

# Comprendre le noyau



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

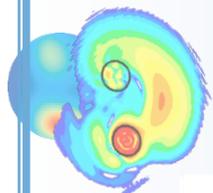
- I. Les échelles de la physique nucléaire et comment voir le noyau ?
- II. La « glue » du noyau et ses conséquences
- III. Ca pèse combien un noyau ? Masse et énergie de liaison
- IV. Les noyaux instables. Combien y en a ? Comment on les fabrique ?

## Deuxième cours : En théorie ça se passe comment ?

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

## Troisième cours : La trousse à outils du physicien nucléaire

- I. Comment on étudie les noyaux ?
- II. Comment on fabrique les noyaux pour les étudier ?
- III. Les réactions directes
- IV. Ce qui chamboule notre vision du noyau...



# LA QUÊTE DE L'EXOTISME

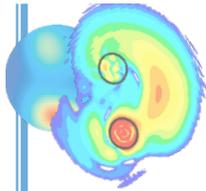
## (I) LES ACCÉLÉRATEURS



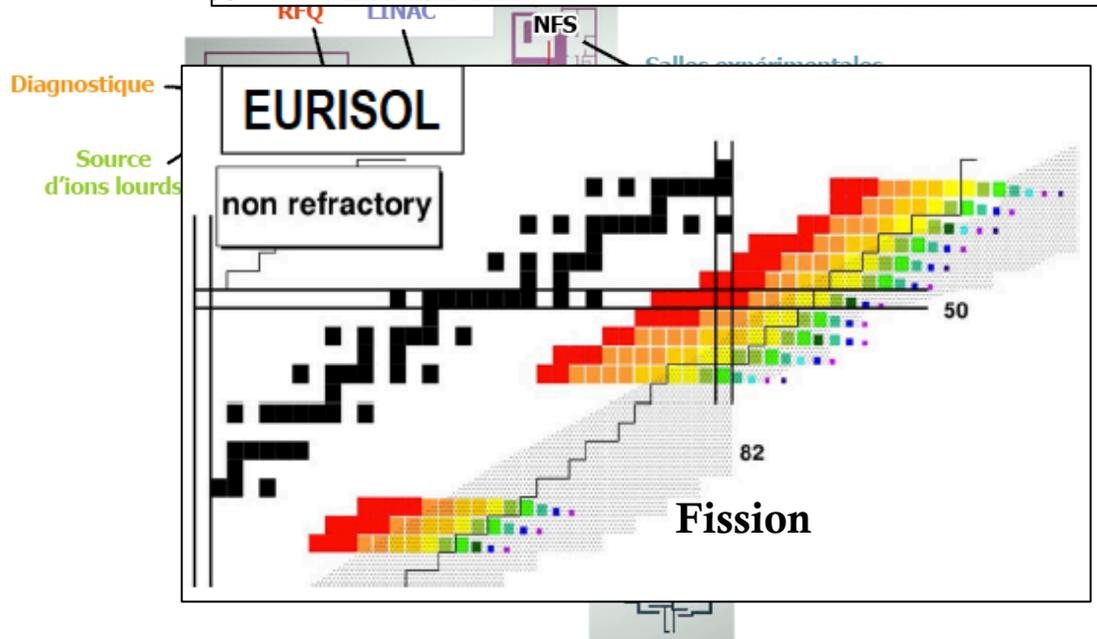
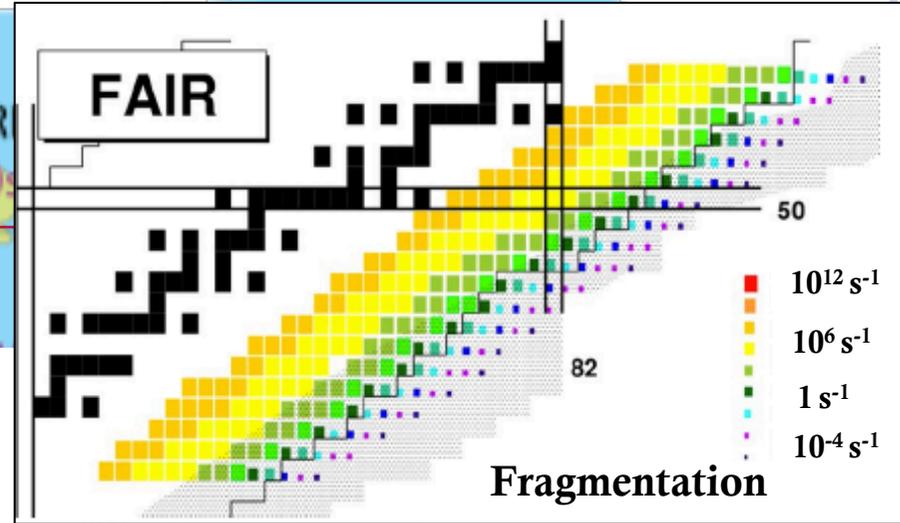
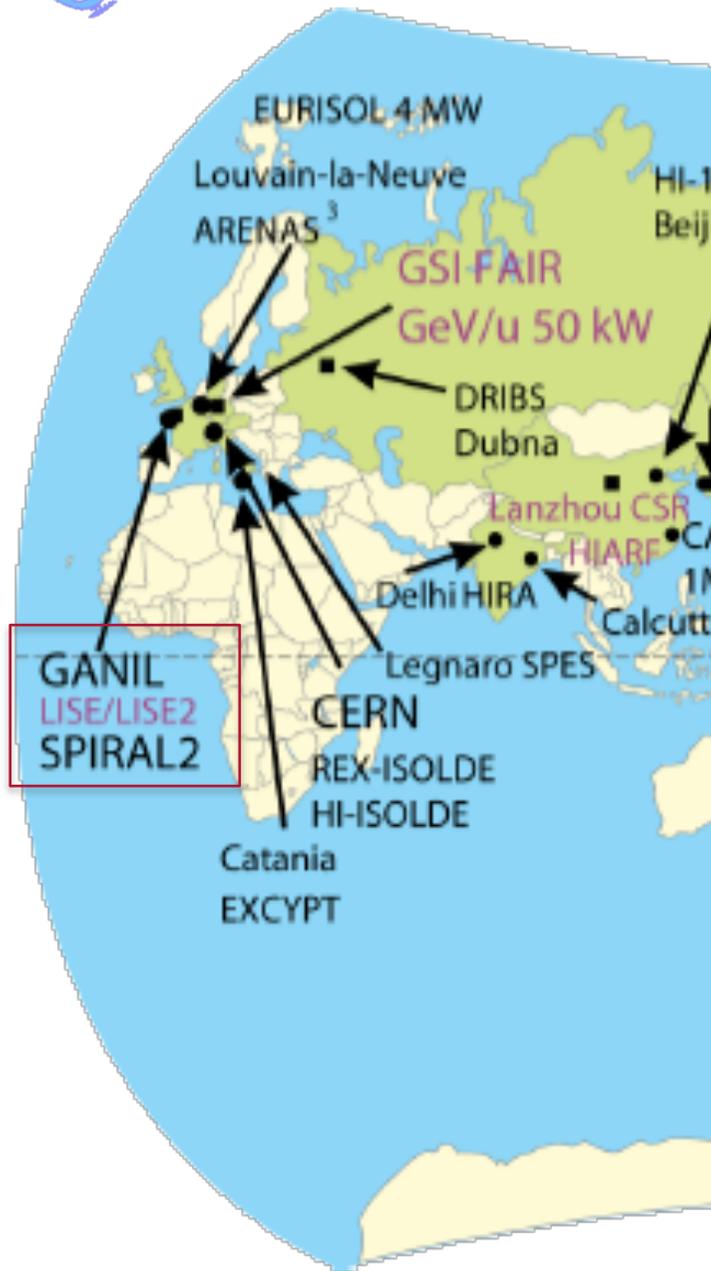
- ▶ **Les méthodes de production**
  - mécanismes de réaction
  - méthode en vol
  - méthode de fragmentation

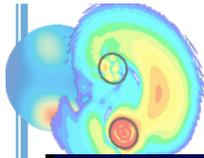


- ▶ **Les installations dans le monde**



# LA CARTE DES INSTALLATIONS



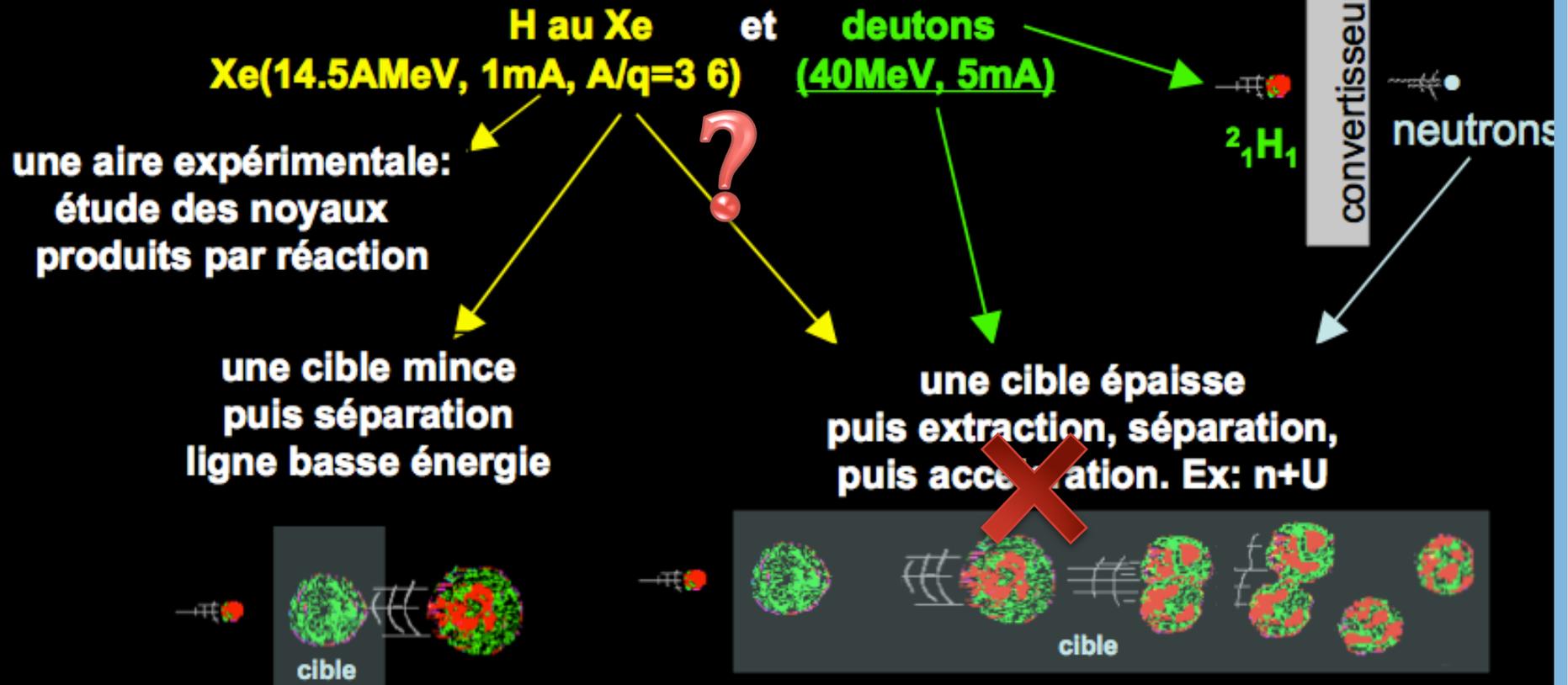


# LE FUTUR ACCÉLÉRATEUR SPIRAL2 EN FRANCE

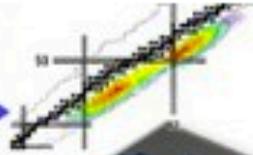
## Spiral2

construction d'un nouvel accélérateur supraconducteur .

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



# Spiral2



GANIL existant

Existing experimental halls

Experimental hall with exotic nuclei at low energy (DESIR)

Phase 2

Experimental hall Super Separator Spectrometer (S<sup>3</sup>)

Experimental hall Neutrons For Science (NFS)

Phase 1

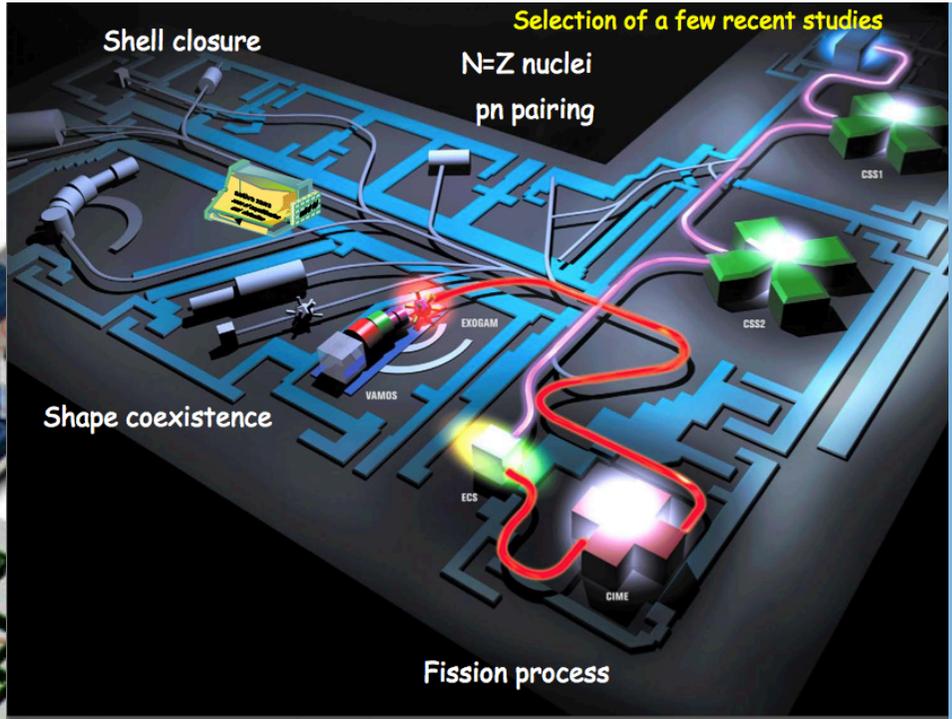
Linear Supraconductor Accelerator LINAC

E = 14.5 A MeV for ions A/q = 3  
E = 40 MeV for deuterons  
E = 33 MeV for protons

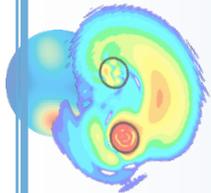
RFQ

Deuteron - Proton source  
5 mA

ECR Source  
Heavy ions  
A/q = 3, 1 mA



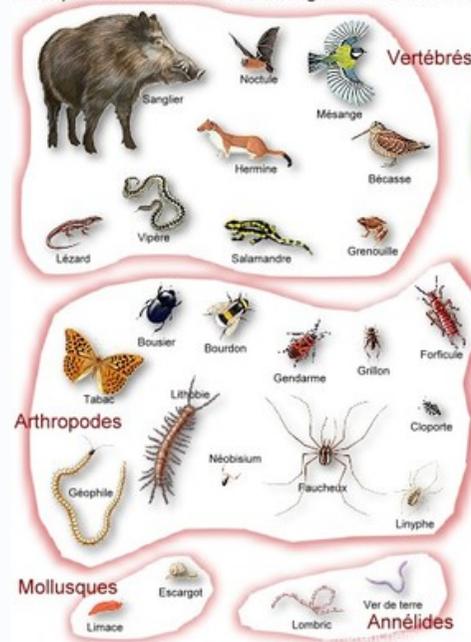
$\approx 10^{14}$  fissions/s



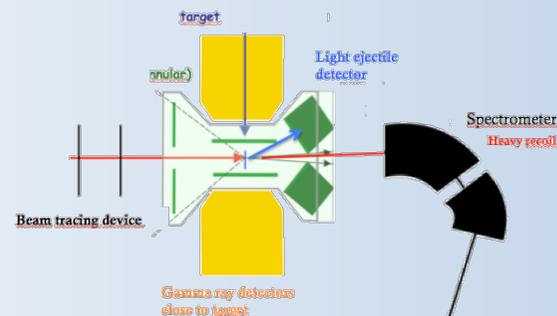
# LA TROUSSE À OUTILS DU PHYSICIEN

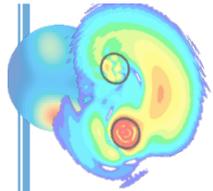
- ▶ Par spectroscopie (version courte)
- ▶ Par des réactions nucléaires (version longue)

Quelques embranchements du règne animal et du règne végétal



- zoologie des réactions nucléaires
- quelle réaction pour quelle information ?
- le dispositif expérimental « idéal »  
(quelques exemples)





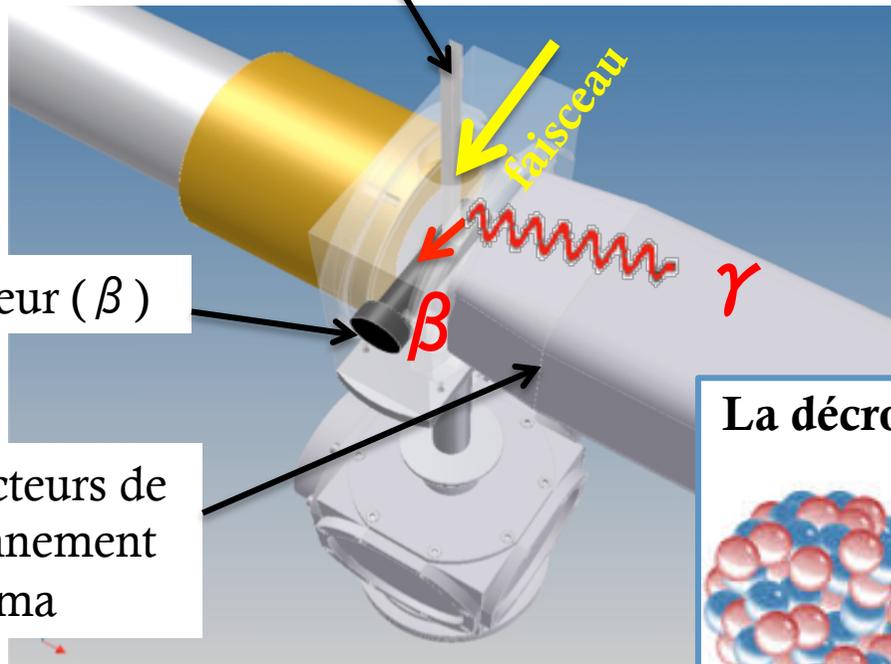
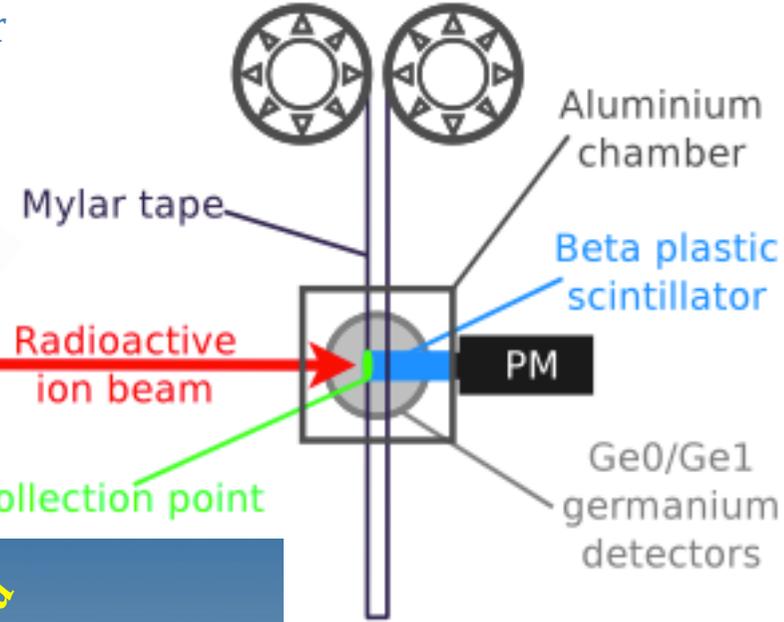
# COMMENT ETUDIER LES NOYAUX ?

## I -LA SPECTROSCOPIE

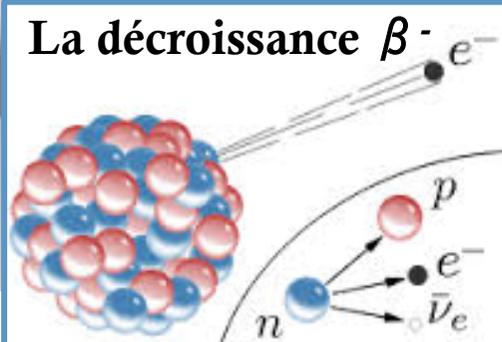
Production de noyaux d'intérêt (E faible)

Séparateur de masse

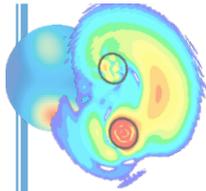
Bande déroulante (mylar)



- Besoin de faisceaux très exotiques
- Dispositif assez "simple"



Illustrations empruntées à D. Vernay, K. Kolos

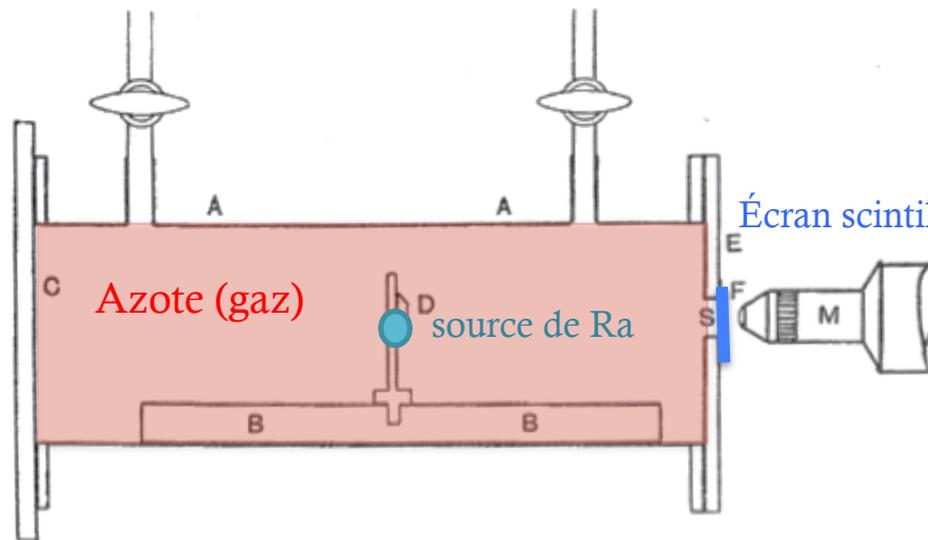
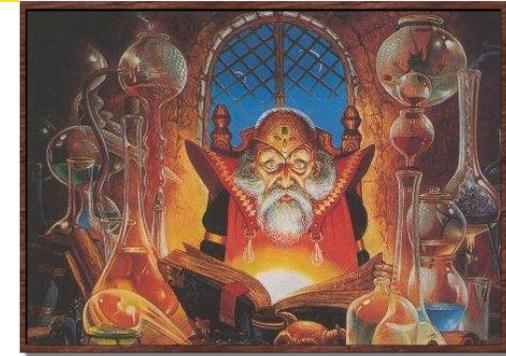


# COMMENT ETUDIER LES NOYAUX ?

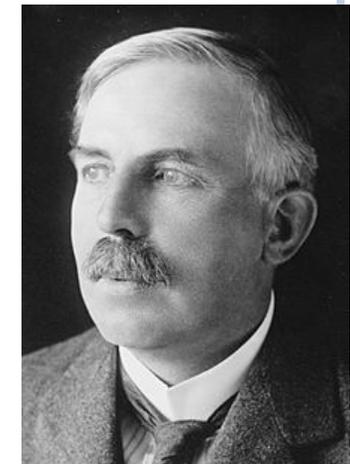
## II- LES REACTIONS

### LA PREMIÈRE RÉACTION DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE

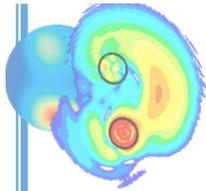
1919, La première réaction de transmutation nucléaire :  
on ne change pas encore le Pb en or !



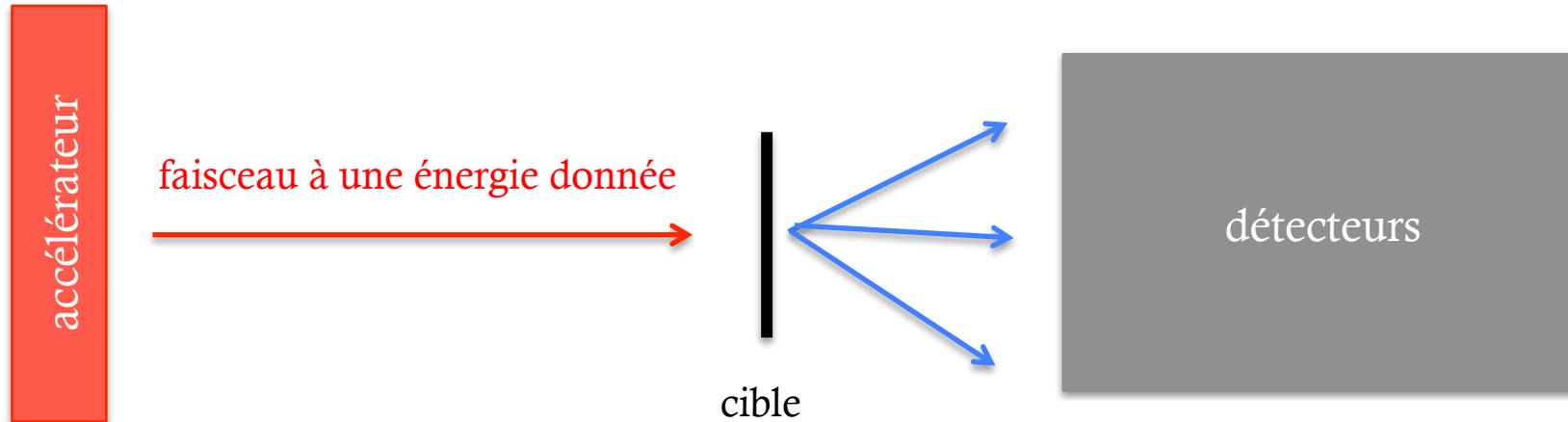
Particules  $\alpha$



Rutherford

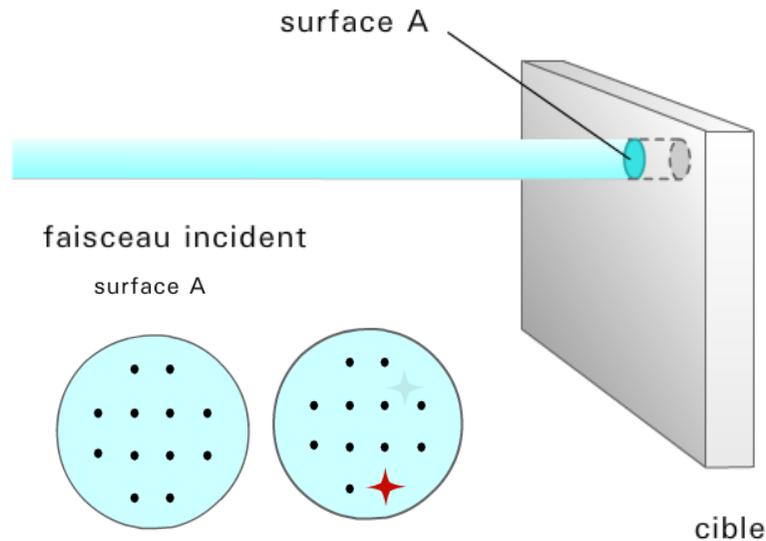


# PRINCIPE DE MESURE D'UNE RÉACTION

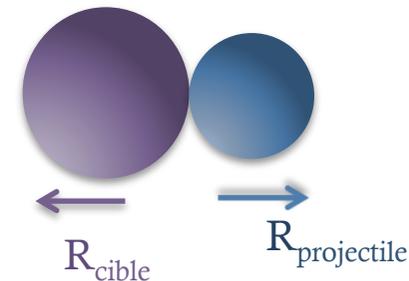


particules, noyaux  
produits

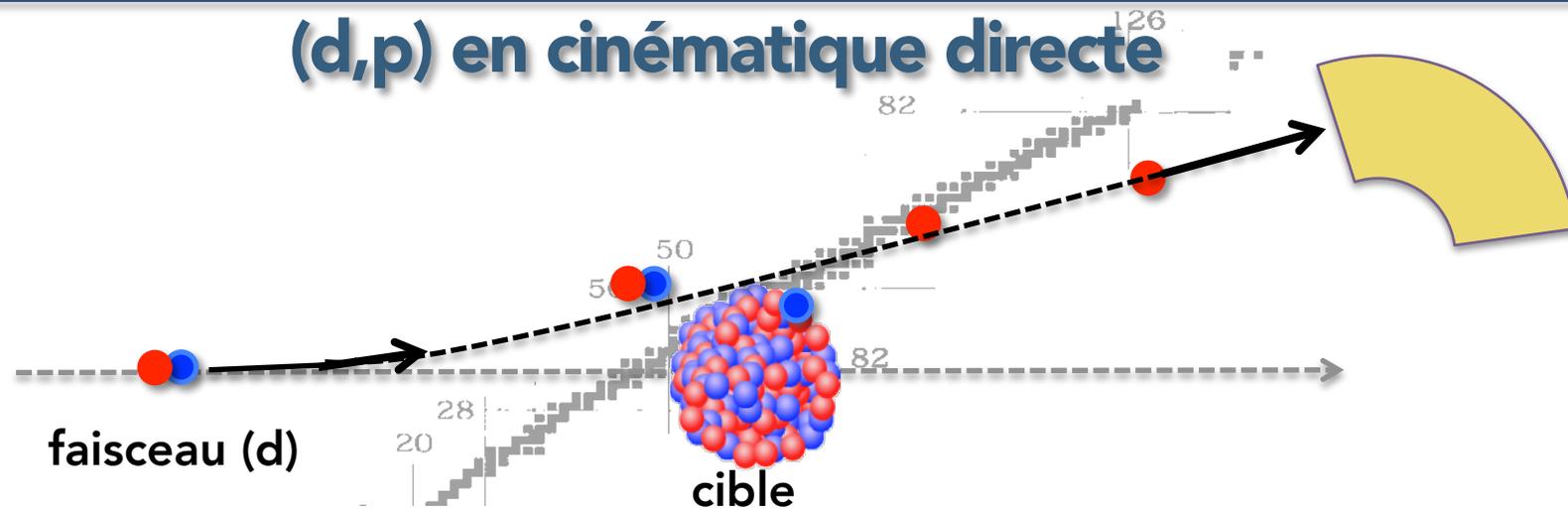
## ► Principe de la section efficace



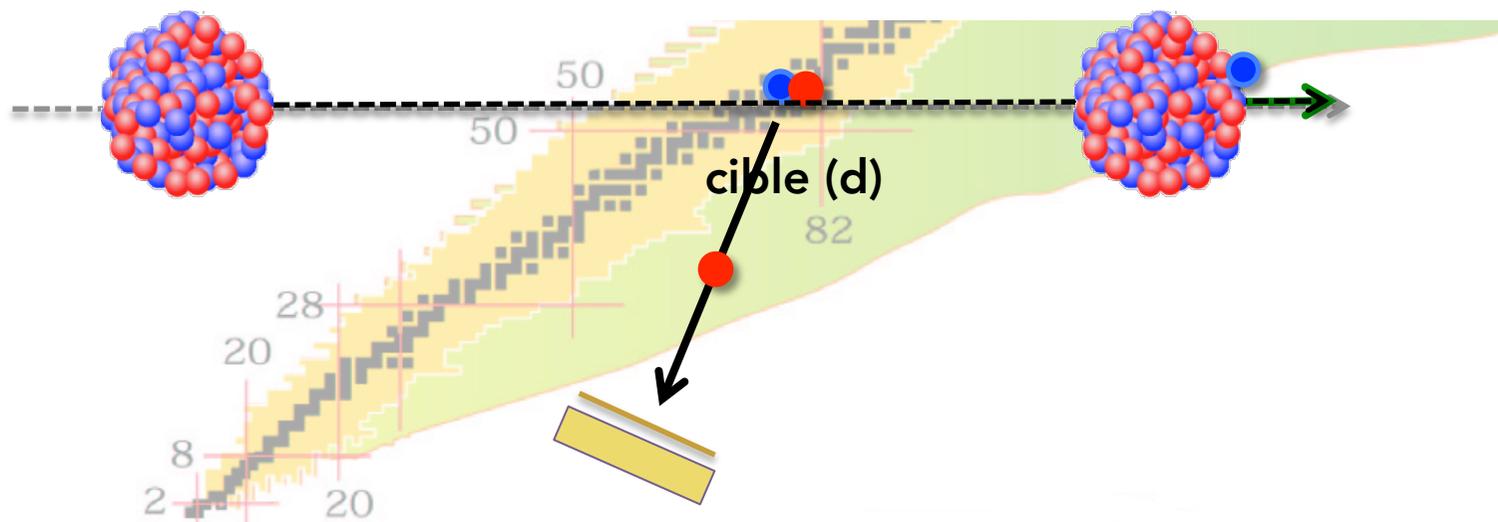
Section efficace  $\sigma$  pour une diffusion  
en 1<sup>ère</sup> approximation :  
$$\sigma = \pi(R_{cible}^2 + R_{projectile}^2)$$

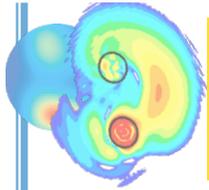


## (d,p) en cinématique directe



## (d,p) en cinématique inverse



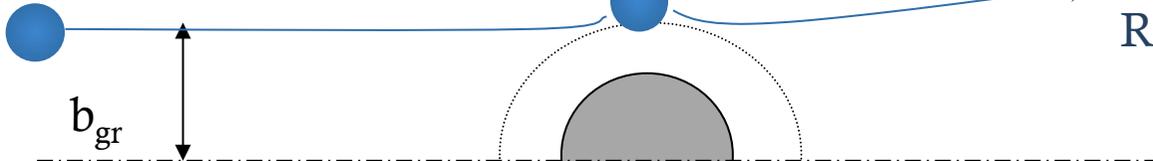


# LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES:

## (I) PARAMÈTRE D'IMPACT

- ▶ **Paramètre d'impact** : distance la plus petite d'approche entre 2 noyaux
- ▶ **Le type de réaction** dépend du **paramètre d'impact**.

paramètre d'impact **d'effleurement**



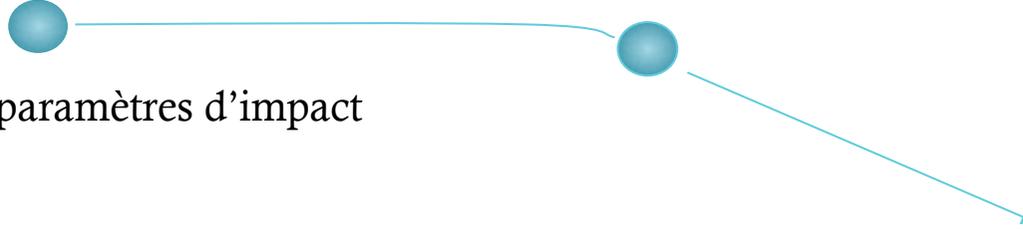
Diffusion élastique  
Réactions directes

petits paramètres d'impact



Collision profondément  
inélastique

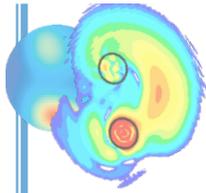
grands paramètres d'impact



Diffusion élastique  
Excitation coulombienne

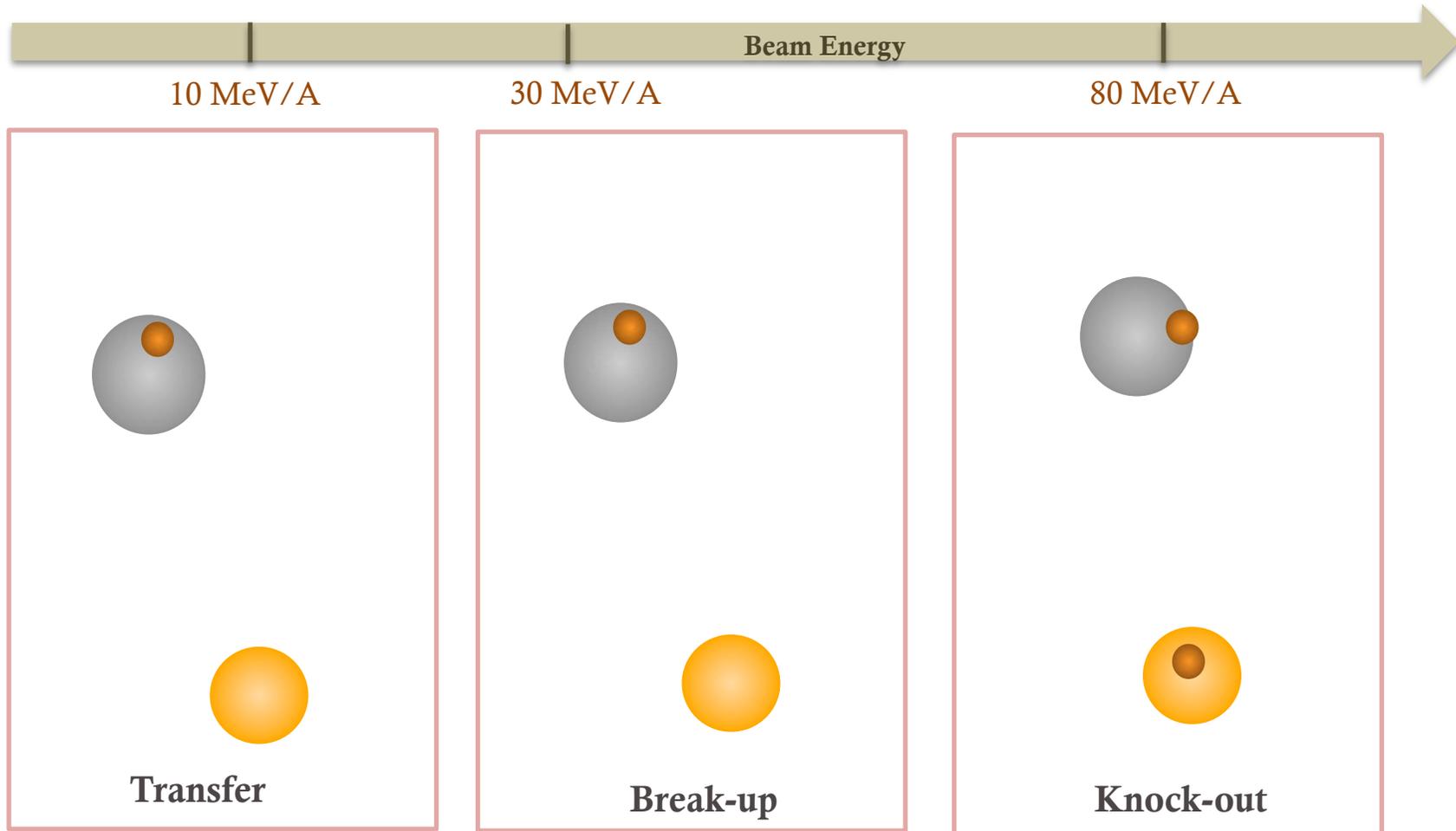
**Mais** : on ne maîtrise pas le paramètre d'impact,  
ce n'est pas du billard !

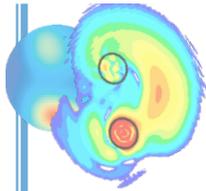




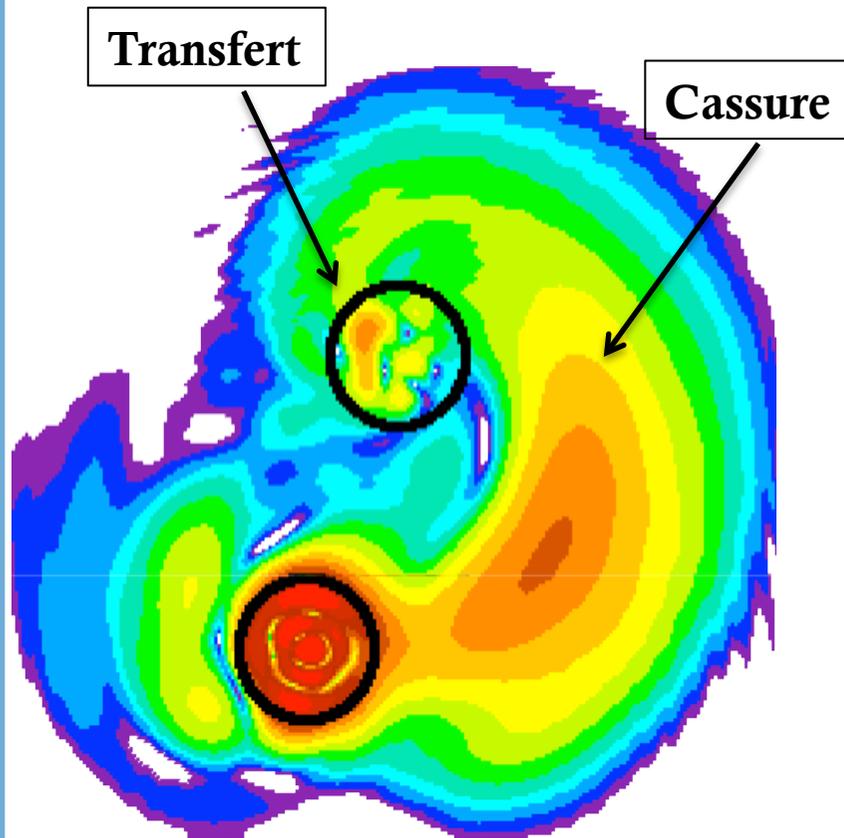
# REACTION NUCLÉAIRES :

## (II) L'EFFET DE L'ÉNERGIE





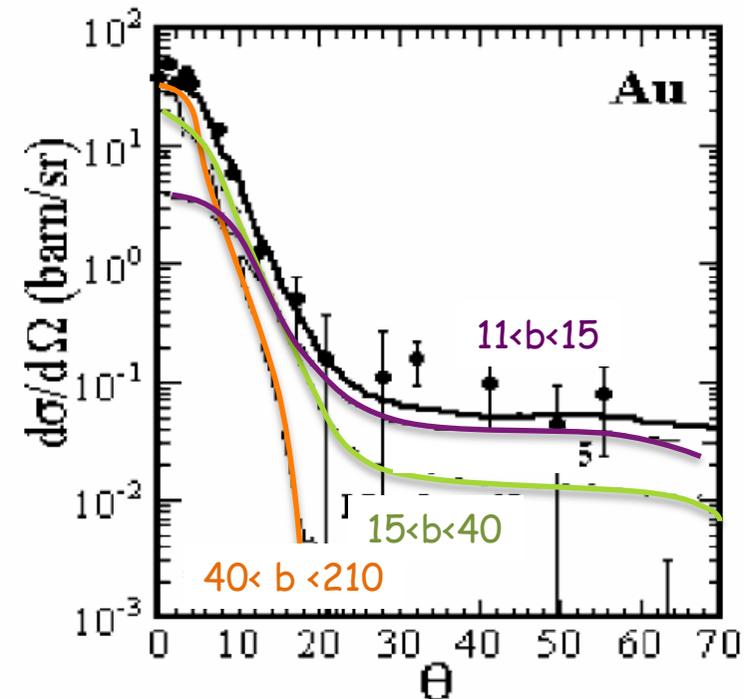
# TOUTES LES RÉACTIONS ONT LIEU EN MÊME TEMPS! IL FAUT LES DÉMÊLER !

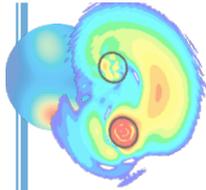


source : J-A Scarpaci home page

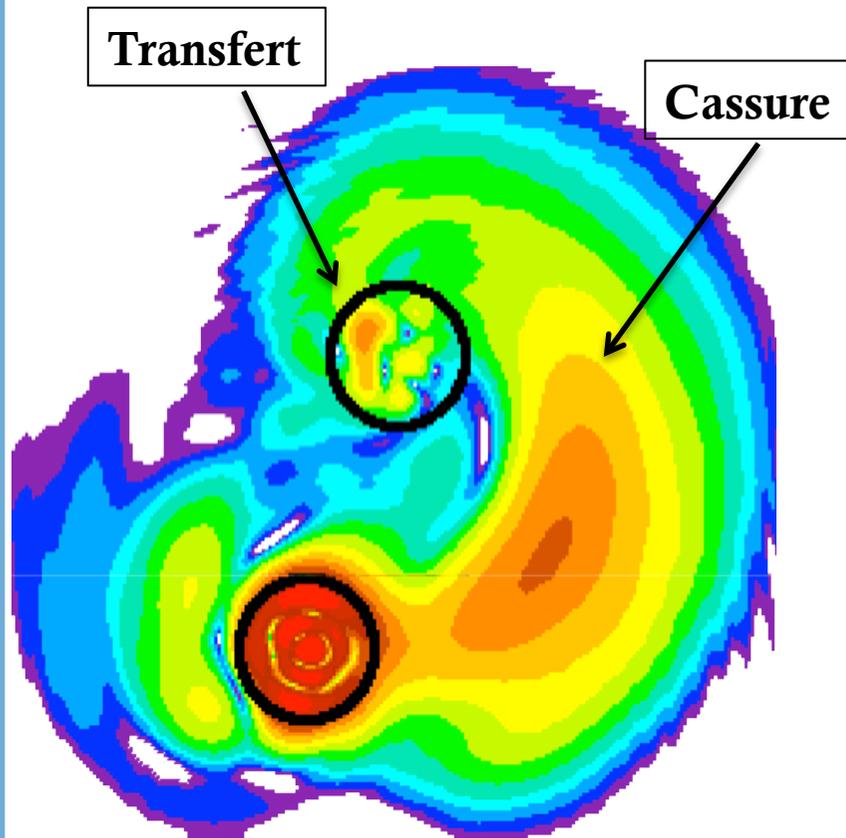
- Comment on sépare les différentes réactions ?  
exemple des réactions de cassure :

- diffusion coulombienne : à l'avant





## LOIN DE L'IMAGE IDÉALE...



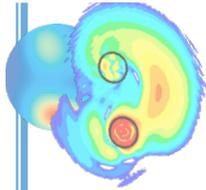
source : J-A Scarpaci

► **Comment on sépare les différentes réactions ?**  
exemple des réactions de cassure :

- diffusion coulombienne : à l'avant
- transfert : **noyaux en sortie différents**
- diffusion élastique : à 90° (voir plus loin)
- cassure dominante entre 10° et 80°

► **Conséquences :**

- **identification** des noyaux éjectés dans la réaction (éjectiles)
- bien choisir le **positionnement** de nos détecteurs en fonction de ce qu'on veut mesurer



# CE QUE LES RÉACTIONS NOUS APPRENNENT

## Réactions



Diffusion élastique de noyaux

Diffusion inélastique (vers états excités)

Diffusion inélastique (au continuum)

**Transfert**, « knock-out », cassure

Fusion

Fission

Diffusion d'électrons

taille du noyau (rayon de matière)

Energie du niveau & nombres quantiques

Résonances géantes (vibrations)

Détails de la structure des noyaux

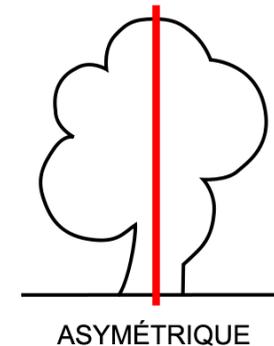
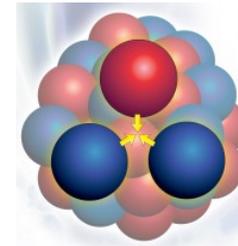
processus astro

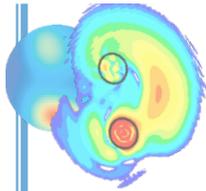
propriétés de la goutte liquide

densité et rayon du noyau (rayon de charge)

## Pourquoi ?

- ▶ si on étudie des noyaux isotopes (variation du nombre de neutrons) :  
sensibilité à l'asymétrie (différence du nombre de neutrons et protons)
- ▶ si on étudie des noyaux peu liés  
sensibilité aux forces à 3 corps
- ▶ si on se rapproche des limites d'existence  
dépendance en densité



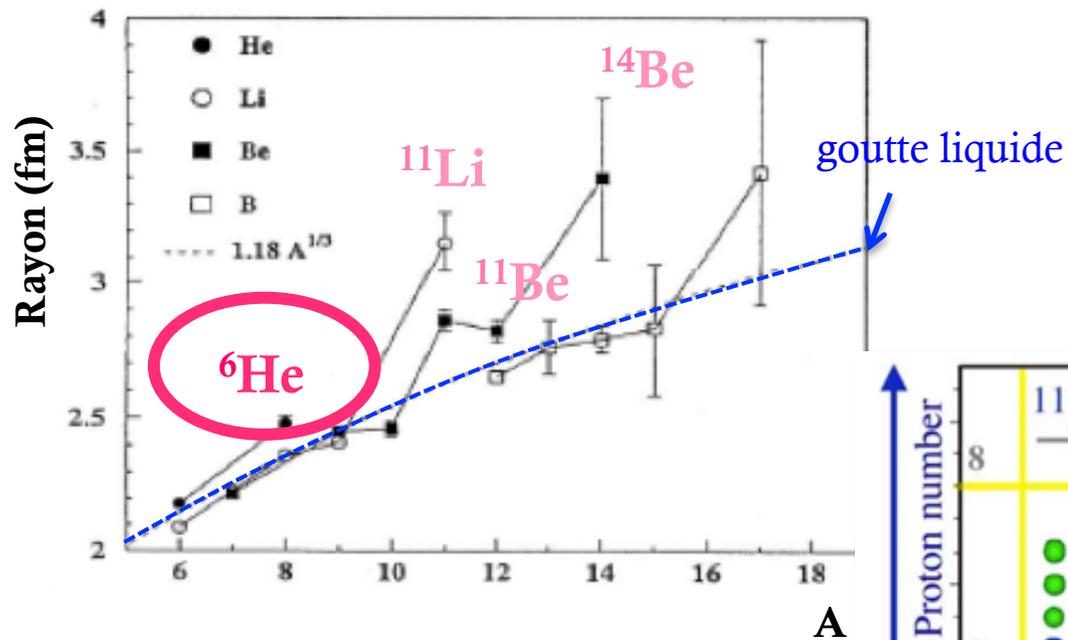
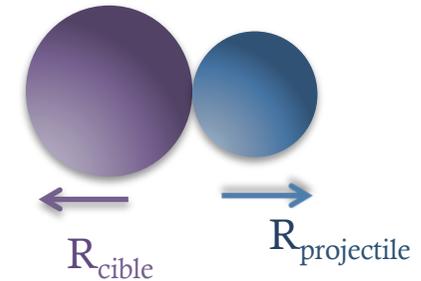


# EXEMPLE : DIFFUSION ELASTIQUE DES NOYAUX, RAYON DES NOYAUX

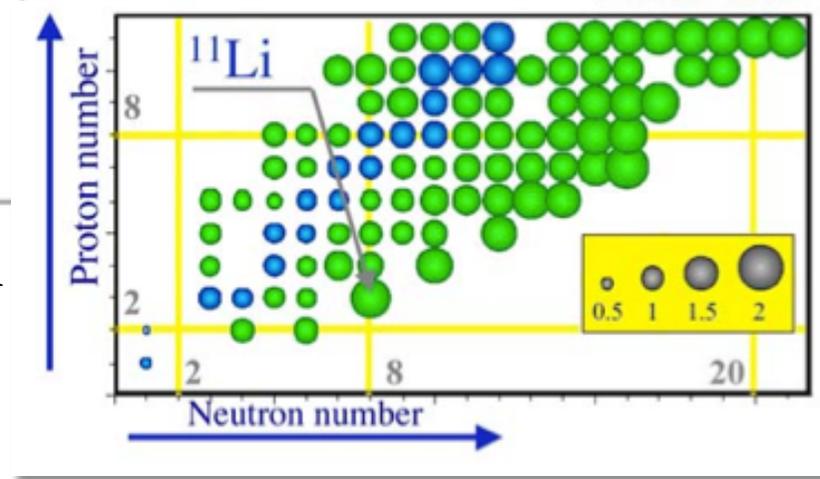
## ► Rayons d'interaction

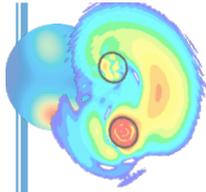
Section efficace  $\sigma$  pour une diffusion en 1<sup>ère</sup> approximation :

$$\sigma = \pi(R_{cible}^2 + R_{projectile}^2)$$



Tannihata et al, PRL (1985)





# EXEMPLE : DIFFUSION ELASTIQUE DES NOYAUX, RAYON DES NOYAUX

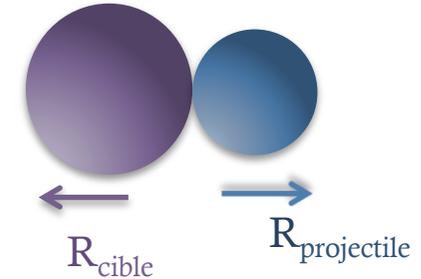
## ► Rayons de matière

Section efficace  $\sigma$  pour une diffusion en 1<sup>ère</sup> approximation :

$$\sigma = \pi(R_{cible}^2 + R_{projectile}^2)$$

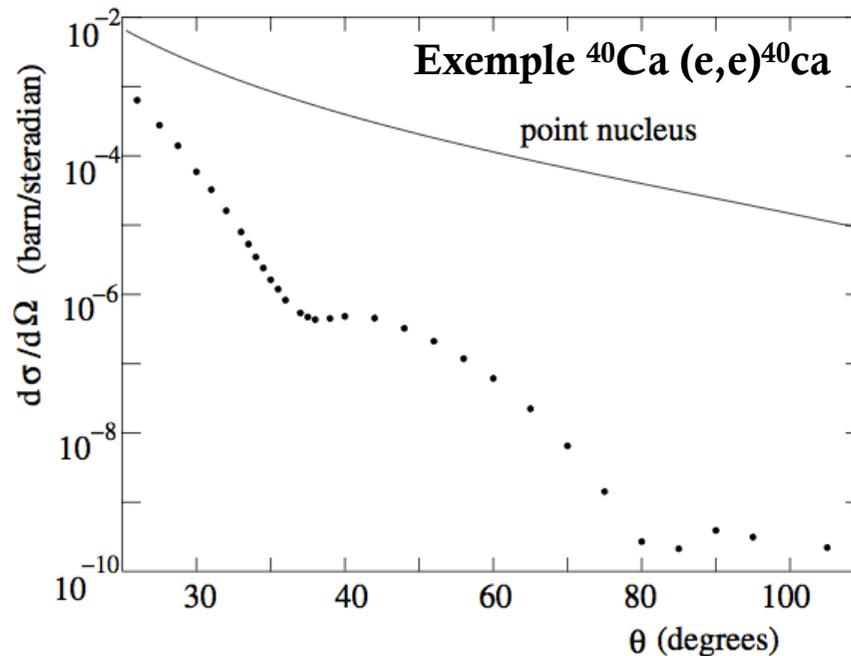
## ► Rayons de charge et densité

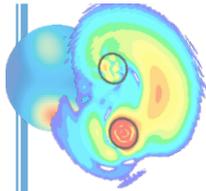
$$\lambda = \frac{\hbar}{p}$$



On utilise des électrons de haute énergie  $E \sim 400$  MeV

Si l'électron a une longueur d'onde inférieure à la taille du noyau  $\rightarrow$  sensible à la **taille du noyau**  
mais l'électron ne voit que les protons du noyau  $\rightarrow$  **rayon de charge**





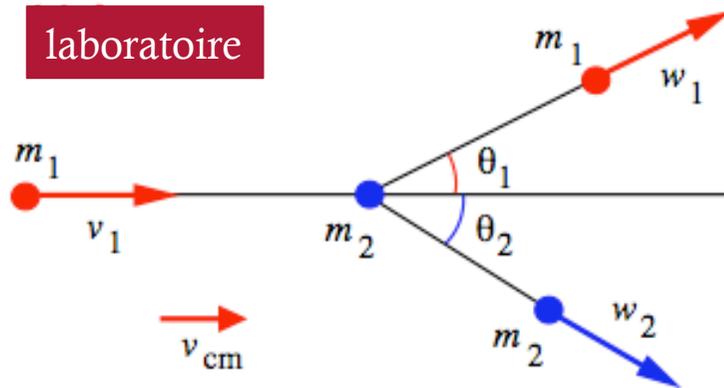
# L'EXEMPLE DES RÉACTIONS DE TRANSFERT

- Conservation de l'énergie et de l'impulsion dans une réaction à 2 corps

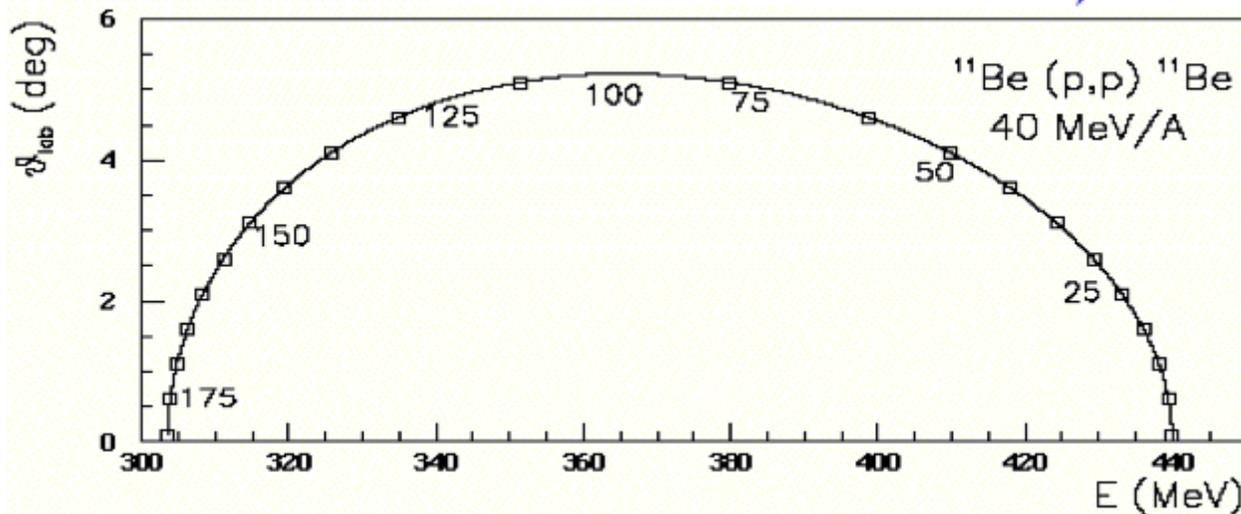
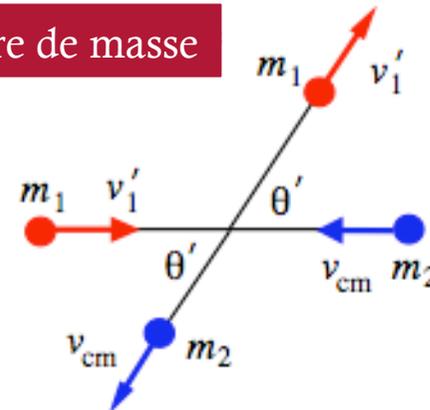


Notation : A(B,D)C = cible (projectile, résidu projectile) résidu cible

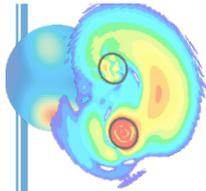
laboratoire



centre de masse

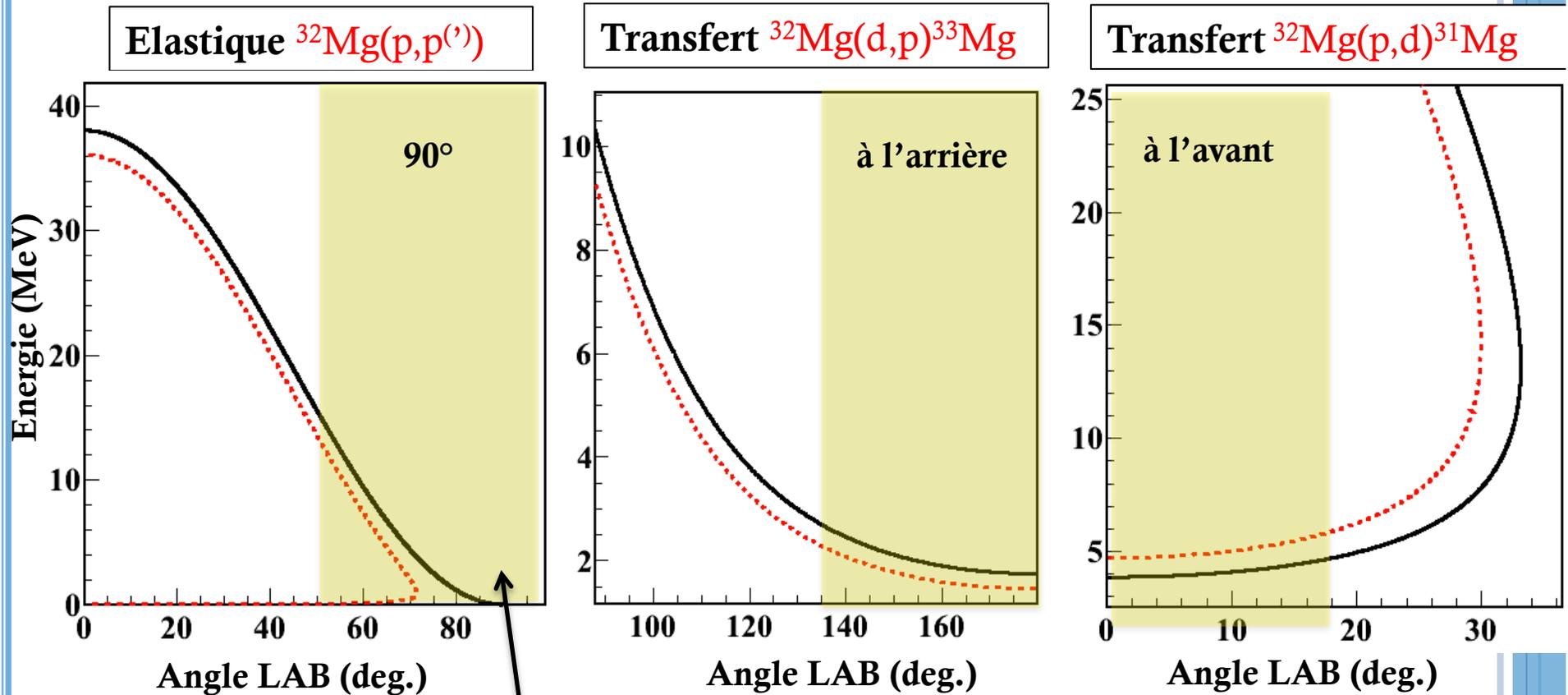


Diffusion élastique  
Cas du « résidu lourd »

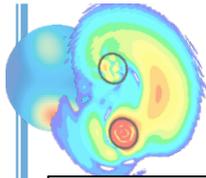


# L'EXEMPLE DES RÉACTIONS DE TRANSFERT

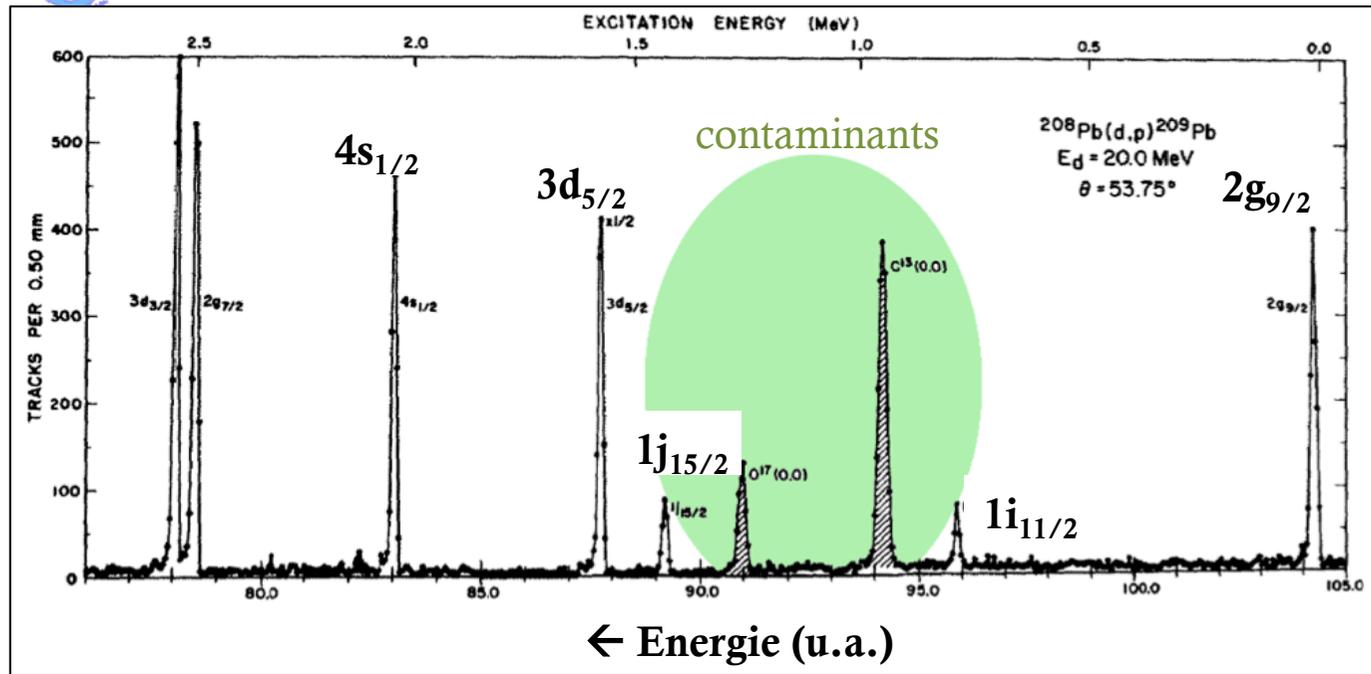
- Conservation de l'énergie et de l'impulsion dans une réaction à 2 corps



Zone de plus grande section efficace

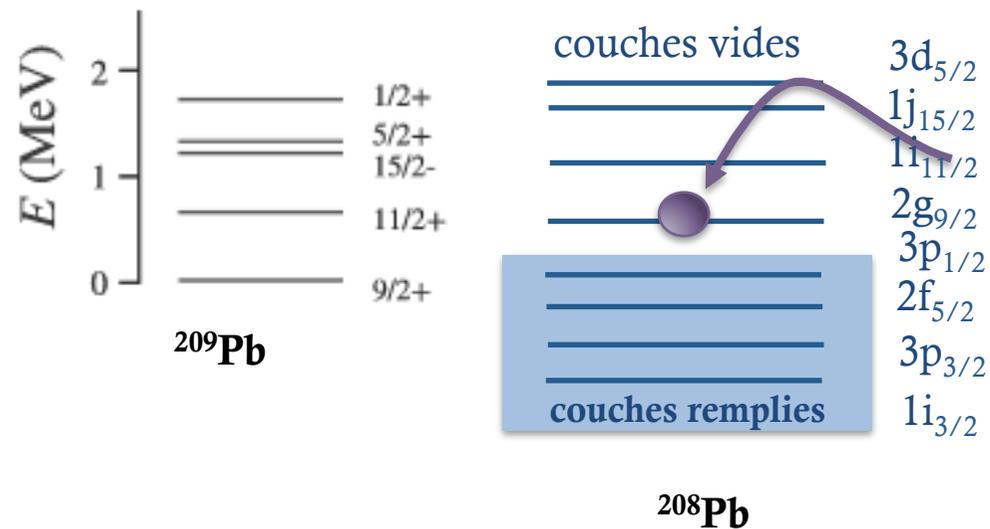


# INTÉRÊT DES RÉACTIONS (D,P) ET (P,D)

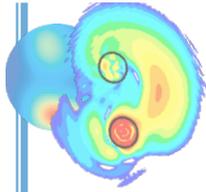


► Réaction (d,p) :  
exploration des états de particules

► Réaction (p,d):  
exploration des états de trous



$^{208}\text{Pb}$



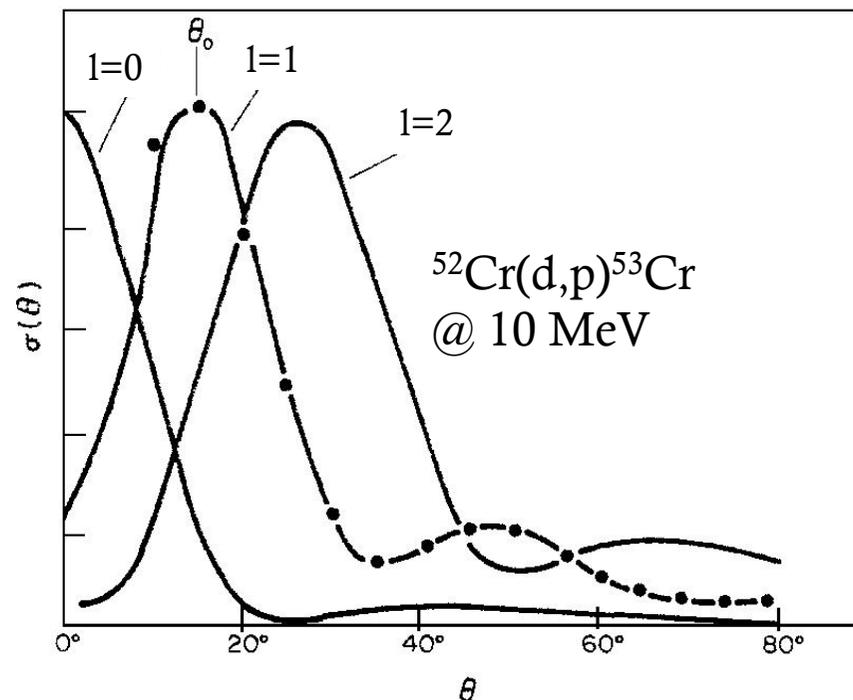
# COMMENT OBTIENT-ON DES INFORMATIONS SUR LE NOYAU?

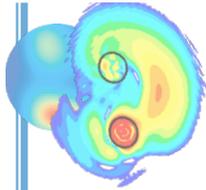
## ► Mesure des **distributions angulaires**

- la **forme** de la distribution dépend du moment angulaire (le  $l$  du modèle en couche) transféré dans la réaction

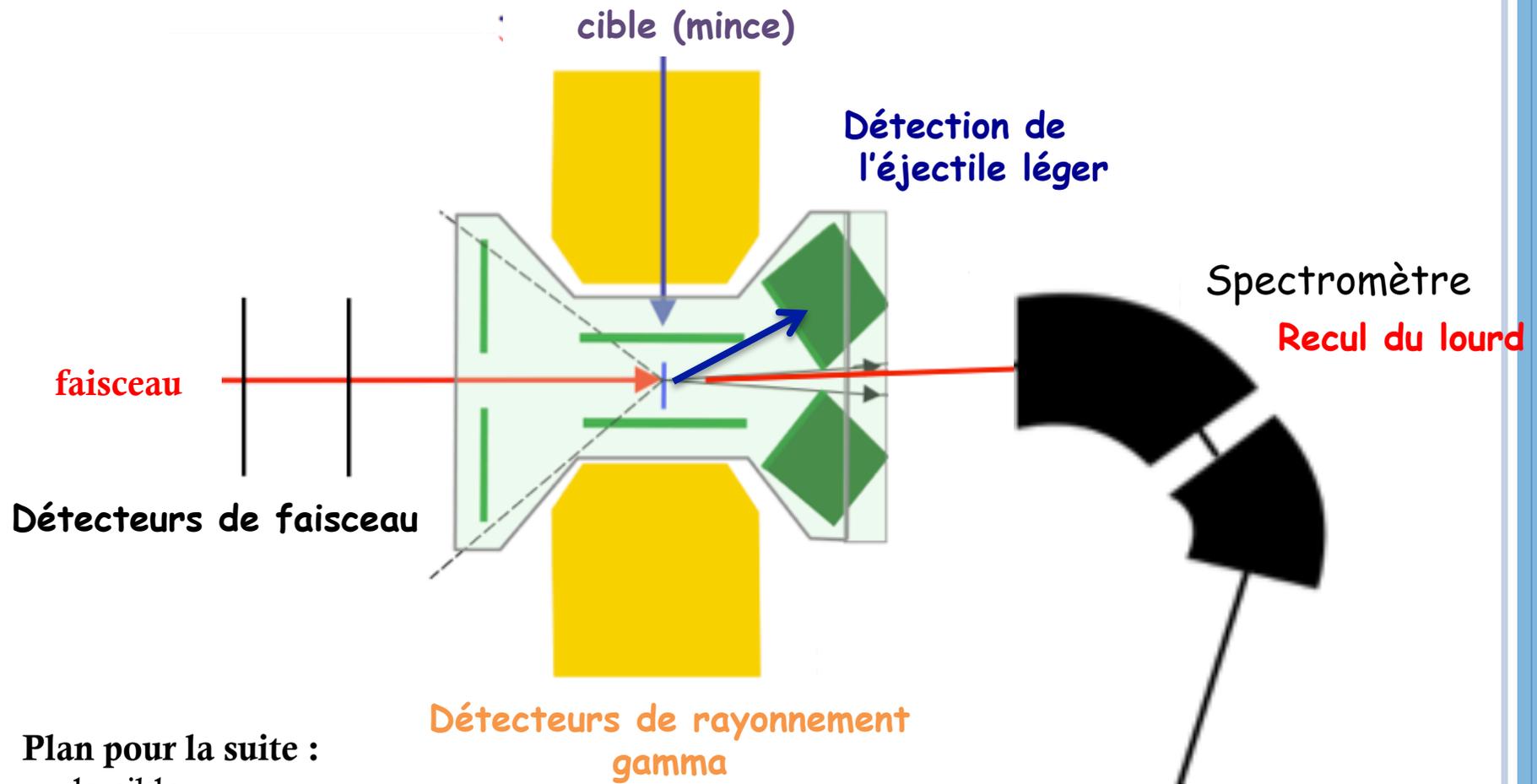
- la comparaison entre la **section efficace mesurée** et celle **prédite théoriquement**

**pour une couche occupée**, nous dit si la couche est complètement occupée ou pas. (le rapport des sections efficaces est appelé “facteur spectroscopique”)



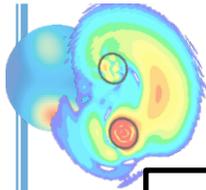


# DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL « IDÉAL » (COMPLET)



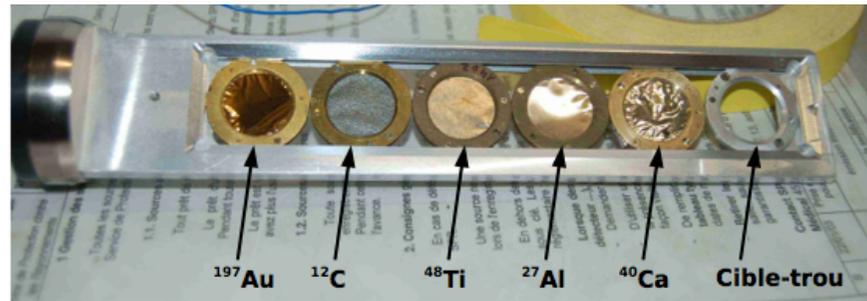
## Plan pour la suite :

- la cible
- les détecteurs de faisceau
- les détecteurs de particules chargées
- les spectromètres
- les détecteurs gamma
- le futur des détecteurs

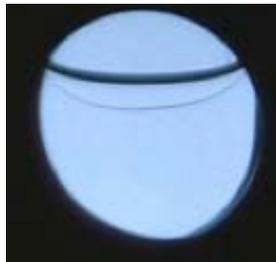


# PLUSIEURS TYPES DE CIBLE

## ► Les cibles « classiques »



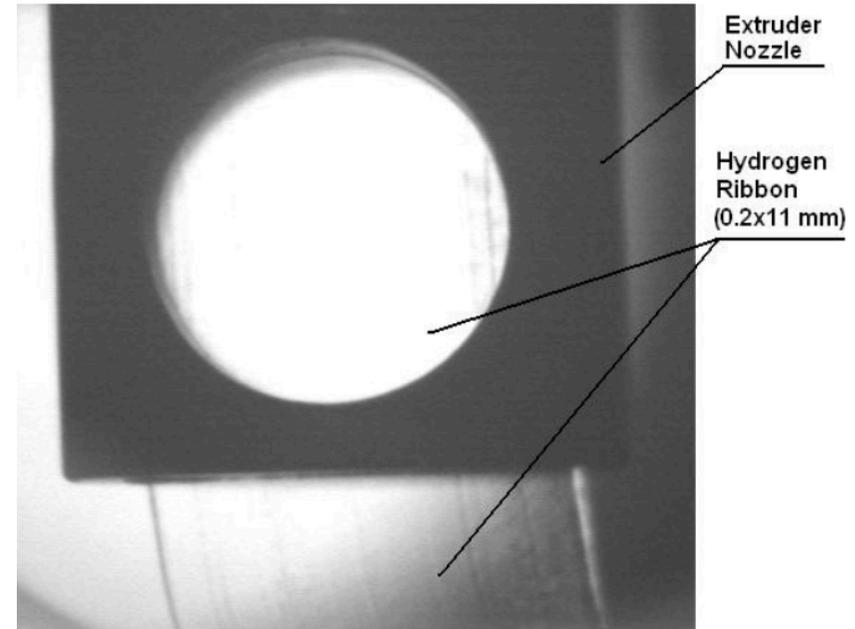
## ► Les cibles cryogéniques

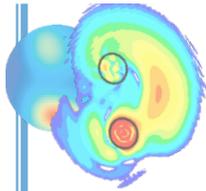


3 phases de l'H pendant la descente en froid

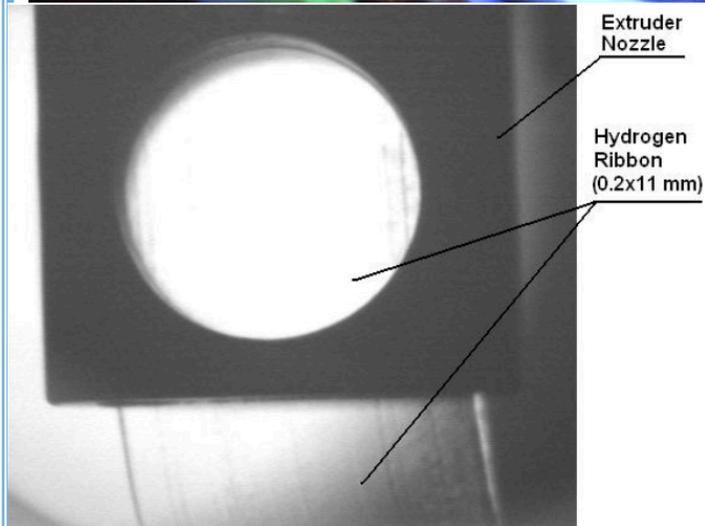
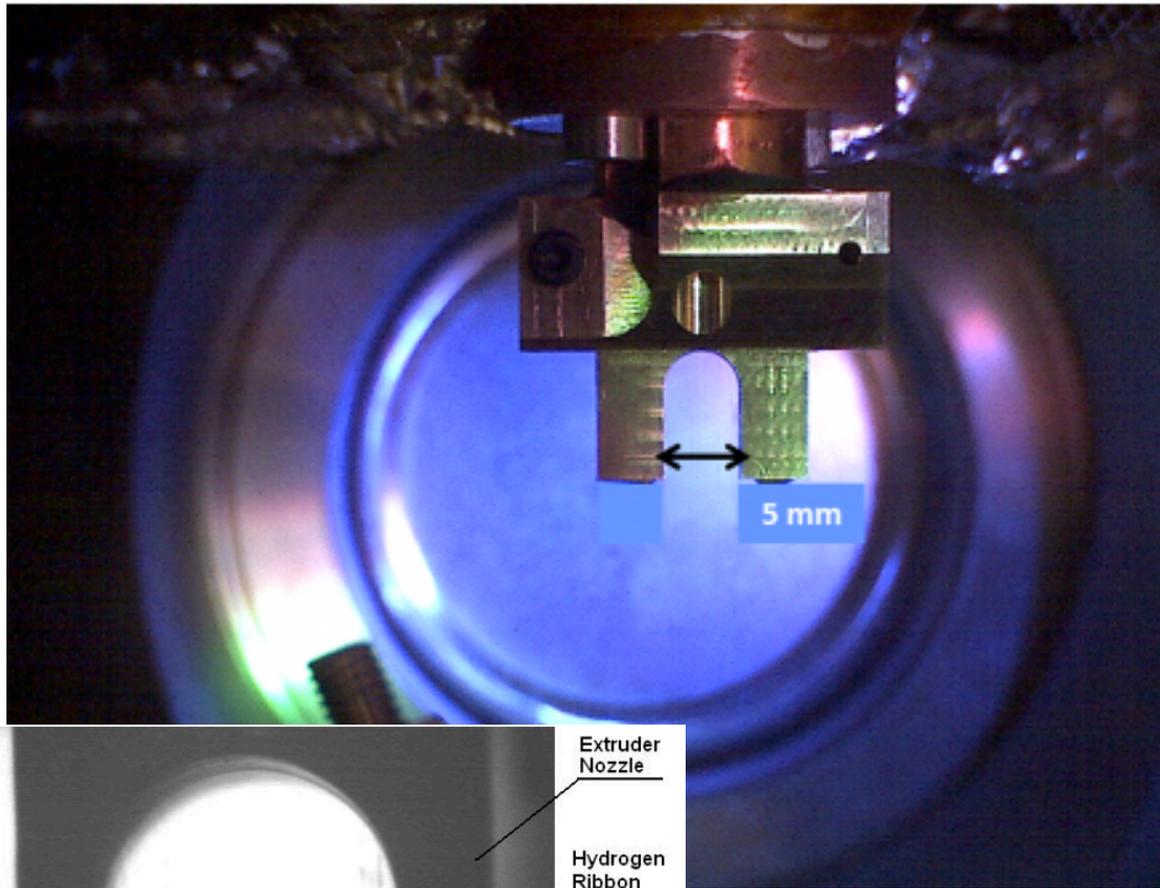
Cible cryogénique H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub>

## ► Les cibles « sans fenêtre », CHymene

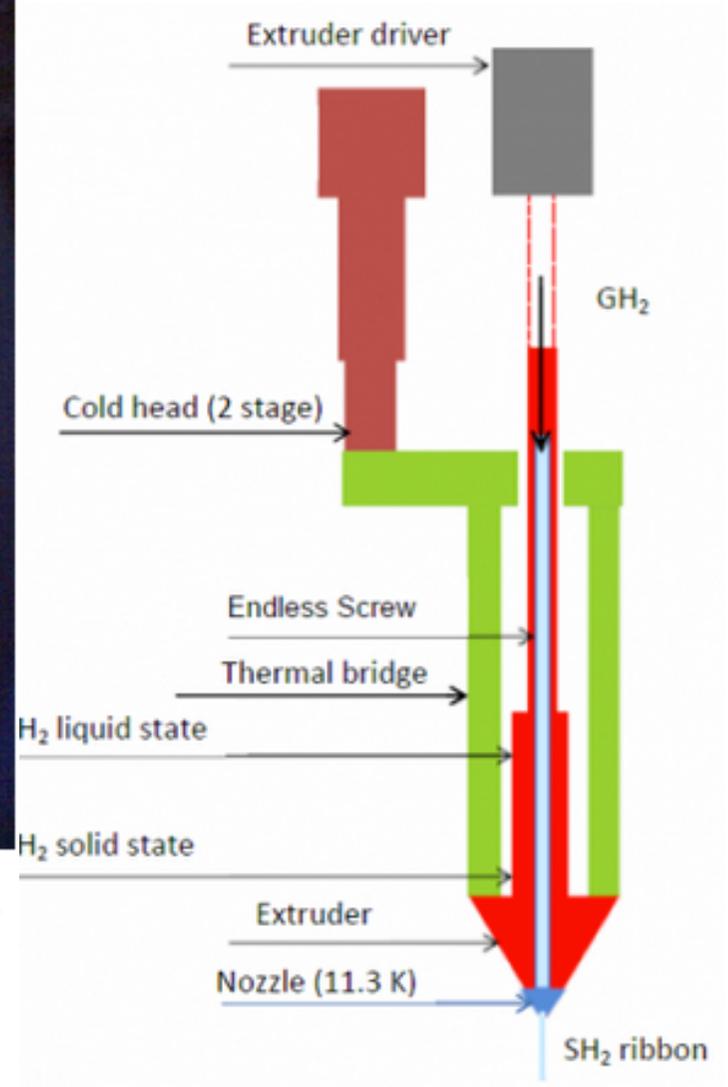


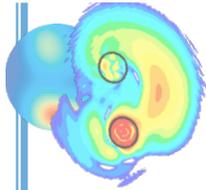


# FOCUS SUR LA CIBLE CHYMENE



eur 20  $\mu\text{m}$  et de largeur 5 mm.





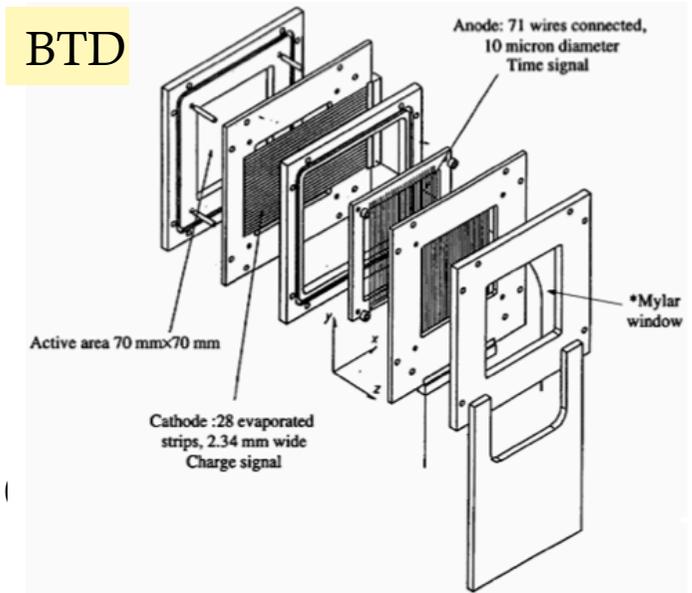
# DÉTECTEURS DE FAISCEAU

## ○ Besoins :

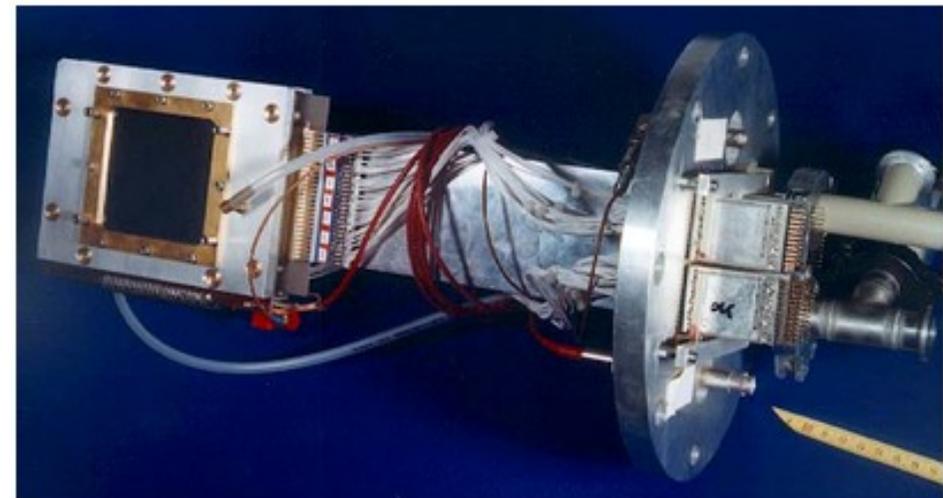
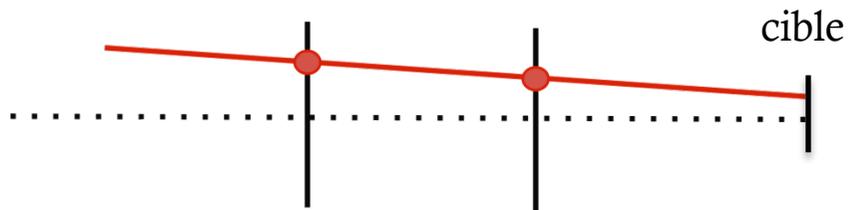
- tenir l'intensité faisceau ( $10^5$ pps) **on aimerait plus !!**
- identifier les noyaux du faisceau (temps de vol)  
**excellente résolution  $\sim 100$  ps**
- reconstruire la trajectoire du faisceau  
**resolution  $\sim 0.1$  mm**
- Efficacité  $\sim 100\%$
- un temps mort électronique réduit, inférieur à 50ms
- une résolution spatiale en deux dimensions de 0,5mm (sur cible de l'ordre de 1mm)

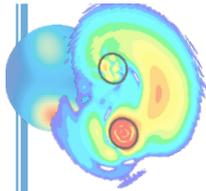
## Vue éclatée

BTD



On en utilise (presque) toujours 2 !



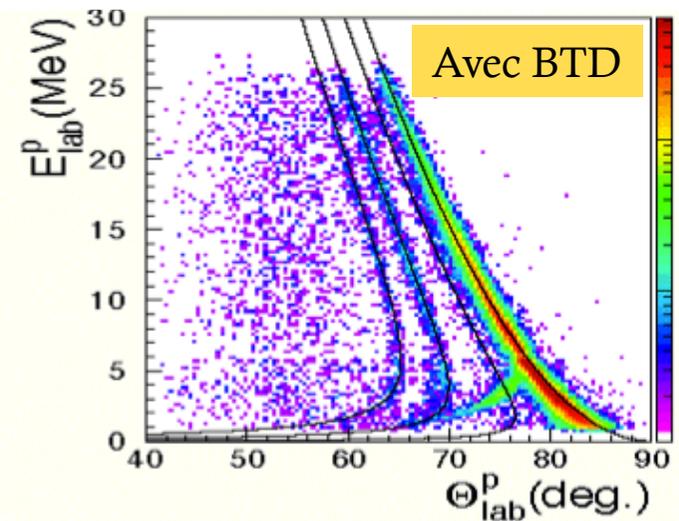
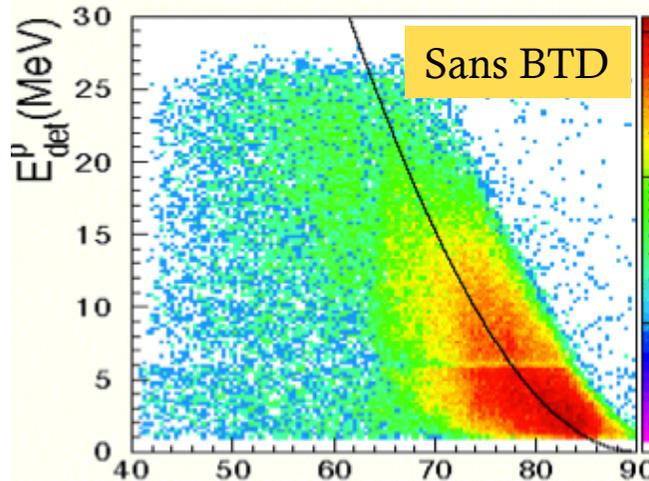
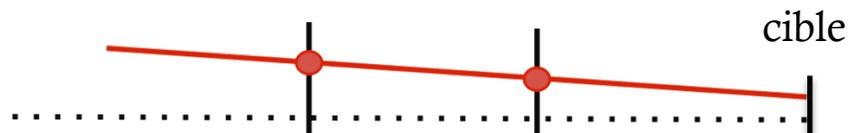
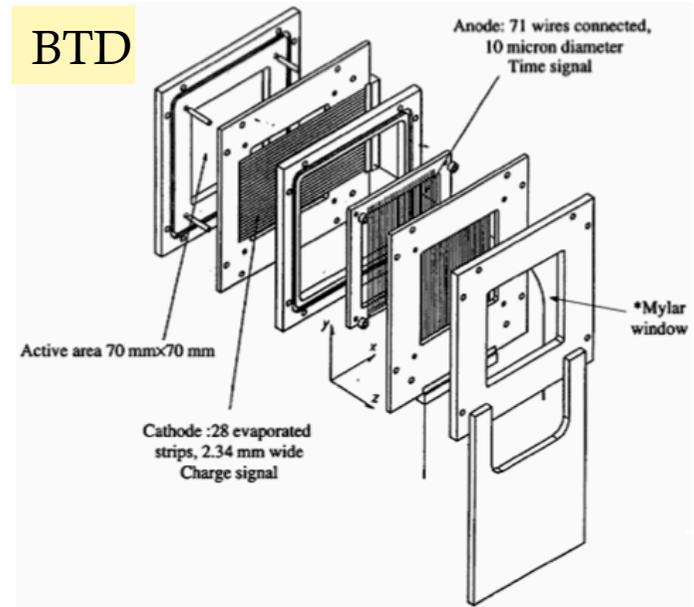


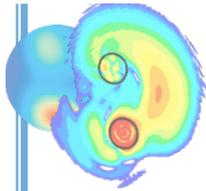
# DÉTECTEURS DE FAISCEAU

## ○ Besoins :

- tenir l'intensité faisceau ( $10^5$ pps)
- identifier les noyaux du faisceau (temps de vol)
- reconstruire la trajectoire du faisceau
- Efficacité  $\sim 100\%$
- un temps mort électronique réduit, inférieur à 50ms
- une résolution spatiale en deux dimensions de 0,5mm sur cible de l'ordre de 1mm)
- une résolution temporelle inférieure à une nanoseconde

## Vue éclatée



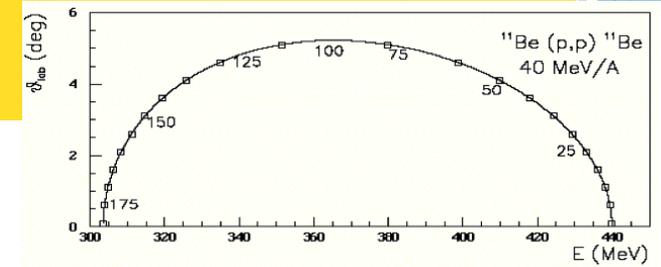


## NOYAU LOURD DE REcul : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

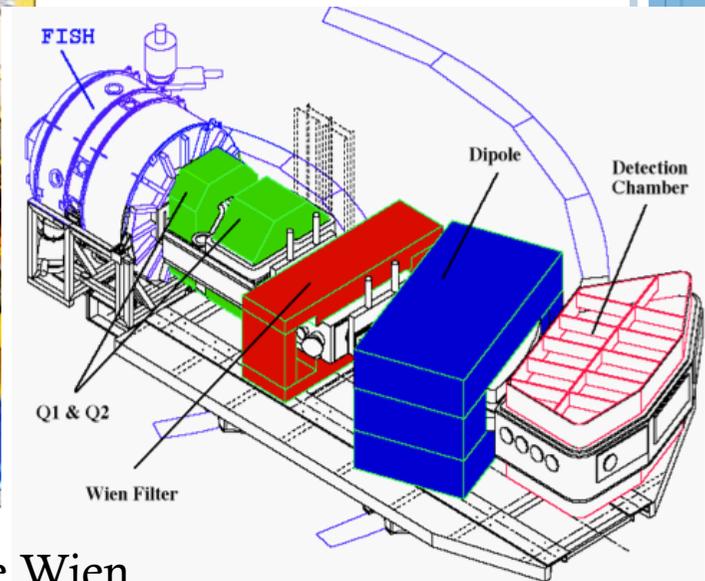
- Le résidu lourd recul :

- proche de 0 degré (à l'avant)
- il est proche du faisceau (résidu du faisceau)

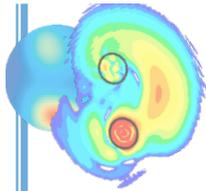
→ besoin d'un **spectromètre magnétique** de grande précision  $B\rho = \frac{p}{Q}$



21/12/17



2 quadrupoles de grande acceptance + dipole + Filtre de Wien  
Acceptance +/- 6%



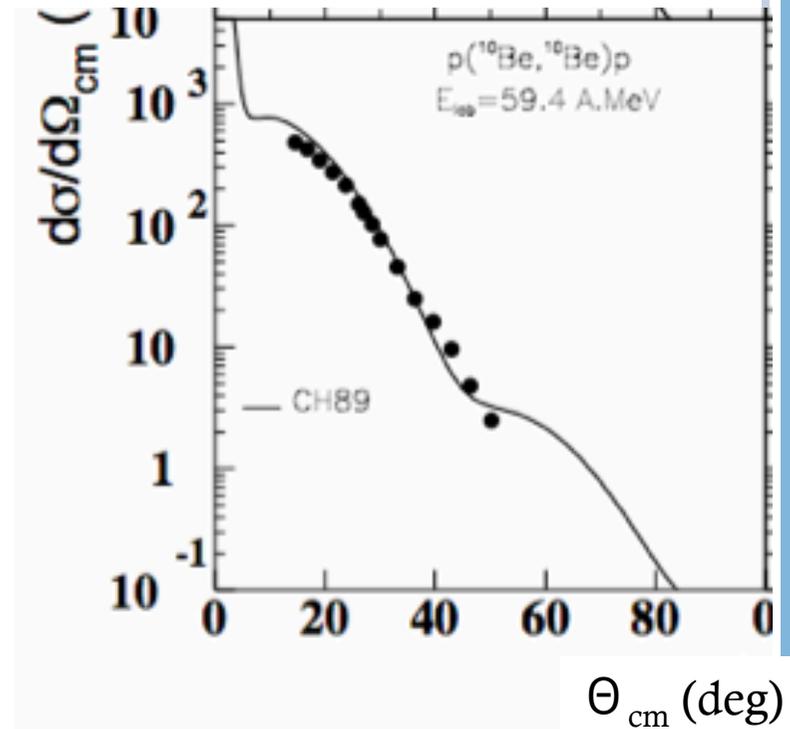
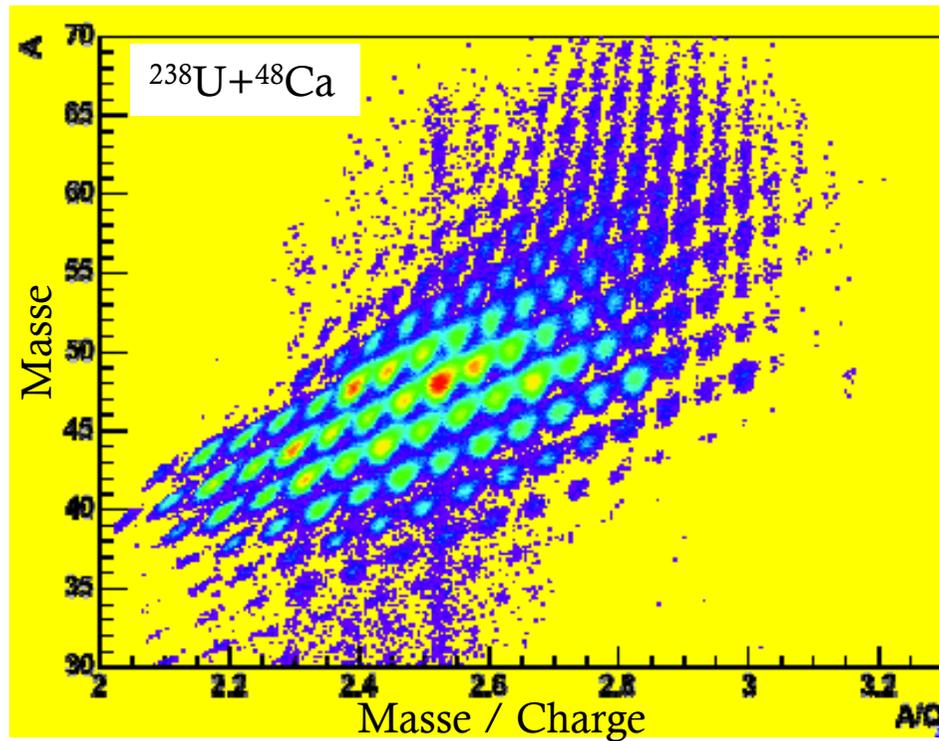
## NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

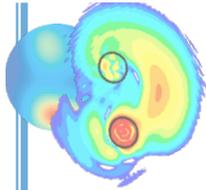
- Le résidu lourd recul :

- proche de 0 degré (à l'avant)

- il est proche du faisceau (résidu du faisceau-

→ besoin d'un **spectromètre magnétique** de grande précision  $B\rho = \frac{p}{Q}$





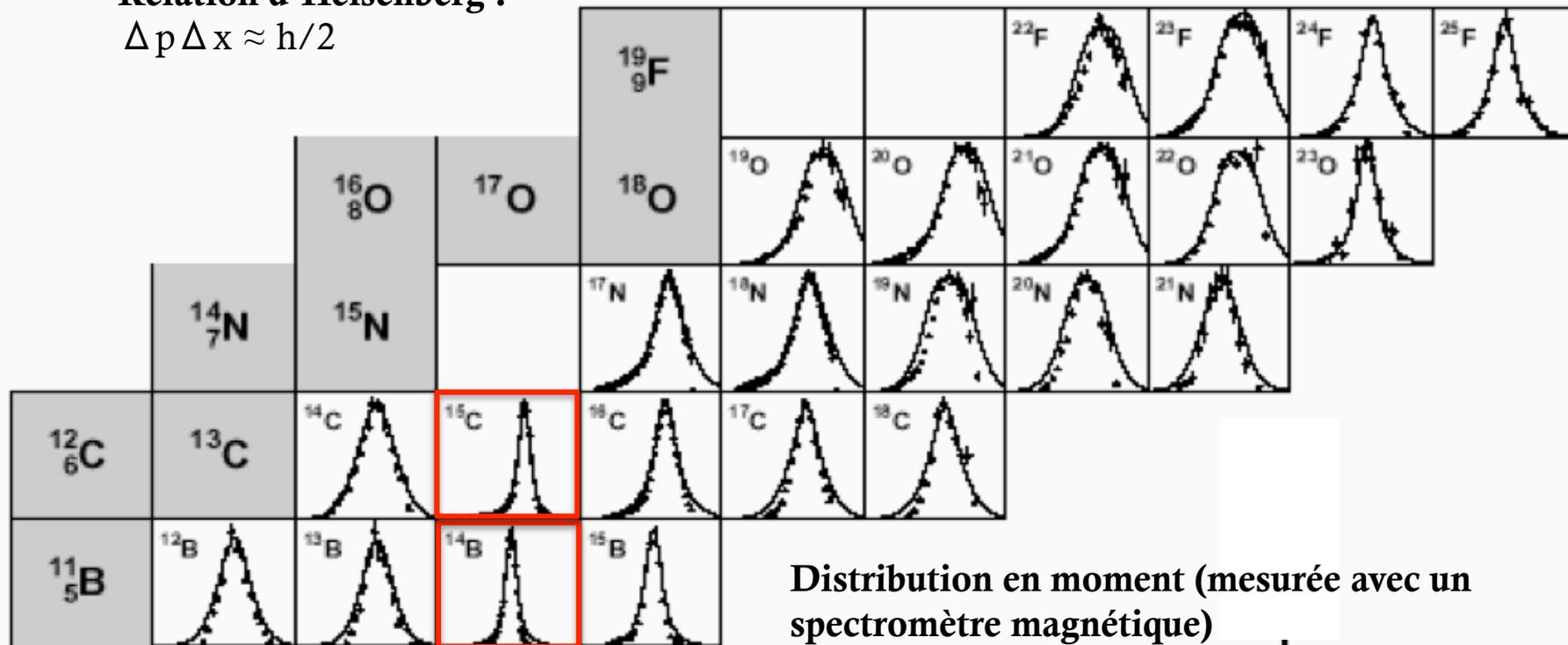
## NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

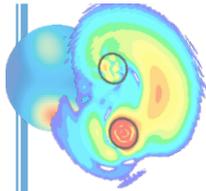
- Le résidu lourd recul :
  - proche de 0 degré (à l'avant)
  - il est proche du faisceau (résidu du faisceau-

→ besoin d'un **spectromètre magnétique** de grande précision  $B\rho = \frac{p}{Q}$

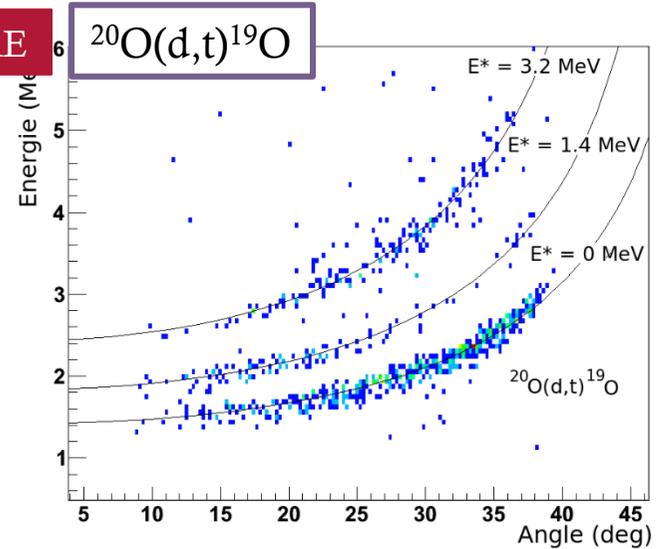
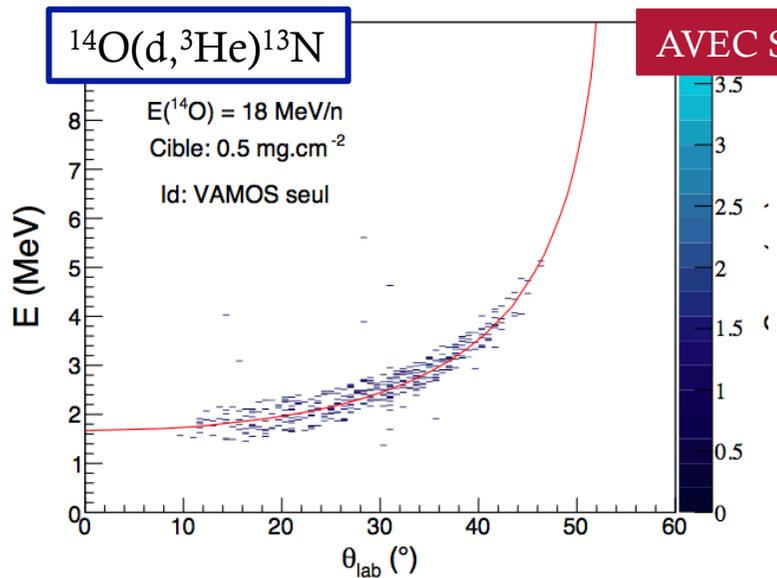
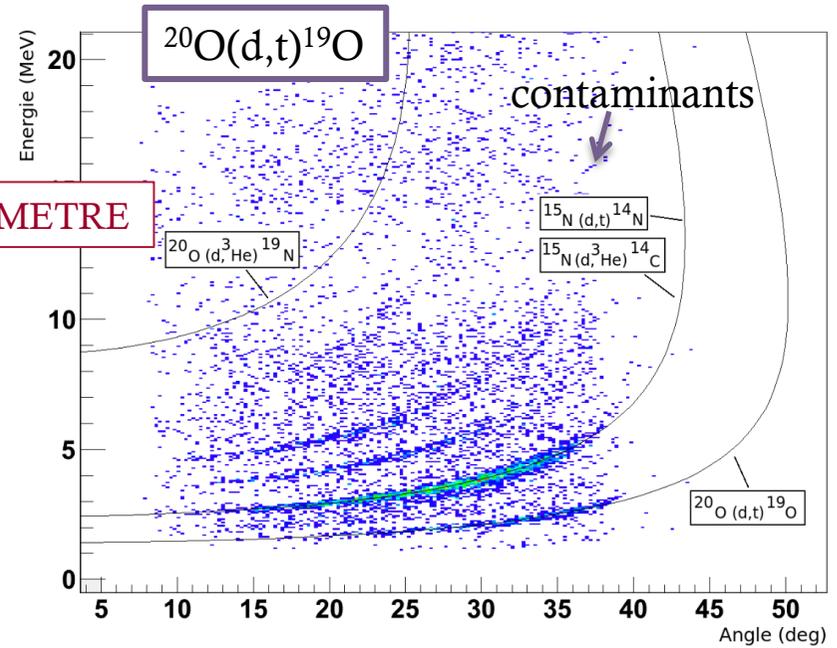
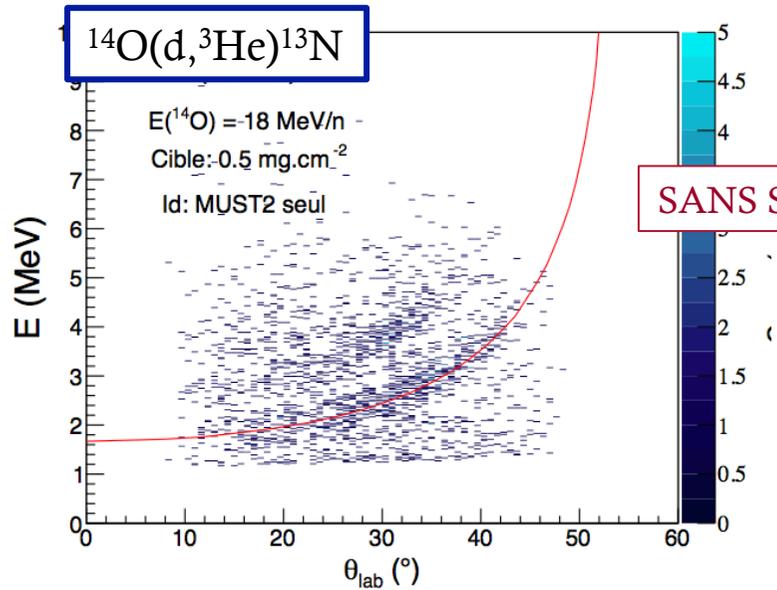
**Relation d'Heisenberg :**

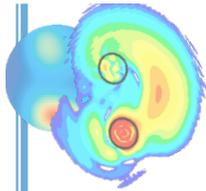
$$\Delta p \Delta x \approx h/2$$





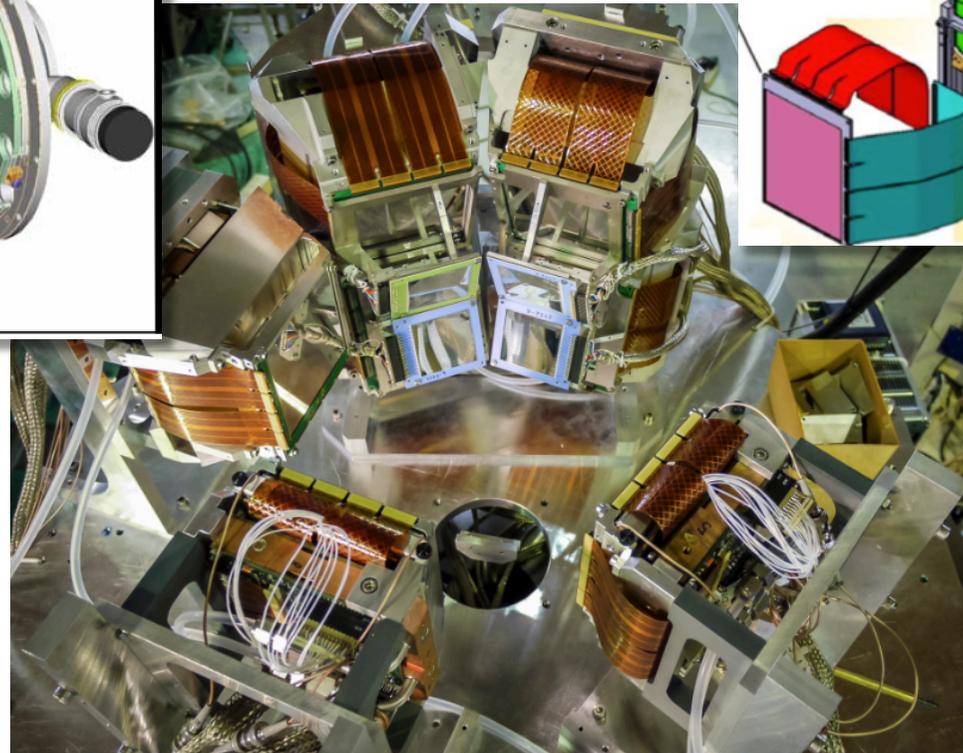
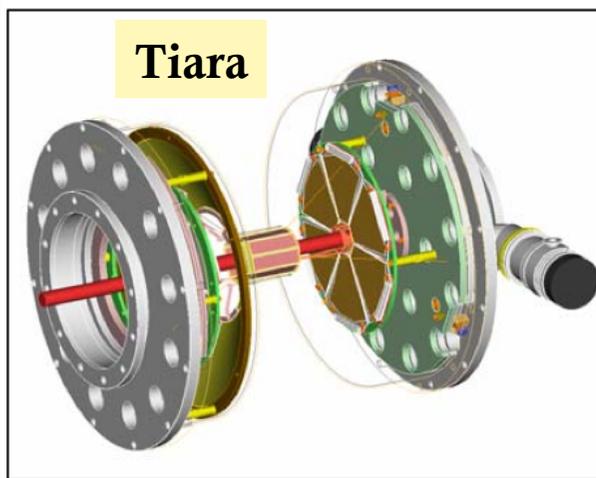
# EXEMPLE D'UNE RÉACTION DE TRANSFERT AVEC ET SANS SPECTROMÈTRE



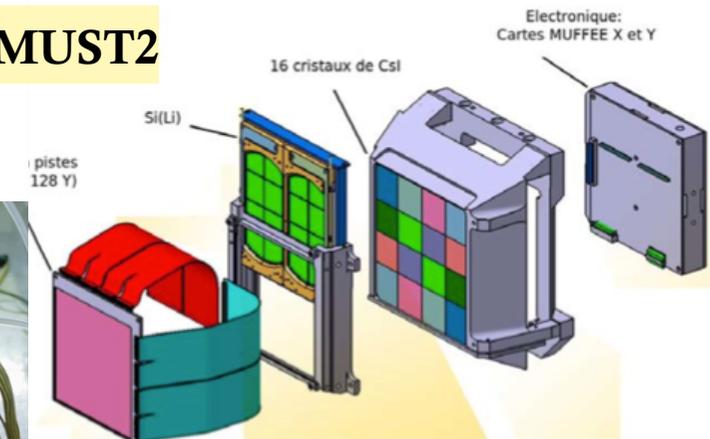


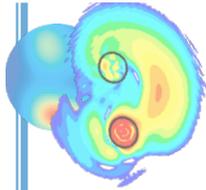
# DÉTECTION DE LA PARTICULE LÉGÈRE

- ▶ En fonction des lignes de cinématique : à l'avant (p,d), à l'arrière (d,p) ou 90° emission (elastic)
- ▶ Granularité (10x10 cm<sup>2</sup>, 128 pistes de chaque côté), couverture angulaire
- ▶ Efficacité ~100%, seuil en énergie 100 keV
- ▶ Résolution ~50 keV (Si), ~150 keV (CsI)
- ▶ Résolution sur l'énergie finale ~500 keV (effets de cible)



## MUST2

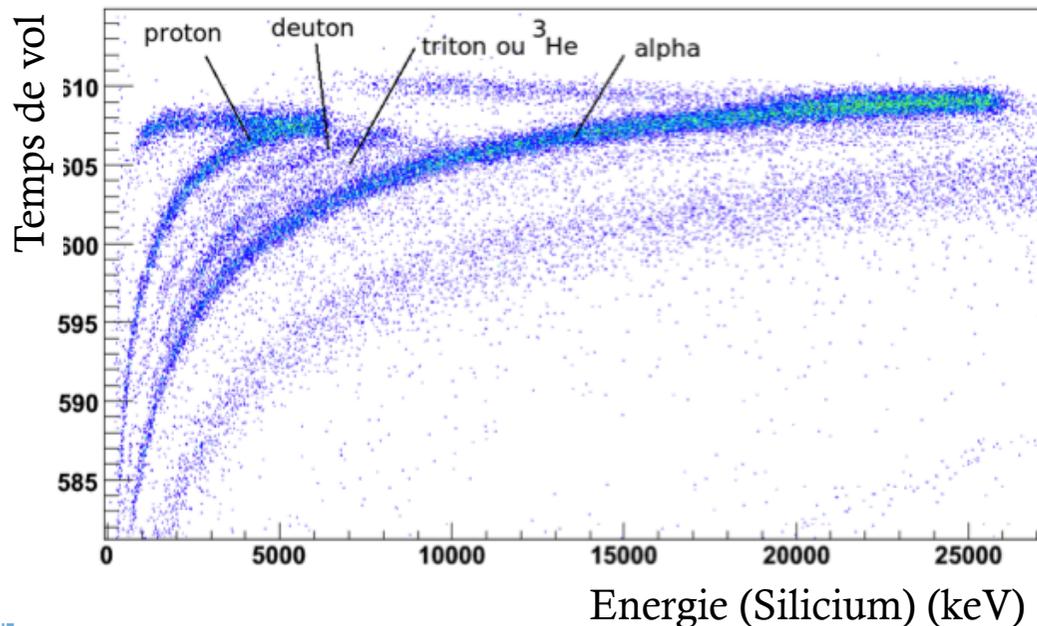




# DÉTECTION DE LA PARTICULE LÉGÈRE

- ▶ En fonction des lignes de cinématique : à l'avant (p,d), à l'arrière (d,p) ou 90° emission (elastic)
- ▶ Grande granularité (10x10 cm<sup>2</sup>, 128 pistes de chaque côté)
- ▶ Grande couverture angulaire & modularité
- ▶ Efficacité ~100%, seuil en énergie 100 keV

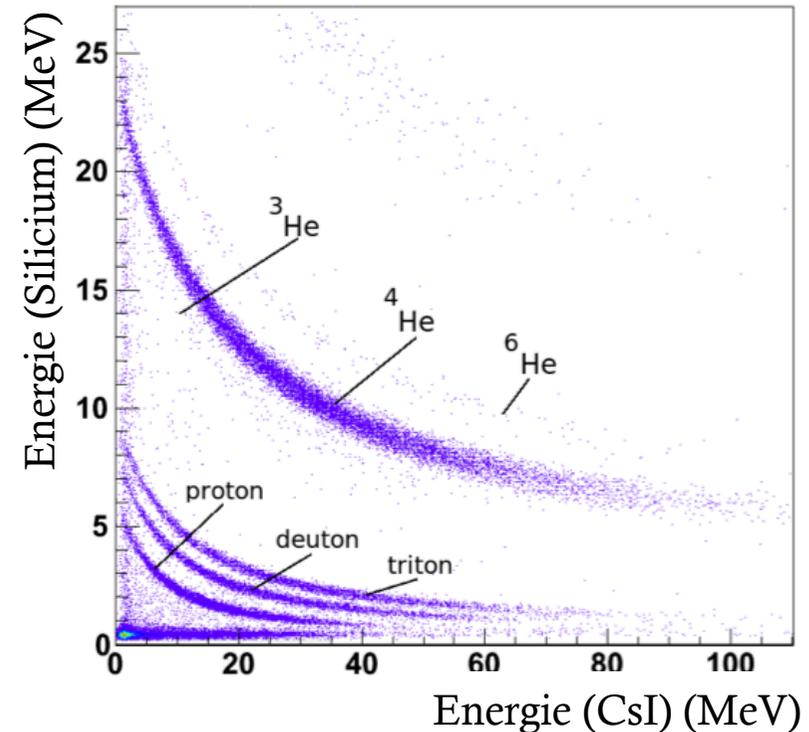
Particules de « basse énergie » (p<5 MeV)



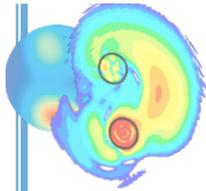
Identification pour les noyaux qui s'arrêtent dans le 1<sup>er</sup> étage

!!! Il faut un détecteur pour donner le START

Particules de plus haute énergie (p>5 MeV)

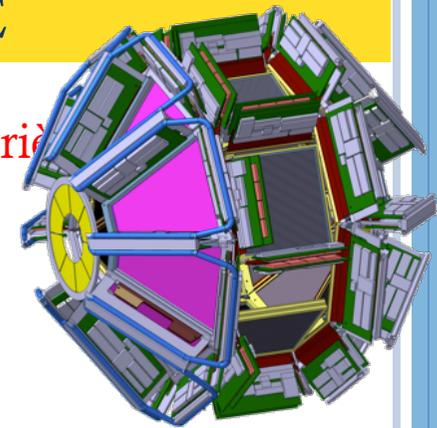


Identification pour les noyaux qui traversent le 1<sup>er</sup> étage

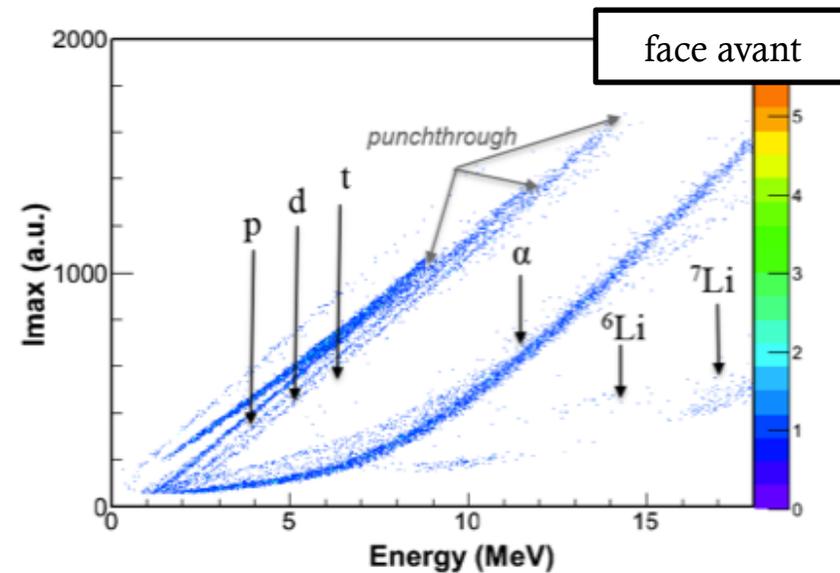
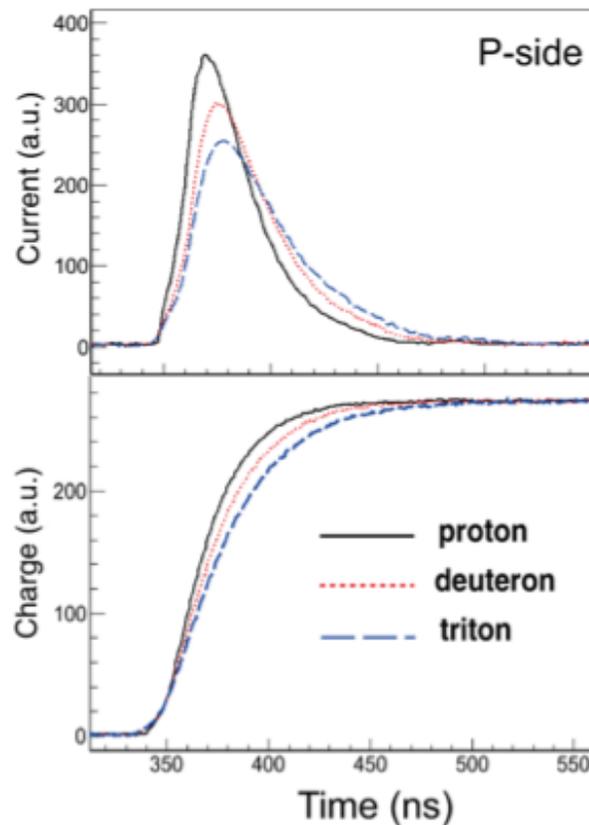


# DÉTECTION DE LA PARTICULE LÉGÈRE

- ▶ En fonction des lignes de cinématique : à l'avant (p,d), à l'arrière ( $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ), à  $90^\circ$  emission (elastic)
- ▶ Grande granularité ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , 128 pistes de chaque côté)
- ▶ Grande couverture angulaire & modularité
- ▶ Efficacité  $\sim 100\%$ , seuil en énergie 100 keV

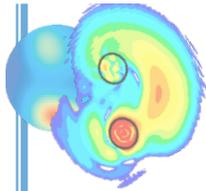


Nouvelle technique : analyse de la forme des signaux



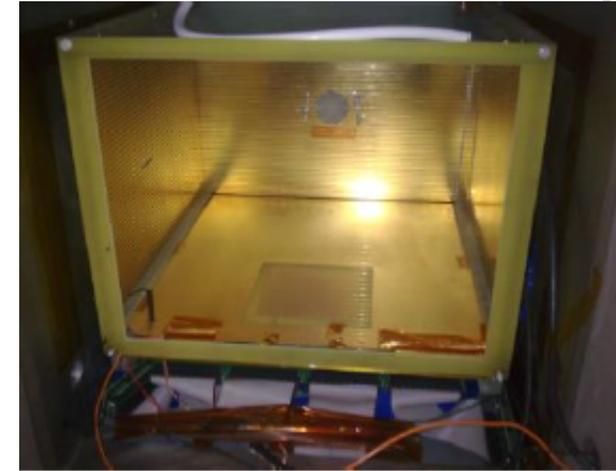
On utilise l'amplitude du signal de courant !

Méthode utilisée pour le projet **GRIT**

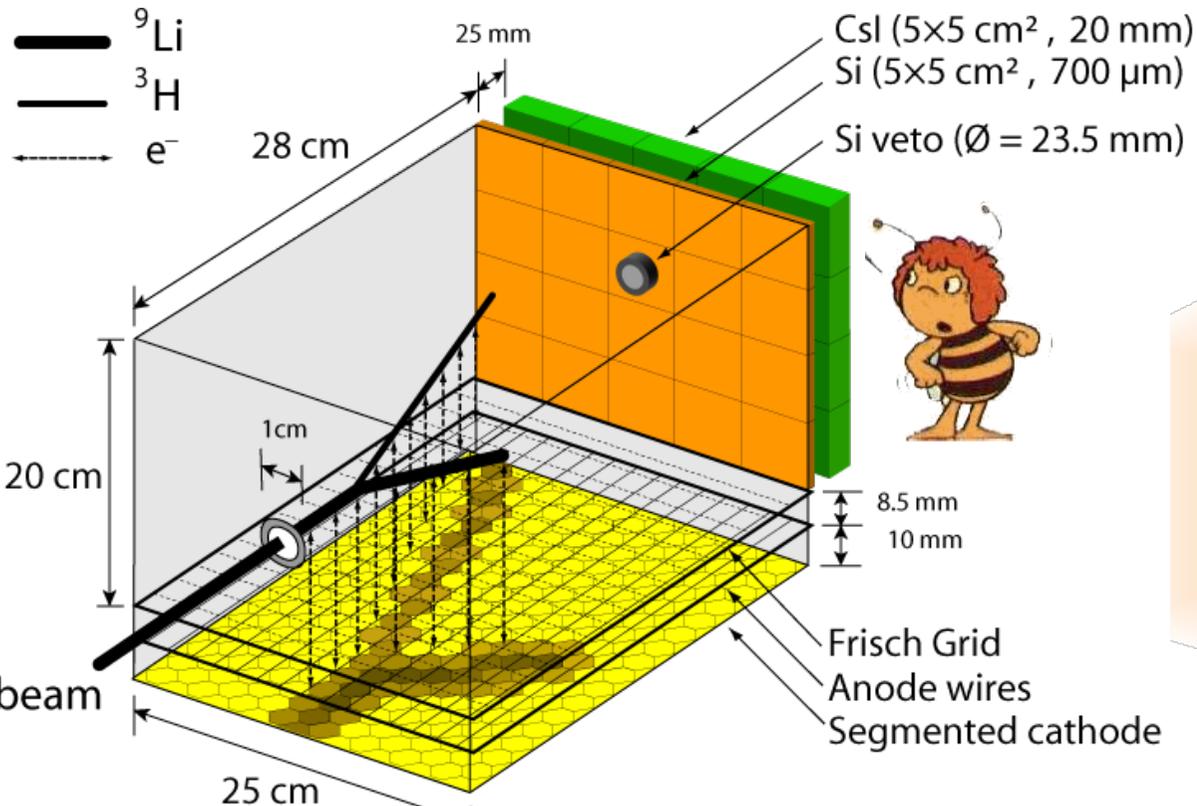


## AUTRE MÉTHODE : LES CIBLES ACTIVES

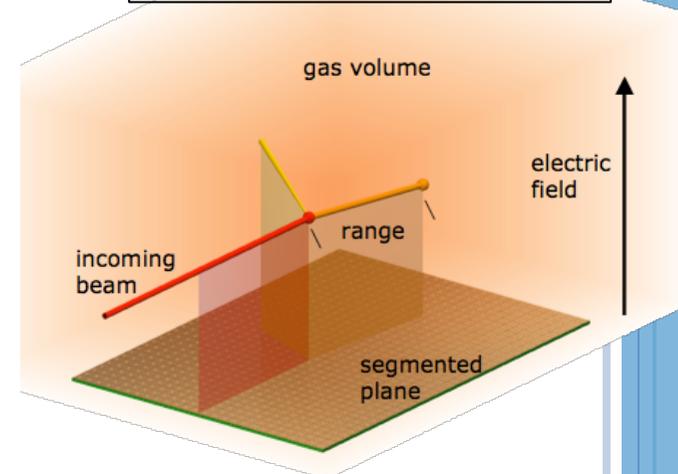
- ▶ Problème des pertes d'énergie dans la cible résolu
- ▶ Seuil très bas (la particule n'a pas besoin de sortir de la cible)
- ▶ Efficacité ~ 90% (sauf partie proche du faisceau)
- ▶ Toutes les cibles ne sont pas possibles (gaz)

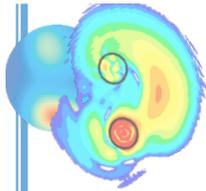


### MAYA



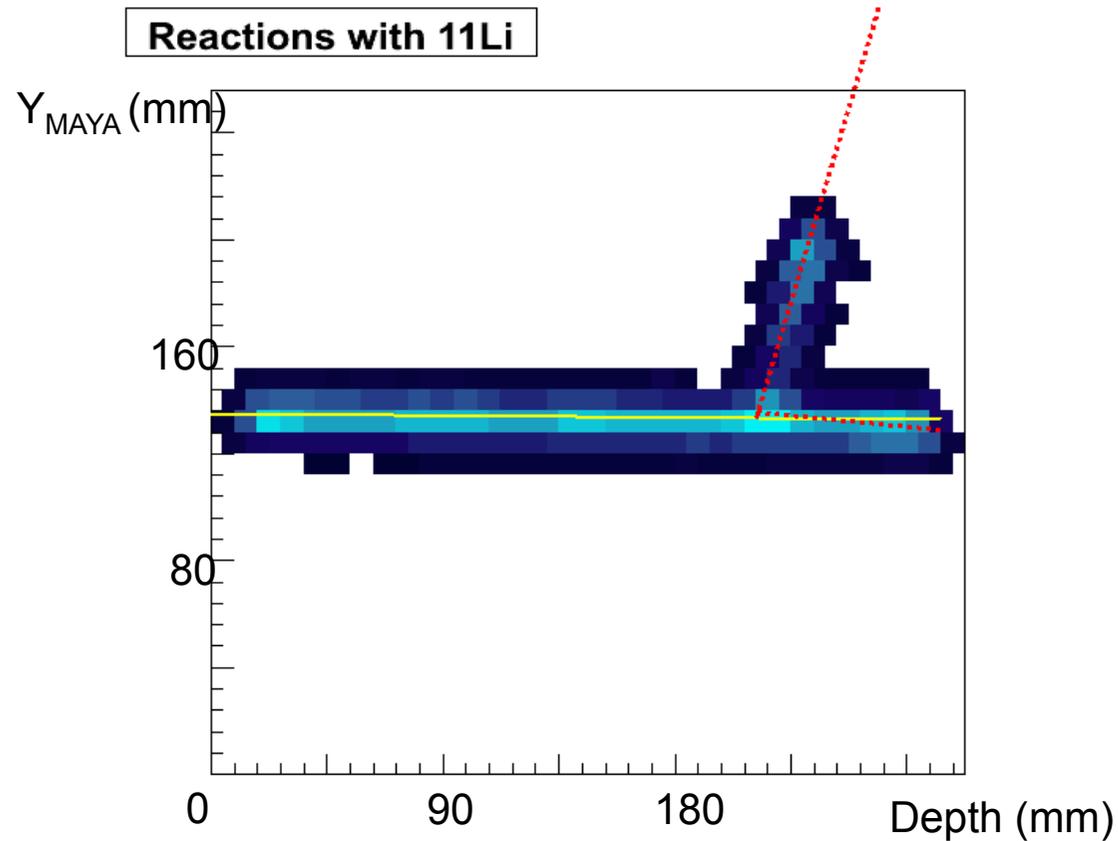
ACTAR : le successeur !

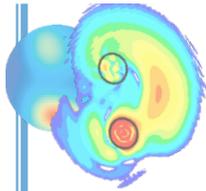




## AUTRE MÉTHODE : LES CIBLES ACTIVES

- ▶ Problème des pertes d'énergie dans la cible résolu
- ▶ Seuil très bas (la particule n'a pas besoin de sortir de la cible)
- ▶ Efficacité~ 90% ( sauf partie proche du faisceau)
- ▶ Toutes les cibles ne sont pas possibles (gaz)

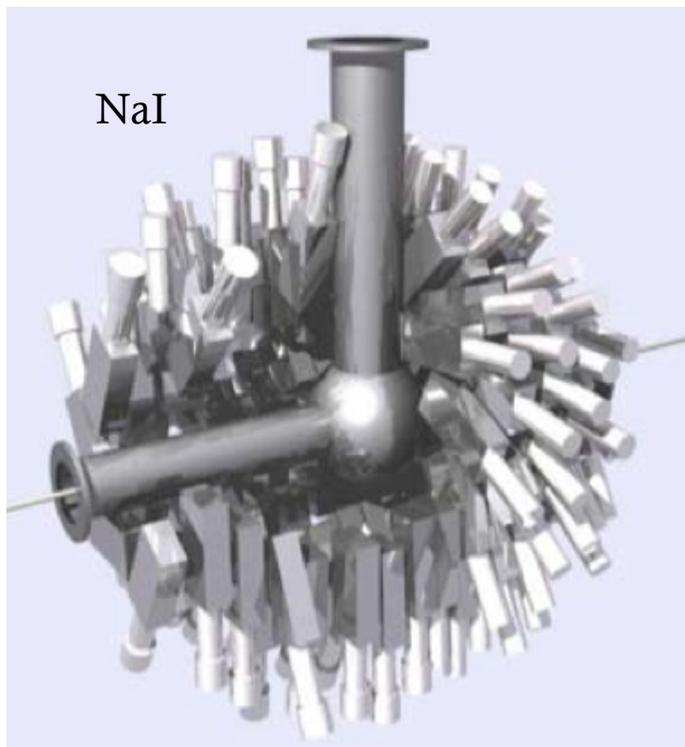




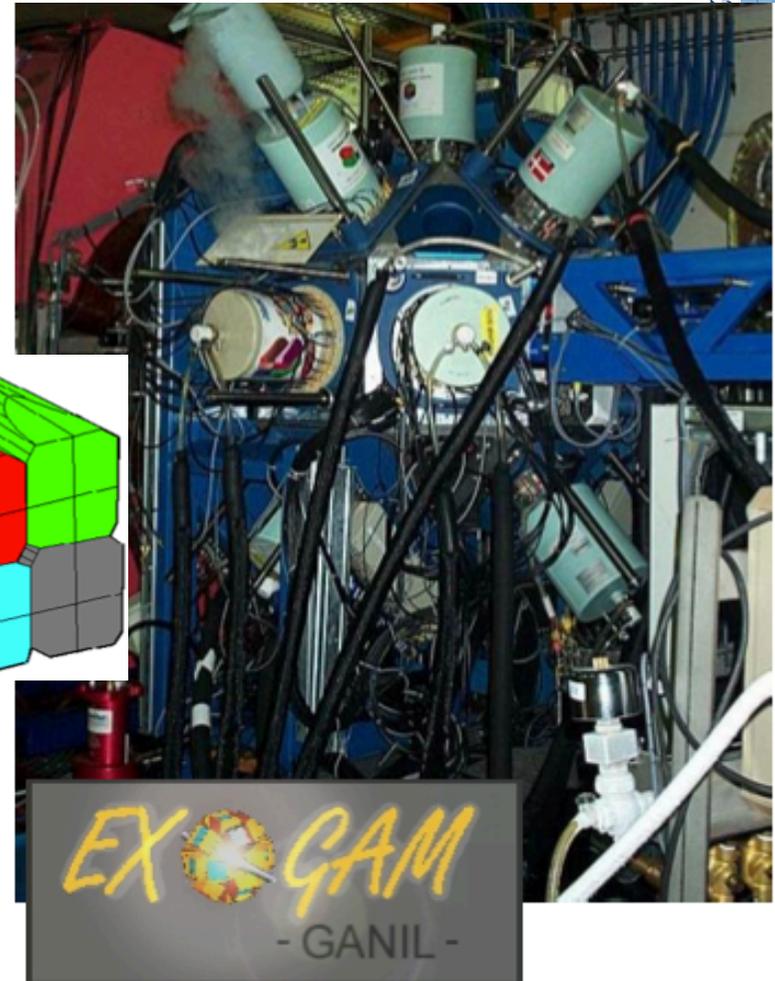
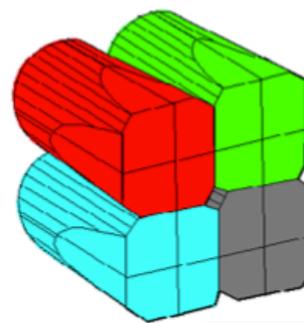
# DÉTECTION DES RAYONNEMENTS GAMMA

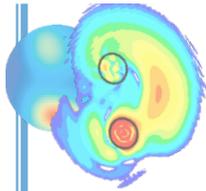
- ▶ Autour de la cible, le plus proche possible
- ▶ Efficacité = efficacité intrinsèque x efficacité géométrique  $\sim 10\%$  à 1MeV pour EXOGAM
- ▶ Résolution en énergie intrinsèque: qq keV

21/11



Dali 2 RIKEN





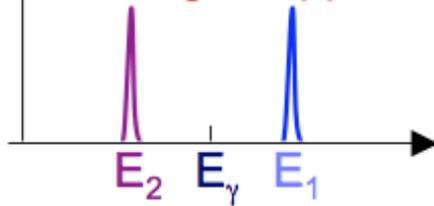
# EFFET DOPPLER

Observateur : Fréquence onde change avec vitesse (valeur, direction) émetteur  
 $\gamma$ : fréquence  $\leftrightarrow$  énergie ( $E = h\nu$ ,  $\nu$  fréquence)  $\gamma \Rightarrow$  énergie détectée pas bonne !  
 $\theta$  : angle entre direction  $\vec{v}$  et direction observateur/détecteur

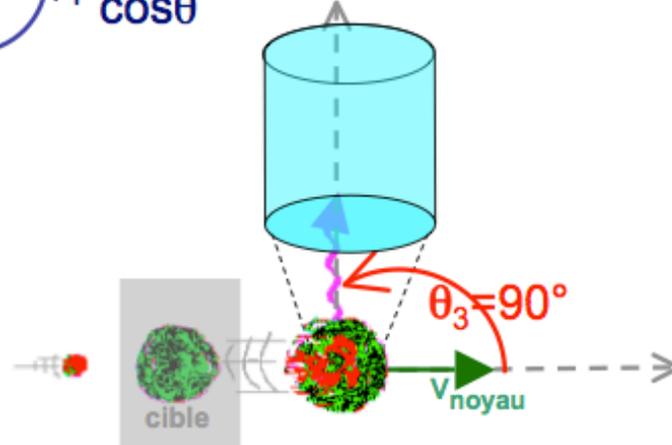
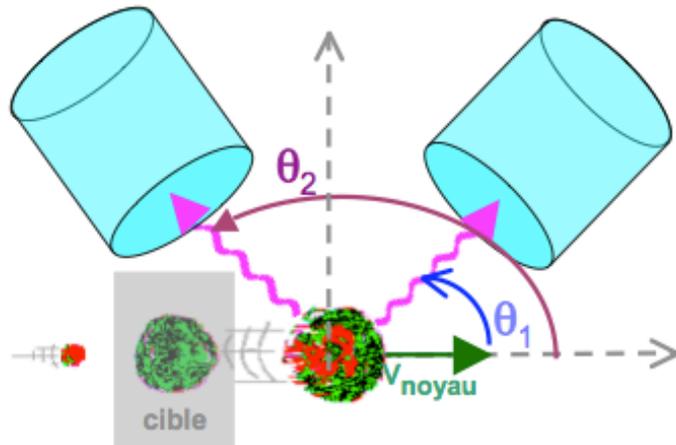
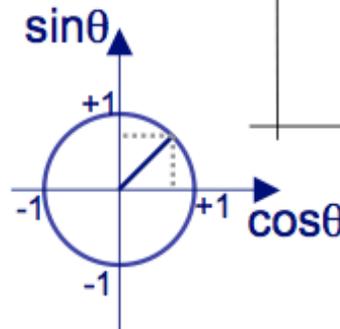
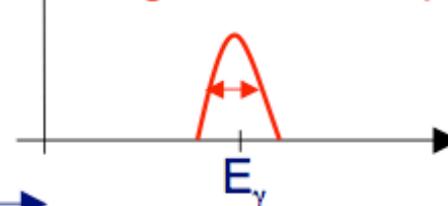
On a :  $E_{\text{dét.}} = E_{\gamma} \left(1 + \frac{v_{\text{noyau}}}{c} \cos\theta\right)$

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

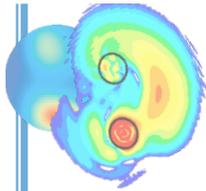
décalage doppler:  $\theta \neq 90^\circ$



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



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

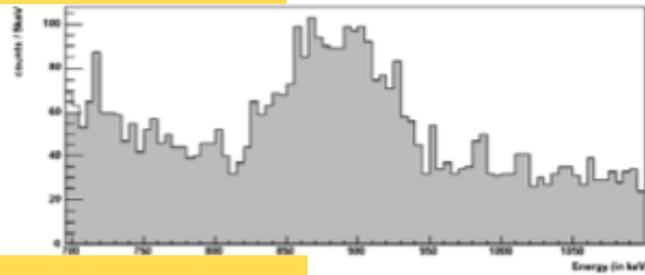


# DÉTECTION DES GAMMAS : EFFET DOPPLER

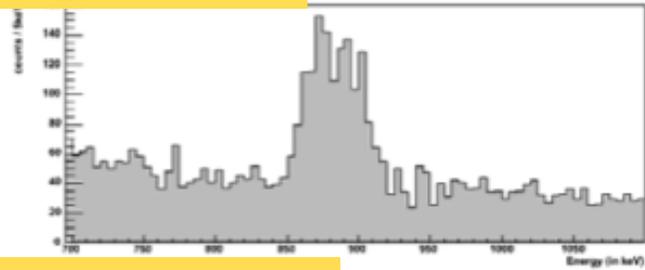
$$E_{\gamma} = \gamma E_{\text{det}} (1 - \beta \cos \theta)$$

## ► Utilisation de la segmentation

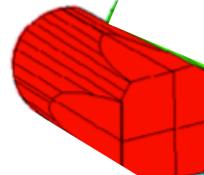
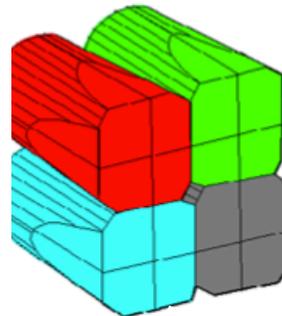
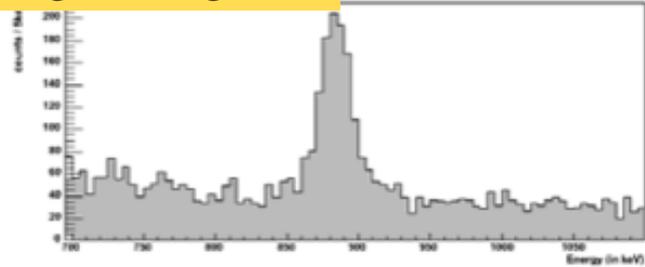
### Angle du trèfle



### Angle du cristal

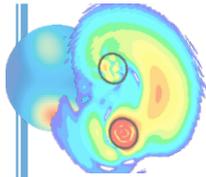


### Angle du segment

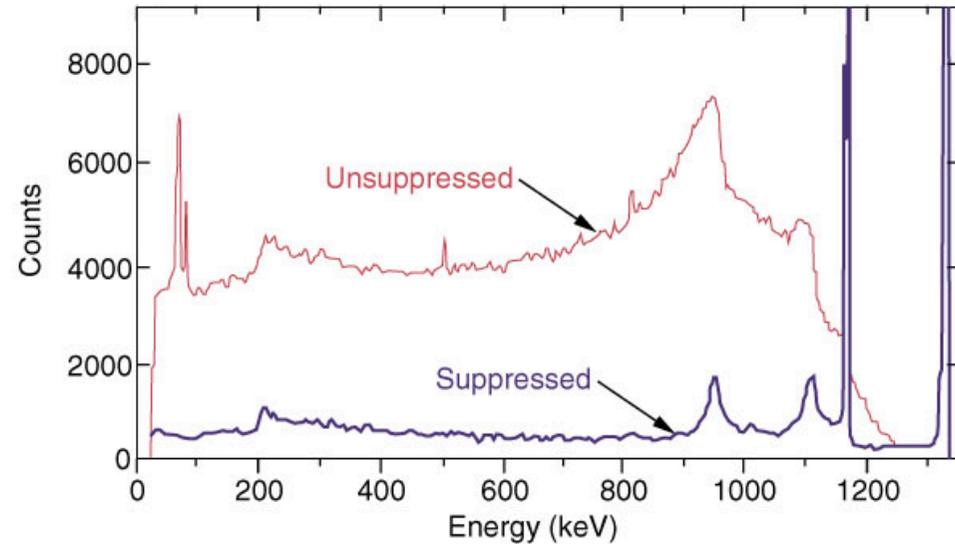
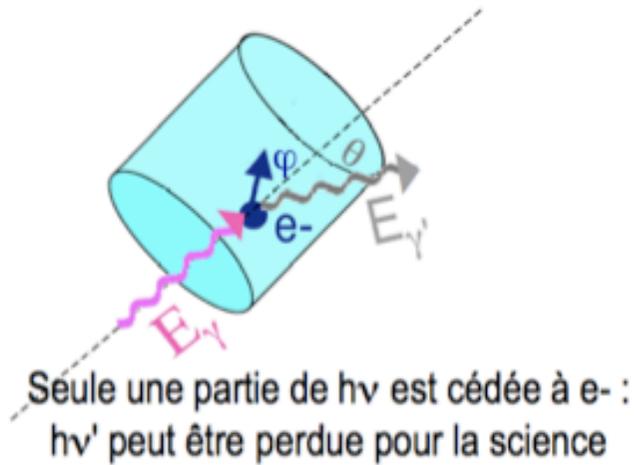


1 segment



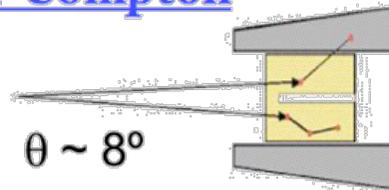


# LA LUTTE CONTRE LA DIFFUSION COMPTON



## Ge avec bouclier anti-Compton

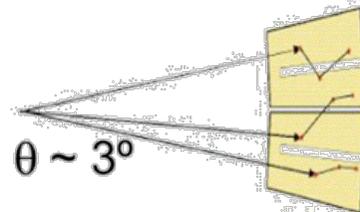
$\epsilon_{ph} \sim 10\%$   
 $N_{det} \sim 100$   
 $\Omega \sim 40\%$



Grand ouverture angulaire  $\rightarrow$  mauvaise résolution en énergie à grande vitesse

## Sphère de Ge

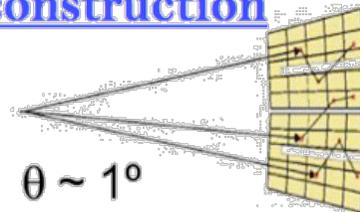
$\epsilon_{ph} \sim 50\%$   
 $N_{det} \sim 1000$



Trop de détecteurs sont nécessaires pour éviter les effets de sommation

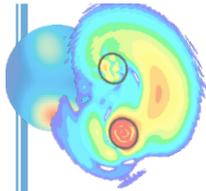
## Groupe de Ge avec reconstruction

$\epsilon_{ph} \sim 50\%$   
 $N_{det} \sim 100$   
 $\Omega \sim 80\%$

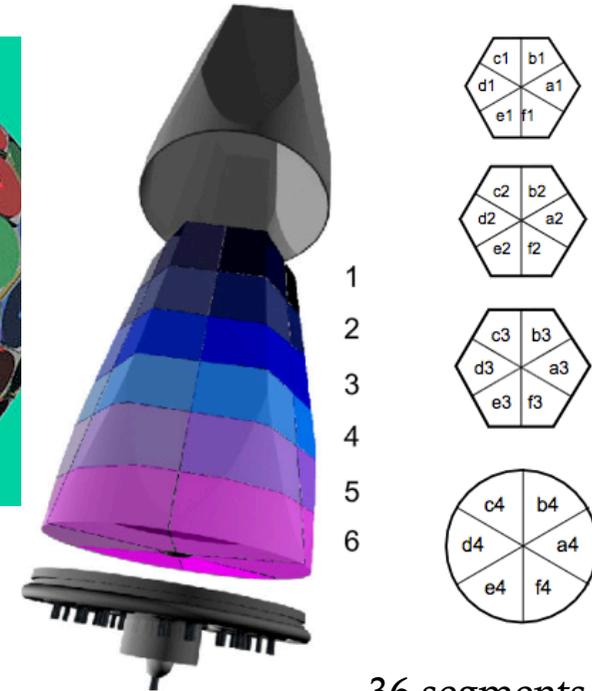
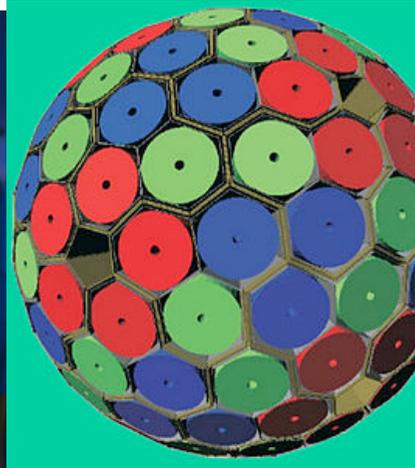
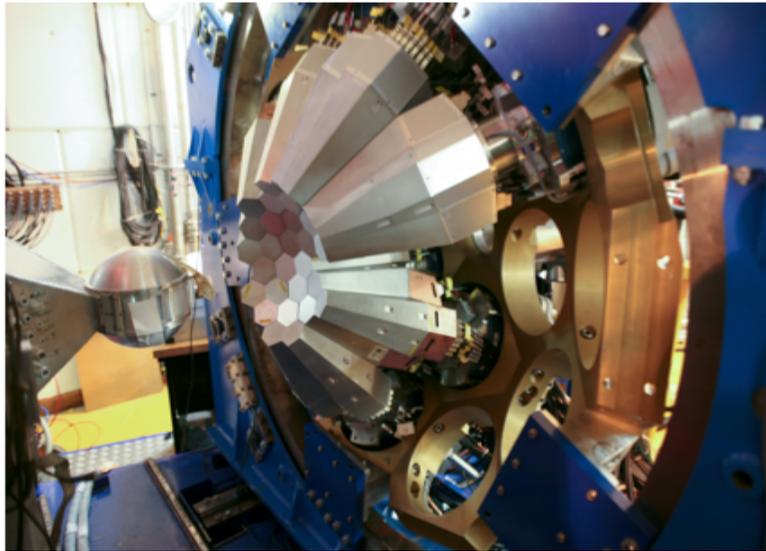


Combinaison de :

- détecteurs segmentés
- électronique digitale
- analyse des signaux
- tracking gamma



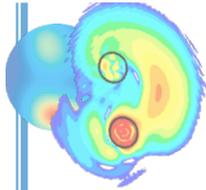
# AGATA : LA NOUVELLE GÉNÉRATION



36 segments

- Ge hautement segmenté
- Analyse de la forme des signaux pour déterminer la position du gamma (< 5 mm LTMH)
- Electronique digitale





# AGATA : LA NOUVELLE GÉNÉRATION

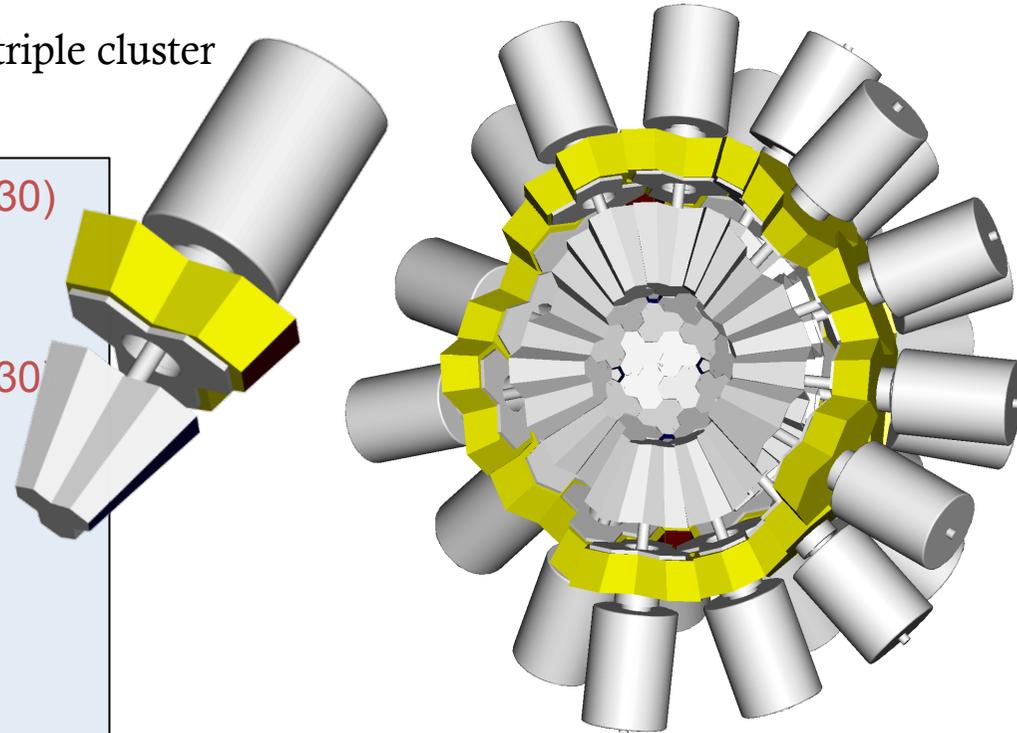
Un triple cluster

<b>Efficacité:</b> 40% ( $M_\gamma=1$ )	25% ( $M_\gamma=30$ )
today's arrays ~10% (gain ~4 ~1000)	5% (gain ~1000)

<b>Peak/Total:</b> 65% ( $M_\gamma=1$ )	50% ( $M_\gamma=30$ )
today ~55%	40%

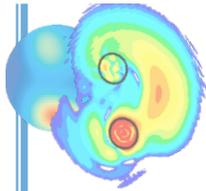
**Angular Resolution:**  $\sim 1^\circ \rightarrow$   
FWHM (1 MeV,  $v/c=50\%$ )  $\sim 6$  keV !!!  
today  $\sim 40$  keV

<b>Rates:</b> 3 MHz ( $M_\gamma=1$ )	300 kHz ( $M_\gamma=30$ )
today 1 MHz	20 kHz



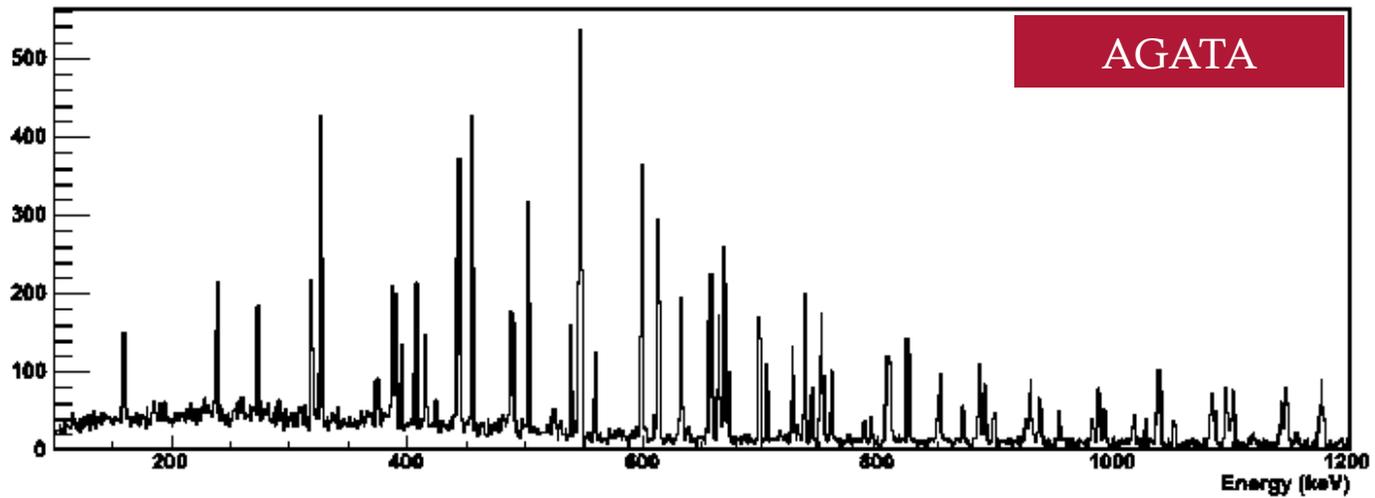
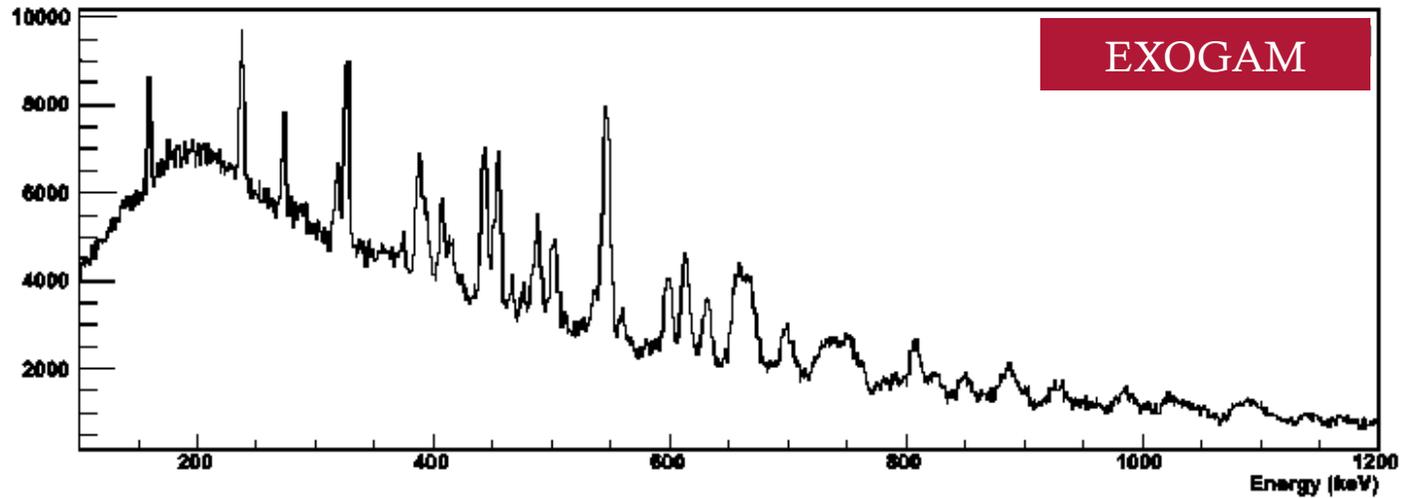
Distance entre les faces avant des cristaux:  
même cluster  $\sim 2.6$  mm  
clusters adjacent  $\sim 9.0$  mm

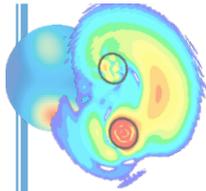
Poids des 60 clusters d'AGATA  $\sim 2.5$  t  
Mécanique auto-portante



# COMPARAISON AGATA-EXOGAM

Réaction de fusion évaporation

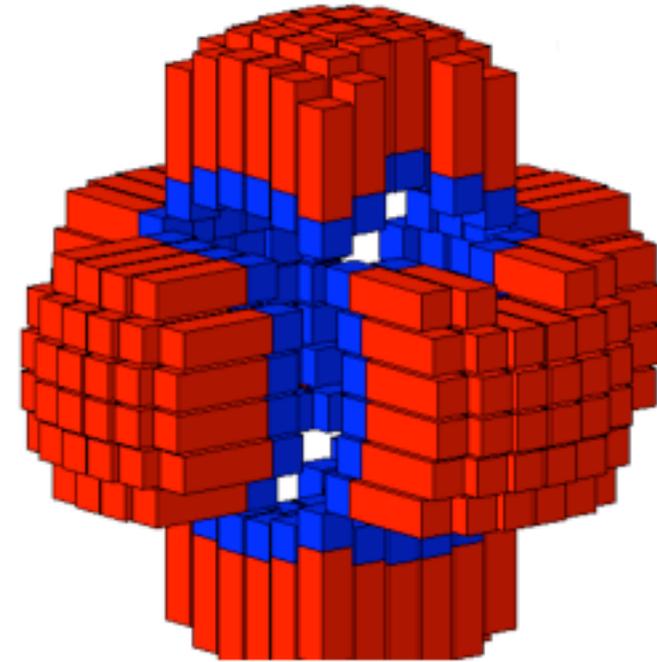
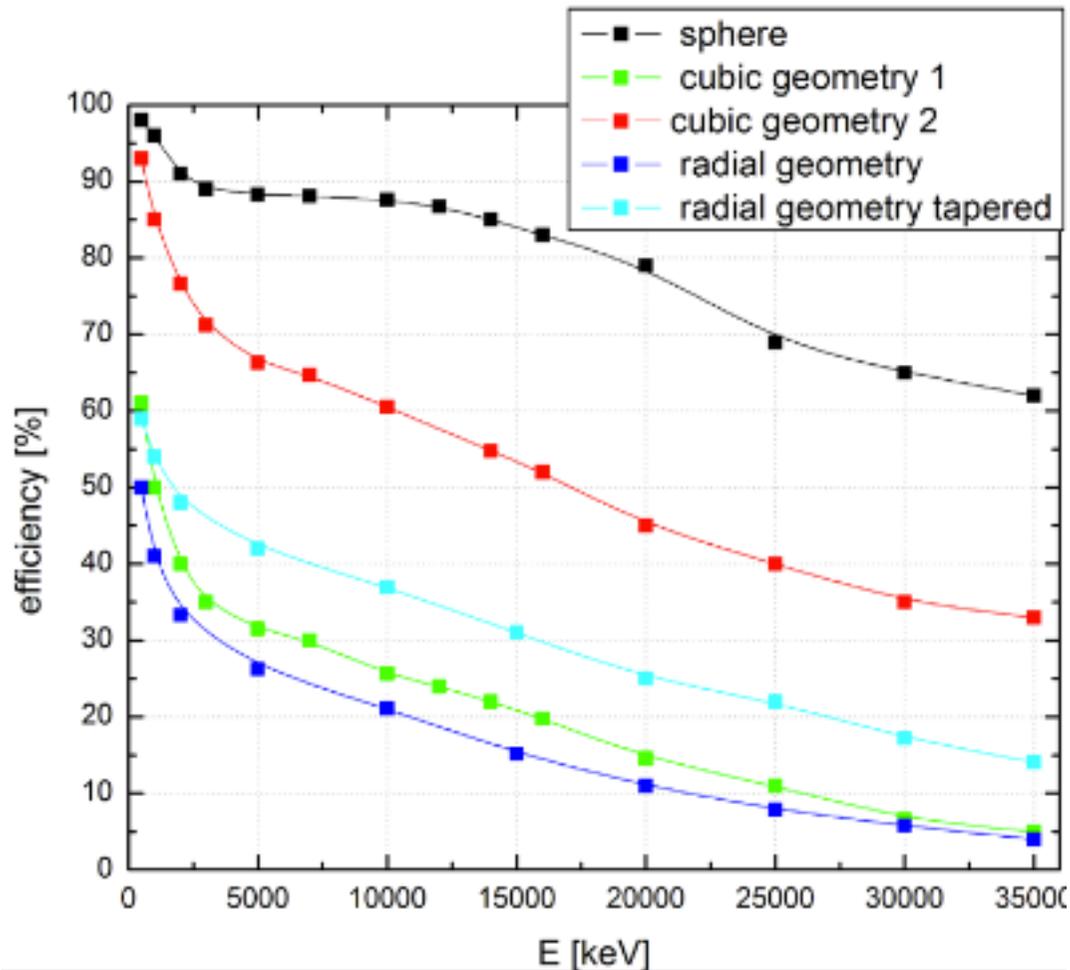




# LE DÉTECTEUR PARIS

Une stratégie différente d'AGATA:

- efficacité supérieure
- résolution moins bonne

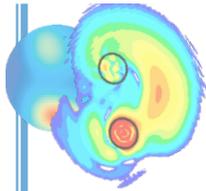


LaBr3  
(2"x2")

CsI(Na) or NaI  
(2"x6")

PMT



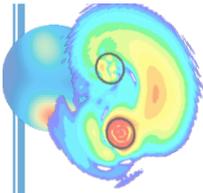


# GE VS. LA $\text{Br}_3$ POUR DÉTECTER LES GAMMAS

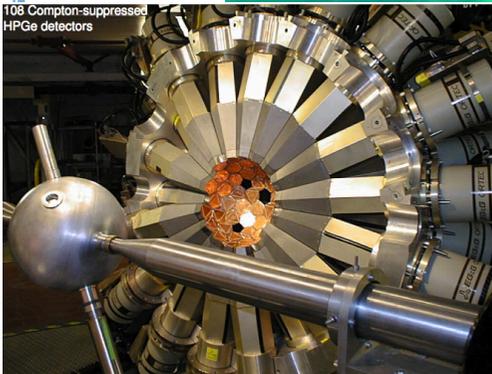
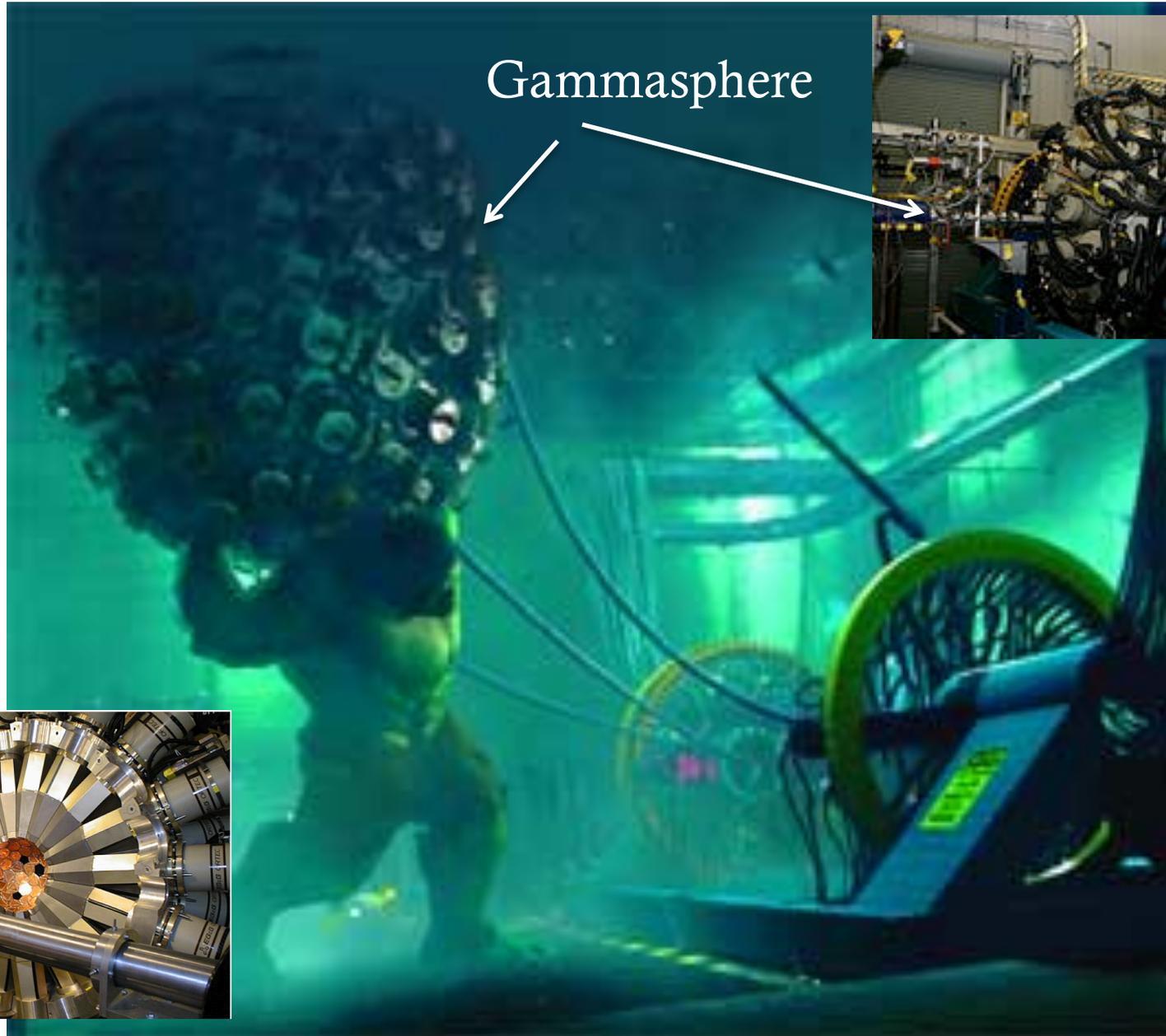
AGATA

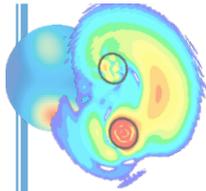
PARIS

GOOD NOT SO GOOD	Ge (3"X3")	LaBr3 (3"x3")
type	Semiconducteur: $\gamma \rightarrow \text{e}^-$	Scintillateur: $\gamma \rightarrow N(h\nu)$ $\Rightarrow$ 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 <sub>abs</sub> @1" [1] (Eff <sub>rel</sub> @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]



# LA RECONVERSION DE CERTAINS DÉTECTEURS...





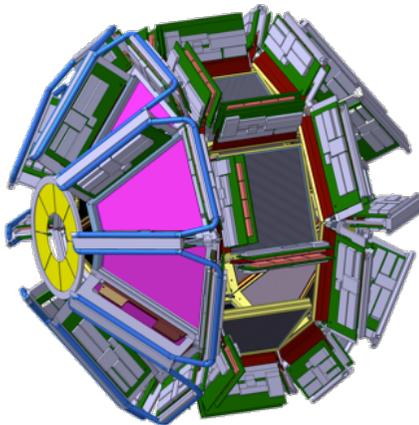
# VERS LE FUTUR ...

**Faisceaux ions légers ( $A \leq 40$ )  
→ Ions lourds (fragments de fission)**

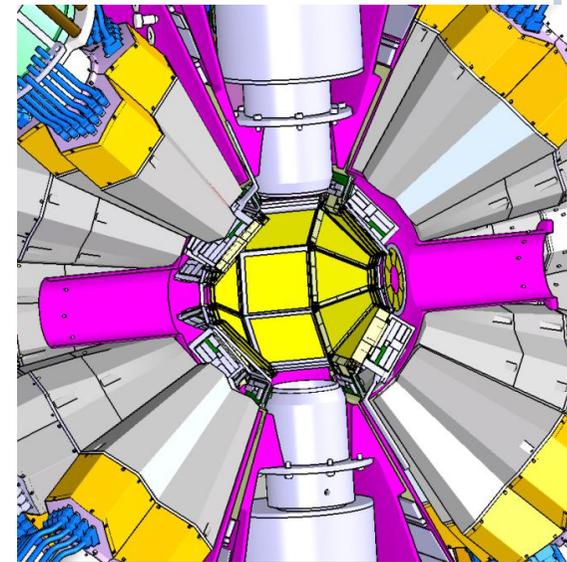
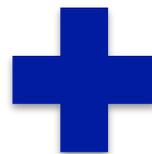
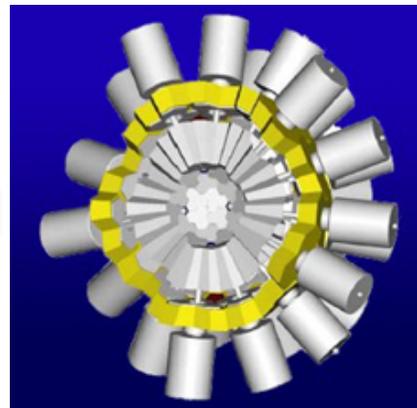
*Integration des détecteurs Siliciums dans les boules gamma à venir*

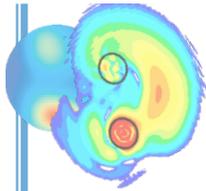


GRIT



AGATA

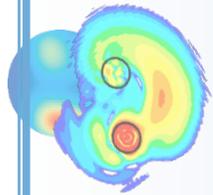




## A QUOI ÇA RESSEMBLE UNE MANIP ?



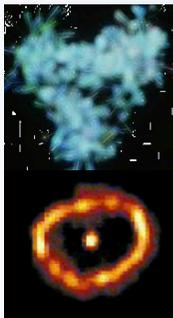
La vidéo en entier : <https://www.youtube.com/watch?v=aUxC68zb6sI>



## CE QUI CHAMBOULE NOTRE VISION DU NOYAU...



▶ **Quand les nombres magiques disparaissent ...**



▶ **Quand les nucléons « coagulent » ...**

▶ **Quand les noyaux enflent...**

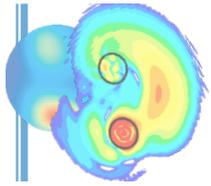


▶ **Le grand saut : Un noyau neutre ? Un noyau super-lourd**



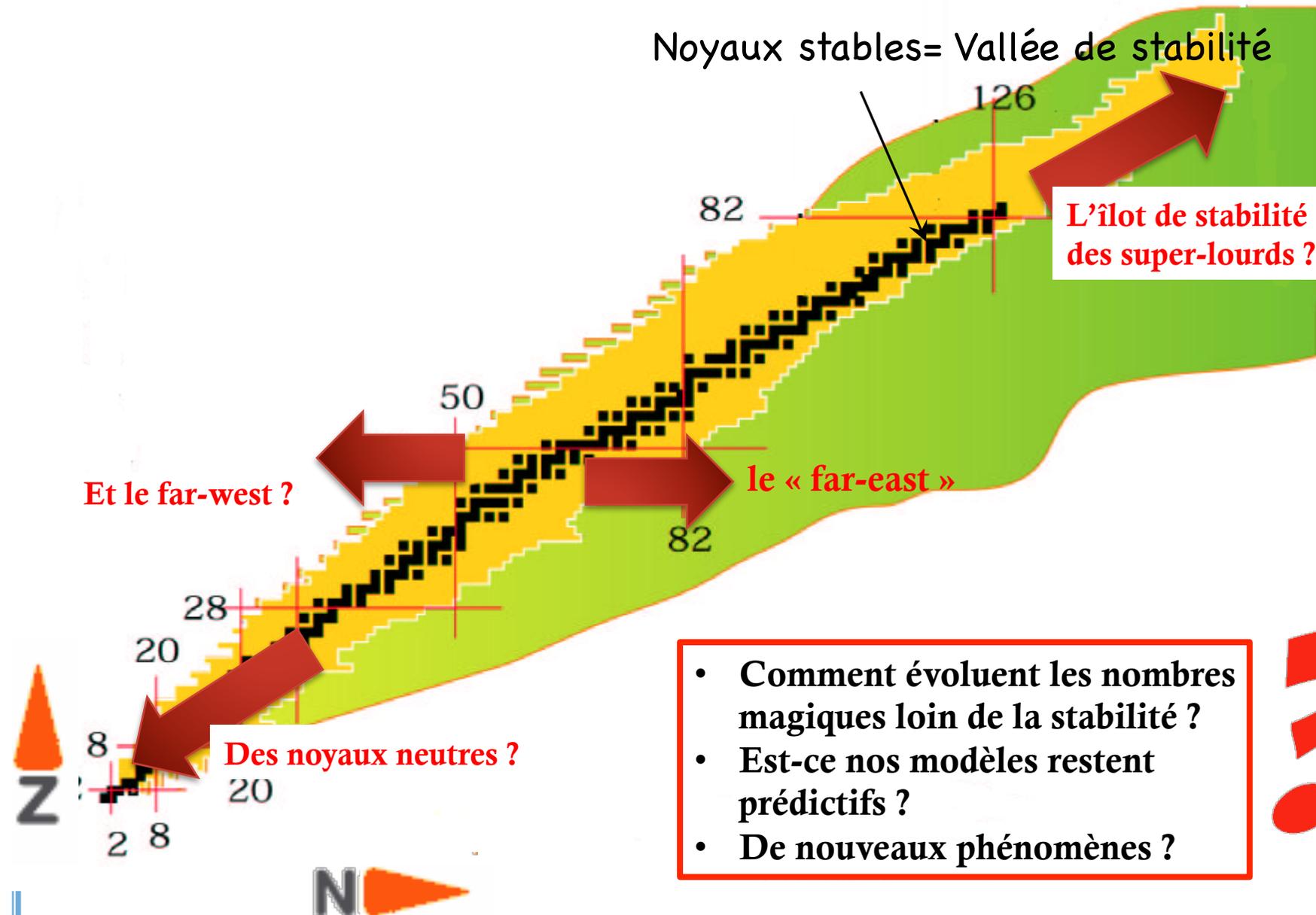
▶ **Jusqu'où repousse-t-on les limites (les noyaux non-liés) ?**

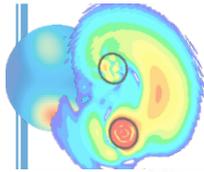
▶ **Des radioactivités exotiques**



# NOTRE TERRAIN DE JEU : LA CARTE DES NOYAUX

## I. LES LIMITES « EST-OUEST »

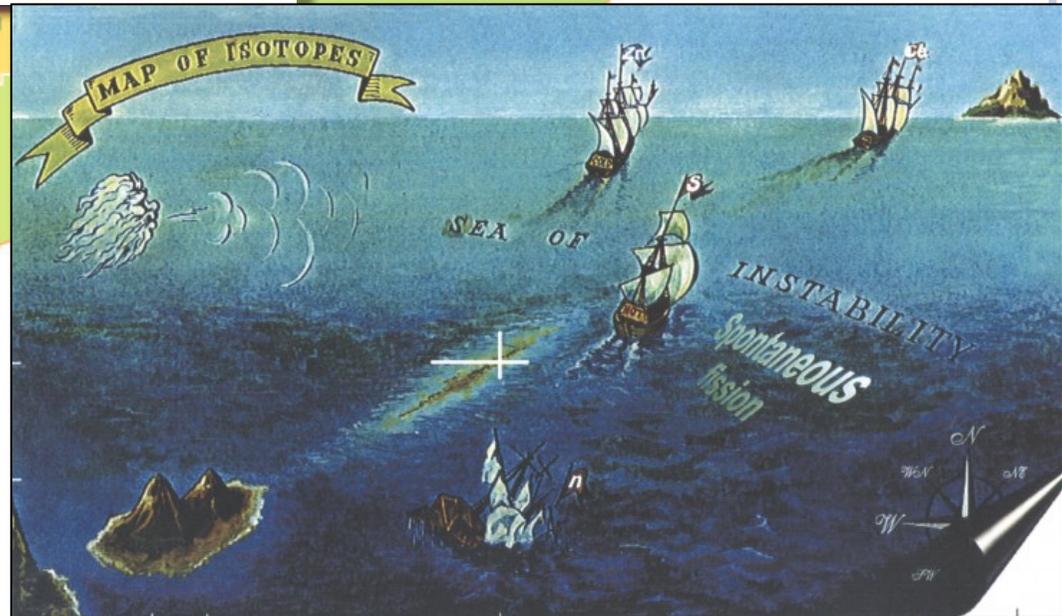
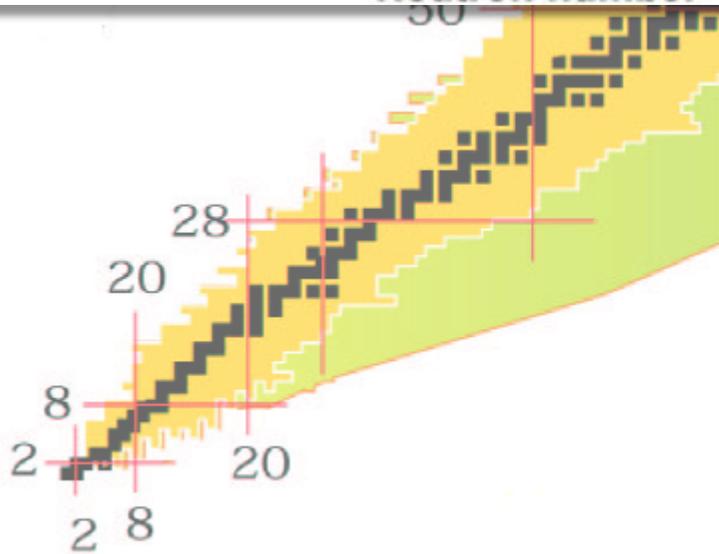
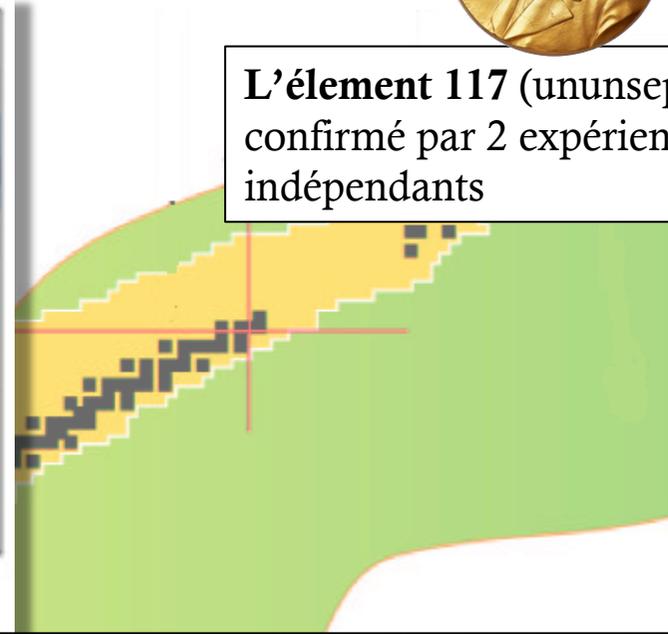
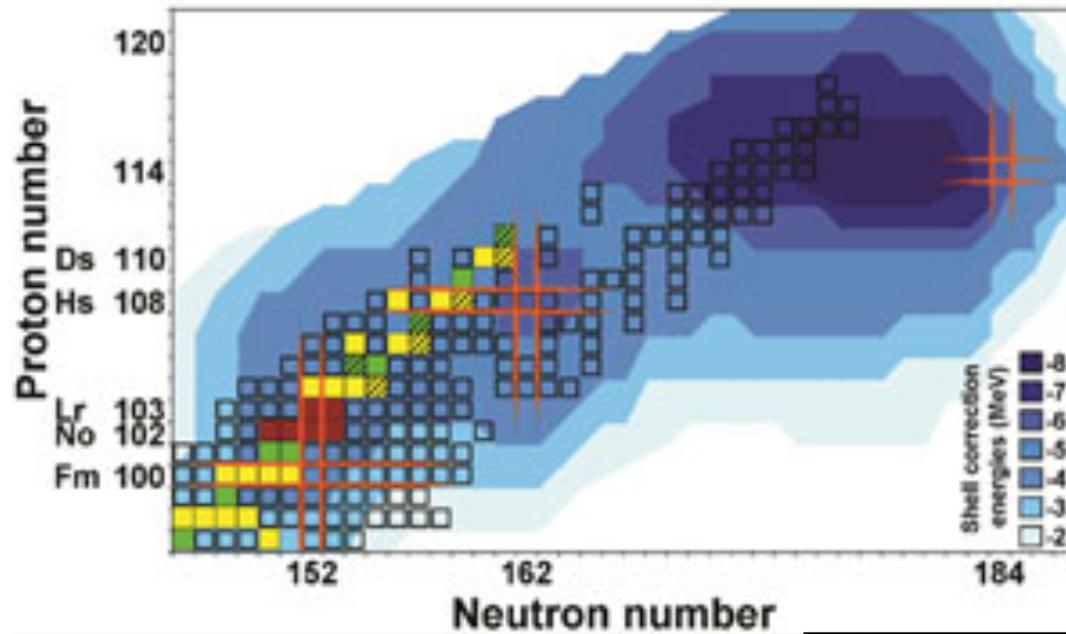


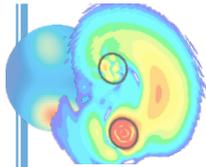


# L'ÎLOT DES SUPERLOURDS



L'élément 117 (ununseptium) confirmé par 2 expériences indépendantes



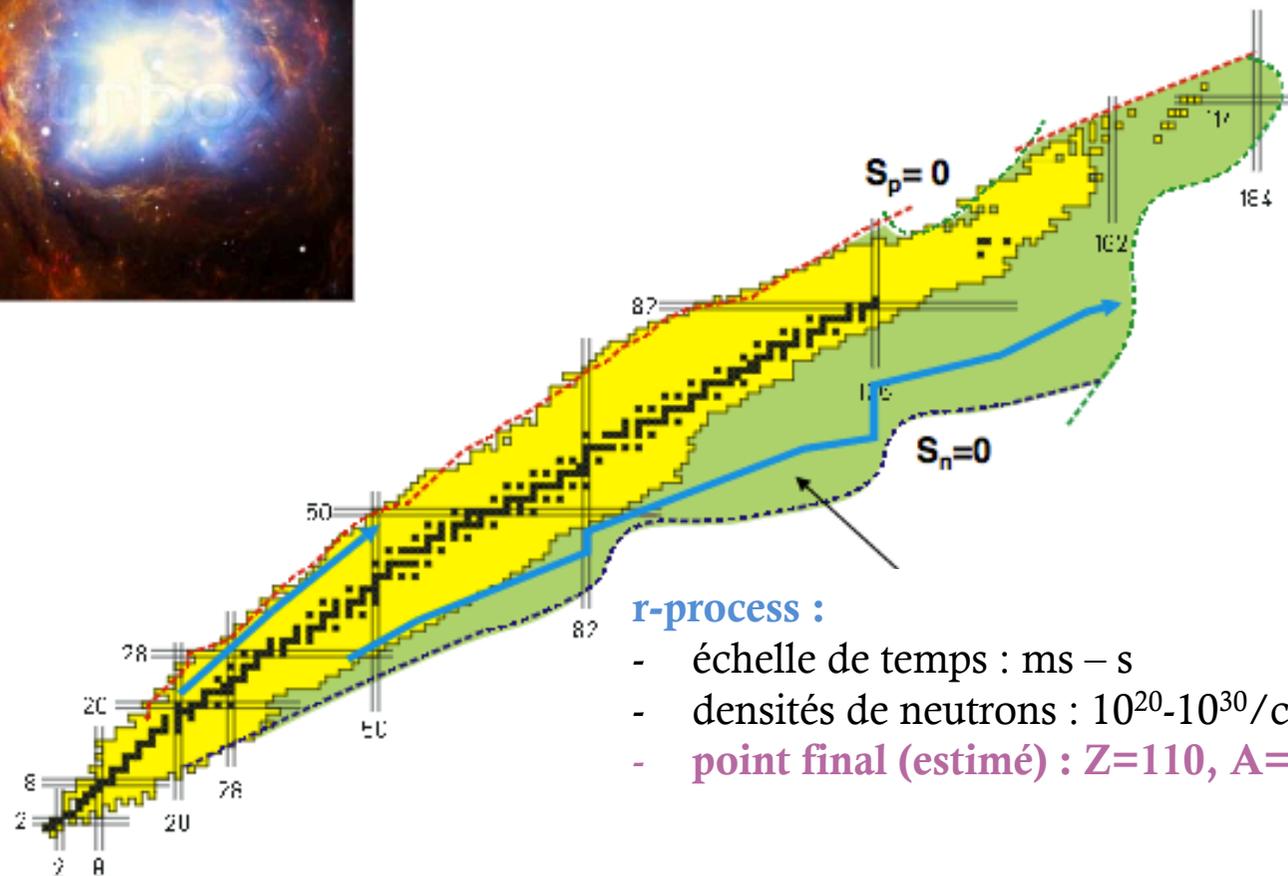


# LES SUPER-LOURDS PRODUITS DANS LA NATURE ?

## Processus de capture rapide de neutron dans les étoiles de type supernovae

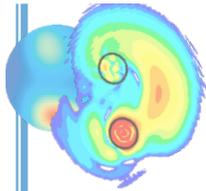


--> Captures de neutrons suivies par des décroissance  $\beta$



### r-process :

- échelle de temps : ms – s
- densités de neutrons :  $10^{20}$ - $10^{30}/\text{cm}^3$
- point final (estimé) :  $Z=110$ ,  $A=270$



# MÉTHODES EXPÉRIMENTALES POUR FORMER DES SUPER-LOURDS

**1940-1952 :** Synthèse des éléments  $Z=93-100$  par **irradiation d'uranium avec des neutrons** (Berkeley)

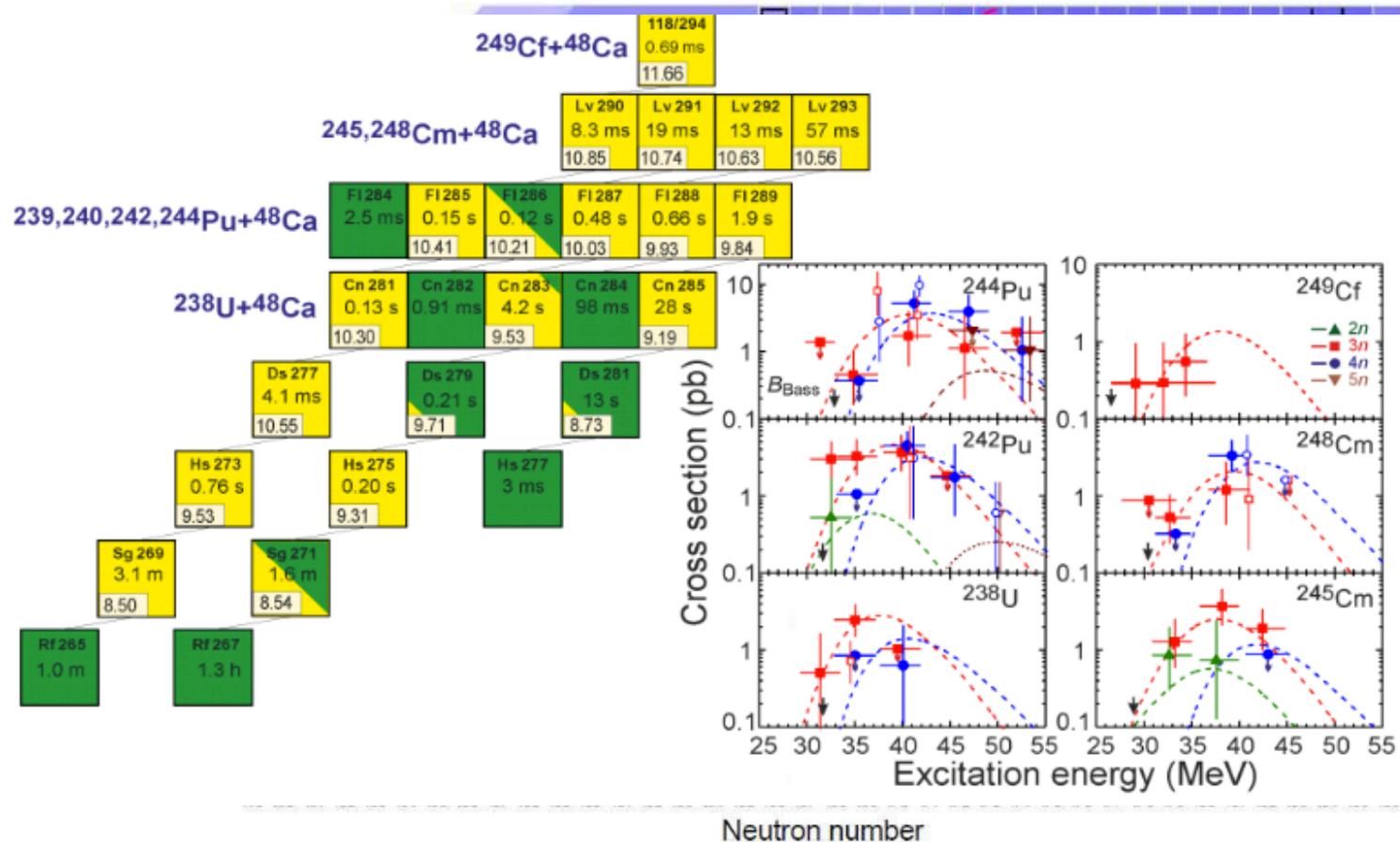
1951 : prix nobel de Chimie pour Seaborg & Mc Millian pour la découvertes des éléments transuraniens

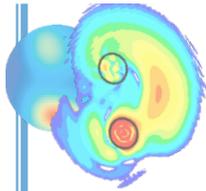
**1958-1974 :**

**1981-1996 :**

**1996-2010 :**

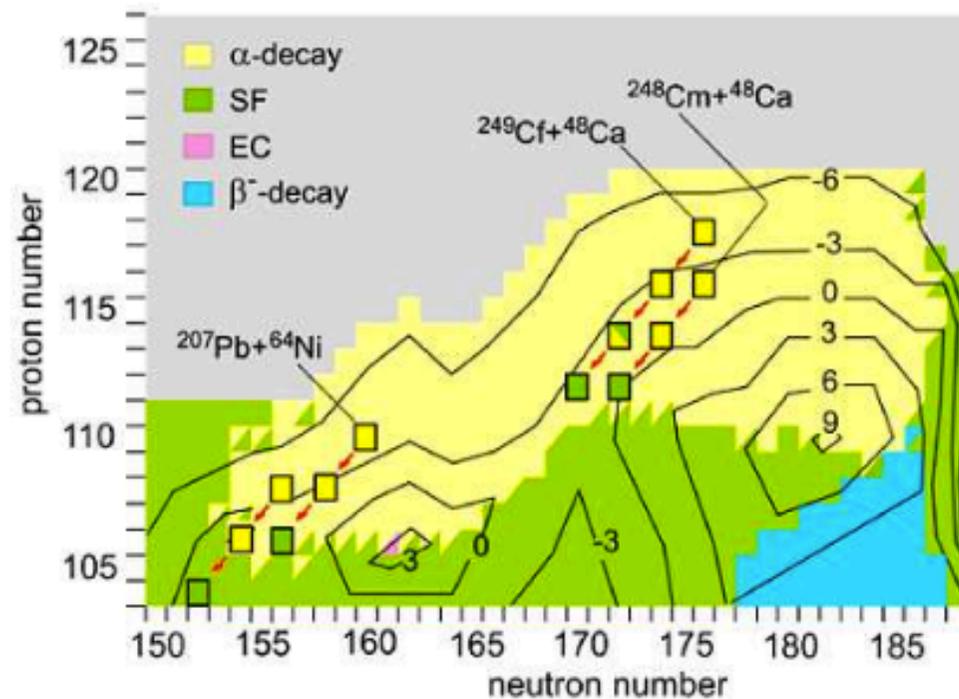
**2015 :**





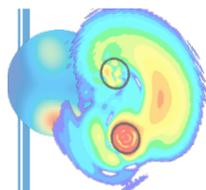
## COMMENT SAIT-ON QU'ON A ATTEINT L'ÎLOT DE STABILITÉ ?

### Calcul des durées de demi-vie des noyaux super-lourds



(figure: A. Sobiczewski, S. Hofmann)

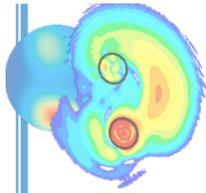
- Les noyaux de l'îlot d'inversion sont très stables vis à vis de la fission et décroissent donc par émission alpha !
- Leurs durées de vie devraient être larges et leur probabilité de production plus importante que pour leurs voisins



## LA COURSE POUR LA DÉCOUVERTE DES SUPER-LOURDS

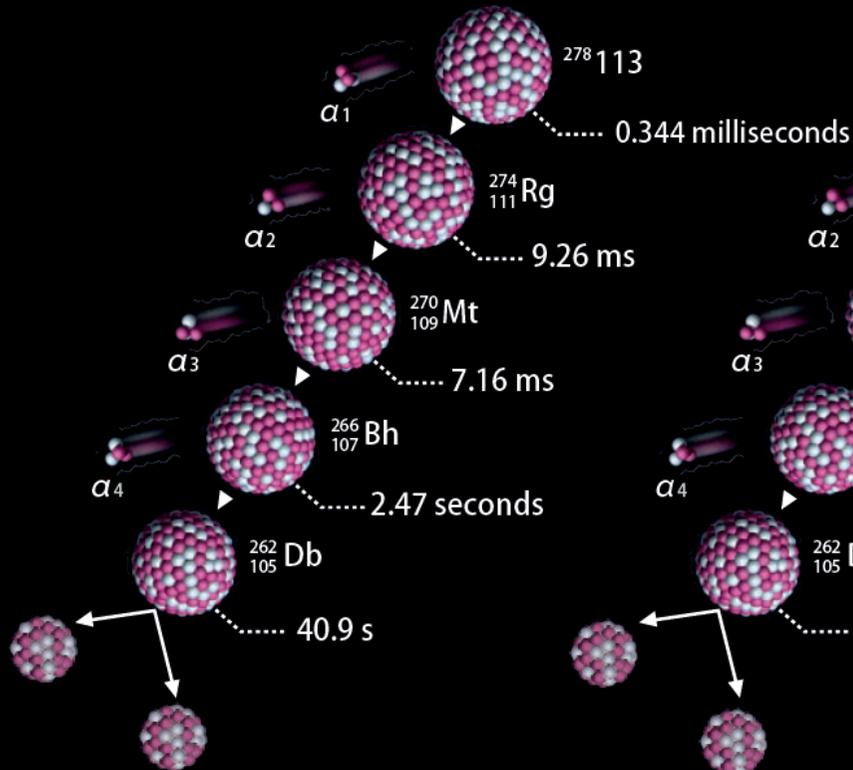
- 1994 Z=111 **Roentgenium** (synthétisé à GSI en Allemagne)
- 1996 Z=112 **Copernicium** (synthétisé à GSI en Allemagne)
- 1998 Z=114 **Flérovium** (découvert à Dubna)
- 2000 Z=116 **Livermorium** (découvert à Dubna)
- 2003 Z=115 **Moscovium** (découvert à Dubna par une équipe américaine de Livermore)
- 2010 Z=117 **Tennessee**, nommé d'après Oak Ridge (qui a produit la cible de Berkélium)
- 2015 Z=118 **Oganesson** (découvert à Dubna (en hommage au physicien Y.Oganessian))
- 2016 Z=113 **Nihonium** (découvert au Japon à RIKEN)

107 <b>Bh</b> Bohrium	108 <b>Hs</b> Hassium	109 <b>Mt</b> Meitnérium	110 <b>Ds</b> Darmstadtium	111 <b>Rg</b> Roentgenium	112 <b>Cn</b> Copernicium
113 <b>Nh</b> Nihonium	114 <b>Fl</b> Flérovium	115 <b>Mc</b> Moscovium	116 <b>Lv</b> Livermorium	117 <b>Ts</b> Tennessine	118 <b>Og</b> Oganesson

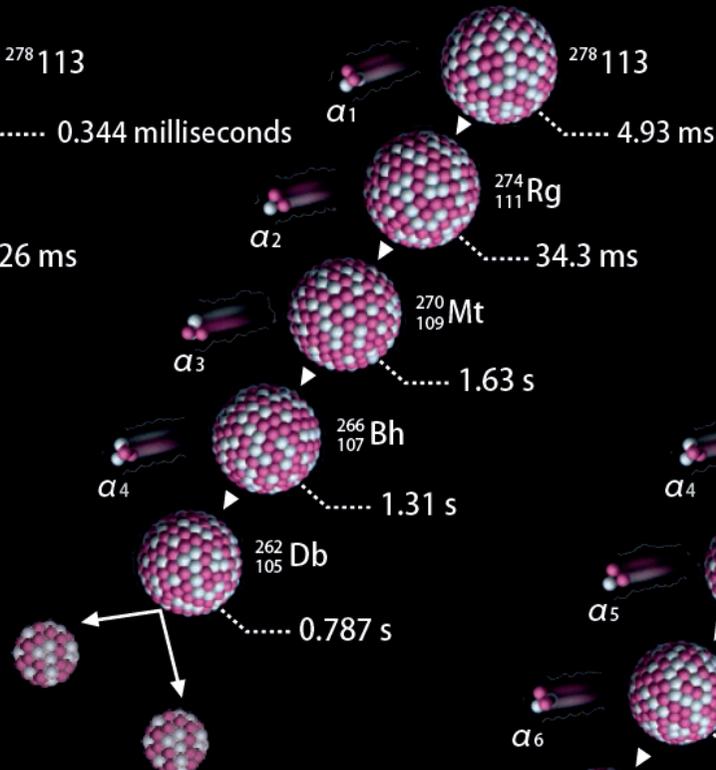


# ELEMENT Z=113 : LE NIHONIUM

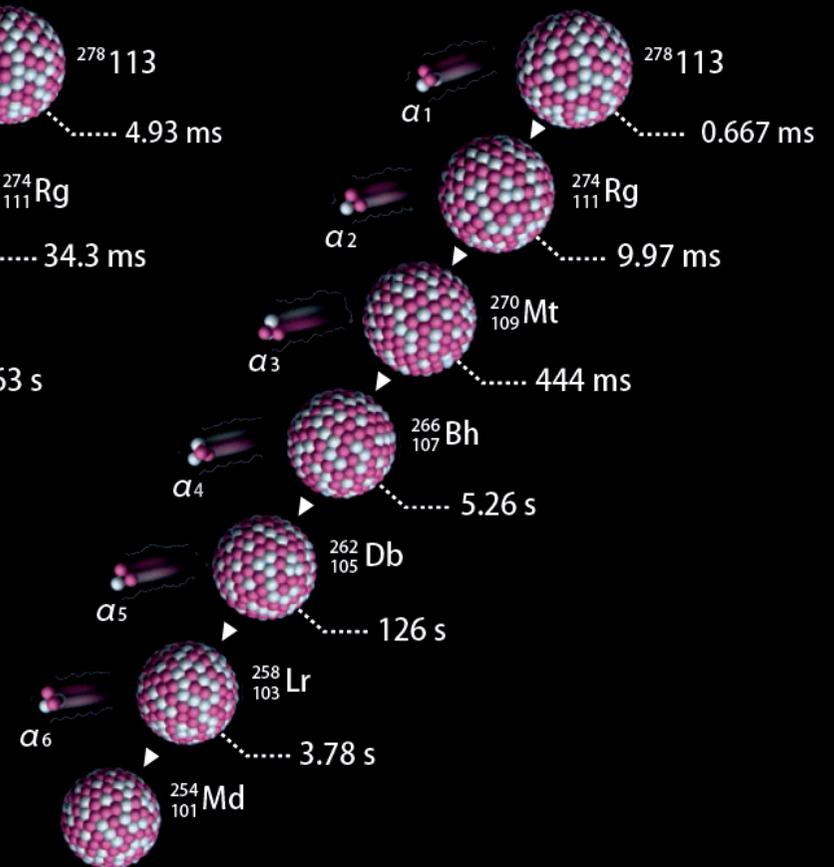
23 July 2004



2 April 2005

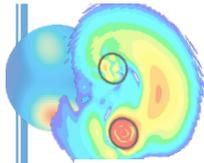


12 August 2012

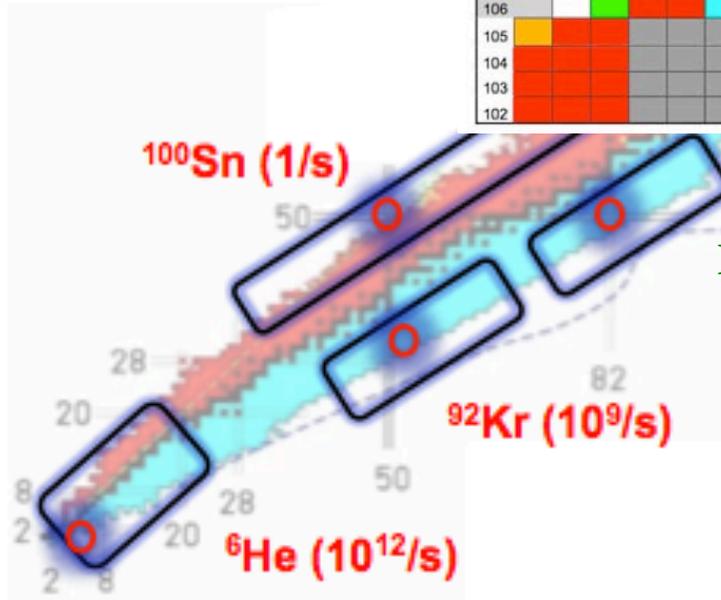
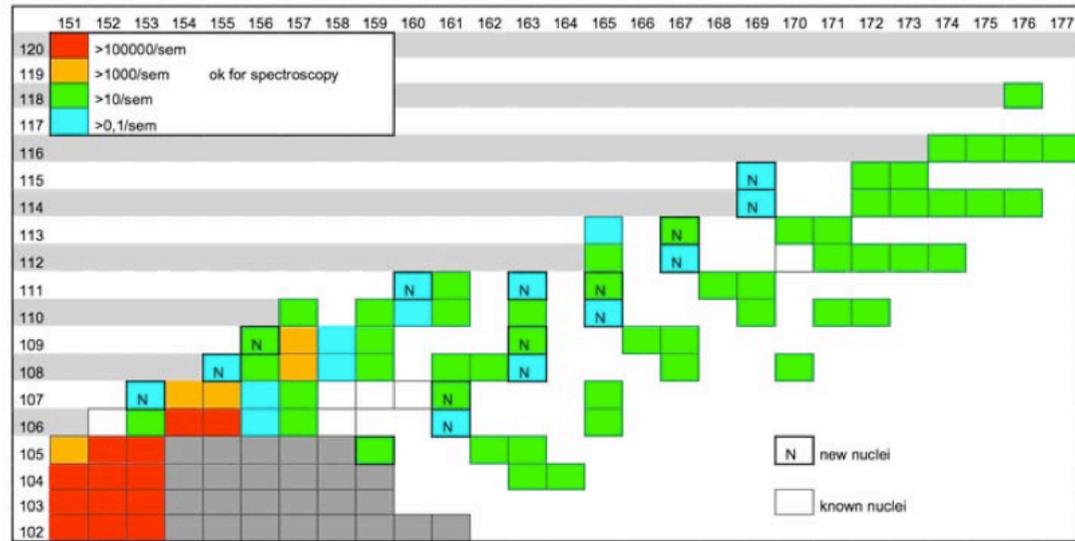


It took Morita's team seven years to clearly show that element 113 was the source of the observed decay chain of alpha particles.

**Trois expériences (8 ans au total) pour conclure à l'observation d'un nouvel élément !!!**

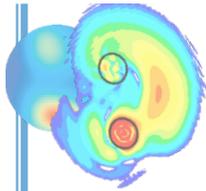


# EXEMPLES POUR AUJOURD'HUI ET LE FUTUR



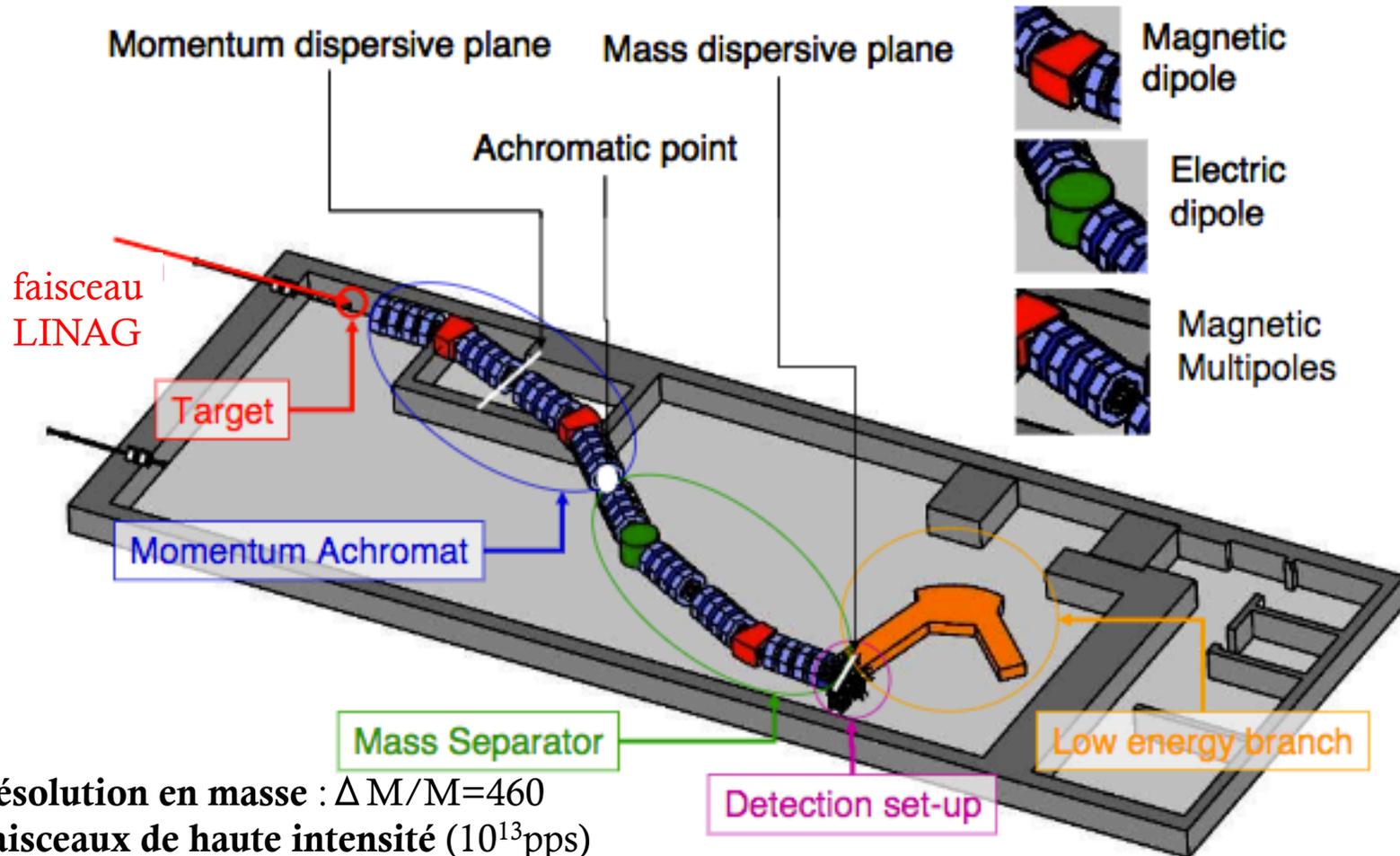
Le spectromètre S<sup>3</sup>

- Spectroscopie (masse, temps de vie)
- Identification et validation



# S<sup>3</sup> : SUPER SEPARATOR SPECTROMETER

## LE CONCEPT



- **Résolution en masse** :  $\Delta M/M=460$
- **Faisceaux de haute intensité** ( $10^{13}$ pps)  
--> beaucoup de puissance dans la cible et les arrêts faisceau  
--> Besoin de rejeter le faisceau mieux que  $>10^{13}$
- Grande acceptance angulaire
- Grande acceptance en moment ( $B\rho$ )
- Sélection en  $M/Q$  : résolution 1/350

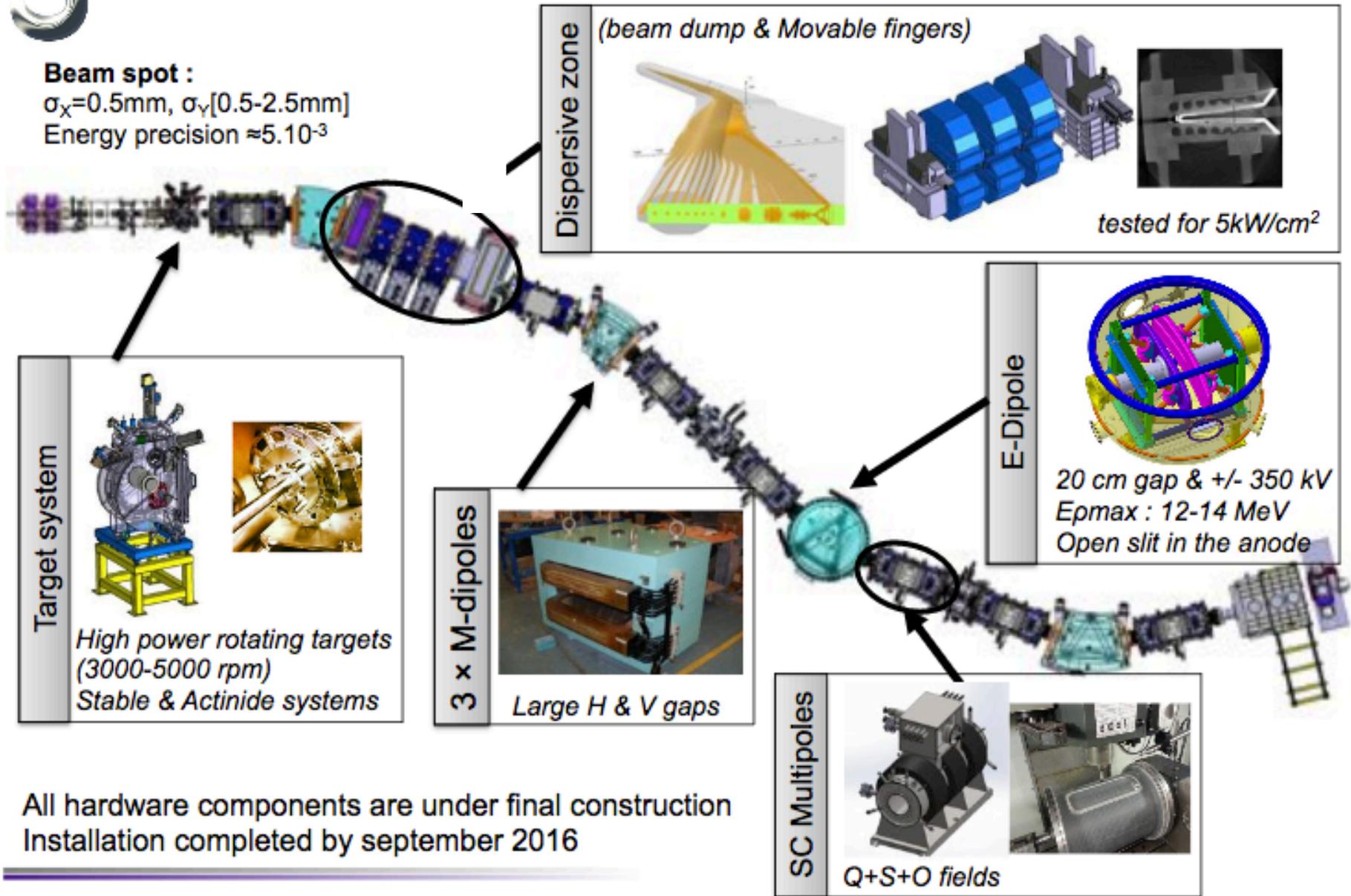
# S3

## Super Separator Spectrometer

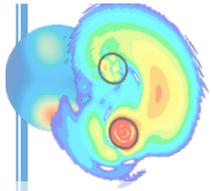
**Beam spot :**

$\sigma_x=0.5\text{mm}$ ,  $\sigma_y[0.5-2.5\text{mm}]$

Energy precision  $\approx 5 \cdot 10^{-3}$



All hardware components are under final construction  
Installation completed by september 2016



# ET UN NOYAU SANS PROTONS, C'EST POSSIBLE ?

**NewScientist**  
The global science and technology weekly | 21 October 2012  
NEW! US JOBS SECTION

## ELEMENT ZERO?

Theory says it can't exist, but experiments have found a new type of matter...

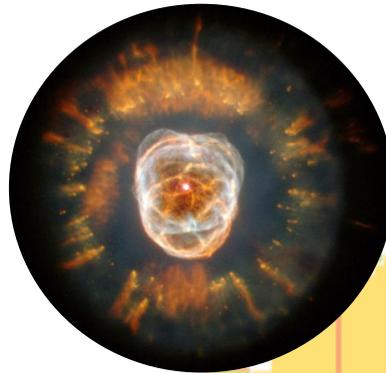
**SWEETNESS AND MIGHT**  
Awesome power of the glycome

**CHAD'S ANCIENT APE**  
Is this really the missing link?

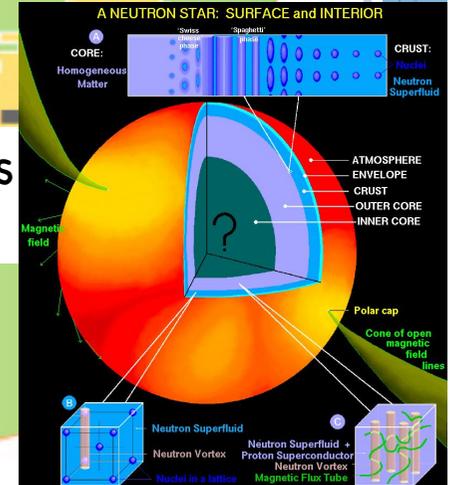
**LATEST NEWS**  
NASA's new vision emerges  
Row over 'turning rivers around'  
New scare links food to blindness

0 4.000  
**Tn**  
Tetraneutron

- D'où vient cette idée ?



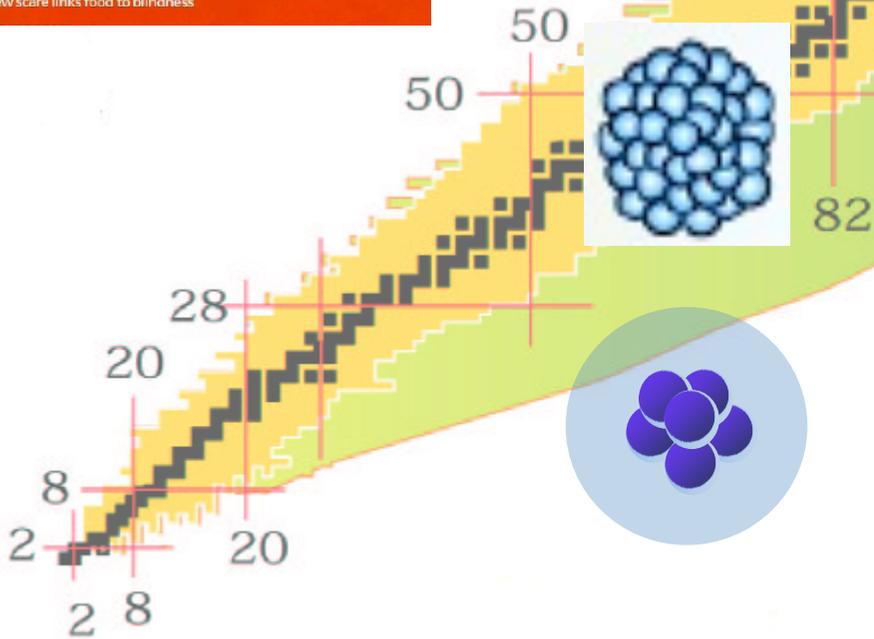
Les étoiles à neutrons  
( $10^{57}$  neutrons)

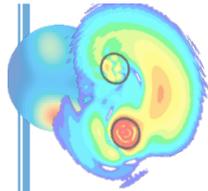


Les gouttes d' $^3\text{He}$  superfluides  
(30 atomes par goutte)



Les noyaux neutres ?





## SI ON FAIT LE BILAN...

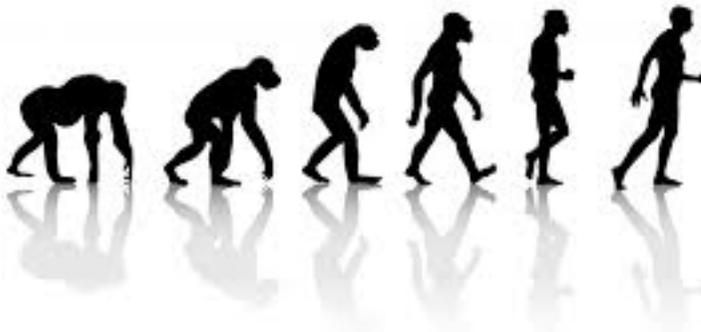
- ▶ Le rayon, la densité du noyau : variable, pas proportionnel à  $A$
- ▶ Les nucléons indépendants :
  - limites de cette approche : il peut y avoir des « clusters » dans les noyaux
  - les nucléons ne sont pas uniformément répartis dans le noyau (peau, hal)
- ▶ L'interaction entre neutrons : pas assez forte pour lier de petits noyaux
- ▶ Les nombres magiques : plus valables loin de la stabilité, apparaissent ou disparaissent

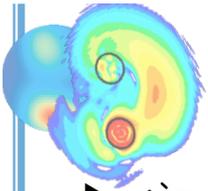


L'interaction nucléaire permet donc l'apparition de phénomènes originaux dans des conditions extrêmes

Il faut la tester dans ces conditions extrêmes pour mieux la comprendre, la décrire...

Toutes les approches apportent plus d'information...





# ET UN NOYAU SANS PROTONS, C'EST POSSIBLE ?

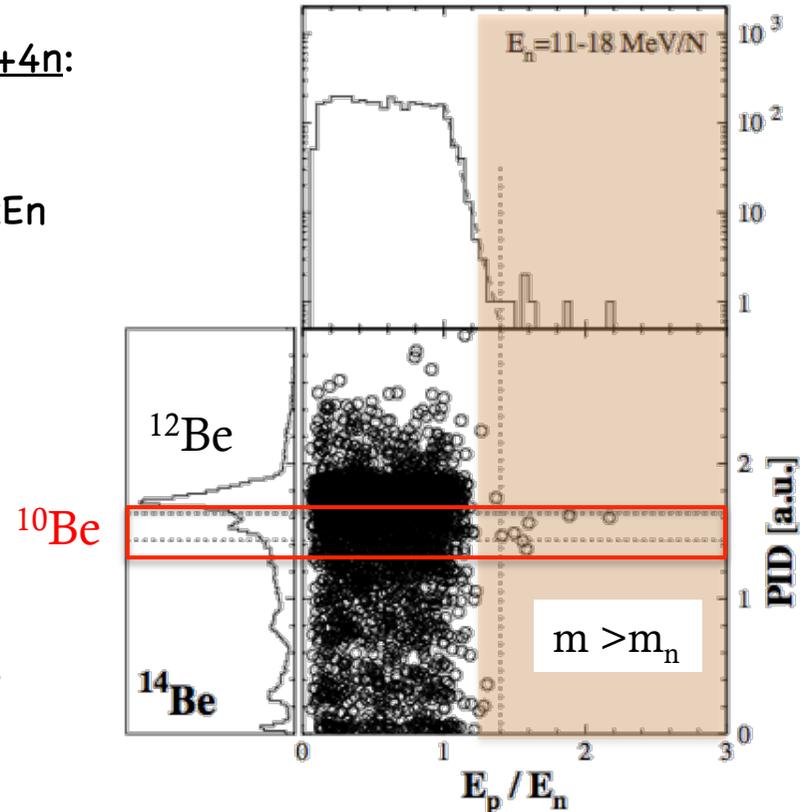
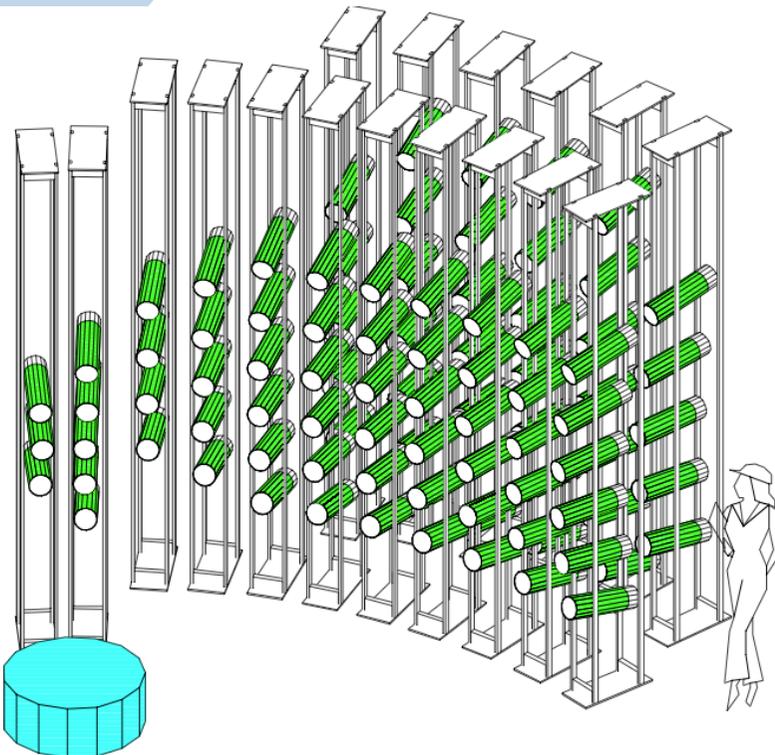
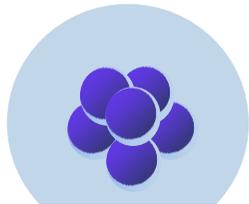
► 1<sup>ère</sup> méthode par cassure du  $^{14}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Be} + 4n$ :

-> **détection directe**

$E_n$  déduite du temps de vol

$n$  détecté par collision avec protons  $\rightarrow E_p < E_n$

Si  $E_p > E_n$ , alors noyau neutre



→ 6 évènements compatibles !

2<sup>ème</sup> méthode  $^{11}\text{Li}(d, ^3\text{He})^{10}\text{He}$

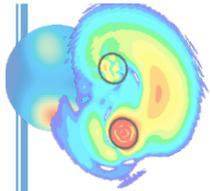
égalité on ne peut détecter que

+  $2n$  ou  $^6\text{He} + 4n$  ou  $^4\text{He} + 6n$

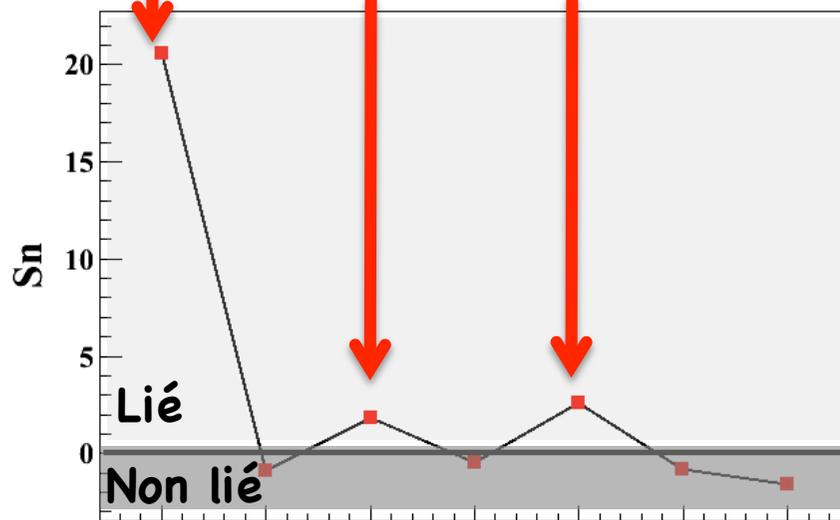
méthode de la masse manquante

→ pas de résonance observée





# QUAND LES NOYAUX COAGULENT ET ENFLENT. LE SYNDROME DES NOYAUX LÉGERS

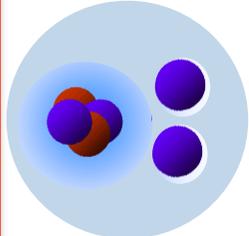


$\alpha$



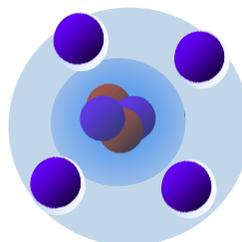
2 neutrons  
2 protons

${}^6\text{He}$



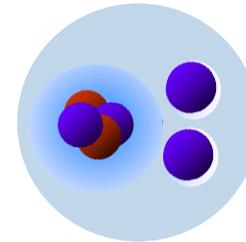
4 neutrons  
2 protons

${}^8\text{He}$



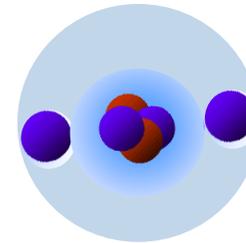
6 neutrons  
2 protons

La question en suspens...



« di-neutron » ?

${}^6\text{He}$



« cigare » ?

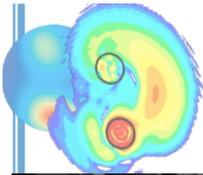


L'appariement des 2 neutrons  
stabilise le noyau

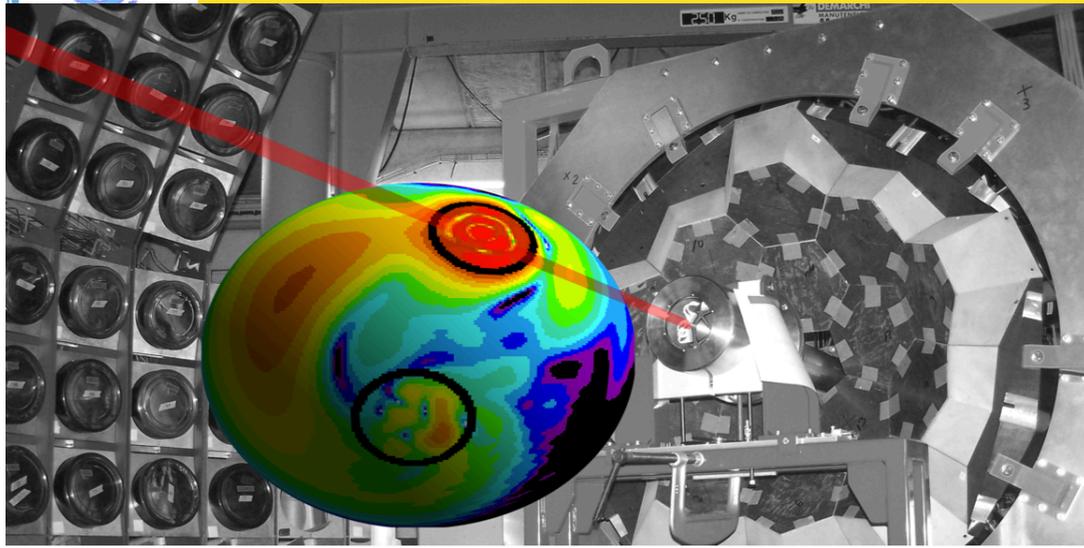
Mais où sont les neutrons ?

**Comment décrire la force qui  
les lie ?**





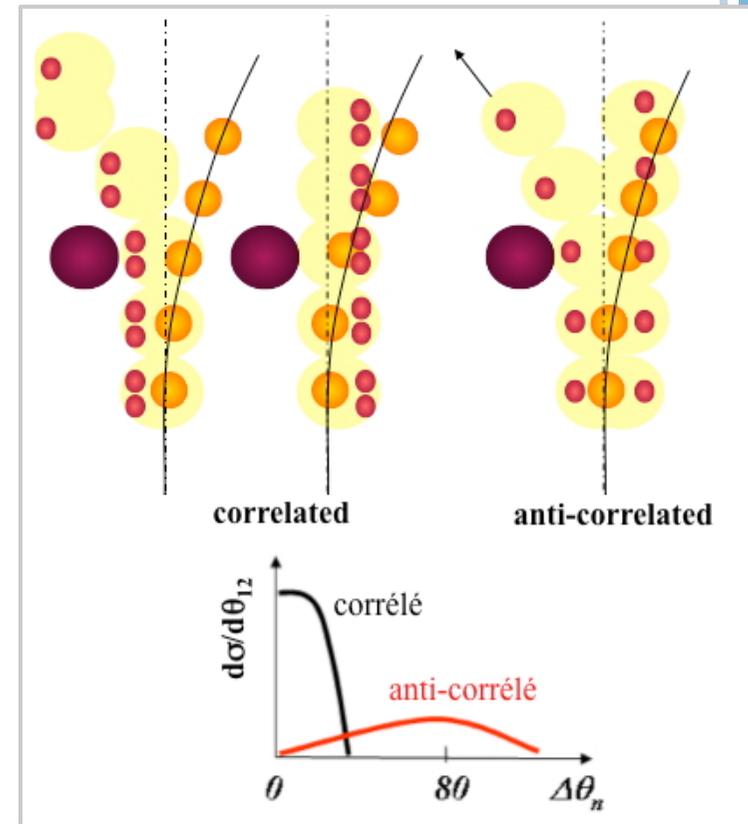
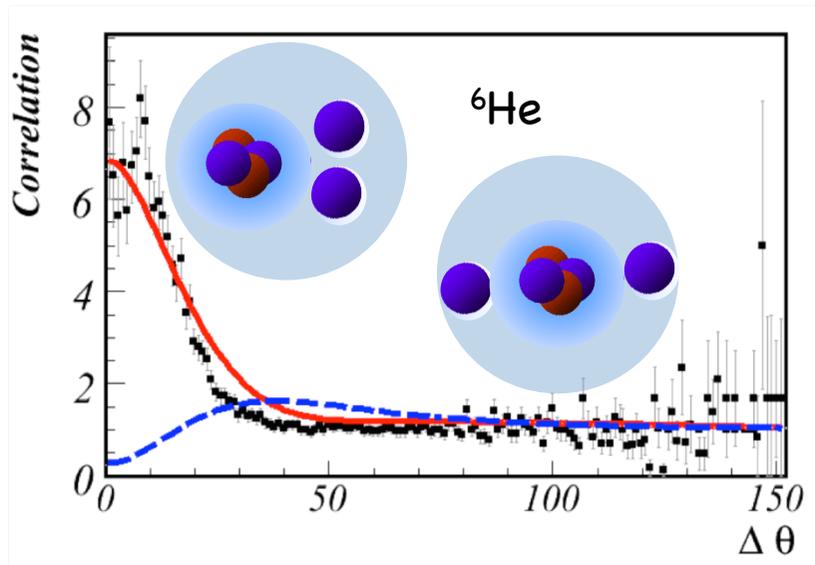
# CASSER LE NOYAU D' ${}^6\text{He}$ POUR LE COMPRENDRE



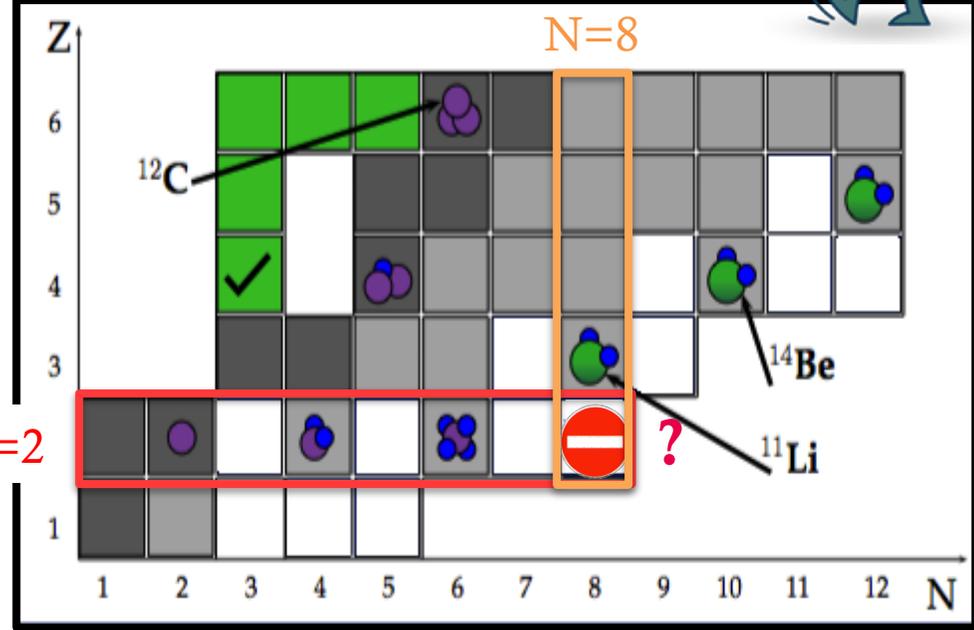
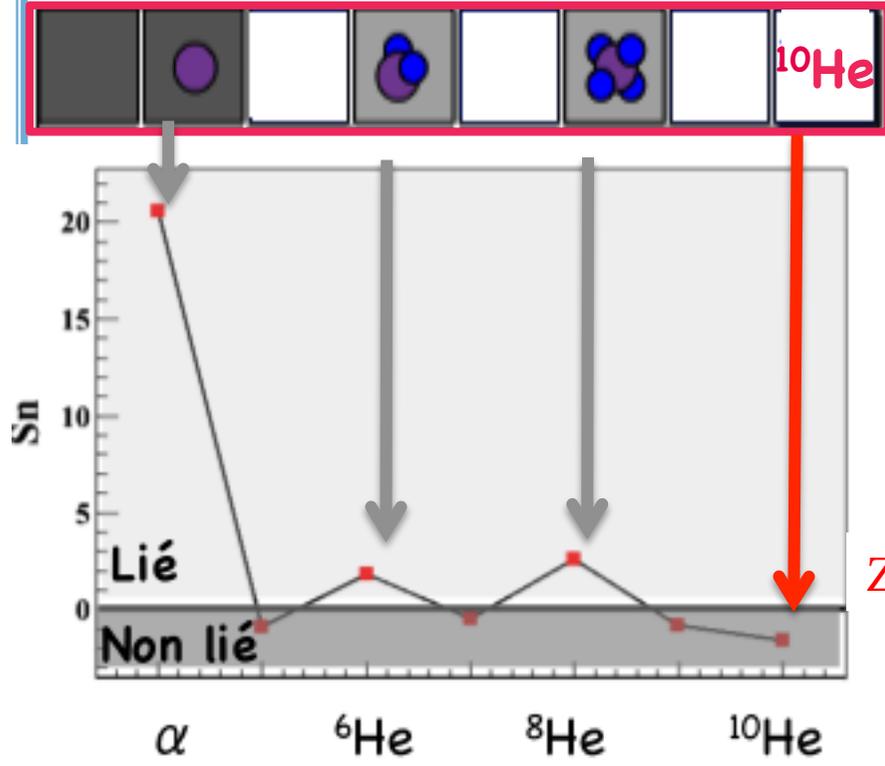
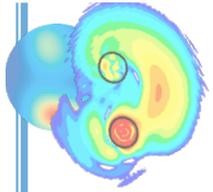
${}^6\text{He}$  : « di-neutron » ou « cigare » ?

L'idée de la manip ... "avec les mains"

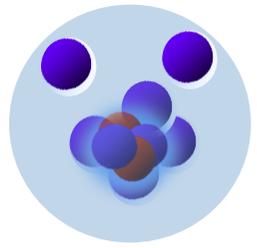
${}^6\text{He}$  a principalement une configuration di-neutron



# ET APRÈS ? ET ENCORE APRÈS ? LES NOYAUX NON LIÉS



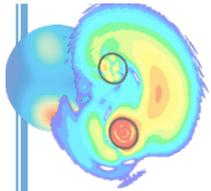
<sup>10</sup>He  
Prédit comme halo de 2 neutrons



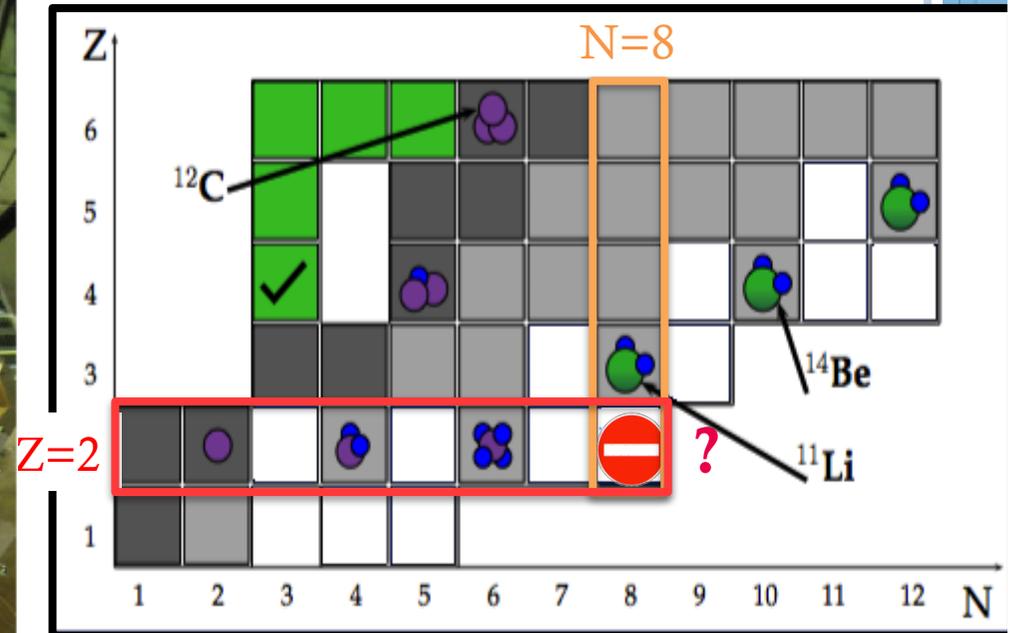
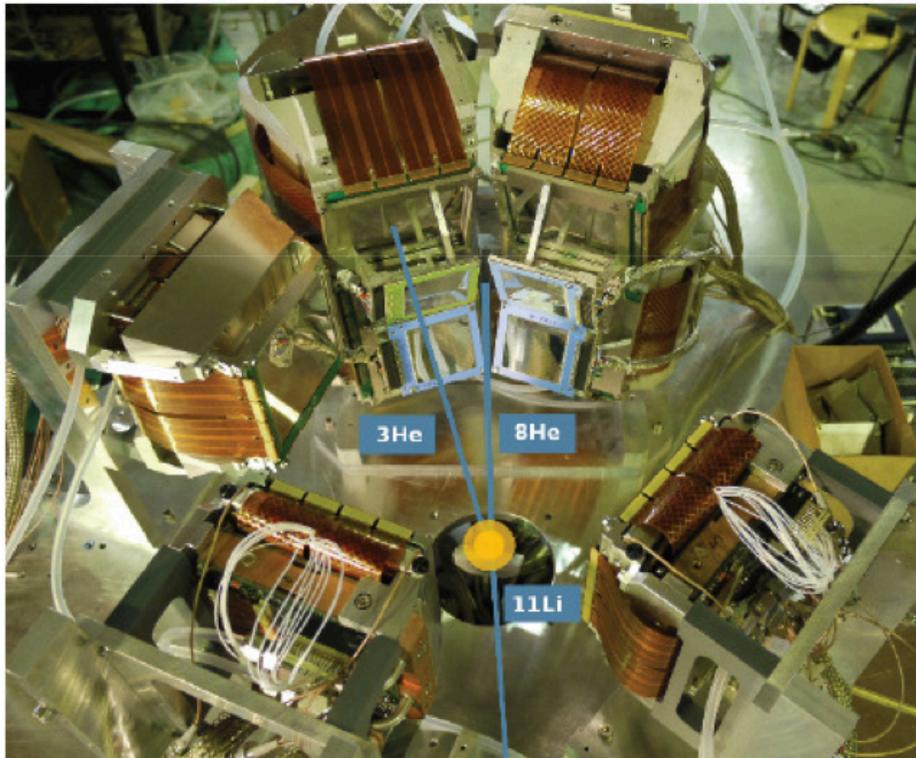
8 neutrons  
2 protons

- Quelle est la structure de l'<sup>10</sup>He ?
- Comment évoluent les nombres magiques?





# ET APRÈS ? LES NOYAUX NON LIÉS

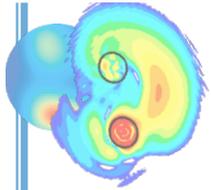


Etudié par la réaction de transfert :  $^{11}\text{Li}(d, ^3\text{He})^{10}\text{He}$

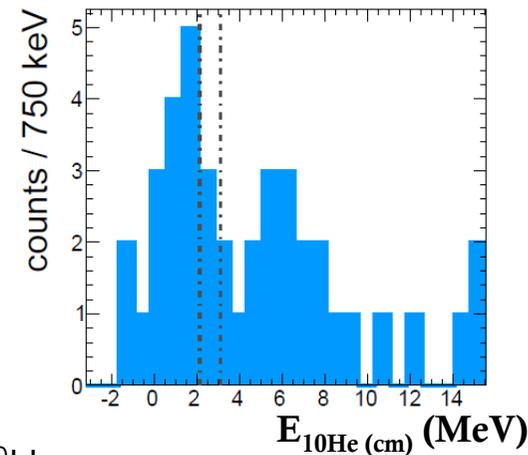
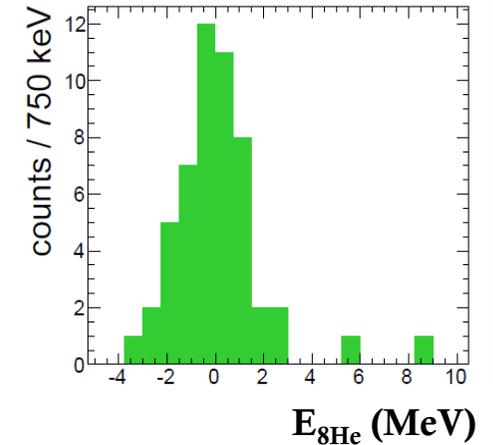
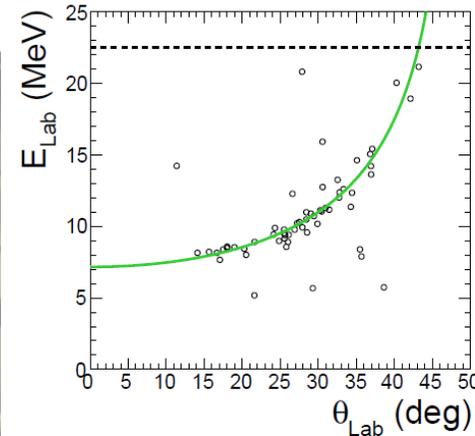
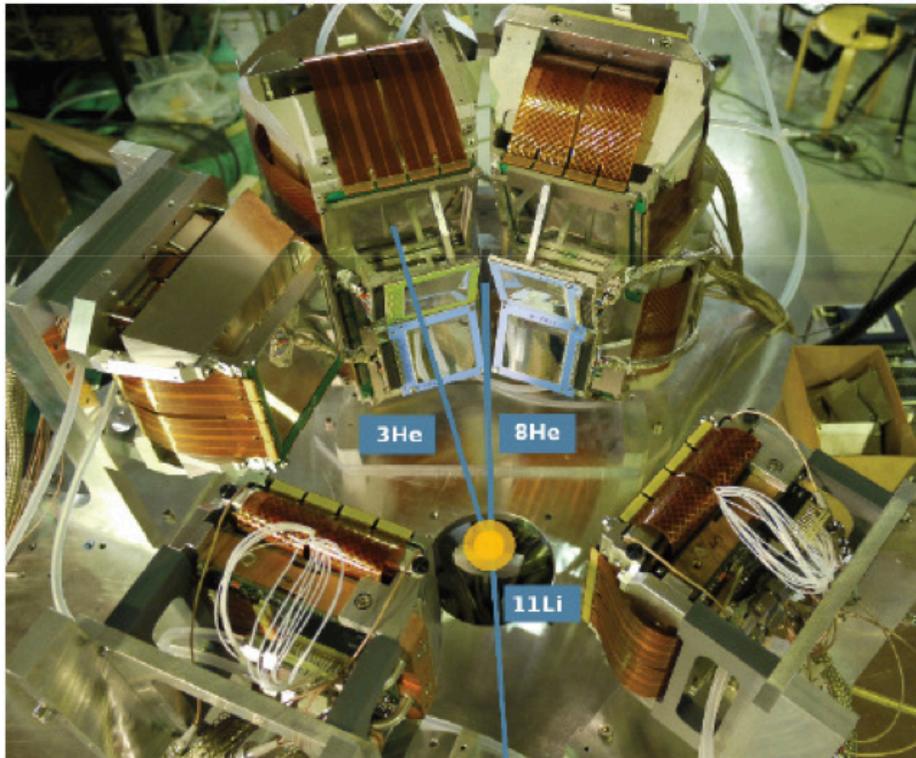
En réalité on ne peut détecter que  $^8\text{He} + 2n$  ou  $^6\text{He} + 4n$  ou  $^4\text{He} + 6n$

-> un état résonant à 1.3 MeV

-> la structure de l' $^{10}\text{He}$  est différente de la structure du  $^{11}\text{Li}$ .



# ET APRÈS ? LES NOYAUX NON LIÉS



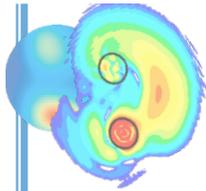
*on enlève un proton  
au  ${}^{11}\text{Li}$*

Etudié par la réaction de transfert :  ${}^{11}\text{Li}(d, {}^3\text{He}){}^{10}\text{He}$

En réalité on ne peut détecter que  ${}^8\text{He} + 2n$  ou  ${}^6\text{He} + 4n$  ou  ${}^4\text{He} + 6n$

-> un état résonant (équivalent au fondamental) à 1.3 MeV

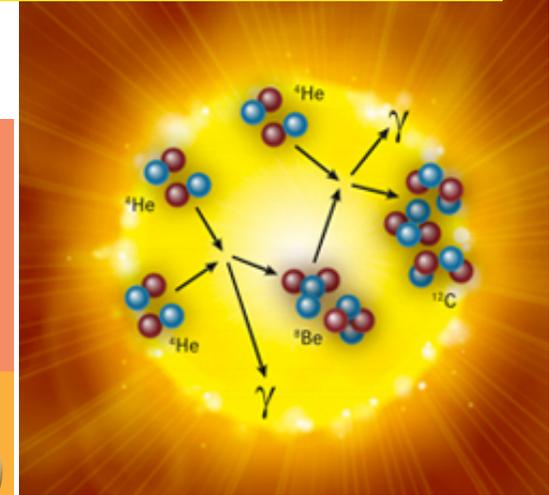
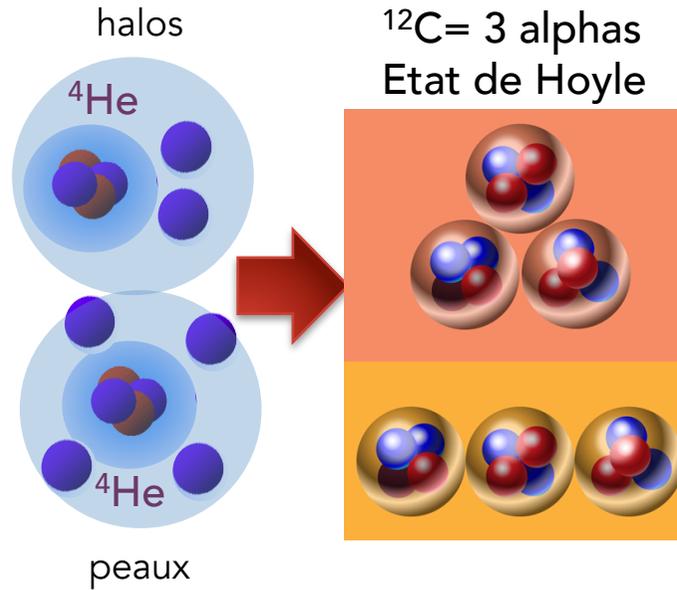
-> la structure de l' ${}^{10}\text{He}$  est très différente de la structure du  ${}^{11}\text{Li}$  ( $={}^{10}\text{He} + p$ ).



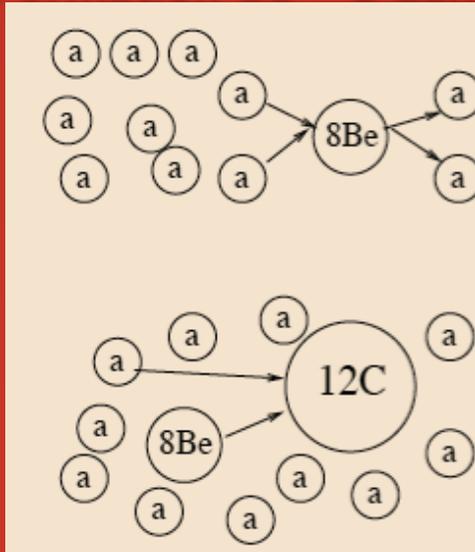
# DES AMAS (« CLUSTERS ») DANS LES NOYAUX ?

Regrouper les "objets" quels qu'ils soient est une loi de la nature :

- quarks --> nucléons
- nucléons --> noyaux
- noyaux --> molécules
- gouttes d'eau --> flocons
- étoiles --> galaxie
- ...



## Formation du ${}^{12}\text{C}$ dans les étoiles à partir de l' ${}^4\text{He}$ (=alpha)



${}^8\text{Be}$  non lié --> décroît en 2 alphas

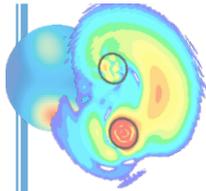
Etat de Hoyle dans le  ${}^{12}\text{C}$  (non lié) 3 possibilités :

--> se casse en 3 alphas

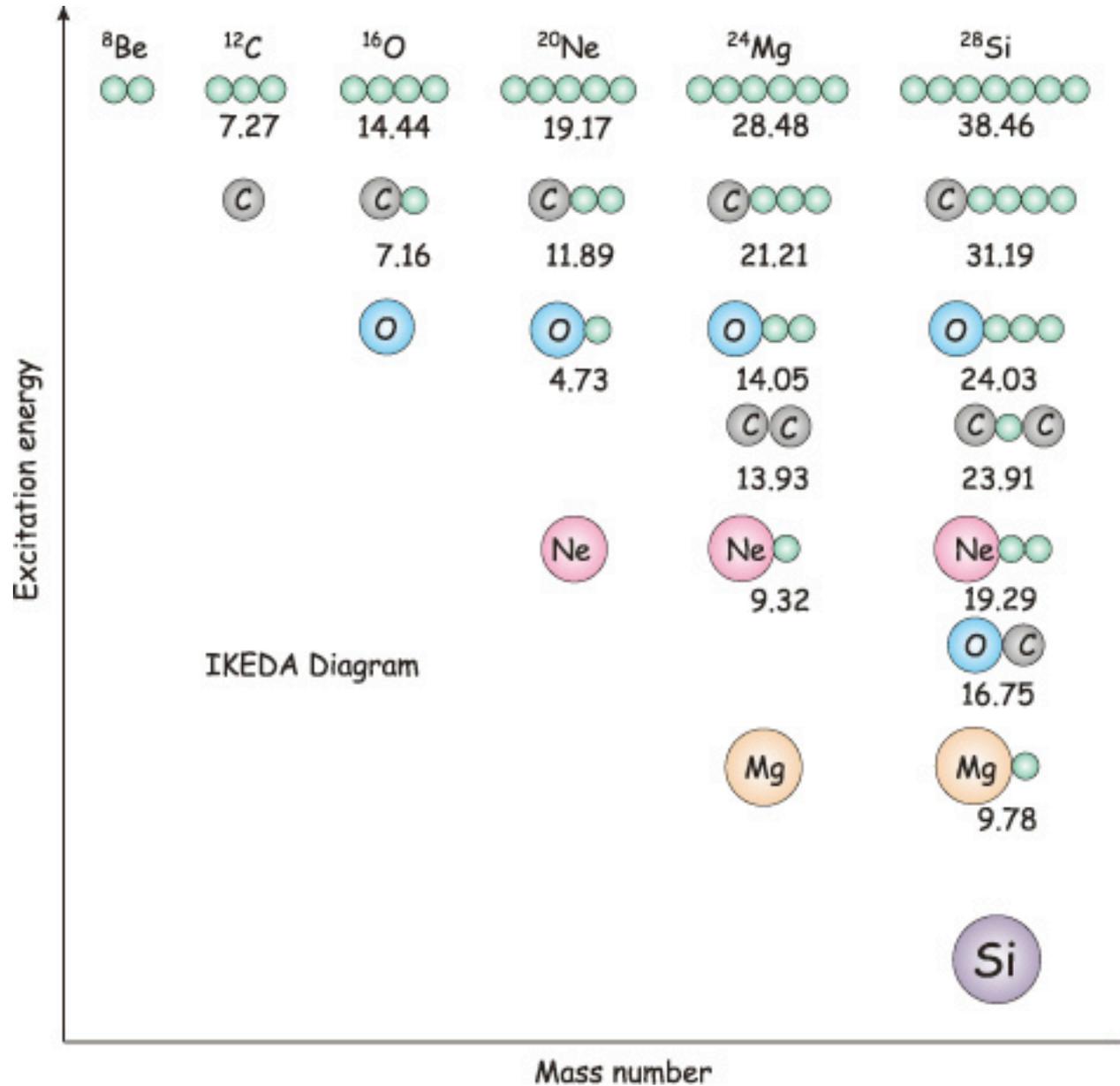
--> se casse en  ${}^8\text{Be}$  + alpha

--> décroît vers l'état fondamental du  ${}^{12}\text{C}$  *Ouf!*





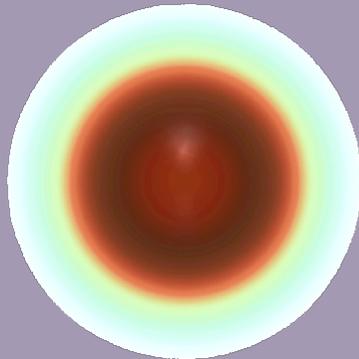
# LE DIAGRAMME D'IKEDA



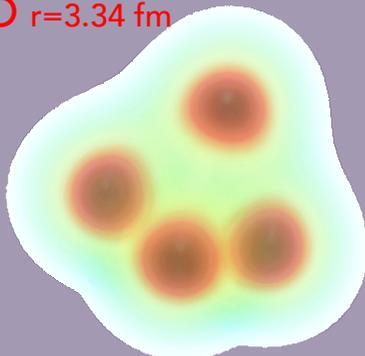
# DES CLUSTERS DANS L'<sup>16</sup>O ?

Approche théorique  
(champ moyen relativiste)

<sup>16</sup>O  $r=3.32$  fm



<sup>16</sup>O  $r=3.34$  fm



$r/r_{g.s.} \approx 1.3$   $E^* = 60$  MeV

J.-P. Ebran, E. Khan et al., PRC 89 (2014)

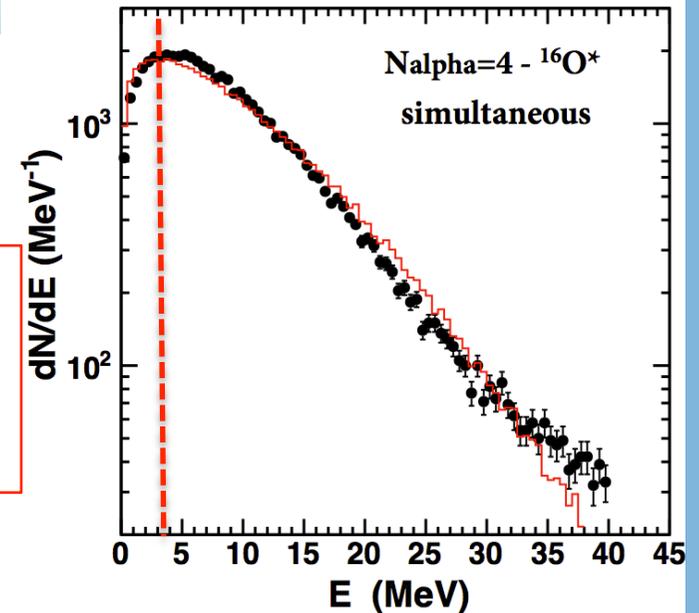
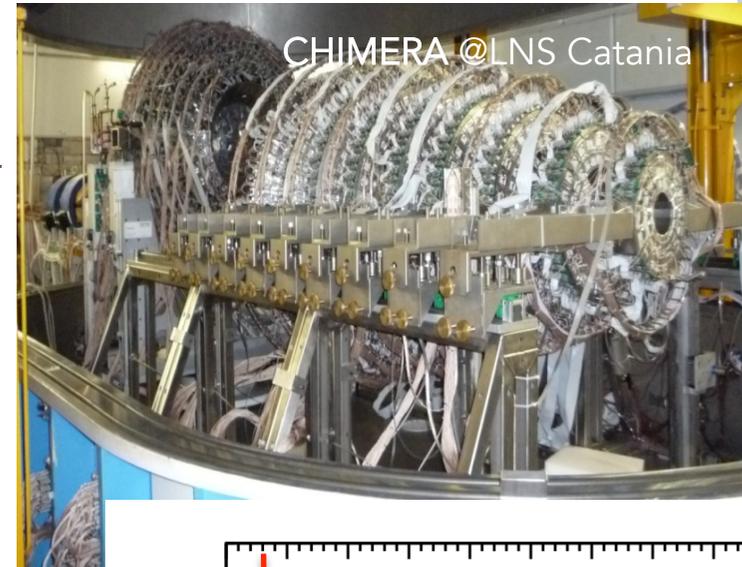
Signature exp. :  
Emission de 4  
noyaux d'<sup>4</sup>He  
simultanément

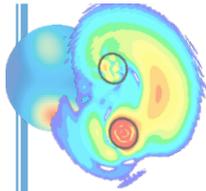
Réaction :  
<sup>40</sup>Ca (faisceau)  
+<sup>12</sup>C (cible)  
à 25A MeV

Energie moyenne des  
<sup>4</sup>He = 3.3 MeV

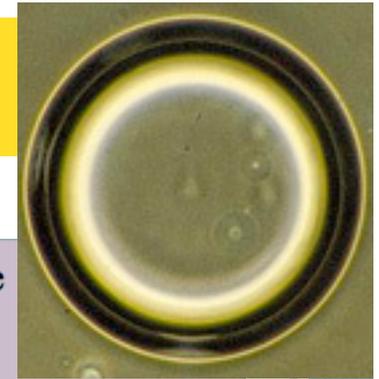
soit  $p/p_0=0.7$   
-->  $r/r_{g.s.}=1.13$

Etude expérimentale

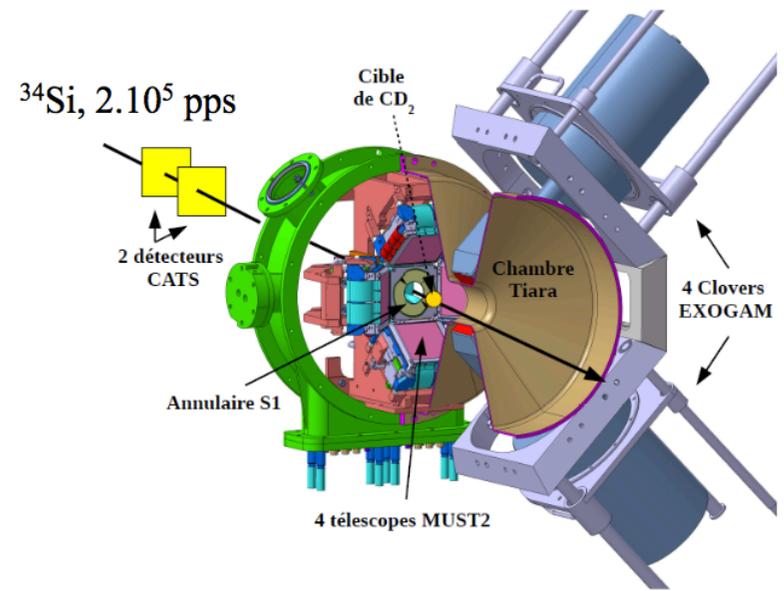
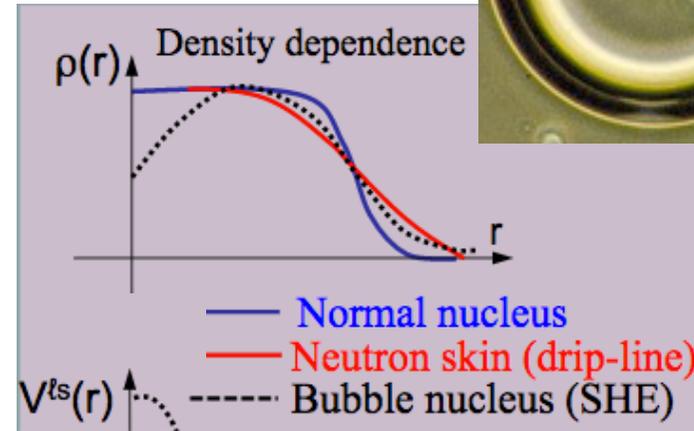
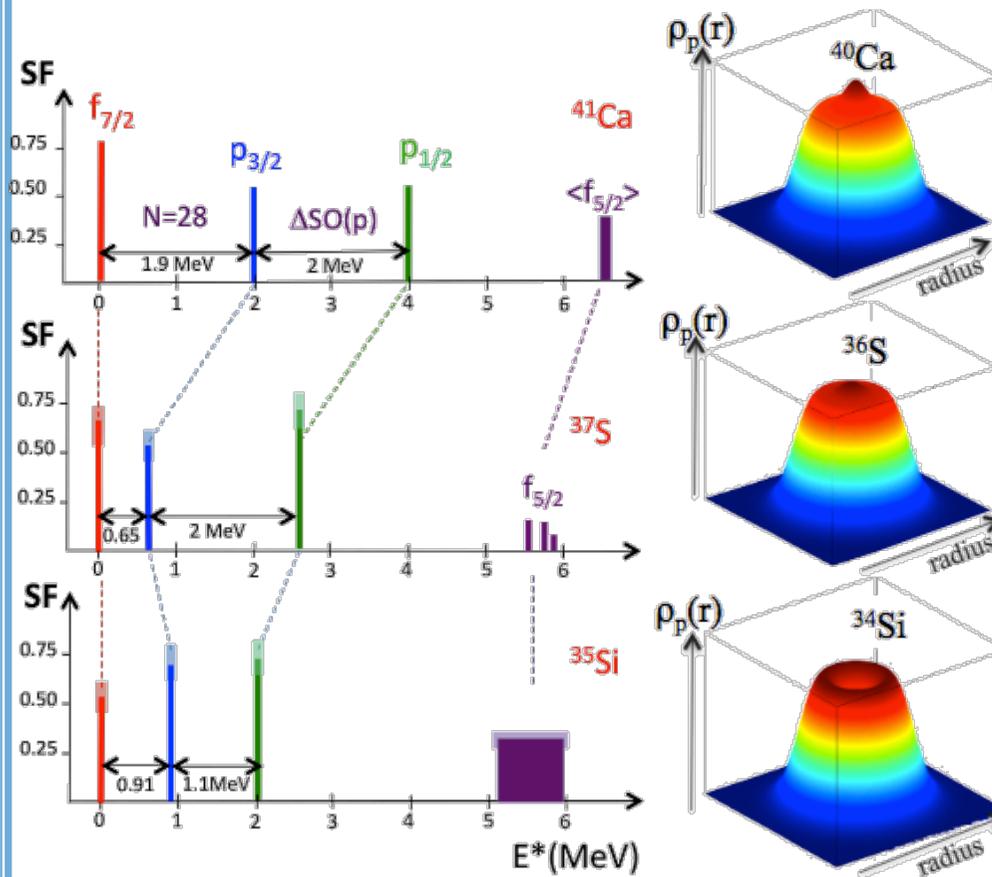


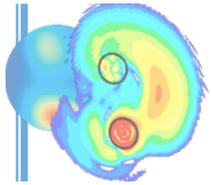


# DES NOYEAUX BULLES ?

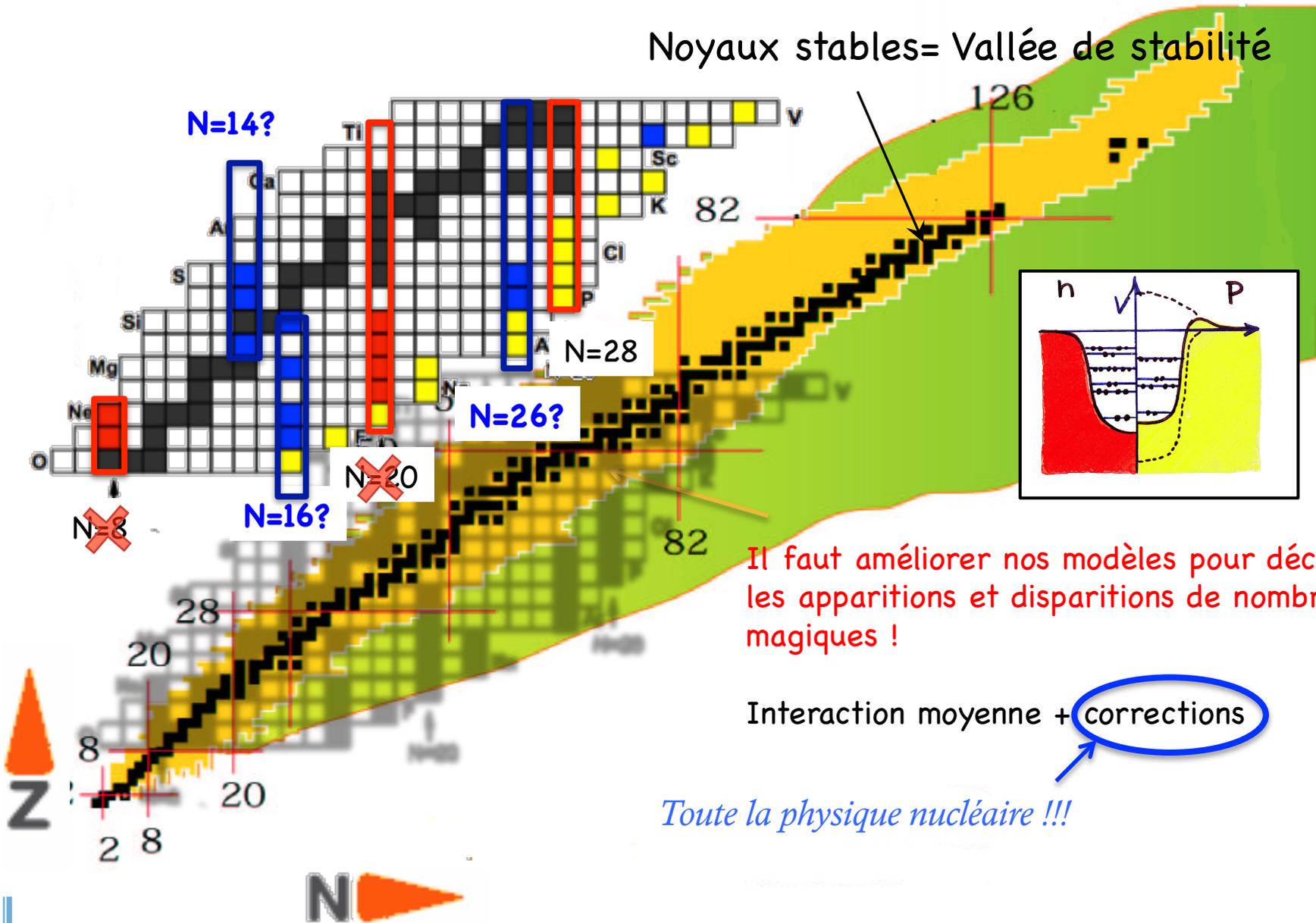


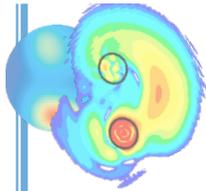
L'interaction spin-orbite dépend de la pente de la densité -> preuve de l'existence de noyaux bulles



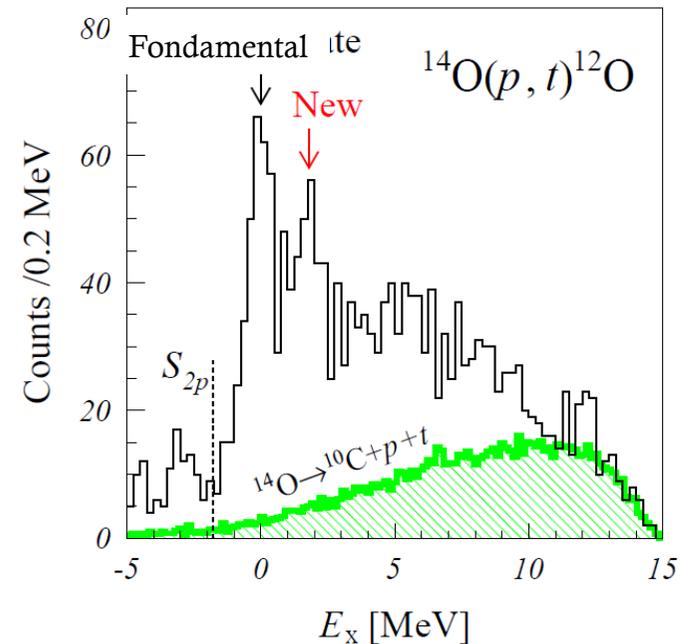
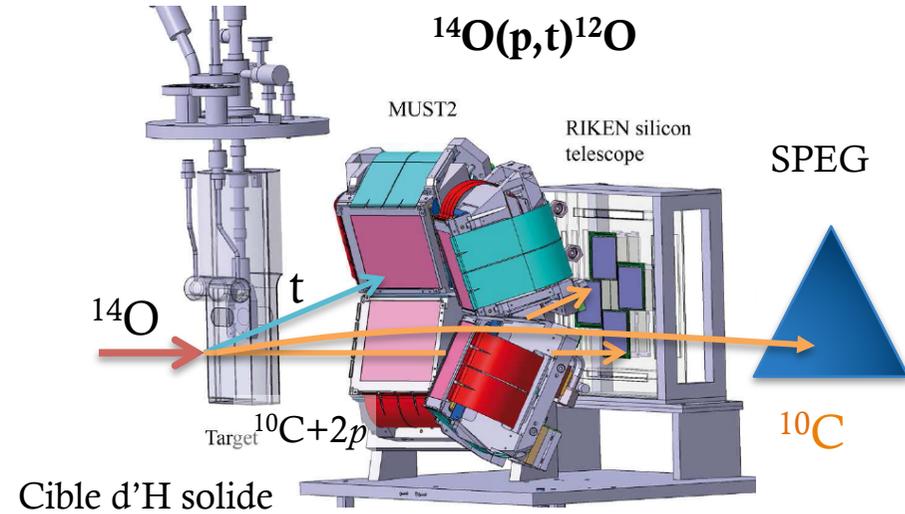
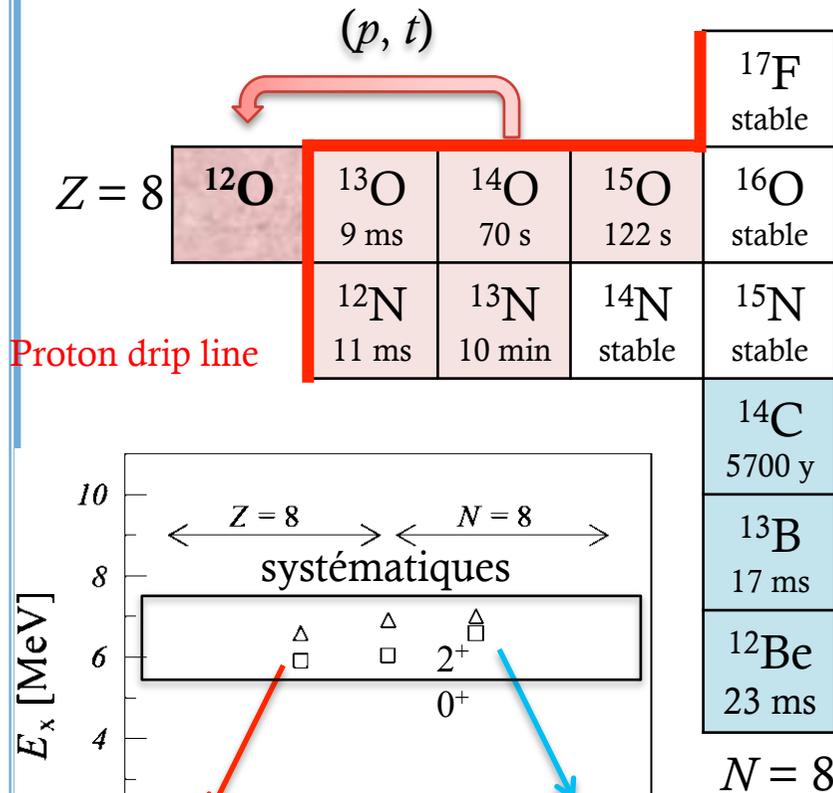


# NOTRE TERRAIN DE JEU : LA CARTE DES NOYAUX





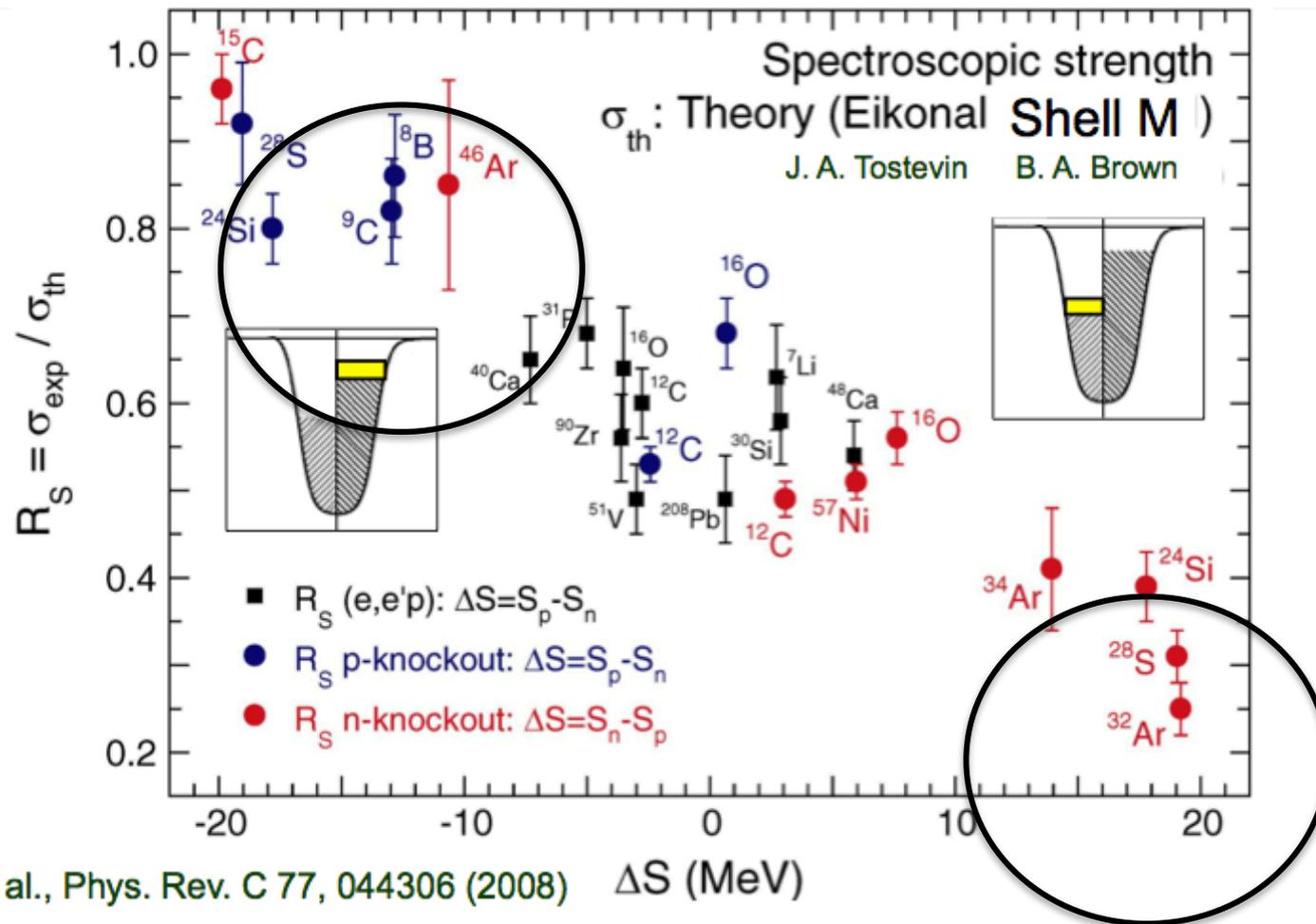
# LE NOYAU NON-LIÉ D' $^{12}\text{O}$ ET LE NOMBRE MAGIQUE $Z = 8$



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

# LIMITE DES METHODES DE CASSURE

faiblement lié

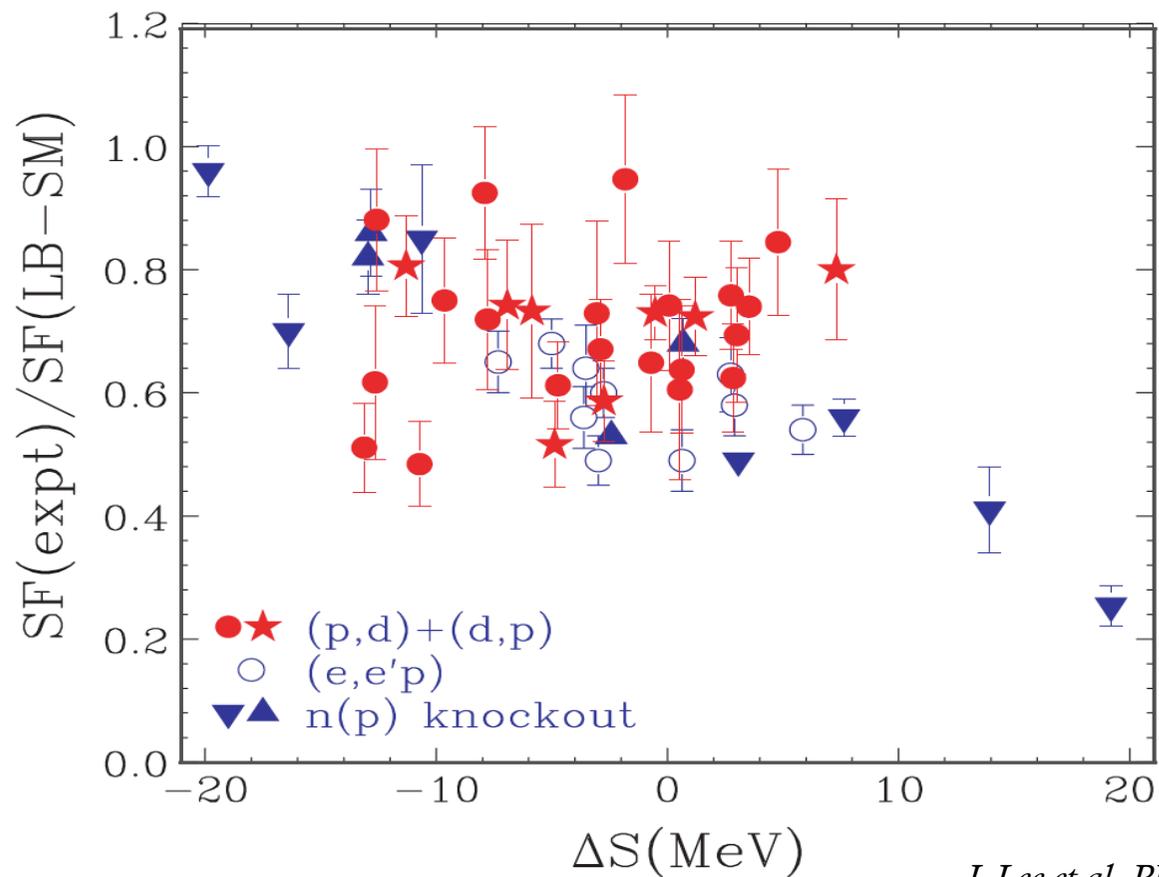


A. Gade et al., Phys. Rev. C 77, 044306 (2008)

très lié (au fond du puits)

# ET POUR LES RÉACTIONS DE TRANSFERT ?

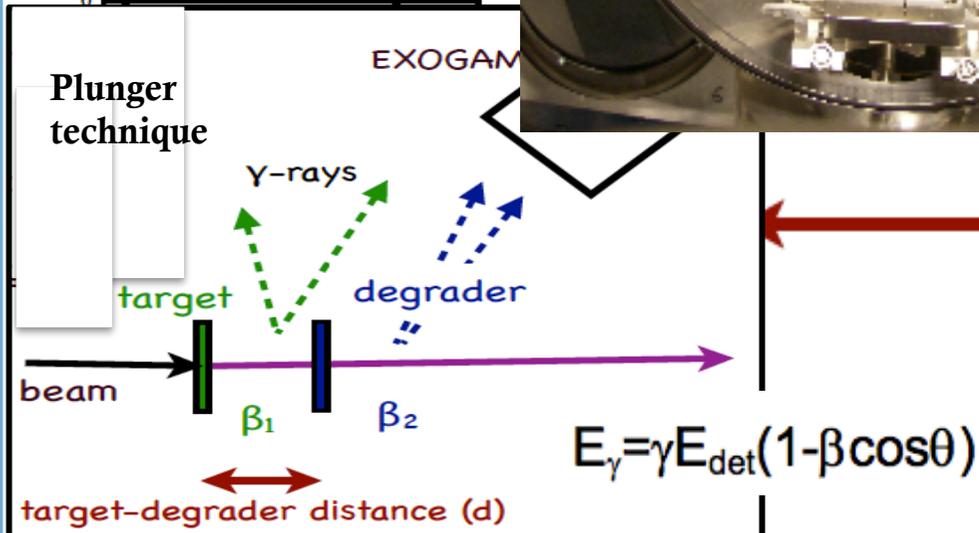
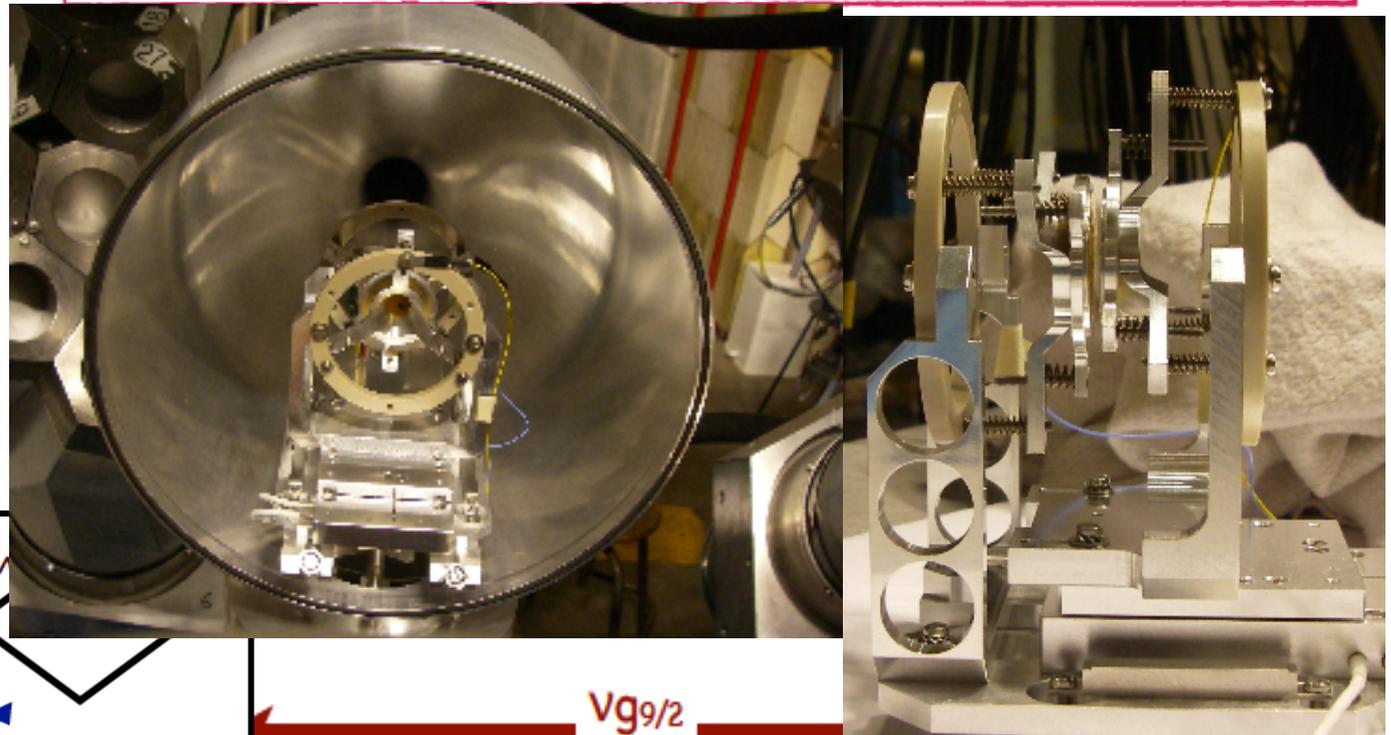
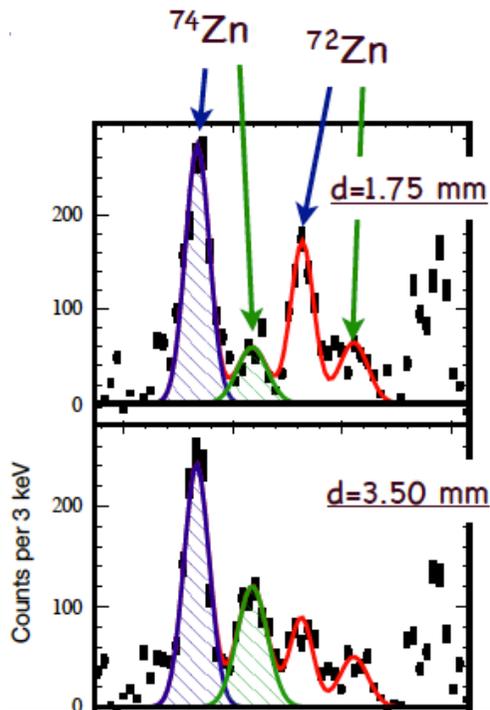
No quenching effect for transfer reactions



# En route vers le $^{78}\text{Ni}$

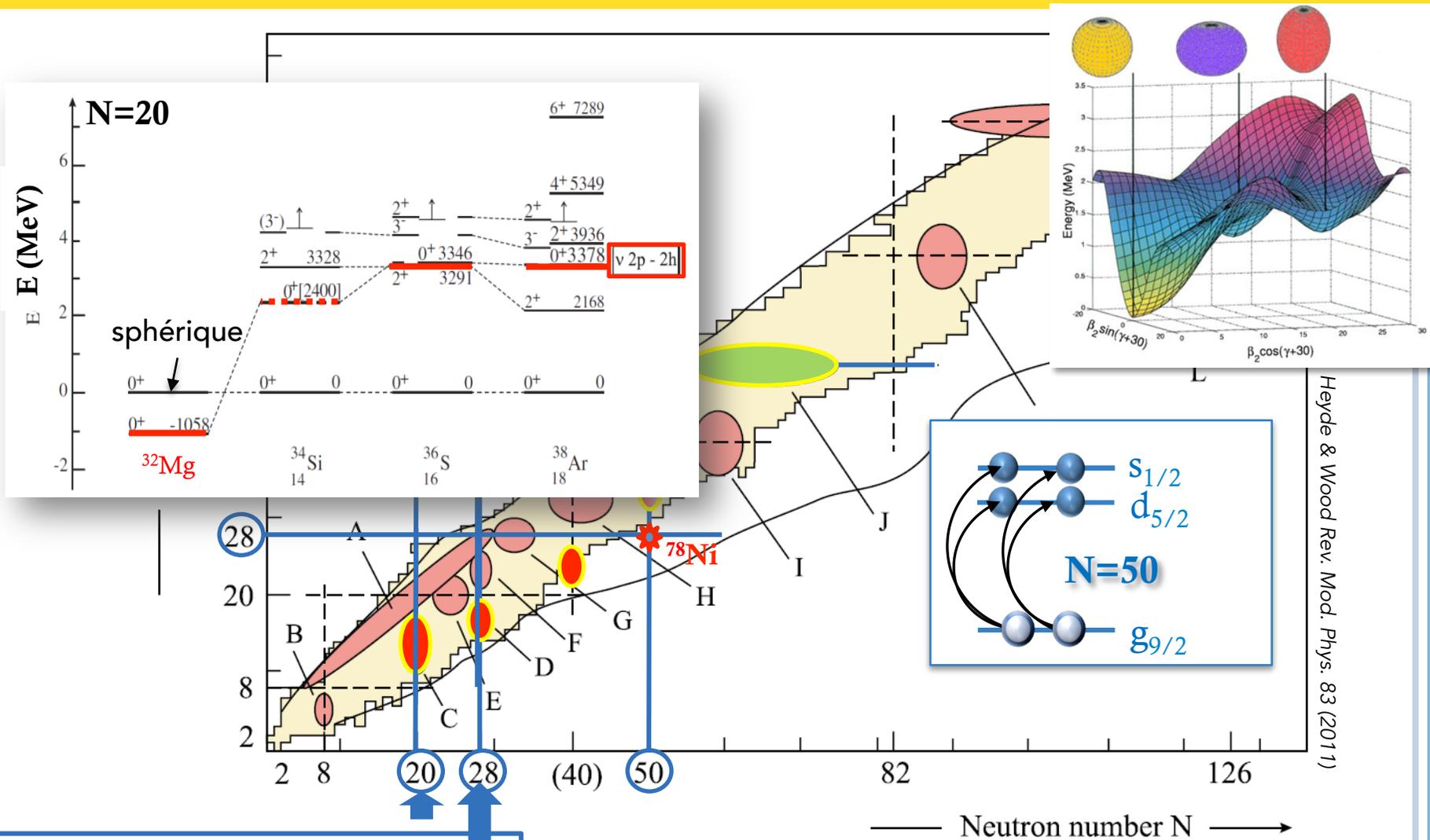
Mesure du temps de vie du premier  $2^+$  du  $^{74}\text{Zn}$  @ GANIL

Lifetime of the  $2^+_1$  state of  $^{74}\text{Zn}$  : 27.0(24) ps  
 Reduced transition probability  $B(E2:2^+ \rightarrow 0^+)$  : 370(33)  $e^2\text{fm}^4$



$v_{g9/2}$

# LES ÉTATS INTRUS DANS LES NOYAUX ET LA DISPARITIONS DES EFFETS DE COUCHE

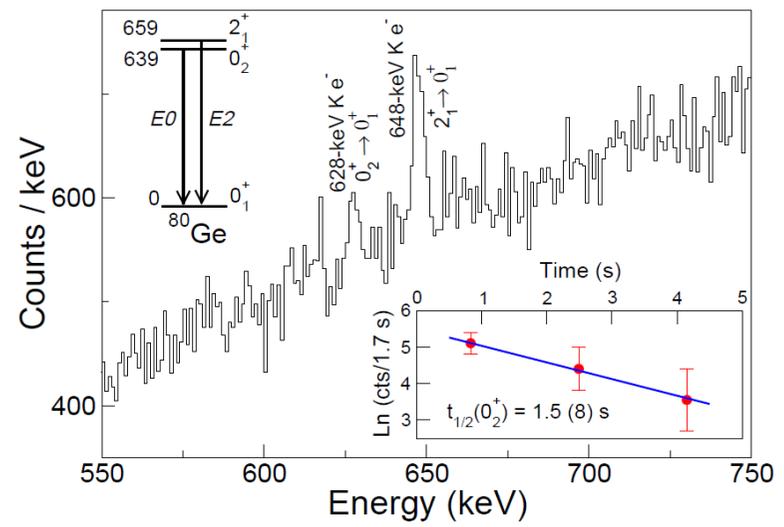
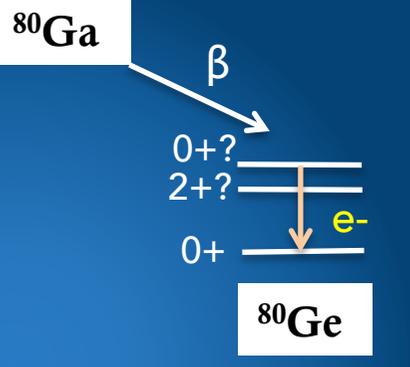
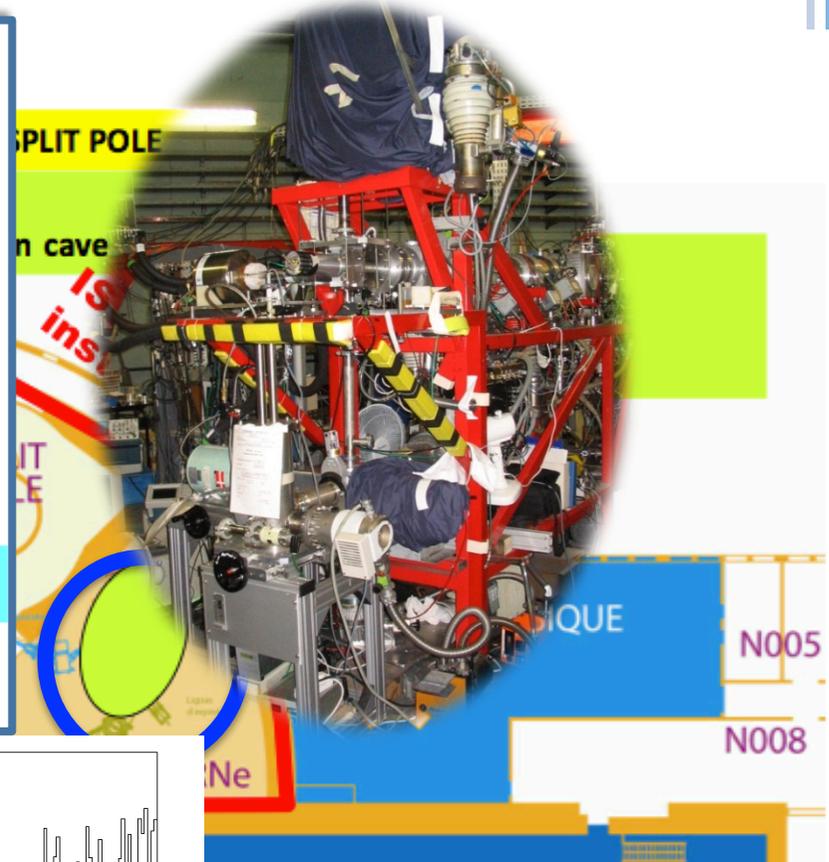
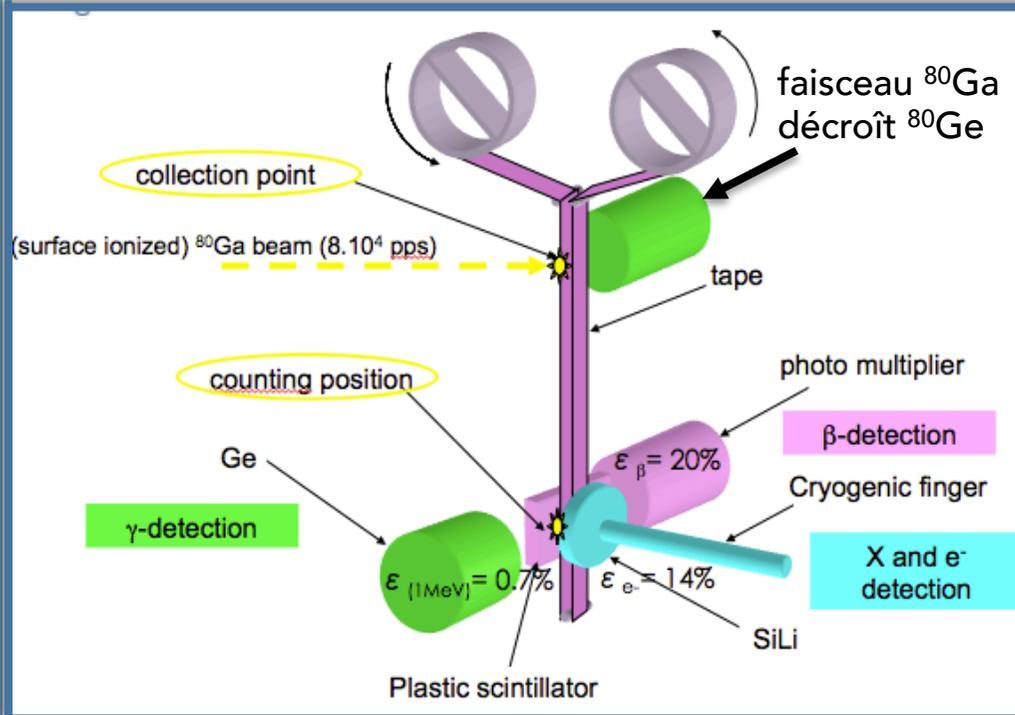


Heyde & Wood Rev. Mod. Phys. 83 (2011)

Cas historique N=20 ( $^{32}\text{Mg}$  region)  
 Klapisch PRL 31 118 (1973)  
 Thibault PRC 12 644 (1975)  
 Détraz PRC 19 164 (1979)

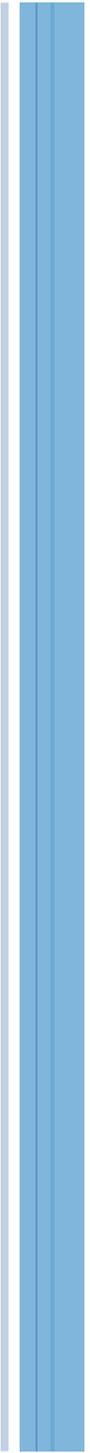
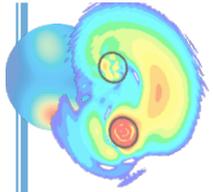
N=28 ( $^{42}\text{Si}$  region)  
 Bastin PRL 99 022503 (2007)

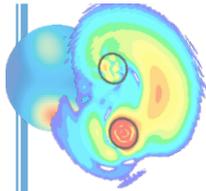
# Beta-decay spectroscopy around N=50 @ ALTO



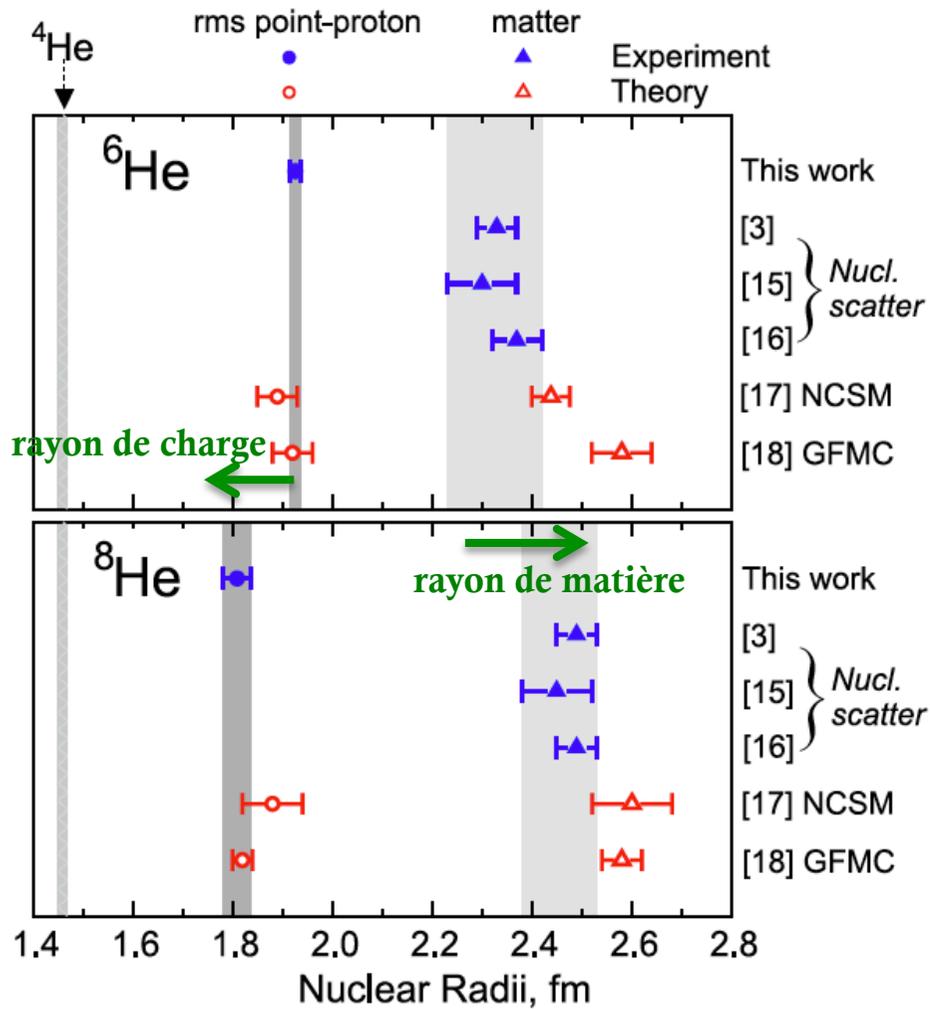
Première mise en évidence d'une coexistence de forme dans la région du  $^{78}\text{Ni}$ .

Stable beam without spectrometer

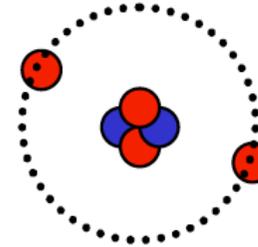




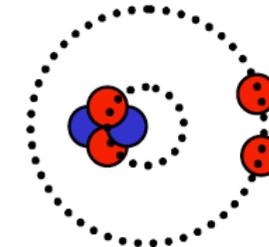
# CHARGE RADIUS MEASUREMENTS



spherically distributed neutrons

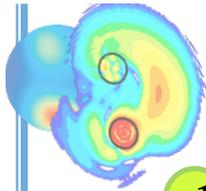


correlated neutrons



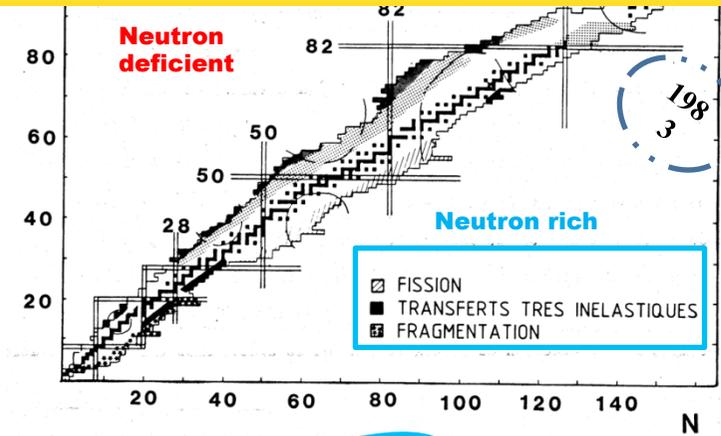
From  ${}^6\text{He}$  to  ${}^8\text{He}$

- *matter radius* **increases** (neutrons added)
- *charge radius* **decreases** (neutrons spend more time close to each other → recoil motion of alpha core)

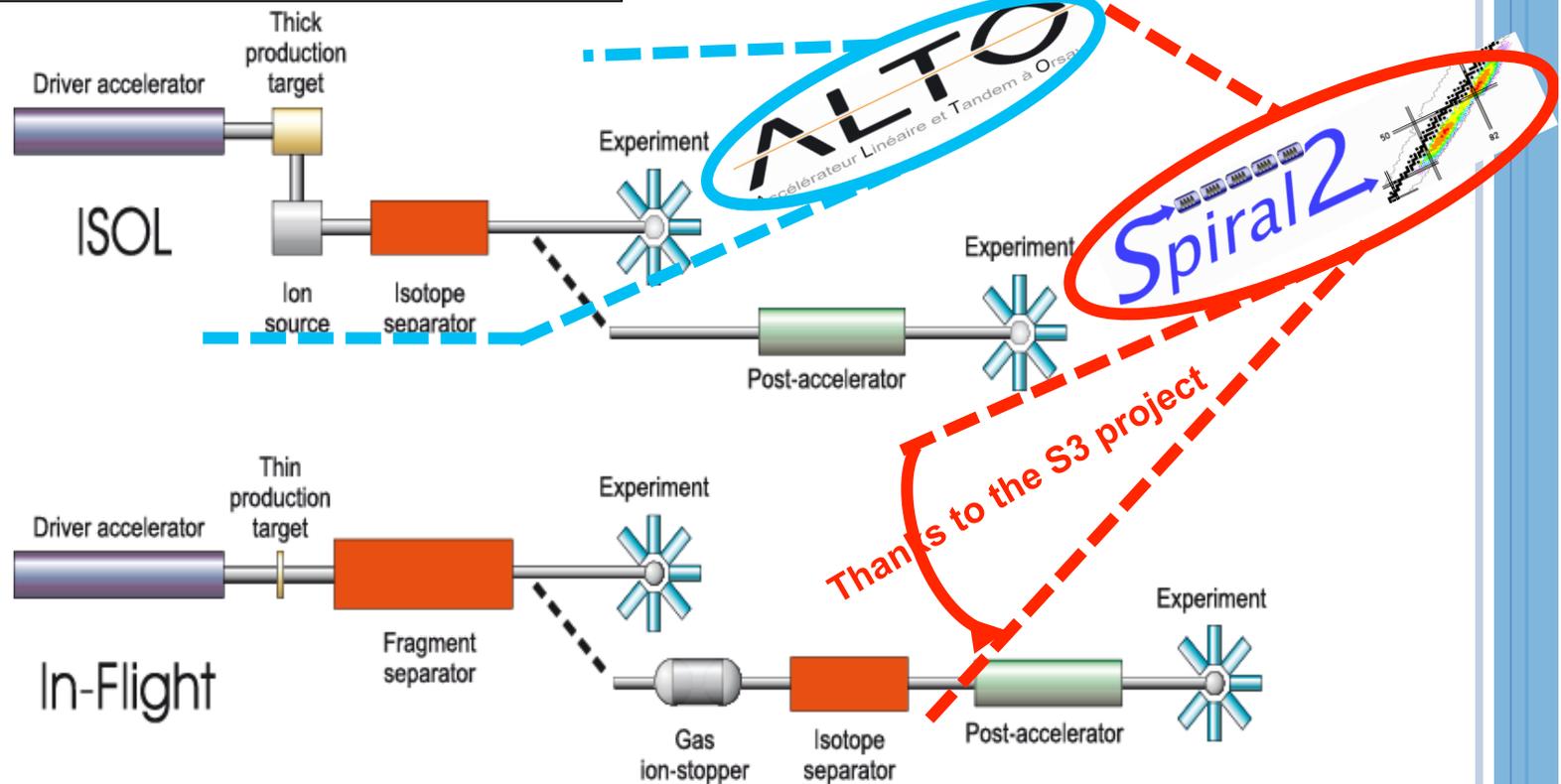


# COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX EXOTIQUE ?

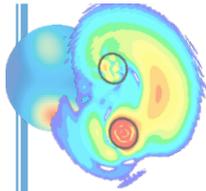
1 Choisir le bon mécanisme de réaction



2 Choisir la méthode de production



Comparison between the ISOL and In-Flight methods of producing radioactive ion beams. Post-acceleration is possible in either case.



# COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX ?

En France :

Driver accelerator

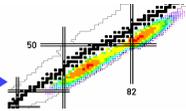


ISOL

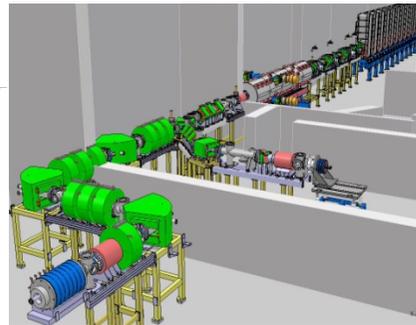
Isotopic  
Separation  
On Line

**ALTO**  
Accélérateur Linéaire et Tandem à Orsay

*Spiral2*



Electrons 10  $\mu$ A 50 MeV

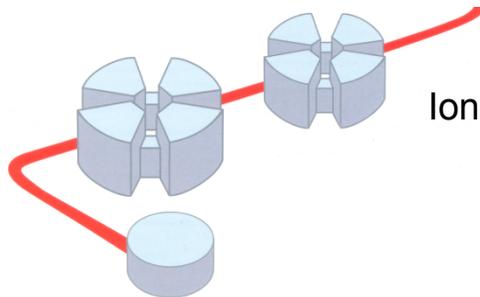


LINAG : ions  
légers  
grande  
intensité  
(qq mA !)

Driver accelerator

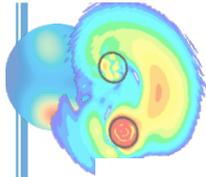


In-Flight

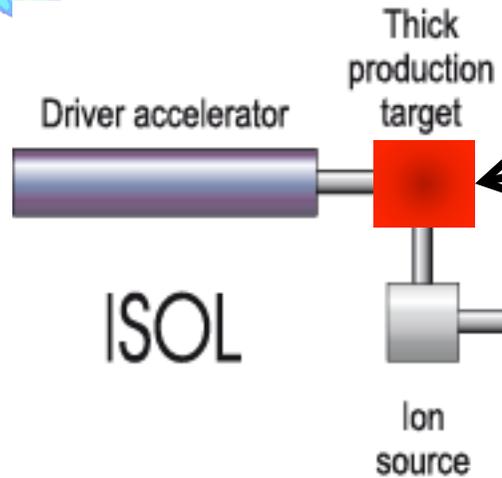


2 cyclotrons CSS1 and CSS2  
Ions lourds 50-100 AMeV ("énergie intermédiaire")

**GANIL**  
GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS



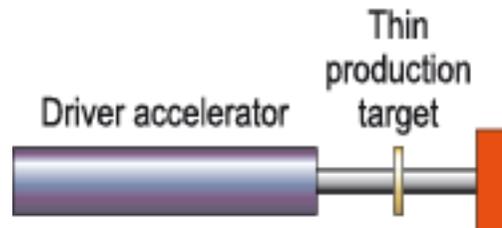
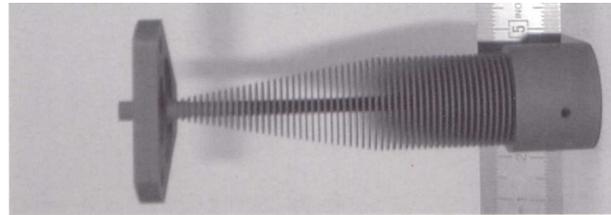
# COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX ?



**thermalisation**

Produits de réaction arrêtés dans la cible

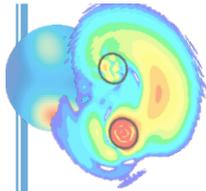
Ex Cible en forme d'arbre de Noël à SPIRAL1-GANIL



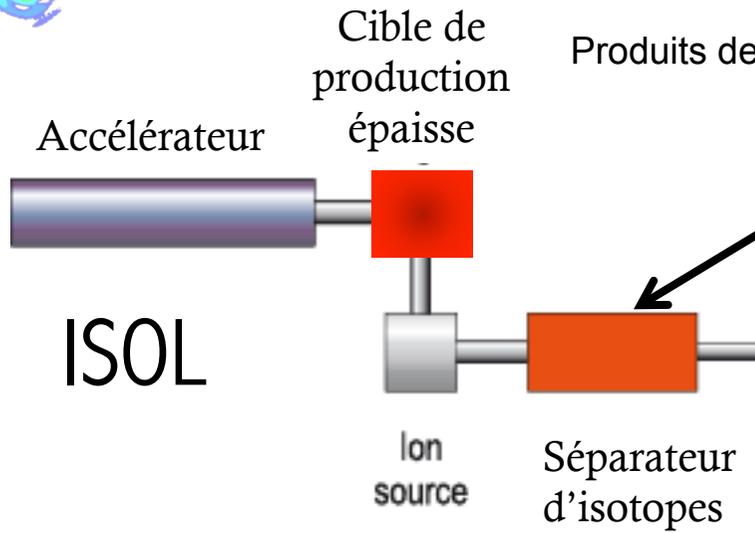
**Pas de thermalisation**

Ex : cible de production de LISE



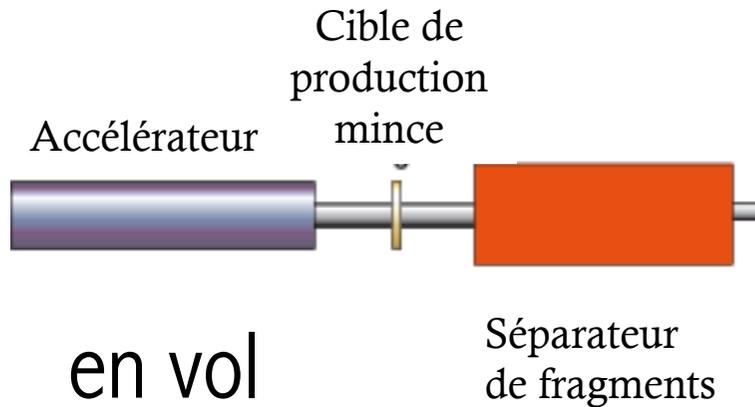


# COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX ?



separation

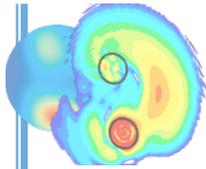
séparateur de masse  
DAPPNo



identification

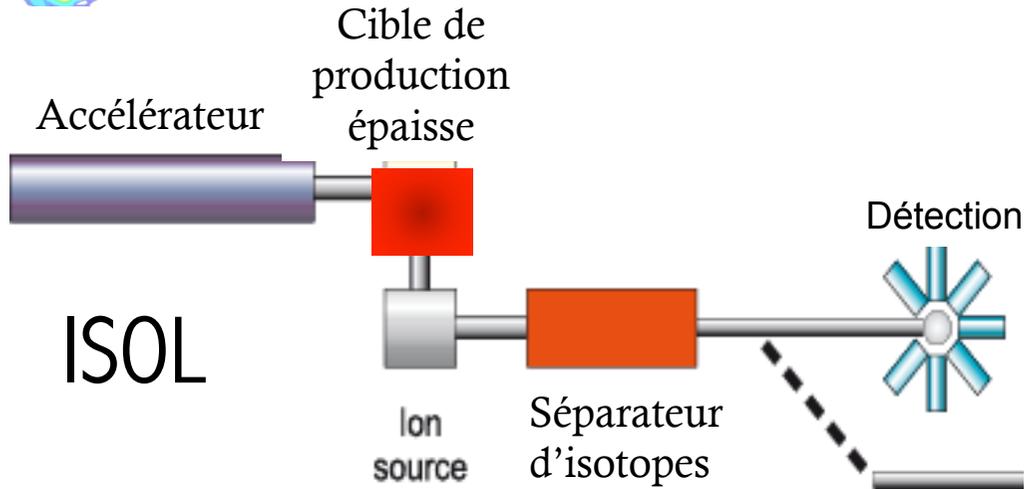
Ex : LISE, SPEG,  VAMOS  
VARIABLE MODE SPECTROMETER



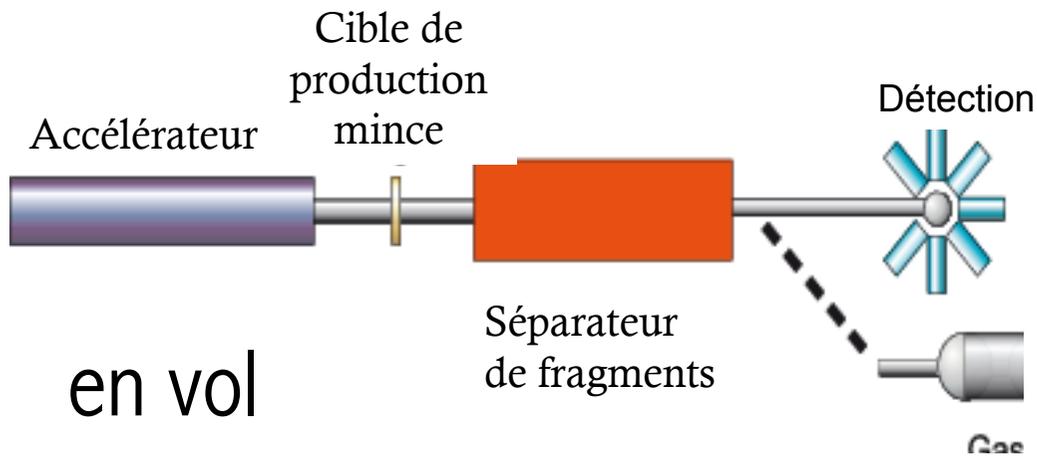


# COMMENT PRODUIRE LES NOYAUX ?

ISOL



en vol



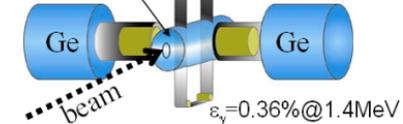
## Détection

Ex : Ge detector array :  
OSCAR (the Orsay Segmented  
lover Array)

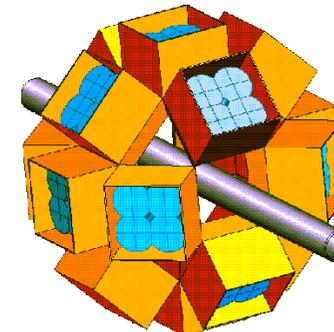


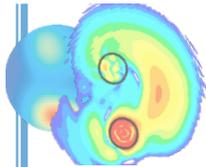
4 $\pi$  plastic  
scintillator

Mylar  
tape

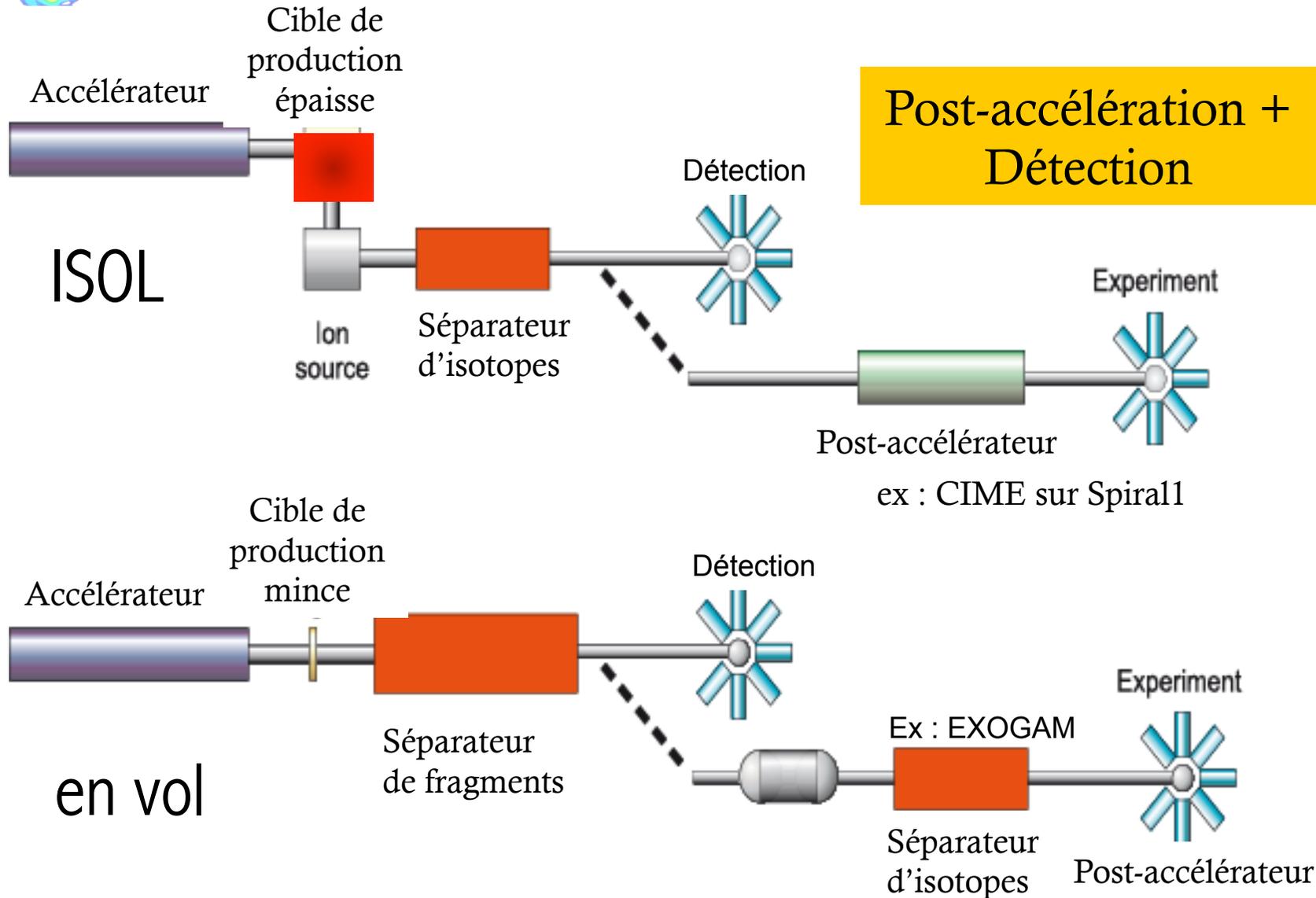


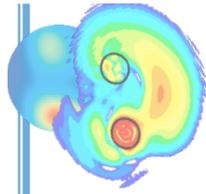
Ex : EXOGAM



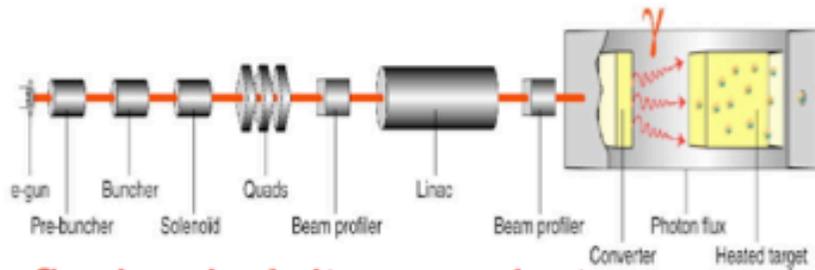


# COMMENT PRODUIRE LES NOYAUX ACCÉLÉRÉS?





# FISSION INDUITE PAR PHOTONS



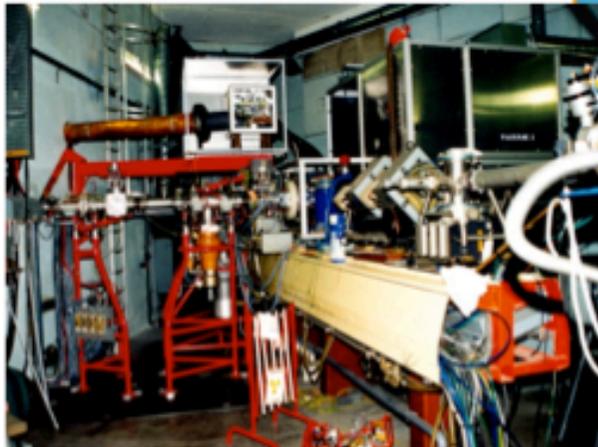
# ALTO

**fission induite par photons  
(photofission)**

**Caractéristiques faisceau :**

**Energie électrons : 10-50 MeV**

**Intensité : 10  $\mu$  A**



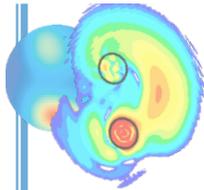
Vers le séparateur et les lignes d'expériences

Section linéaire accélératrice

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

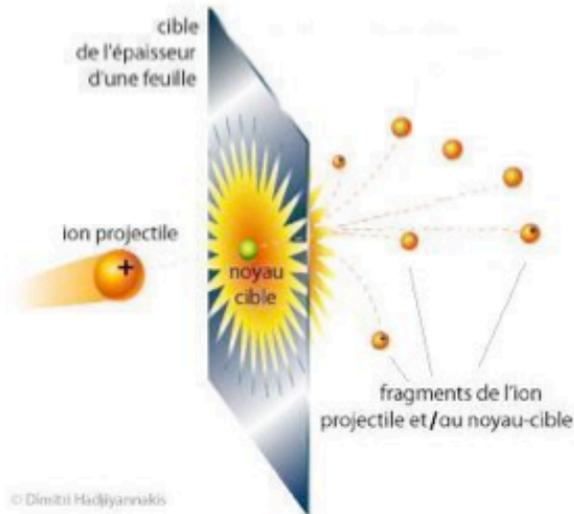
Accélérateur Linéaire ALTO  
Installation au Tandem - De l'étude à la réalisation - panorama

**+ technique ISOL  
mais sans post-accélération**

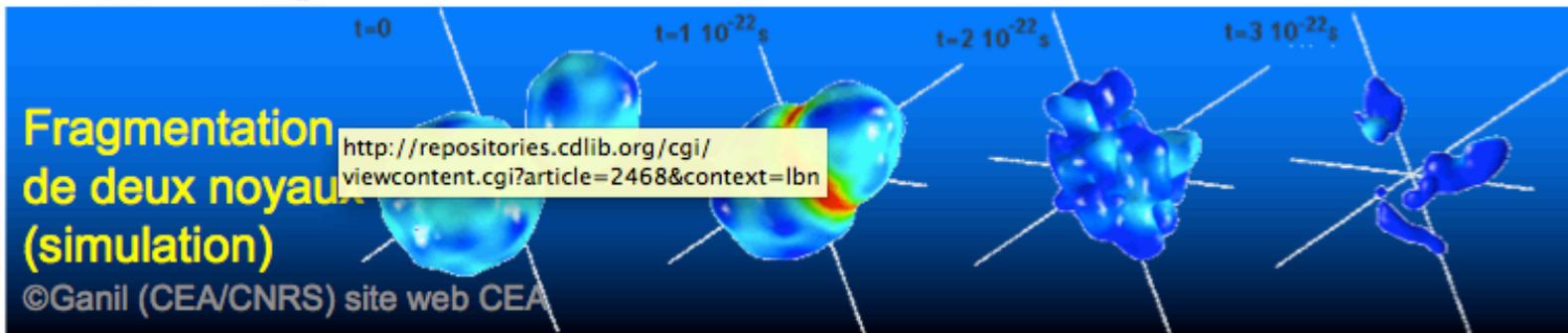
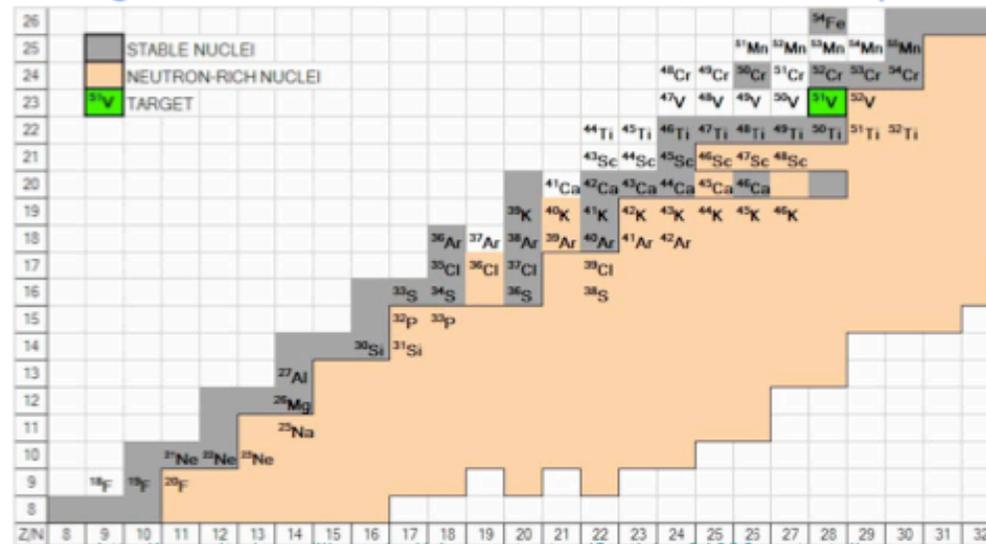


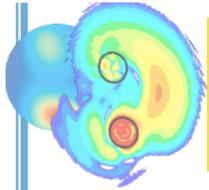
# PRINCIPE DE LA FRAGMENTATION

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  $\sim 8$  MeV)  
 $\Leftrightarrow$  pas de noyau composé : on erode la structure quantique,  
 "chauffe" le noyau



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





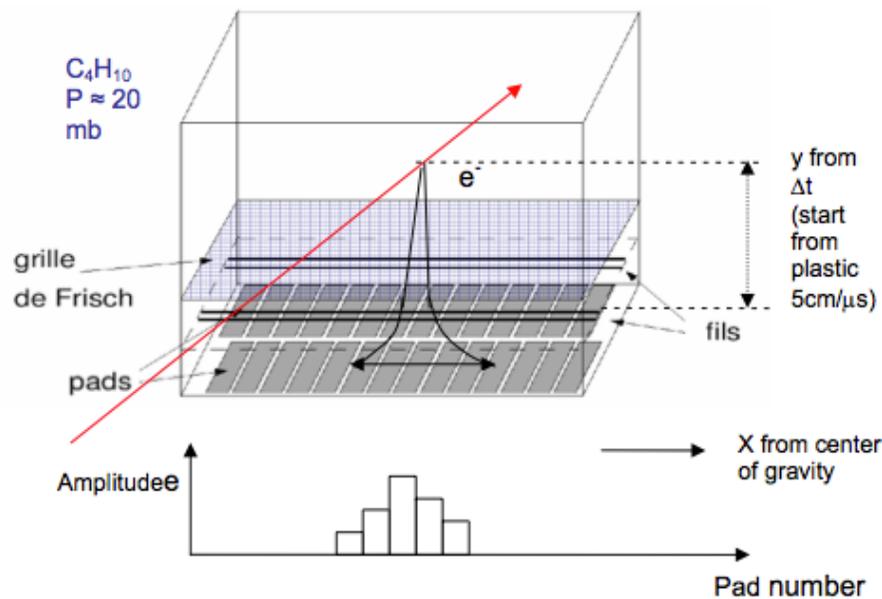
## NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

- Le résidu lourd recul :

- proche de 0 degré (à l'avant)

- il est proche du faisceau (résidu du faisceau)

→ besoin d'un **spectromètre magnétique** de grande précision  $B\rho = \frac{p}{Q}$



2 quadrupoles de grande acceptance + dipole + Filtre de Wien  
Acceptance +/- 6%