

Comprendre le noyau



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

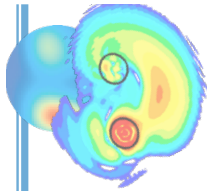
- I. Les échelles de la physique nucléaire et comment voir le noyau ?
- II. La « glue » du noyau et ses conséquences
- III. Ça pèse combien un noyau ? Masse et énergie de liaison
- IV. Les noyaux instables. Combien y en a ? Comment on les fabrique ?

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

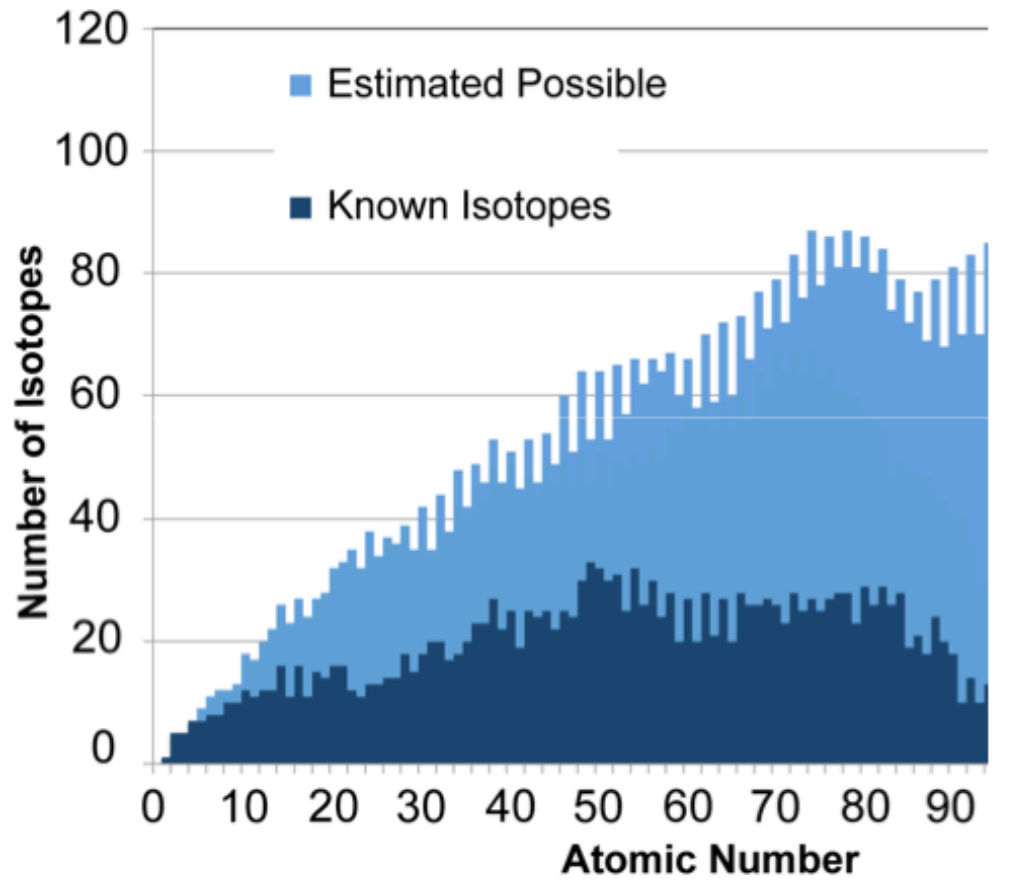
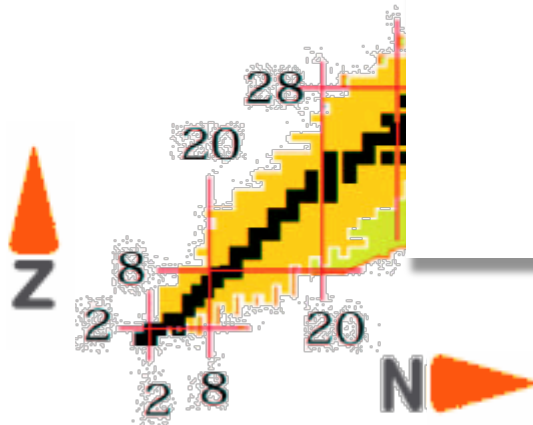
- I. Comment on étudie les noyaux ?
- II. Comment on fabrique les noyaux pour les étudier ?
- III. Les réactions directes
- IV. Bonus : astrophysique nucléaire

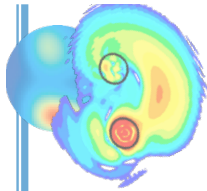


LA COURSE VERS L'EXOTISME



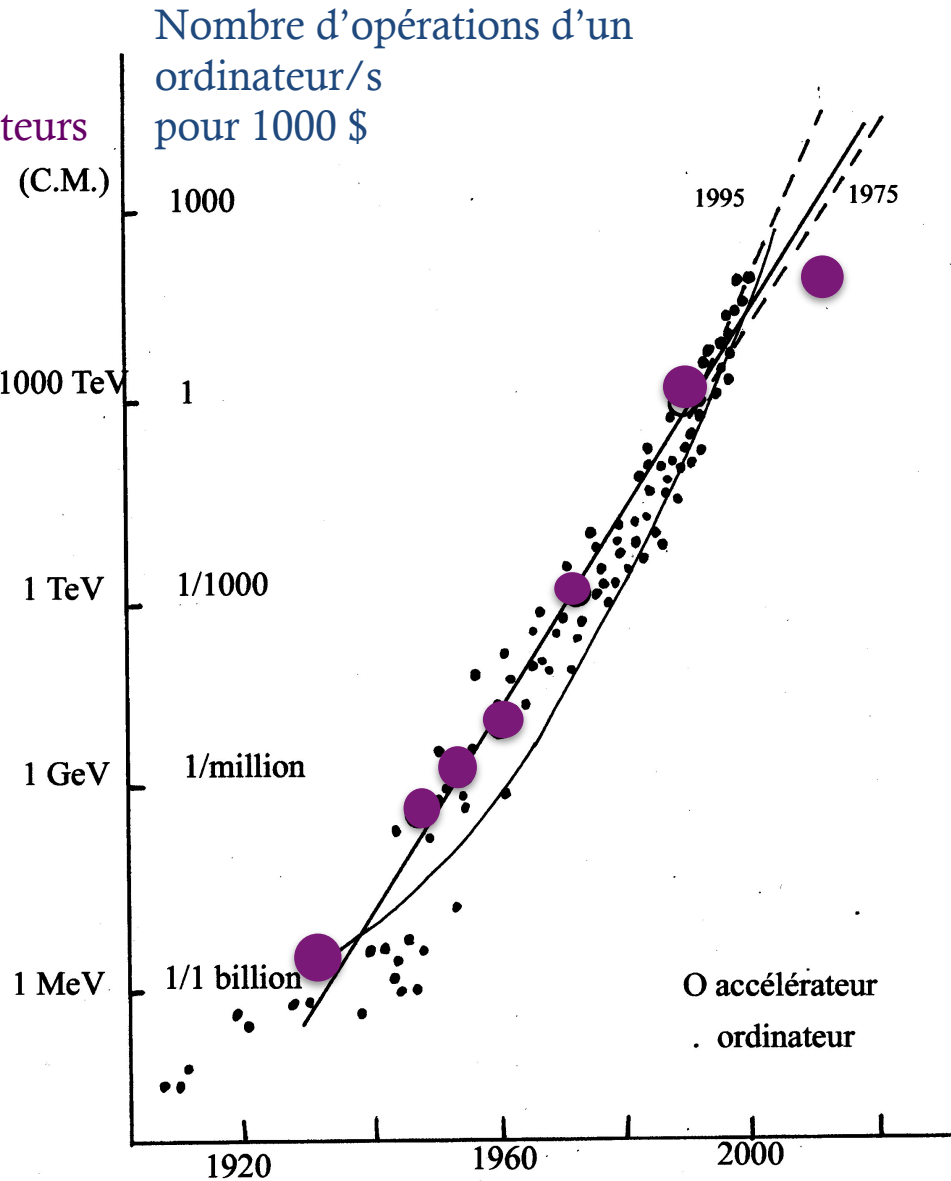
ric
dél





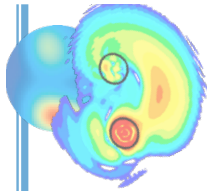
QUELS PROGRÈS EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE POUR DEMAIN ?

Energie
accélérateurs

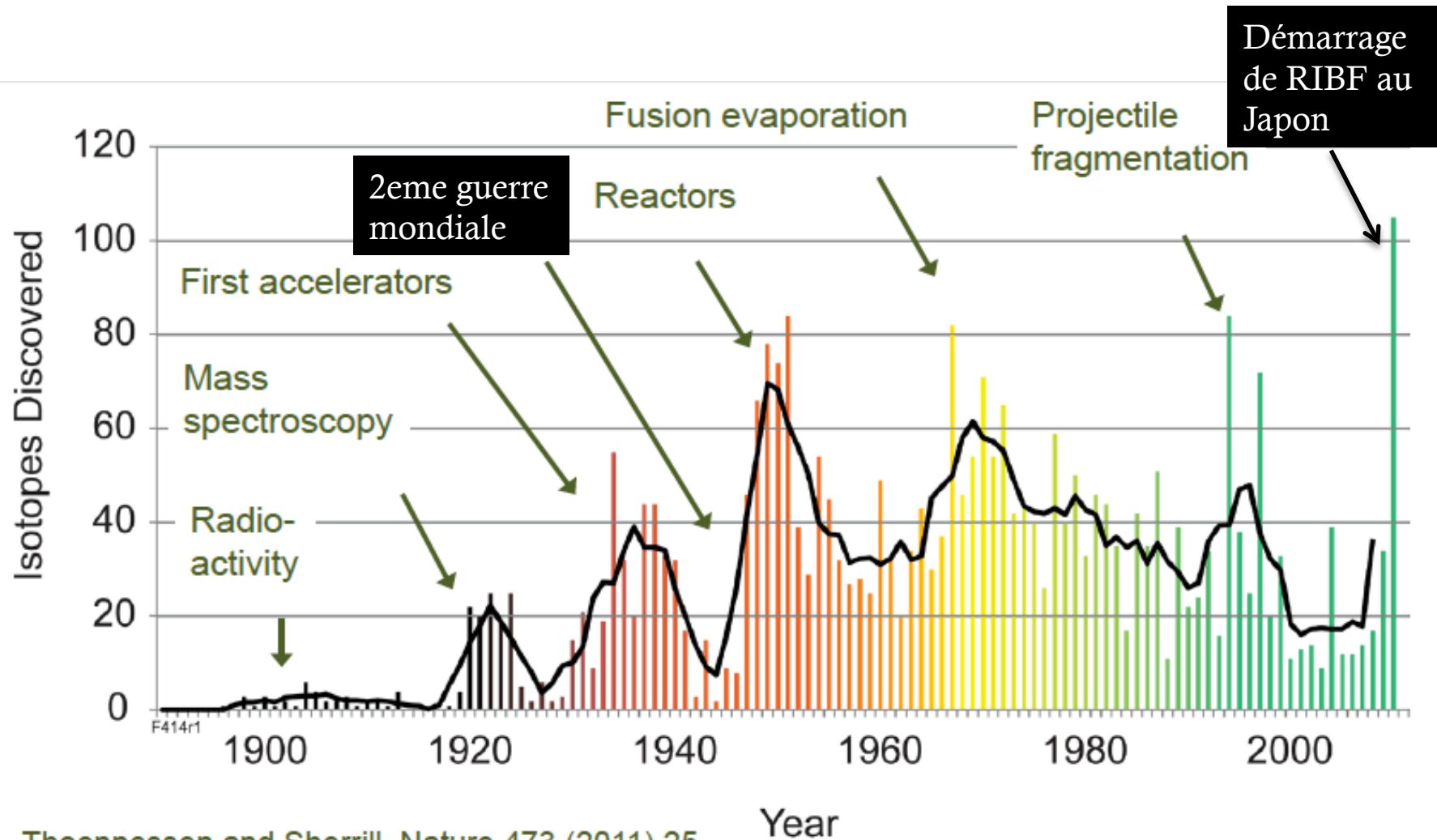


Courbe de Livingstone des
accélérateurs

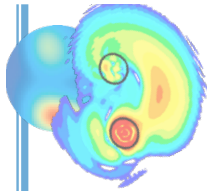
Loi de Moore pour les
ordinateurs (évolution de la
puissance des ordinateurs)



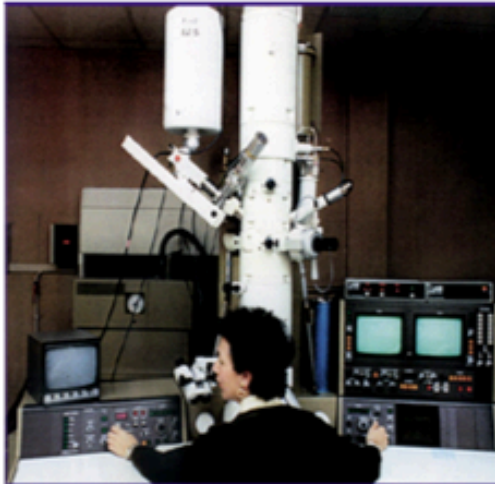
NOMBRE D'ISOTOPES DÉCOUVERTS



→ Il y a une difficulté ...

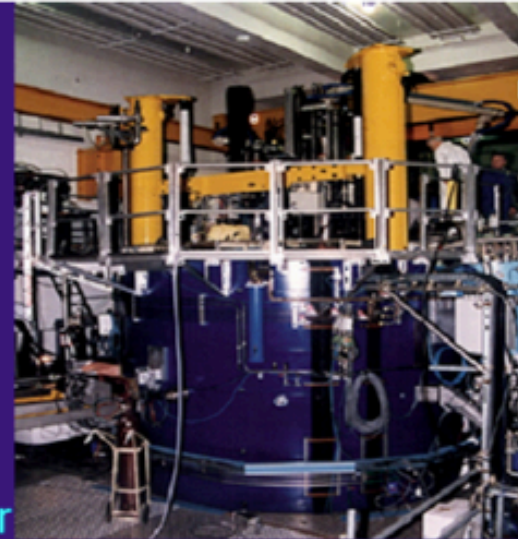
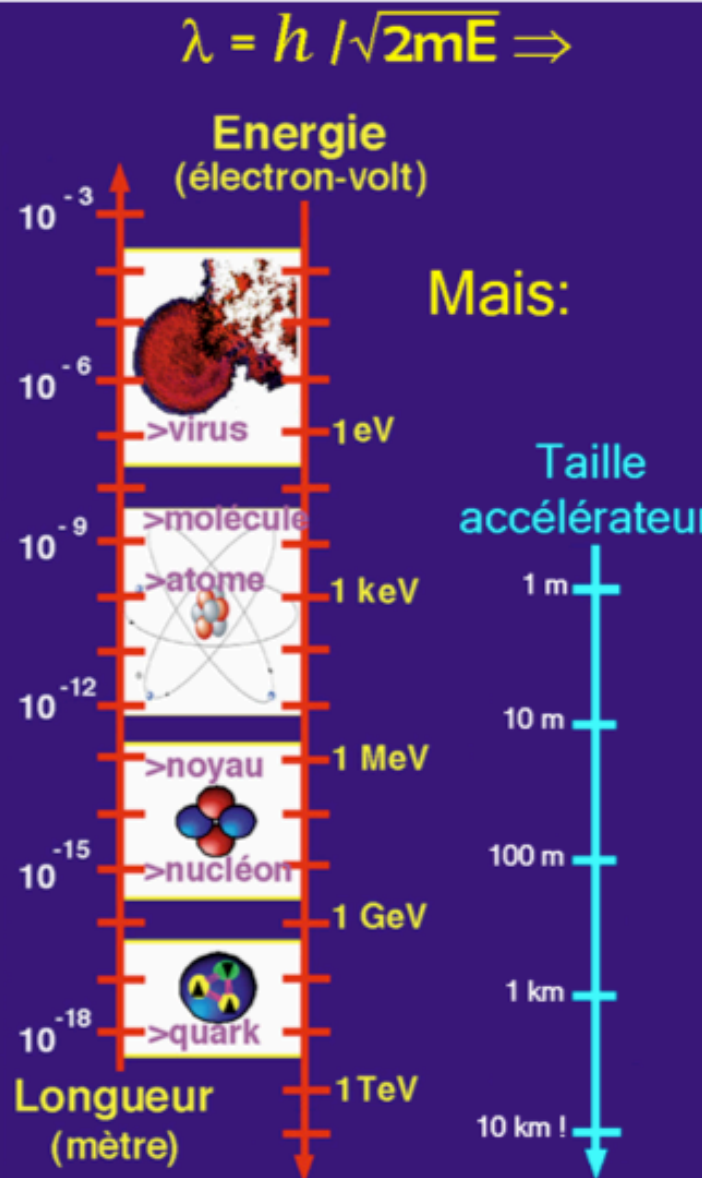


LA COURSE À L'ÉNERGIE



Microscope électronique

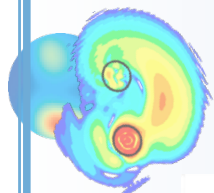
Accélérateur linéaire (SLAC)



Cyclotron (AGOR)

Synchrotron (LHC)





LA QUÊTE DE L'EXOTISME

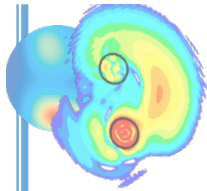
(I) LES ACCÉLÉRATEURS



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



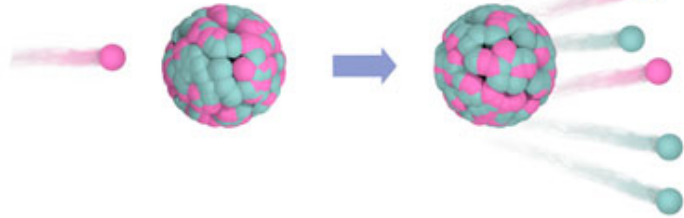
- ▶ **Les installations dans le monde**



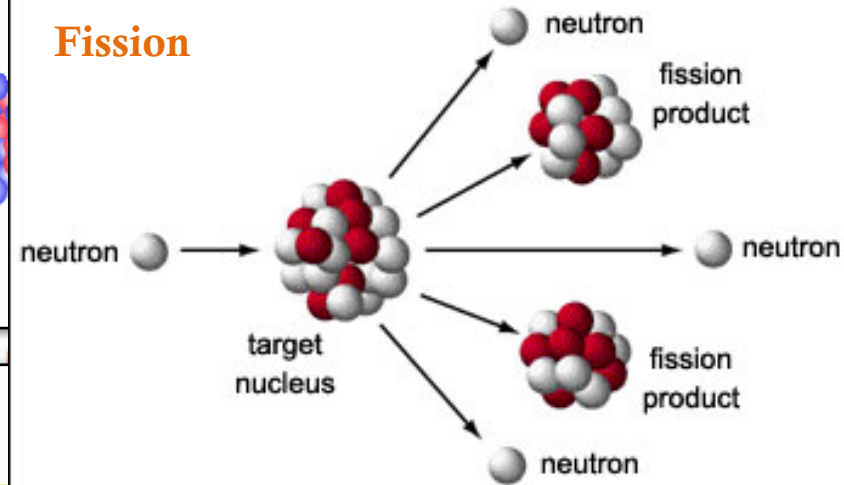
COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX EXOTIQUES ?

(I) CHOISIR LE BON MÉCANISME

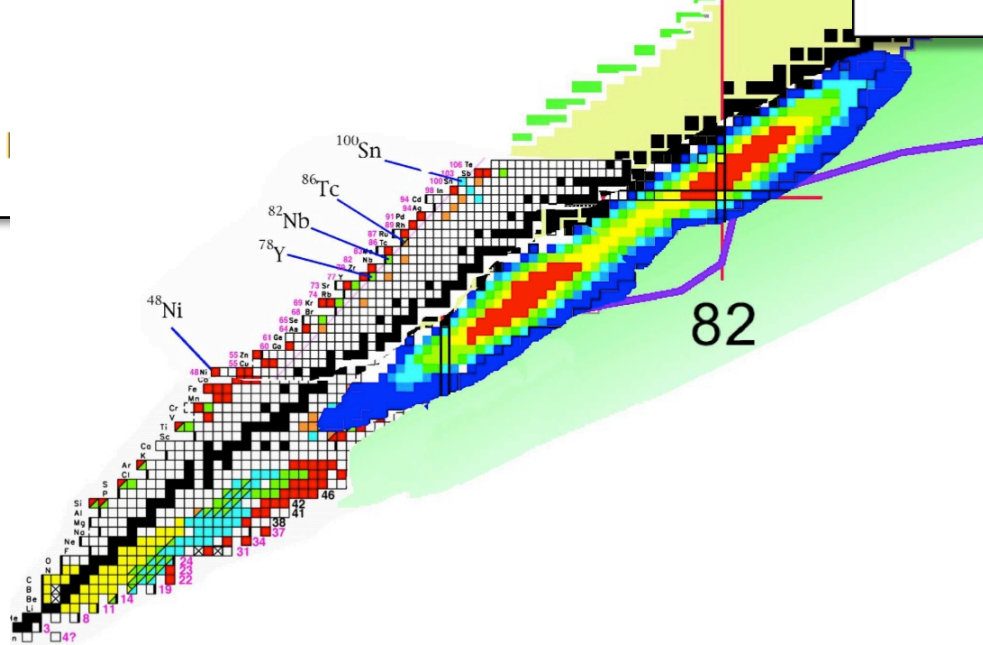
Spallation



Fission

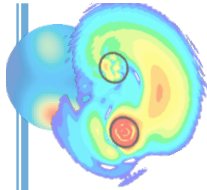


Fragmentation



- Heavy Ions
- Spallation
- Projectile Fragmentation

en neutrons



PRODUCTION DE FAISCEAUX RADIOACTIFS

► Méthode ISOL

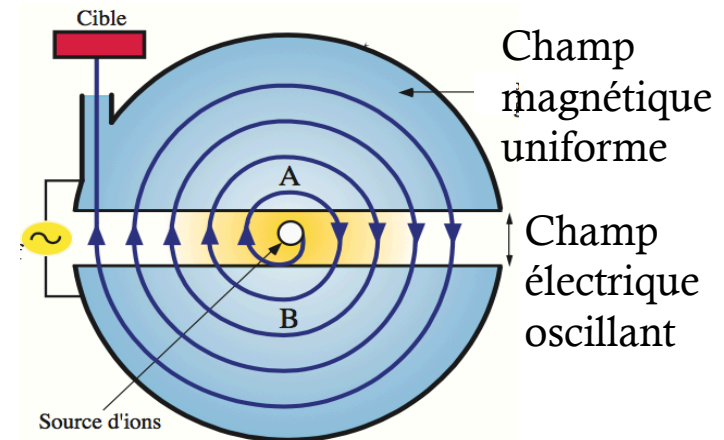
Accélérateur

► Méthode de fragmentation

Accélérateur

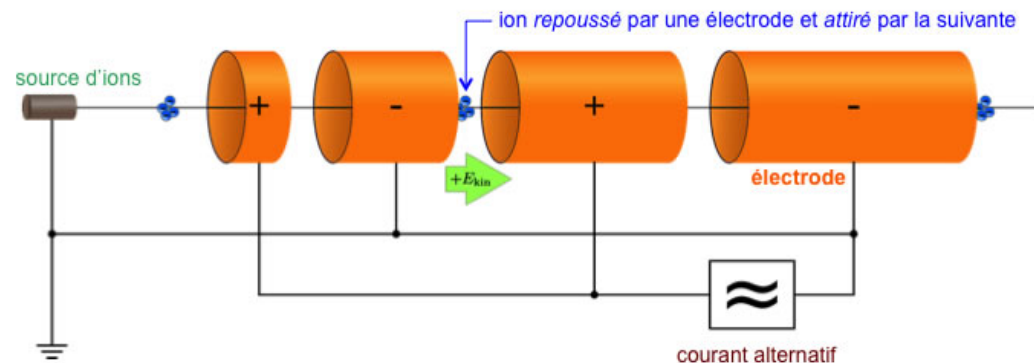
► Cyclotron, synchrocyclotron, synchrotron

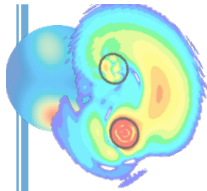
NSCL (E-U), GANIL (France), FAIR (Allemagne)
TRIUMF (Canada), RIKEN RIBF (Japon)



► Linac

FRIB (E-U), ATLAS – ANL (Argonne, E-U),
ALTO (Orsay), Spiral2 (GANIL, Caen)

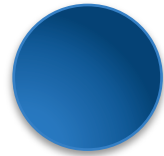




PRODUCTION DE FAISCEAUX RADIOACTIFS

► Méthode ISOL

faisceau



cible



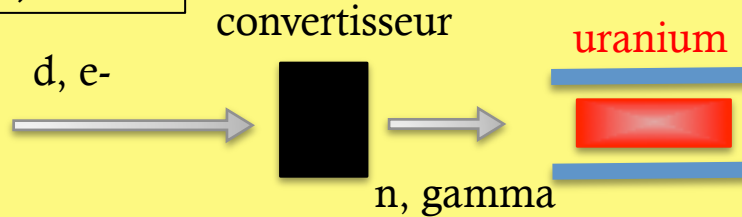
intensité
qualité optique des faisceaux
Energie bien définie



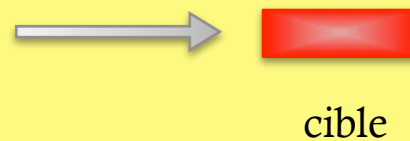
chimie
temps de vie minimum
post-accelération

► Méthode de fragmentation

Spiral2, ALTO



Spiral1, Spiral 2



Accélérateur

Primary beam

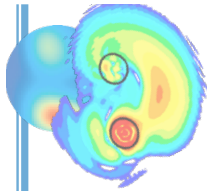
Thick & hot target

Ion source

Isotope separator

(Post-accelerator)

Radioactive
Ion beam



PRODUCTION DE FAISCEAUX RADIOACTIFS

► Méthode ISOL

faisceau



cible

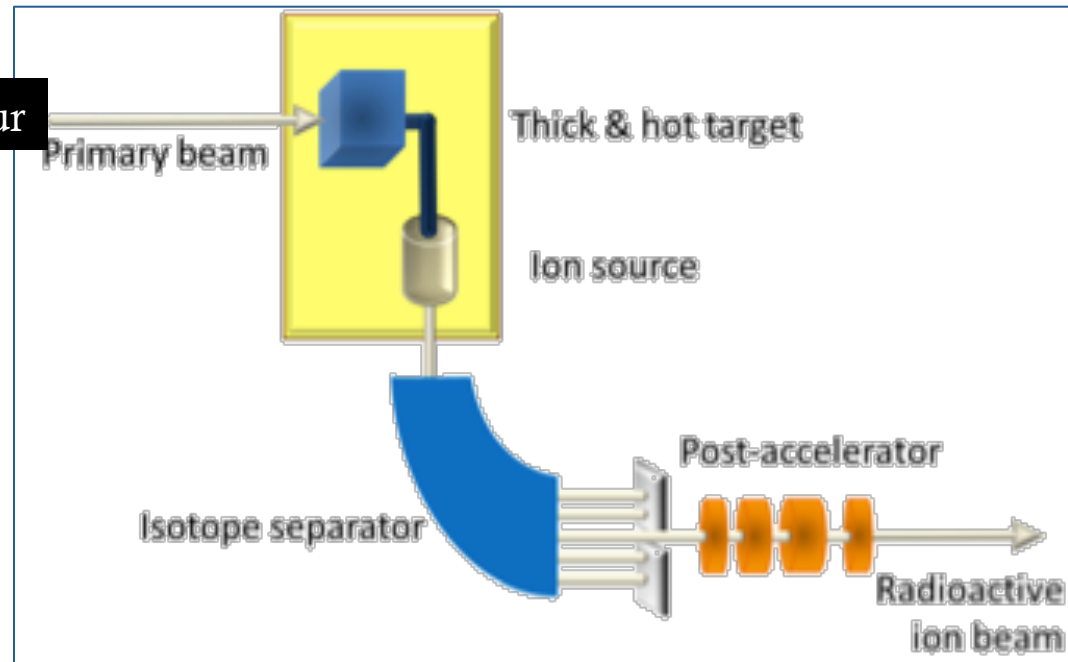
Accélérateur



intensité
qualité optique des faisceaux
Energie bien définie



chimie
temps de vie minimum
post-accelération



► Méthode de fragmentation

faisceau



cible

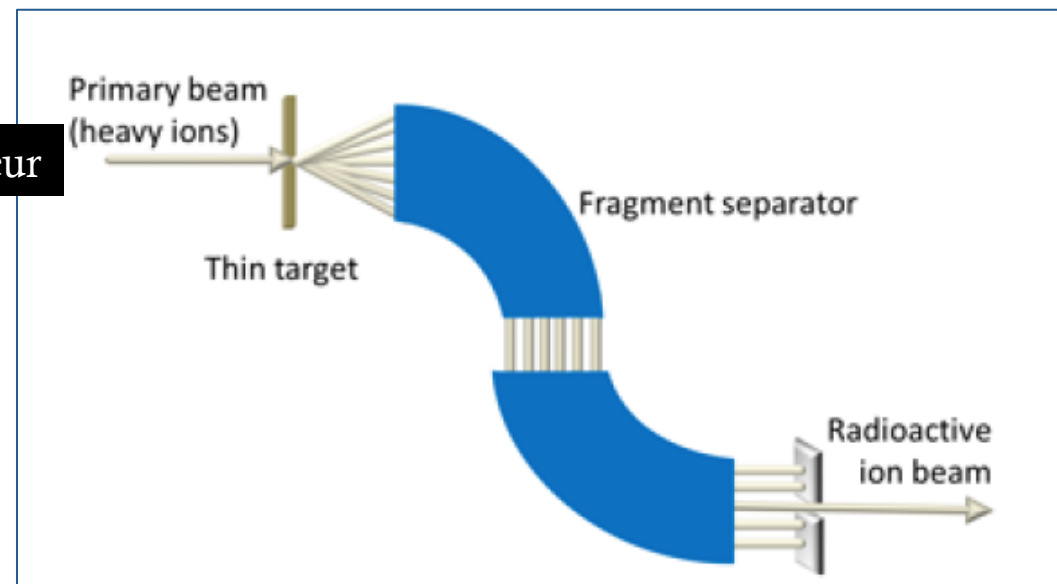
Accélérateur

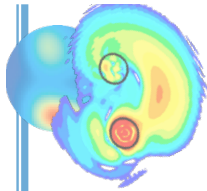


énergie \approx faisceau primaire
rapide, pas de chimie
cible production simple



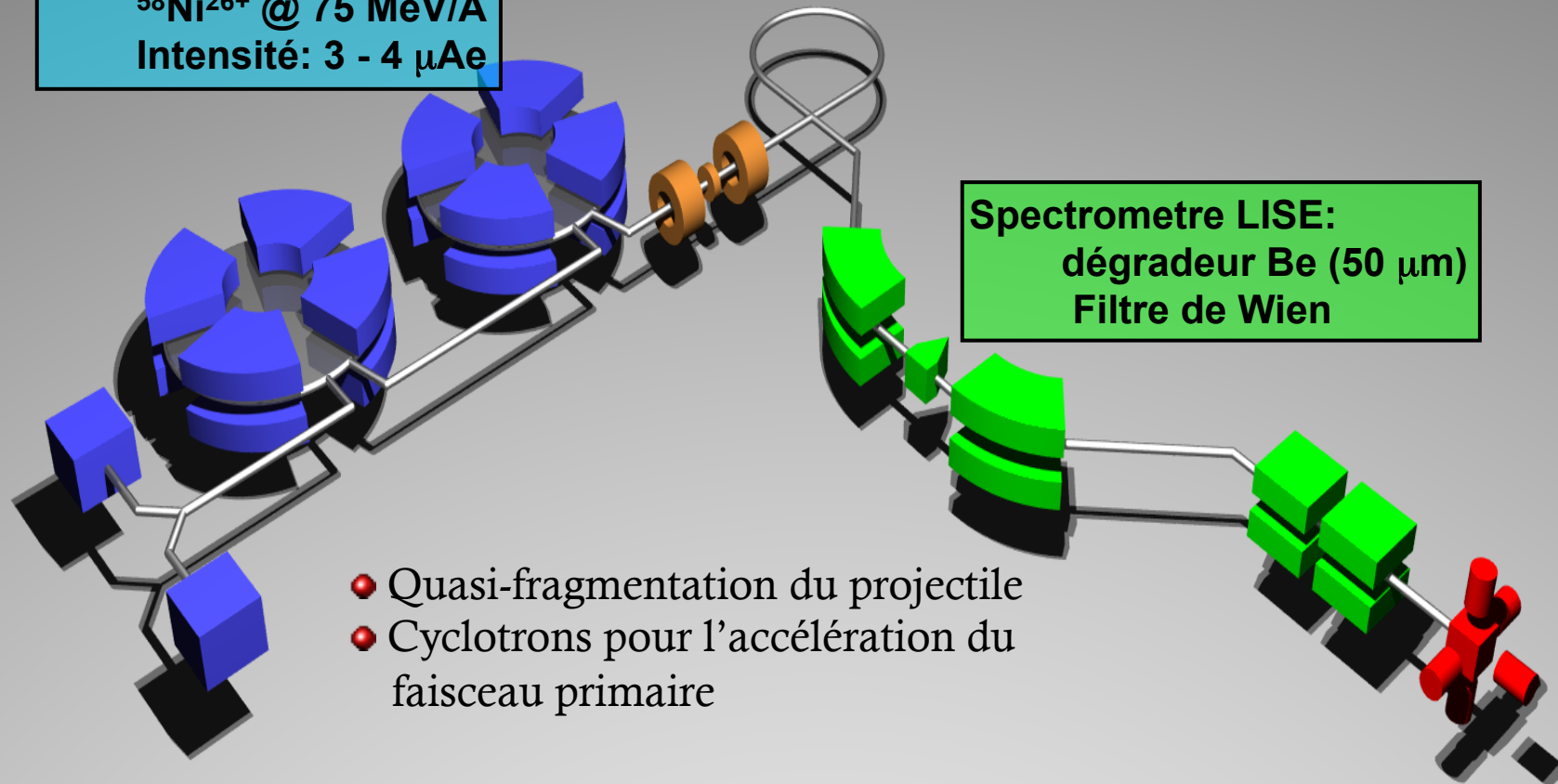
ralentir les faisceaux
sélectionner les noyaux





EXEMPLE DU GANIL (FRAGMENTATION EN VOL)

Faisceau primaire
 $^{58}\text{Ni}^{26+}$ @ 75 MeV/A
Intensité: 3 - 4 μAe

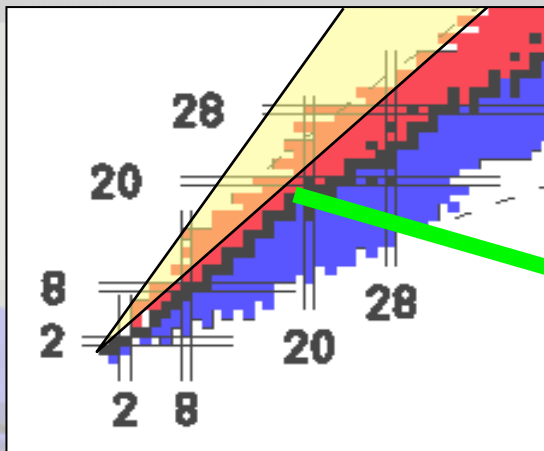


Spectrometre LISE:
dégradeur Be (50 μm)
Filtre de Wien

Système de détection

LE SPECTROMÈTRE LISE ET LA SÉLECTION DES NOYAUX

1^{er} dipole:
rigidité magnétique
 $B\rho = A \cdot v / Z$

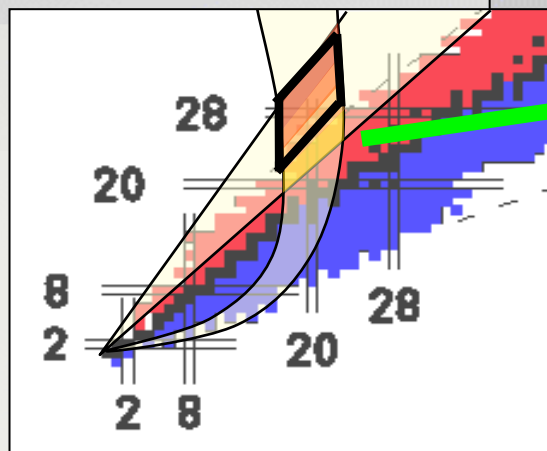
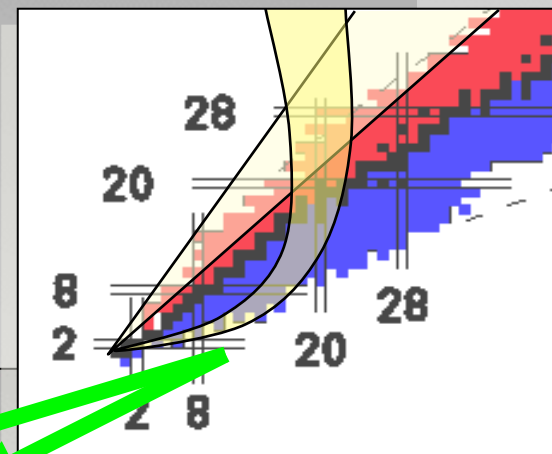


$$\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2}$$

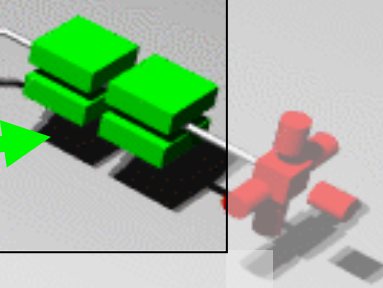
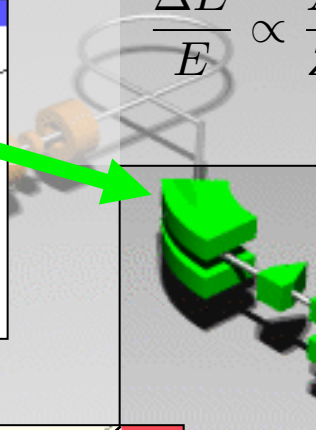
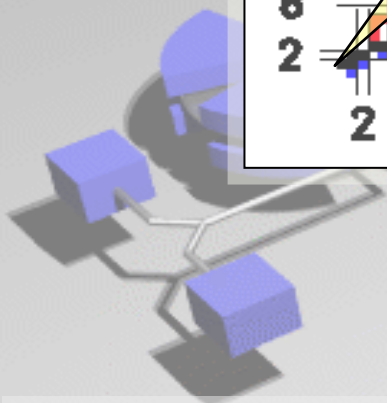
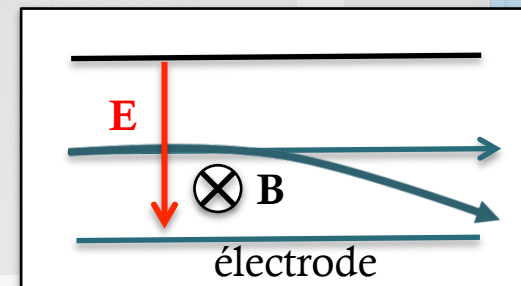
$$v \propto \frac{Z}{A}$$

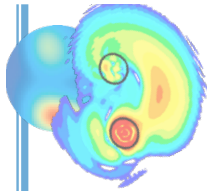
$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{A^3}{Z^2}$$

Degrader+ 2nd dipole:
 A^3 / Z^2 selection



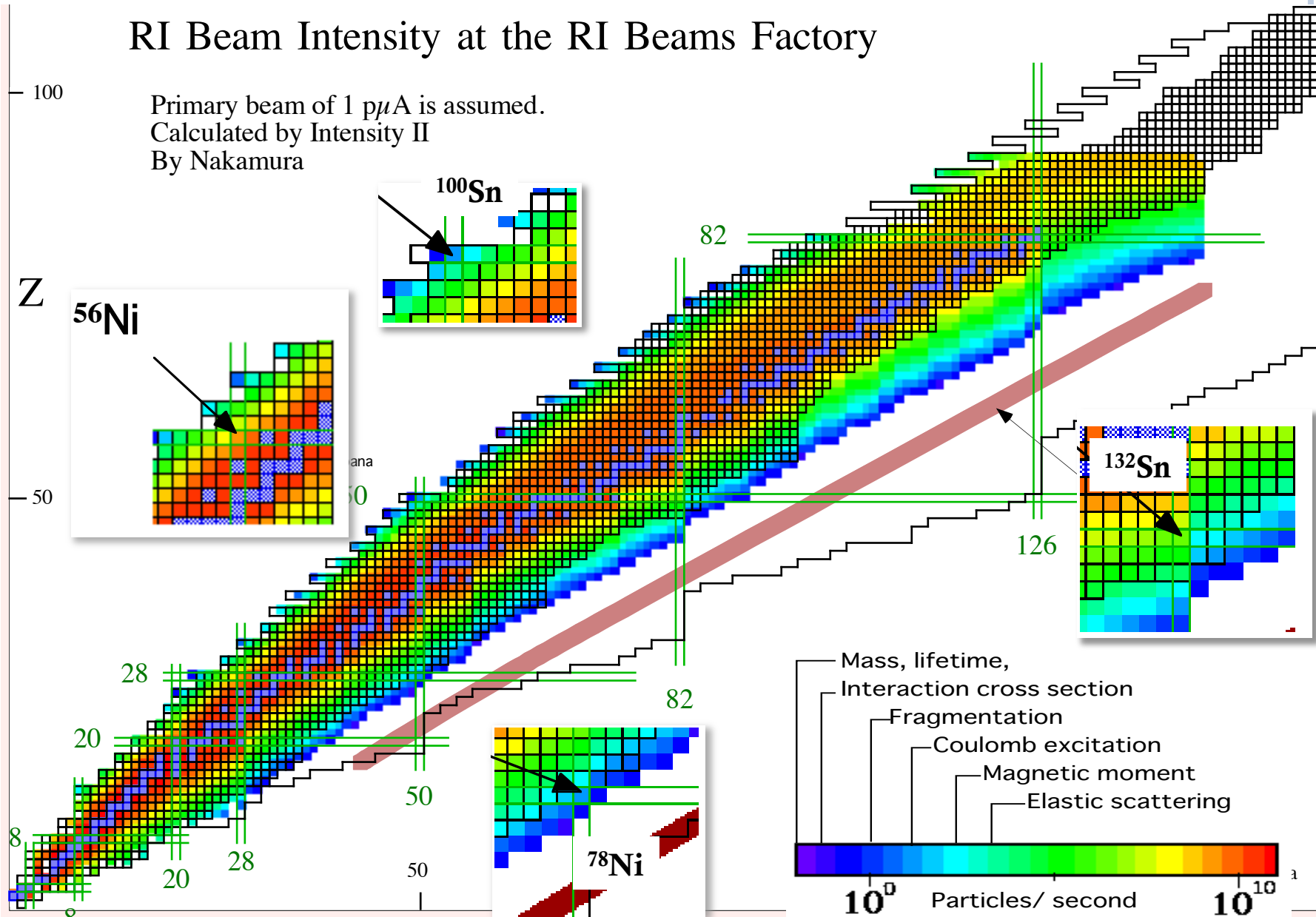
Wien Filter:
sélection de vitesse

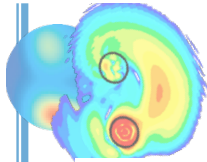




RI Beam Intensity at the RI Beams Factory

Primary beam of $1 \mu A$ is assumed.
Calculated by Intensity II
By Nakamura



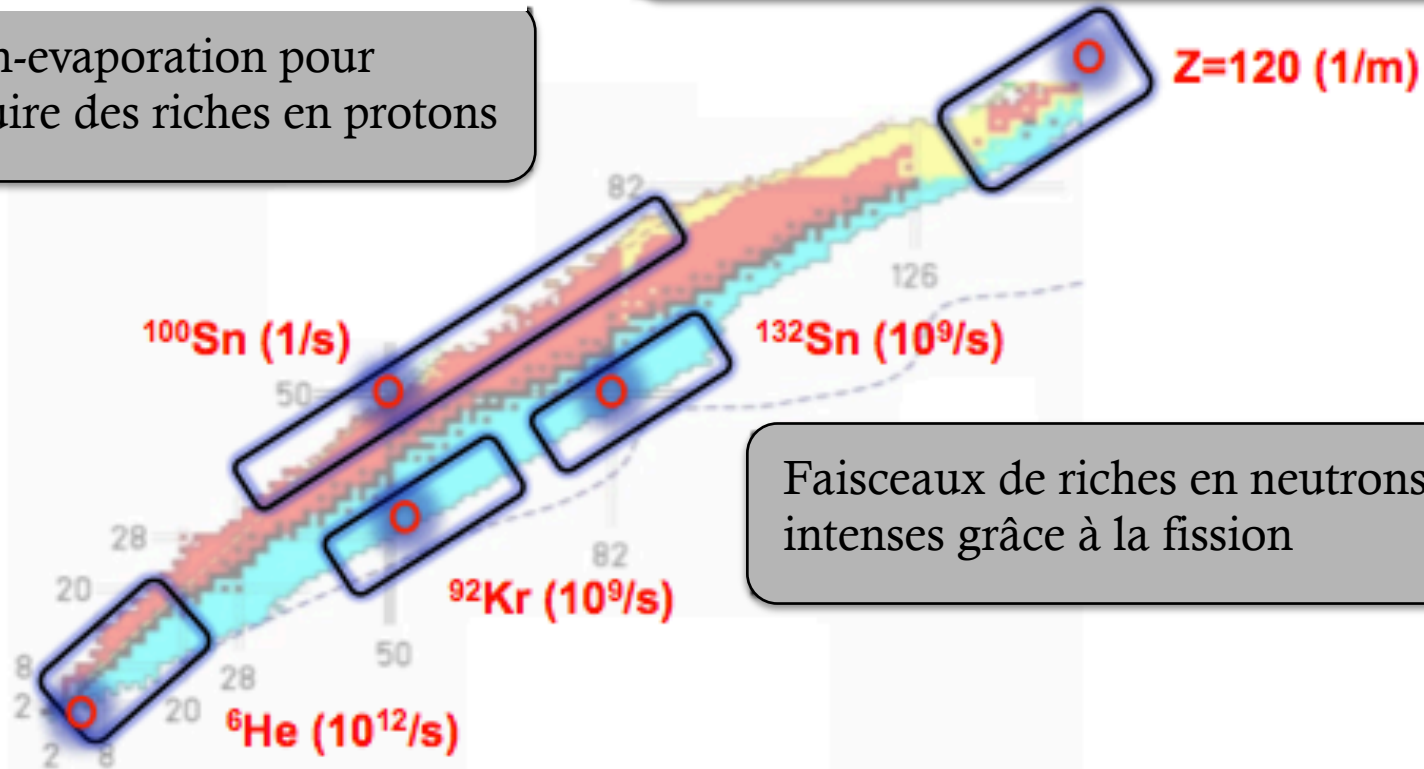


EXEMPLES POUR AUJOURD'HUI ET LE FUTUR



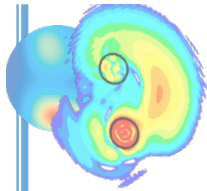
fusion-evaporation pour
produire des riches en protons

De nouveaux noyaux super-lourds
pourront être produits (fusion-évap.)

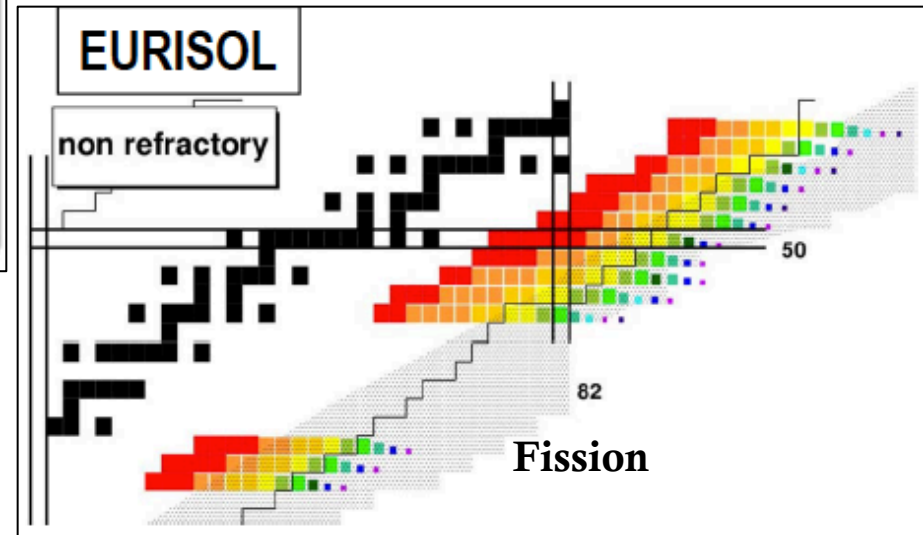
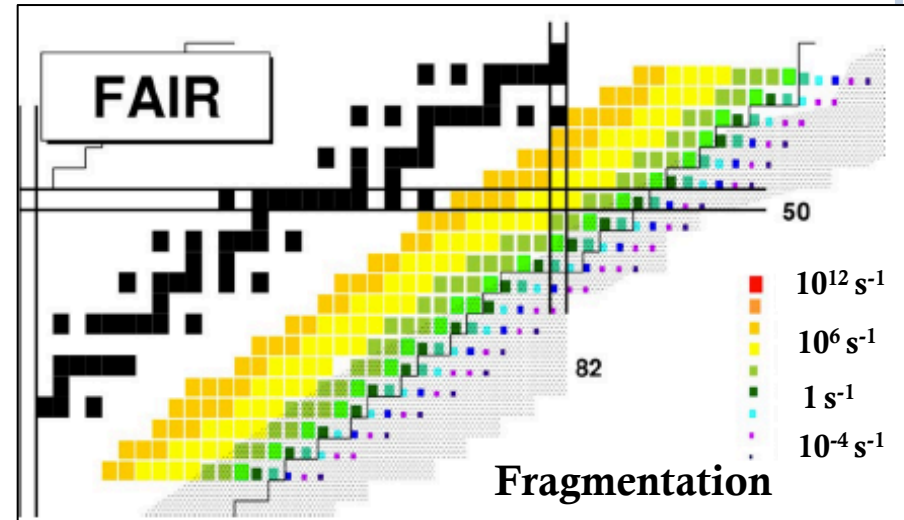
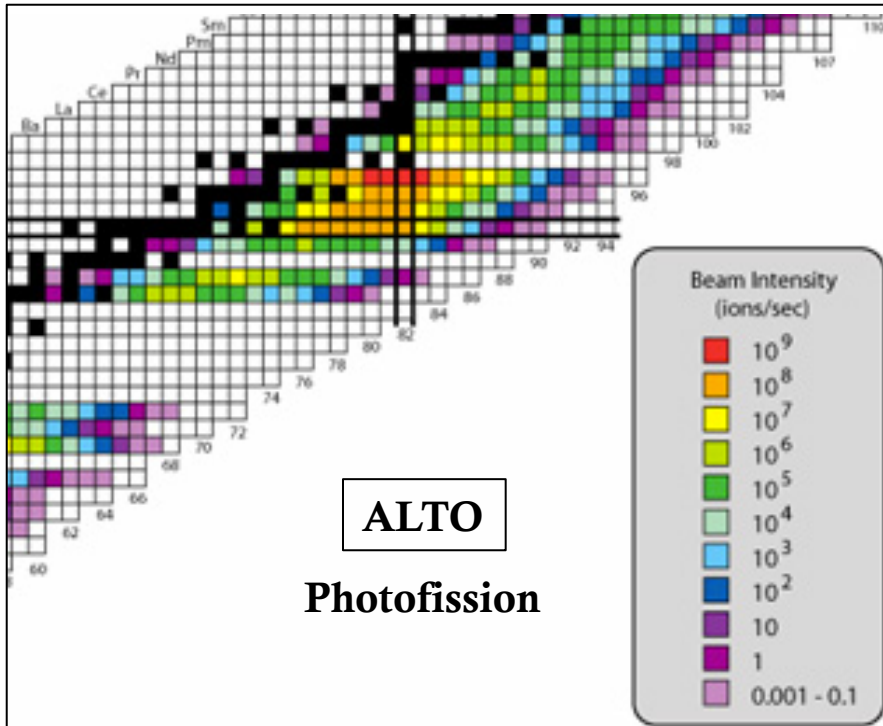


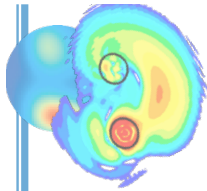
Faisceaux de riches en neutrons
intenses grâce à la fission

Noyaux légers radioactifs aux
mêmes intensités que les faisceaux
stables

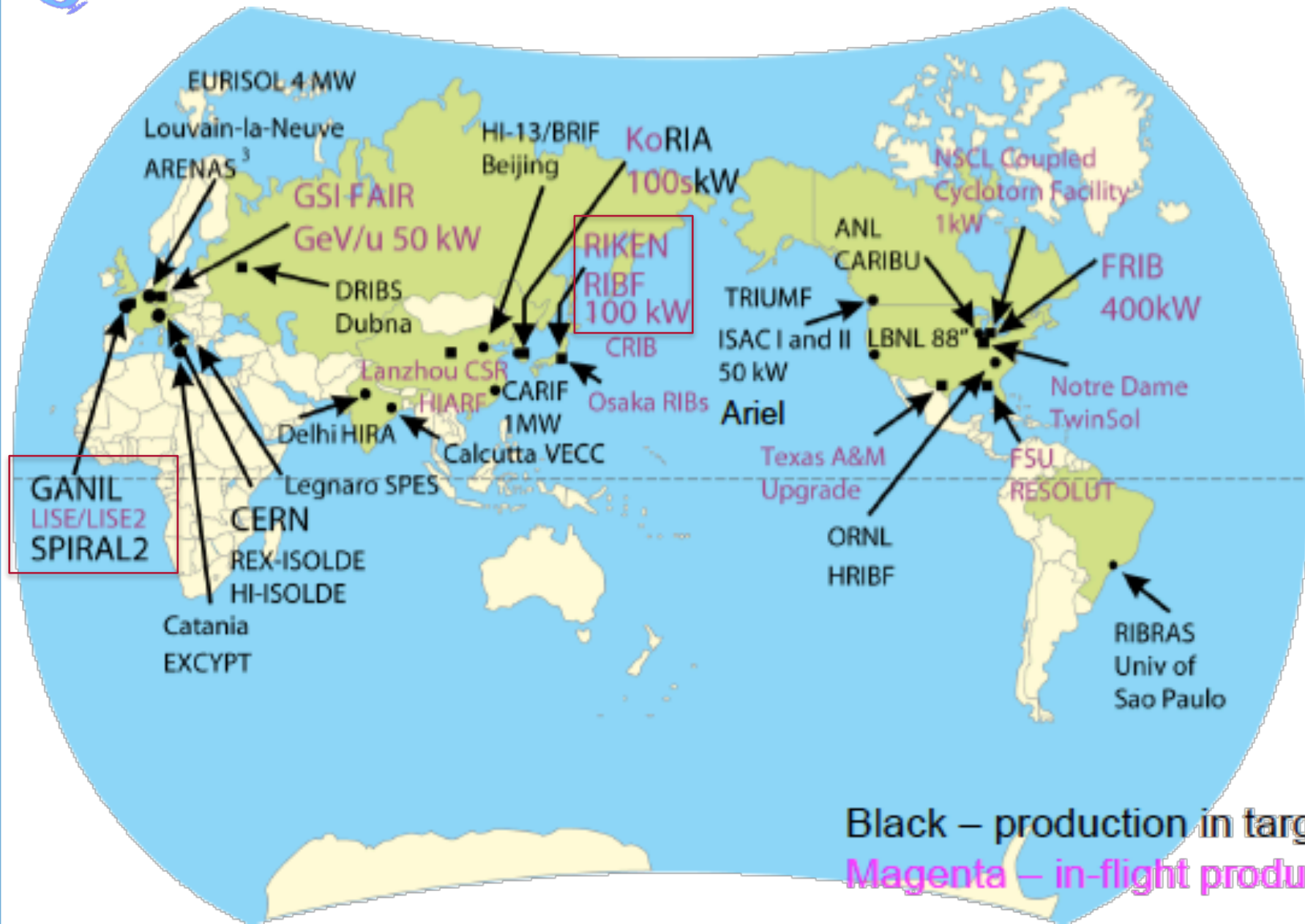


EXEMPLES POUR AUJOURD'HUI ET LE FUTUR

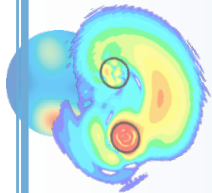




LA CARTE DES INSTALLATIONS



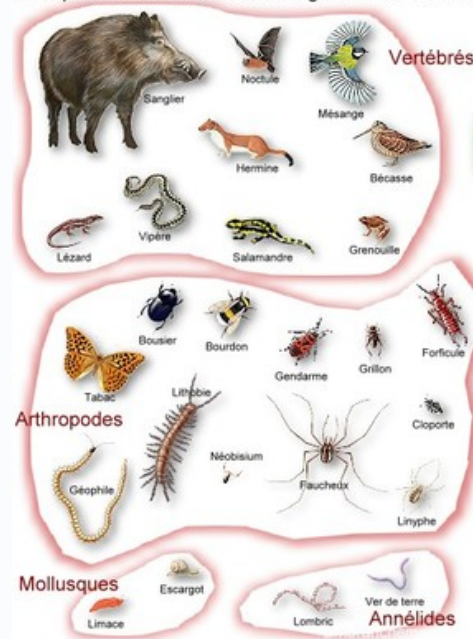
Black – production in target
Magenta – in-flight production



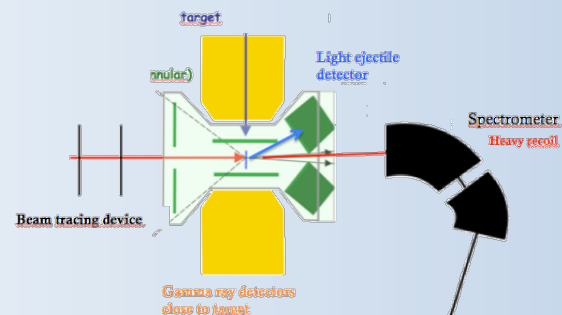
LA TROUSSE À OUTILS DU PHYSICIEN

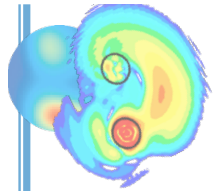
- ▶ Par spectroscopie (version courte)
- ▶ Par des réactions nucléaires (version longue)

Quelques embranchements du règne animal et du règne végétal



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





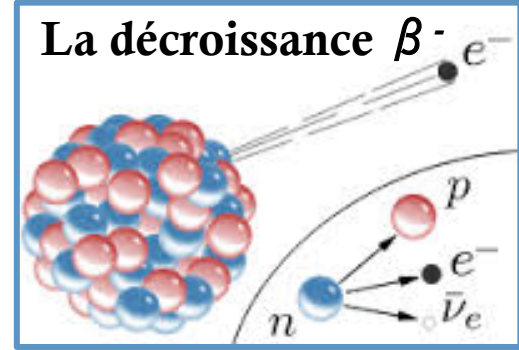
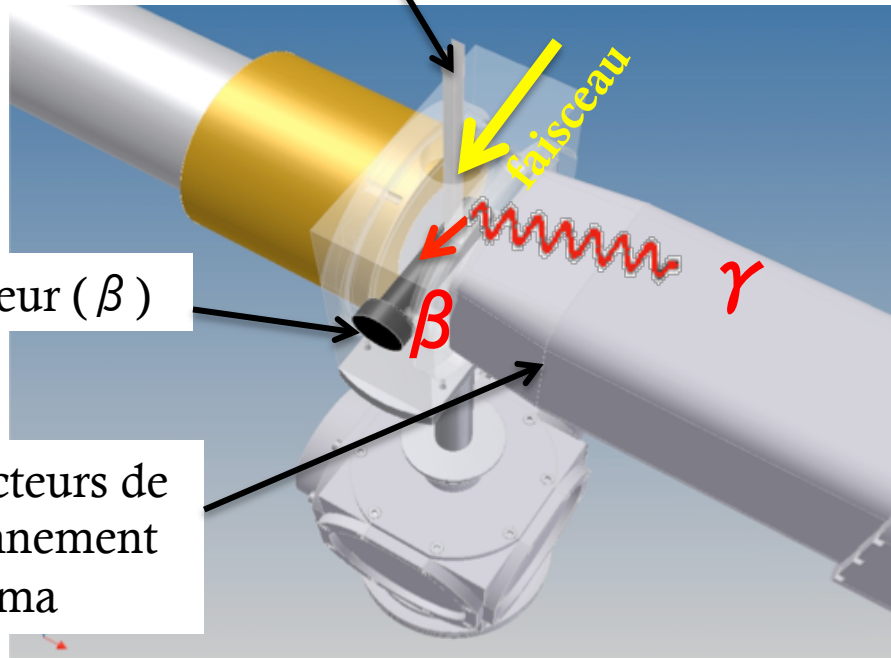
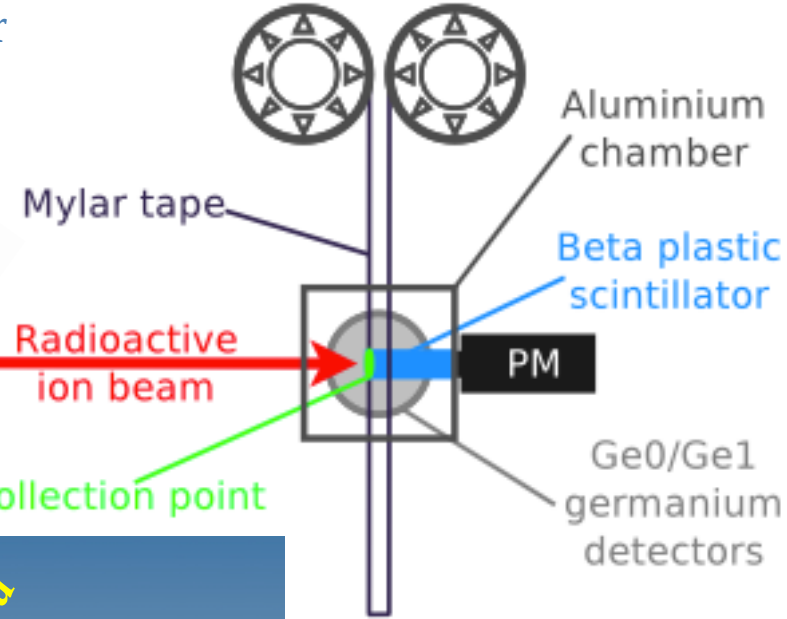
COMMENT ETUDIER LES NOYAUX ?

I -LA SPECTROSCOPIE

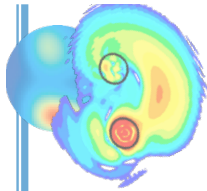
Production de noyaux d'intérêt (E faible)

Séparateur de masse

Bande déroulante (mylar)



Illustrations empruntées à D. Vernay, K. Kolos

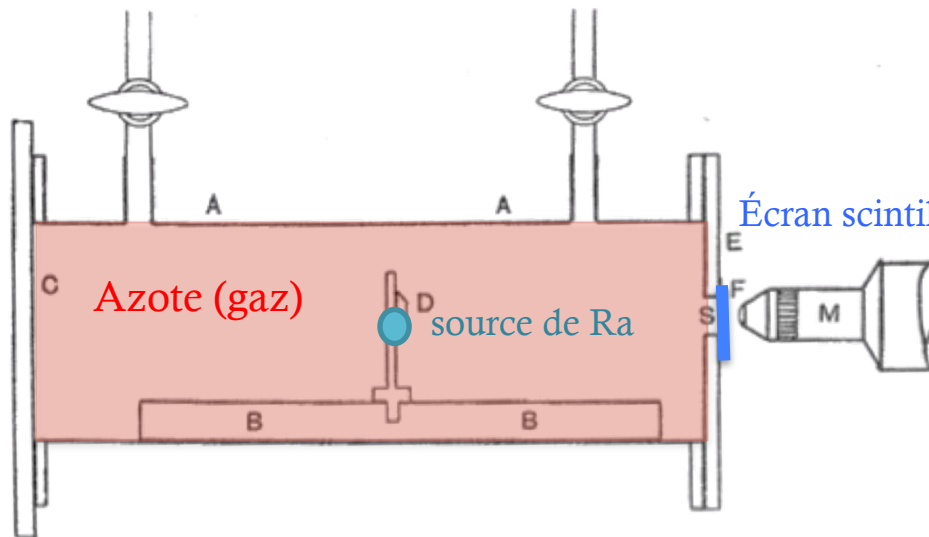
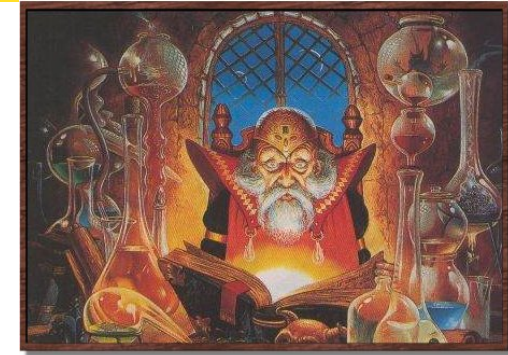


COMMENT ETUDIER LES NOYAUX ?

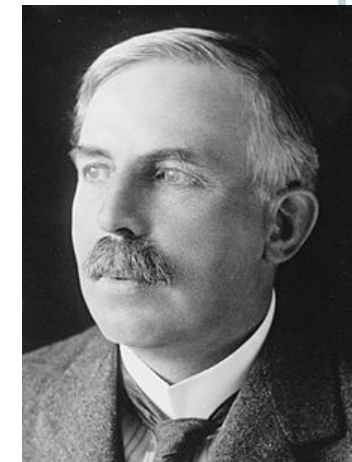
(II) LES REACTIONS

LA PREMIÈRE RÉACTION DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE

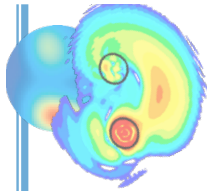
1919, La première réaction de transmutation nucléaire :
on ne change pas encore le Pb en or !



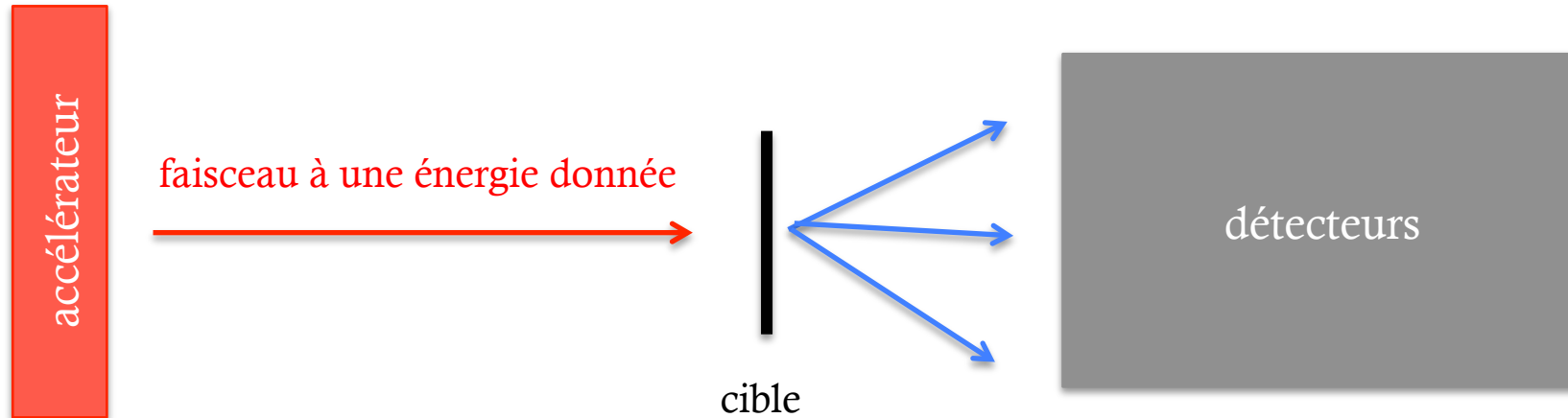
Particules α



Rutherford

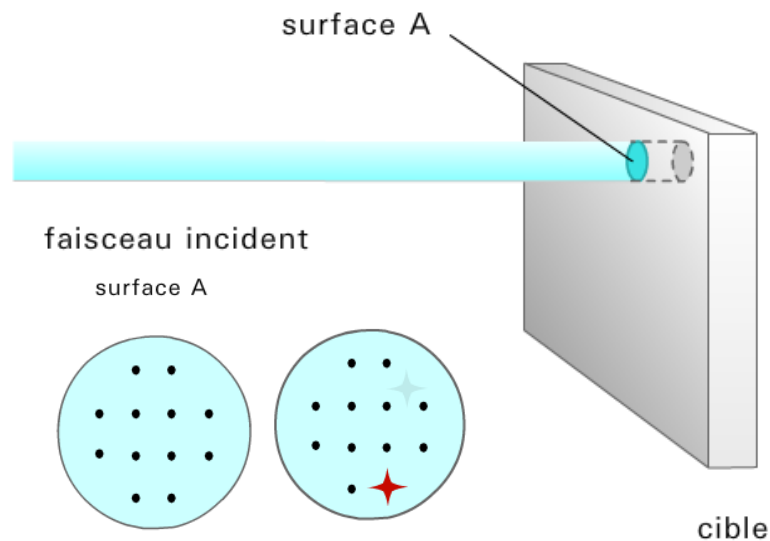


PRINCIPE DE MESURE D'UNE RÉACTION

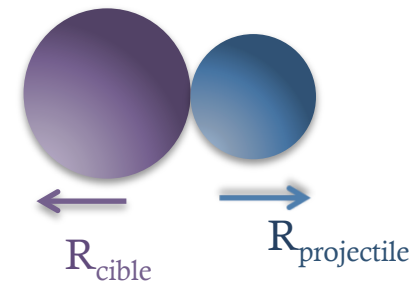


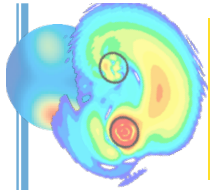
particules, noyaux
produits

► Principe de la section efficace



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



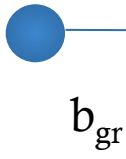


LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES:

(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**.

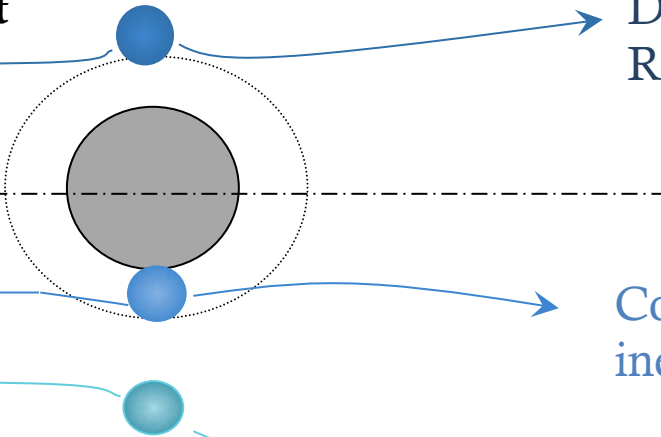
paramètre d'impact **d'effleurement**



petits paramètres d'impact



grands paramètres d'impact



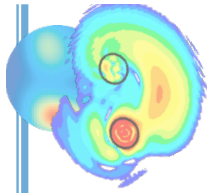
Diffusion élastique
Réactions directes

Collision profondément
inélastique

Diffusion élastique
Excitation coulombienne

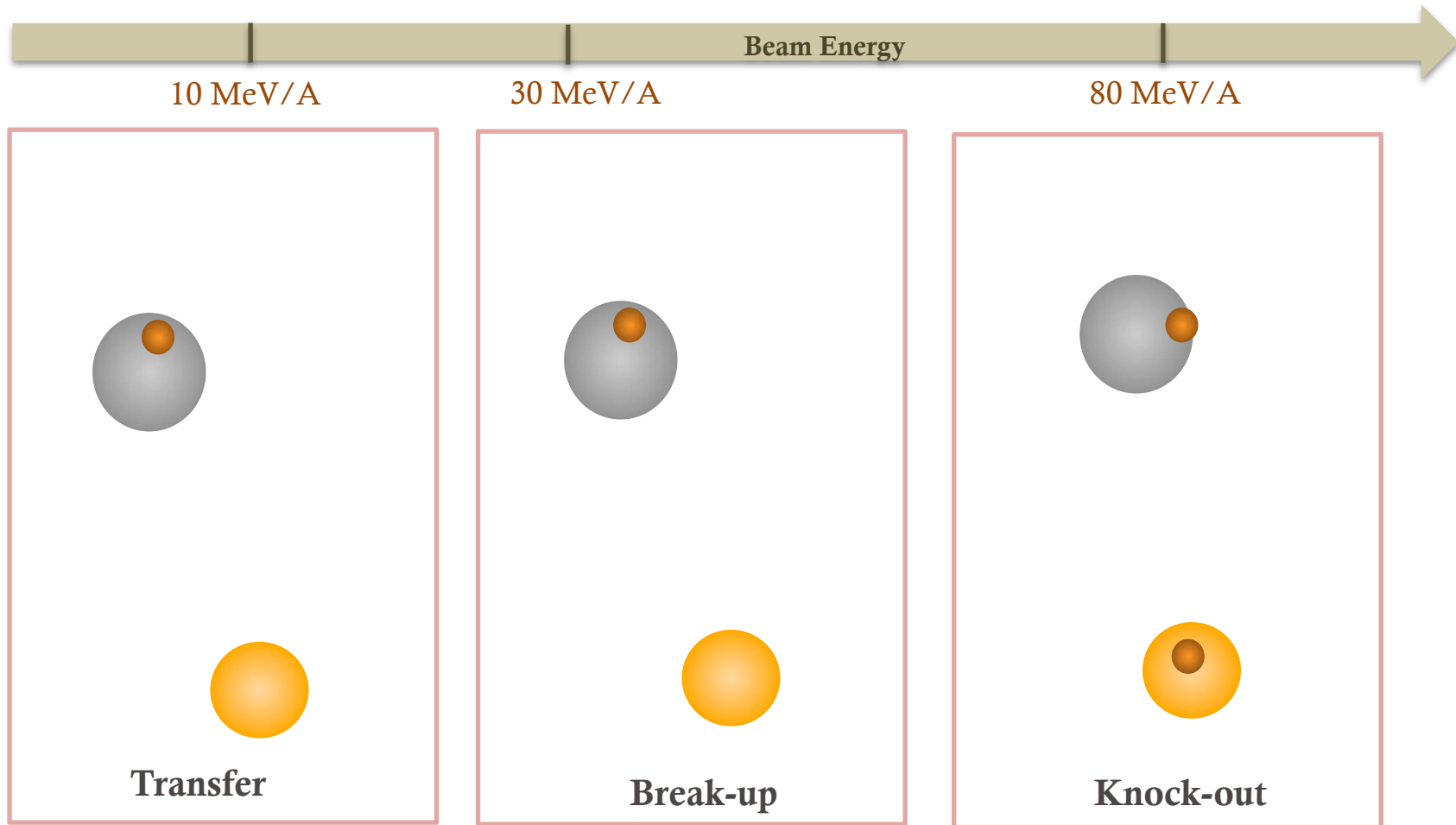
Mais : on ne maîtrise pas le paramètre d'impact,
ce n'est pas du billard !

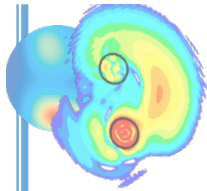




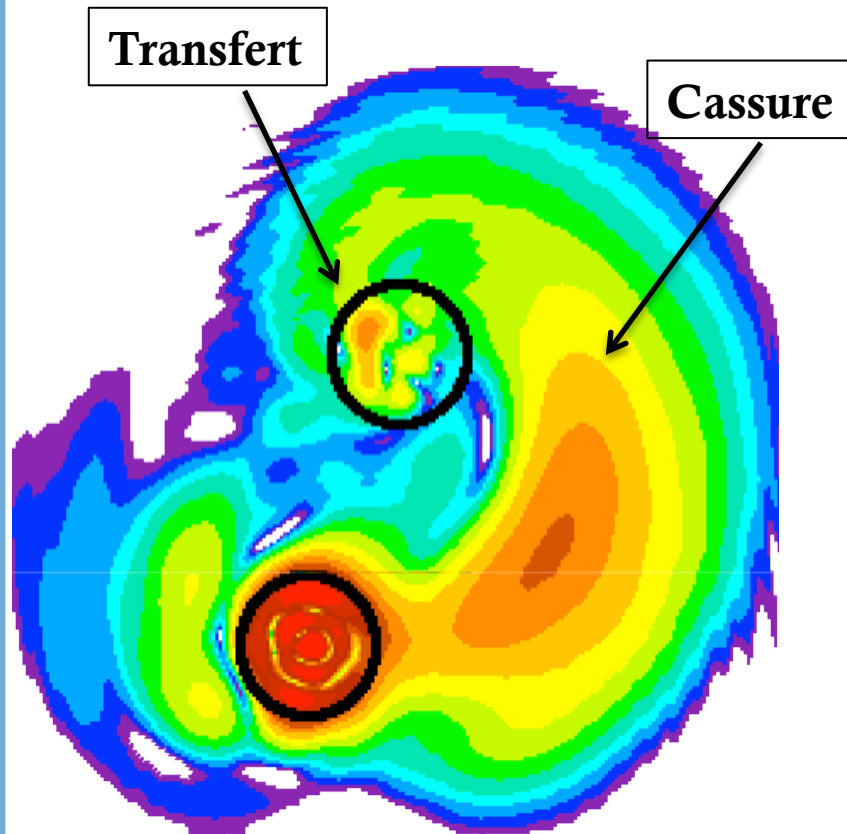
REACTION NUCLÉAIRES :

(II) L'EFFET DE L'ÉNERGIE





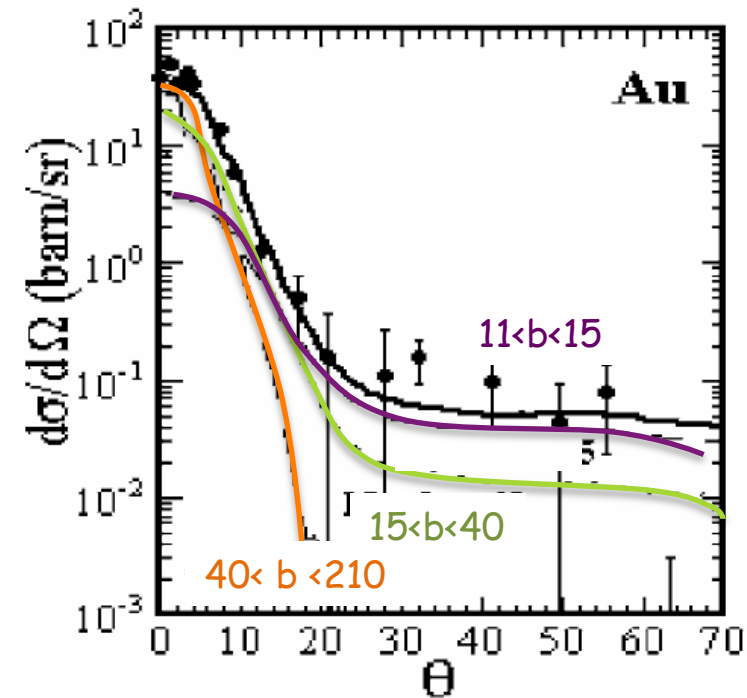
TOUTES LES RÉACTIONS ONT LIEU EN MÊME TEMPS! IL FAUT LES DÉMÊLER !

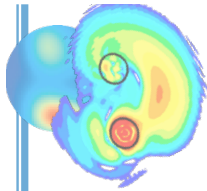


source : J-A Scarpaci home page

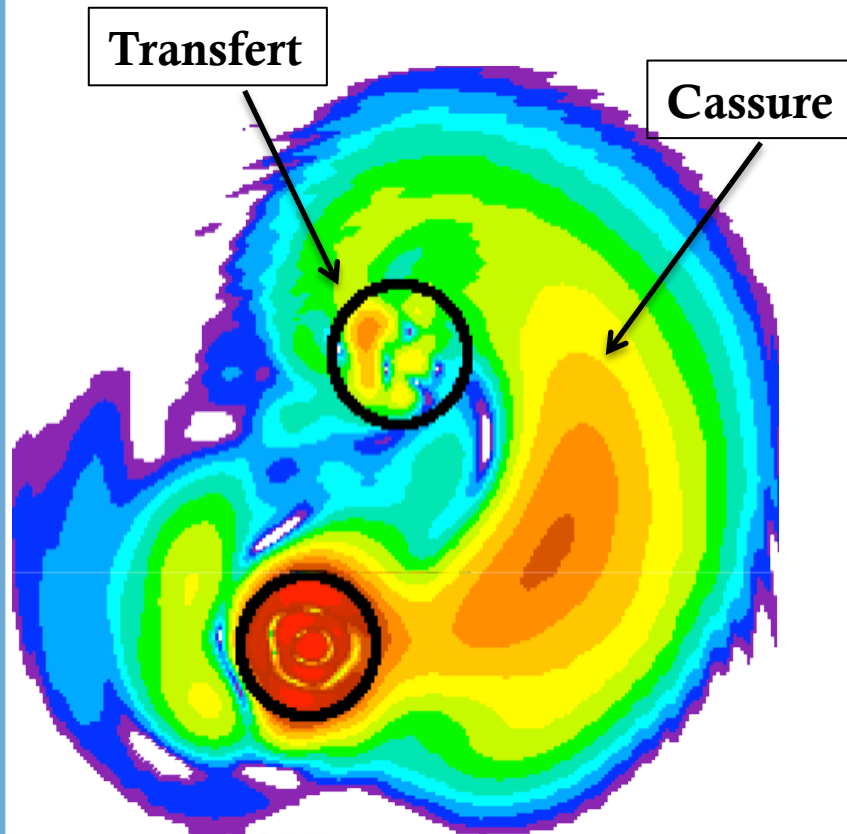
► Comment on sépare les différentes réactions ?
exemple des réactions de cassure :

- diffusion coulombienne : à l'avant





LOIN DE L'IMAGE IDÉALE...



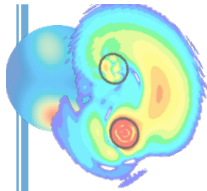
source : J-A Scarpaci

► **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

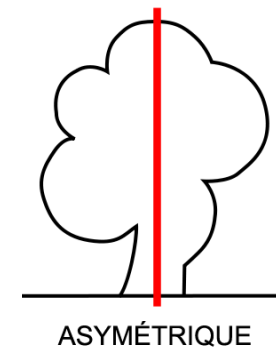
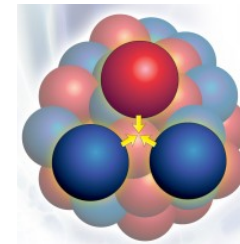
Diffusion élastique de noyaux
Diffusion inélastique (vers états excités)
Diffusion inélastique (au continuum)
Transfert, « knock-out », cassure
Fusion
Fission
Diffusion d'électrons

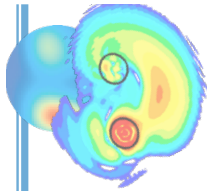
Ce qu'on apprend

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



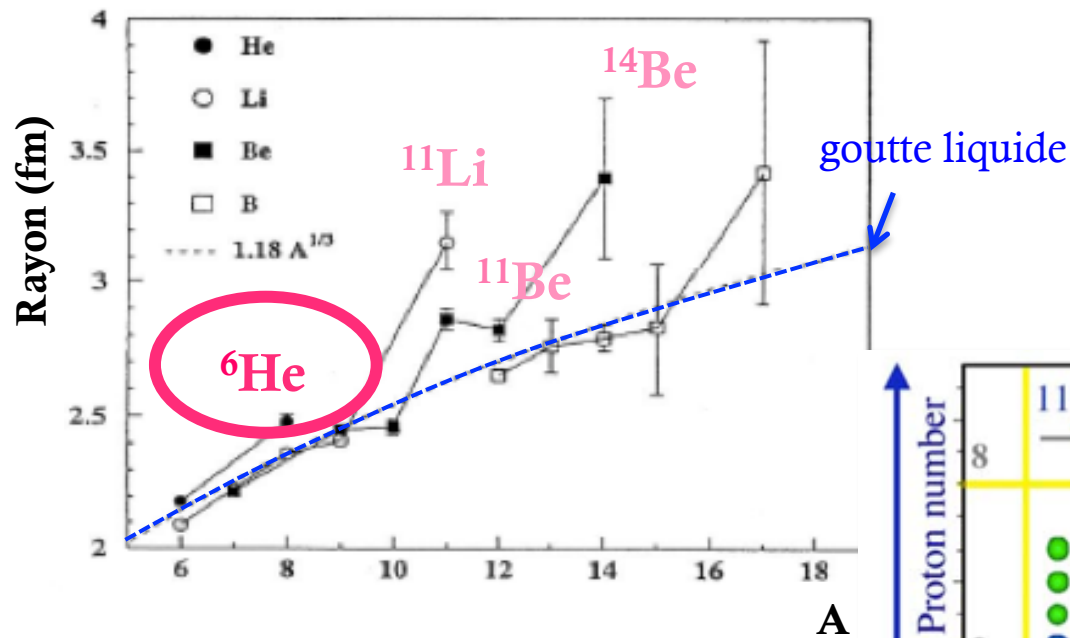
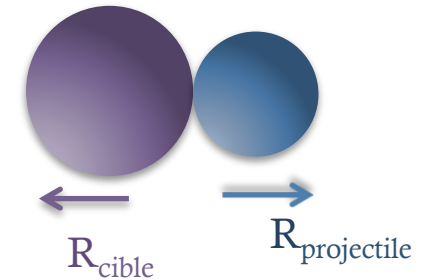


EXEMPLE : DIFFUSION ELASTIQUE DES NOYAUX, RAYON DES NOYAUX

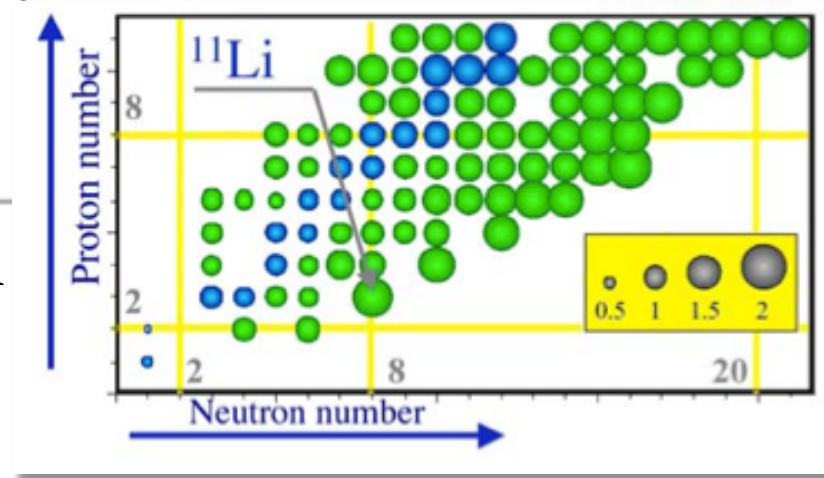
► Rayons d'interaction

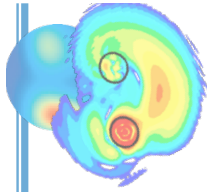
Section efficace σ pour une diffusion en 1^{ère} approximation :

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



Tannihata et al, PRL (1985)





EXEMPLE : DIFFUSION ELASTIQUE DES NOYAUX, RAYON DES NOYAUX

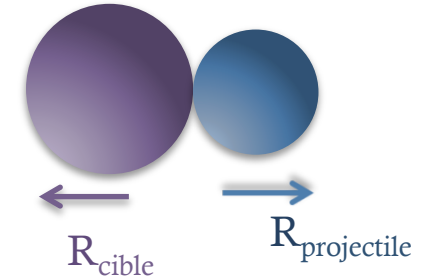
► Rayons de matière

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

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

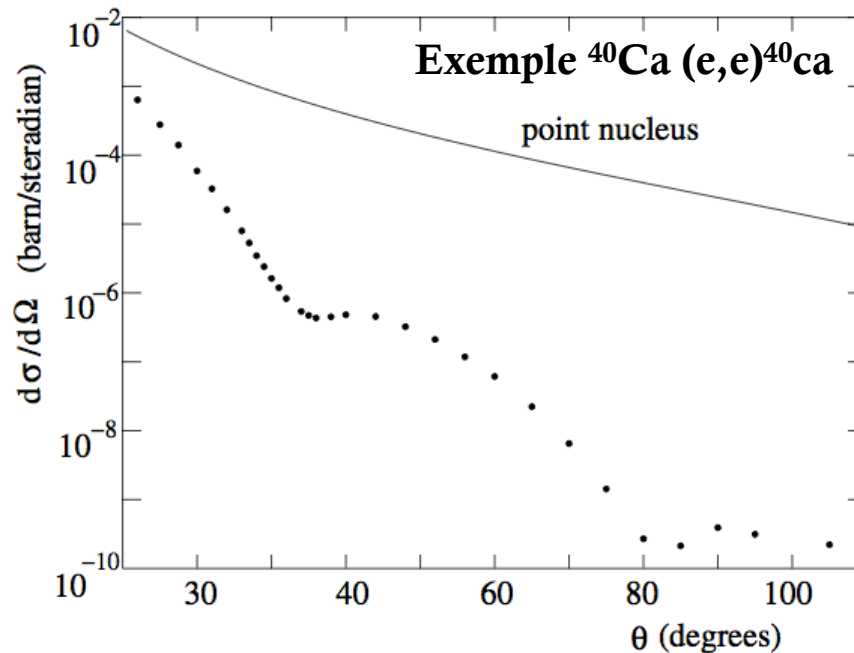
► Rayons de charge et densité

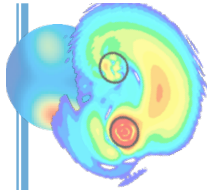
$$\lambda = \frac{\hbar}{p}$$



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

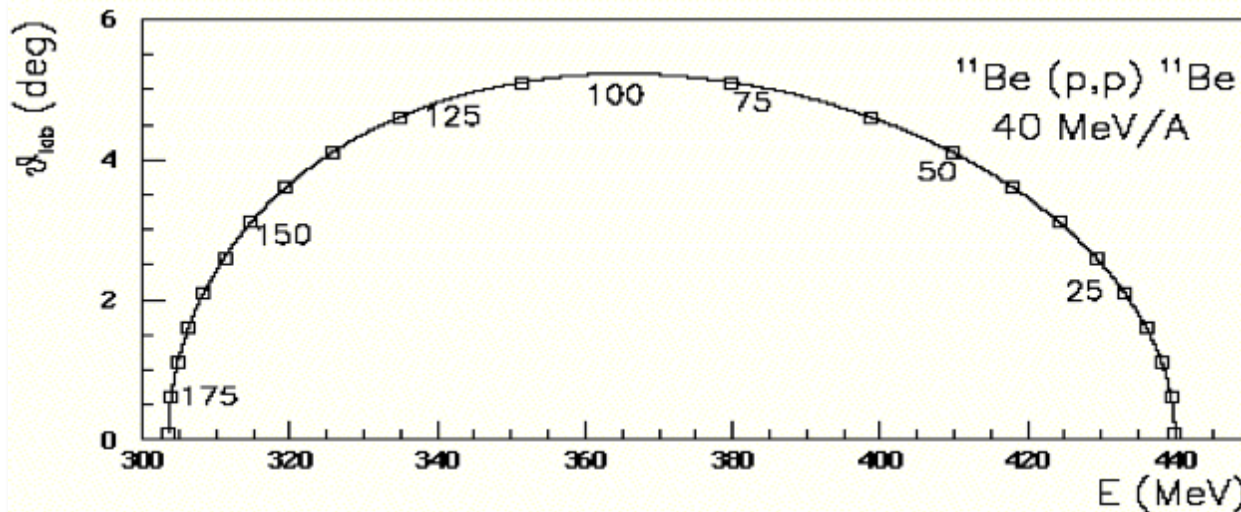
- Conservation de l'énergie et de l'impulsion dans une réaction à 2 corps



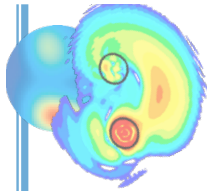
Notation : $A(B,D)C$ = cible (projectile, résidu projectile) résidu cible

- Cinématique directe / inverse

- Directe : noyau qu'on veut étudier = cible (historique)
- Inverse : noyau qu'on veut étudier = faisceau (car on veut étudier des noyaux instables)

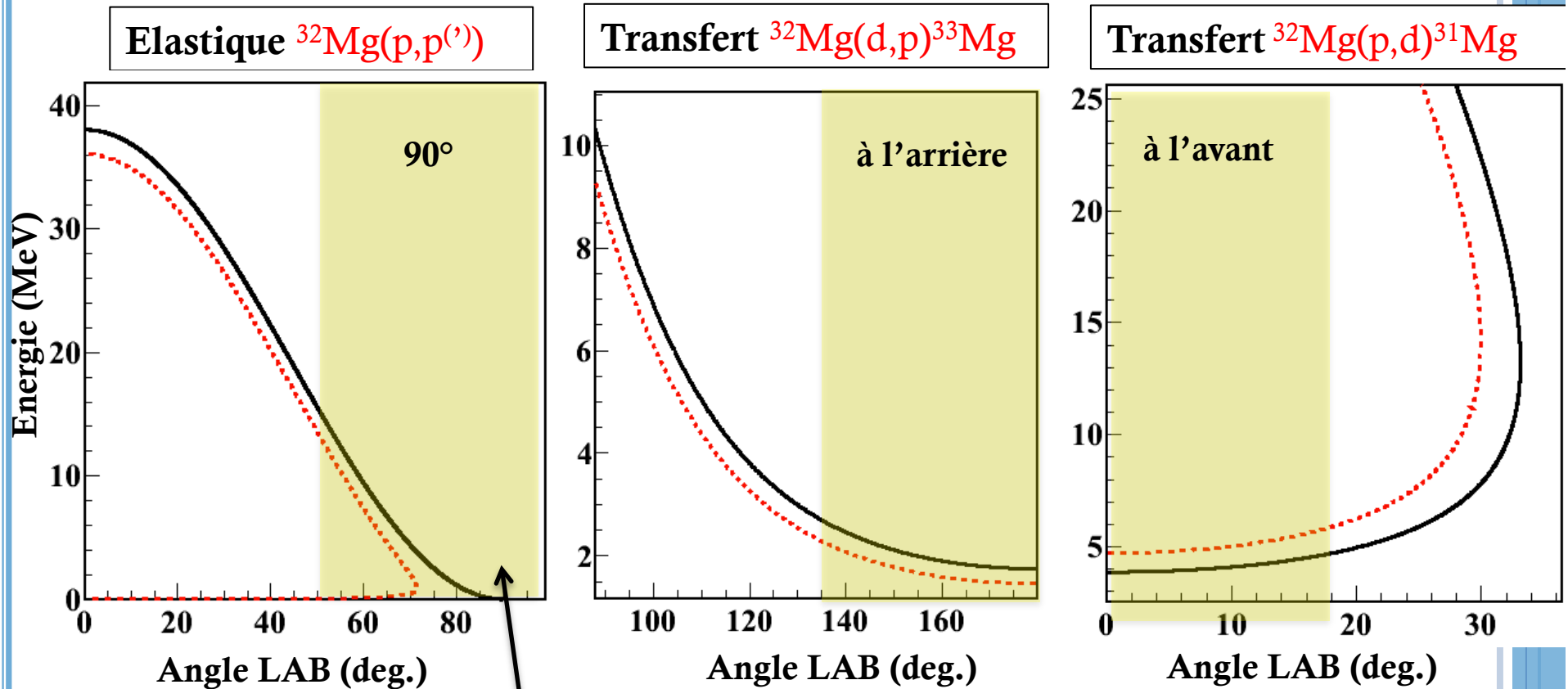


Diffusion élastique
Cas du « résidu lourd »

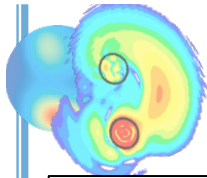


L'EXEMPLE DES RÉACTIONS DE TRANSFERT

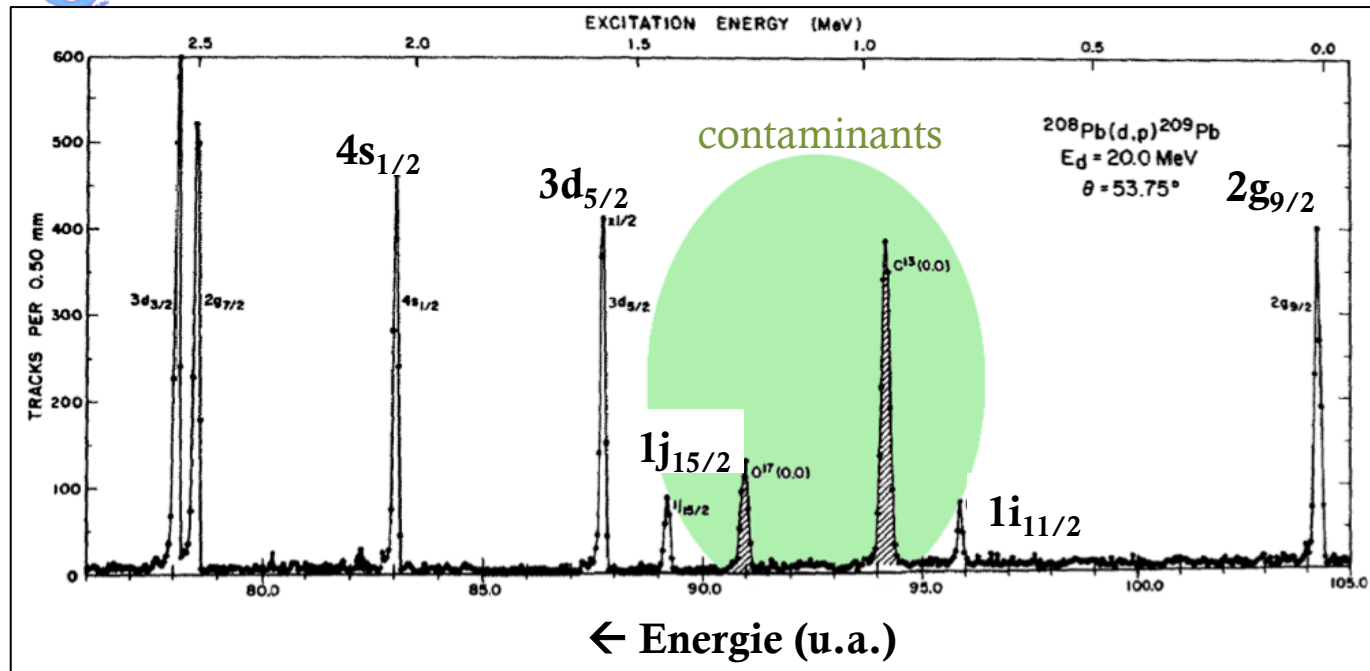
- Conservation de l'énergie et de l'impulsion dans une réaction à 2 corps



Zone de plus grande section efficace

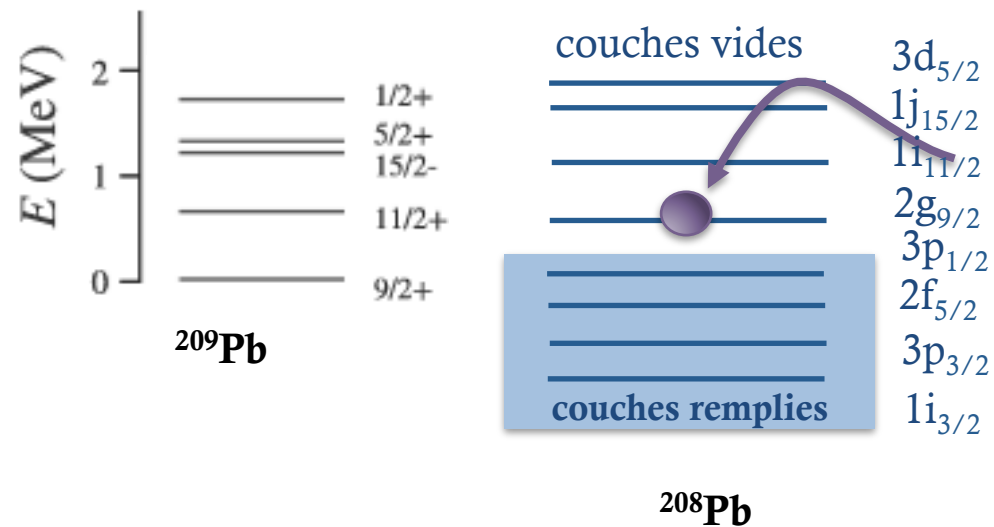


INTÉRÊT DES RÉACTIONS (D,P) ET (P,D)

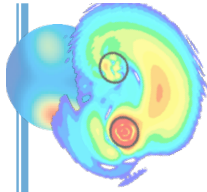


► Réaction (d,p) :
exploration des états de particules

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



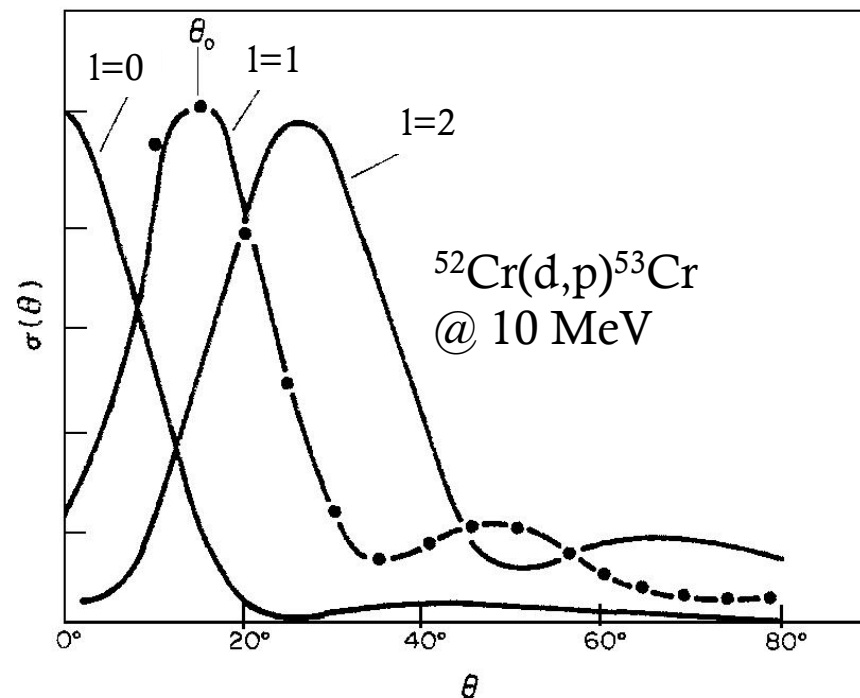
^{208}Pb

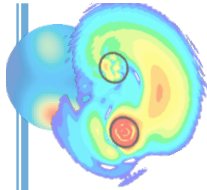


COMMENT OBTIENT-ON DES INFORMATIONS SUR LE NOYAU?

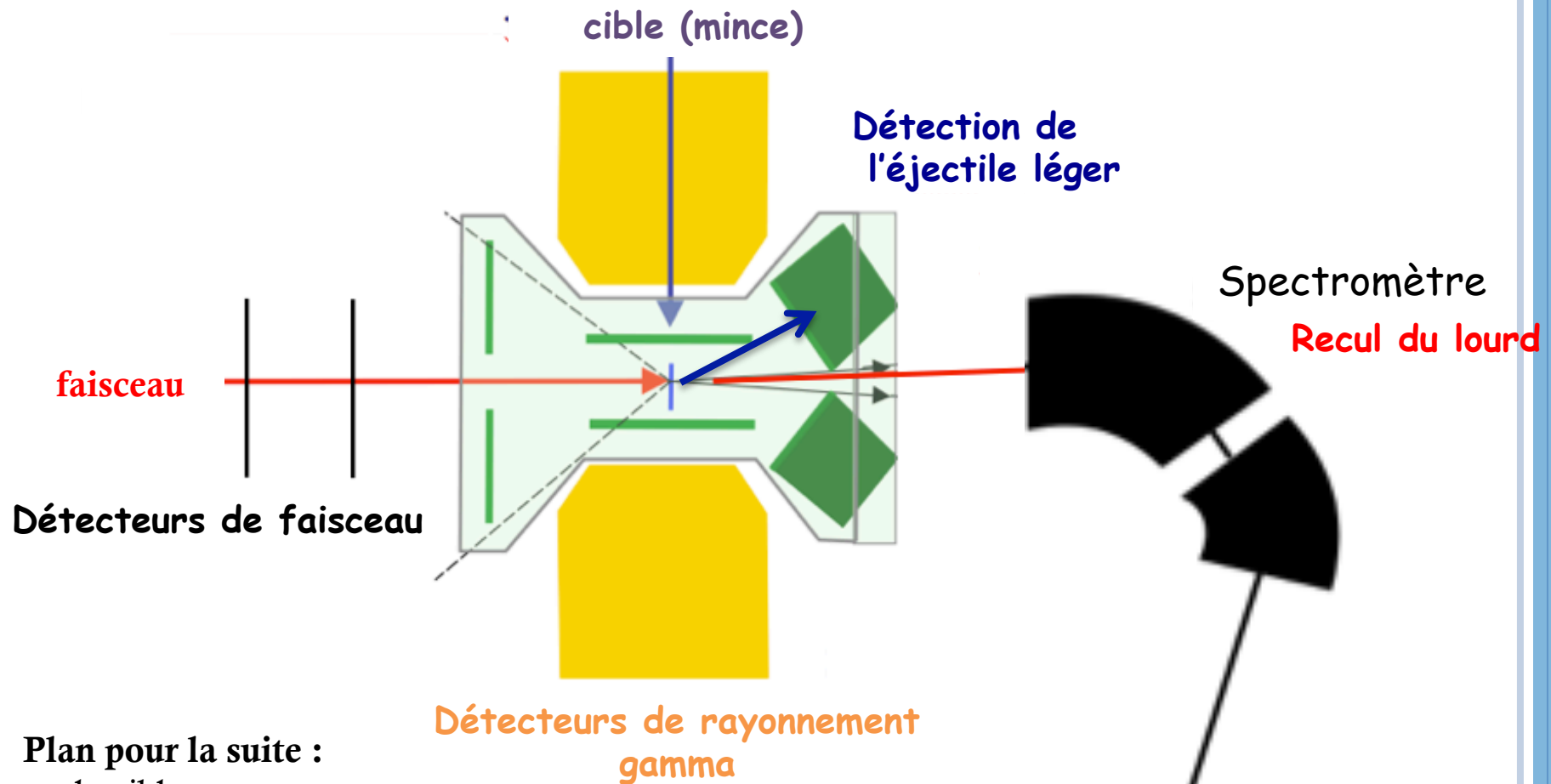
► Mesure des **distributions angulaires**

- 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”)



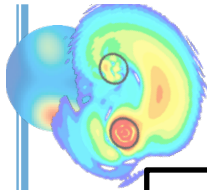


DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL « IDÉAL » (COMPLET)



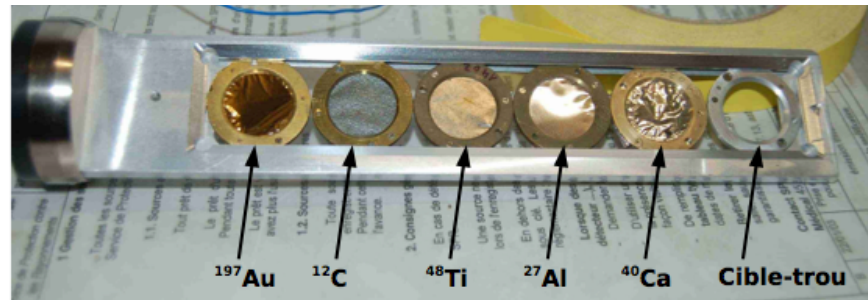
Plan pour la suite :

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

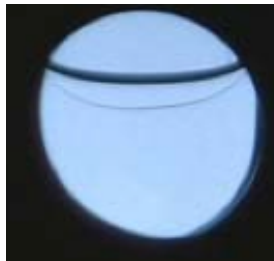


PLUSIEURS TYPES DE CIBLE

► Les cibles « classiques »



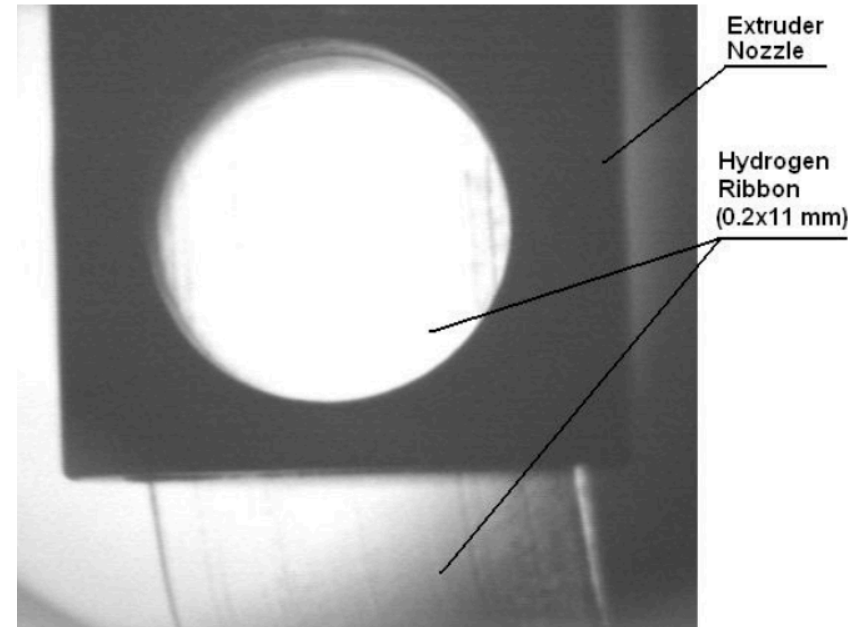
► Les cibles cryogéniques

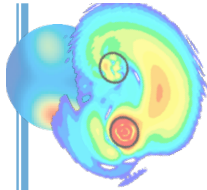


3 phases de l'H pendant la descente en froid

Cible cryogénique H₂/D₂

► Les cibles « sans fenêtre », CHymene

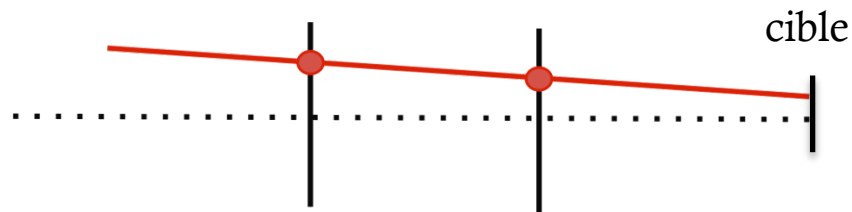




DÉTECTEURS DE FAISCEAU

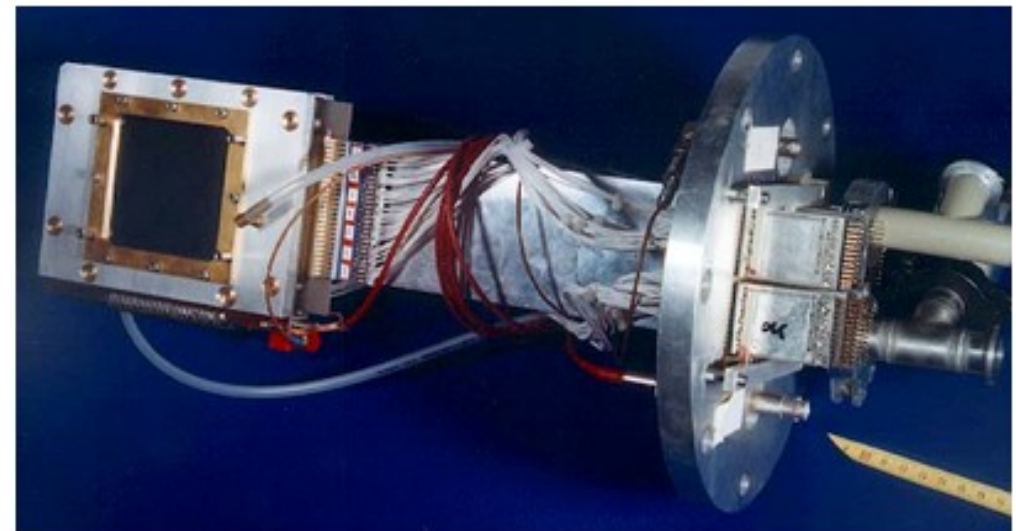
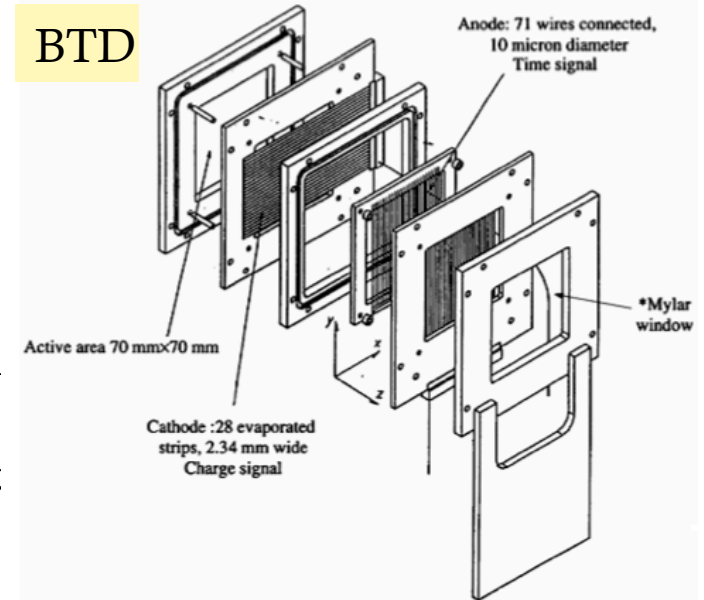
○ Besoins :

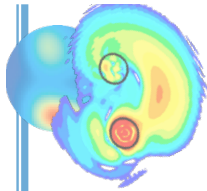
- tenir l'intensité faisceau (10^5 pps)
- identifier les noyaux du faisceau (temps de vol)
- reconstruire la trajectoire du faisceau
- Efficacité $\sim 100\%$
- un temps mort électronique réduit, inférieur à 50ms
- une résolution spatiale en deux dimensions de 0,5mm sur cible de l'ordre de 1mm)
- une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



Vue éclatée

BTD



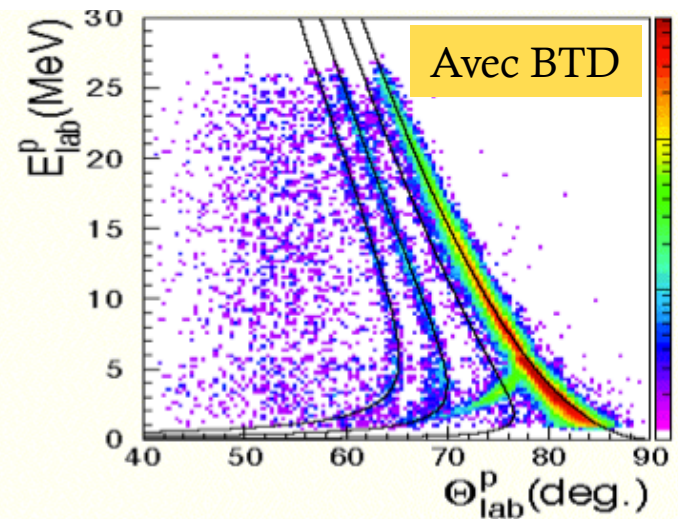
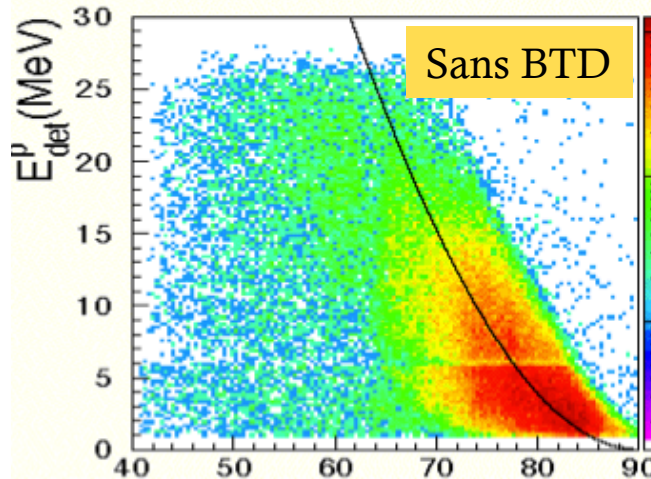
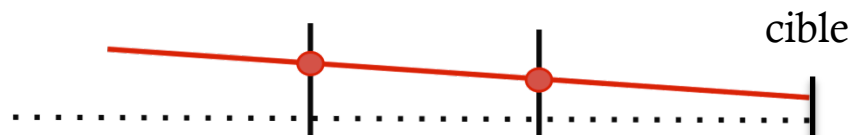
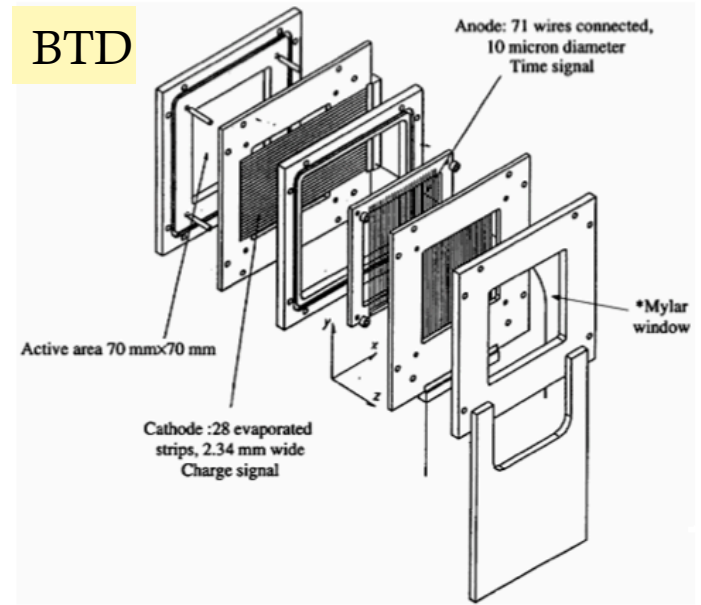


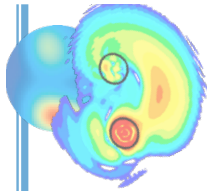
DÉTECTEURS DE FAISCEAU

○ 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



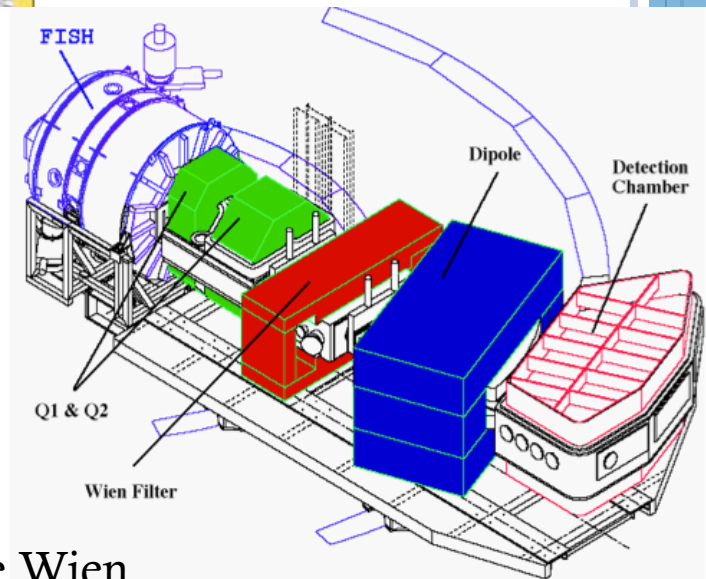
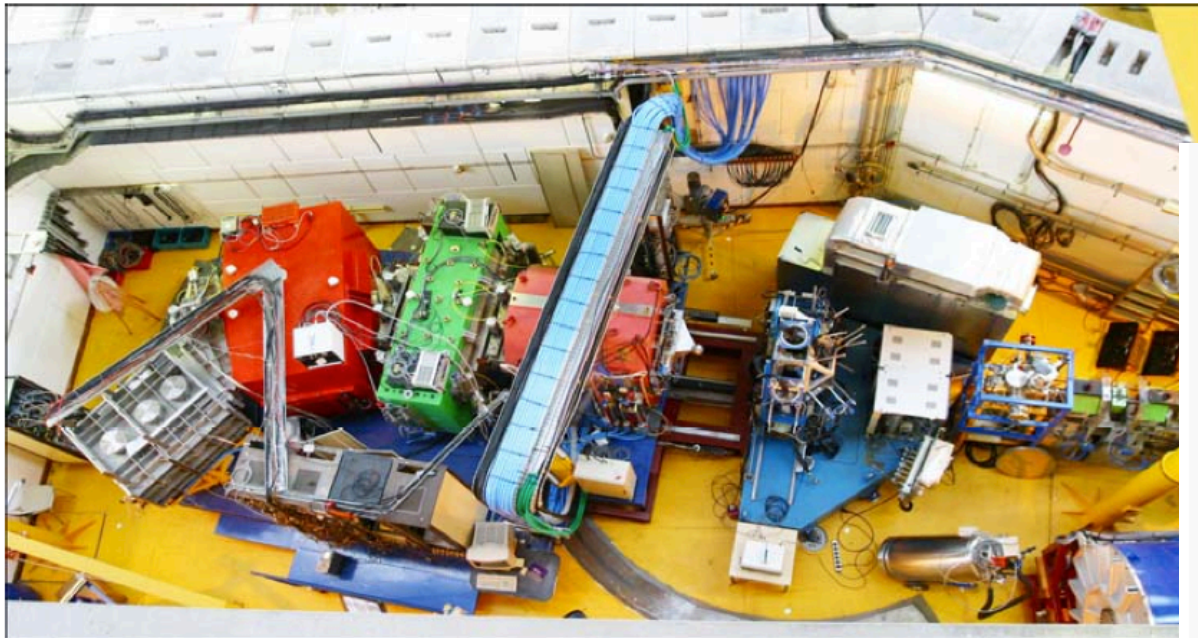


NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

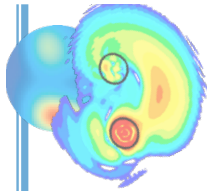
- Le résidu lourd recul :
 - proche de 0 degré (à l'avant)
 - il est proche du faisceau (résidu du faisceau-

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

17/12/14



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



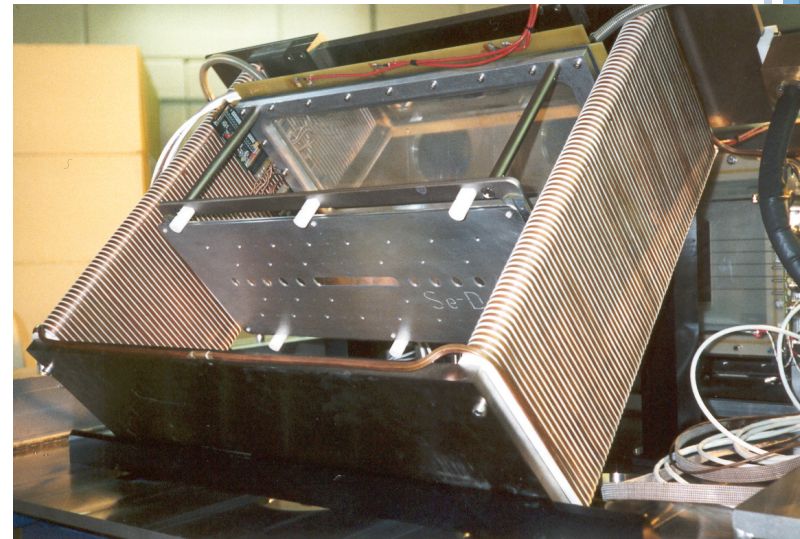
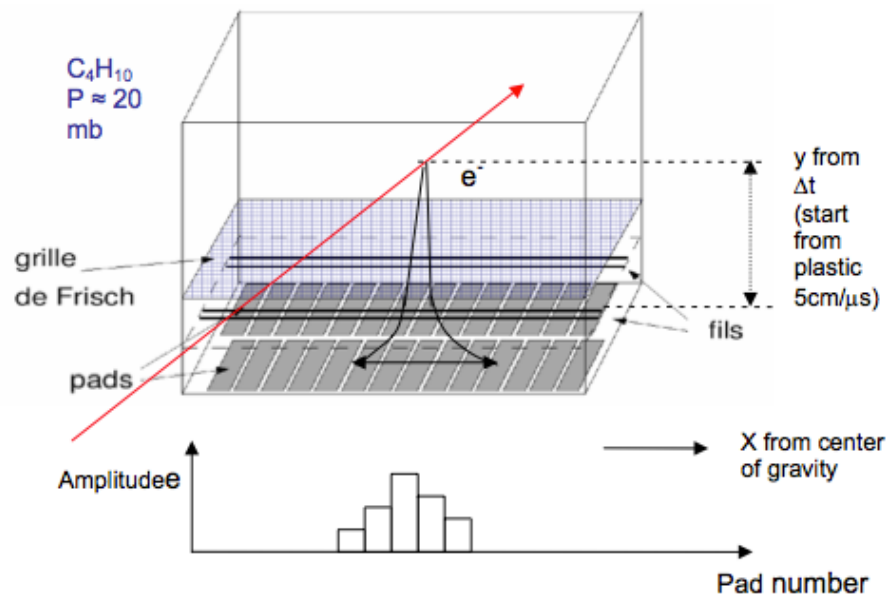
NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

- Le résidu lourd recul :

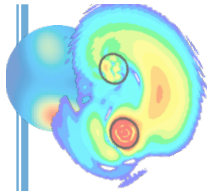
- proche de 0 degré (à l'avant)

- il est proche du faisceau (résidu du faisceau-

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



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



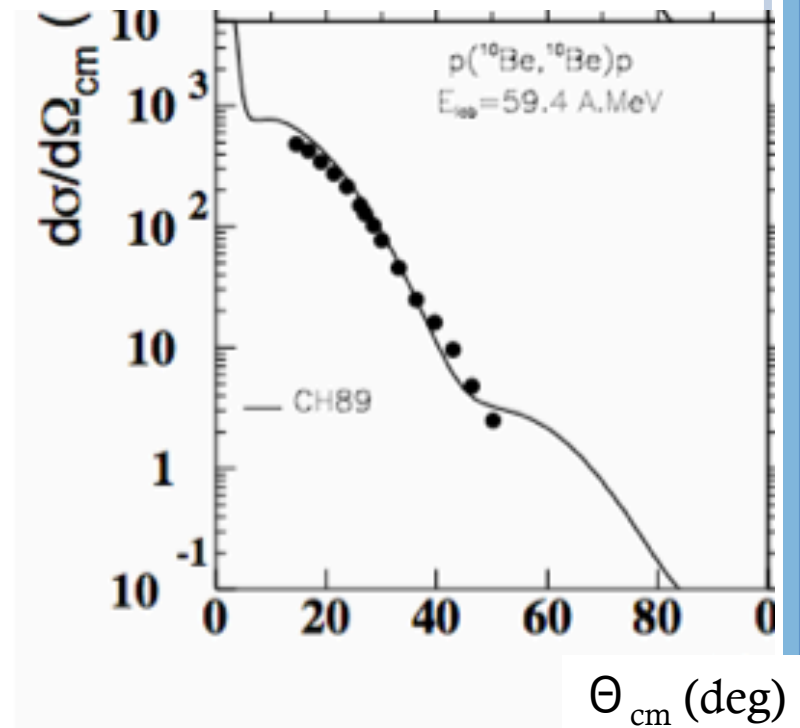
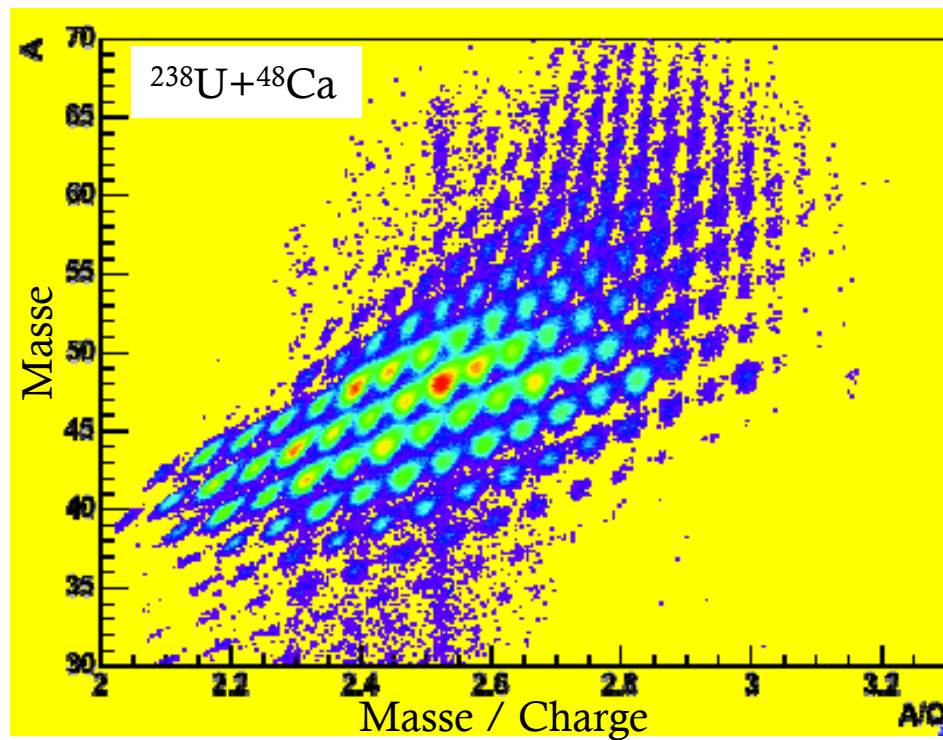
NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

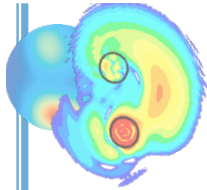
- Le résidu lourd recul :

- proche de 0 degré (à l'avant)

- il est proche du faisceau (résidu du faisceau-

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





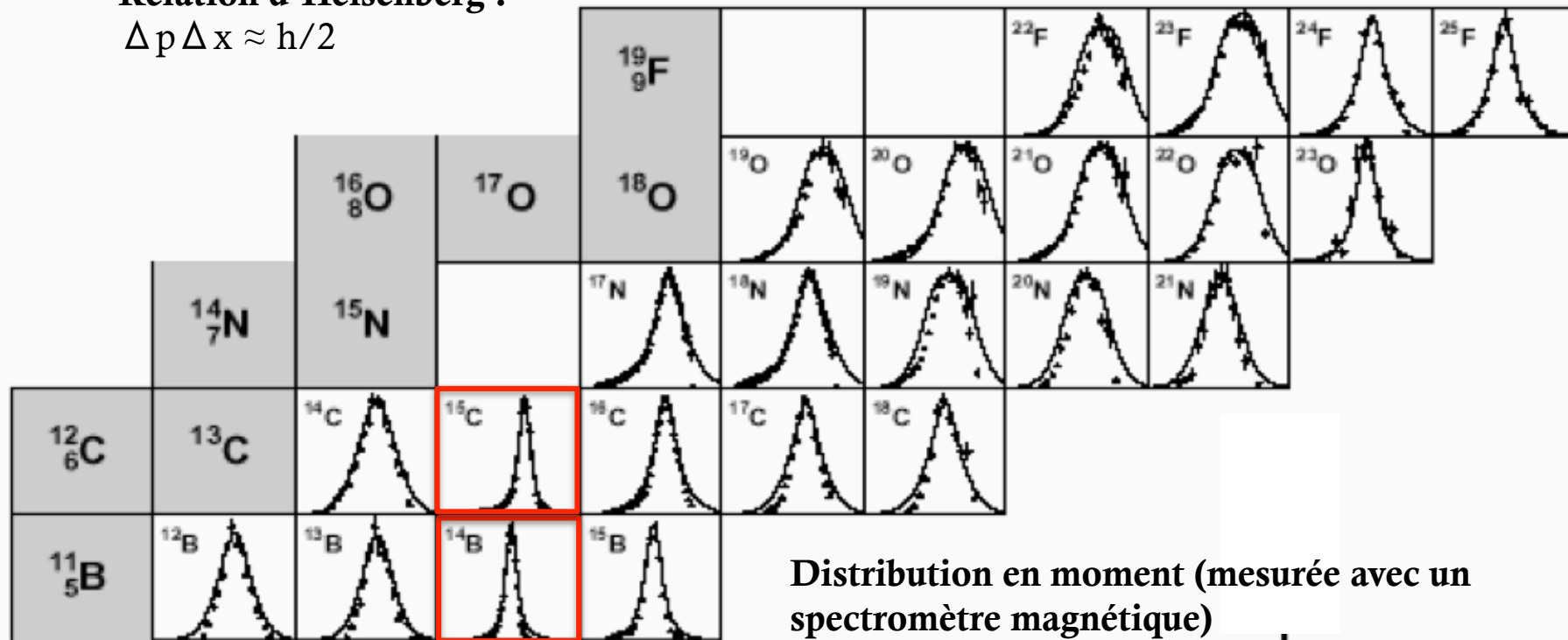
NOYAU LOURD DE RECOL : LE SPECTROMÈTRE MAGNÉTIQUE

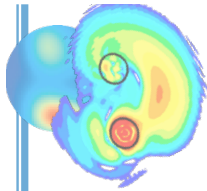
- Le résidu lourd recul :
 - proche de 0 degré (à l'avant)
 - il est proche du faisceau (résidu du faisceau-

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

Relation d'Heisenberg :

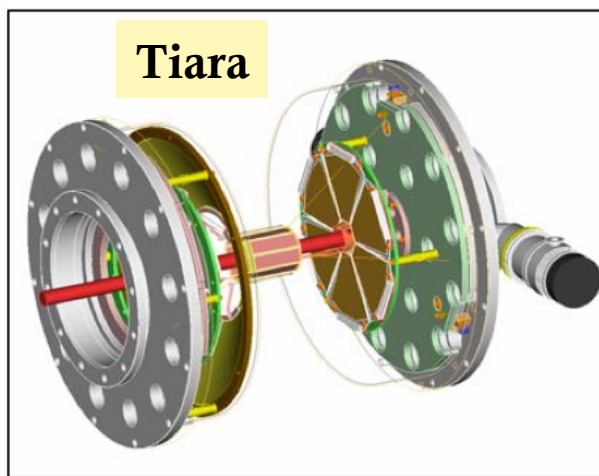
$$\Delta p \Delta x \approx h/2$$



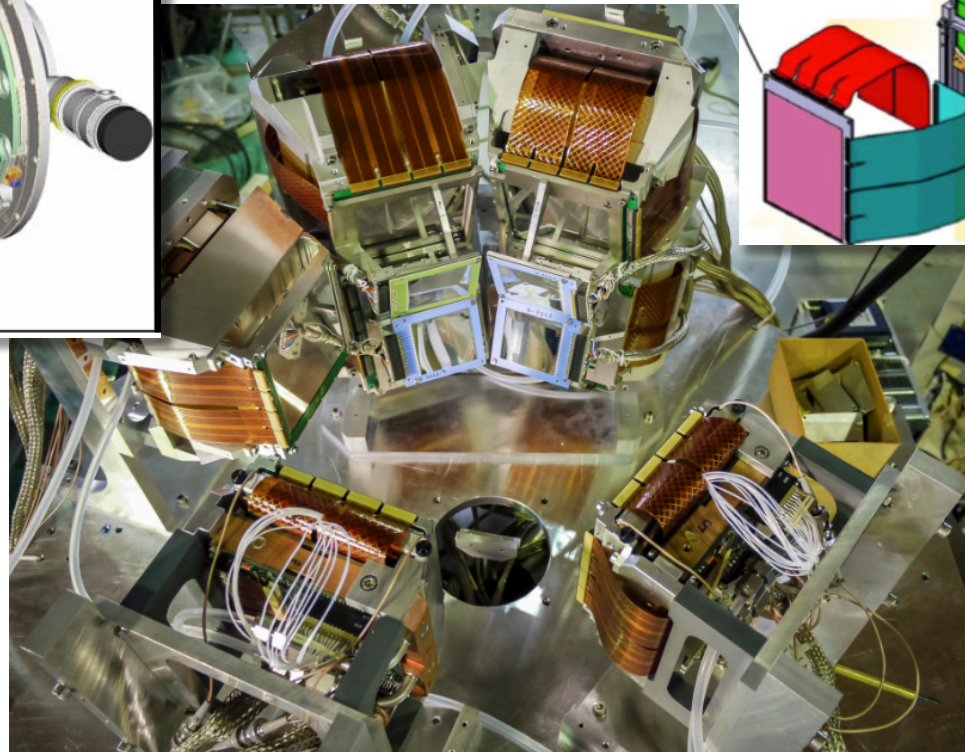
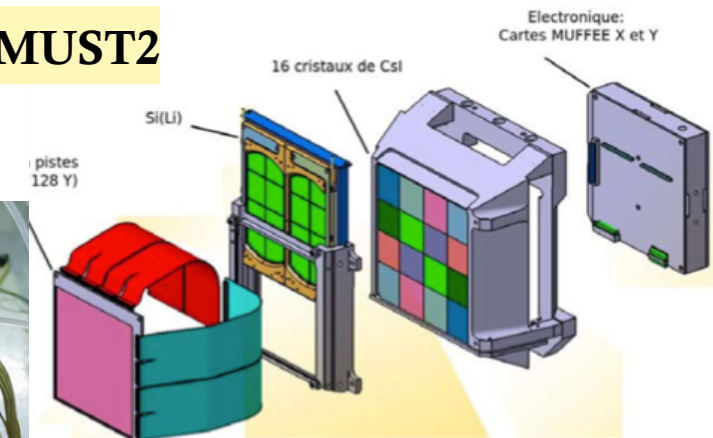


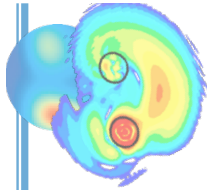
DÉTECTION DE LA PARTICULE LÉGÈRE

- ▶ 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

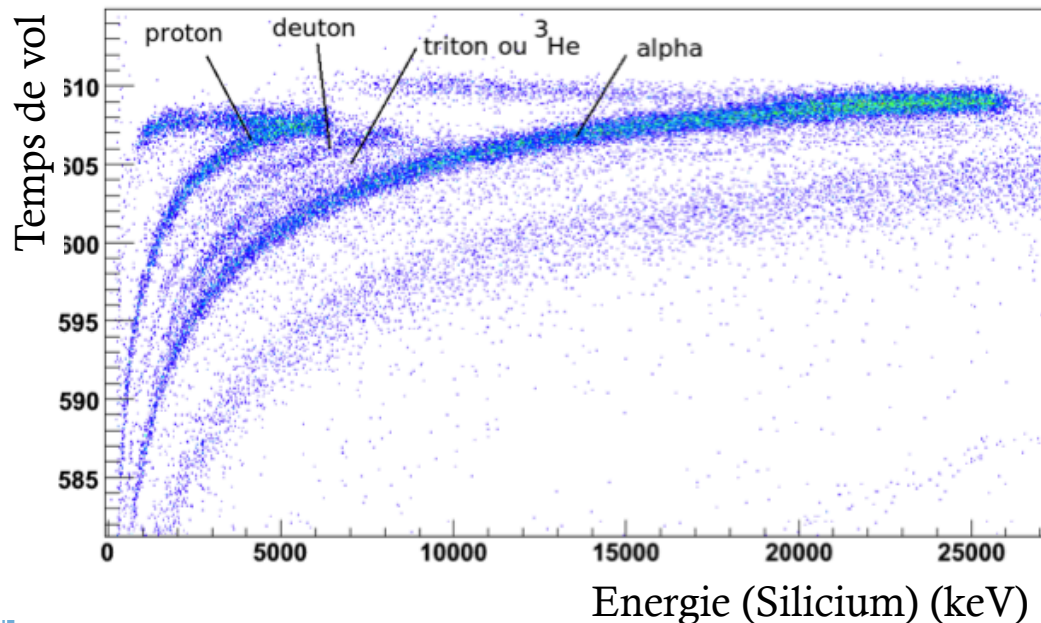




DÉTECTION DE LA PARTICULE LÉGÈRE

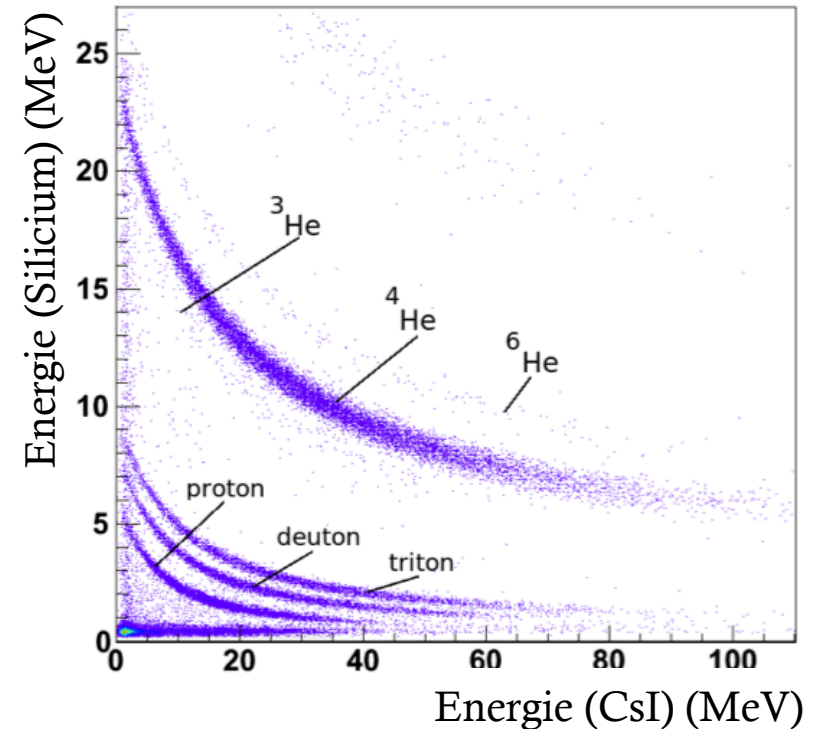
- ▶ En fonction des lignes de cinématique : à l'avant (p,d), à l'arrière (d,p) ou 90° emission (elastic)
- ▶ Grande granularité (10x10 cm², 128 pistes de chaque côté)
- ▶ Grande couverture angulaire & modularité
- ▶ Efficacité ~100%, seuil en énergie 100 keV

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

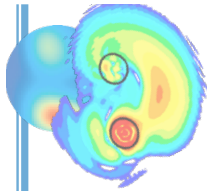


Identification pour les noyaux qui s'arrêtent dans le 1^{er} étage

Particules de plus haute énergie (p>5 MeV)



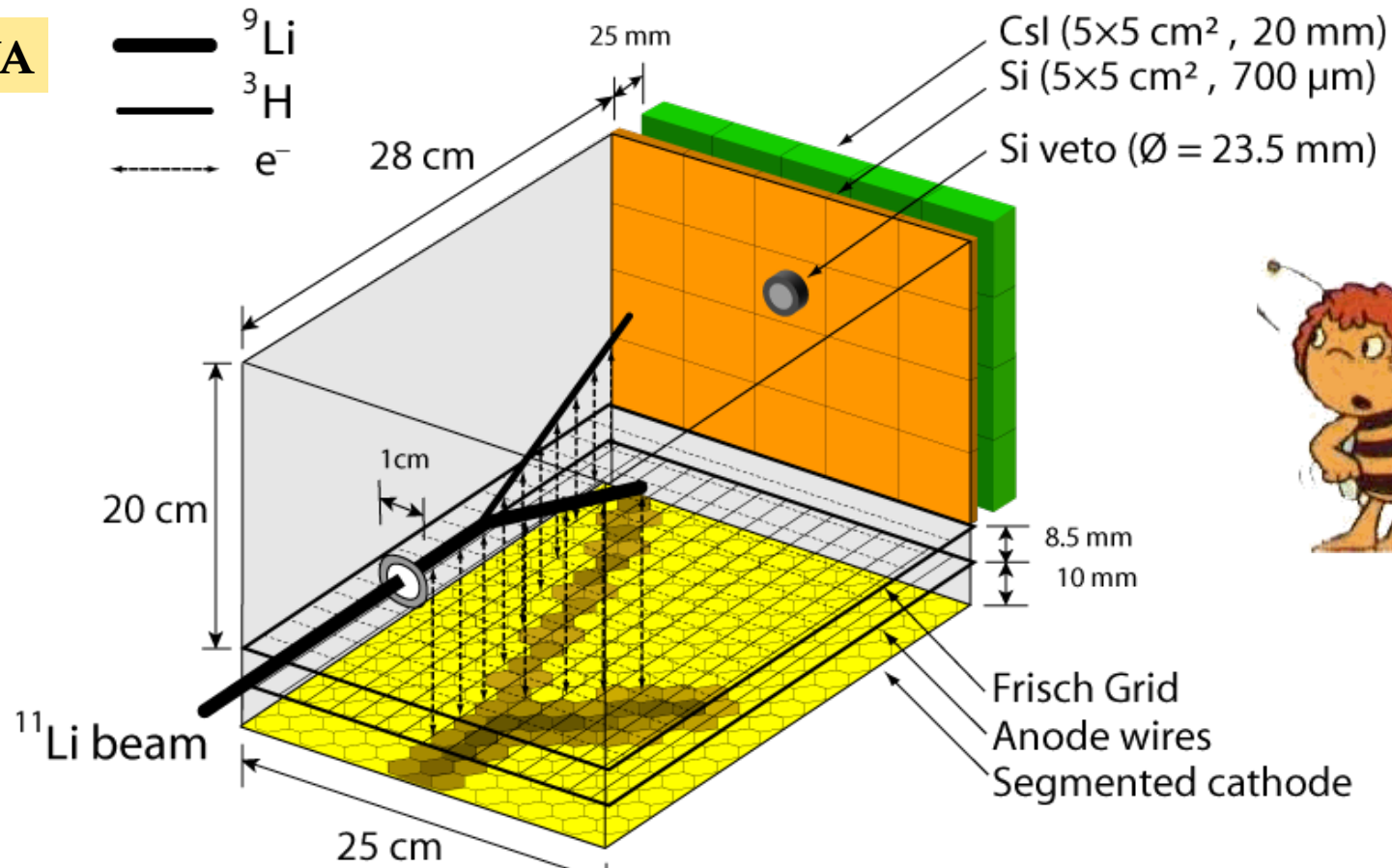
Identification pour les noyaux qui traversent le 1^{er} étage

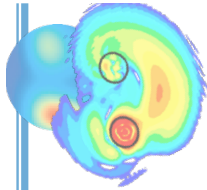


AUTRE MÉTHODE : LES CIBLES ACTIVES

- ▶ 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)

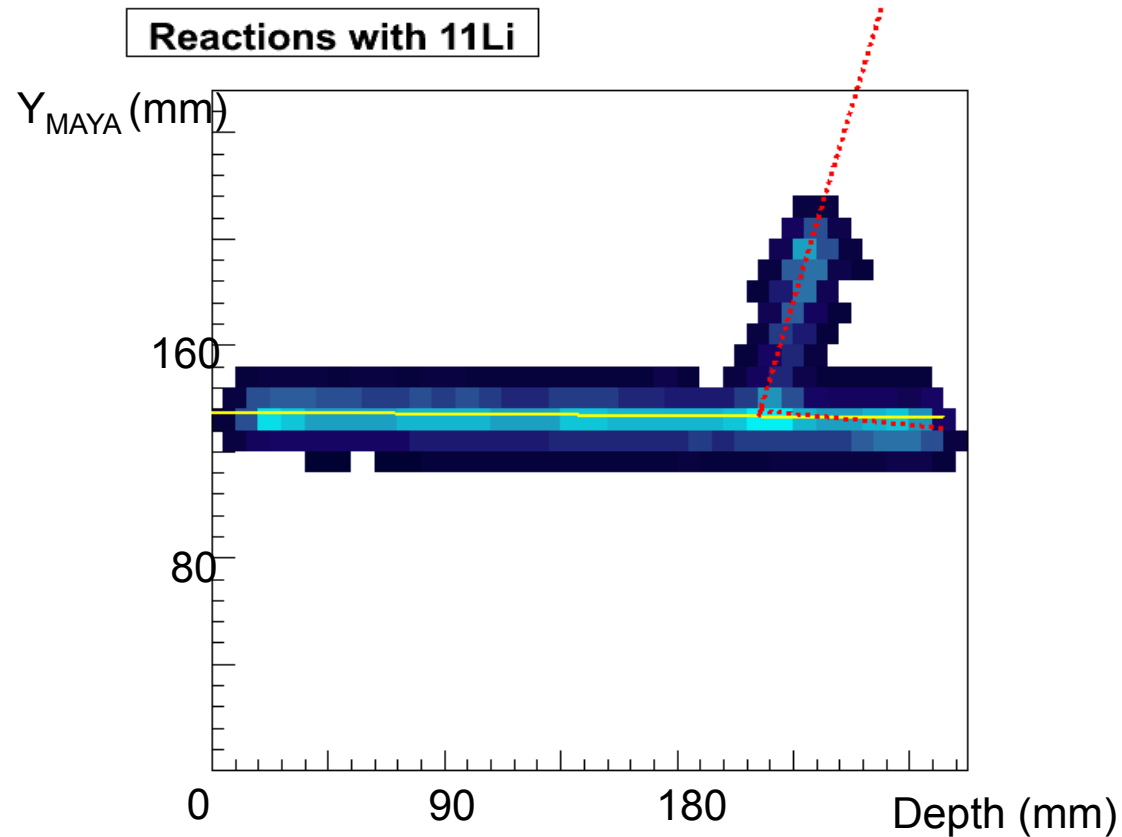
MAYA

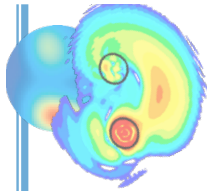




AUTRE MÉTHODE : LES CIBLES ACTIVES

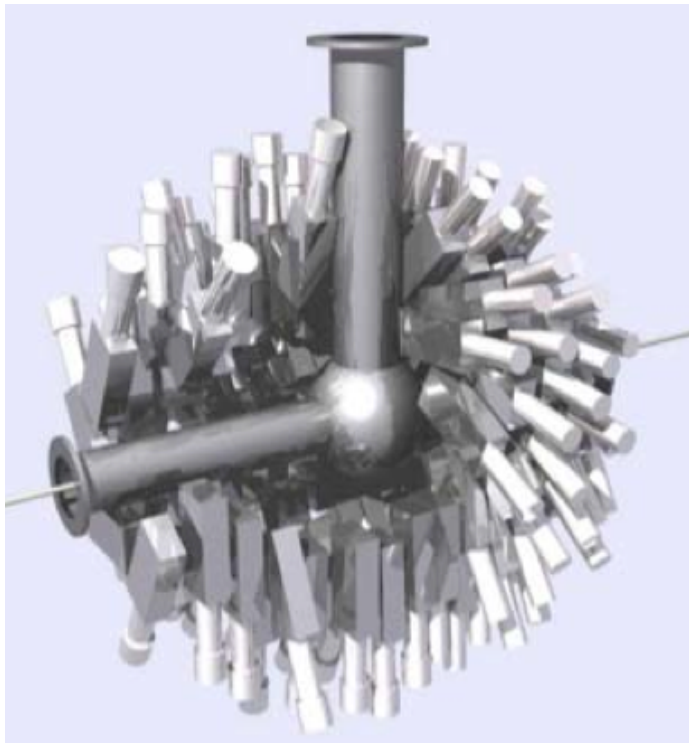
- ▶ Problème des pertes d'énergie dans la cible résolu
- ▶ Seuil très bas (la particule n'a pas besoin de sortir de la cible)
- ▶ Efficacité~ 90% (sauf partie proche du faisceau)
- ▶ Toutes les cibles ne sont pas possibles (gaz)



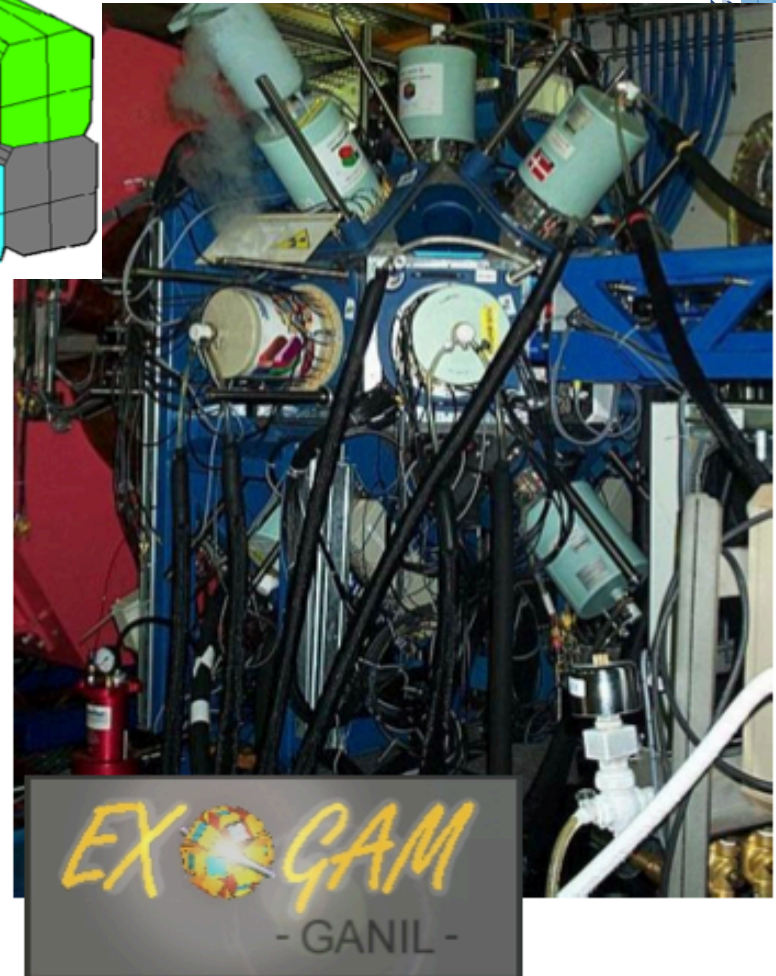
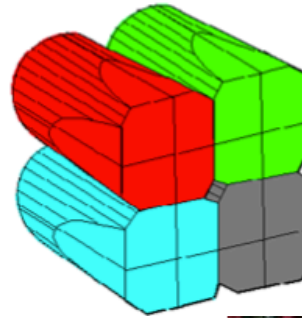


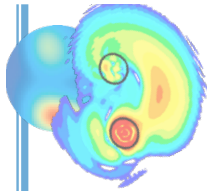
GAMMA RAY DETECTION

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



Dali 2 RIKEN



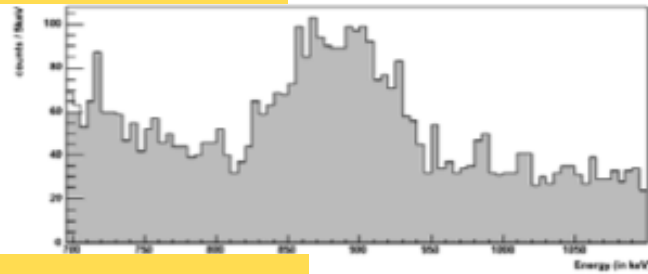


DÉTECTION DES GAMMAS : EFFET DOPPLER

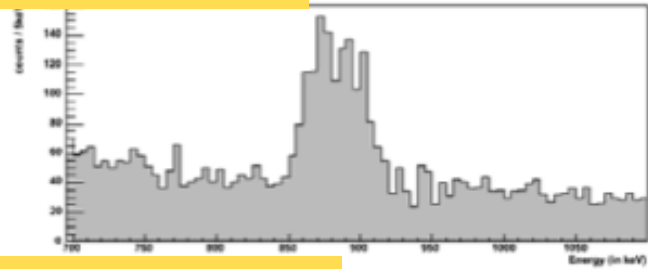
$$E_{\gamma} = \gamma E_{\text{det}} (1 - \beta \cos \theta)$$

► Utilisation de la segmentation

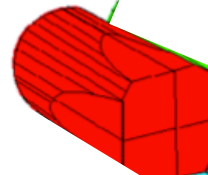
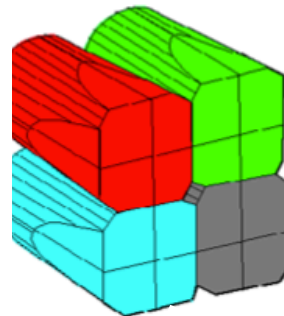
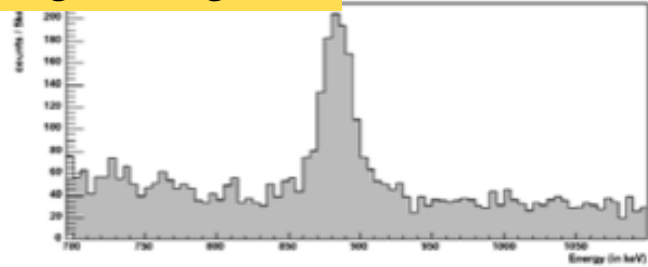
Angle du trèfle



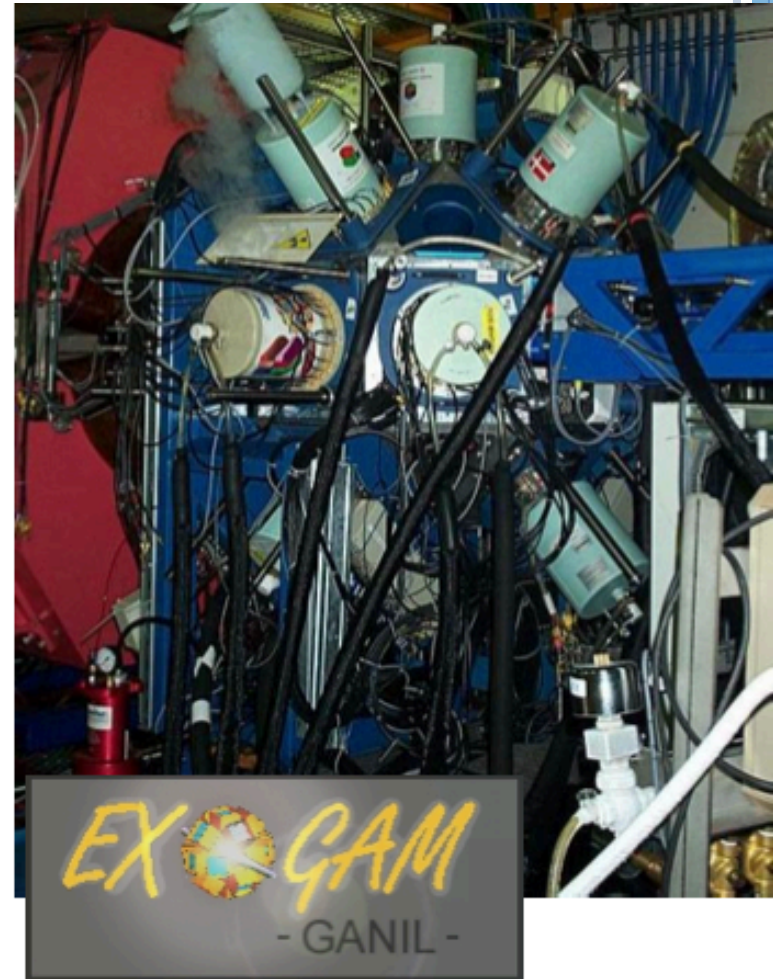
Angle du cristal

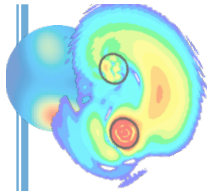


Angle du segment



1 segment



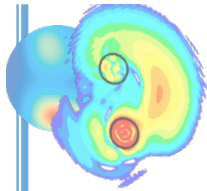


GE VS. LA Br_3 POUR DÉTECTER LES GAMMAS

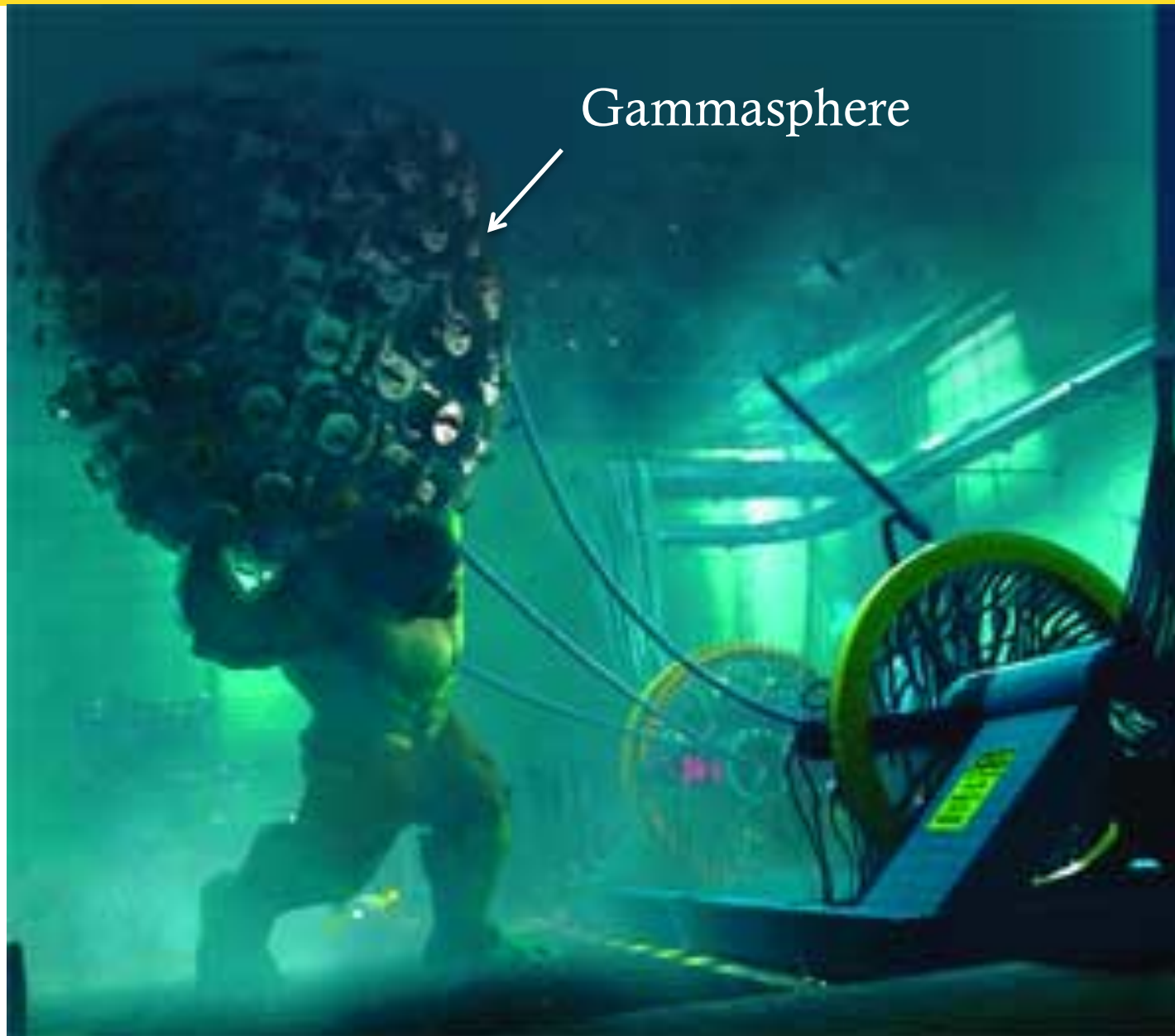
AGATA

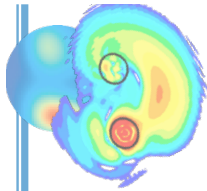
PARIS

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



LA RECONVERSION DE CERTAINS DÉTECTEURS...





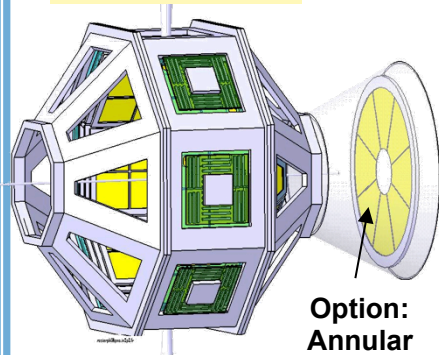
VERS LE FUTUR ...

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



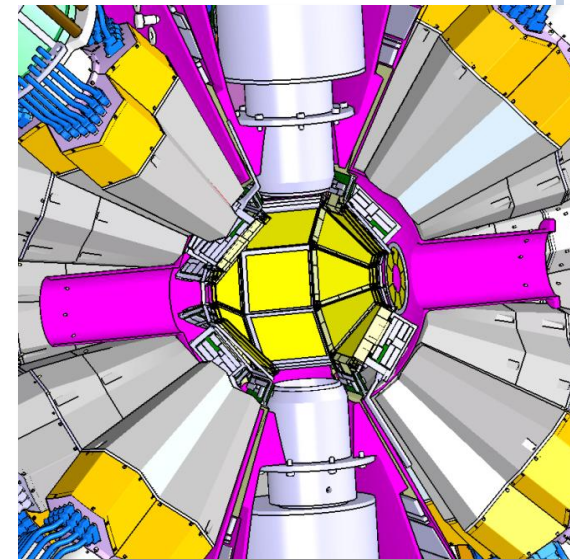
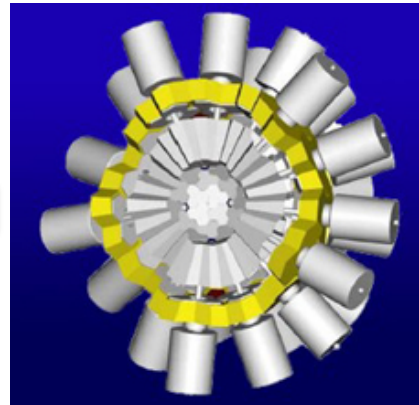
***Integration des détecteurs Siliciums
dans les boules gamma à venir***

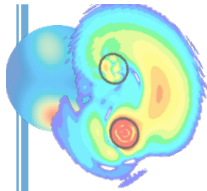
GASPARD



Option:
Annular
detectors

AGATA

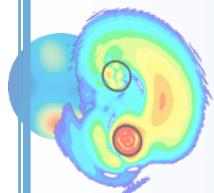




A QUOI ÇA RESSEMBLE UNE MANIP ?



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



« TEASER » : CE QUI CHAMBOULE NOTRE VISION DU NOYAU...



▶ Quand les nombres magiques disparaissent ...



▶ Quand les nucléons « coagulent » ...

▶ Quand les noyaux enflent...

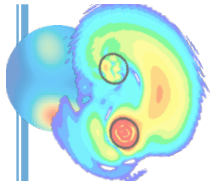


▶ Le grand saut : Un noyau neutre ? Un noyau super-lourd



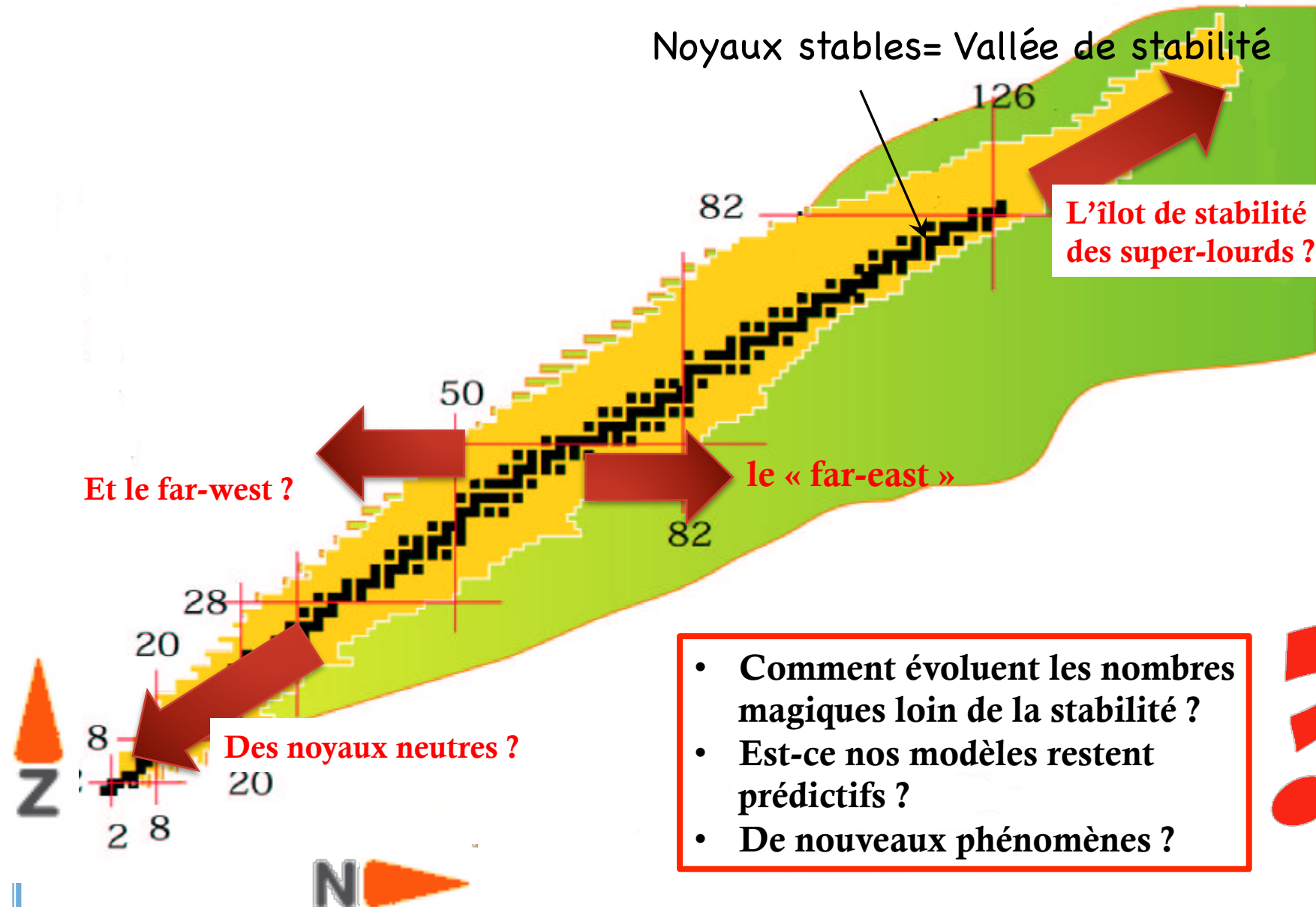
▶ Jusqu'où repousse-t-on les limites (les noyaux non-liés) ?

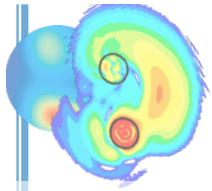
▶ Des radioactivités exotiques



NOTRE TERRAIN DE JEU : LA CARTE DES NOYAUX

I. LES LIMITES « EST-OUEST »





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...

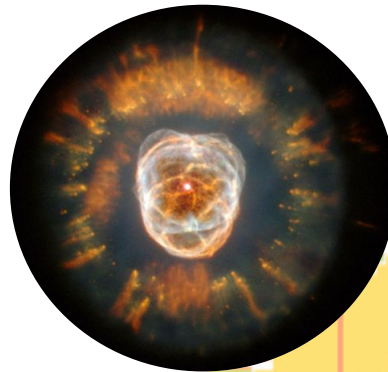
SWEETNESS AND MIGHT
Awesome power of the glycome

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

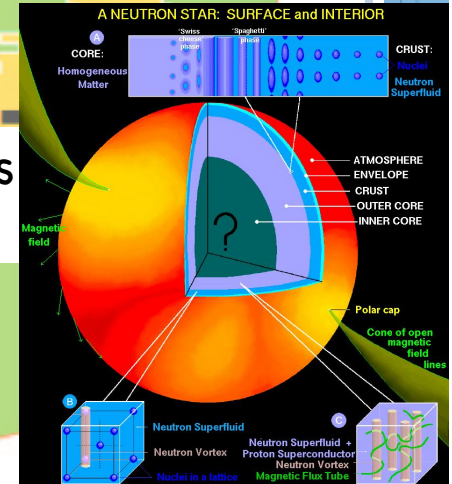
LATEST NEWS
NASA's new vision emerges
Row over 'turning rivers around'
New scare links food to blindness

0 4.000
Tn
Tetraneutron

- D'où vient cette idée ?



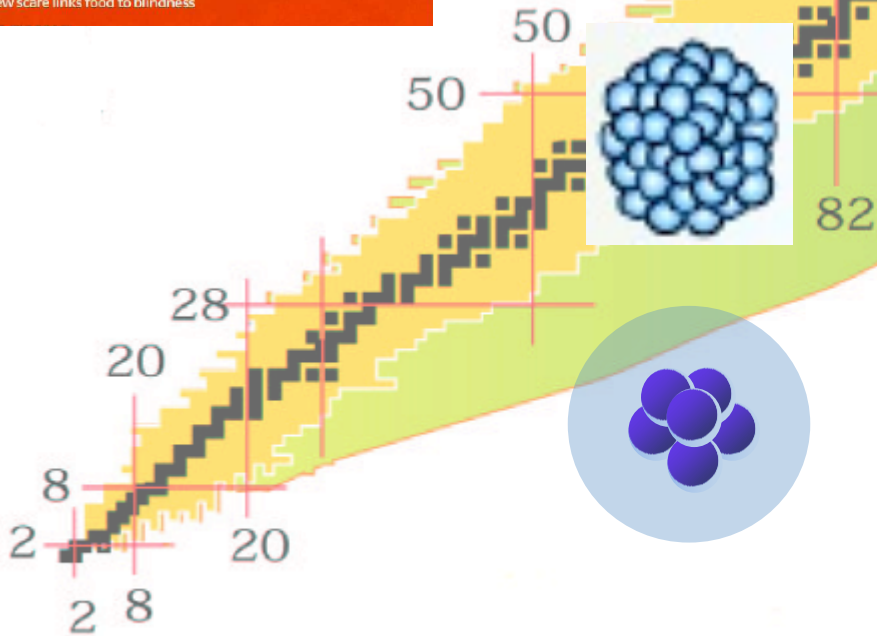
Les étoiles à neutrons
(10^{57} neutrons)

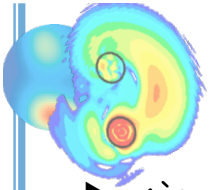


Les gouttes d' ^3He superfluides
(30 atomes par goutte)



Les noyaux neutres ?





ET UN NOYAU SANS PROTONS, C'EST POSSIBLE ?

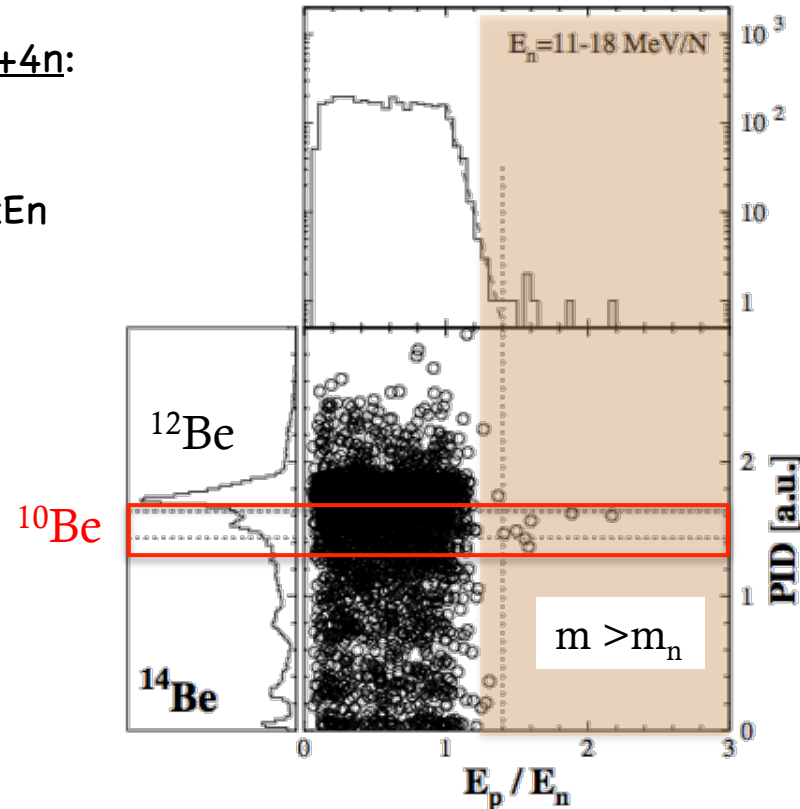
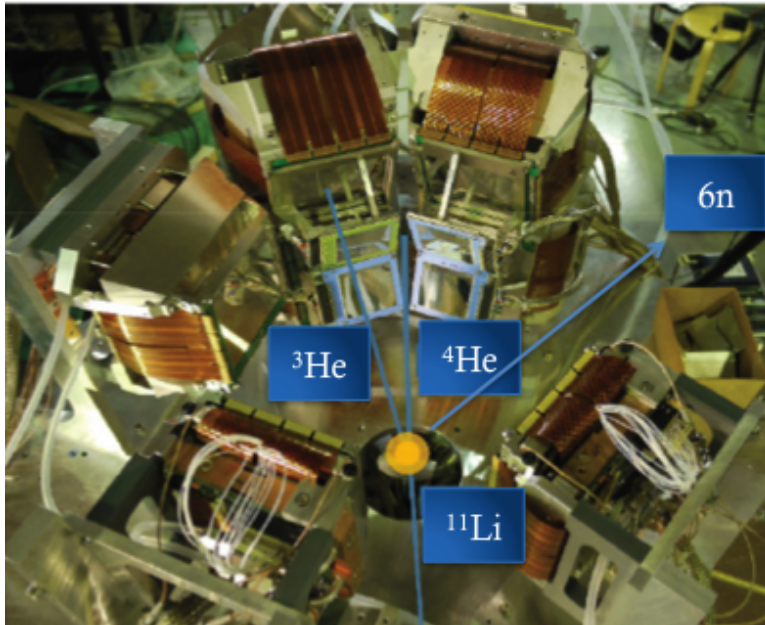
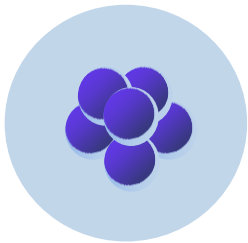
► 1^{ère} méthode par cassure du $^{14}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Be} + 4n$:

-> **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 $^{11}\text{Li}(d, ^3\text{He})^{10}\text{He}$

En réalité on ne peut détecter que

$^8\text{He} + 2n$ ou $^6\text{He} + 4n$ ou $^4\text{He} + 6n$

-> **méthode de la masse manquante**

→ pas de résonance observée

POURQUOI LES NOYAUX NEUTRES NOUS INTÉRESSENT-ILS ?

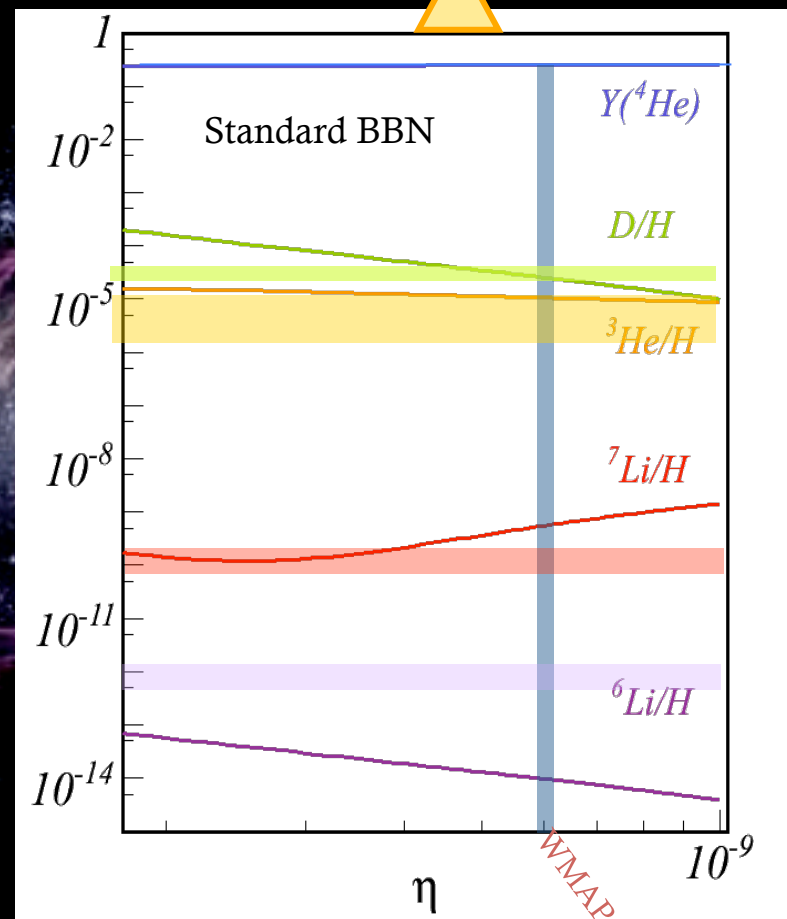


Nucléosynthèse primordiale commence à ~ 200 s
La physique nucléaire aussi...

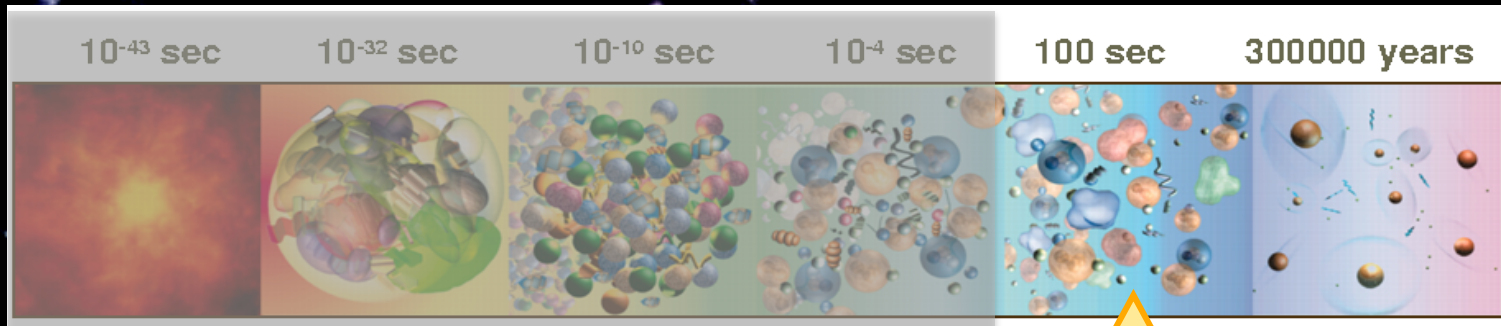
Le modèle du Big Bang permet de calculer les abondances attendues aujourd'hui

Mais désaccord avec le ${}^7\text{Li}$

Et si on rajoute des noyaux neutres ??



POURQUOI LES NOYAUX NEUTRES NOUS INTÉRESSENT-ILS ? UN EXEMPLE... (CHOISI)

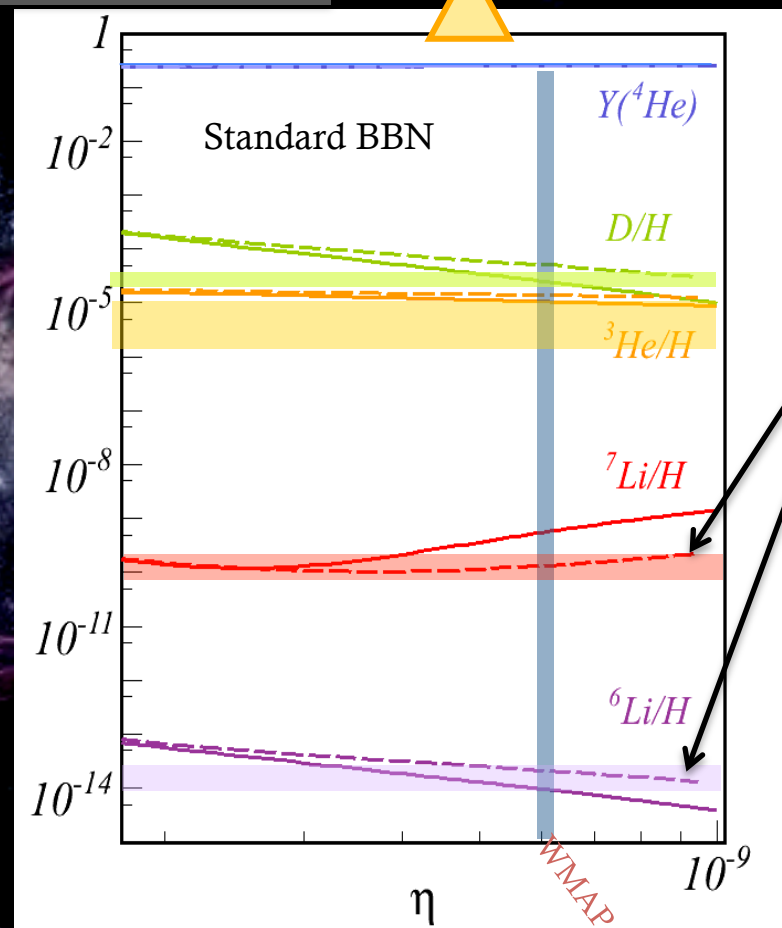


Nucléosynthèse primordiale
commence à ~ 200 s
La physique nucléaire aussi...

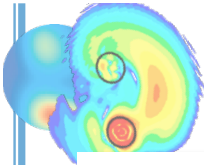
La modèle du Big Bang permet de
calculer les abondances attendues
aujourd'hui

Mais désaccord avec le ${}^7\text{Li}$

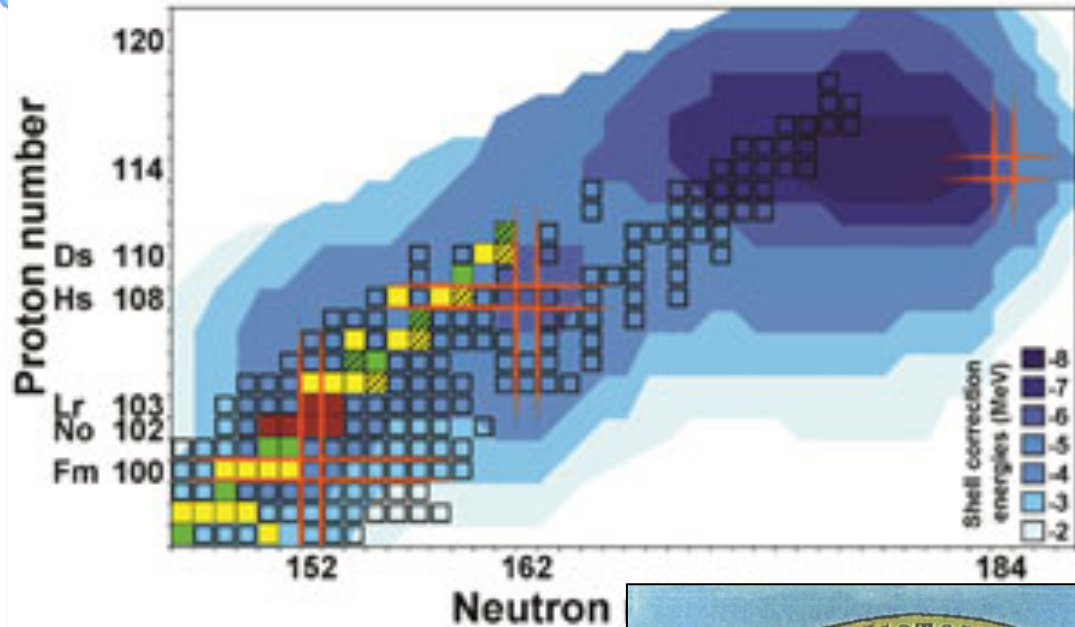
Et si on rajoute des noyaux
neutres ??



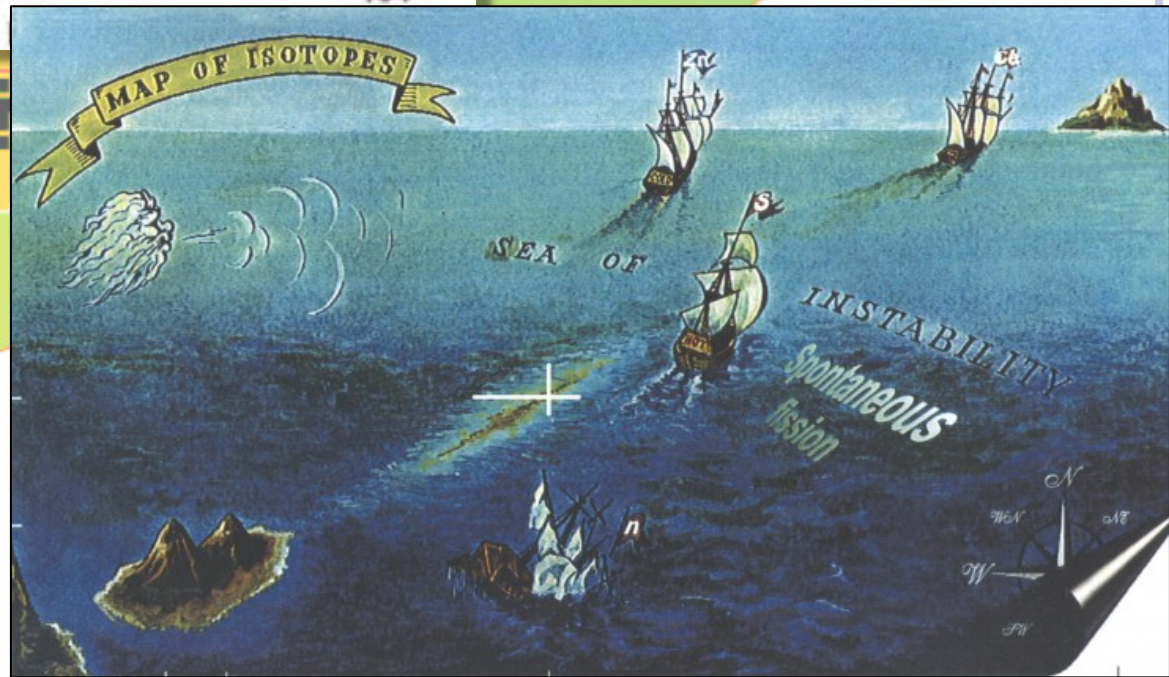
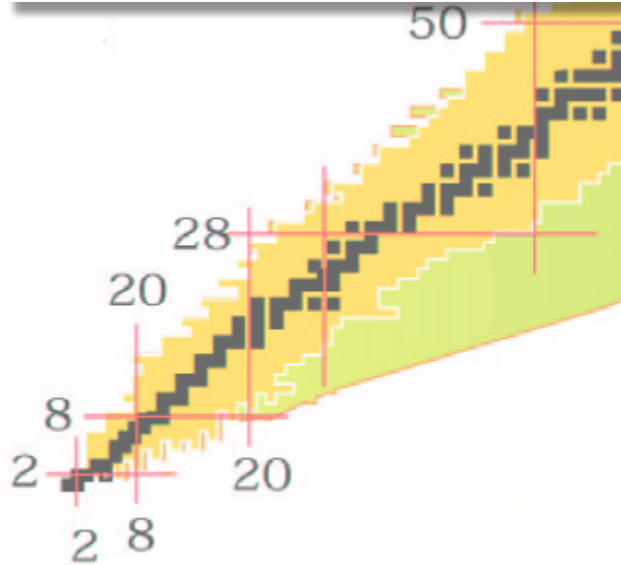
Avec $4n$

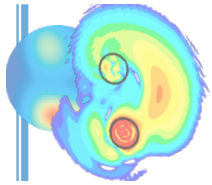


L'ÎLOT DES SUPERLOURDS

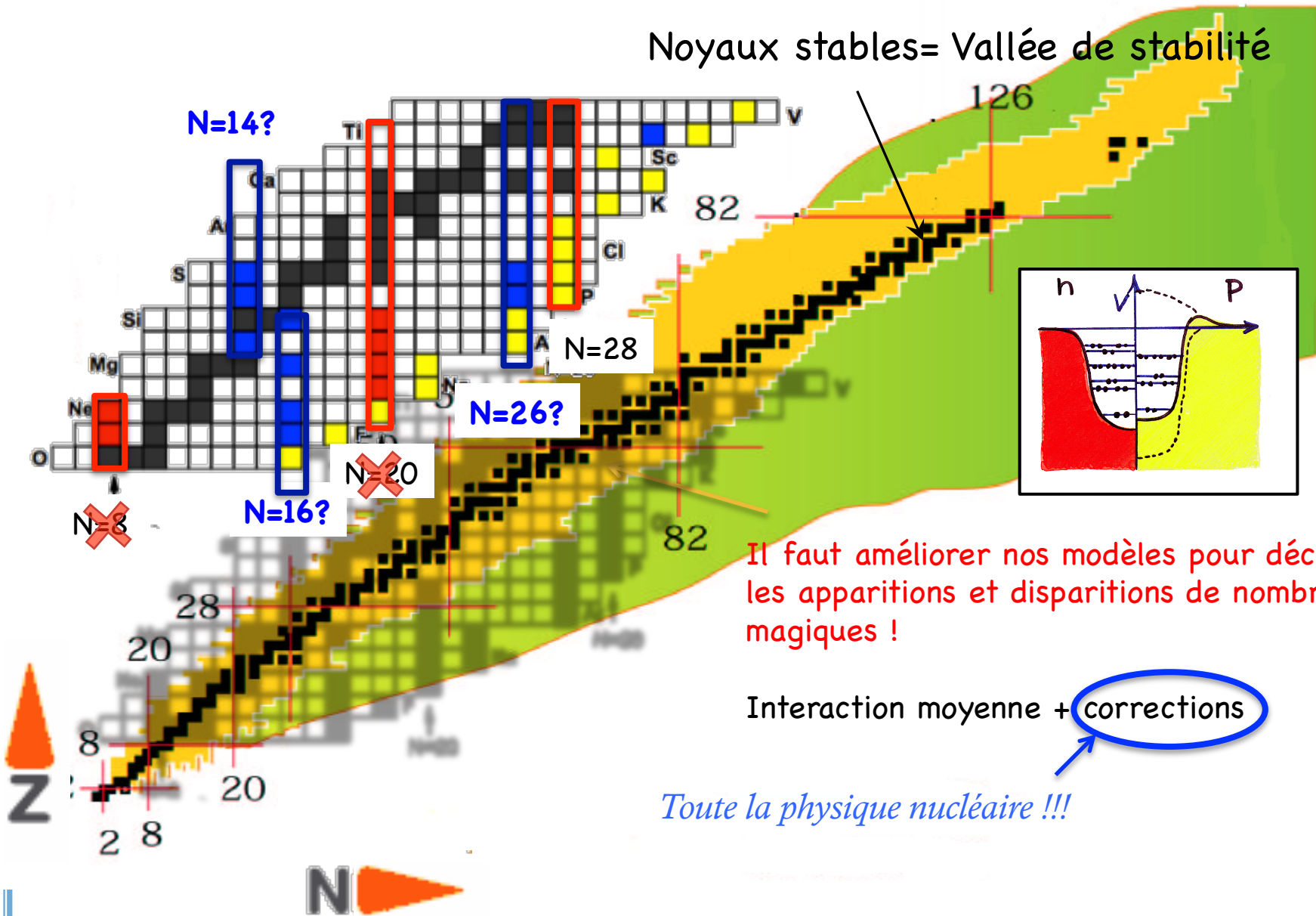


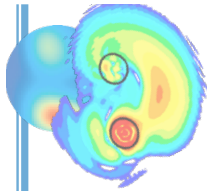
L'élément 117 (ununseptium) confirmé par 2 expériences indépendantes



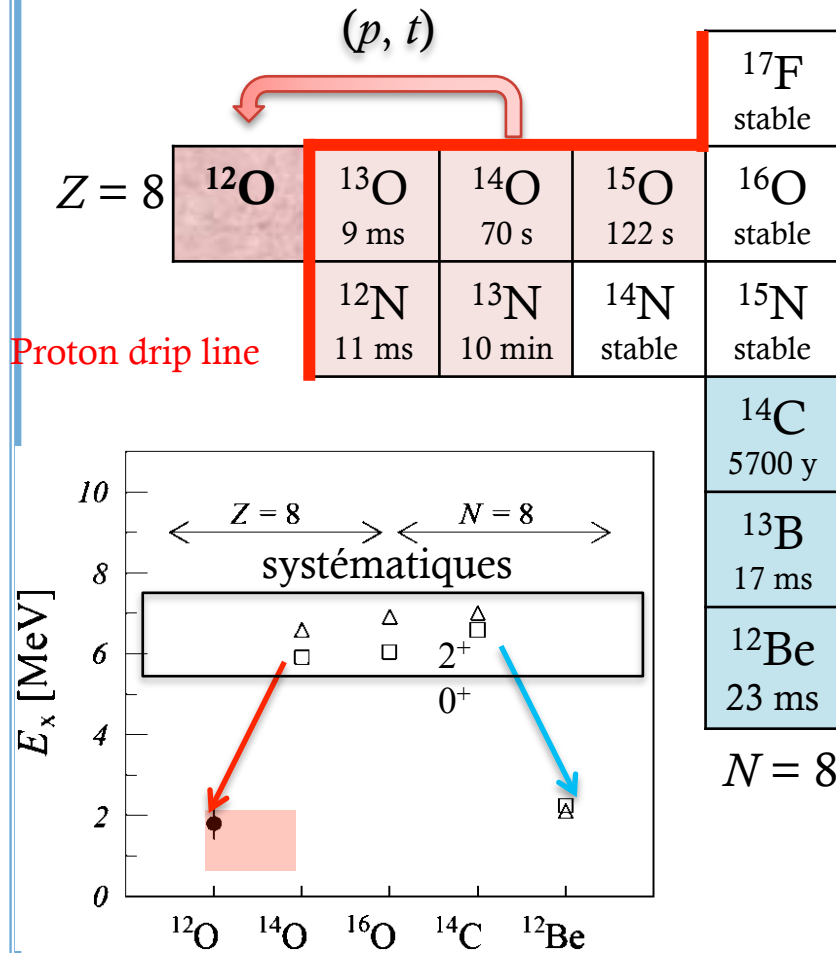


NOTRE TERRAIN DE JEU : LA CARTE DES NOYAUX

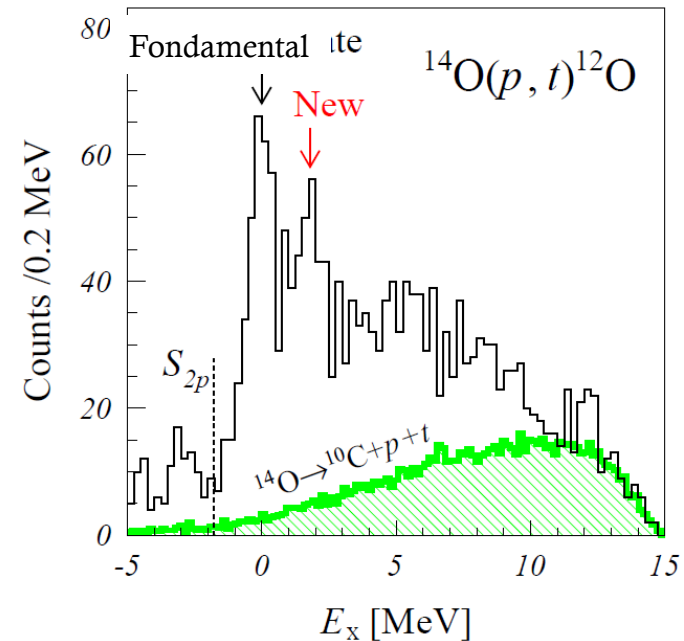
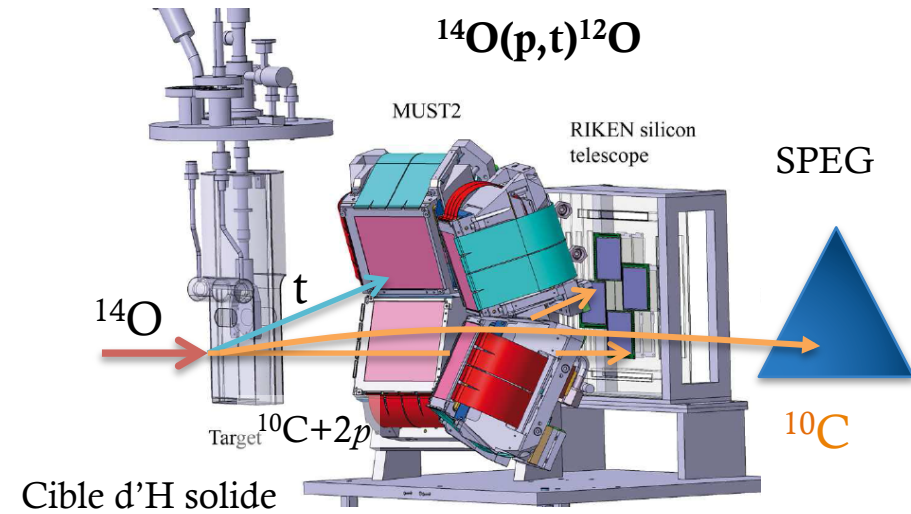


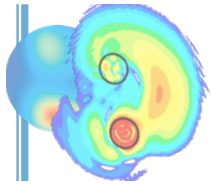


LE NOYAU NON-LIÉ D' ^{12}O ET LE NOMBRE MAGIQUE $Z = 8$

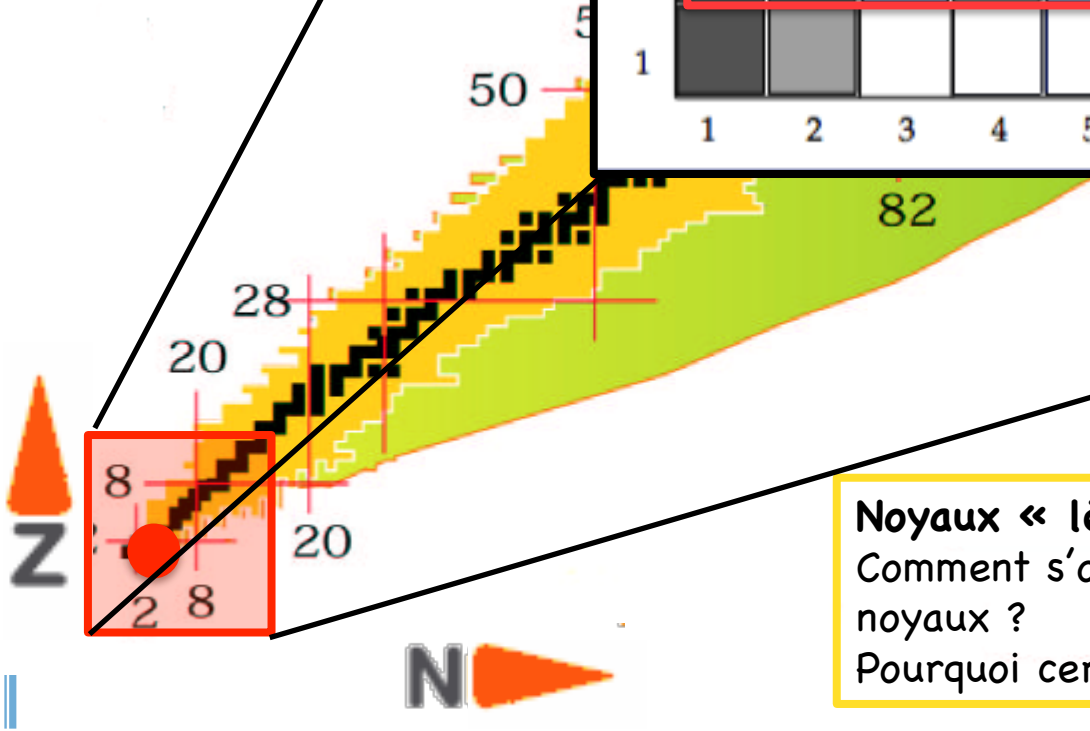
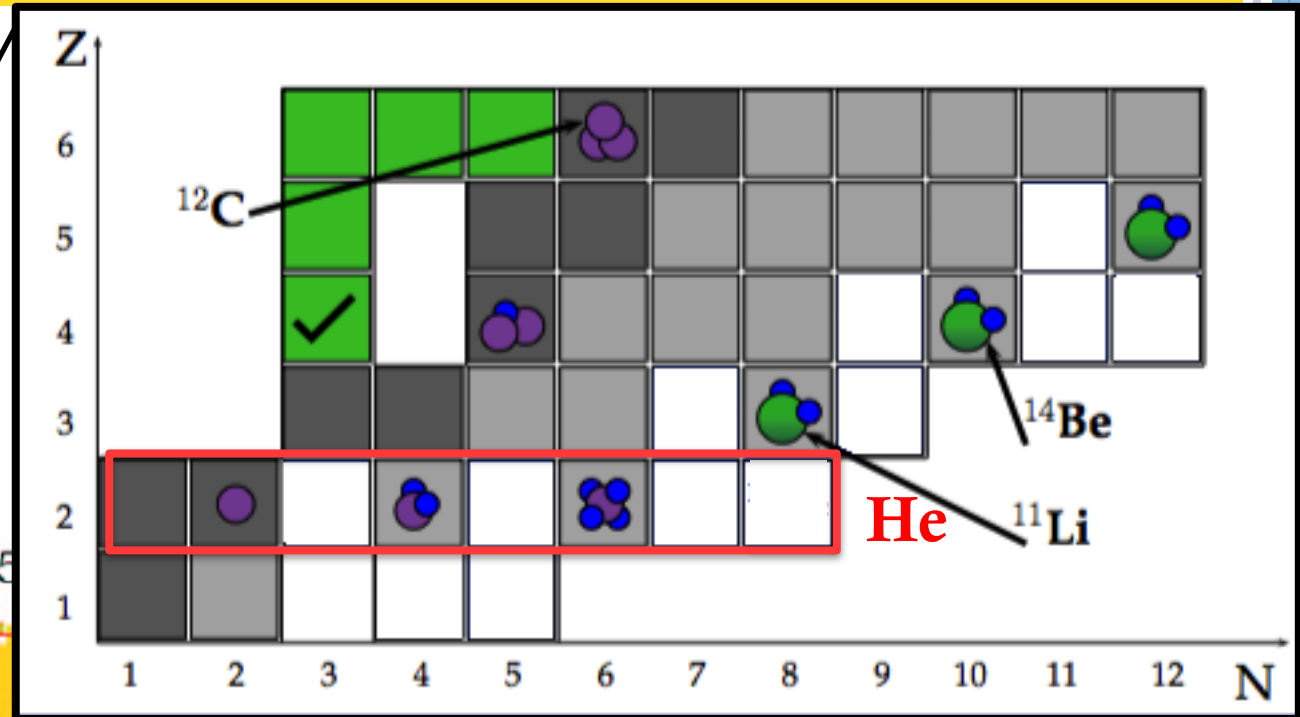


- Découverte d'un nouvel état dans l' ^{12}O (non lié)
- Disparition de la fermeture de couche $Z = 8$



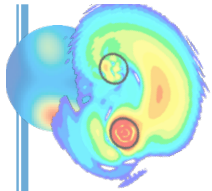


QUAND LES NOYAUX COAGULENT ET ENFLENT... LE SYNDROME DES NOYAUX LÉGERS

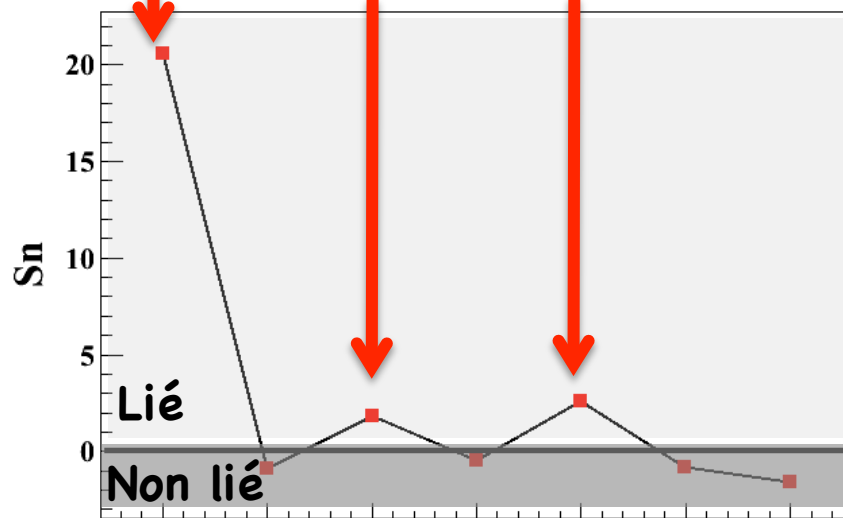


Noyaux « légers »
Comment s'organisent les éléments du noyaux ?
Pourquoi certains existent, d'autres pas ?





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

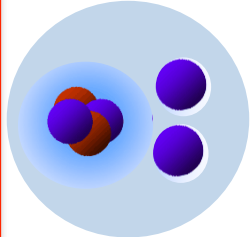


α



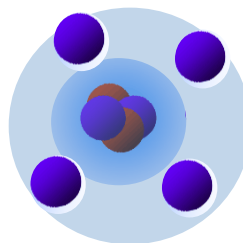
2 neutrons
2 protons

${}^6\text{He}$



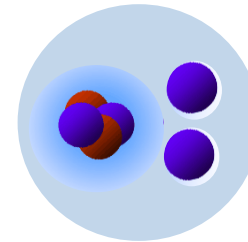
4 neutrons
2 protons

${}^8\text{He}$



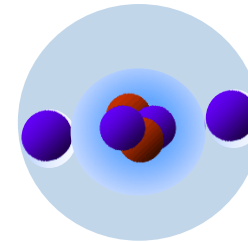
6 neutrons
2 protons

La question en suspens...



« di-neutron » ?

${}^6\text{He}$



« cigare » ?



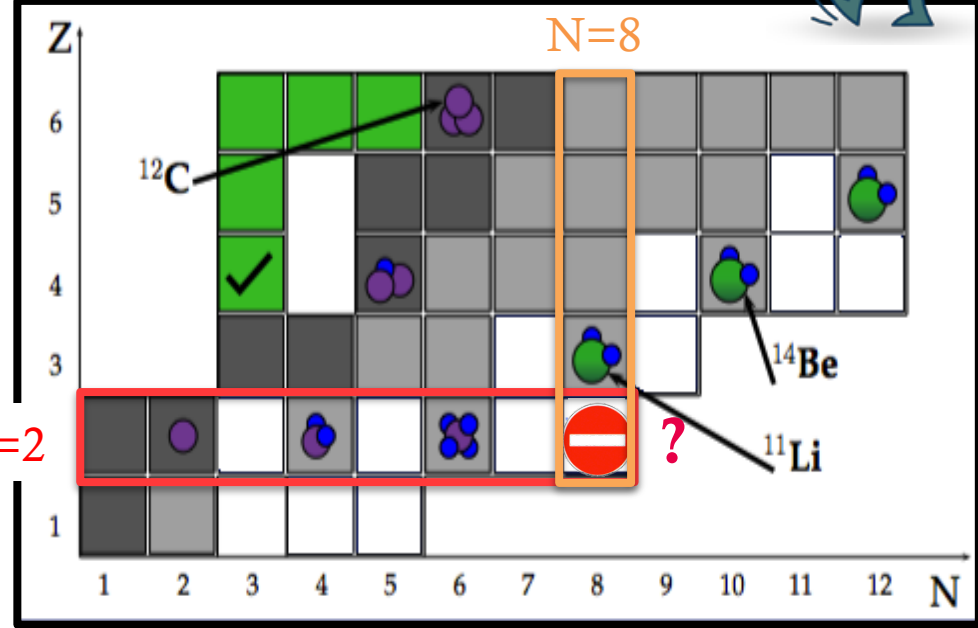
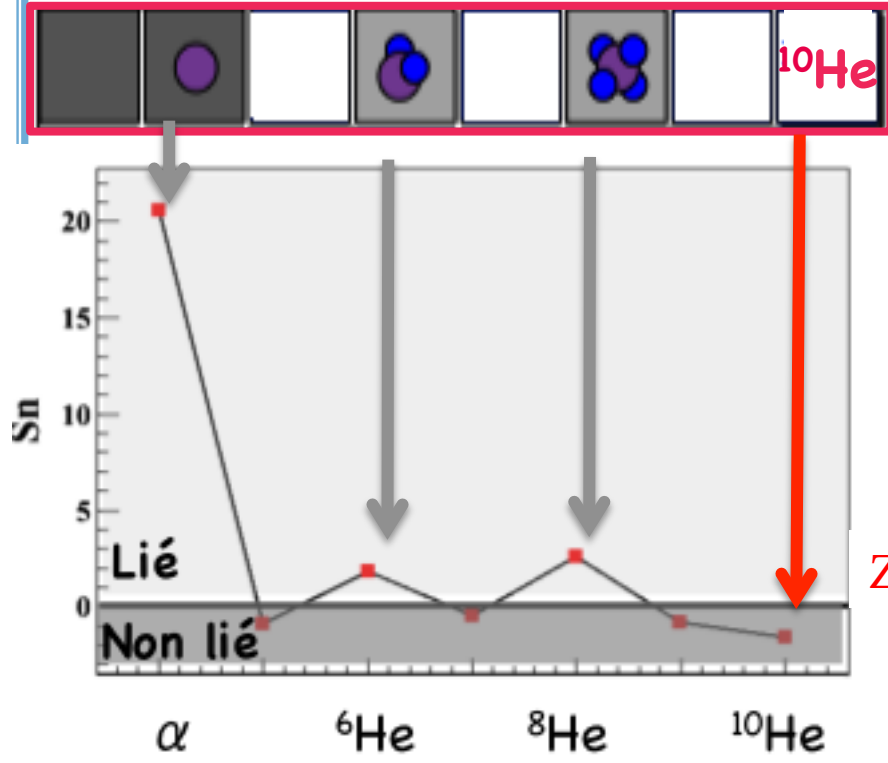
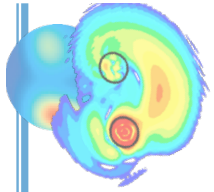
L'appariement des 2 neutrons
stabilise le noyau

Mais où sont les neutrons ?

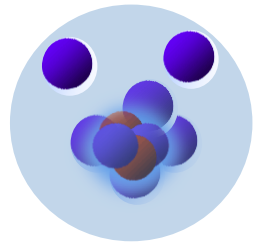
**Comment décrire la force qui
les lie ?**



ET APRÈS ? ET ENCORE APRÈS ? LES NOYAUX NON LIÉS



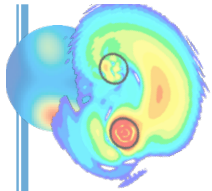
¹⁰He
Prédit comme halo de 2 neutrons



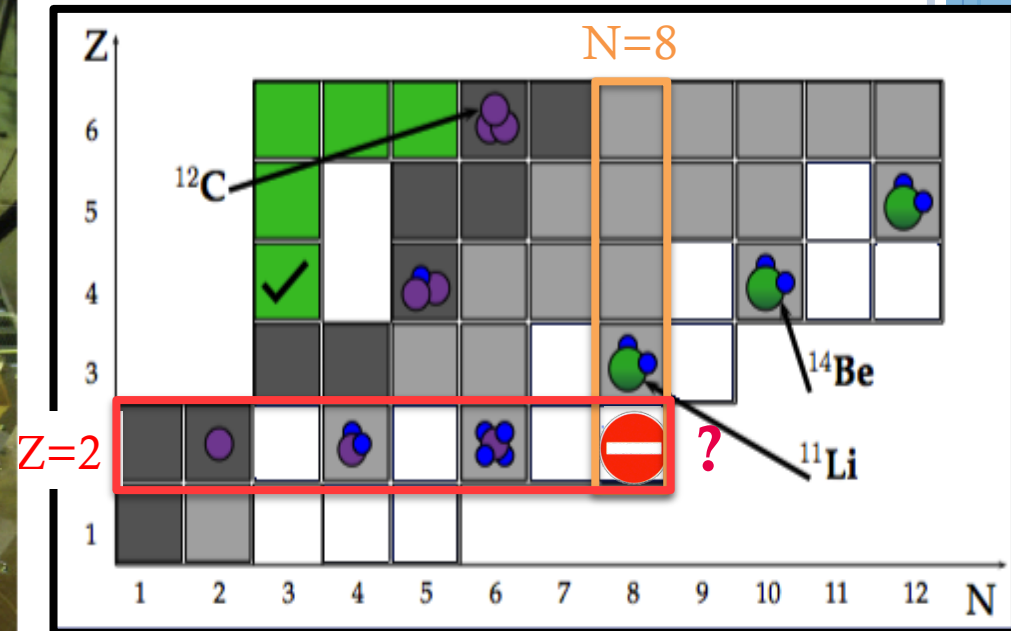
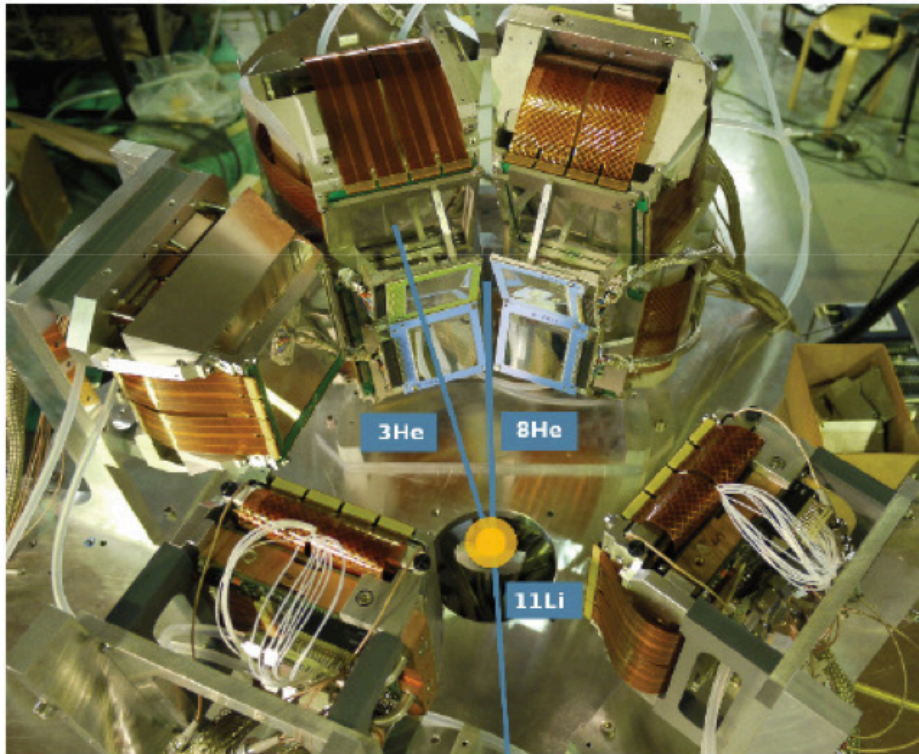
8 neutrons
2 protons

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





ET APRÈS ? LES NOYAUX NON LIÉS

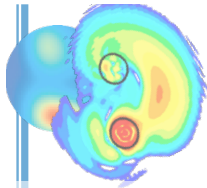


Etudié par la réaction de transfert : $^{11}\text{Li}(d, ^3\text{He})^{10}\text{He}$

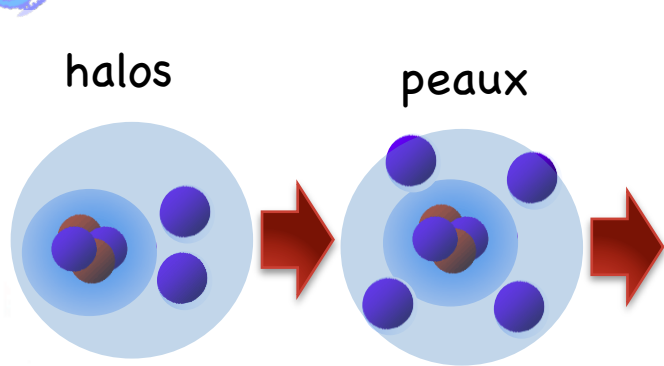
En réalité on ne peut détecter que $^8\text{He} + 2n$ ou $^6\text{He} + 4n$ ou $^4\text{He} + 6n$

-> un état résonant à 1.3 MeV

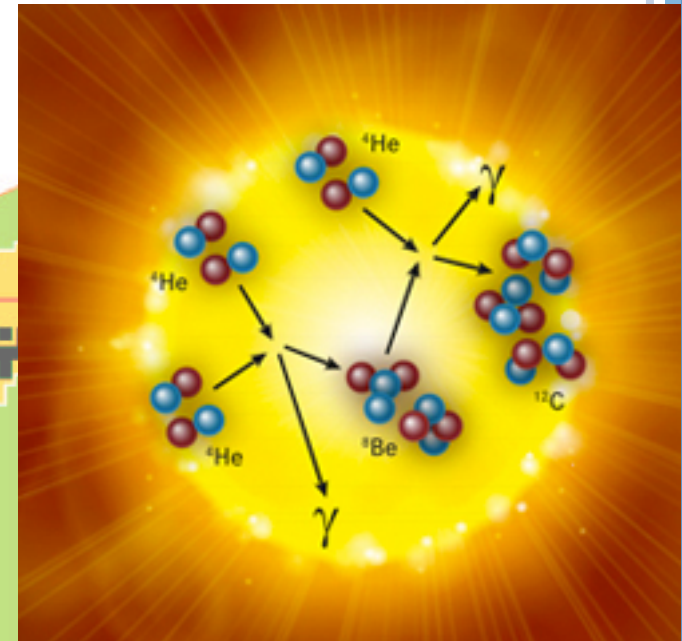
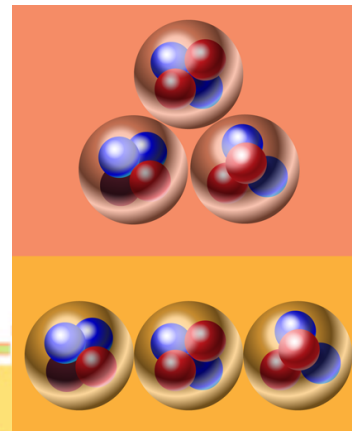
-> la structure de l' ^{10}He est différente de la structure du ^{11}Li .



DES AMAS (« CLUSTERS ») DANS LES NOYEAUX ?

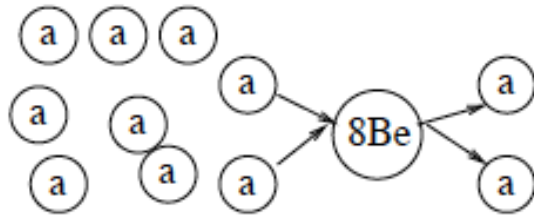


$^{12}\text{C} = 3$ alphas
Etat de Hoyle

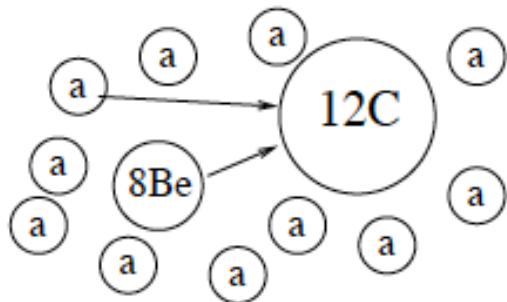


Formation du ^{12}C dans les étoiles

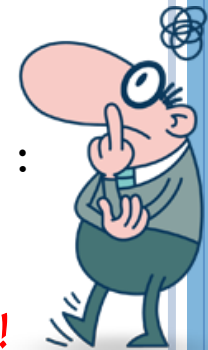
M. Freer, UK

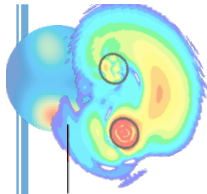


^8Be non lié \rightarrow décroît en 2 alphas



Etat de Hoyle dans le ^{12}C (non lié) 3 possibilités :
 \rightarrow se casse en 3 alphas
 \rightarrow se casse en ^8Be + alpha
 \rightarrow décroît vers l'état fondamental du ^{12}C *Ouf!*



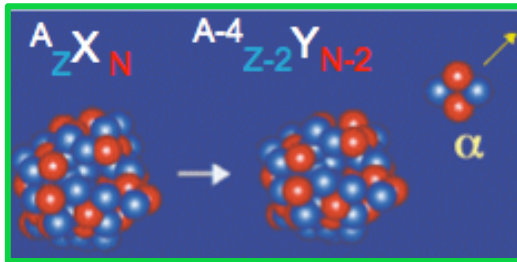


CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYEAUX

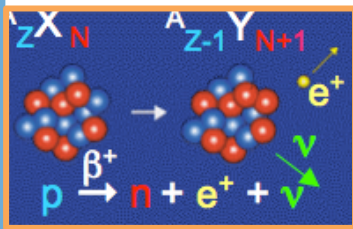
► Condition de décroissance :

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

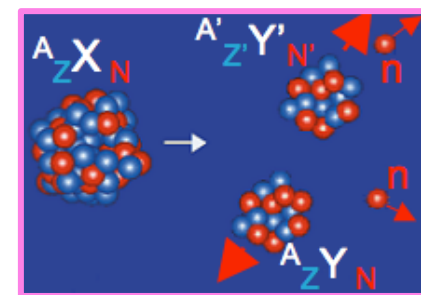
$$Q = M(\text{Père}) - [M(\text{Fils}) + M(\alpha, \beta, \dots)] > 0$$



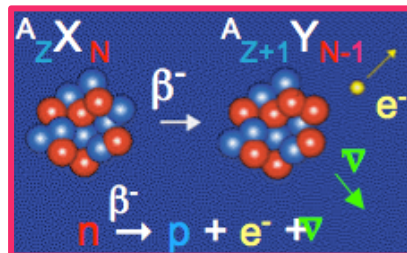
Désintégration α



Désintégration β^+
& capture e^-

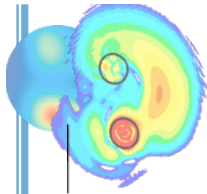


fission spontanée



Désintégration β^-

EMISSION	
■	STABLE
■	α ALPHA
■	p PROTON
□	EC e^- CAPTURE
■	β^+ POSITRON
■	β^- ELECTRON
■	n NEUTRON
■	SF (n)
●	FERTILE (SF)



DE NOUVEAUX MODES DE DÉCROISSANCE

► Condition de décroissance :

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

$^{45}\text{Fe}, ^{54}\text{Zn}, ^{19}\text{Mg}$ two-proton decay

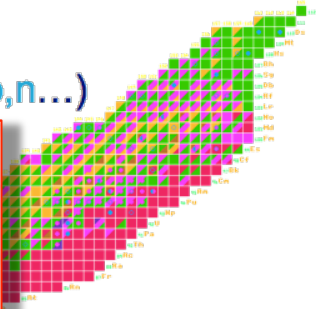
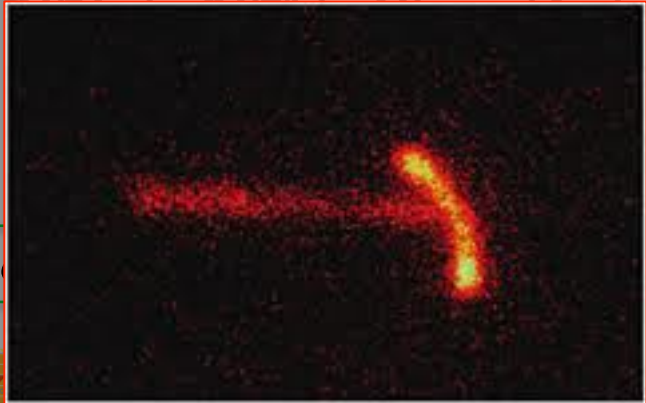
découverte en 2000

$^Z_X^N$

β^+

$p \rightarrow n + e^+ + \nu$

Désintégration β^+ & capture e^-



émission spontanée

$A'Z'Y'N'$

AZY_N

$^A_ZX^N$

β^-

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

$^A_{Z+1}Y^{N-1}$

Désinté

^{16}Be : two neutron decay

découverte en 2012

ION _____

HA

TION

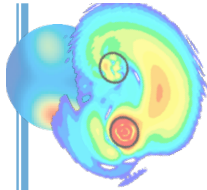
PTURE

ITRON

CTRON

TRON

E (5F)



MESURE DES DÉCROISSANCES 2P

Décroissance du noyau après implantation :

- ⇒ temps implantation -> décroissance
- ⇒ énergie des gamma et beta

Energie des protons

Efficacité détecteur ~ 99 %
empilement avec β (ΔE)

B Coincidences :

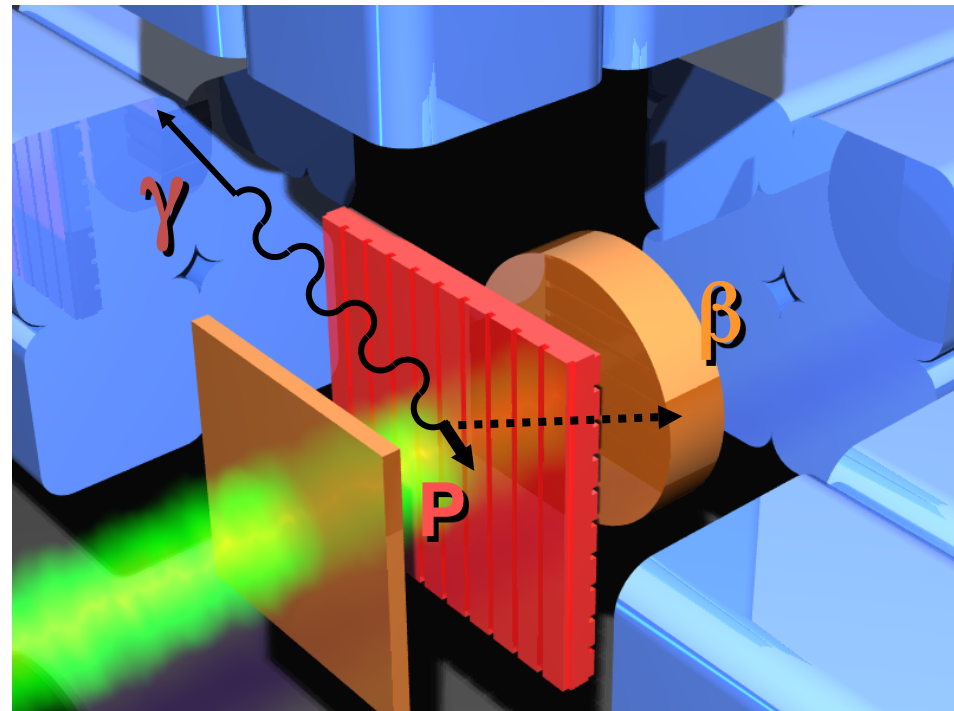
pistes voisines Si ~ 30/40 %

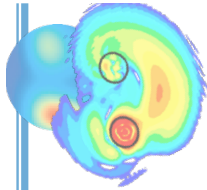
Détecteurs Germanium

spectroscopie β - γ , β -p- γ

implantation → décroissance

corrélation spatiale
corrélation en temps





SI ON FAIT LE BILAN...

- ▶ Le rayon 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...

