



IN2P3

Institut national de physique nucléaire
et de physique des particules

Conseil Scientifique de l'IN2P3 des 26 et 27 octobre 2017
« Physique nucléaire de basse énergie sur les installations de type ISOL –
les propriétés fondamentales du noyau »

Structure nucléaire dans les régions des nombres magiques de spin-orbite 28, 50 et 82 : apports et atouts des méthodes « ISOL-basse-énergie »

David Verney (IPNO) pour la collaboration ISOL-France

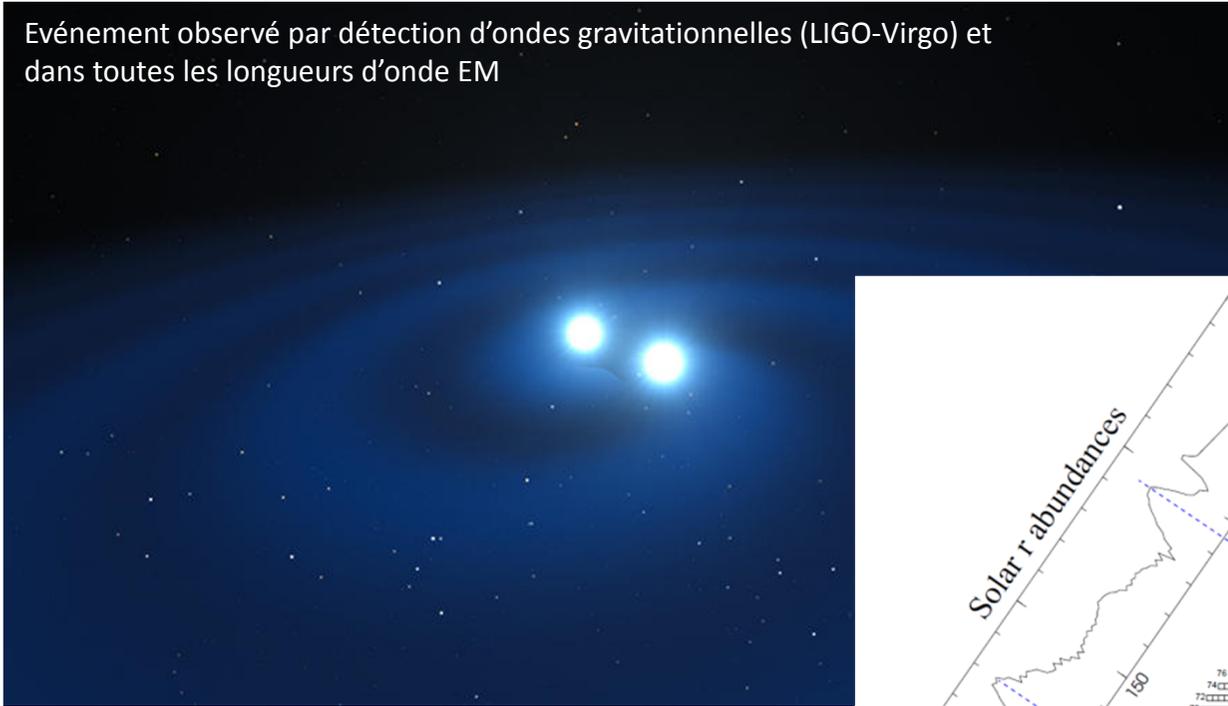
- Enjeux scientifiques:
(exotité, magicit  et spin-orbite nucléaire)
- L'approche « holistique » de la basse énergie
(précision en structure nucléaire)
- Implémentation de ce programme scientifique
(installations IN2P3 et autres, calendrier et realpolitik...)
-  quipes IN2P3 impliquées

pourquoi $N_{\text{magique}}=28, 50, 82, 126 \dots ?$

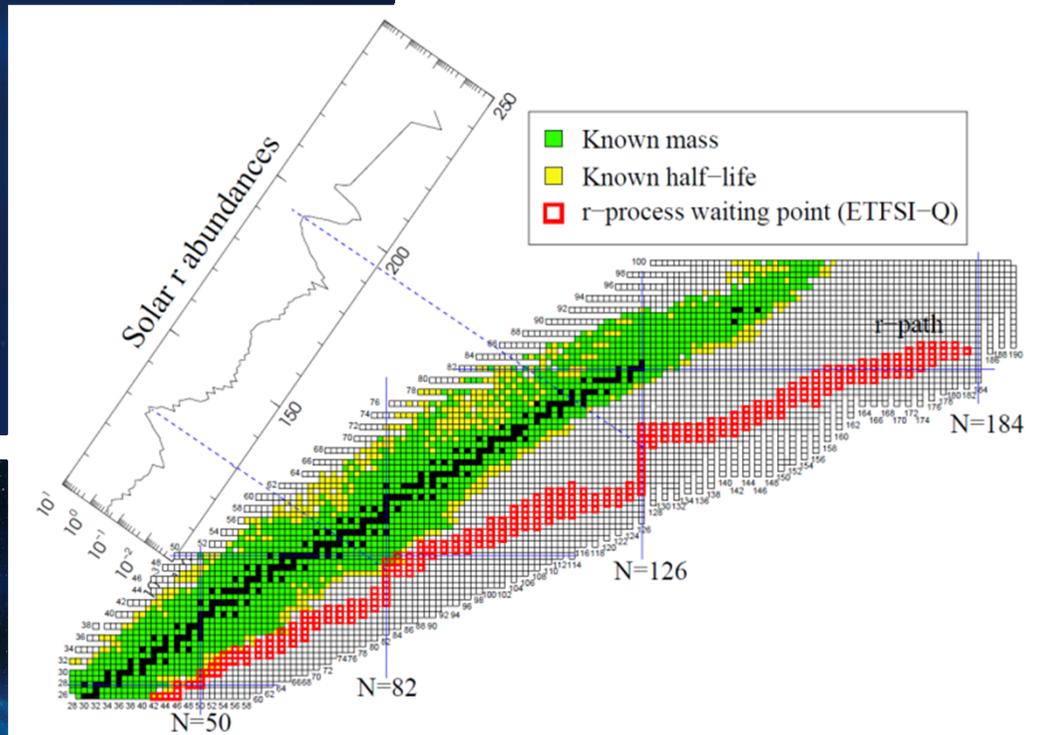
parce que ce sont les nombres magiques du processus r

Enjeux scientifiques ► noyaux exotiques

Événement observé par détection d'ondes gravitationnelles (LIGO-Virgo) et dans toutes les longueurs d'onde EM



Vue d'artiste d'une kilonova, produite par la fusion de deux étoiles à neutrons, événement exceptionnel observé le 17 août 2017. (journal du CNRS)

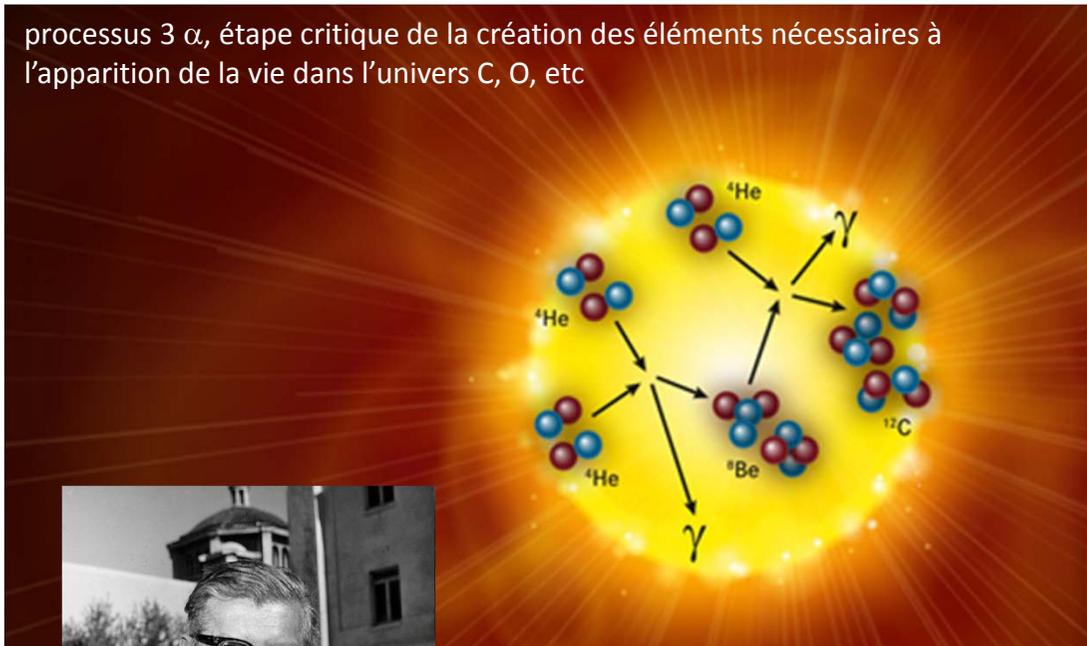


processus nucléaires en jeu, site « de choix » pour la création des éléments plus lourds que le Fer (cf exposé de M. Fallot)

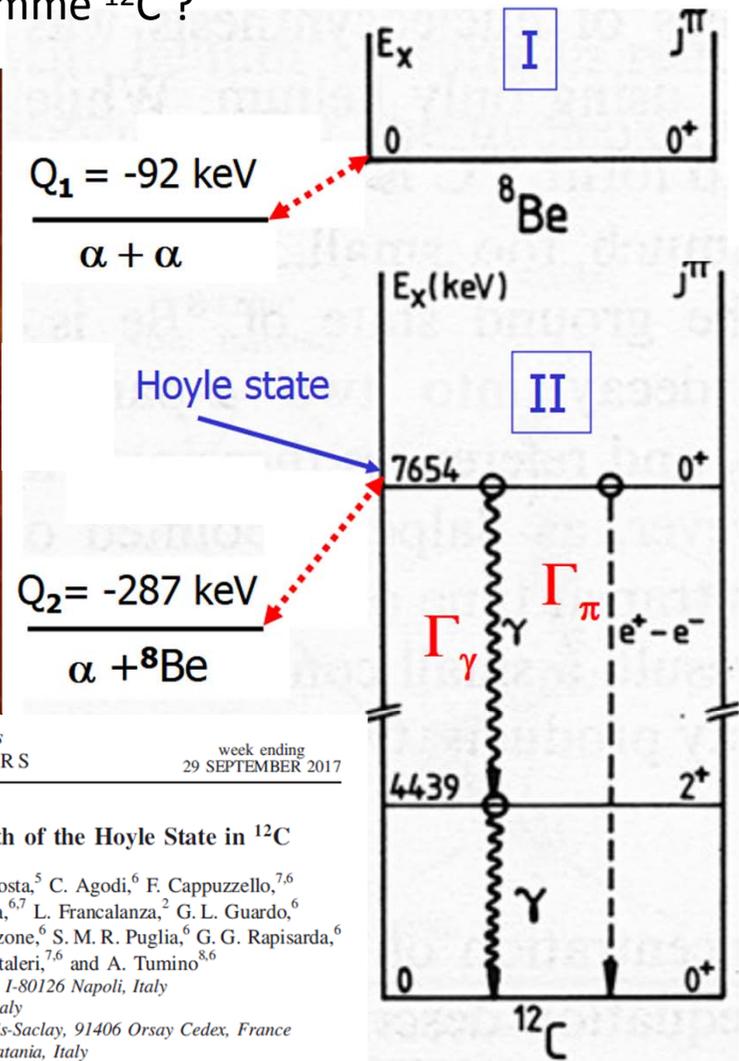
Enjeux scientifiques ► noyaux exotiques

pourquoi les noyaux exotiques ?

pourquoi ne pas se concentrer sur un noyau mythique comme ^{12}C ?



Sir Fred Hoyle en 1967 au California Institute of Technology



PRL 119, 132501 (2017) Selected for a Viewpoint in Physics PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 29 SEPTEMBER 2017

High-Precision Probe of the Fully Sequential Decay Width of the Hoyle State in ^{12}C

D. Dell'Aquila,^{1,2,3,*} I. Lombardo,^{1,4,†} G. Verde,^{3,4} M. Vigilante,^{1,2} L. Acosta,⁵ C. Agodi,⁶ F. Cappuzzello,^{7,6} D. Carbone,⁶ M. Cavallaro,⁶ S. Cherubini,^{6,7} A. Cvetinovic,⁶ G. D'Agata,^{6,7} L. Francalanza,² G. L. Guardo,⁶ M. Gulino,^{8,6} I. Indelicato,⁶ M. La Cognata,⁶ L. Lamia,⁷ A. Ordine,² R. G. Pizzone,⁶ S. M. R. Puglia,⁶ G. G. Rapisarda,⁶ S. Romano,⁶ G. Santagati,⁶ R. Sparta,⁶ G. Spadaccini,^{1,2} C. Spitaleri,^{7,6} and A. Tumino^{8,6}

¹Dip. di Fisica "E. Pancini", Università di Napoli Federico II, I-80126 Napoli, Italy
²INFN-Sezione di Napoli, I-80126 Napoli, Italy

³Institut de Physique Nucléaire, CNRS-IN2P3, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91406 Orsay Cedex, France
⁴INFN—Sezione di Catania, Via S. Sofia, I-95125 Catania, Italy
⁵Universidad Nacional Autónoma de México, P.O. Box 20-364, Mexico City 01000, México
⁶INFN—Laboratori Nazionali del Sud, Via S. Sofia, I-95125 Catania, Italy
⁷Dip. di Fisica e Astronomia, Università di Catania, Via S. Sofia, I-95125 Catania, Italy
⁸Facoltà di Ingegneria ed Architettura, Università Kore, I-94100 Enna, Italy

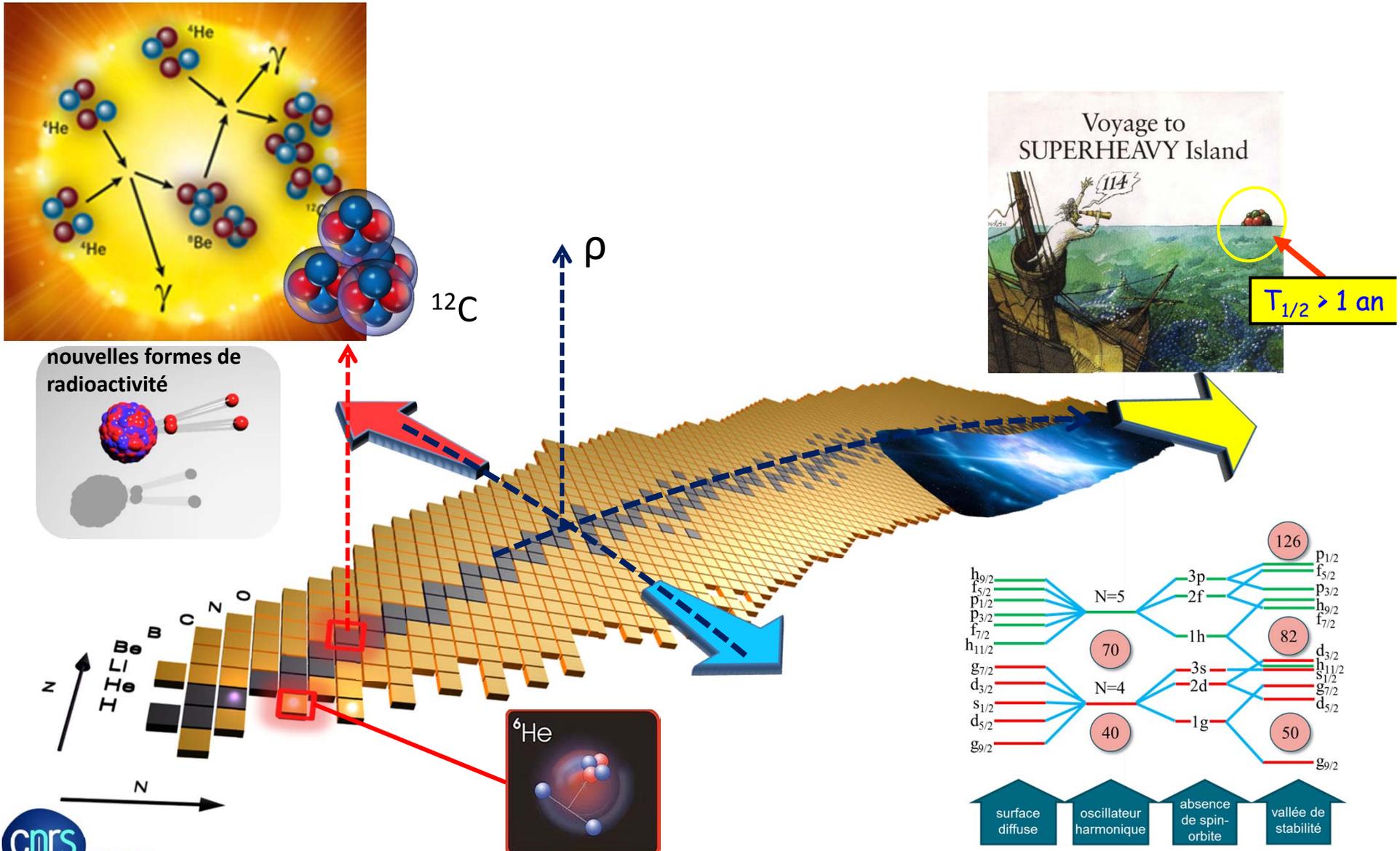
(Received 15 May 2017; revised manuscript received 18 June 2017; published 25 September 2017)



Enjeux scientifiques ► noyaux exotiques

pourquoi les noyaux exotiques ?

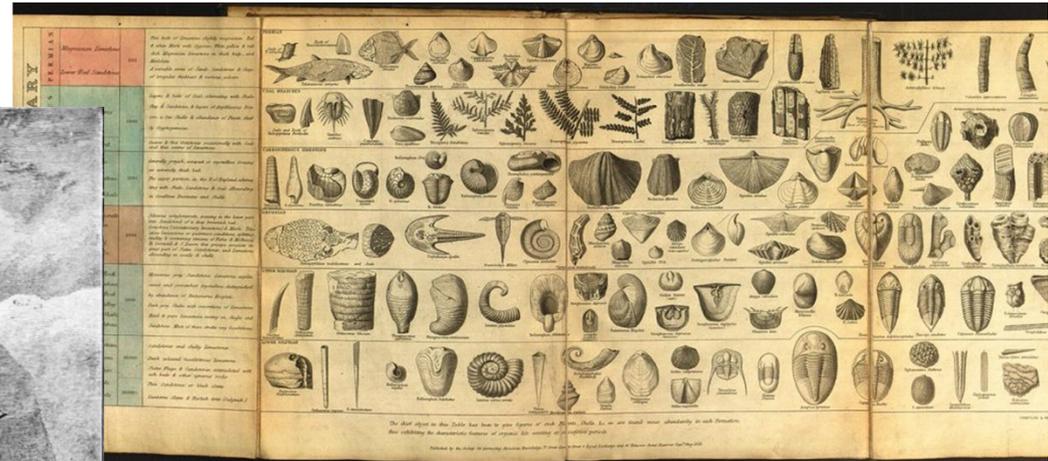
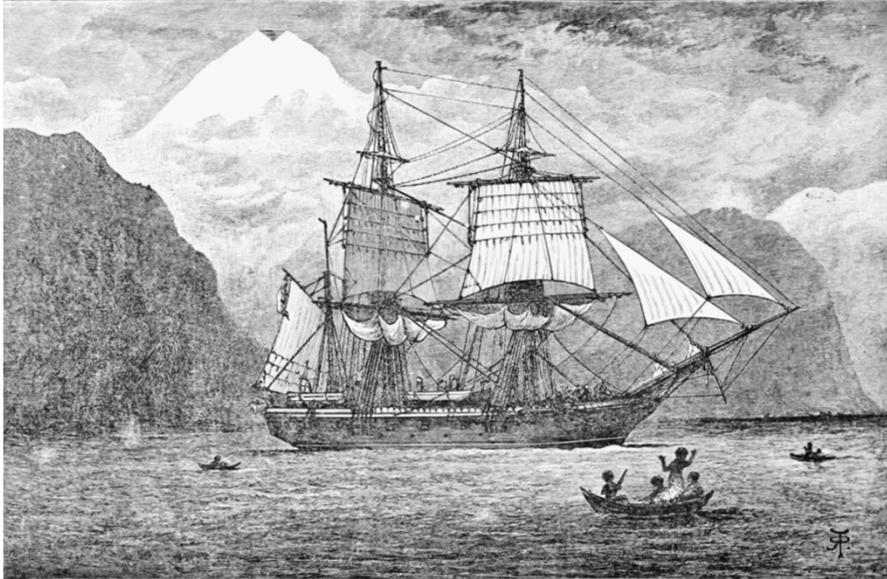
pourquoi ne pas se concentrer sur un noyau mythique comme ^{12}C ?



Enjeux scientifiques ► noyaux exotiques

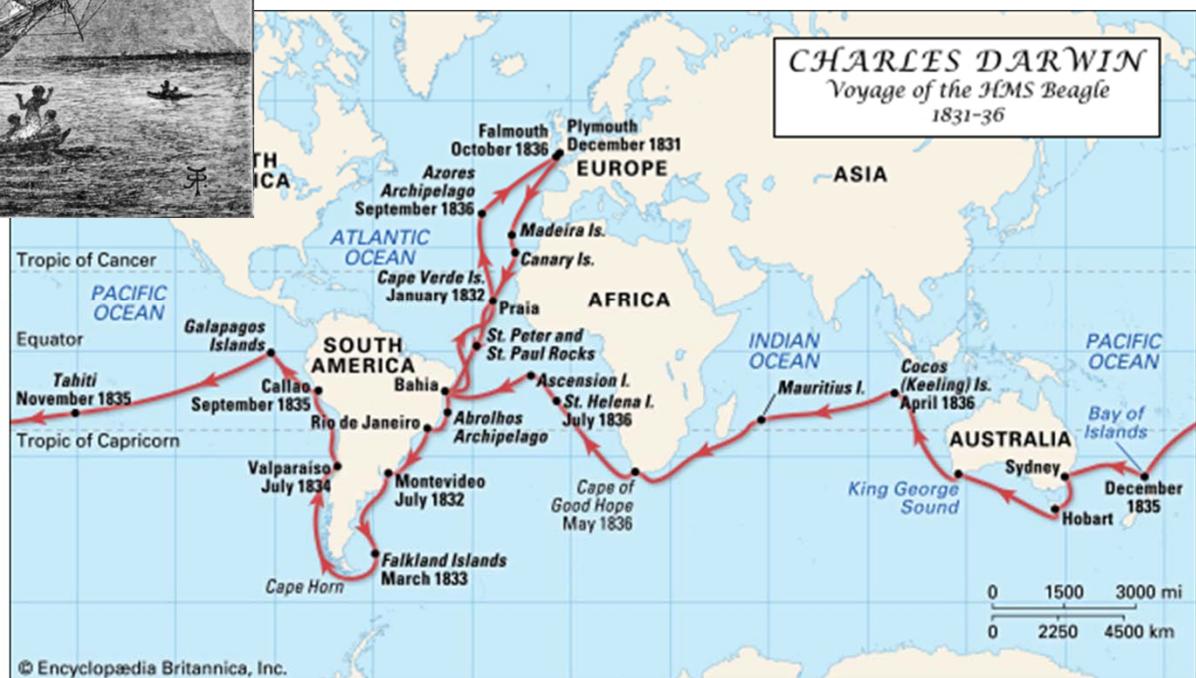
pourquoi les noyaux exotiques ?

pourquoi ne pas se concentrer sur un noyau mythique comme ^{12}C ?



Darwin :
un voyage de naturaliste
une théorie de l'évolution à la clef

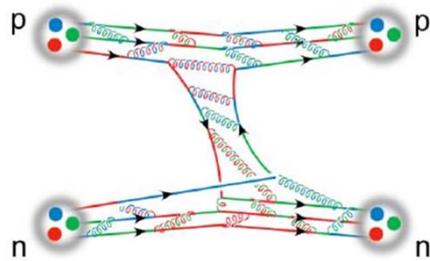
Physique nucléaire:
la théorie est le but du voyage *a priori*



Enjeux scientifiques ► noyaux exotiques

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^A \frac{\hat{p}_i^2}{2M} + \sum_{i<j=1}^A \hat{V}_{ij} + \sum_{i<j<k=1}^A \hat{V}_{ijk} + \dots$$

le cœur du problème nucléaire : 1) comment résoudre $H\psi = E\psi$ (problème à N corps) ?
 2) quelle interaction nucléaire $\hat{V}_{ij} + \hat{V}_{ijk} + \dots$?

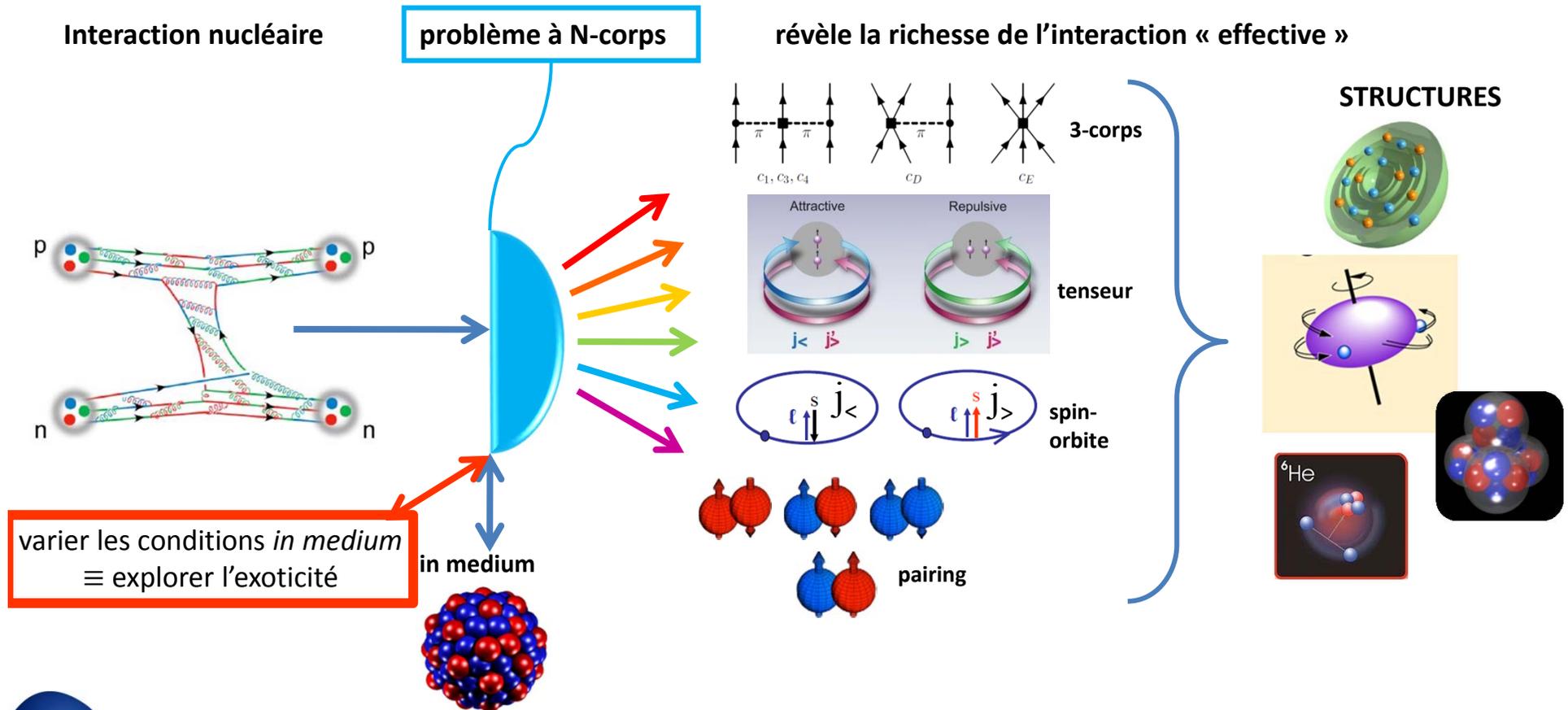


- les nucléons sont de objets composites
 - 3 quarks + bcp de particules (gluons, paires $q\bar{q}$ etc)
 - interaction forte décrite par QCD
- l'interaction entre 2 nucléons \equiv résidu à longue portée
- Equations QCD difficiles à résoudre en particulier à basse énergie
 - d'importants progrès en utilisant les théories effectives sont réalisés
 - encore insuffisant pour décrire la structure des noyaux
- interaction entre nucléons libres \neq in medium
 - structures des nucléons différentes (effet EMC)
 - présence d'autres nucléons dans la zone de diffusion in medium (Pauli)

Enjeux scientifiques ► noyaux exotiques

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^A \frac{\hat{P}_i^2}{2M} + \sum_{i<j=1}^A \hat{V}_{ij} + \sum_{i<j<k=1}^A \hat{V}_{ijk} + \dots$$

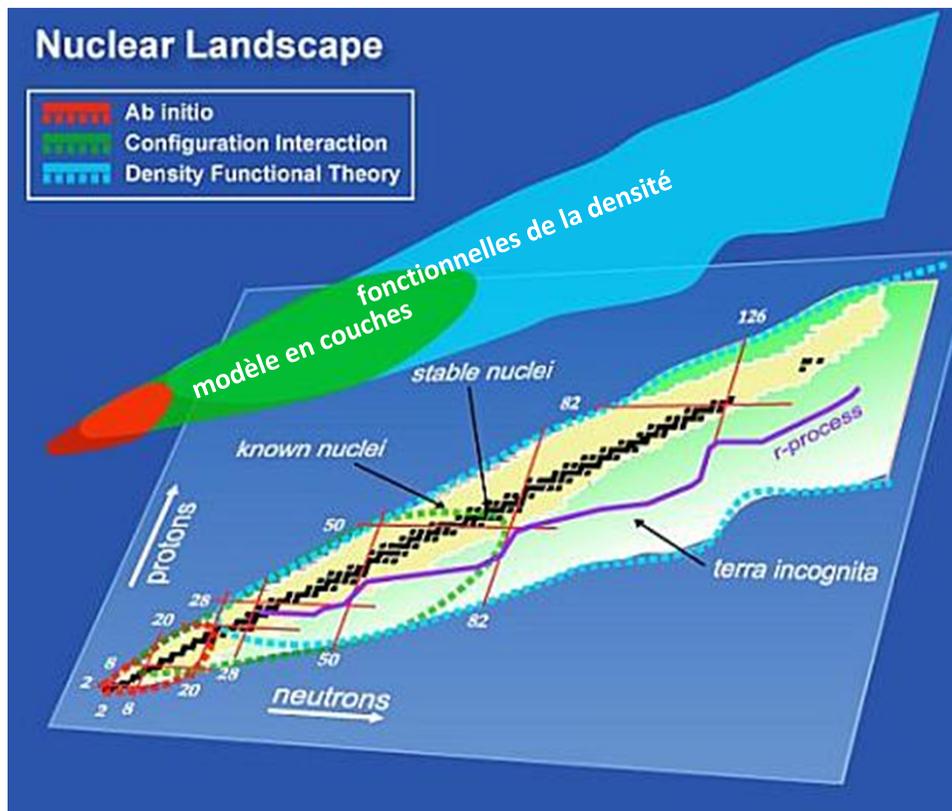
- le cœur du problème nucléaire : 1) comment résoudre $H\psi = E\psi$ (problème à N corps) ?
 2) quelle interaction nucléaire $\hat{V}_{ij} + \hat{V}_{ijk} + \dots$?



Enjeux scientifiques ► les nombres magiques

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^A \frac{\hat{p}_i^2}{2M} + \sum_{i<j=1}^A \hat{V}_{ij} + \sum_{i<j<k=1}^A \hat{V}_{ijk} + \dots$$

- le cœur du problème nucléaire :
- 1) comment résoudre $H\psi = E\psi$ (problème à N corps) ?
 - 2) quelle interaction nucléaire $\hat{V}_{ij} + \hat{V}_{ijk} + \dots$?



idée fructueuse :
particules individuelles qui ne sont pas des nucléons
(et en fait pas observables)

$\mathcal{H}_{CM} + h_{res}$

dynamique des
particules individuelles

ce qui perturbe cette
dynamique

beaucoup de latitude
pour ce choix

→ importance des nombres magiques

Enjeux scientifiques ► le spin-orbite nucléaire



Eugene Paul Wigner (1/2)

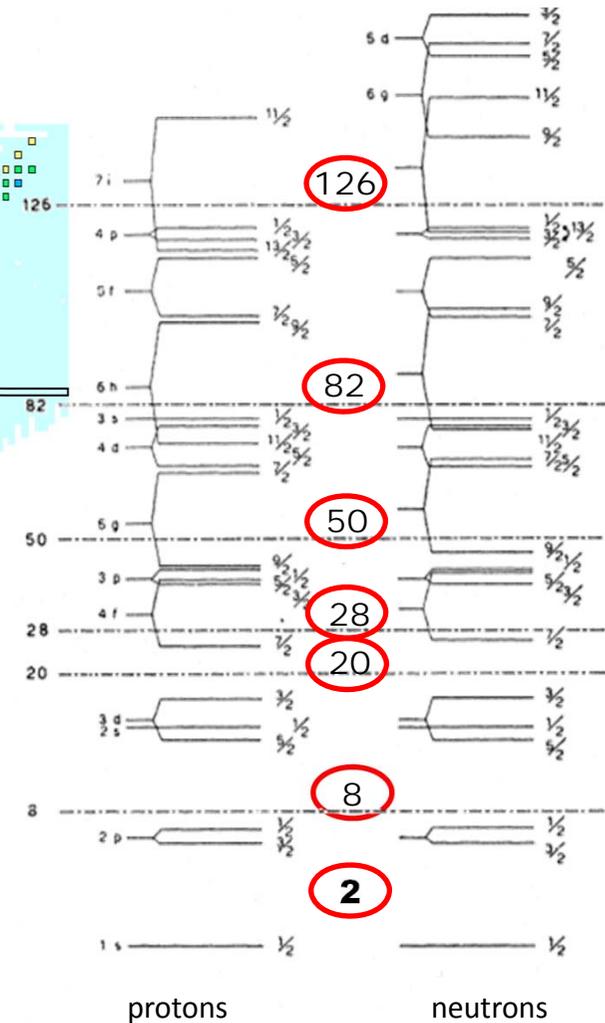
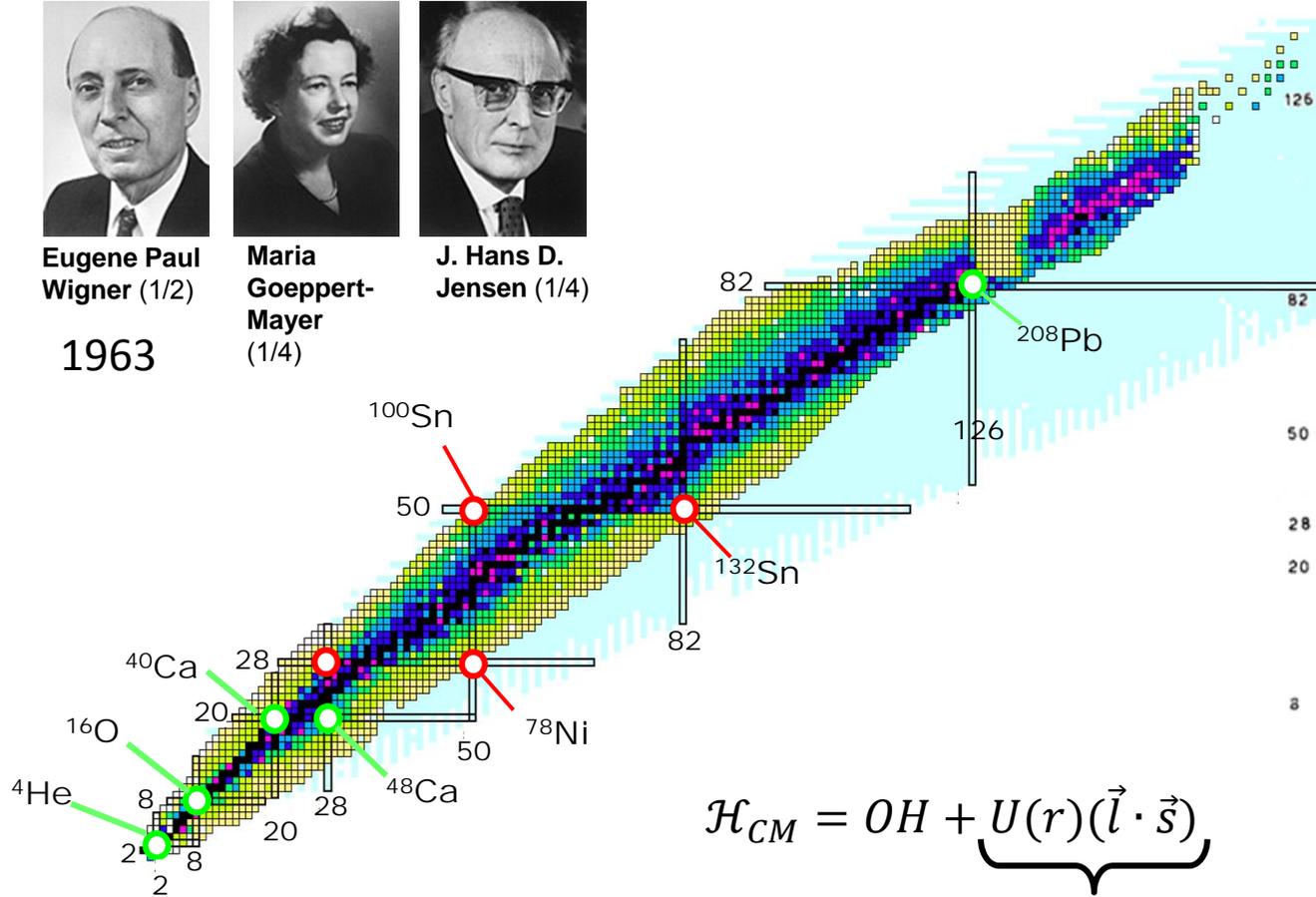
1963



Maria Goeppert-Mayer (1/4)



J. Hans D. Jensen (1/4)



$$\mathcal{H}_{CM} = OH + \underbrace{U(r)(\vec{l} \cdot \vec{s})}_{V^{LS}}$$

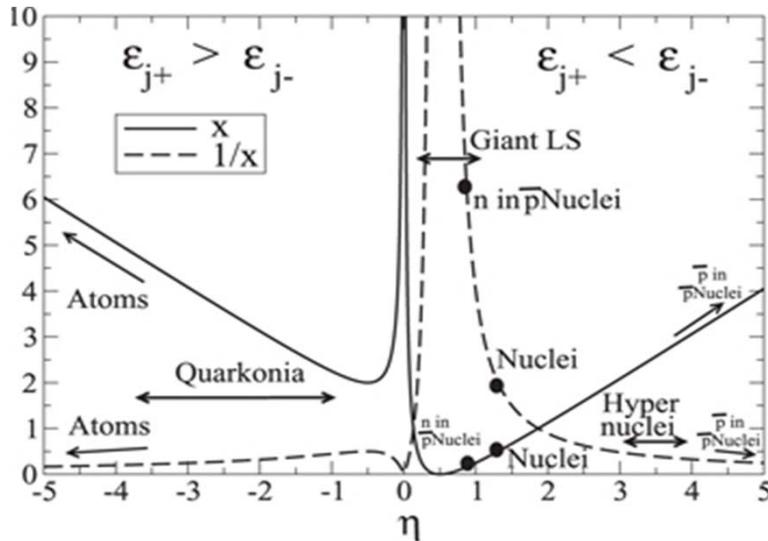
la grande surprise :

$$x \equiv \frac{\hbar\omega_0}{|\Delta(V^{SL})|} \approx 1$$

Enjeux scientifiques ► le spin-orbite nucléaire

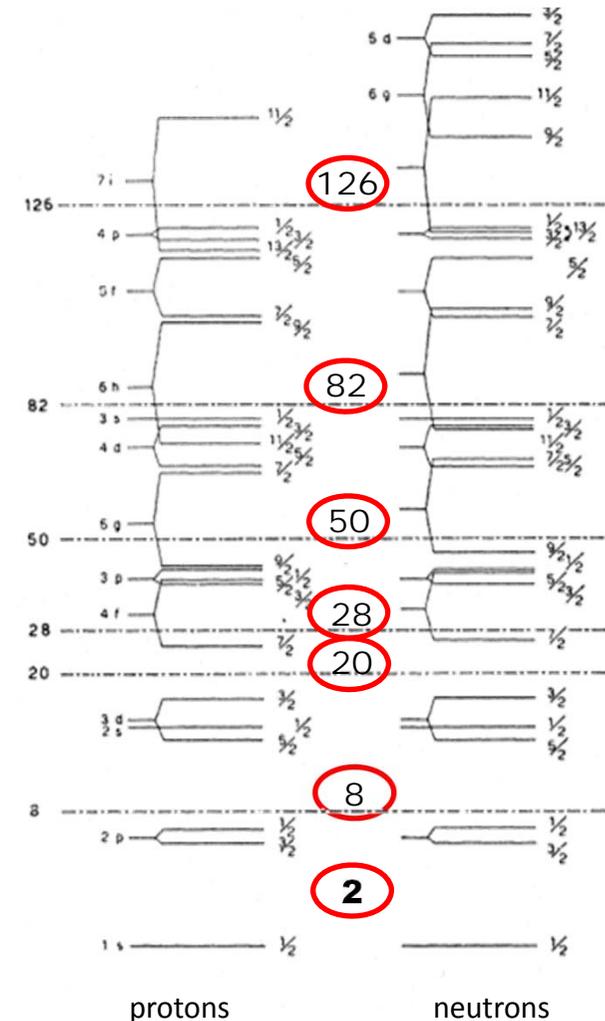
spin-orbite : effet universel dans les systèmes quantique avec particules possédant un spin : atomes, noyaux, hyper-noyaux, quarkonia...
 joue un rôle très important également en matière condensée : atomes froids, spintronique, isolants topologiques...

J-P Ebran et al 2016 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 43 085101



$$\eta \equiv \frac{m}{V - S}$$

$$x \equiv \frac{\hbar\omega_0}{|\Delta\langle V^{SL} \rangle|}$$



équation de Dirac gouvernant la dynamique d'une particule individuelle →

$$V^{LS} = \frac{1}{2M^2(r)} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (V(r) - S(r)) \vec{l} \cdot \vec{s}$$

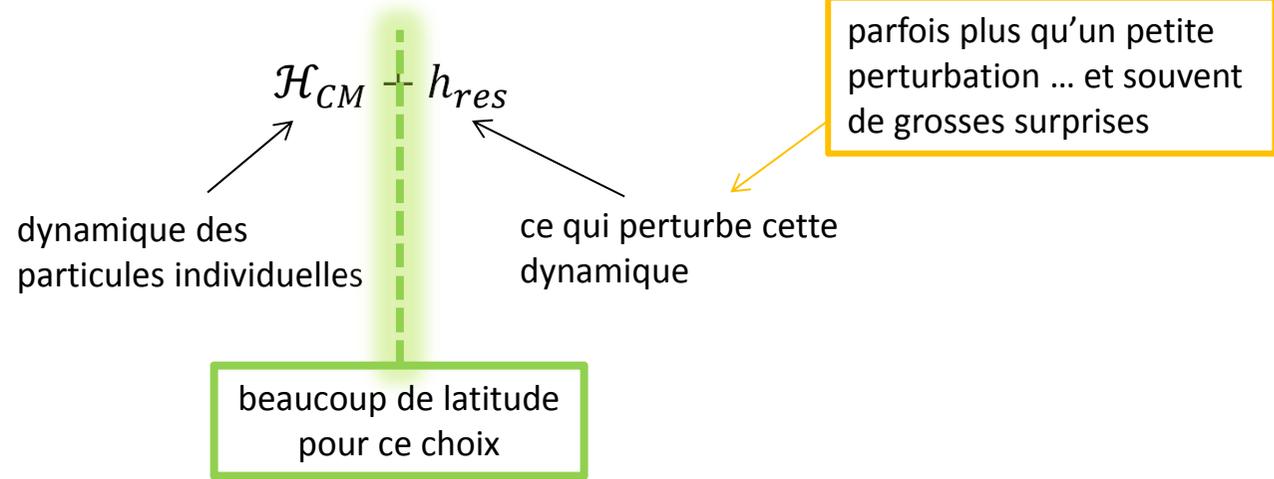
potentiel vecteur (répulsion à courte portée) $\approx +350$ MeV
 potentiel scalaire (attraction moyenne portée) ≈ -400 MeV
 masse du nucléon ≈ 940 MeV

dans l'atome :

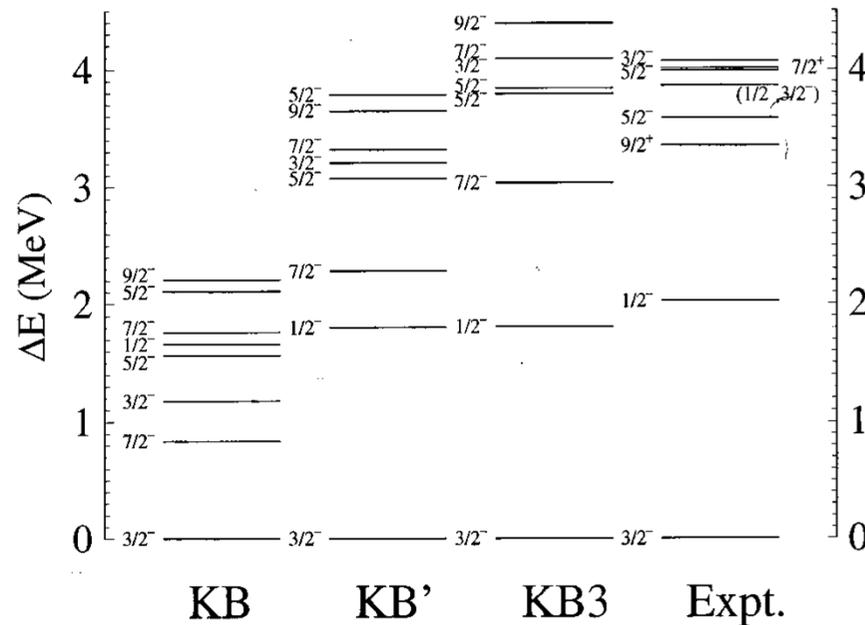
$$x \sim \frac{1}{\alpha^2} \approx 10^4$$

Enjeux scientifiques ► le spin-orbite nucléaire

l'essentiel du spin-orbite est bien compris au niveau du champ moyen pur mais...



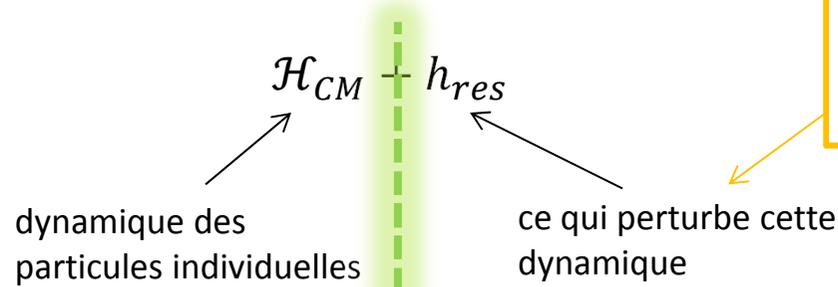
^{49}Ca



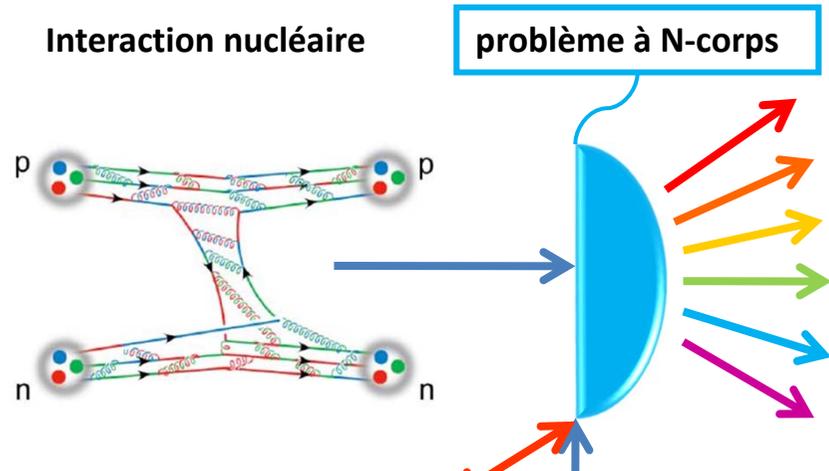
Enjeux scientifiques ► le spin-orbite nucléaire

l'essentiel du spin-orbite est bien compris au niveau du champ moyen pur mais...

parfois plus qu'une petite perturbation ... et souvent de grosses surprises



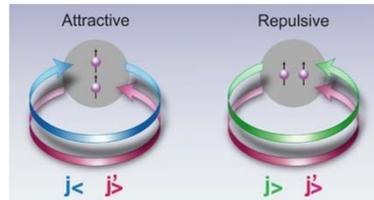
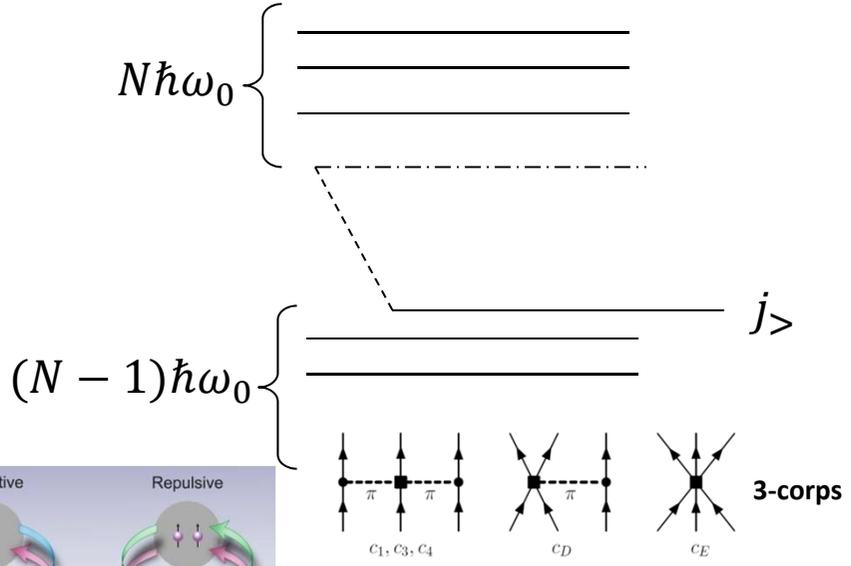
beaucoup de latitude pour ce choix



varier les conditions *in medium* ≡ explorer l'exotisme

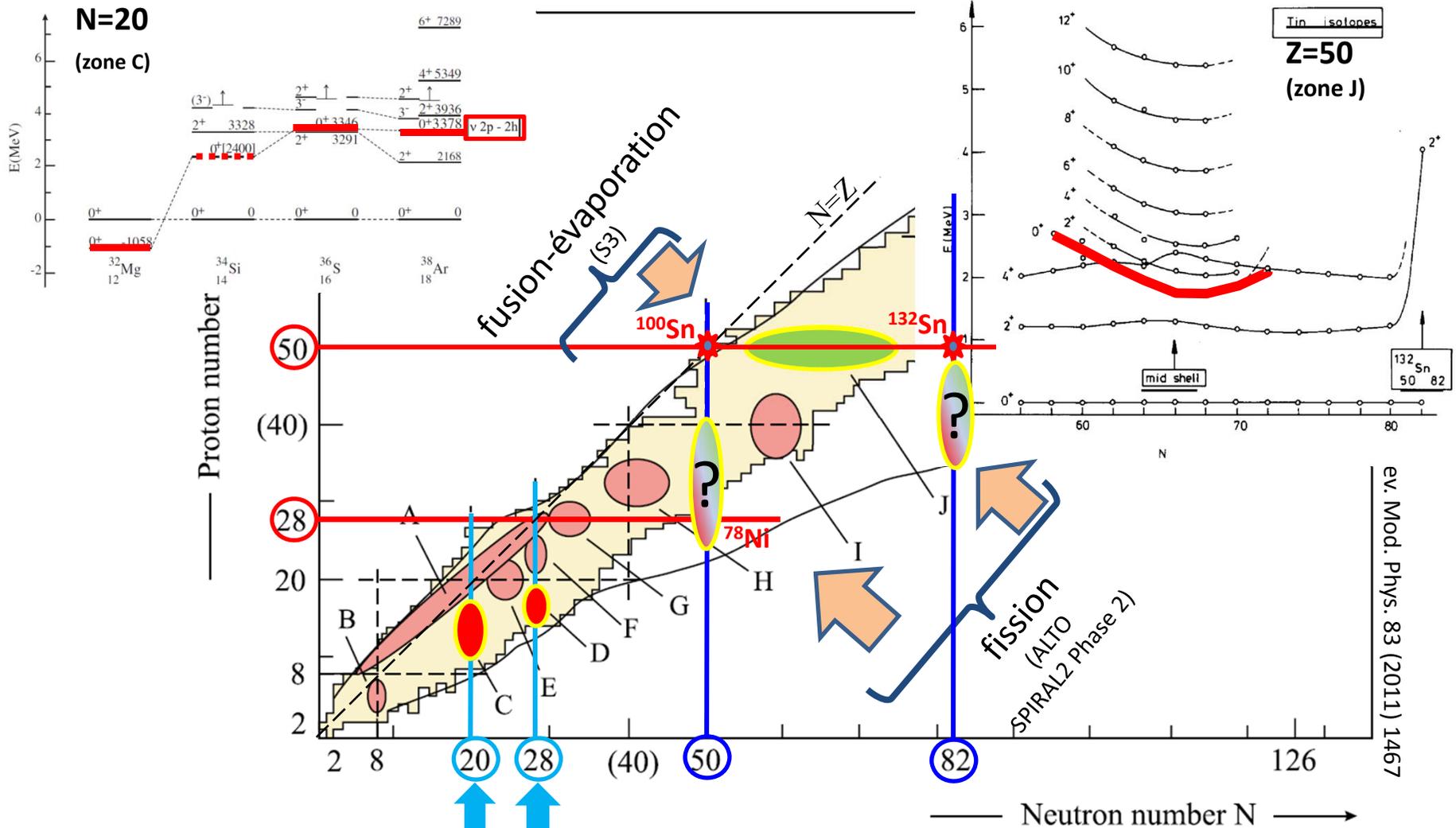


le spin-orbite nucléaire « effectif »



tenseur diffusivité, taille des orbites etc

Enjeux scientifiques ► nouvelles perspectives sur la magie SO

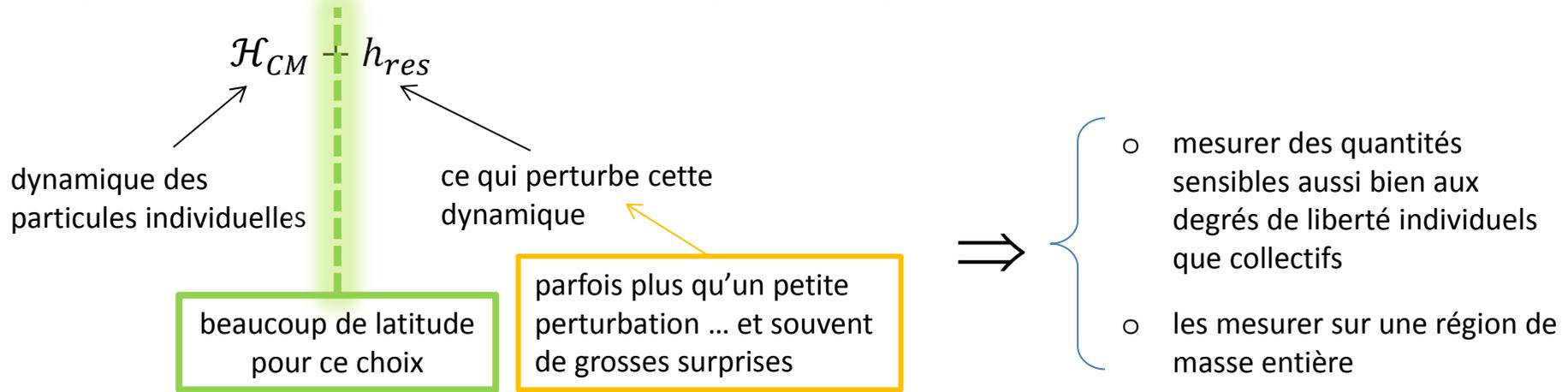


Cas historique N=20 (^{32}Mg region)
 Klapisch PRL 31 118 (1973) } ISOLDE
 Thibault PRC 12 644 (1975) } (méthode
 Détraz PRC 19 164 (1979) } ISOL)

N=28 (^{42}Si region)
 Bastin PRL 99 022503 (2007)
 GANIL (méthode in-flight)

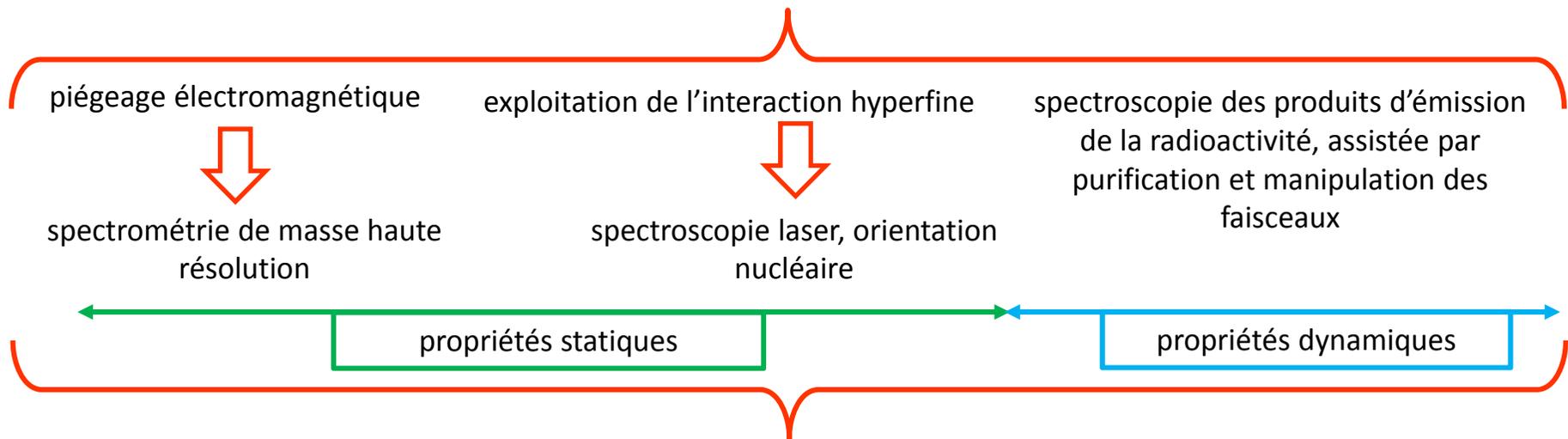


L'approche « holistique » de la basse énergie ► la « précision » en structure nucléaire



Unicité de la méthode ISOL:
 excellente **qualité optique** des faisceaux radioactifs, le bon **régime d'énergie**

3 domaines de mesures



précision en structure nucléaire

L'approche « holistique » de la basse énergie ► la « précision » en structure nucléaire

PRL 116, 182501 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
6 MAY 2016

← résultat ALTO

← résultat ISOLDE
(participation
IPNO)
↓

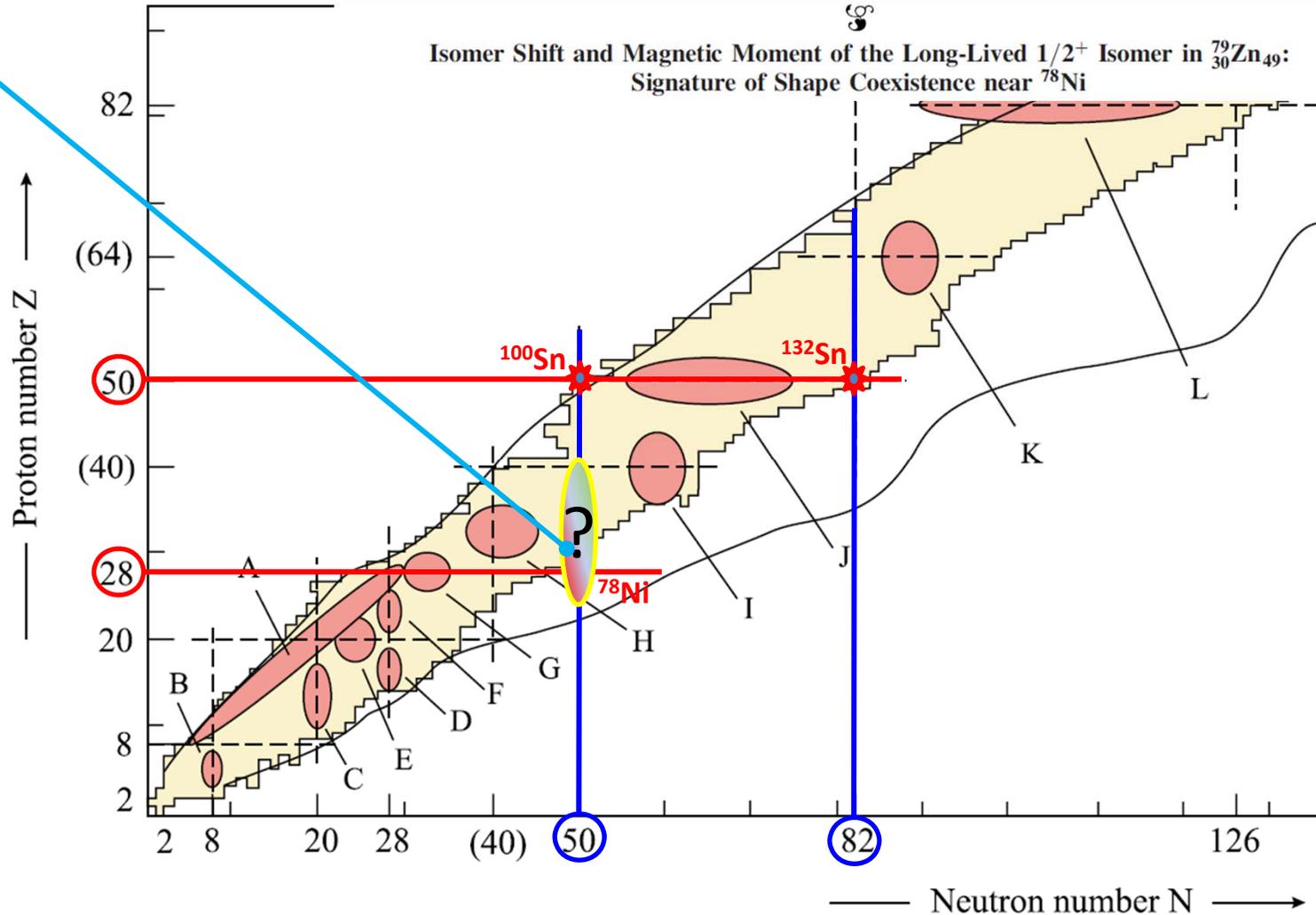
First Evidence of Shape Coexistence in the ^{78}Ni Region: Intruder 0_2^+ State in ^{80}Ge

$^{79}\text{Zn}, ^{80}\text{Ge}$

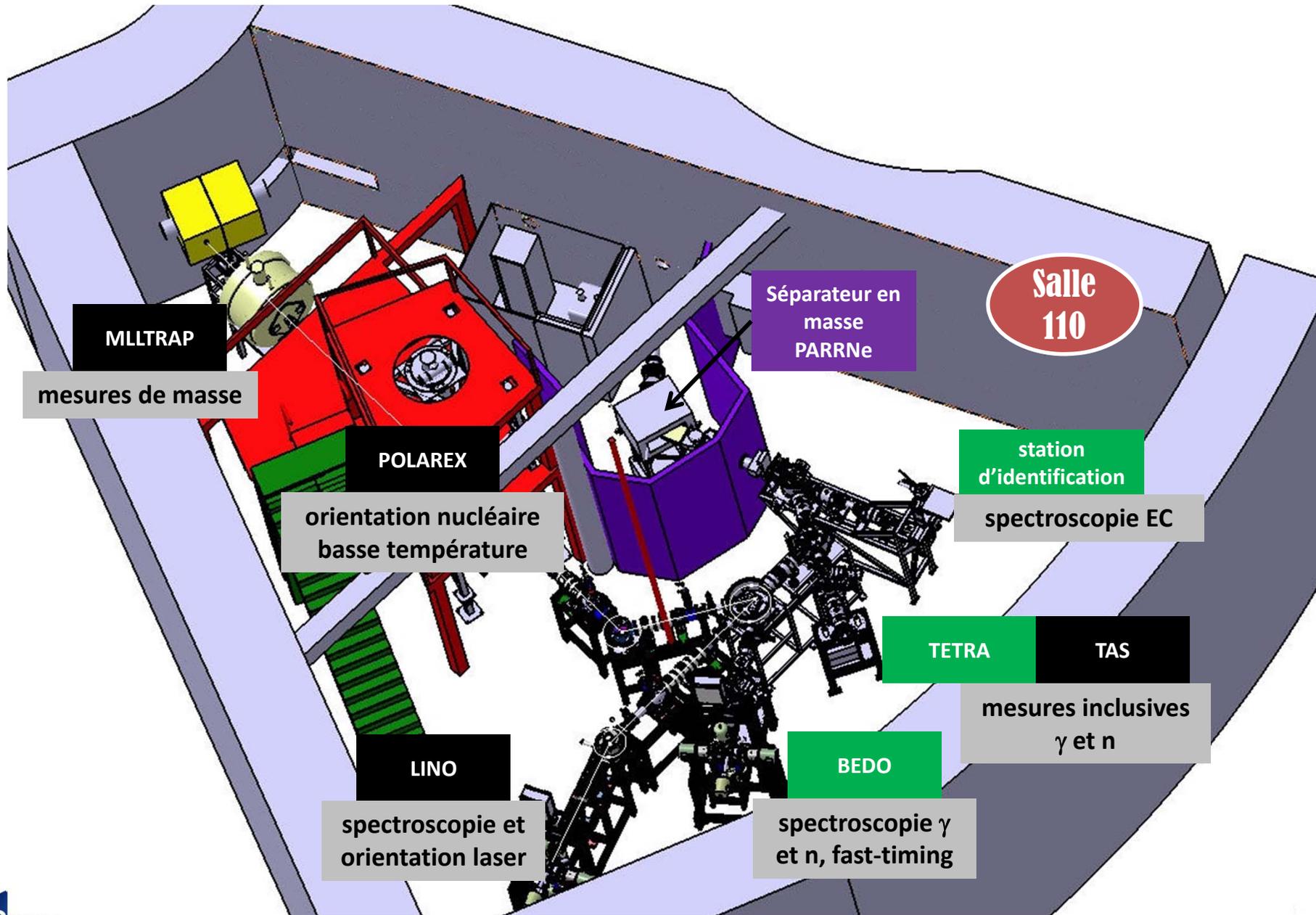
PRL 116, 182502 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
6 MAY 2016

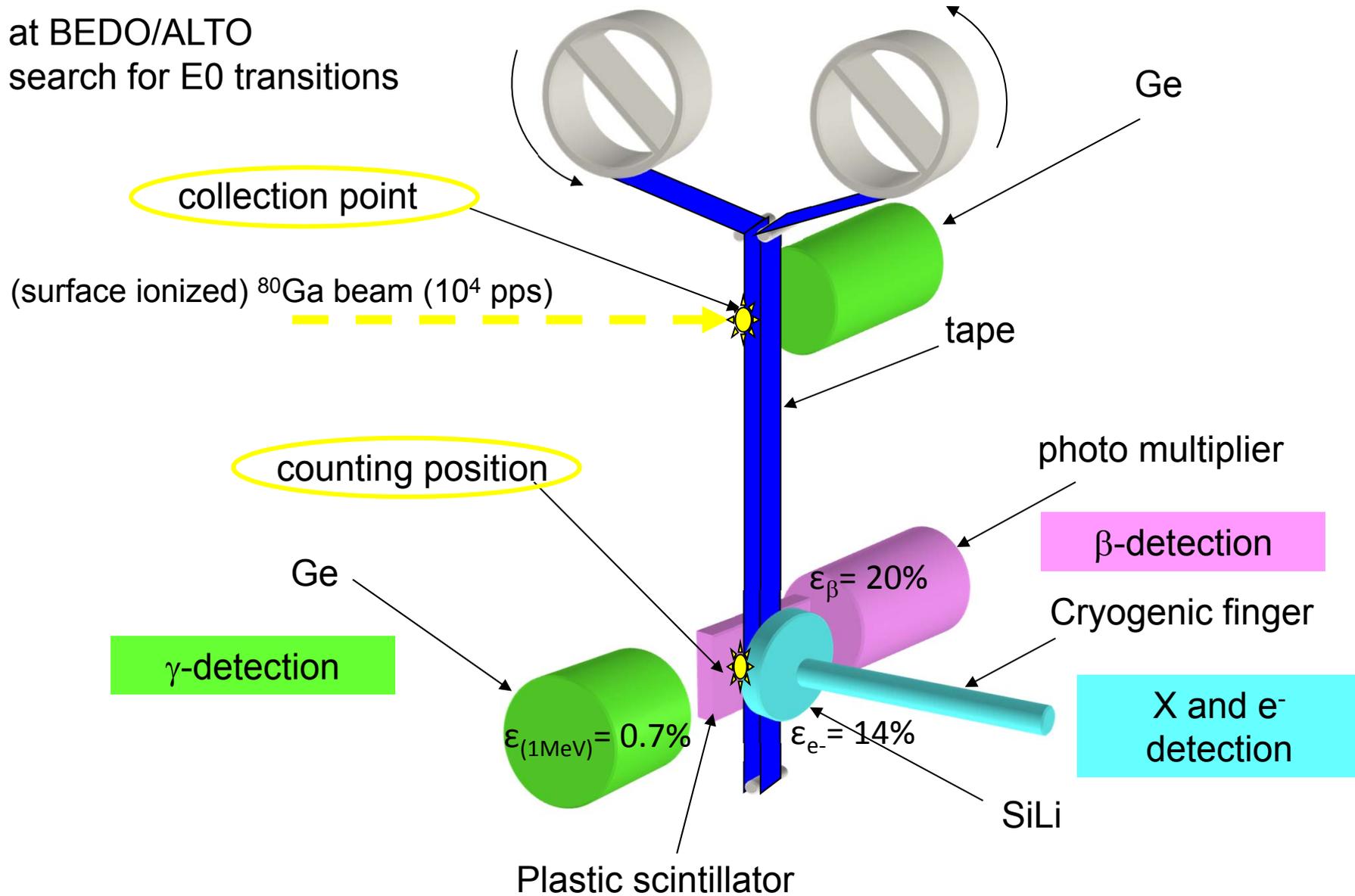


L'approche « holistique » de la basse énergie ► la « précision » en structure nucléaire

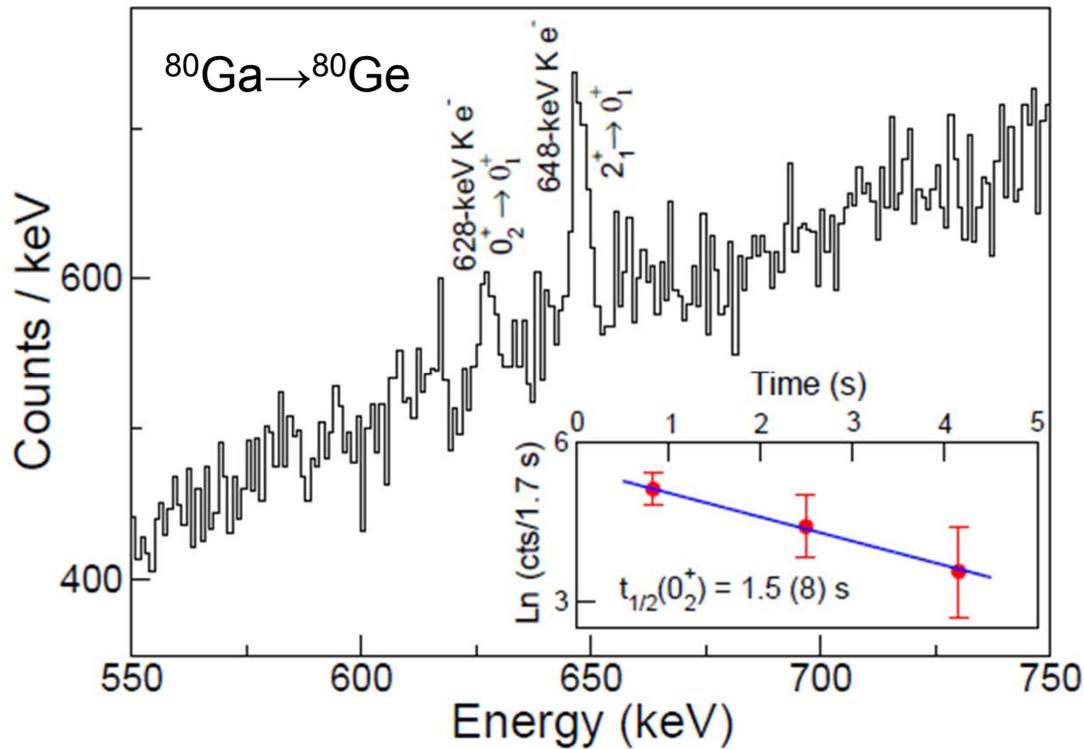


L'approche « holistique » de la basse énergie ► la « précision » en structure nucléaire

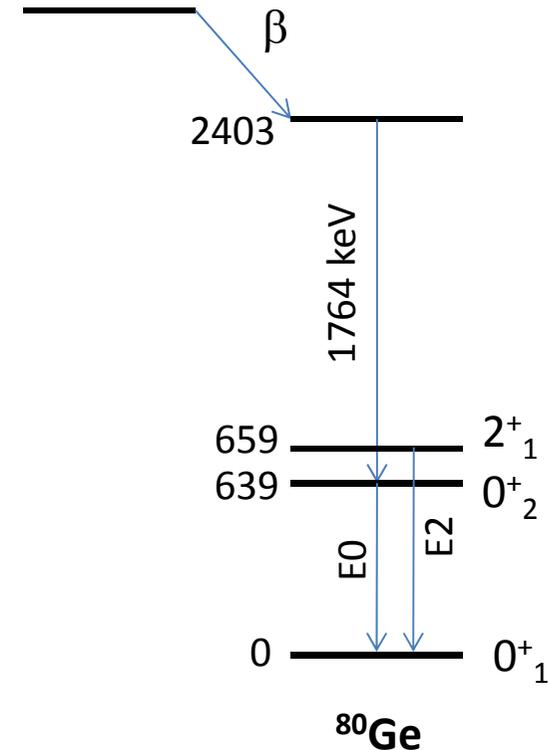
at BEDO/ALTO
search for E0 transitions



L'approche « holistique » de la basse énergie ► la « précision » en structure nucléaire

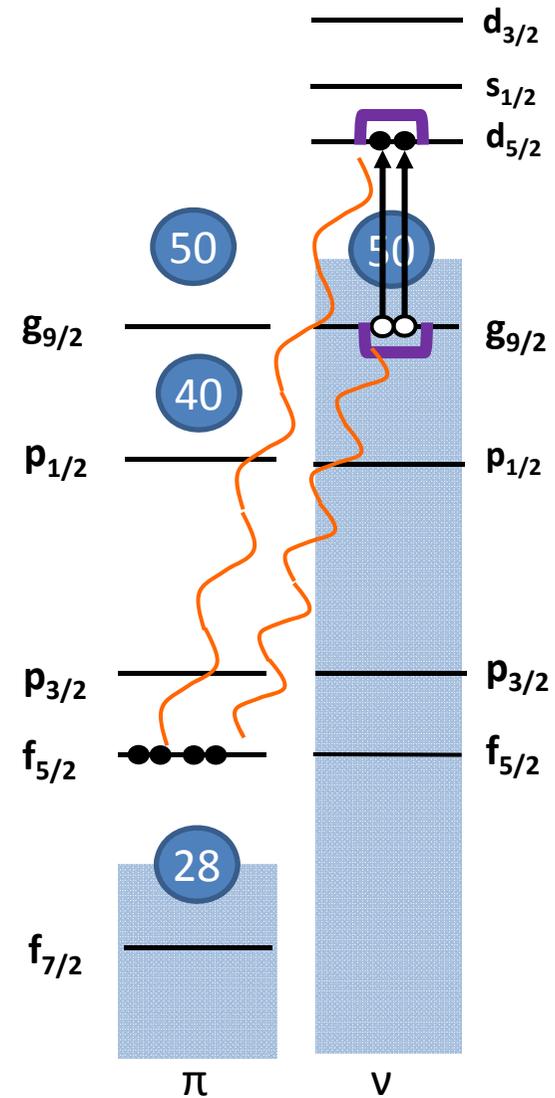
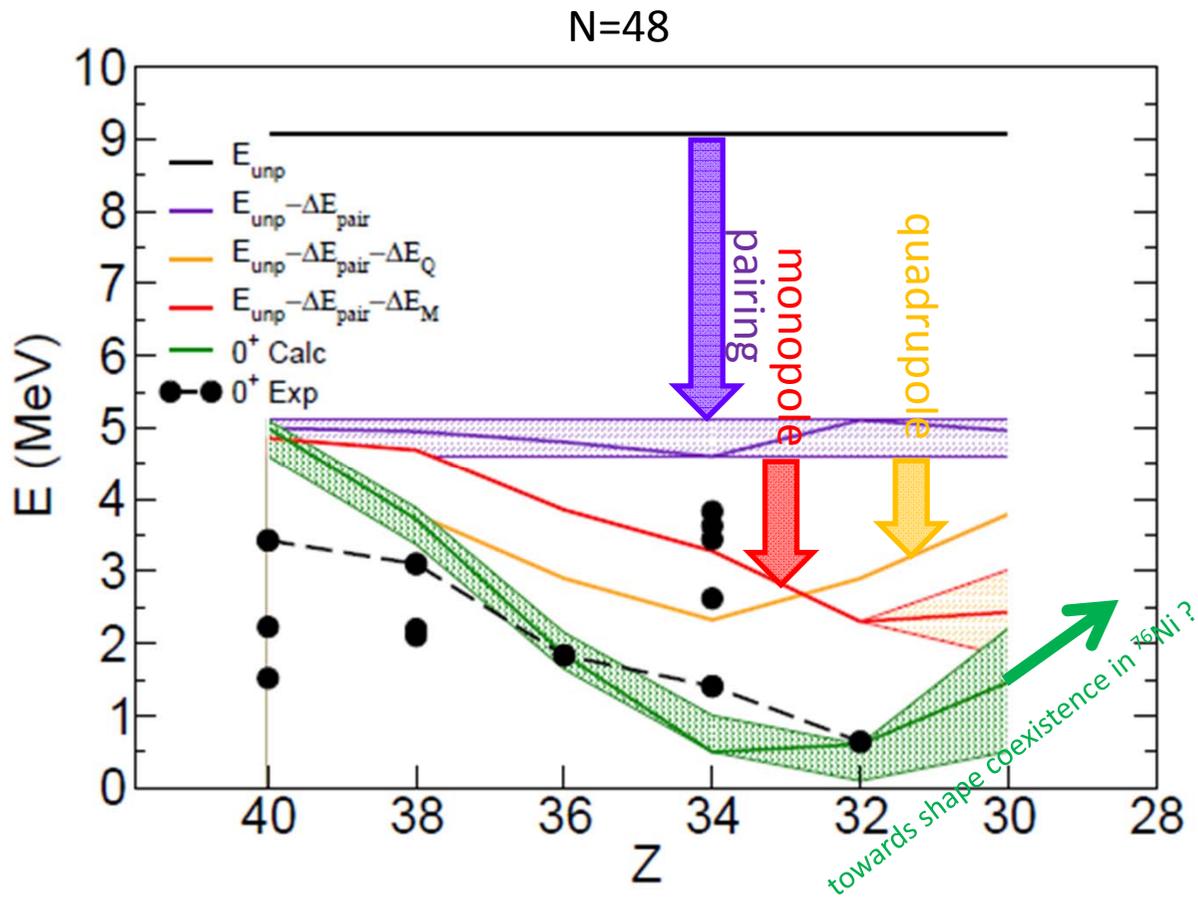


3⁻ isomer in ⁸⁰Ga
 $[T_{1/2}(3^-) = 1.3 \pm 0.2 \text{ s};$
 PRC 87 (2013)]



une réelle surprise : aucune théorie microscopique ne prédit suffisamment d'énergie de corrélations pour permettre à un état 0_2^+ dans ^{80}Ge d'être plus lié que l'état de premier phonon

L'approche « holistique » de la basse énergie ► la « précision » en structure nucléaire

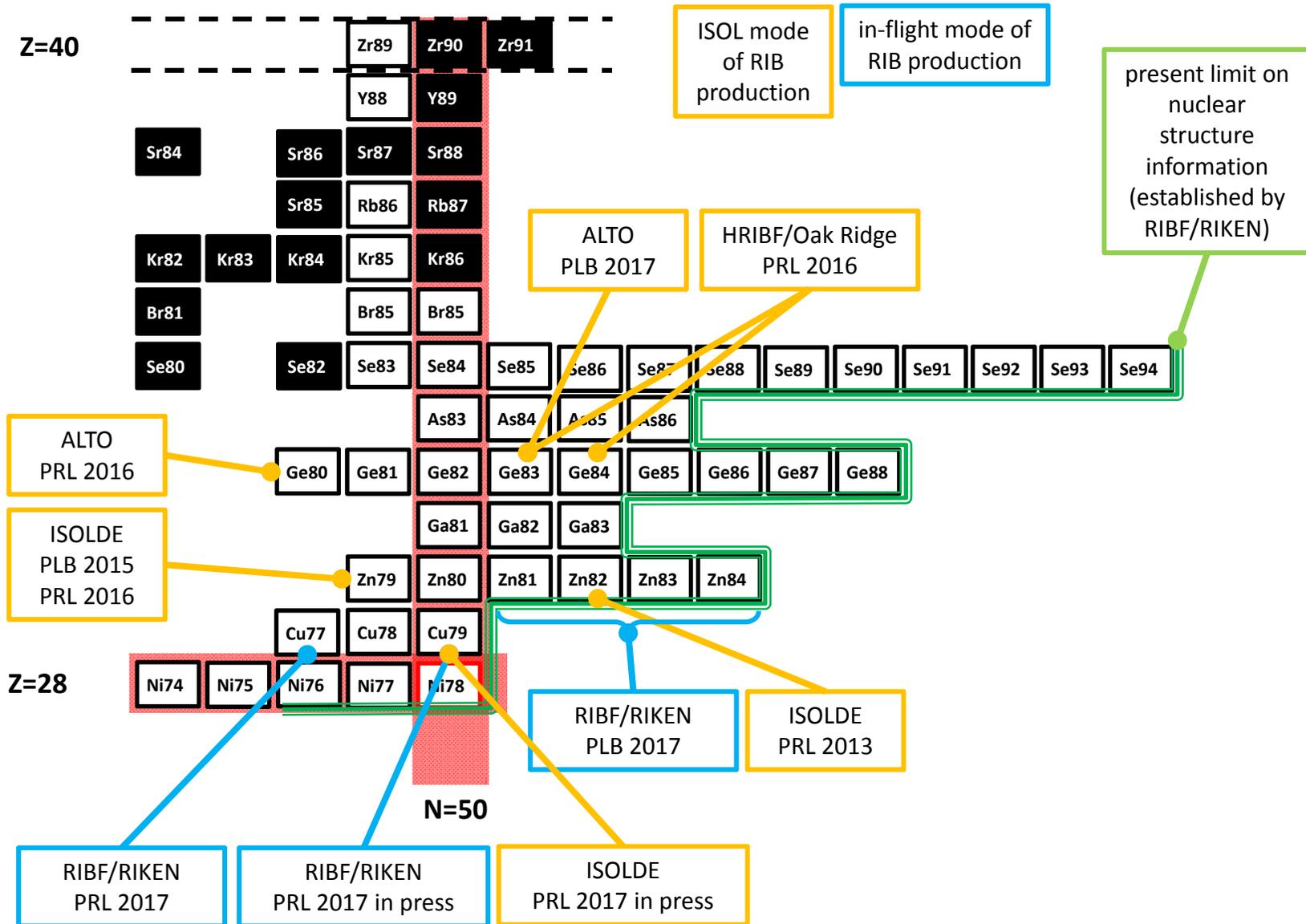


Interprétation:

- analyse phénoménologique en énergie : grâce aux données de spectrométrie de masse de grande précision (ISOL)
- configurations impliquées : grâce aux données de spin, moments magnétiques obtenues en spectroscopie laser

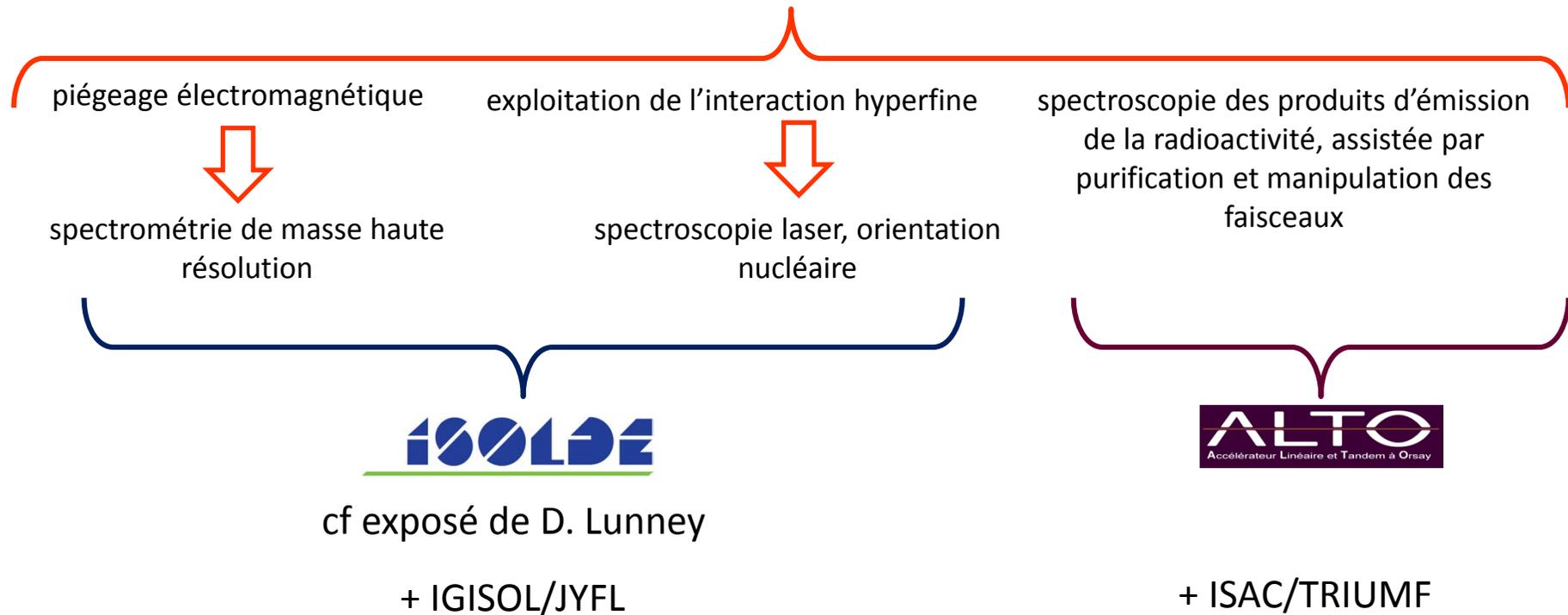
L'approche « holistique » de la basse énergie ► la « précision » en structure nucléaire

la « précision » en structure nucléaire, que permet le mode ISOL de production, constitue une force de frappe redoutable



Etude des régions dominées par les effets spin-orbite
(noyaux riches en neutrons obtenus par fission de ^{238}U)

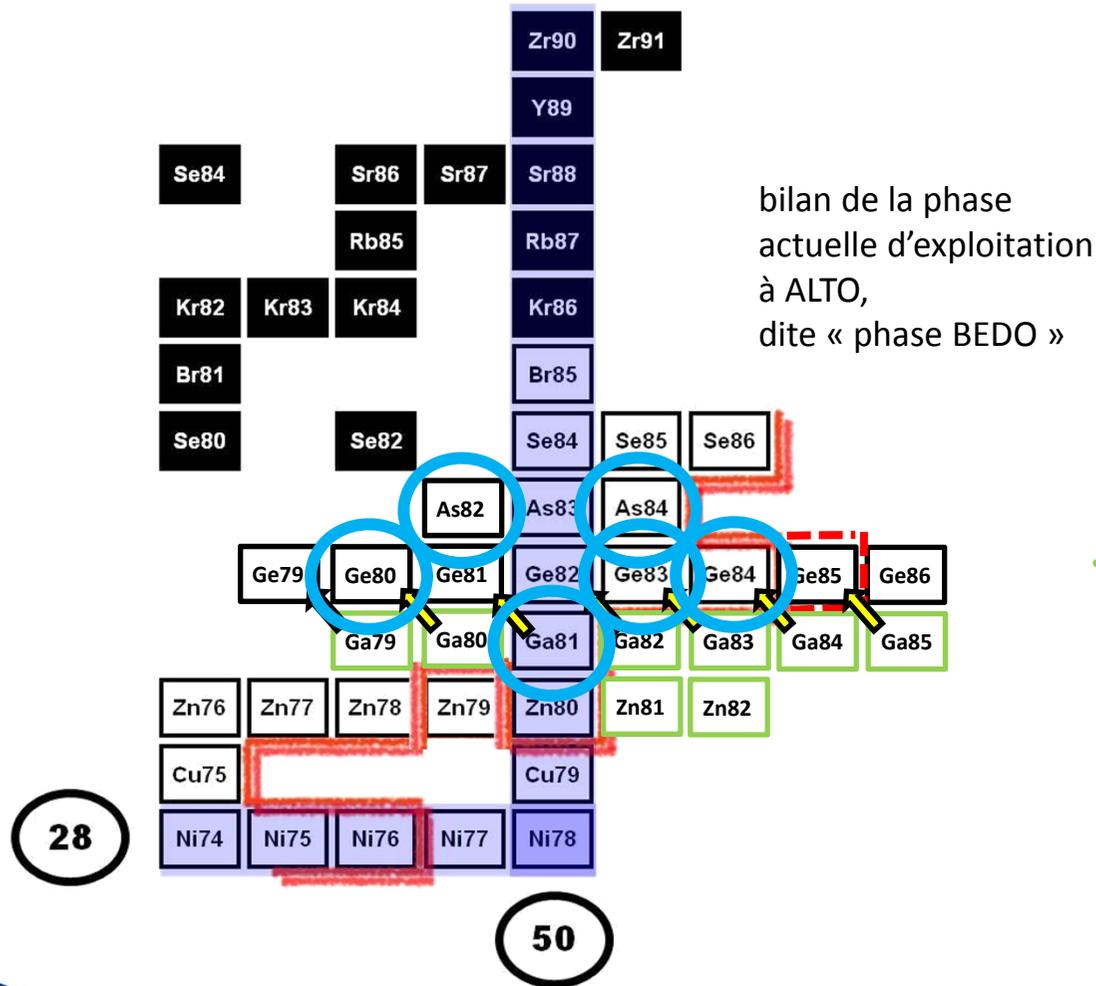
A l'heure actuelle...



Implémentation de ce programme scientifique ► installations IN2P3 et autres

Programme de spectroscopie des produits d'émission de la radioactivité, assistée par purification et manipulation des faisceaux

- en l'occurrence collection du faisceau sur surface amovible
- ie « dérouleur de bande » (technique la plus rapide à mettre en œuvre pour une installation émergente et la plus économique)



hot plasma ionization

(1 μA deuteron primary beam)

- O. Perru PhD –2004

[Eur. Phys. J. A 28, 307 \(2006\)](#)

[PRC 76 054312 \(2007\)](#)

(7 μA electron primary beam)

- A. Etilé PhD CSNSM –2014

[PRC 91 064317 \(2015\)](#)

surface ionization

(2-4 μA electron primary beam)

- M. Lebois PhD –2008

[PRC 80, 044308 \(2009\)](#)

- P.V Cuong PhD –2009

- B. Tastet PhD –2011

[PRC 87, 054307 \(2013\)](#)

- C. Delafosse PhD –ongoing

[PRL 118 182501 \(2016\)](#)

[Phys. Lett. B 772 359 \(2017\)](#)

laser ionization

(10 μA electron primary beam)

- K. Kolos PhD –2012

[PRC 88, 047301 \(2013\)](#)

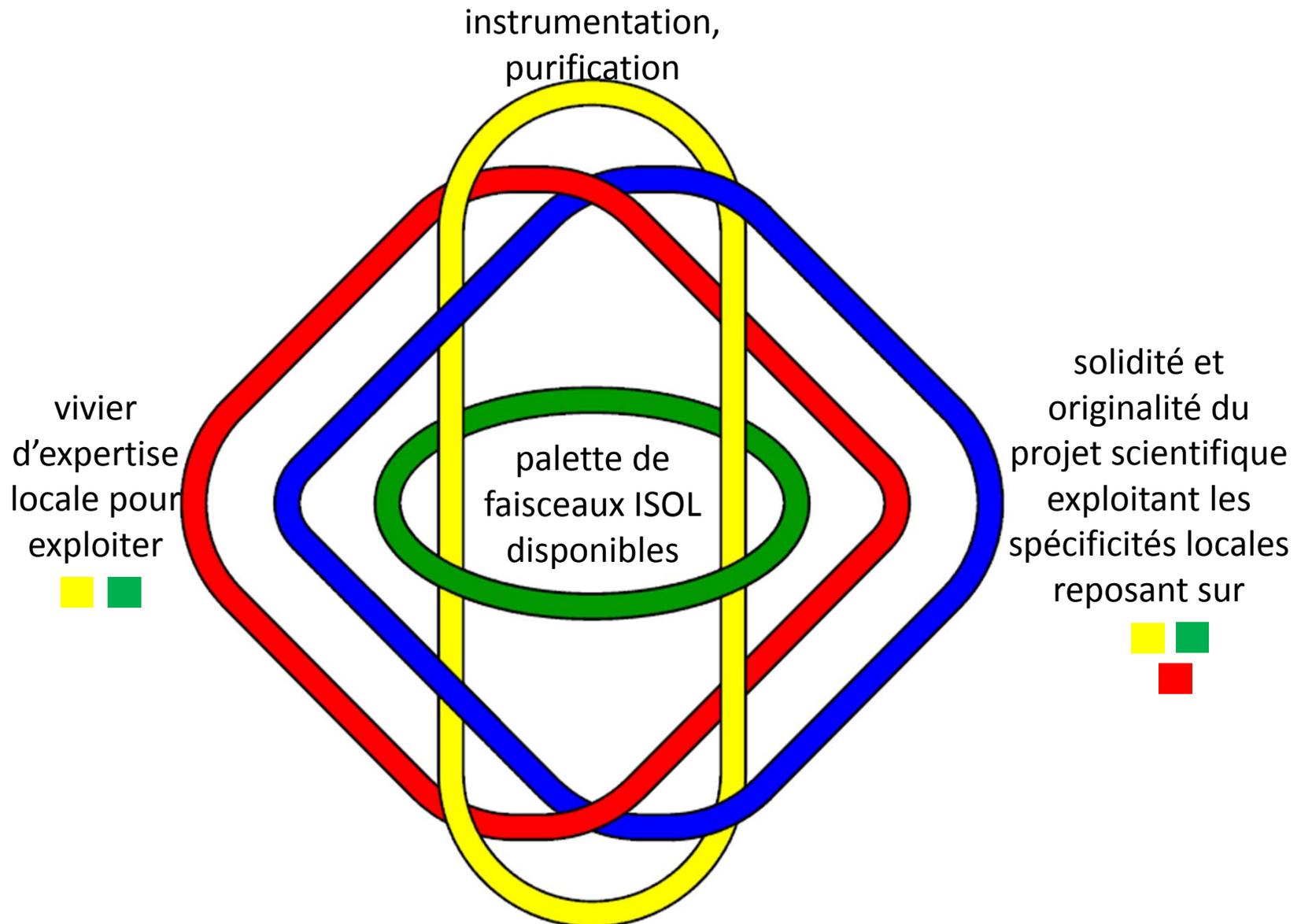
- D. Testov PhD –2014

[NIM A815, 96 \(2016\)](#)

[PRC 95 054320 \(2017\)](#)

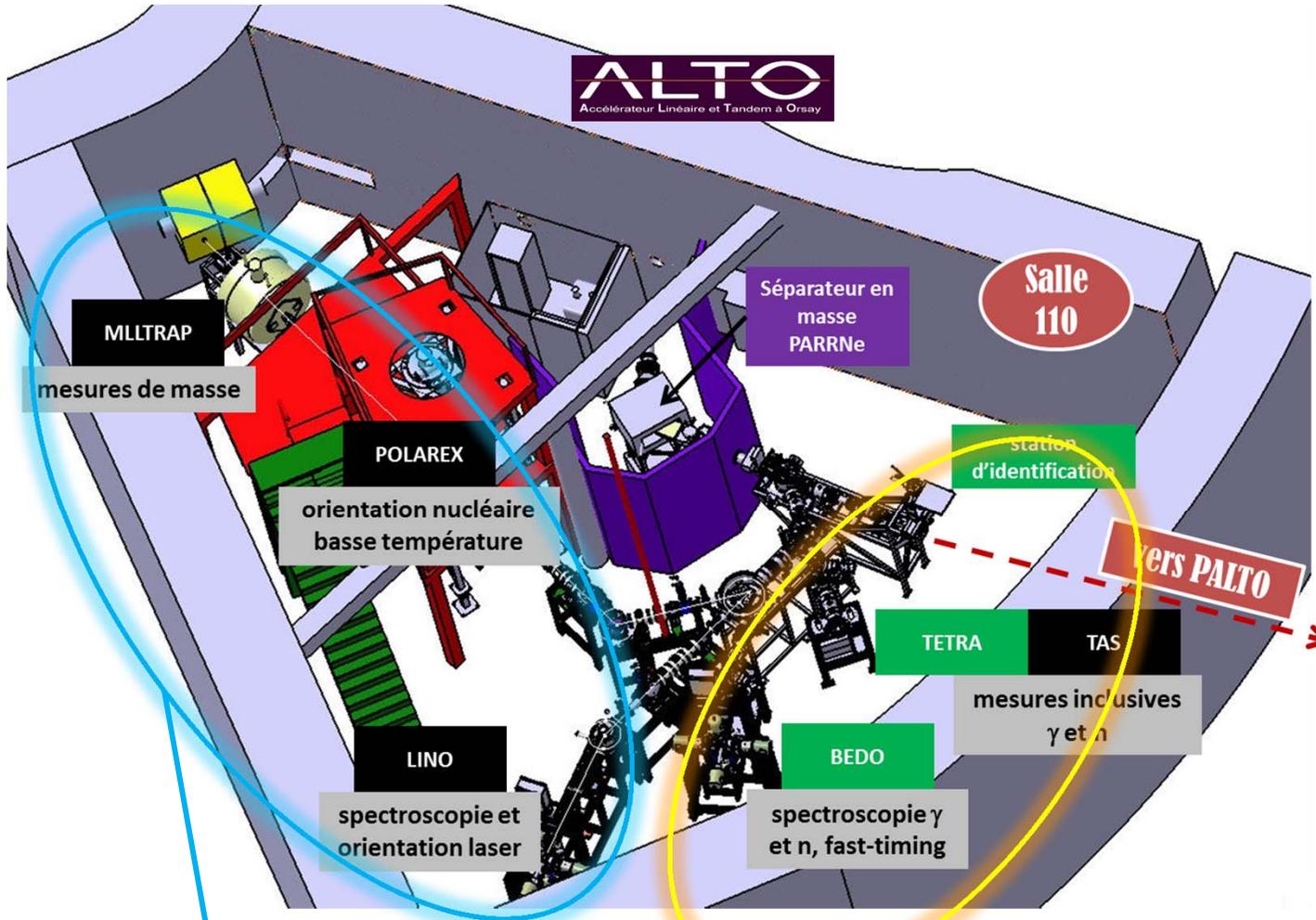
Implémentation de ce programme scientifique ► installations IN2P3 et autres

La compétitivité d'une installation ISOL : un entrelacs brunnien



Implémentation de ce programme scientifique ► calendrier

A court terme pour ce programme scientifique



poursuite naturelle du programme :
spectrométrie de masse
et spectroscopie laser

+ IGISOL/JYFL

phase « terra incognita »
(en cours de construction,
exploitation
au-delà de 2019)

phase « BEDO » (en
cours d'exploitation)

pour le moyen et long terme : cf exposé d'Hervé Savajols

région $N \approx Z = 50$: S3-LEB >2020
à DESIR >2023



Implémentation de ce programme scientifique ► équipes IN2P3 impliquées

programme en cours,
physique des régions ^{78}Ni et
 ^{132}Sn , noyaux riches en
neutrons (fission)



Noms et labos	Fonction	Domaine de mesures ¹	Installations utilisées
IPNO			
M. Babo	PostDoc	3	ALTO
C. Delafosse	Doc	3	ALTO
S. Franchoo	CR1	2/3	ALTO ; ISOLDE
A. Gottardo	PostDoc	3	ALTO ; ISOLDE
J. Guillot	PostDoc	2	ALTO
F. Ibrahim	DR2	3	ALTO
F. Le Blanc	DR2	2/3	ALTO ; ISOLDE
M. Lebois	MdC	3	ALTO
M. MacCormick	CR1	1	ALTO
I. Matea	MdC	3	ALTO
E. Minaya Ramirez	PostDoc	1	ALTO
I. Murray	Doc	1/3	ALTO
B. Roussière	DR2	3	ALTO
L. Vasquez Rodriguez	Doc	2	ALTO ; ISOLDE
D. Verney	DR2	3	ALTO ; ISOLDE
D. Yordanov	CR2	2	ALTO ; ISOLDE
Total ETP IPNO pour ce thème	10.5 ETP		
CSNSM			
A. Astier	CR1	3	ALTO
P. Chauveau	PostDoc	1/3	ALTO
I. Delonde	CR1	3	ALTO
E. Dupont	Doc	3	ALTO
C. Gaulard	MdC	2	ALTO
W. Huang	Doc	1	ISOLDE
X. Li	Doc	3	ALTO ; ISOLDE ; ILL
A. Lopez Martens	DR2	1/3	ALTO
R. Lozeva	CR1	3	ALTO ; ISOLDE ; ILL
D. Lunney	DR1	1	ISOLDE ; ISAC/TRIUMF
B. Lv	Doc	3	ALTO ; ISOLDE ; ILL
M. Mougeot	Doc	1	ISOLDE
C. Petrache	PR1	3	ISAC/TRIUMF
R. Thoen	Doc	2	ALTO
S. Roccia	MdC	2	ALTO
Total ETP CSNSM pour ce thème	8 ETP		



Implémentation de ce programme scientifique ► équipes IN2P3 impliquées

programme en cours,
physique des régions ^{78}Ni et
 ^{132}Sn , noyaux riches en
neutrons (fission)



IPHC			
P. Dessagne	DR2	3	ISOLDE
F. Didierjean	IR2	3	ALTO
G. Duchêne	DR1	3	ALTO
Total ETP IPHC pour ce thème		0.25 ETP	
LPSC			
M. Ramdhane	PR	3	ISOLDE ; ILL
G. Simpson	CR1	3	ISOLDE ; ILL
Total ETP LPSC pour ce thème		1.5 ETP	
SUBATECH			
M. Estienne	CR1	3	IGISOL/JYFL ; ALTO
M. Fallot	MdC	3	IGISOL/JYFL ; ALTO
L. Giot	MdC	3	IGISOL/JYFL ; ALTO
V. Guadilla	PostDoc	3	IGISOL/JYFL ; ALTO
L. Le Meur	Doc	3	IGISOL/JYFL ; ALTO
A. Porta	MdC	3	IGISOL/JYFL ; ALTO
Total ETP SUBATECH pour ce thème		4.5 ETP	
CENBG			
T. Kurtukian Nieto	CR1	3	ISOLDE ; ILL
Total ETP CENBG pour ce thème		0.5 ETP	
GANIL			
J.-C. Thomas	CR1	3	ALTO
Total ETP GANIL pour ce thème		<0.1 ETP	

TOTAL ETP physiciens pour ce programme : 25,3

Implémentation de ce programme scientifique ► équipes IN2P3 impliquées

programme à venir, physique
la région ^{100}Sn , noyaux $N \approx Z$
(fusion évaporation)



GANIL			
D. Ackermann	CEA	2	S3-LEB ; GSI(RADRIS)
P. Delahaye	CR1	1	S3-LEB ; DESIR
J. Piot	CR2	2/3	S3-LEB ; GSI(RADRIS)
B. Bastin	CR1	1/2	S3-LEB ; DESIR
E. Clement	CR1	1/3	S3-LEB ; DESIR
G. Defrance	DR2	1/3	S3-LEB ; DESIR
N. Lelesne	IR1	2	S3-LEB ; DESIR
L. Caceres	CEA	1/2/3	S3-LEB ; DESIR ; GSI(RADRIS)
H. Savajols	DR2	1/2	S3-LEB ; DESIR ; GSI(RADRIS)
M. Lewitovicz	DRCE	3	S3-LEB ; DESIR
J. C. Thomas	CR2	2/3	S3-LEB ; DESIR
-	Doc	2	S3-LEB
-	Doc	1	S3-LEB
-	PostDoc	2	S3-LEB
Total ETP GANIL pour ce thème		7.3 ETP	
Autres labos			
Participation estimée pour ce thème		5 ETP	S3-LEB ; DESIR



TOTAL ETP physiciens pour ce programme : 12,3