

Physique Nucléaire : quelques enjeux et thématiques

Isabelle Deloncle, CSNSM

Ecole de la physique au détecteur
Fréjus Novembre 2008

Plan des cours:

I Approche “Théorique” de la physique nucléaire

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

Premier chapitre :

Aspects classiques

Deuxième chapitre :

Aspects quantiques

II Approche expérimentale des noyaux loin de la stabilité

Troisième chapitre :

Expériences : créer des noyaux loin des zones normalement
peuplées

Quatrième chapitre :

Synthèse des noyaux exotiques: installations et détecteurs “IN2P3”

Dernier chapitre :

Un exemple de mesure: mesures de masse

Si vous voulez lire sur ces sujets :

Physique subatomique : Noyaux et Particules de L. Valentin

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

Wikipédia en long en large et en travers

Ordres de grandeur

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

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

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

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

taille noyau en fm :

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

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

\Rightarrow masse atome \sim masse noyau

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

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

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

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

vitesse nucléon/c $\sim 21 \%$

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

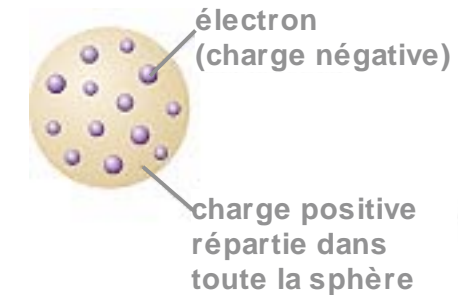
$T_{1/2}(\text{proton})$ stable $> 10^{30}$ ans, $T_{1/2}(\text{neutron}) \sim 15 \text{ min}$

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

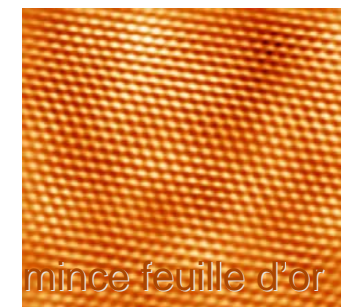
modèle => expérience

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

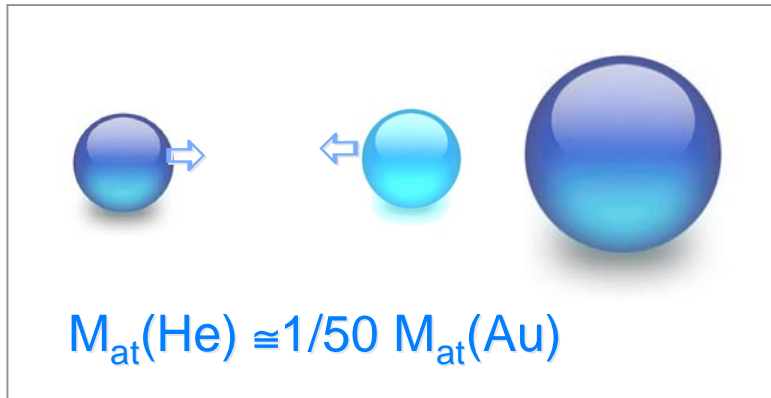
Le modèle précédent était celui la boule de billard, version de Dalton (1803) du concept antique de l'in sécable: a - tomos



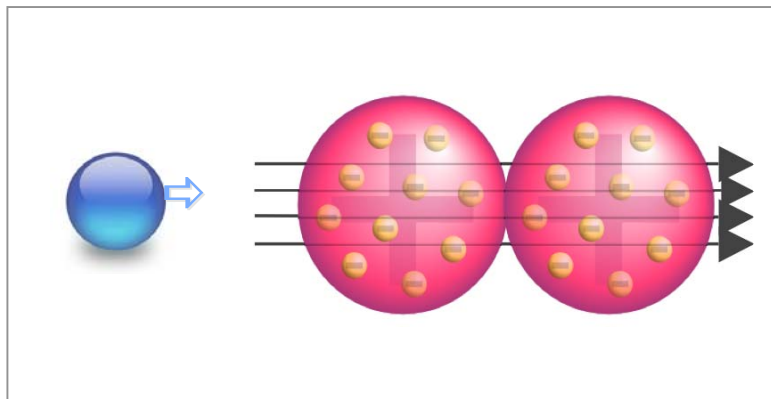
Pour faire l'expérience ils disposent de :
projectiles légers et chargés : particules α
émises par sources radioactives (Ra, Po), il a
montré que $\alpha + 2$ électrons = atome d'He (1908)
1 cible d'atomes lourds neutres : une mince
feuille d'**Or** (6μ , ~200 couches d'atomes)



Résultats attendus



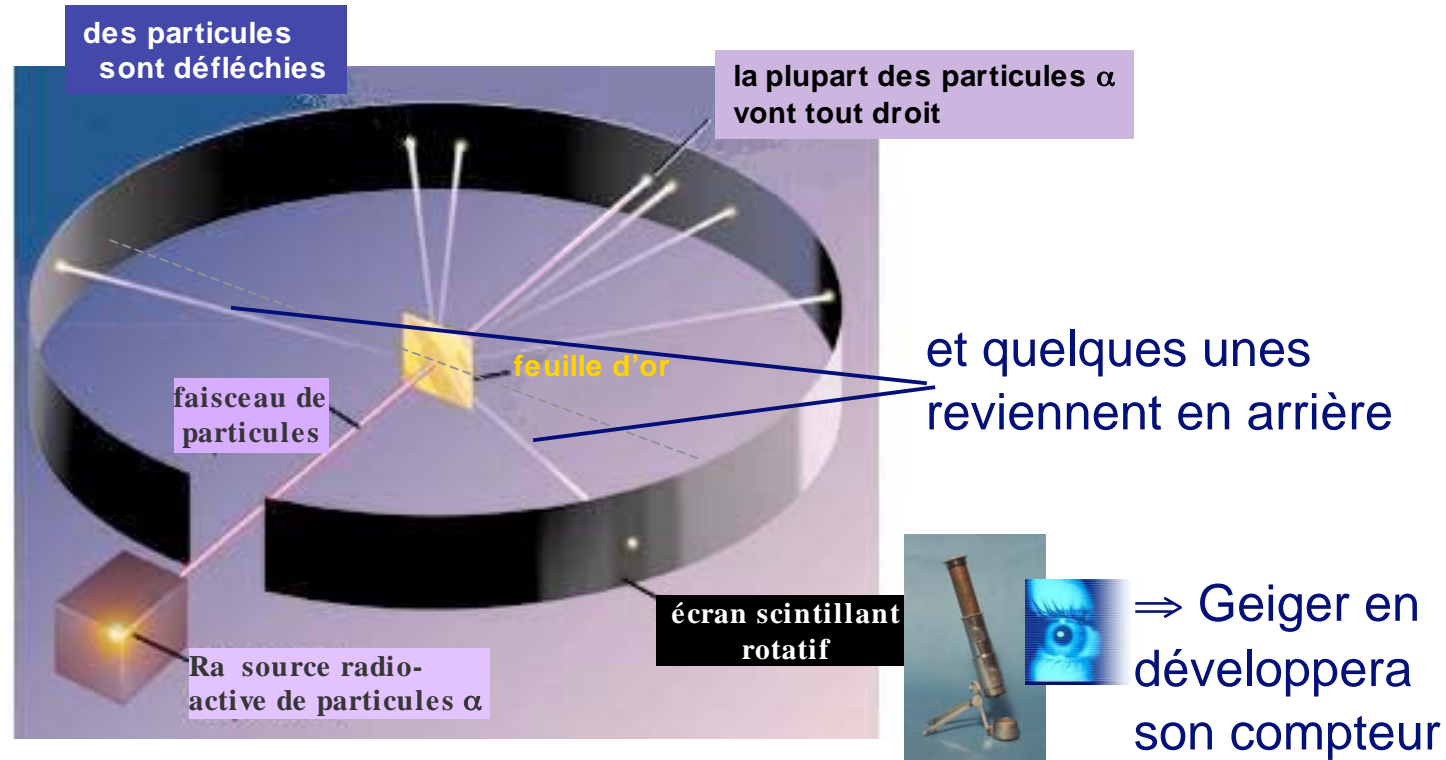
hyp 1: atome \equiv sphère dure neutre
 N_{T1} alphas Traversent entre atomes
 $\Rightarrow N_{D1}$ alphas sont rétro-Diffusés (sur atomes)
 $N_{D1} (N_{T1}) \propto$ probabilité rencontrer (ou pas) 1 atome
 \propto taille atome (ou sa section $\perp \equiv$ section efficace σ)



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

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

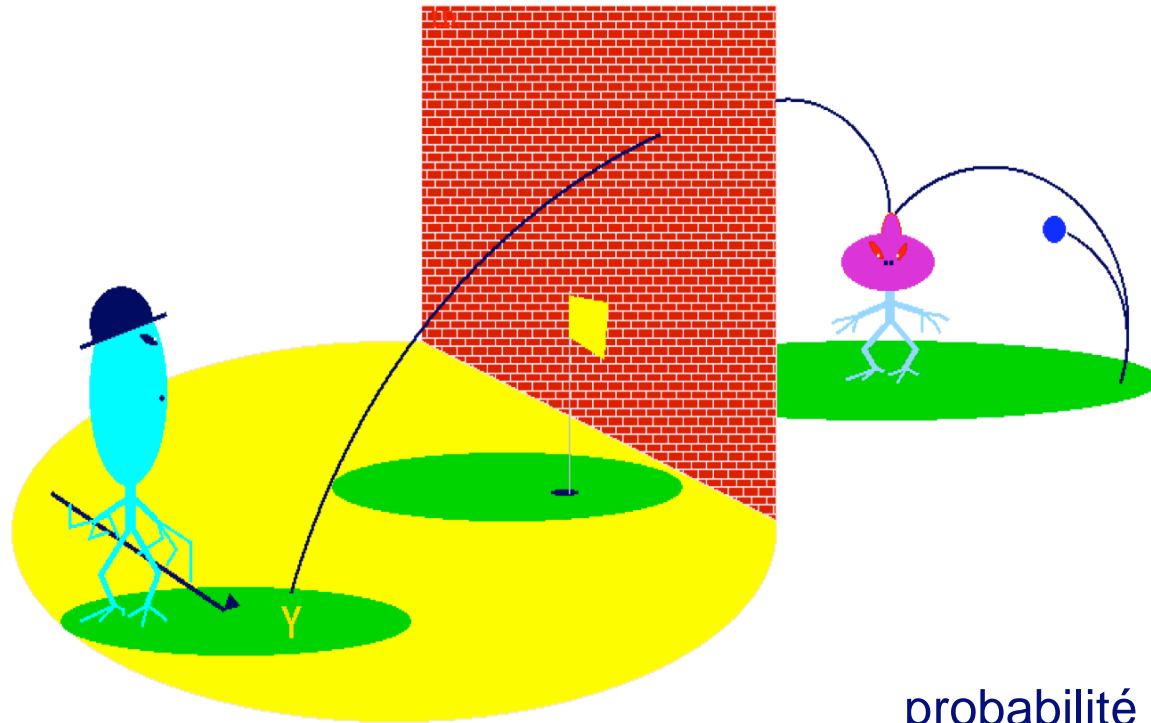
expérience



⇒ ne correspond à aucun des 2 modèles:

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

expérience \Rightarrow modèle



\Rightarrow la matière est essentiellement VIDE !
structure lacunaire

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

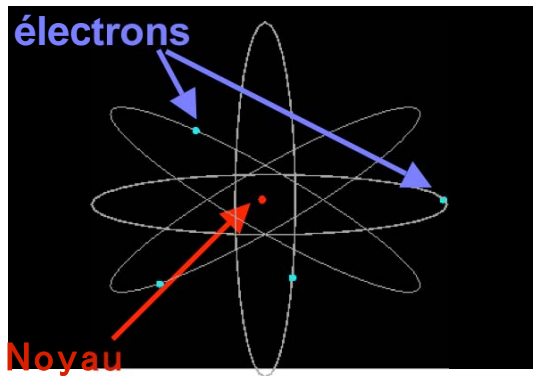
probabilité des rencontres α -noyau
de l'ordre de $\sim 10^{-28} \text{ m}^2$ (barn b)
 \Rightarrow rayon noyau ~ 10 fermi (10^{-14}m)

\Rightarrow nouveau modèle (classique, 1911)

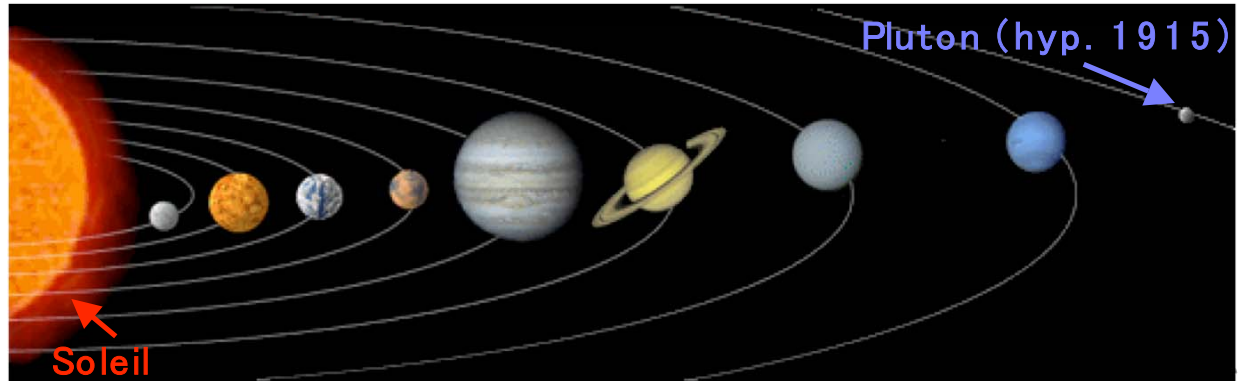
modèle planétaire : l'atome \cong le système solaire

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 ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$)

et tout aussi (voire plus) “central” :

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

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

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

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

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

Pourquoi un modèle classique ?

les quantas en sont à leur début

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

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

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

(1911 : Rutherford modèle planétaire)

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

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

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

\Rightarrow caractère ondulatoire non négligeable qd 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

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

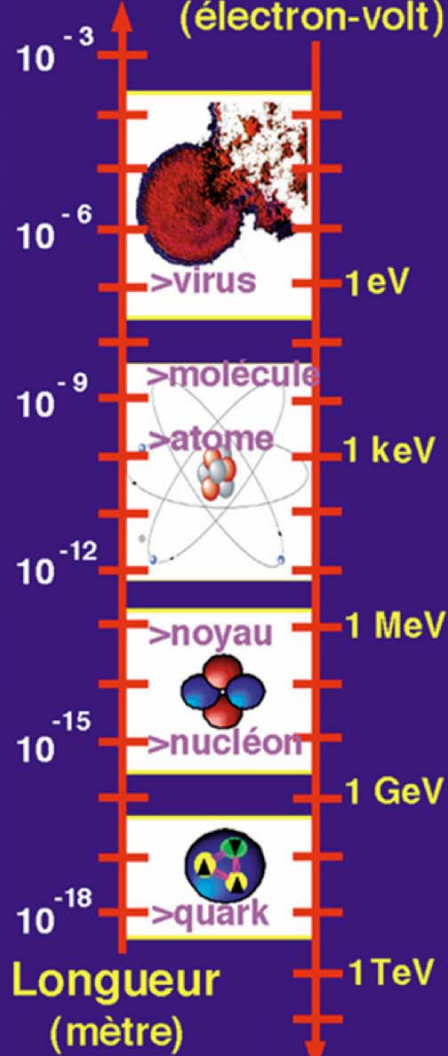


Microscope électronique



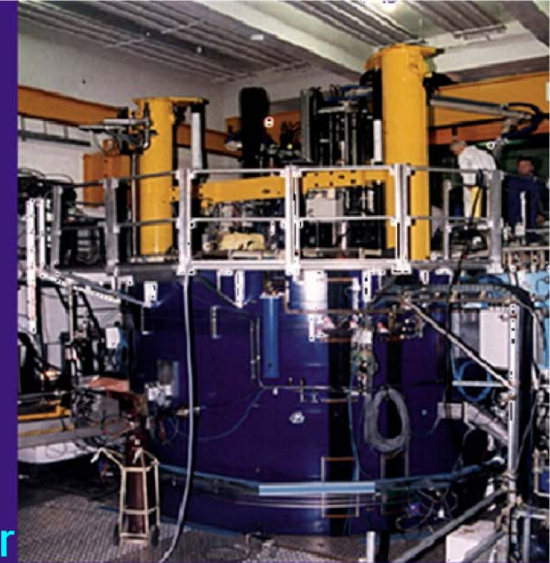
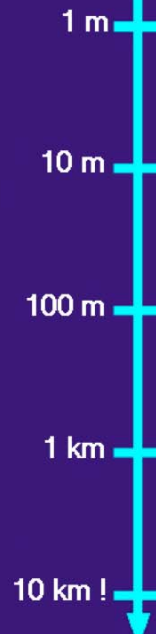
Accélérateur linéaire (SLAC)

Energie
(électron-volt)



Mais:

Taille
accélérateur



Cyclotron (AGOR)



Synchrotron (LHC)

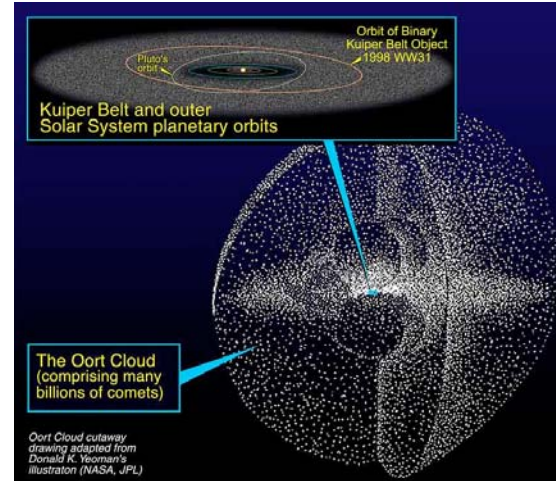
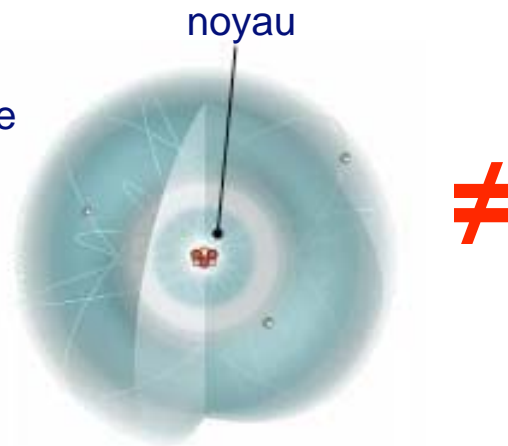
Pourquoi un modèle classique ?

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

1926 : Schroedinger particule décrite par une fonction d'onde

1927 : Heisenberg comportement insaisissable des particules

nuage électronique
autour noyau



nuage de Oort
(comètes)
autour
système solaire

Image moderne d'une ionisation:

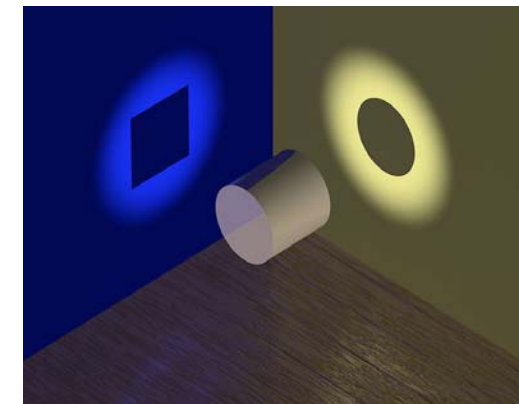
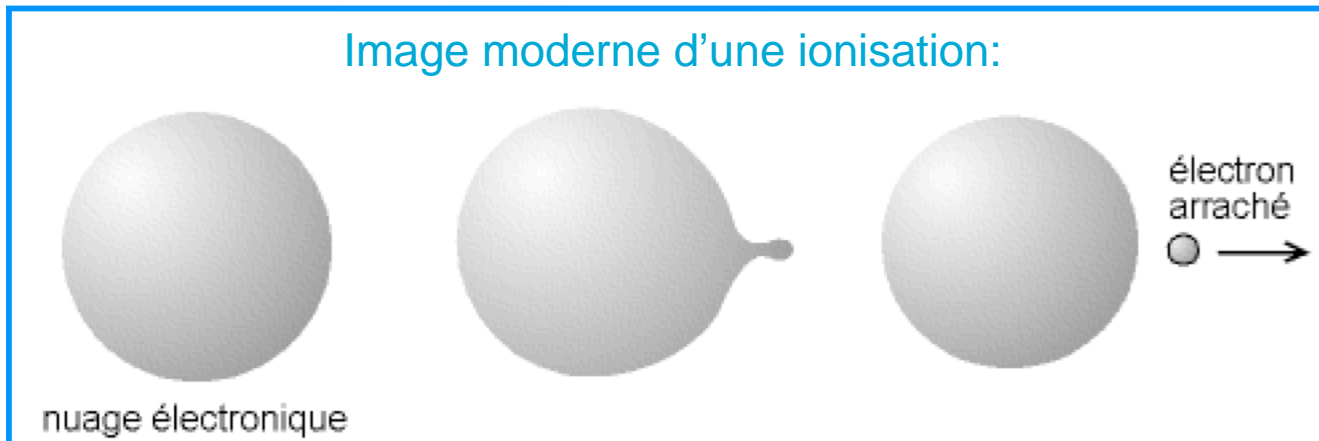


Image de dualité classique

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

nuage électronique: http://www.cea.fr/jeunes/themes/la_radioactivite/l_atome,

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

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

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

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



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

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

1935 : Yukawa, première théorie de l'interaction forte

(1964-70 : quarks, théorie standard QCD)

source images: huile, fouet et œufs : http://www.meilleurduchef.com/cgi/mdc/l/fr/boutique/produits/sim-bouteille_pili.html

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

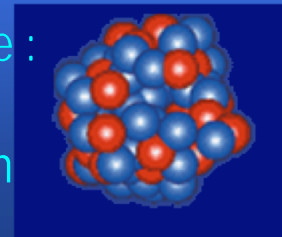
1930 : Pauli hyp pour $\beta^- \Rightarrow$ particule indétectable le neutrino de masse nulle

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

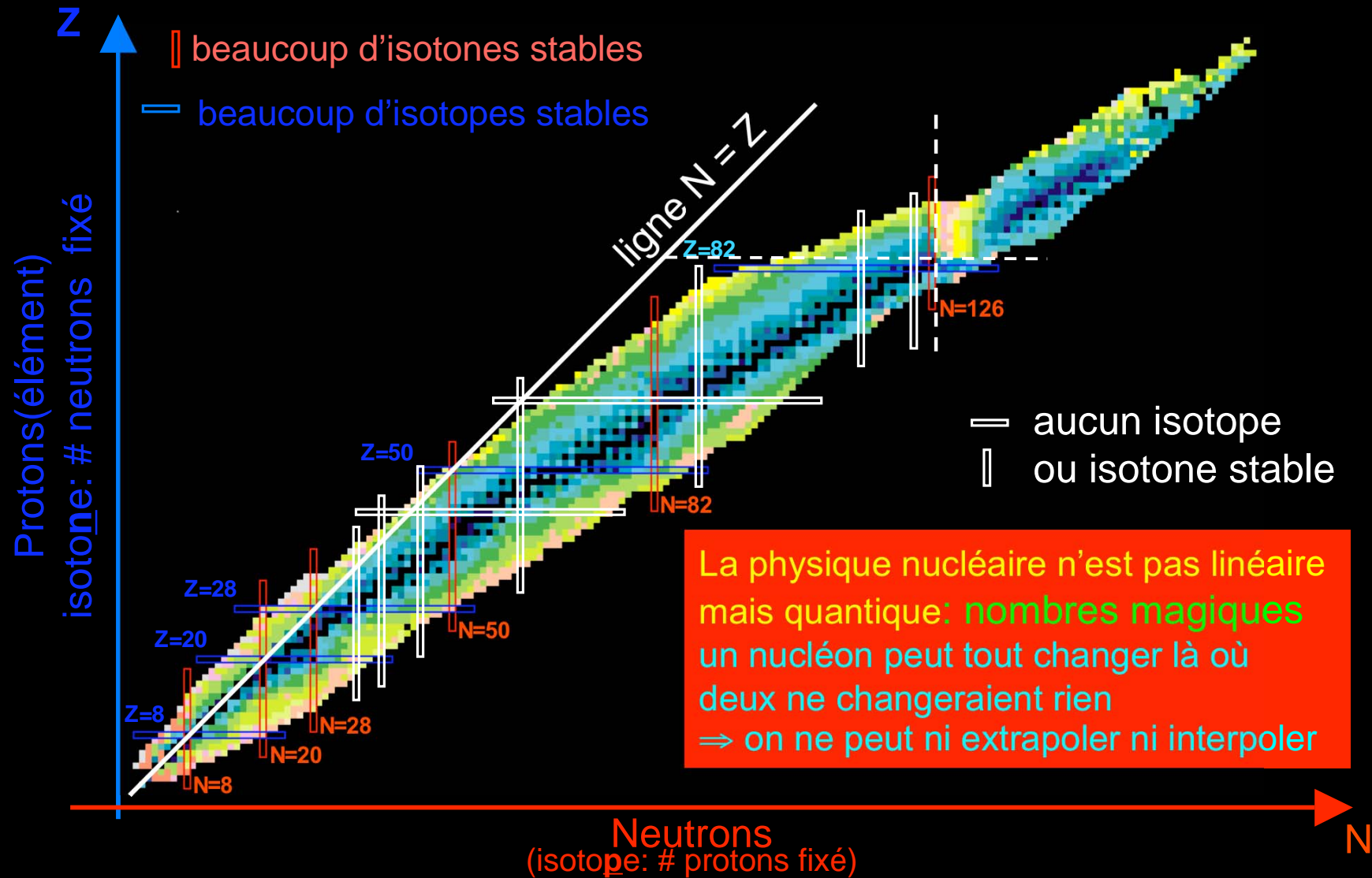
⇒ il faut les CREER

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

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

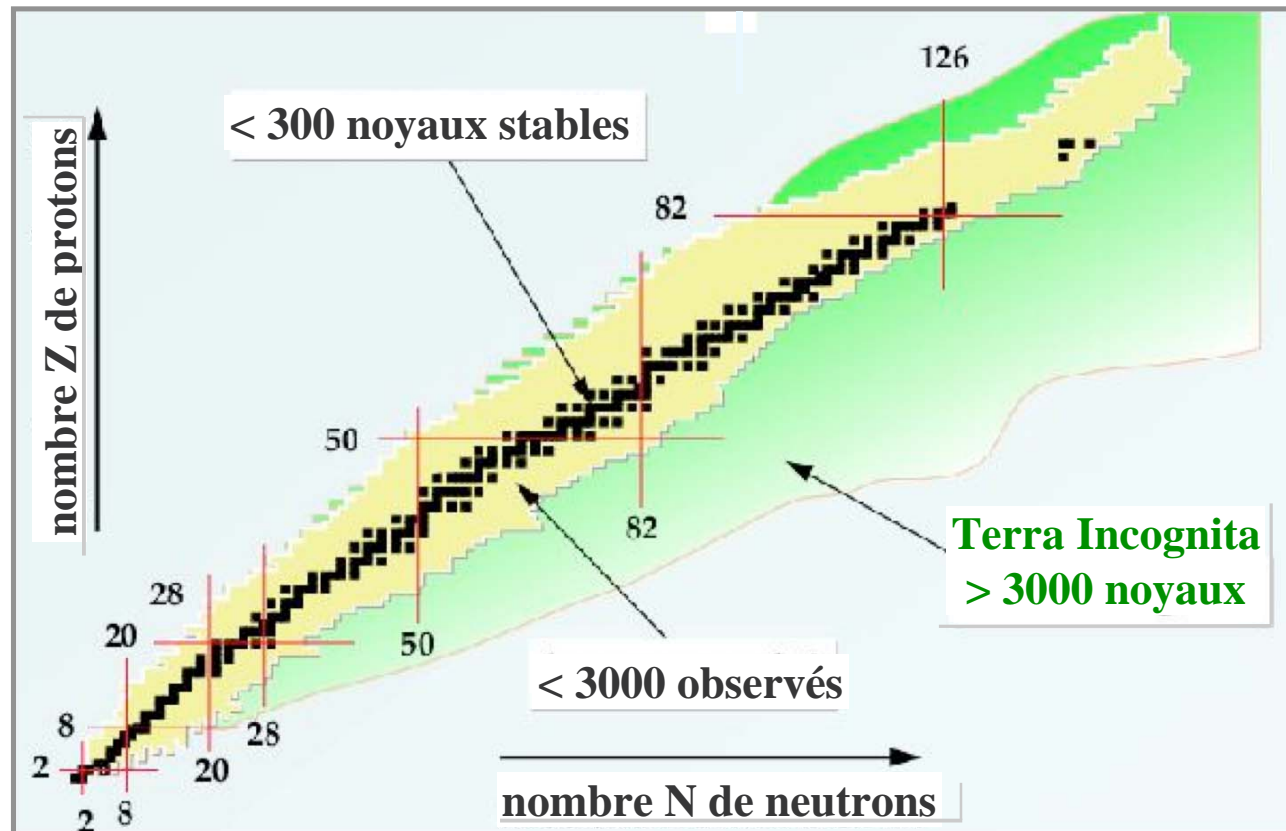
Nécessité des expériences
sur accélérateurs....

Carte des ~3000 noyaux connus



⇒ il faut créer et étudier chaque noyau!

...Vaste Programme !



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

étudier = caractériser statiquement et dynamiquement un noyau

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

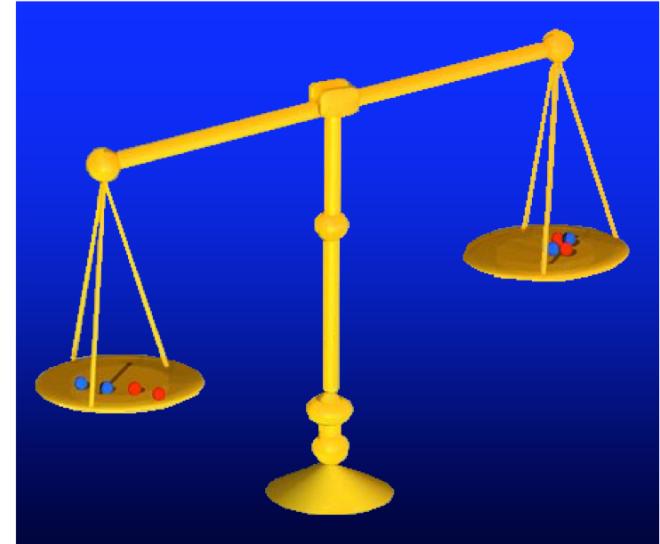
• que se passe-t-il quand on lui fournit de l'énergie (ou excitation)?

⇒ il faut produire chaque noyau en grand nombre

Qu'est-ce que la masse des noyaux ?

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

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



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

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

B non négligeable dans le noyau (max 1%)

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

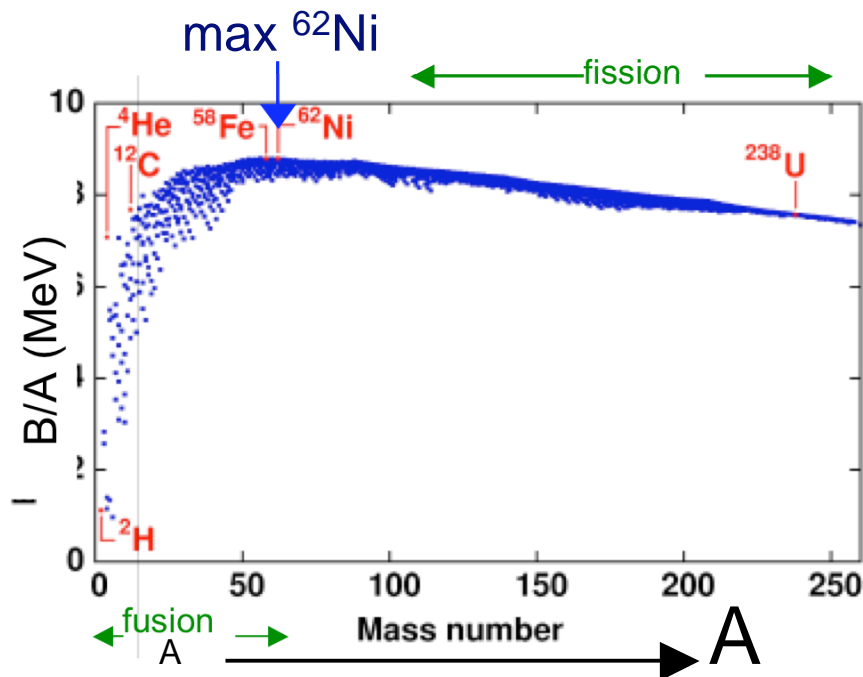
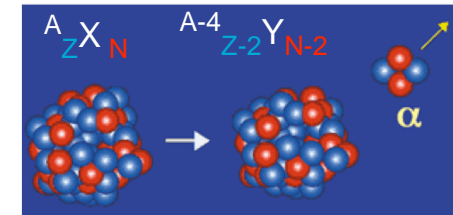
c'est B qui permet les noyaux stables (durée de vie \sim âge de l'univers, ou proton)

Energie de liaison et stabilité

Condition nécessaire d'une décroissance

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

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



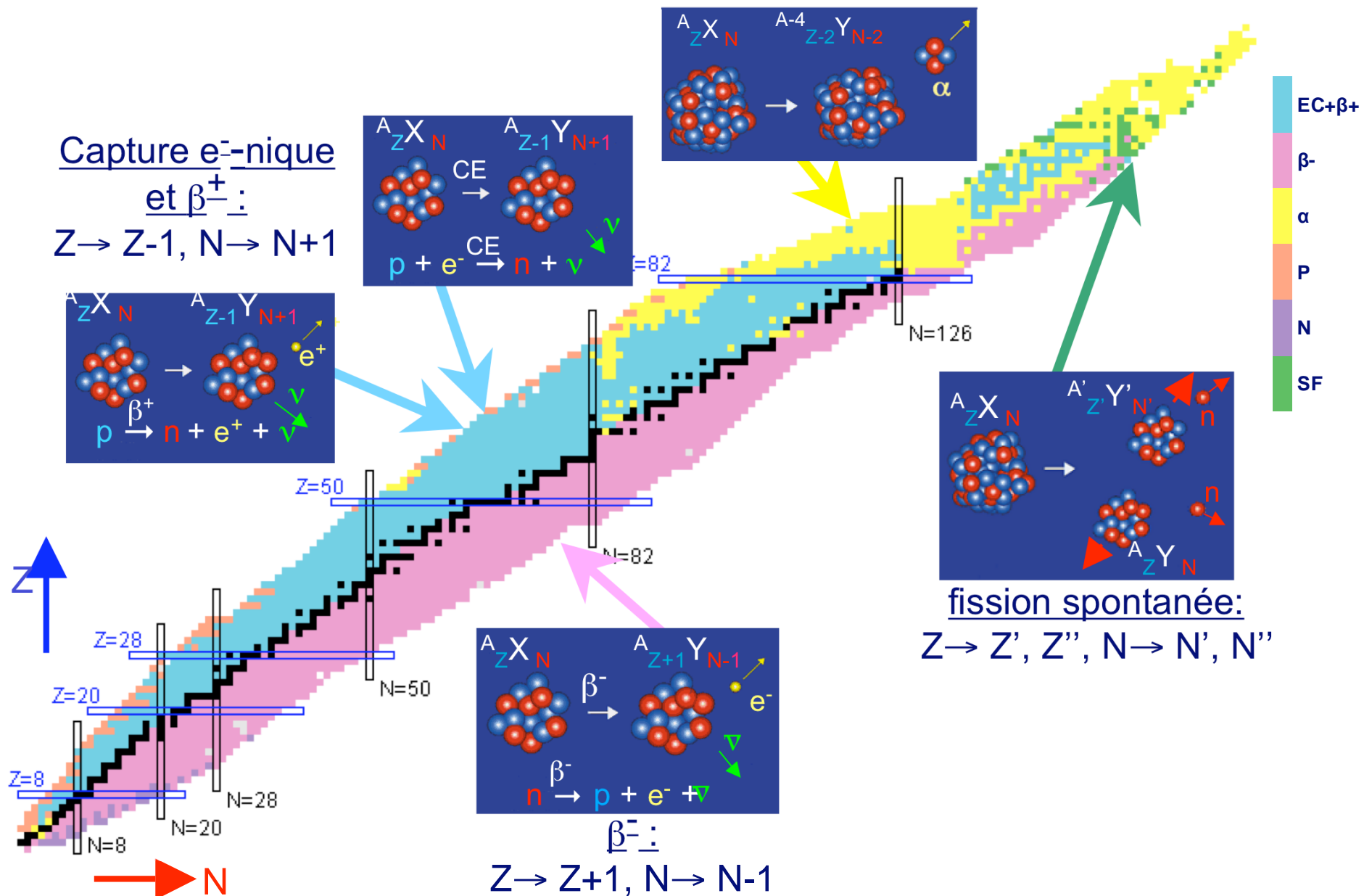
Ex radioactivité α (^4_2He):

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

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

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

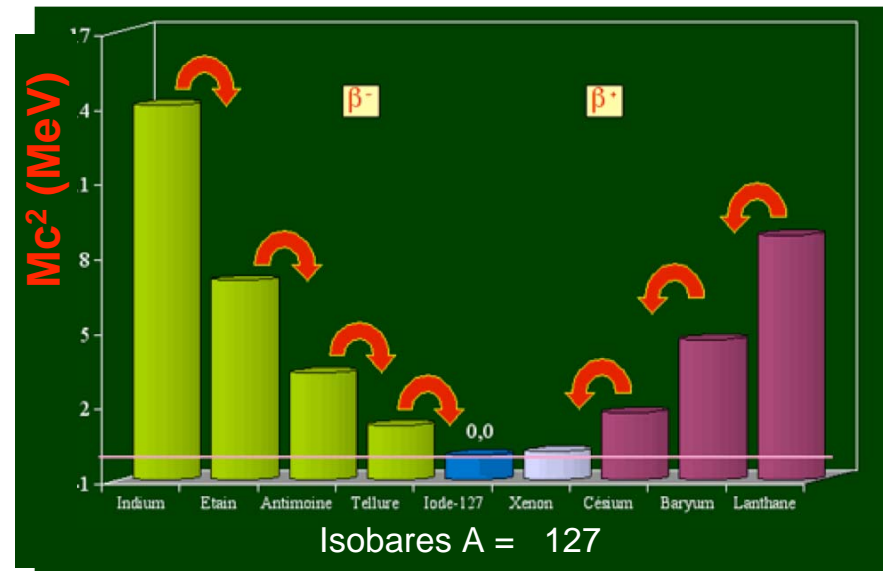
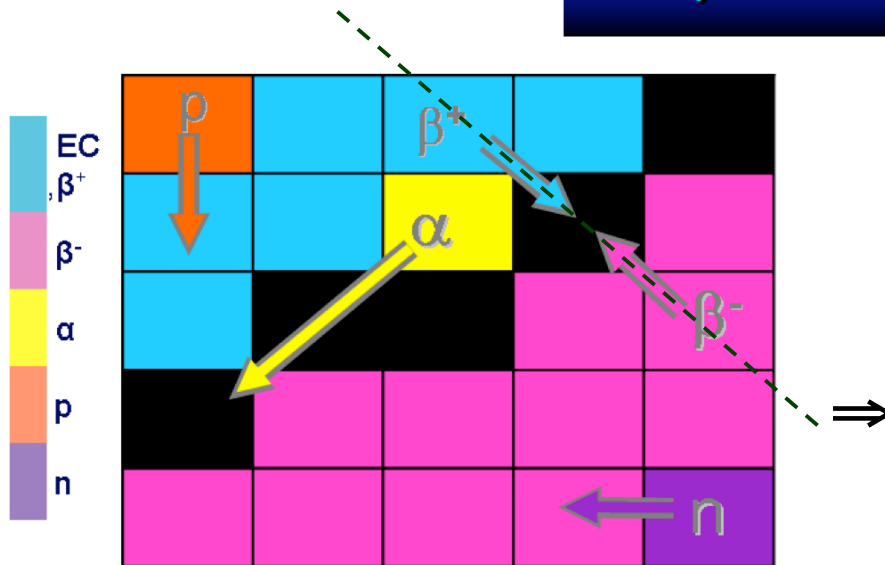
Energie de liaison et stabilité



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

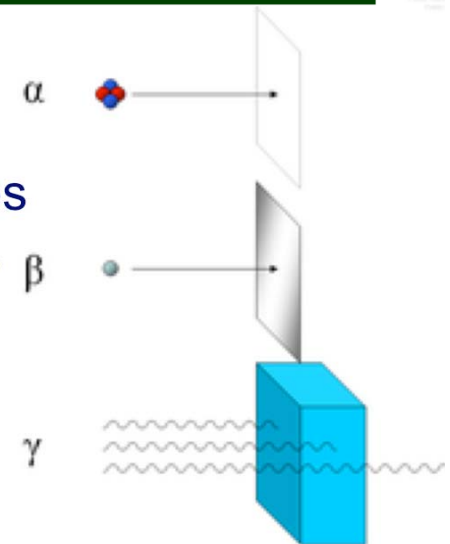
radioactivités à partir de : http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences_robert/basesnuclear.ppt

"Vallée" de stabilité



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

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)

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

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

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

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

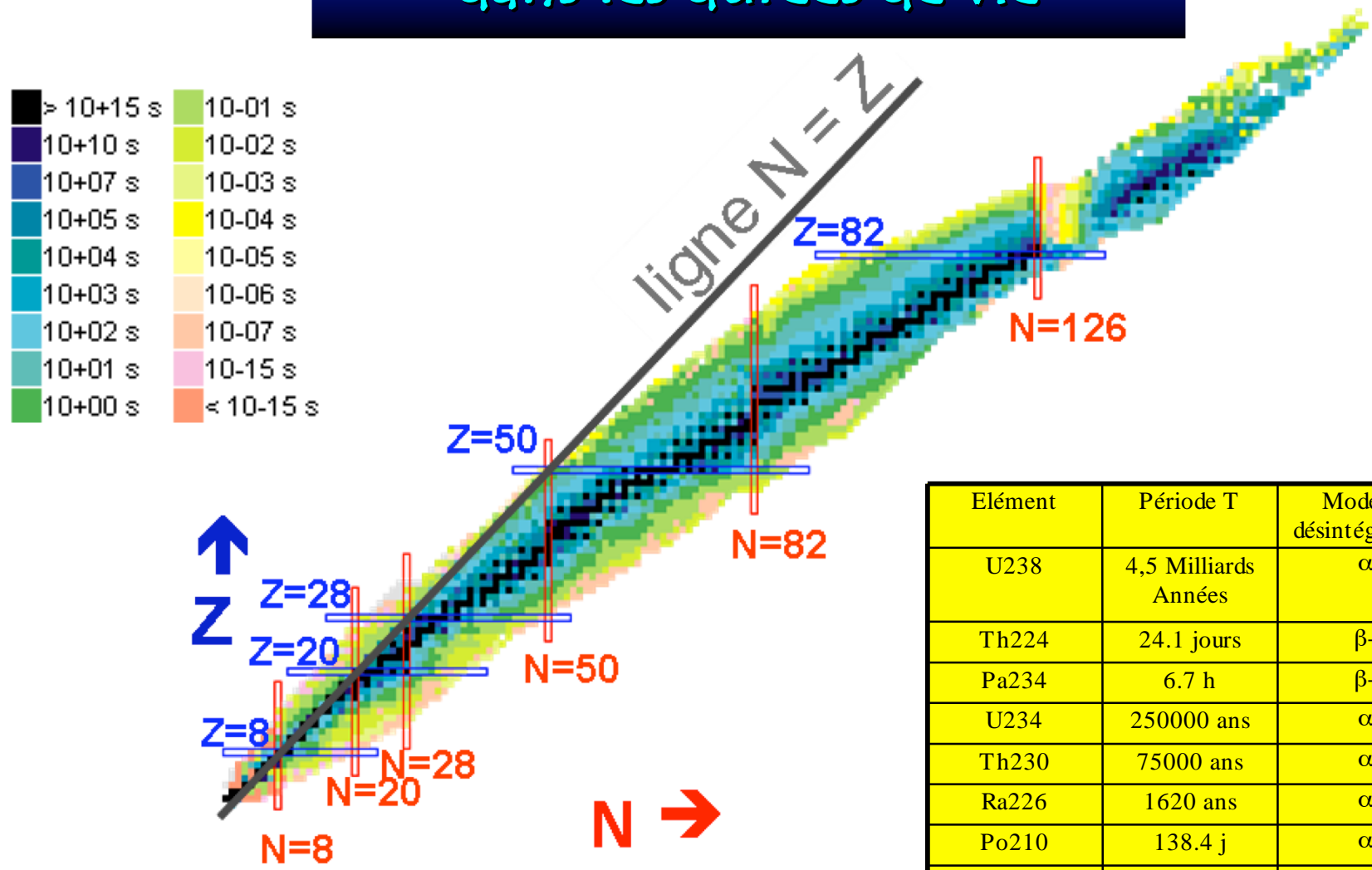
Nombre de désintégrations par unité de temps = $\mathcal{A}(t)$ l'activité = $\lambda N(t)$

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

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

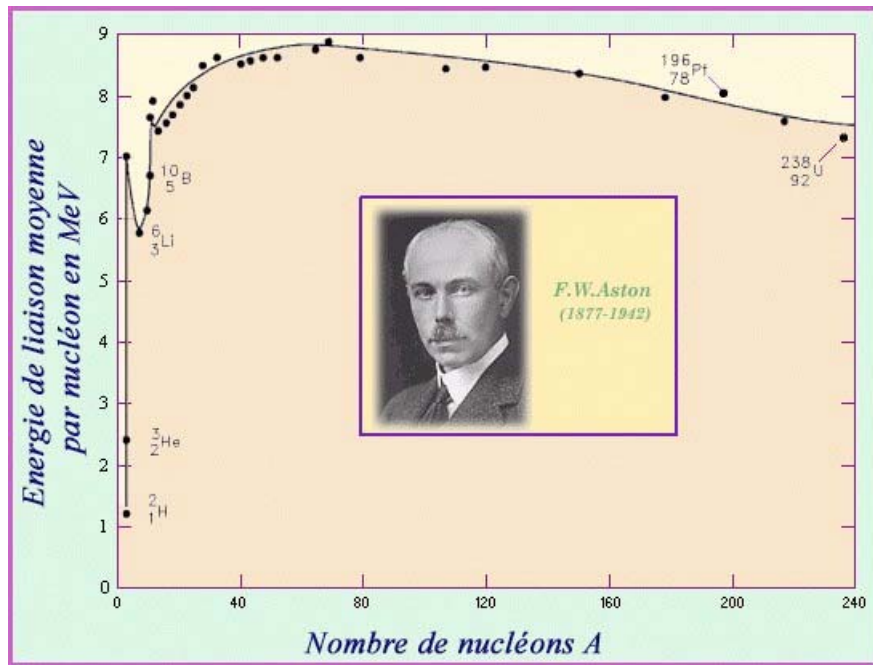


Elément	Période T	Mode de désintégration
U238	4,5 Milliards Années	α
Th224	24.1 jours	β^-
Pa234	6.7 h	β^-
U234	250000 ans	α
Th230	75000 ans	α
Ra226	1620 ans	α
Po210	138.4 j	α
Tl206	4.2 min	β^-

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))

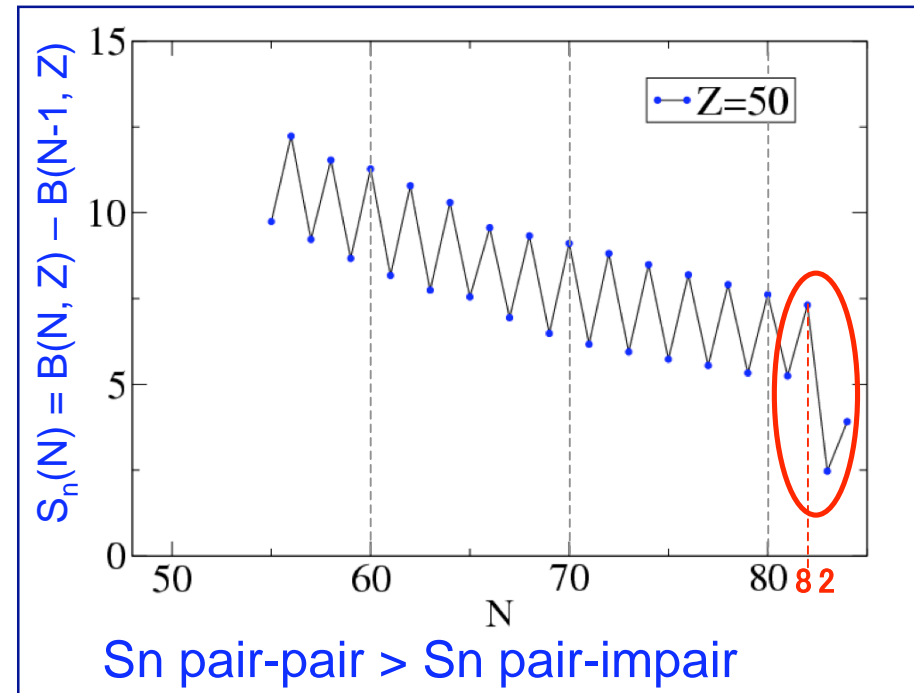
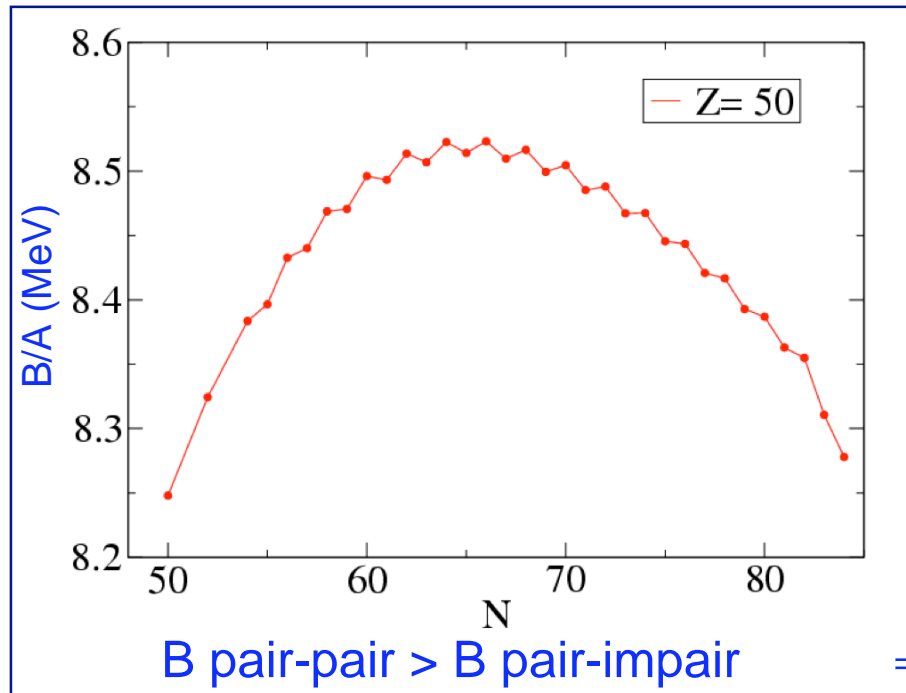
Rq : si $|N-Z|$ trop grand $B \leq 0$: émission spontanée proton, neutron

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):

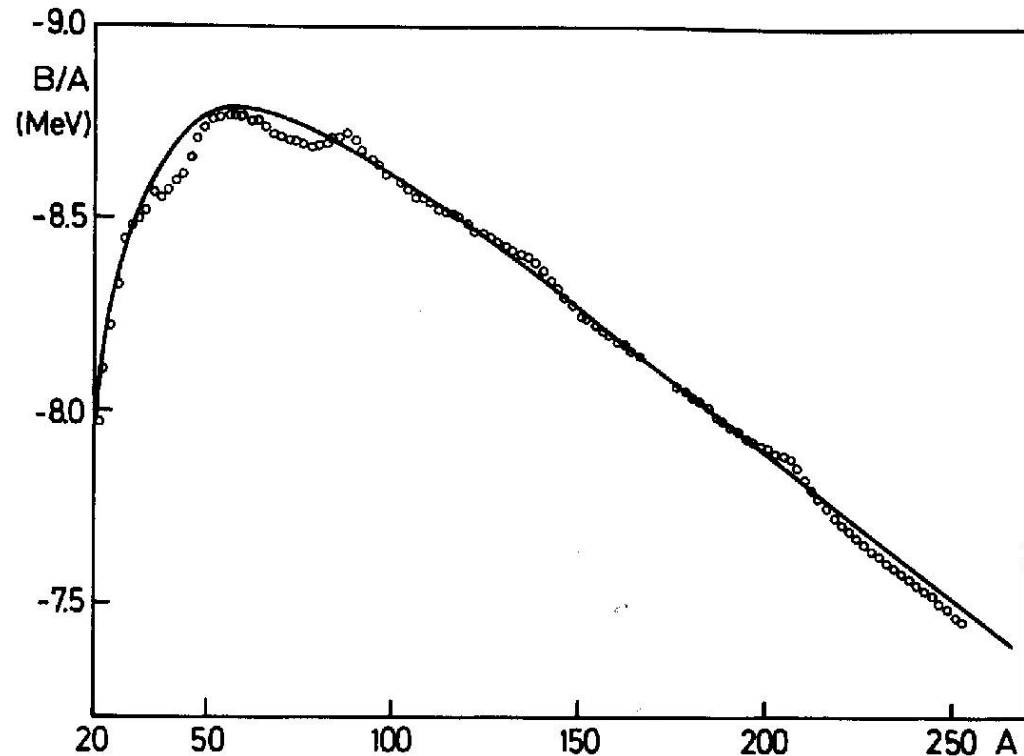


S_n est l'énergie de séparation d'1 neutron, car nécessaire pour libérer le "dernier" neutron

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 :

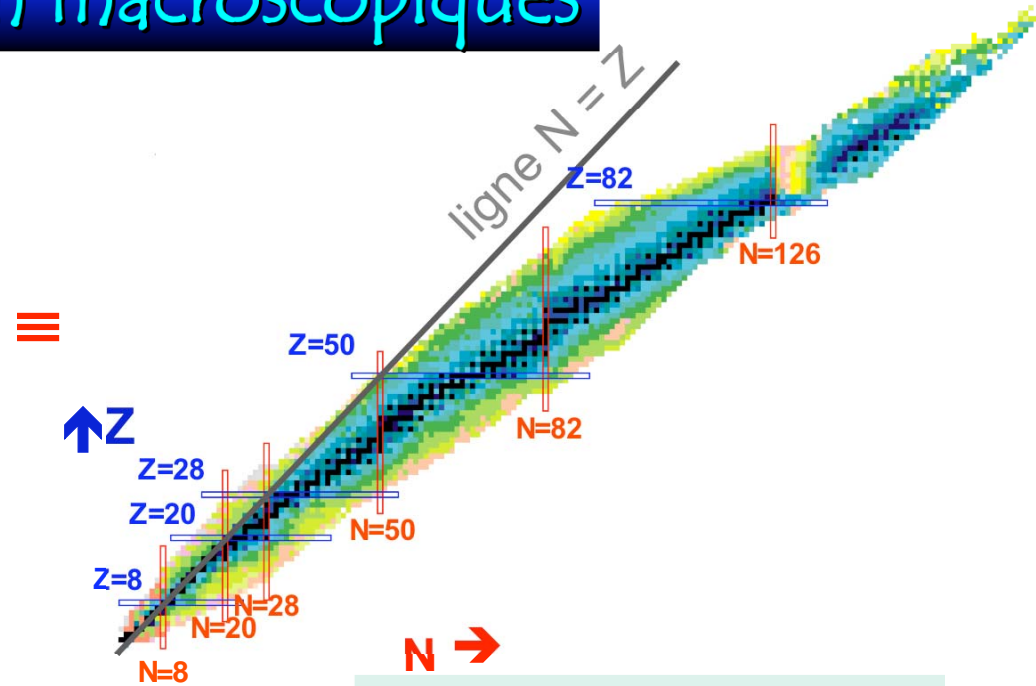
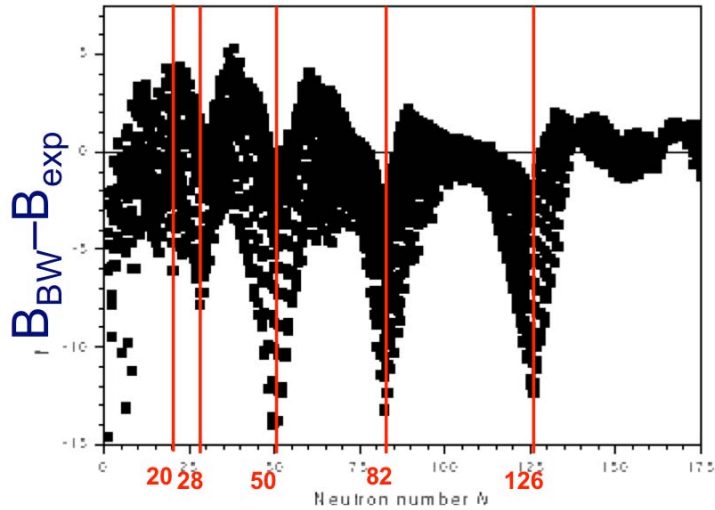


- valeurs expérimentales
- courbe calculée avec formule goutte liquide

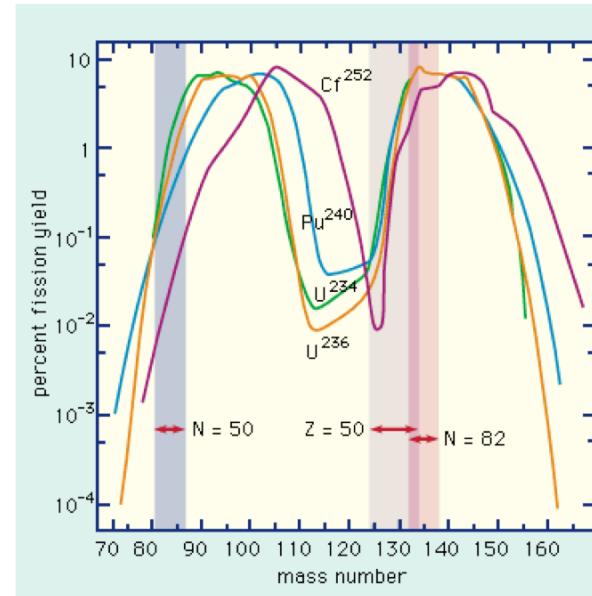
Figure 1.2. Experimental values of B/A for β -stable odd- $A(o)$ nuclei and the calculated curve using a mass formula similar to Eq. (1.4). (From [Ho 75].)

en plus donne explication de la fission
MAIS...

Effets non macroscopiques



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



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

Pourquoi une durée de vie ?

Condition nécessaire d'une décroissance

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

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



Si énergétiquement décroissance possible pourquoi pas immédiatement ????

Pour 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

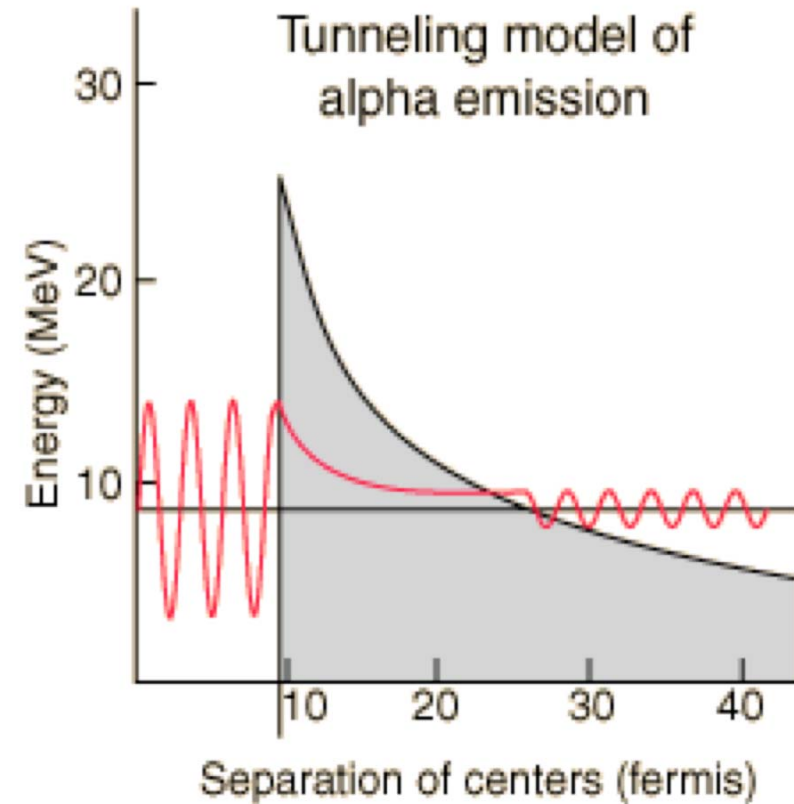
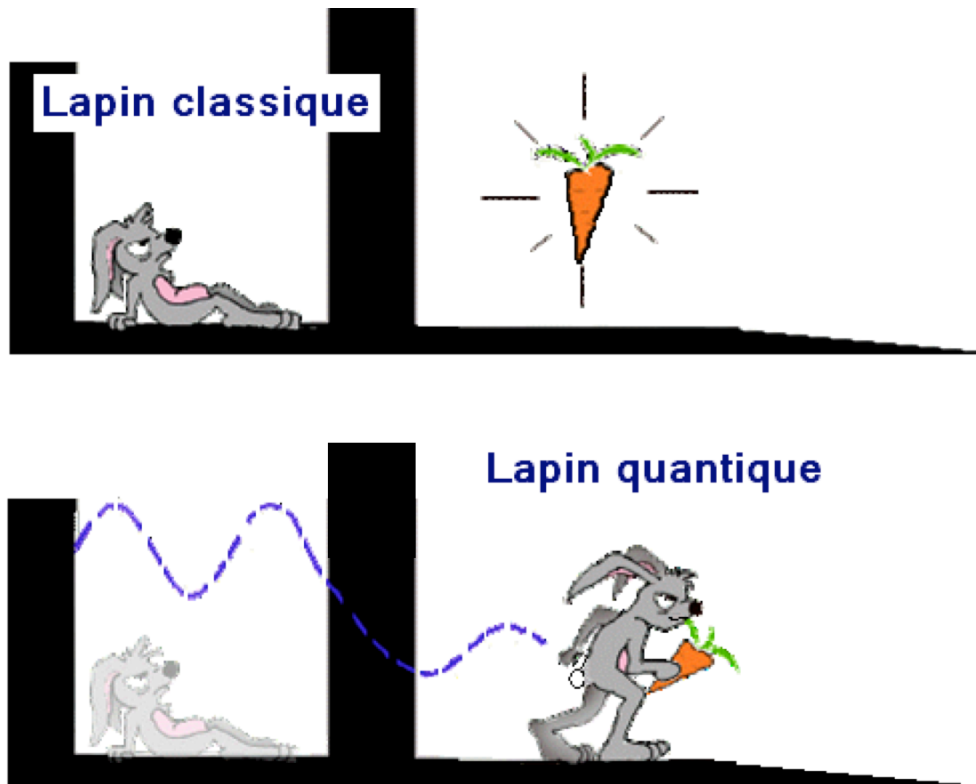
\Leftrightarrow émission α spontanée impossible

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 :

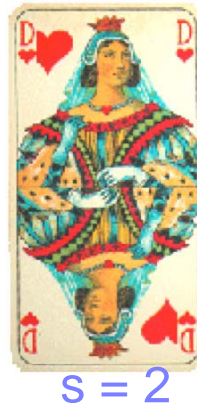
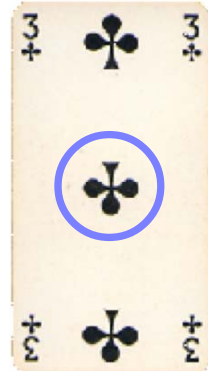
spin : propriété quantique intrinsèque, permet de caractériser le comportement, la symétrie d'une particule sous l'effet de rotations.

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



\neq
 \curvearrowright
 180°



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

si **nucléons** comme **électrons**

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

Un modèle de gaz ????

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

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

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

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

Approximation du potentiel moyen

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

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

C'est un des aspects du travail du physicien :

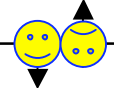
En cas de problème difficile, impossible à résoudre en l'état \Rightarrow utiliser et justifier des approximations

Application du gaz de Fermi au noyau

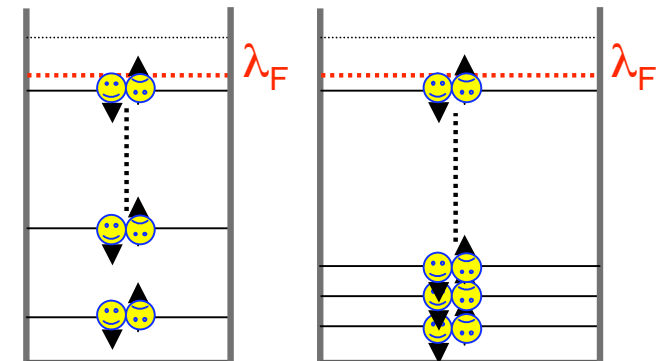
approximation :

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

Approximation Boîte carrée murs ∞ :

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

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

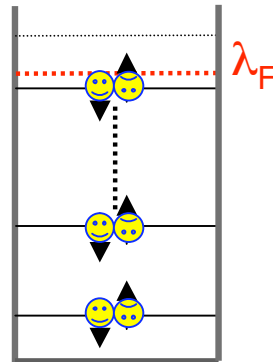


⇒ Si $A \nearrow$, volume noyau (de la boîte) \nearrow ,
mais profondeur $c^{ste} \Rightarrow$ les états se resserrent
forme puits change \Leftrightarrow espacement niveaux change

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

Niveaux dans puits de potentiel

Il s'agit d'une représentation...



≠

dont le sens n'est pas



mais plutôt ...



hauteur note = fréquence onde sonore

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

Au crédit du modèle de gaz de Fermi

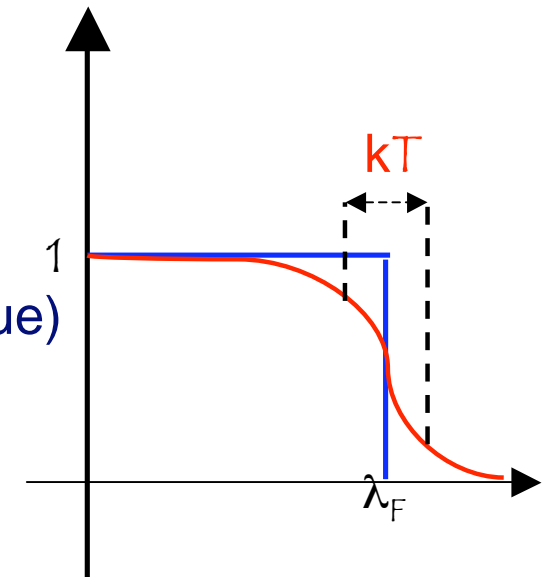
- permet de justifier et de retrouver les paramètres du modèle de goutte liquide
- donne des résultats en accord avec expérience:
(profondeur du puits \Leftrightarrow densité cste \Leftrightarrow saturation)
- plus satisfaisant intellectuellement

Mais

Chgt dans la notion de température

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

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



Toujours pas de nombres magiques:

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

potentiel plus adapté

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

(oscillations) vibrations de pulsation 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

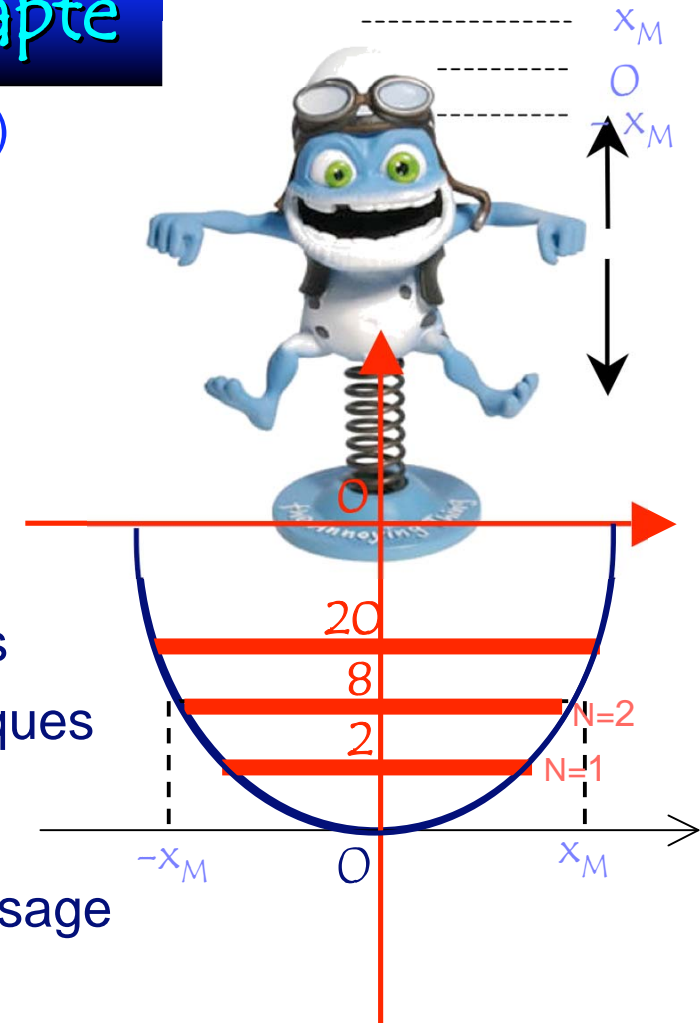
\Leftrightarrow « recouvre » beaucoup de sous-états quantiques
entre couches des espaces \Leftrightarrow nombres

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 ?

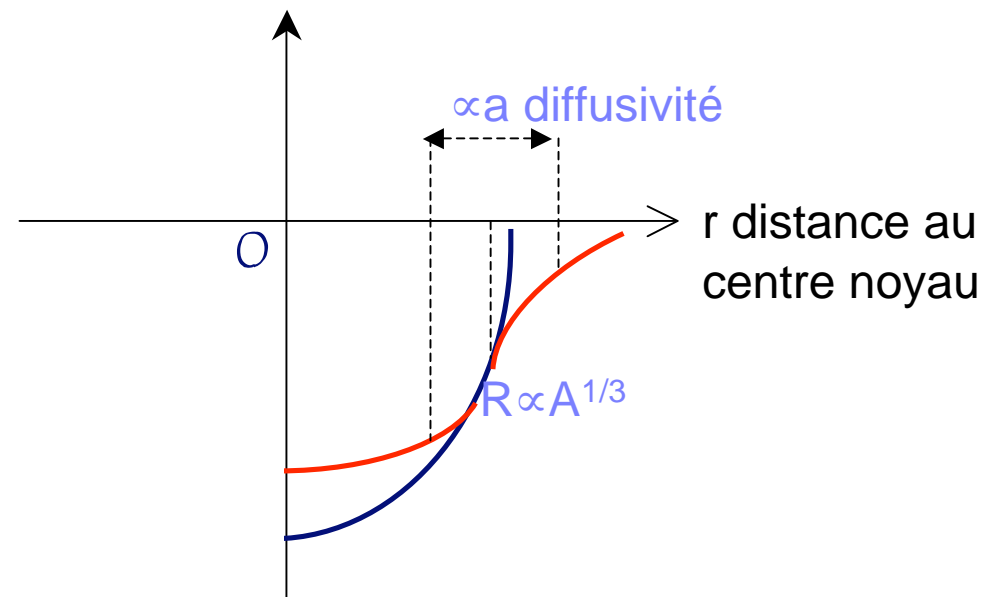
deux raisons pour cela : surface diffuse à T non nulle, rôle boîte dans
espacement niveaux



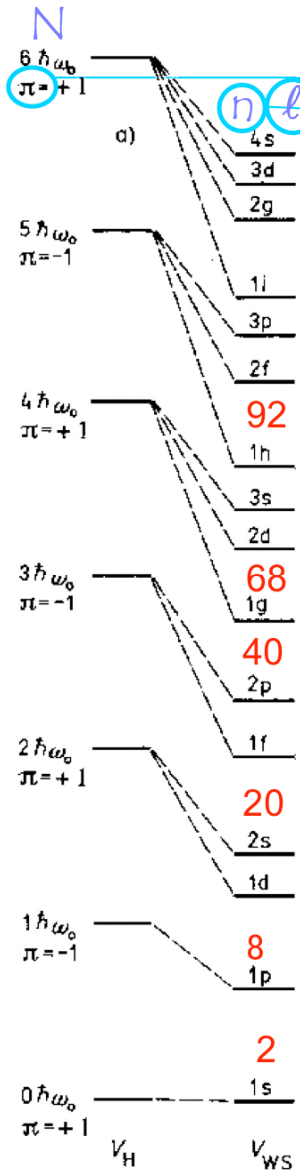
Travaillons la forme du puits

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

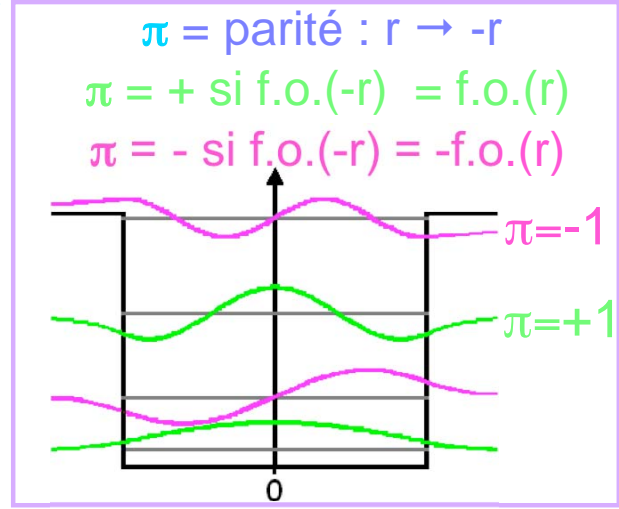
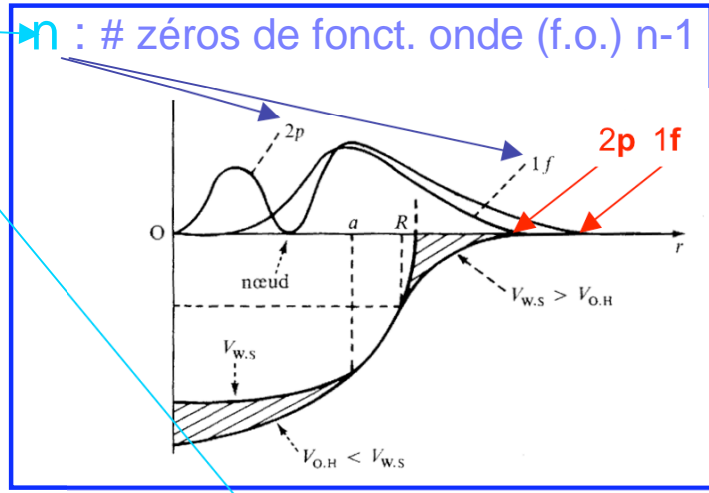
Woods-Saxon:
bord diffus mais même volume



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
 ➤ ~ même schéma si Osc. Harm sph. - $D\ell^2$ (Nilsson)

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

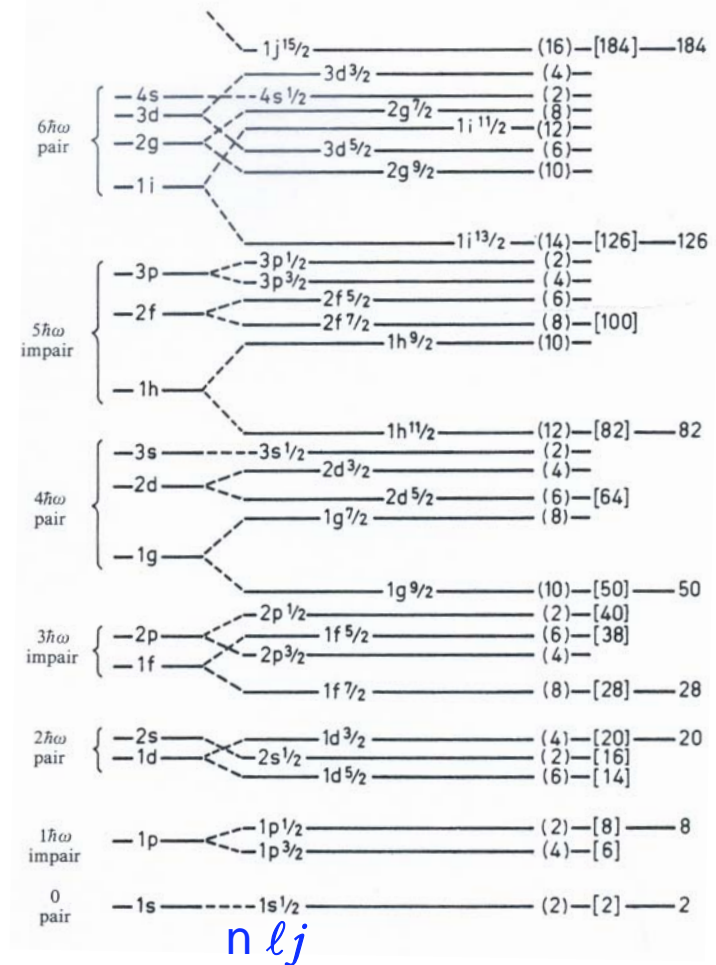
Potentiel spin-orbite

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

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

Résultat : **CA Y EST !**

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



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

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

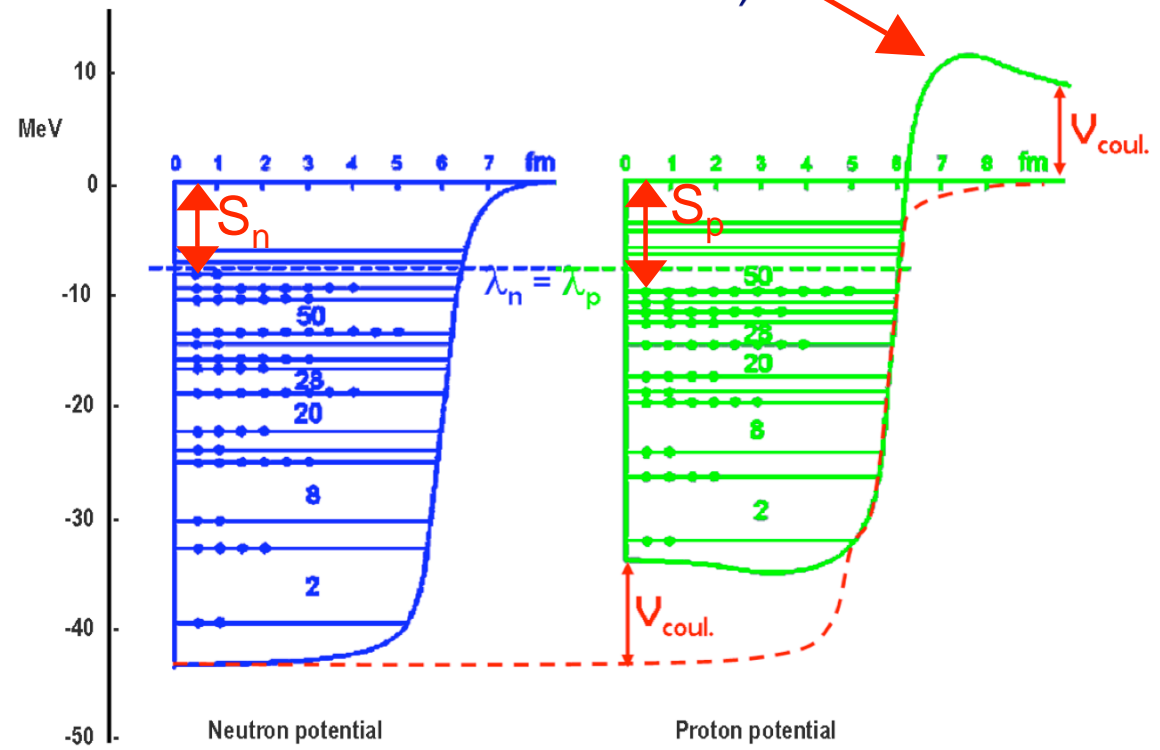
d'après allocution Nobel M. Goppert-Mayer http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1963/mayer-lecture.pdf

I. Deloncle, Fréjus 2008

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.

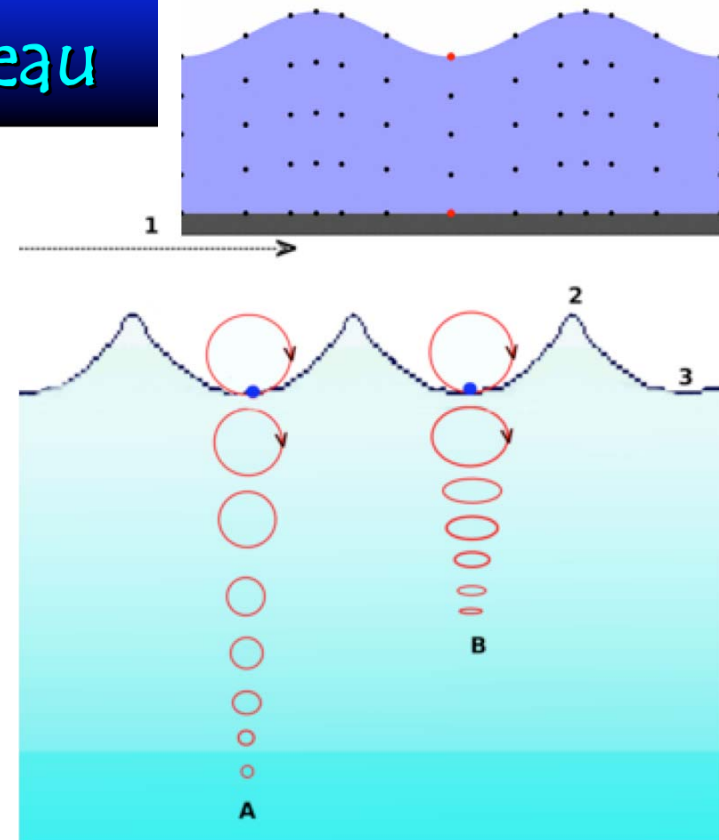


The ^{116}Sn neutron and proton shell structure in the potential well. (According to S. G. Nilsson)

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

Quantique:

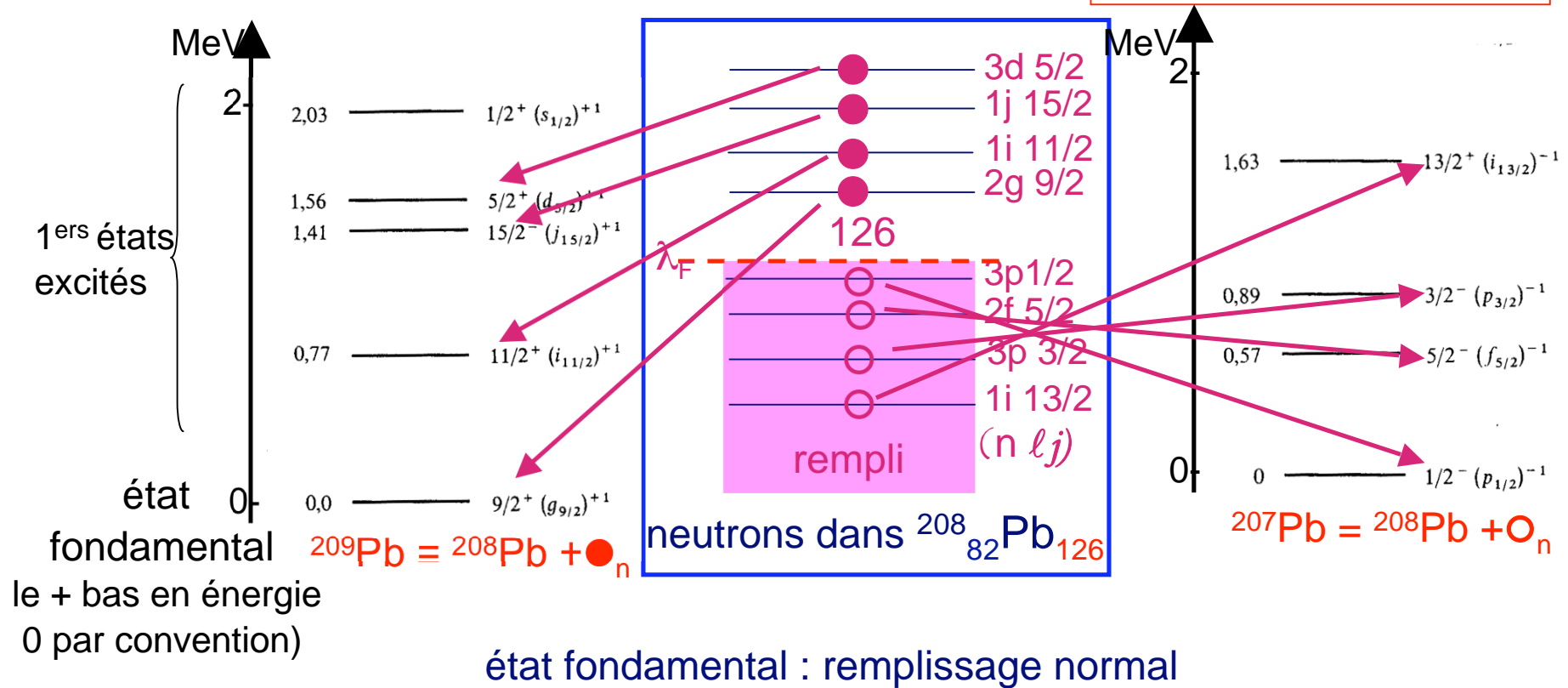
Σ mvts nucléons dans états individuels dans noyau
⇒ 1 onde \equiv 1 noyau dans 1 état quantique (global)
⇒ Autant de configurations autant d'états...

Schéma de niveaux noyaux sphériques impairs

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

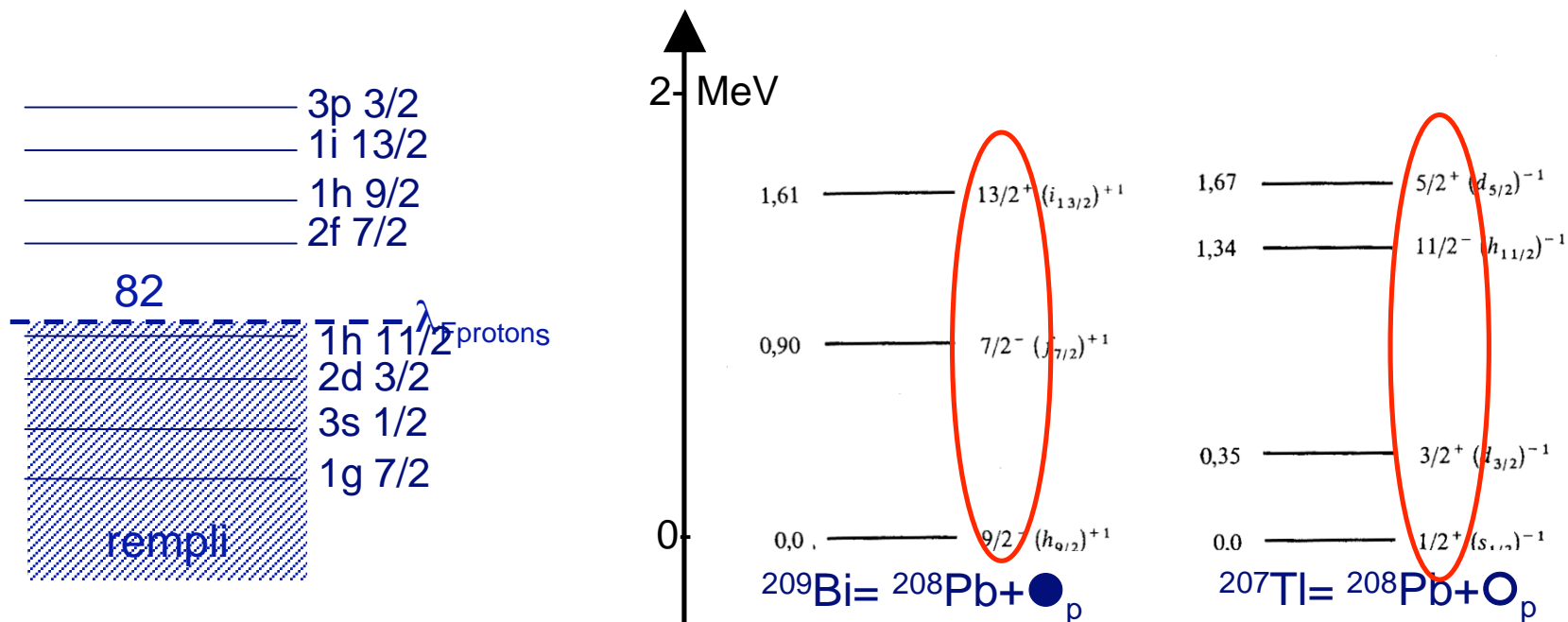
excitation \leftrightarrow
 \uparrow nucléon célibataire
 $j_{\text{nucléon}} = J \text{ noyau}$

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

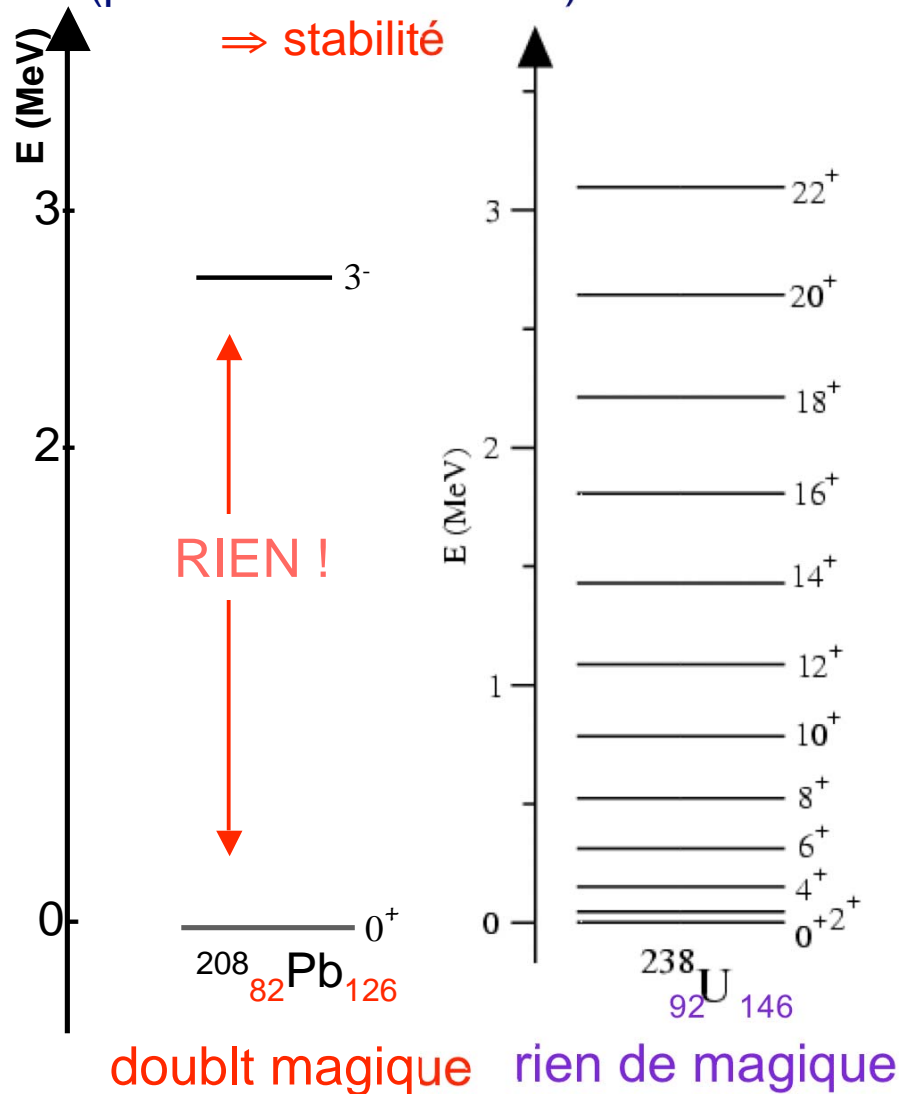


pas le bon ordre !!!!!

Les noyaux magiques , de bons cœur : INERTES !

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

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



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

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

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

Mais noyau_{p-p} = noyau_{p-i} + nucléon
= (noyau_{p-p} + nucléon) + nucléon

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

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

\Rightarrow les nucléons se lient en paires \downarrow

\Leftrightarrow APPARIEMENT (gain de liaison)

Conséquence : 1^{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

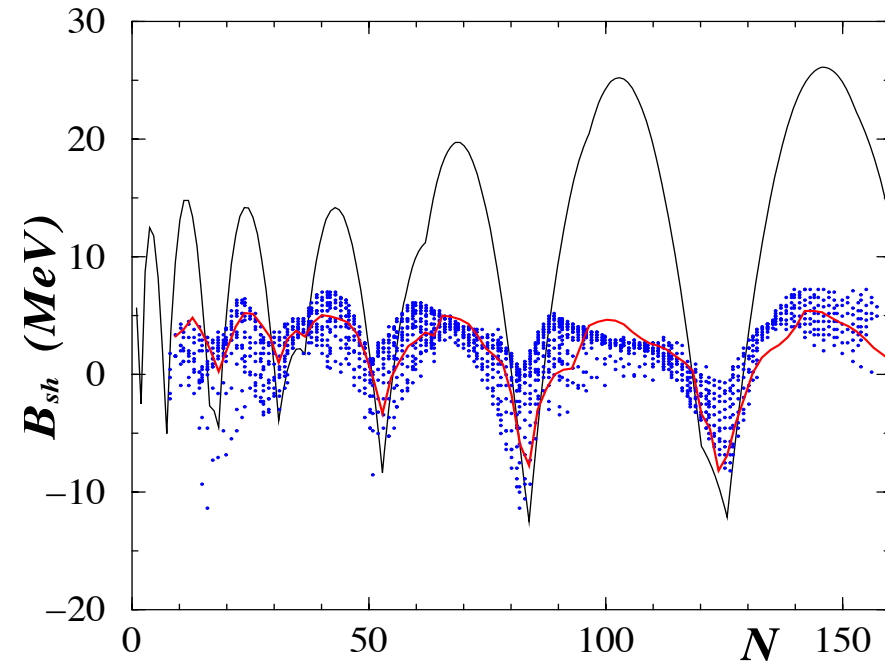
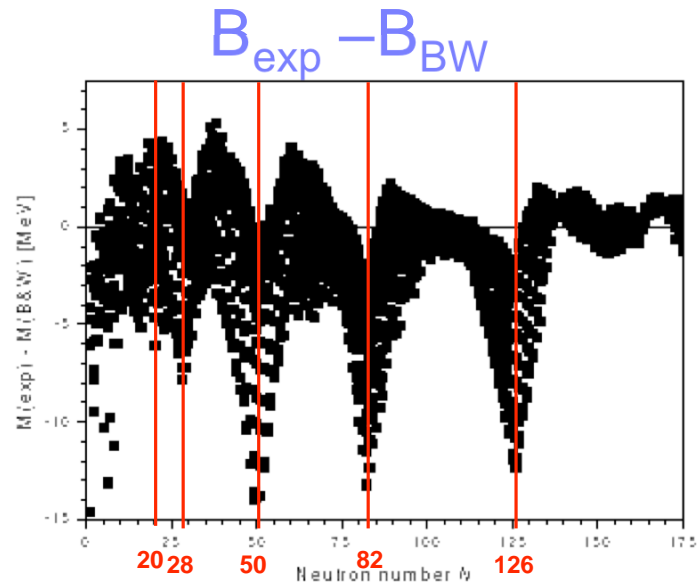
mais en **quantique rotation** \Leftrightarrow **déformation**

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



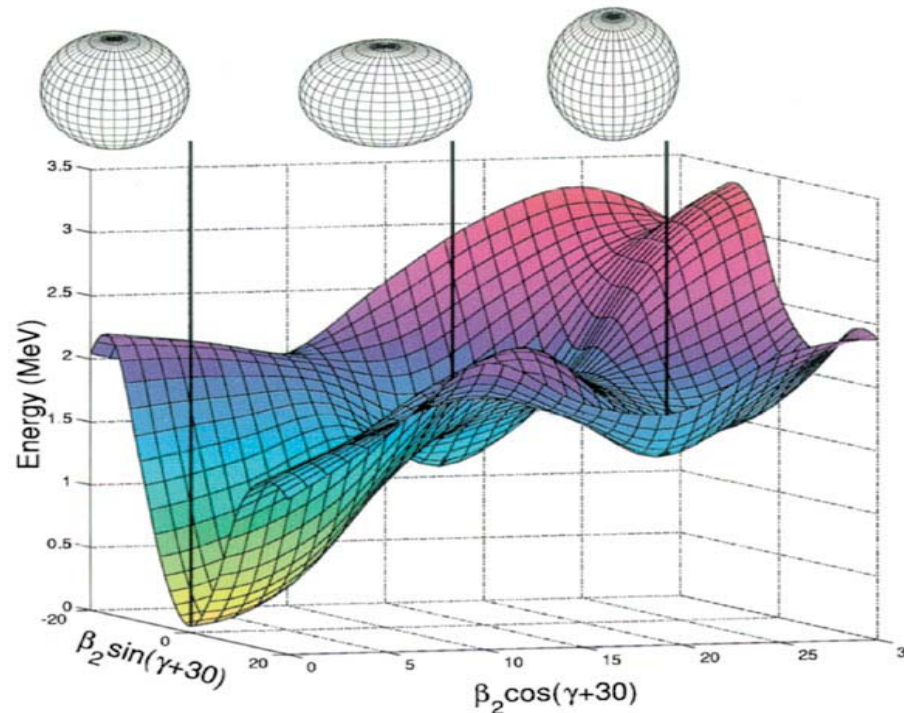
- calcul quantique puits sphérique
- “ ” puits déformé

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

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)...

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

Succès de l'approximation du potentiel moyen

⇒ mais on utilise des méthodes plus fondamentales :

➡ construire LE potentiel moyen DE chaque noyau à partir d'une force « effective » V_{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.

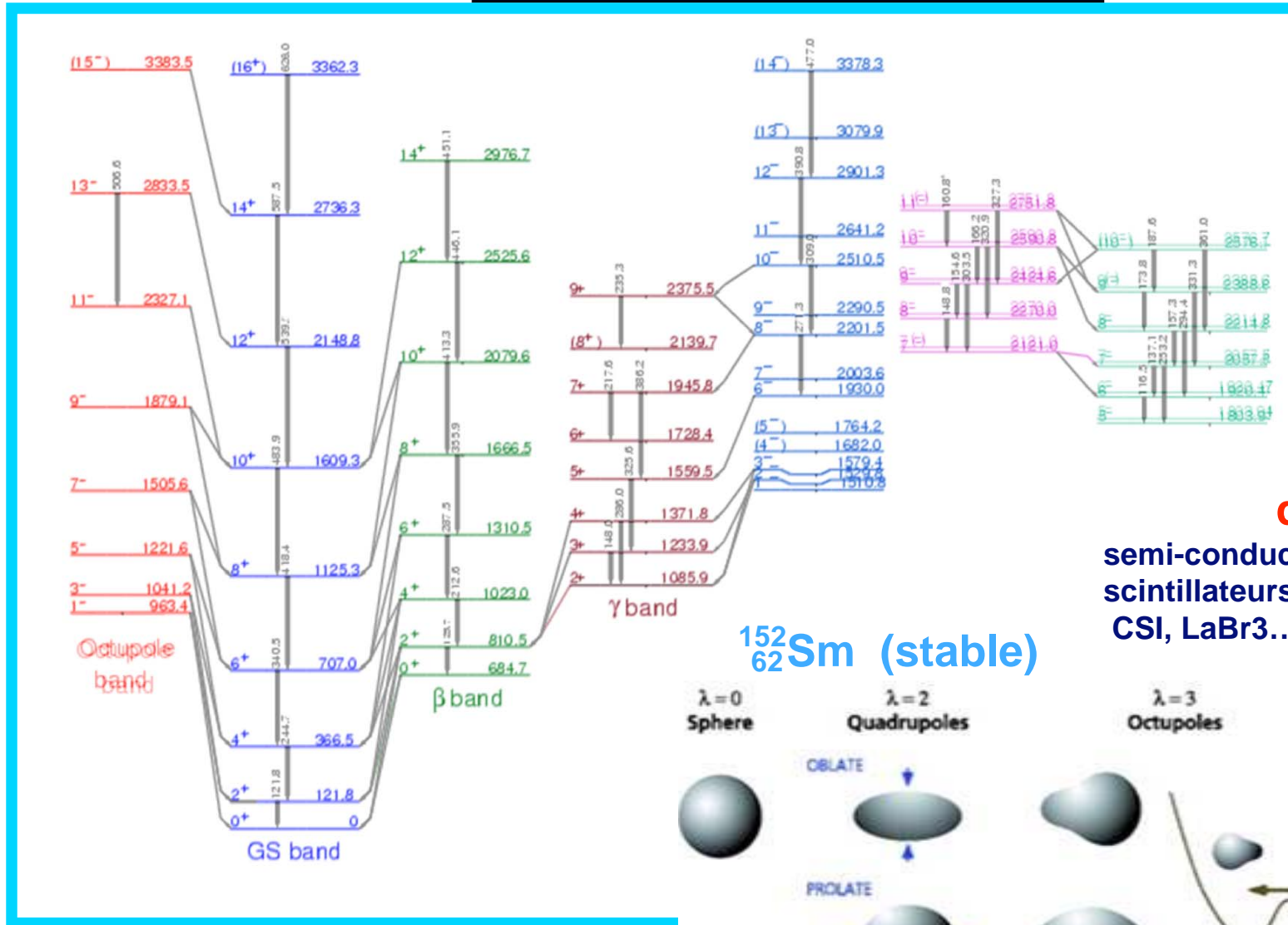
➡ noyau = cœur (magique) + particules “valence”

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 de ces forces
loin de la stabilité...

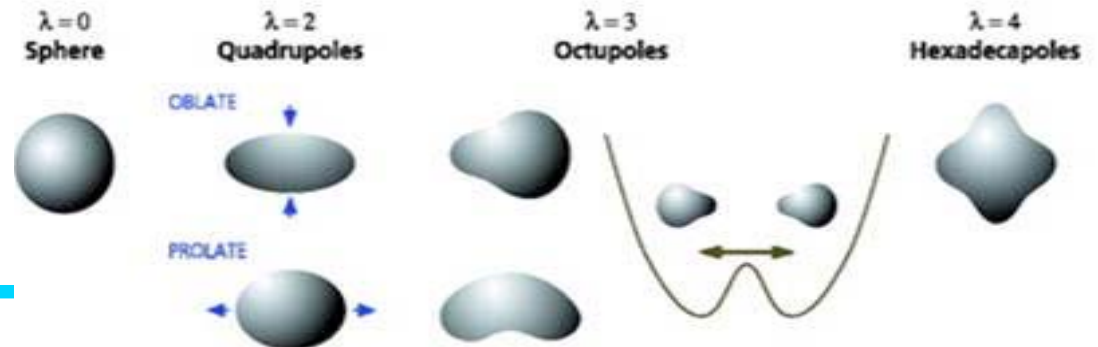
transitions entre états



déTECTABLE

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

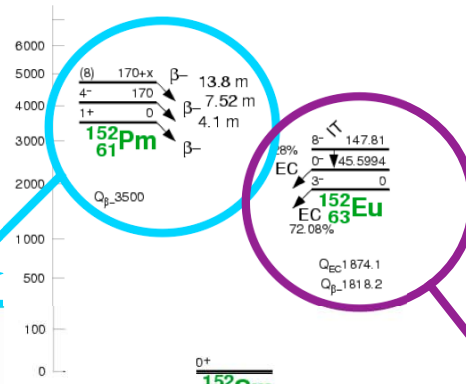
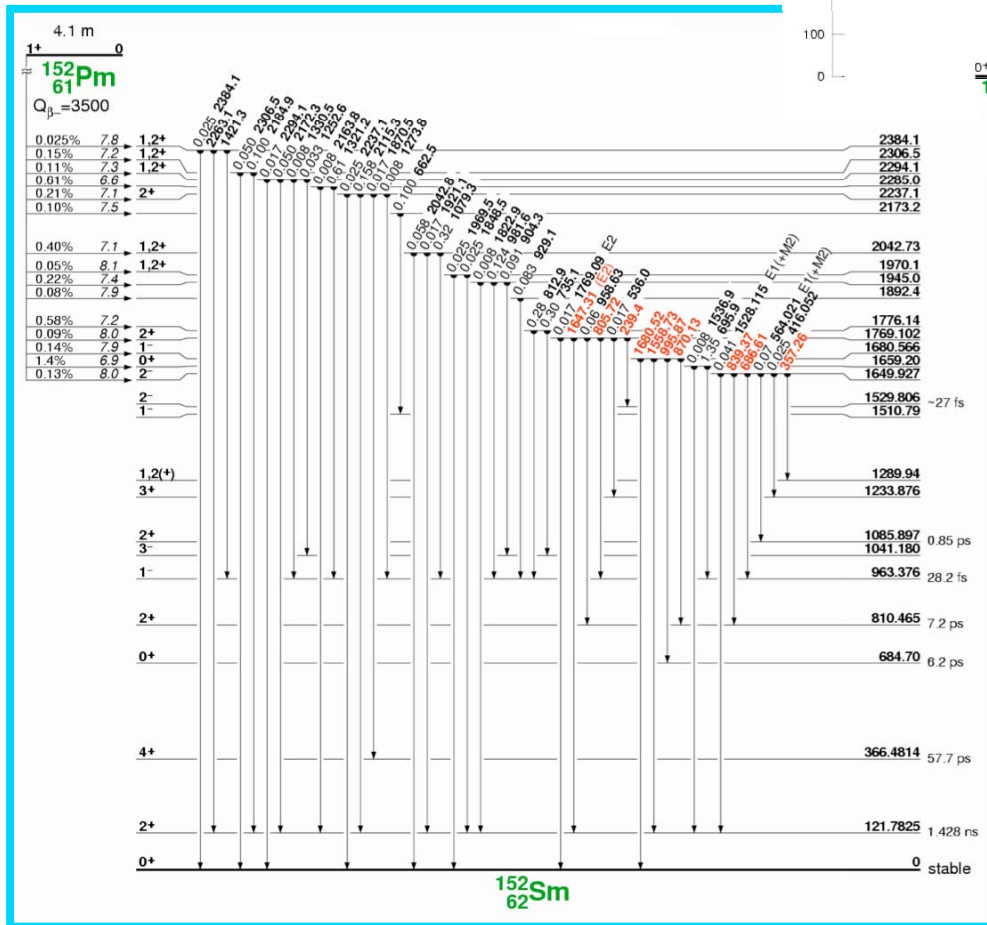
$^{152}_{62}\text{Sm}$ (stable)



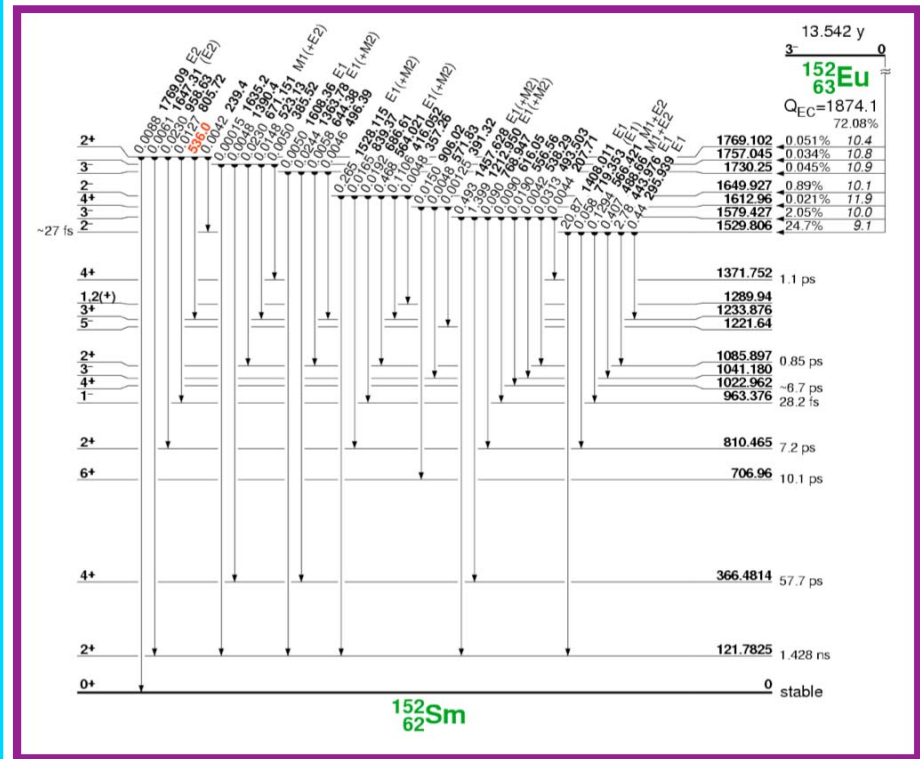
⇒ de multiples expériences sont nécessaires en faisceau

Aussi en décroissance

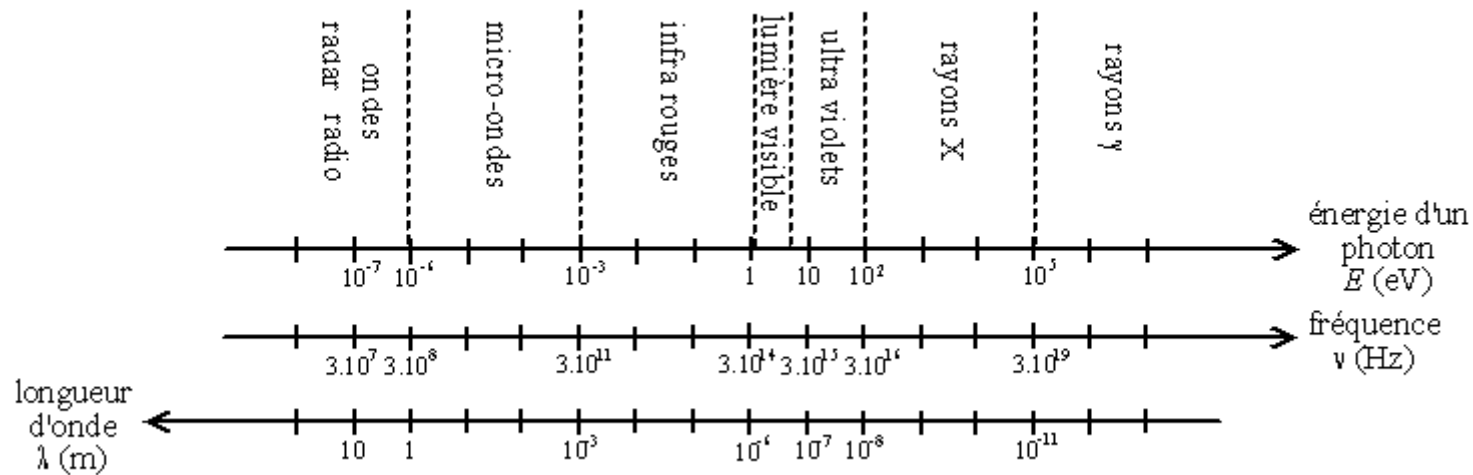
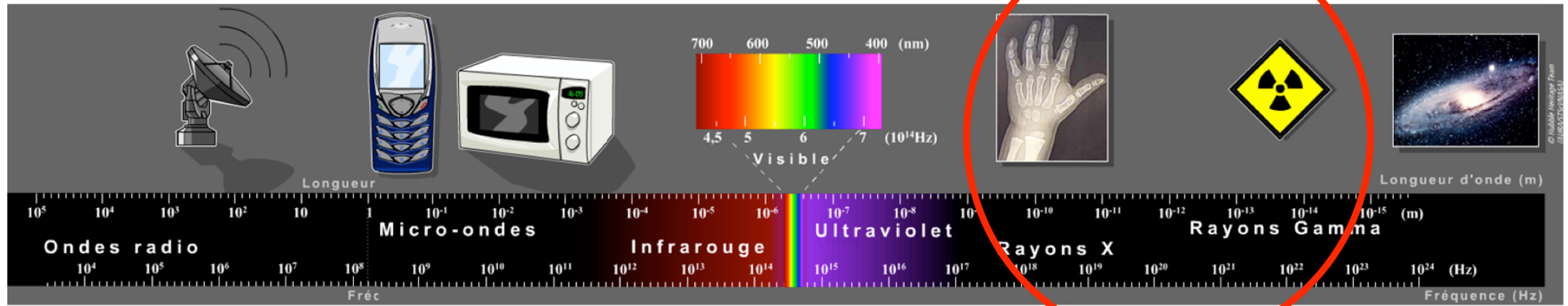
Partiel



Partiel



spectre électromagnétique



sources: spectre électromagnétique couleurs à partir de http://www.edumedia-sciences.com/a189_l1-spectre-electromagnetique.html

échelles : http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_électromagnétique

I. Deloncle, Fréjus 2008

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

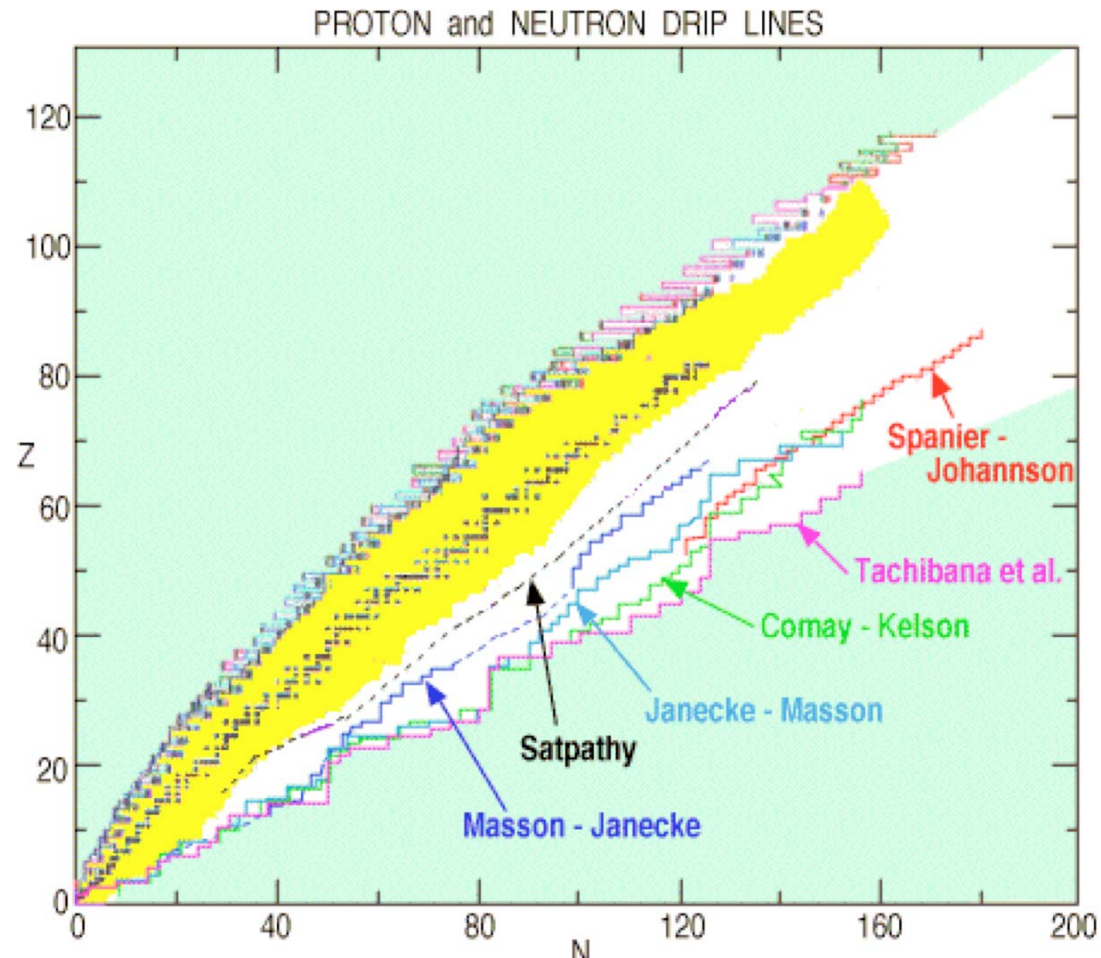


Fig. I.1: Chart of the nuclides showing the stable nuclei (dots), the region of known nuclei (yellow area), various dripline predictions [HA88] for both protons and neutrons, and the r-process path.

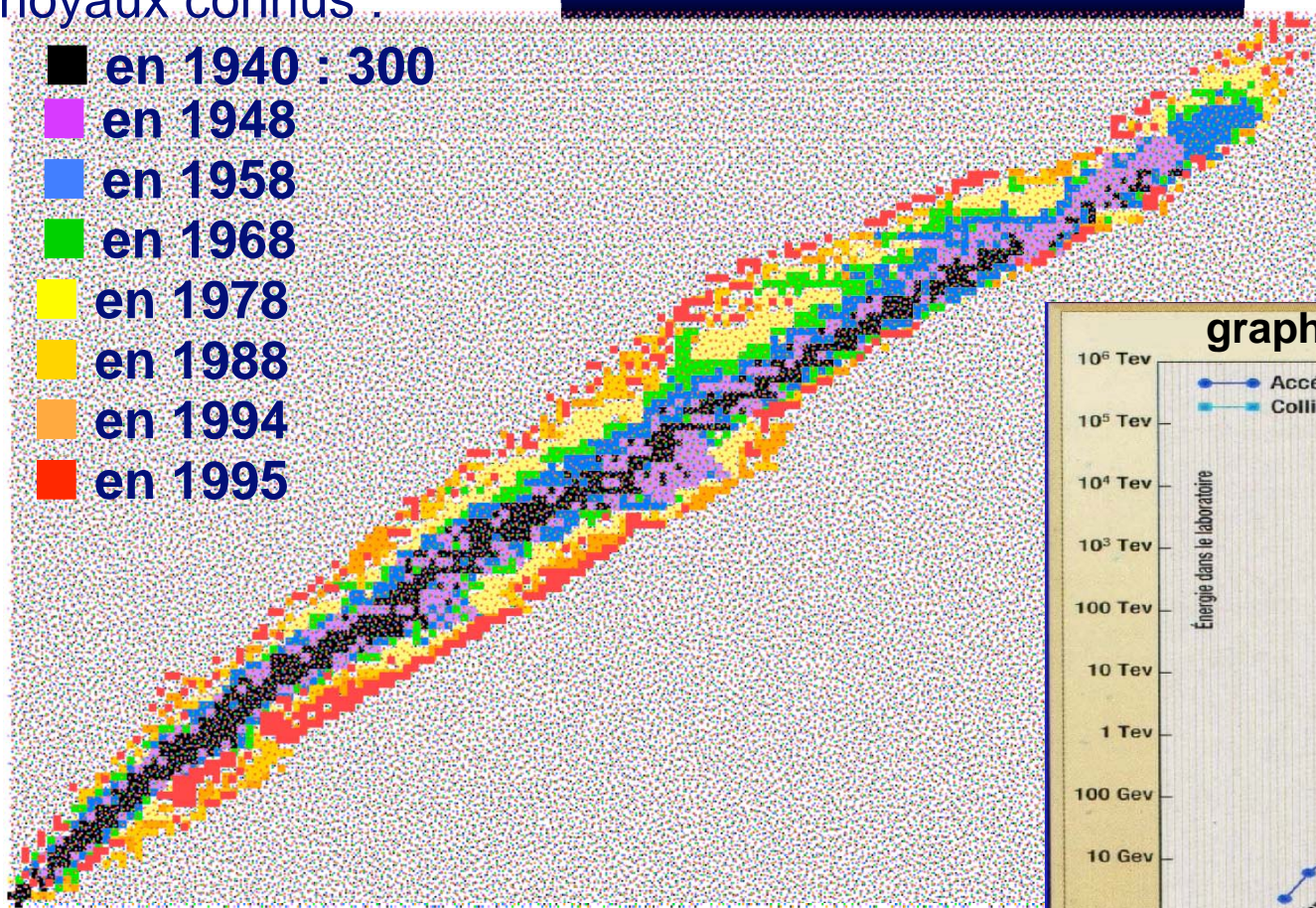
source : RIA 1995 Argonne Yellow Book <http://www.phy.anl.gov/div/origins/yellow-book/figsI.1-I.5.html>
<http://www.sc.doe.gov/henp/np/nsac/docs/LRP1996.pdf>

Expériences :
créer des noyaux
loin des zones
normalement peuplées

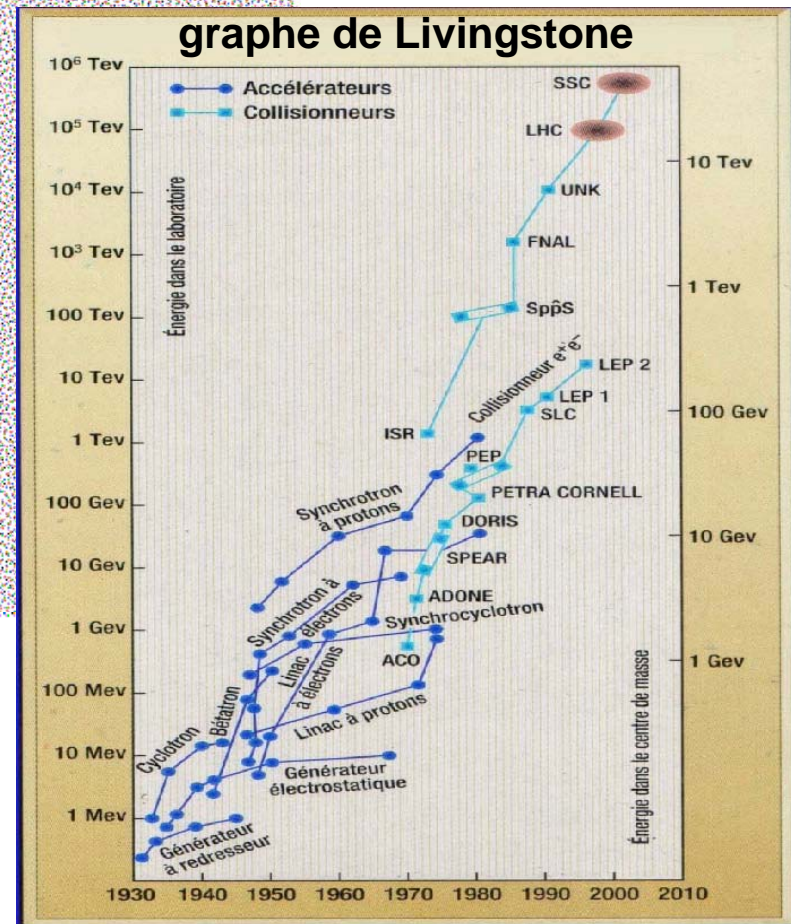
C'est très difficile :

noyaux connus :

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

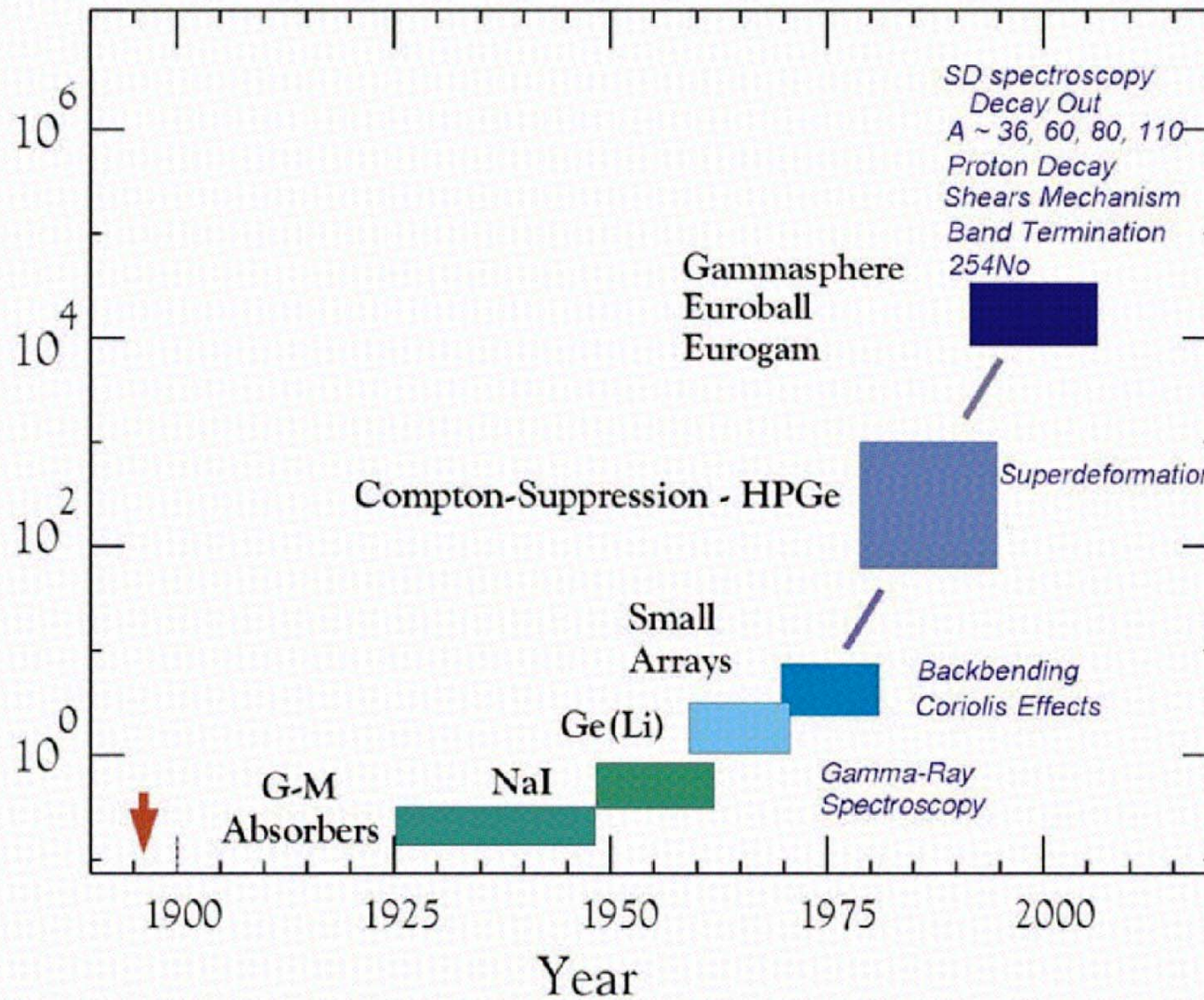


aujourd'hui ~3200 \Rightarrow $\times 10$ en 60 ans
 pourtant
 gain énergie accélérateur \cong $\times 10$ tous les 10 ans



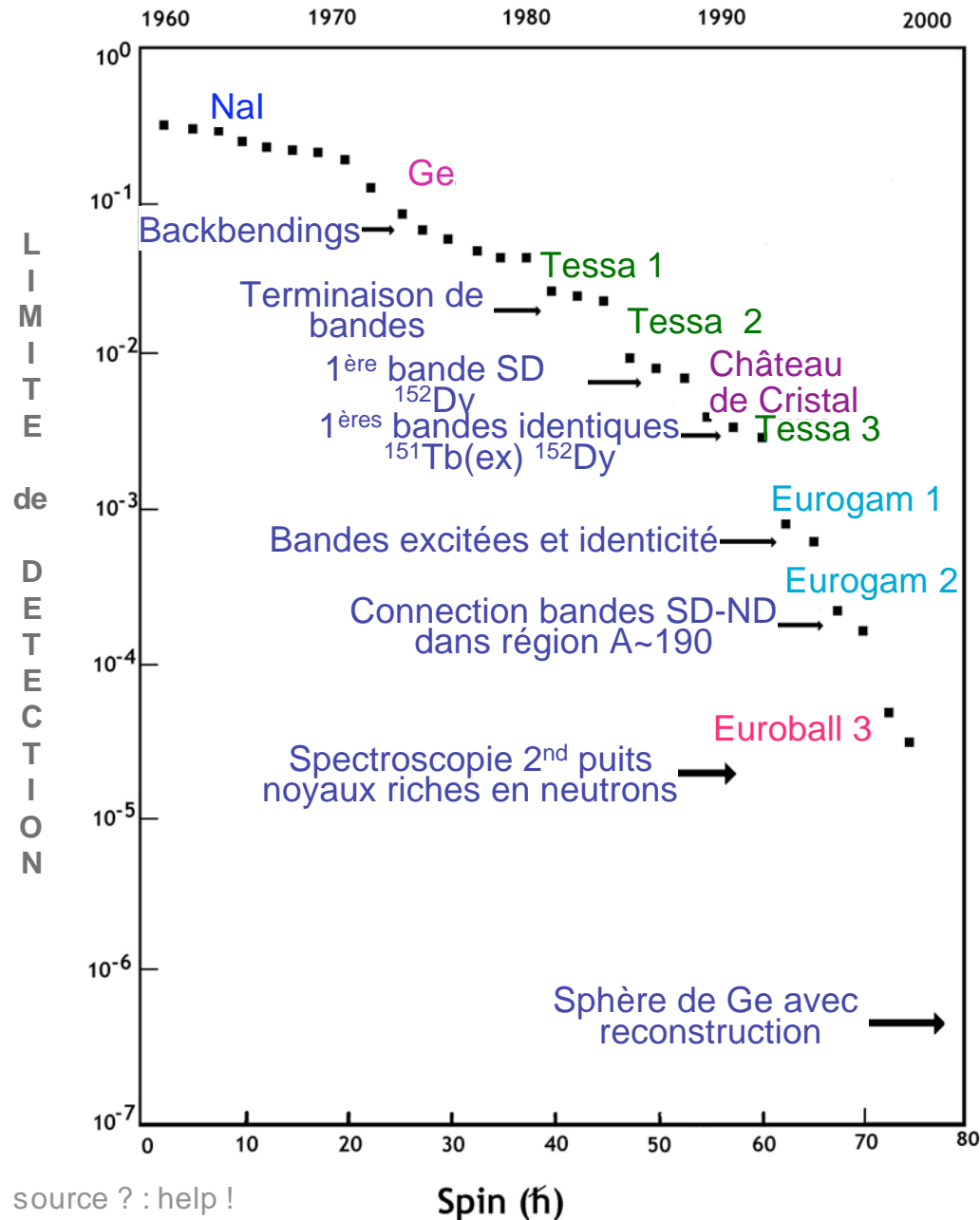
from C. Pagani A. Mueller
 I. Deloncle, Fréjus 2008

Malgré les avancées en détection...



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

Qui ont bien permis des découvertes



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

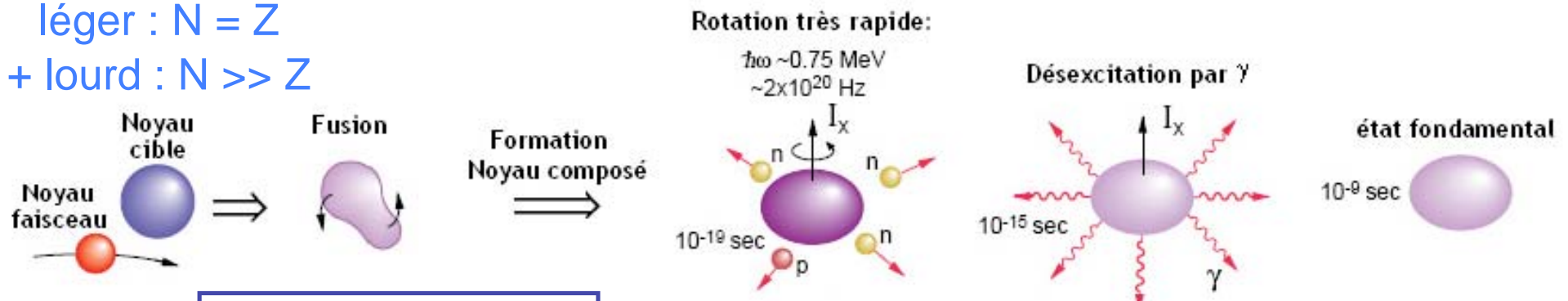
Réactions à partir de noyaux stables...

Fusion - évaporation

Réactions Ions lourds :

léger : $N = Z$

+ lourd : $N \gg Z$

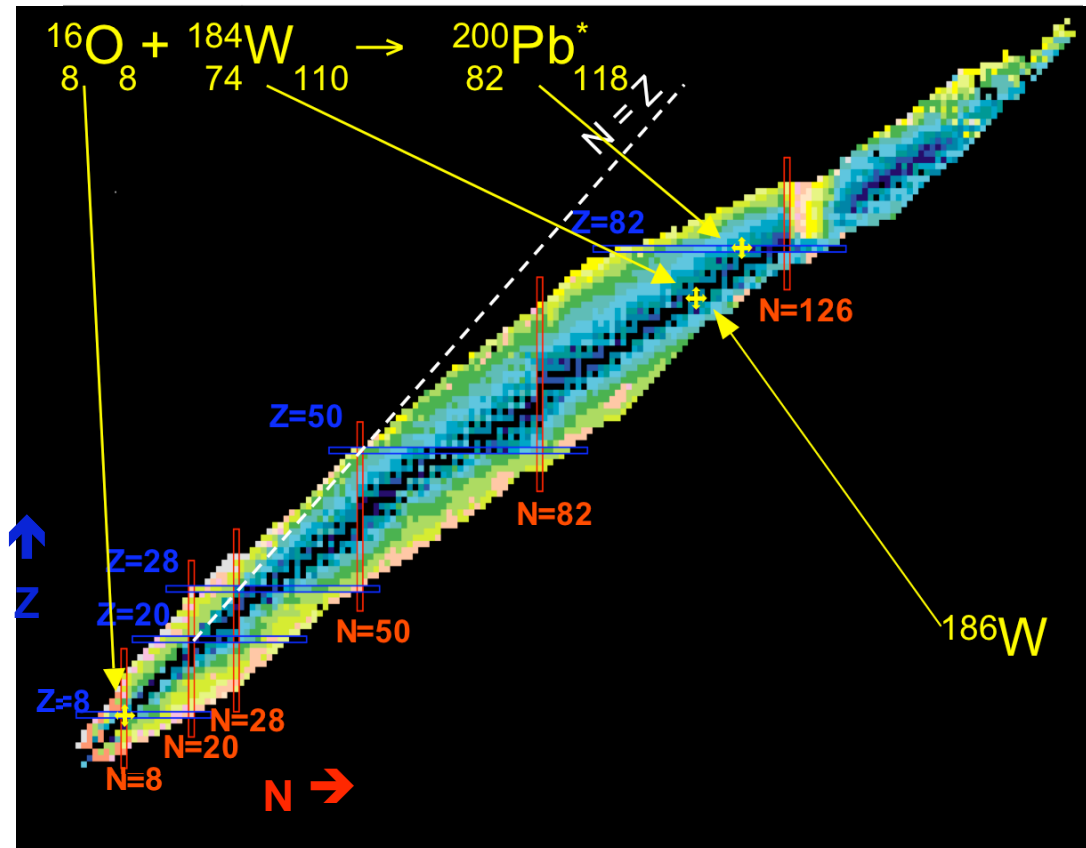


<p>noyau lourd + Σ nucléons $\Rightarrow N > Z$ \Rightarrow côté déficients neutrons</p>	<p>Rotation \Rightarrow chemin des très grandes déformations: super, hyper- déformation MAIS Evaporation de particules légères (p,n..) \Rightarrow déficients neutrons</p>	<p>moyen détection: \oplus noyau de recul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

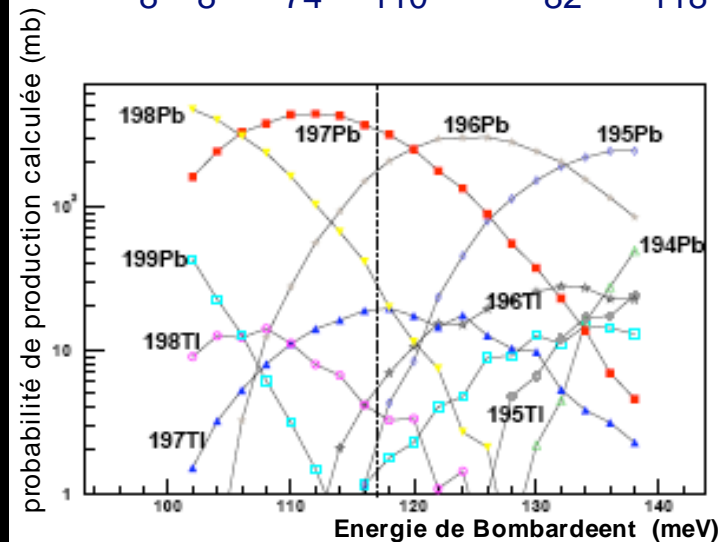


${}^{200}\text{Pb} \Rightarrow$ côté déficients neutrons: ${}^{206}\text{Pb}$ dernier isotope stable (donc abondant)
 période du ${}^{204}\text{Pb}$ (1,4% du Pb sur Terre) $\sim 10^{17}$ ans (âge Terre $4,6 \cdot 10^9$ ans)

Fusion-évaporation de noyaux stables...



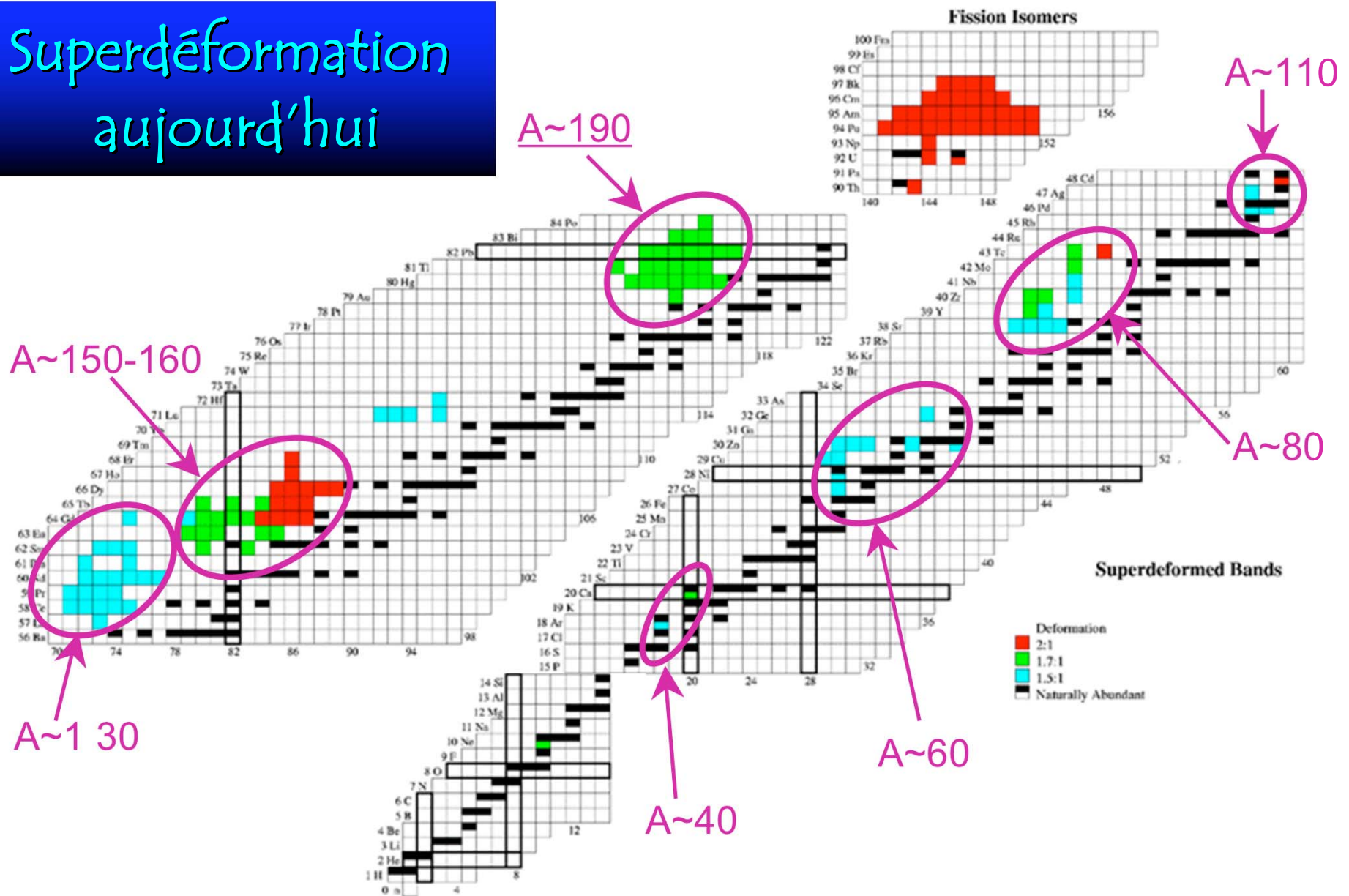
on peut parfois jouer sur
autres isotopes stables ici ^{186}W



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

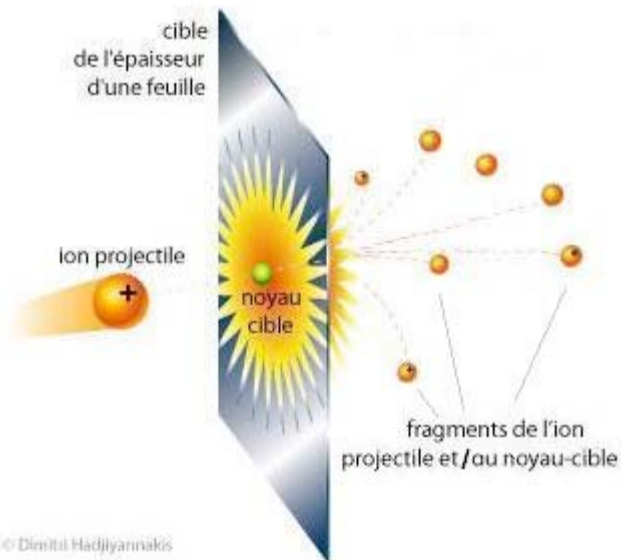
Superdéformation aujourd'hui



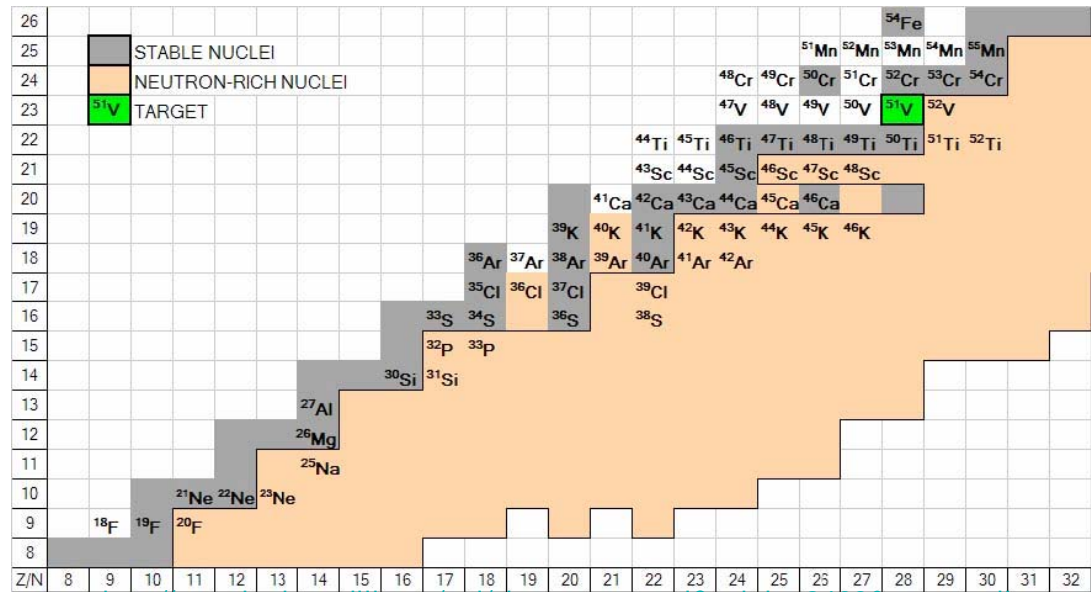
Pourtant, il y a toutes les raisons de penser qu'il y en a autant de l'autre côté de la vallée ...

Fragmentation

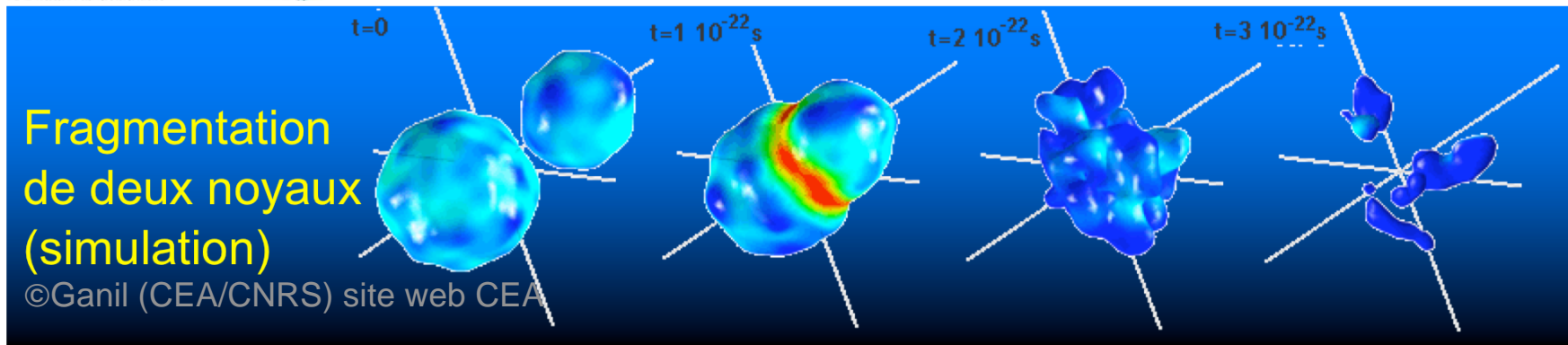
ion léger + haute énergie que fusion-évaporation : qqs dizaine MeV/u au GeV
 $\Rightarrow E_{\text{faisceau}} > B/A$ (énergie de liaison moyenne par nucléon ~ 8 MeV)
 \Leftrightarrow pas de noyau composé : on attaque la structure quantique,
 “chauffe” le noyau



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



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



Fragmentation
de deux noyaux
(simulation)

©Ganil (CEA/CNRS) site web CEA

http://www.cea.fr/fr/magazine/dossier_noyau/chapitre4.htm : lien cassé

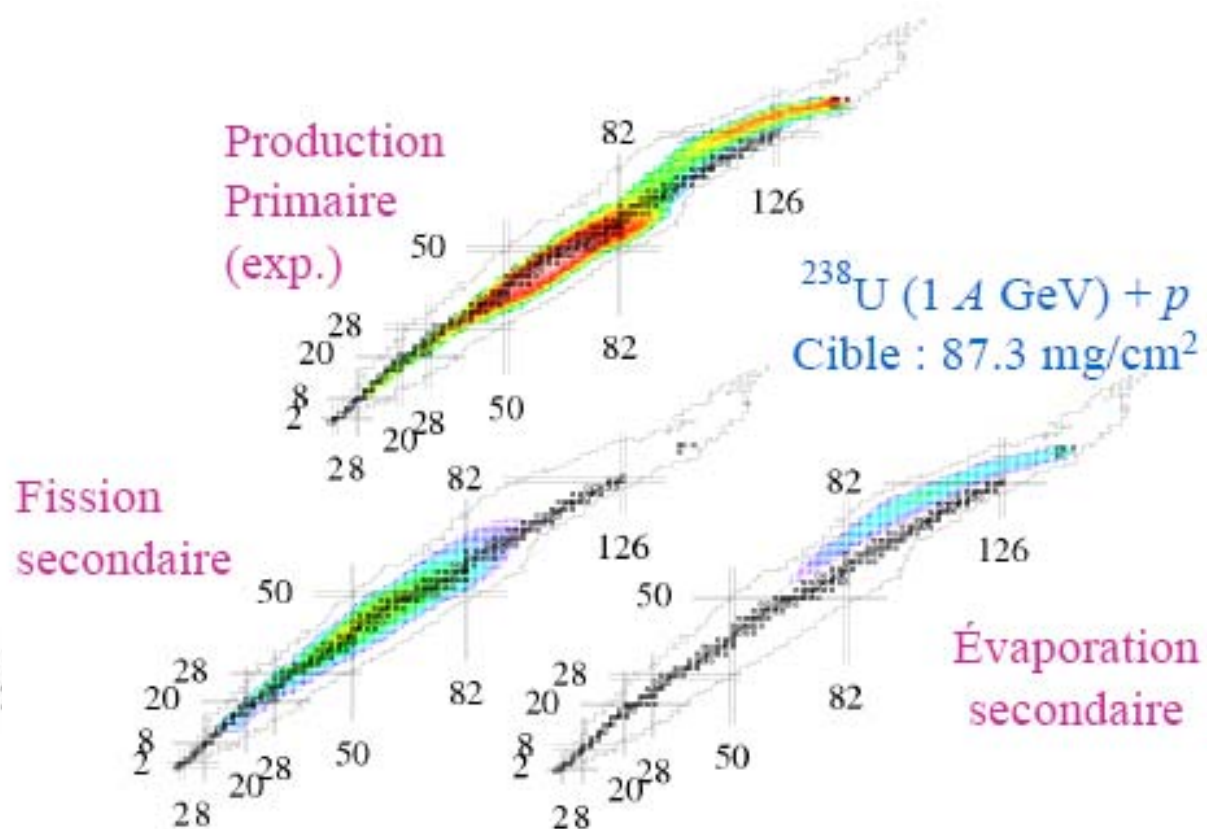
http://www.cea.fr/fr/magazine/dossier_noyau/img/simulationFragNoya_vignette.gif : lien cassé

Spallation

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

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

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



source image mécanisme spallation : http://hp.ujf.cas.cz/ionty/adtt/uvod/uvoden_soubory/image003.gif

U + p total : http://www.in2p3.fr/recherche/nouvelles_scientifiques/archives/2005/1_spallation.htm

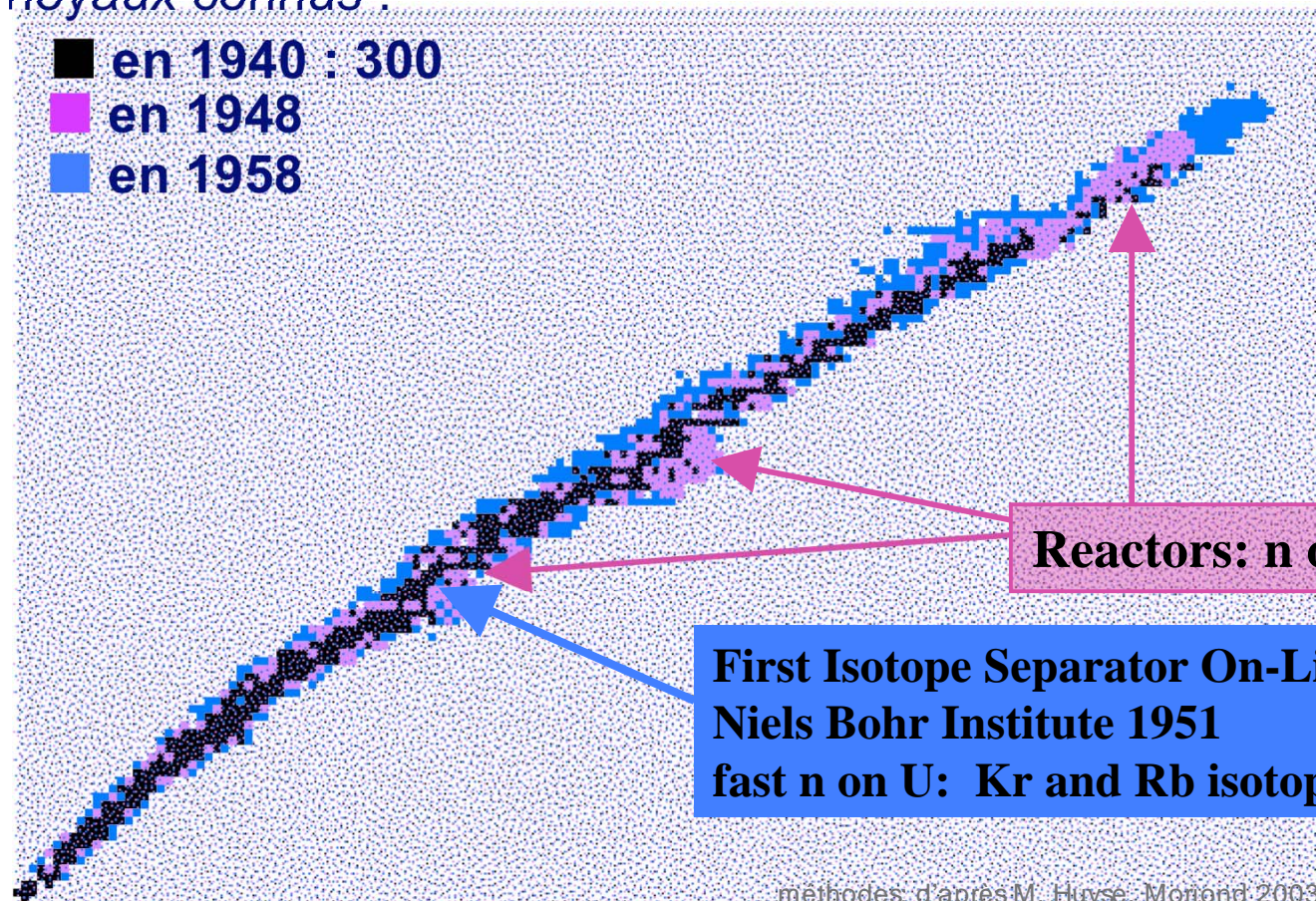
décomposition <http://www.qanil.fr/research/events/seminars/files/2005/Presentation-P.Napolitani.pdf>

Fission induite par particule:

(utilisée depuis longtemps)

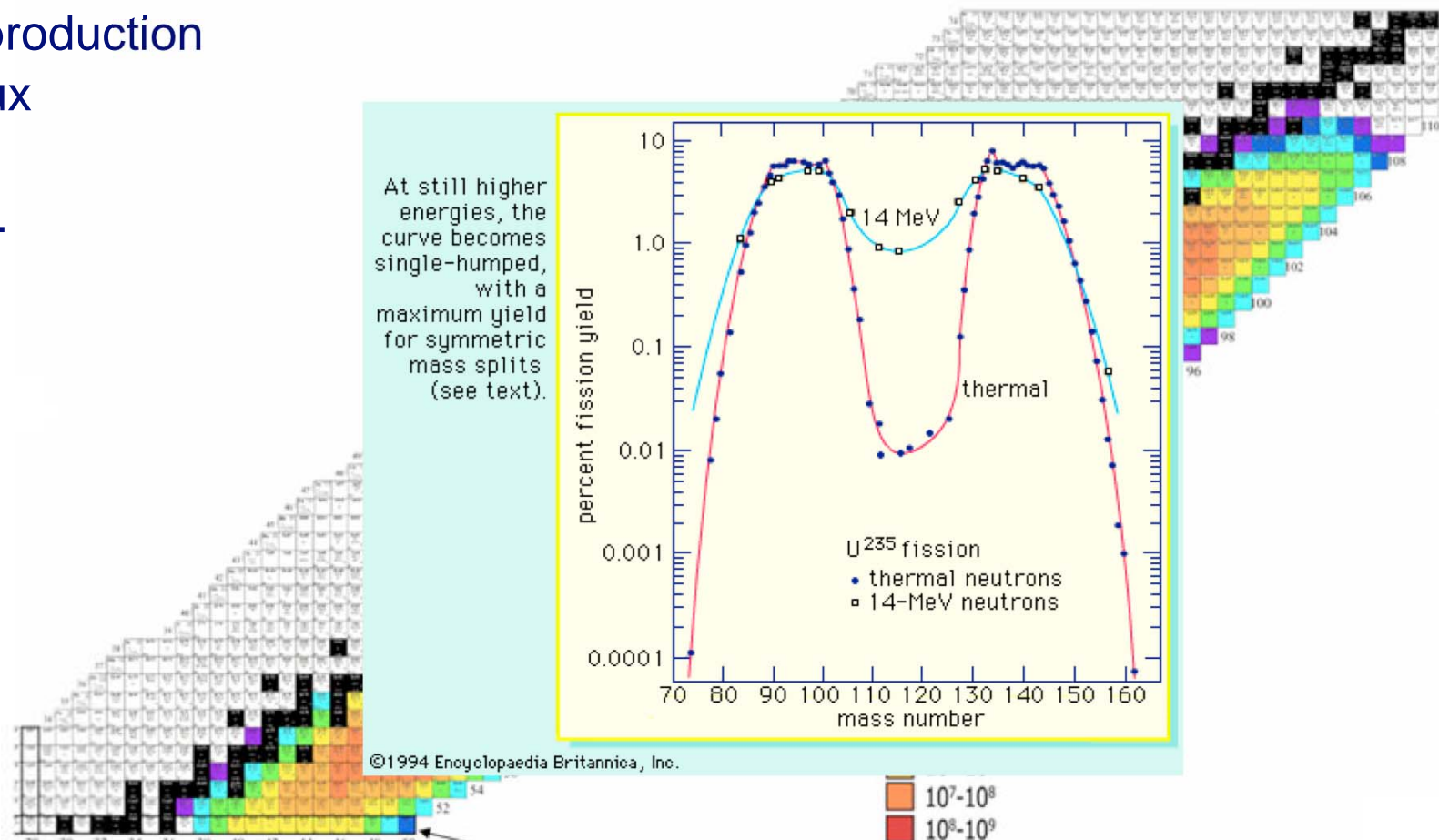
Parmi premiers noyaux synthétiques : neutrons des réacteurs sur cible U
Fission **Induite** pour ne pas attendre le bon vouloir d'un noyau qui fissionne
"spontanément")

noyaux connus :



Fission induite

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



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

Ex: fission induite par ions lourds

pré fission

cible:



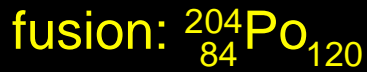
ralentissement dans support de cible (Au) évacuation du trop plein d'énergie, évaporation de neutrons

INSUFFISANT!



projectile:

ion lourd



noyau composé

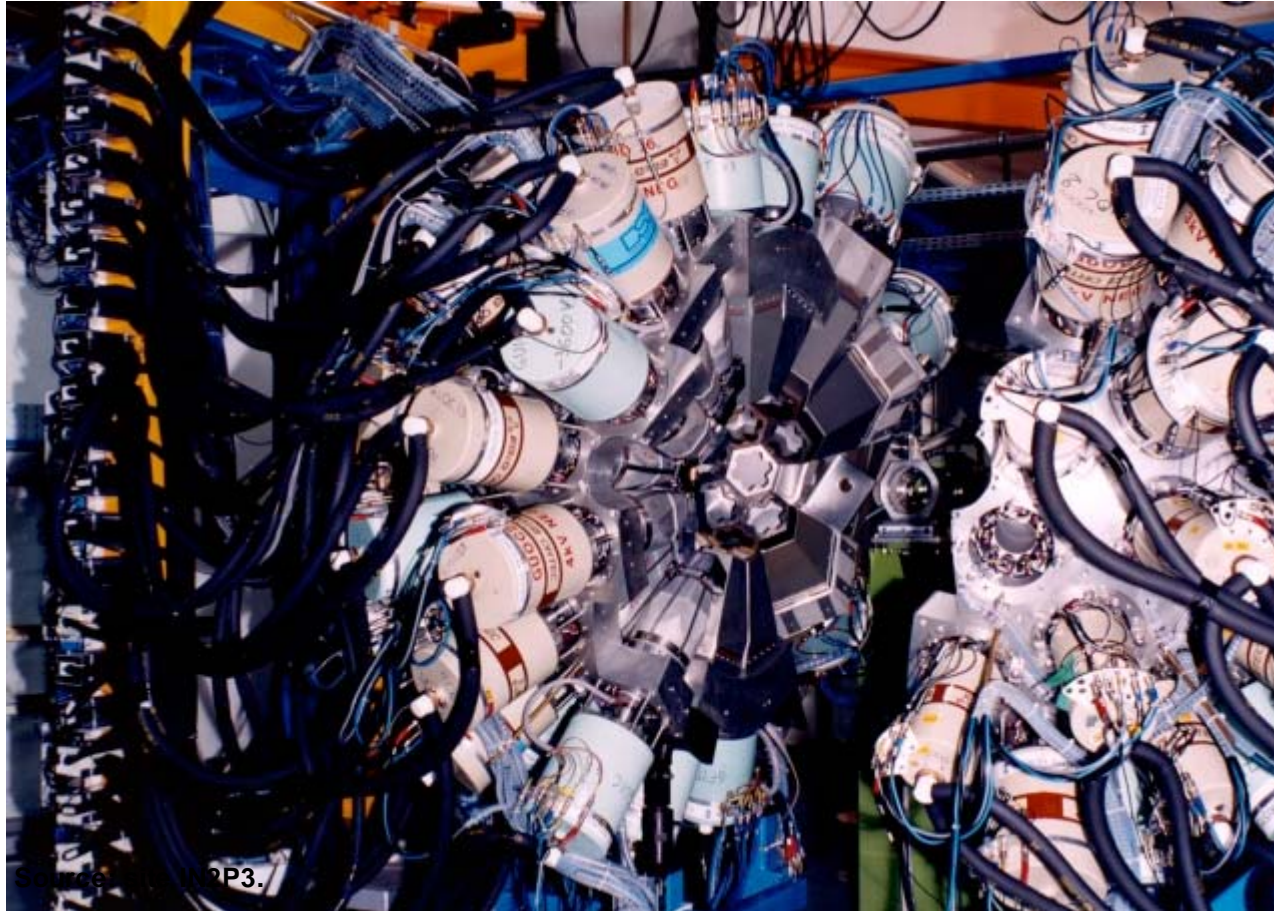
fissile essayant de trouver un équilibre qui n'existe pas

fission \Rightarrow deux noyaux évacuant leur énergie avec des neutrons

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

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

Détection de cascades de photons



239 cristaux
de Germanium

Analyse des événements

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

1 évt de fold 3 :

E_{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}

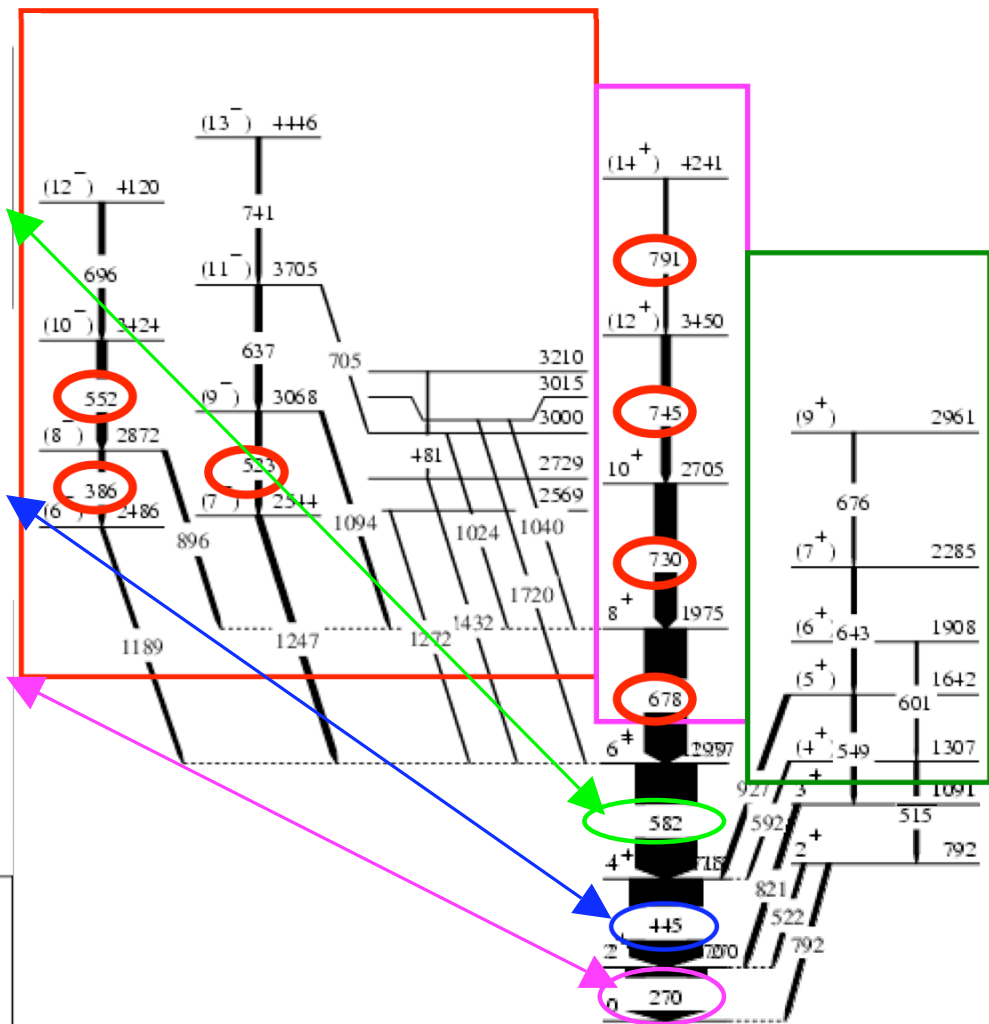
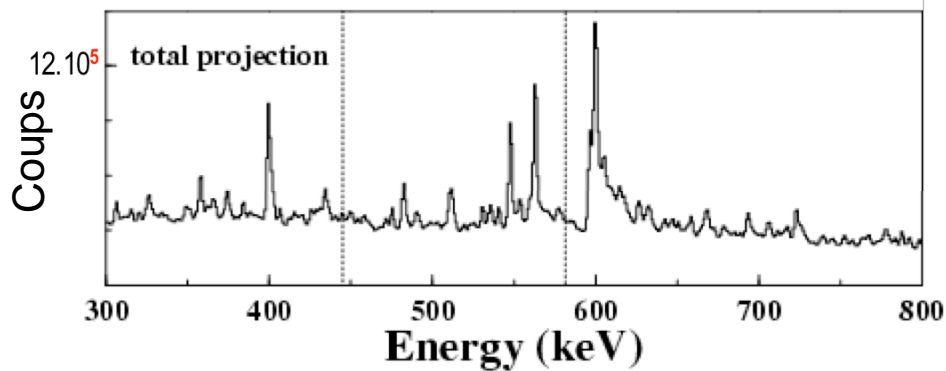
-Q: Avec quelles autres énergies E_{γ_1} et E_{γ_6} ensemble ont-elles été vues ?

-R : le plus souvent avec E_{γ_9}

etc...

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

Résultat d'un questionnaire



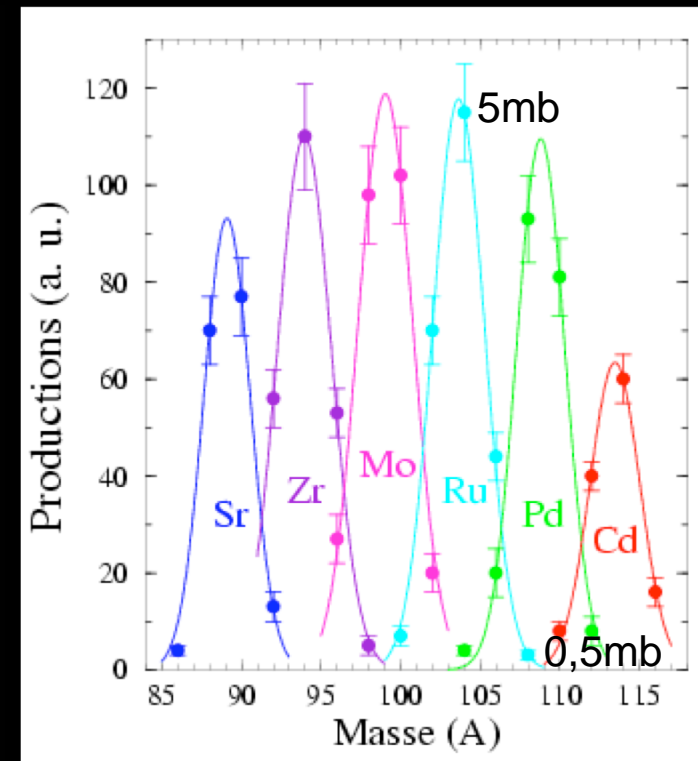
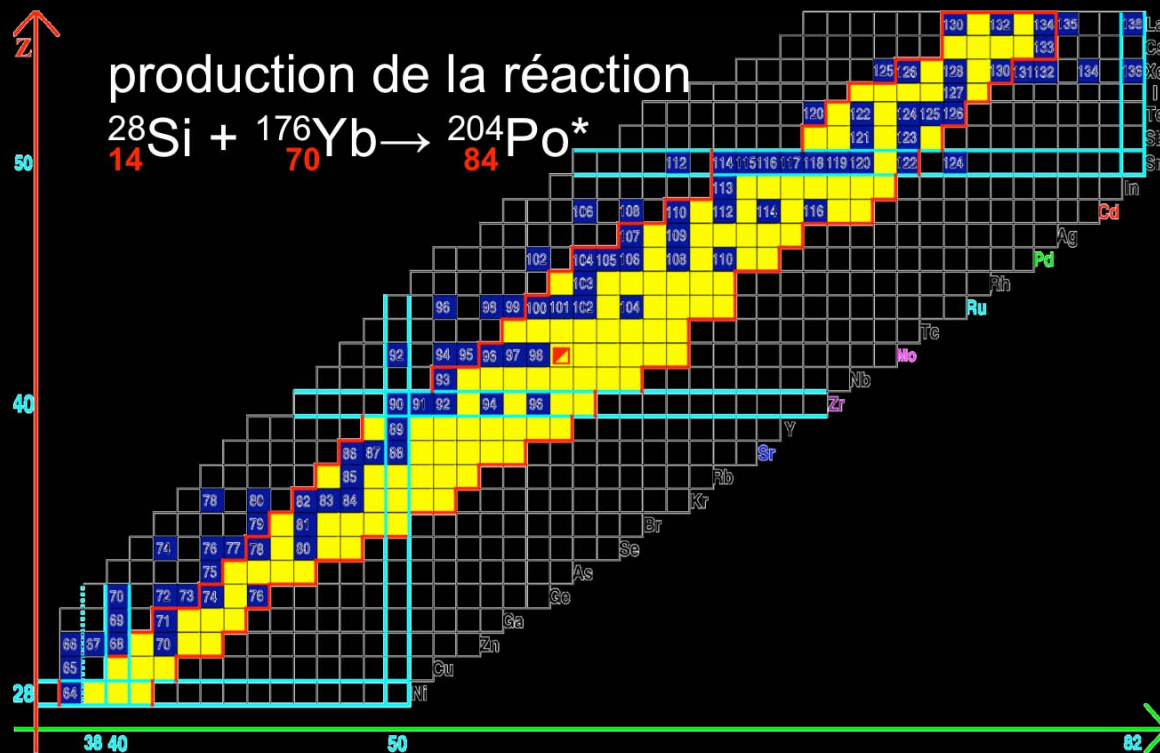
^{106}Ru $\sigma \sim 2\text{mb}$
 départ: 5 niveaux connus

Fission induite par ions lourds:

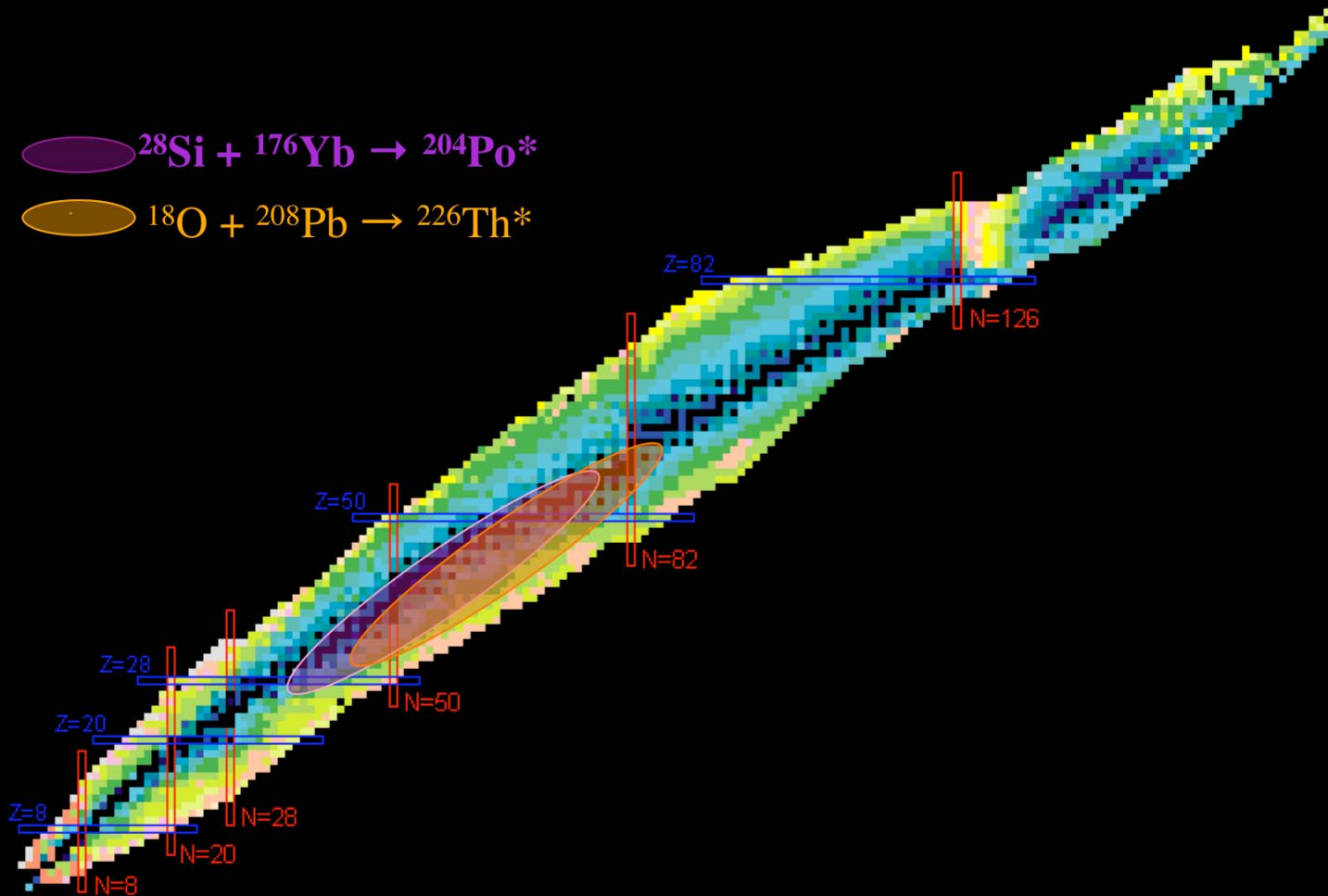
1 transition mène à tous, deux transitions à un noyau, 3 au 1^{er} embranchement

- 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 de la zone de production

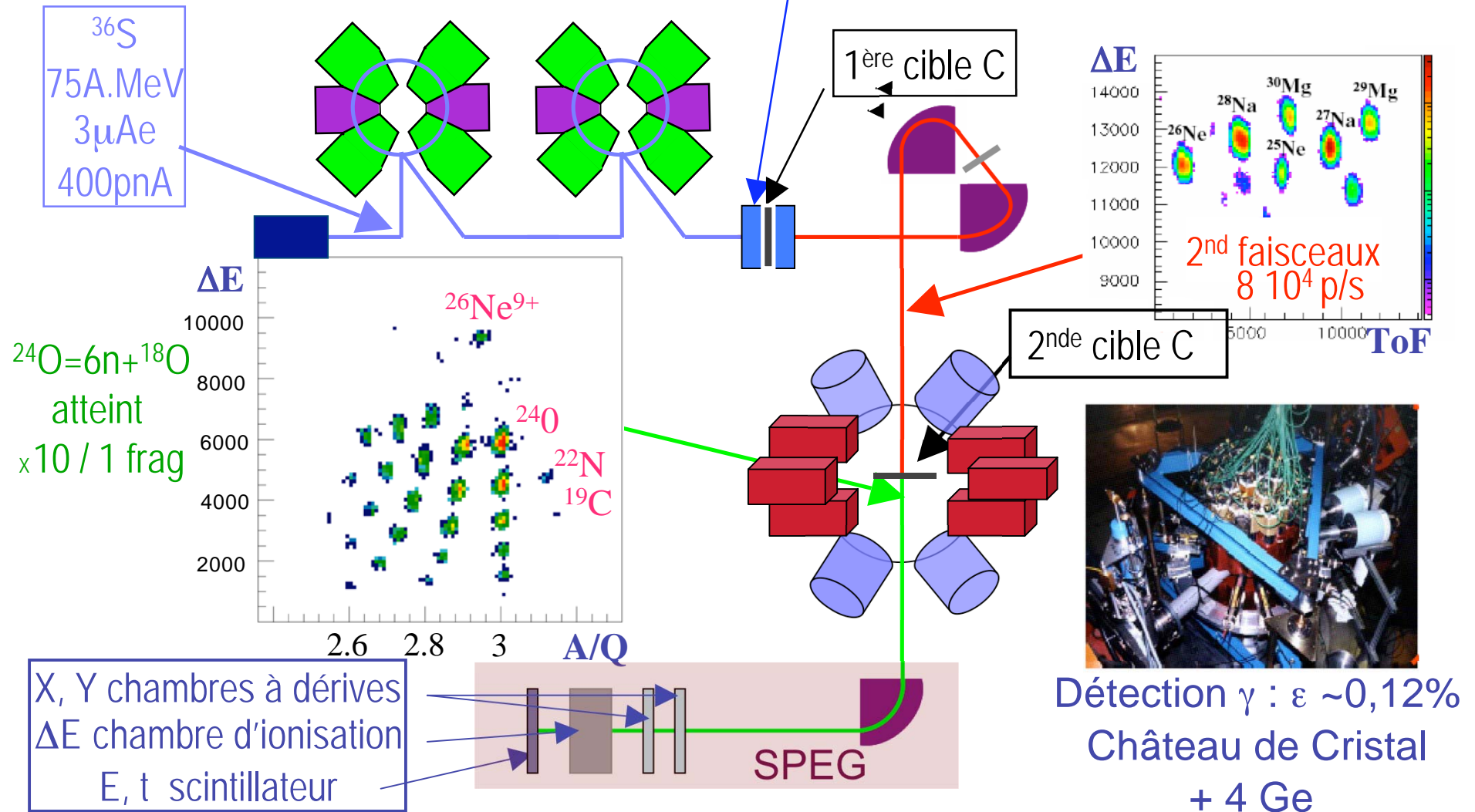


Faire des réactions avec les noyaux produits

Deux étapes de fragmentation

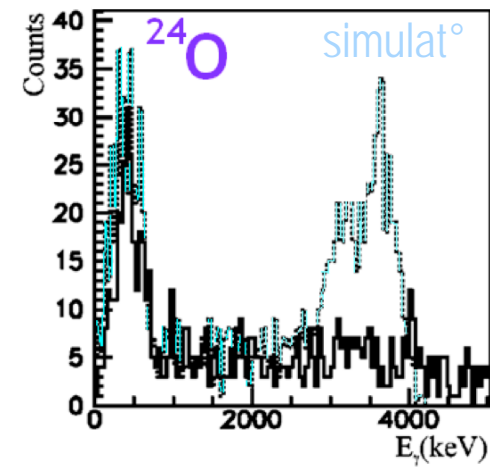
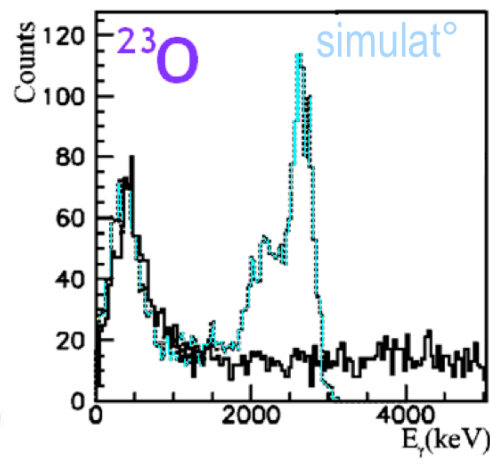
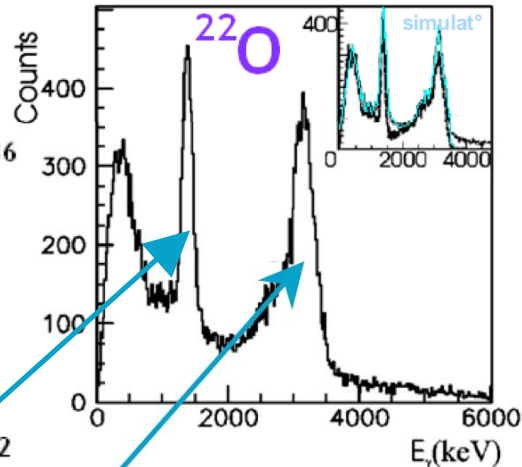
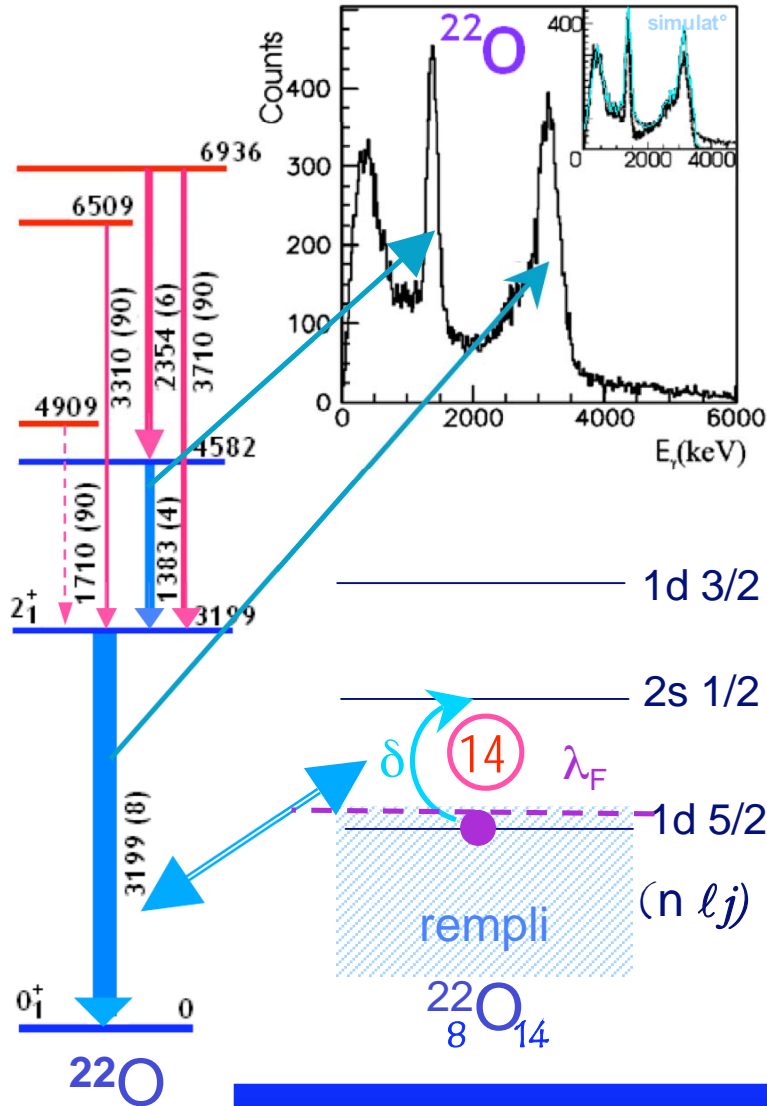
M. Stanoiu et al., Phys.Rev. C69, 034312 (2004)

SISSI : source d'ions secondaires à supraconducteurs intenses



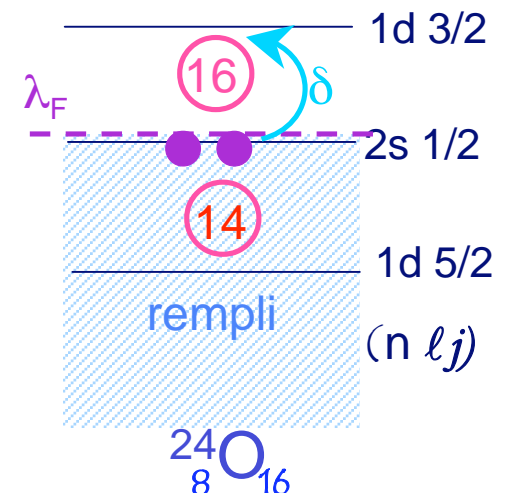
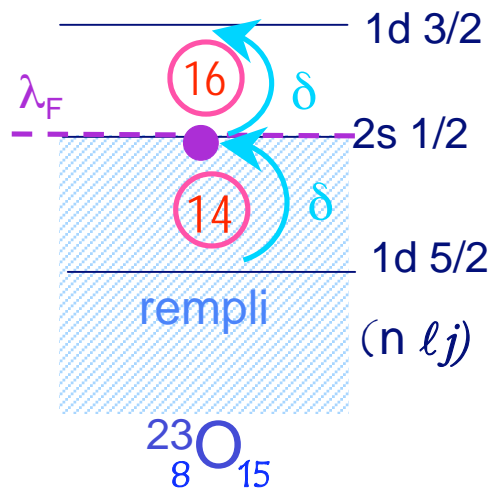
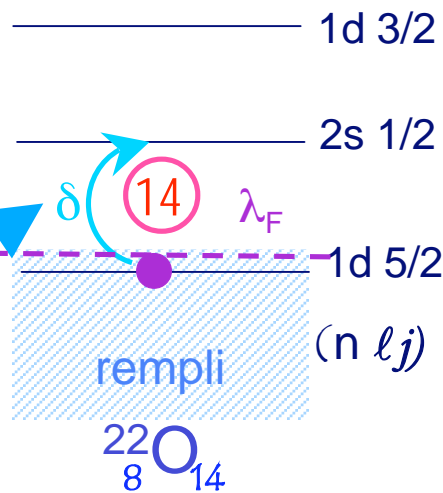
Résultats en γ pour $^{23,24}_{8}\text{O}_{15,16}$

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

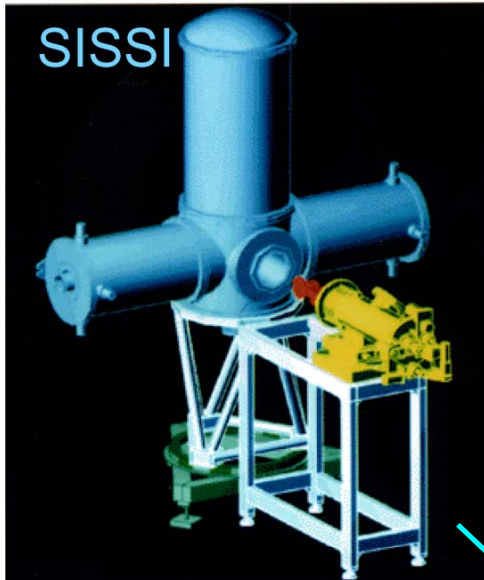


rien $\Rightarrow \delta \sim E > S_n = 2,7\text{MeV}$

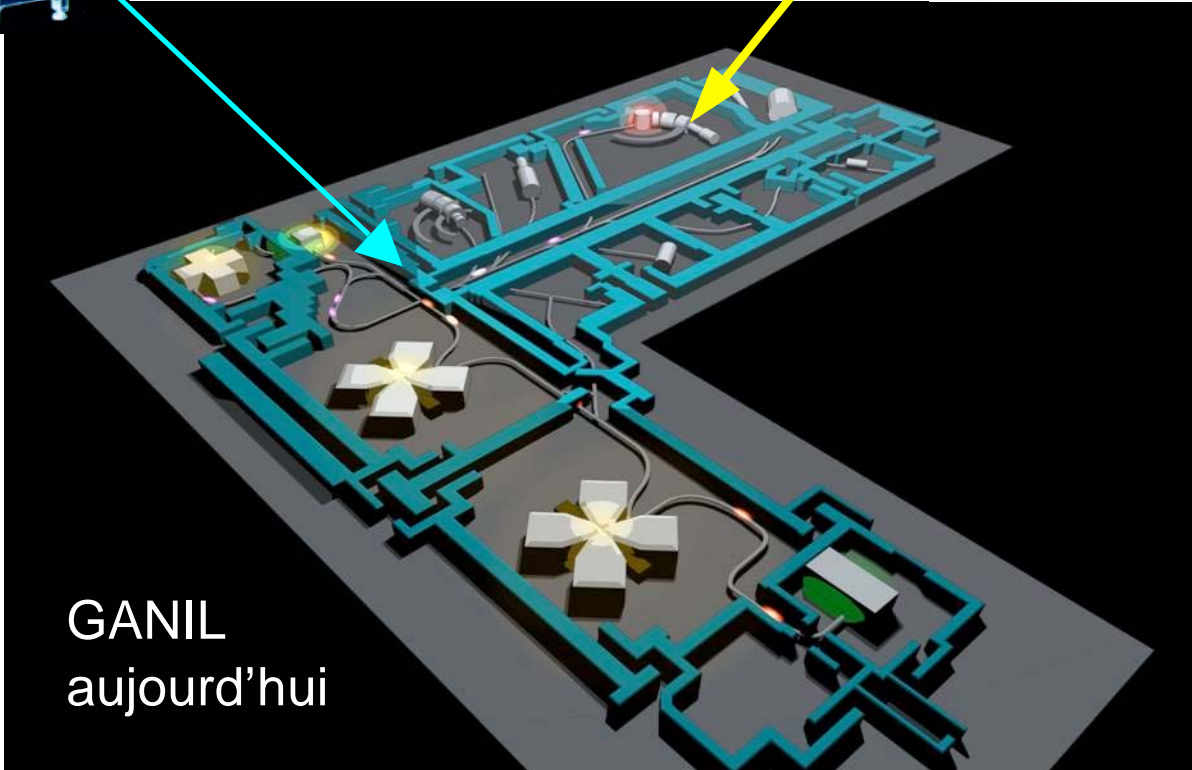
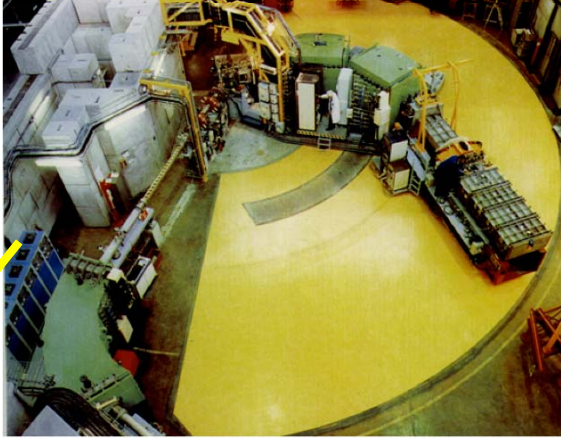
rien $\Rightarrow \delta \Rightarrow E > S_n = 3,7\text{MeV}$



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



De Sissi à SPEG



Synthèse des
noyaux exotiques:
installations et détecteurs
"IN2p3"

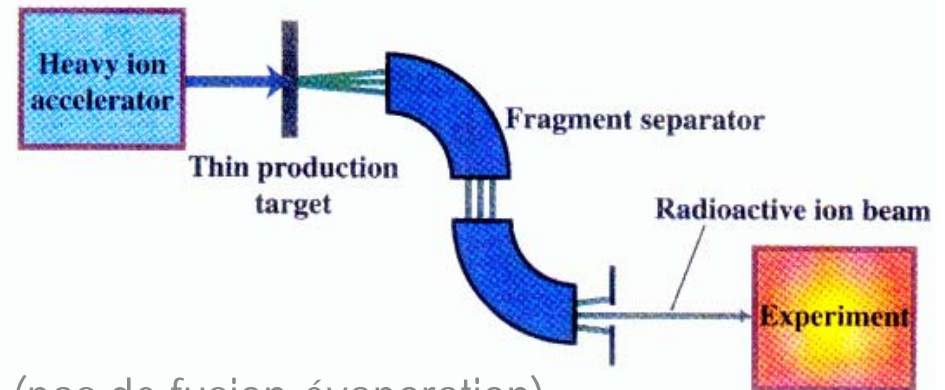
Aujourd'hui

Fragmentation

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

+ large variété d'éléments

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

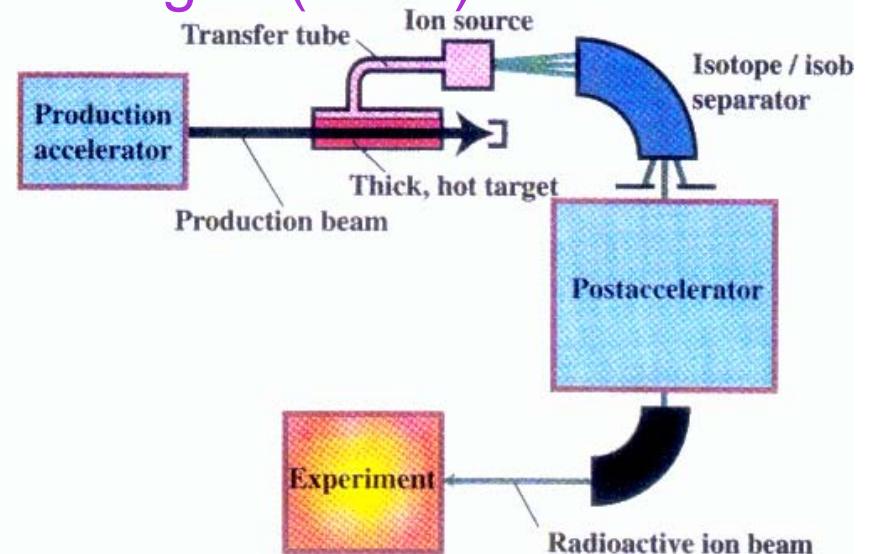


Séparation isotopique en ligne (ISOL)

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

+ bonne qualité faisceau, flexibilité, intensité

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

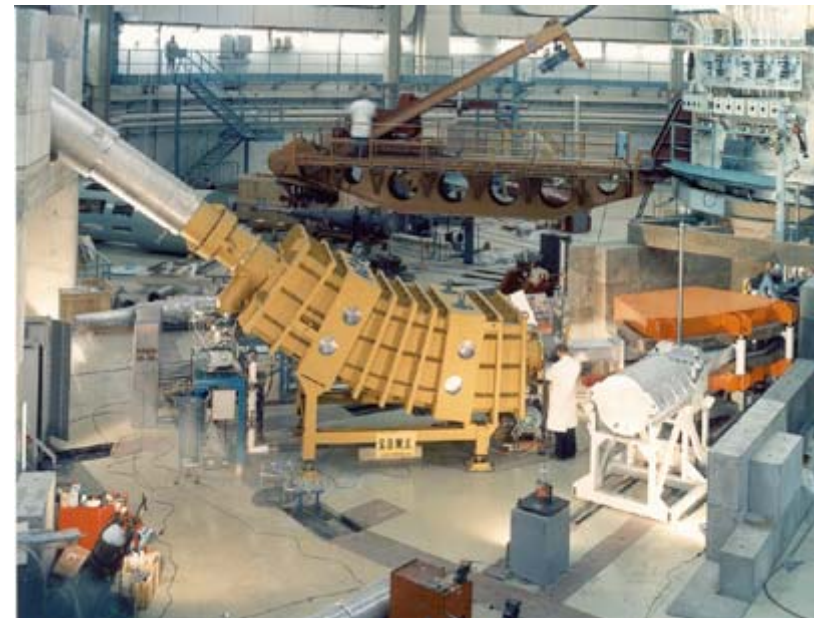
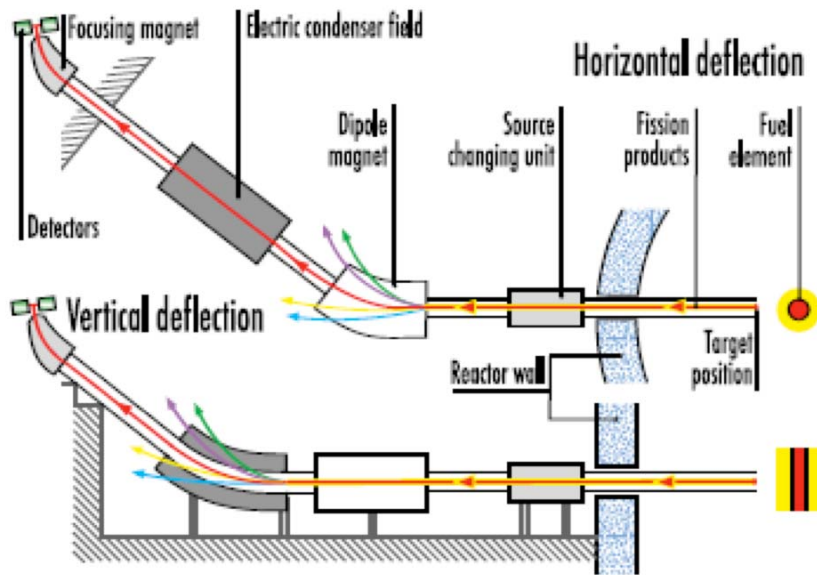
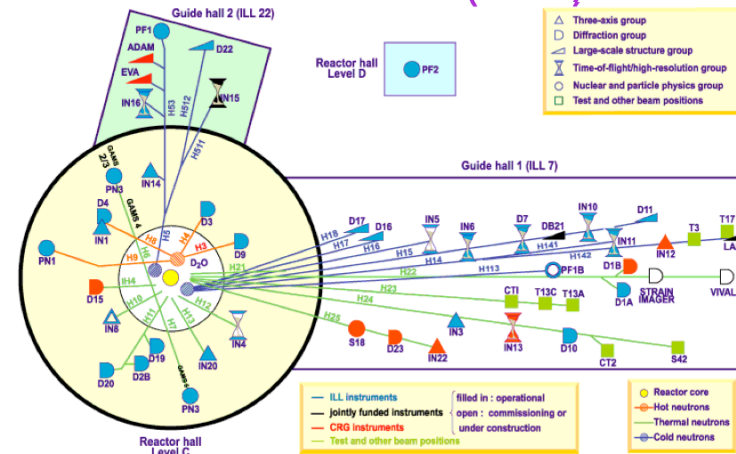


Aujourd'hui (suite)

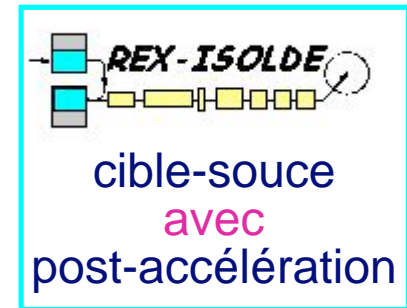
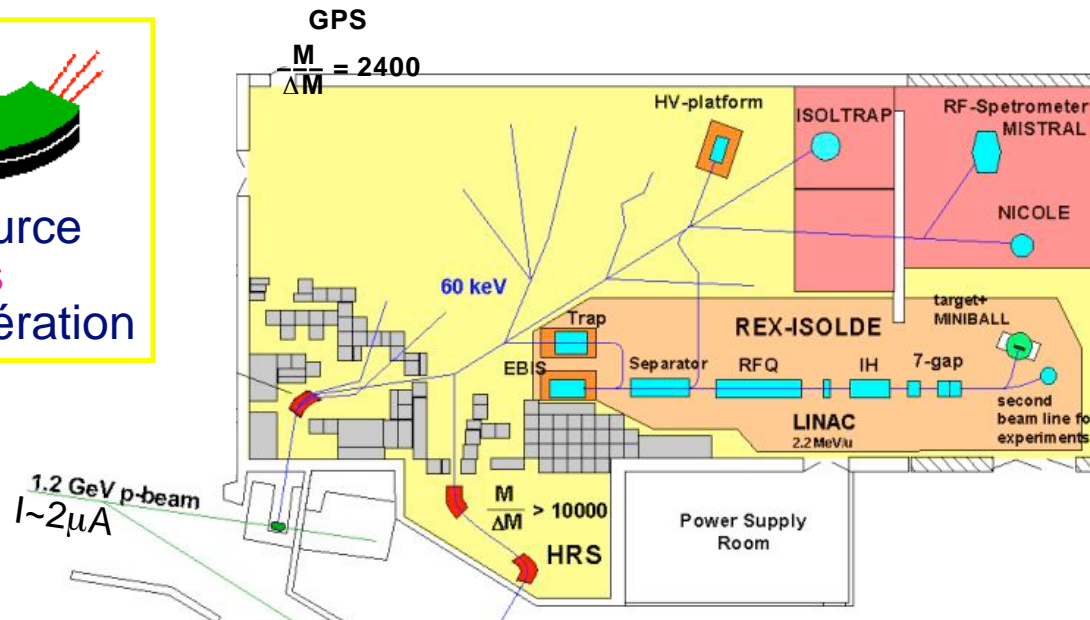
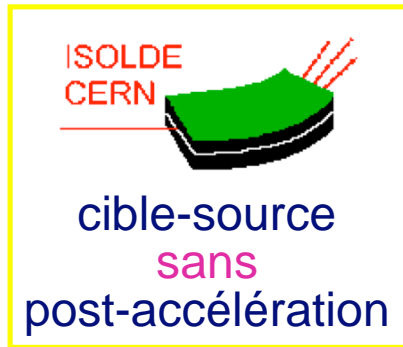
Fission induite par neutrons d'un réacteur (ILL)

ILL/Lohengrin
(MAF)

Caractéristiques ~id fragmentation



Aujourd'hui (et encore)

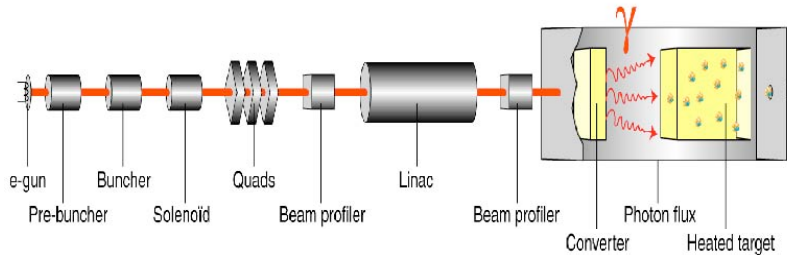


60 élts (10 isotopes)

Ion source:																						
		+		-																		
		Surface		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							

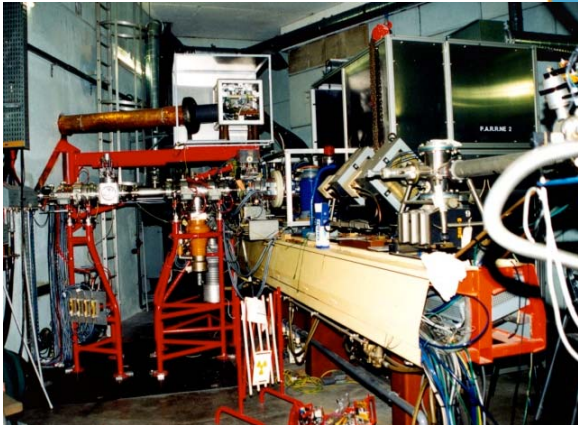
En 2009

ALTO



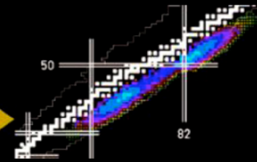
fission induite par photons
(photofission)

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



+ technique ISOL
mais sans post-accélération

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**)

une aire expérimentale:
étude des noyaux
produits par réaction

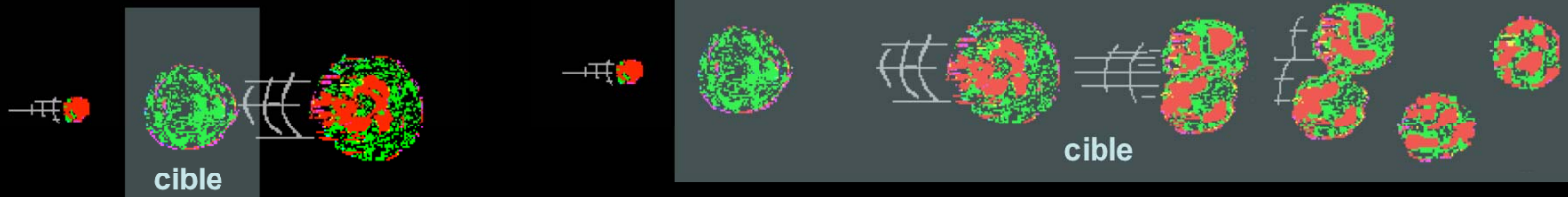
une cible mince
puis séparation
ligne basse énergie

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



convertisseur C

neutrons



Dans les cinq-dix ans à venir



équipements existants

CIME
accélérateur
 $E < 25$ AMeV

faisceau basse
énergie Lirat

faisceau d'ions
lourds stables

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

accès direct aux caves G1/G2

séparateur de masse

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

source de
deutons 5mA

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

RFQ

Les faisceaux exotiques sont rares et précieux:

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

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

⇓
détecteurs encore
plus
performants

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

σ : section efficace, Φ : intensité faisceau primaire,

N : épaisseur de cible,

ϵ_1 : efficacité de relâchement et transfert des produits,

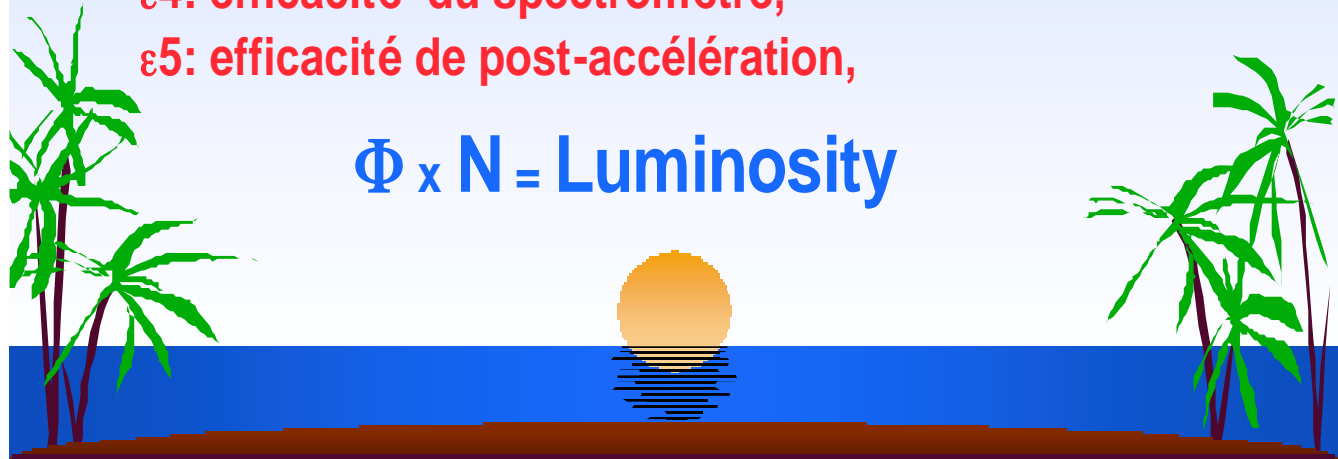
ϵ_2 : efficacité de la source d'ions ,

ϵ_3 : efficacité de perte due à la décroissance radioactive,

ϵ_4 : efficacité du spectromètre,

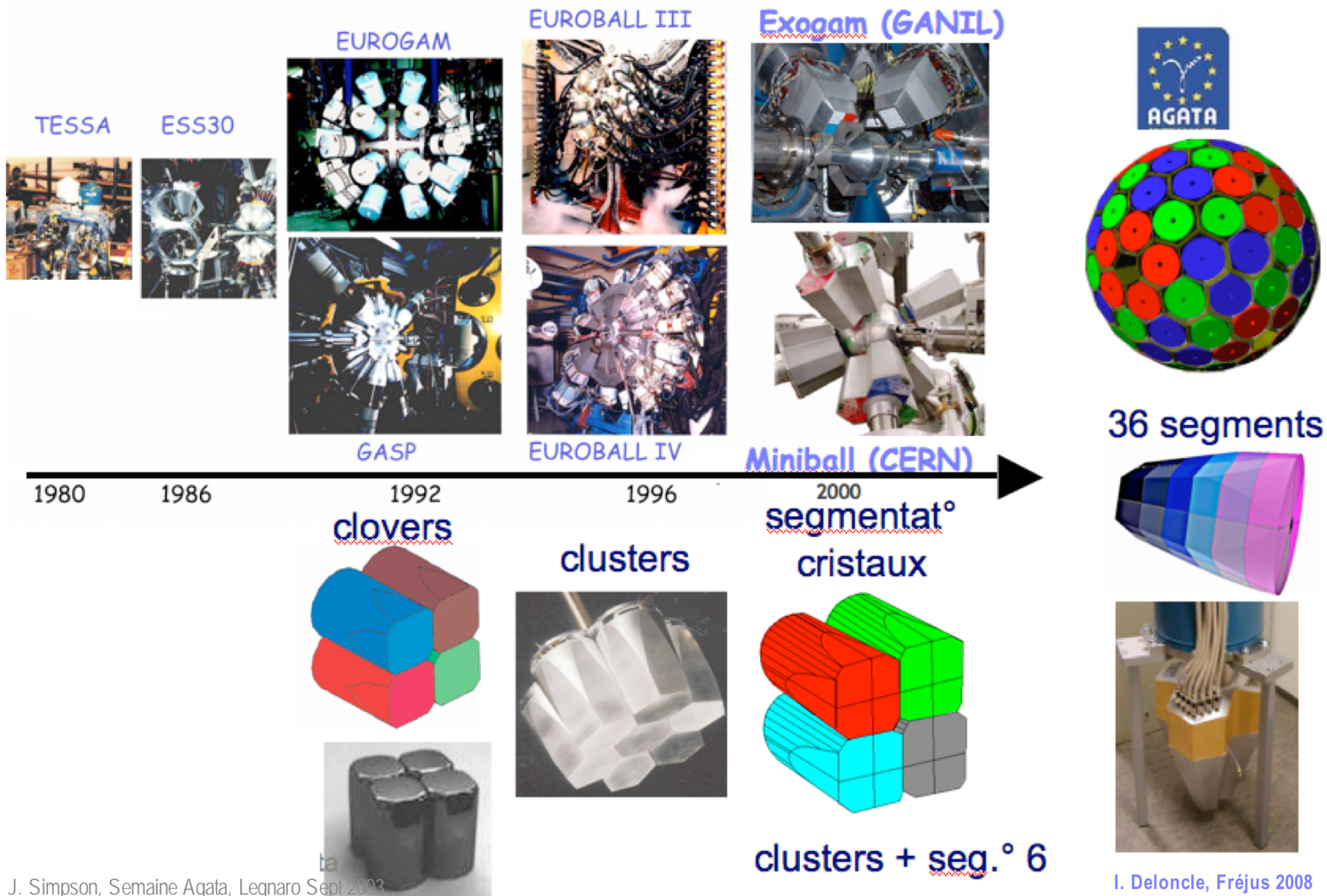
ϵ_5 : efficacité de post-accélération,

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

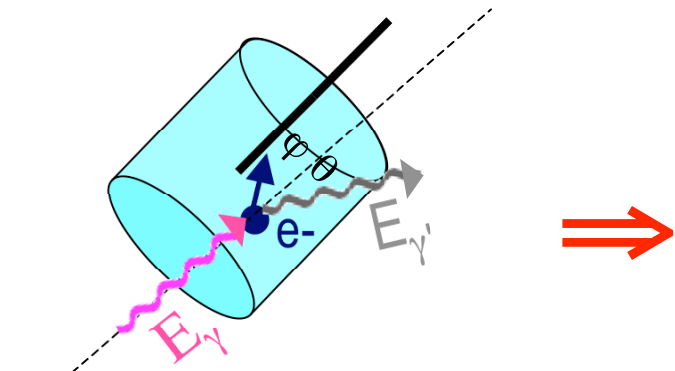


Alex C. Mueller, CERN PS-Div., June 2001

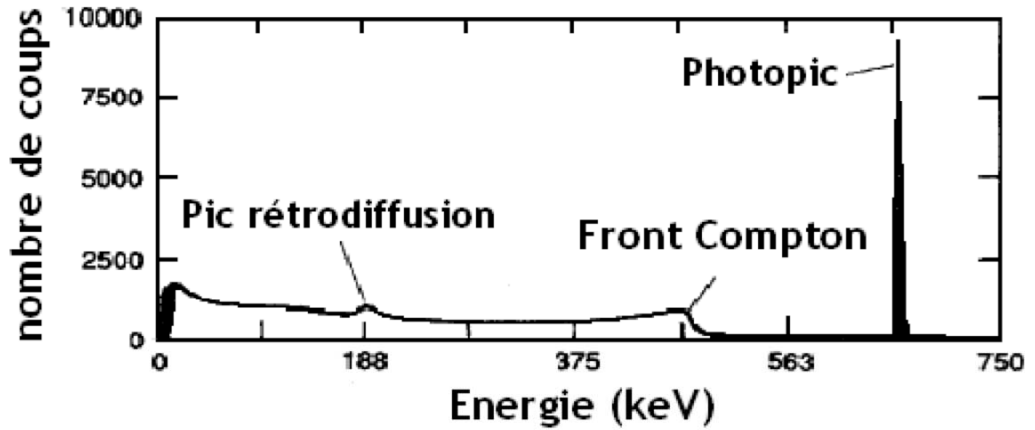
Détecteur Germanium la Next Generation



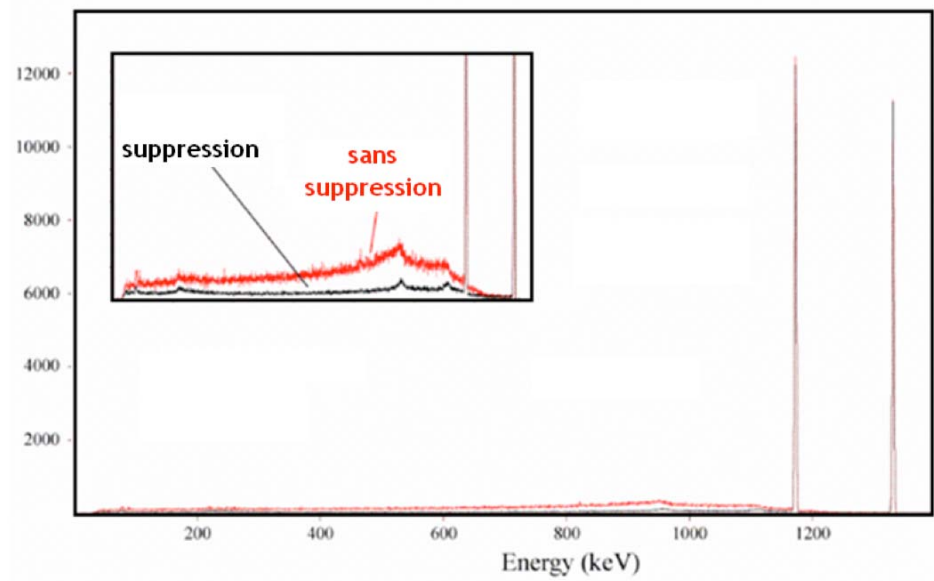
Une lutte contre la diffusion Compton



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



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



sans suppression : P/T ~ 30%

avec suppression : P/T ~ 50%

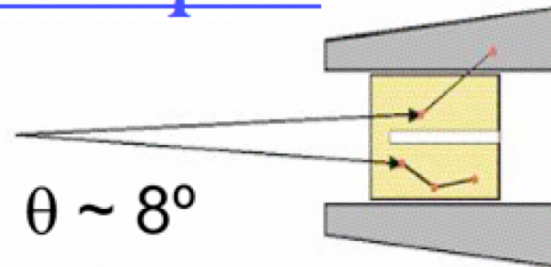
Diffusion Compton

Ge avec bouclier anti-Compton

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

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

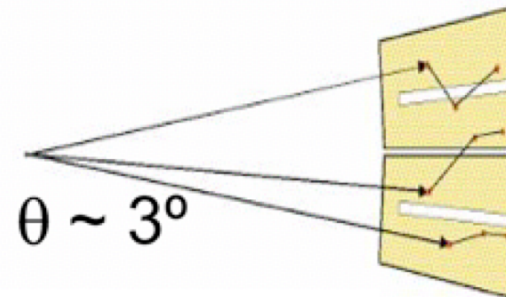
$\Omega \sim 40\%$



Sphère de Ge

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

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

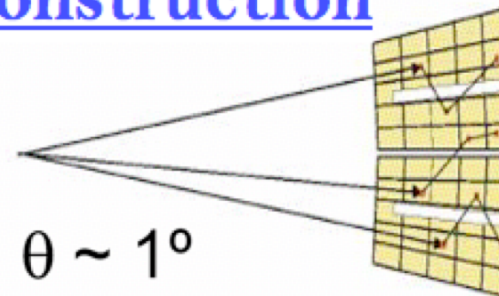


Groupe de Ge avec reconstruction

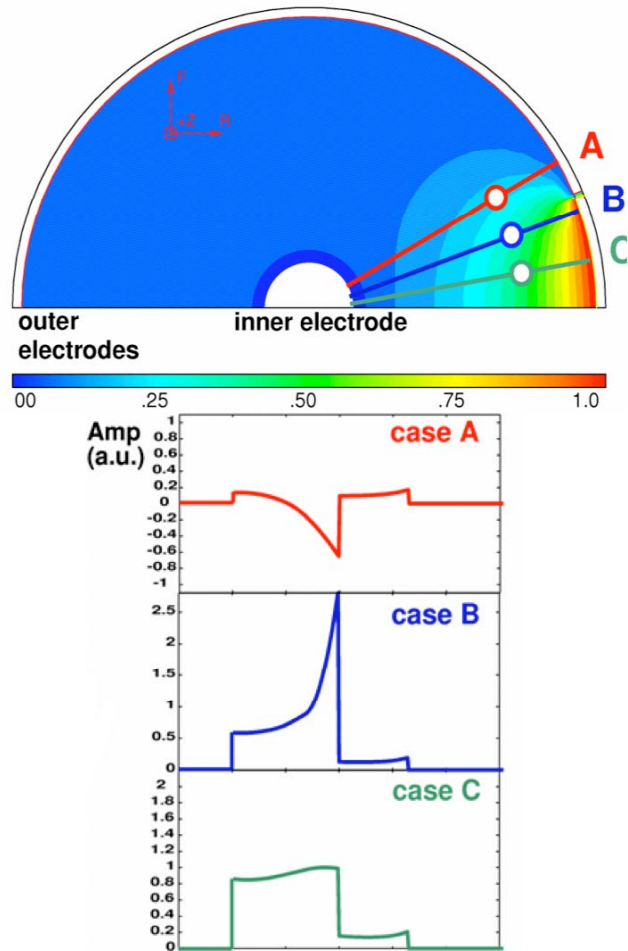
$\epsilon_{\text{ph}} \sim 50\%$

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

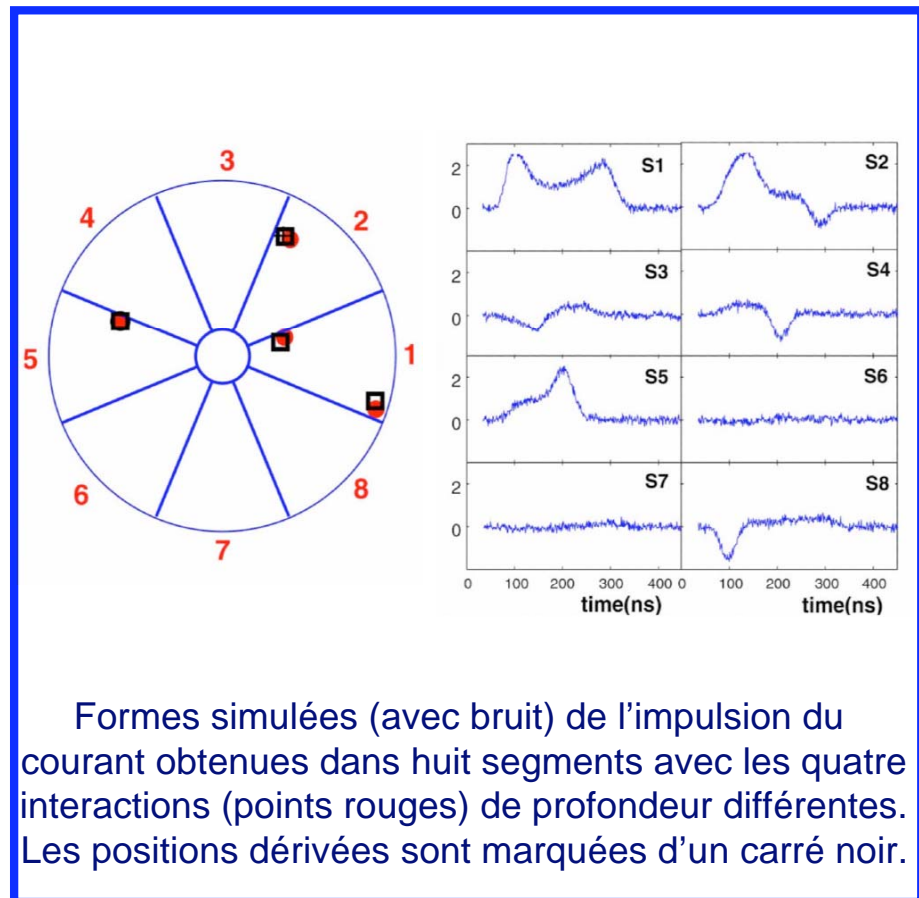
$\Omega \sim 80\%$



Segmentation des détecteurs



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



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

Et contre l'effet Doppler

Animation !

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

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



Effet Doppler:

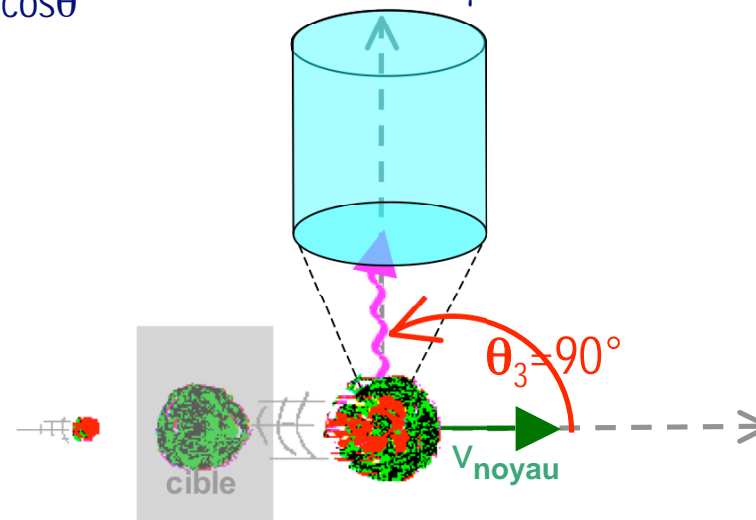
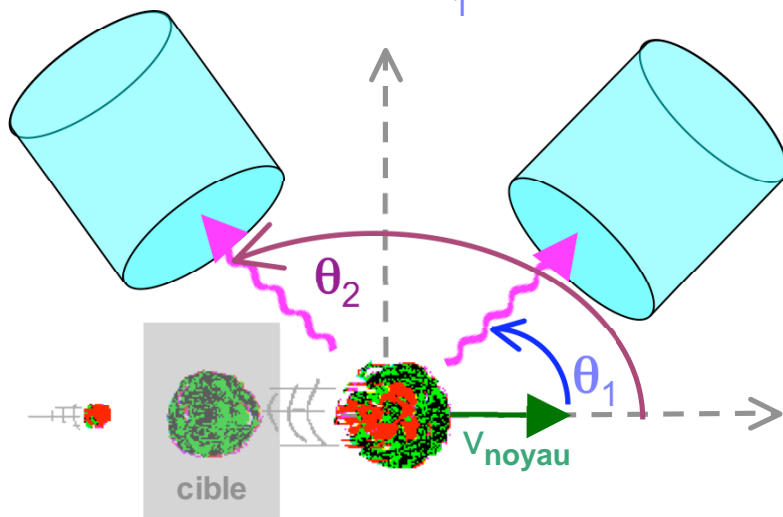
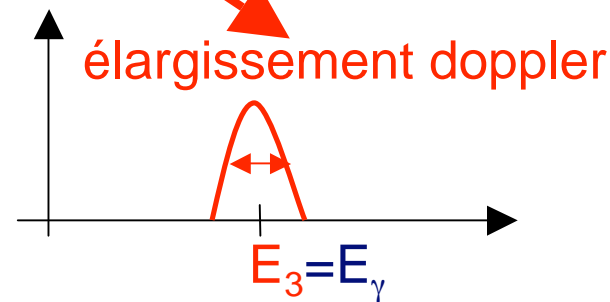
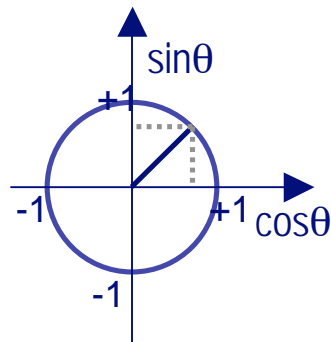
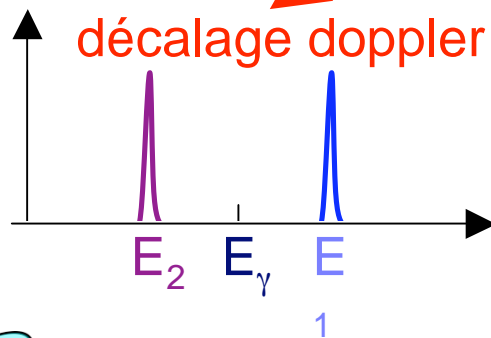
Observateur : Fréquence onde change en fct de vitesse **et** direction émetteur

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

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

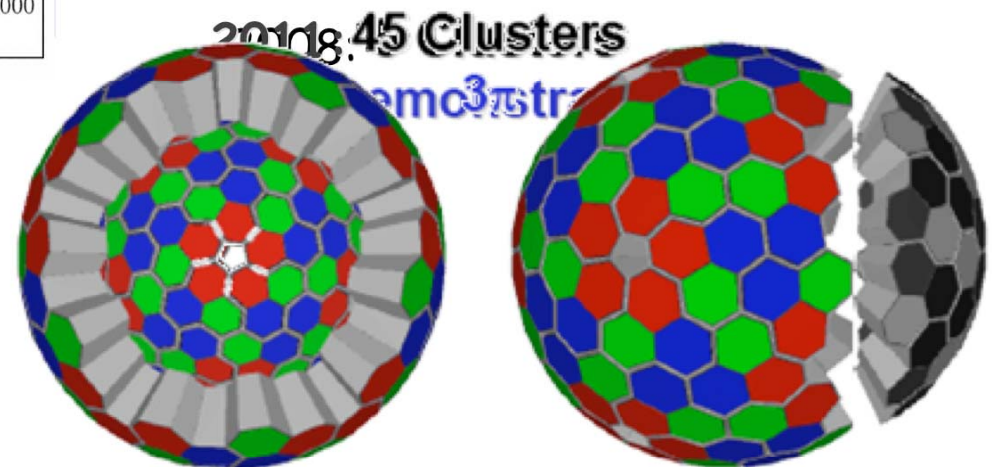
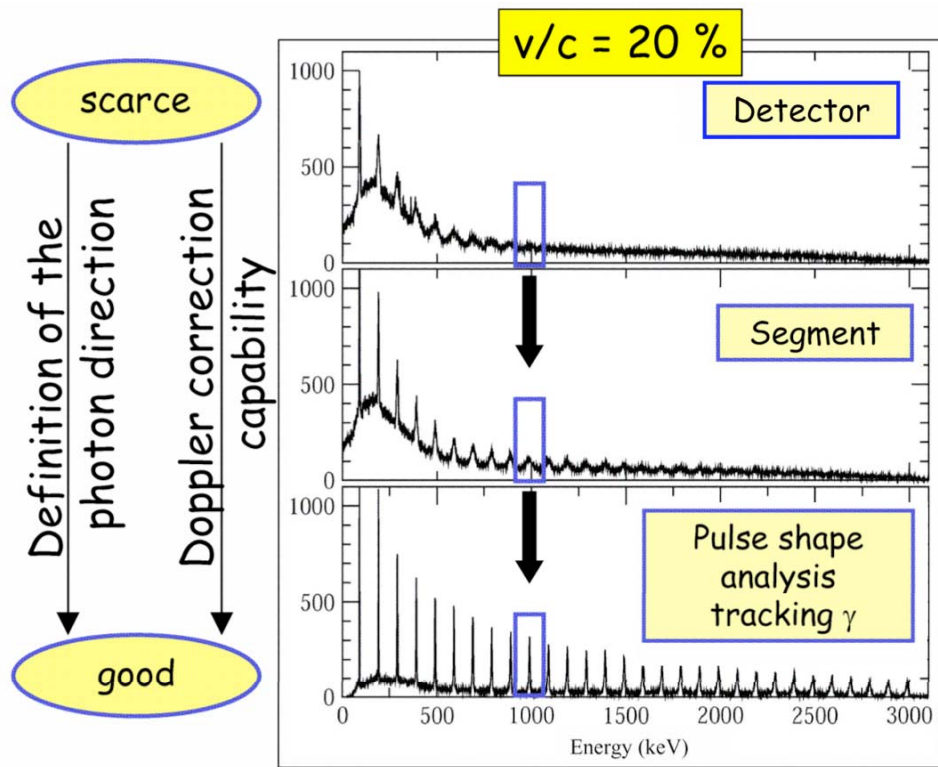
donc

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

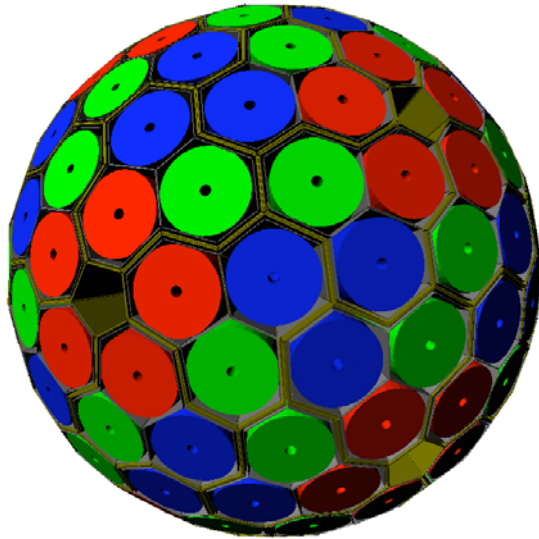


\Rightarrow réduire la taille des détecteurs ou des segments

Effet Doppler et Agata



Caractéristiques d'AGATA



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

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

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

→ reconstruction des parcours de γ

Performances d'AGATA

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

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

Résolution angulaire : ~1°

Résolution en énergie :

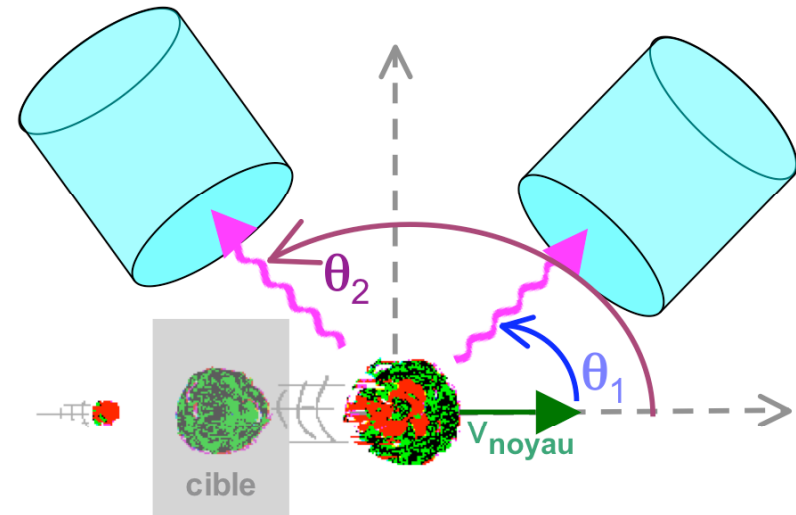
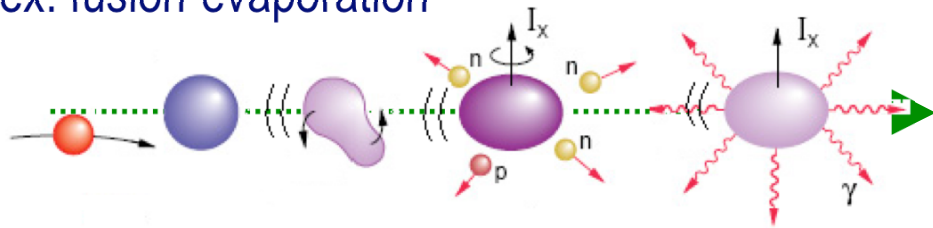
FWHM (1 MeV, $v/c=50\%$) ~ 6 keV !!!
aujourd'hui ~40 keV

Taux de comptage:

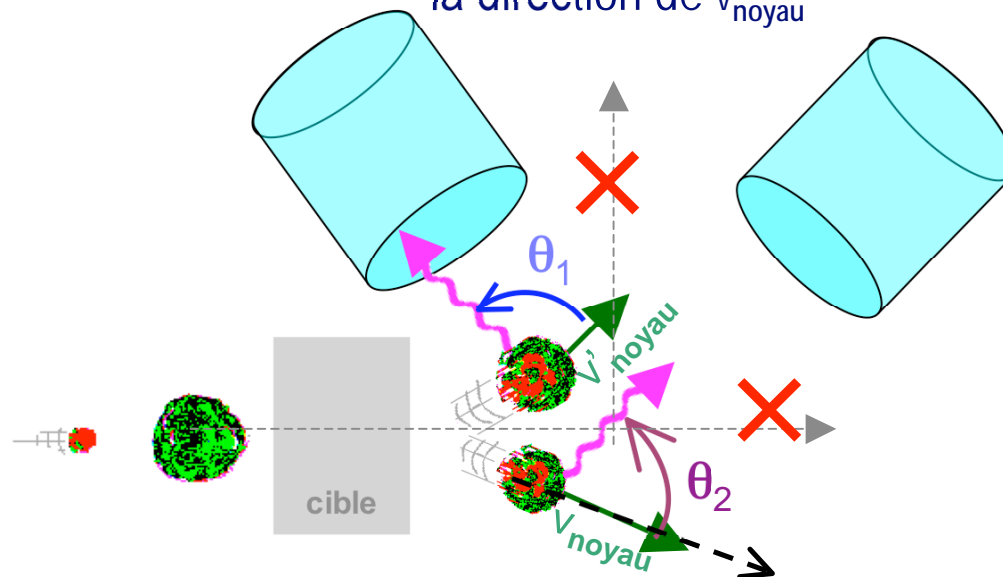
3 MHz ($M_\gamma=1$) 300 kHz ($M_\gamma=30$)
today 1 MHz 20 kHz

Retour sur Effet Doppler

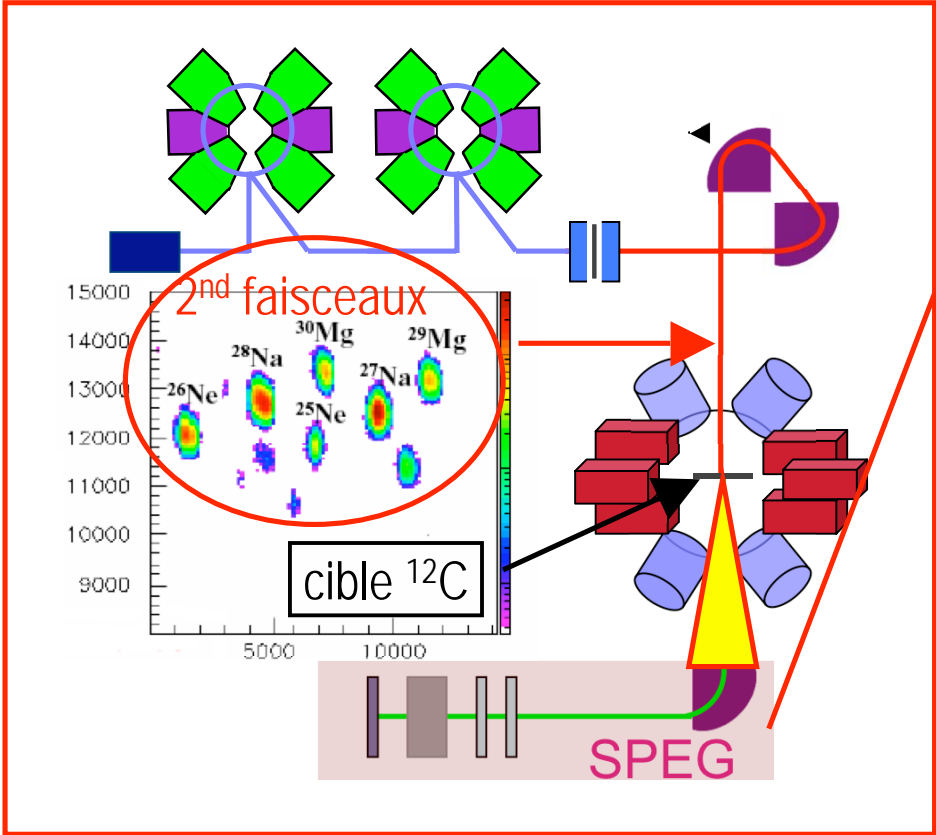
Correction Doppler impose soit d'utiliser des réactions très 'piquées' vers l'avant : ex: fusion-évaporation



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



Spectromètre



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



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

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

On ne craint rien en arrière

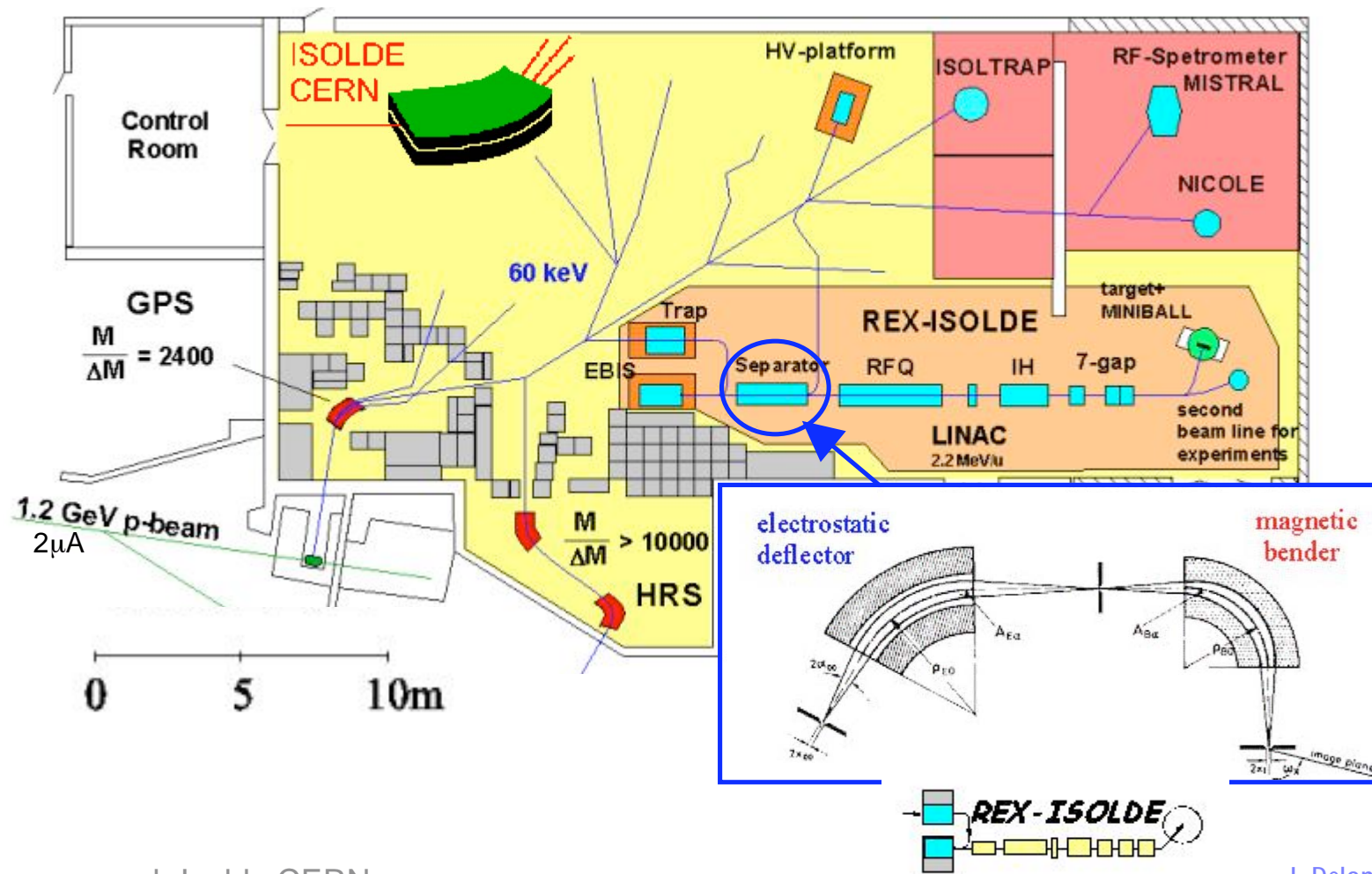
[http://joopterhaar.hjhosting.nl/Jeu% 20de% 20Boules/cochonnet.jpg](http://joopterhaar.hjhosting.nl/Jeu%20de%20Boules/cochonnet.jpg)

mais accélérer un projectile lourd + coûteux en énergie

Spectromètre en Séparateur de faisceau

ISOL : Isotopic Separator On Line

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



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

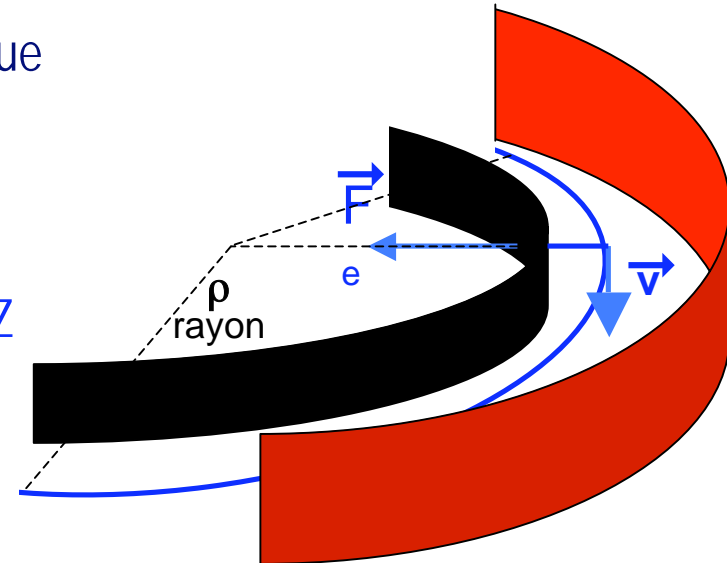
electrostatic deflector



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

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

Q charge de l'ion $\leq Z$



mouvement circulaire si

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

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

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

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

soit beaucoup ...encore :

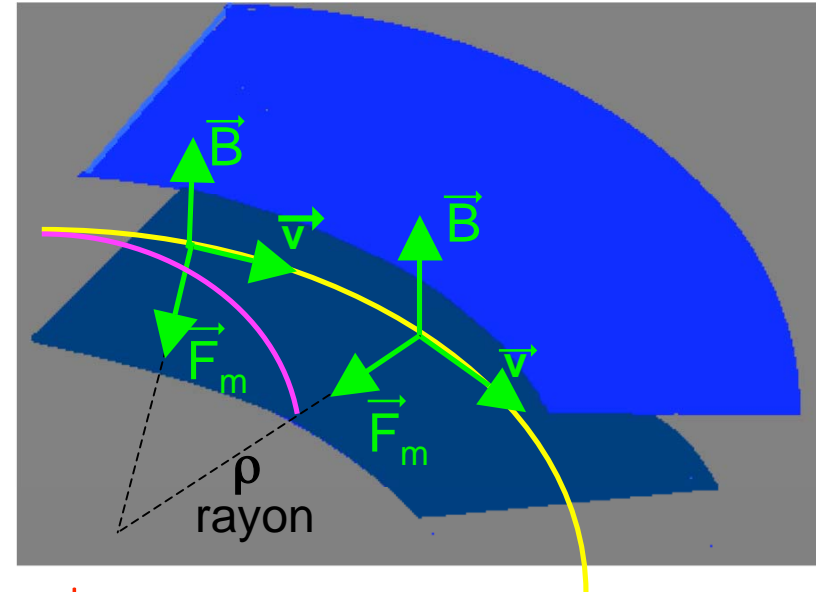
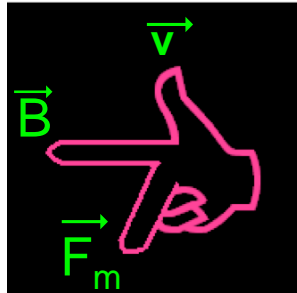
ex: même $(v, \text{ et } (M/Q))$: $(v, [M \pm m / (Q \pm q)])$

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

En mécanique classique
champ magnétique :

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

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



mouvement circulaire si

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

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

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

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

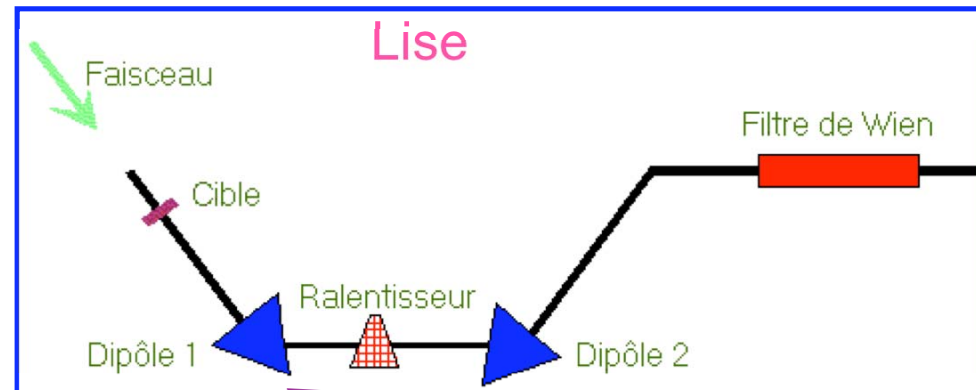
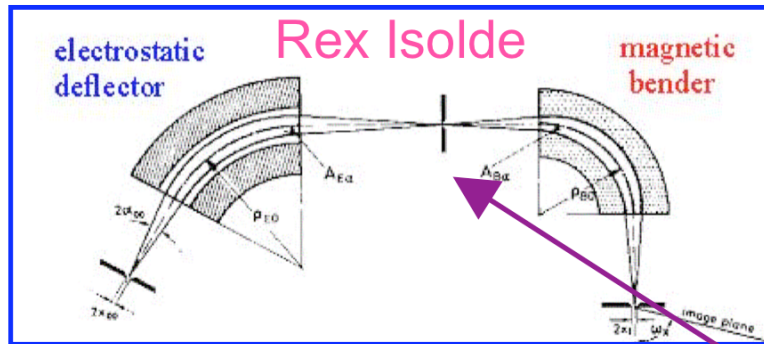
\Rightarrow noyaux avec même $[(M/Q) v]$ au même pt en sortie... (pas très sélectif)

\Rightarrow nécessité deuxième étape

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

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

2 et 3^{ème} étape



source lise : site Ganil

2^{ème} étape:

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

3^{ème} étape: Un champ E ou B finira le travail, ils discriminent en v^2

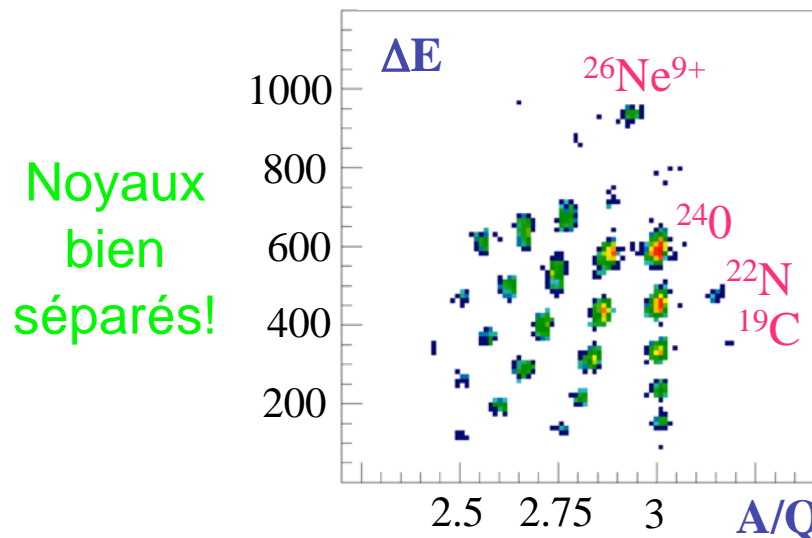
Rex/Isolde: $B\rho \rightarrow (B\rho)' = B\rho + \Delta B\rho$ avec $\Delta B\rho/B\rho = \frac{1}{2} \Delta E/E$

Pour Lise : Dipôle et

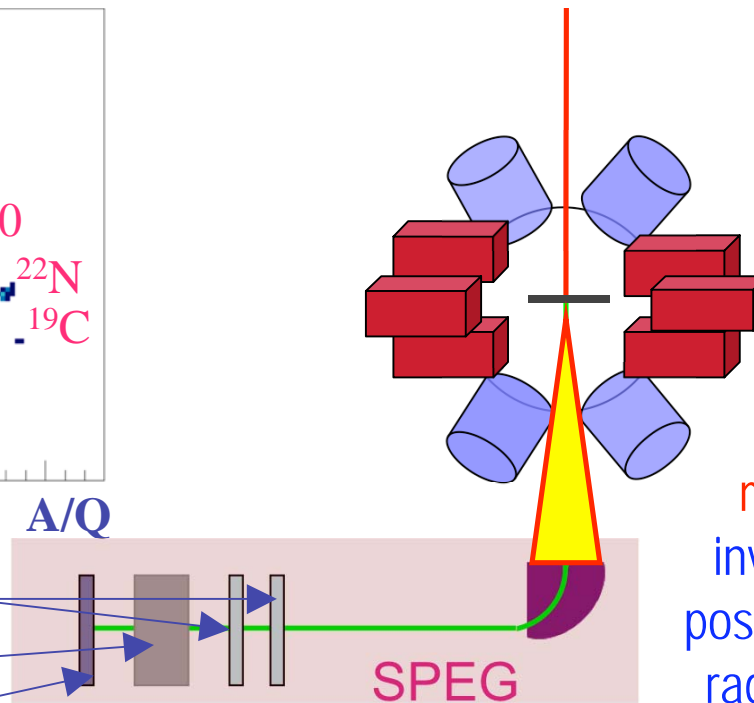
Filtre de Wien (B + E) donc transmission si $F_e = F_m \Rightarrow QE = QvB \Leftrightarrow v = E/B$

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

De SPEG à Vamos: évolution Spectromètres d'aval



X, Y chambres à dérives
 ΔE chambre d'ionisation
 E, t scintillateur



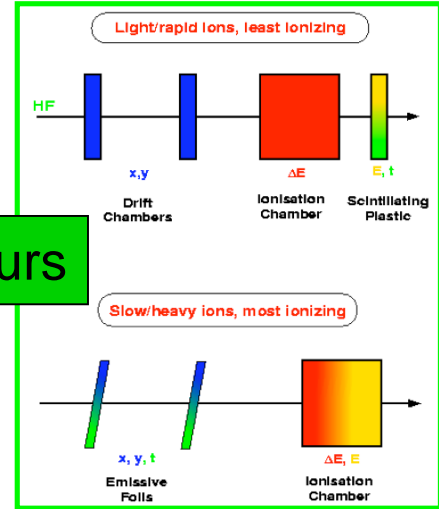
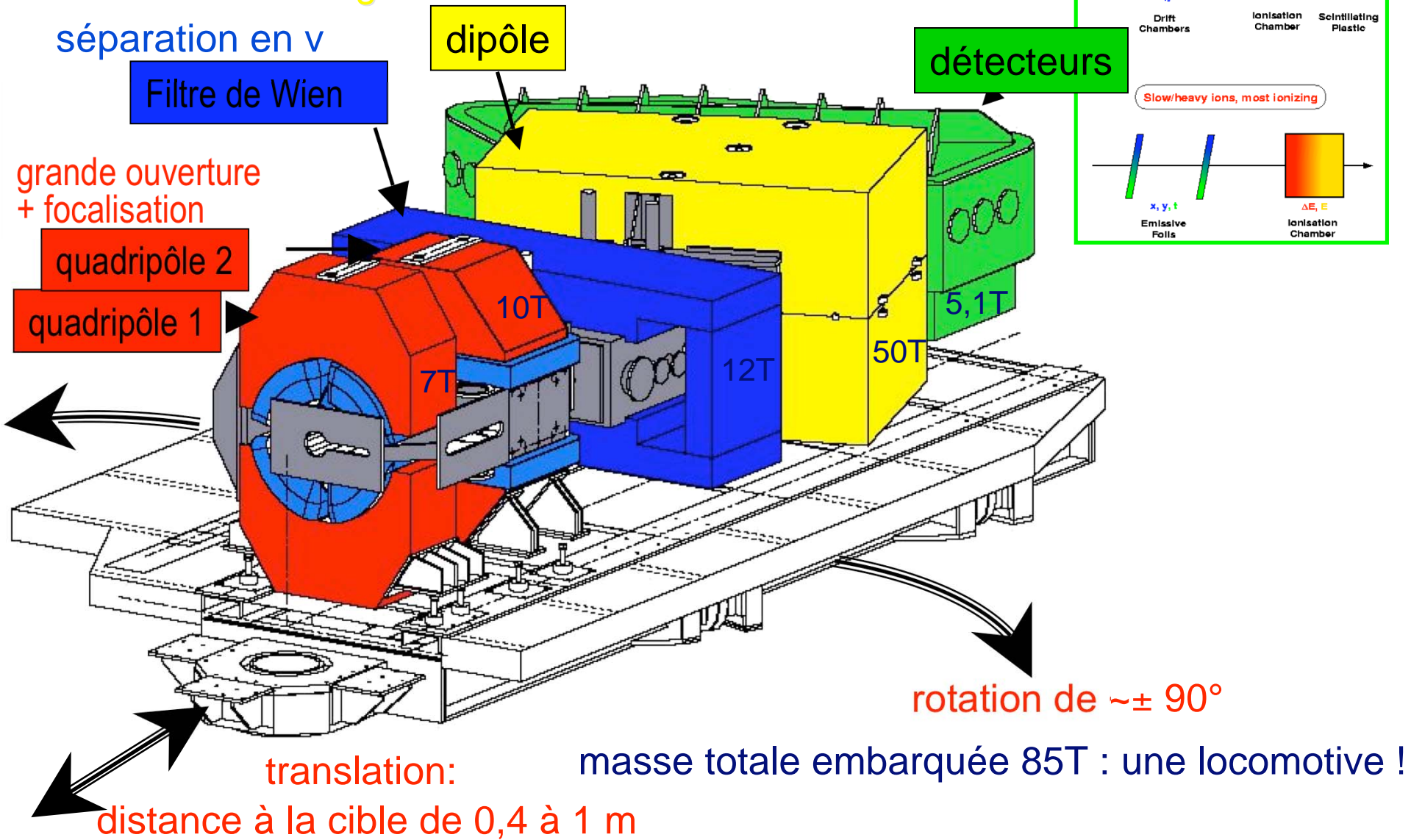
mais cinématique inverse pas toujours possible avec faisceaux radioactifs disponibles
 SPIRAL : $^6,^8\text{He}$, ^{13}N ,
 $^{14,15,19-22}\text{O}$, ^{18}F , $^{17-19,23-27}\text{Ne}$,
 $^{31-35,42-46}\text{Ar}$, $^{72-77,79,81}\text{Kr}$
 (source: site internet SPIRAL)

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

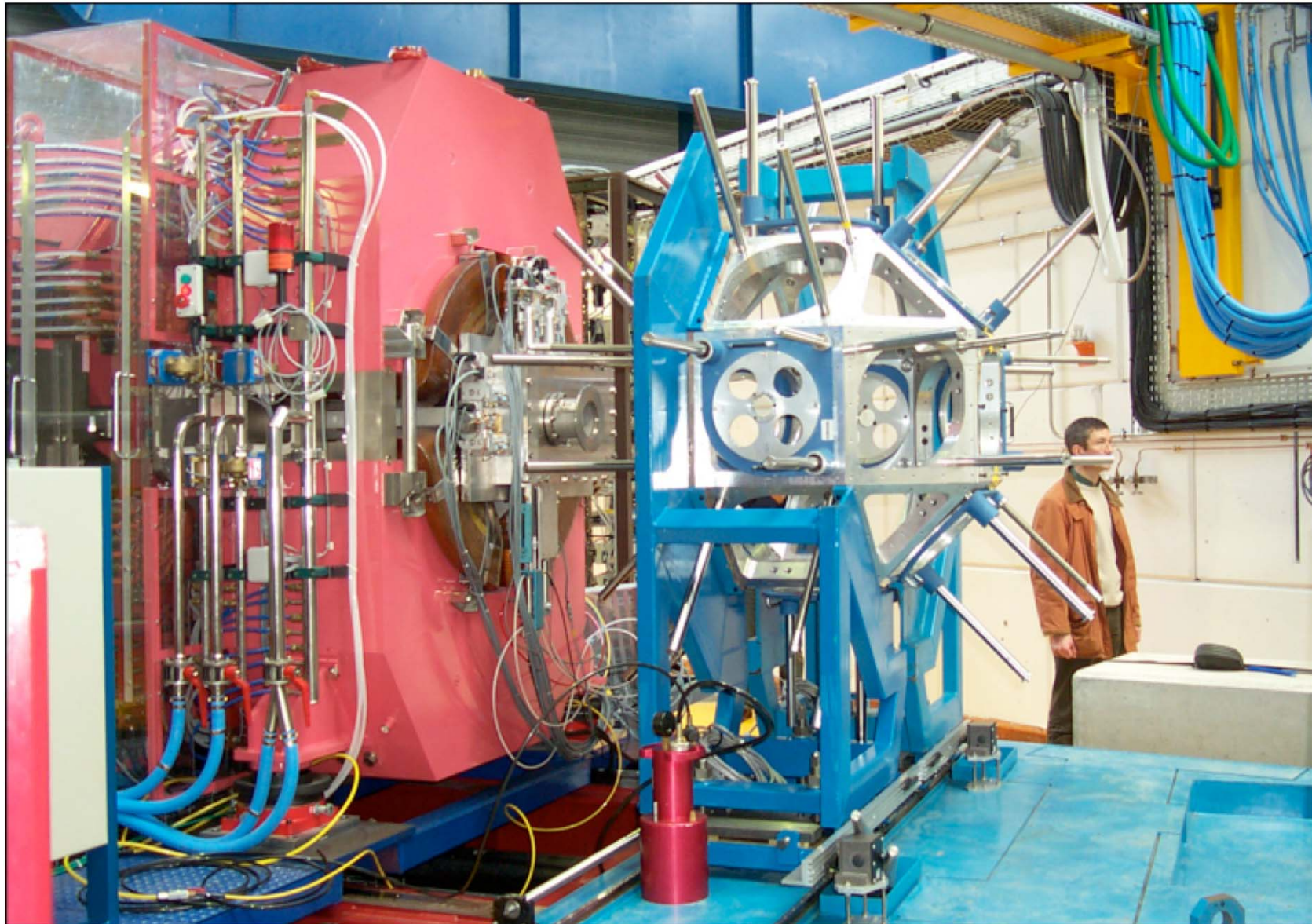
restriction due à l'acceptance limitée ⇒ progrès possible : spectromètre à large acceptance (un ordre de grandeur), adaptable à la géométrie de la réaction, mais avec fort taux de rejection du faisceau à 0° (fonction de filtre de vitesse)

Vamos pour SPIRAL

angle variable de 10 à 60°

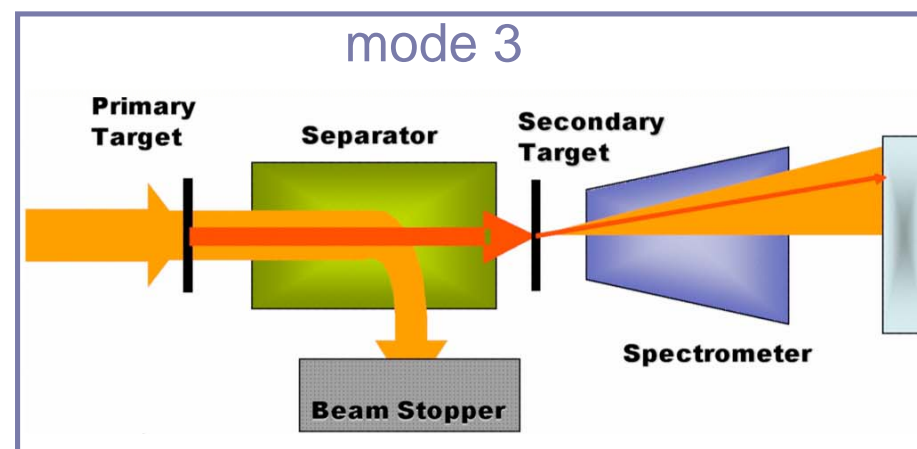
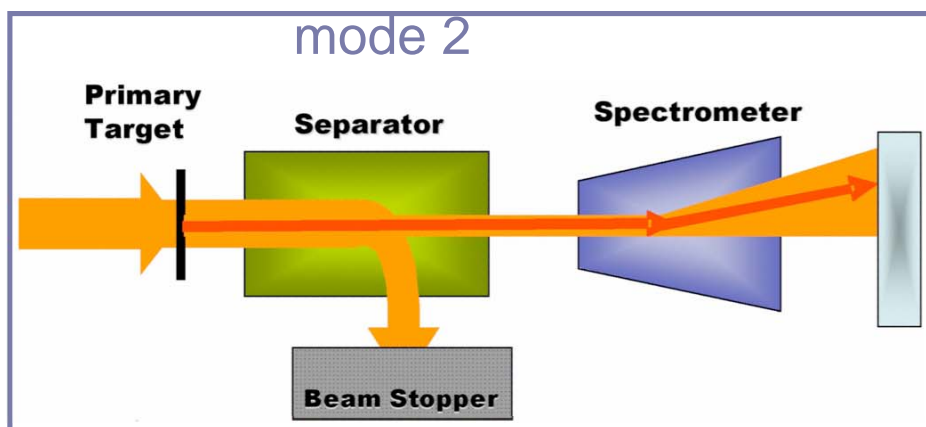
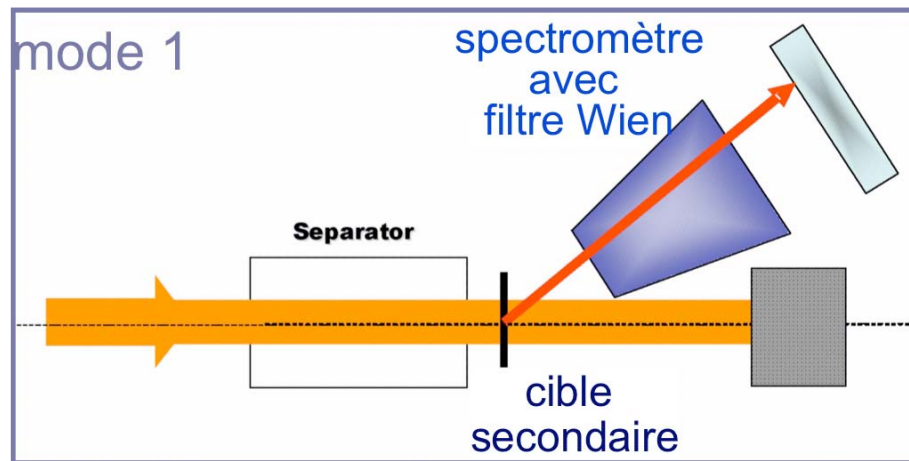


Vamos en vraie grandeur

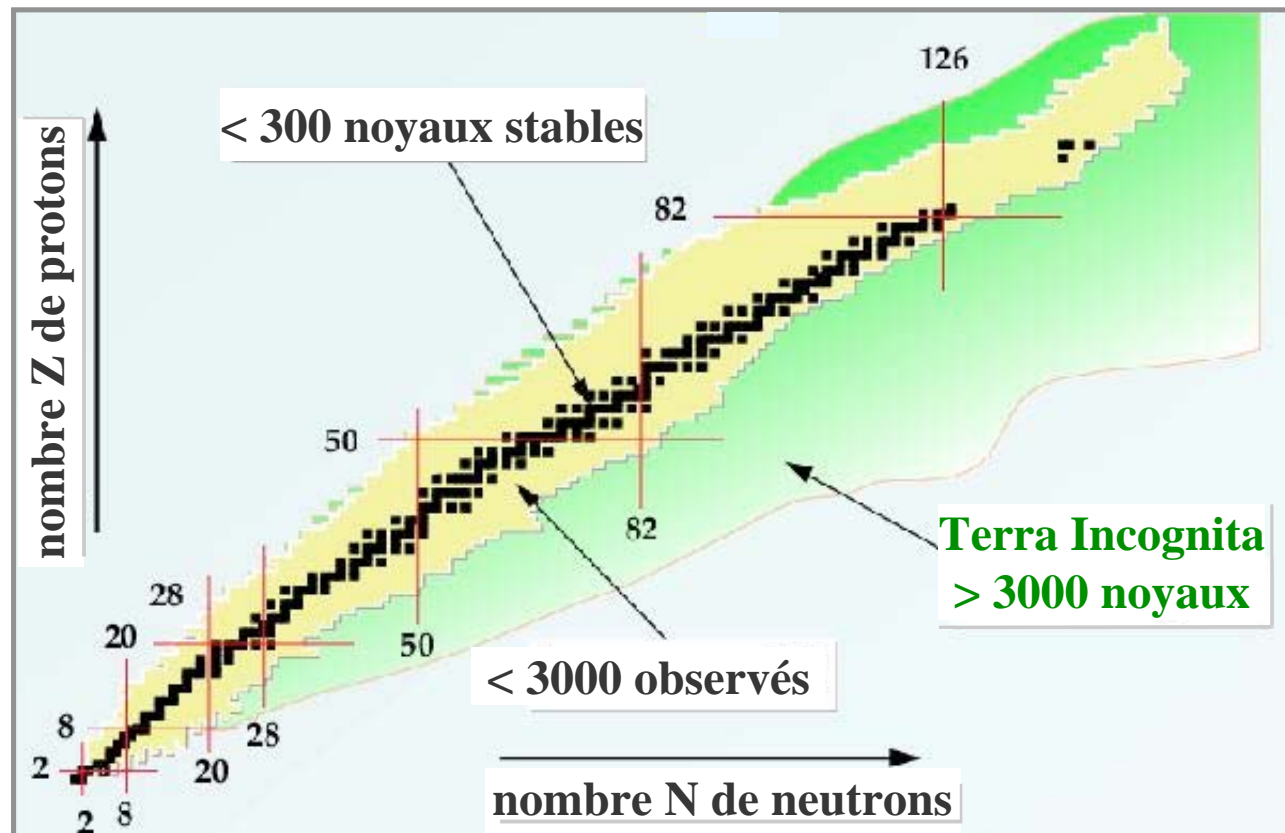


S³: The Super Separator Spectrometer for LINAG Beams

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



Nous en étions à ... Vaste Programme !



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

étudier = caractériser statiquement et dynamiquement un noyau

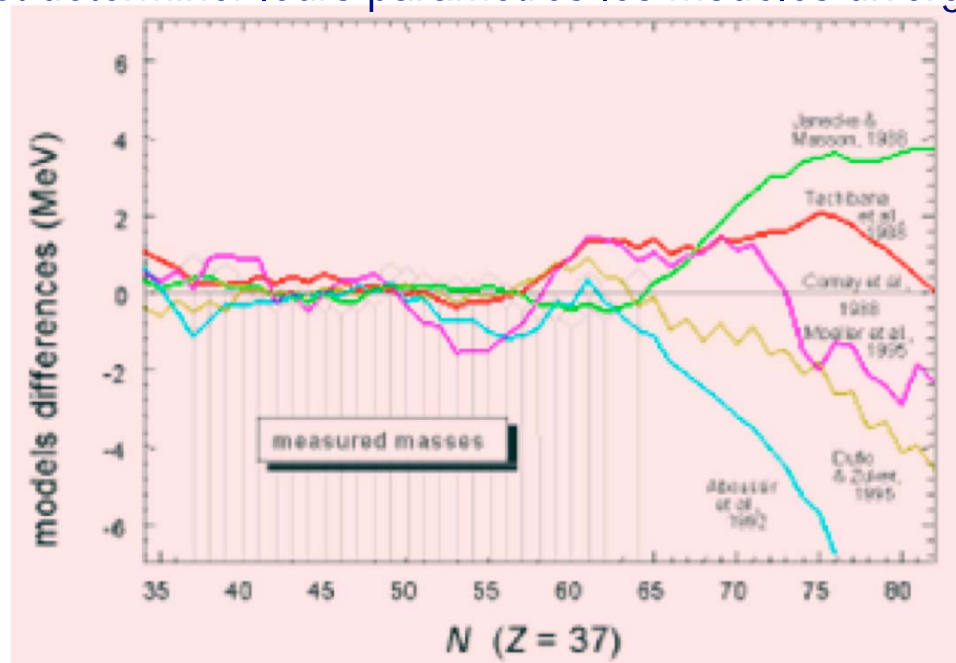
- quelle est sa masse, sa taille, sa forme ?
- que se passe-t-il quand on lui fournit de l'énergie (ou excitation)?

⇒ il faut produire chaque noyau en grand nombre

Un exemple de mesure:
mesures de masse

Pourquoi mesurer des masses

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



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

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

Mesure directes de masse avec spectromètre

si ion transmis mvt circulaire

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

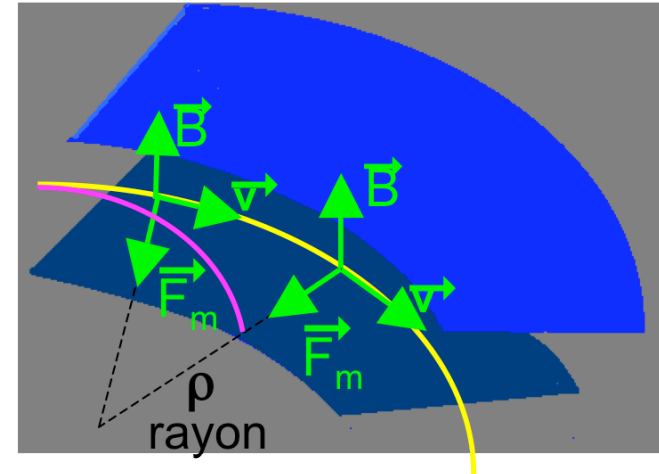
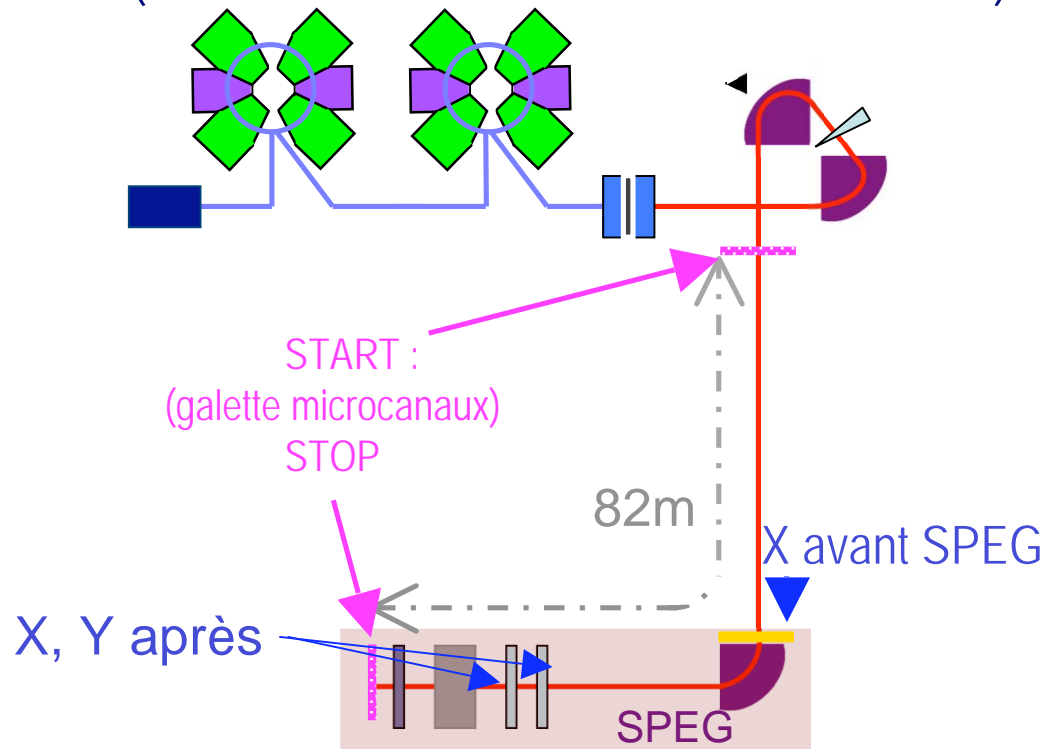
$$\Rightarrow QvB = M v^2 / \rho \quad (M = Ac^2, A = Z + N)$$

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

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

\Rightarrow il suffit de mesurer 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

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

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

$\Rightarrow \rho$ dépend de v

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

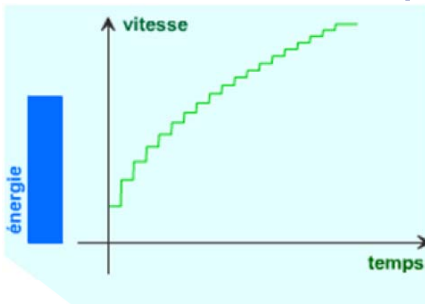
$\Rightarrow f$ indt de ρ et de v



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 :

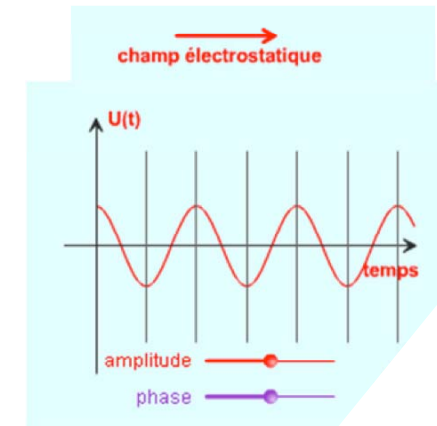
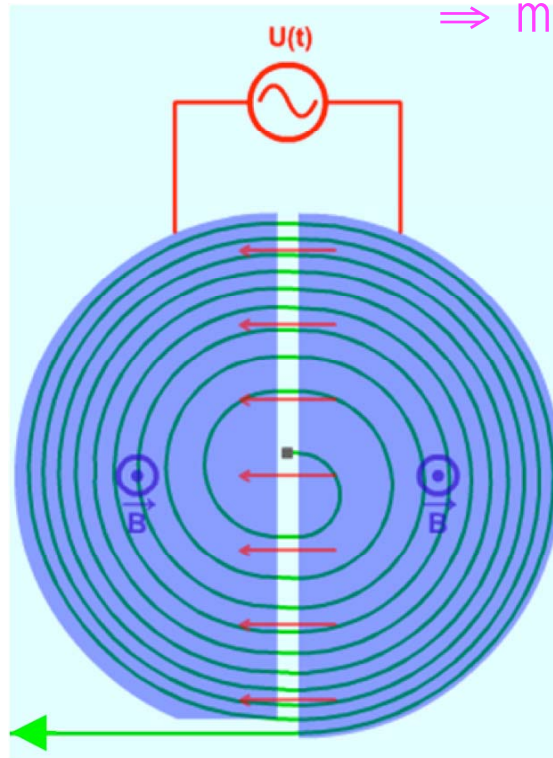
une force en plus $F = Q E$

Principe Fondamental Dynamique (PFD)

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

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

\Rightarrow mouvement en spirale



Animation :

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

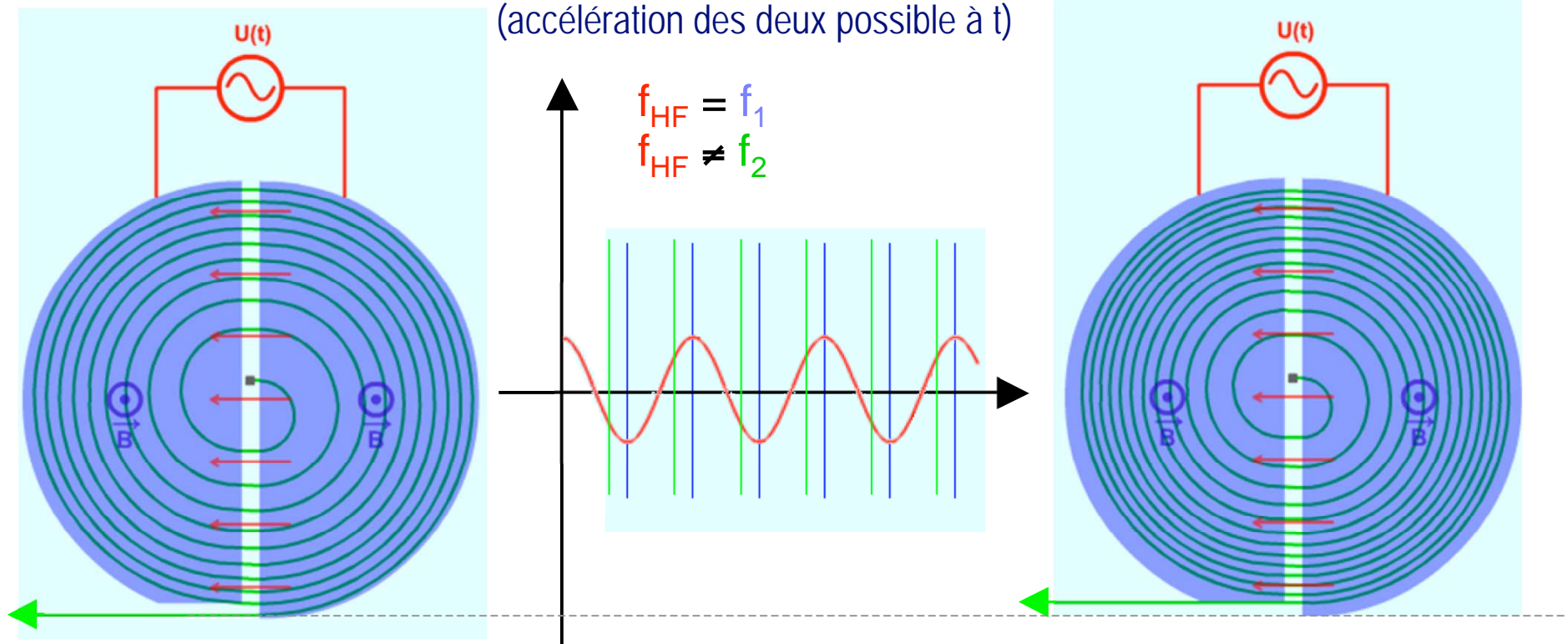
<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/cyclotron.html>

Des faisceaux différents dans cyclotron

Si deux faisceaux : $(Q_1/M_1) \neq (Q_2/M_2)$

Q/M assez proches pour que $(f_{HF} =) f_1 \sim f_2$

(accélération des deux possible à t)



1) variation f : durée dt d'accélération \searrow

à chaque tour $dv_1 \gtrsim dv_2$

~ 200 tours $\Rightarrow v_1 > v_2, t_1 - t_2 > 0$

200 tours $\Rightarrow d \sim \text{km} !!!$ précision \nearrow

2) différence de Q/M : $(Q_1/M_1) \gtrsim (Q_2/M_2)$

par ex: $Q_1 = Q_2$ mais $M_1 < M_2$

$\Rightarrow (dv_1/dt_1) = (Q_1/M_1)E \gtrsim (dv_2/dt_2) = (Q_2/M_2)E$

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

Des faisceaux ≠ dans cyclotron

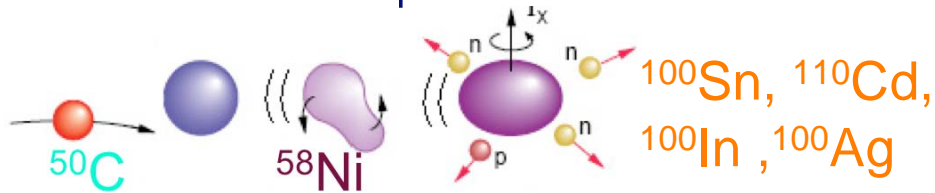
M. Chartier et al., PRL 12 Vol. 77 (1996) 2400, Hyp. Int. 132 (2001) 275

Première étape :

Avec 1^{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

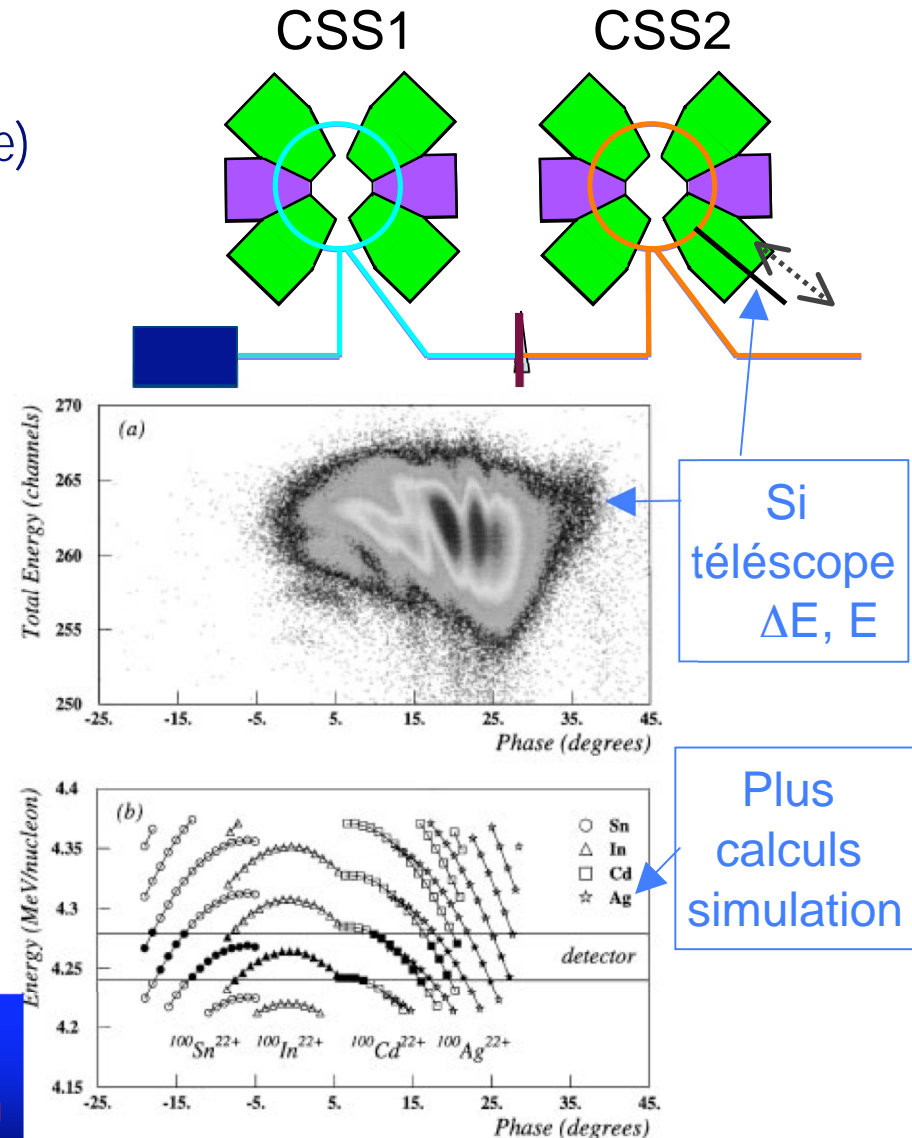


seuls leurs 22⁺ pourront être accélérés
 dans CSS2 (tolérance $2 \cdot 10^{-4}$)

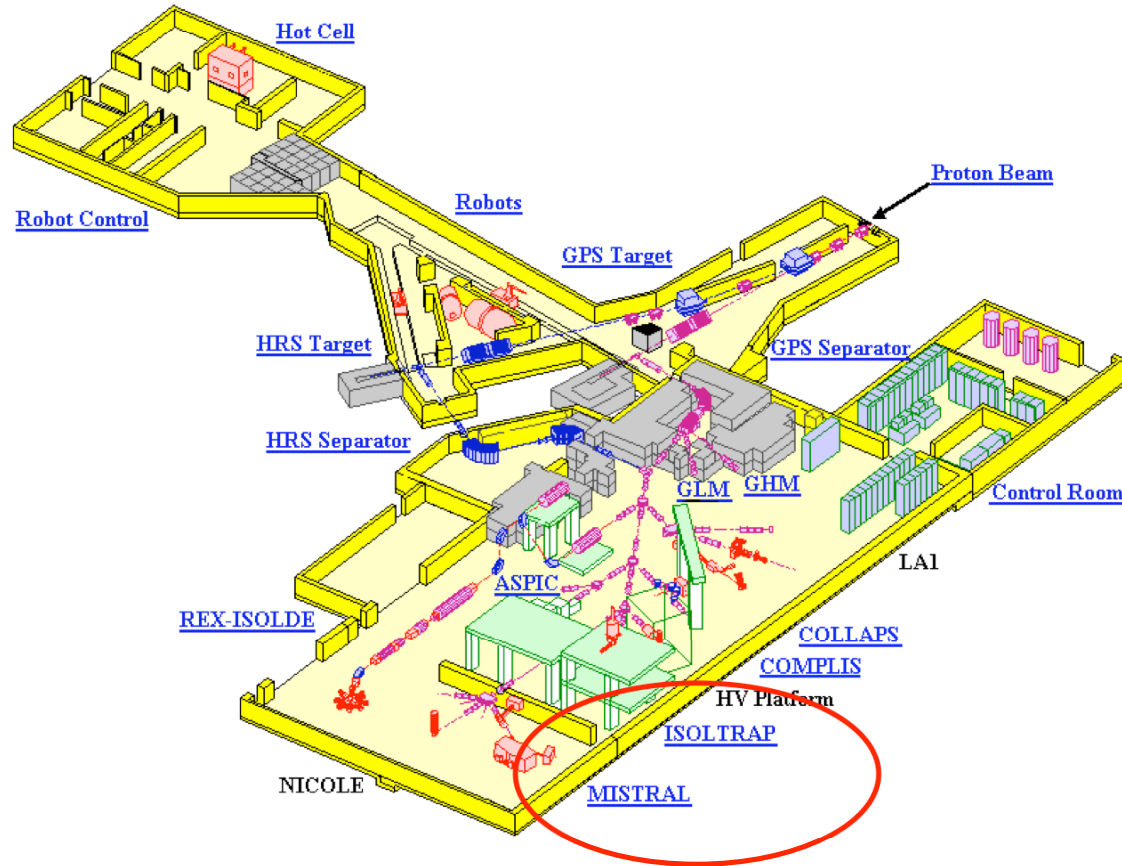
Troisième étape :

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

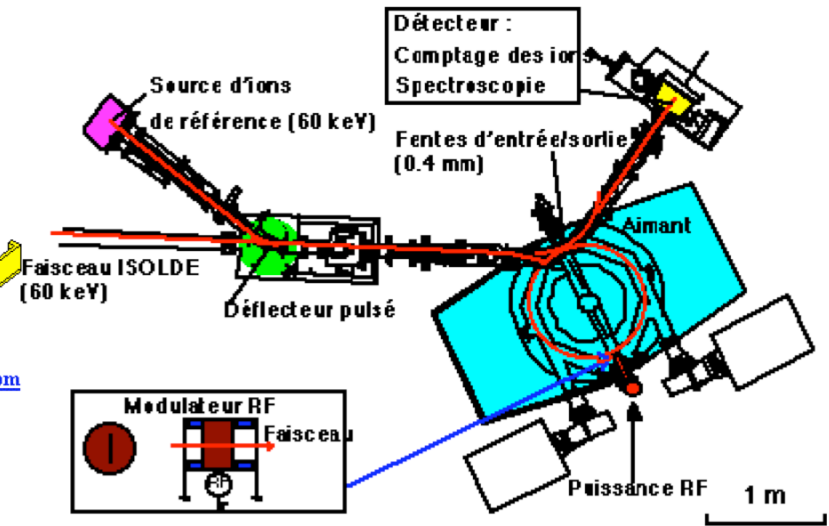
⇒ $M \pm \delta M$
 avec $\delta M/M \approx 3 \cdot 10^{-6}$ pour In
 et $\delta M/M \approx 10^{-5} \cdot 10^{-6}$



A Isolde : Mistral et Isoltrap mesure de la fréquence cyclotron



Mistral

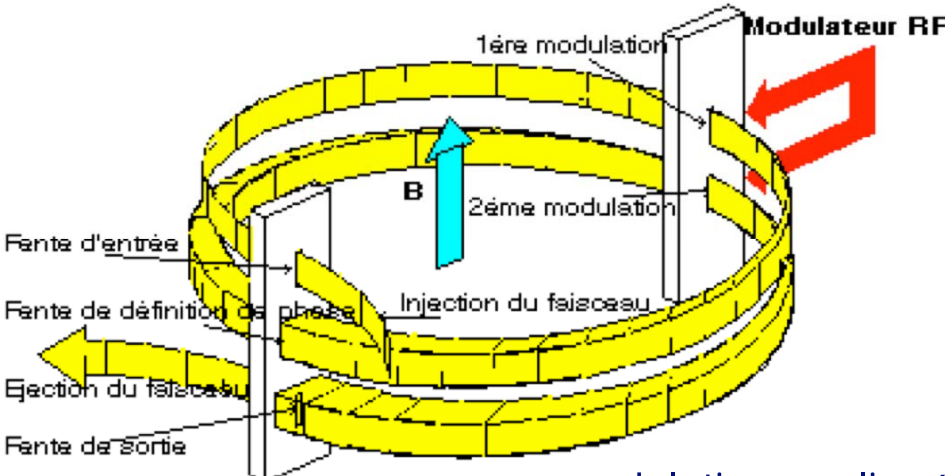
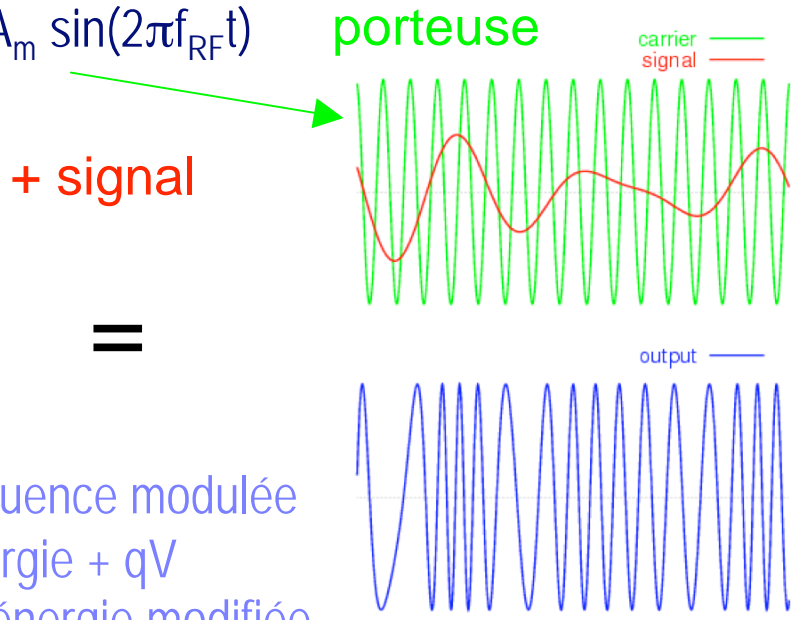


faisceau de Isolde, non post accéléré
mesures de et à basse énergie

Mistral

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

+ champ **E** variable (potentiel élect V)
 (modulation radio fréquence RF):
 $A(t) = A_m \sin(2\pi f_{RF} t)$



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

Mesures avec Mistral

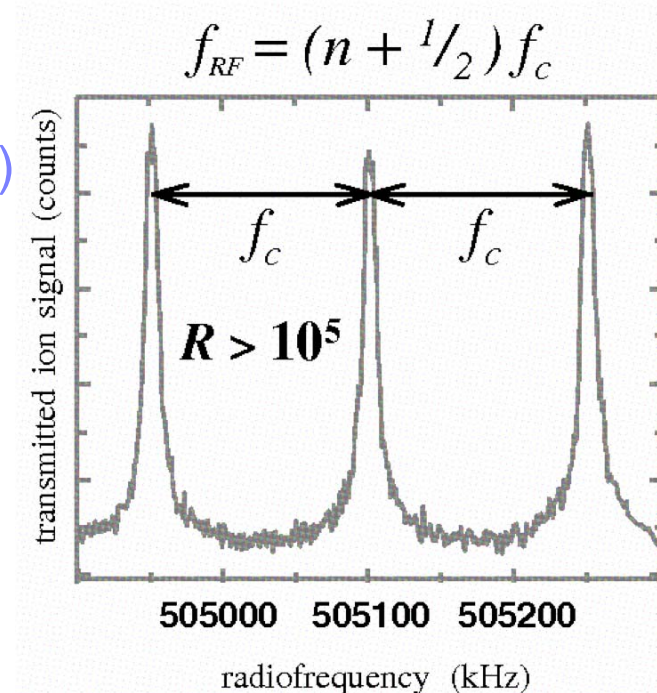
$E_{em} = E_0 + E_m \sin(2\pi f_{RF} t) + E_m \sin(2\pi f_{RF} (t+t_c))$
pour retrouver E_0 et $r = R$
il faut $f_{RF} = (n + 1/2) f_c$
sinon pas de sortie possible !

Pas si simple :

B pas parfait, inhomogène

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

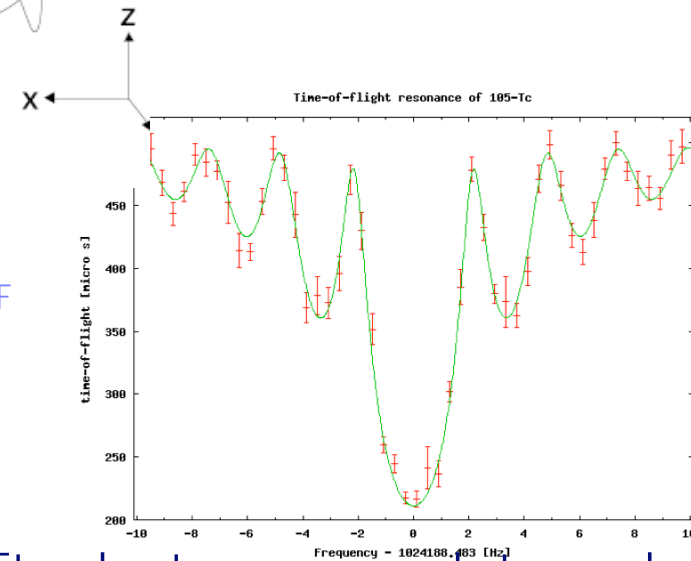
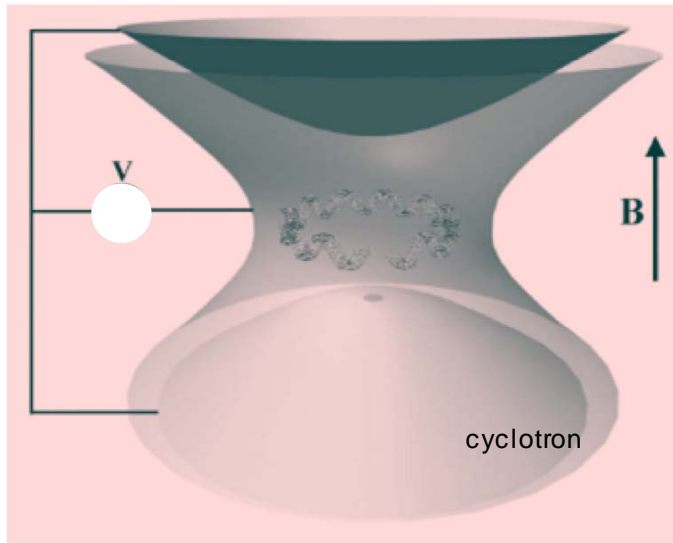
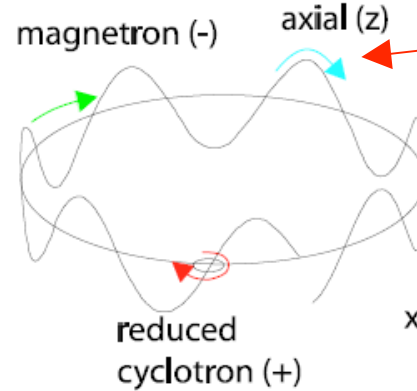
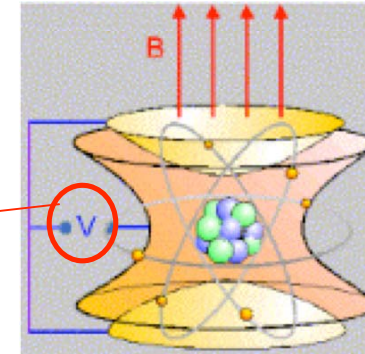
⇒ $M \pm \delta M$
avec $\delta M/M = 5 \cdot 10^{-7}$ pour Na



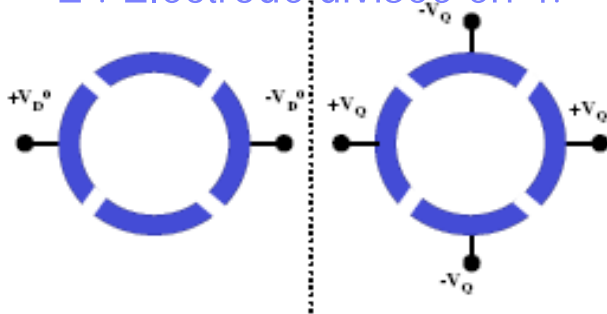
3 pics de transmission
mesure avec un multiplicateur
d'électrons

Isoltrap

Trappe de Penning



E : Electrode divisée en 4:



⇒ excitation avec E_{RF}
 ⇒ transformation
 magnétron
 cyclotron

Et au bout une mesure de temps de vol

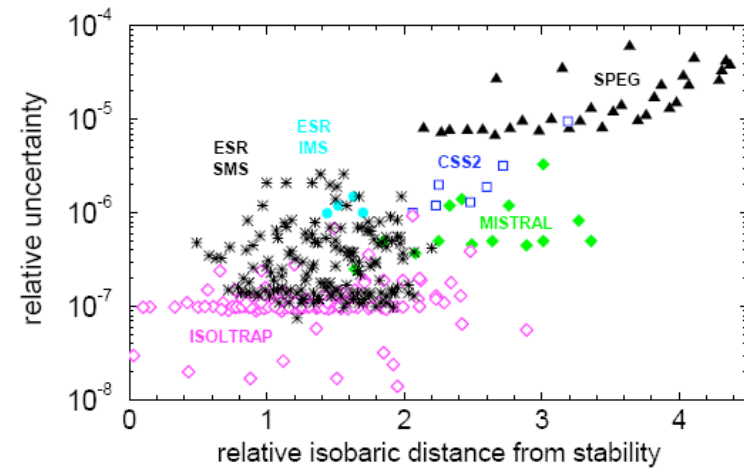
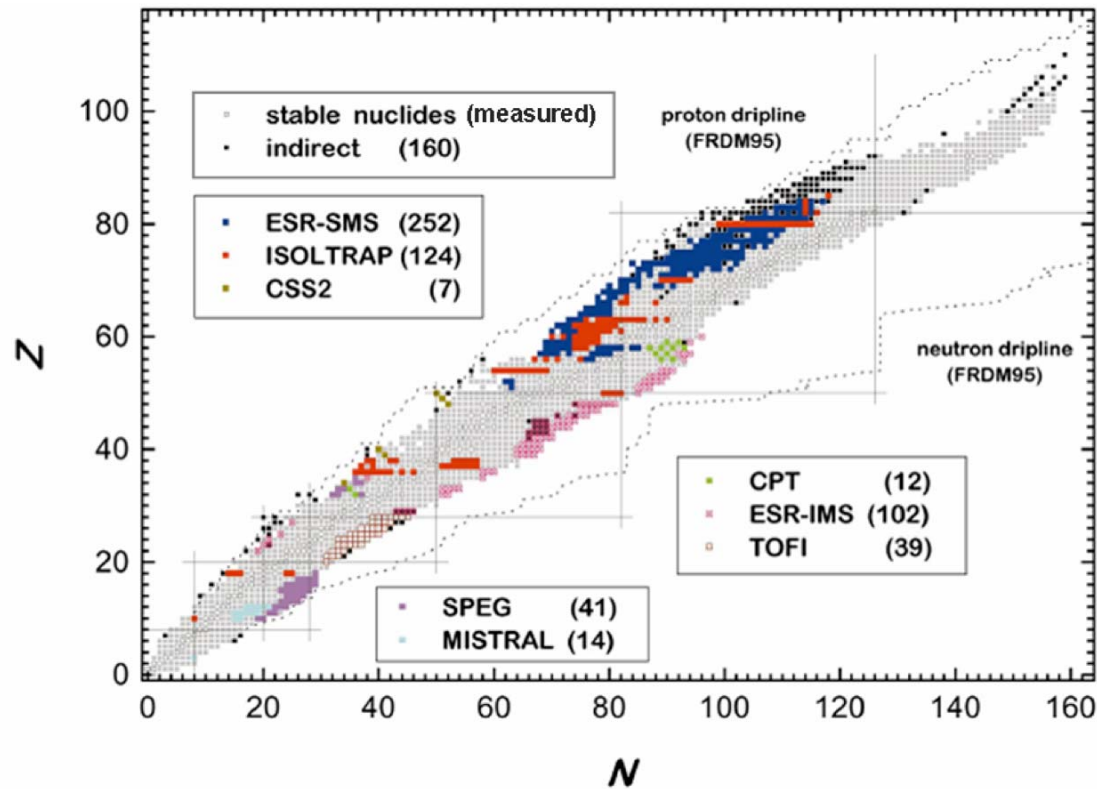
$$\text{si } f_{HF} = F_{\text{cyclotron}} \quad E = E_{\text{max}}, \quad V = V_{\text{max}}$$

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

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

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

Zones des masses mesurées



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

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

Fin

Merci à tous les contributeurs du WEB....