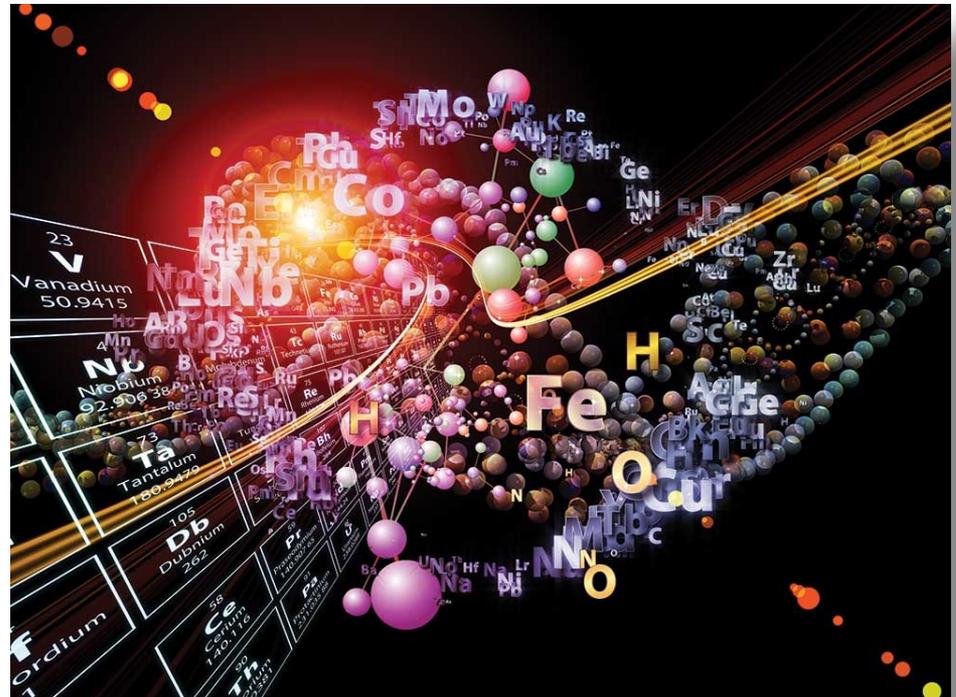


Ecole thématique IN2P3
“de la physique au détecteur”

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Cours de physique nucléaire 2/3
Les indispensables classiques de la physique
nucléaire



Marine VANDEBROUCK
CEA Saclay Irfu/DPhN

Cours de physique nucléaire 2/3

Les indispensables classiques de la physique nucléaire

1. Etude des propriétés fondamentales

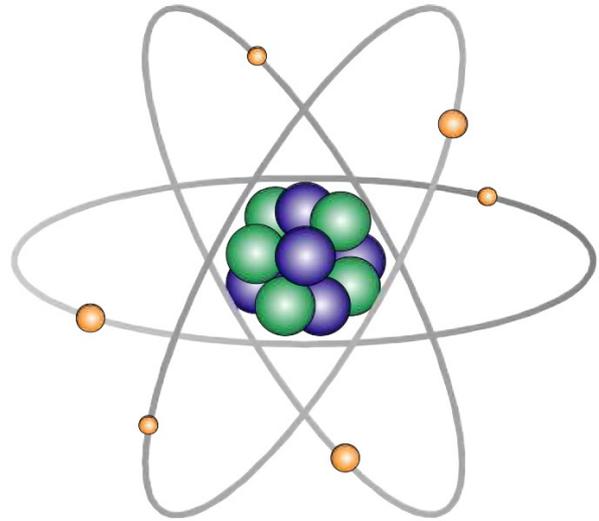
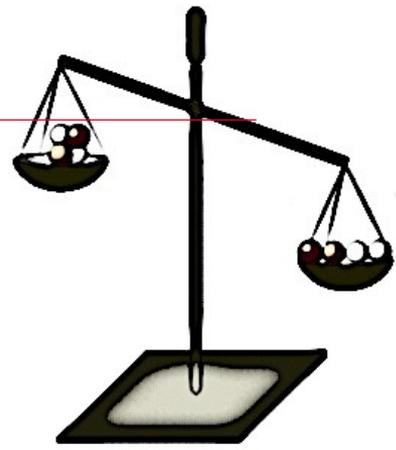
- 1. La masse**
- Les propriétés de décroissance
 - Cas des noyaux superlourds
 - Cas de la radioactivité α protons

2. Etude des états excités du noyau

- La spectroscopie γ prompt
- Mesurer des γ de plus haute énergie

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.1. La masse

- Qu'est ce que la masse d'un noyau ?



$$= N \cdot \text{green sphere} + Z \cdot \text{blue sphere} + Z \cdot \text{orange sphere} - \text{binding energy}$$

$$m_{\text{Atom}} = N \cdot m_{\text{neutron}} + Z \cdot m_{\text{proton}} + Z \cdot m_{\text{electron}} - (B_{\text{atom}} + B_{\text{nucleus}})/c^2$$

$$\delta m/m < 10^{-10}$$

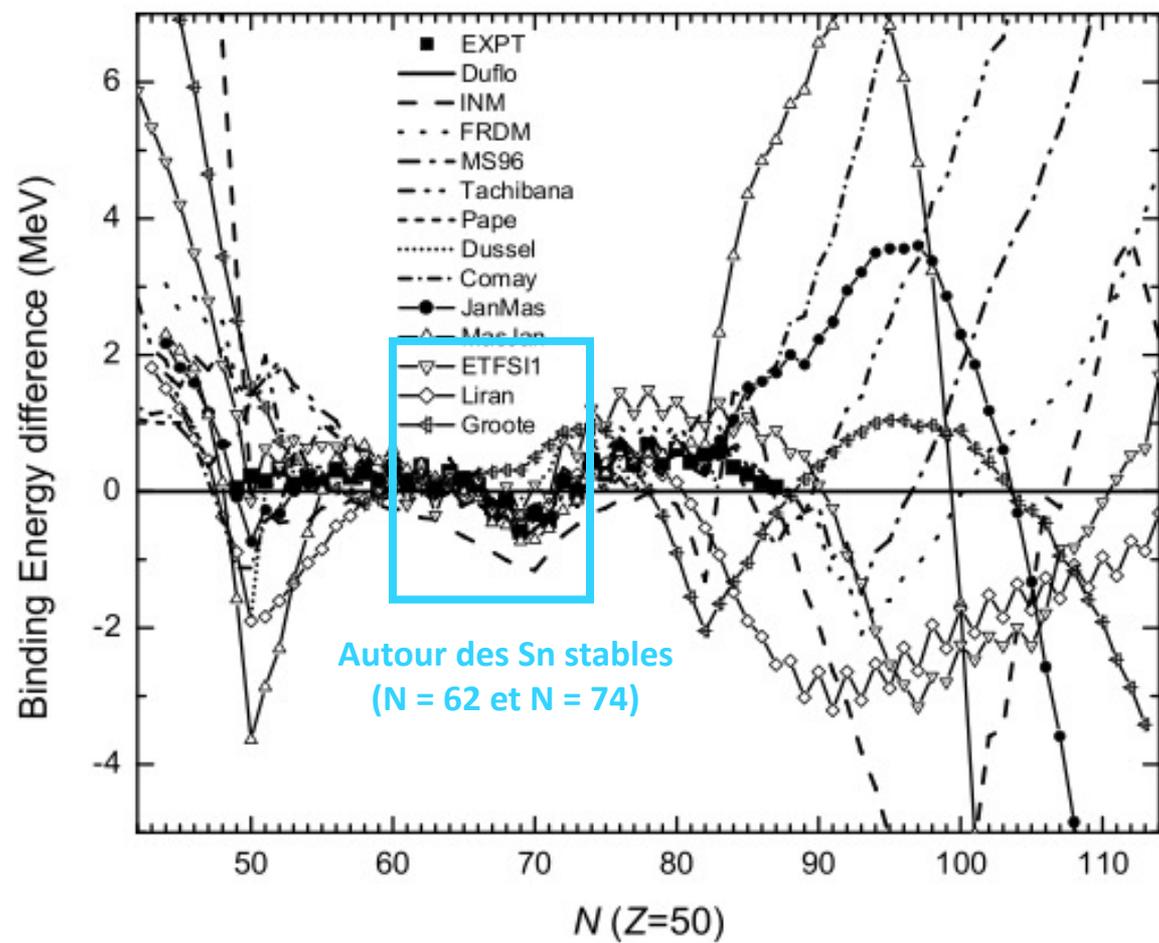


$$\delta m/m = 10^{-6} - 10^{-8}$$

La physique nucléaire est ici (interaction n-n)

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.1. La masse

- Pourquoi mesure-t-on la masse d'un noyau ?

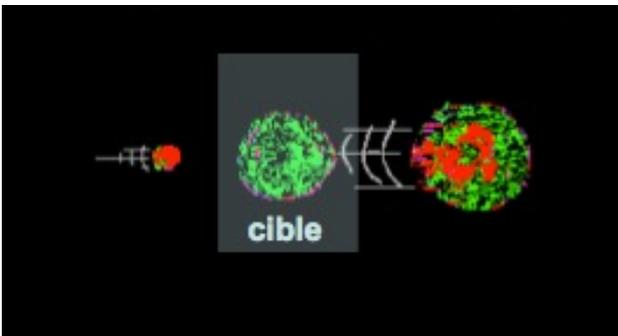


1. Etude des propriétés fondamentales – 1.1. La masse

- Comment mesurer la masse des noyaux ?

Faisceau primaire

Faisceau secondaire



ACCELERATEUR

SYSTEME DE PRODUCTION IONS RADIOACTIFS

DETECTEUR

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.1. La masse

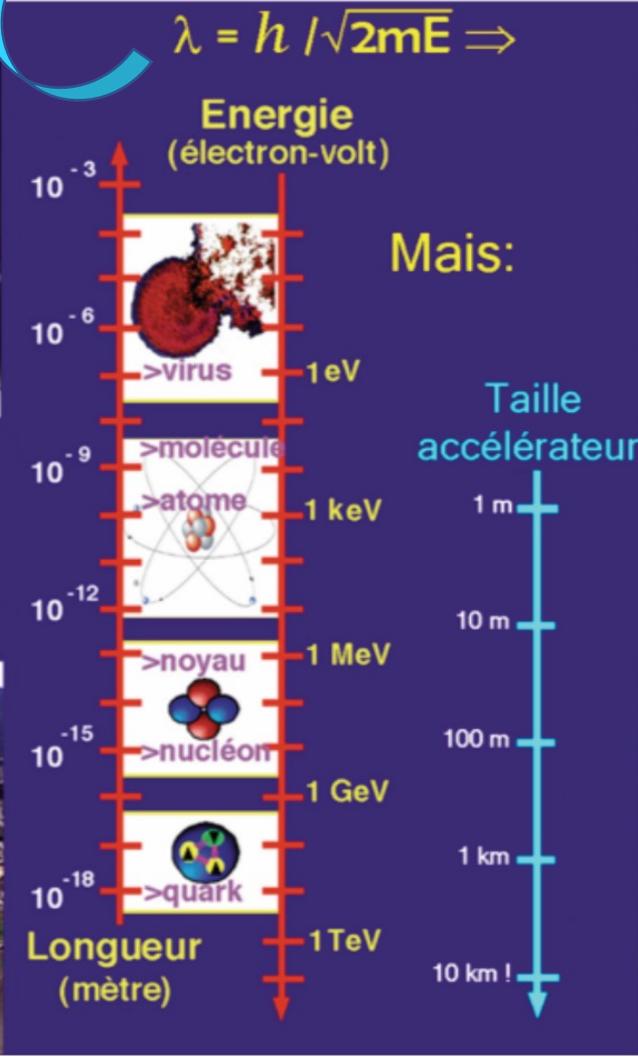
ACCELERATEUR

Plus l'énergie de la particule est grande, plus elle est une sonde fine



Microscope électronique

Accélérateur linéaire (SLAC)



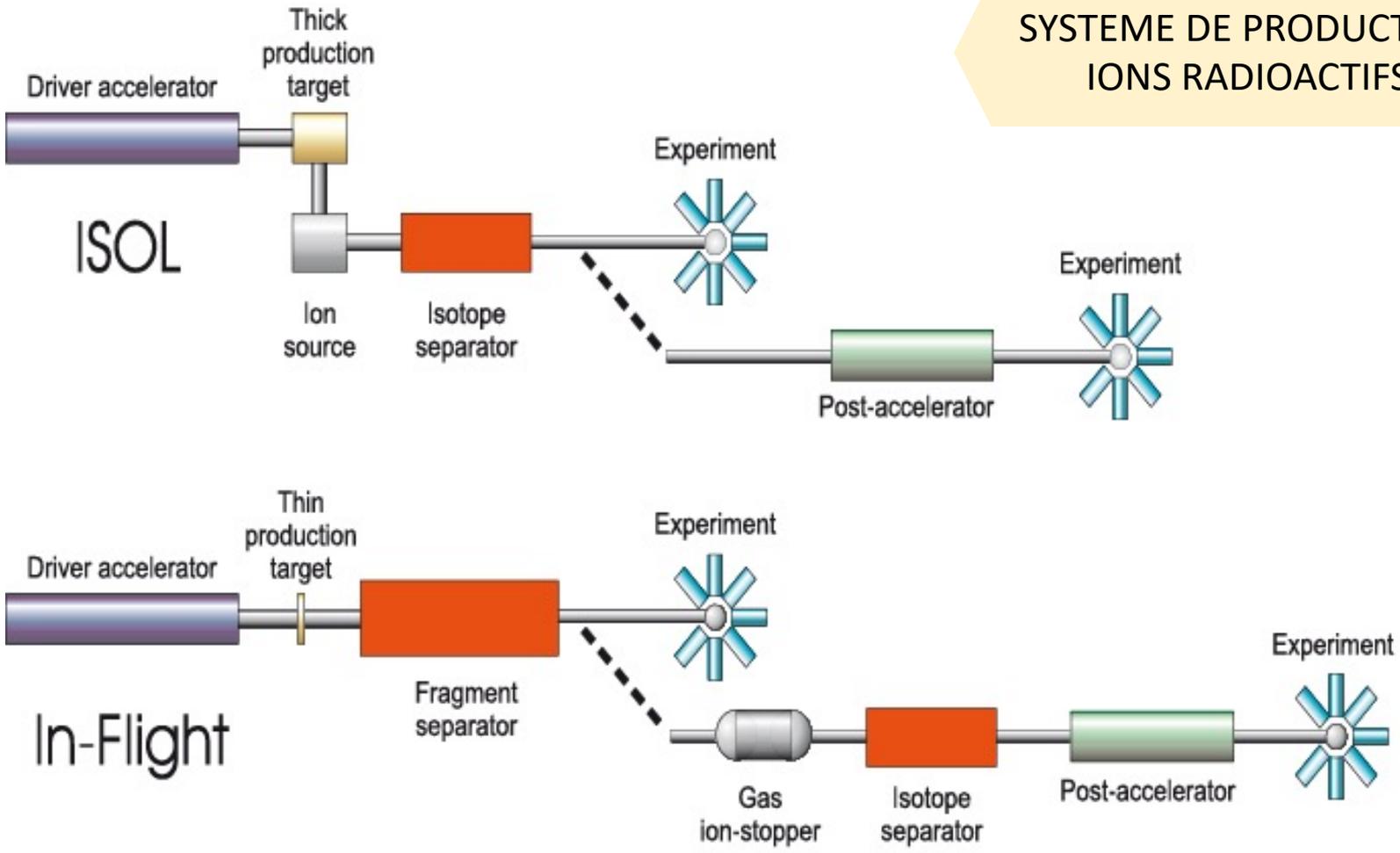
Cyclotron (AGOR)



Synchrotron (LHC)

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.1. La masse

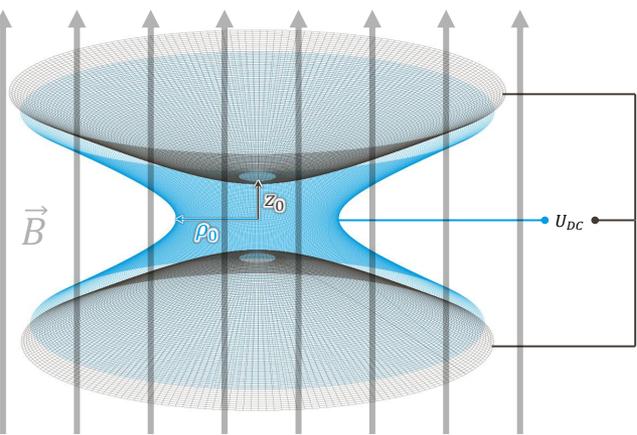
SYSTEME DE PRODUCTION IONS RADIOACTIFS



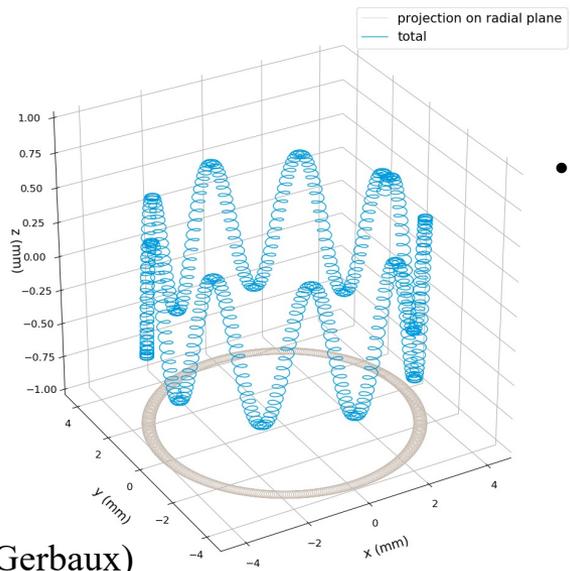
1. Etude des propriétés fondamentales – 1.1. La masse

- Inégalité d'Heisenberg $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

- ➔ Des mesures de précision implique des longs temps d'observation
- ➔ Piégeage des noyaux pendant une « longue durée »



(courtesy M. Gerbaux)



- Le mouvement est composé de 3 mouvements propres de fréquence :
 - ω_z : mouvement axial ($\sim 100\text{kHz}$)
 - ω_+ : mouvement cyclotron modifié ($\sim 10\text{ MHz}$)
 - ω_- : mouvement magnétron ($\sim \text{kHz}$)

- S'il n'y avait pas de champ électrique, la particule chargée aurait simplement un mouvement circulaire à la fréquence cyclotron :

$$\omega_c = QB/m \text{ et } \omega_c = \omega_+ + \omega_-$$

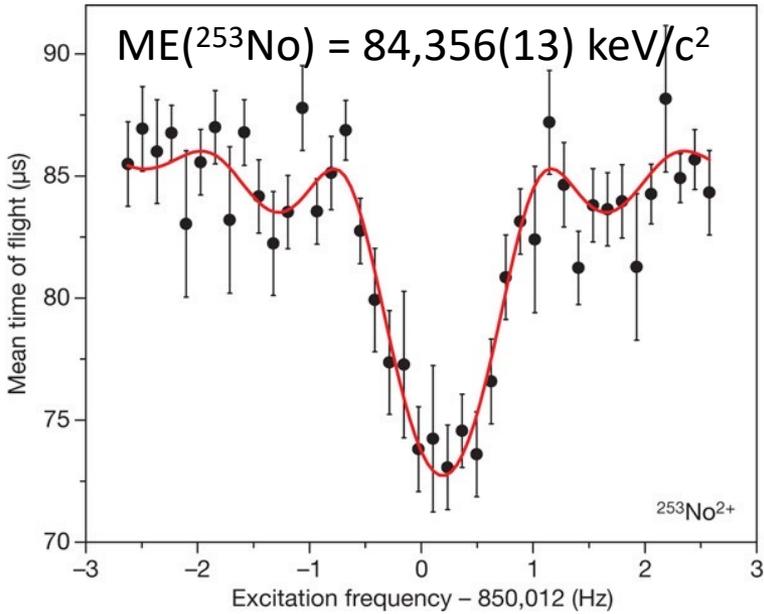
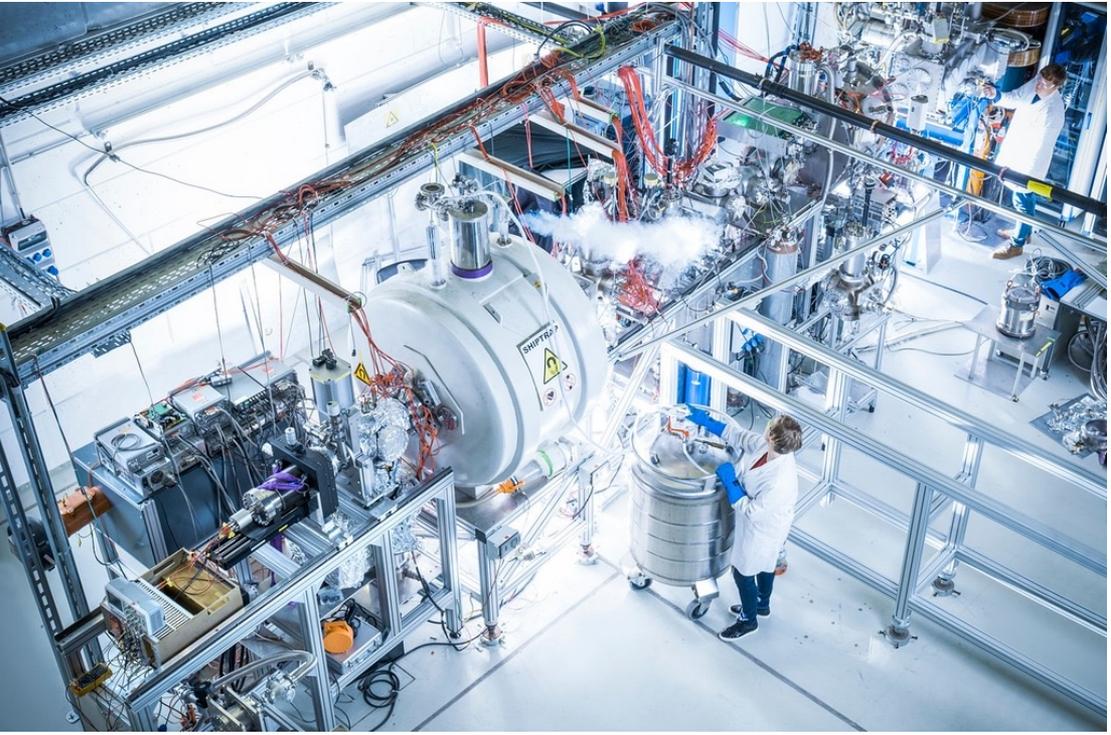
$$M \pm \delta M$$

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

- Scan en fréquence. Ejection du piège et mesure du temps de vol

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.1. La masse

- Mesure de la masse des isotopes $^{252-254}\text{No}$ ($Z = 102$) avec le piège de Penning SHIPTRAP à GSI (Allemagne)



M. Block *et al.* Nature 463 (2010)

Cours de physique nucléaire 2/3

Les indispensables classiques de la physique nucléaire

1. Etude des propriétés fondamentales

1. La masse

2. Les propriétés de décroissance

- Cas des noyaux superlourds

- Cas de la radioactivité α protons

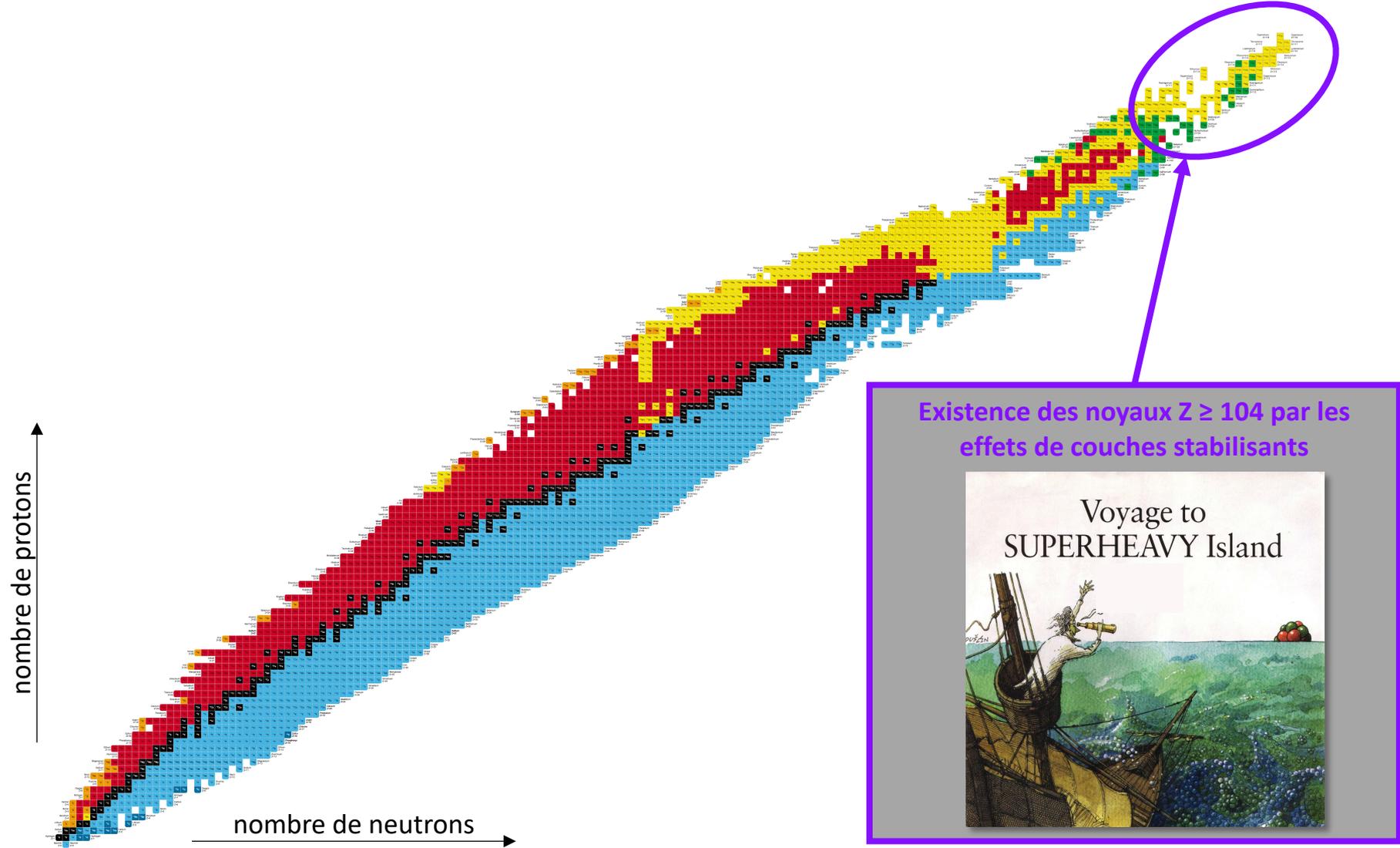
2. Etude des états excités du noyau

1. La spectroscopie γ prompt

2. Mesurer des γ de plus haute énergie

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, $Z > 104$) - la découverte de nouveaux éléments



Existence des noyaux $Z \geq 104$ par les effets de couches stabilisants

The image shows the cover of a book titled "Voyage to SUPERHEAVY Island". The cover art depicts a figure in a wicker basket hanging from a rope, looking through a telescope. The background is a landscape with green hills and blue flowers. The title "Voyage to SUPERHEAVY Island" is written in a serif font at the top of the cover.

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, $Z > 104$) - la découverte de nouveaux éléments

- Avant les noyaux superlourds, savez-vous comment ont été synthétisés les premiers noyaux lourds (actinides $Z > 89$) ?



Première explosion thermonucléaire
« Mike » en Novembre 1952

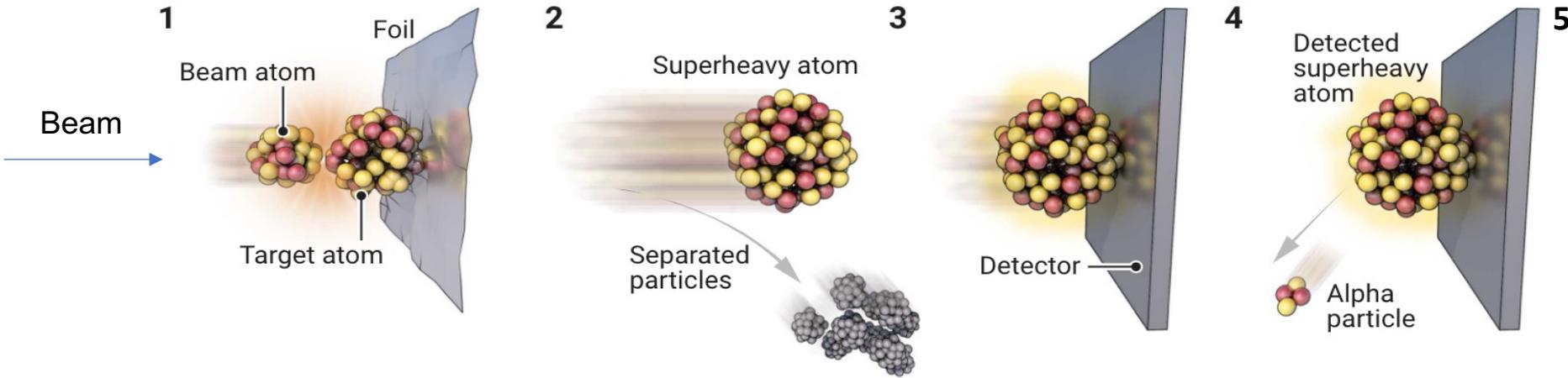
15 nouveaux isotopes découverts :
 $^{244,245,246}\text{Pu}$ ($Z=94$), ^{246}Am ($Z=95$),
 $^{246,247,248}\text{Cm}$ ($Z=96$), ^{249}Bk ($Z=97$),
 $^{249,252,253,254}\text{Cf}$ ($Z=98$), $^{253,255}\text{Es}$ ($Z=99$),
 ^{255}Fm ($Z=100$)

- Aujourd'hui, les noyaux lourds et superlourds sont produits auprès d'accélérateurs !

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, $Z > 104$) - la découverte de nouveaux éléments

- Comment synthétiser des noyaux superlourds et les identifier ? (courtesy B. Sulignano)



Un projectile est accéléré grâce à un accélérateur d'ions lourds (typiquement qq MeV/nucléon)

Bombardement d'une cible, fusion (entre autres !) du projectile et du noyau cible

Notre noyau superlourd produit doit être séparé de tous les autres produits de la réaction

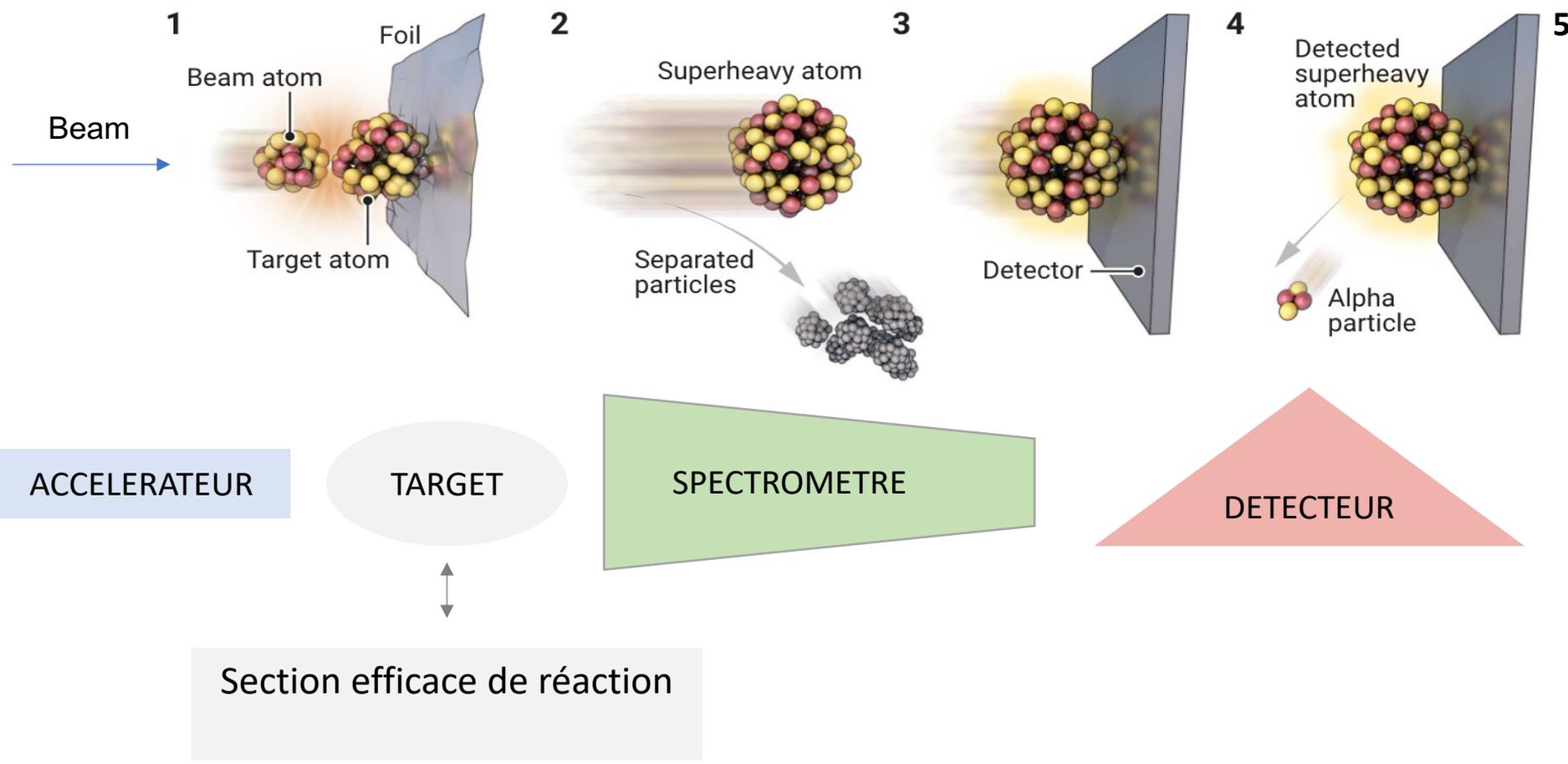
Les produits de réaction sélectionnés (parmi lesquels, on l'espère, notre noyau d'intérêt) sont implantés dans un détecteur localisé après la séparation

L'énergie déposée par le noyau implanté et par la particule émise lors de sa décroissance sont mesurées afin d'identifier le noyau produit/sélectionné /implanté

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, $Z > 104$) - la découverte de nouveaux éléments

- Comment synthétiser des noyaux superlourds et les identifier ? (courtesy B. Sulignano)



1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, Z>104) - la découverte de nouveaux éléments

La section efficace de réaction σ
 « Quantifier à quel point une réaction est probable »

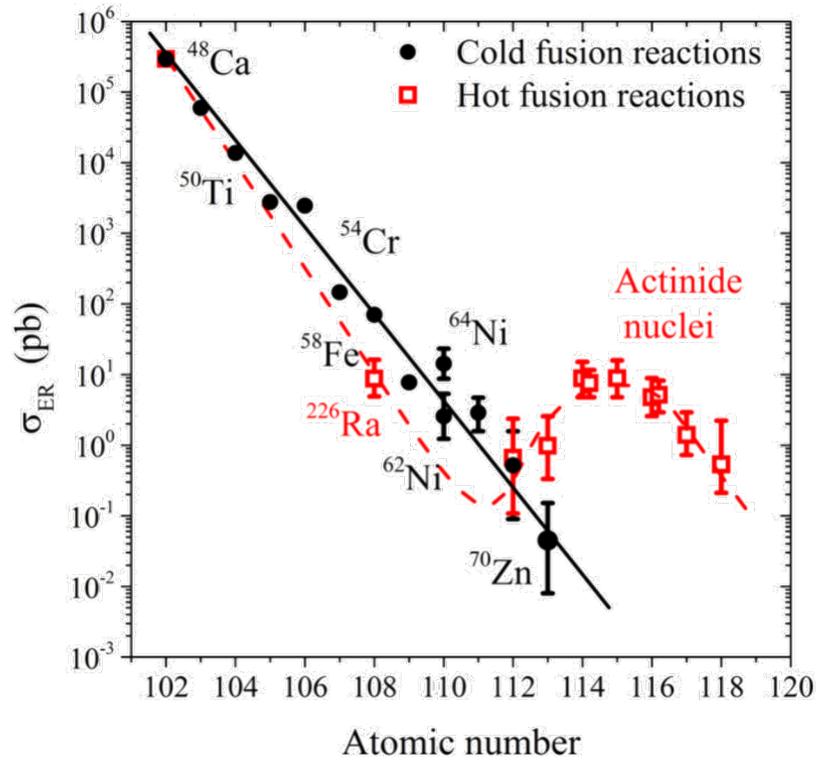
ex : réaction de diffusion
 $\sigma = \pi (R^2_{\text{cible}} + R^2_{\text{projectile}})$

- Unité : 1 barn = 10^{-24} cm^2
- Comment en déduire le taux T de noyaux d'intérêt produits lors d'une réaction donnée :

$$T = \sigma \phi N_{\text{cible}}$$

- ϕ est les flux, c'est-à-dire le nombre de particules incidentes par unité de surface et de temps,
- N_{cible} est le nombre de particules cible dans le volume de la cible correspondant à la surface couverte par le faisceau
- Quelques valeurs : Capture neutron thermique (n, γ) \sim 100-1000 barn, diffusion inélastique (p,p' γ) \sim 1 mbarn

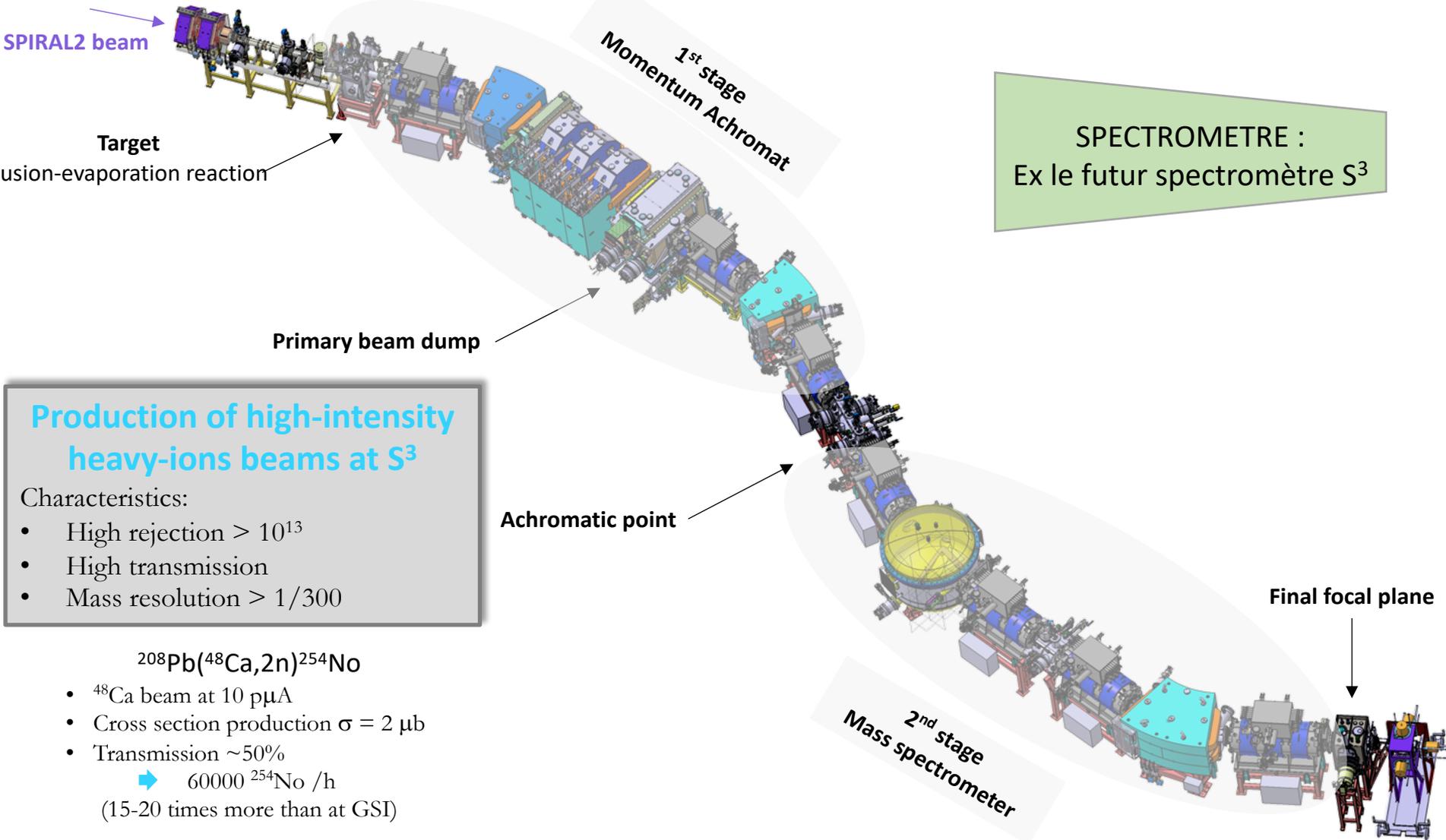
Section efficace de réaction
 Ex production SH par fusion évaporation



Très très faible section efficace
 de production des SH !!

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, Z>104) - la découverte de nouveaux éléments

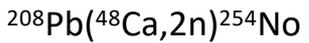


SPECTROMETRE :
Ex le futur spectromètre S³

Production of high-intensity heavy-ions beams at S³

Characteristics:

- High rejection > 10¹³
- High transmission
- Mass resolution > 1/300

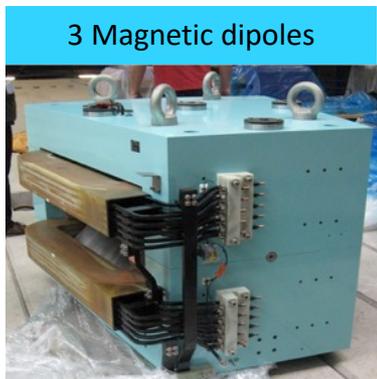
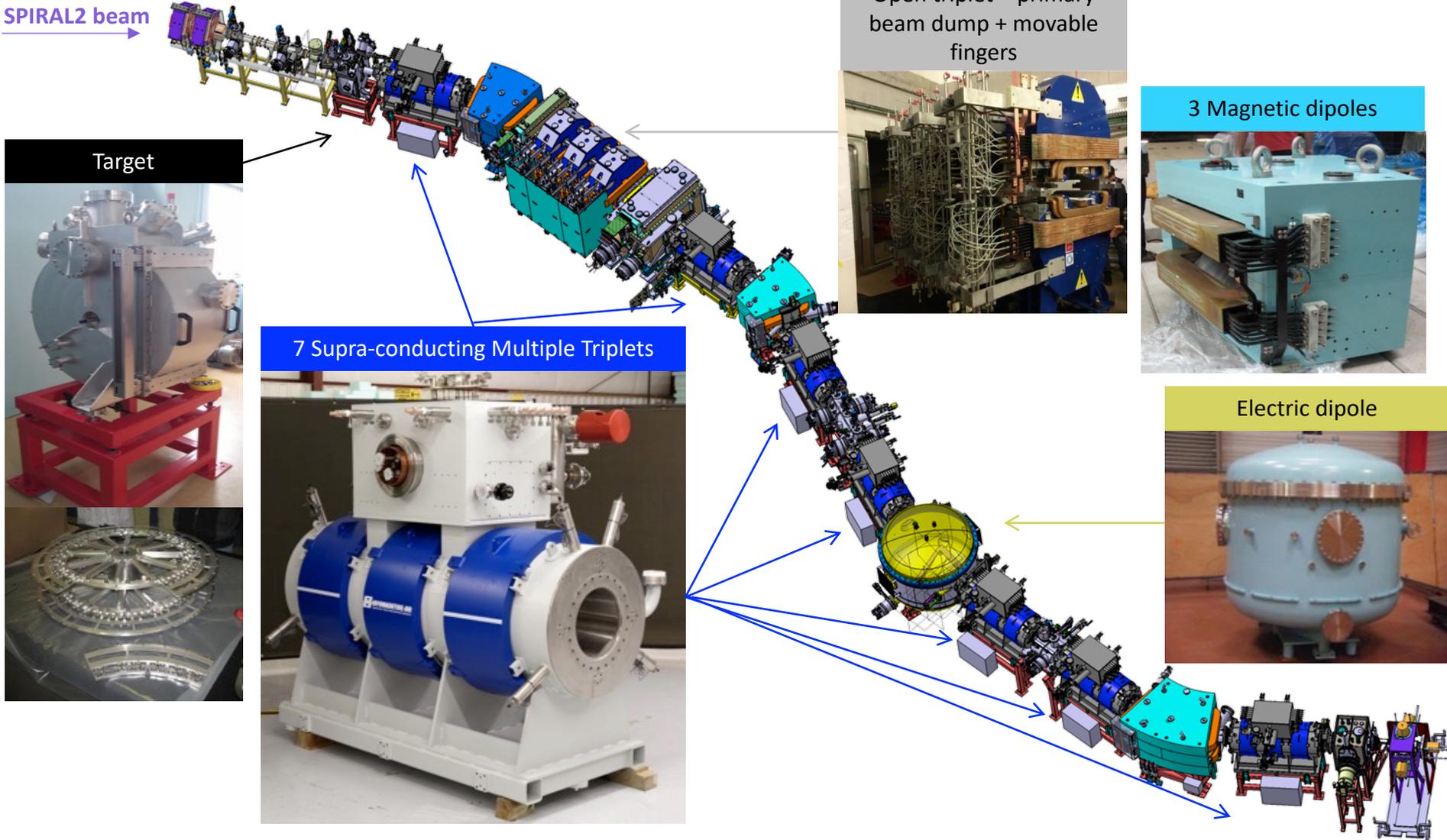


- ⁴⁸Ca beam at 10 pμA
- Cross section production $\sigma = 2 \mu\text{b}$
- Transmission ~50%
 - ➡ 60000 ²⁵⁴No /h
 - (15-20 times more than at GSI)

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

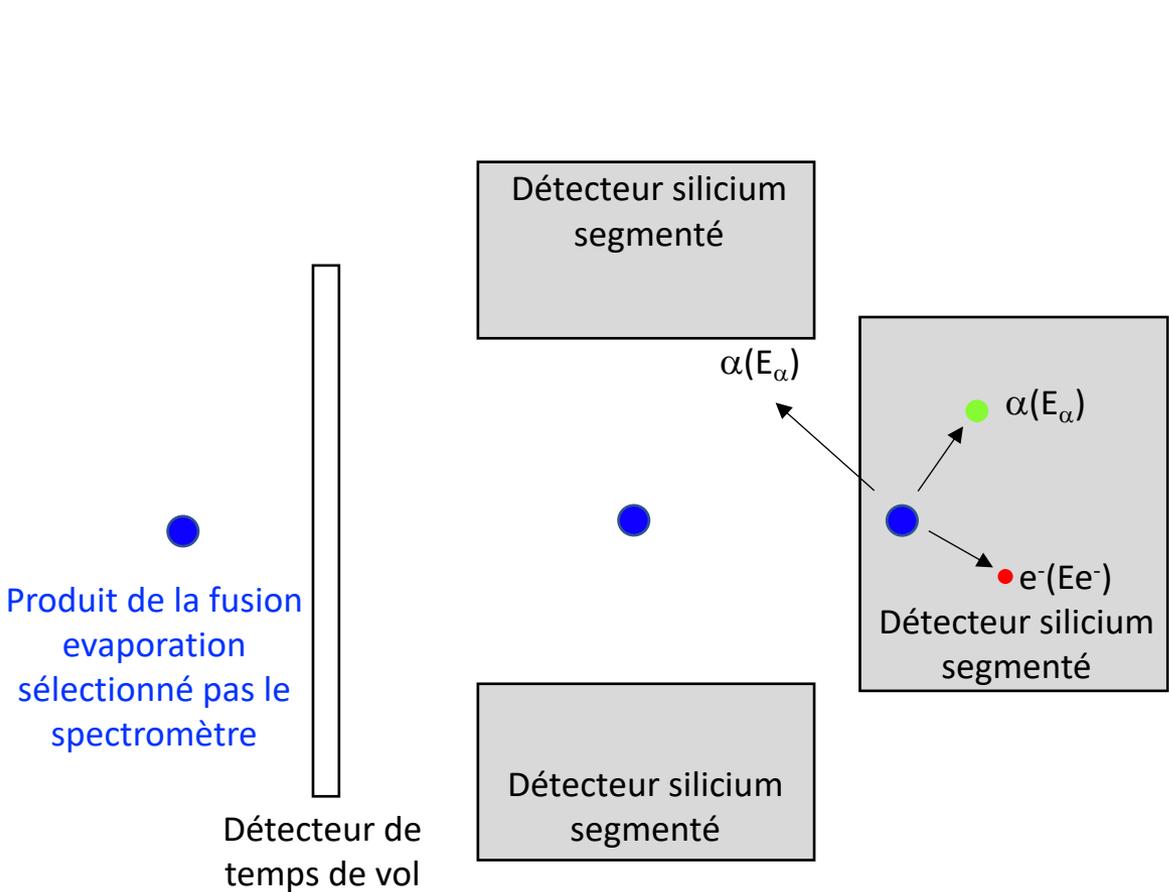
Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, $Z > 104$) - Nouveaux éléments

SPIRAL2 beam →

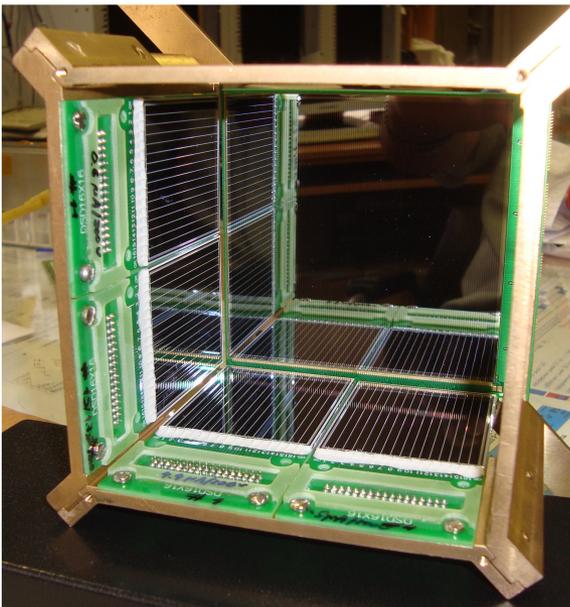


1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, $Z > 104$) - la découverte de nouveaux éléments



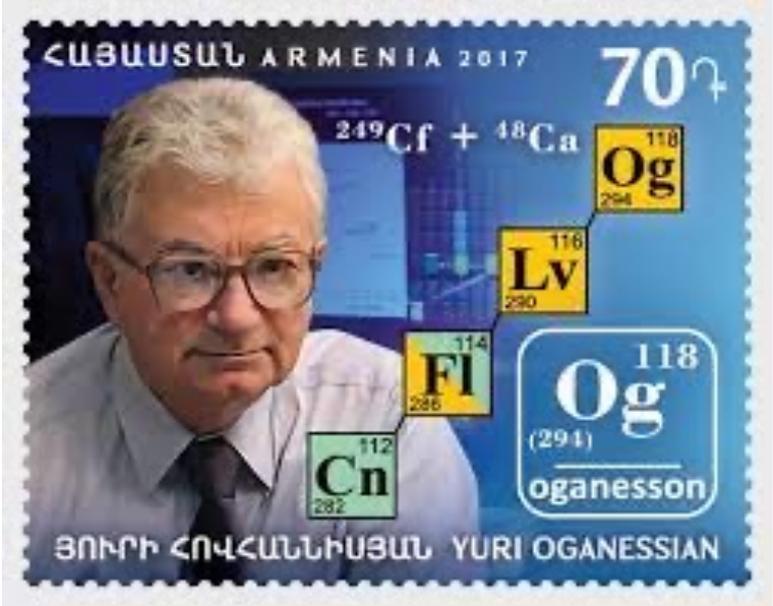
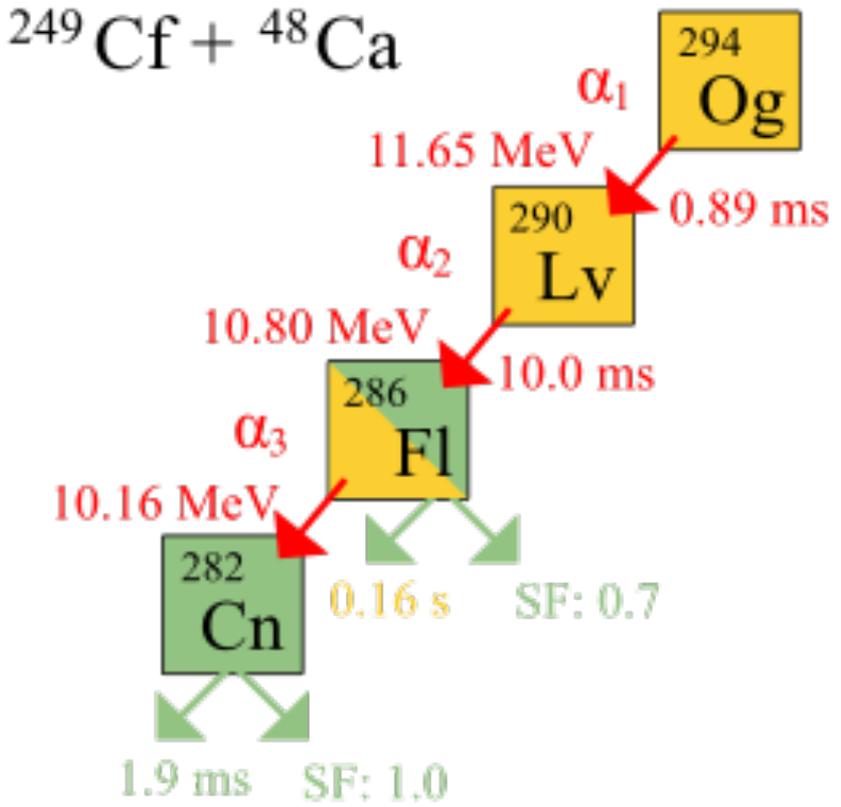
DETECTEUR
Ex GABRIELA



1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 1 : les noyaux superlourds (SH, Z>104) - la découverte de nouveaux éléments

- Découverte de l'élément Z = 118, l'Oganesson, à Dubna, avec le spectromètre DGFRS et la station de détection dédiée à son plan focal



Yu. Ts. Oganessian *et al.* Phys. Rev. C 74, 044602 (2006)

Cours de physique nucléaire 2/3

Les indispensables classiques de la physique nucléaire

1. Etude des propriétés fondamentales

1. La masse

2. Les propriétés de décroissance

- Cas des noyaux superlourds

- Cas de la radioactivité α protons

2. Etude des états excités du noyau

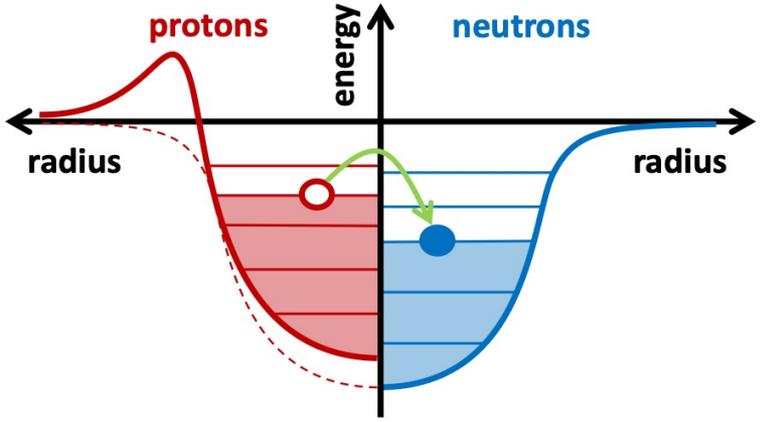
1. La spectroscopie γ prompt

2. Mesurer des γ de plus haute énergie

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons

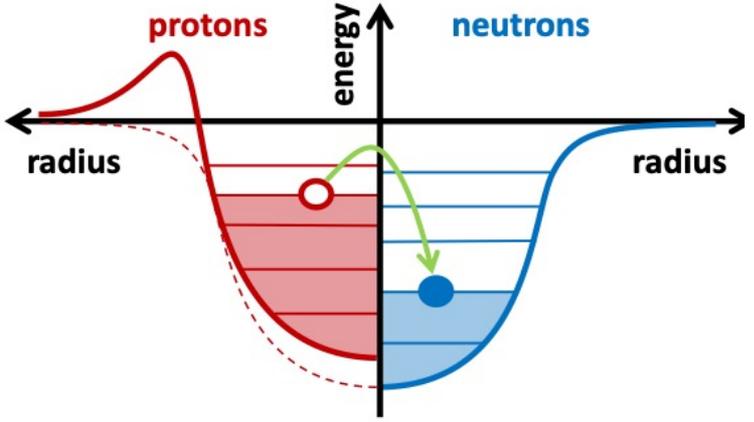
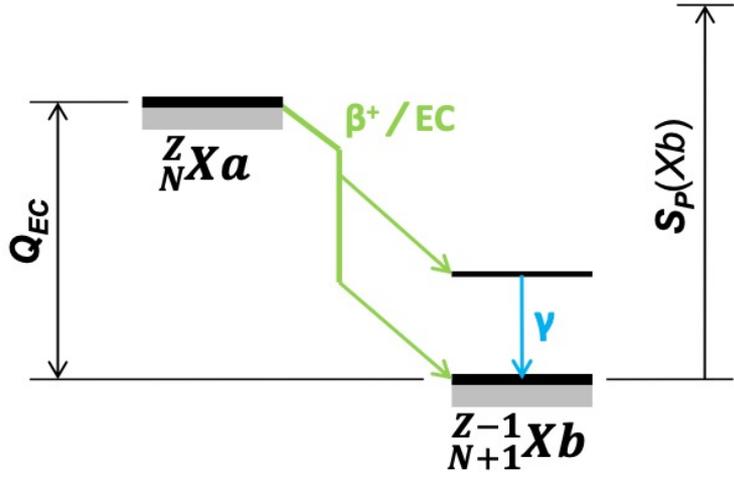
- Retour sur la radioactivité β^+ (courtesy J. Giovinazzo)



1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons

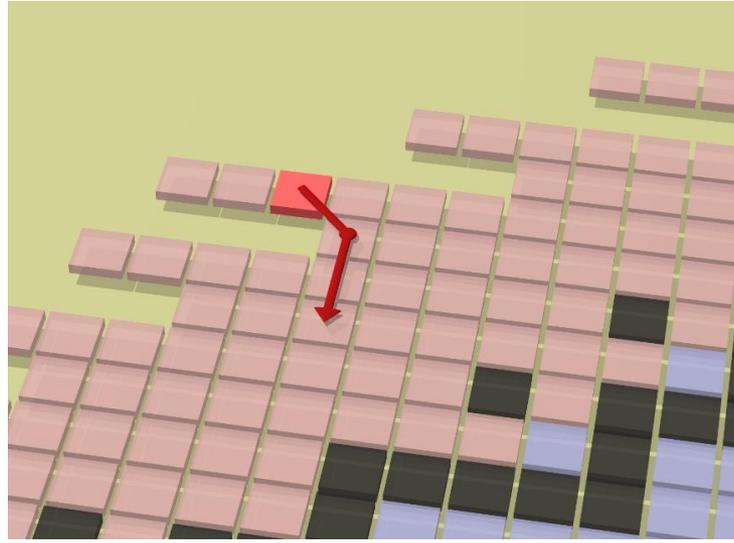
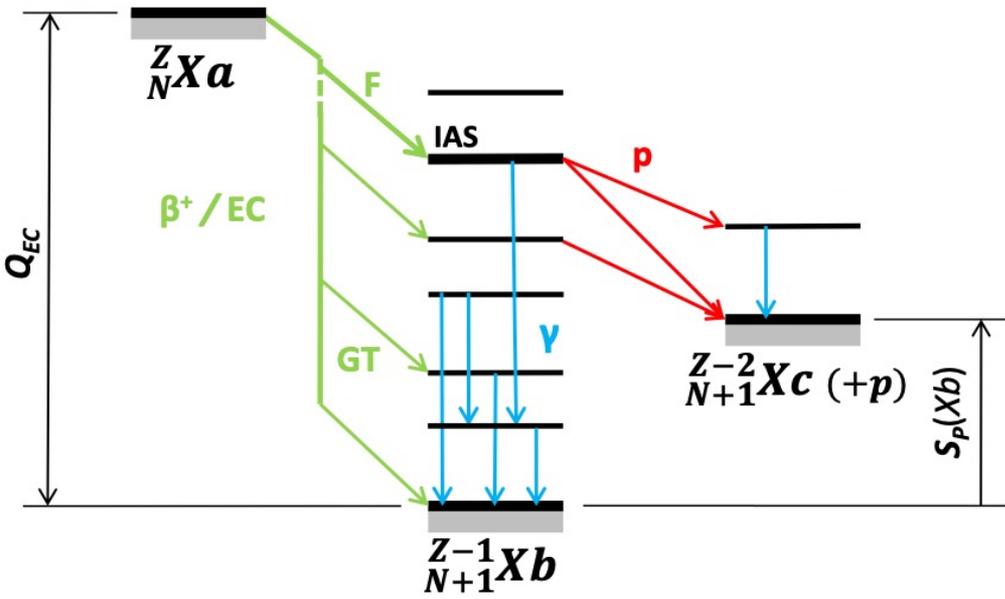
- Retour sur la radioactivité β^+ (courtesy J. Giovinazzo)



1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons

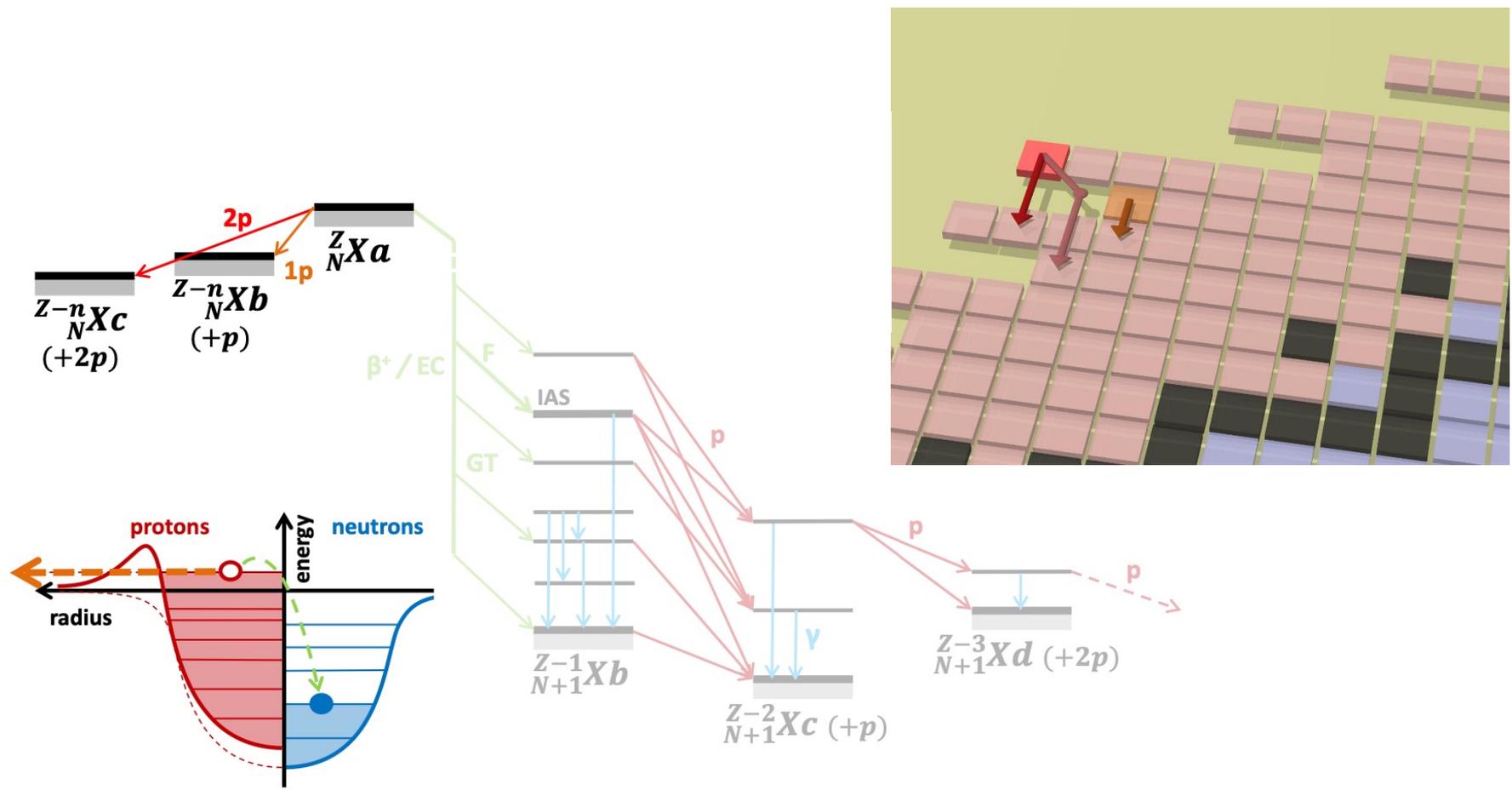
- La radioactivité β^+ quand on tombe au dessus du seuil d'émission proton (courtesy J. Giovinazzo)



1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons

- La radioactivité β^+ versus l'émission d'1 proton (courtesy J. Giovinazzo)



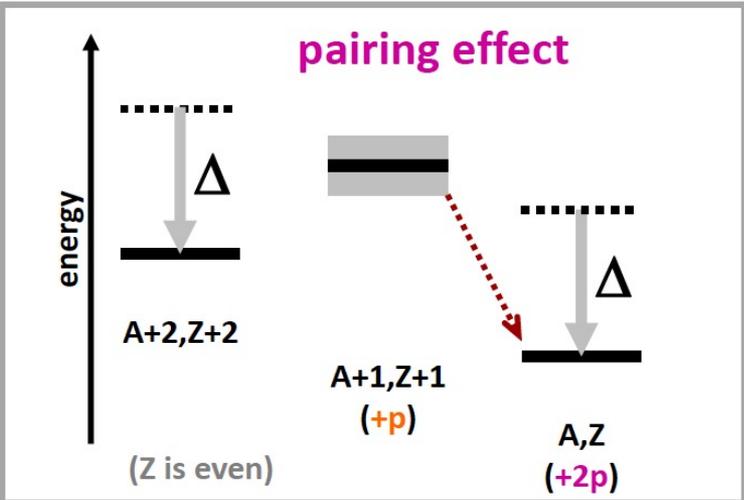
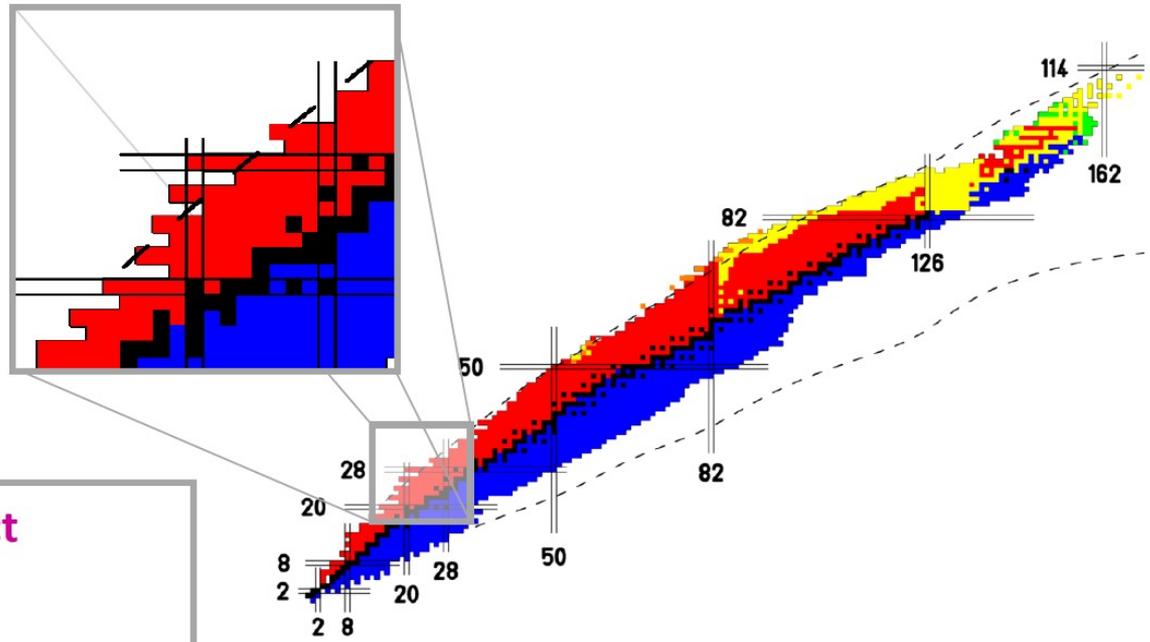
1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons

- Qu'est ce que la radioactivité 2 protons ? (courtesy J. Giovinazzo)

Illustration de l'effet pair – impair :

- isotopes stables
- drip-lines



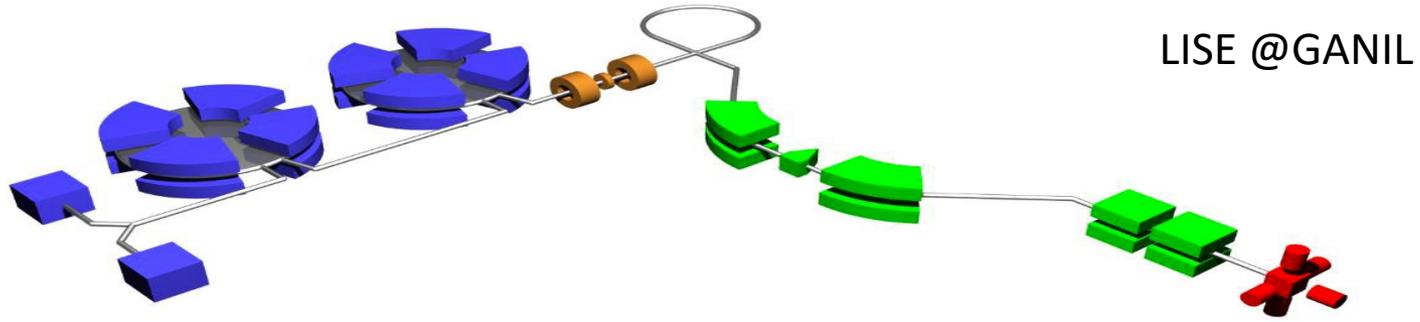
Décroissance 2P : possible dans un isotope pair en proton,
Radioactivité 1 proton interdite

- Noyaux très exotiques (drip-line proton)
- Courtes durées de vie

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons

- Comment produire les noyaux émetteurs 2 protons et comment mesurer cette décroissance exotique ?



Faisceau haute intensité et haute énergie

Courtes durées de vie
→ Fragmentation en vol

Notre noyau d'intérêt produit doit être séparé de tous les autres produits de la réaction

Implantation, identification et décroissance

ACCELERATEUR

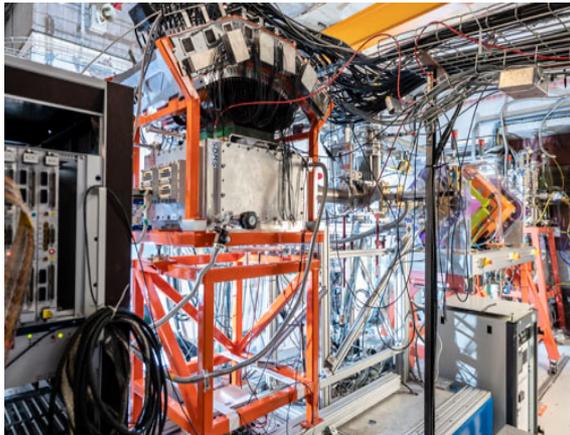
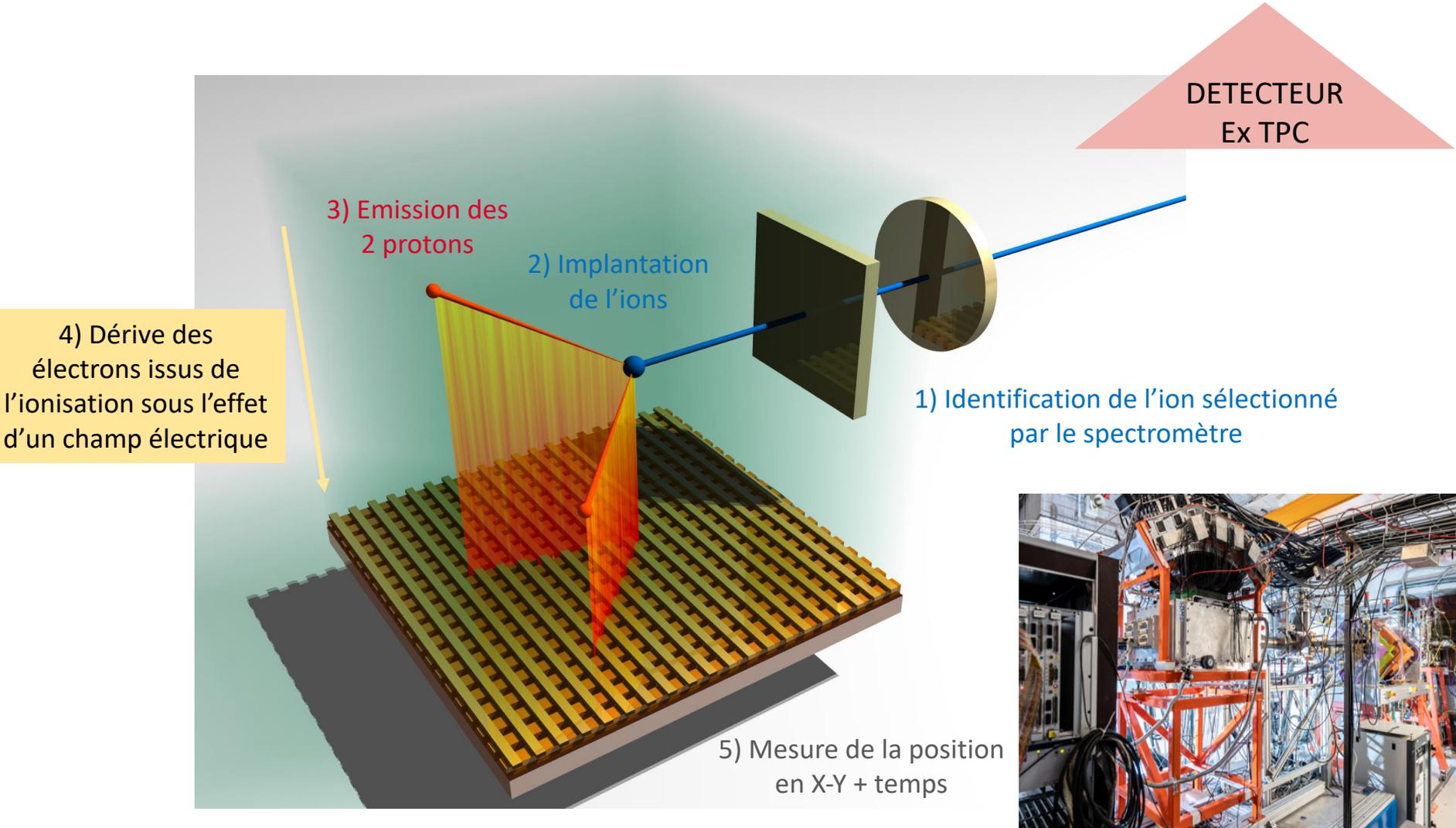
SYSTEME DE PRODUCTION IONS RADIOACTIFS

SEPARATEUR

DETECTEUR

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons



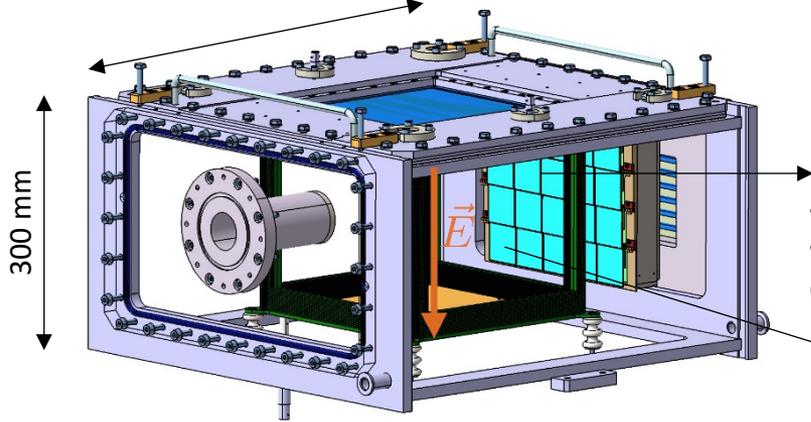
1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons

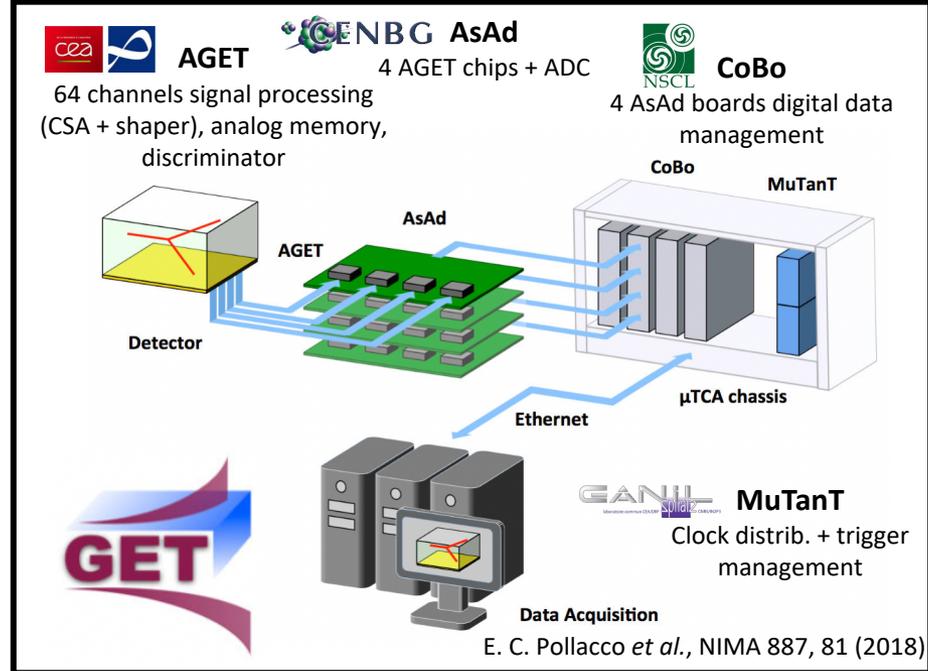
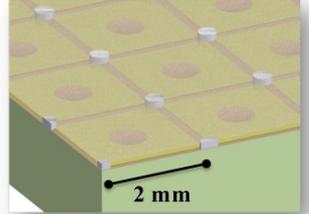
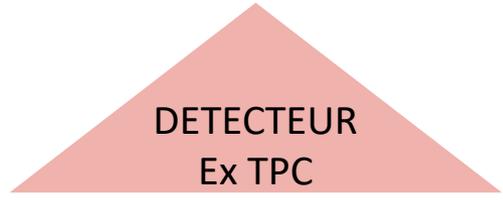
Animation « Radioactivité 2p »

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

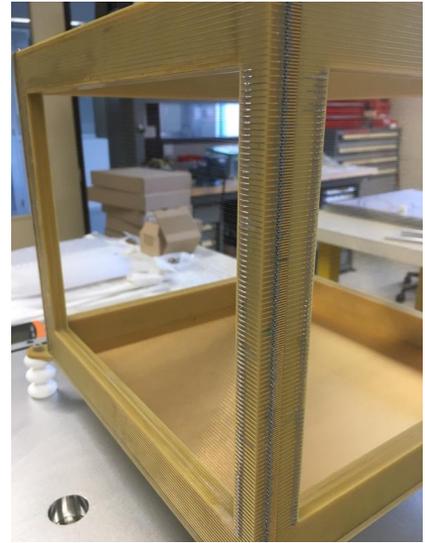
Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons



- ✓ Amplification region
- Micromegas gas amplifier
 - Pad plane : 128x128 square pads of 2x2 mm (16 384 channels to read !)



✓ Drift region



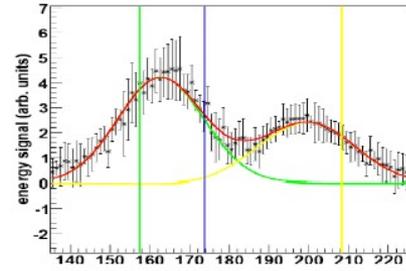
T. Roger *et al.*, NIMA 895, 126 (2018)
 B. Mauss *et al.*, NIMA 940, 498 (2019)

1. Etude des propriétés fondamentales – 1.2. Les propriétés de décroissance

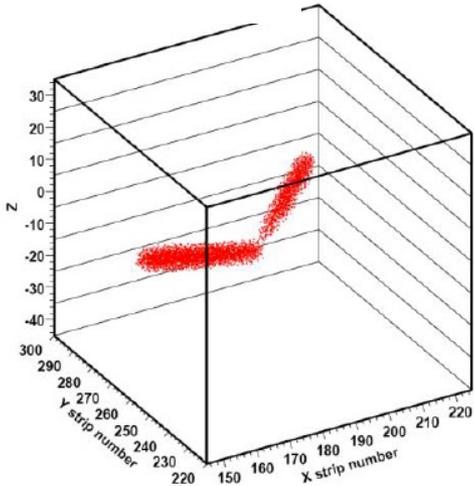
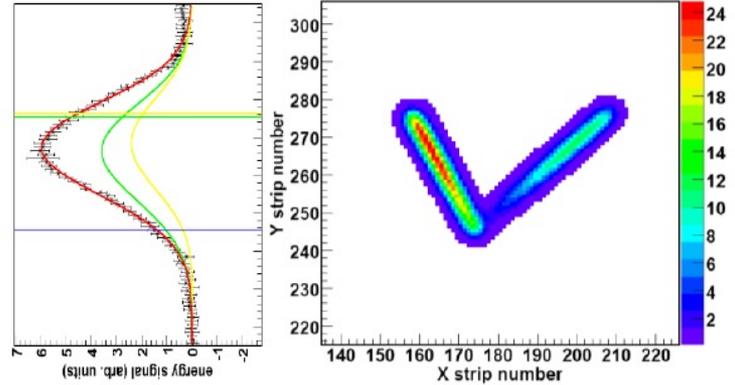
Cas physique 2 : la découverte d'une nouvelle radioactivité, la radioactivité 2 protons

- Les premières observation directes de la radioactivité 2p (conjointement avec NSCL aux USA)

^{45}Fe



^{54}Zn



J. Giovinazzo *et al.* Phys. Rev. Lett 99 (2007)

P. Ascher *et al.* Phys. Rev. Lett. 107 (2011)

➡ Distribution angulaire des protons nous renseigne sur la nature des états individuels

Cours de physique nucléaire 2/3

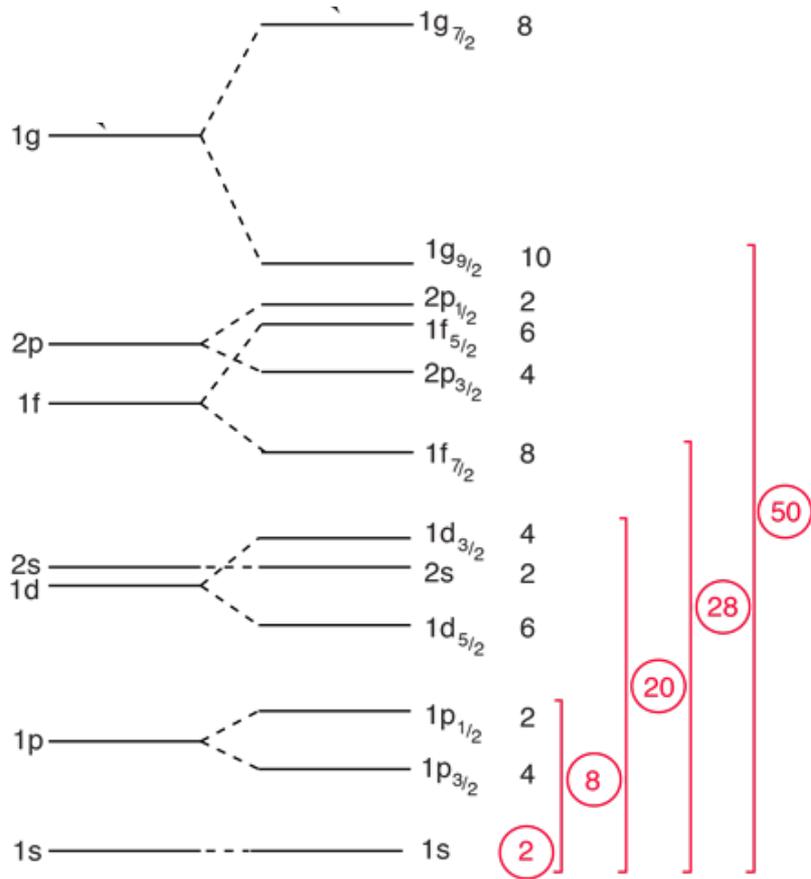
Les indispensables classiques de la physique nucléaire

1. Etude des propriétés fondamentales
 1. La masse
 2. Les propriétés de décroissance
 - Cas des noyaux superlourds
 - Cas de la radioactivité α protons
- 2. Etude des états excités du noyau**
 - 1. La spectroscopie γ prompt**
 2. Mesurer des γ de plus haute énergie

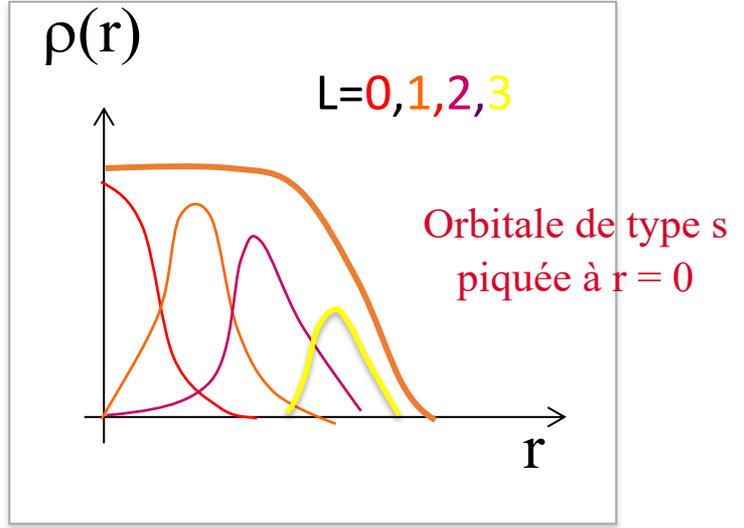
2. Etude des états excités du noyau – 2.1 La spectroscopie γ prompt

Cas physique : Etude des noyaux bulles

- Origine d'une déplétion centrale dans le noyau ^{34}Si



Densité radiale proton ou neutron pour différentes nature d'orbitale

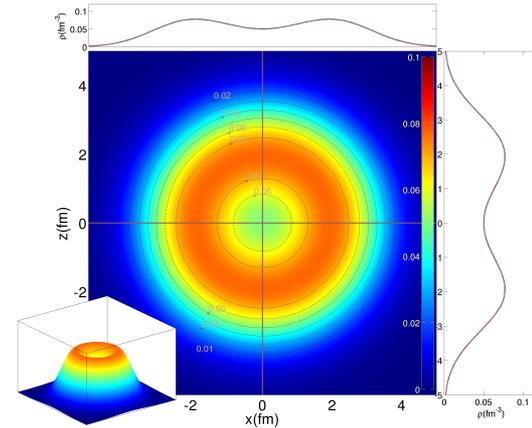
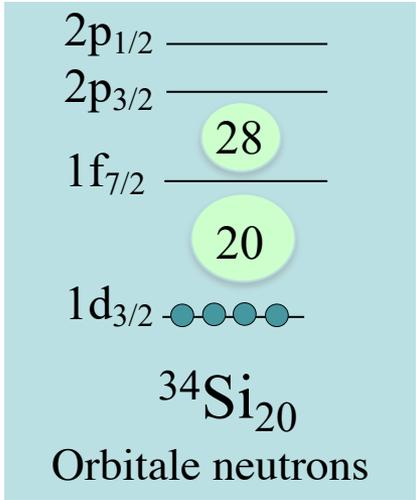
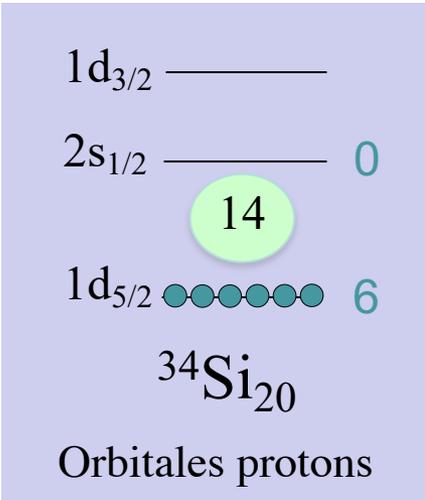


La plupart du temps, les orbitales sont remplies et la densité radiale s'approche d'un « plateau »

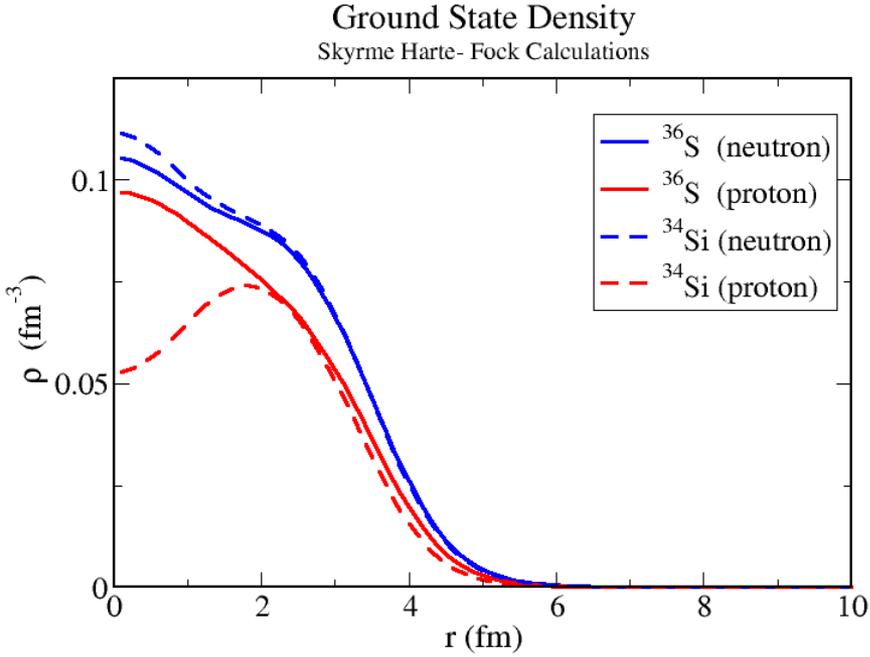
2. Etude des états excités du noyau – 2.1 La spectroscopie γ prompt

Cas physique : Etude des noyaux bulles

- Origine d'une déplétion centrale dans le noyau ^{34}Si



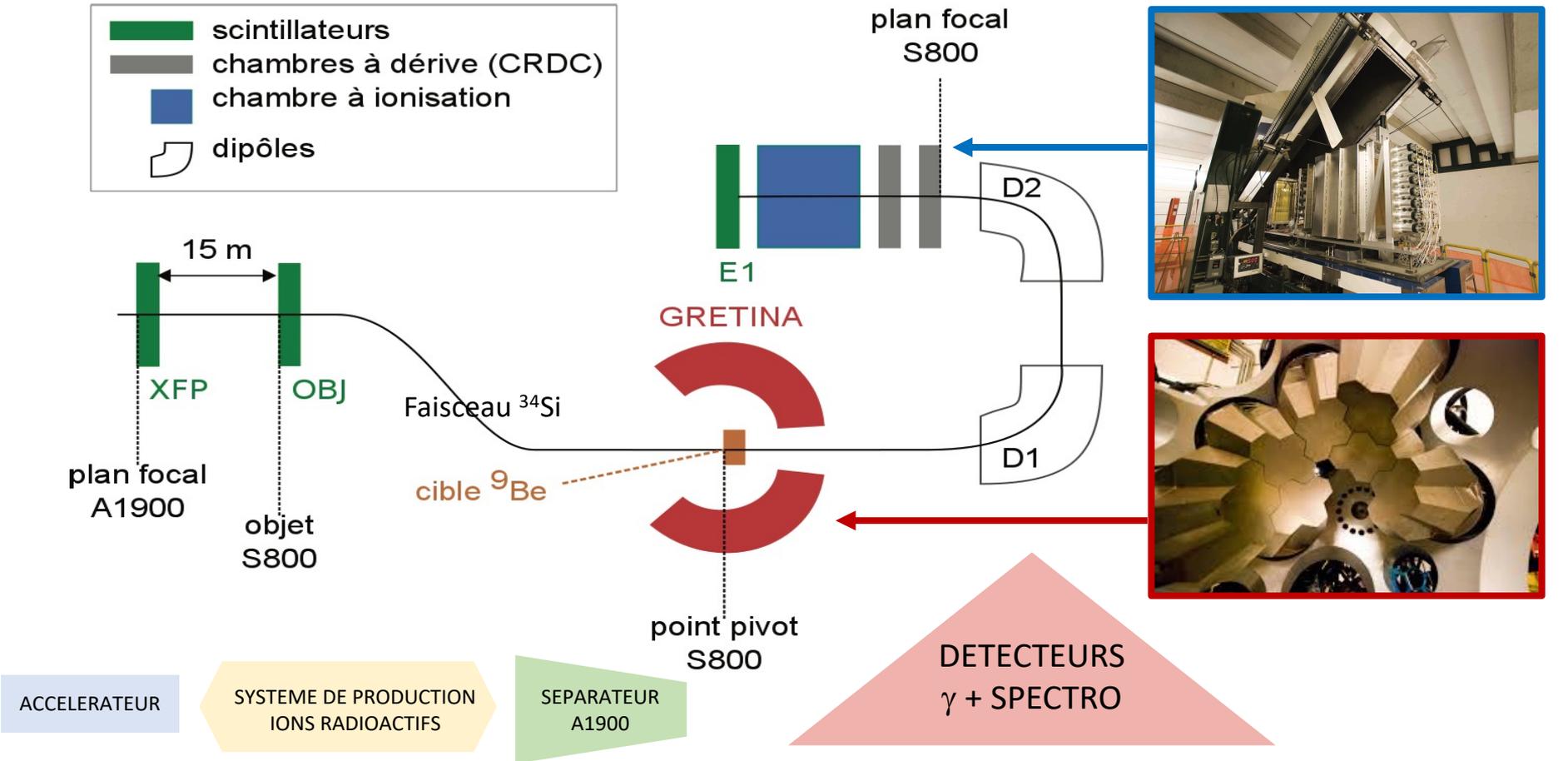
➔ A cause de son orbitale $2s_{1/2}$ vide, le ^{34}Si ($Z=14$, $N=20$) présenterait une déplétion centrale comparativement au ^{36}S ($Z=16$, $N=20$)



2. Etude des états excités du noyau – 2.1 La spectroscopie γ prompt

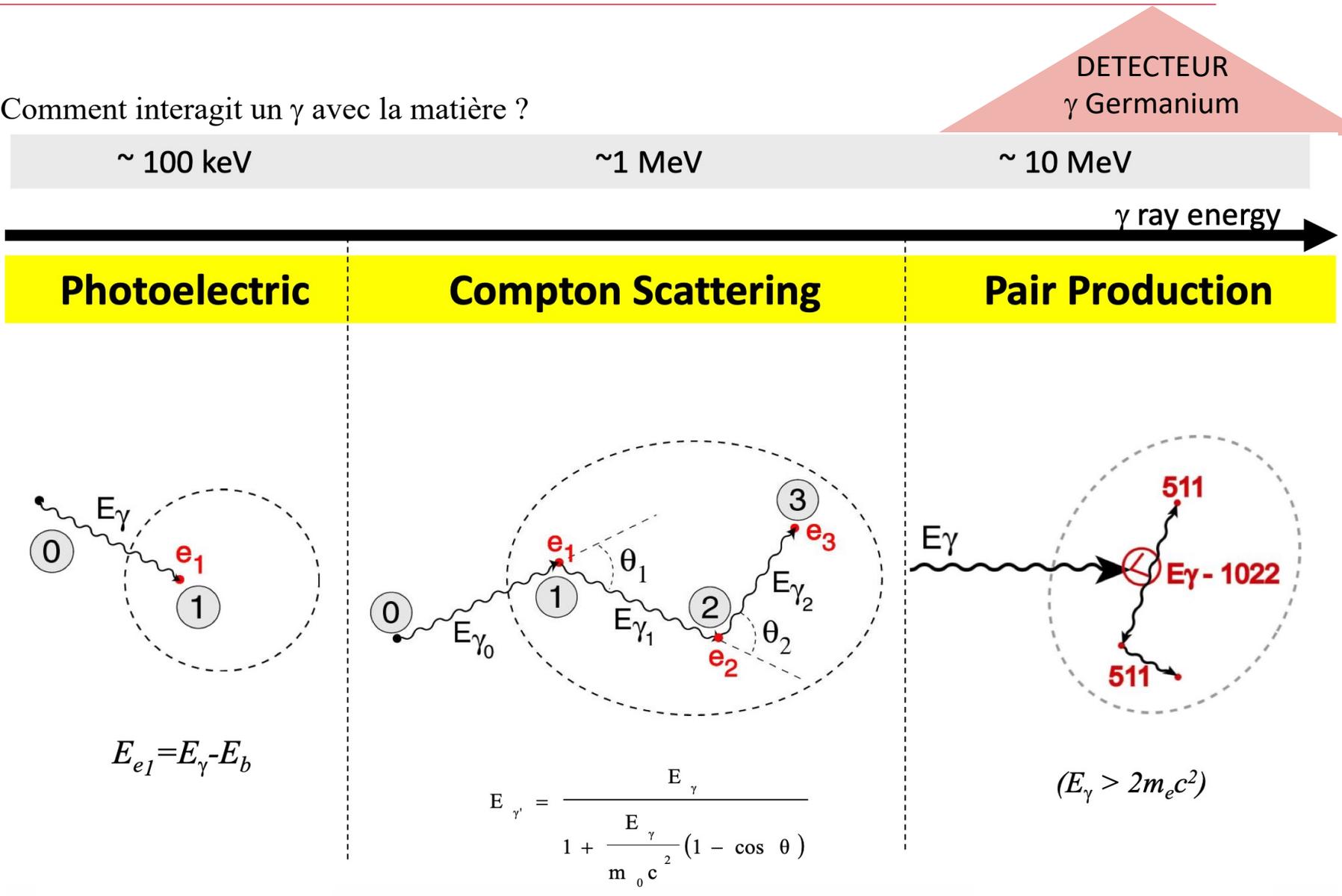
Cas physique : Etude des noyaux bulles

- Expérience @NSCL, MSU USA. Objectif : étudier l'occupation de l'orbitale $2s_{1/2}$ dans le ^{34}Si et ^{36}S
- Réaction d'arrachage d'un proton (1 proton knockout) $^{34}\text{Si}(-1p)^{33}\text{Al}$ and $^{36}\text{S}(-1p)^{35}\text{P}$ et on essaye d'identifier d'où a été arraché le proton



2. Etude des états excités du noyau – 2.1 La spectroscopie γ prompt

- Comment interagit un γ avec la matière ?



$$E_{e1} = E_{\gamma} - E_b$$

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

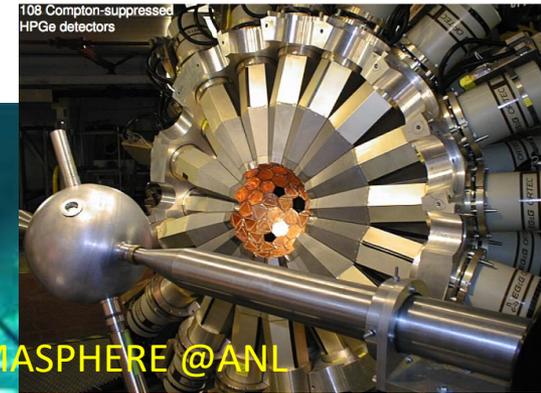
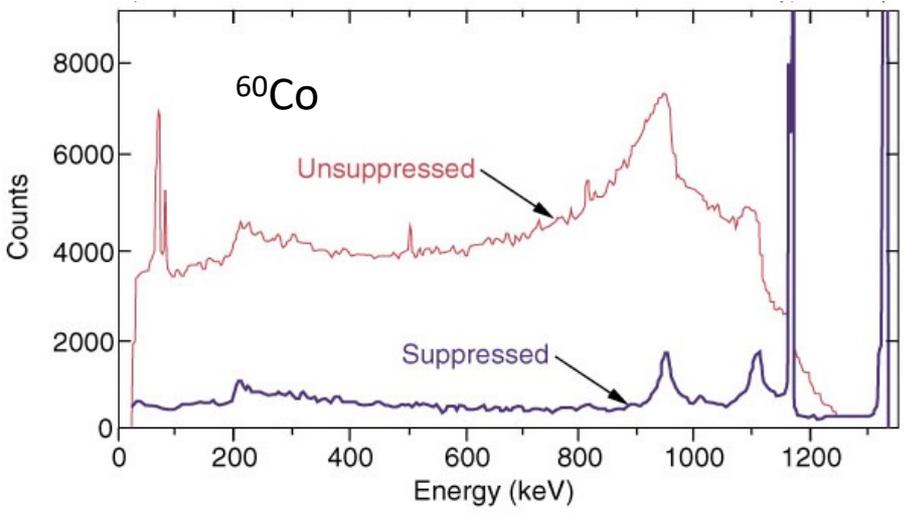
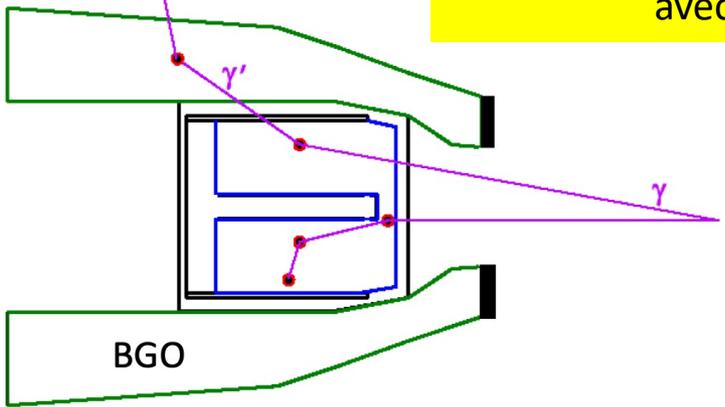
$$(E_{\gamma} > 2m_e c^2)$$

2. Etude des états excités du noyau – 2.1 La spectroscopie γ prompt

DETECTEUR γ Germanium

- Les détecteurs γ , la lutte contre la diffusion Compton

Astuce 1 : se débarrasser du Compton avec un bouclier BGO



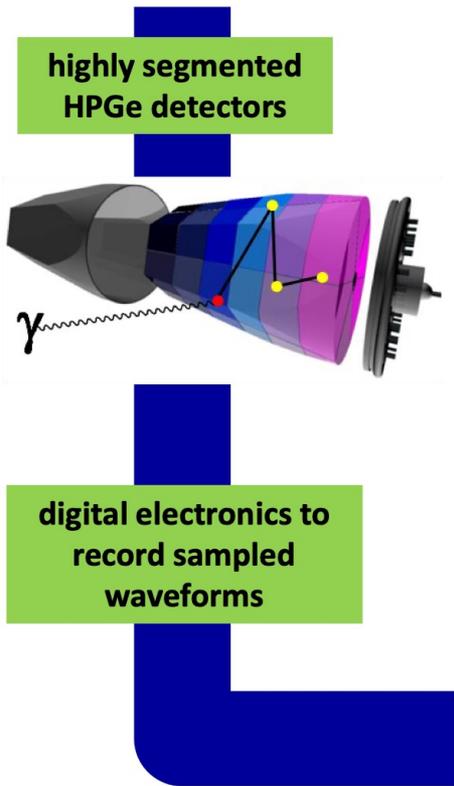
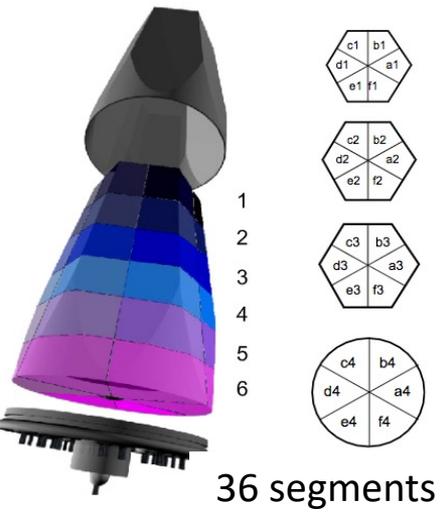
2. Etude des états excités du noyau – 2.1 La spectroscopie γ prompt

- Les détecteurs γ , la lutte contre la diffusion Compton

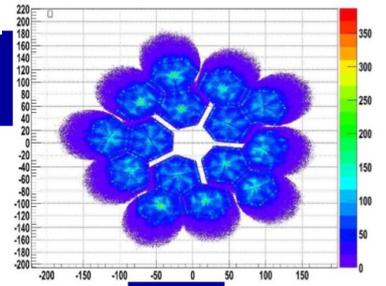
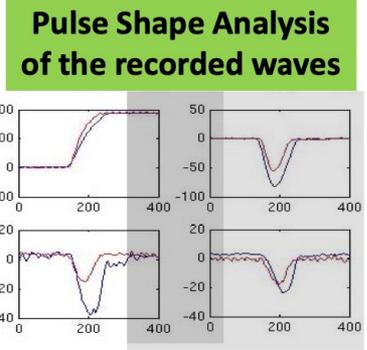


Astuce 2 : AGATA/GRETA, reconstruire le Compton

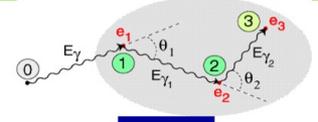
(cf cours EJC2015 C. Michelagnoli)



Identified interaction points (hits)
 $(x, y, z, E, t)_i$



reconstruction of γ -rays from the hits (tracking)

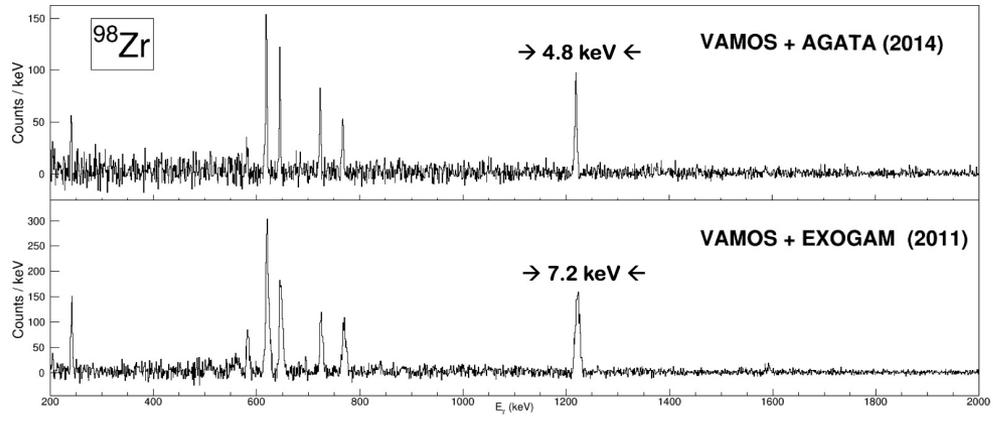
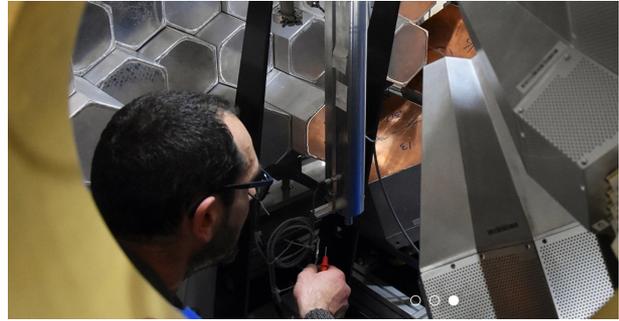
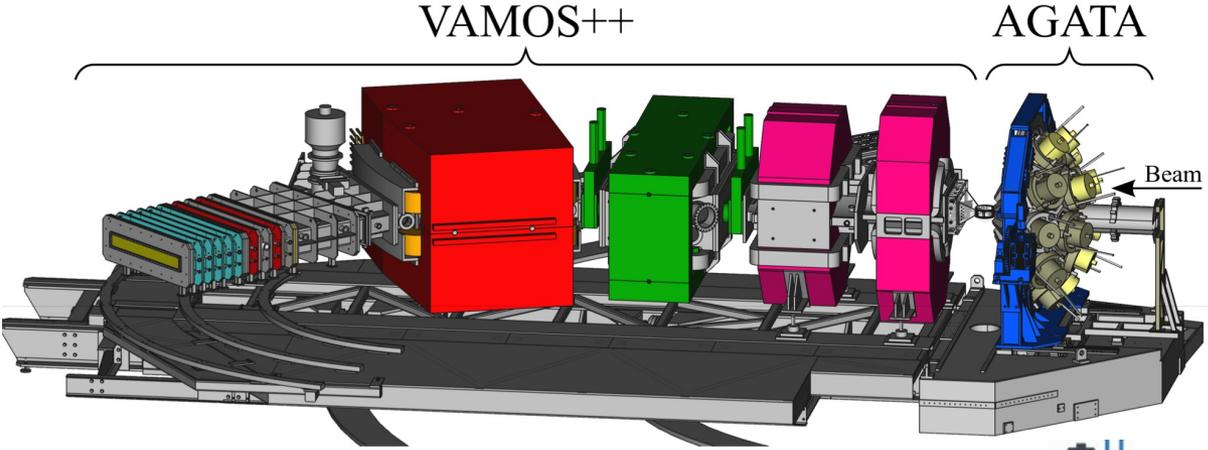


Event by event:
 how many gammas,
 for each gamma: energy,
 first interaction point, path

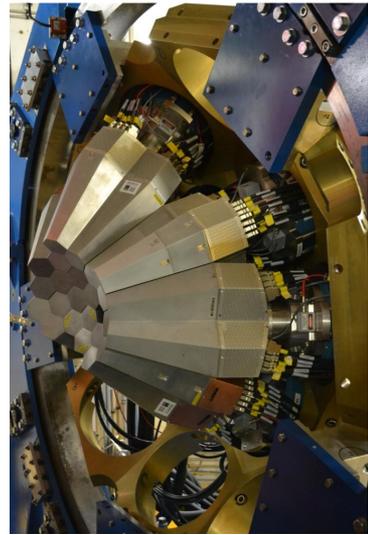
2. Etude des états excités du noyau – 2.1 La spectroscopie γ prompt

- La campagne VAMOS-AGATA @GANIL 2014-2021

DETECTEUR γ Germanium



-  29 expériences
-  558 To de données
-  6568 heures de faisceau sur cible
-  14 034 entrées dans le elog
-  2386 jours de surveillance cryogénique
-  11,5 tonnes de matériel scientifique



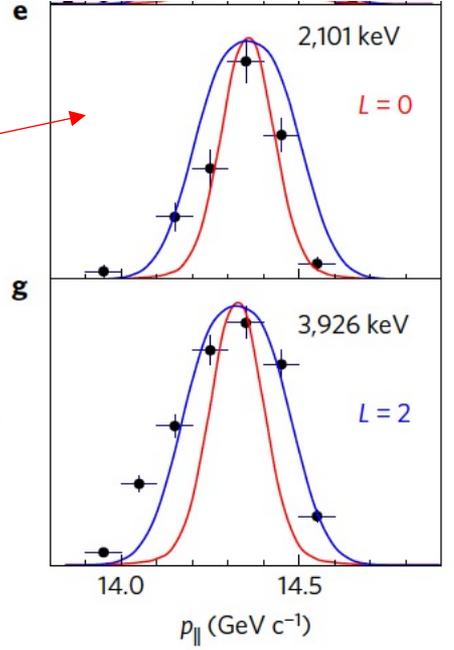
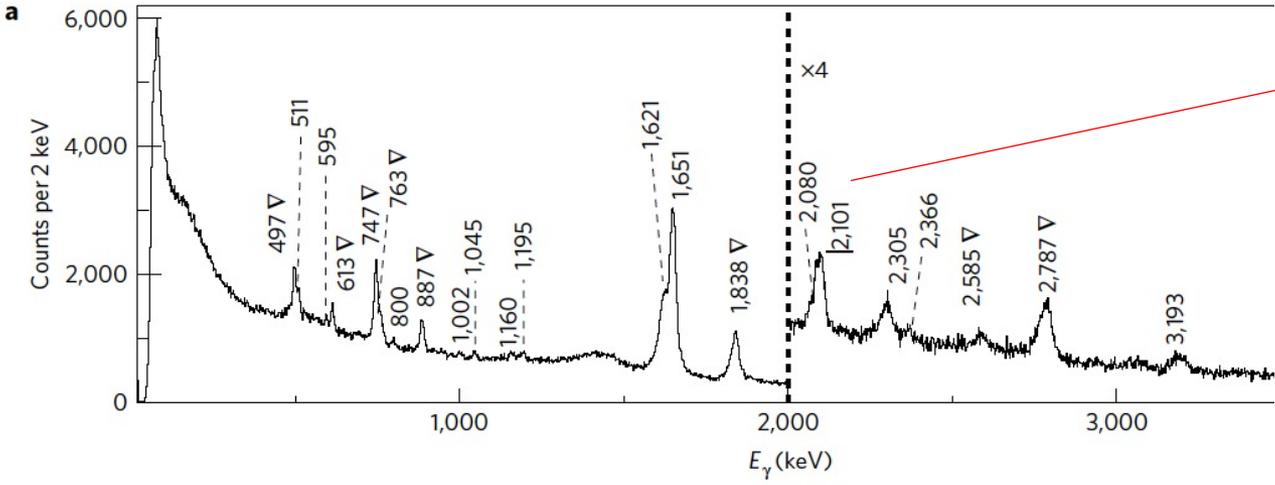
2. Etude des états excités du noyau – 2.1 La spectroscopie γ prompt

Cas physique : Etude des noyaux bulles

• Alors bulle ou pas bulle ?

1) $^{34}\text{Si}(-1p)^{33}\text{Al}$, détection des γ issus de la désexcitation du ^{33}Al dans GRETINA en coïncidence avec le noyau ^{33}Al au plan focal du spectromètre S800

A. Mutschler *et al.* Nature Physics 3916 (2016) e



2) Le moment orbital angulaire l de l'orbitale d'où est arraché le p est déterminé en mesurant la distribution en moment longitudinal du ^{33}Al pour l'état peuplé

3) L'occupation de l'état $2s_{1/2}$ est déduite en de la section efficace expérimentale pour arracher un p depuis cette orbitale (rappel : orbitale $2s_{1/2}$ peut accueillir 2 nucléons)

Dans le ^{34}Si 0.17(3)
Dans le ^{36}S 1.7(4)



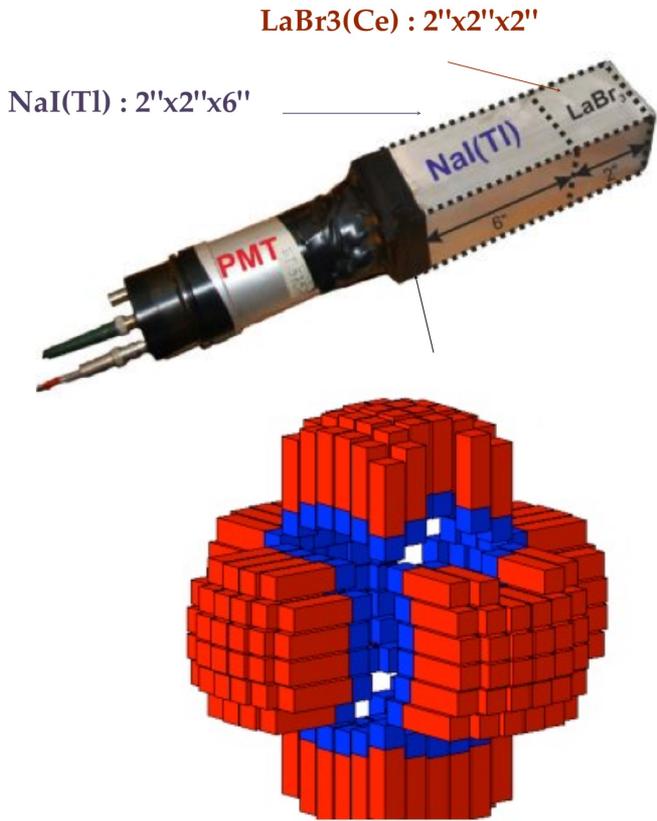
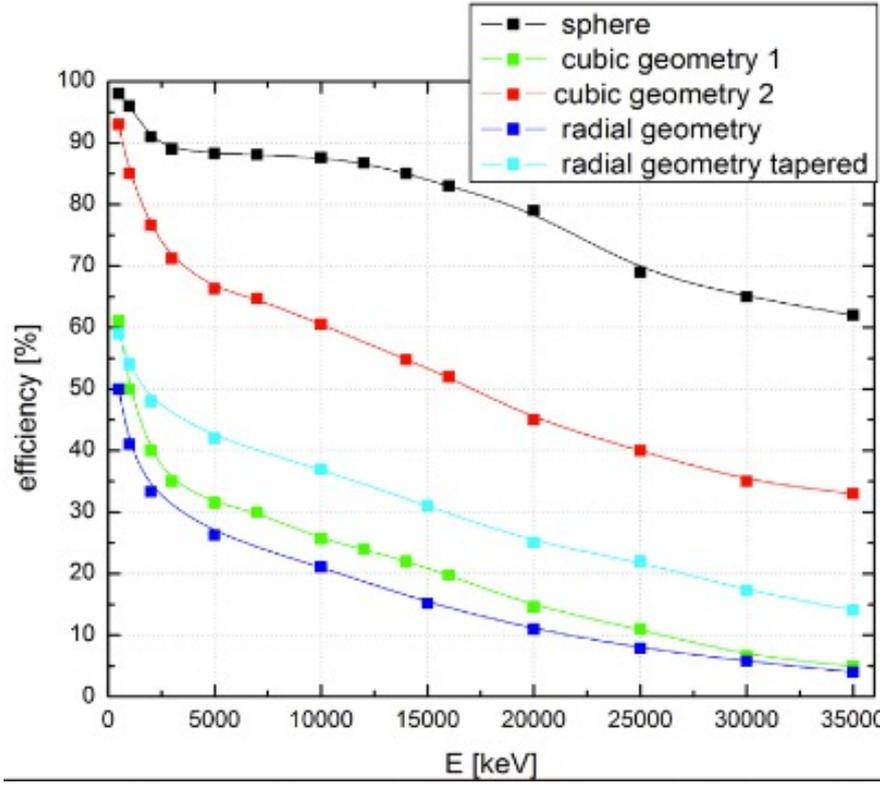
Cours de physique nucléaire 2/3

Les indispensables classiques de la physique nucléaire

1. Etude des propriétés fondamentales
 1. La masse
 2. Les propriétés de décroissance
 - Cas des noyaux superlourds
 - Cas de la radioactivité α protons
2. **Etude des états excités du noyau**
 1. La spectroscopie γ prompt
 2. **Mesurer des γ de plus haute énergie**

2. Etude des états excités du noyau – 2.2 Mesurer de γ de plus haute énergie

- Problème, les détecteurs Ge n'ont pas une bonne efficacité à haute énergie ($E_\gamma > 100$ MeV)
- PARIS, scintillateur inorganique, une stratégie différente d'AGATA/GRETA :
 - Une efficacité supérieure
 - Une résolution moins bonne



2. Etude des états excités du noyau – 2.2 Mesurer de γ de plus haute énergie

GOOD NOT SO GOOD	Ge (3"X3")	LaBr3 (3"x3")
type	Semiconducteur: $\gamma > Ne^-$	Scintillateur: $\gamma > N(h\nu)$ ⇒ besoin PMT
Working conditions	froid: 77°K ⇒ cryostat Azote	Conditions ambiantes ⇒ dispositif léger et portable
Energy range and resolution	keV ↗ MeV 1% ↘ 1‰	keV ↗ MeV 20% ↘ 3%
Eff _{abs} @1" [1]	10 ⁻¹ ↘ 2.10 ⁻²	2.10 ⁻¹ ↘ 5.10 ⁻²
Time resp. Resolution	~250ns (temps montée) 20ns ↘ 5ns [2]	16ns (temps scint.) 200ps -500ps@511KeV [3,4]