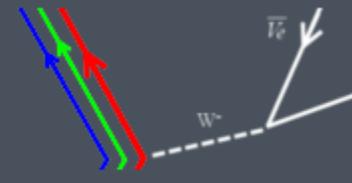


ÉVÉNEMENTS SFP - PHYSIQUE NUCLÉAIRE DU 21/06/2016 AU 22/06/2016  
LES GRANDES QUESTIONS EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE FONDAMENTALE



Session IV :

**Le noyau, un laboratoire quantique complexe : existe t-il une logique unifiée pour le décrire ?**

**Quelle(s) expérience(s) pour quelle(s) observable(s) ?**

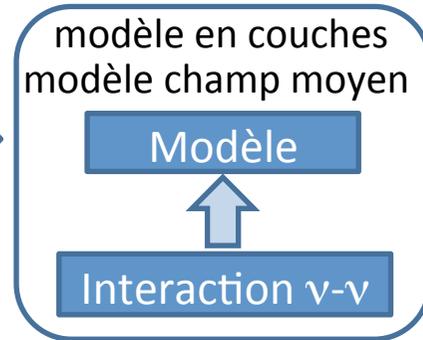
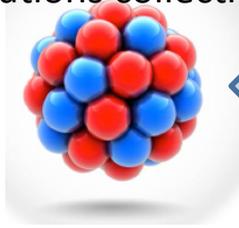
Stéphane Grévy  
CENBG



## 0- Introduction

excitations individuelles  
excitations collectives

objet isolé



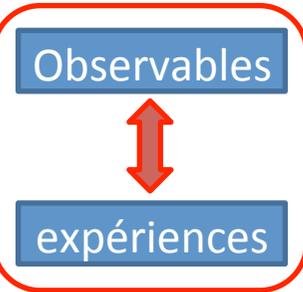
Approximations



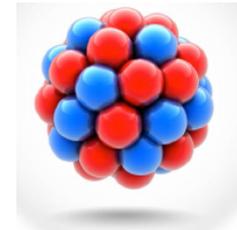
Paramètres



valider/tester  
fixer



interprétation  
des mesures



objet isolé mais souvent  
via des réactions

**cohérence** entre le cadre de la description  
(le modèle avec ses approximations) et les  
ingrédients (interaction avec ses paramètres)

Quelle(s) expérience(s) pour quelle(s) observable(s) ?

1- (Éléments de) discussion sur le lien Paramètres/Approximations - Observables

- paramètres/approximations : de quoi parle t-on ?
- quelles observables ?
- pertinence des observables
- interprétation des observables

2- (Éléments de) discussion sur le lien observables - expériences

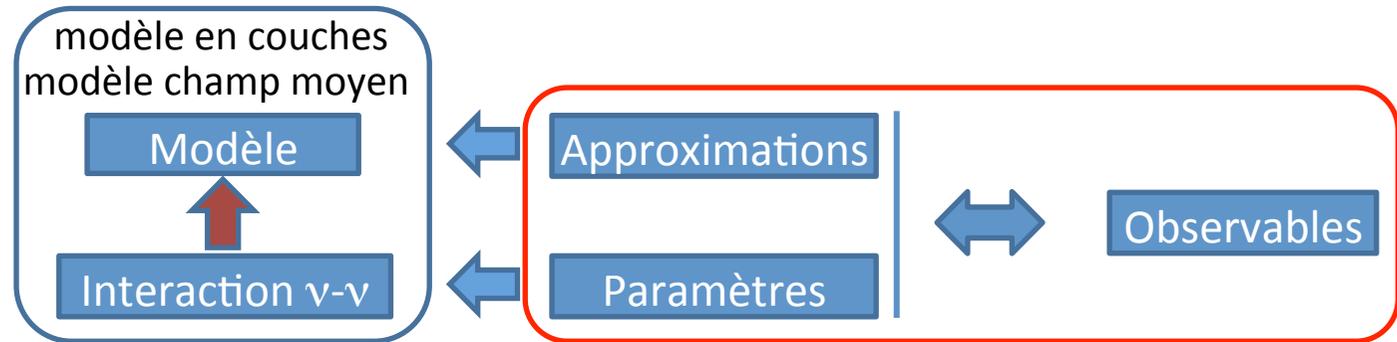
- diversité des moyens de productions
- diversité des dispositifs expérimentaux
- précision des mesures - exemple de la masse

3- Complémentarité des observables/expériences pour étudier la physique sous-jacente :

- exemple de la fermeture de couche  $N=28$

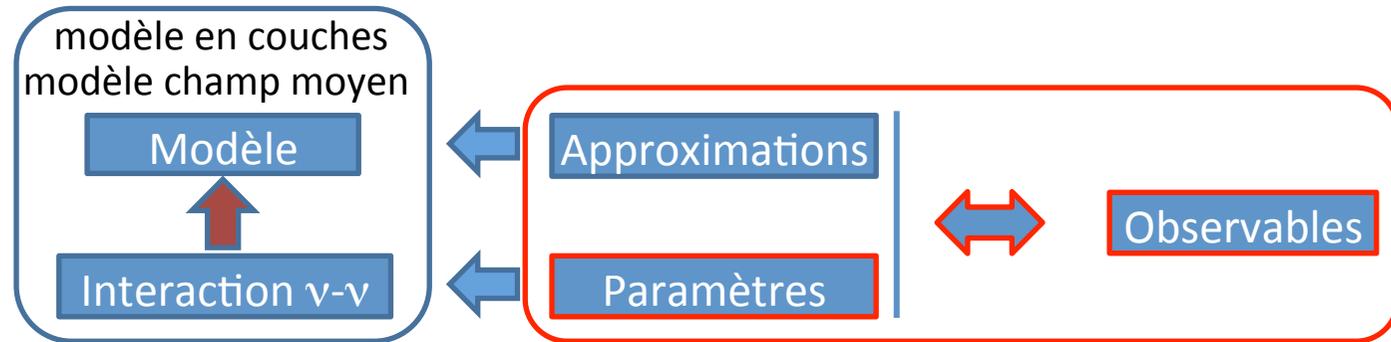
# 1- (Elements de) discussion sur le lien paramètres - observables

---



- Observables utilisées pour fixer les paramètres des interactions
- Observables utilisées pour valider/tester les approximations des modèles

# 1- (Elements de) discussion sur le lien paramètres - observables



- Observables utilisées pour fixer les paramètres des interactions

Le nombre de paramètres dépend de l'interaction

-int. effectives Chirales      dépend de l'ordre (LO, NLO, NNLO...)  
 ~ 10 → qqls dizaines de paramètres

- int. effectives réalistes      ~30-50 paramètres

-int. effectives phénoménologique

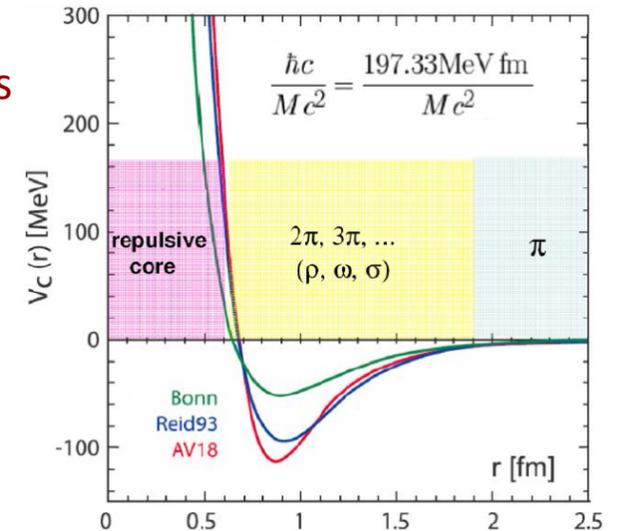
champ moyen :      ~15 paramètres (Skyrme, Gogny)

modèle en couches : dépend de l'espace de valence

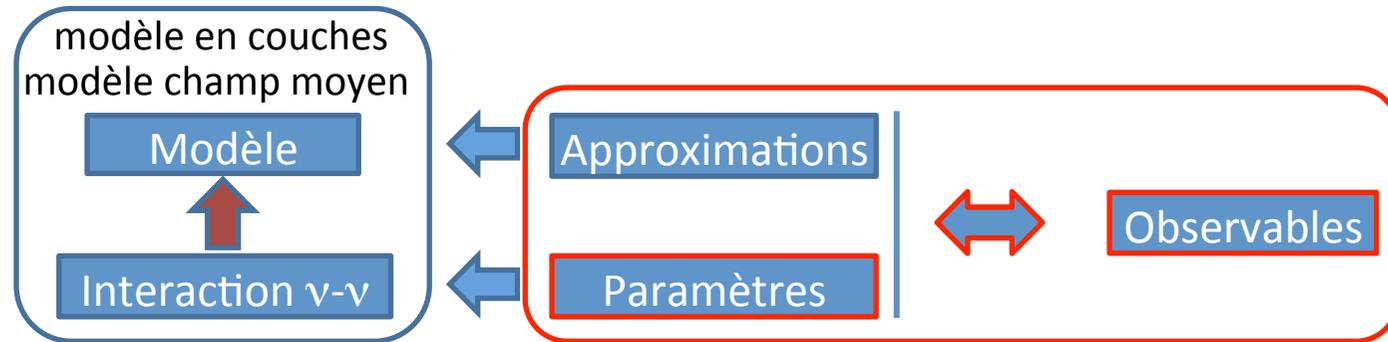
0p-shell : ( $^4\text{He}$ - $^{16}\text{O}$ ) 15 TBME

1s0d-shell : ( $^{16}\text{O}$ - $^{40}\text{Ca}$ ) 63 TBME

1p0f-shell : ( $^{40}\text{Ca}$ - $^{80}\text{Zr}$ ) 195 TBME



# 1- (Elements de) discussion sur le lien paramètres - observables



- Observables utilisées pour fixer les paramètres des interactions

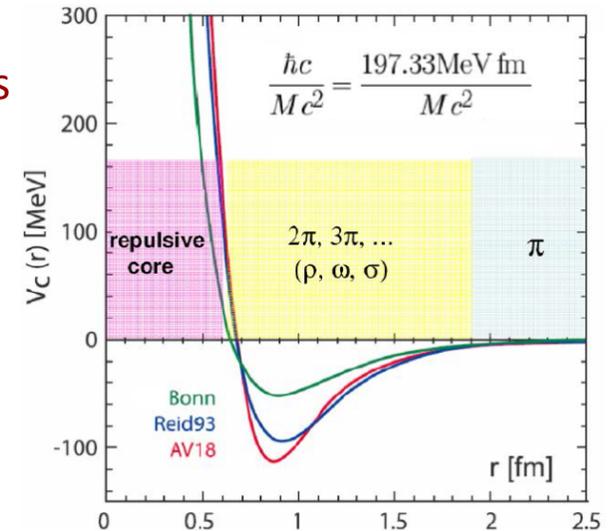
Exemple : interaction de Gogny

*partie longue portée :*

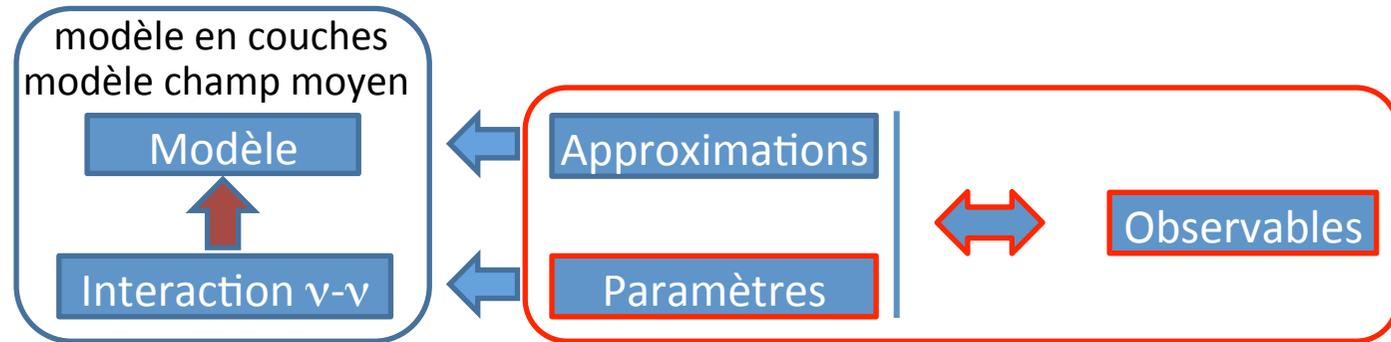
- forme donnée par des considérations de symétries
- paramètres fixés par des données de diffusion nucléon-pion

*parties moyenne et courte portée*

- forme du puit donnée par 2 gaussiennes (1 attractive, 1 répulsive)
- 14 paramètres :
  - 5 par gaussienne : portée, amplitudes dans les canaux direct, spin, isospin et spin/isospin
  - terme de densité
  - terme de pairing
  - terme puissance de la densité
  - terme de spin-orbite



# 1- (Elements de) discussion sur le lien paramètres - observables



- Observables utilisées pour fixer les paramètres des interactions

Exemple : interaction de Gogny

	$j$	$\mu_j$	$W_j$	$B_j$	$H_j$	$M_j$	$t_3$	$x_0$	$\alpha_0$	$W_{ls}$
D1	1	0.7	-402.4	-100.0	-496.17	-23.561	1350.0	1.0	1/3	115.0
	2	1.2	-21.297	-11.772	37.27	-68.81				

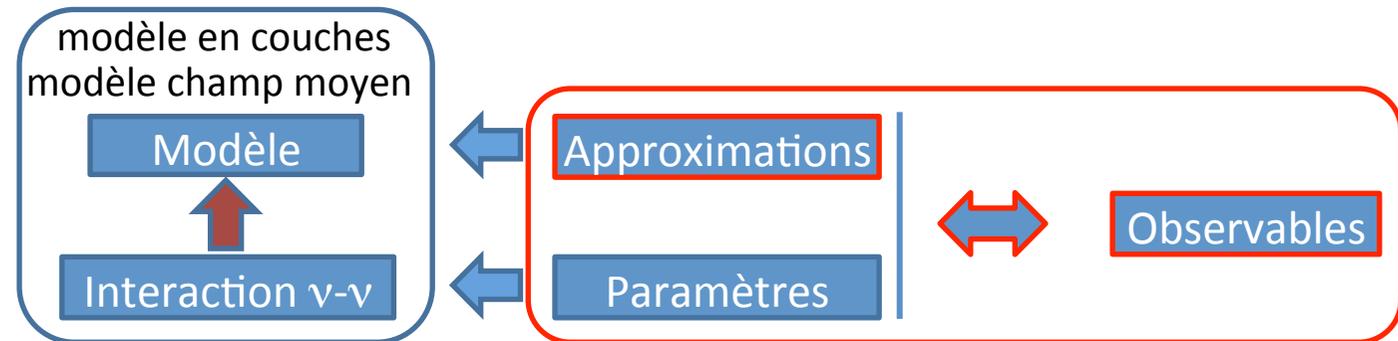
Observables

- données de la matière nucléaire :  $\rho_0$ ,  $E_0/A$ ,  $K_{inf}$ ,  $E_{sym}$ ,  $m^*/m$
- rayons, masses et  $E^*$  de qqls noyaux
- + barrières de fission
- + propriétés matière neutronique
- + toutes les masses mesurées

	D1	D1S	D1N	D1M	Emp. values
$\rho_0$ (fm <sup>-3</sup> )	0.166	0.163	0.161	0.165	0.17 ± 0.02
$E_0/A$ (MeV)	-16.32	-16.02	-15.96	-16.03	-16 ± 1
$K_{inf}$ (MeV)	228	210	230	225	220 ± 10
$E_{sym}$ (MeV)	30.8	32.0	29.3	28.554	30 ± 2
$m^*/m$	0.67	0.70	0.75	0.746	0.70 ± 0.05

On peut aussi ajouter de nouveaux termes dans l'interaction  
 → nouveaux paramètres  
 → nouvelles observables (ou non)

## 1- (Elements de) discussion sur le lien paramètres - observables



### - Observables utilisées pour valider/tester les approximations des modèles

Approximations → pour traiter le problème à N corps  $\begin{cases} \text{Traitement du champ moyen} \\ \text{Traitement des corrélations} \end{cases}$

La compréhension des fermetures de couches (et donc leur évolution) et des effets des corrélations sont les éléments principaux à considérer pour valider les approximations

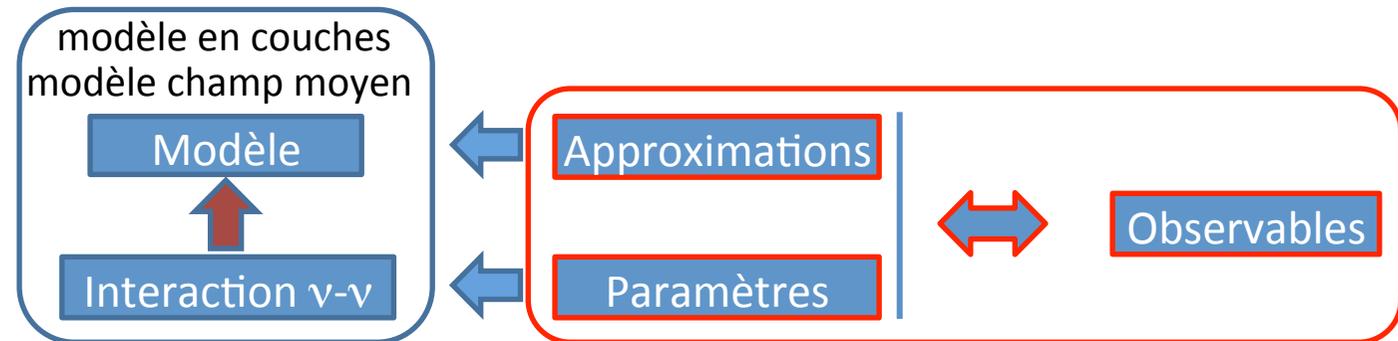
- masses, existences (driplines, SHE)
- spectroscopie de décroissances (beta, gammas, particules...)
- rayons (charge, matière)
- spins et moments des états fondamentaux
- spectroscopie basse énergie (énergies, spins, facteurs spectroscopiques...)
- transitions
- ...

Il faut faire des choix : quelles observables dans quels noyaux ?

- a t'on les bonnes observables ? pertinence par rapport au phénomène étudié ?
- certaines observables nécessitent une *interprétation* pour être reliées à des propriétés physiques  
exemple des facteurs spectroscopiques



## 1- (Elements de) discussion sur le lien paramètres - observables



### - Exemples de questions actuelles :

**Force tenseur** : Comment vérifier son importance ? Par la dérive du monopole...

- Quelles observables ? → Quelles expériences ?
- Comment isoler la contribution champ moyen sphérique ?

**Force à 3 corps** : Jusqu'à maintenant, correction "ad hoc" des monopoles pour "avoir"  $N=28$  dans  $^{48}\text{Ca}$

- Cohérence de l'approche ?
- Avec 3N réalistes →  $N=28$  apparaît "naturellement"...
- Comment vérifier/valider ? Masses ? Spectroscopie ?
- Quid des autres fermetures de couche SO (50, 82...) ? Aussi 3N ?  
(énergie  $2+$  dans  $^{78}\text{Ni}$ , très basse, était non prédite par les modèles...)



## 2- (Elements de) discussion sur le lien observables - expériences

---

L'enjeu se trouve dans les noyaux "à leurs extrêmes" au sens large :

- composition (exotiques)
- formes
- modes de décroissance
- états d'excitation (individuels ou collectifs)
- ...

→ **diversité** en terme de

- moyen de productions (accélérateurs)
- dispositifs expérimentaux

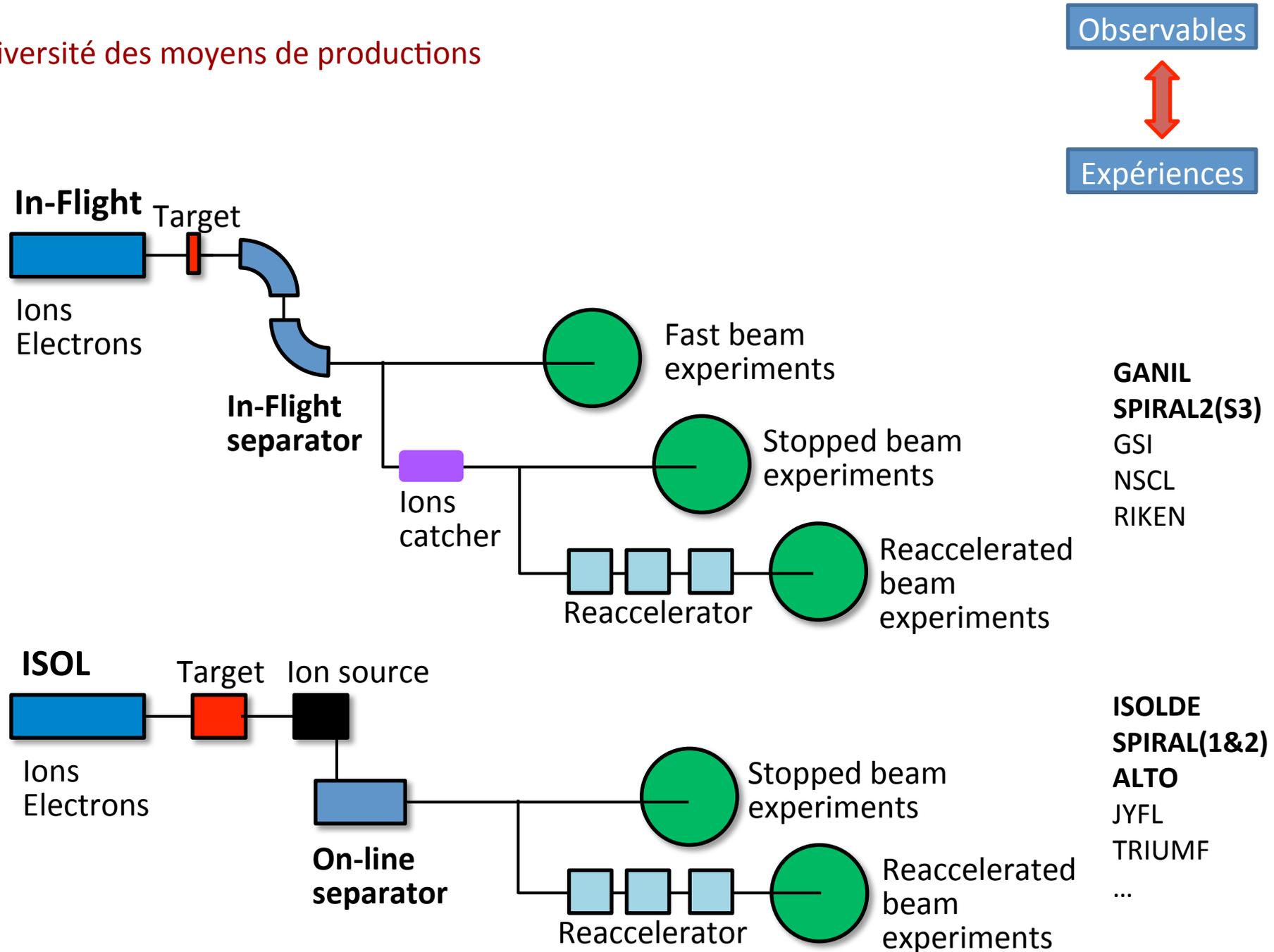
Observables



Expériences

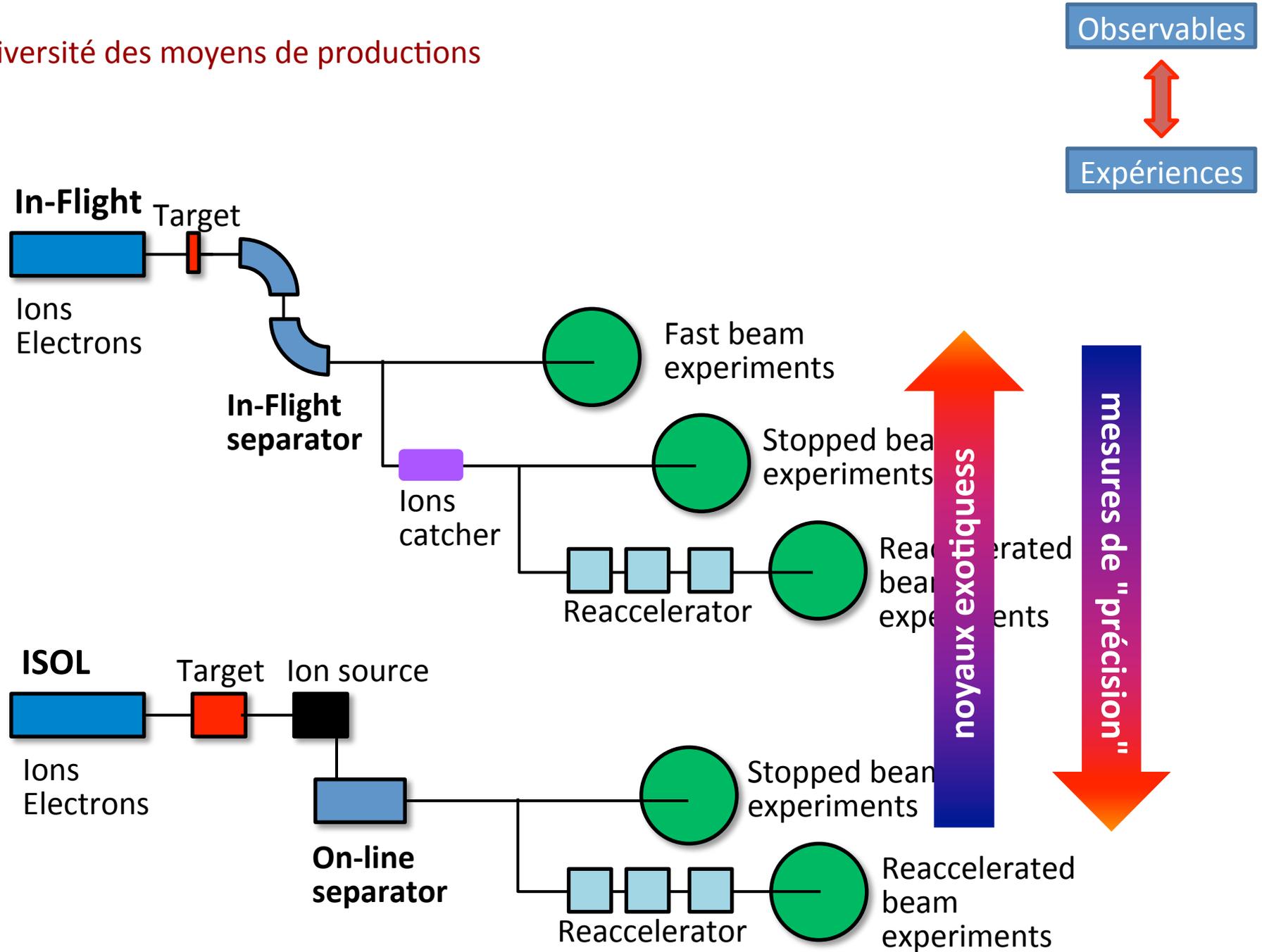
## 2- (Elements de) discussion sur le lien observables - expériences

### Diversité des moyens de productions



## 2- (Elements de) discussion sur le lien observables - expériences

### Diversité des moyens de productions



## 2- (Elements de) discussion sur le lien observables - expériences

### Diversité des moyens expérimentaux

#### Détecteurs

particules chargées,  
neutrons,  
gammas,  
electrons  
...

fct (E,  $\phi$ , précision...)

#### Techniques expérimentales

##### *basse énergie:*

spectroscopie par décroissance  
spectroscopie laser  
utilisation des pièges  
...

##### *réactions*

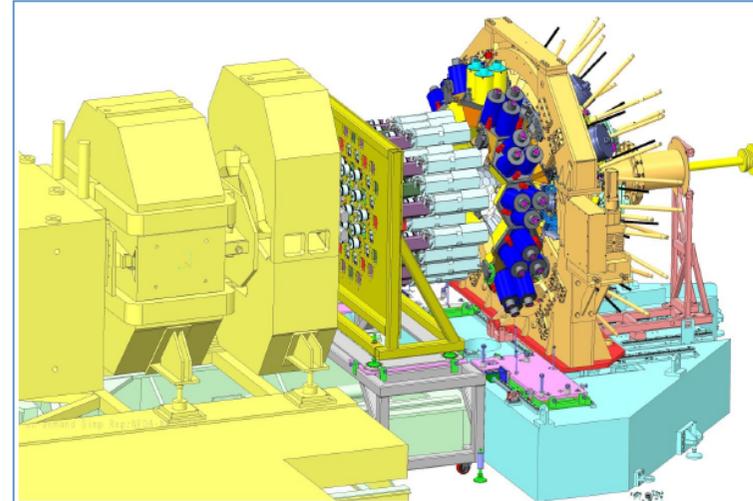
diffusion  
transfert  
pick-up  
fusion, fission  
excitation coulombienne  
spectroscopie par réaction  
...

Observables



Expériences

→ tendance aux *multidétecteurs*



→ importance des corrélations entre observables

→ l'extraction des observables nécessite souvent un modèle de réaction  
- validité de ces modèles ?

## 2- (Elements de) discussion sur le lien observables - expériences

### Précision sur la mesure de l'observable

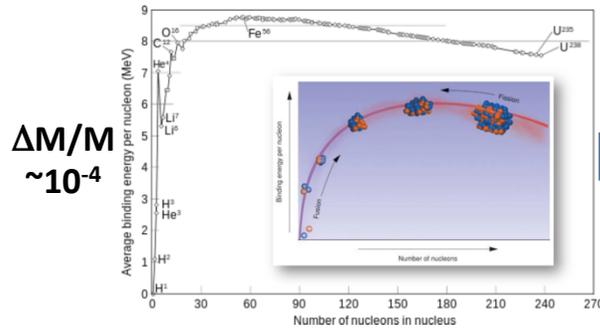
Mesures de masse :

→ modèles, physique sous-jacente...

Observables



Expériences



$$B(Z,A) = a_v A + a_s A^{2/3} + a_c Z^2/A^{1/3} + a_A (N-Z)^2/A - a_p/A^{1/2}$$

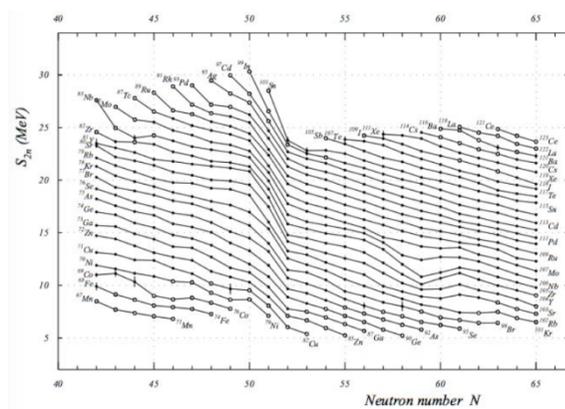
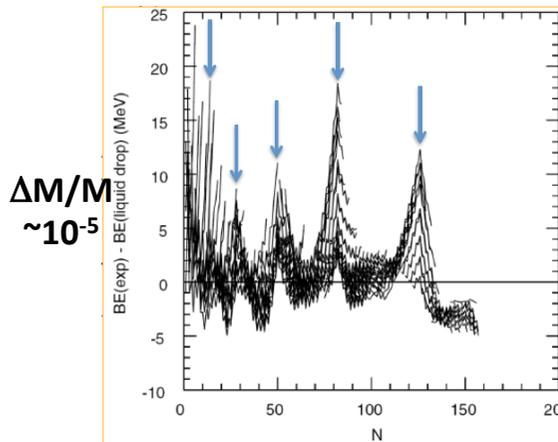
Volume term  
 $a_v = -15.68$  MeV

Surface term  
 $a_s = 18.56$  MeV

Coulomb term  
 $a_c = 0.717$  MeV

Asymmetry term  
 $a_A = 28.1$  MeV

Pairing term  
 $a_p = 12.0$  MeV  
(+) even-even  
(-) odd-odd  
(0) even-odd



Near stability

- 126:  $p_{1/2}, f_{5/2}, i_{13/2}, p_{3/2}, h_{9/2}, f_{7/2}$
- 82:  $d_{3/2}, h_{11/2}, s_{1/2}, g_{7/2}, d_{5/2}$
- 50:  $g_{9/2}$

For  $N \gg Z$

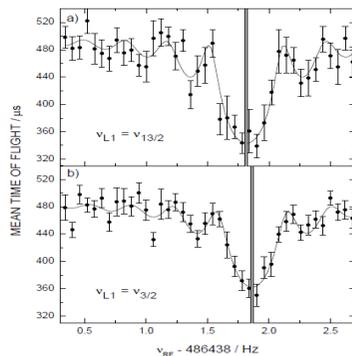
- $h_{9/2}, p_{1/2}, p_{3/2}, f_{7/2}, h_{11/2}$
- $g_{7/2}, d_{3/2}, s_{1/2}, d_{5/2}, g_{9/2}$

towards neutron-rich nuclei

- Mean field near stability
- Strong spin-orbit term

- Mean field for  $N \gg Z$ ?
- Reduced spin-orbit
- Diffuse density
- Tensor force

$\Delta M/M \sim 10^{-7}$



-  $B/A \sim 8$  MeV

-  $S_{2n}$

- isomères

→ goutte liquide

→ modèle en couches

→ modification nombres magiques, tenseur,  $3N$ ...

→ spectroscopie

## 2- (Elements de) discussion sur le lien observables - expériences

### Mesures de masse :

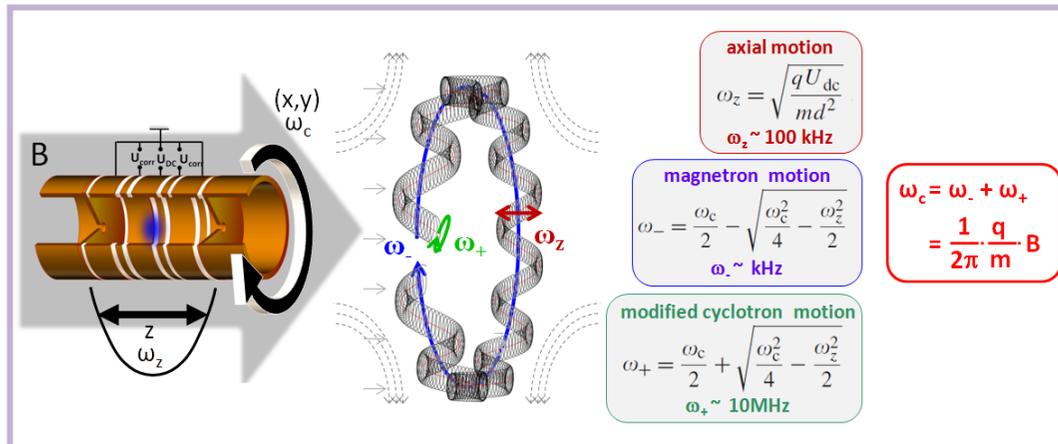
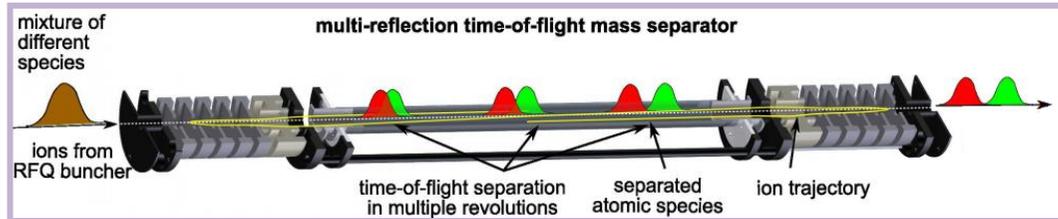
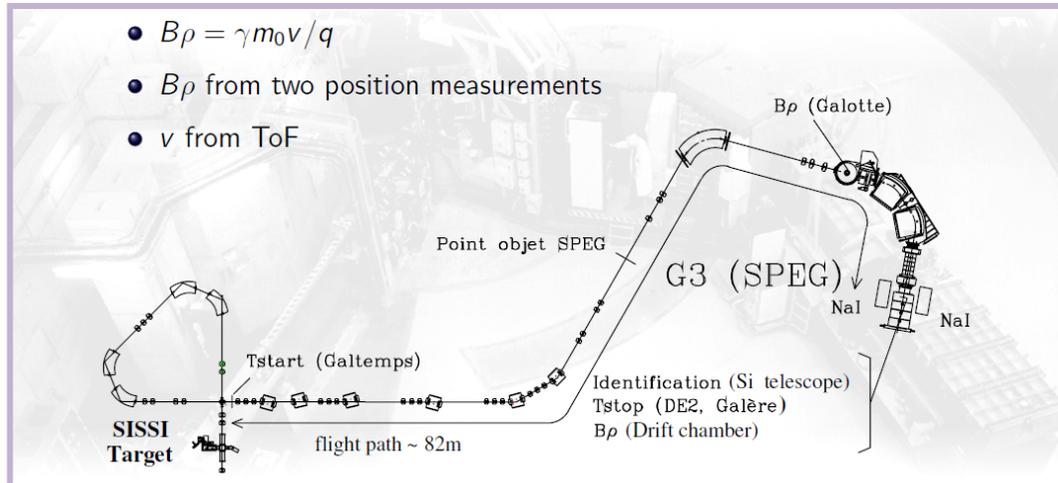
En fonction des noyaux (nombre, energie, temps de vie) et de la précision requise

→ différentes méthodes

Observables



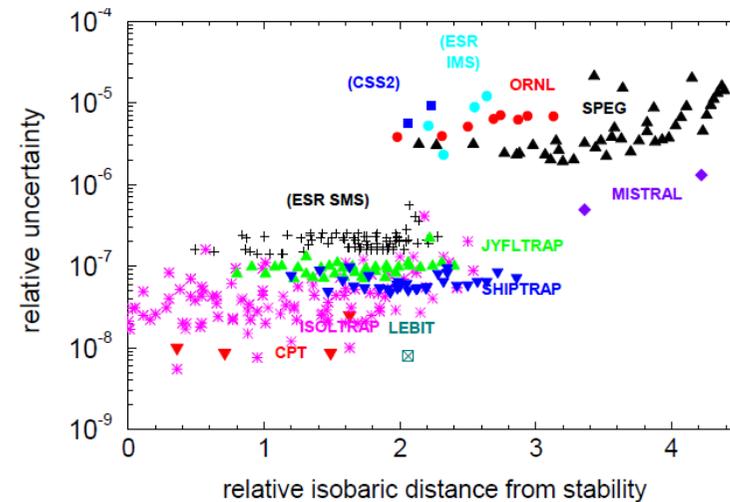
Expériences



méthode "haute énergie"

$$\Delta M/M \sim 10^{-5} - 10^{-6}$$

$$T_{1/2} \ll \text{msec}$$



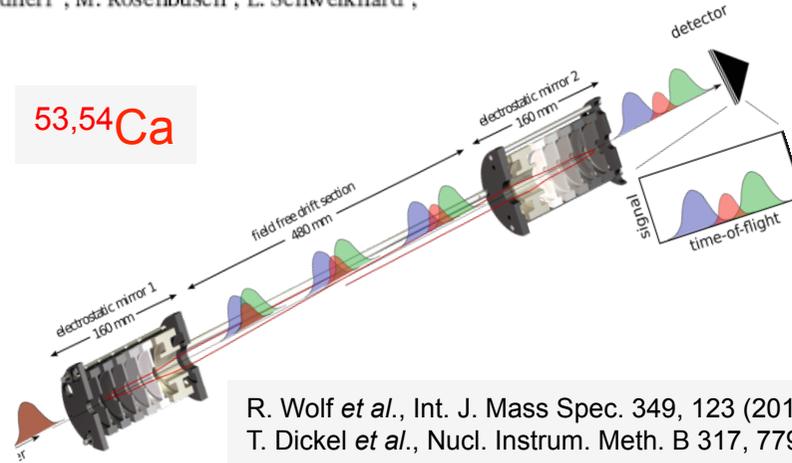
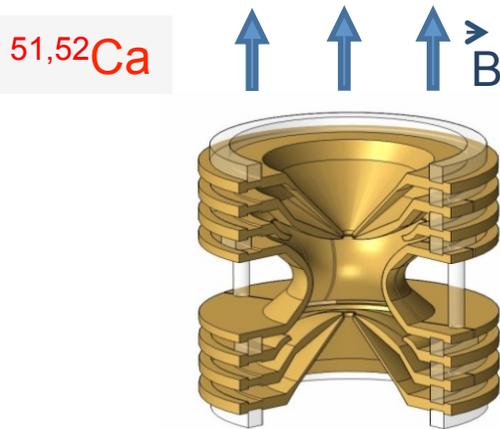
méthode "basse énergie"

$$\Delta M/M \sim 10^{-7} - 10^{-8}$$

$$T_{1/2} > 10\text{-}50 \text{ msec}$$

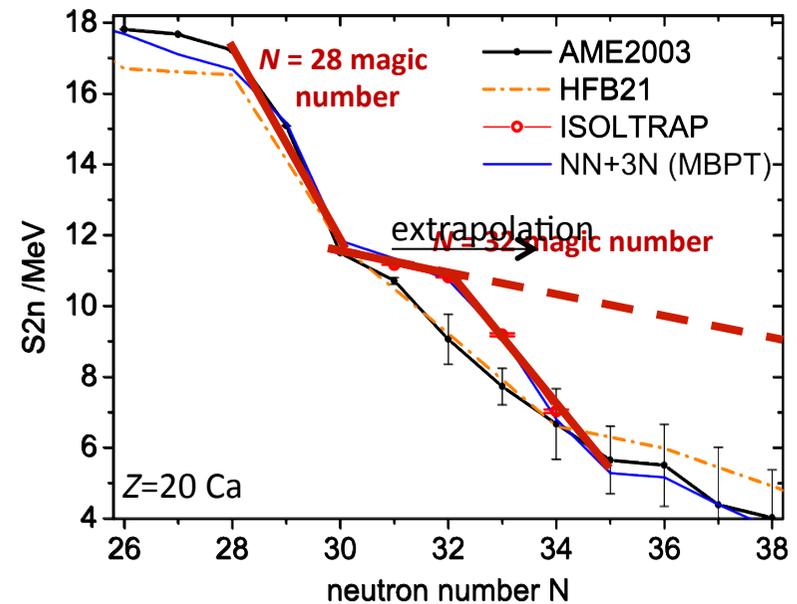
## Masses of exotic calcium isotopes pin down nuclear forces

F. Wienholtz<sup>1</sup>, D. Beck<sup>2</sup>, K. Blaum<sup>3</sup>, Ch. Borgmann<sup>3</sup>, M. Breitenfeldt<sup>4</sup>, R. B. Cakiri<sup>3,5</sup>, S. George<sup>1</sup>, F. Herfurth<sup>2</sup>, J. D. Holt<sup>6,7</sup>, M. Kowalska<sup>8</sup>, S. Kreim<sup>3,8</sup>, D. Lunney<sup>9</sup>, V. Manea<sup>9</sup>, J. Menéndez<sup>6,7</sup>, D. Neidherr<sup>2</sup>, M. Rosenbusch<sup>1</sup>, L. Schweikhard<sup>1</sup>, A. Schwenk<sup>7,6</sup>, J. Simonis<sup>6,7</sup>, J. Stanja<sup>10</sup>, R. N. Wolf<sup>1</sup> & K. Zuber<sup>10</sup>



R. Wolf *et al.*, *Int. J. Mass Spec.* 349, 123 (2013)  
T. Dickel *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. B* 317, 779 (2013)

- Production rates of  $\sim 10$  ions/s
- Mass measurements via  $S_{2n}$  establish new magic number at  $N = 32$
- Correct prediction from 3N-forces (A. Schwenk *et al.*, TUD)



F. Wienholtz *et al.*, *Nature* 498, 346 (2013)

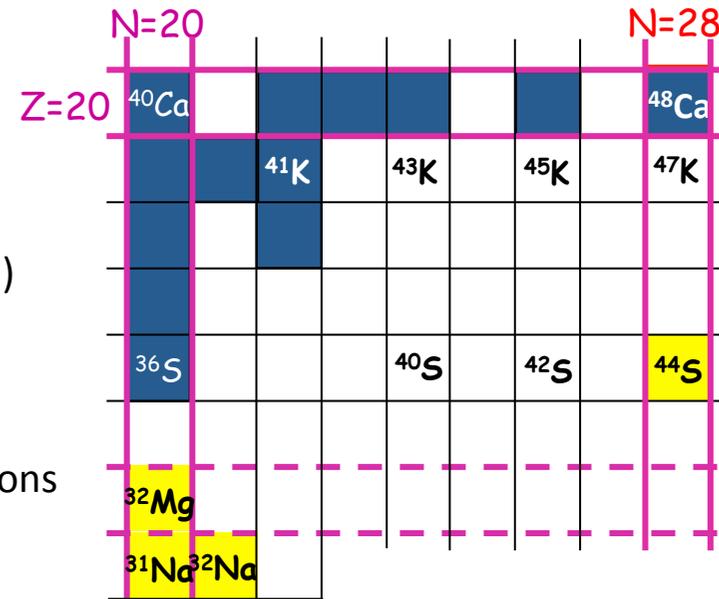
ISOLTRAP (CERN), TITAN (TRIUMF)

### 3- Complémentarité des observables/expériences pour étudier la physique sous-jacente

#### Etude expérimentale de la fermeture de couche N=28

Fin des années 70, années 80 :

- masses des noyaux riches en neutrons  $^{31,32}\text{Na}$  (ISOLDE)
- énergie du premier état  $2^+$  du  $^{32}\text{Mg}$  (par décroissance beta)
  - déformation associée à des excitations 2p-2h au dessus N=20 ("îlot d'inversion")
  - N=20 non "magique" dans les noyaux riches en neutrons
    - N=28 ? Fermeture de couche de "spin-orbite"



	Méthode expérimentales	Noyaux	Observables	Interprétations
1993	décroissance $\beta$	$^{44}\text{S}$	$T_{1/2}$ , $P_n$	déformation ?
1997	excitation coulombienne	$^{44}\text{S}$	$E_\gamma$ , $\sigma \rightarrow B(E2)$	deformation, collectivité neutrons
				<i>Une des premières expériences d'excitation Coulombienne de noyaux exotiques</i>
				<i>→ cinématique inverse, statistique faible, "multidétecteurs"....</i>
1998	réactions de transfert $\text{Ca}(d,^3\text{He})\text{K}$	$^{41-47}\text{K}$	$E_p$ , $d\sigma/d\phi$	Energies "single particle" dégénérescence orbitales proton $s_{1/2}$ et $d_{3/2}$ vers N=28
2001	spectroscopie $\gamma$ en vol	$^{40,42,44}\text{S}$	$E_\gamma$	reduction gap N=28 et collectivité protons ?
				<i>Première expérience de spectroscopie <math>\gamma</math> de noyaux exotiques autour de la cible de production !</i>

### 3- Diversité et complémentarité des observables : N=28

Quels sont les principaux effets responsables de la déformation à N=28 ?

Réduction du gap N=28 sous le  $^{48}\text{Ca}$

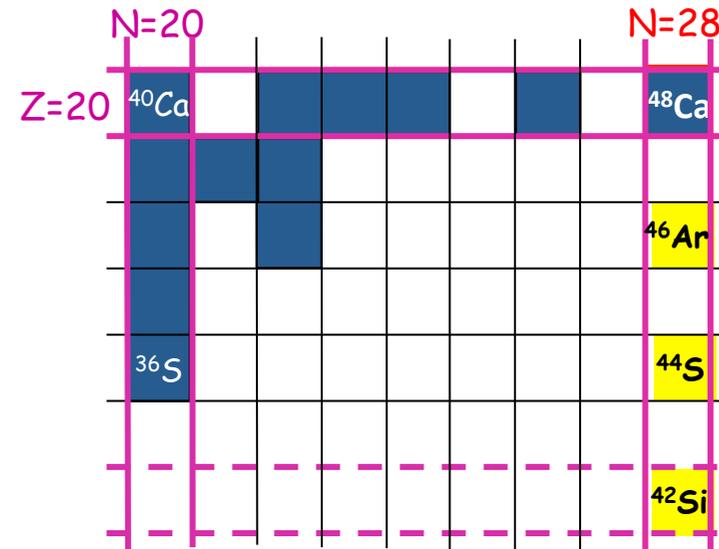
→ la quantifier dans le noyau  $^{46}\text{Ar}$

Coexistence de forme dans le  $^{44}\text{S}$

→ la mettre en évidence et la caractériser

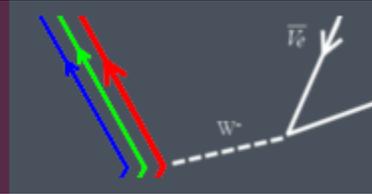
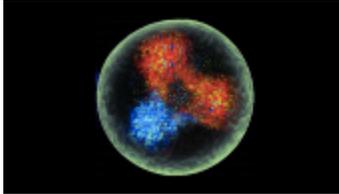
Dégénérescence des orbitales proton  $\pi d_{3/2}$  et  $\pi s_{1/2}$

→ étudier un cas où la configuration proton est plus "fermé" :  $^{42}\text{Si} \rightarrow (\pi d_{5/2})^6$



	Méthode expérimentales	Noyaux	Observables	Interprétations
2005	réactions de transfert (d,p)	$^{46}\text{Ar}$	$E_p, d\sigma/d\phi$	Energies "single particle" Facteurs spectroscopiques Réduction gap N=28 : 330keV
2010	spectroscopie $\gamma$ -electrons	$^{44}\text{S}$	$E_{e^-}, E_\gamma$	Coexistence de forme Angle de mélange des états $0^+$
2007	spectroscopie $\gamma$ en vol	$^{42}\text{Si}$	$E_\gamma$	Réduction gap N=28 et Collectivité protons





Le noyau, un laboratoire quantique complexe : existe t-il une logique unifiée pour le décrire ?  
**Quelle(s) expérience(s) pour quelle(s) observable(s) ?**

"Take home" messages

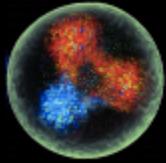
Si vision unifiée du noyau un jour, cela passera par un approfondissement des connaissances expérimentales indispensable pour fixer/tester/valider les modèles et les interactions

Cet approfondissement des connaissances expérimentales nécessite :

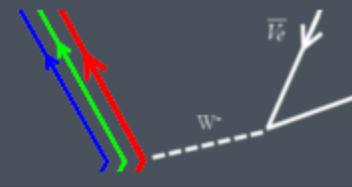
- une réflexion sur la pertinence des observables par rapport aux phénomènes étudiés
- une attention dans l'interprétation des observables

Ceci ne pourra se faire qu'en ayant une **diversité**, tant du point de vue des noyaux étudiés et donc des moyens de production que du point de vue des observables et donc des techniques expérimentales

L'étude (et la compréhension) d'un problème spécifique nécessite de l'aborder par des observables différentes et complémentaires



ÉVÉNEMENTS SFP - PHYSIQUE NUCLÉAIRE DU 21/06/2016 AU 22/06/2016  
LES GRANDES QUESTIONS EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE FONDAMENTALE



Le noyau, un laboratoire quantique complexe : existe t-il une logique unifiée pour le décrire ?

Quelle(s) expérience(s) pour quelle(s) observable(s) ?

*Remerciement à :*

- L. Bonneau, N. Smirnova
- S. Péru
- D. Verney, M. Grasso, D. Lacroix
- ...

CENBG  
CEA Bruyère-le-châtel  
IPNO

Backup