

Ecole thématique IN2P3  
“de la physique au détecteur”

**Cours de physique nucléaire 3/3**  
**La physique nucléaire aux interfaces**

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



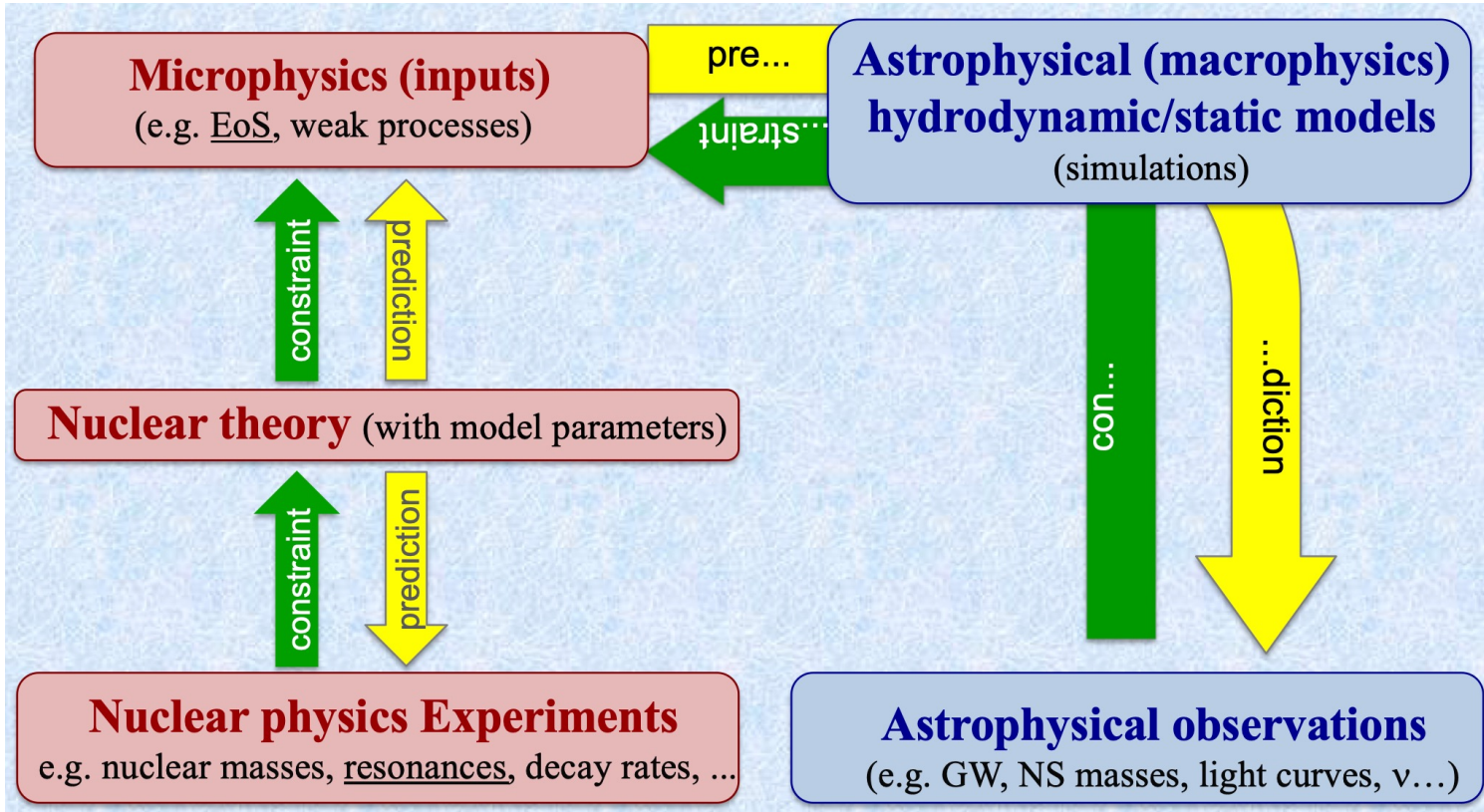
Marine VANDEBROUCK  
CEA Saclay Irfu/DPhN

## **Cours de physique nucléaire 3/3** **La physique nucléaire aux interfaces**

- 1. Incompressibilité de la matière nucléaire**
2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique
3. A la frontière de la physique des ions lourds : forme des noyaux et QGP

# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

- A l'interface entre nucléaire et astrophysique : l'équation d'état de la matière nucléaire (EoS)  
EoS caractérise les propriétés de la matière nucléaire soumise à des conditions extrêmes de température, de densité et d'asymétrie proton/neutron  
EoS joue un rôle clé dans la modélisation des explosions de supernovae et dans la description de la matière dans les étoiles à neutrons



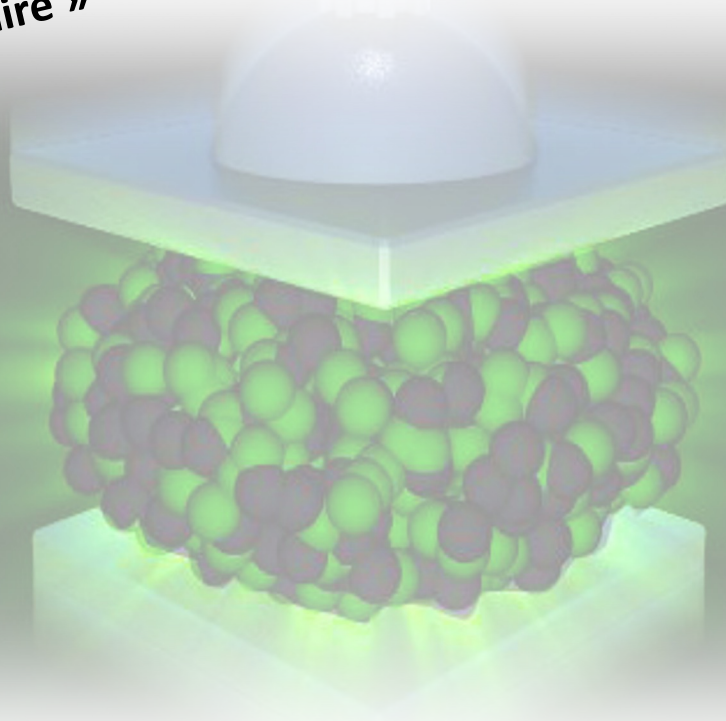
(Cf talk A. Fantina workshop GMR – GDR Resanet 2020)

# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

---

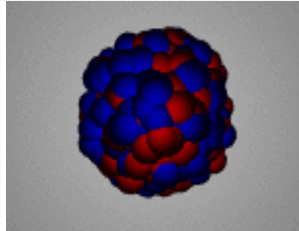
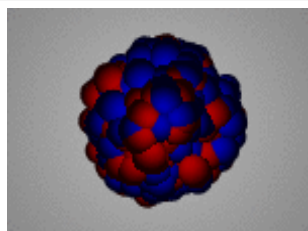
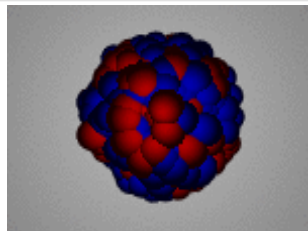
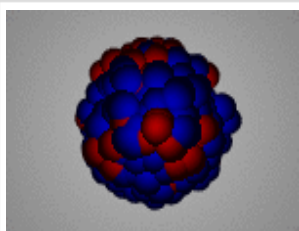
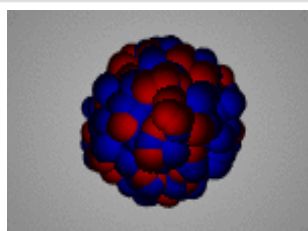
- L'incompressibilité, un paramètre de l'équation d'état de la matière nucléaire

**Ou, avec les mains,  
« A quel point pouvons-nous comprimer la  
matière nucléaire »**



# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

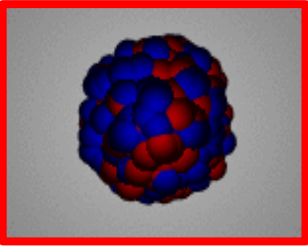
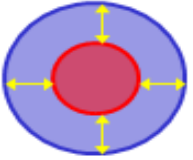
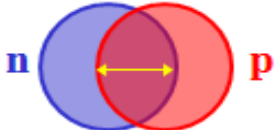
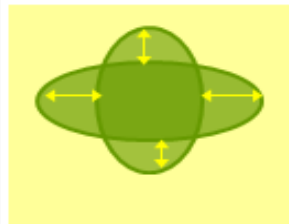
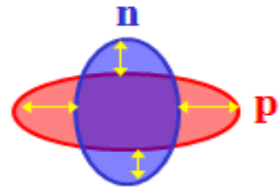
- Comment sonder l'incompressibilité en laboratoire ? La résonance géante monopolaire  
Résonance géante = mode collectif d'excitation du noyau où la majorité des nucléons sont investis dans le processus d'excitation

	$T = 0$ isoscalar	$T = 1$ isovectorial
$L = 0$ monopole (GMR)		
$L = 1$ dipole (GDR)		
$L = 2$ quadrupole (GQR)		

# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

- Comment sonder l'incompressibilité en laboratoire ? La résonance géante monopolaire
- Résonance géante = mode collectif d'excitation du noyau où la majorité des nucléons sont investis dans le processus d'excitation

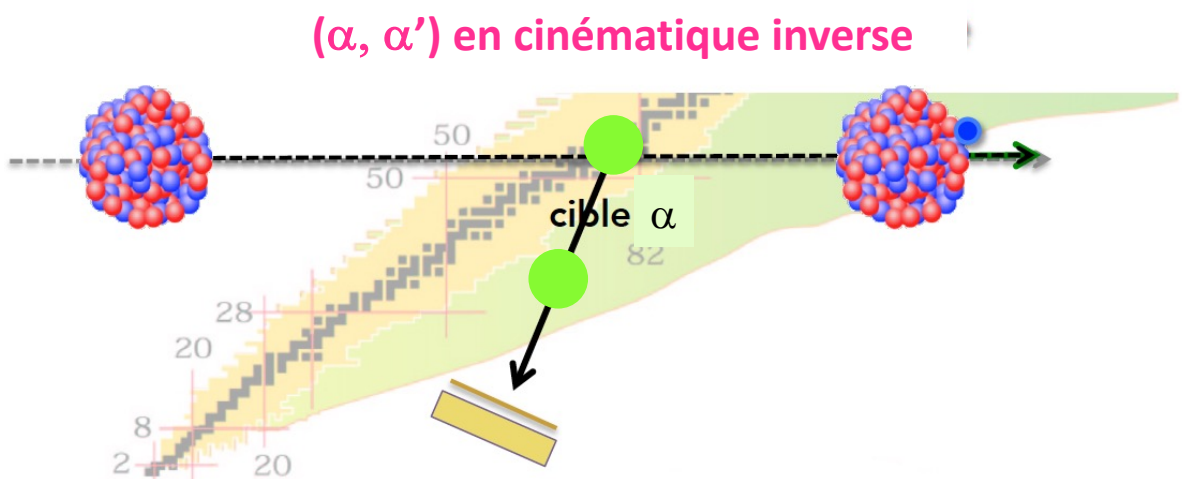
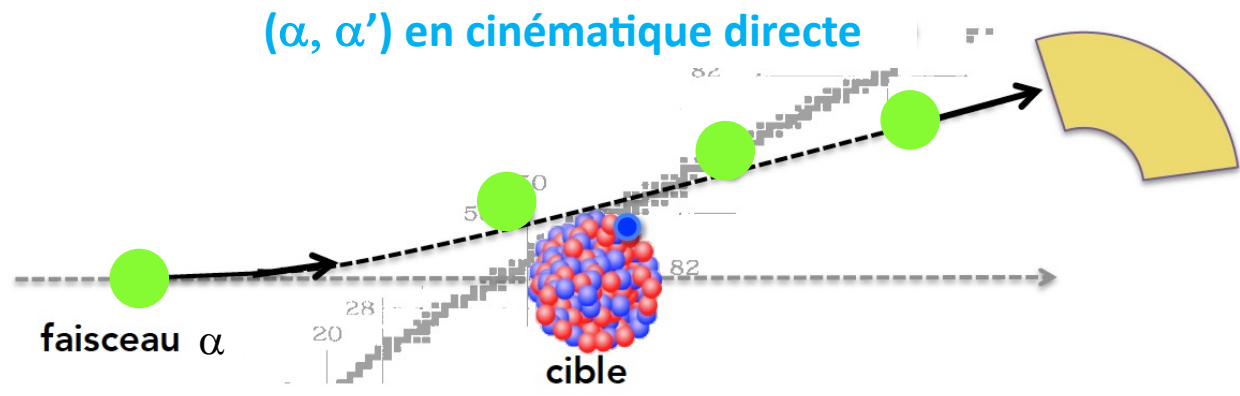
Résonance géante monopolaire  
 = mode de compression –  
 dilatation  
 = mode de respiration du noyau

	$T = 0$ isoscalar	$T = 1$ isovectorial
$L = 0$ monopole (GMR)		
$L = 1$ dipole (GDR)		
$L = 2$ quadrupole (GQR)		

→ Intérêt des noyaux radioactifs riches en neutrons

# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

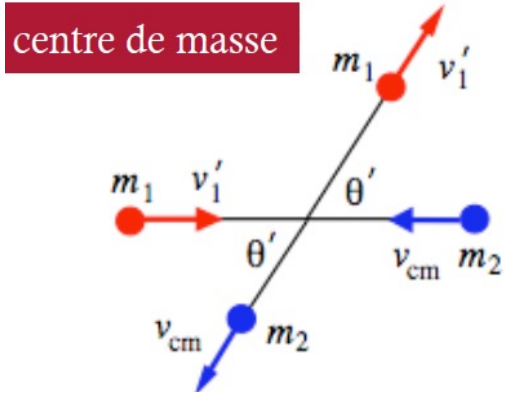
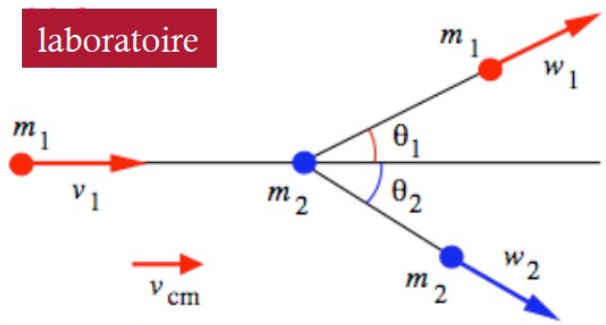
- Comment mesurer la résonance géante monopolaire dans un noyau radioactif ?  
Pour sonder les résonances géantes isoscalaires : diffusion inélastique d' $\alpha$  à 35-100 MeV/ nucléon



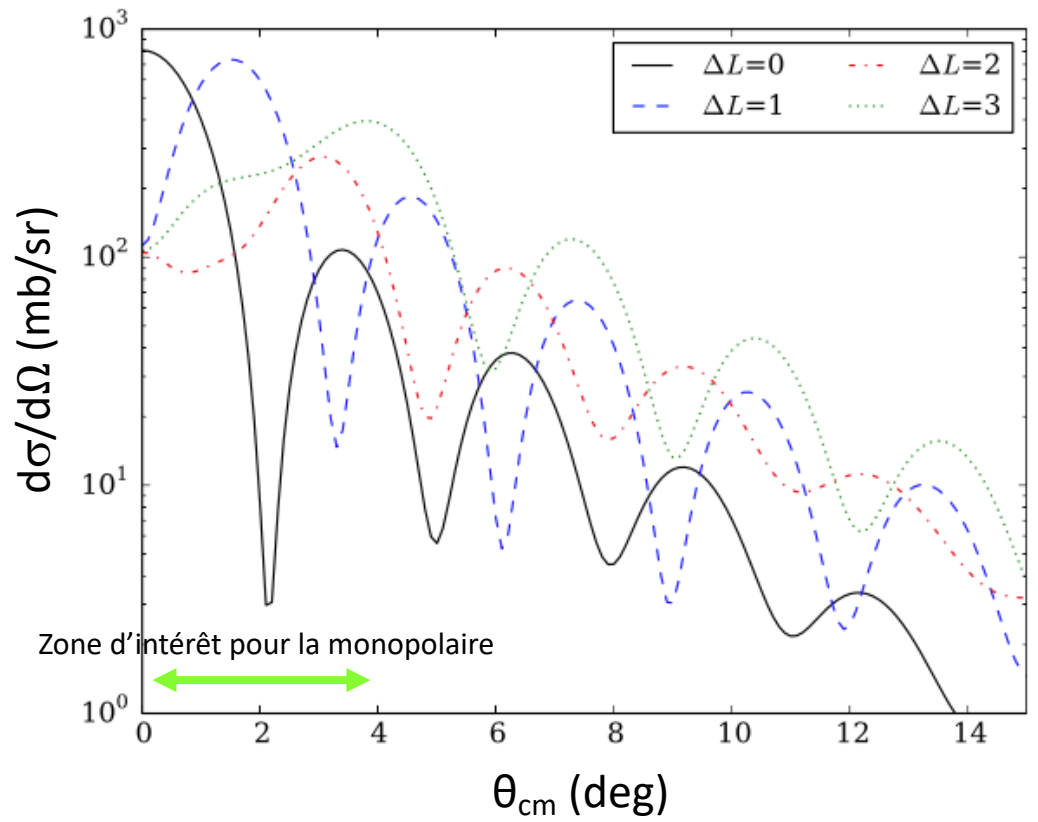
# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

- Comment identifier la résonance géante monopolaire parmi les différentes résonances géantes isoscalaires peuplées ?

1) On change de référentiel



$^{110}\text{Cd}(\alpha, \alpha')^{110}\text{Cd}^*$ ,  $E_\alpha = 97 \text{ MeV/nucleon}$ ,  $E^*(^{110}\text{Cd}) = 15.5 \text{ MeV}$

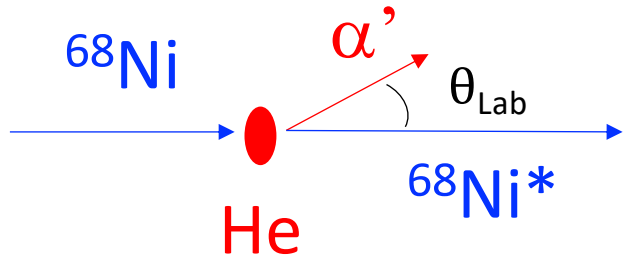


2) On étudie la distribution angulaire



# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

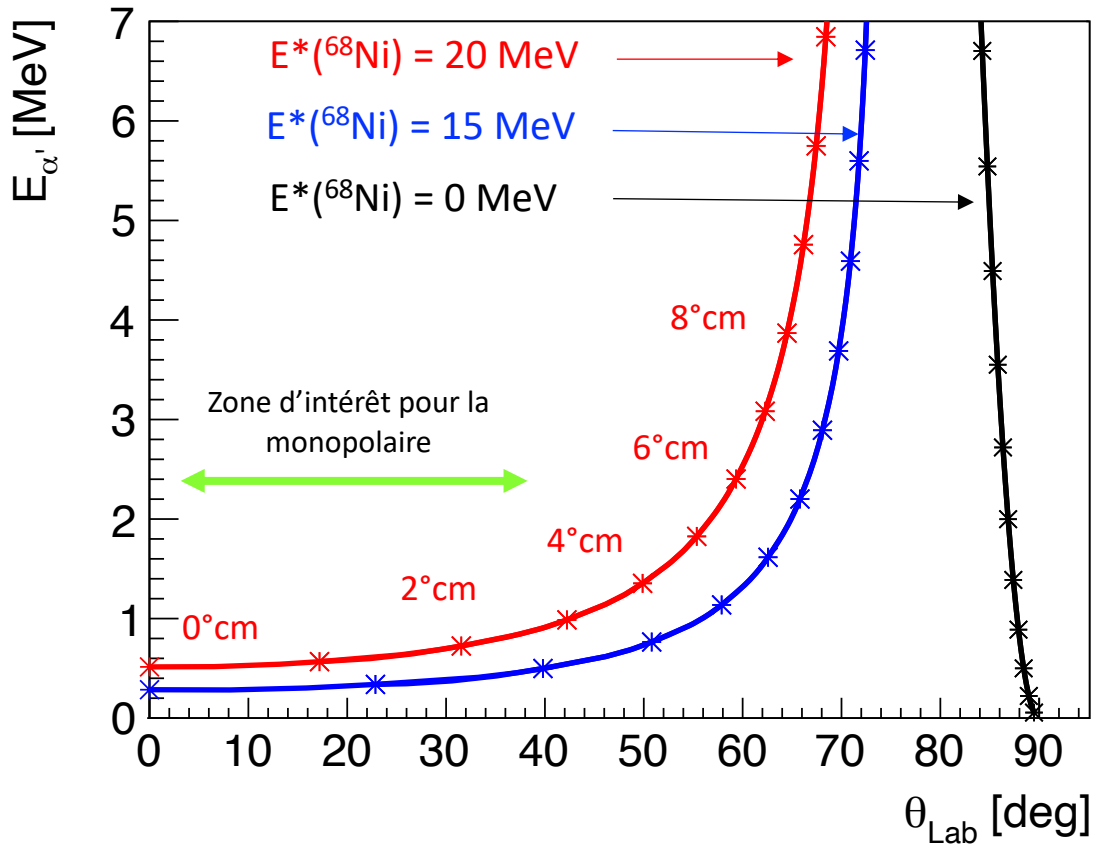
- Première mesure de la résonance géante monopolaire dans un noyau radioactif riche en neutrons : le  $^{68}\text{Ni}$ . La difficulté de la cinématique inverse.



Mesure de  $E_{\alpha'}$  and  $\theta_{\text{Lab}}$   
 + analyse par masse manquante  
 →  $E^*(^{68}\text{Ni})$

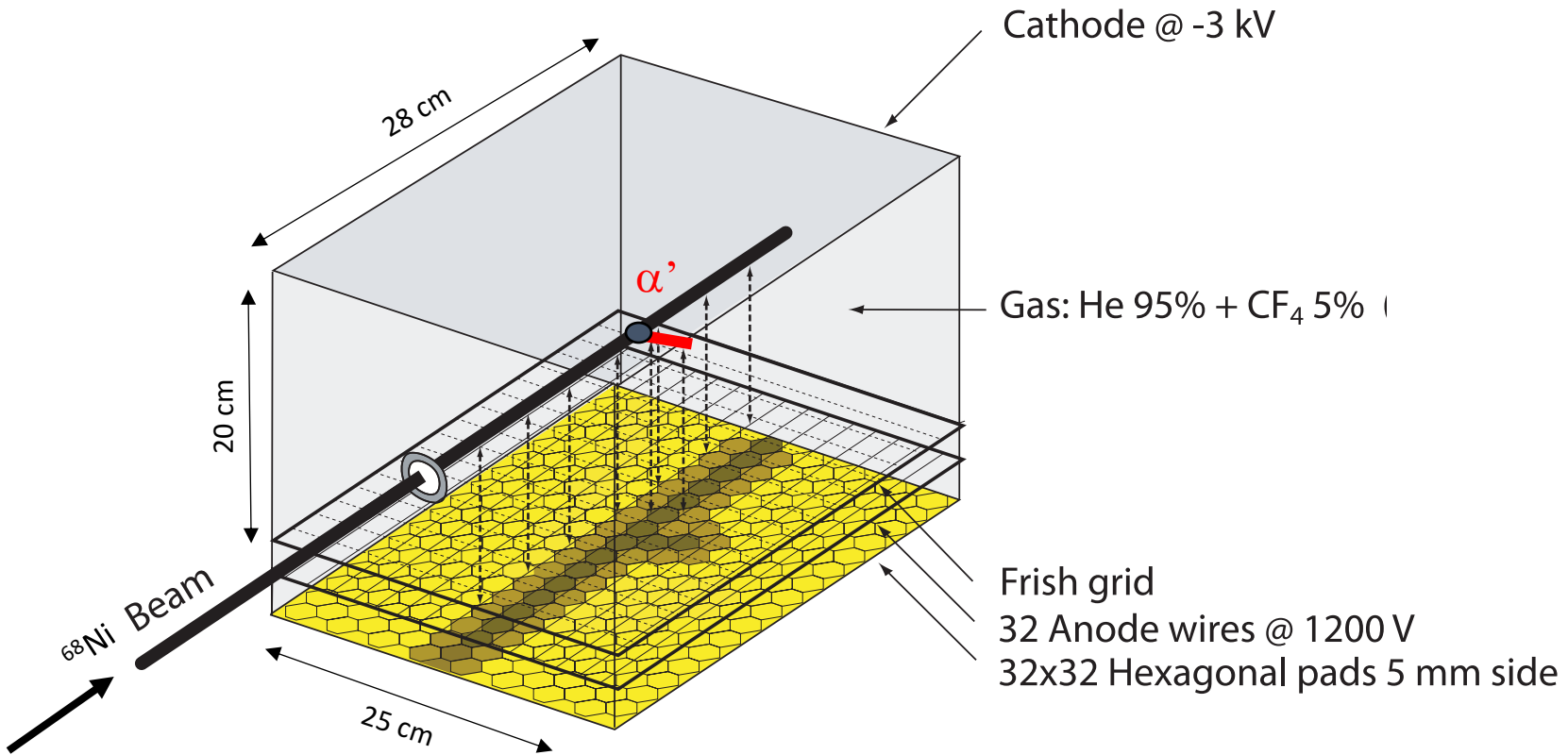
!  $\alpha'$  ne sort pas de la cible

$^{68}\text{Ni}(\alpha, \alpha')^{68}\text{Ni}^*$ ,  $E_{\alpha} = 50 \text{ MeV/nucleon}$



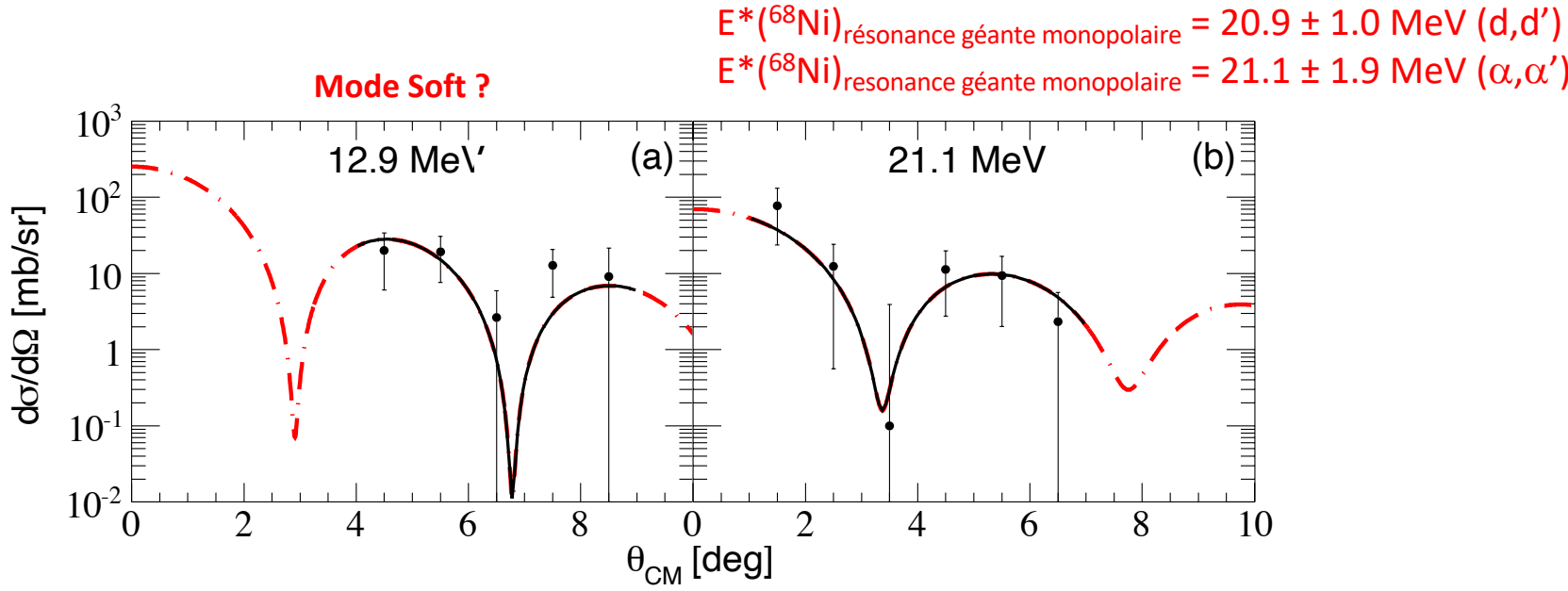
# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

- La **cible active** MAYA (puis ACTAR) : le gaz utilisé dans la TPC est également la cible !



# 1. L'incompressibilité de la matière nucléaire

- Première mesure de la résonance géante monopolaire dans un noyau radioactif riche en neutrons : le  $^{68}\text{Ni}$ . Les résultats.



MV *et al.*, Phys. Rev. Lett. 113, 032504 (2014)

- Mais un résultat associé à des barres d'erreur qui ne permettent pas de contraindre l'incompressibilité
  - ➡ Nouvelle expérience avec ACTAR en 2019 actuellement en cours d'analyse
  - Résolution en énergie 3MeV ➡ 1MeV
  - Seuil de détection 600keV ➡ 100keV

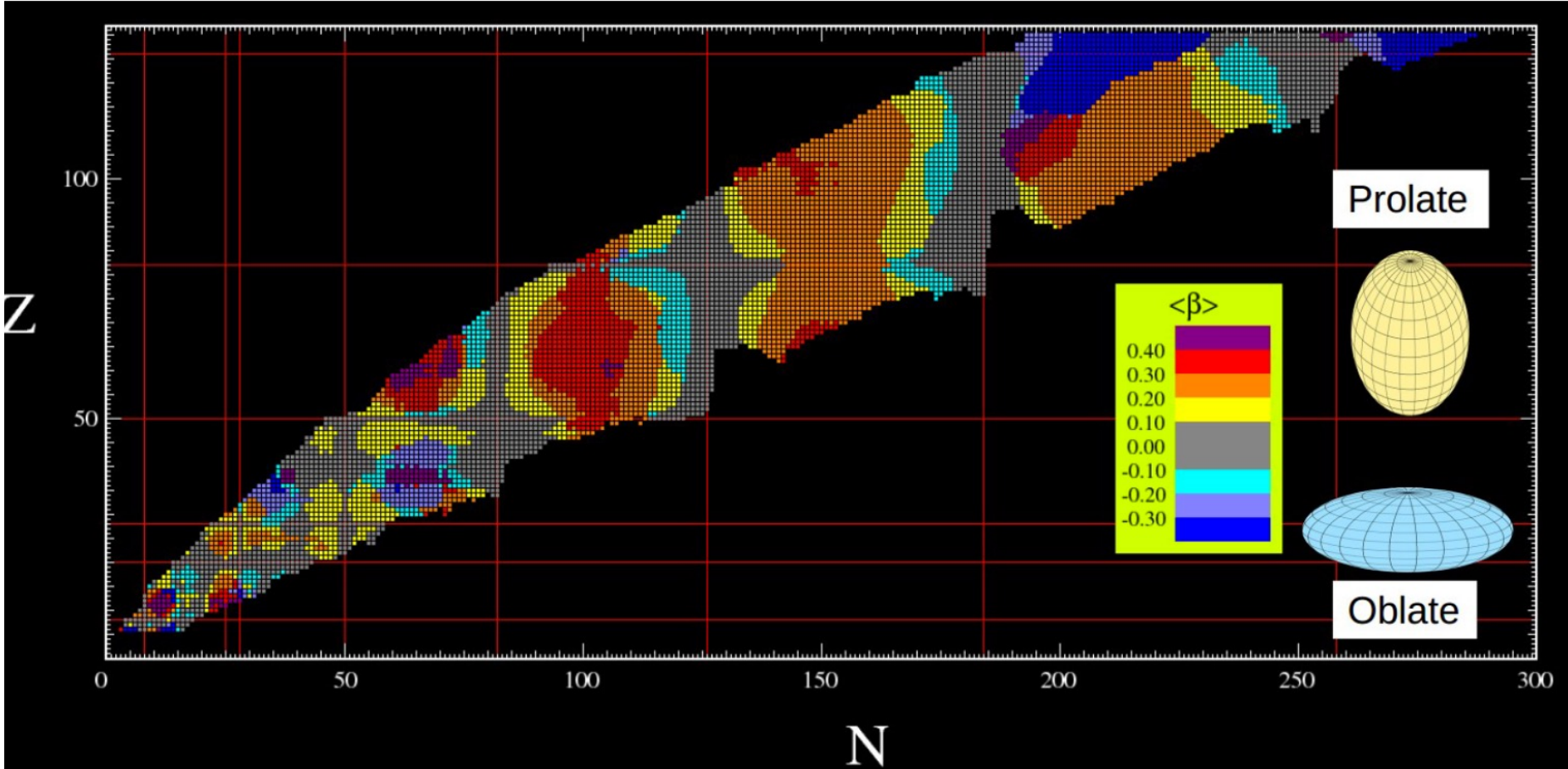
## **Cours de physique nucléaire 3/3** **La physique nucléaire aux interfaces**

1. Incompressibilité de la matière nucléaire
- 2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique**
3. A la frontière de la physique des ions lourds : forme des noyaux et QGP

# 2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique

- Les formes du noyau

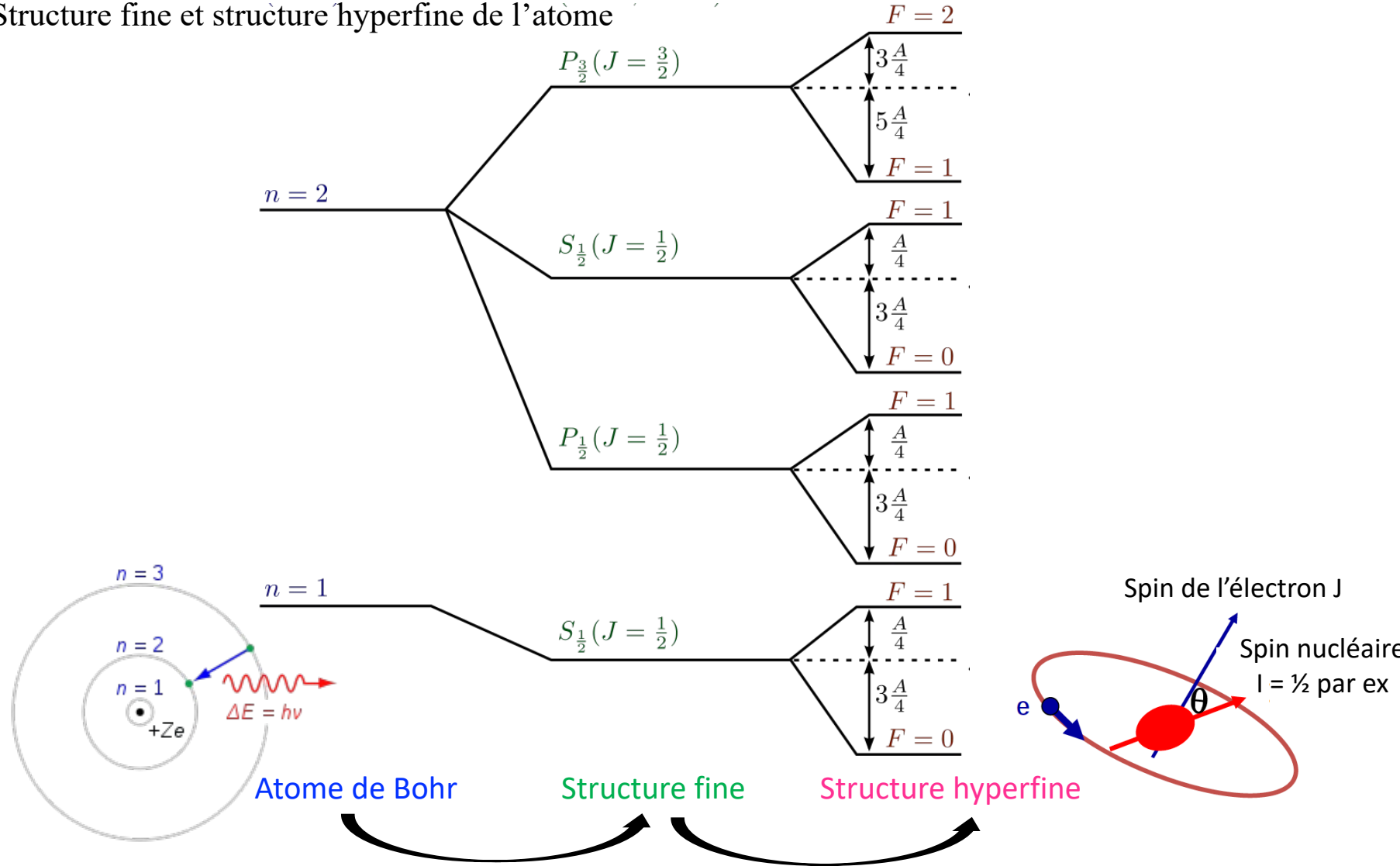
film « Le noyau, un objet quantique »



[http://www-phynu.cea.fr/science\\_en\\_ligne/carte\\_potentiels\\_microscopiques/carte\\_potentiel\\_nucleaire.htm](http://www-phynu.cea.fr/science_en_ligne/carte_potentiels_microscopiques/carte_potentiel_nucleaire.htm)

# 2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique

- Structure fine et structure hyperfine de l'atome

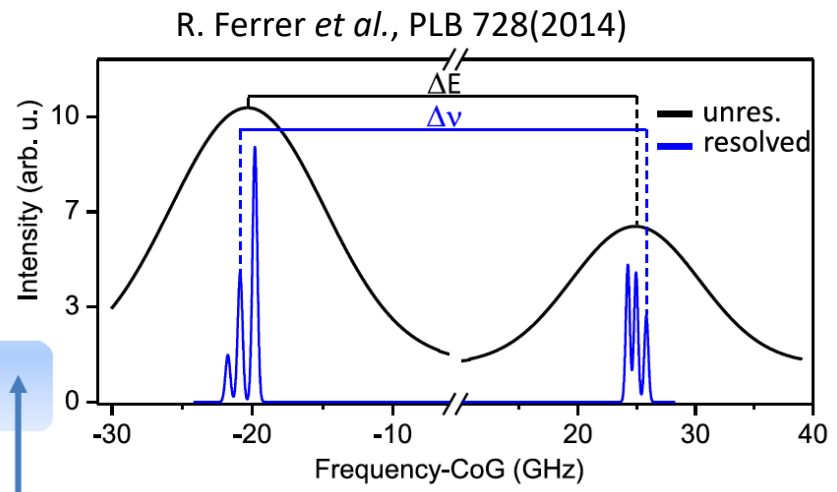


Atome de Bohr      Structure fine      Structure hyperfine

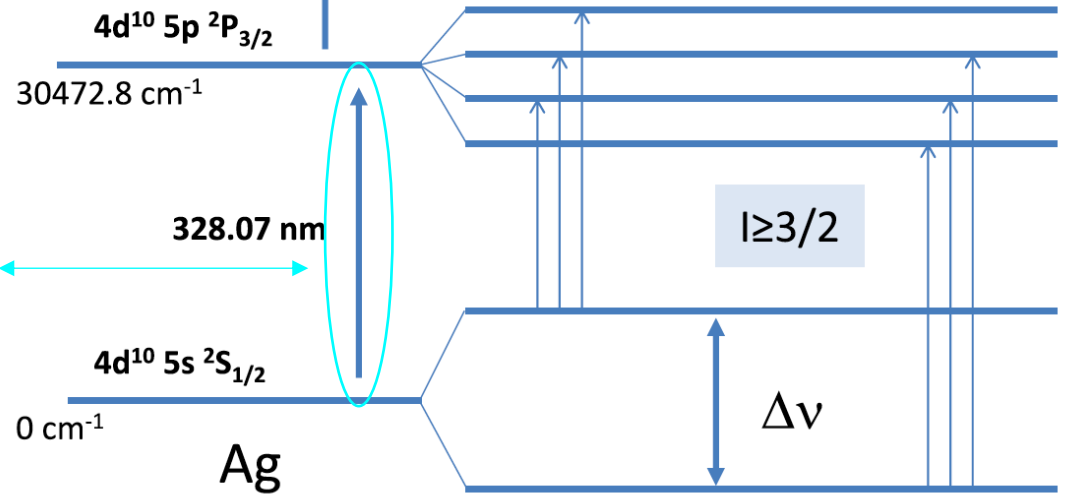
Description quantique de l'atome      Couplage noyau - électron

# 2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique

- La spectroscopie par ionisation laser. La technique :



continuum  
I.P. 7.57623 eV  
308 nm



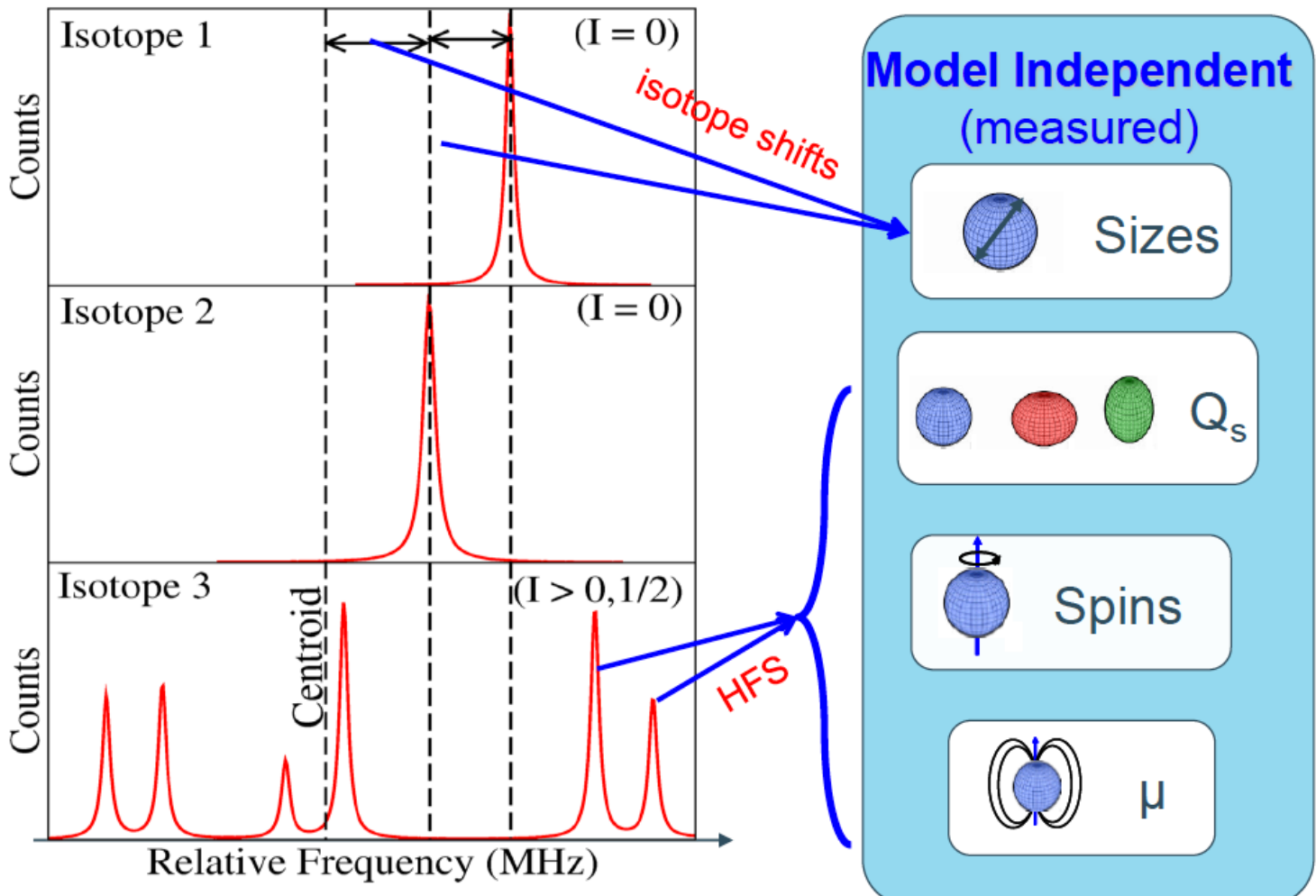
Quand la fréquence de ce laser correspond à une transition entre 2 niveaux de la structure hyperfine  
 → Ionisation

Structure fine

Structure hyperfine

# 2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique

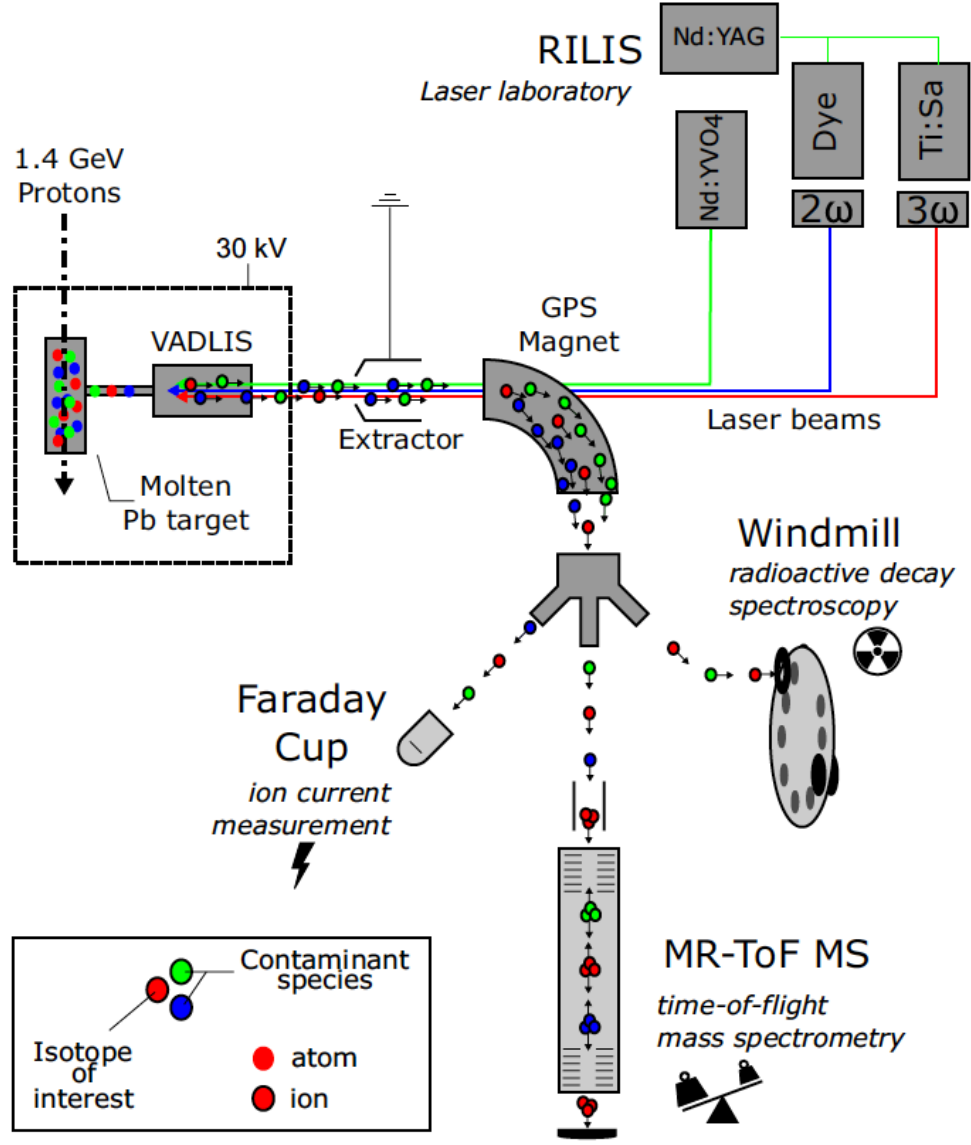
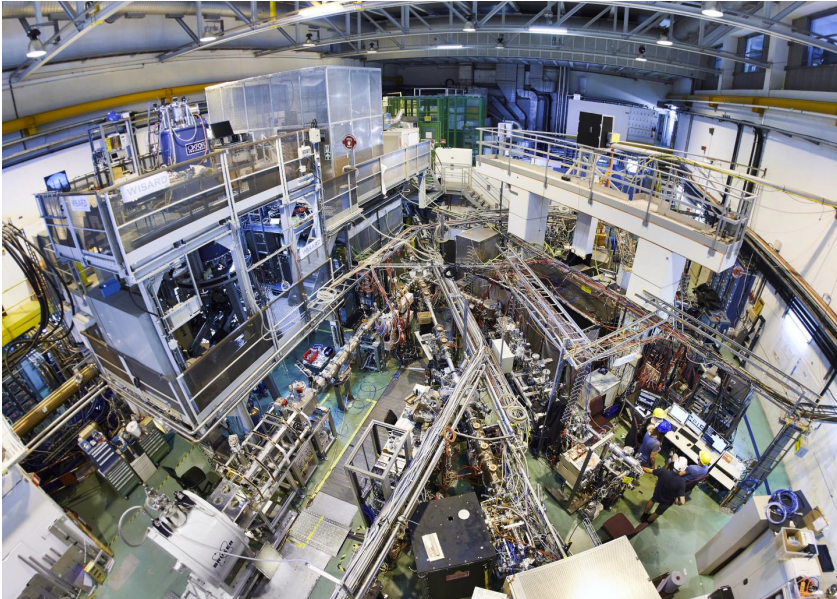
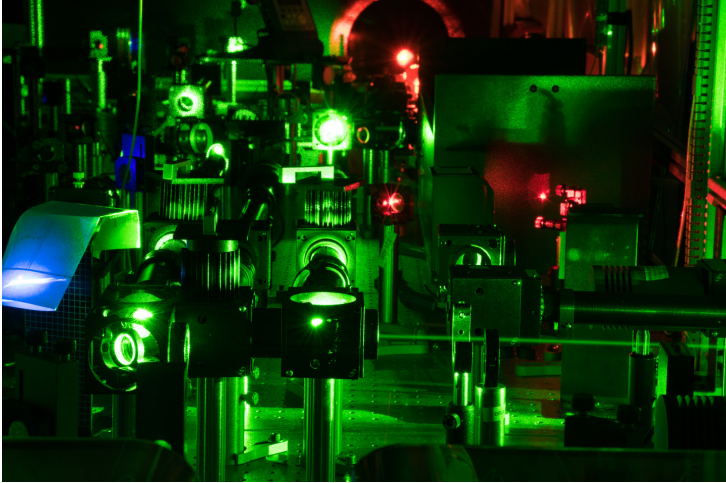
- La spectroscopie par ionisation laser. Que pouvons-nous en déduire ? (cf cours EJC2021 R. de Groot)





# 2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique

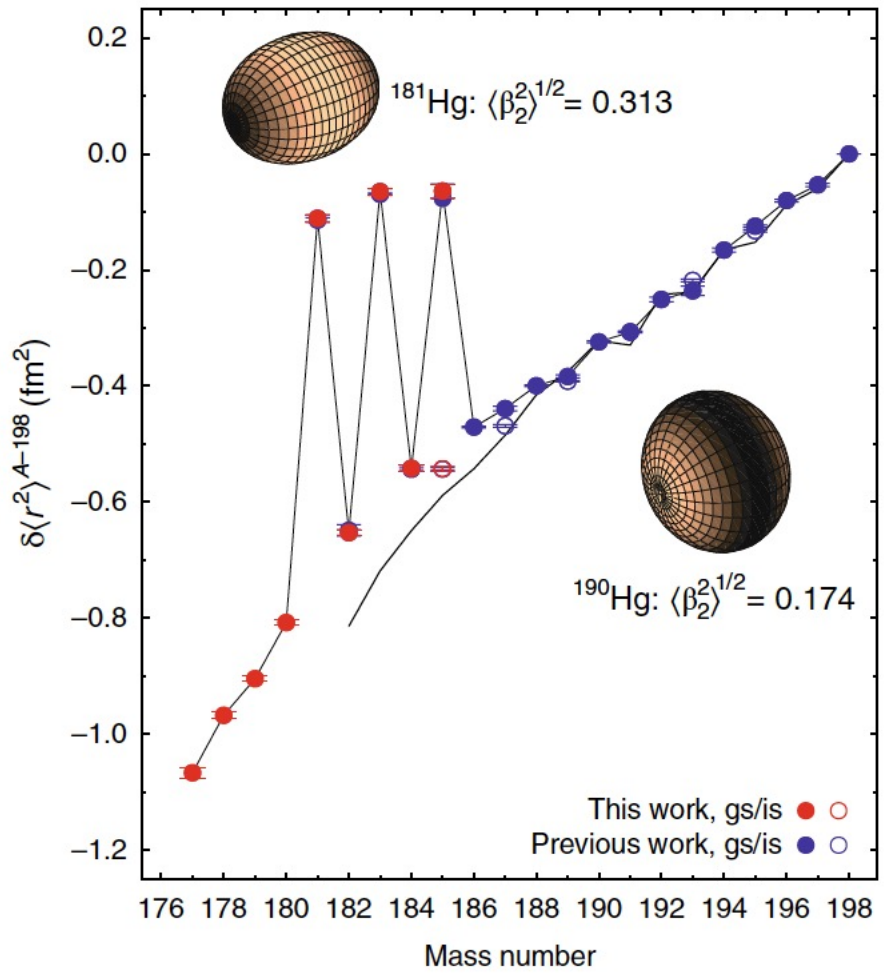
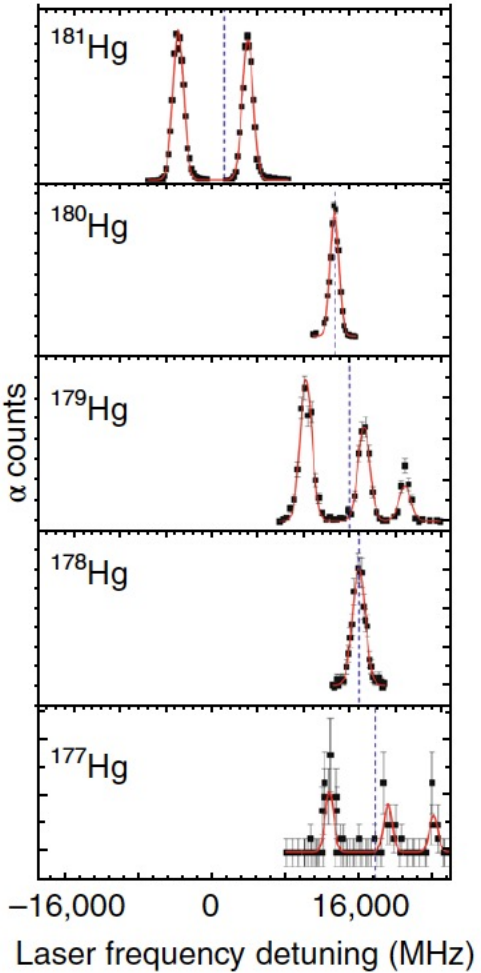
- Dispositif expérimental ISOLDE @CERN



B. A. Marsh *et al.*, Nature Physics 14 (2018)

# 2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique

- Spectroscopie par ionisation laser dans la chaîne isotopique de Hg



Très forte augmentation du rayon de charge entre N = 101 et 105 (<sup>181</sup>Hg, <sup>183</sup>Hg et <sup>185</sup>Hg)

Retour à une forme quasi sphérique à N = 100 (<sup>180</sup>Hg)

Coexistence de formes à N = 105 (<sup>185</sup>Hg)

**Un vrai terrain de jeu pour les théoriciens**

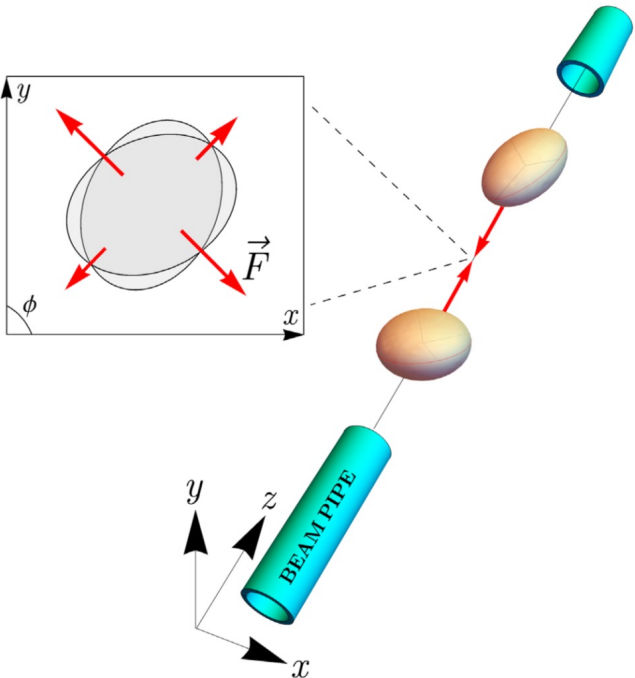
B. A. Marsh *et al.*, Nature Physics 14 (2018)  
 S. Sels et al. Phys. Rev. C 99 (2019)

## Cours de physique nucléaire 3/3 La physique nucléaire aux interfaces

1. Incompressibilité de la matière nucléaire
2. Les perturbations nucléaires de la structure atomique
3. **A la frontière de la physique des ions lourds : forme des noyaux et QGP**

### 3. A la frontière de la physique des ions lourds : forme des noyaux et QGP

- Expérience de collision entre 2 noyaux atomiques auprès d'un collisionneur d'ions lourds



B. Bally *et al.*, Phys. Rev. Lett. 128 (2022)

- La forme de la zone de recouvrement lors de la collision dépend de la forme initiale des noyaux dans leur état fondamental
- Impact sur la dynamique (**flot elliptique  $v_2$** ) du plasma de quarks et de gluons (QGP) créé lors de la collision

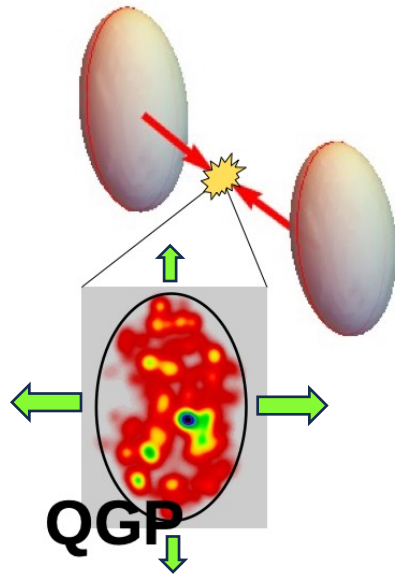
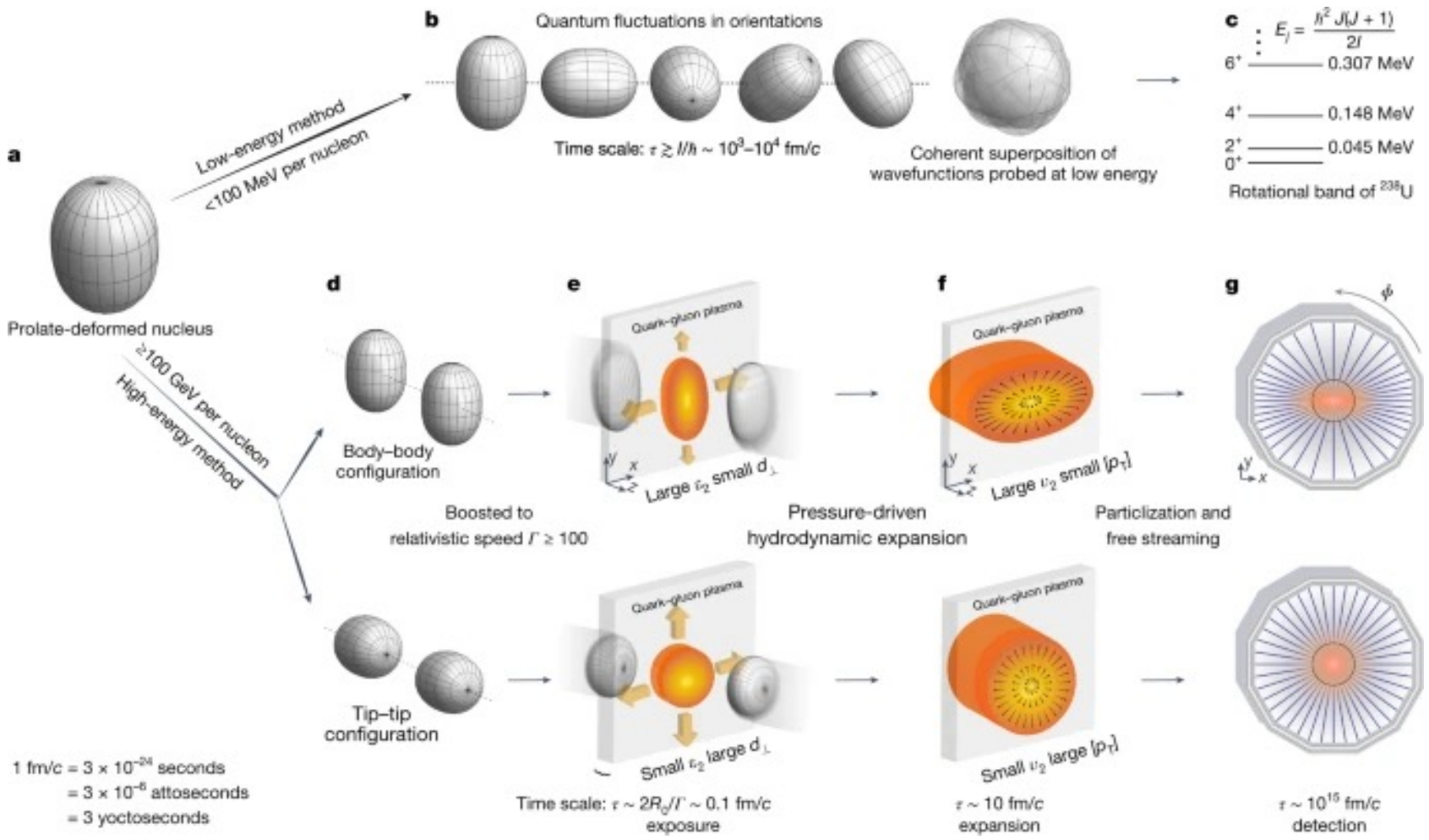


Image extraite présentation de G. Giacalone à IS2023

### 3. A la frontière de la physique des ions lourds : forme des noyaux et QGP



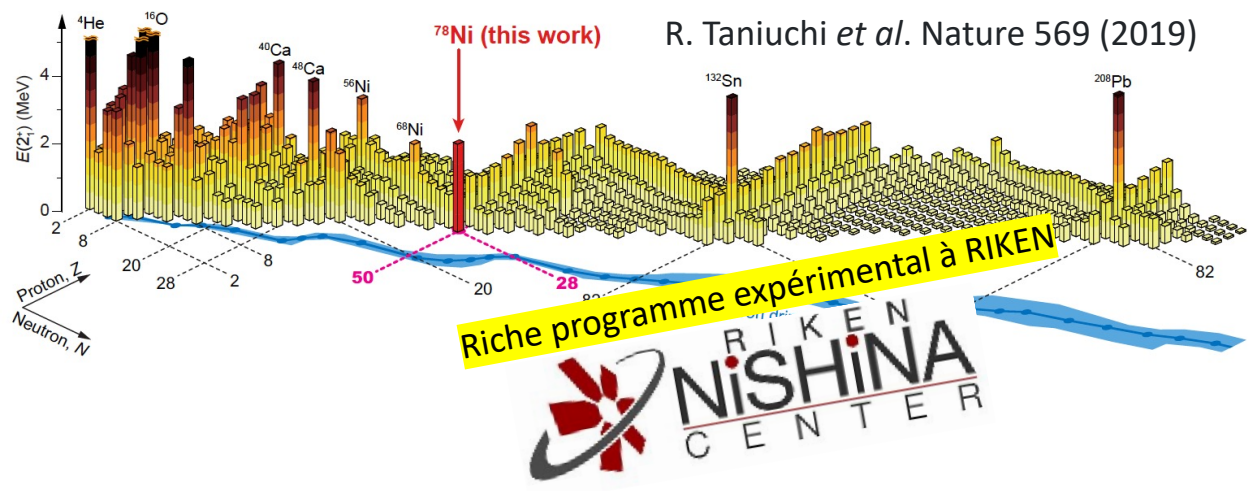
Star Collaboration, Nature 635 (2024)

- Measurement of the quadrupole deformation  $\beta = 0.297 \pm 0.015$  compatible with results from low-energy data  $\beta = 0.287 \pm 0.007$

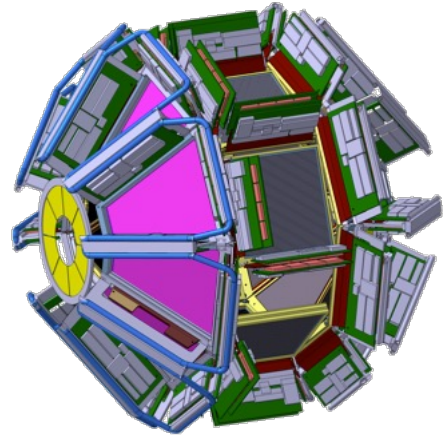
Article  
**Imaging shapes of atomic nuclei in high-energy nuclear collisions**

# The end

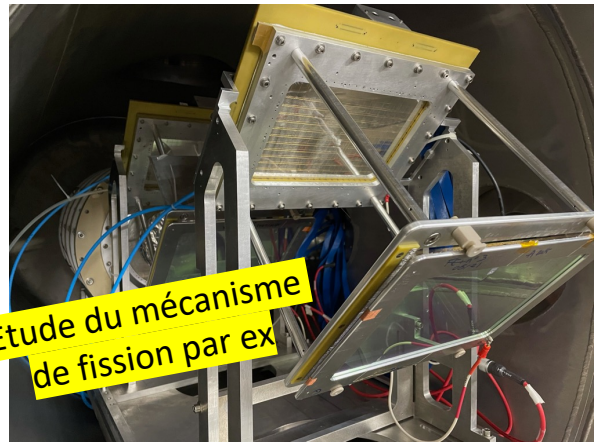
Echantillon de tout ce dont je n'ai pas eu le temps de vous parler...



GRIT  
La structure nucléaire grâce aux réactions de transfert



J'ai parlé structure mais pas réaction ...



... et tant d'autres belles manip encore !