
La Φν

Comment modéliser le noyau ?

Sophie Péru

Pour résumer

Petit système

Le noyau est composé
de A nucléons :

$A = Z$ protons + N neutrons

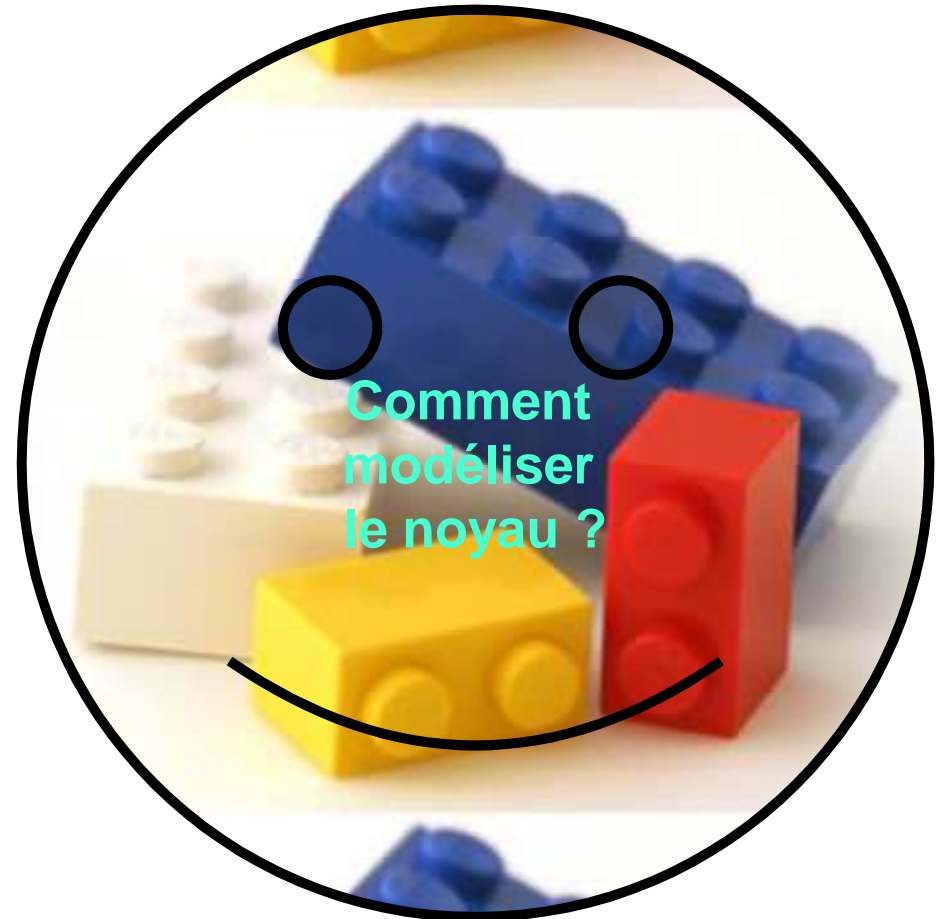


Le noyau est un système lié

Forme, densité et rayon
dépendent de A et Z

Etat fondamental et état excités

Réaction, radioactivité,
fission et fusion



Comment modéliser le noyau ?



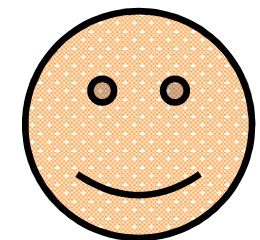
Noyau = ensemble lié de A nucléons

Noyau = A nucléons en interaction

→ 2 challenges

Interaction nucléaire (quasi- inconnue)

problème à N corps : A nucléons



Le Modèle de la goutte liquide : Vision globale du noyau, qui est assimilé à un fluide.

Le modèle en couches : Chaque nucléon baigne dans un potentiel attractif (simple).

les méthodes “microscopiques auto-cohérentes”

telles que Hartree-Fock , BCS ,Hartree-Fock-Bogoliubov :

la structure du noyau est connue si l’on décrit l’attraction subie par chaque nucléon de la part de tous les autres.

Structure des noyaux : la goutte liquide



Le **noyau atomique** est un **fluide quantique**.

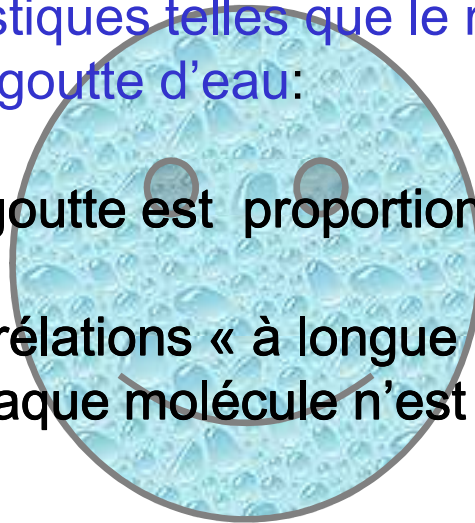
Quantique : La longueur d'onde des **nucléons** est suffisamment grande par rapport à la taille des nucléons pour que la notion de position ou de trajectoire ne soit plus valide.

Fluide : Néanmoins les nucléons au sein du noyau se comportent comme les molécules d'un liquide. A savoir elles roulent les unes sur les autres sans jamais quitter le "récipient".

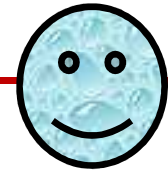
Le noyau, par ses caractéristiques telles que le rayon ou l'énergie de liaison, ressemble beaucoup à une goutte d'eau:

- Le volume d'une goutte est proportionnel aux nombres de molécules.
- Il n'y a pas de corrélations « à longue portée » (grande distance) entre les molécules d'une goutte ; chaque molécule n'est sensible qu'à ses plus proches voisines.

On peut donc en première approximation décrire le noyau via un modèle de goutte liquide **chargée**.

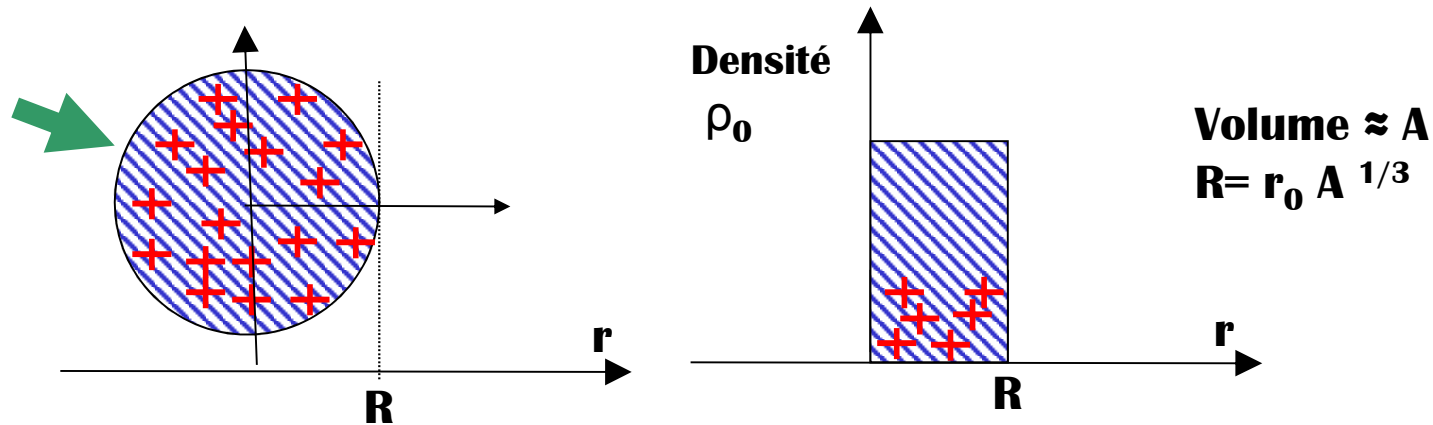


Structure des noyaux : la goutte liquide



Le noyau atomique est un fluide quantique : une goutte liquide chargée.

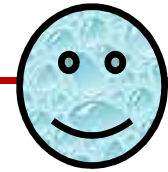
Forme d'équilibre
sphérique



L'énergie de liaison est donnée par la formule semi-empirique de Bethe-Weiszaker

$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a \frac{(N - Z)^2}{A} \pm a_p A^{-1/3}$$

La goutte liquide : énergie de liaison



$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a \frac{(N - Z)^2}{A} \pm a_p A^{-1/3}$$

Termes de pairing

+ pour N et Z pairs

- pour N et Z impairs

0 pour N pairs et Z impairs

0 pour N impairs et Z pairs

Terme liant :

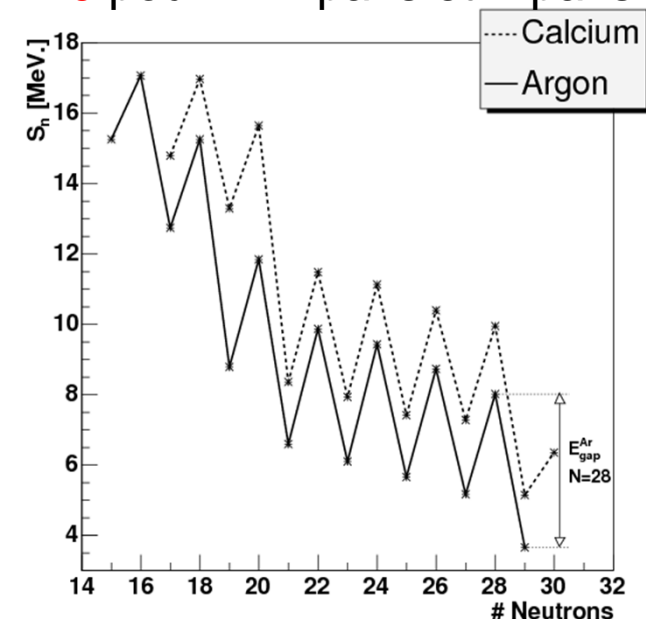
volume a_v

Termes déliants :

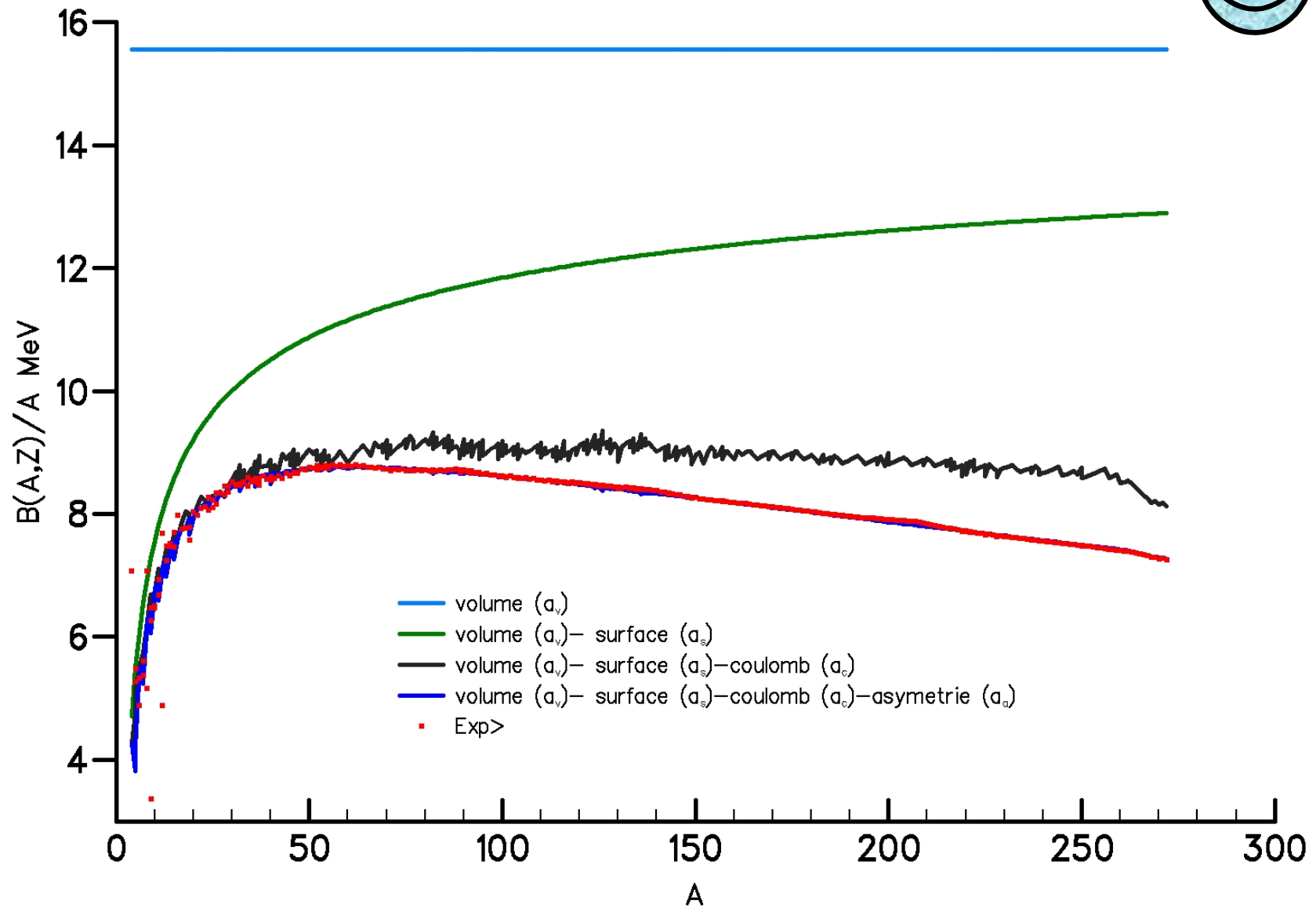
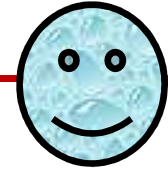
Surface a_s ,

Coulomb a_c ,

Asymétrie a_a



La goutte liquide : énergie de liaison par particule



La goutte liquide : quelques problèmes



1) Distributions des fragments de fission

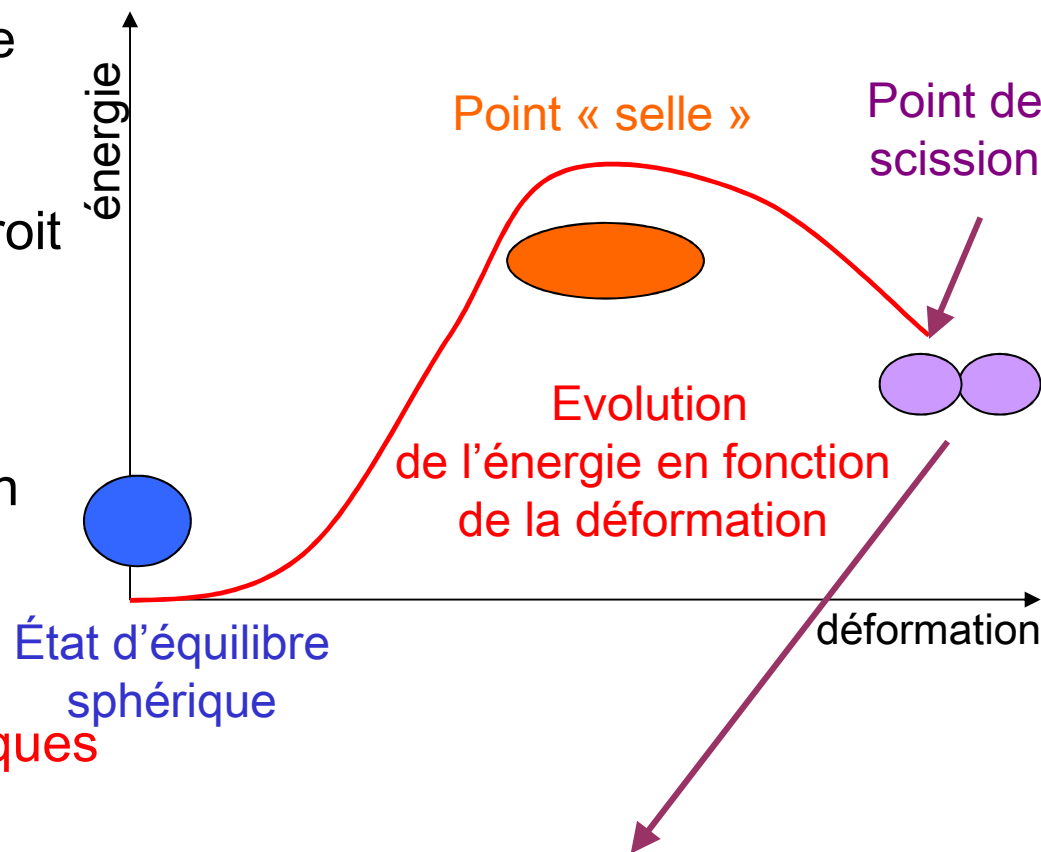
La fission s'explique par une compétition entre la répulsion coulombienne et l'attraction nucléaire:

1) oscillation du noyau autour de la forme d'équilibre.

2) au-delà du **point critique** l'énergie décroît avec la déformation.

3) Augmentation rapide de la déformation jusqu'au **point de scission**.

4) **Séparation** des deux fragments **identiques**



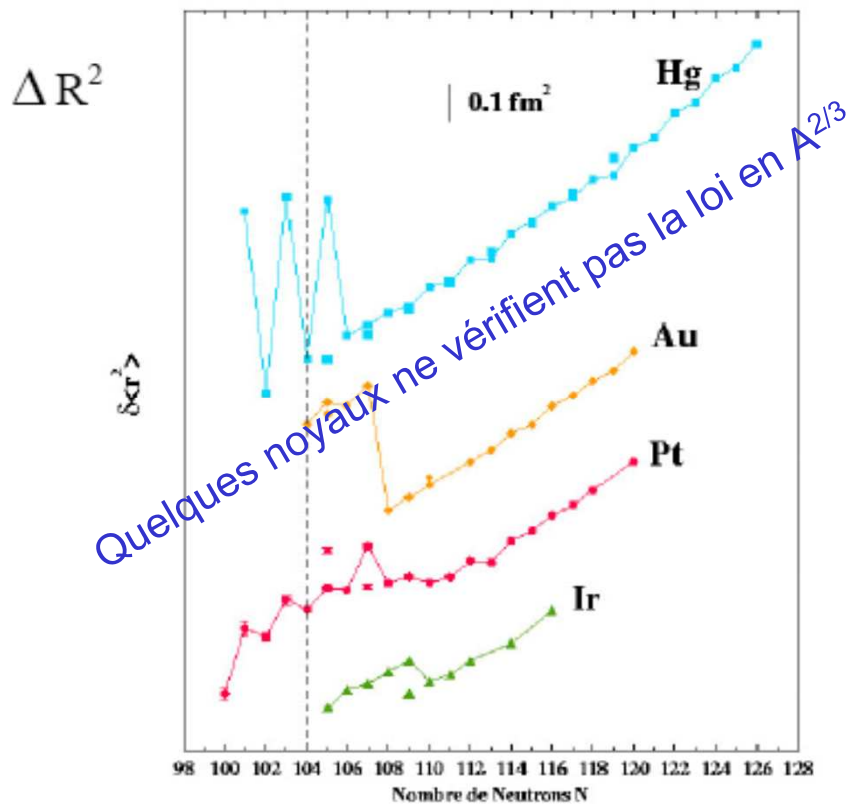
La goutte liquide ne décrit **que** la fission symétrique

La goutte liquide : quelques problèmes



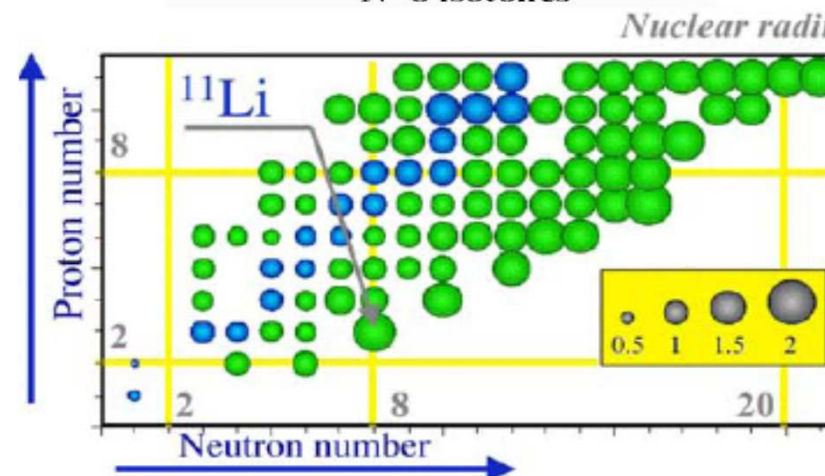
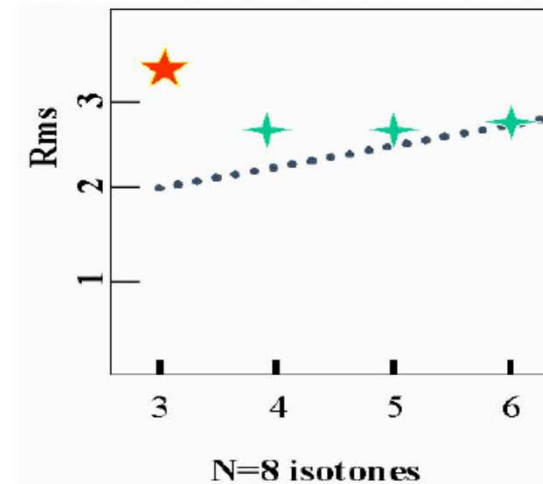
2) Les rayons

Evolution du rayon carré moyen
(par rapport au ^{198}Hg)



Les isotopes légers sont instables ;
ils sont produits au CERN avec ISOLDE.
<http://ipnweb.in2p3.fr/recherche>

Les noyaux à halo

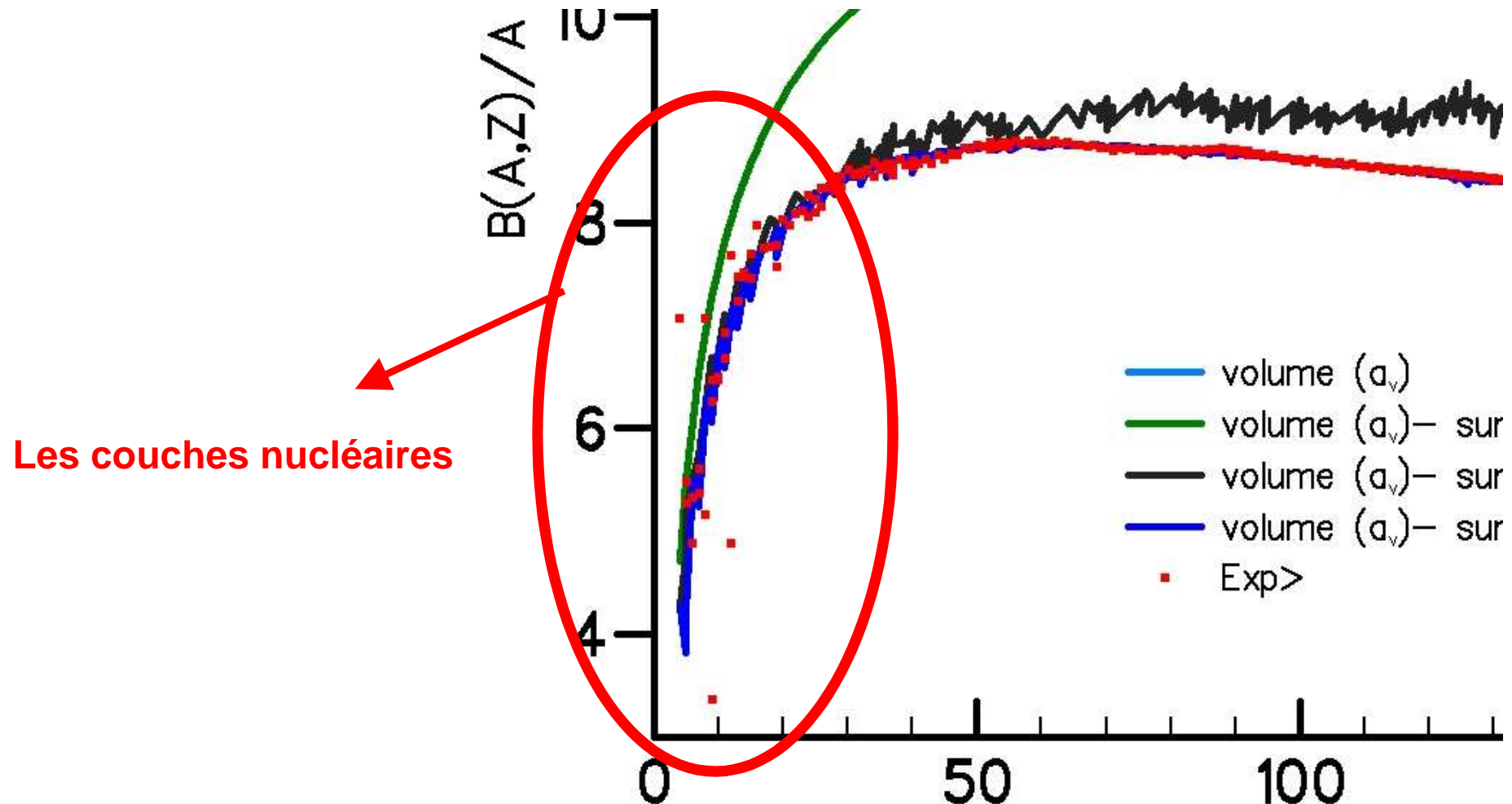


I. Tanihata et al., PRL 55 (1985) 2676
I. Tanihata and R. Kanungo, CR Physique (2003) 437

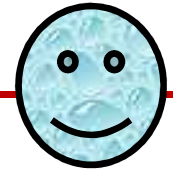
La goutte liquide : quelques problèmes



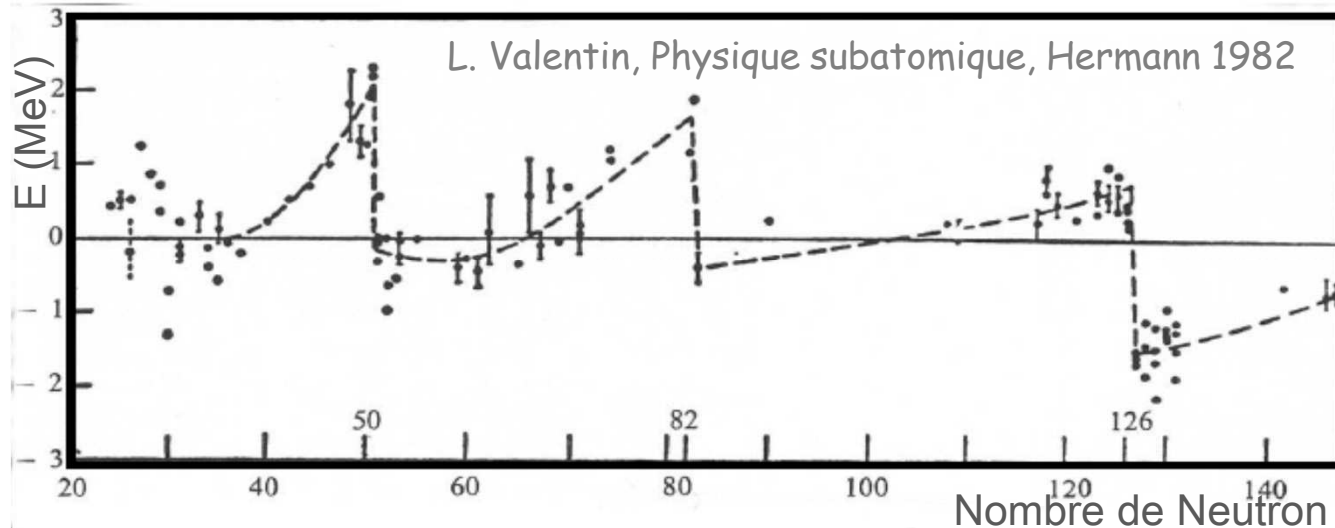
3) Les couches nucléaires



La goutte liquide : quelques problèmes



3) Les couches nucléaires



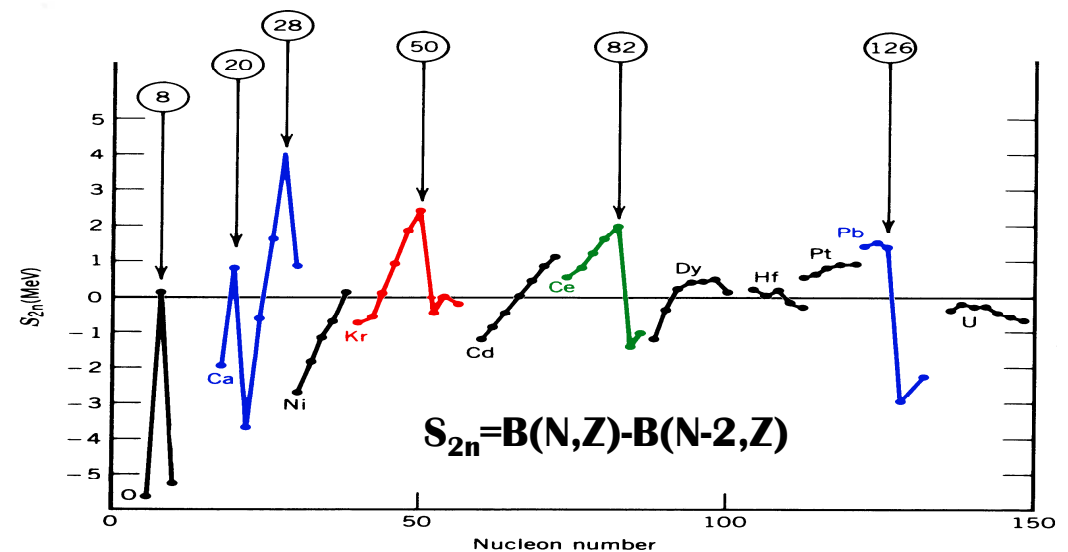
Existence
de nombres magiques :
8, 20, 28, 50, 82, 126

Energies de séparation de 2 neutrons

Rappel:

S_{2n} = énergie nécessaire
pour arracher une paire de neutrons
d'un noyau donné (N,Z).

Dans les noyaux magiques,
les particules sont plus liées :
il faut plus d'énergie pour les arracher.



Structure des noyaux : Le noyau n'est pas une goutte liquide



Il y a de nombreux "effets de couches" dans les noyaux.

Ces effets ne peuvent pas être reproduits par la goutte liquide.

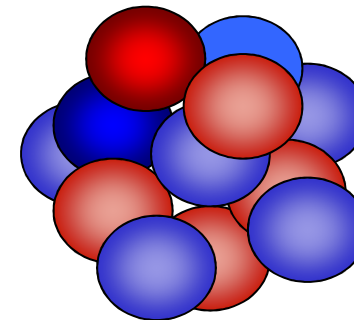
Ces effets ne peuvent pas être reproduits par des approches macroscopiques.

Il y a des « nombres magiques » 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Et donc des noyaux « magiques » ${}_{40}^{90}\text{Zr}$ ${}_{50}^{140}\text{Ce}$ ${}_{82} \dots ..$

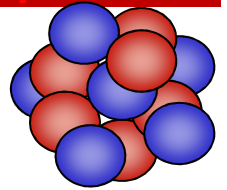
Et même « doublement magiques » ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ ${}_{50}^{100}\text{Sn} \dots ..$

Nous avons besoin d'approches microscopiques dont les ingrédients essentiels sont les **nucléons** dans le noyau en **interaction entre eux**.



Structure des noyaux : vers une description microscopique

Une question « reste en suspend »



pourquoi une durée de vie ?

Condition nécessaire d'une décroissance

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

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

Si énergétiquement une décroissance est possible, pourquoi n'est-elle pas immédiate ????

Exemple radioactivité α :

Symétrie par renversement du sens du temps (le film à l'envers)

émission $\alpha \Leftrightarrow$ fusion avec un α

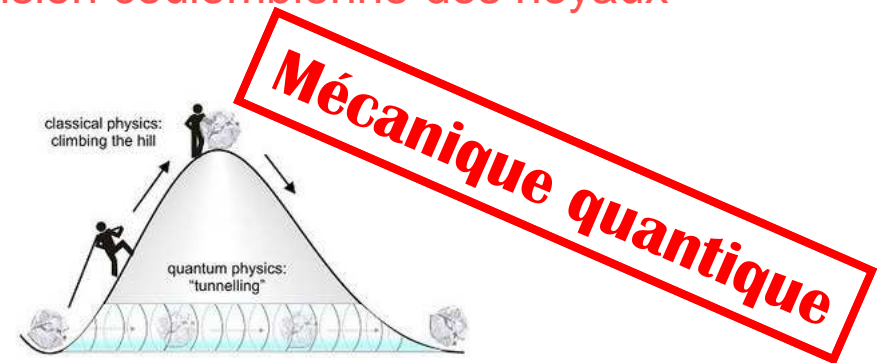
D'où

répulsion coulombienne des noyaux \Leftrightarrow fusion spontanée impossible

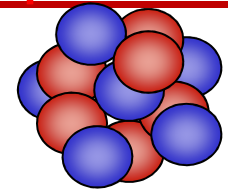
émission α spontanée impossible \Leftrightarrow répulsion coulombienne des noyaux

Classiquement, la barrière est trop haute.

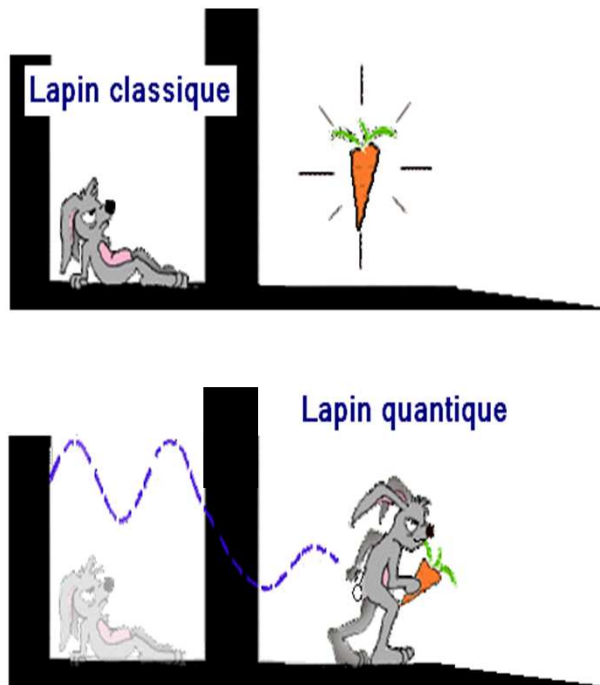
Traversée de barrière par effet tunnel



Structure des noyaux : vers une description microscopique



Impossible n'est pas quantique

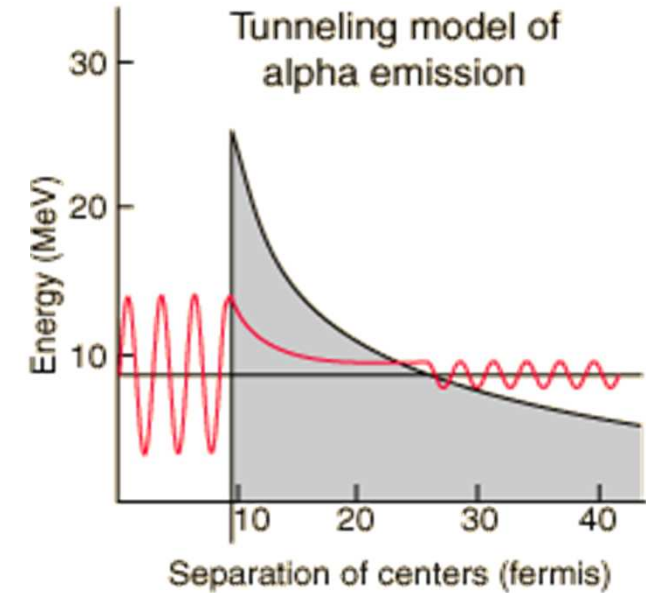
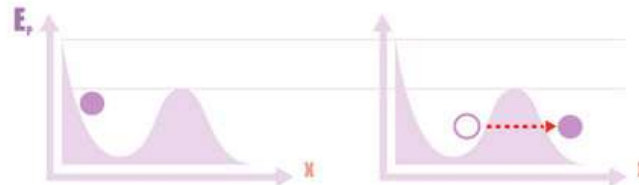


I. Deloncle, Fréjus 2010

EN MECANIQUE CLASSIQUE



EN MECANIQUE QUANTIQUE



lapin à partir de: http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences_robert/basesnuclear.ppt
 source image effet tunnel: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/imgnuc/alphapolon.gif>

Structure des noyaux : vers une description microscopique

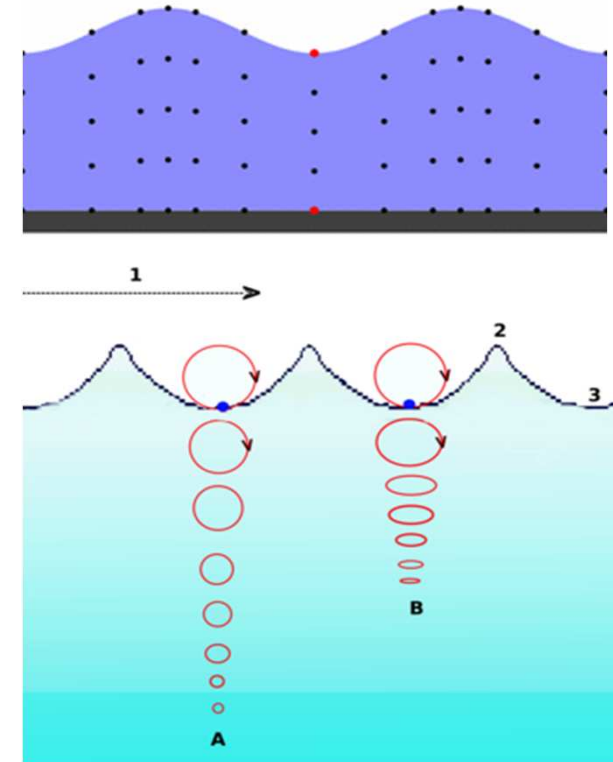
I. Deloncle, Fréjus 2010

Les vagues de la mer et les gouttes d'eau



Classique:

somme déplacements verticaux gouttes d'eau
⇒ 1 onde mécanique (vague: mvt horizontal)

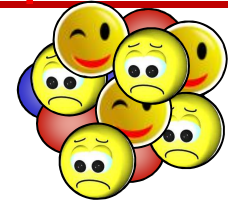


Quantique:

\sum mvts nucléons dans états individuels dans noyau
⇒ 1 onde \equiv 1 noyau dans 1 état quantique (global)
⇒ Autant de configurations autant d'états...

<http://www.jamiescottimages.com/images/cyclops.jpg>
http://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_surface_wave
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Simple_harmonic_motion_animation.gif

Structure des noyaux : vers une description microscopique



Noyau = N nucléons en interaction forte

Le problème à N corps
(le comportement de chaque nucléon influence les autres et vis et versa)

Ne peut être résolu exactement que pour $N < 4$

Pour les $N \gg 10$, on a recourt à des approximations

Modèle en couches :
Seulement un petit nombre de particules sont actives 😞

La force nucléon-nucléon est quasi-inconnue

Les forces effectives :
par définition

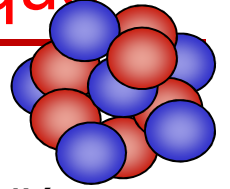
elles dépendent de la méthode utilisée pour résoudre le problème à N corps.

Approches fondées sur l'approximation du champ moyen :

Pas de cœur inerte 😊

Ne peut pas prendre en compte toutes les corrélations entre les particules. 😞

Structure des noyaux : vers une description microscopique



Les nucléons sont des objets quantiques :

seulement certaines valeurs de l'énergie sont accessibles : il existe un nombre discret d'états.

Les nucléons sont des fermions ;

deux nucléons ne peuvent pas occuper le même état quantique : principe de Pauli.

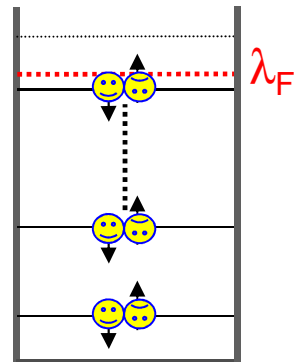
Niveaux individuels dans un potentiel

I. Deloncle, Fréjus 2010

<http://www.st-benoit-du-lac.com/gregorien/resurrectionmanuscrit.jpg>



≠

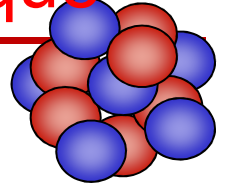


=



hauteur note = fréquence onde sonore

Structure des noyaux : vers une description microscopique



Différence Atome-Noyau :

Atome

Champ extérieur (=noyau)
Champ central

eV~ keV

0.1nm

Interaction électromagnétique
CONNUE

Noyau

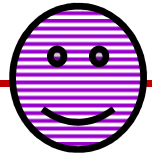
Pas de champ extérieur

MeV

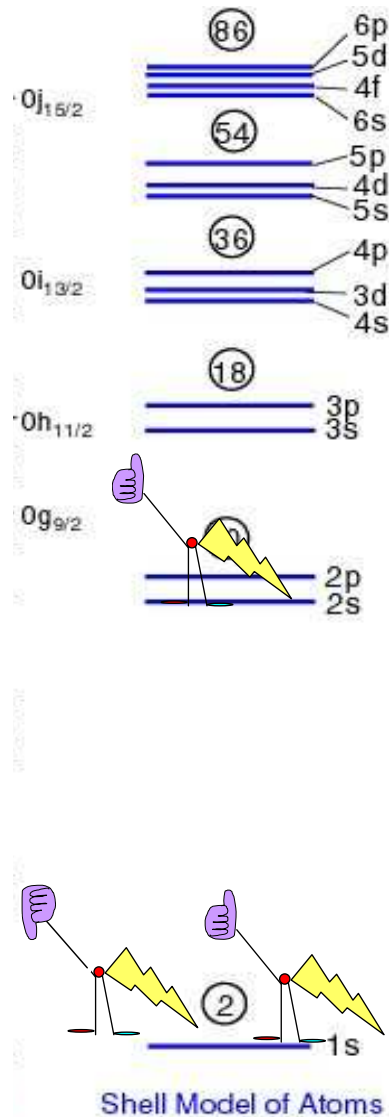
fm (10^{-15} m)

Interaction nucléaire
« INCONNUE »

Structure des noyaux : Le modèle en couche



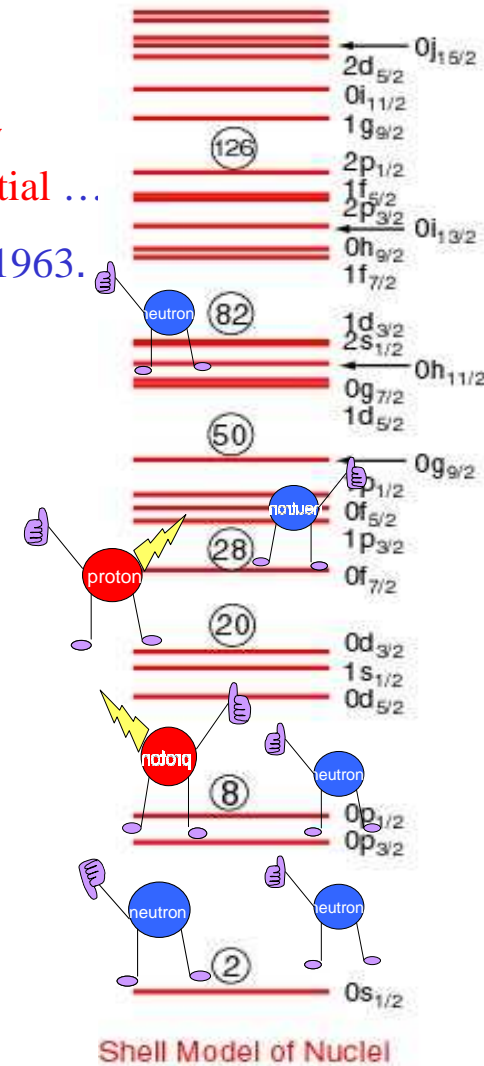
Modèle développé par M. Goeppert Mayer en 1948 .



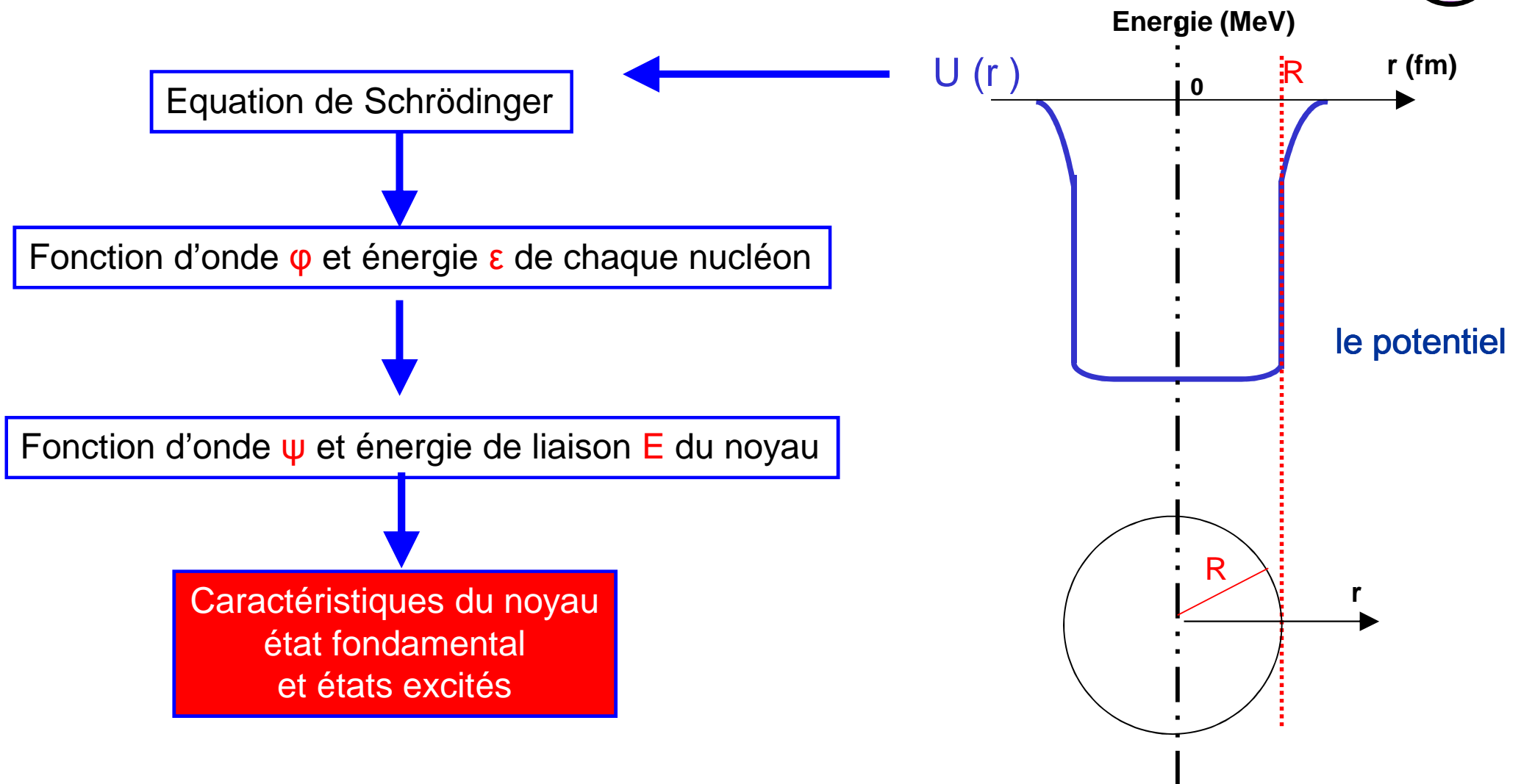
“In analogy with atomic structure one may postulate that in the nucleus the nucleons move fairly **independently** in individual orbits in an **average potential** ...

M. Goeppert Mayer, Nobel Conference 1963.

Approximation
de particules
indépendantes



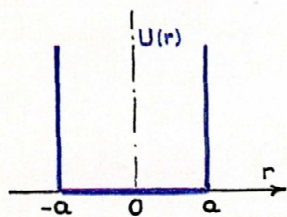
Le modèle en couche : choix du potentiel



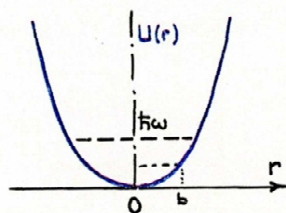
Le modèle en couche : choix du potentiel



Exemples de potentiel centraux



Puits carré ∞
 $E_{nl} \leftarrow$ zéros des $j_p(qa)$



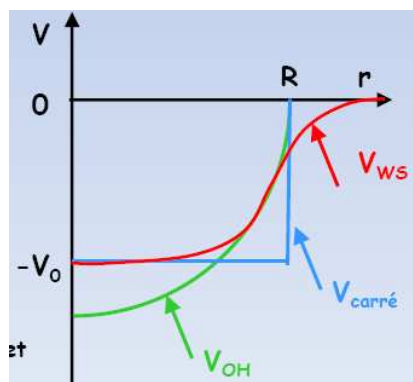
Oscill. harm $U(r) = \frac{1}{2}kr$
 $E_{nl} \leftarrow (2(n-l) + l + \frac{3}{2})\hbar\omega$

- (1) *parité de la sous-couche*
- (2) *n l*
- (3) *nb de nucléons / sous-couche*
- (4) *totalisation du nb de nucléons*
- (5) *nb. magiques*

$l =$	0	1	2	3	4	5	6	...
	s	p	d	f	g	h	i	...

Dessins de Jacques Dechargé

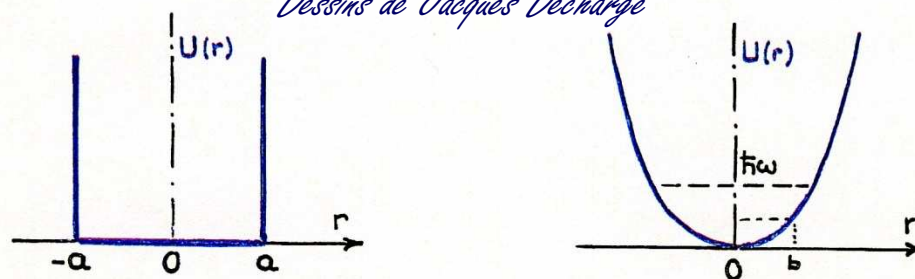
Potentiel de Wood Saxon



$$V(r) = -\frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R}{a}\right)}$$

(1) (2)	(3) (4)	(5)	
+ 1i	26		168 4s 3d 2g 1i
- 3p	6 112	126	
- 2f	14		112 - 3p 2f 1h
		106	
- 1h	22		
		92	82
+ 3s	2 70		70 + 3s 2d 1g
+ 2d	10		
		68	
+ 1g	18		
		58	50
- 2p	6 40		40 - 2p 1f
- 1f			
	14 34	20	20 + 2s 1d
+ 2s	2 20		
+ 1d	10		
		18	8
- 1p	6 8		8 - 1p
		8	
+ 1s	2 2	2	2 + 1s
		2	

Dessins de Jacques Dechargé



Le modèle en couche : choix du potentiel

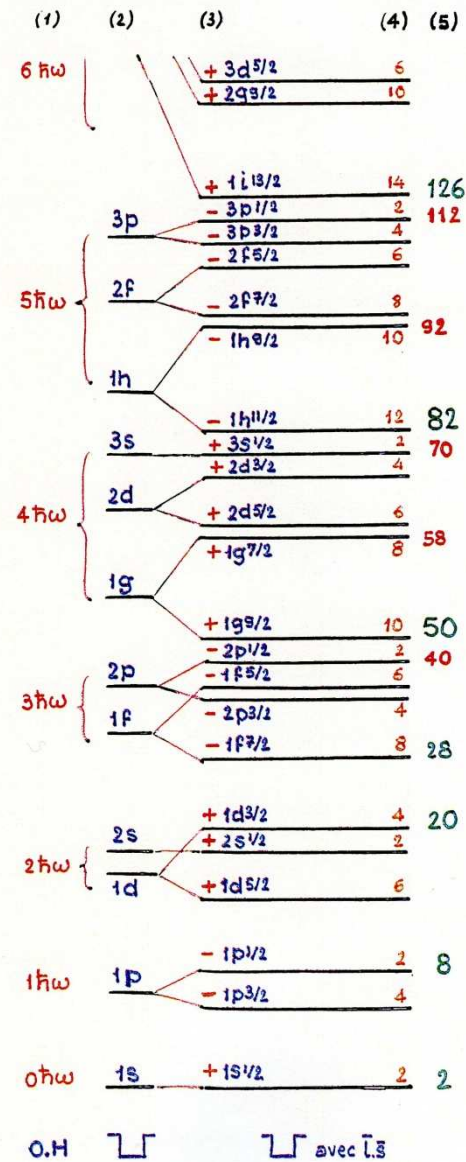


Effet du spin orbite

Interaction du moment angulaire orbital et du moment de spin:

$$S \cdot O \approx \vec{l} \cdot \vec{s}$$

Dessins de Jacques Dechargeé



(1) O.H. isotrope - Nb de ħω : n_{OH}
(échelle d'éner. non respectée)
n_{OH} ~ numéro couche principale

(2) Puits carré isotrope (n ℓ)

(3) idem + spin-orbite: [parité n ℓ^j]

(4) Nb de nucléons/ss-couche

(5) totalisation
- Nb magiques

Note: Le nb. de couches princip. augmente avec la profondeur du puits, donc avec A.

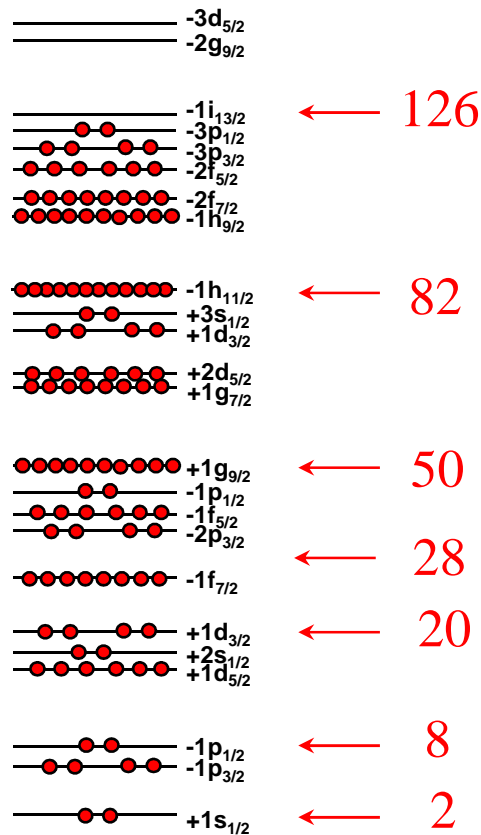
L'ordre des niveaux ne doit pas être pris trop à la lettre. Il peut varier avec A, mais les couches principales subsistent.

Rappel: j = ℓ - 1/2 et ℓ + 1/2

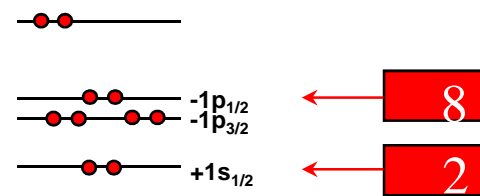
(2j+1) nucl/état

Parité	+	-	+	-	+	-	+	-
ℓ	0	1	2	3	4	5	6	7
	s	p	d	f	g	h	i	j

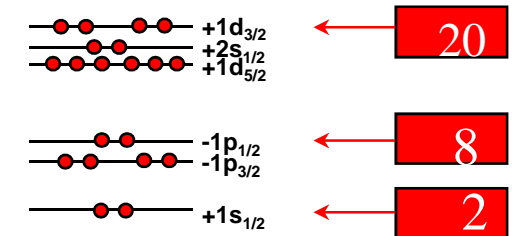
Le modèle en couches : description de l'état fondamental



Ex: Z=10



Ex: N=20

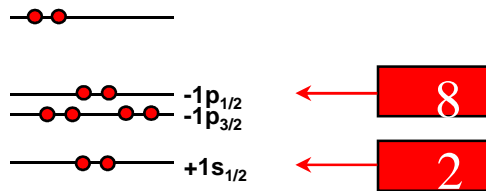


Pour un noyau constitué de masse, on remplit avec A nucléons les états les plus bas en énergie. L'énergie de l'état fondamental devient la somme des énergies individuelles.

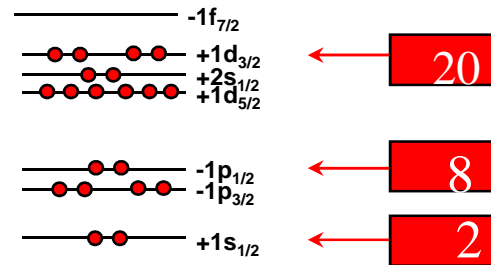
Le modèle en couches : description des états excités



Ex: Z=10

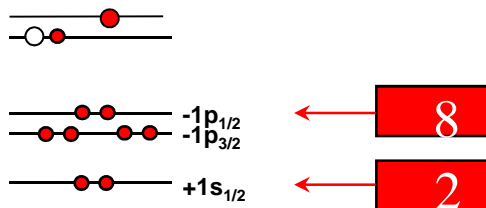


Ex: N=20

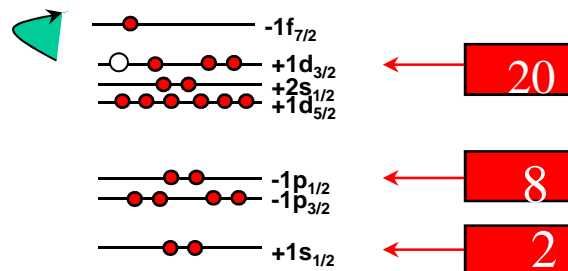


État fondamental

Ex: Z=10



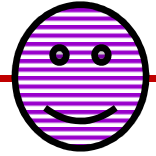
Ex: N=20



États excités

Excitations individuelles « particule-trou » :
On déplace une particule sur un état de plus haute énergie.

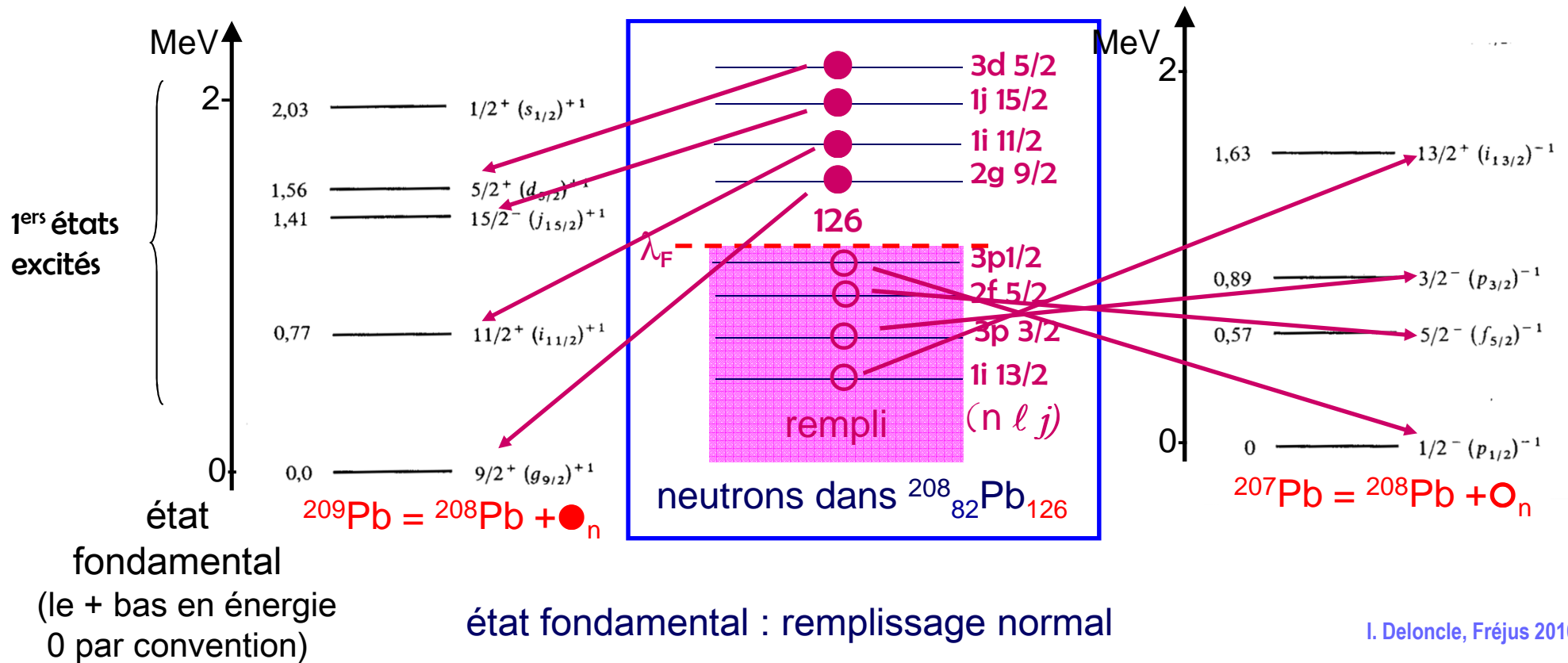
Le modèle en couches: Noyaux impairs



Autour du doublement magique $^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$: un très bon cœur

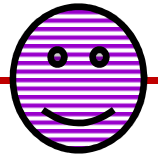
excitation $\leftrightarrow \uparrow$ nucléon
célibataire
 $j_{\text{nucléon}} = J \text{ noyau}$

gap empêche d'aller
dans les états au-dessus
trop cher en énergie



I. Deloncle, Fréjus 2010

Le modèle en couches: des particules indépendantes ?



Code Antoine E. Caurier, G. Martinez-Pinedo, F. Nowacki, A. Poves, A.P. Zuker, Rev. Mod. Phys. 77, 427 (2005)

❖ Espace de calcul :

Espace externe

Espace de valence

♥ = ^{56}Ni

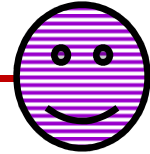
1h11/2	1h11/2
3s1/2	3s1/2
2d3/2	2d3/2
2d5/2	2d5/2
1g7/2	1g7/2
1g9/2	1g9/2
2p1/2	2p1/2
1f5/2	1f5/2
2p3/2	2p3/2
1f7/2	1f7/2
1d3/2	1d3/2
2s	2s
1d5/2	1d5/2
1p1/2	1p1/2
1p3/2	1p3/2
1s	1s

proton neutron

❖ Interaction rg5.45
❖ Interaction rg5.45mod

FAUL Tatjana – Séminaire GANIL – 4 Avril 2008

Le modèle en couche : Bilan



C'est un modèle à **particules indépendantes**, qui vérifie le principe de Pauli :
Chaque nucléon « se déplace sur une orbite » **indépendamment** des autres nucléons.

Indépendamment : Chaque nucléon baigne dans un potentiel moyen de forme simple qui simule l'attraction moyenne qu'il ressent de la part de tous les autres.

Ce potentiel moyen est une vision macroscopique du noyau.

Succès :

- 1) Bonne description de certaines caractéristiques des noyaux dans leur état fondamental,
- 2) et évidemment bonne description des effets de couches.

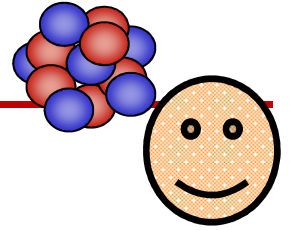
Défauts :

- 1) Le potentiel moyen est phénoménologique.

Bien que ses paramètres varient lentement avec A , ils doivent être ajustés pour chaque noyau (région de masse).

- 2) L'énergie de liaison $\sum_{i=1}^A \epsilon_i$ est très mauvaise.

Structure des noyaux : les modèles microscopiques



Point de vue macroscopique :

Le noyau est assimilé à un fluide → Goutte Liquide

Macro-microscopique :

Les nucléons baignent dans un potentiel attractif, simple → Modèle en Couches.

Point de vue microscopique :

La structure du noyau est déterminée si l'on connaît l'attraction subie par chaque nucléon de la part de tous les autres → **Champ Moyen**

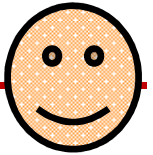
Il faut connaître :

l'interaction nucléaire → Interaction effective : relativiste ou non relativiste (Skyrme, Gogny)

Les fonctions d'onde des nucléons

Et enfin traiter le problème à N corps en interaction.

Structure du noyau : approximation du champ moyen



Hypothèse principale

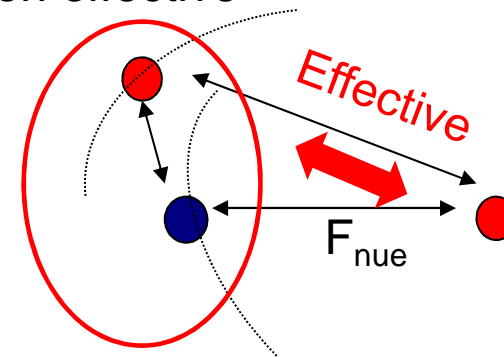
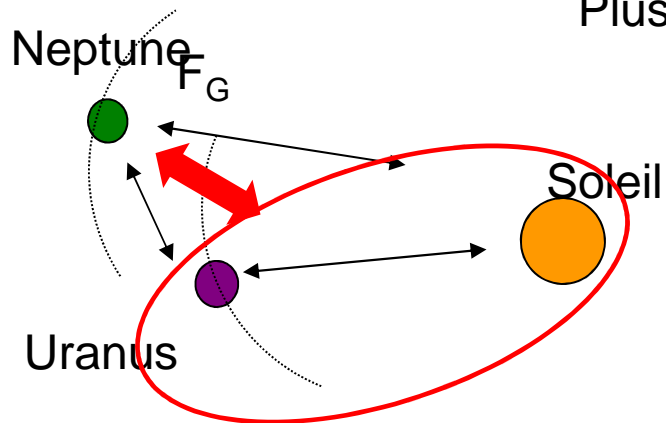
Chaque nucléon est soumis à un potentiel généré par tous les autres nucléons du noyau :
le champ moyen.

Le champ moyen est construit à partir des excitations individuelles des nucléons.

Interaction nucléaire

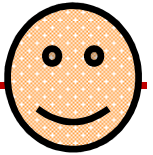
2 nucléons → force nue

Plusieurs nucléons → interaction effective



Champ moyen auto-cohérent : il dépend de la structure du noyau ; il n'y a pas de cœur inerte.

Structure du noyau : approximation du champ moyen



Méthodes Hartree-Fock et Hartree-Fock-Bogoliubov

$$H\psi = E\psi$$

$$\left[\sum_i T_i + \sum_{i<j} V_{ij} \right] \psi = E\psi$$

Système de A nucléons en interaction

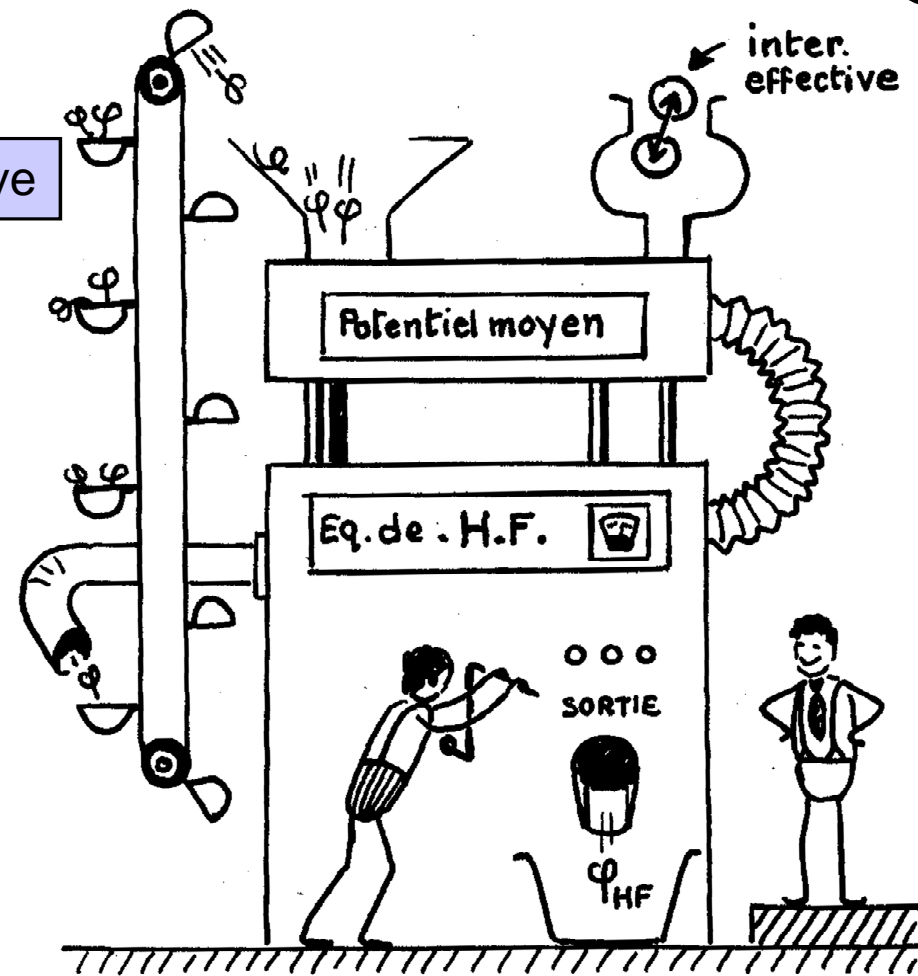
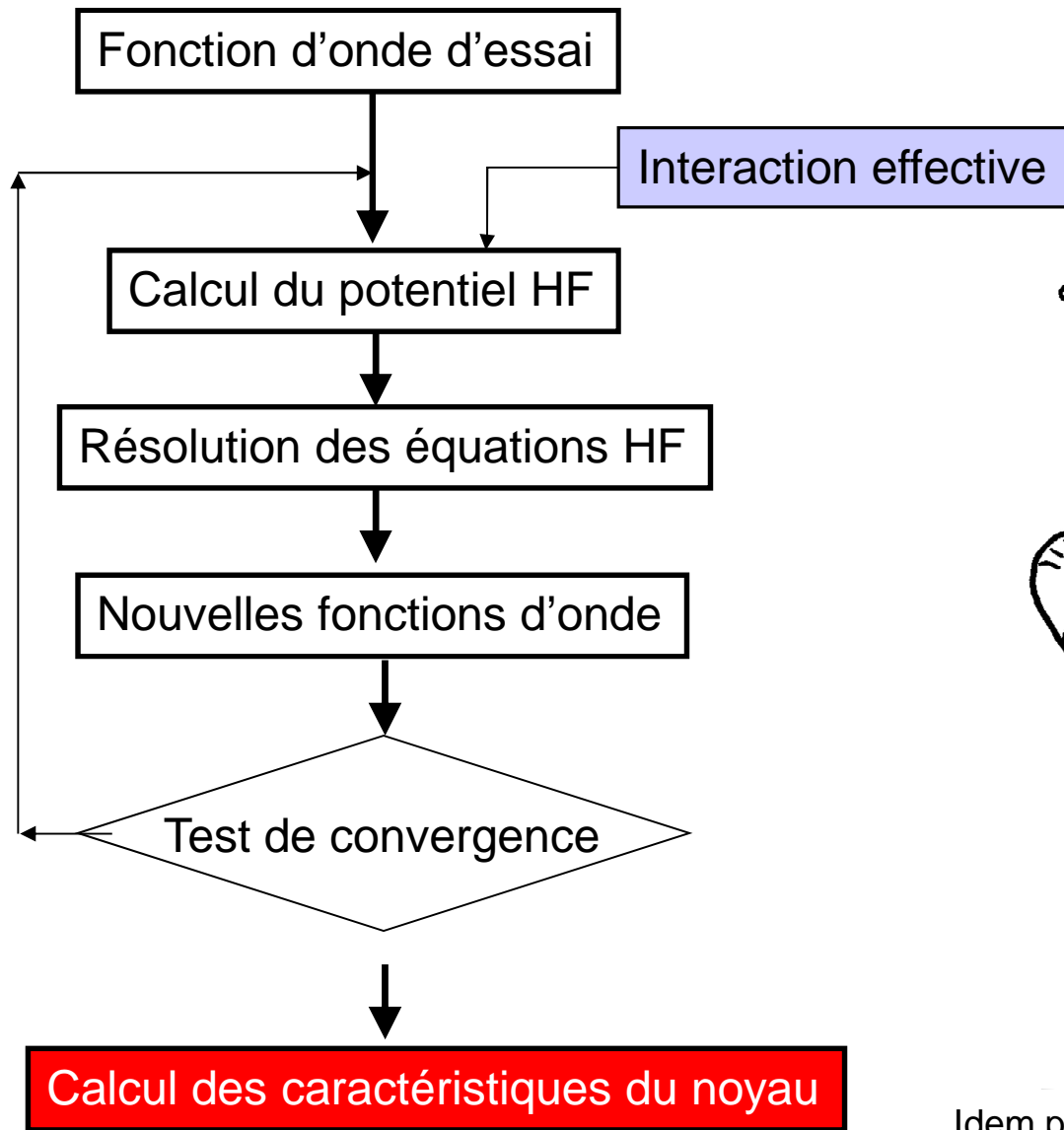
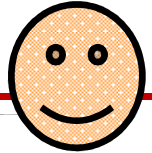
$$\left[\sum_i T_i + \sum_i U_i + \sum_{i<j} v_{ij} \right] \psi = E\psi$$

L'idée est simple, on veut obtenir un potentiel moyen directement à partir de l'interaction effective nucléaire V_{ij} .

MAIS pour cela,
il faut connaître les fonctions d'ondes, donc les solutions, **avant** démarrer le calcul !

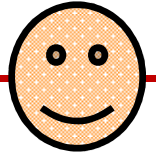
Le problème ne peut être résolu que de manière itérative.

Structure du noyau : approximation du champ moyen



Idem pour HFB avec les corrélations d'appariement en plus

Structure du noyau : approximation du champ moyen



Interaction de Gogny

PAGE DE PUB !

$$v_{12} = \sum_{j=1}^2 \exp \left[- \left(\frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}{p_j} \right)^2 \right] (W_j + B_j P_\sigma - H_j P_\tau - M_j P_\sigma P_\tau)$$

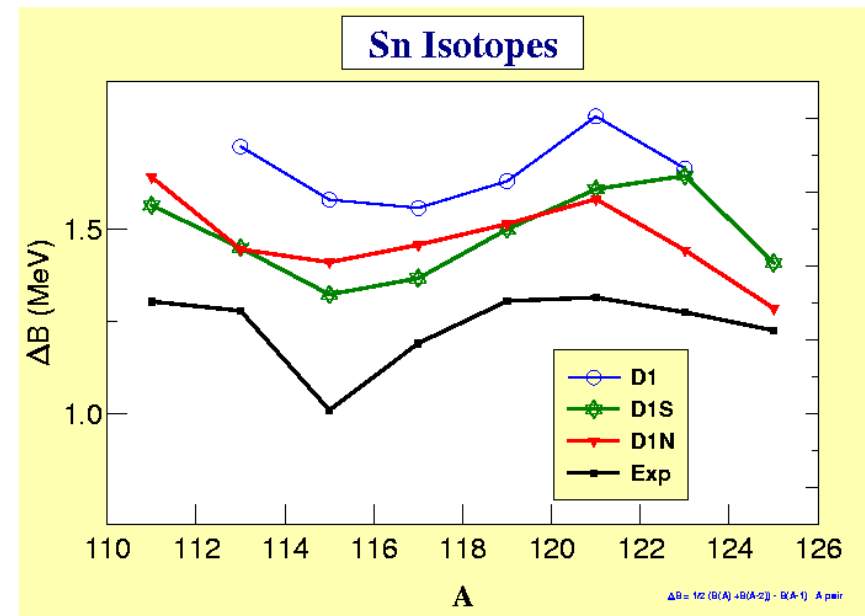
$$+ t_3 (1 + x_0 P_\sigma) \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \rho^\alpha \left(\frac{\vec{r}_1 + \vec{r}_2}{2} \right)$$

$$+ i W_{ls} \vec{\nabla}_{12} \cdot \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \wedge \vec{\nabla}_{12} \cdot (\vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2)$$

$$+ (1 + 2\tau_{1z})(1 + 2\tau_{2z}) \frac{e^2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}$$

P_τ : opérateur d'échange d'isospin
 P_σ : opérateur d'échange de spin

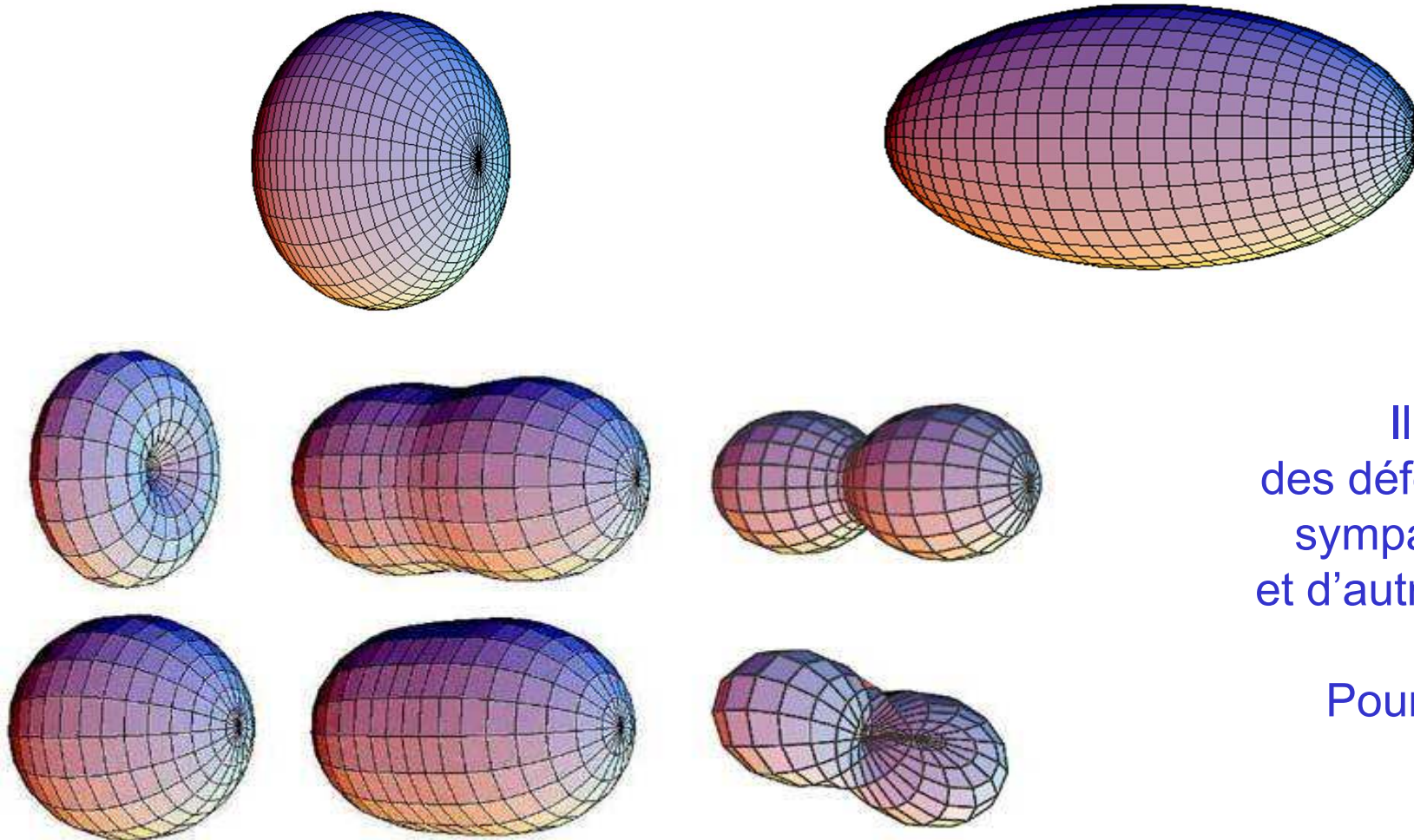
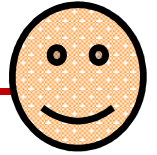
Portées finies pour corrélations d'appariement



Les seules variables du calcul sont Z et N

Des contraintes sur la déformation :

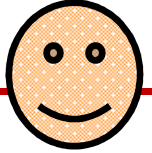
Quelles sont celles le plus souvent utilisées ?



Il y a
des déformations
sympathiques
et d'autres moins.

Pourquoi ?

Déformation contrainte : surfaces d'énergie potentielles.

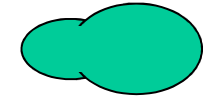


Les déformations pertinentes pour décrire le processus de fission sont :

Elongation

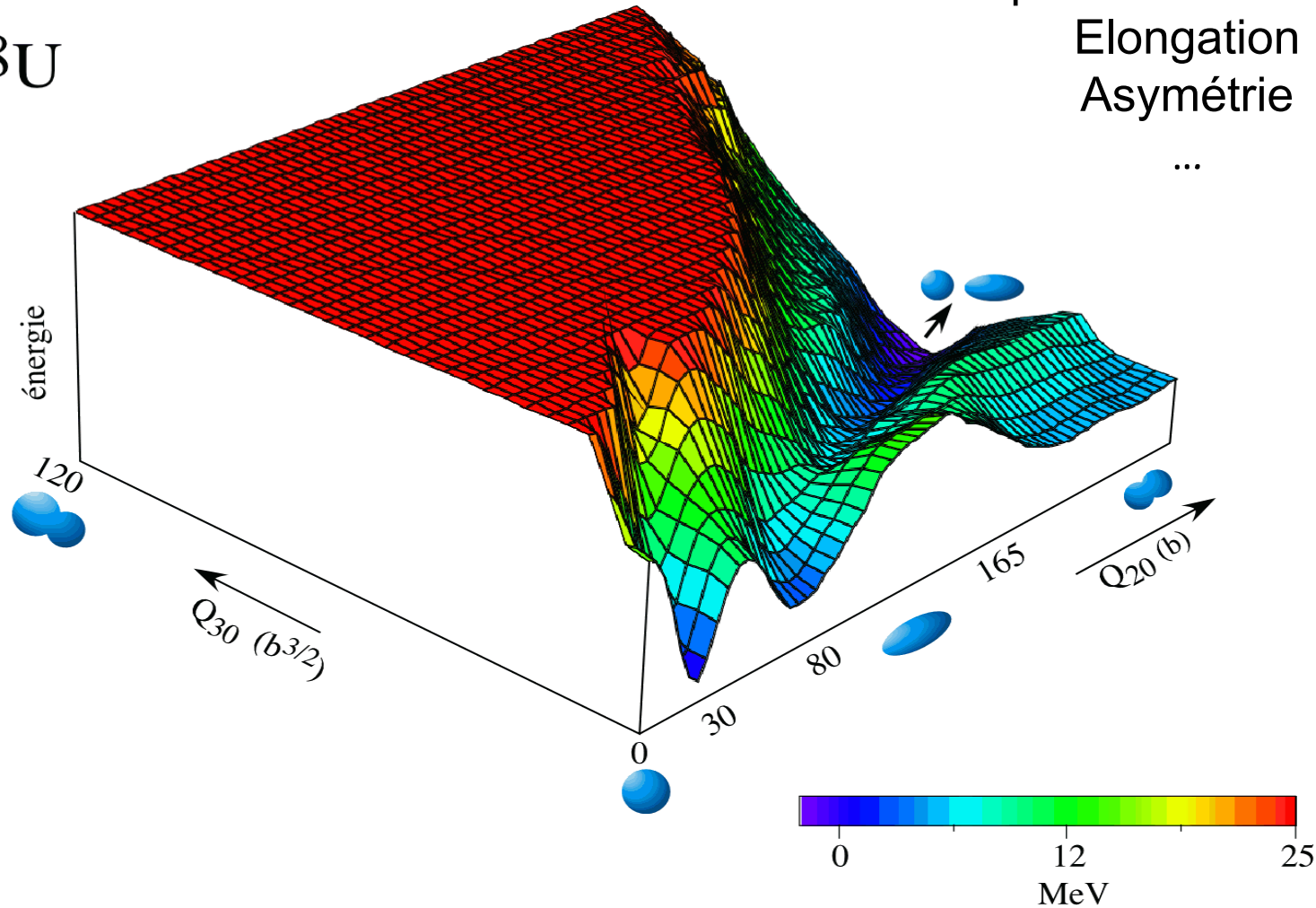


Asymétrie



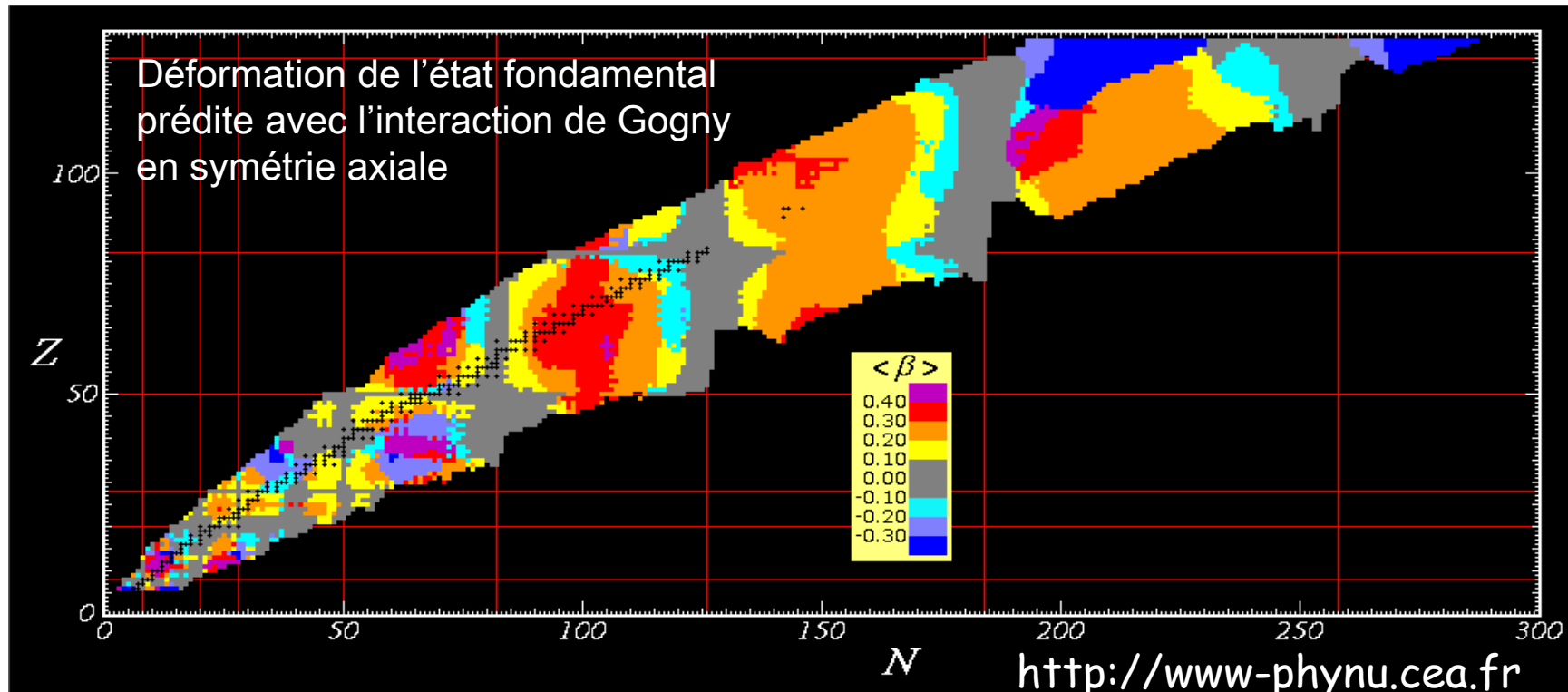
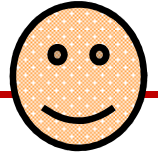
...

^{238}U

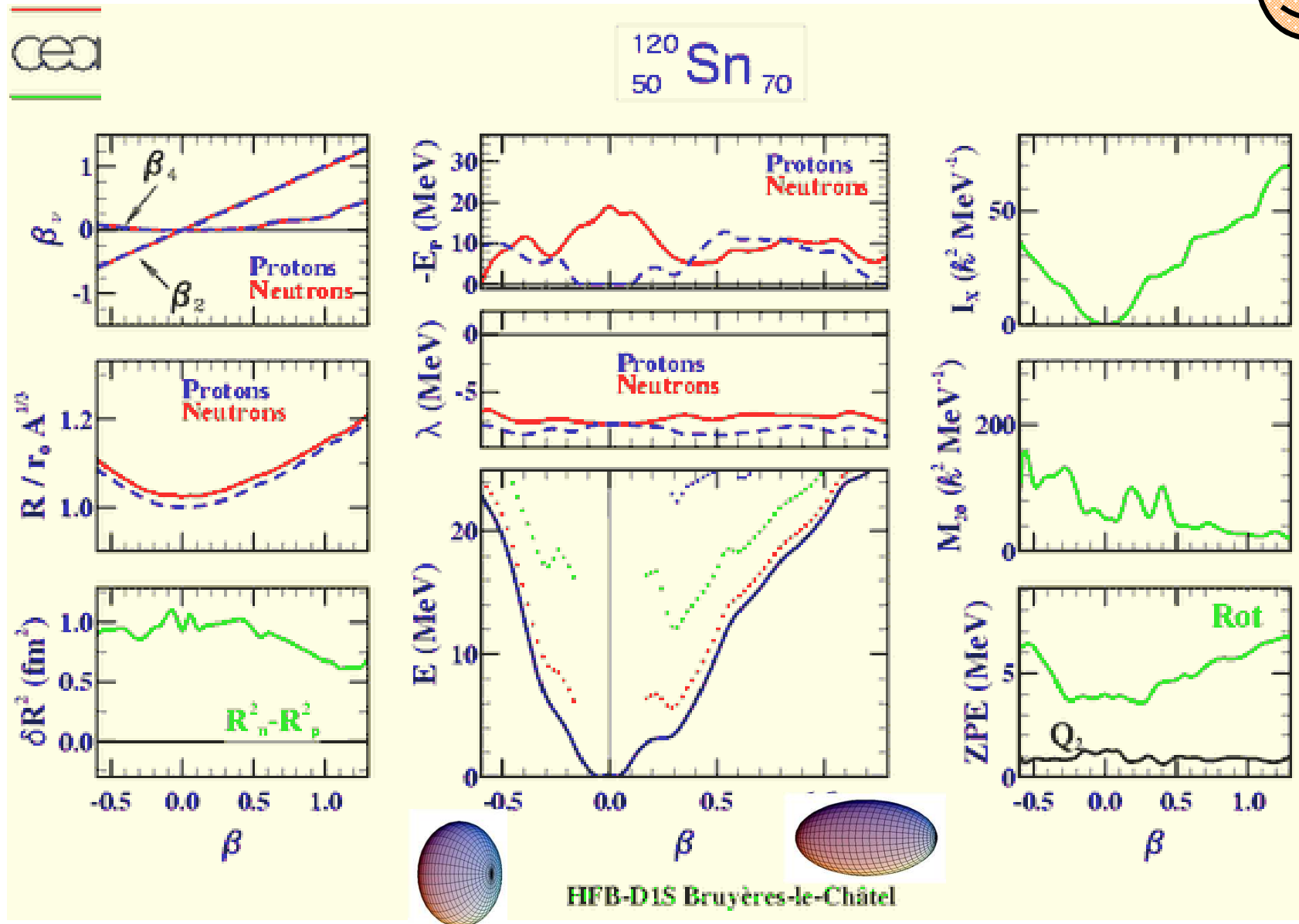
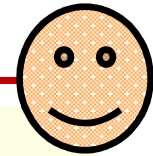


Des contraintes sur la déformation :

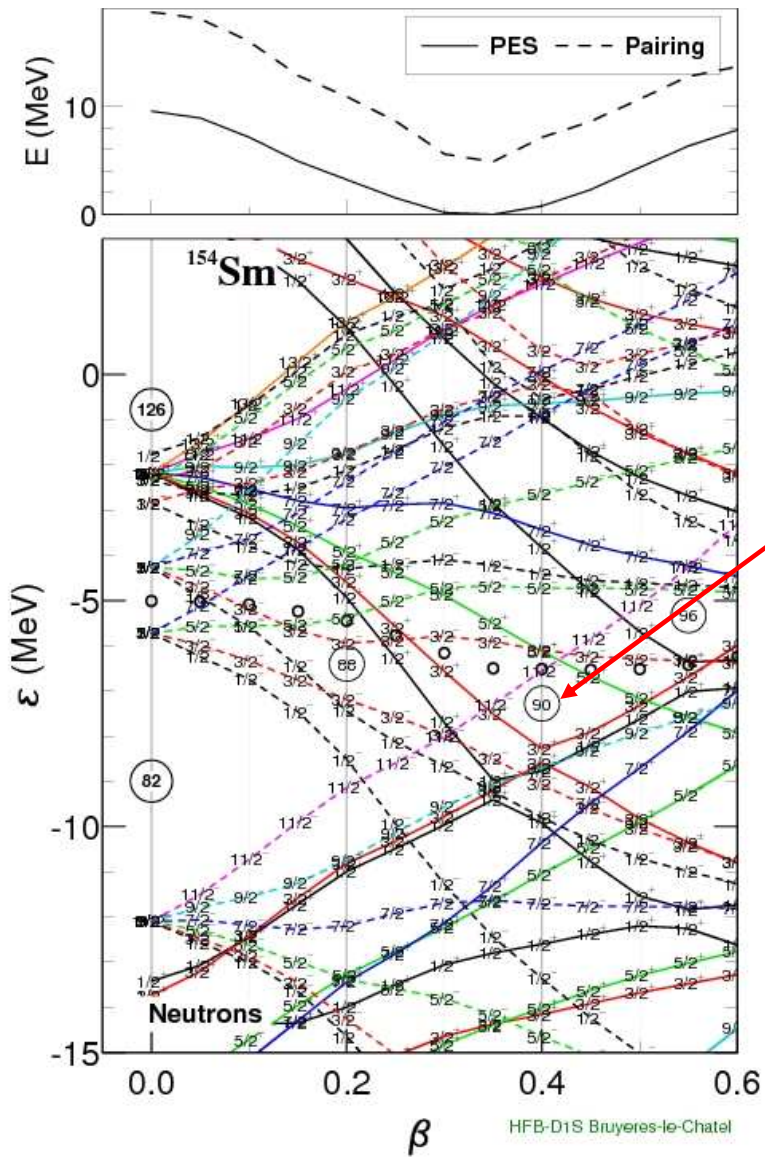
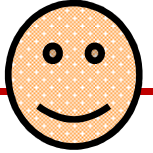
Des « résultats »



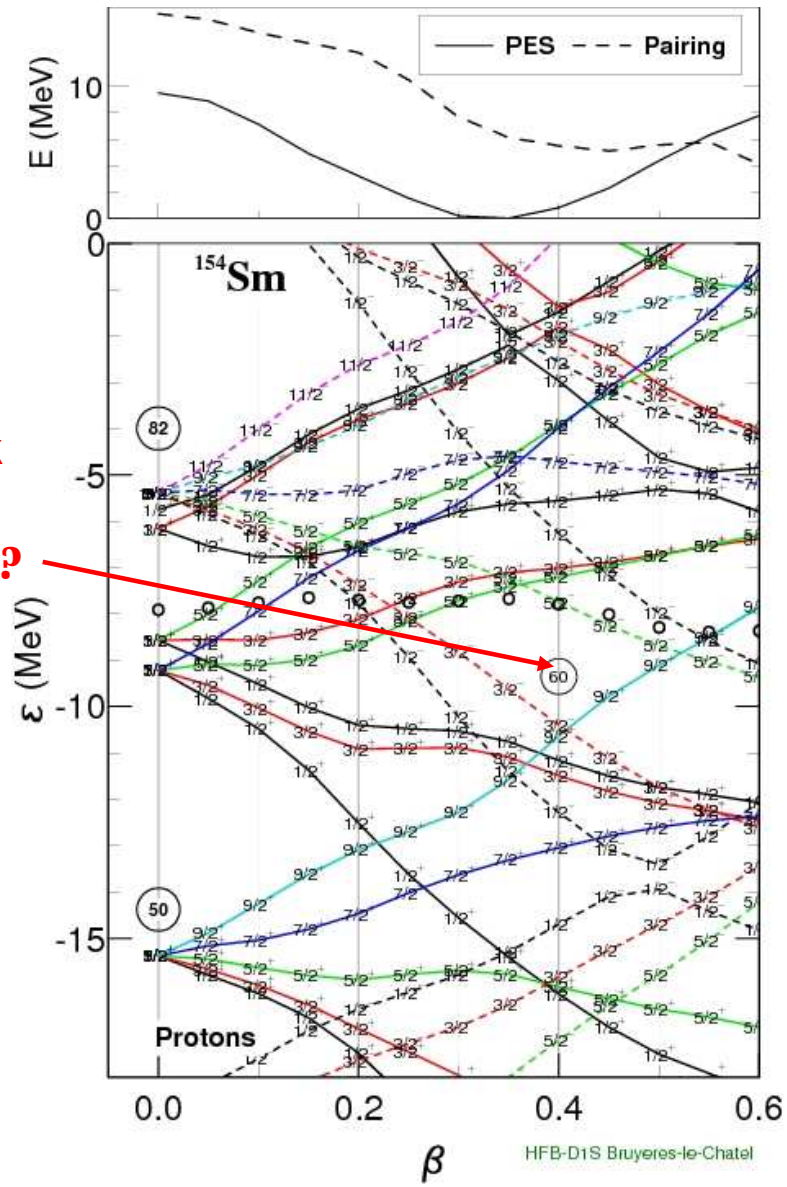
Structure des noyaux : résultats HFB



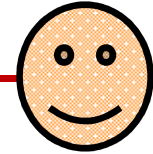
Résultats HFB : schéma de niveau individuels



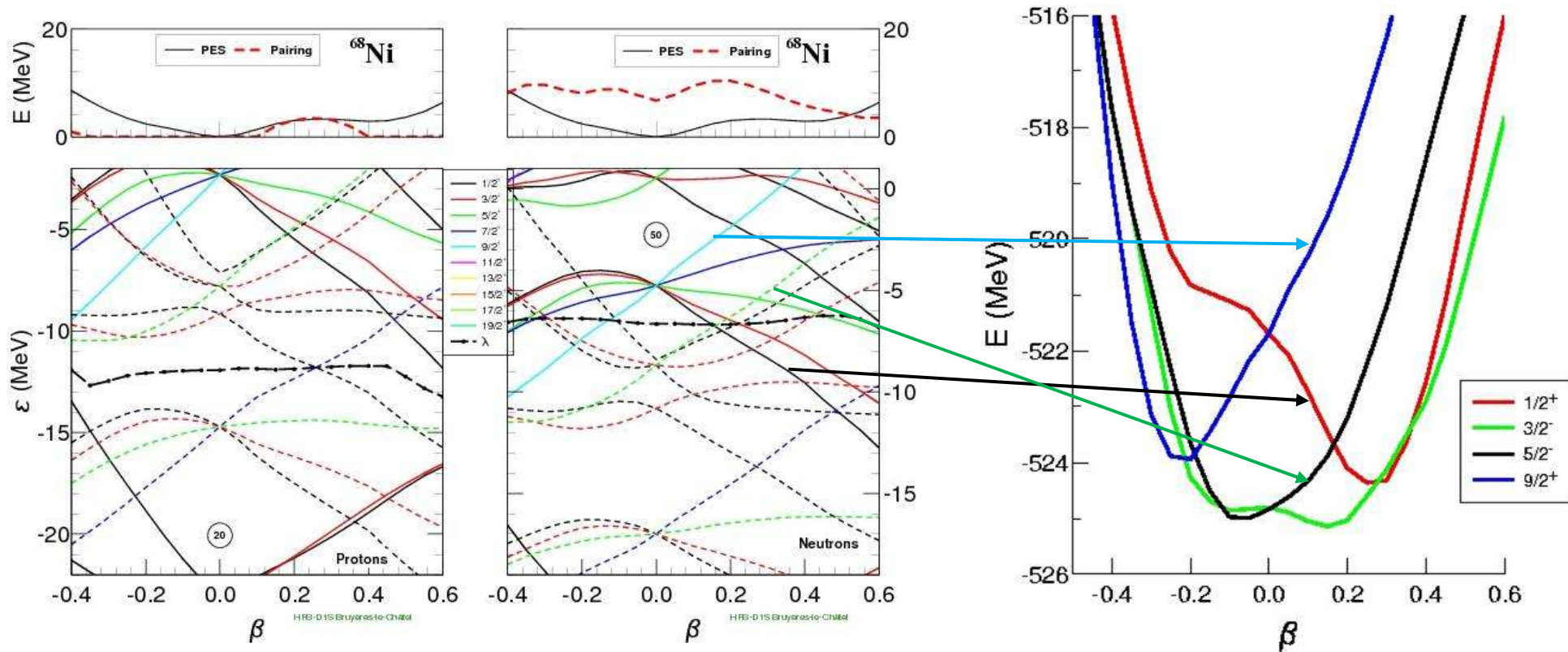
^{154}Sm
 Nouveaux
 nombres
 magiques ?



Structure des noyaux : résultats HFB avec blocking

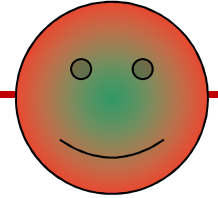


Excitations particule-trou → surfaces à une ou plusieurs « quasi-particules »



Une **quasi-particule** « égale à la fois » une **particule** et un **trou**.
C'est l'objet quantique avec un grand Q comme Quasi-particule.

Structure des noyaux : un peu de dynamique !



Méthodes de champ moyen « statique »

Introduction de plus en plus de corrélations
Deux types d'approche

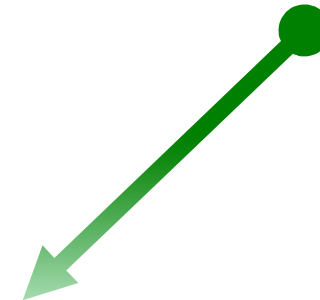
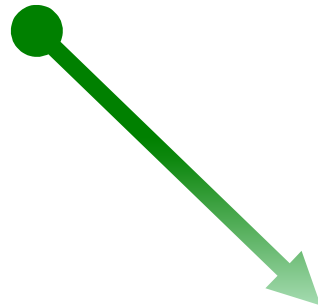


Random Phase Approximation (RPA)

Generator Coordinate Method (GCM)

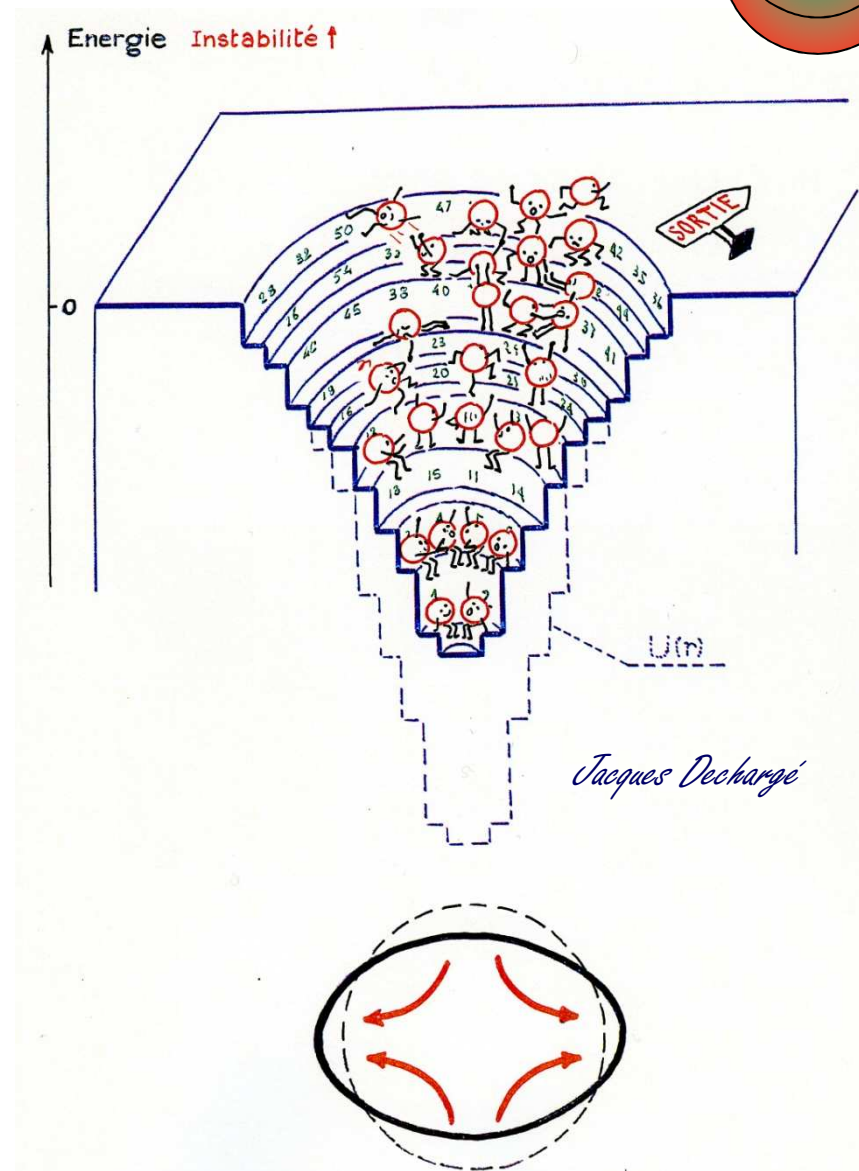
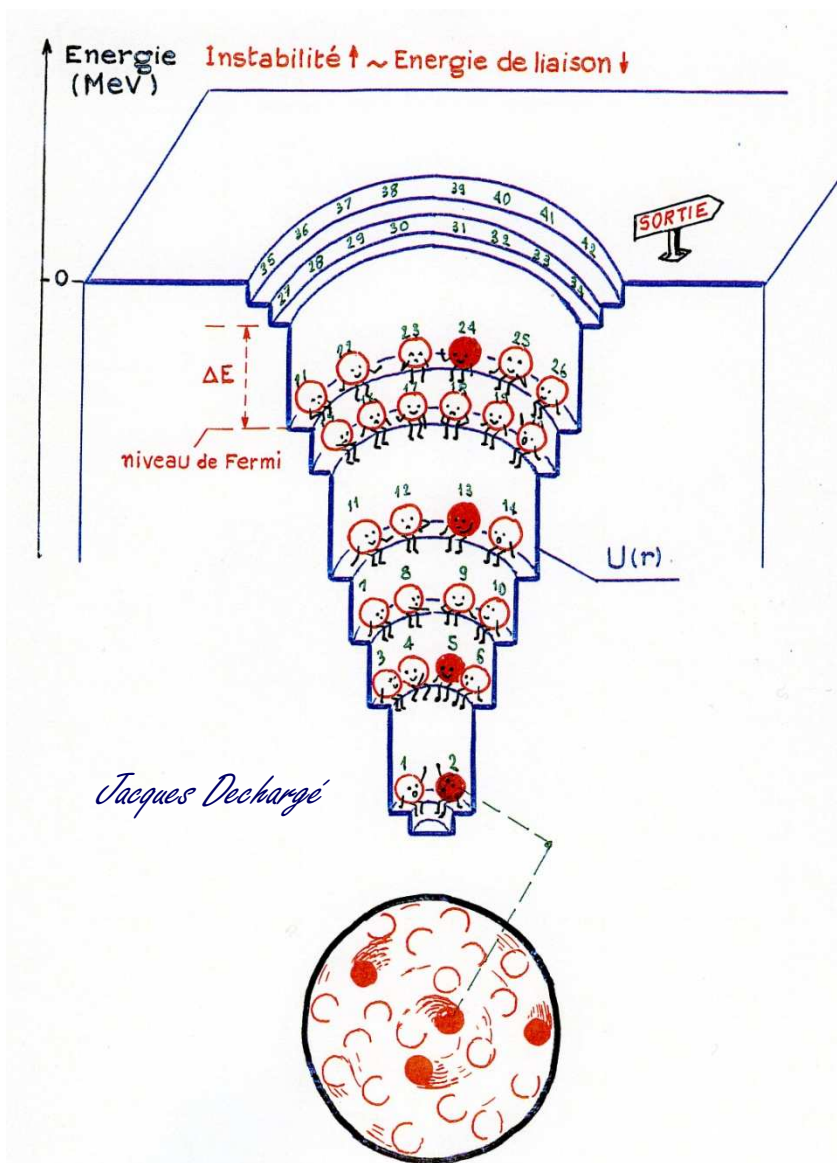
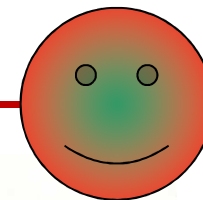
Couplage entre l'état fondamental HF (HFB)
et les excitations particule-trou.

Mixe les états HFB de déformation différentes
Introduction des corrélations
de très grandes amplitudes

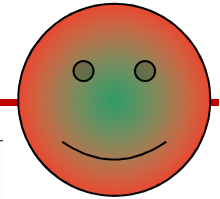


Ajoute des corrélations dans l'état fondamental
Décrit les états excités
collectifs et individuels (seulement pour RPA).

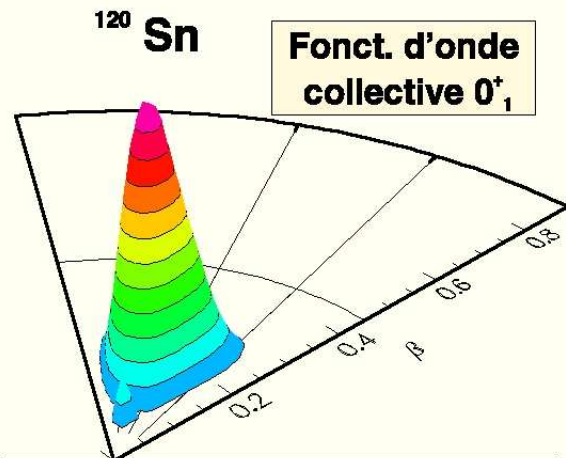
Structure des noyaux : un peu de dynamique !



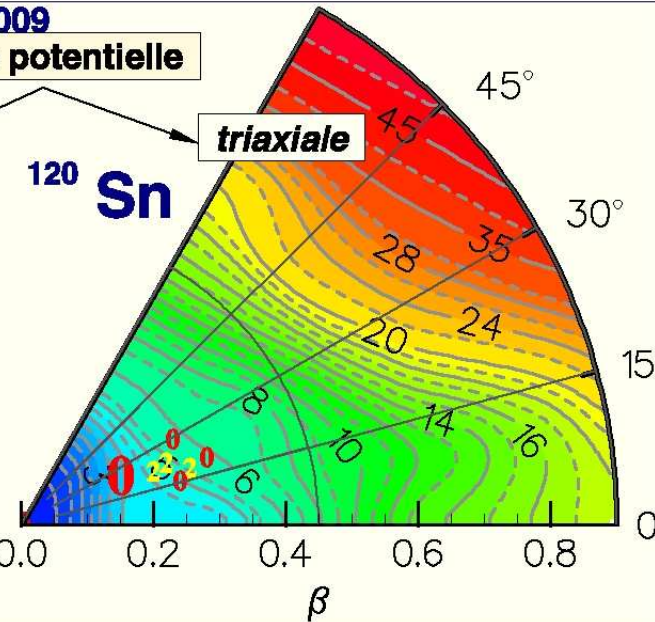
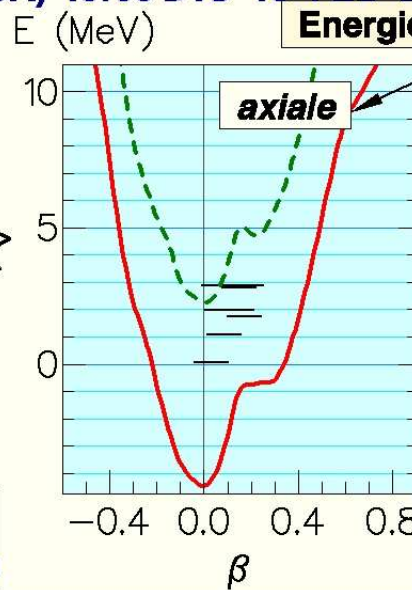
Au-delà du champ moyen avec ... la GCM



Bruyères-le-Châtel HFB+GCM(GOA) force D1S 19-FEB-2009



$B_{Exp} = 1020.5 \text{ MeV}$
 $B_{TH} = 1019.4 \text{ MeV}$ $R_c = 4.658 \text{ fm}$



$E_x \text{ (MeV)} \langle \beta \rangle$

0⁺ — 3.52 0.3

0⁺ — 2.88 0.26

2⁺ — 2.76 0.27

3⁺ — 2.88 0.26

4⁺ — 2.84 0.26

6⁺ — 2.82 0.27

0⁺ — 1.68 0.25

2⁺ — 1.93 0.24

4⁺ — 1.92 0.25

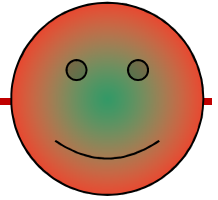
2⁺ — 1.04 0.22

0⁺ — 0.00 0.17

(GCM+GOA ← 2 vibr. + 3 rot.)
= 5 Dimension Collective Hamiltonian
5DCH

P r e m i e r s é t a t s c o l l e c t i f s

Au-delà du champ moyen avec ... la RPA

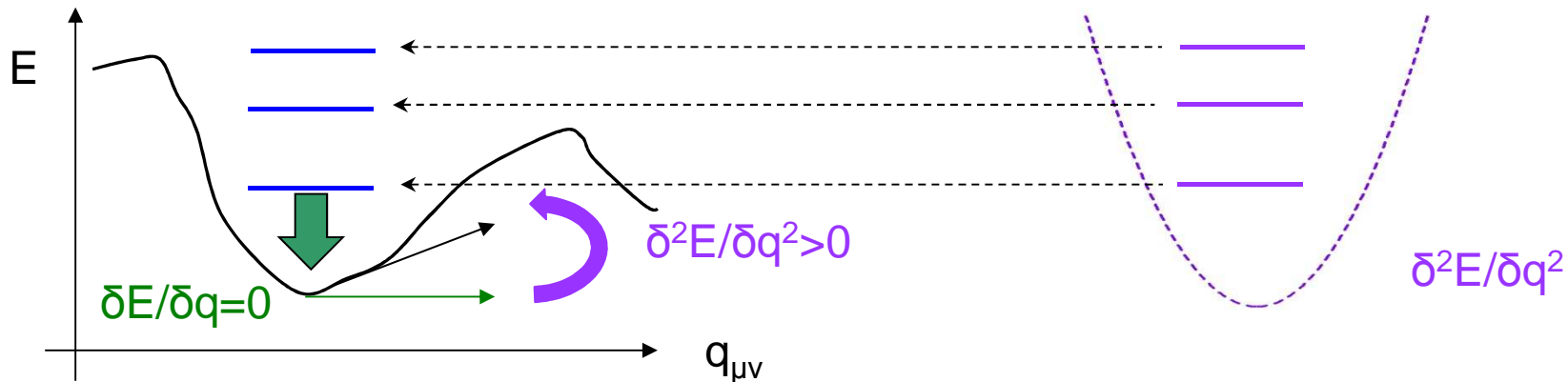


En QRPA,

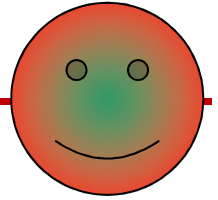
les états excités du noyaux sont décrits par des états cohérents,
des combinaisons linéaires d'excitations individuelles de type « particule-trou ».

Ceci permet de décrire les états collectifs et les états individuels,
les états de basse énergie et les résonances géantes

A l'approximation de faible amplitude , i.e. pour des noyaux « harmoniques »

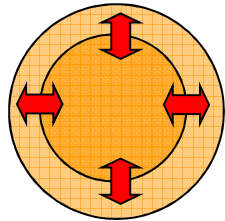


Au-delà du champ moyen avec ... la RPA



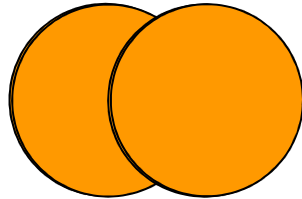
Les résonances géantes sont reliées aux propriétés de la matière nucléaire et interviennent dans les processus de réaction.

Monopole



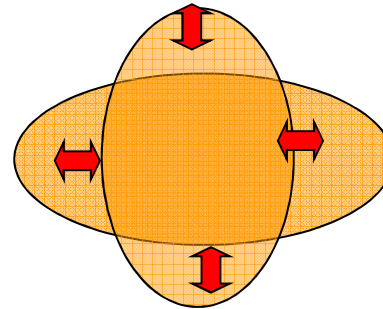
IS GMR

Dipole



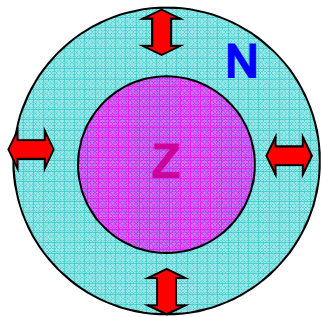
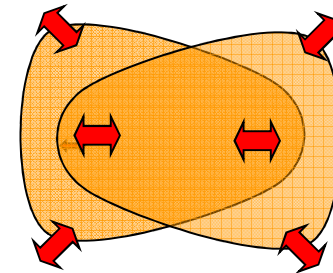
spurious state

Quadripole

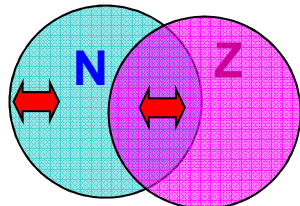


GQR

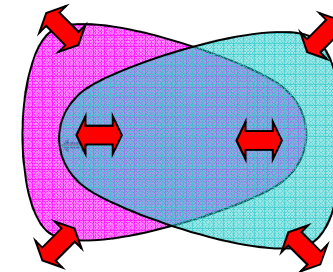
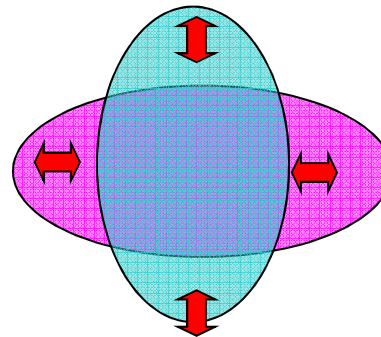
Octupole



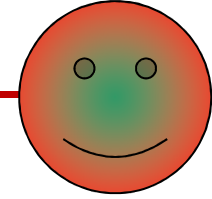
IV GMR



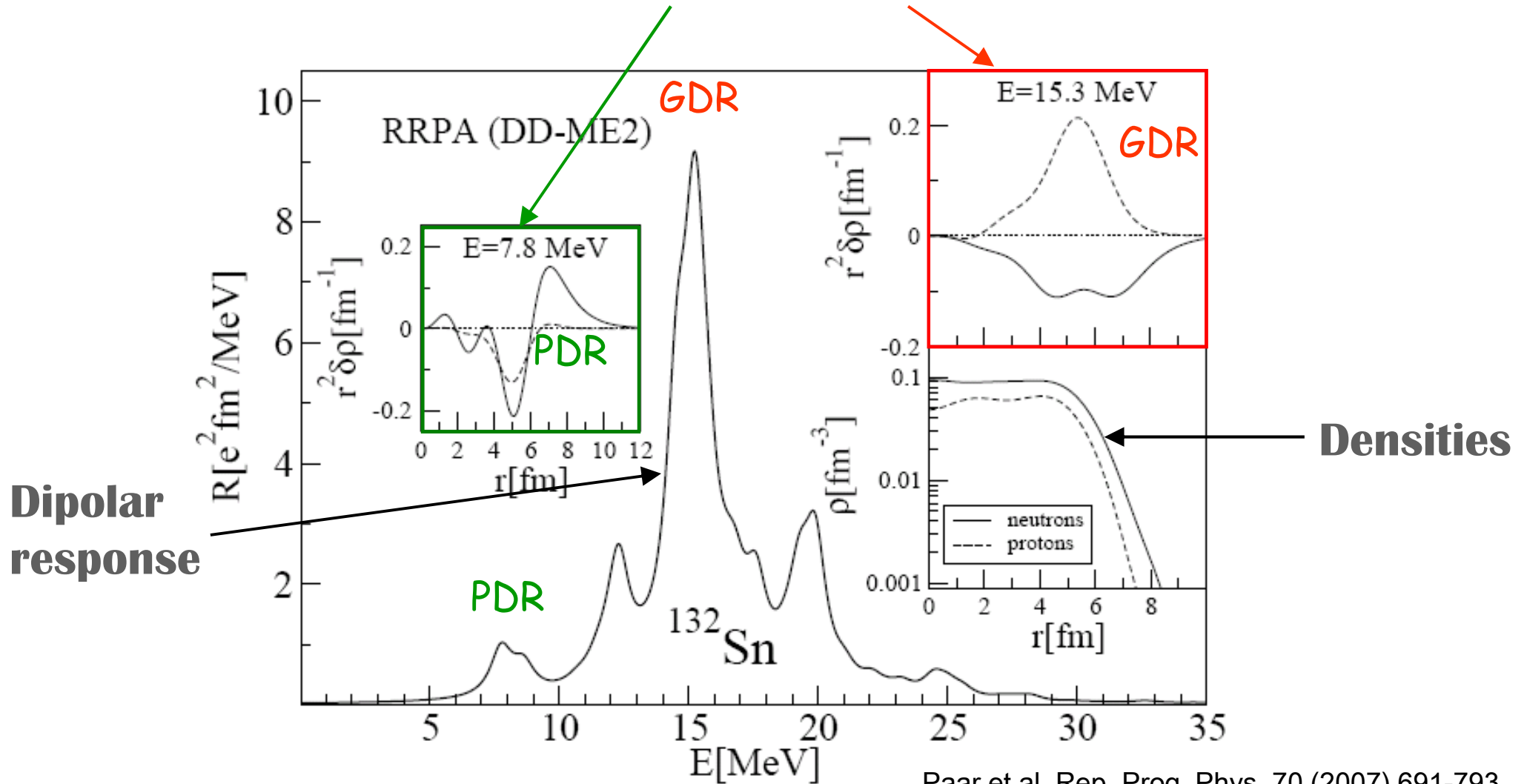
IV GDR



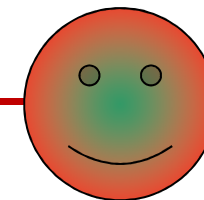
Au-delà du champ moyen avec ... la RPA



Transition densities



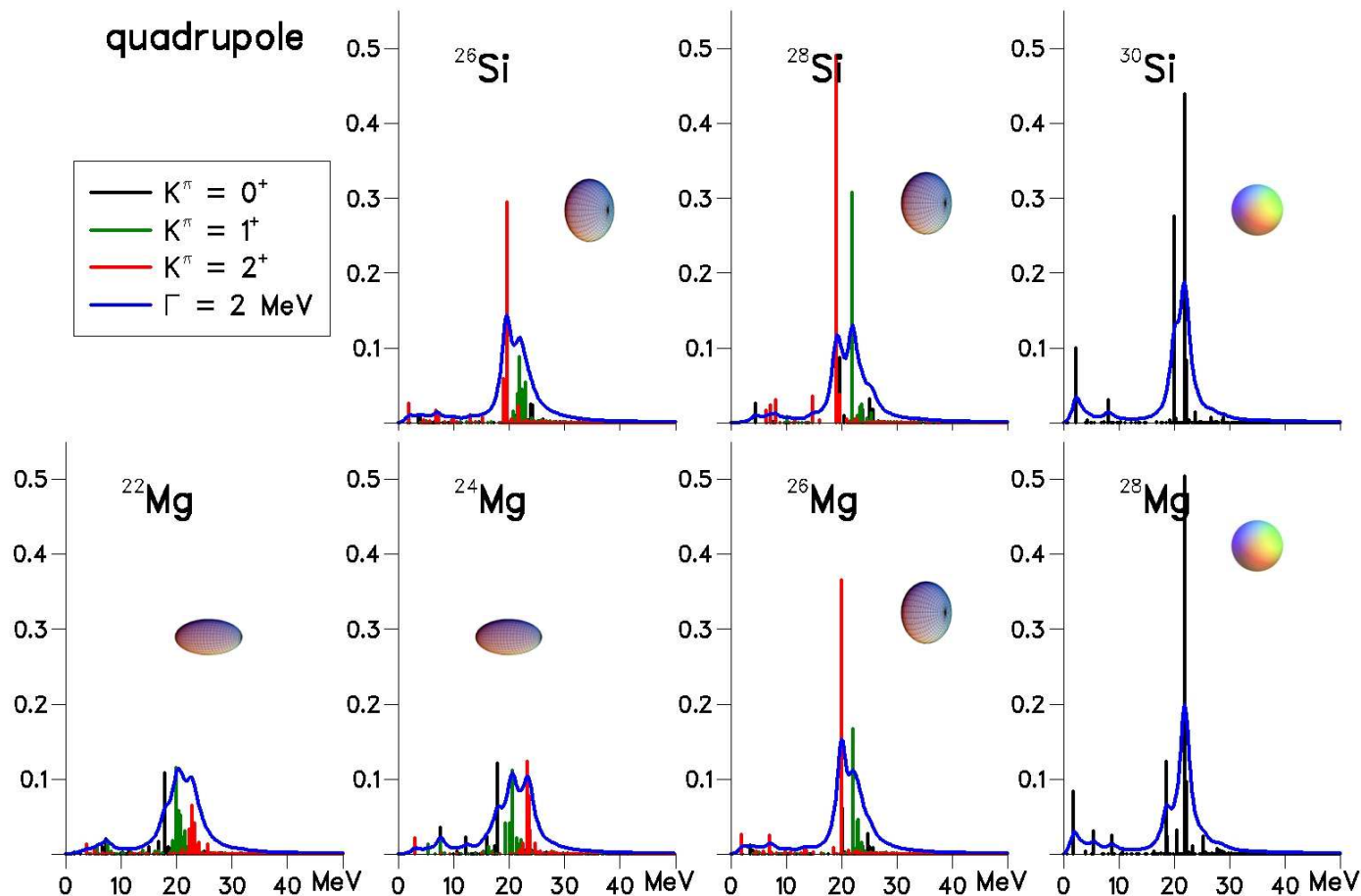
Au-delà du champ moyen avec ... la RPA



PHYSICAL REVIEW C 77, 044313 (2008)

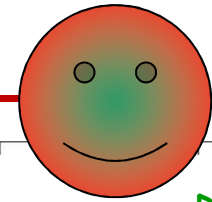
Role of deformation on giant resonances within the quasiparticle random-phase approximation and the Gogny force

S. Péru* and H. Goutte



Pour les noyaux déformés, il manque des états ...rotationnels

Excitations électromagnétiques dans l' ^{238}U



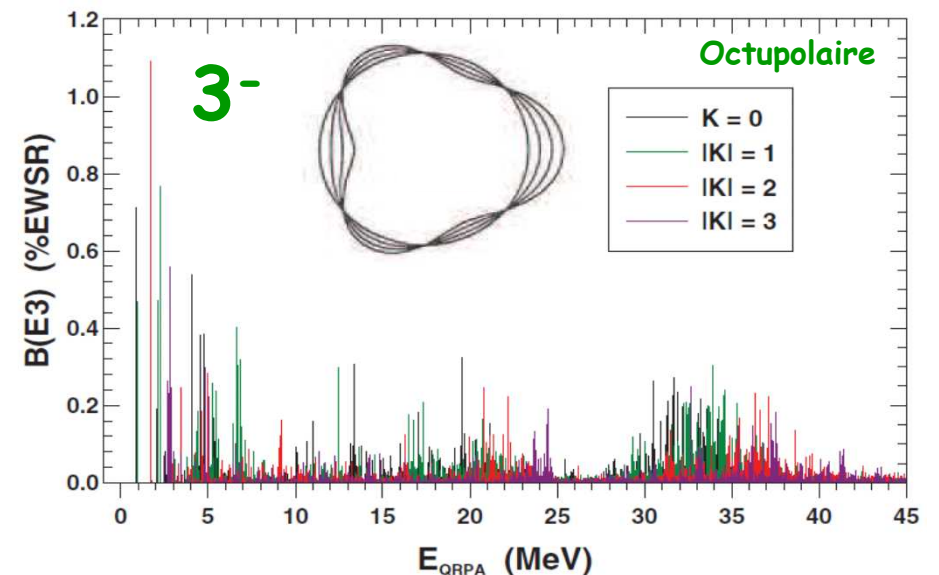
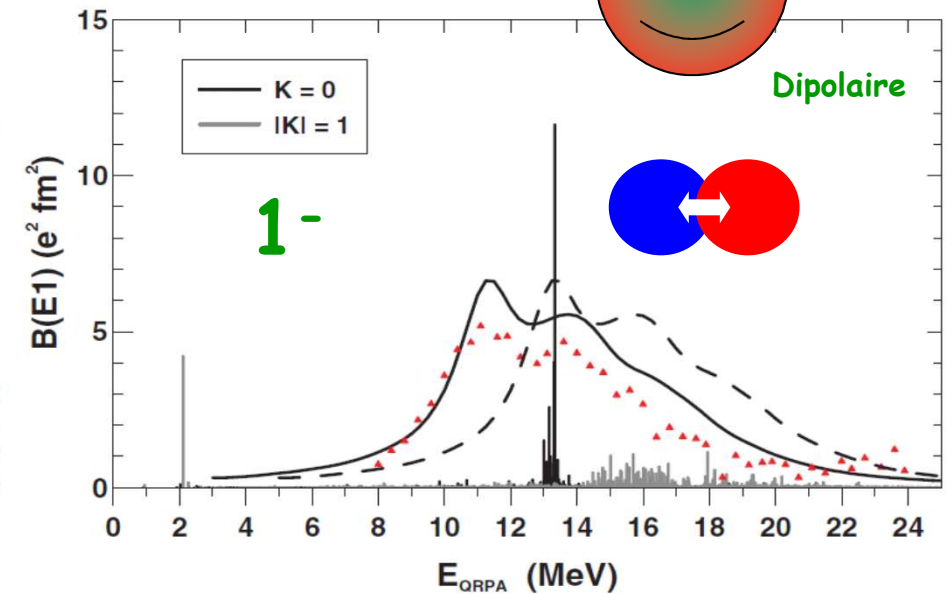
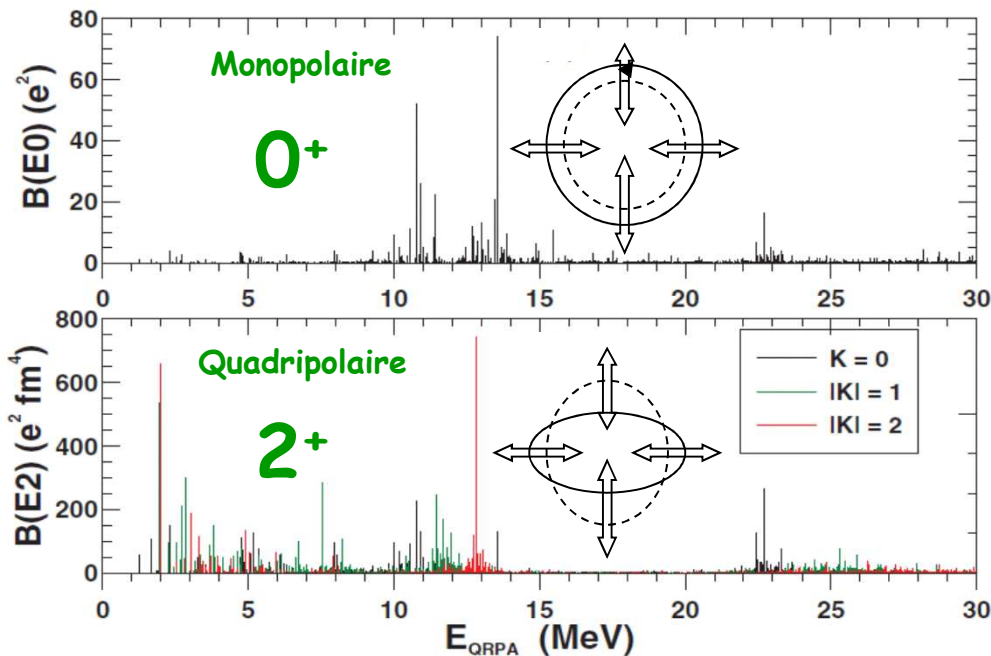
PHYSICAL REVIEW C 83, 014314 (2011)

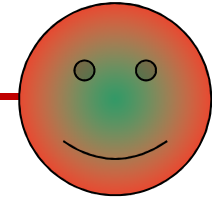
Giant resonances in ^{238}U within the quasiparticle random-phase approximation with the Gogny force

S. Péru,^{1,*} G. Gosselin,¹ M. Martini,¹ M. Dupuis,¹ S. Hilaire,¹ and J.-C. Devaux²

Plus de 716800 heures (~82 ans) de calcul réparties sur 256 et 512 proc.

Grand Challenge ASIMOV



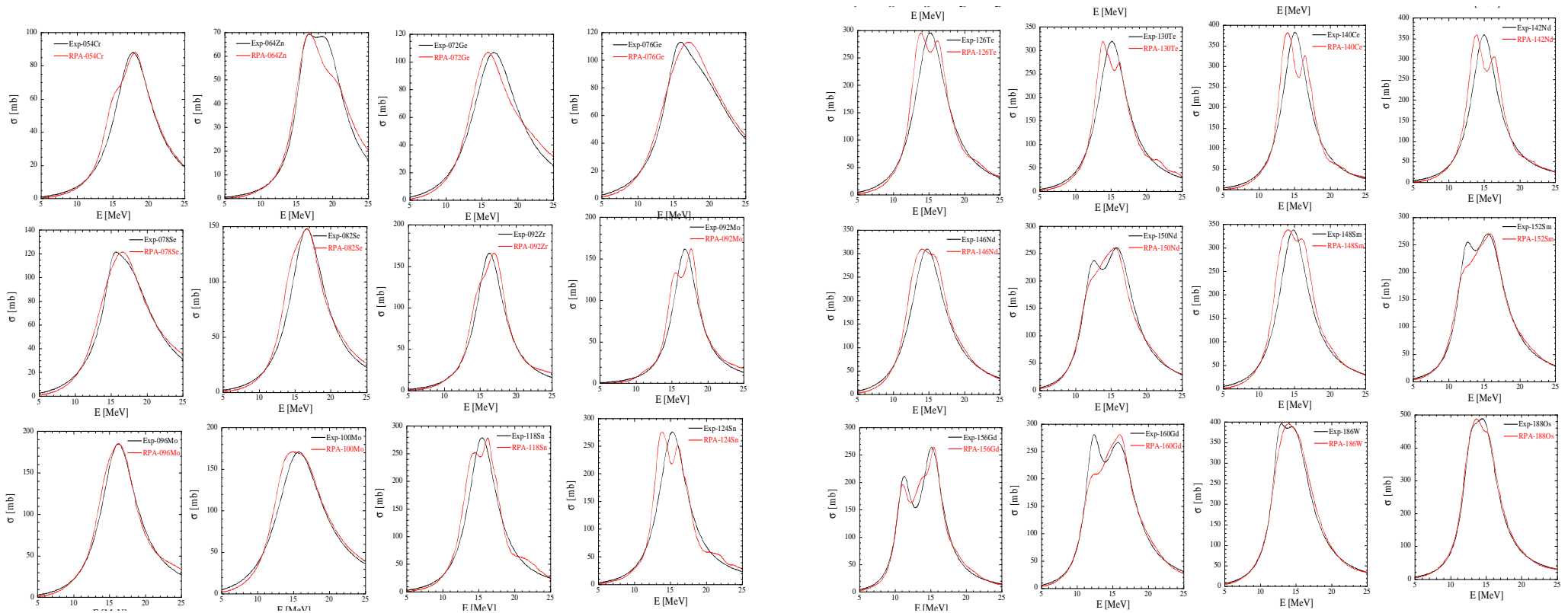


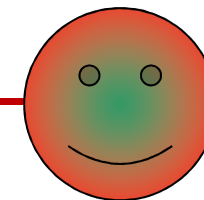
Large scale QRPA calculations for dipole excitations based on a Gogny force

Marco Martini^{1,2}, Stéphane Goriely¹, Stéphane Hilaire², Sophie Péru²

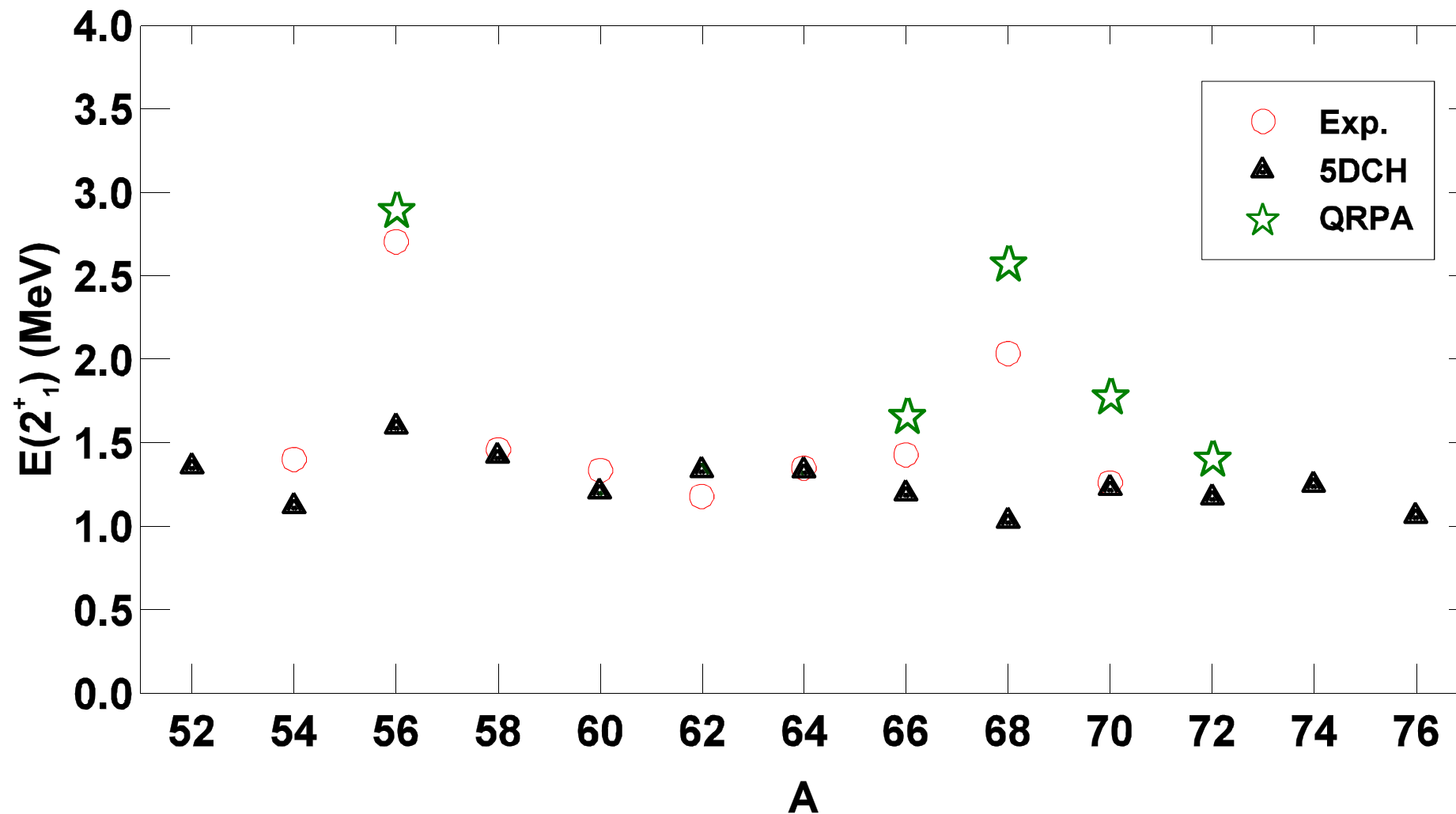
¹Institut d'Astronomie et d'Astrophysique, ULB, CP226, 1050 Brussels, Belgium

²CEA/DAM/DIF, 91297 Arpajon, France



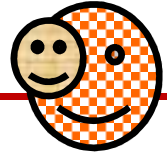


Isotopes du Ni



S. Péru, AIPS Conference proceedings No. 1165, NSD09, (Melville, New York, 2009), p165

... Au delà de la structure :



³⁶S

HFB+5DCH

$E(2^+_{1}) = 2.34 \text{ MeV}$

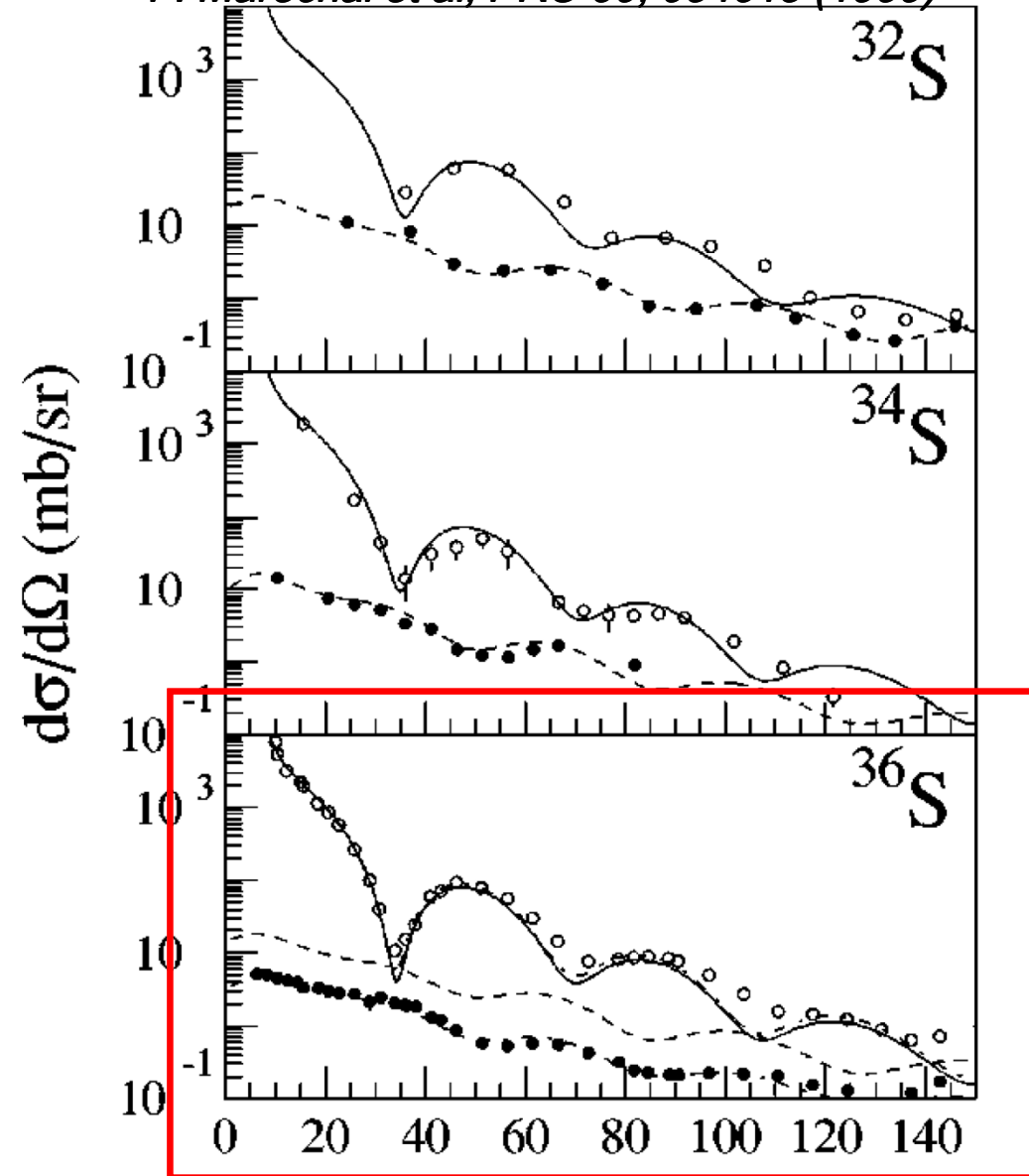
$B(E2) = 375 \text{ e}^2\text{fm}^4$

Exp

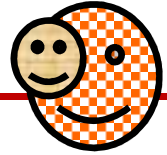
$E(2^+_{1}) = 3.29 \text{ MeV}$

$B(E2) = 100 \text{ e}^2\text{fm}^4$

F. Marechal et al, PRC 60, 034615 (1999)



... Au delà de la structure :



^{36}S

HFB+5DCH

$E(2^+_1) = 2.34 \text{ MeV}$

$B(E2) = 375 \text{ e}^2\text{fm}^4$

HFB+QRPA

$E(2^+_1) = 3.29 \text{ MeV}$

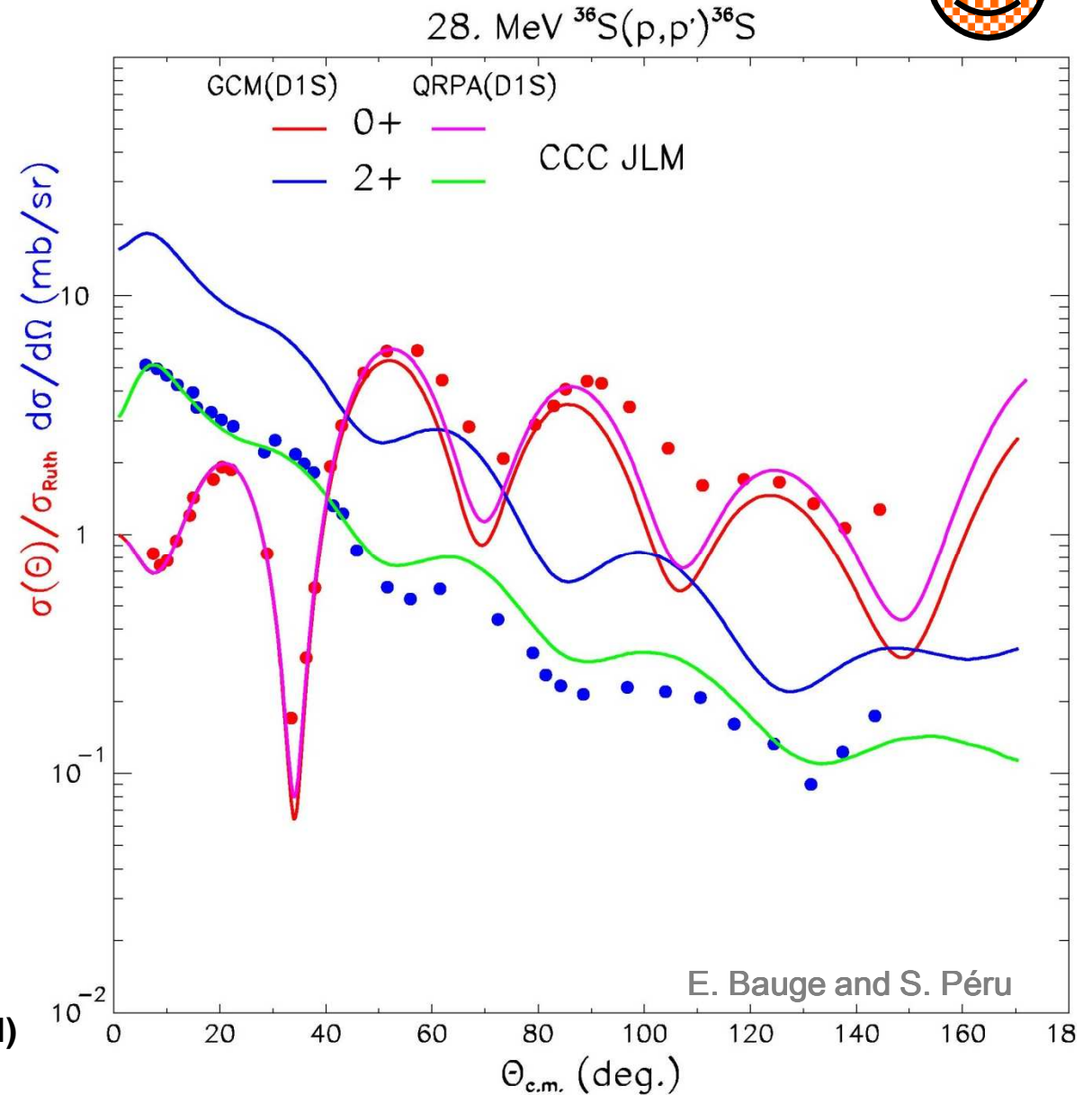
$B(E2) = 139.7 \text{ e}^2\text{fm}^4$

Exp

$E(2^+_1) = 3.29 \text{ MeV}$

$B(E2) = 100 \text{ e}^2\text{fm}^4$

Test des fonctions d'onde QRPA et 5DCH (GCM) dans les études de diffusion inélastiques ...



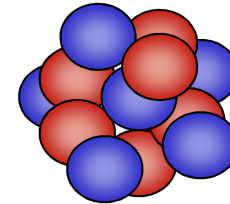
Comment modéliser le noyau ?



- Description macroscopique du noyau : Le modèle de la goutte liquide



- Nécessité d'une description microscopique: les ingrédients fondamentaux sont les nucléons présents dans le noyau et l'interaction entre eux.



- Différentes approches microscopiques: Modèle en couches, approximation du champ moyen et au-delà ...



- Plusieurs noyaux sont déformés dans leur état fondamental et la spectroscopie dépend beaucoup de cette déformation.

- On obtient une description du processus de fission.

- MAIS, c'est pas fini ! Beaucoup de travail reste à faire.

- Les modèles de réactions ont besoin d'une bonne description de la structure de la cible et du projectile.

La $\Phi\nu$

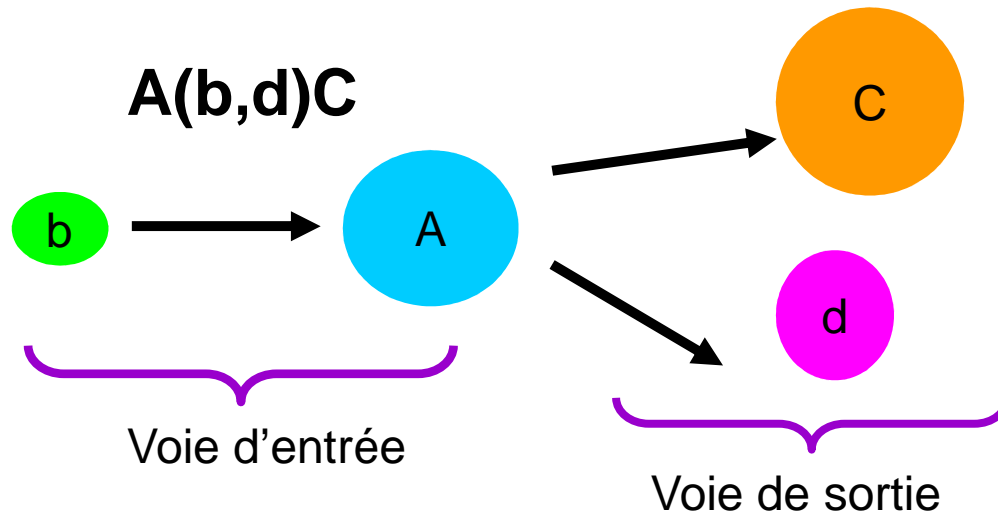
Comment étudier le noyau ?



Comment étudier un noyau expérimentalement ?



Rappel : les réactions nucléaires.



Cas particuliers :

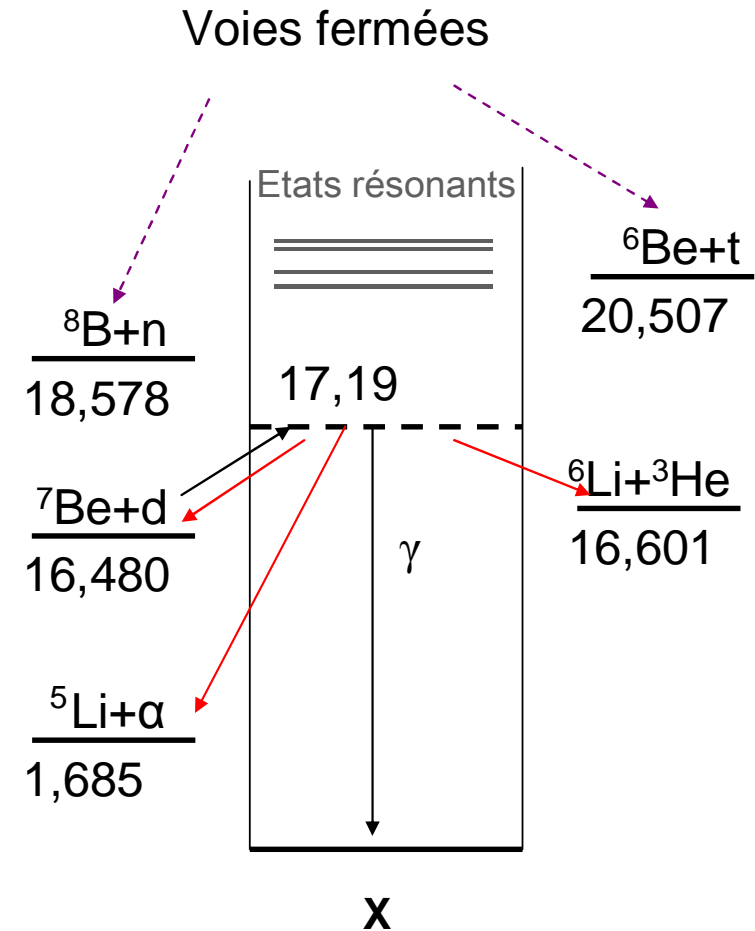
Photo-nucléaire $A(\gamma, b)B$

Capture radiative $A(a, \gamma)B$

Diffusion élastique $A(a, a)A$

Diffusion inélastique $A(a, a')A^*$

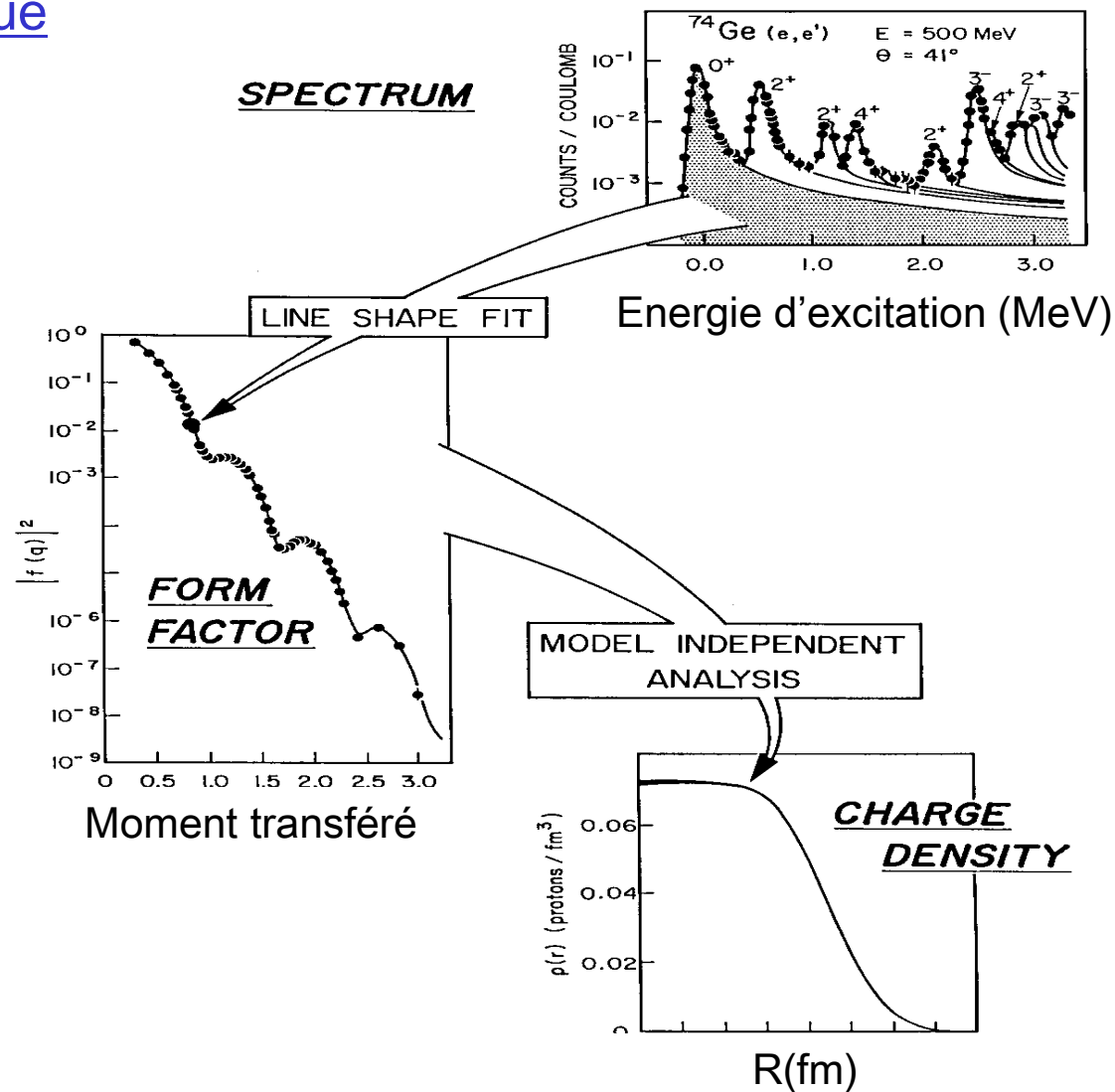
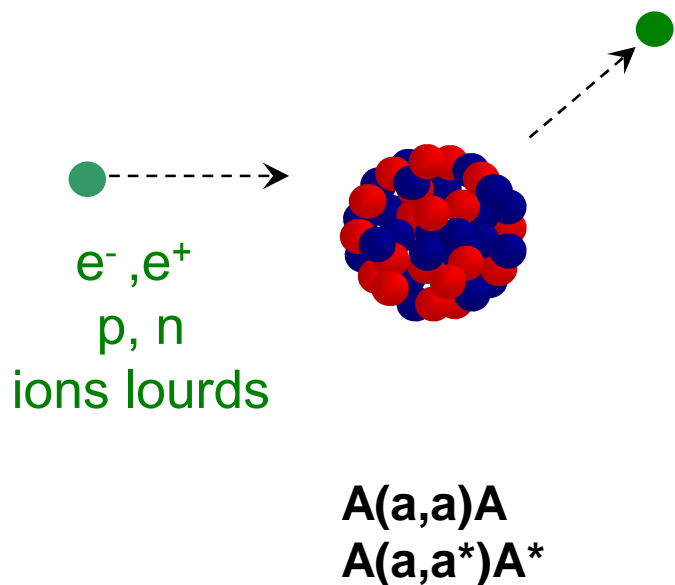
Réaction (de réarrangement) $a \neq b$ et $A \neq B$



Comment étudier un noyau expérimentalement ?



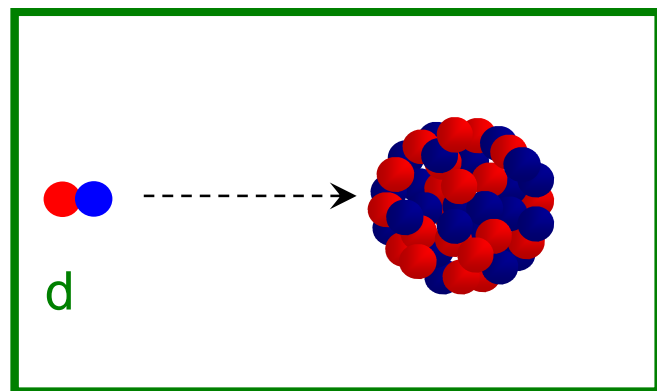
I) Diffusion élastique et inélastique



Comment étudier un noyau expérimentalement ?

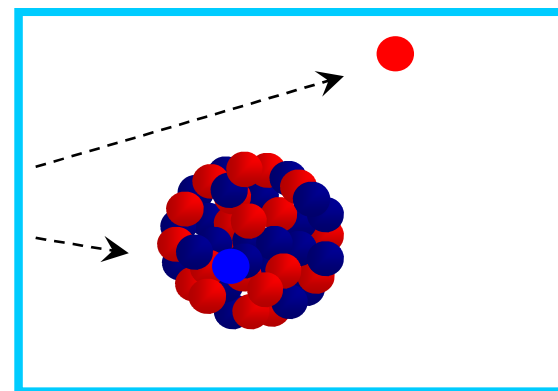


II) Réactions de transfert



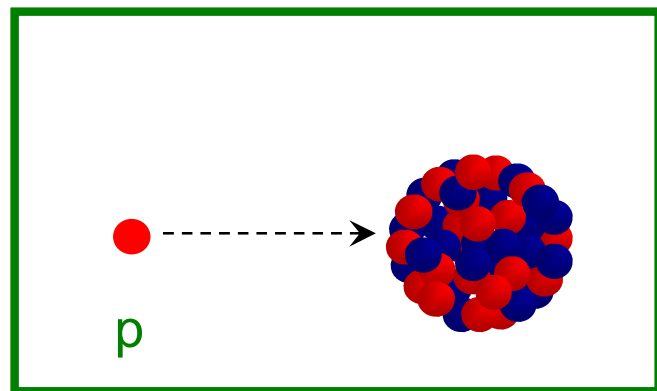
Voie d'entrée

(d,p)
.....

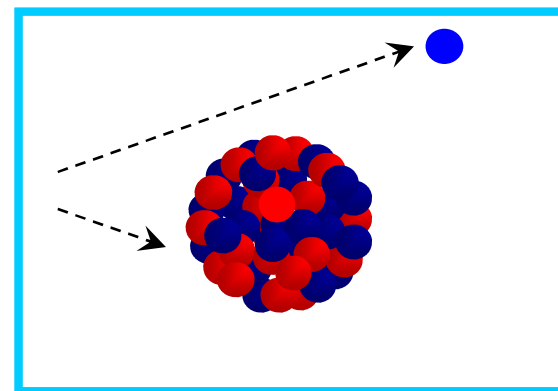


Voie de sortie

$A \rightarrow A+1$
 $N \rightarrow N+1$



(p,n)
.....



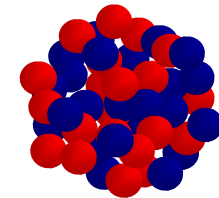
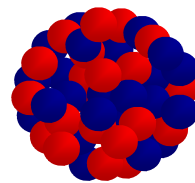
$Z \rightarrow Z+1$
 $N \rightarrow N-1$

Comment étudier un noyau expérimentalement ?

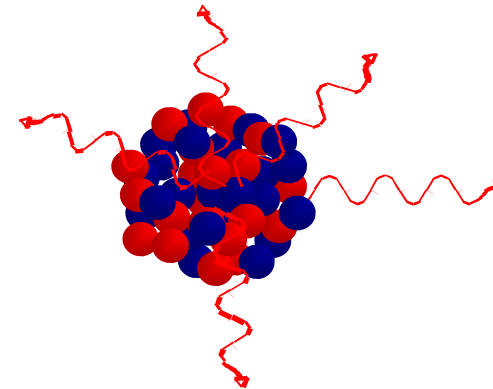


III) Spectroscopie Gamma

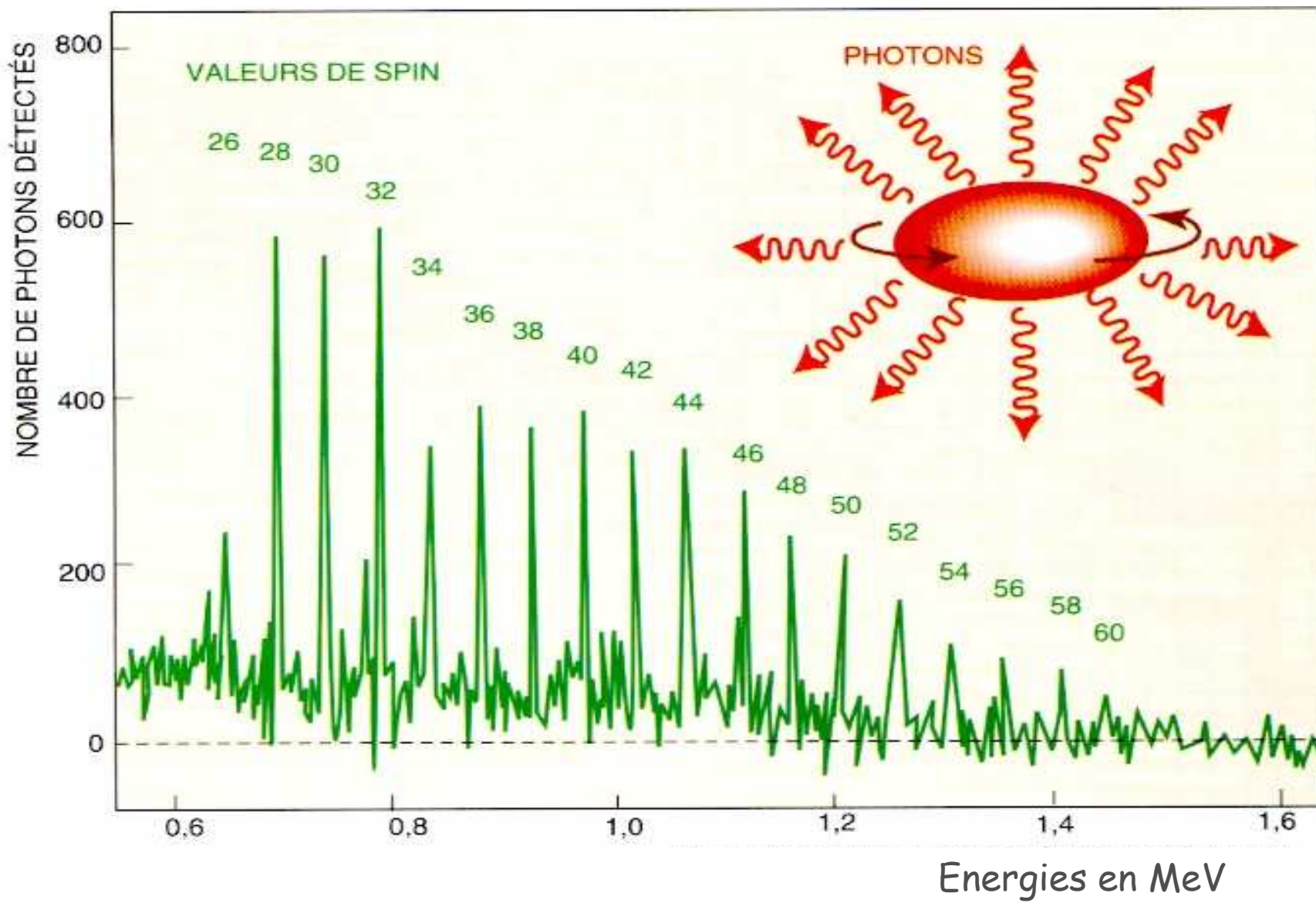
1) On excite le noyau
Ou bien on le produit dans un état excité
(par exemple les fragments de fission)



2) On observe sa décroissance



Observer le noyau



Observer le noyau et le comprendre

Il faut des détecteurs...

Il faut une réaction ou une excitation initiale

Il faut produire le noyau ... qu'il soit stable ou exotique

Les grandeurs observées sont des données nucléaires.

Les données doivent être comparées aux modèles.

Les modèles permettent d'interpréter les résultats expérimentaux.

Parfois les résultats expérimentaux infirment les modèles.

alors, il faut faire évoluer les modèles !

Ok ! mais dans quelles directions ?