

Comprendre le noyau



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

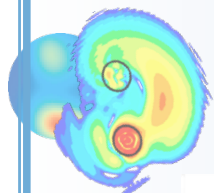
- I. Les échelles de la physique nucléaire et comment voir le noyau ?
- II. La « glue » du noyau et ses conséquences
- III. Ça pèse combien un noyau ? Masse et énergie de liaison
- IV. Les noyaux instables. Combien y en a ? Comment on les fabrique ?

Deuxième cours : En théorie ça se passe comment ?

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

Troisième cours : La trousse à outils du physicien nucléaire

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



LA QUÊTE DE L'EXOTISME

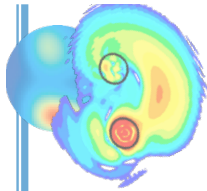
(I) LES ACCÉLÉRATEURS



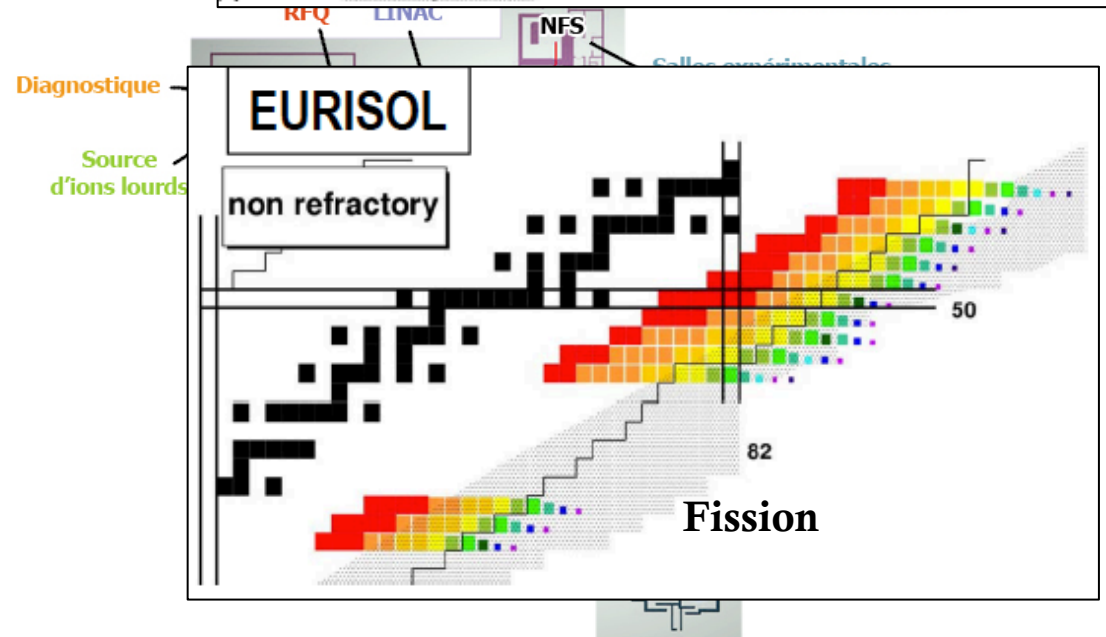
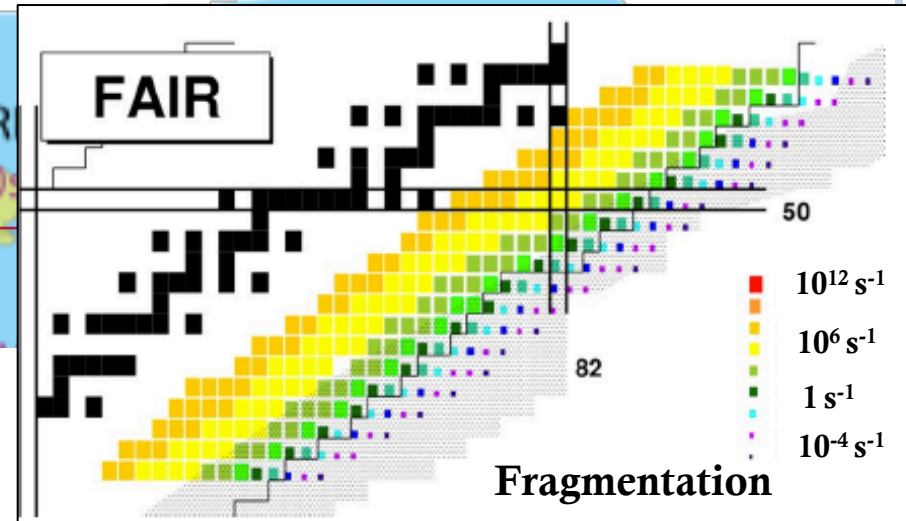
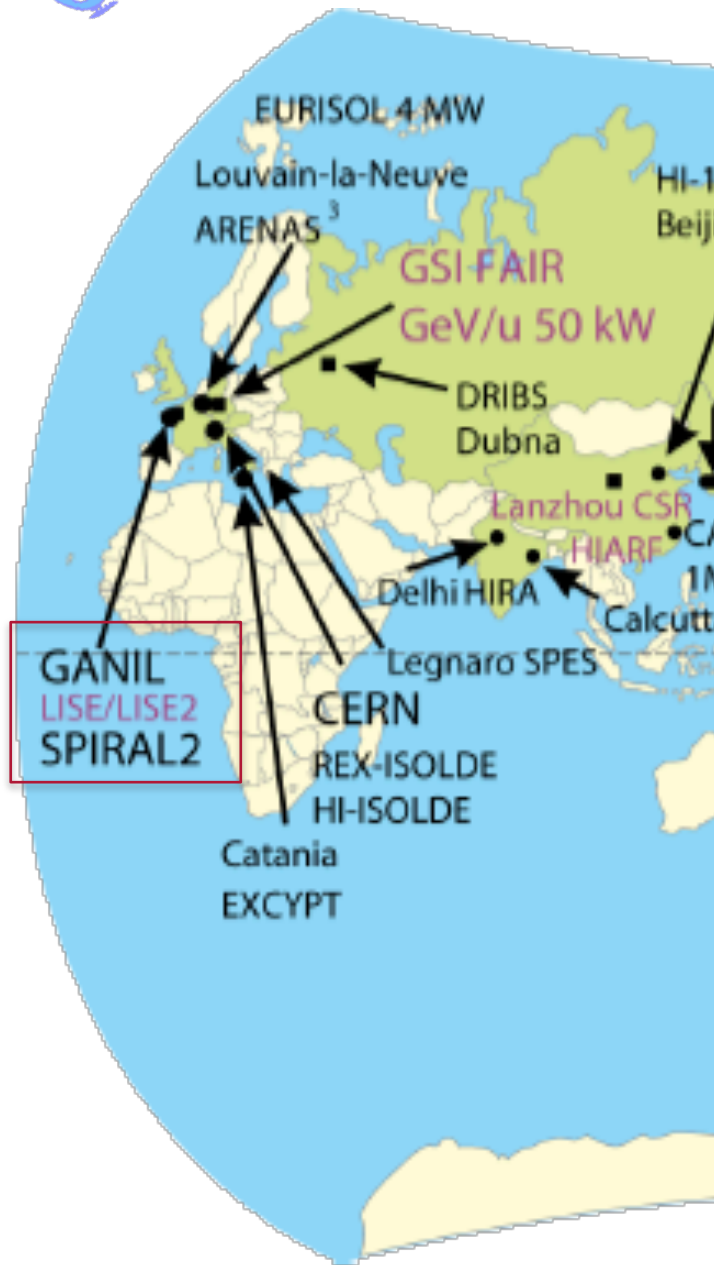
- ▶ **Les méthodes de production**
 - mécanismes de réaction
 - méthode en vol
 - méthode de fragmentation

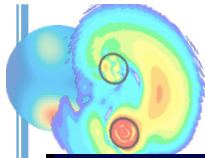


- ▶ **Les installations dans le monde**



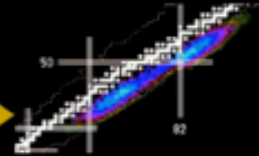
LA CARTE DES INSTALLATIONS





LE FUTUR ACCÉLÉRATEUR SPIRAL2 EN FRANCE

Spiral2



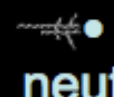
construction d'un nouvel accélérateur supraconducteur .

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

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



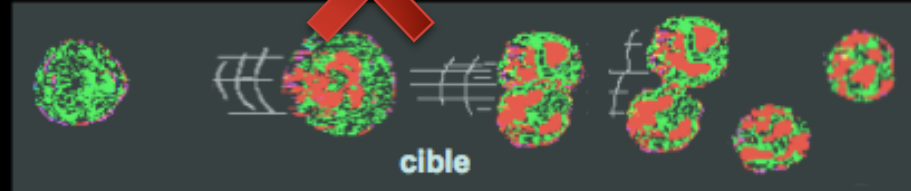
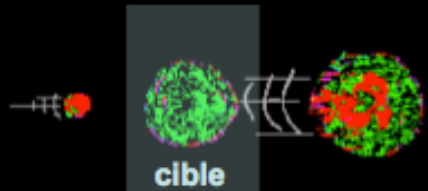
convertisseur C



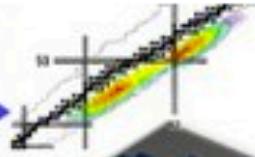
une aire expérimentale:
étude des noyaux
produits par réaction

une cible mince
puis séparation
ligne basse énergie

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



Spiral2



GANIL existant

Existing experimental halls

Experimental hall with exotic nuclei at low energy (DESIR)

Phase 2

Experimental hall Super Separator Spectrometer (S³)

Experimental hall Neutrons For Science (NFS)

Phase 1

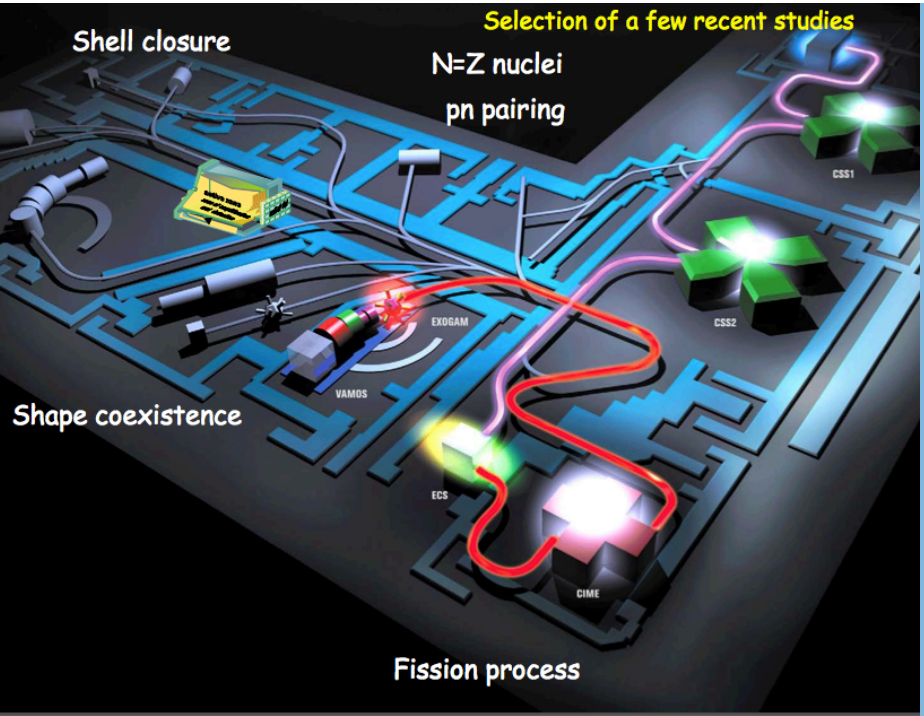
Linear Supraconductor Accelerator LINAC

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

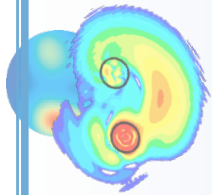
RFQ

Deuteron - Proton source
5 mA

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



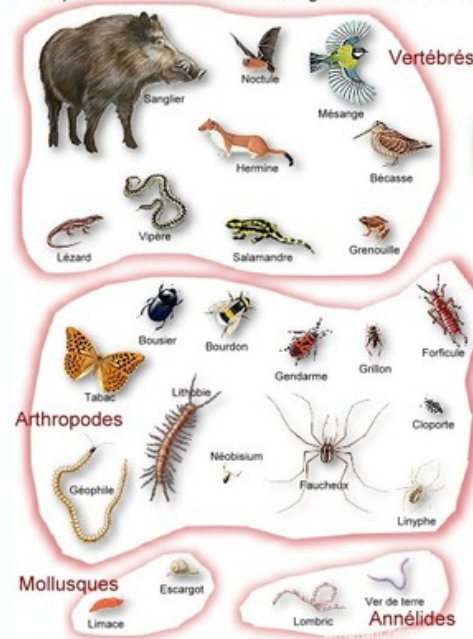
$\approx 10^{14}$ fissions/s



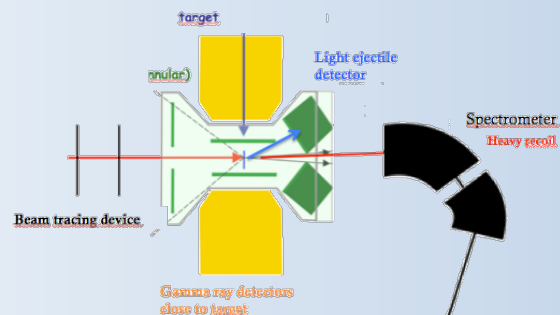
LA TROUSSE À OUTILS DU PHYSICIEN

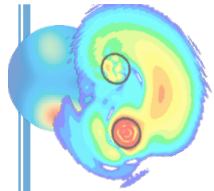
- ▶ Par spectroscopie (version courte)
- ▶ Par des réactions nucléaires (version longue)

Quelques embranchements du règne animal et du règne végétal



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





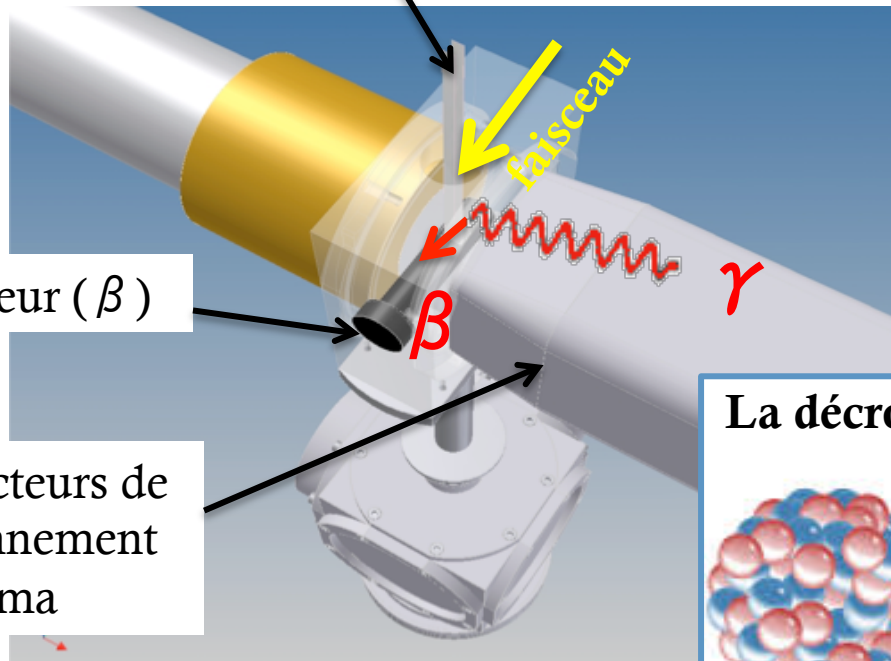
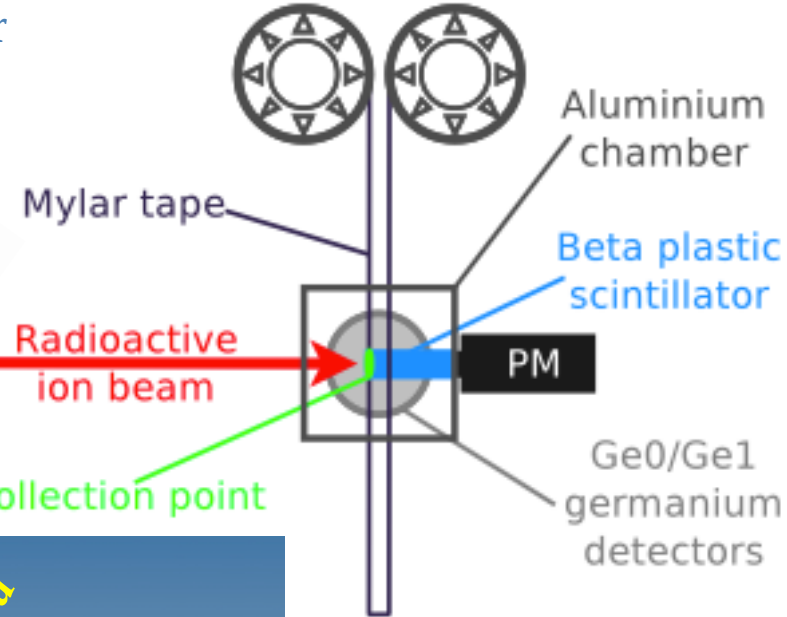
COMMENT ETUDIER LES NOYAUX ?

I -LA SPECTROSCOPIE

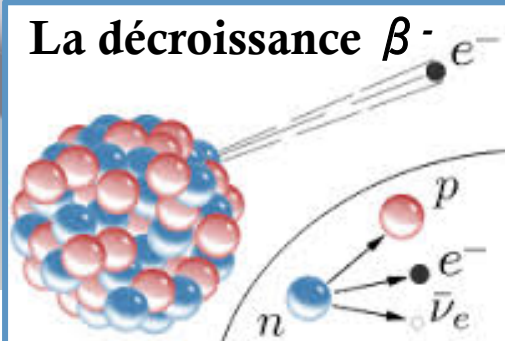
Production de noyaux d'intérêt (E faible)

Séparateur de masse

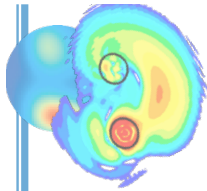
Bande déroulante (mylar)



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



Illustrations empruntées à D. Vernay, K. Kolos

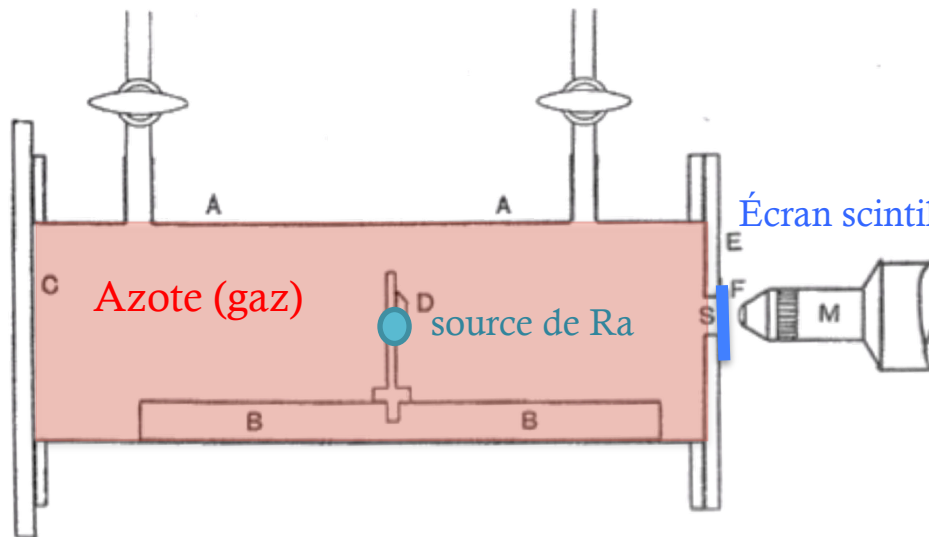
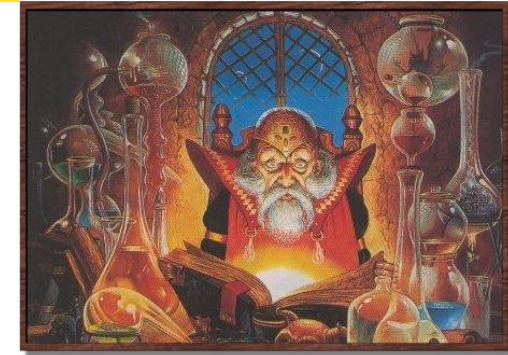


COMMENT ETUDIER LES NOYAUX ?

II- LES REACTIONS

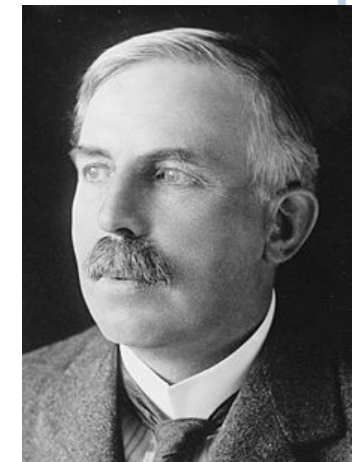
LA PREMIÈRE RÉACTION DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE

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

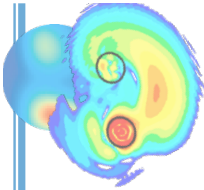


Écran scintillant de Sulfure de Zinc

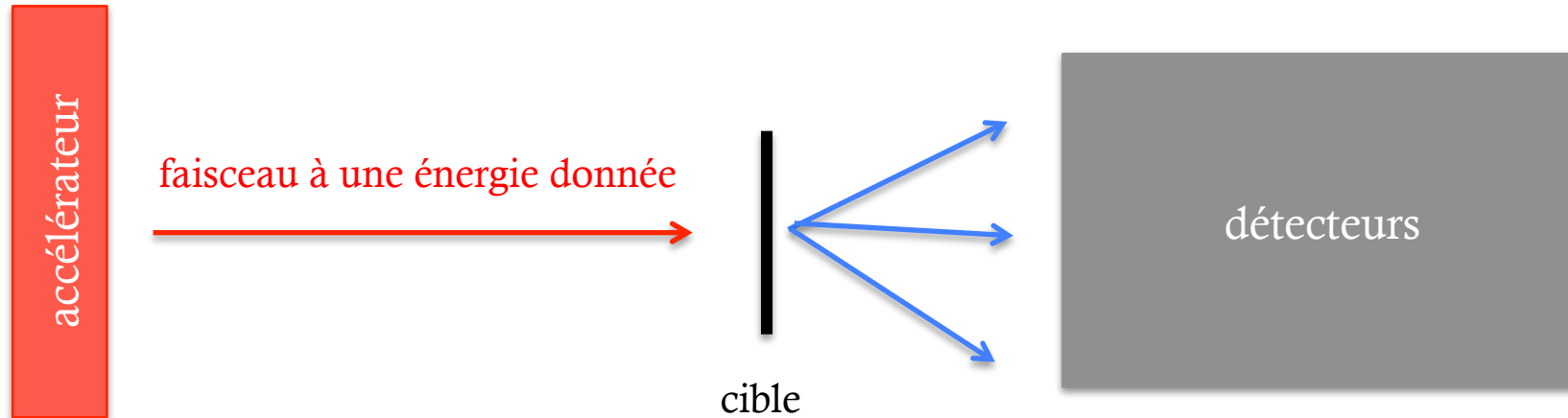
Particules α



Rutherford

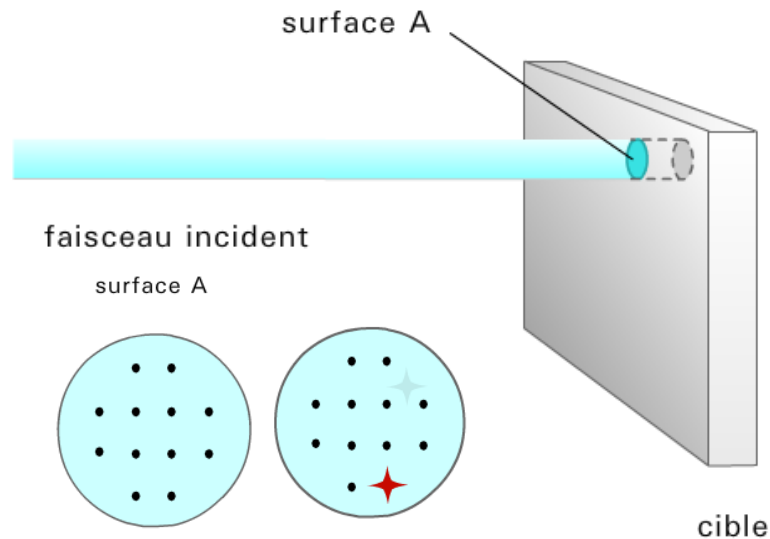


PRINCIPE DE MESURE D'UNE RÉACTION

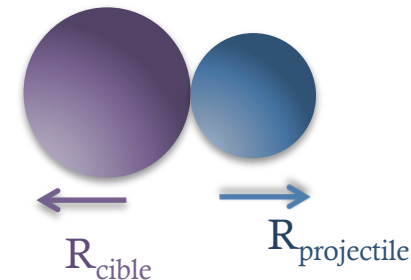


particules, noyaux
produits

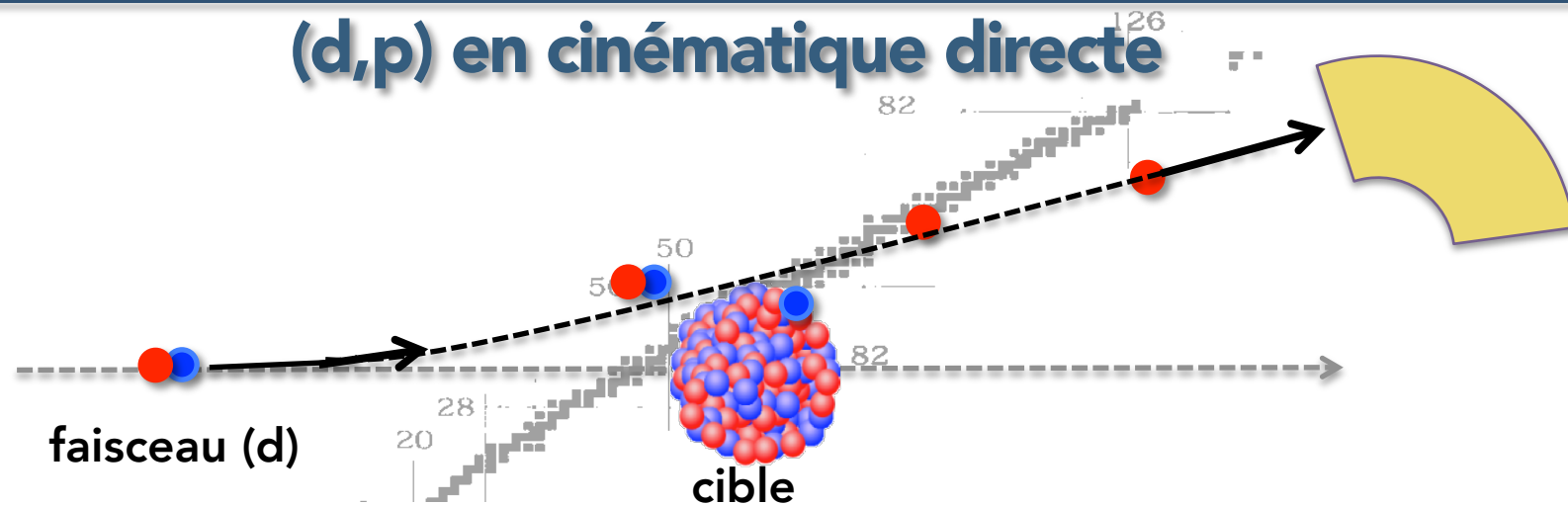
► Principe de la section efficace



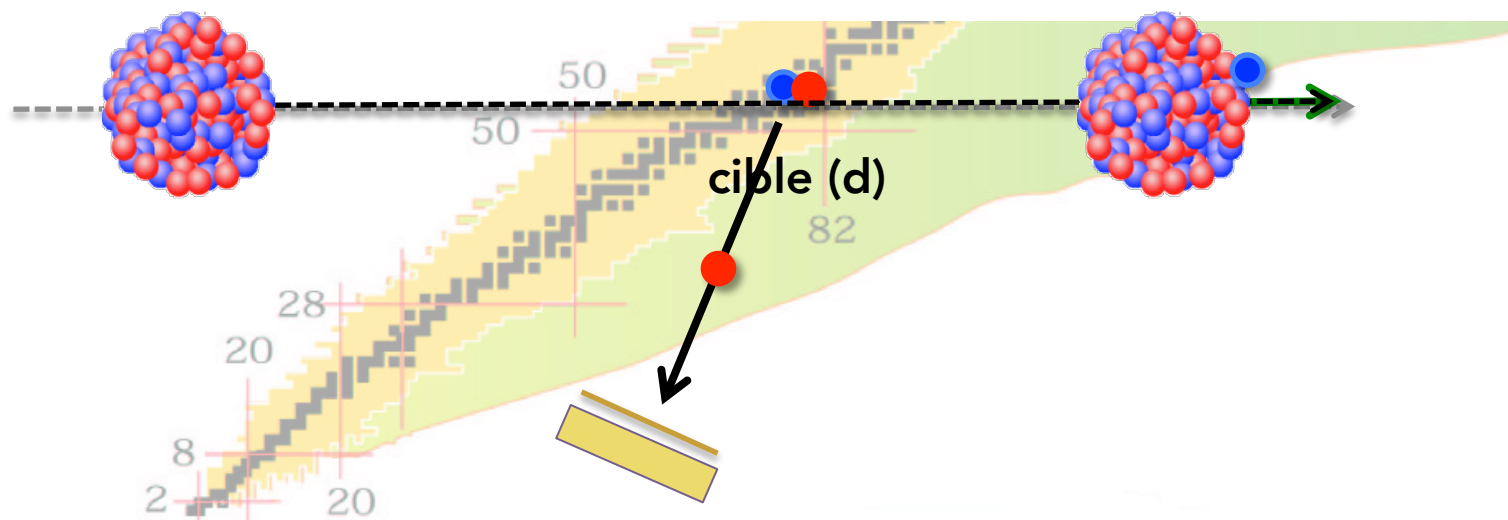
Section efficace σ pour une diffusion
en 1^{ère} approximation :
$$\sigma = \pi(R_{cible}^2 + R_{projectile}^2)$$

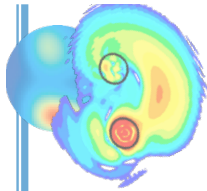


(d,p) en cinématique directe



(d,p) en cinématique inverse



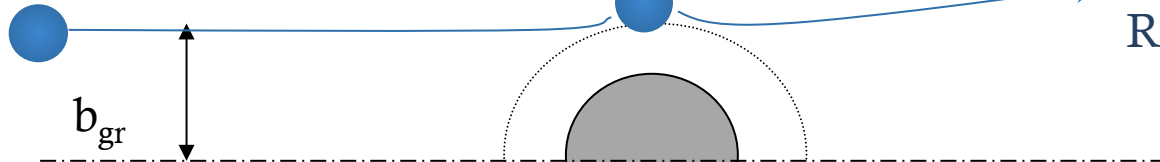


LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES:

(I) PARAMÈTRE D'IMPACT

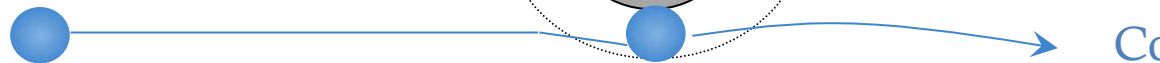
- ▶ **Paramètre d'impact** : distance la plus petite d'approche entre 2 noyaux
- ▶ **Le type de réaction** dépend du **paramètre d'impact**.

paramètre d'impact **d'effleurement**



Diffusion élastique
Réactions directes

petits paramètres d'impact



Collision profondément
inélastique

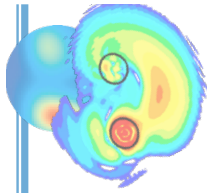
grands paramètres d'impact



Diffusion élastique
Excitation coulombienne

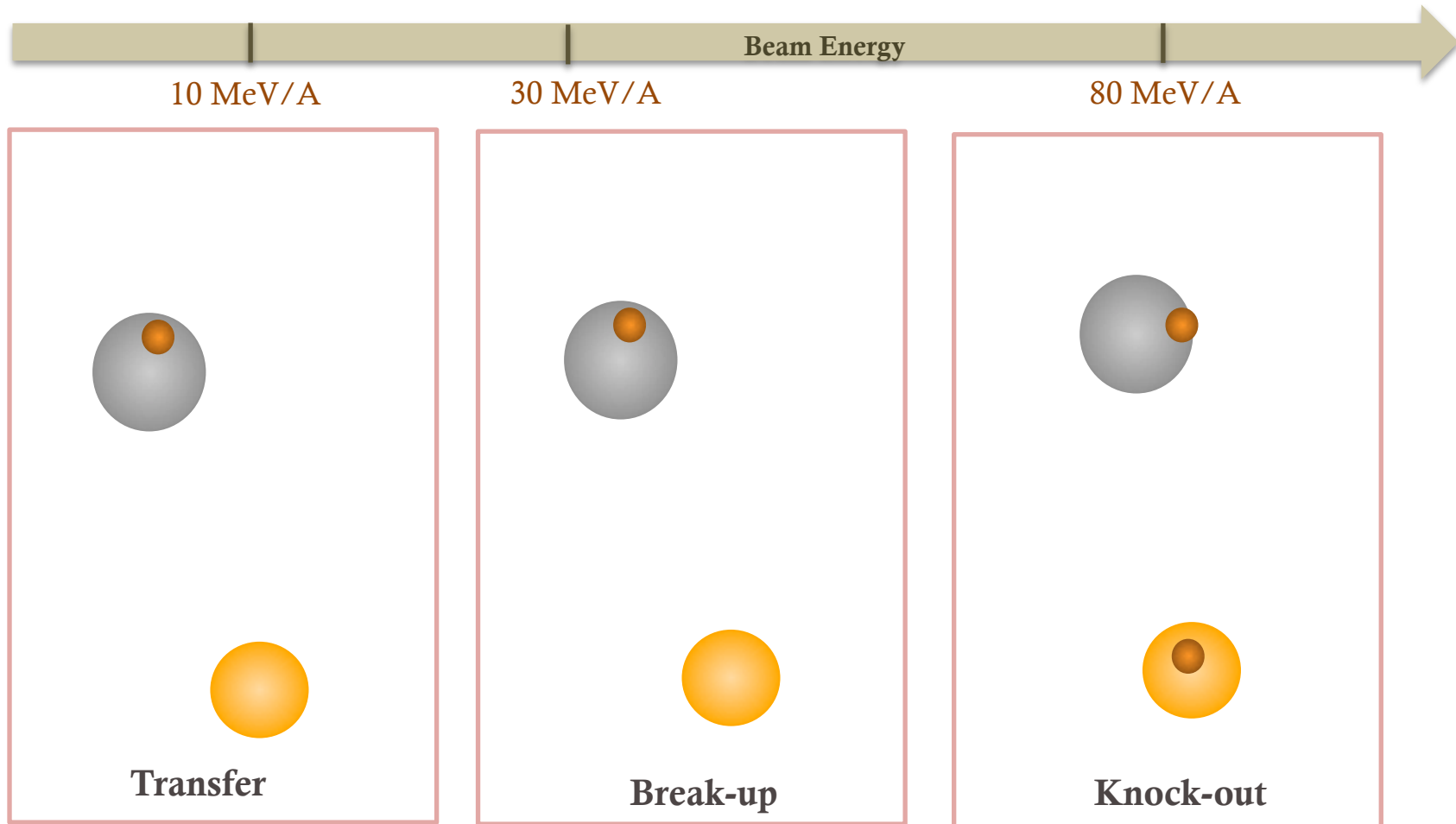
Mais : on ne maîtrise pas le paramètre d'impact,
ce n'est pas du billard !

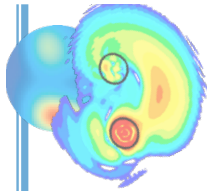




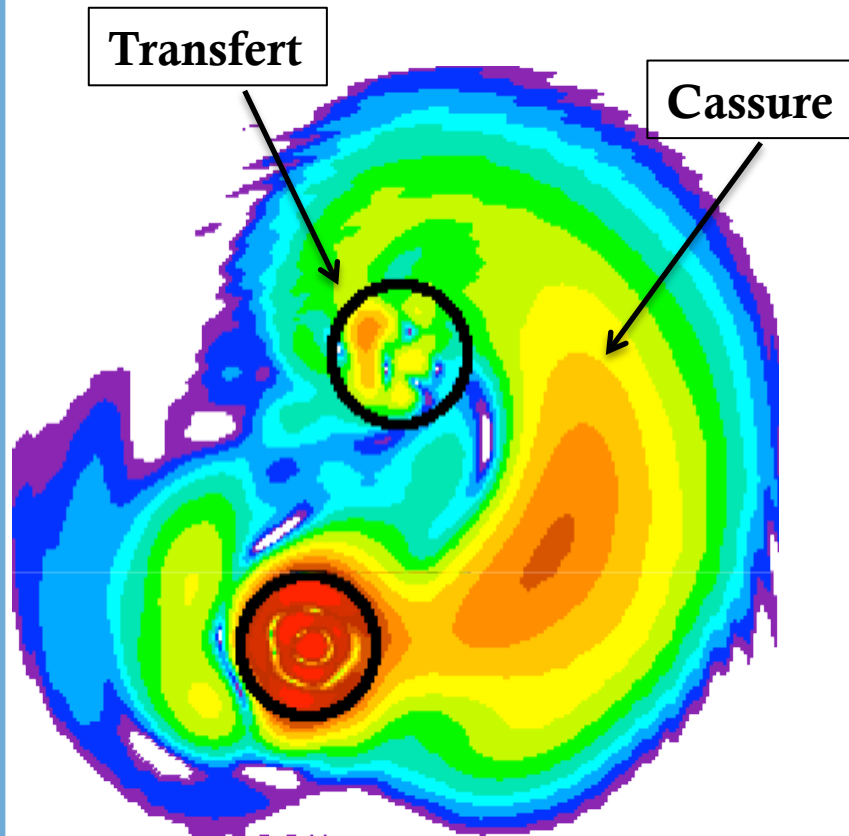
REACTION NUCLÉAIRES :

(II) L'EFFET DE L'ÉNERGIE





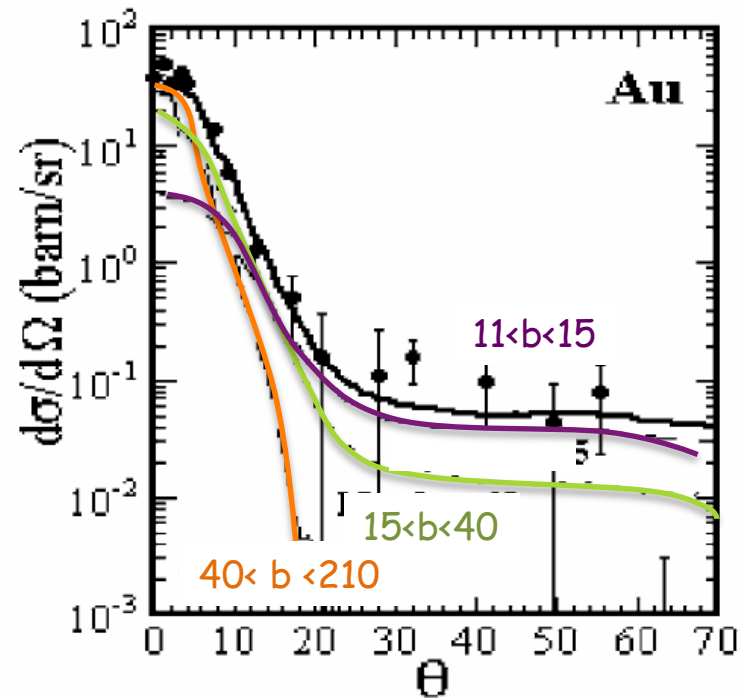
TOUTES LES RÉACTIONS ONT LIEU EN MÊME TEMPS! IL FAUT LES DÉMÊLER !

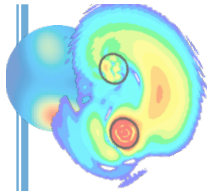


source : J-A Scarpaci home page

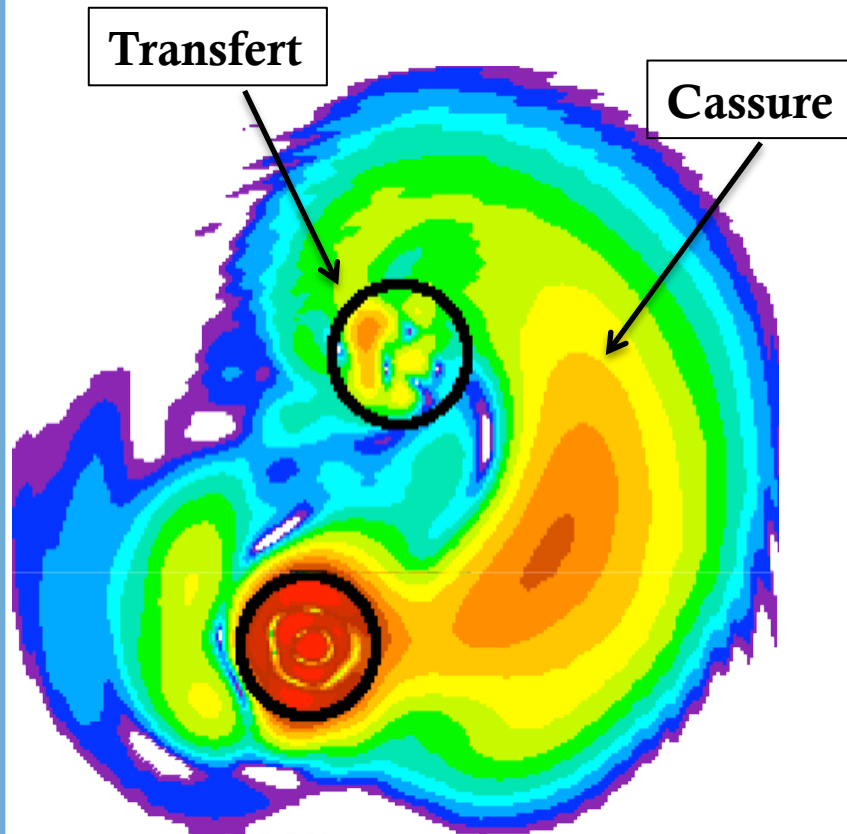
► Comment on sépare les différentes réactions ?
exemple des réactions de cassure :

- diffusion coulombienne : à l'avant





LOIN DE L'IMAGE IDÉALE...



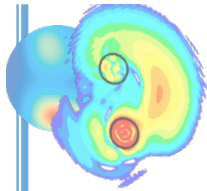
source : J-A Scarpaci

► **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

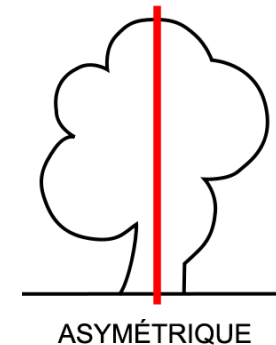
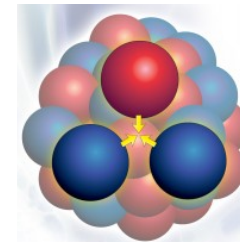
Ce qu'on apprend

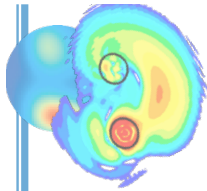
Diffusion élastique de noyaux
Diffusion inélastique (vers états excités)
Diffusion inélastique (au continuum)
Transfert, « knock-out », cassure
Fusion
Fission
Diffusion d'électrons

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



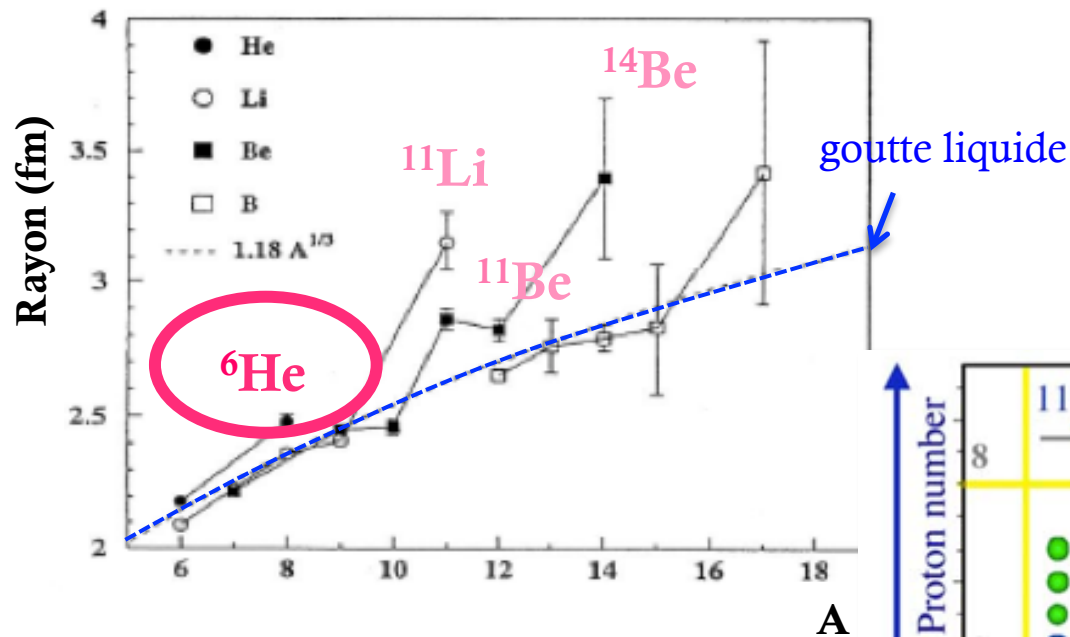
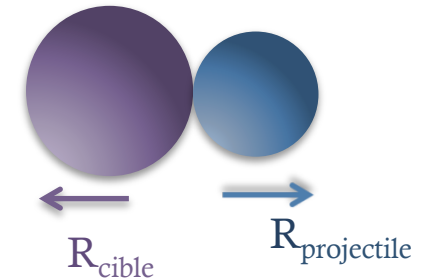


EXEMPLE : DIFFUSION ELASTIQUE DES NOYAUX, RAYON DES NOYAUX

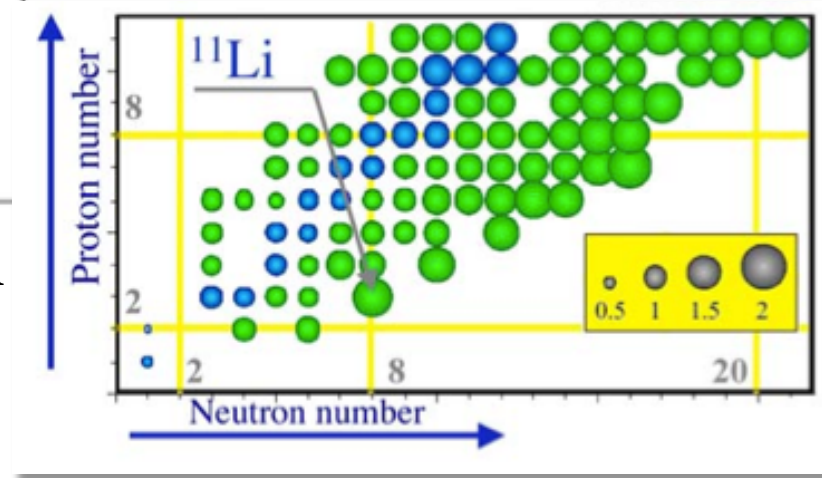
► Rayons d'interaction

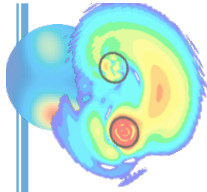
Section efficace σ pour une diffusion en 1^{ère} approximation :

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



Tannihata et al, PRL (1985)





EXEMPLE : DIFFUSION ELASTIQUE DES NOYAUX, RAYON DES NOYAUX

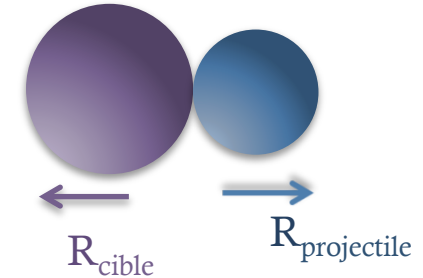
► Rayons de matière

Section efficace σ pour une diffusion en 1^{ère} approximation :

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

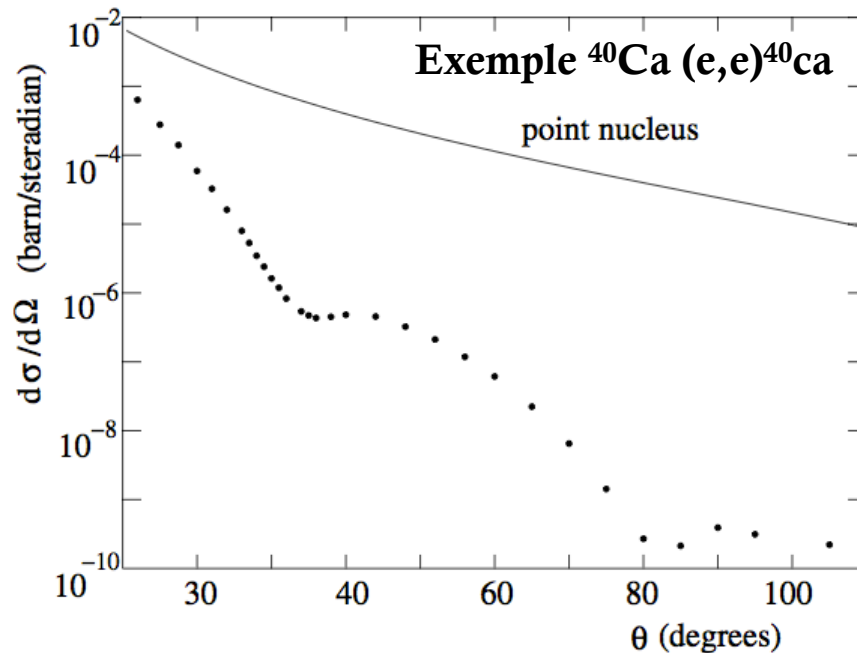
► Rayons de charge et densité

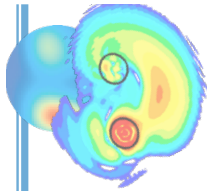
$$\lambda = \frac{\hbar}{p}$$



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**





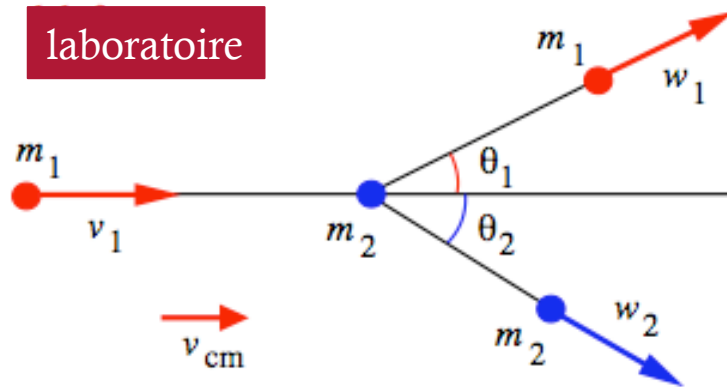
L'EXEMPLE DES RÉACTIONS DE TRANSFERT

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

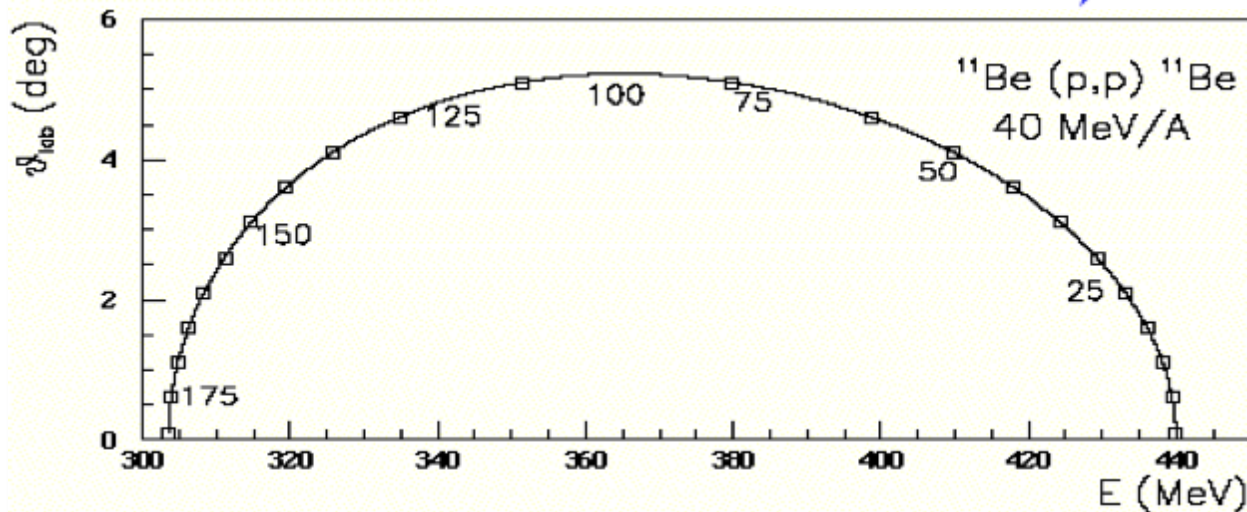
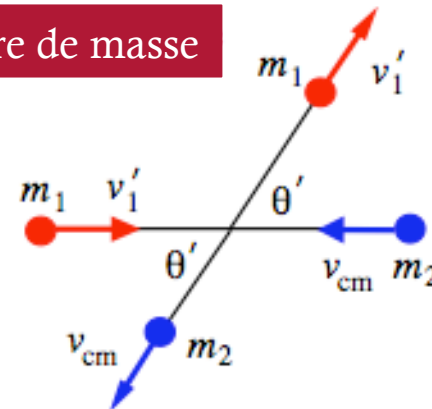


Notation : A(B,D)C = cible (projectile, résidu projectile) résidu cible

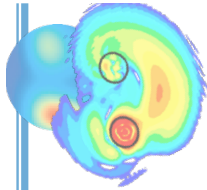
laboratoire



centre de masse

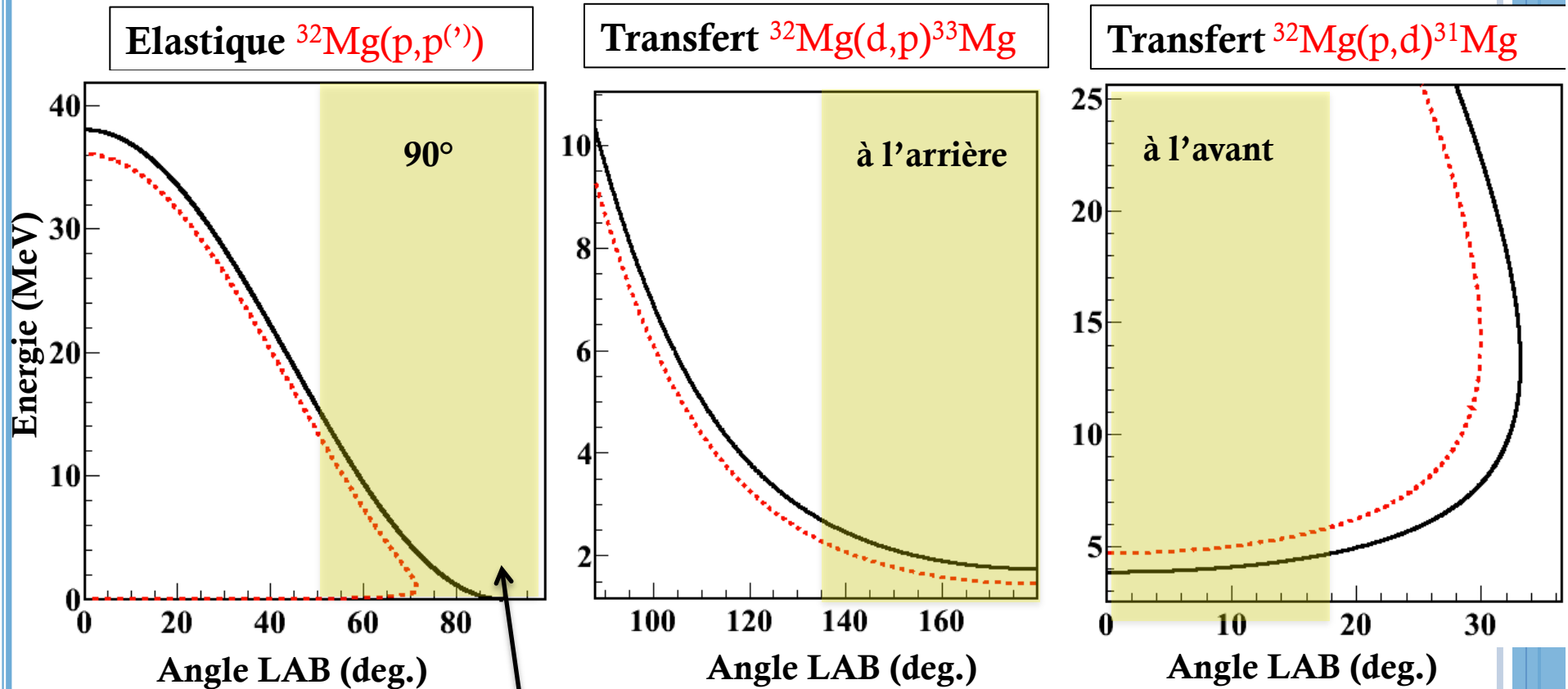


Diffusion élastique
Cas du « résidu lourd »

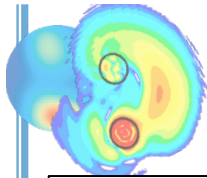


L'EXEMPLE DES RÉACTIONS DE TRANSFERT

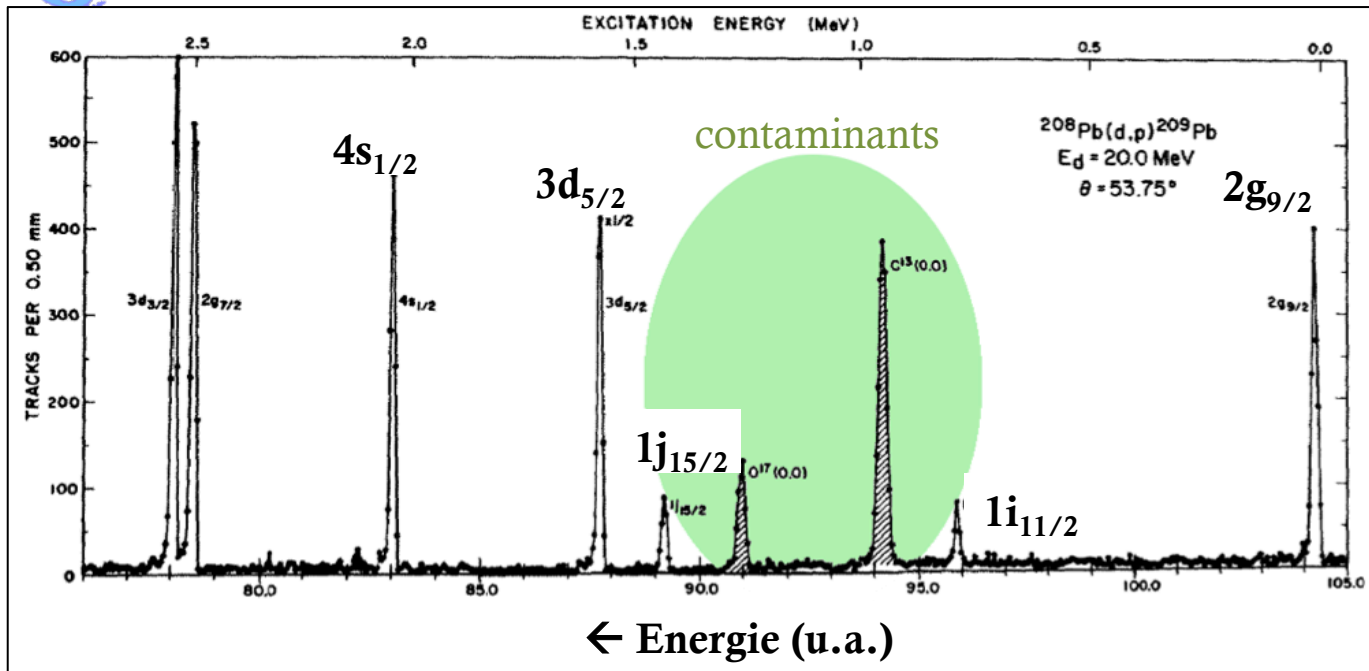
- Conservation de l'énergie et de l'impulsion dans une réaction à 2 corps



Zone de plus grande section efficace

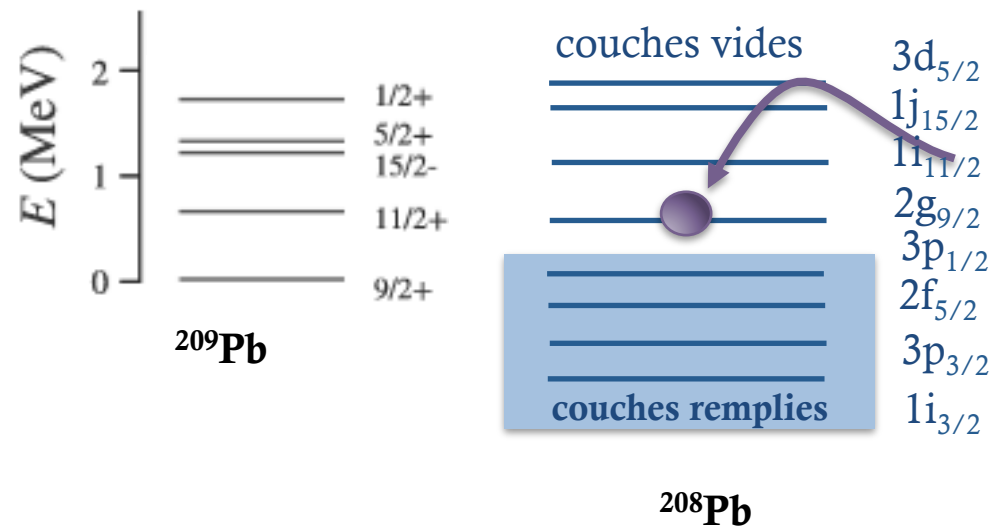


INTÉRÊT DES RÉACTIONS (D,P) ET (P,D)

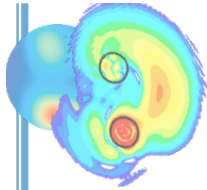


► Réaction (d,p) :
exploration des états de particules

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



^{208}Pb



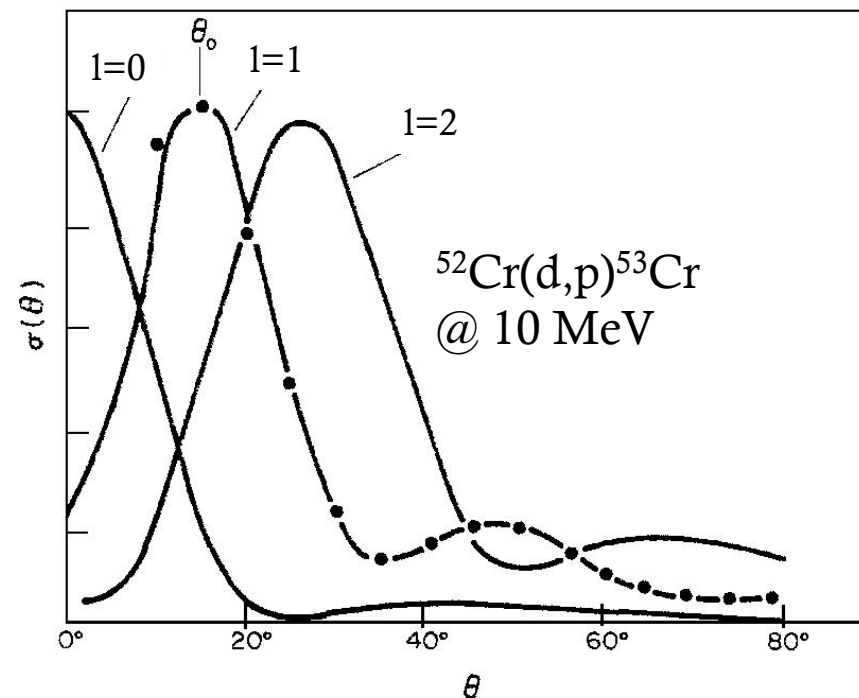
COMMENT OBTIENT-ON DES INFORMATIONS SUR LE NOYAU?

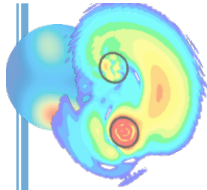
► Mesure des **distributions angulaires**

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

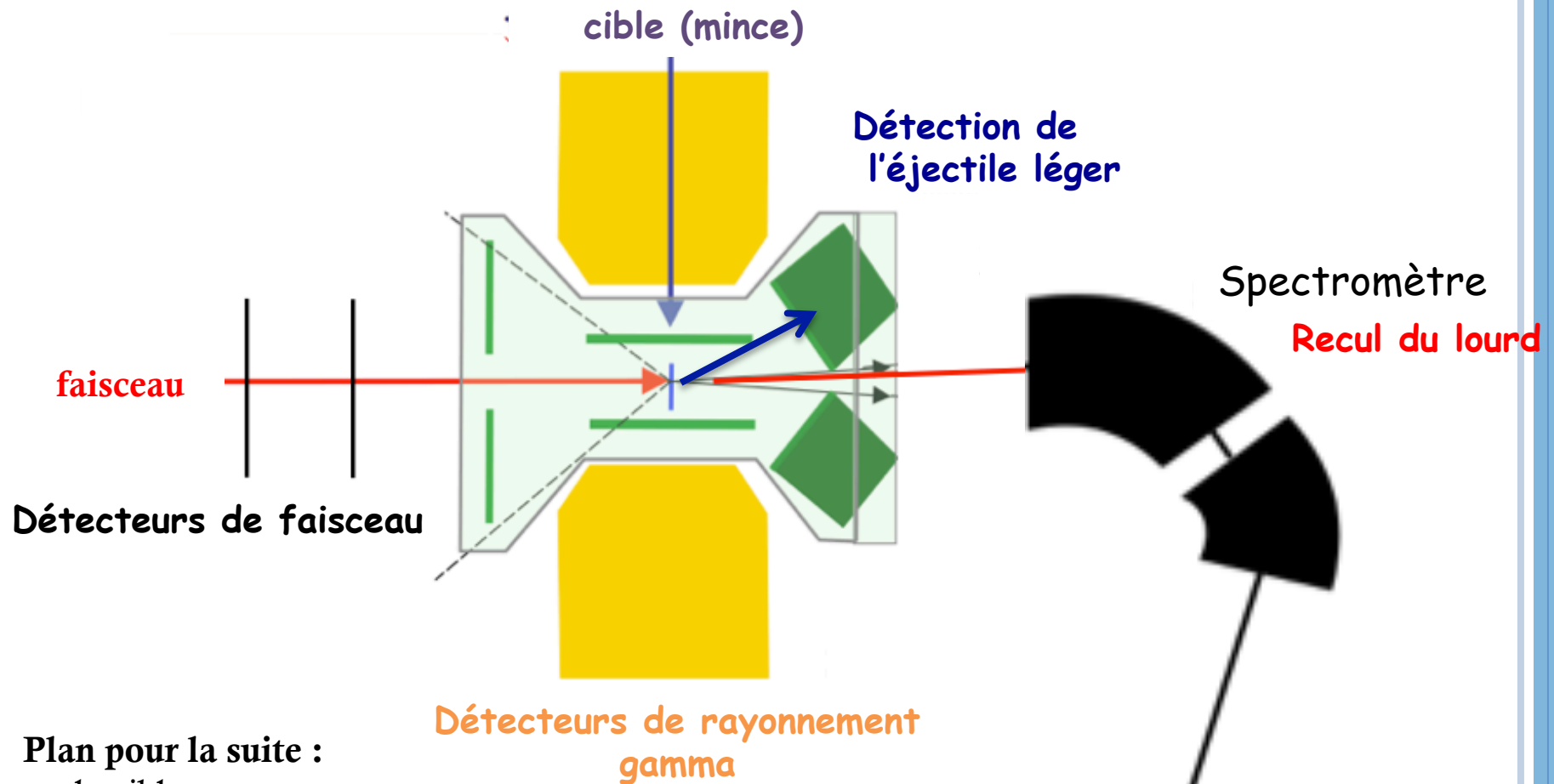
- la comparaison entre la **section efficace mesurée** et celle **prédite théoriquement**

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



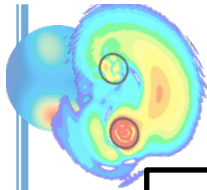


DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL « IDÉAL » (COMPLET)



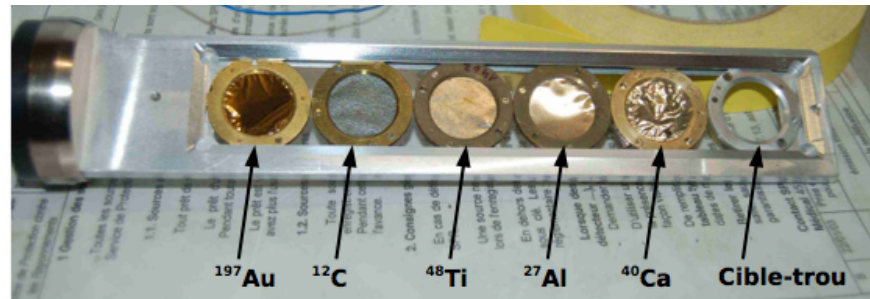
Plan pour la suite :

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

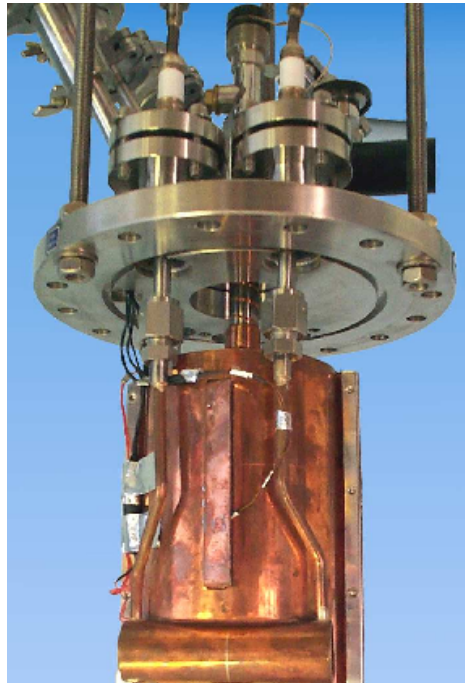


PLUSIEURS TYPES DE CIBLE

► Les cibles « classiques »



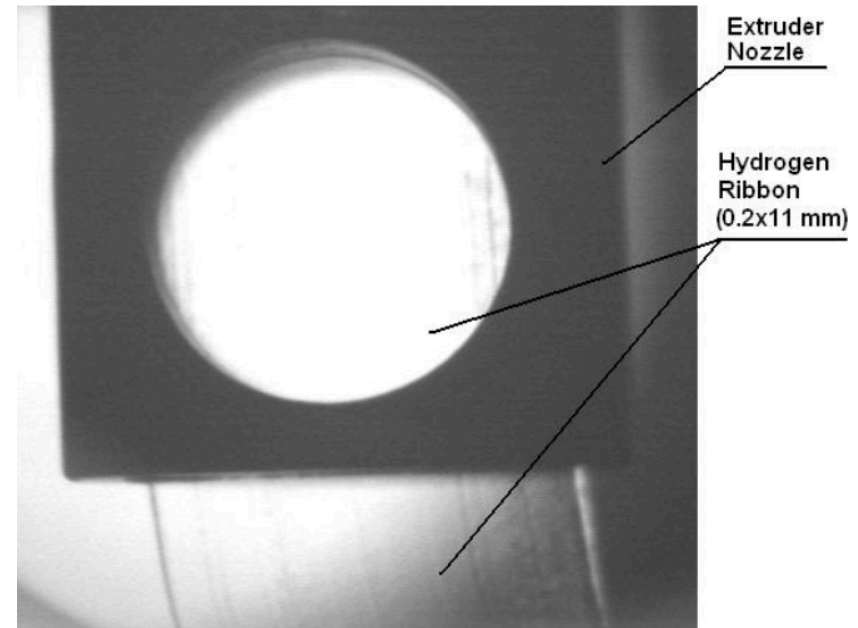
► Les cibles cryogéniques

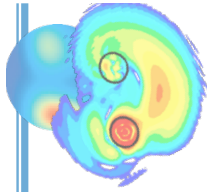


3 phases de l'H pendant la descente en froid

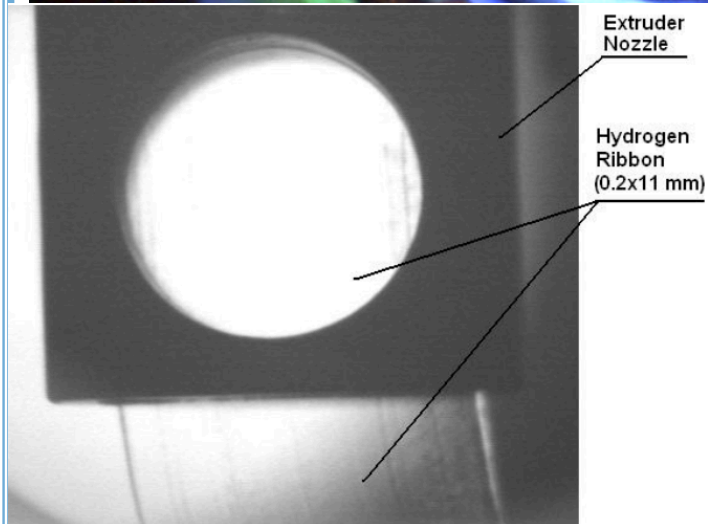
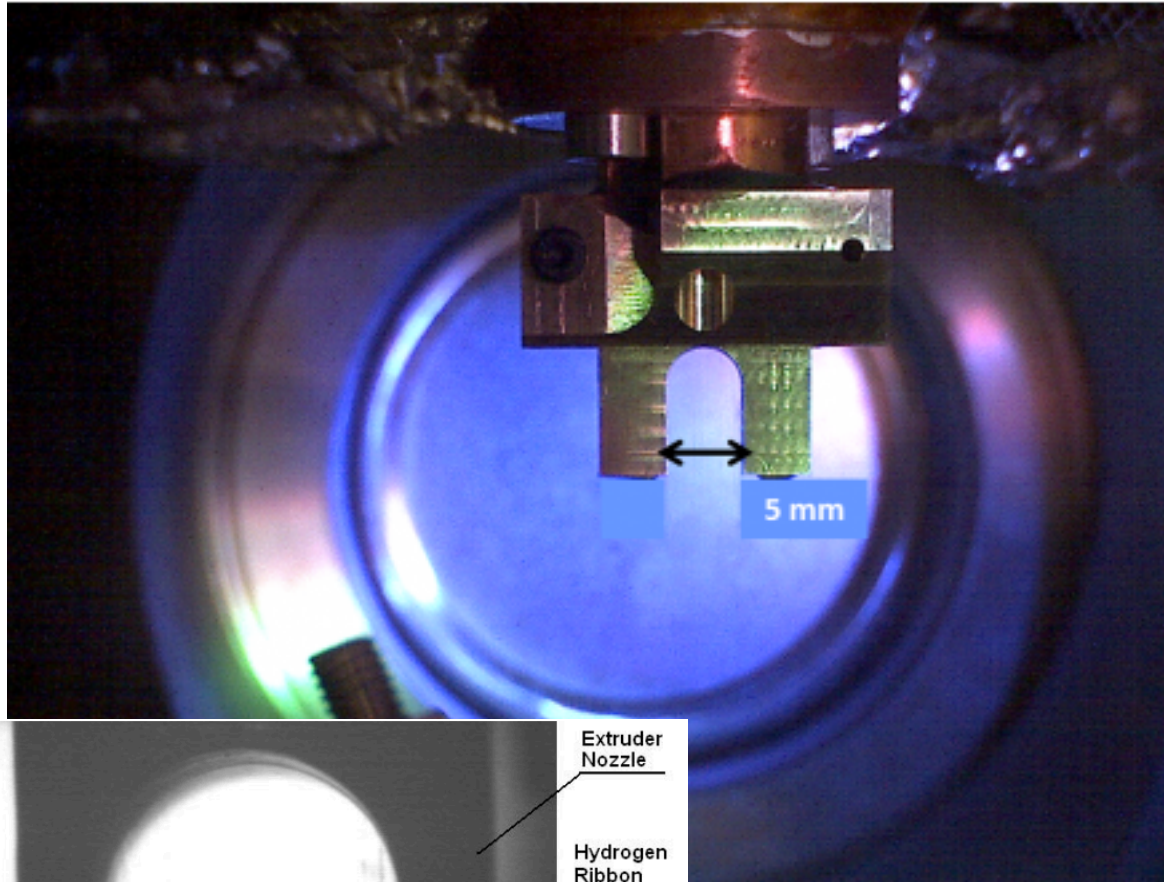
Cible cryogénique H₂/D₂

► Les cibles « sans fenêtre », CHymene

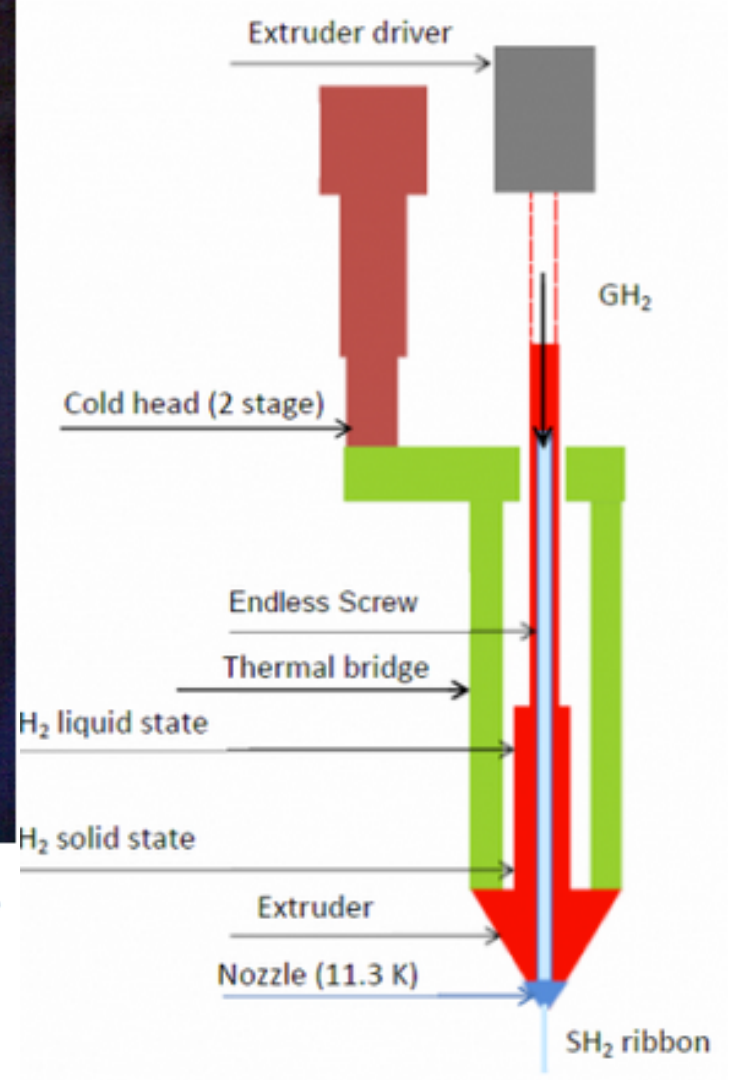


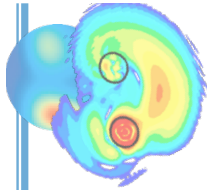


FOCUS SUR LA CIBLE CHYMENE



eur 20 μm et de largeur 5 mm.





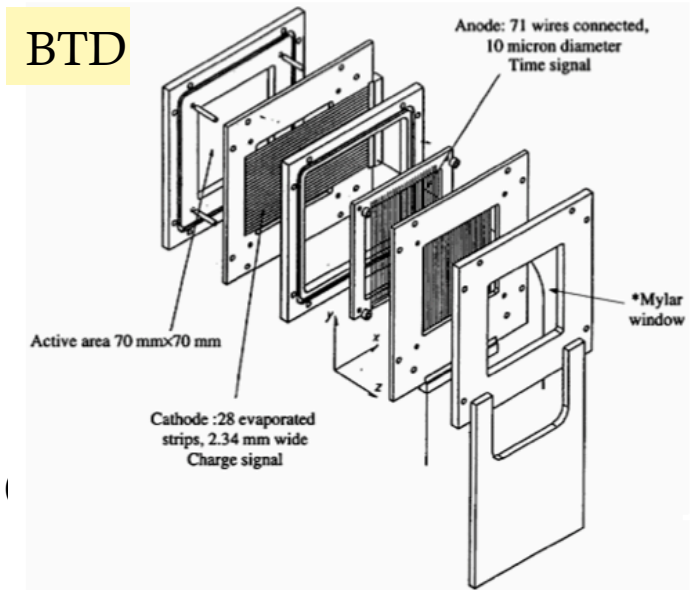
DÉTECTEURS DE FAISCEAU

○ Besoins :

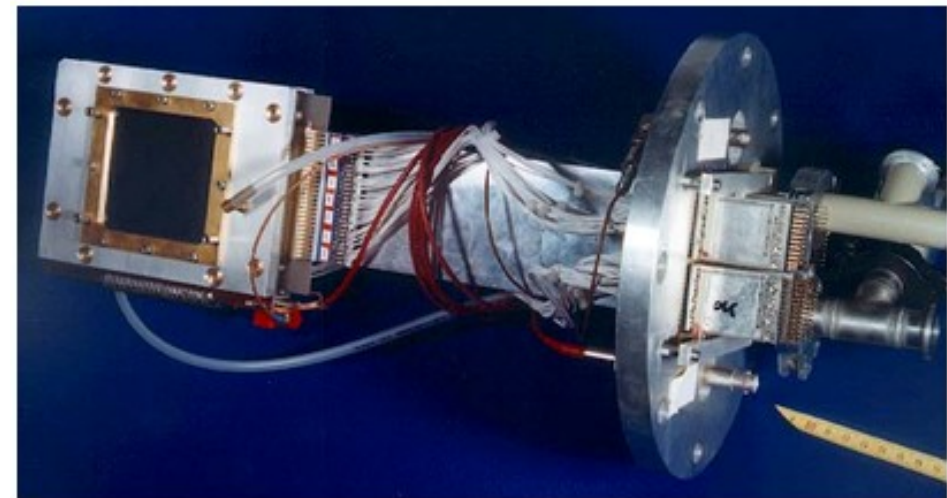
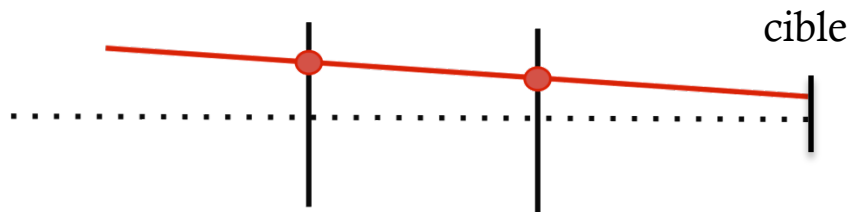
- tenir l'intensité faisceau (10^5 pps) **on aimerait plus !!**
- identifier les noyaux du faisceau (temps de vol)
excellente résolution ~ 100 ps
- reconstruire la trajectoire du faisceau
resolution ~ 0.1 mm
- Efficacité $\sim 100\%$
- un temps mort électronique réduit, inférieur à 50ms
- une résolution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

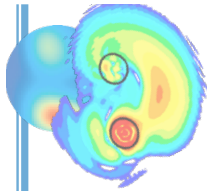
Vue éclatée

BTD



On en utilise (presque) toujours 2 !



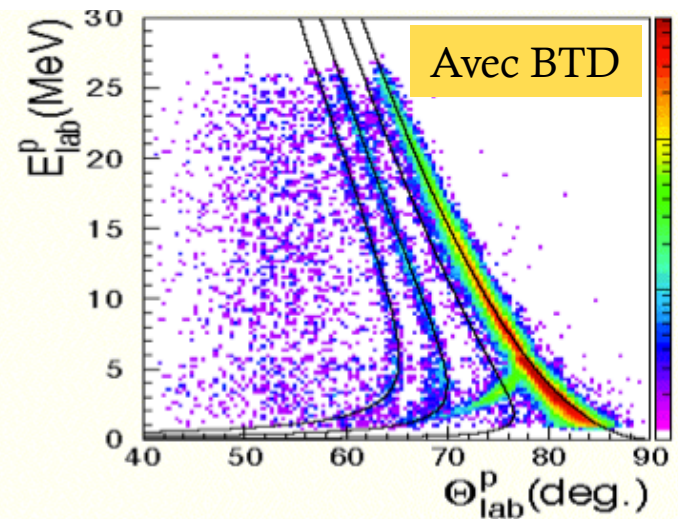
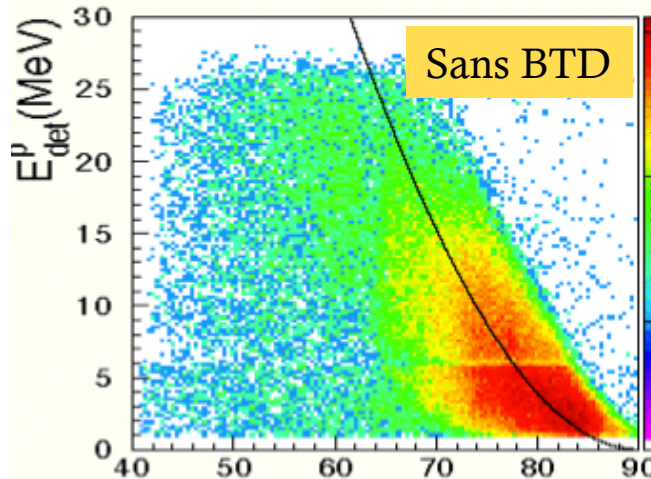
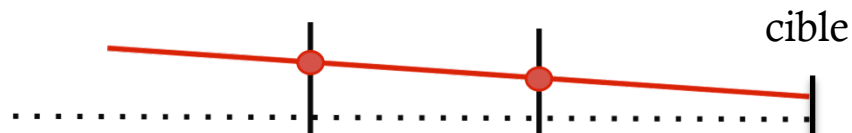
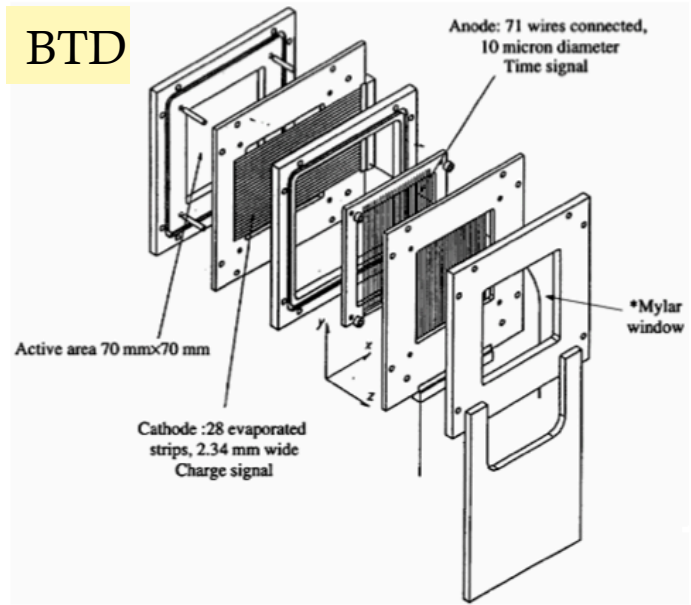


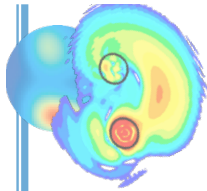
DÉTECTEURS DE FAISCEAU

○ 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



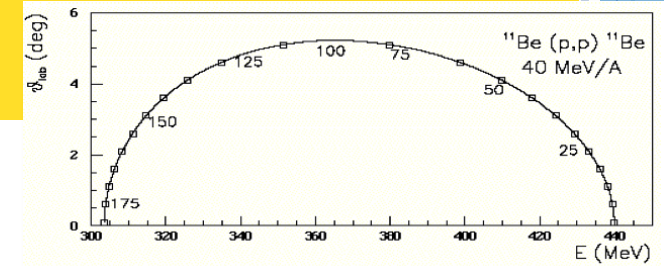


NOYAU LOURD DE REcul : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

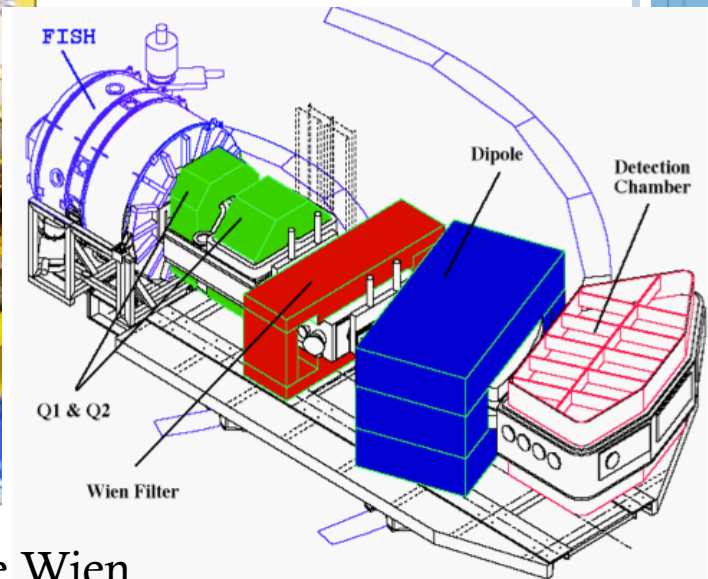
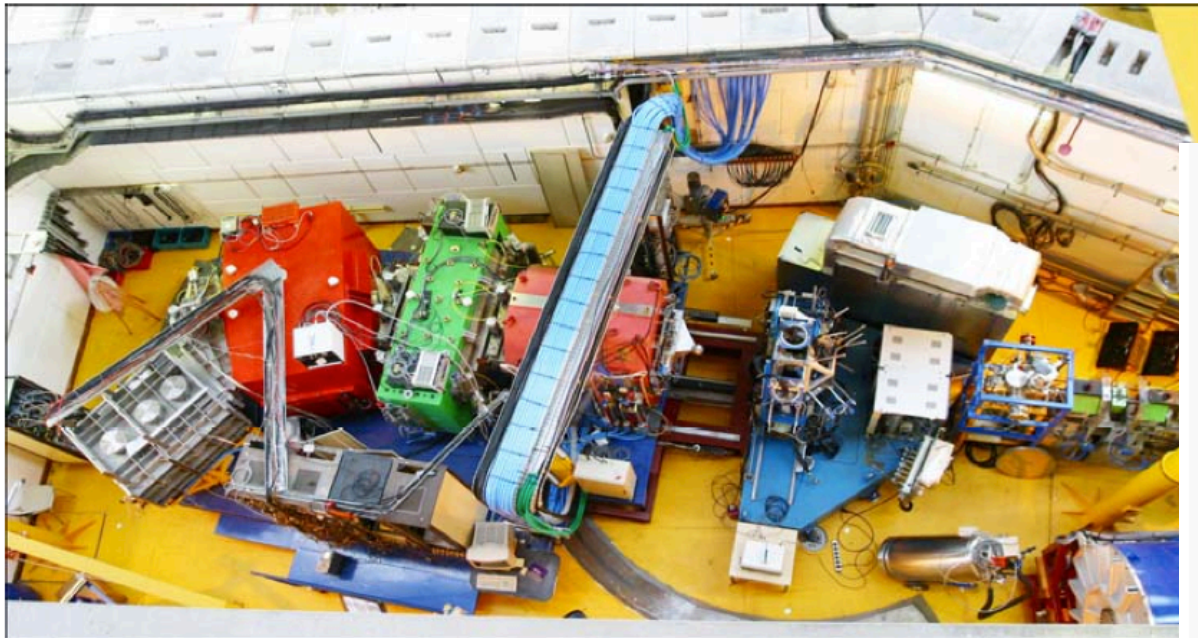
- Le résidu lourd recul :

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

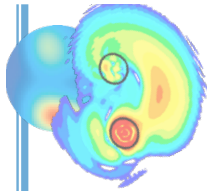
→ besoin d'un **spectromètre magnétique** de grande précision $B\rho = \frac{p}{Q}$



21/12/17

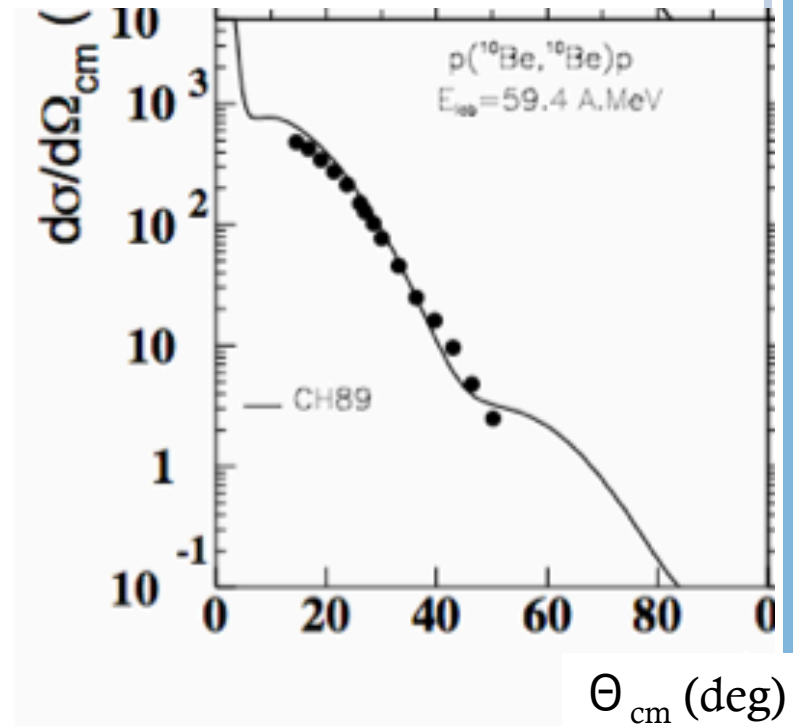
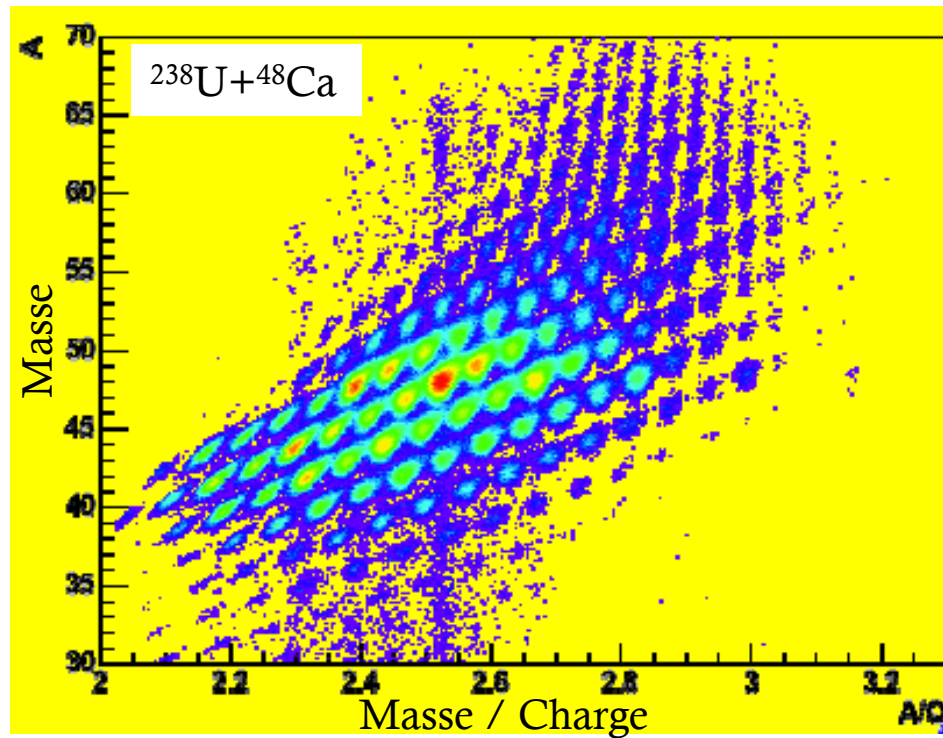


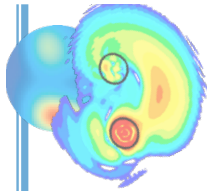
2 quadrupoles de grande acceptance + dipole + Filtre de Wien
Acceptance +/- 6%



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 $B\rho = \frac{p}{Q}$





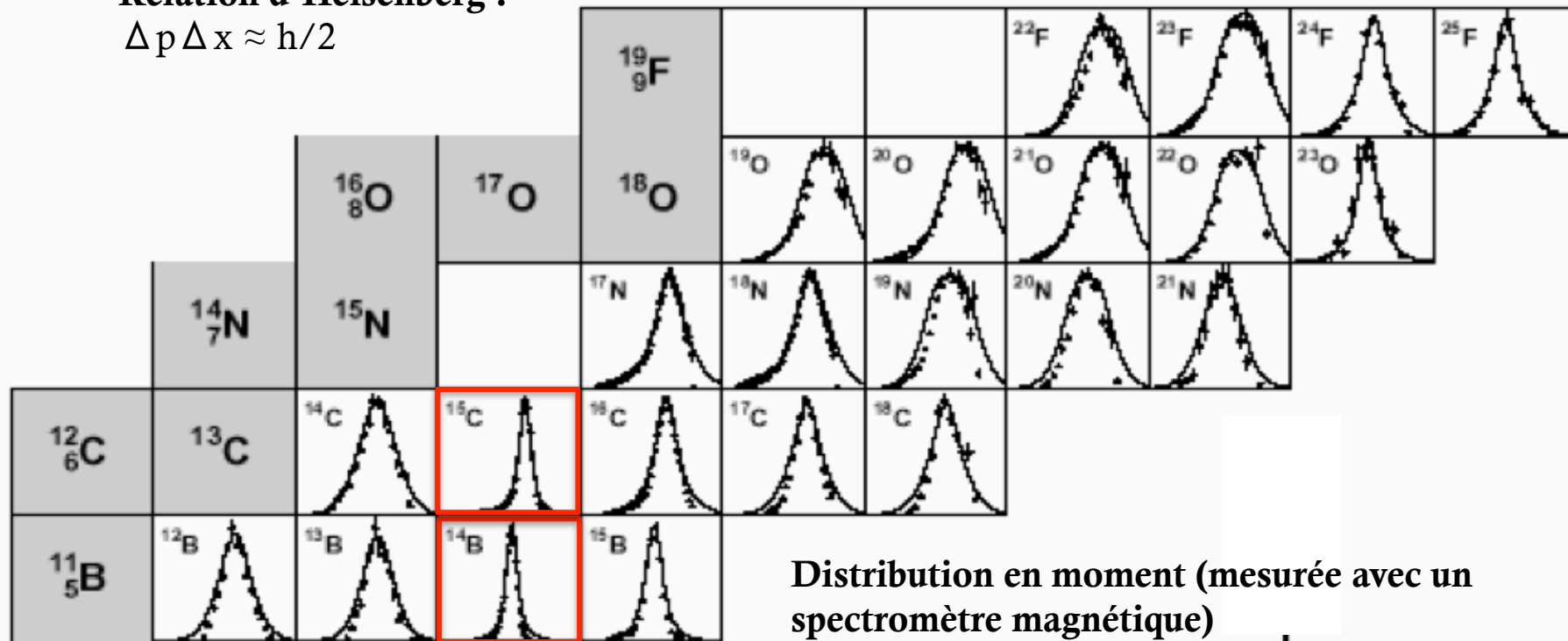
NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

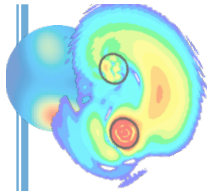
- Le résidu lourd recul :
 - proche de 0 degré (à l'avant)
 - il est proche du faisceau (résidu du faisceau-

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

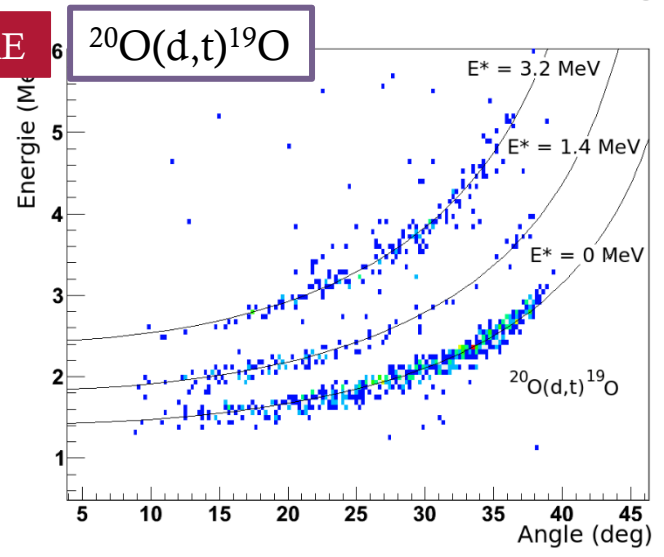
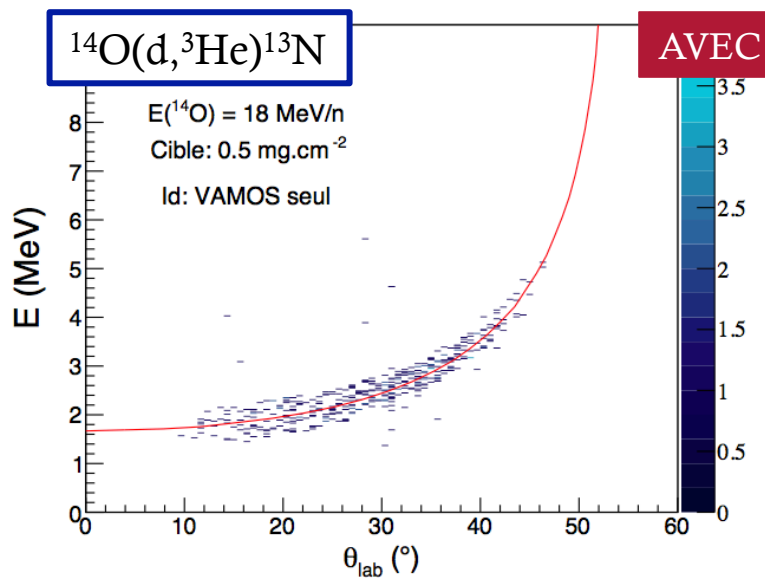
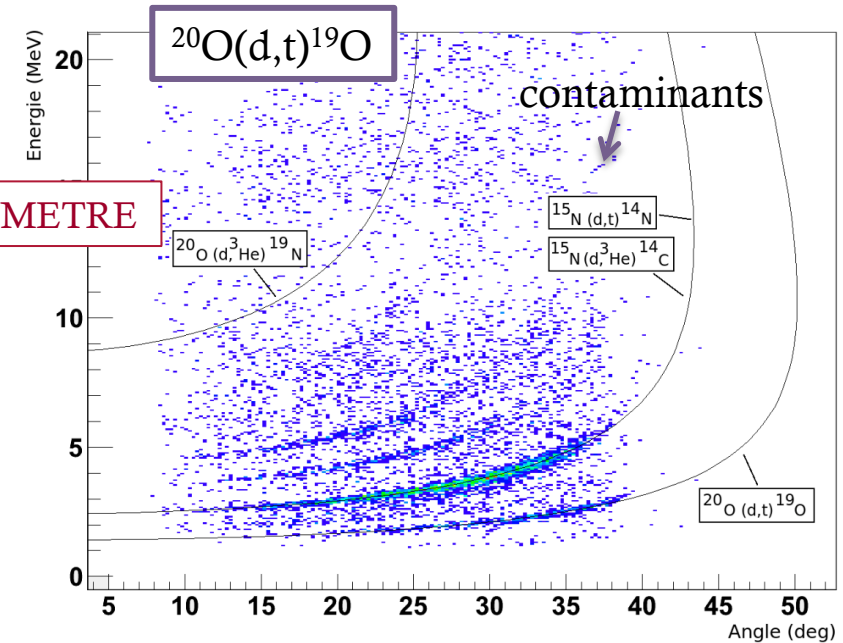
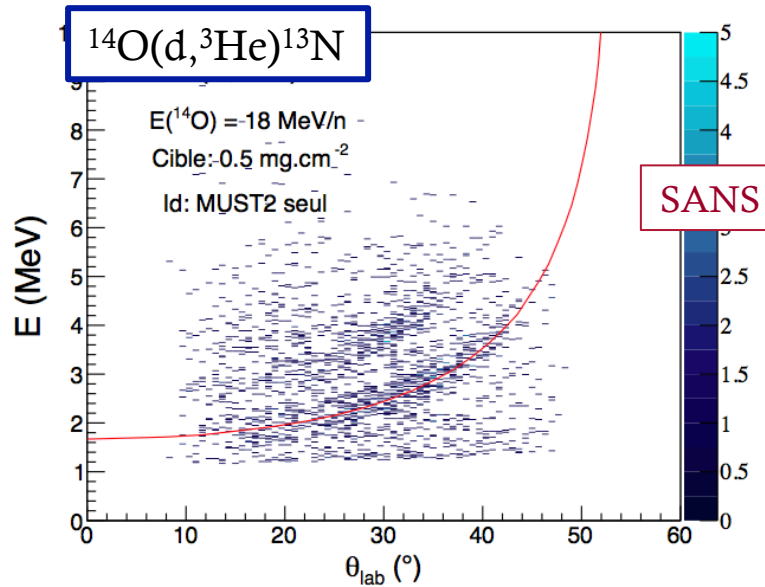
Relation d'Heisenberg :

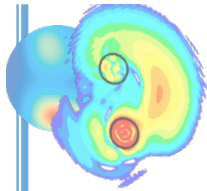
$$\Delta p \Delta x \approx h/2$$





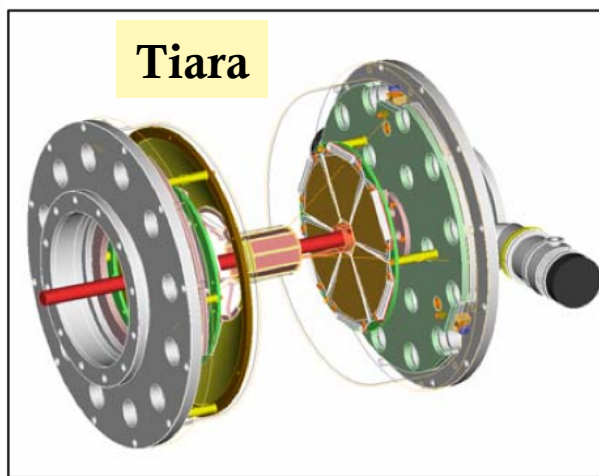
EXEMPLE D'UNE RÉACTION DE TRANSFERT AVEC ET SANS SPECTROMÈTRE



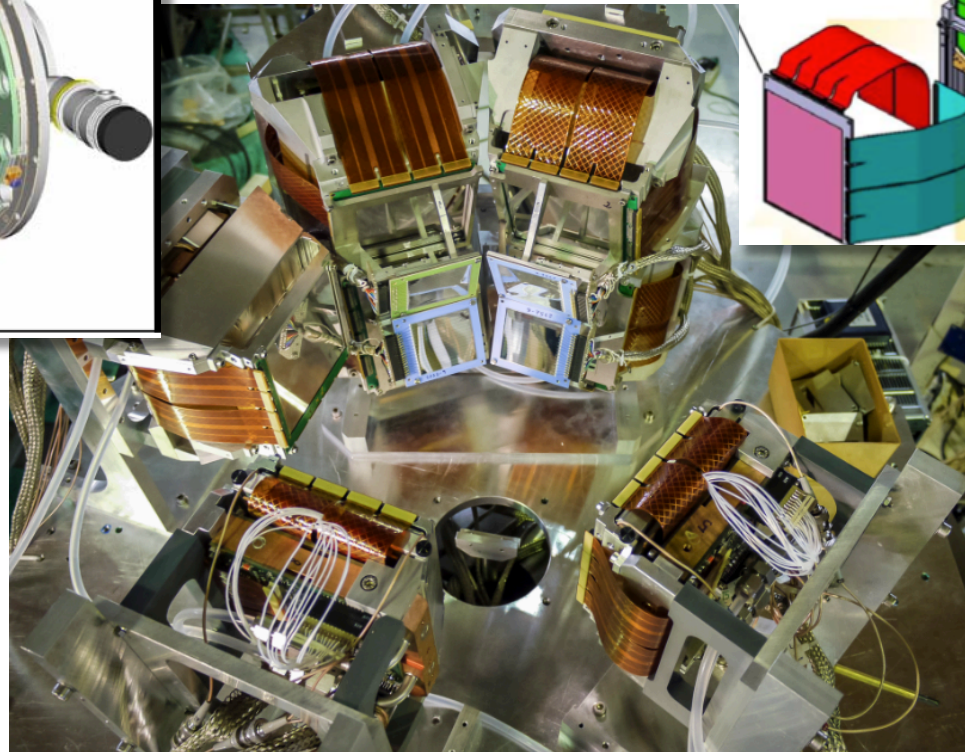
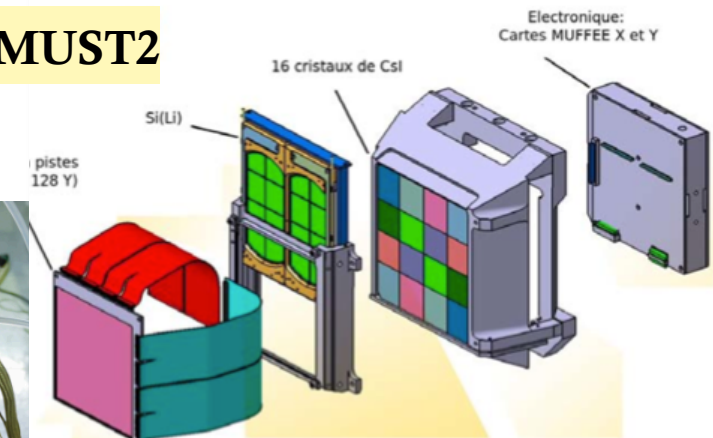


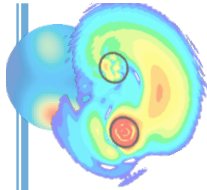
DÉTECTION DE LA PARTICULE LÉGÈRE

- ▶ En fonction des lignes de cinématique : à l'avant (p,d), à l'arrière (d,p) ou 90° emission (elastic)
- ▶ Granularité ($10 \times 10 \text{ cm}^2$, 128 pistes de chaque côté), couverture angulaire
- ▶ Efficacité $\sim 100\%$, seuil en énergie 100 keV
- ▶ Résolution $\sim 50 \text{ keV}$ (Si), $\sim 150 \text{ keV}$ (CsI)
- ▶ Résolution sur l'énergie finale $\sim 500 \text{ keV}$ (effets de cible)



MUST2

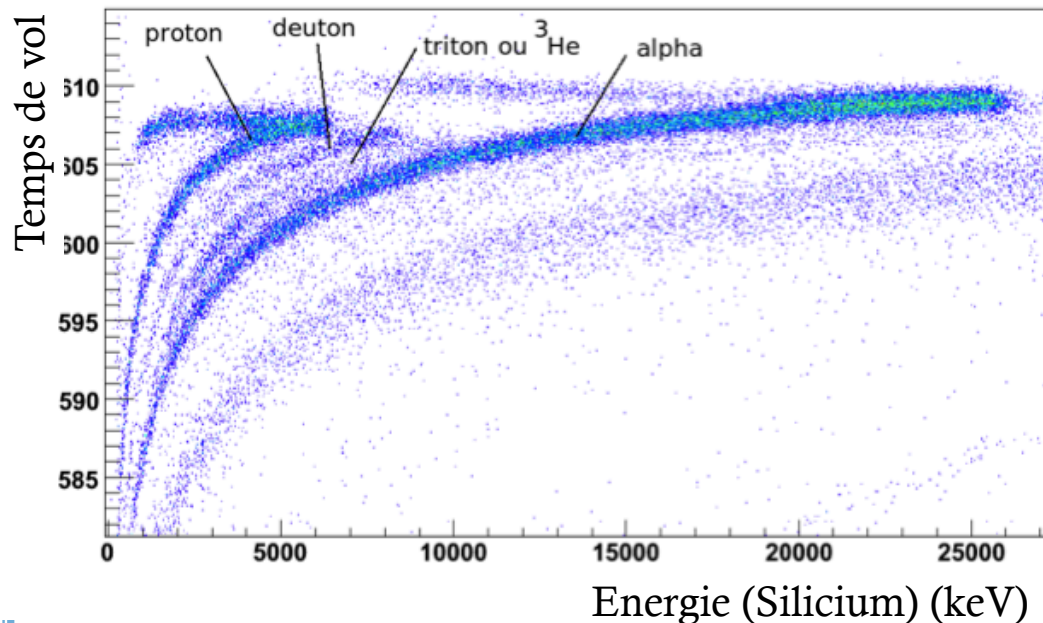




DÉTECTION DE LA PARTICULE LÉGÈRE

- ▶ En fonction des lignes de cinématique : à l'avant (p,d), à l'arrière (d,p) ou 90° emission (elastic)
- ▶ Grande granularité (10x10 cm², 128 pistes de chaque côté)
- ▶ Grande couverture angulaire & modularité
- ▶ Efficacité ~100%, seuil en énergie 100 keV

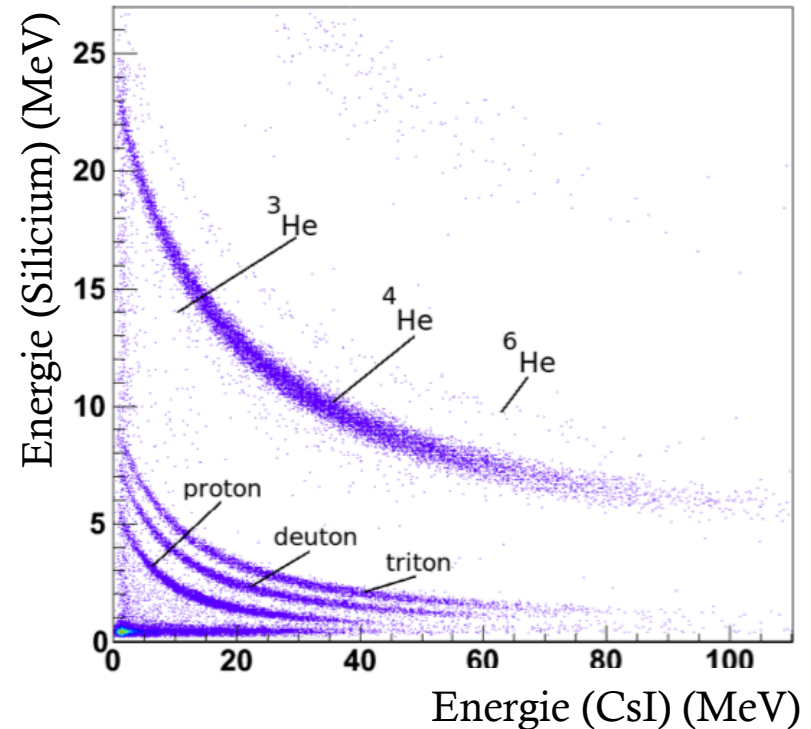
Particules de « basse énergie » (p<5 MeV)



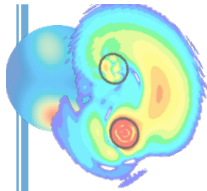
Identification pour les noyaux qui s'arrêtent dans le 1^{er} étage

!!! Il faut un détecteur pour donner le START

Particules de plus haute énergie (p>5 MeV)

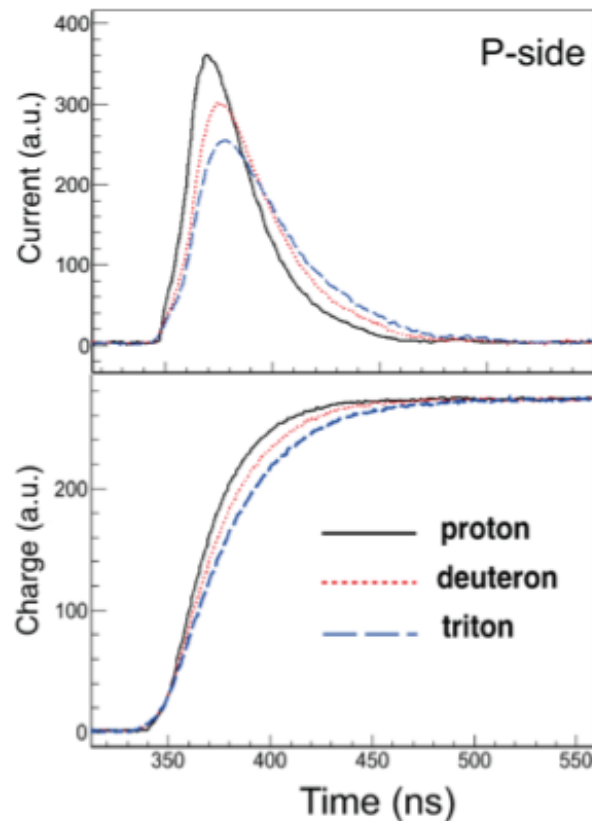
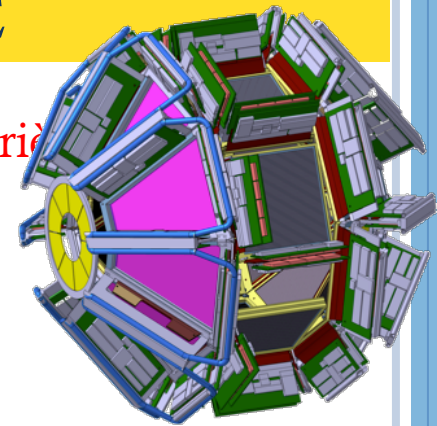


Identification pour les noyaux qui traversent le 1^{er} étage

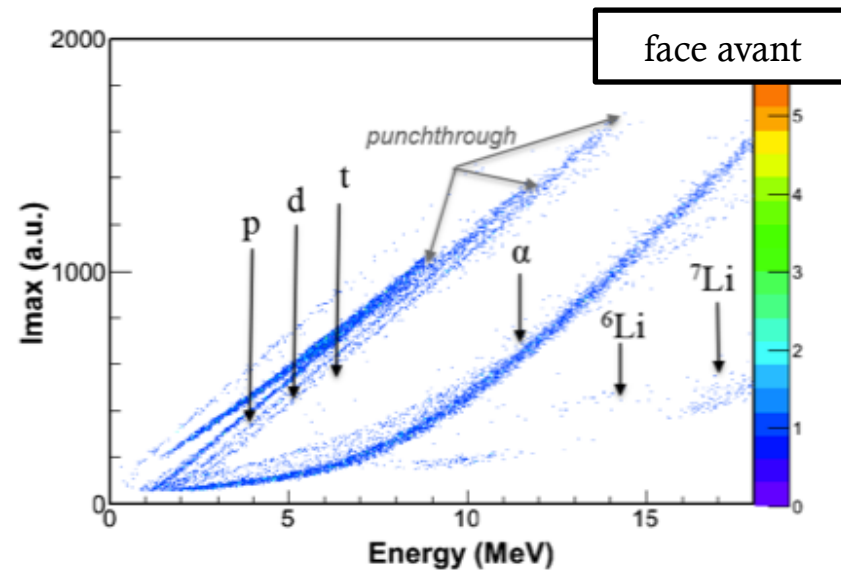


DÉTECTION DE LA PARTICULE LÉGÈRE

- ▶ En fonction des lignes de cinématique : à l'avant (p,d), à l'arrière (90° 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

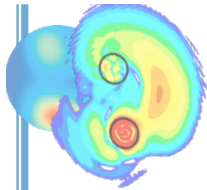


Nouvelle technique : analyse de la forme des signaux



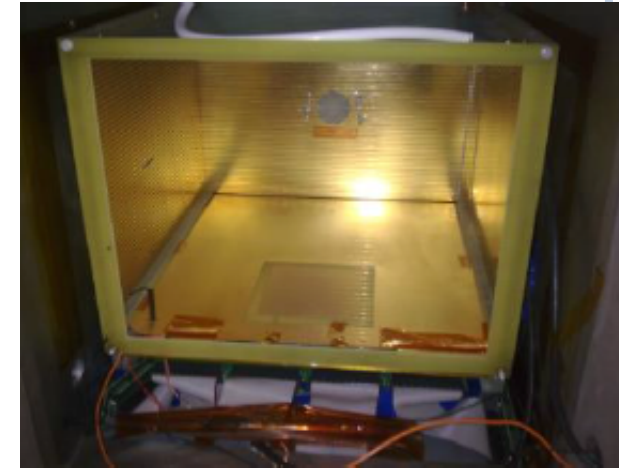
On utilise l'amplitude du signal de courant !

Méthode utilisée pour le projet **GRIT**

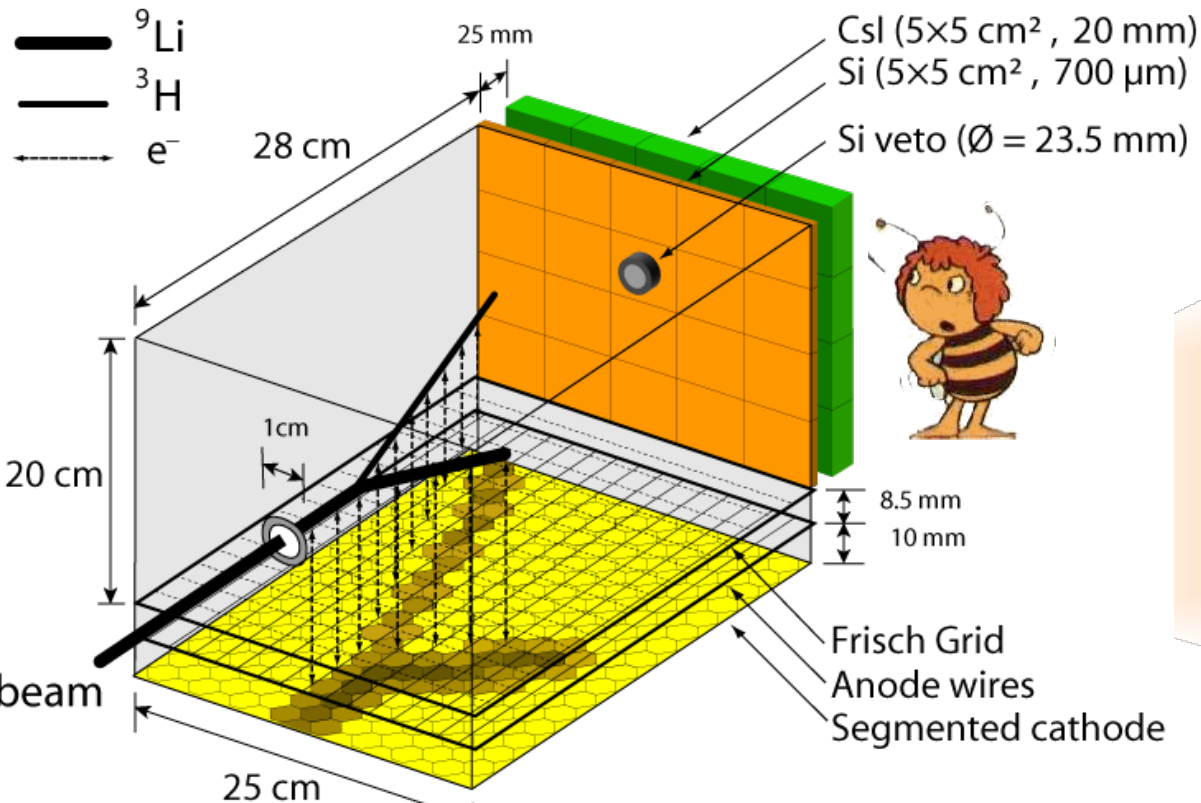


AUTRE MÉTHODE : LES CIBLES ACTIVES

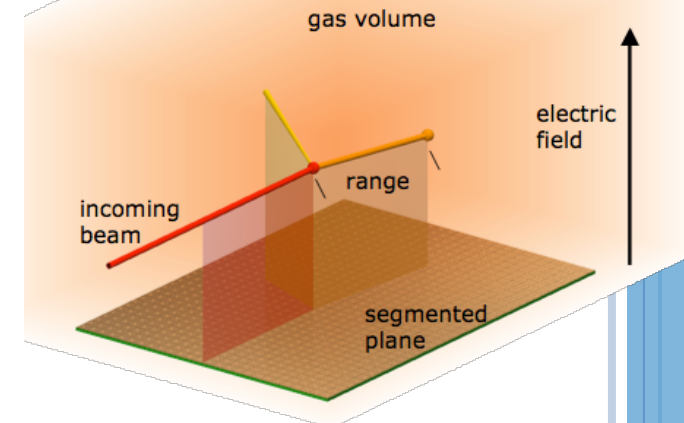
- ▶ Problème des pertes d'énergie dans la cible résolu
- ▶ Seuil très bas (la particule n'a pas besoin de sortir de la cible)
- ▶ Efficacité ~ 90% (sauf partie proche du faisceau)
- ▶ Toutes les cibles ne sont pas possibles (gaz)

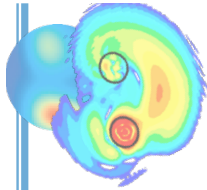


MAYA



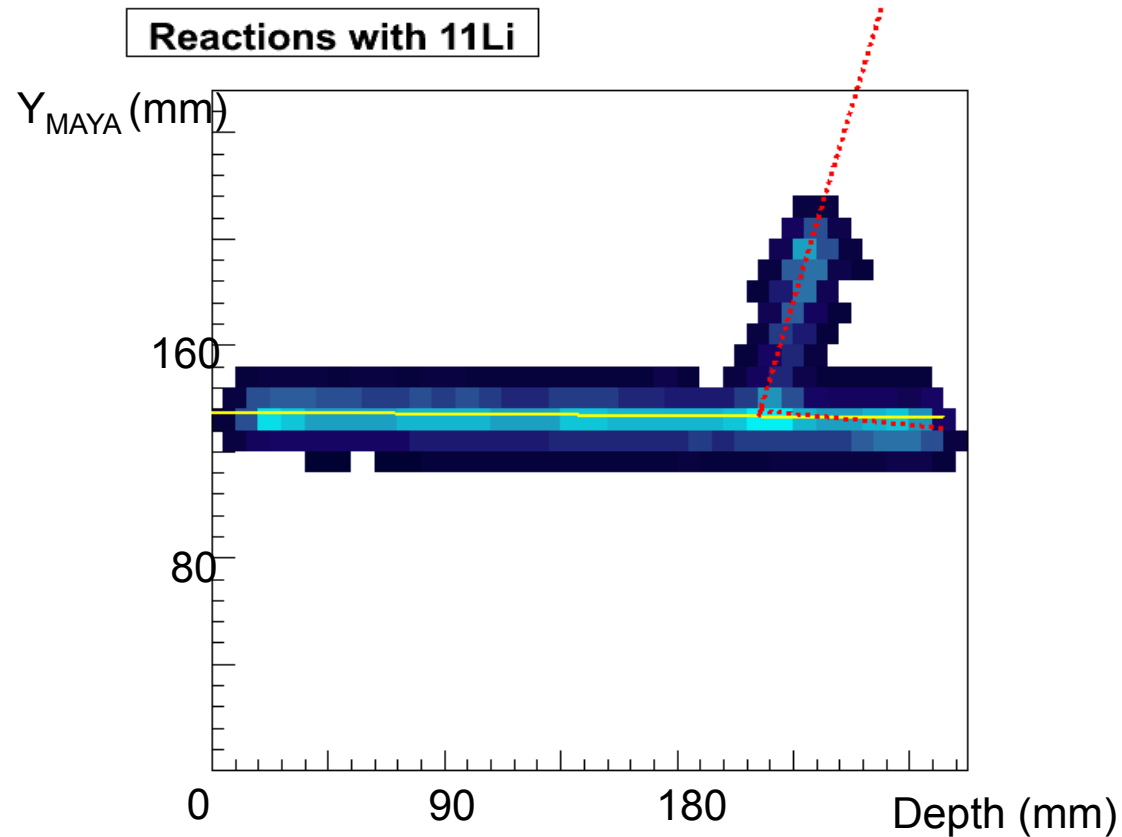
ACTAR : le successeur !

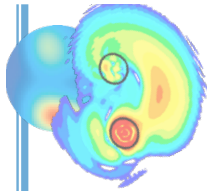




AUTRE MÉTHODE : LES CIBLES ACTIVES

- ▶ 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)

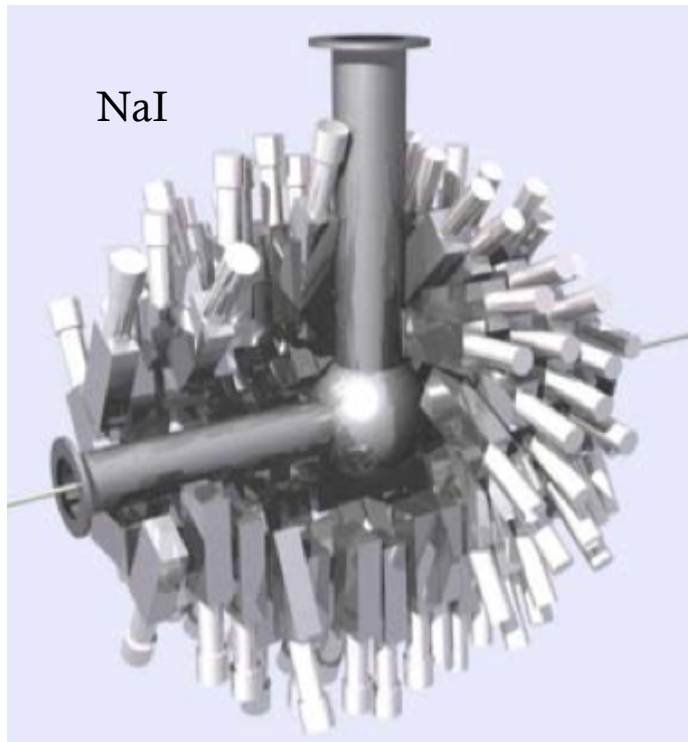




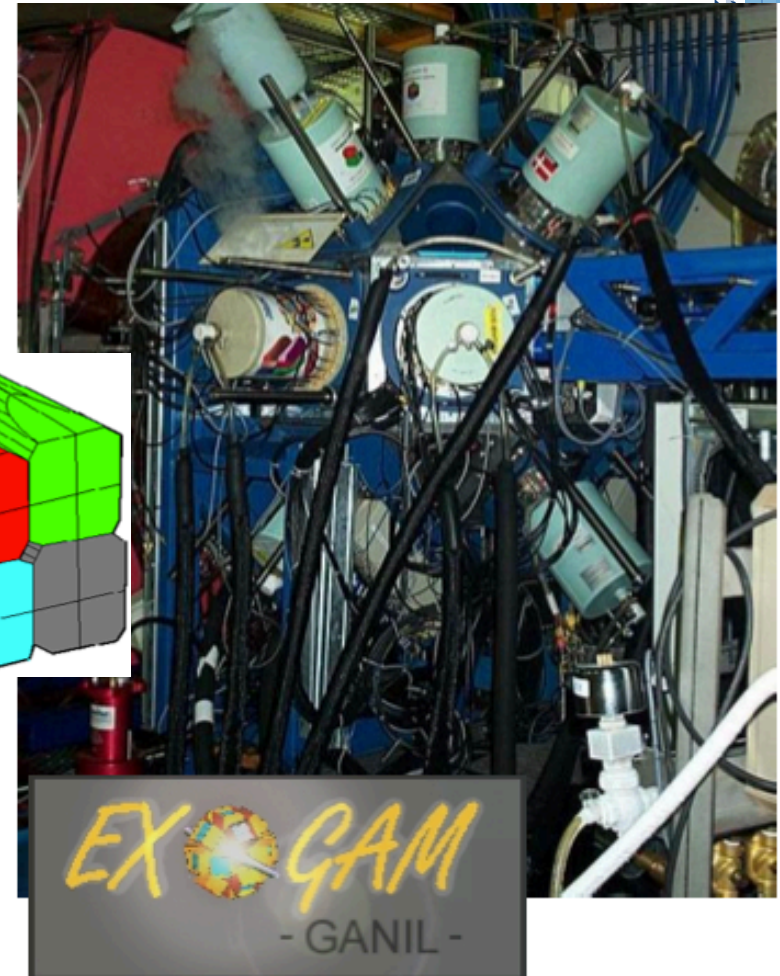
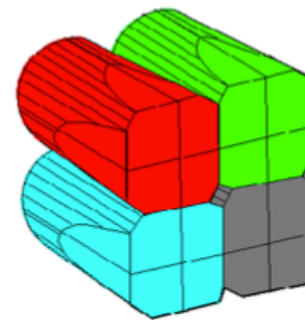
DÉTECTION DES RAYONNEMENTS GAMMA

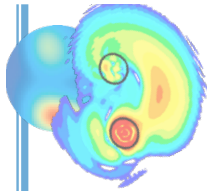
- ▶ Autour de la cible, le plus proche possible
- ▶ Efficacité = efficacité intrinsèque x efficacité géométrique $\sim 10\%$ à 1MeV pour EXOGAM
- ▶ Résolution en énergie intrinsèque: qq keV

21/11



Dali 2 RIKEN



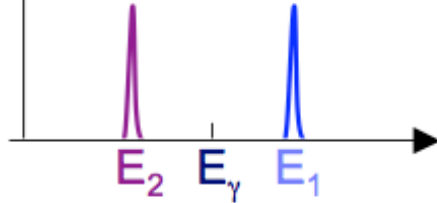


EFFET DOPPLER

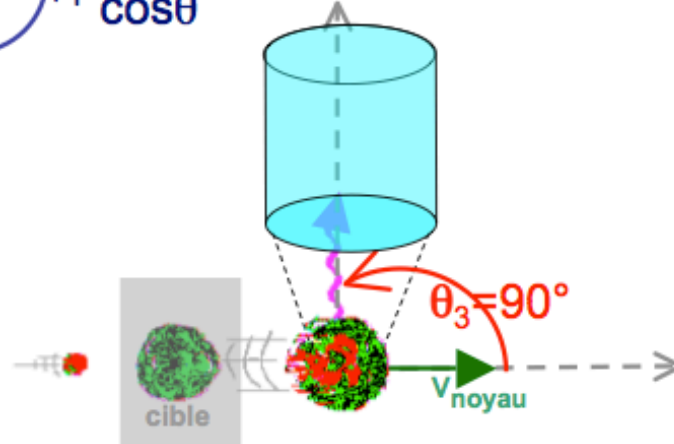
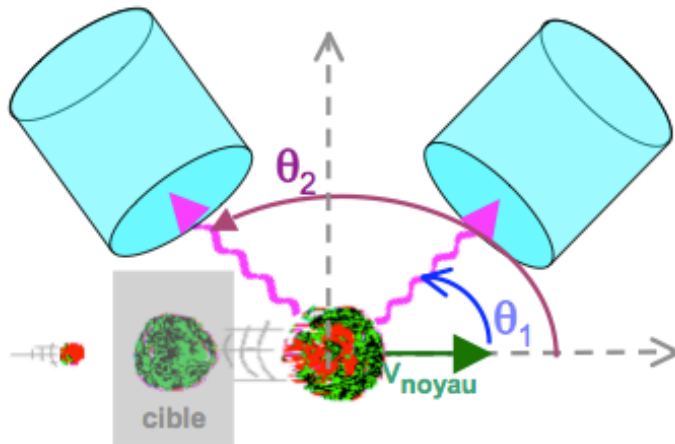
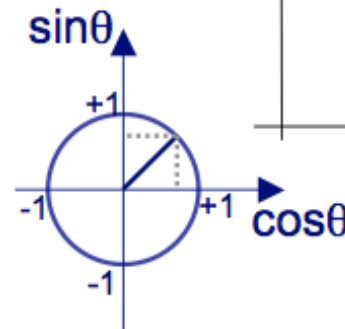
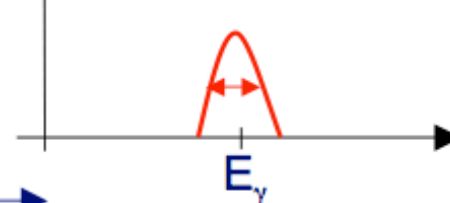
Observateur : Fréquence onde change avec vitesse (valeur, direction) émetteur
 γ : fréquence \leftrightarrow énergie ($E = h\nu$, ν fréquence) $\gamma \Rightarrow$ énergie détectée pas bonne !
 θ : angle entre direction \vec{v} et direction observateur/détecteur

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

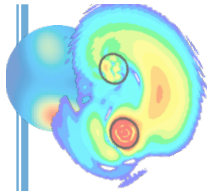
décalage doppler: $\theta \neq 90^\circ$



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



\Rightarrow réduire la taille des détecteurs ou des segments

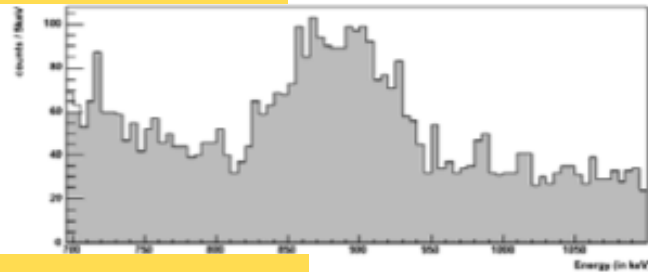


DÉTECTION DES GAMMAS : EFFET DOPPLER

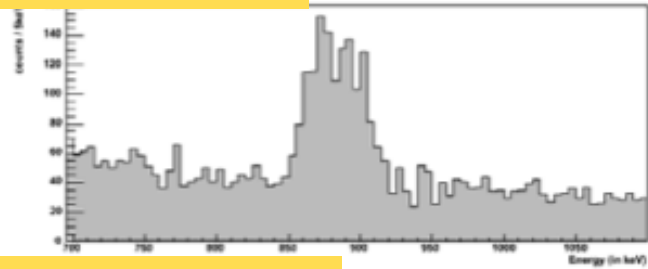
$$E_{\gamma} = \gamma E_{\text{det}} (1 - \beta \cos \theta)$$

► Utilisation de la segmentation

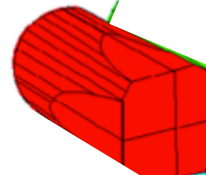
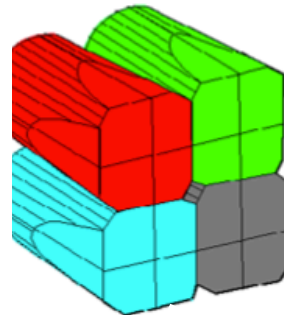
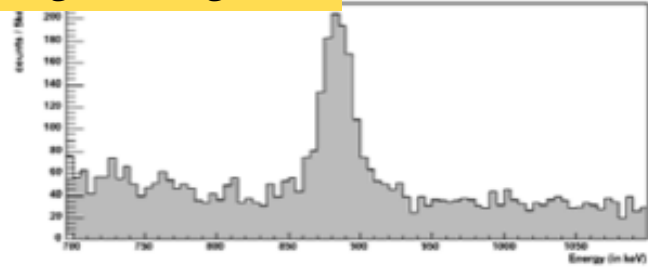
Angle du trèfle



Angle du cristal

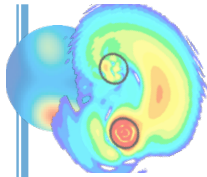


Angle du segment

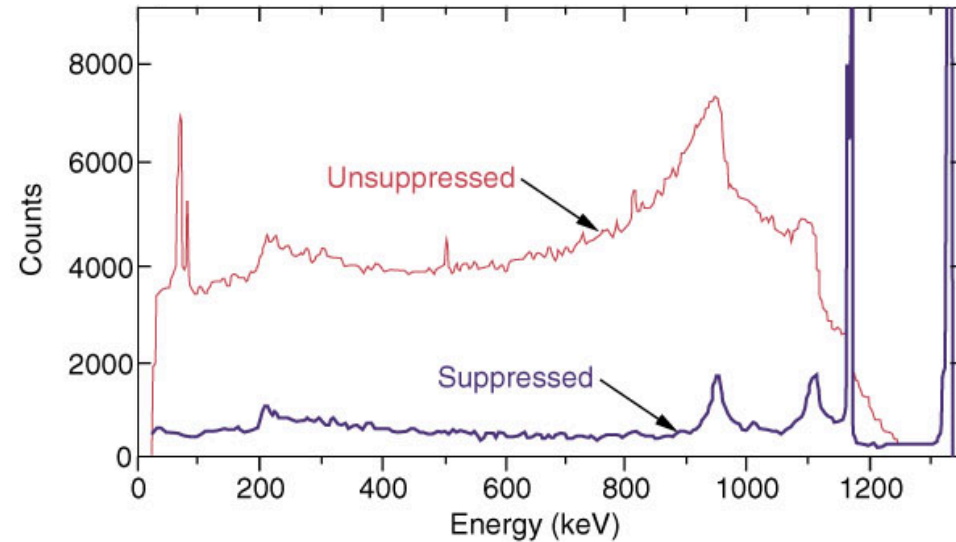
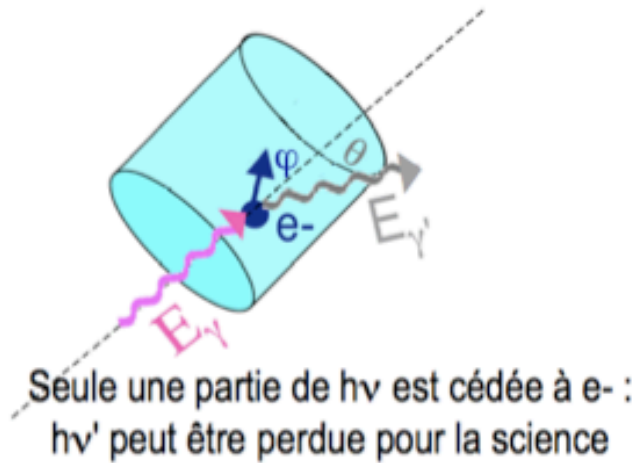


1 segment



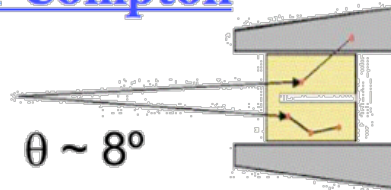


LA LUTTE CONTRE LA DIFFUSION COMPTON



Ge avec bouclier anti-Compton

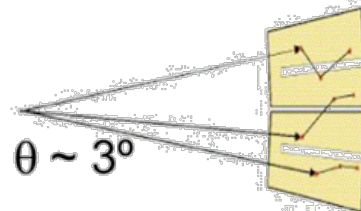
$\epsilon_{ph} \sim 10\%$
 $N_{det} \sim 100$
 $\Omega \sim 40\%$



Grand ouverture angulaire -> mauvaise résolution en énergie à grande vitesse

Sphère de Ge

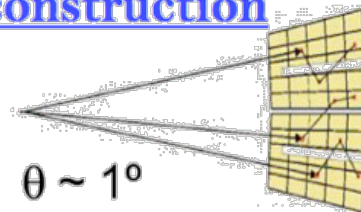
$\epsilon_{ph} \sim 50\%$
 $N_{det} \sim 1000$



Trop de détecteurs sont nécessaires pour éviter les effets de sommation

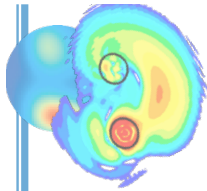
Groupe de Ge avec reconstruction

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

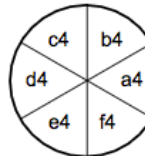
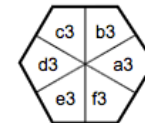
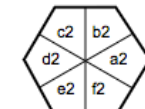
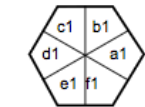
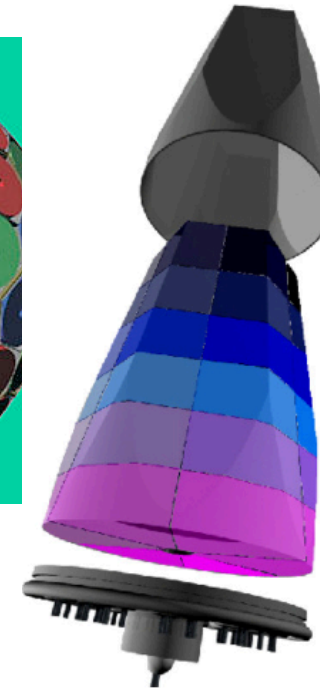
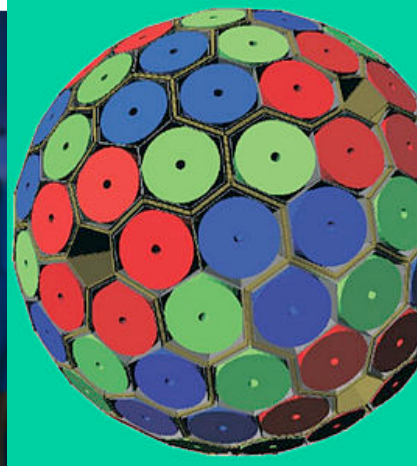
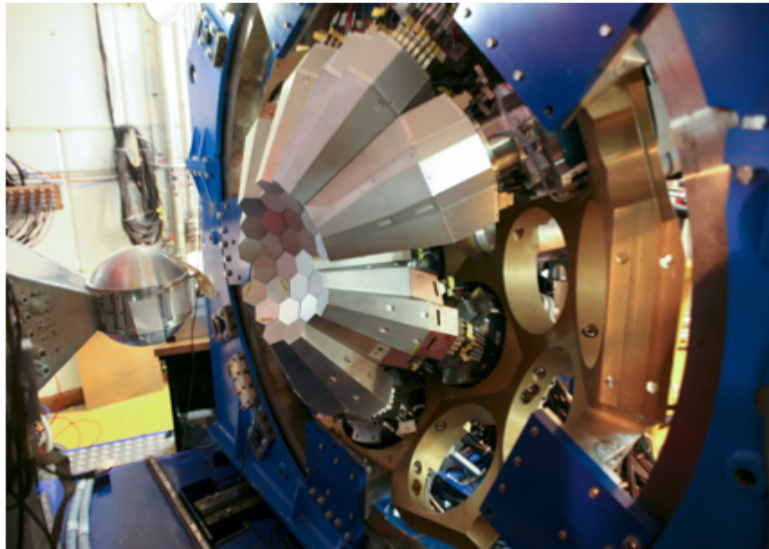


Combinaison de :

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



AGATA : LA NOUVELLE GÉNÉRATION

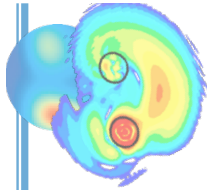


1
2
3
4
5
6

36 segments

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





AGATA : LA NOUVELLE GÉNÉRATION

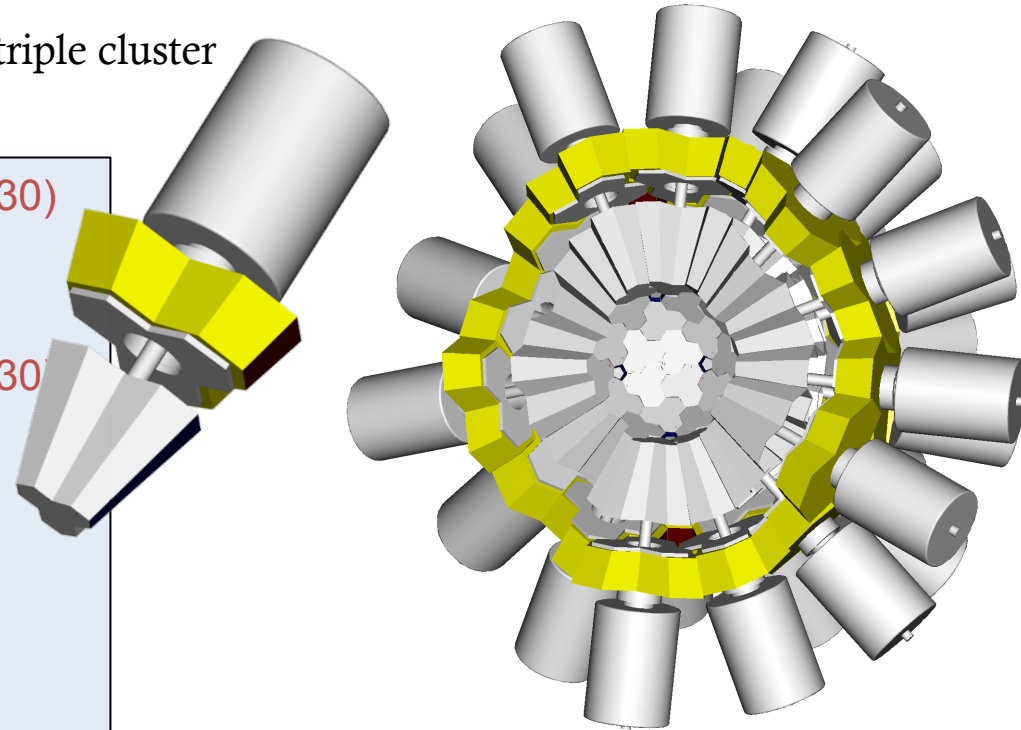
Un triple cluster

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

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

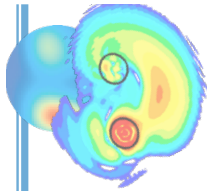
Angular Resolution: $\sim 1^\circ \rightarrow$
FWHM (1 MeV, $v/c=50\%$) ~ 6 keV !!!
today ~ 40 keV

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



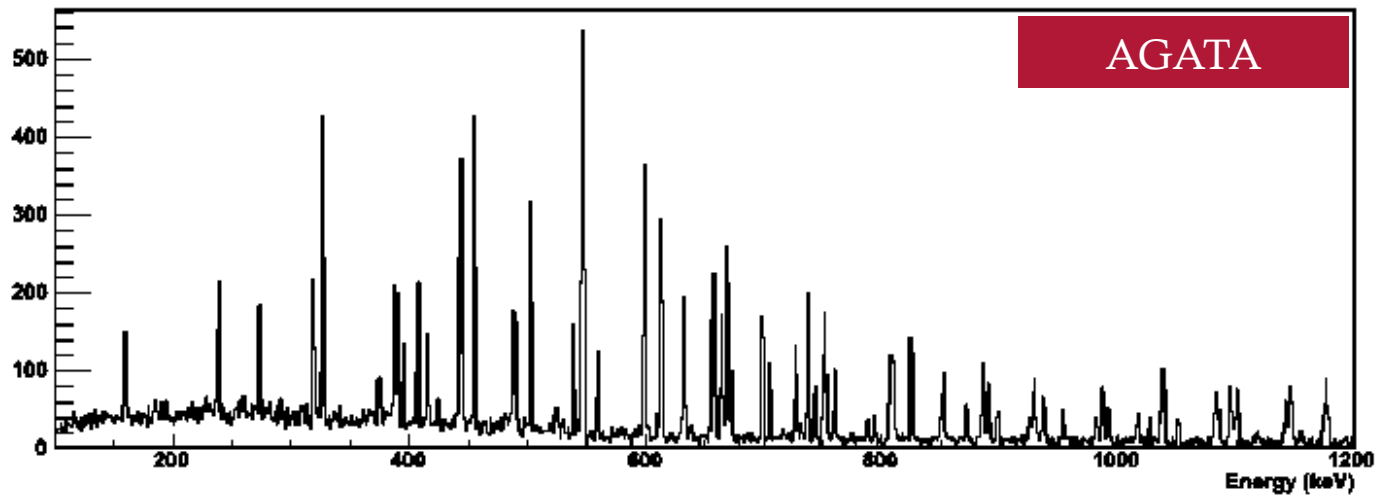
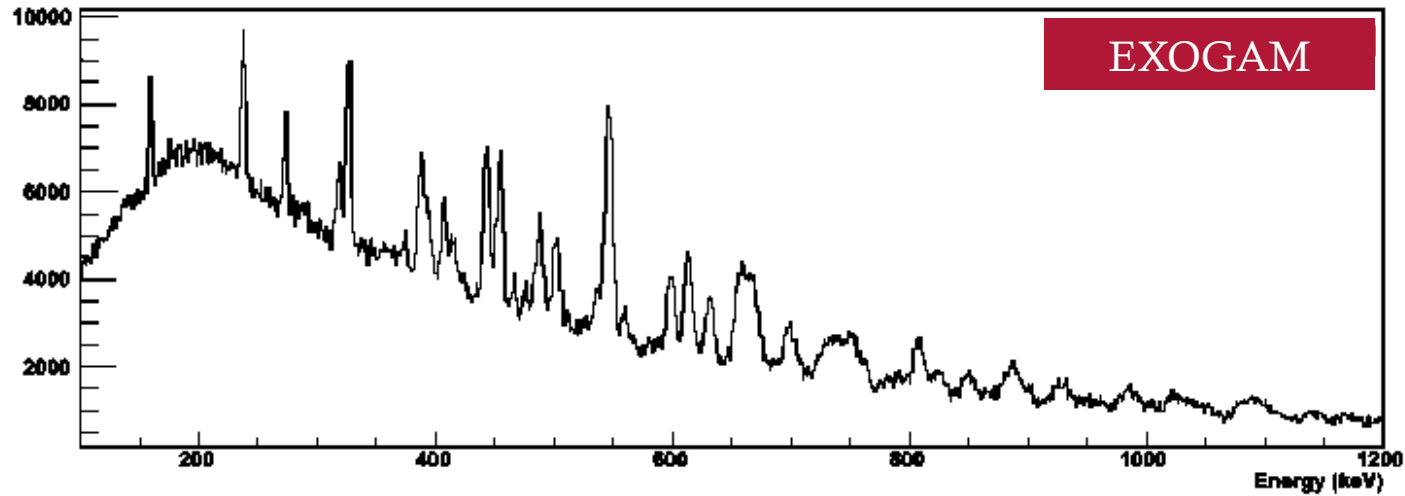
Distance entre les faces avant des cristaux:
même cluster ~ 2.6 mm
clusters adjacent ~ 9.0 mm

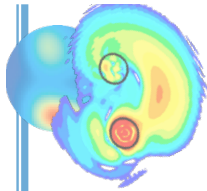
Poids des 60 clusters d'AGATA ~ 2.5 t
Mécanique auto-portante



COMPARAISON AGATA-EXOGRAM

Réaction de fusion évaporation

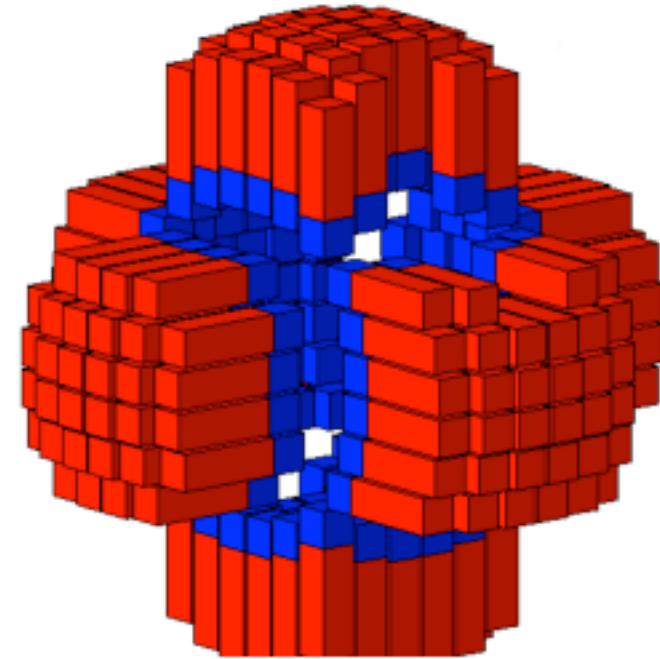
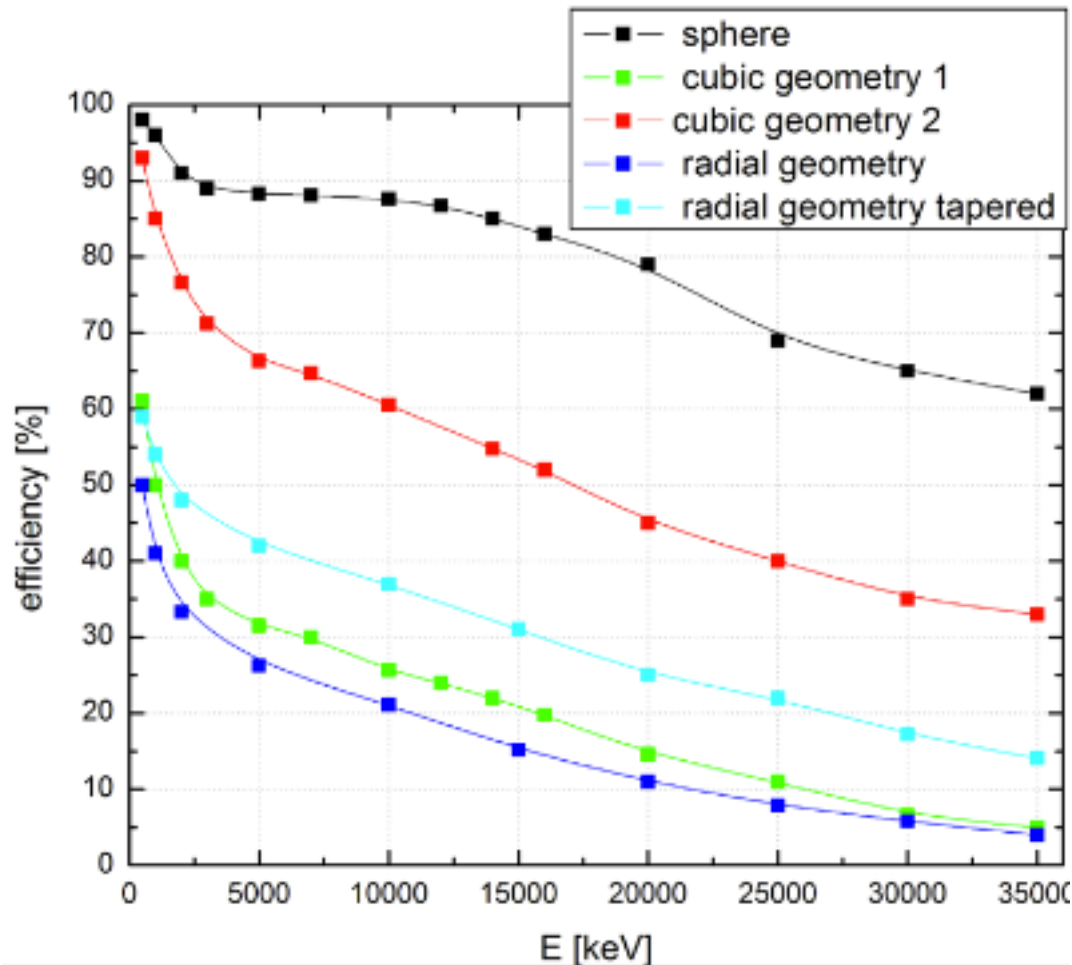




LE DÉTECTEUR PARIS

Une stratégie différente d'AGATA:

- efficacité supérieure
- résolution moins bonne

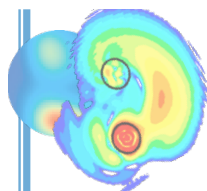


LaBr3
(2"x2")

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

PMT



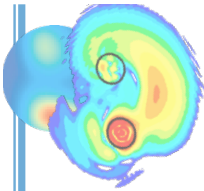


GE VS. LA_{Br}₃ POUR DÉTECTER LES GAMMAS

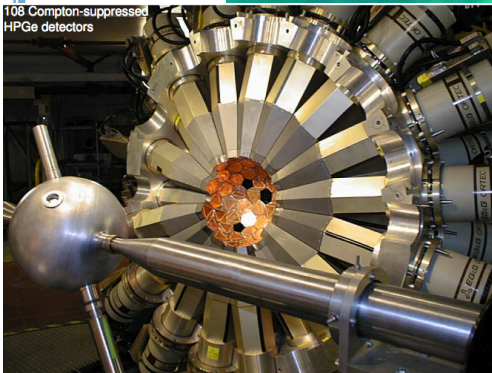
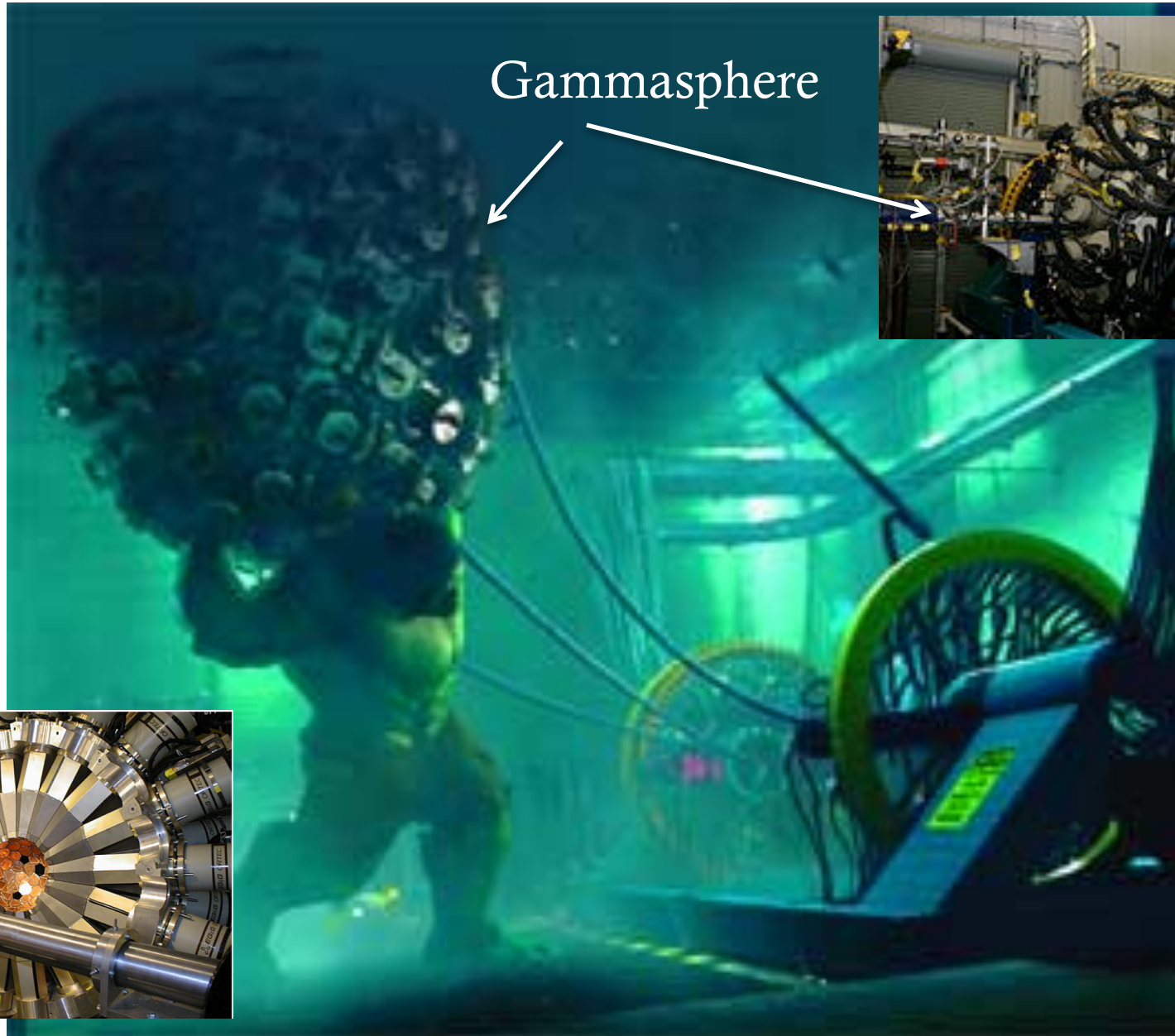
AGATA

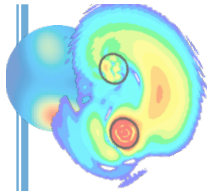
PARIS

GOOD NOT SO GOOD	Ge (3"X3")	LaBr3 (3"x3")
type	Semiconducteur: $\gamma \rightarrow e^-$	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 _{abs} @1" [1] (Eff _{rel} @1,33MeV)	10 ⁻¹ \searrow 2.10 ⁻² (75% NaI (3x3))	2.10 ⁻¹ \searrow 5.10 ⁻² (143% NaI(3x3)@1,33MeV)
Time resp. Resolution	~250ns (temps montée) 20ns \searrow 5ns [2]	16ns (temps scint.) 200ps -500ps@511KeV [3,4]



LA RECONVERSION DE CERTAINS DÉTECTEURS...





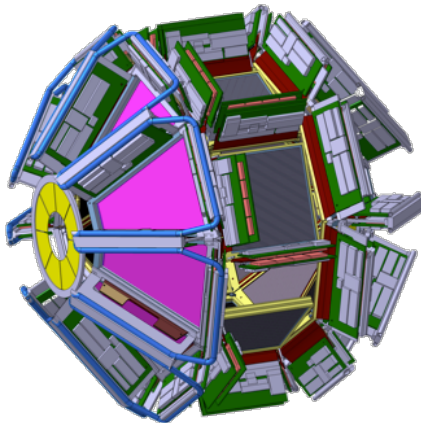
VERS LE FUTUR ...

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

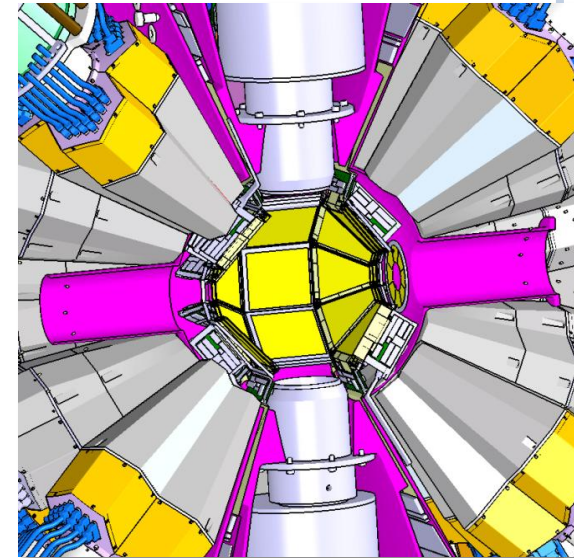
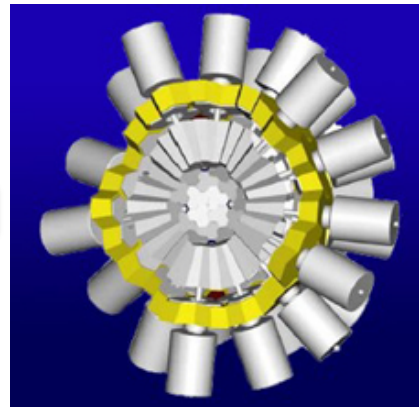
Integration des détecteurs Siliciums dans les boules gamma à venir

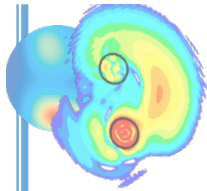


GRIT



AGATA

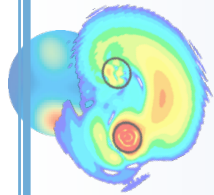




A QUOI ÇA RESSEMBLE UNE MANIP ?



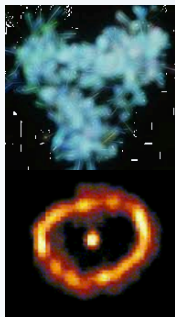
La vidéo en entier : <https://www.youtube.com/watch?v=aUxC68zb6sI>



CE QUI CHAMBOULE NOTRE VISION DU NOYAU...



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



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

▶ **Quand les noyaux enflent...**

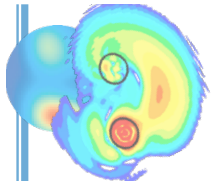


▶ **Le grand saut : Un noyau neutre ? Un noyau super-lourd**



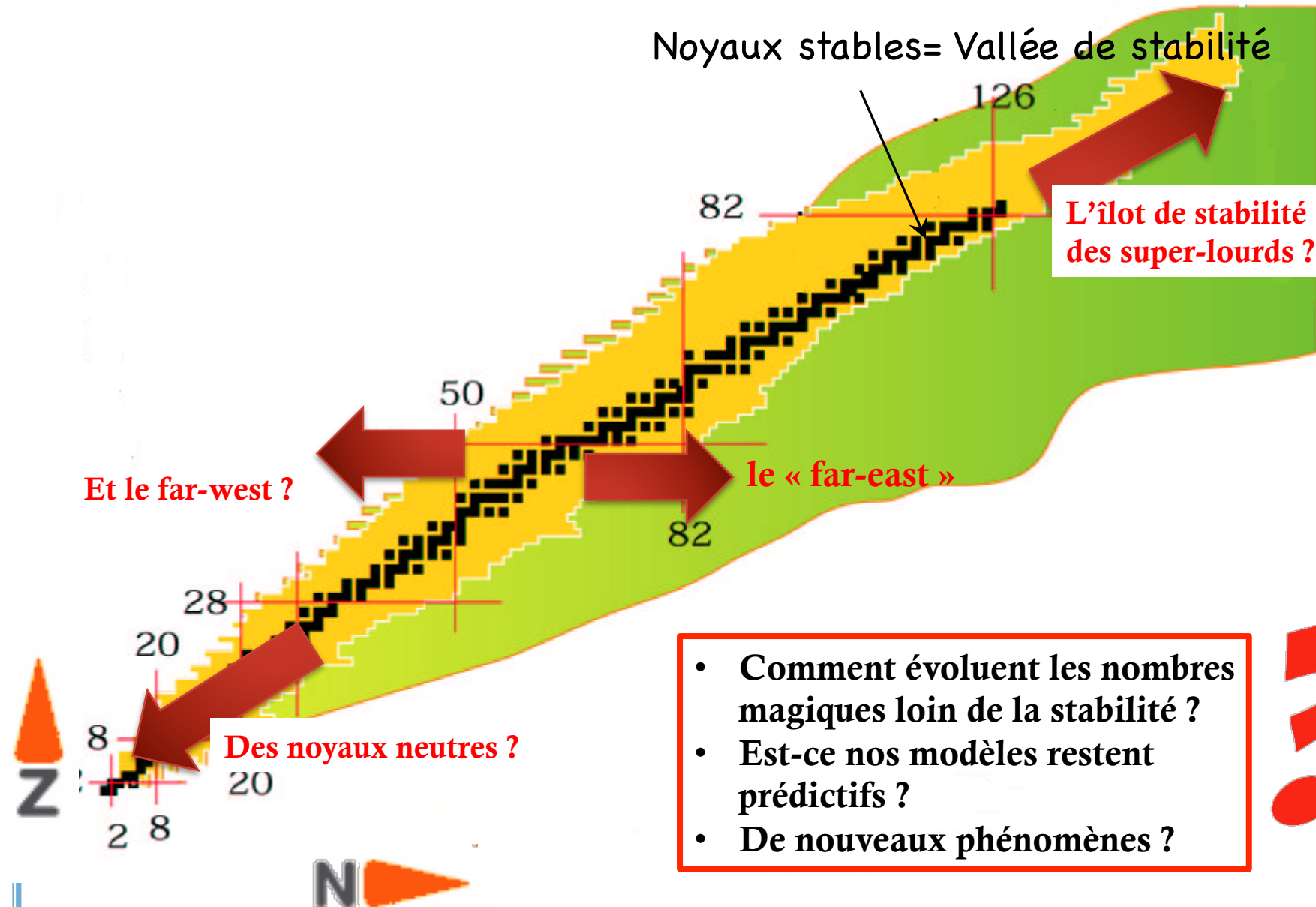
▶ **Jusqu'où repousse-t-on les limites (les noyaux non-liés) ?**

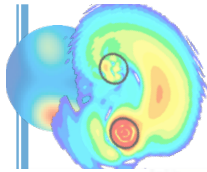
▶ **Des radioactivités exotiques**



NOTRE TERRAIN DE JEU : LA CARTE DES NOYAUX

I. LES LIMITES « EST-OUEST »

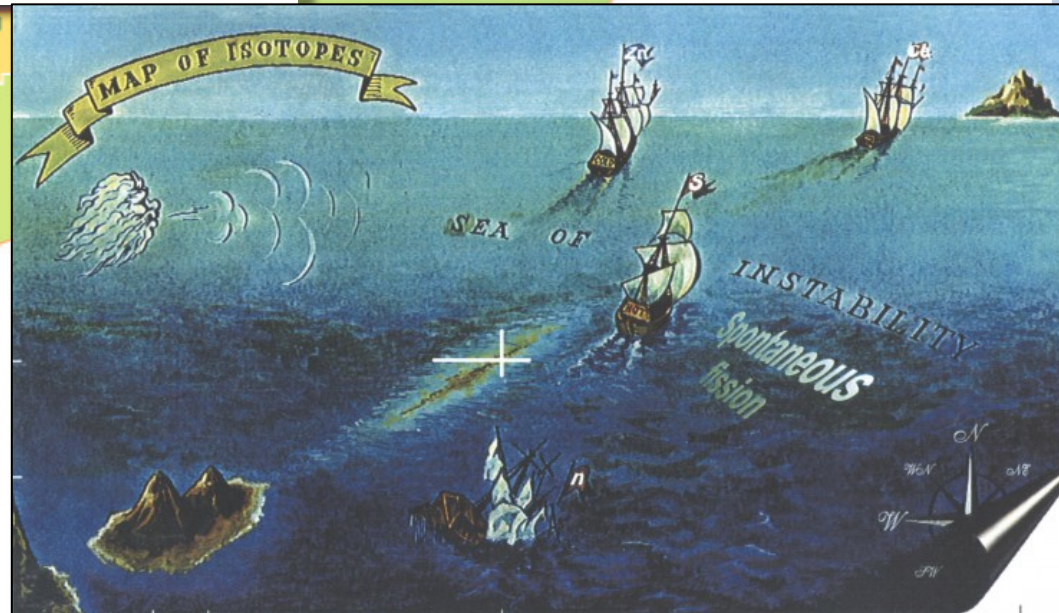
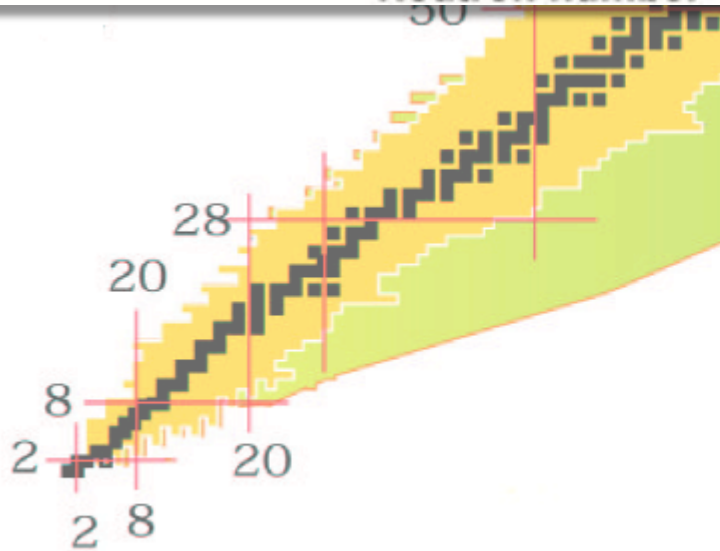
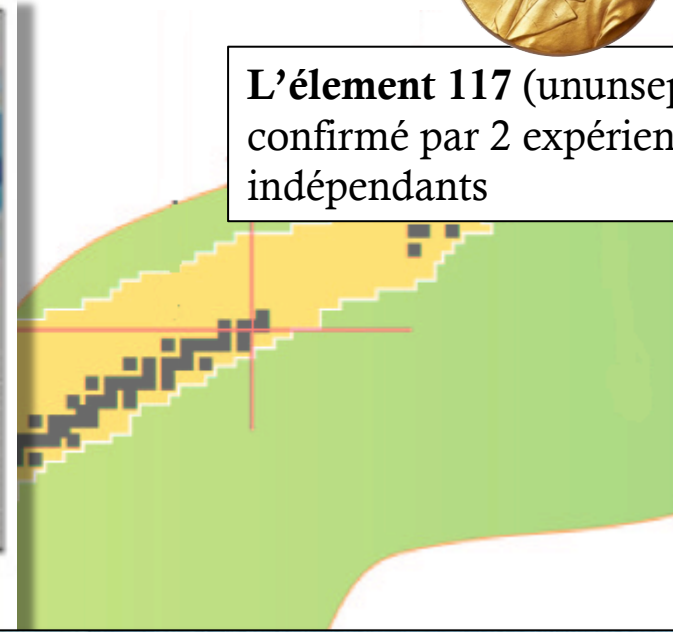
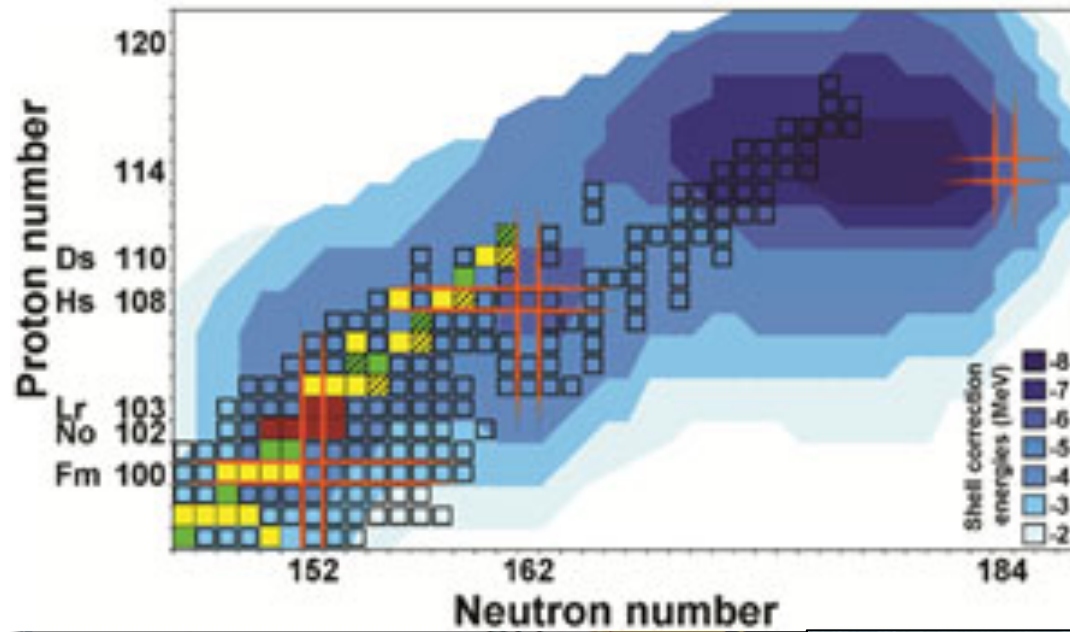


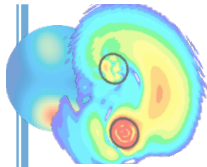


L'ÎLOT DES SUPERLOURDS



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



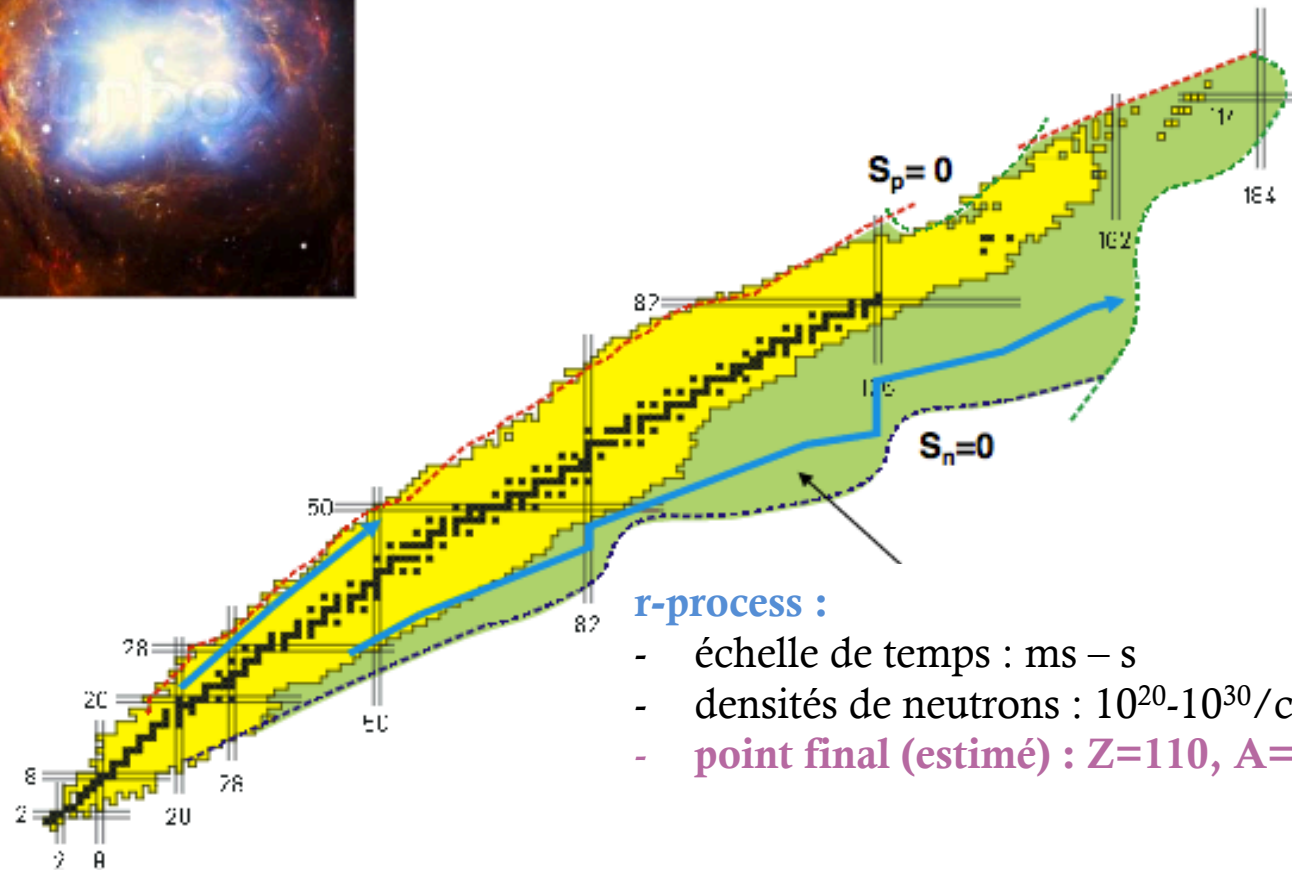


LES SUPER-LOURDS PRODUITS DANS LA NATURE ?

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

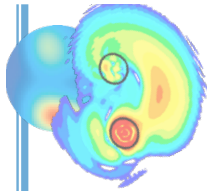


--> Captures de neutrons suivies par des décroissance β



r-process :

- échelle de temps : ms – s
- densités de neutrons : 10^{20} - 10^{30} /cm³
- 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)

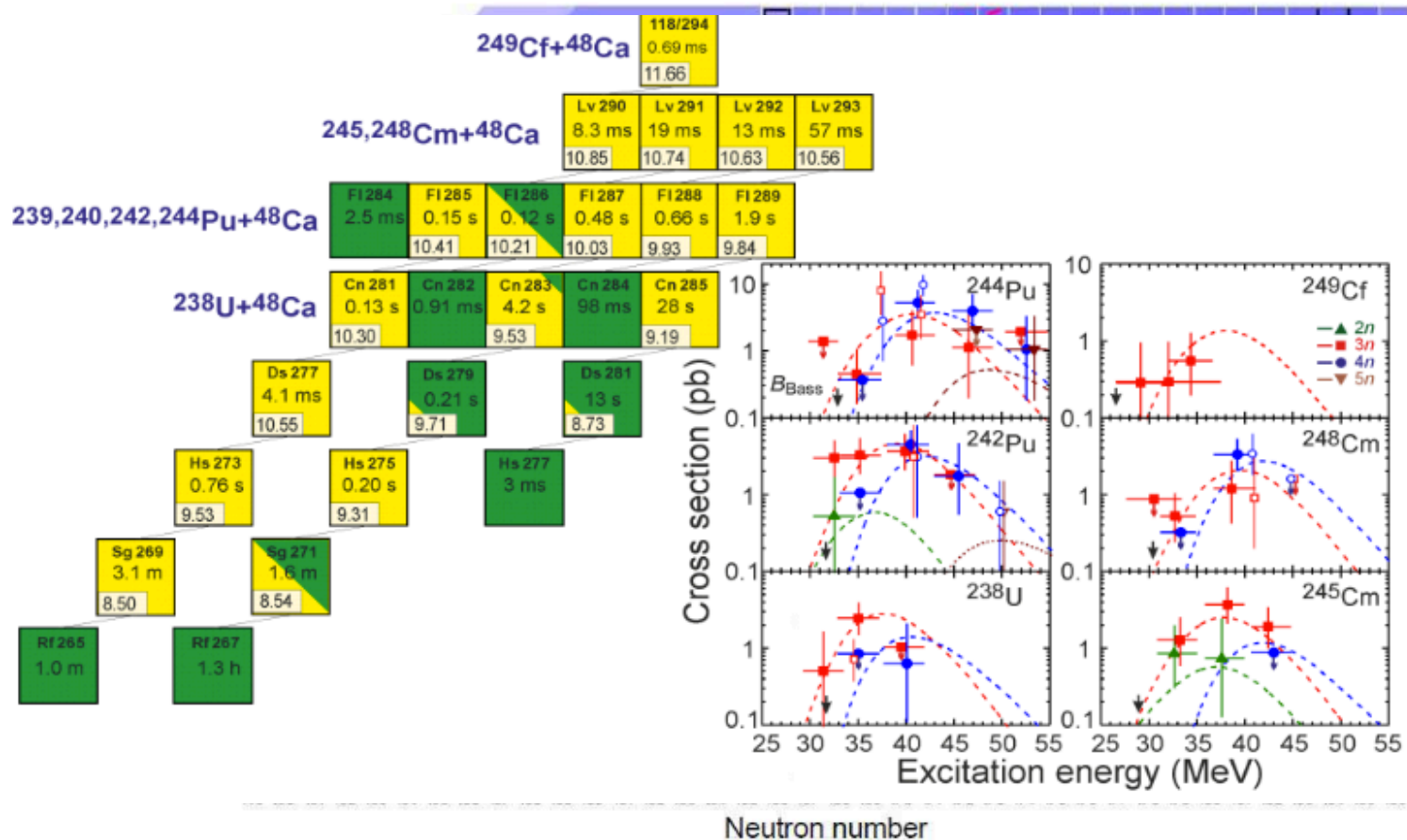
1951 : prix nobel de Chimie pour Seaborg & Mc Millian pour la découvertes des éléments transuraniens

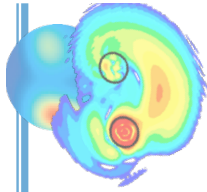
1958-1974 :

1981-1996 :

1996-2010 :

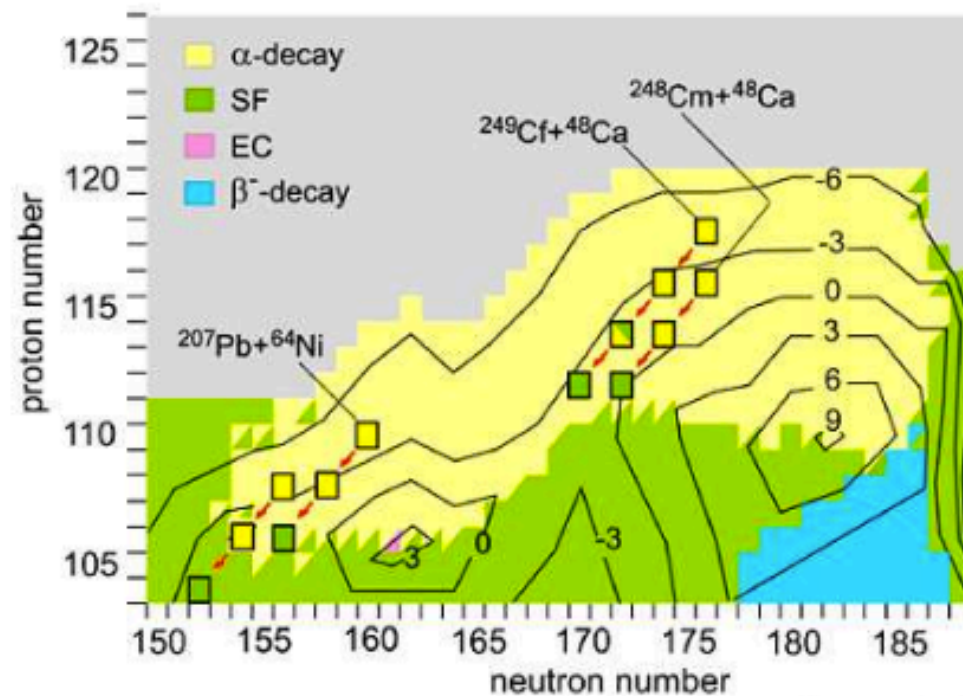
2015 :





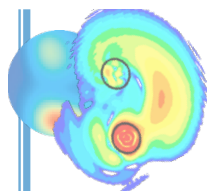
COMMENT SAIT-ON QU'ON A ATTEINT L'ÎLÔT DE STABILITÉ ?

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



(figure: A. Sobiczewski, S. Hofmann)

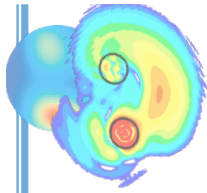
- Les noyaux de l'îlot d'inversion sont très stables vis à vis de la fission et décroissent donc par émission alpha !
- Leurs durées de vie devraient être larges et leur probabilité de production plus importante que pour leurs voisins



LA COURSE POUR LA DÉCOUVERTE DES SUPER-LOURDS

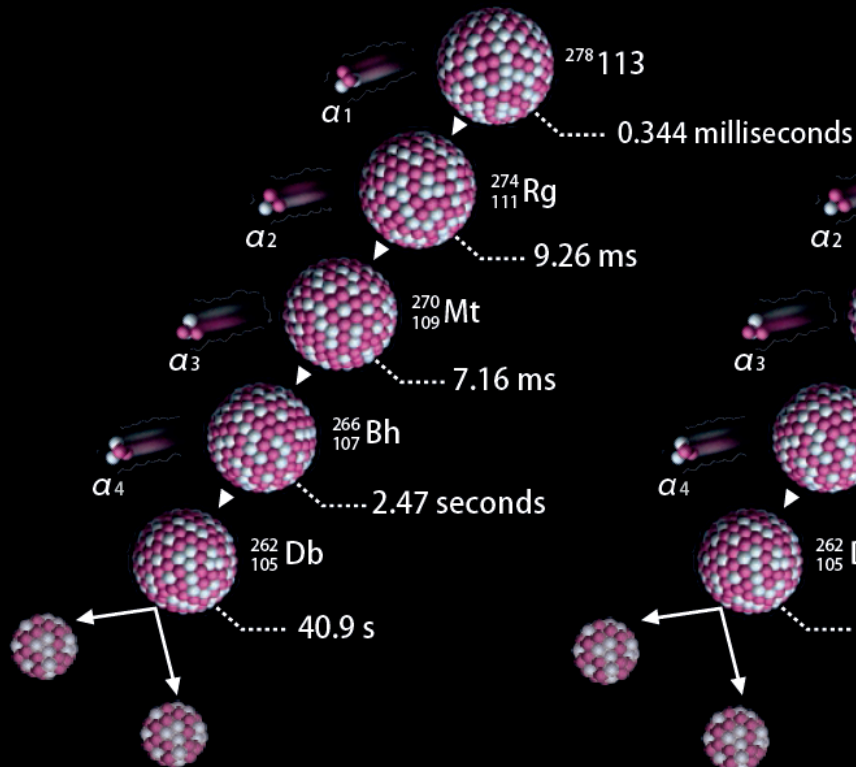
- 1994 Z=111 **Roentgenium** (synthétisé à GSI en Allemagne)
1996 Z=112 **Copernicium** (synthétisé à GSI en Allemagne)
1998 Z=114 **Flérovium** (découvert à Dubna)
2000 Z=116 **Livermorium** (découvert à Dubna)
2003 Z=115 **Moscovium** (découvert à Dubna par une équipe américaine de Livermore)
2010 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 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnérium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium
113 Nh Nihonium	114 Fl Flérovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson

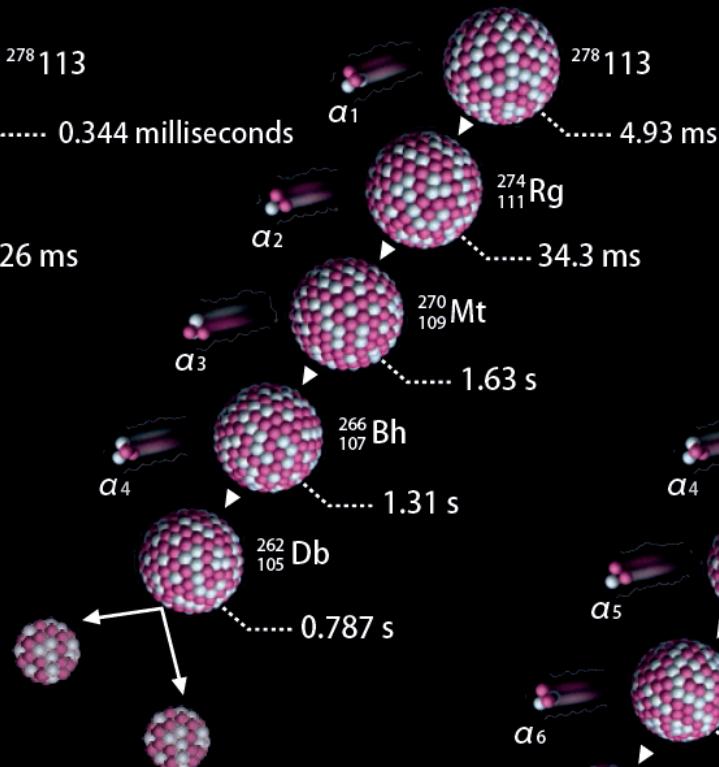


ELEMENT Z=113 : LE NIHONIUM

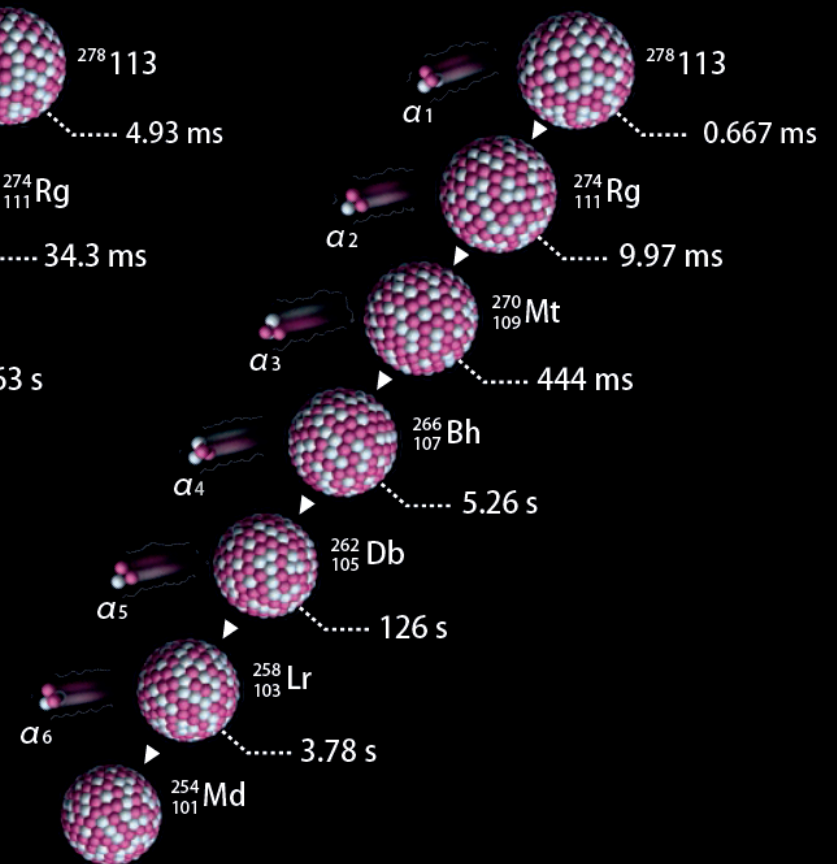
23 July 2004



2 April 2005

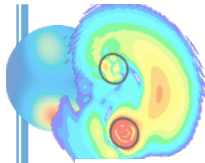


12 August 2012

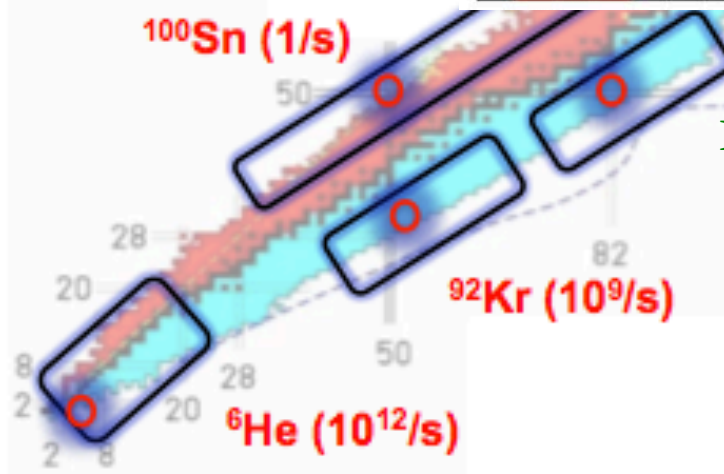
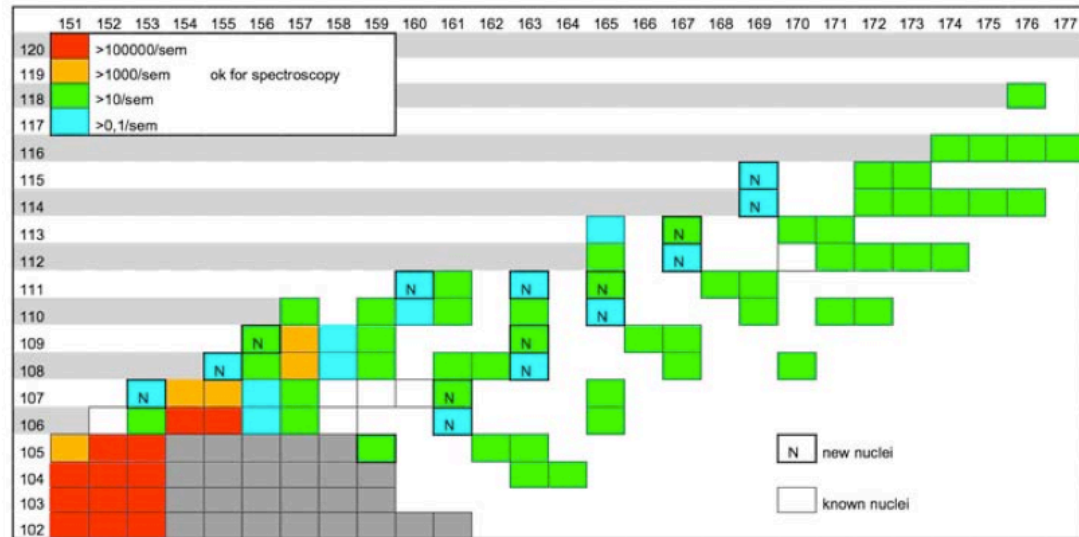


It took Morita's team seven years to clearly show that element 113 was the source of the observed decay chain of alpha particles.

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

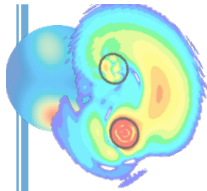


EXEMPLES POUR AUJOURD'HUI ET LE FUTUR



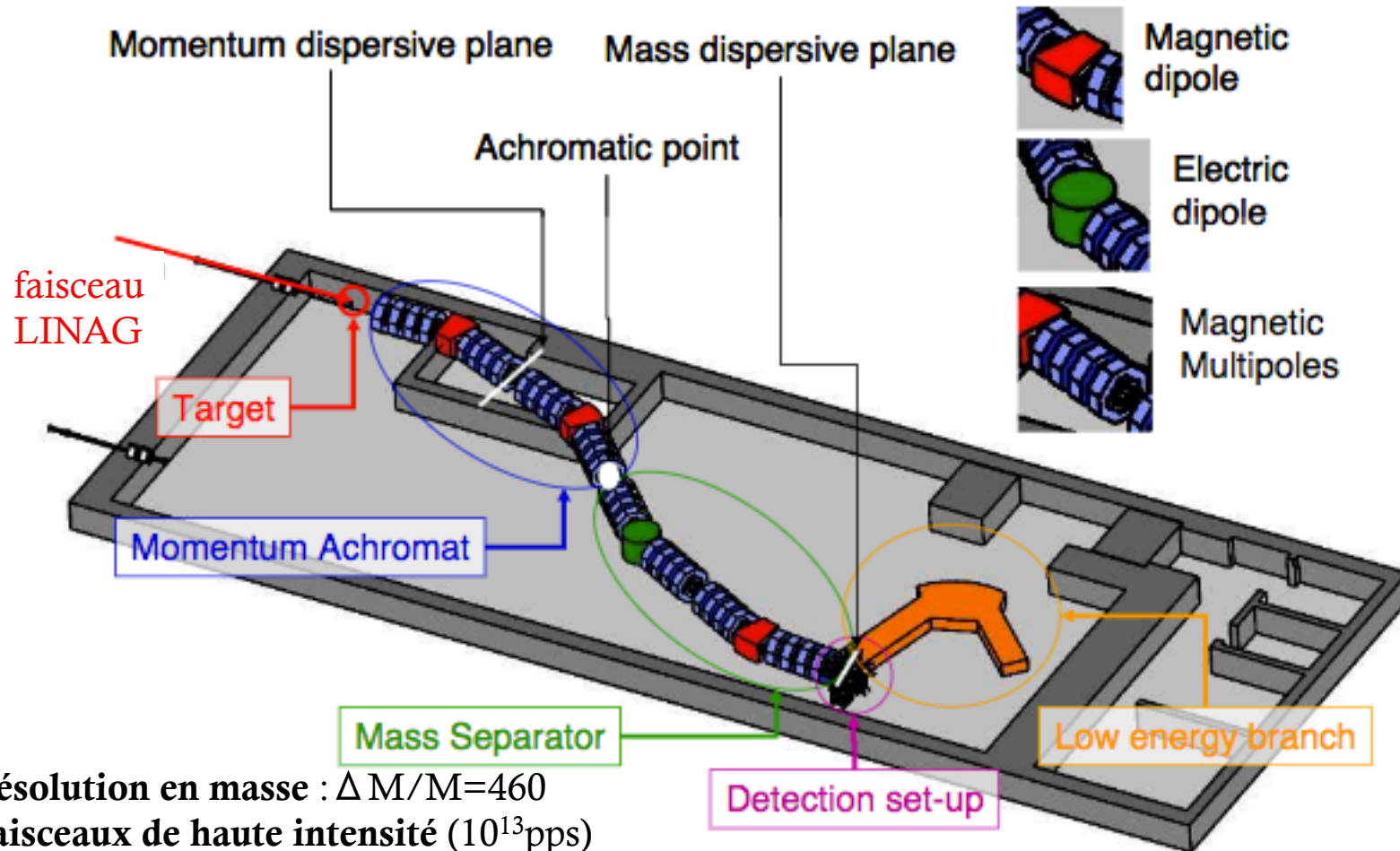
Le spectromètre S³

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



S³ : 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

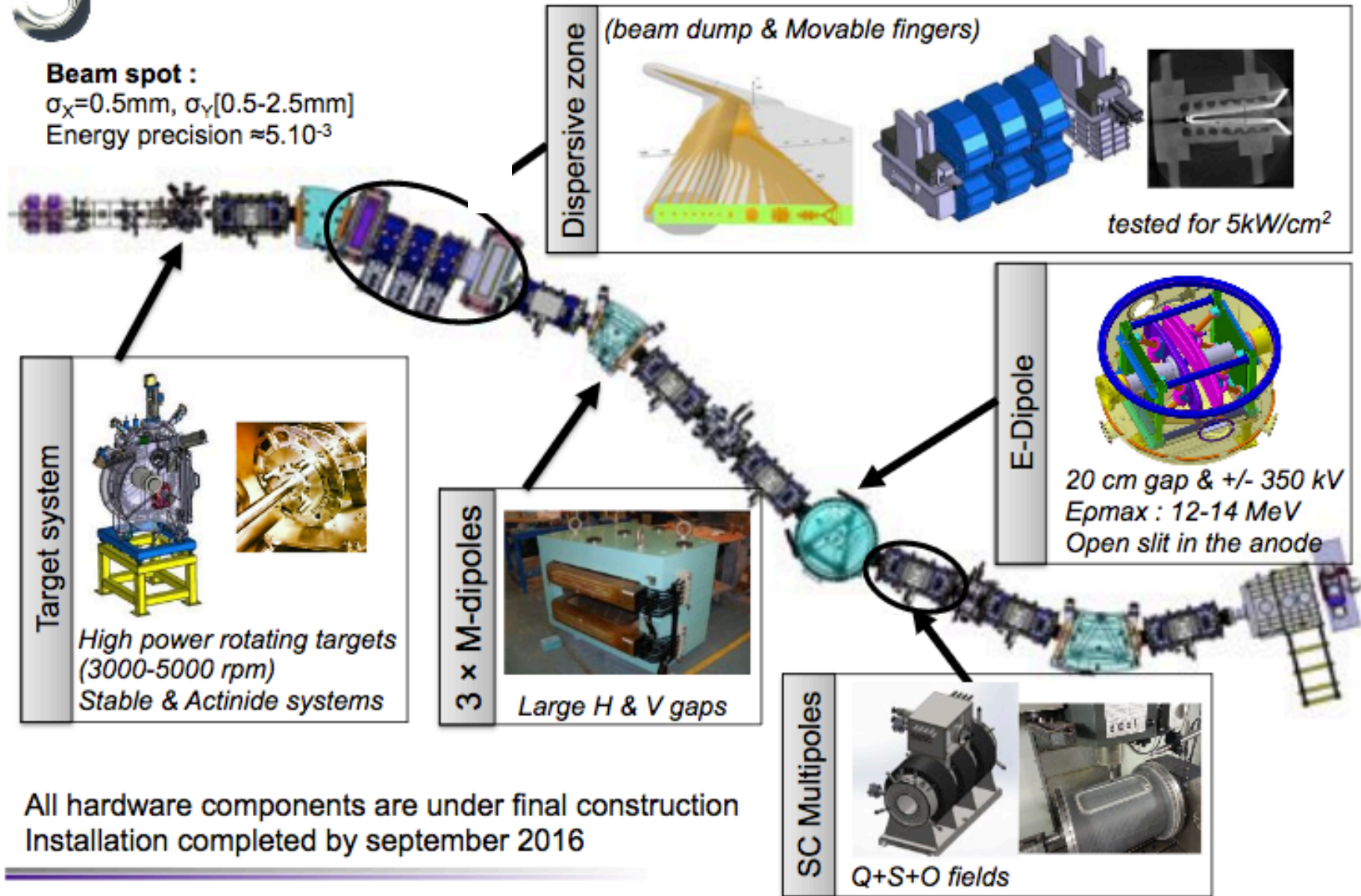
S3

Super Separator Spectrometer

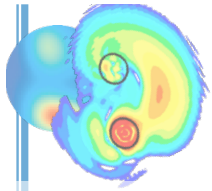
Beam spot :

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

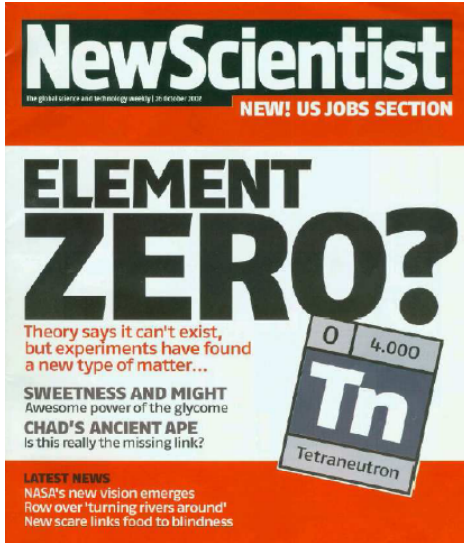
Energy precision $\approx 5 \cdot 10^{-3}$



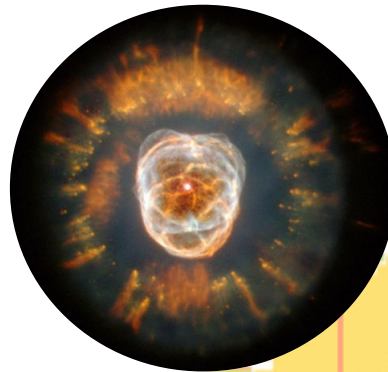
All hardware components are under final construction
Installation completed by september 2016



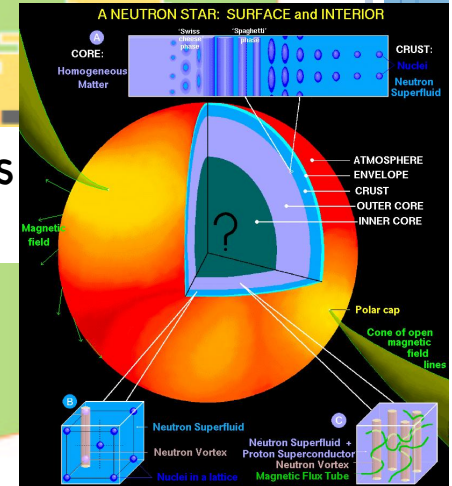
ET UN NOYAU SANS PROTONS, C'EST POSSIBLE ?



- D'où vient cette idée ?



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

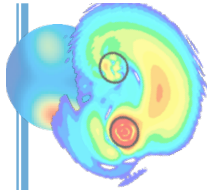


Les gouttes d' ^3He superfluides (30 atomes par goutte)



Les noyaux neutres ?





SI ON FAIT LE BILAN...

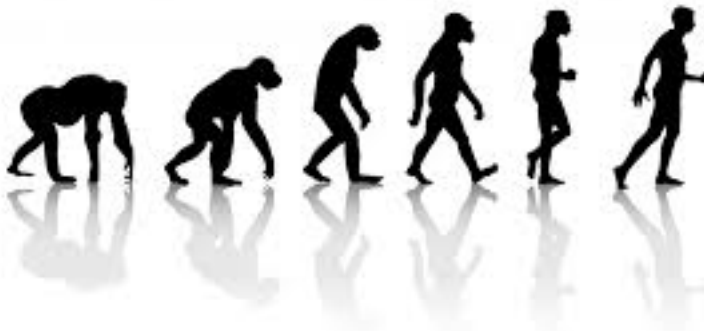
- ▶ Le rayon, la densité du noyau : variable, pas proportionnel à A
- ▶ Les nucléons indépendants :
 - limites de cette approche : il peut y avoir des « clusters » dans les noyaux
 - les nucléons ne sont pas uniformément répartis dans le noyau (peau, hal)
- ▶ L'interaction entre neutrons : pas assez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

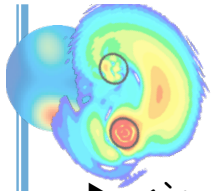


L'interaction nucléaire permet donc l'apparition de phénomènes originaux dans des conditions extrêmes

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 ?

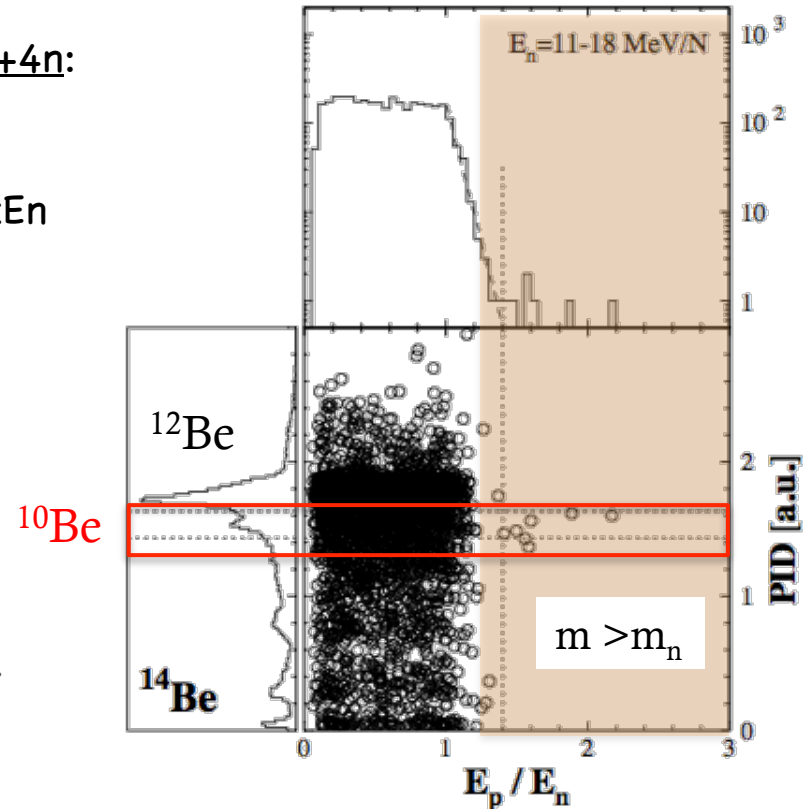
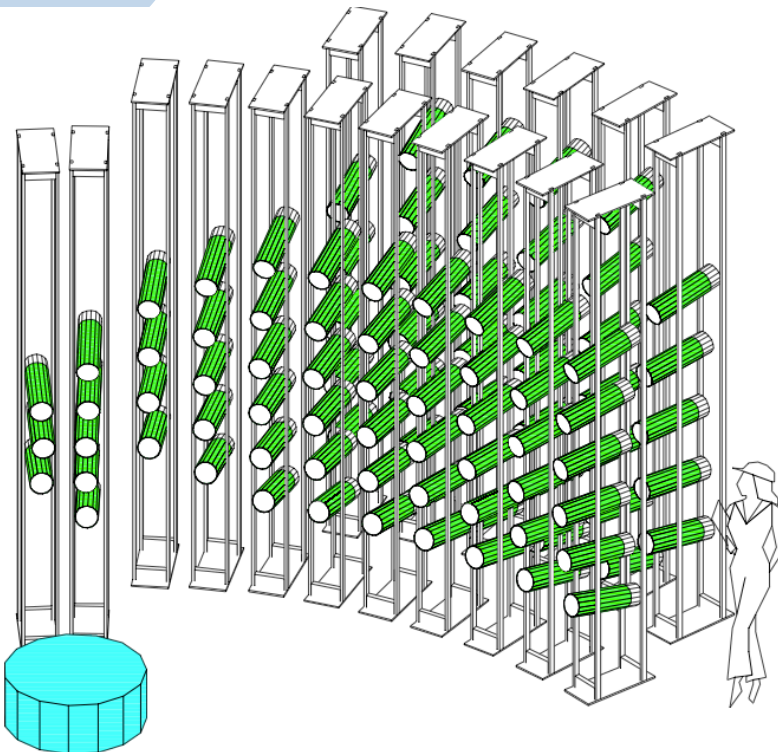
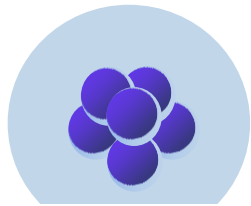
► 1^{ère} méthode par cassure du $^{14}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Be} + 4n$:

-> **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 !

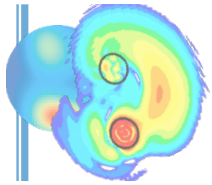
2^{ème} méthode $^{11}\text{Li}(d, ^3\text{He})^{10}\text{He}$

égalité on ne peut détecter que

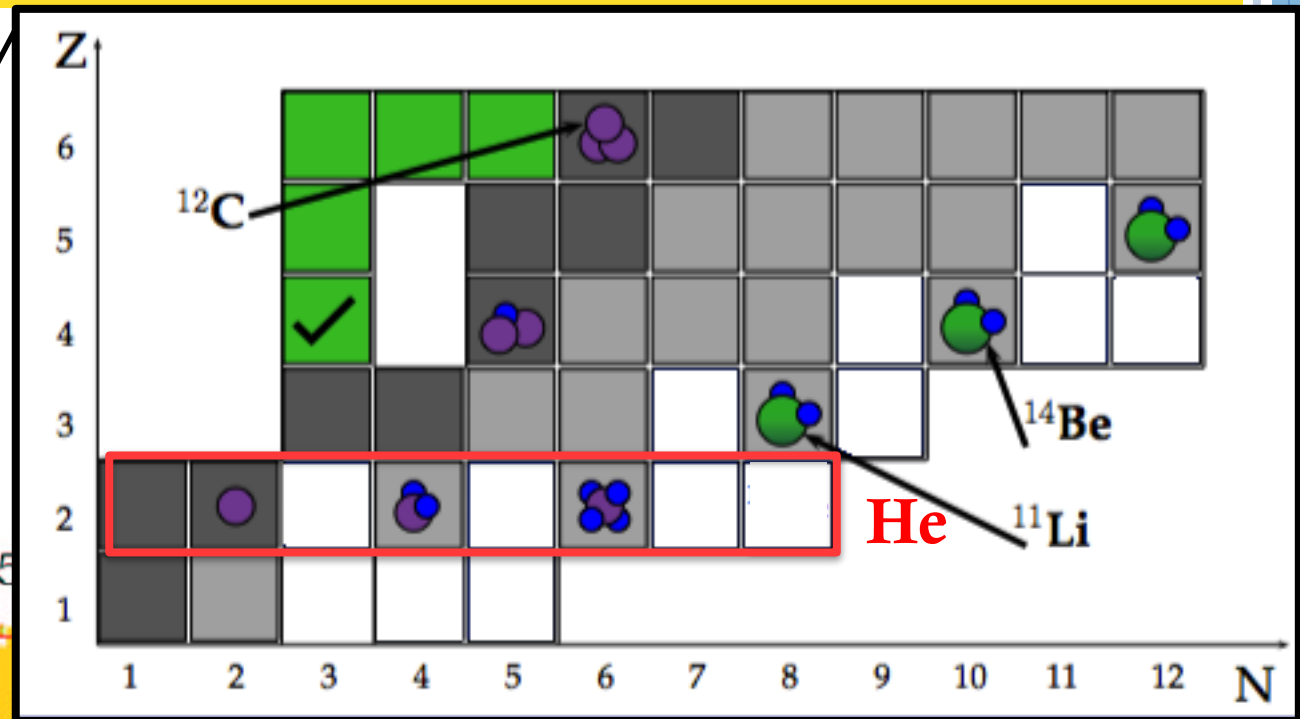
+ $2n$ ou $^6\text{He} + 4n$ ou $^4\text{He} + 6n$

méthode de la masse manquante

→ pas de résonance observée

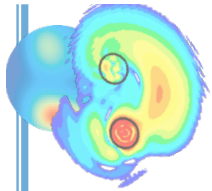


QUAND LES NOYAUX COAGULENT ET ENFLENT... LE SYNDROME DES NOYAUX LÉGERS

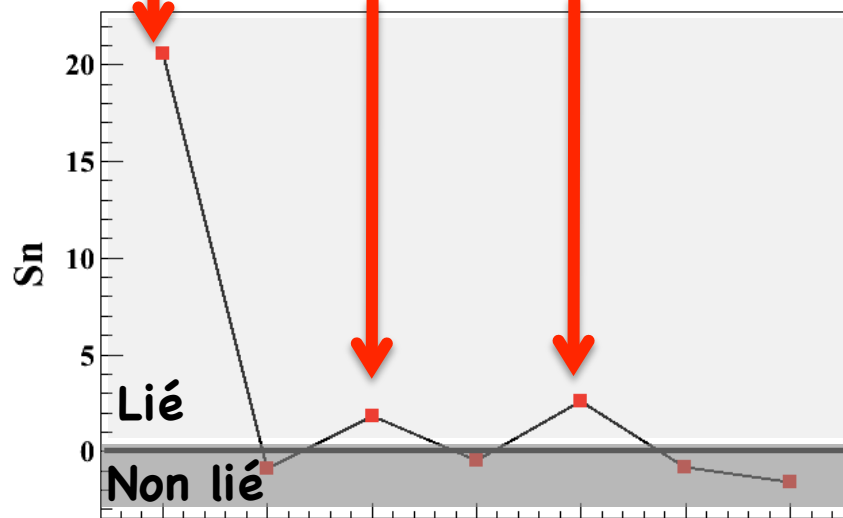


Noyaux « légers »
Comment s'organisent les éléments du noyaux ?
Pourquoi certains existent, d'autres pas ?





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

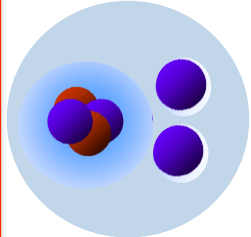


α



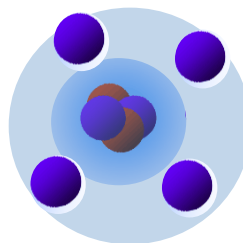
2 neutrons
2 protons

${}^6\text{He}$



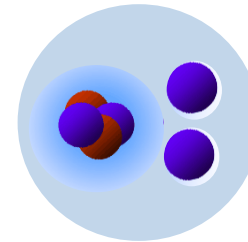
4 neutrons
2 protons

${}^8\text{He}$



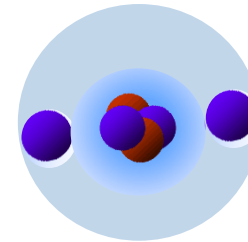
6 neutrons
2 protons

La question en suspens...



${}^6\text{He}$

« di-neutron » ?



« cigare » ?

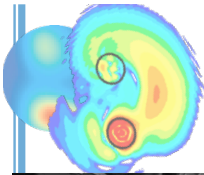


L'appariement des 2 neutrons
stabilise le noyau

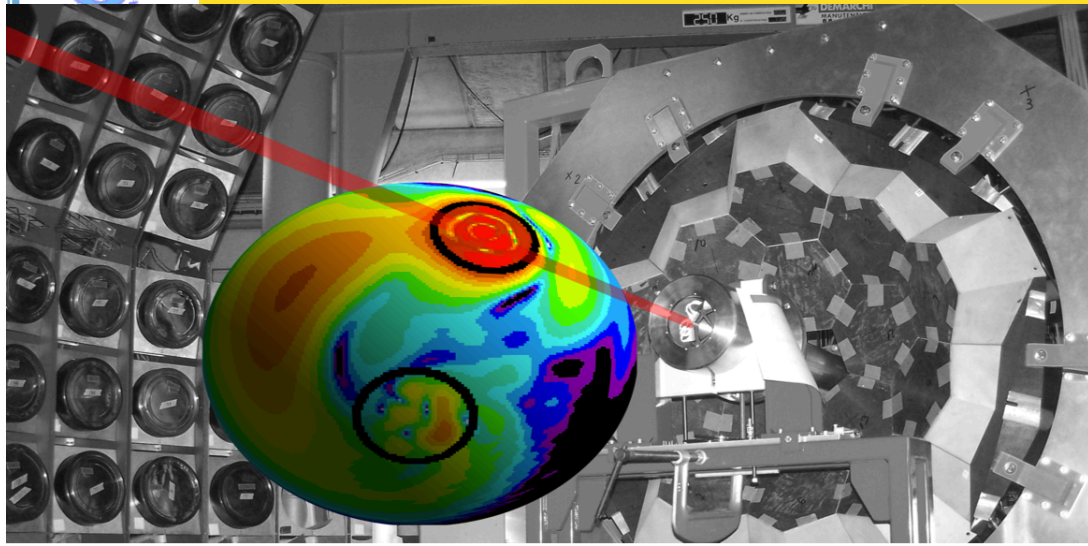
Mais où sont les neutrons ?

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



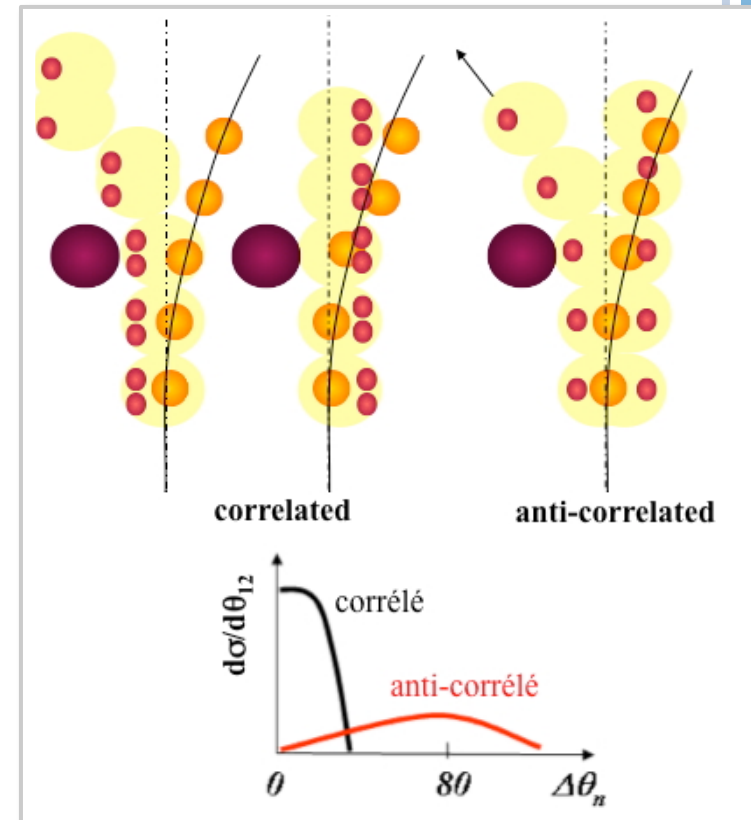


CASSER LE NOYAU D' ${}^6\text{He}$ POUR LE COMPRENDRE

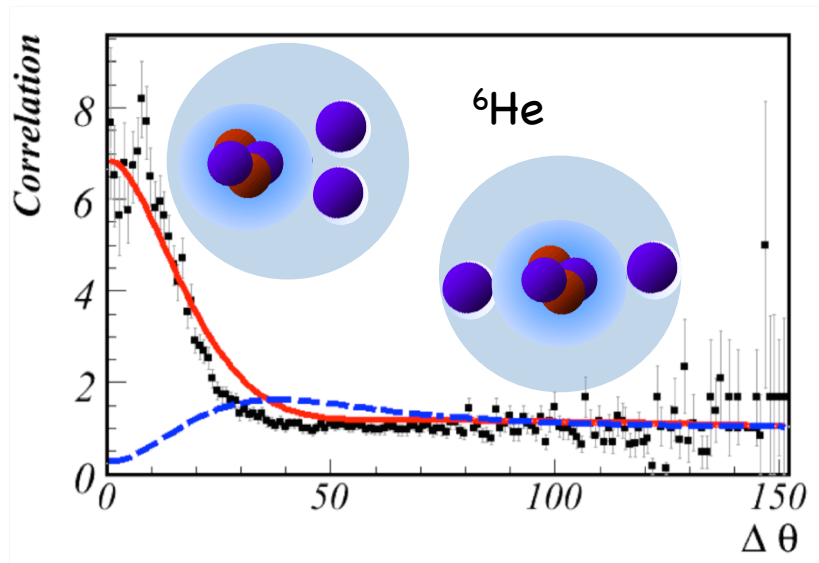


${}^6\text{He}$: « di-neutron » ou « cigare » ?

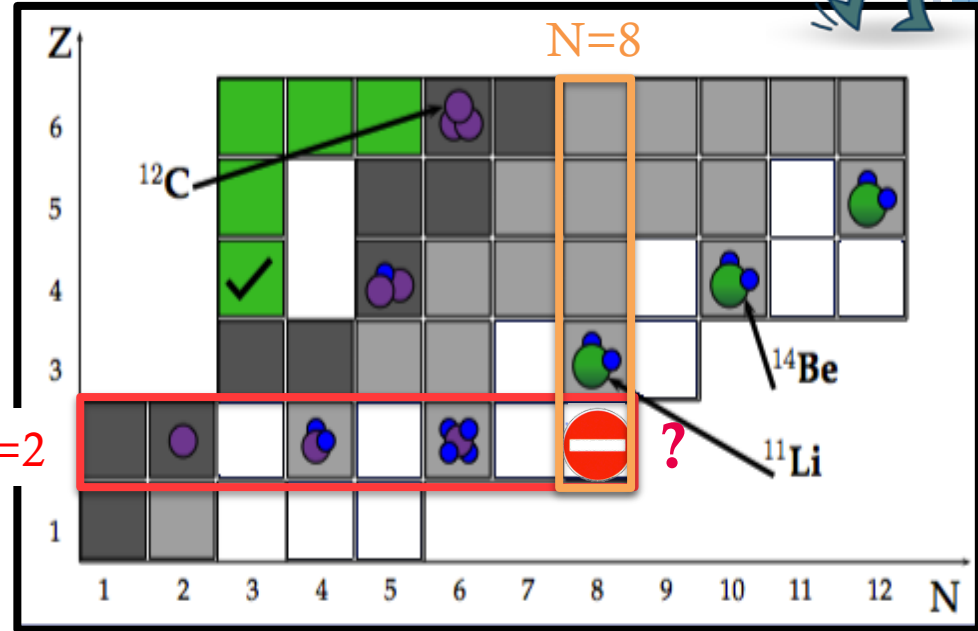
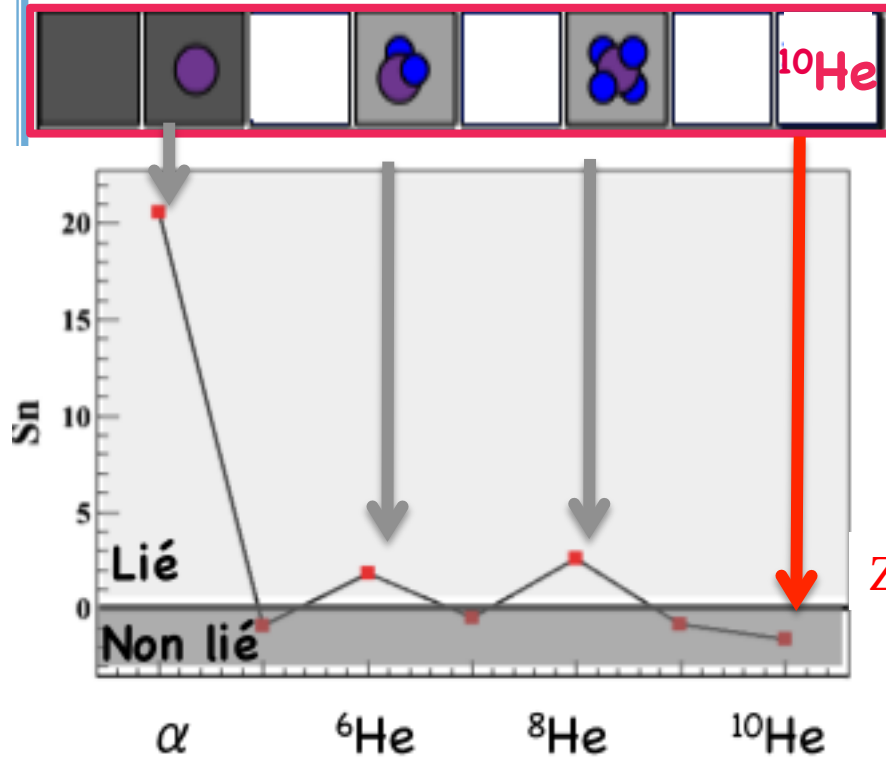
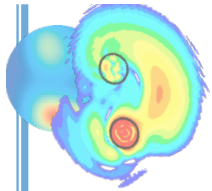
L'idée de la manip ... "avec les mains"



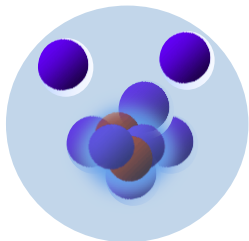
L' ${}^6\text{He}$ a principalement une configuration di-neutron



ET APRÈS ? ET ENCORE APRÈS ? LES NOYAUX NON LIÉS



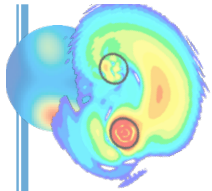
¹⁰He
Prédit comme halo de 2 neutrons



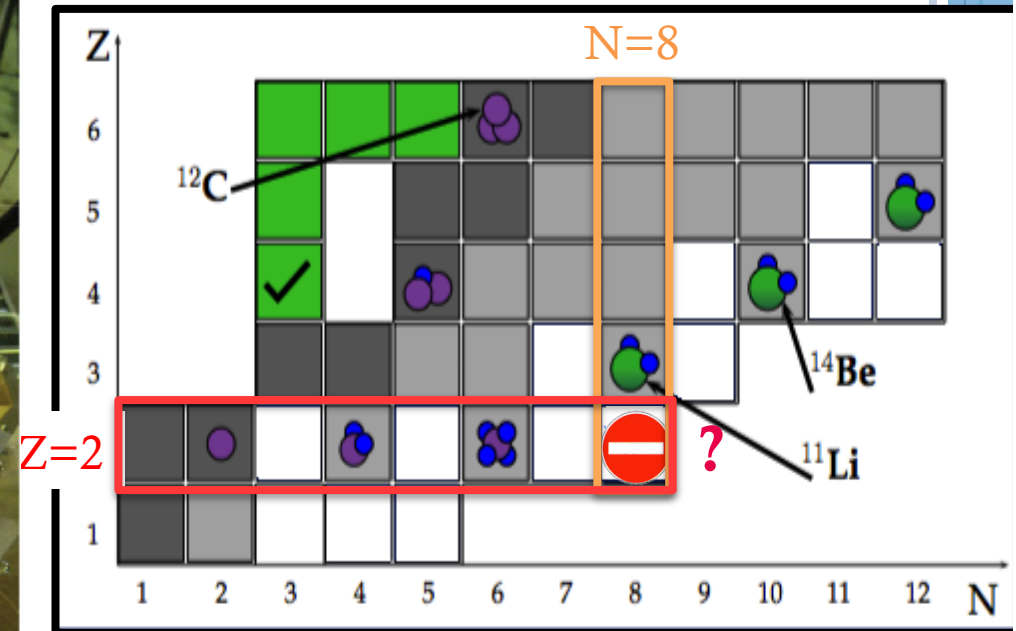
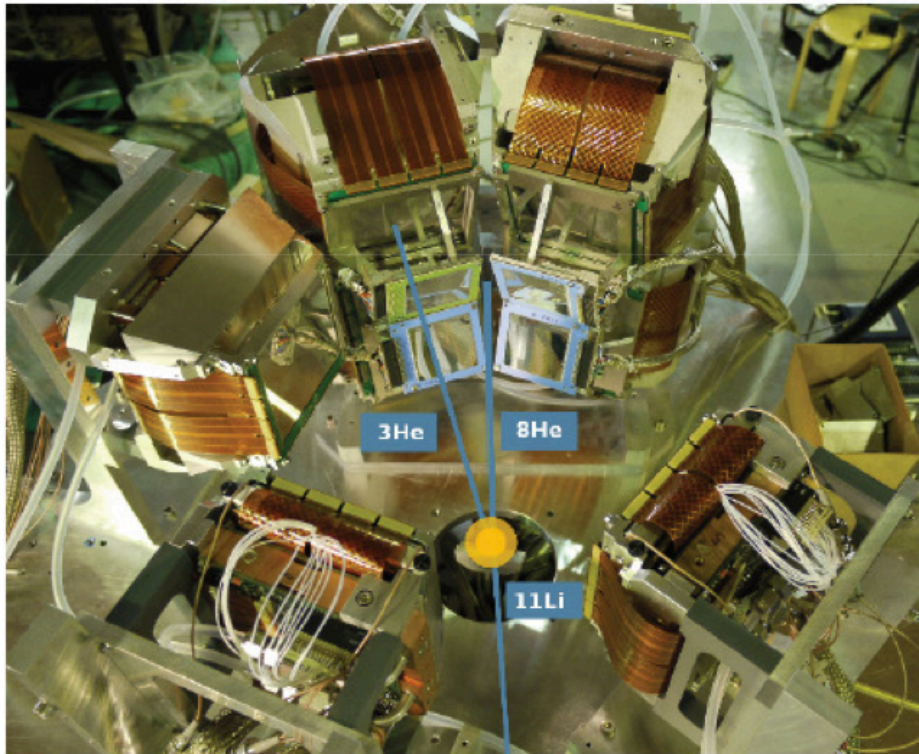
8 neutrons
2 protons

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





ET APRÈS ? LES NOYAUX NON LIÉS

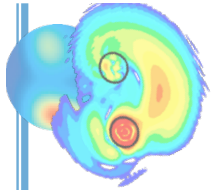


Etudié par la réaction de transfert : $^{11}\text{Li}(d, ^3\text{He})^{10}\text{He}$

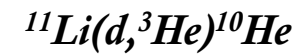
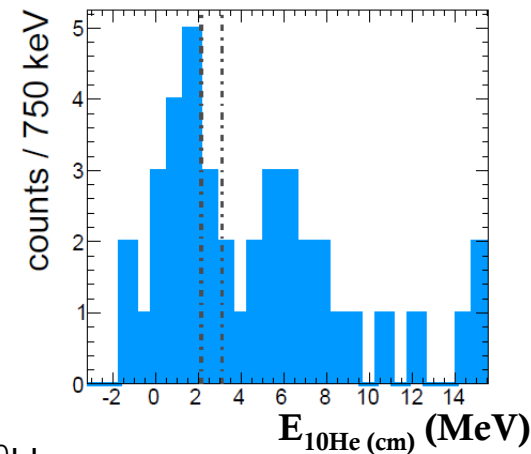
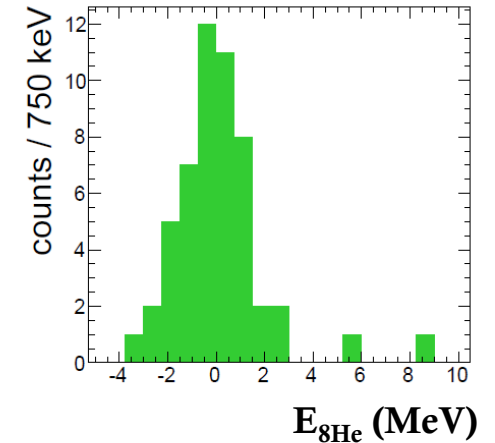
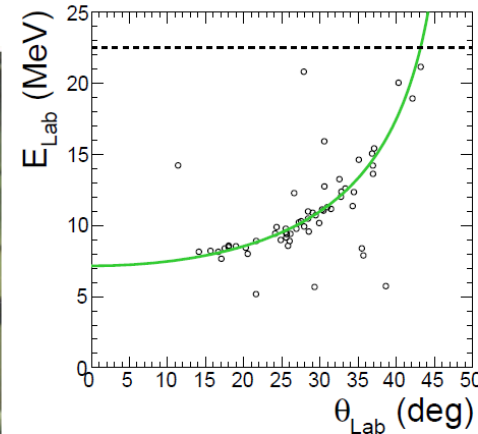
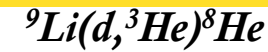
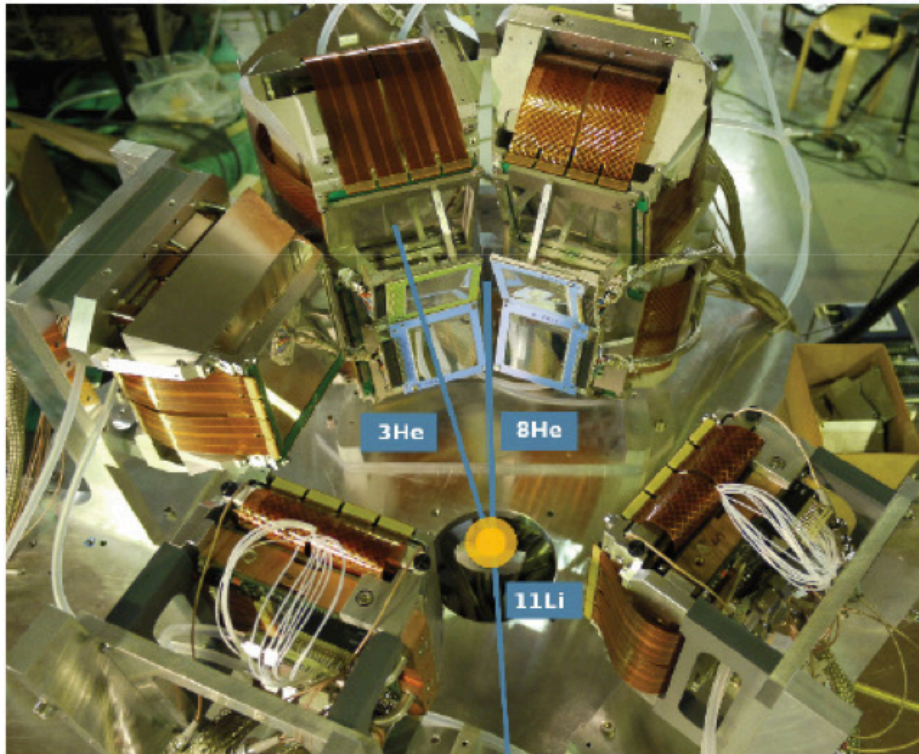
En réalité on ne peut détecter que $^8\text{He} + 2n$ ou $^6\text{He} + 4n$ ou $^4\text{He} + 6n$

-> un état résonant à 1.3 MeV

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



ET APRÈS ? LES NOYAUX NON LIÉS



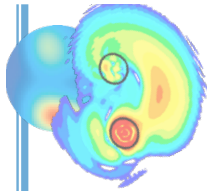
*on enlève un proton
au ${}^{11}\text{Li}$*

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

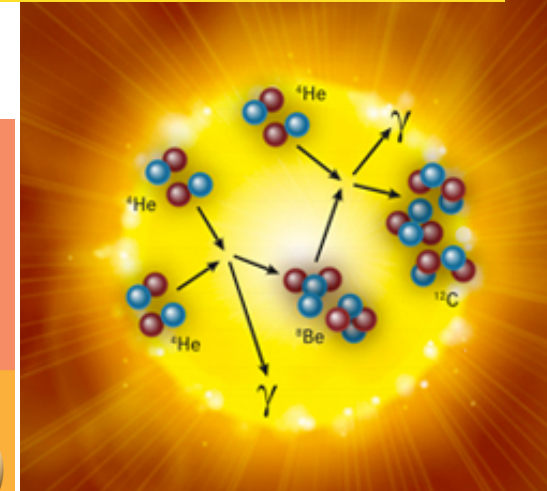
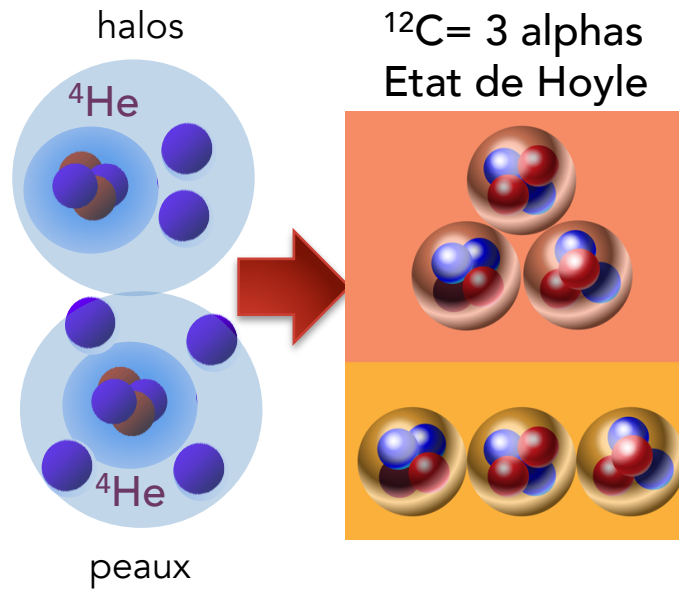
-> la structure de l' ${}^{10}\text{He}$ est très différente de la structure du ${}^{11}\text{Li}$ ($={}^{10}\text{He} + p$).



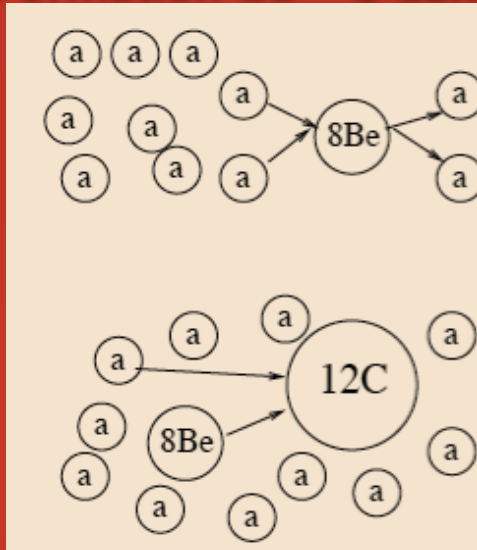
DES AMAS (« CLUSTERS ») DANS LES NOYAUX ?

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}C dans les étoiles à partir de l' ^4He (=alpha)



^8Be non lié --> décroît en 2 alphas

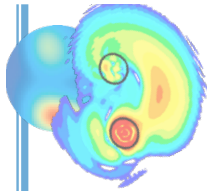
Etat de Hoyle dans le ^{12}C (non lié) 3 possibilités :

--> se casse en 3 alphas

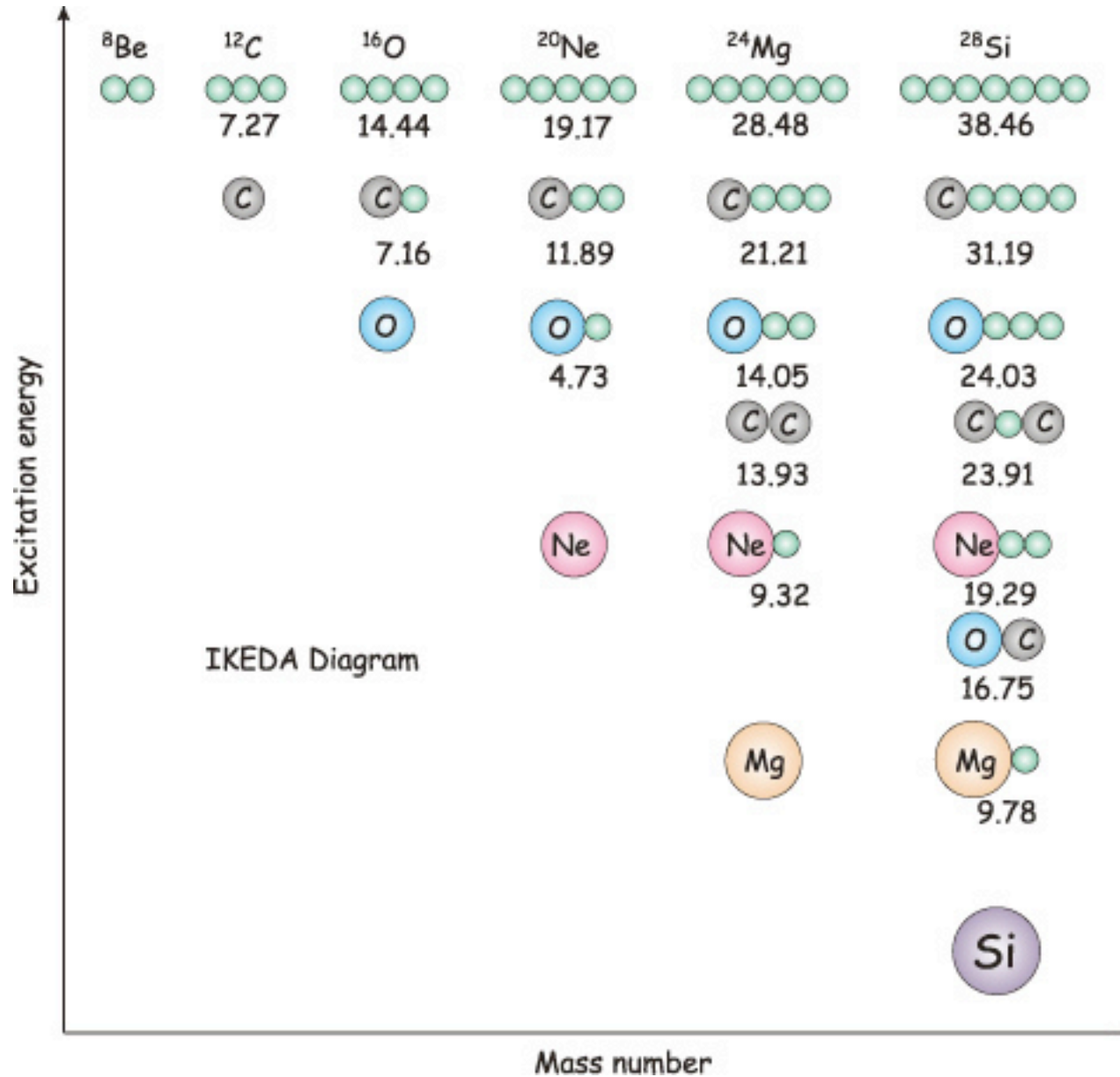
--> se casse en ^8Be + alpha

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





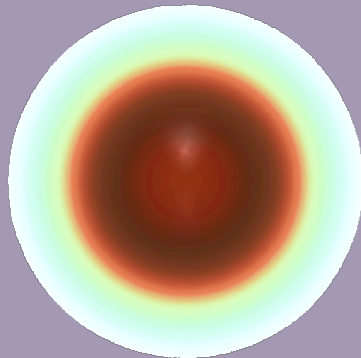
LE DIAGRAMME D'IKEDA



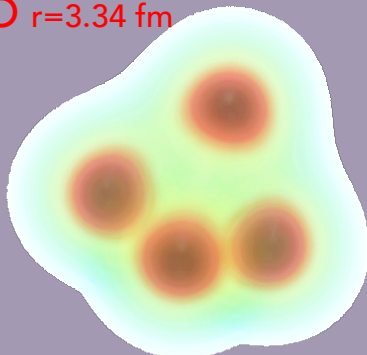
DES CLUSTERS DANS L'¹⁶O ?

Approche théorique
(champ moyen relativiste)

¹⁶O $r=3.32$ fm



¹⁶O $r=3.34$ fm



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

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

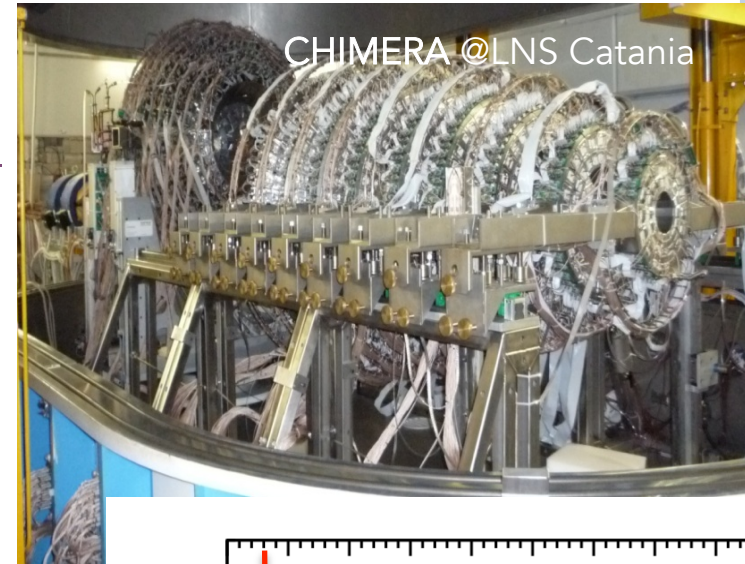
Signature exp. :
Emission de 4
noyaux d'⁴He
simultanément

Réaction :
⁴⁰Ca (faisceau)
+ ¹²C (cible)
à 25A MeV

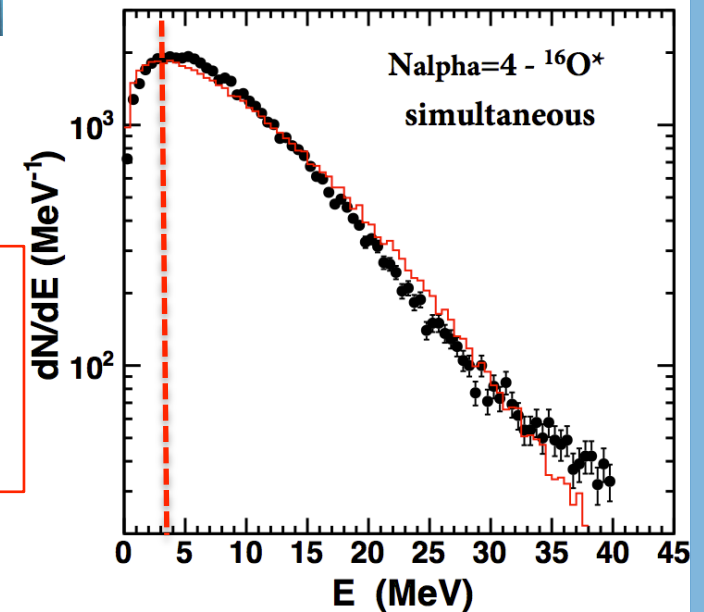
Energie moyenne des
⁴He = 3.3 MeV

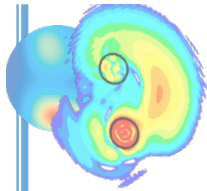
soit $p/p_0=0.7$
--> $r/r_{g.s.}=1.13$

Etude expérimentale

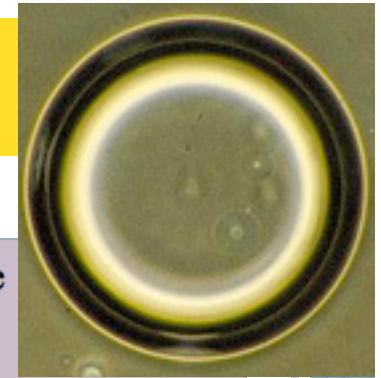


CHIMERA @LNS Catania

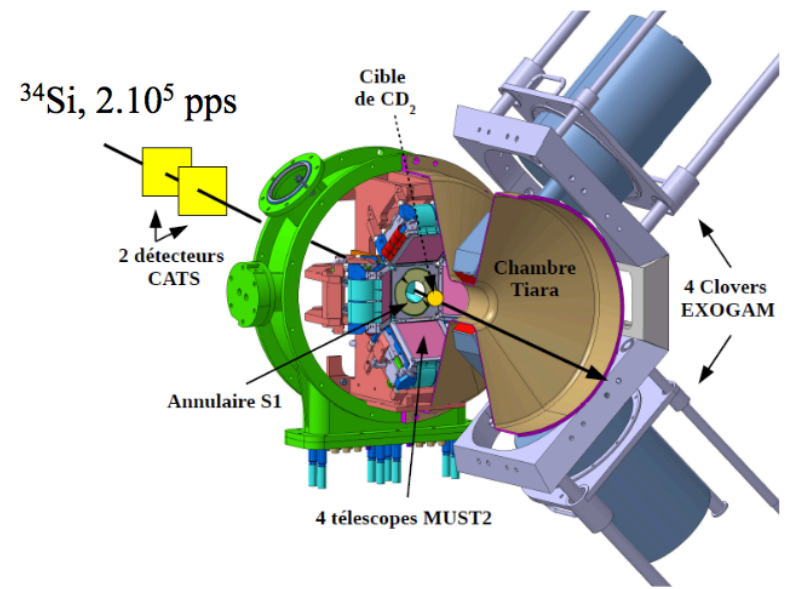
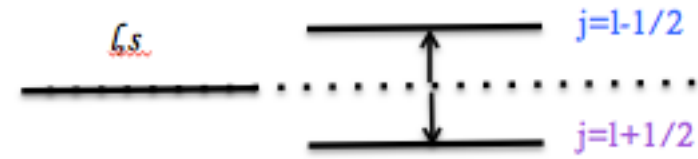
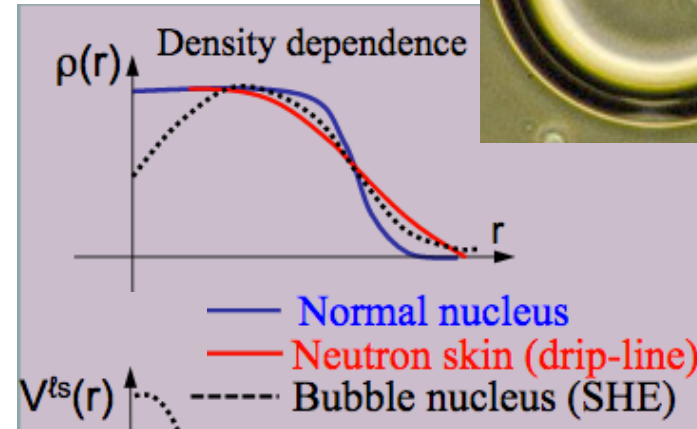
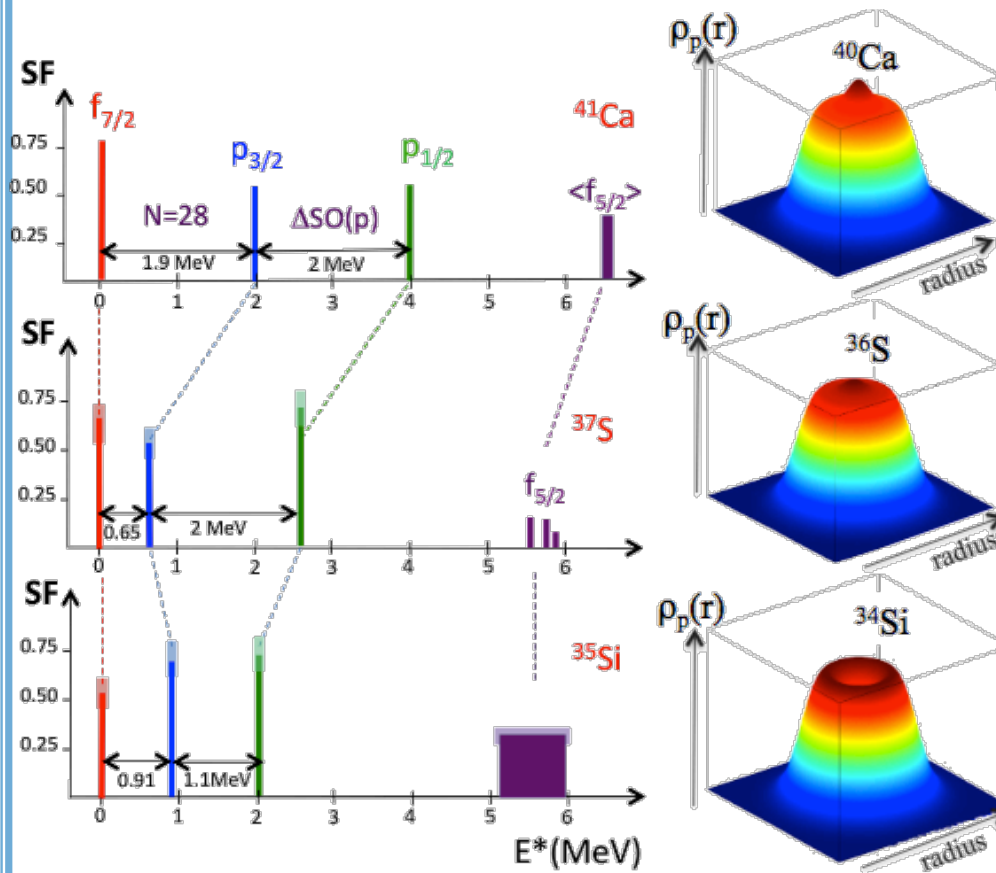


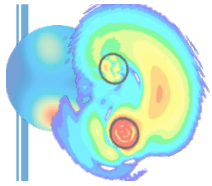


DES NOYEAUX BULLES ?

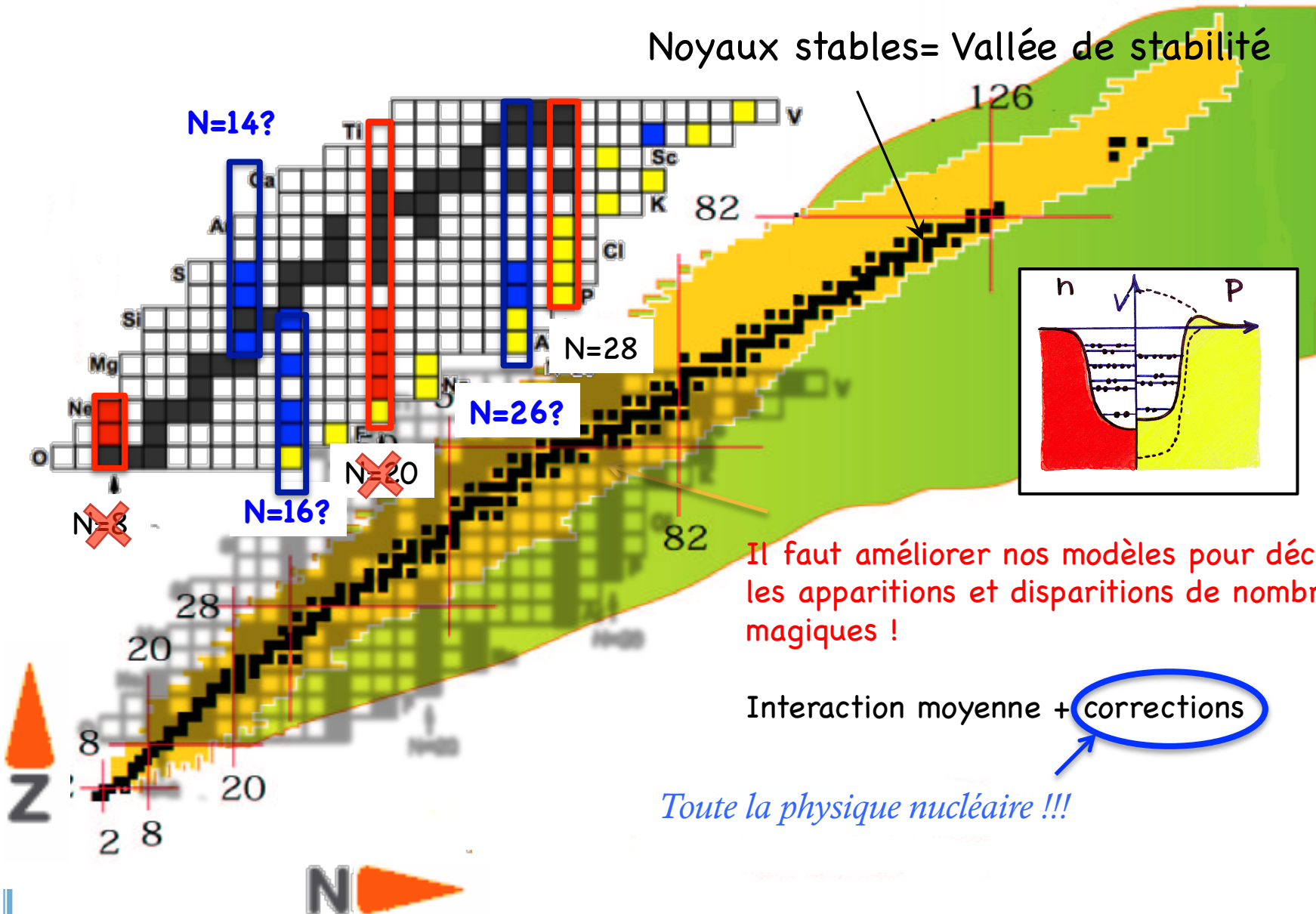


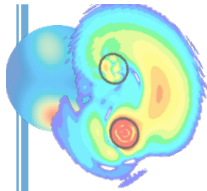
L'interaction spin-orbite dépend de la pente de la densité -> preuve de l'existence de noyaux bulles



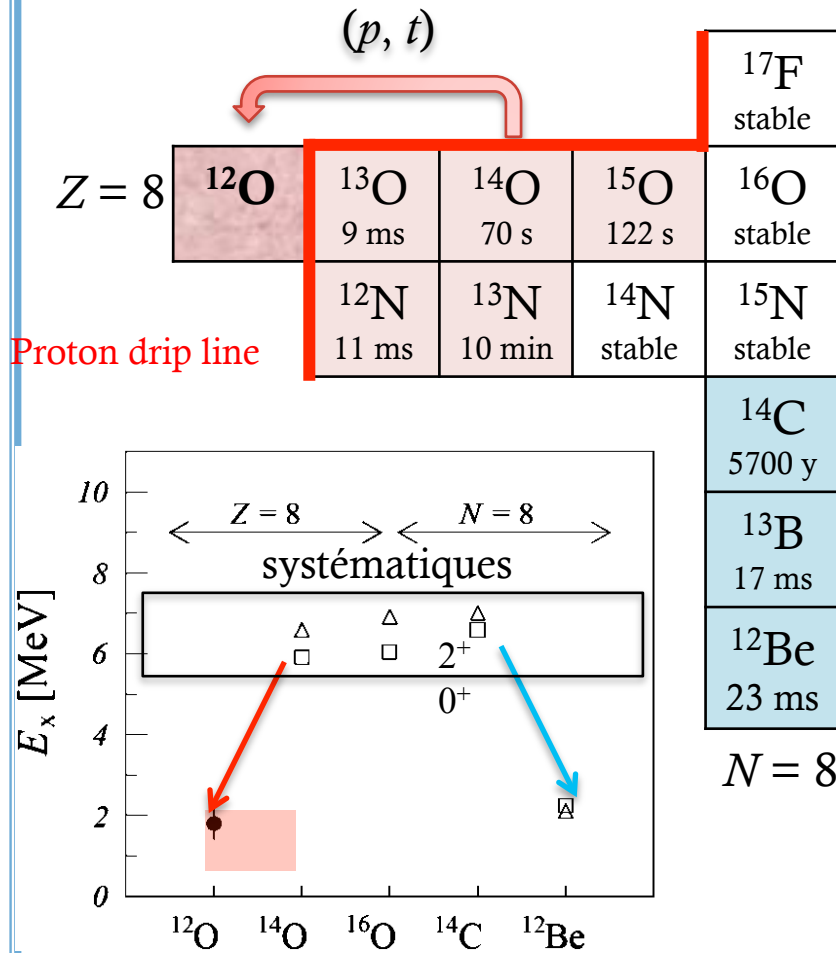


NOTRE TERRAIN DE JEU : LA CARTE DES NOYAUX

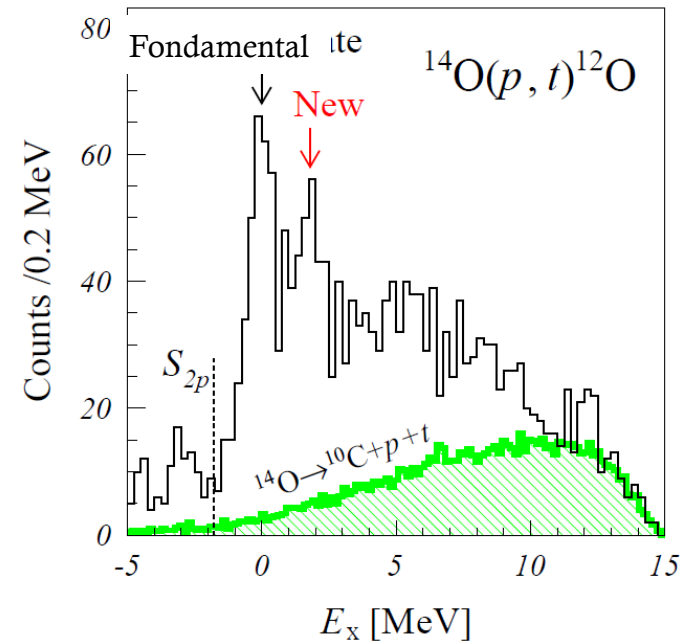
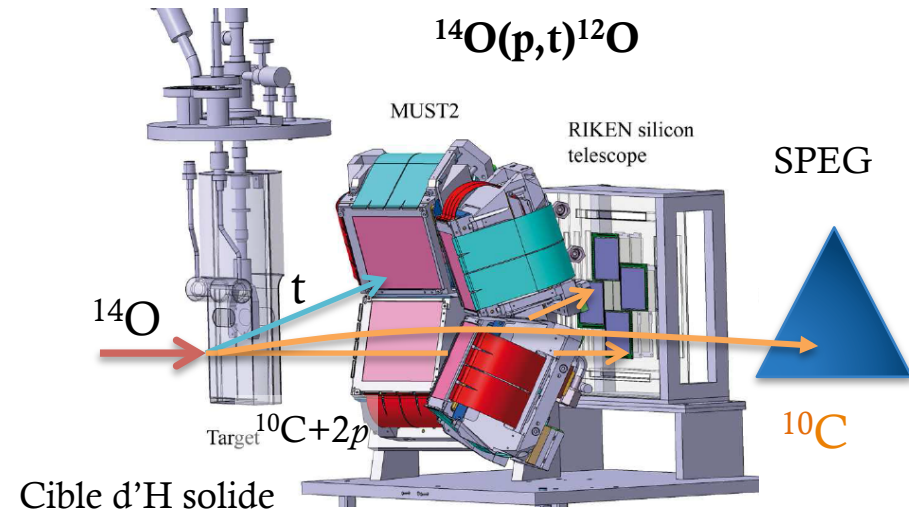




LE NOYAU NON-LIÉ D' ^{12}O ET LE NOMBRE MAGIQUE $Z = 8$

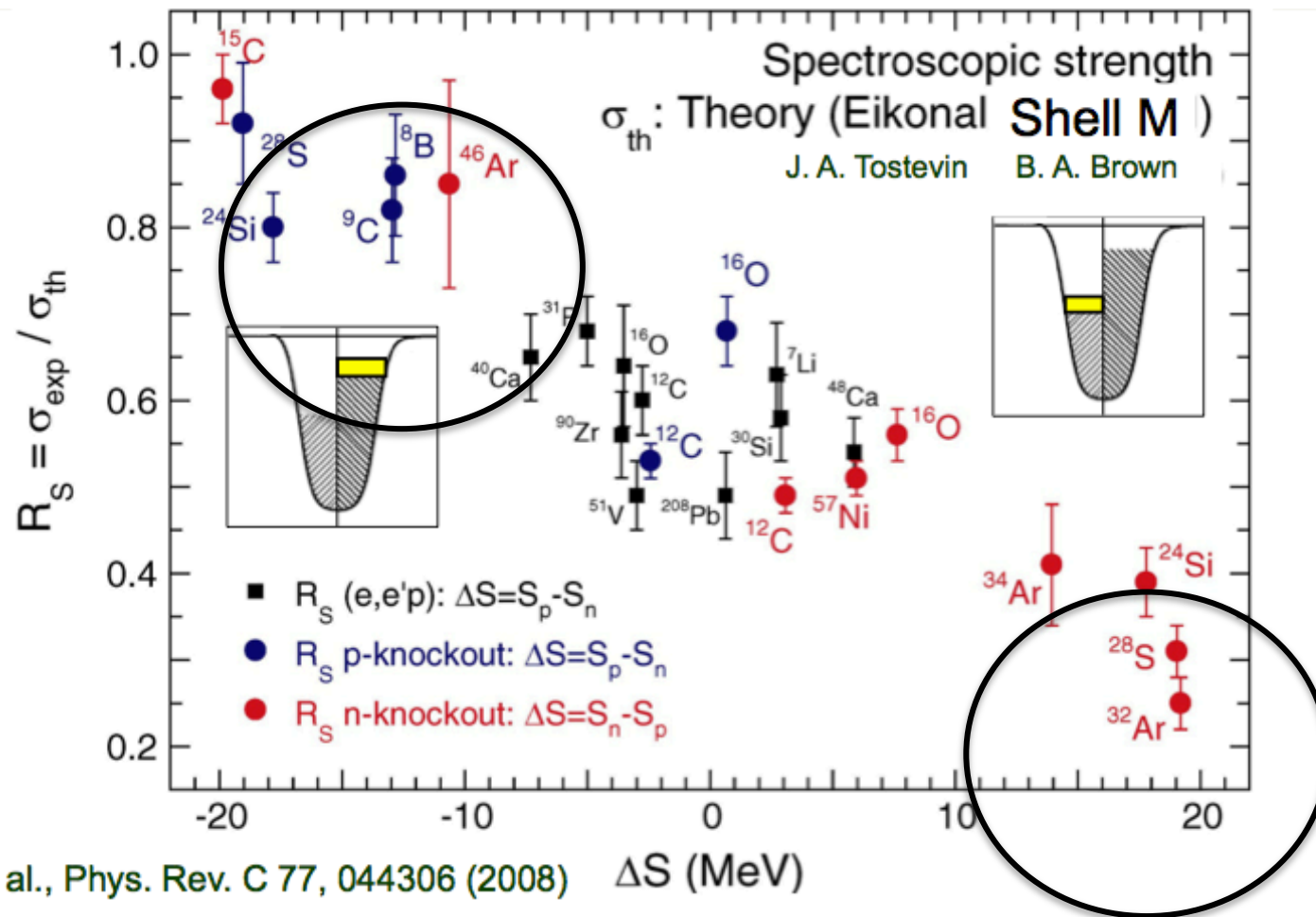


- Découverte d'un nouvel état dans l' ^{12}O (non lié)
- Disparition de la fermeture de couche $Z = 8$



LIMITE DES METHODES DE CASSURE

faiblement lié

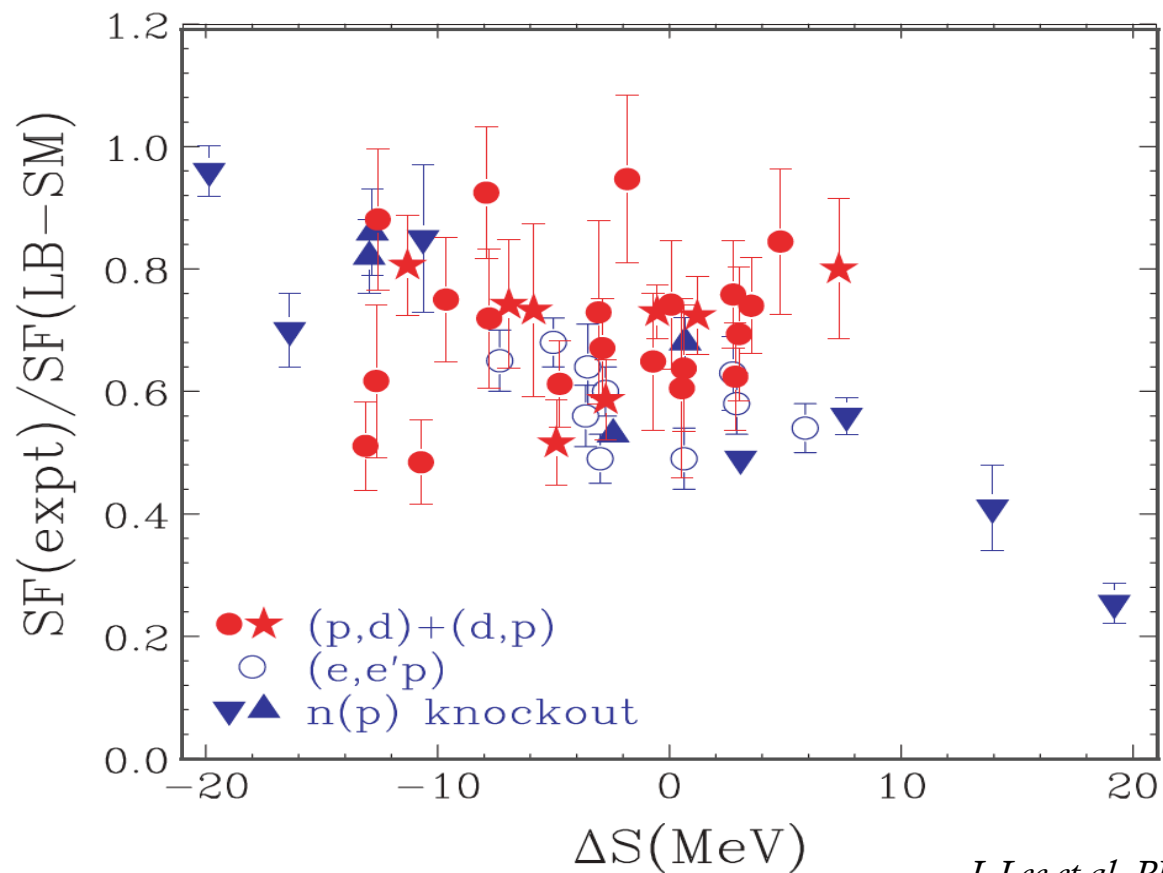


A. Gade et al., Phys. Rev. C 77, 044306 (2008)

très lié (au fond du puits)

ET POUR LES RÉACTIONS DE TRANSFERT ?

No quenching effect for transfer reactions

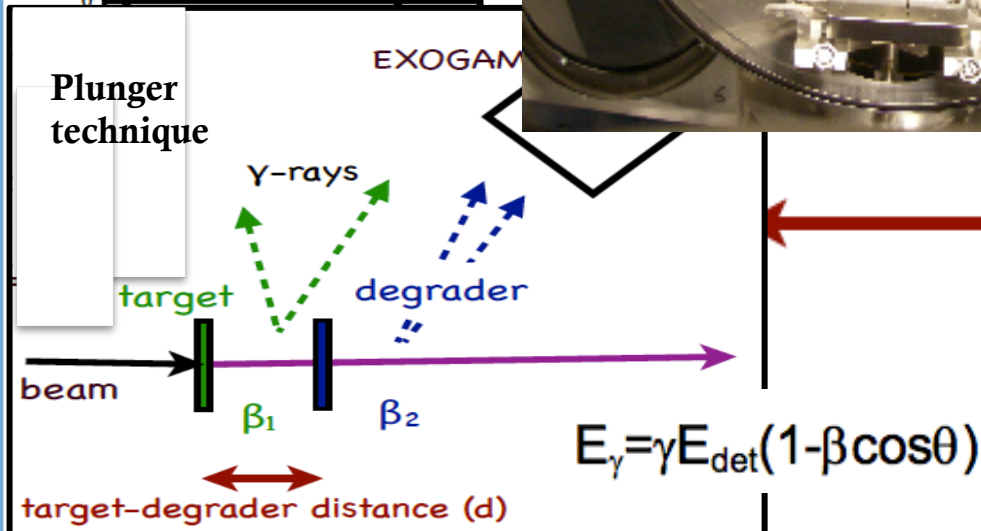
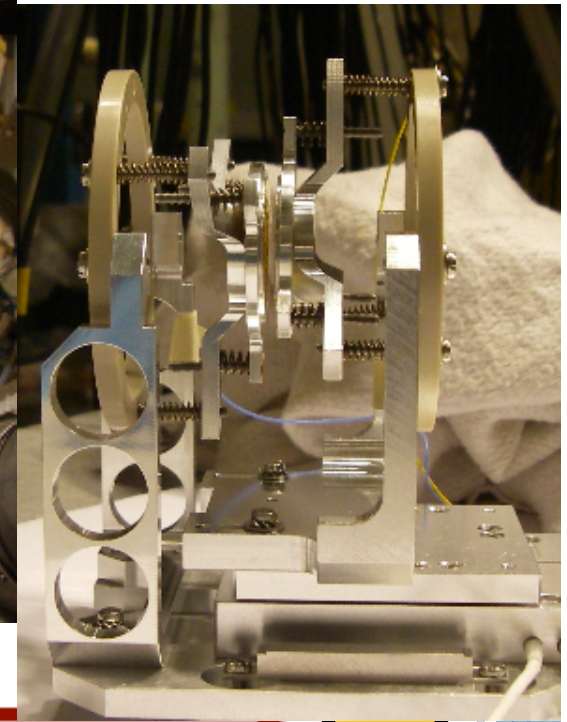
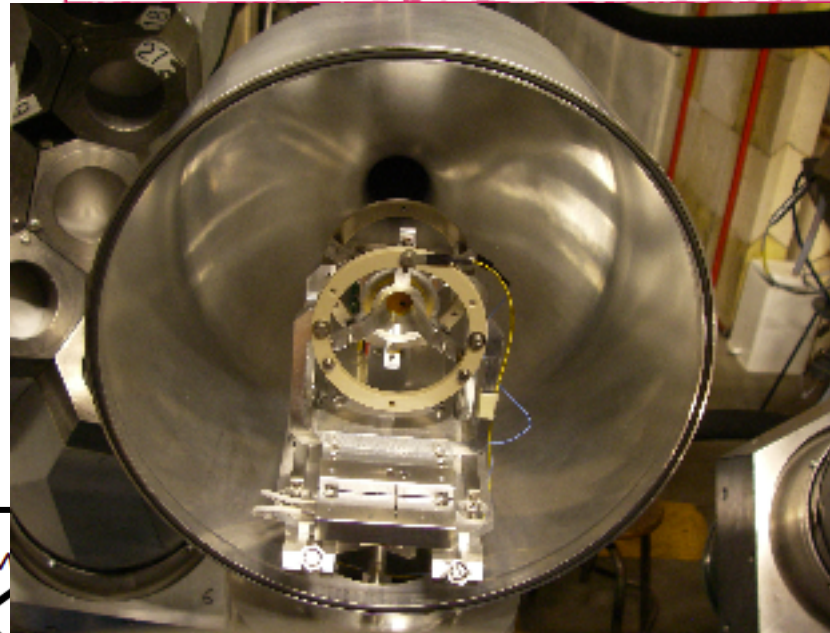
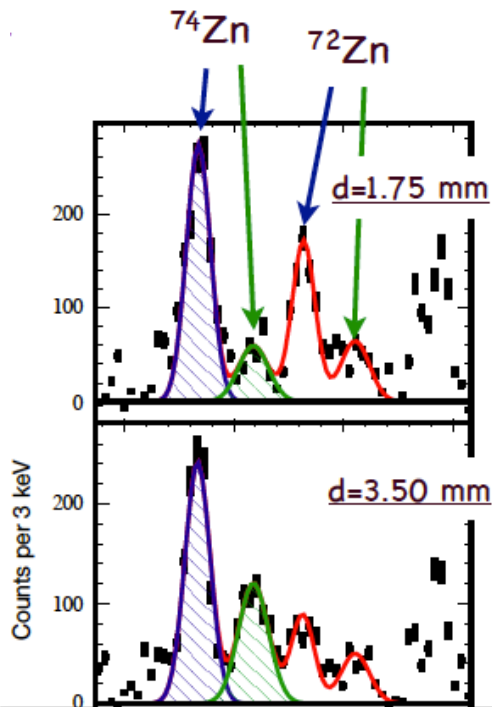


J. Lee et al, PRC (2006)

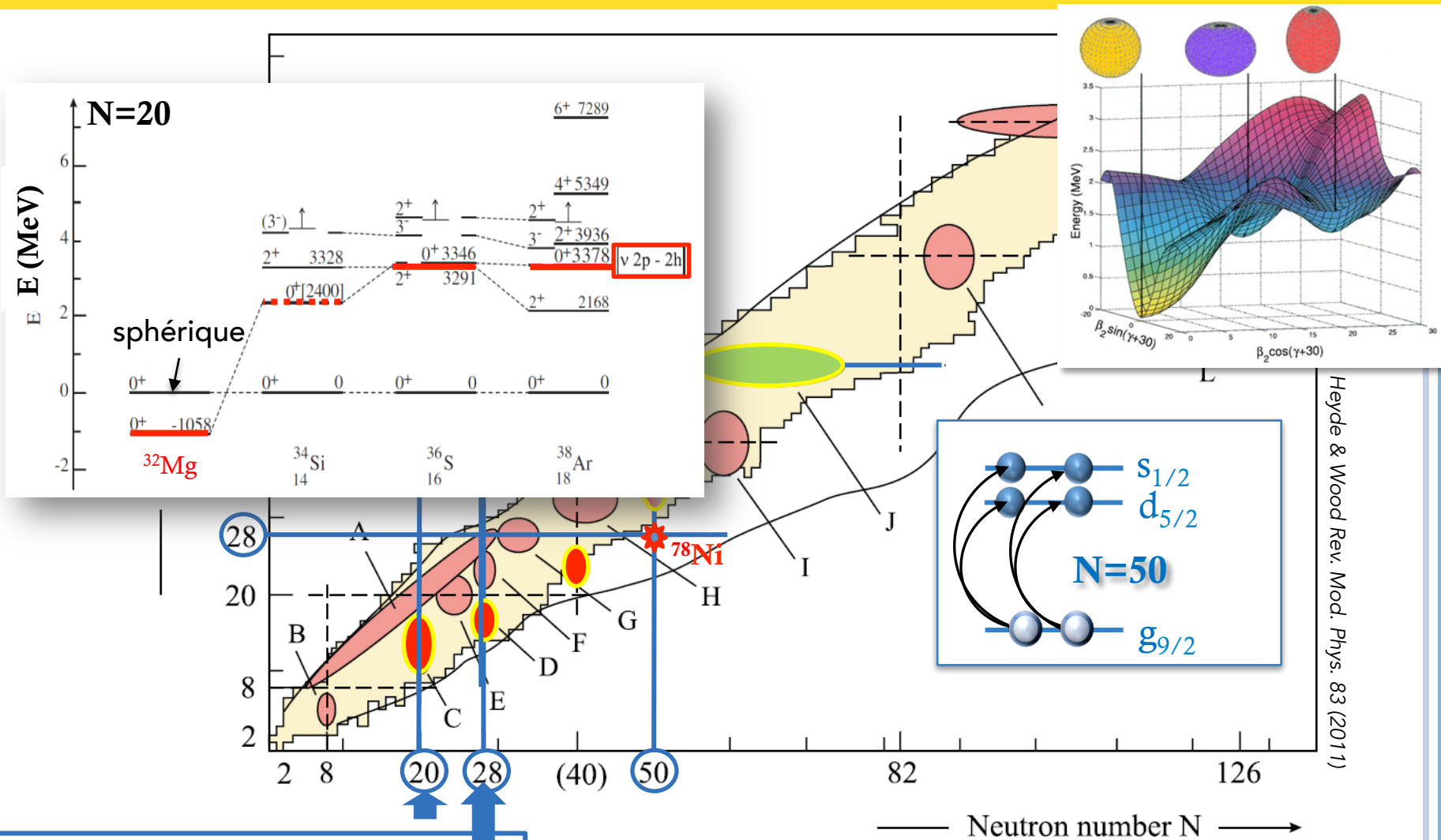
En route vers le ^{78}Ni

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

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



LES ÉTATS INTRUS DANS LES NOYAUX ET LA DISPARITION DES EFFETS DE COUCHE

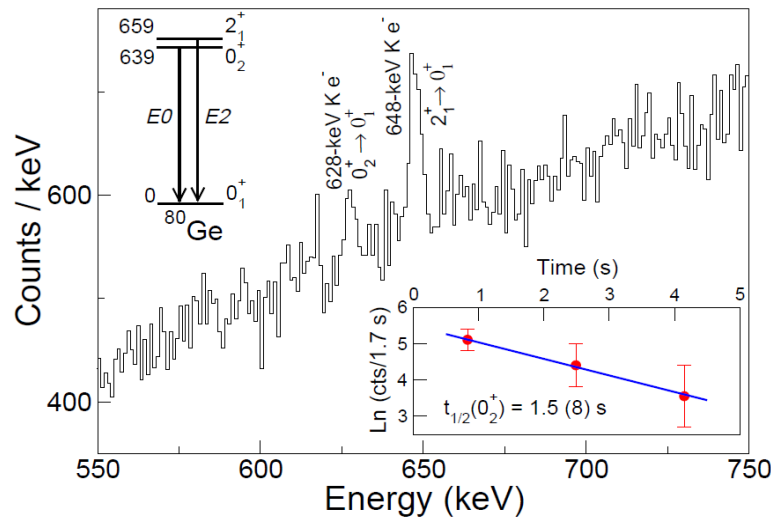
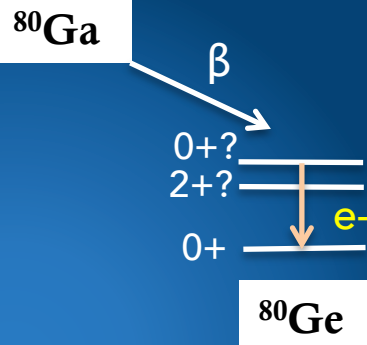
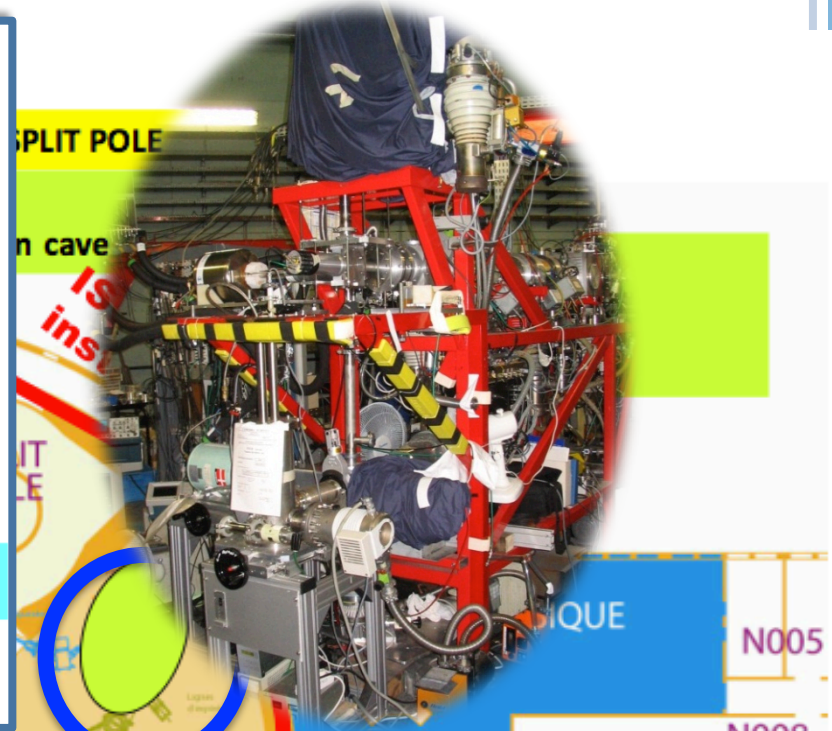
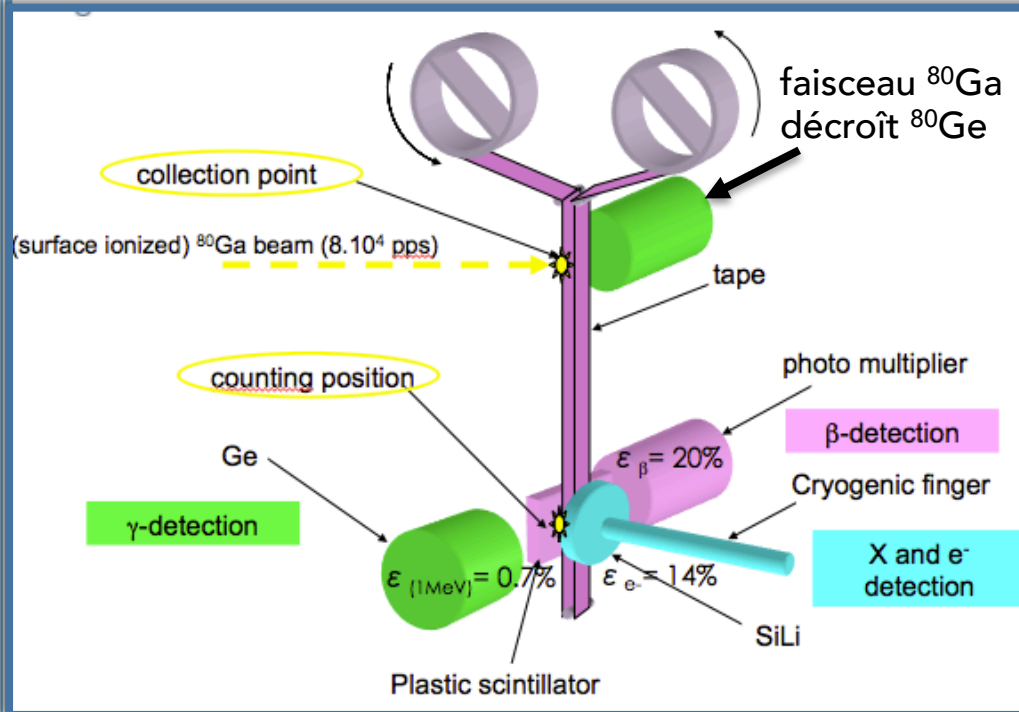


Heyde & Wood Rev. Mod. Phys. 83 (2011)

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

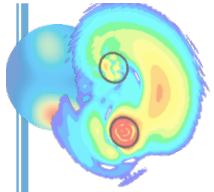
$N=28$ (^{42}Si region)
 Bastin PRL 99 022503 (2007)

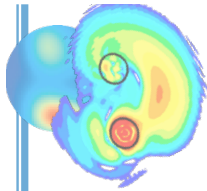
Beta-decay spectroscopy around N=50 @ ALTO



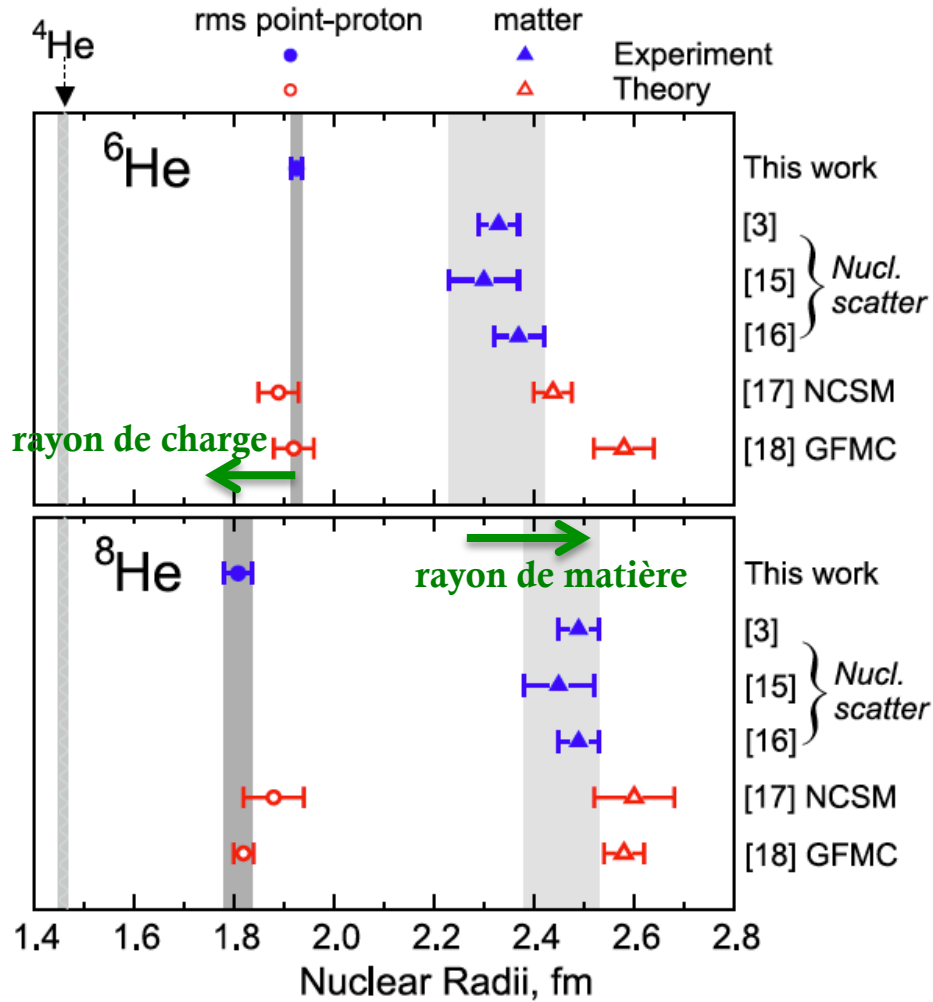
Première mise en évidence d'une coexistence de forme dans la région du ^{78}Ni .

Stable beam without spectrometer

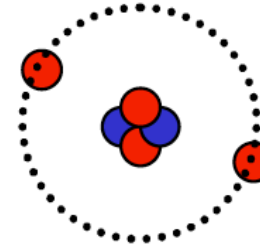




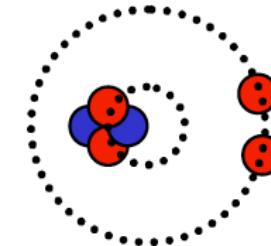
CHARGE RADIUS MEASUREMENTS



spherically distributed neutrons

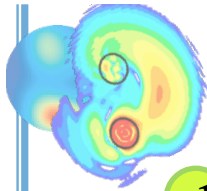


correlated neutrons



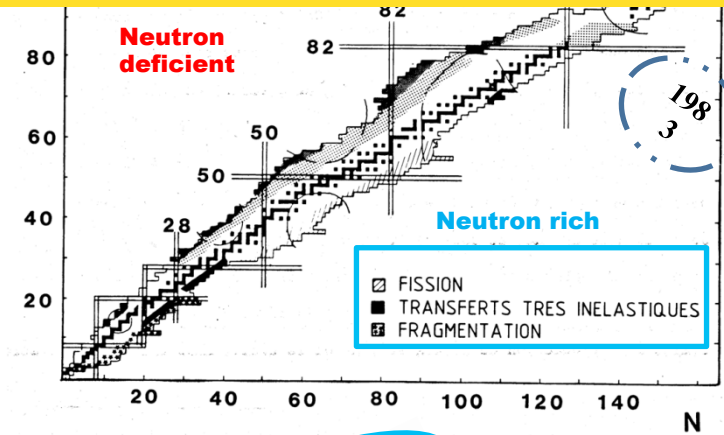
From ${}^6\text{He}$ to ${}^8\text{He}$

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

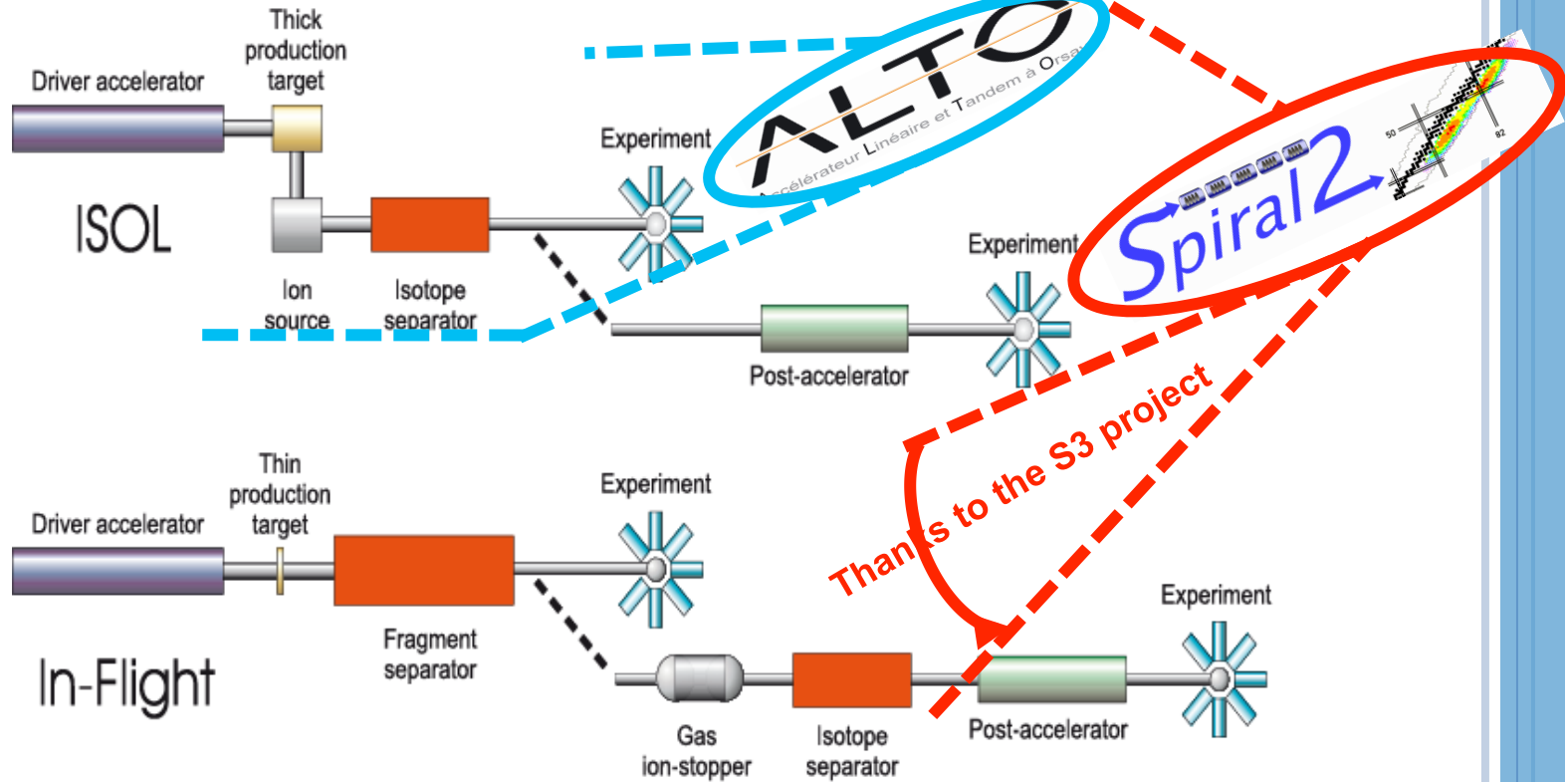


COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX EXOTIQUES ?

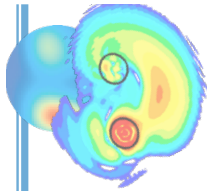
1 Choisir le bon mécanisme de réaction



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

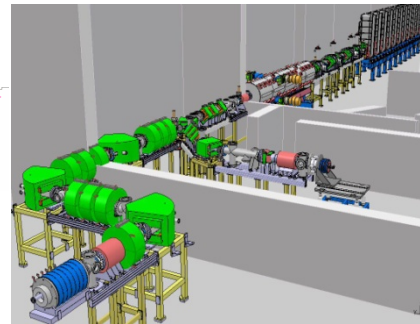
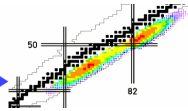
Isotopic
Separation
On Line

ALTO
Accélérateur Linéaire et Tandem à Orsay



Electrons 10 μ A 50 MeV

Spiral2

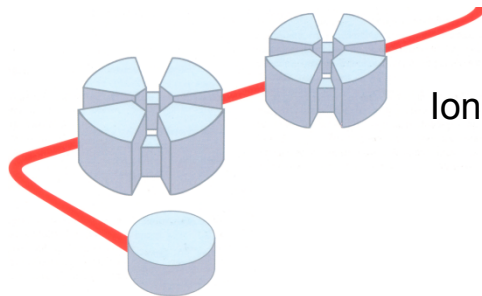


LINAG : ions
légers
grande
intensité
(qq mA !)

Driver accelerator

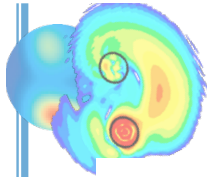


In-Flight

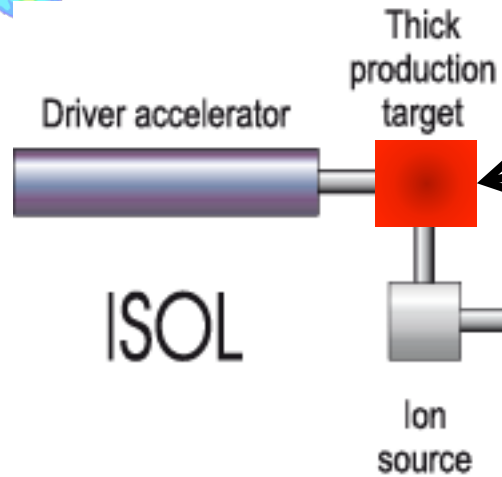


2 cyclotrons CSS1 and CSS2
Ions lourds 50-100 AMeV ("énergie intermédiaire")

GANIL
GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS



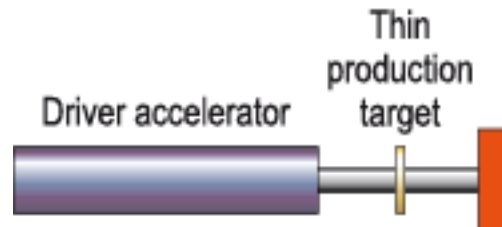
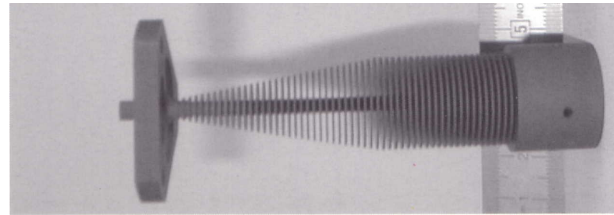
COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX ?



thermalisation

Produits de réaction arrêtés dans la cible

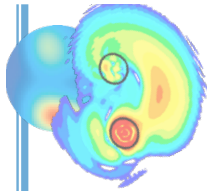
Ex Cible en forme d'arbre de Noël à SPIRAL1-GANIL



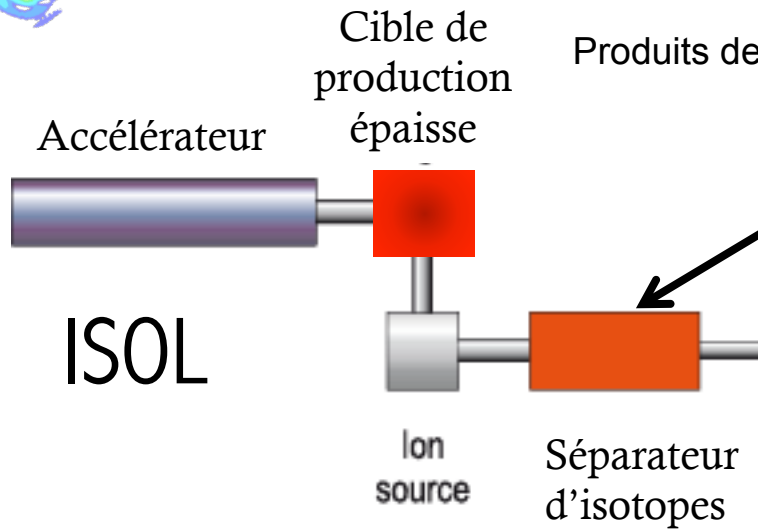
Pas de thermalisation

Ex : cible de production de LISE





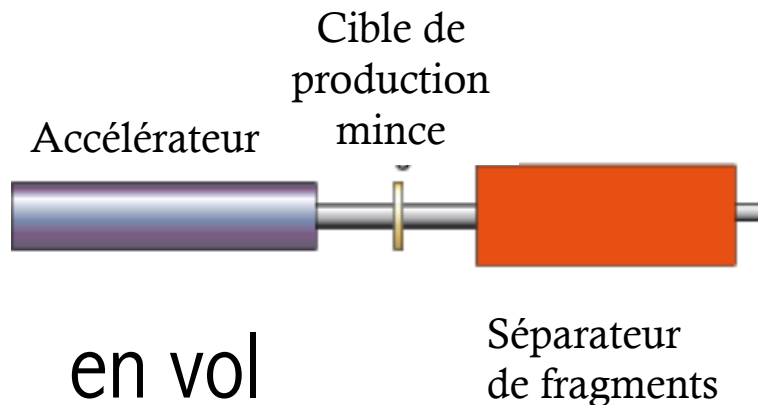
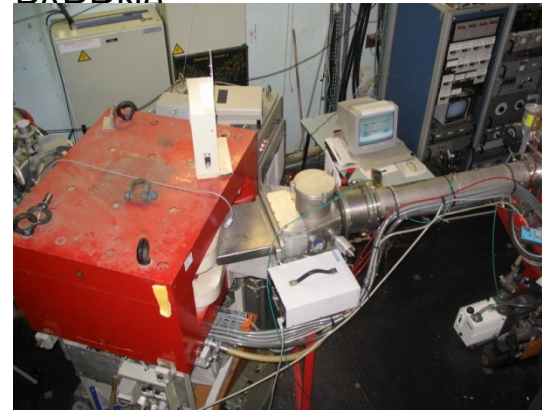
COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX ?



Produits de réaction arrêtés dans la cible et neutralisés

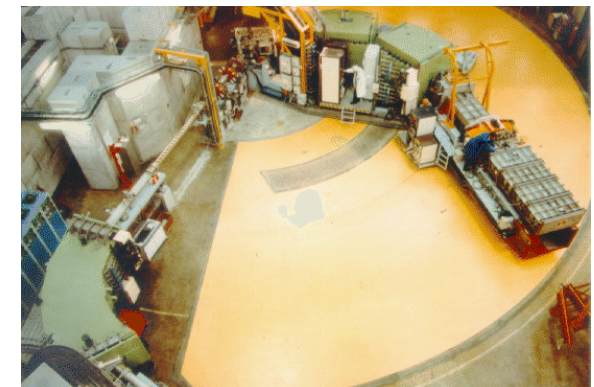
separation

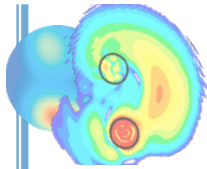
séparateur de masse
DAPDN



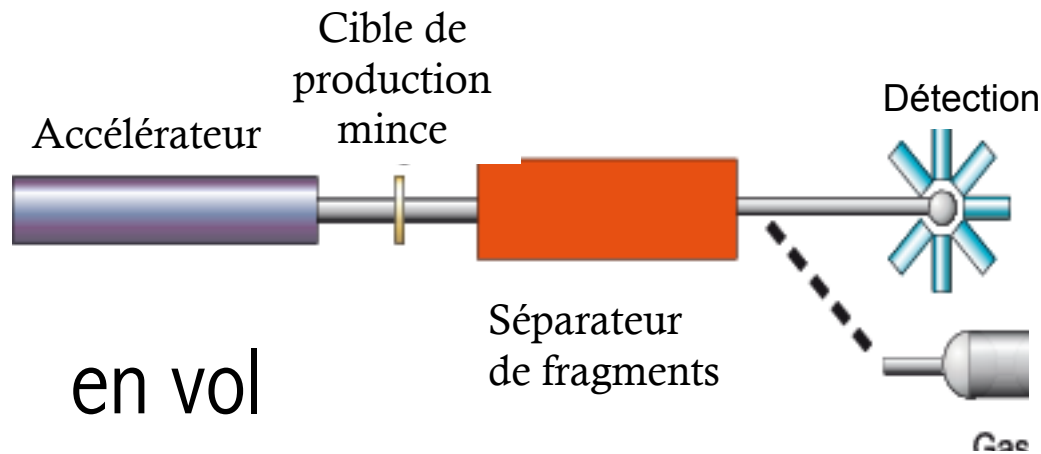
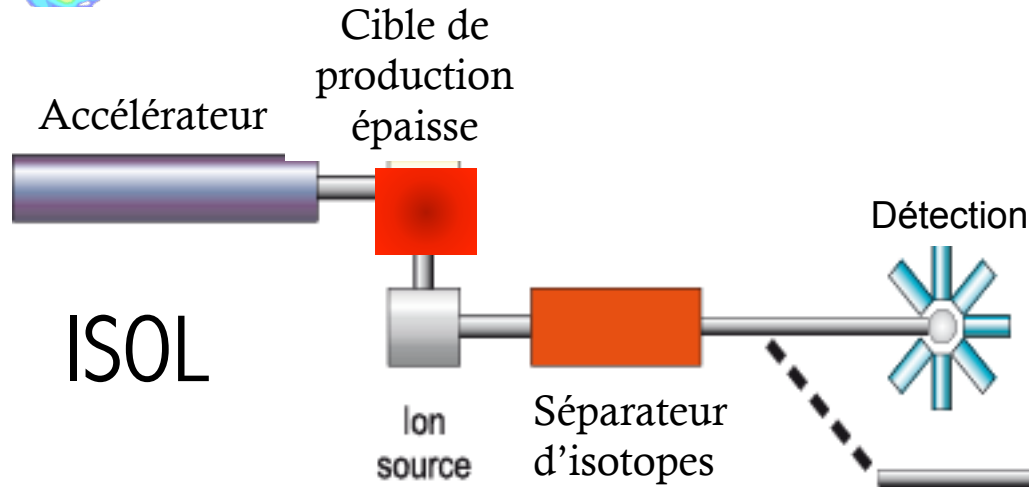
identification

Ex : LISE, SPEG,  VAMOS
VARIABLE MODE SPECTROMETER





COMMENT PRODUIRE LES NOYAUX ?



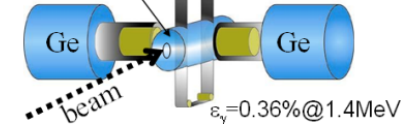
Détection

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

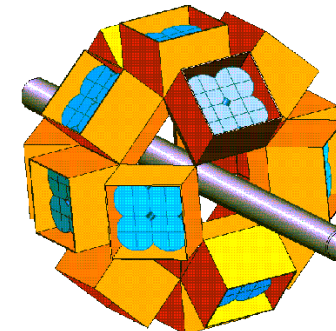


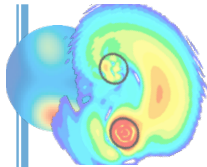
4 π plastic
scintillator

Mylar
tape

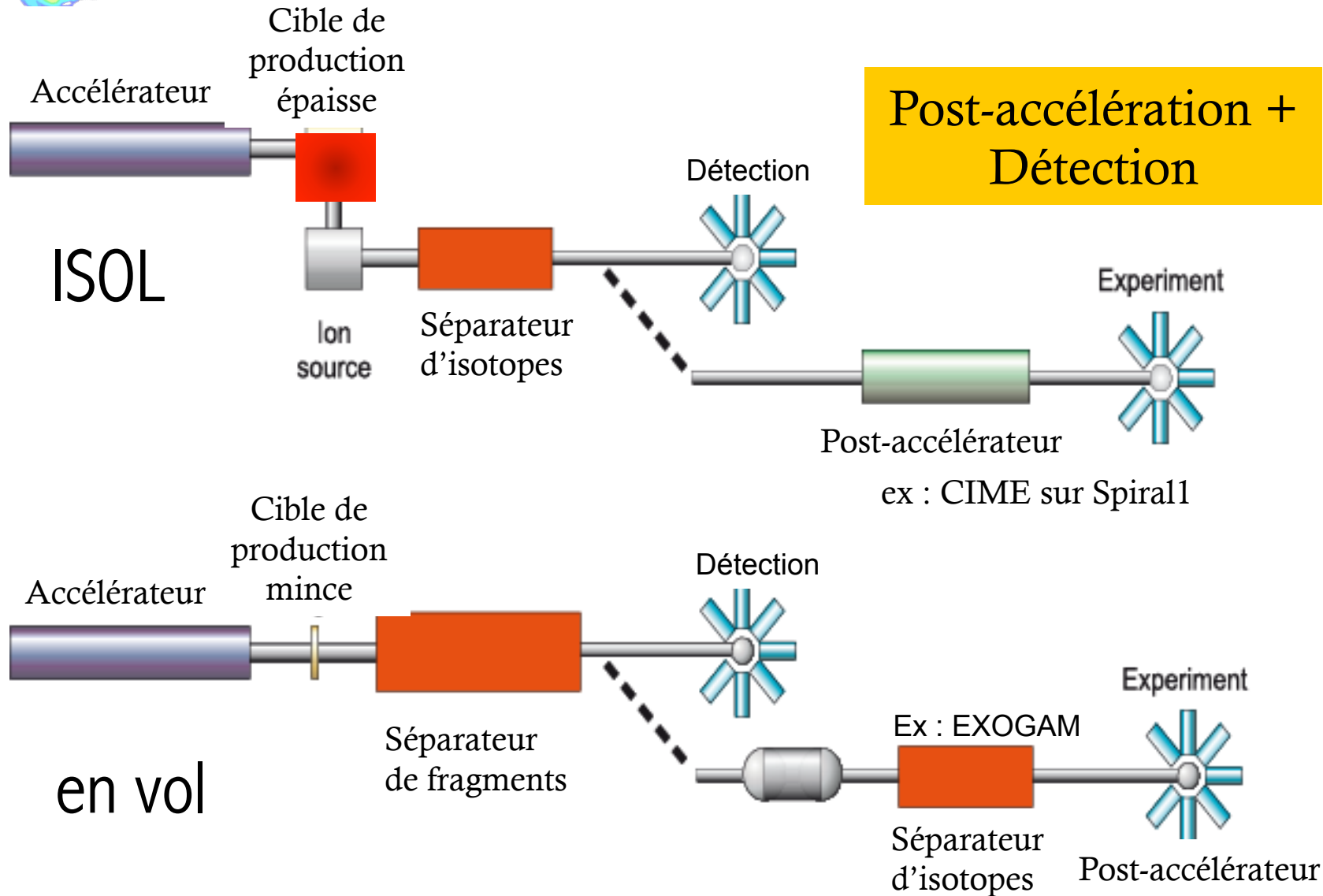


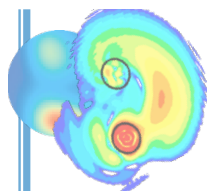
Ex : EXOGAM



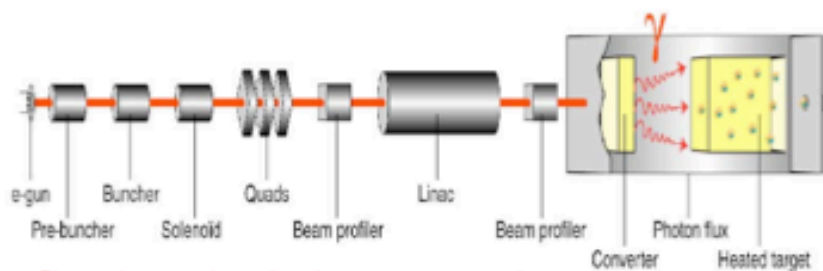


COMMENT PRODUIRE LES NOYAUX ACCÉLÉRÉS?





FISSION INDUITE PAR PHOTONS



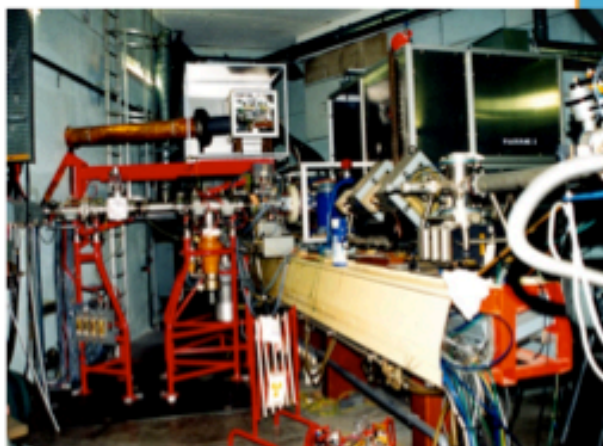
ALTO

**fission induite par photons
(photofission)**

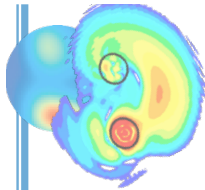
Caractéristiques faisceau :

Energie électrons : 10-50 MeV

Intensité : 10 μ A



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



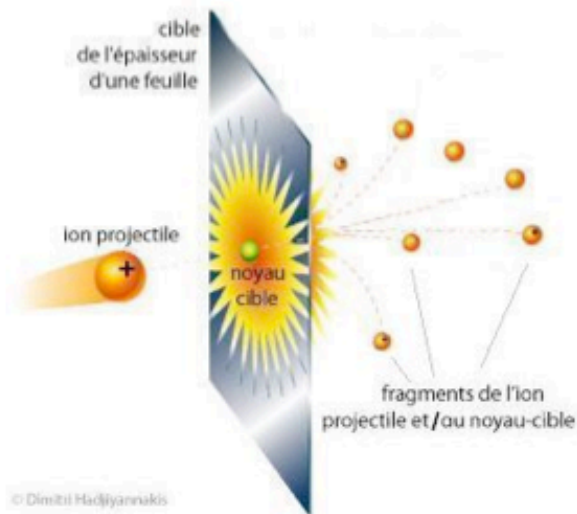
PRINCIPE DE LA FRAGMENTATION

ion léger + haute énergie que fusion-évaporation : qqs dizaine MeV/u au GeV

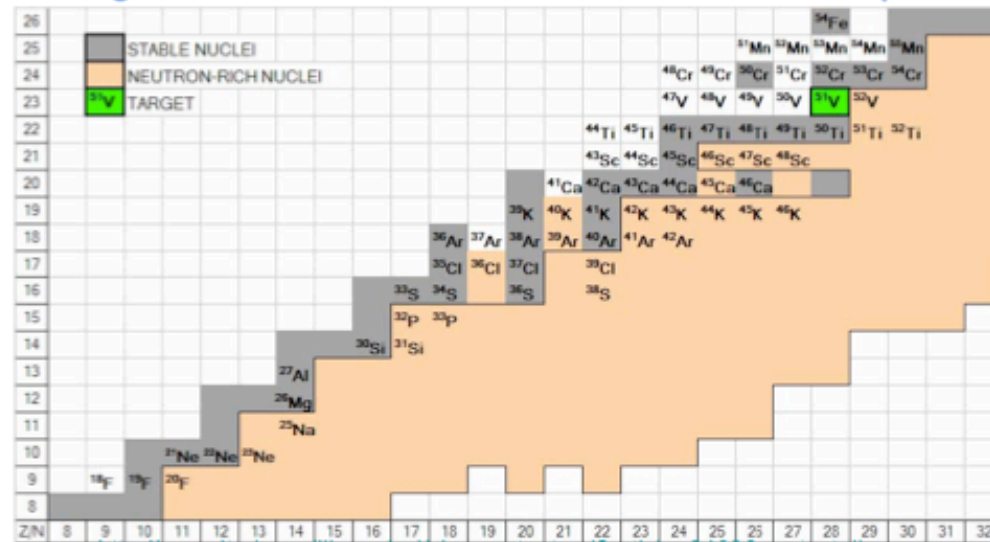
⇒ $E_{\text{faisceau}}/A > B/A$ (énergie de liaison moyenne par nucléon ~ 8 MeV)

⇔ pas de noyau composé : on erode la structure quantique,

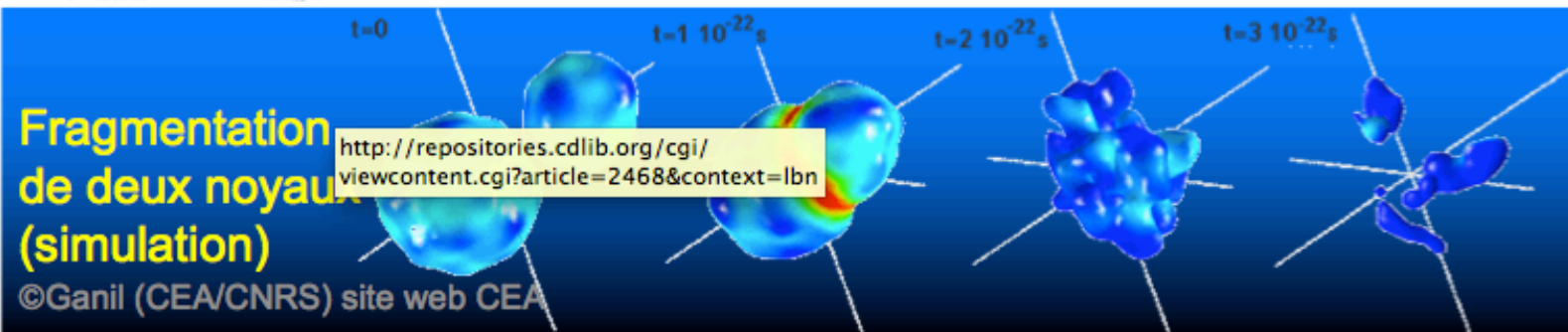
“chauffe” le noyau



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



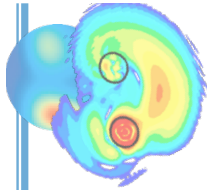
<http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=2468&context=lbn>



Fragmentation
de deux noyaux
(simulation)

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

©Ganil (CEA/CNRS) site web CEA



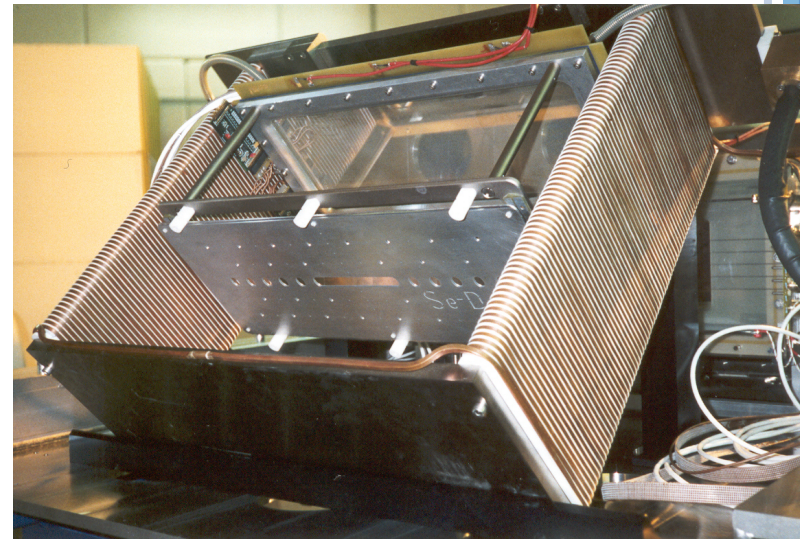
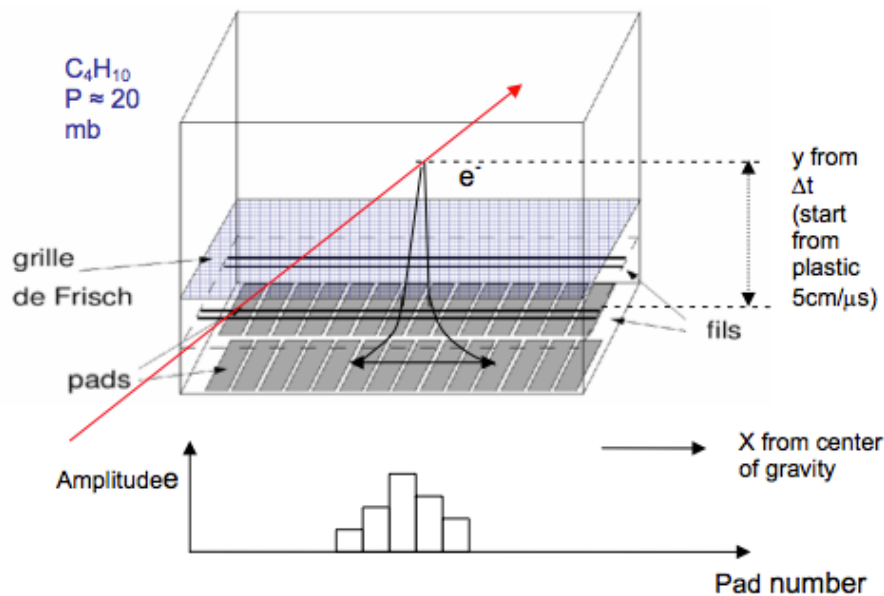
NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

- 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%