

Quels degrés de liberté pour quels phénomènes ?

Un exemple : La coexistence de formes par les méthodes  
au-delà du champ moyen

*Part 1 : Par l'expérience*



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

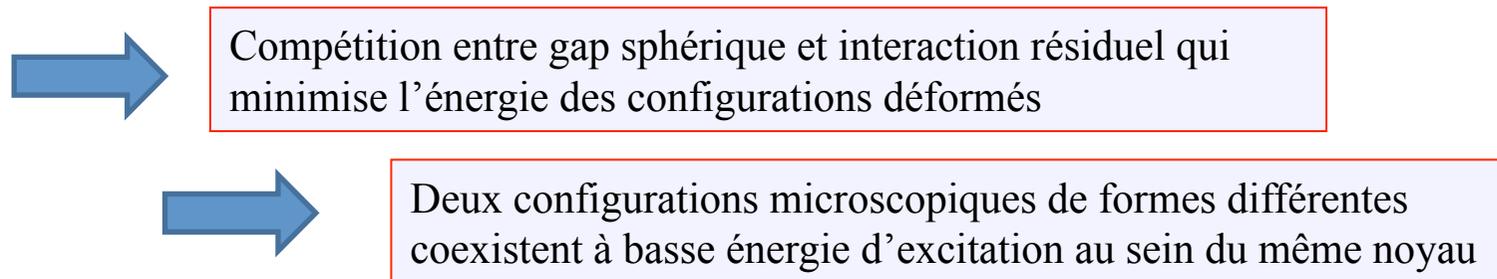
Événements SFP - Physique Nucléaire

21/06/2016 - 22/06/2016

Les grandes questions en physique nucléaire fondamentale

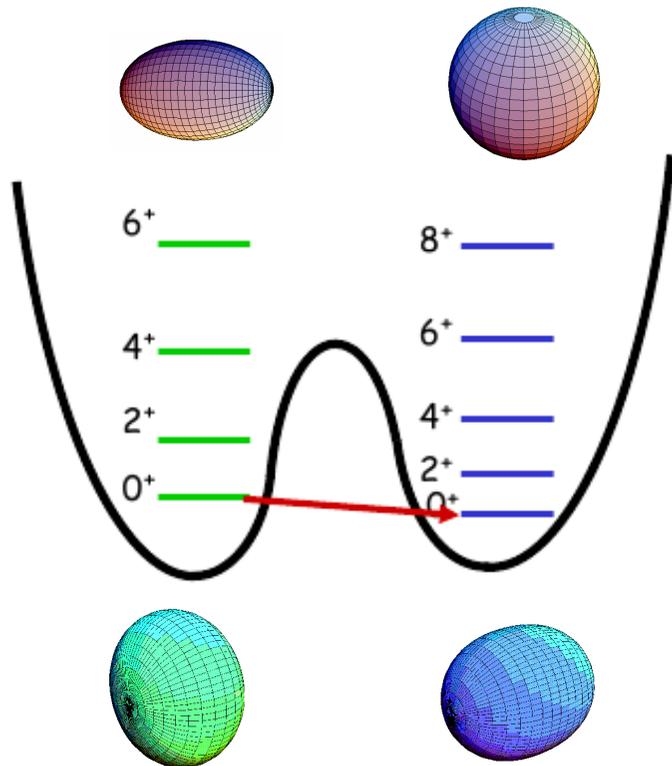
## La coexistence de formes : un phénomène universel et spectaculaire

Il reflète la compétition entre la stabilisation du noyau par une répartition sphérique des nucléons et sa tendance naturelle à se déformer



L'énergie d'excitation des configurations correspondantes est similaire, séparée par une barrière de potentielle tel que le mélange entre les différentes composantes des fonctions d'ondes reste faible et les états correspondants conservent leur caractéristique

# Les indices expérimentaux (cas simplifié des pairs-pairs)



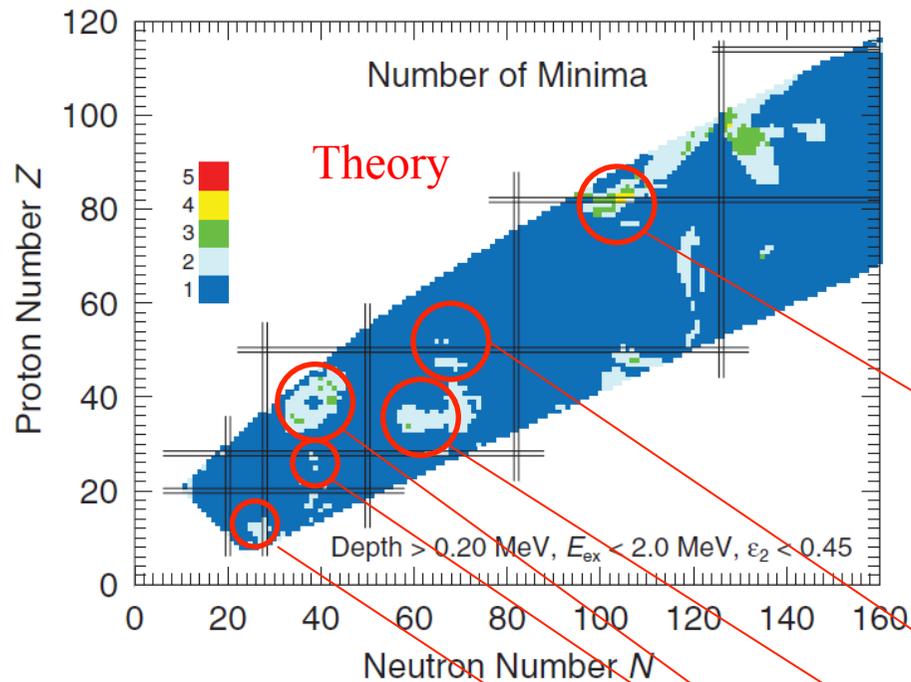
- Isomère de formes  $0^+_2$
- Schémas de niveaux
- Probabilités de transition
- La forme :  $Q_s$

Quel est le mécanisme à l'Origine de la coexistence de formes ?

Mécanisme microscopique

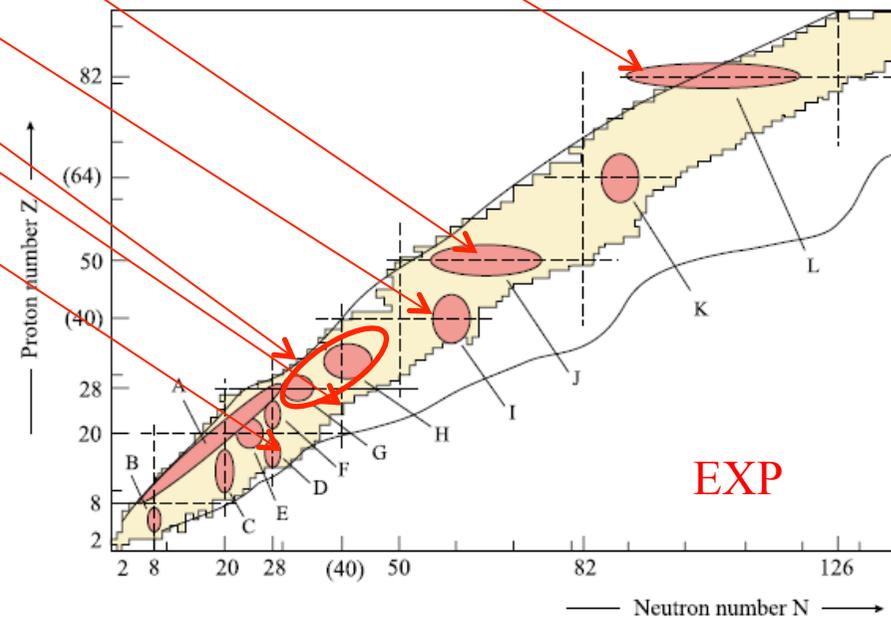


Effet de symétrie/champ moyen



P. Möller et al Phys. Rev. Lett 103, 212501 (2009)

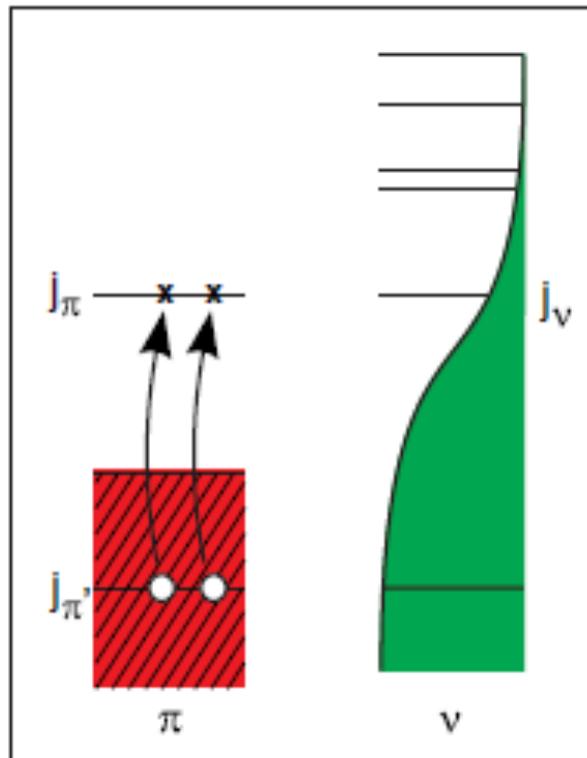
Les évidences expérimentales pointent vers plusieurs minima dans la surface d'énergie potentielle



Kris Heyde and John L. Wood Rev. Mod. Phys. **83**, 1467 (2011)

# Du point de vue microscopique

Kris Heyde and John L. Wood *Rev. Mod. Phys.* 83, 1467 (2011)



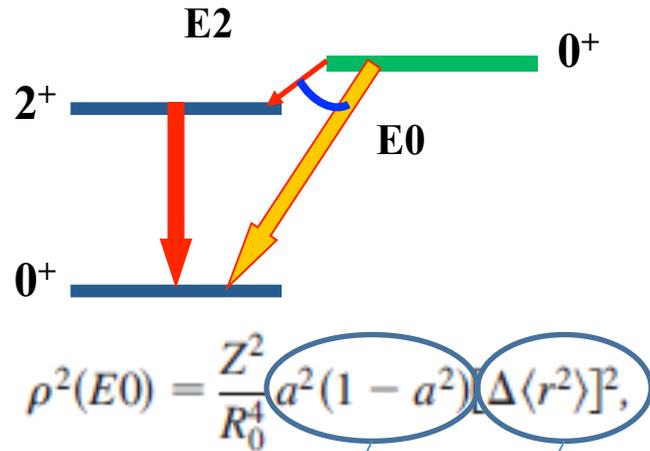
Gap en énergie

Pairing

énergie résiduelle p-n

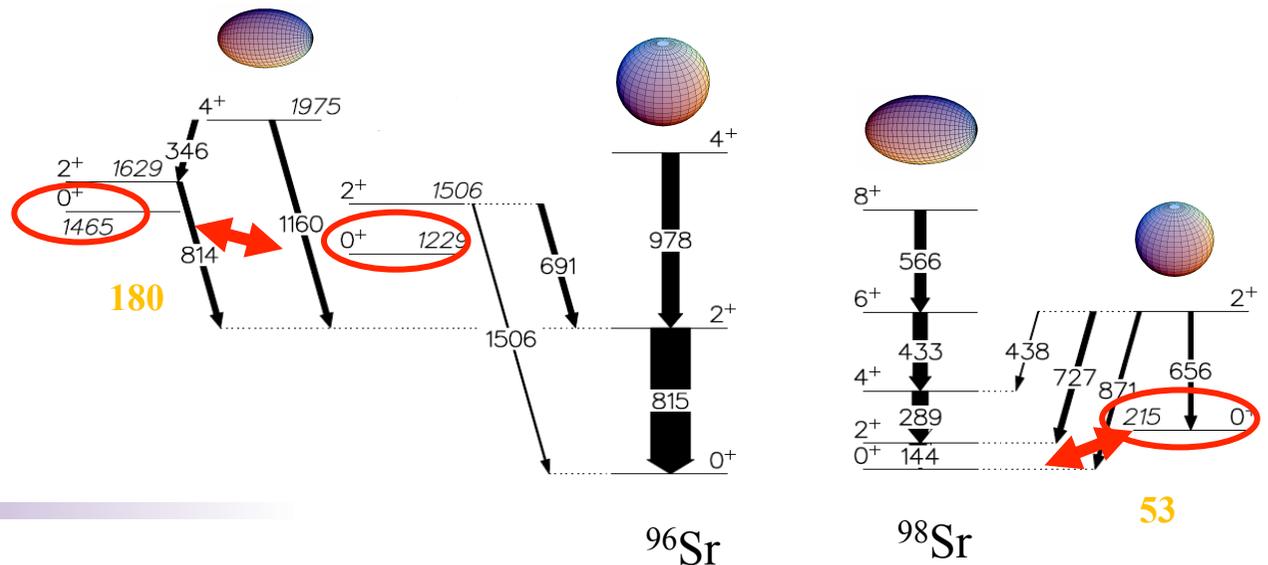
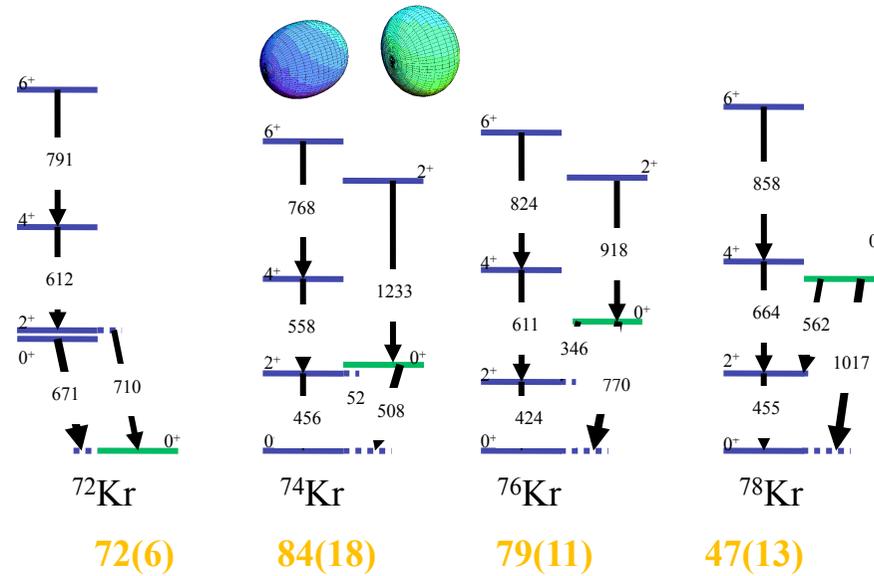
$$E_{\text{intr}}(0^+) = 2(\varepsilon_{j_\pi} - \varepsilon_{j'_\pi}) - \Delta E_{\text{pair}} + \underbrace{\Delta E_M + \Delta E_Q}_{\text{énergie résiduelle p-n}}$$

# Les états $0^+_2$ , quelques exemples

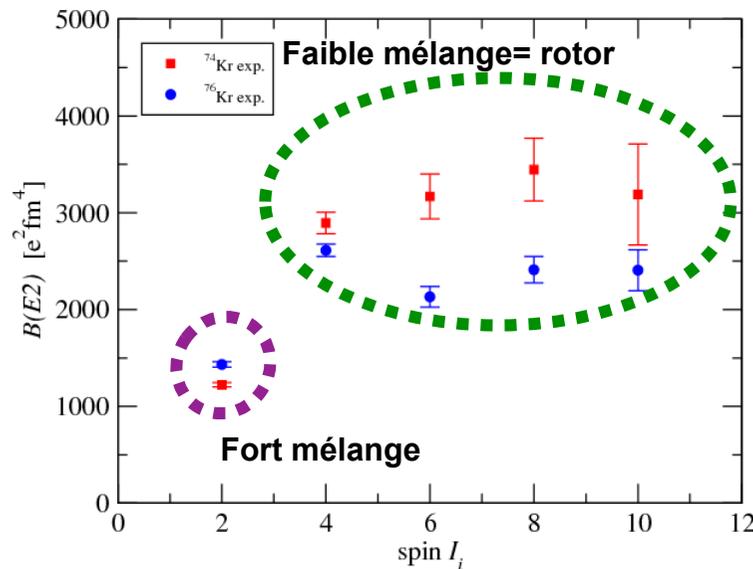
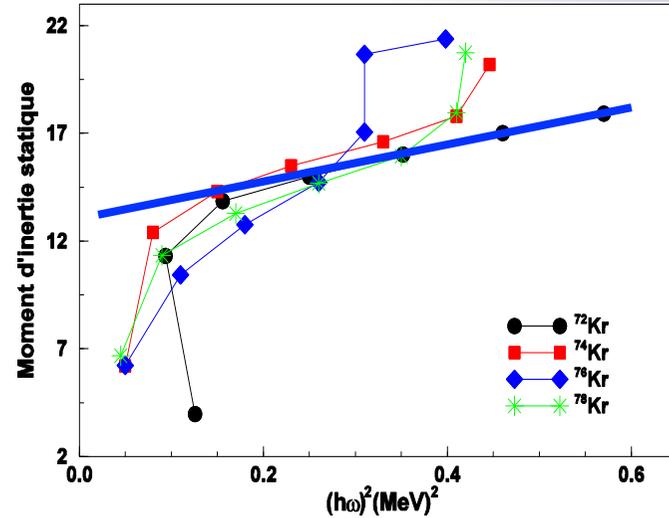
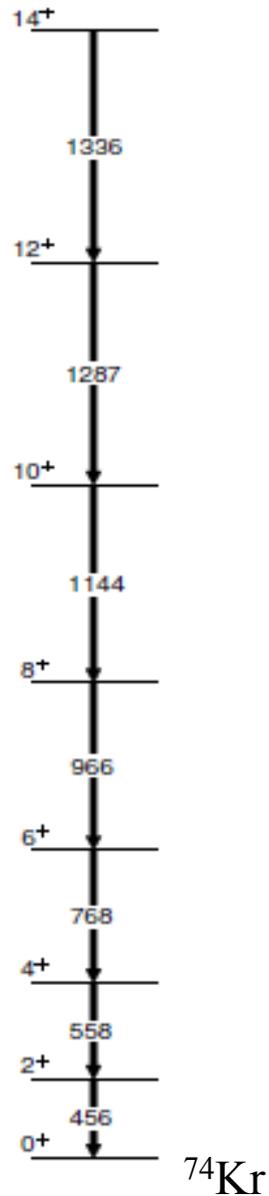


Mélange ?

Changement de formes ?



# Perturbation d'une séquence collective



La collectivité des états de bas spin est perturbée

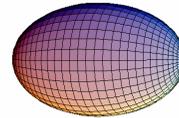
→ Effet du mélange des fonctions d'ondes ?

# Excitation Coulombienne

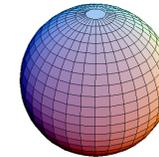
Les éléments de matrice  $\langle I || E2 || J \rangle$

Le  $Q_s$  « mesure » la forme ( $I = J$ )

Les  $B(E2)$  quantifie les couplages ( $I \neq J$ )



$\beta > 0.4$



$|\beta| < 0.16$

$B(E2 \downarrow) = 270(30)e^2fm^4$

$B(E2 \downarrow) = 3400(800) e^2fm^4$

$Q_s = -95(88) efm^2$

$B(E2 \downarrow) = 3420(500) e^2fm^4$

$Q_s = -121(40) efm^2$

$B(E2 \downarrow) = 4570(100)e^2fm^4$

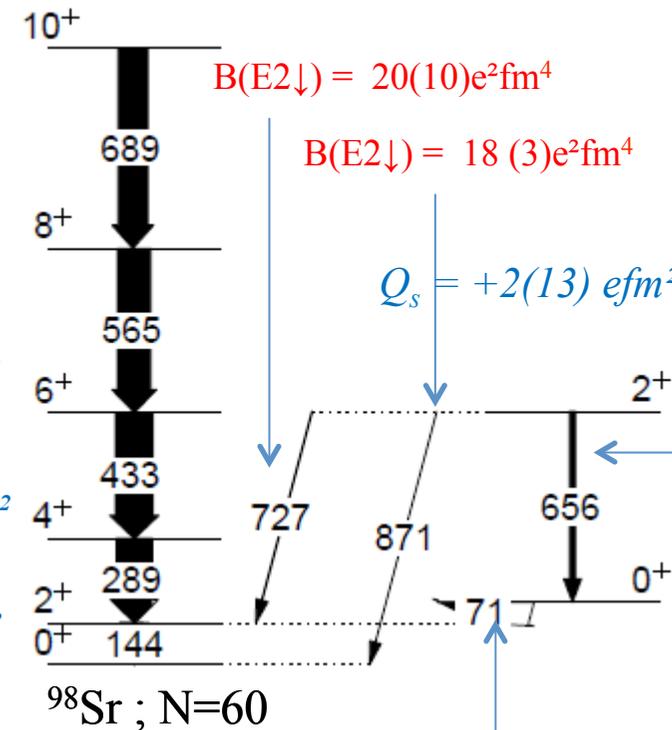
$Q_s = -187(25) efm^2$

$B(E2 \downarrow) = 3450(220) e^2fm^4$

$Q_s = -52(25) efm^2$

$B(E2 \downarrow) = 2590(80) e^2fm^4$

Deux formes coexistent

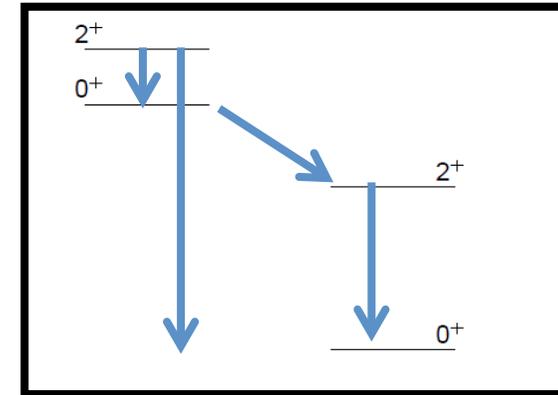


$B(E2 \downarrow) = 2450(200)e^2fm^4$

## Etats perturbés

$$\begin{aligned}
 |I_1\rangle &= + \cos \theta_I |I_{pr}\rangle + \sin \theta_I |I_{ob}\rangle \\
 |I_2\rangle &= - \sin \theta_I |I_{pr}\rangle + \cos \theta_I |I_{ob}\rangle
 \end{aligned}$$

Etats intrinsèques



Coexistence de formes à Z=40 :  
le cas des Kr déficient en neutrons

Perturbation de la séquence en énergie  
*E. Bouchez et al. Phys. Rev. Lett 90 (2003)*

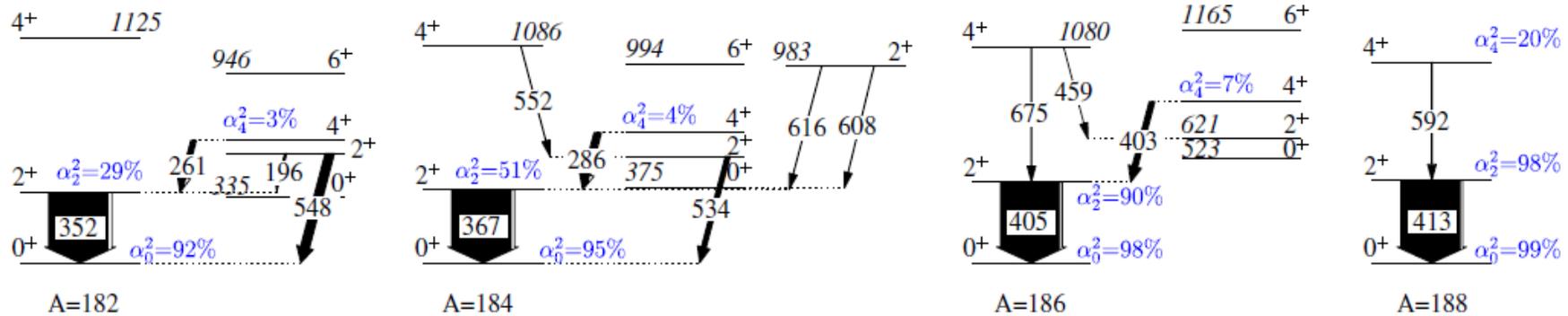
Eléments de matrice

*E. Clément et al. Phys. Rev. C 75, 054313 (2007)*

	<sup>76</sup> Kr	<sup>74</sup> Kr	<sup>72</sup> Kr
$\cos^2\theta_0$	0.73(1)	0.48(1)	0.10(1)
	0.69(4)	0.48(2)	*

Un large mélange des configurations et qui est maximum au moment de l'inversion

## Coexistence de formes à Z=82 : le cas des Hg déficient en neutrons

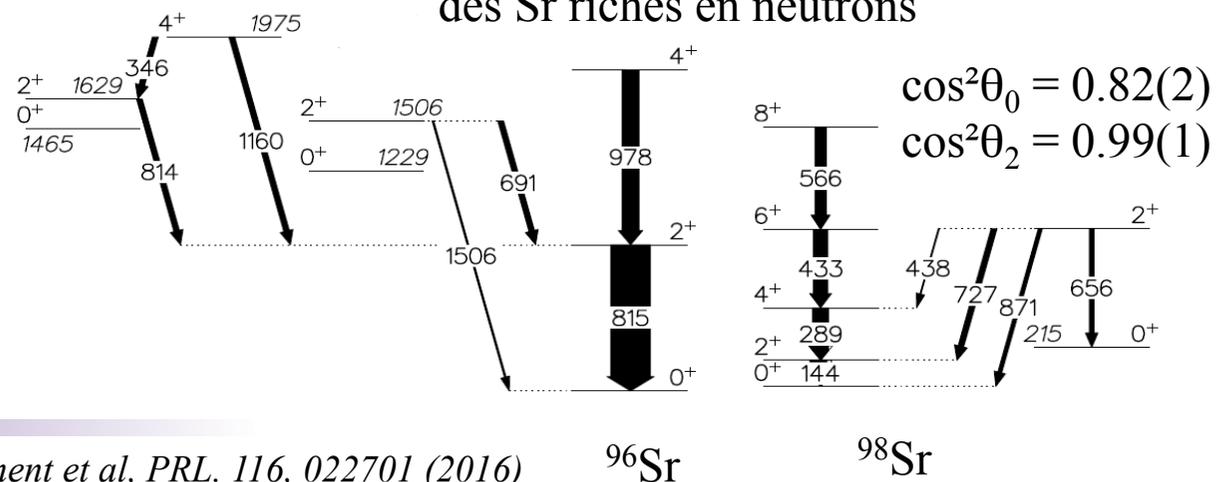


Un très large mélange des configurations pour  $J > 2$ , maximum au moment de l'inversion

*N. Bree et al., PRL 112, 162701 (2014)*

La transition s n'est pas associée à un mélange entre les configurations intrinsèques par opposition aux "Kr" et "Hg"

## Coexistence de formes à Z=40 : le cas des Sr riches en neutrons

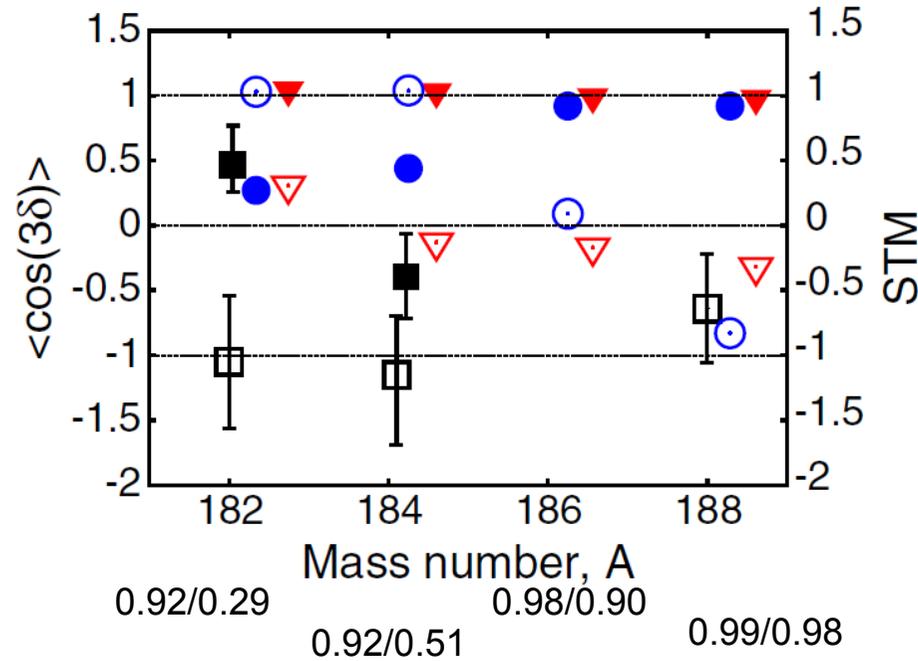
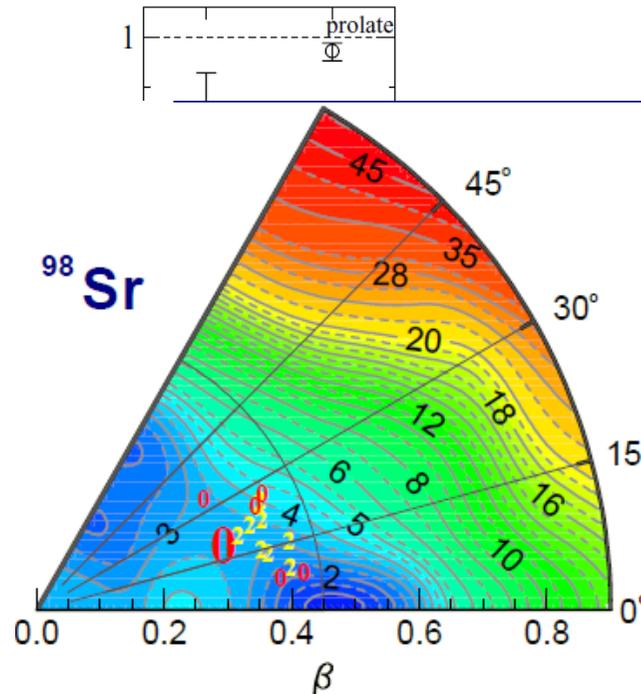


paramètre  $Q^2$  : déformation globale

$$\langle s || [E2 \times E2]_0 || s \rangle = \frac{1}{\sqrt{5}} Q^2 = \frac{(-1)^{2s}}{\sqrt{2s+1}} \sum_t \underbrace{\langle s || E2 || t \rangle \langle t || E2 || s \rangle}_{\Sigma B(E2)} \begin{Bmatrix} 2 & 2 & 0 \\ s & s & t \end{Bmatrix}$$

paramètre  $\cos 3\delta$  : triaxialité

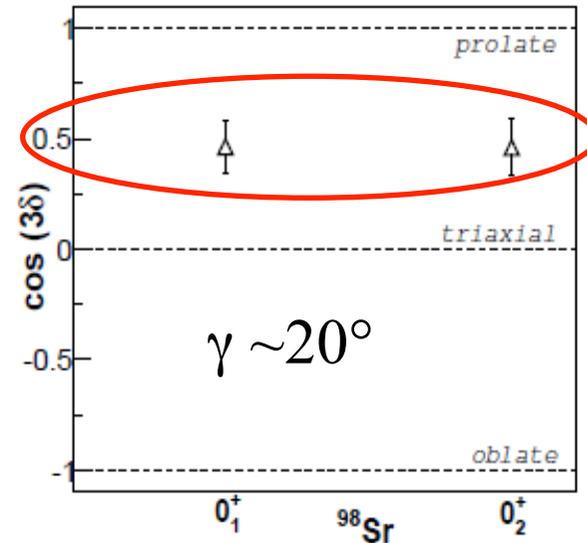
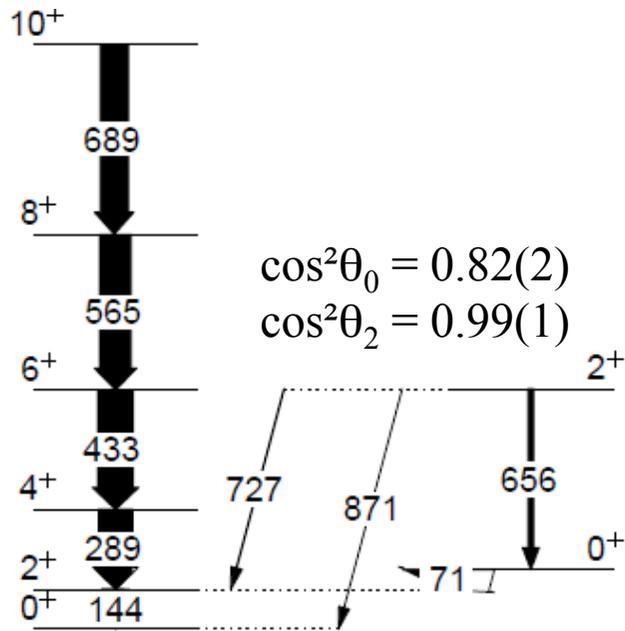
$$\langle s || [[E2 \times E2]_2 \times E2]_0 || s \rangle = -\sqrt{\frac{2}{35}} Q^3 \cos(3\delta) = \frac{1}{2s+1} \sum_{t,u} \langle s || E2 || t \rangle \langle t || E2 || u \rangle \langle u || E2 || s \rangle \begin{Bmatrix} 2 & 2 & 2 \\ s & t & u \end{Bmatrix}$$



Lien entre large mélange et triaxialité  
semble valide pour les états  $0_1^+$

$0_1^+$  restent inchangés légèrement oblate axial  
 $0_2^+$  sont triaxiaux en dépit d'un mélange  $< 10\%$

# Coexistence de formes à Z=40 : le cas des Sr riches en neutrons



Faible mélange n'exclue pas une contribution de la triaxialité

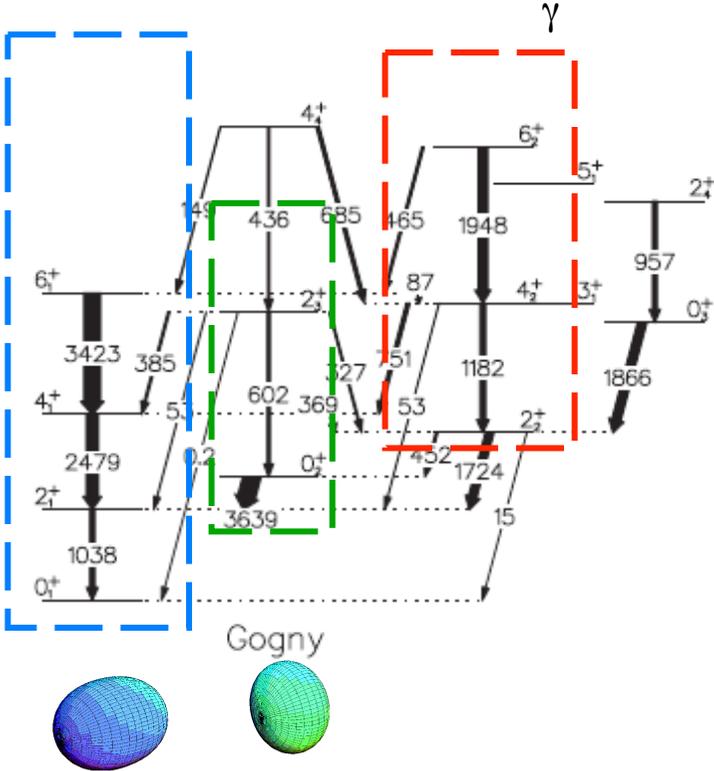
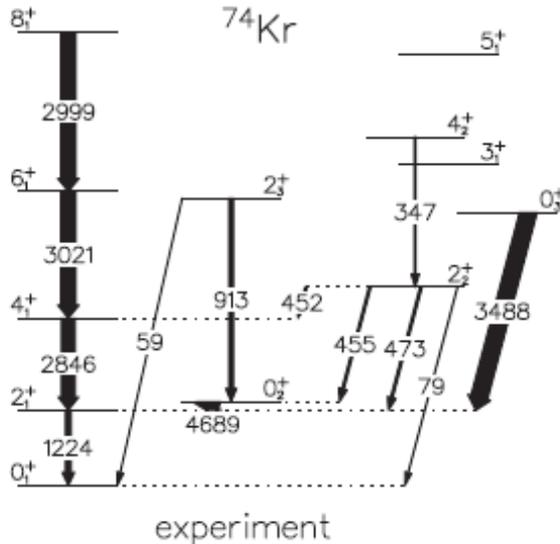
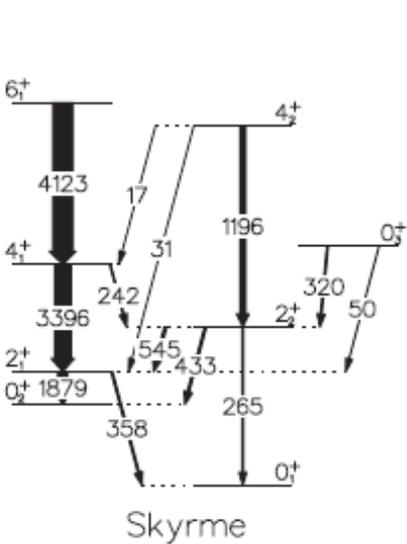
# La comparaison avec la théorie

Méthode HFB+GCM  
Skyrme SLy6 force  
density dependent pairing interaction

HFB+GCM Gaussian overlap approximation  
Gogny D1S force

Restreins à la symétrie axiale (pas d'état K=2)

Inclus les degrés de liberté axial et triaxial

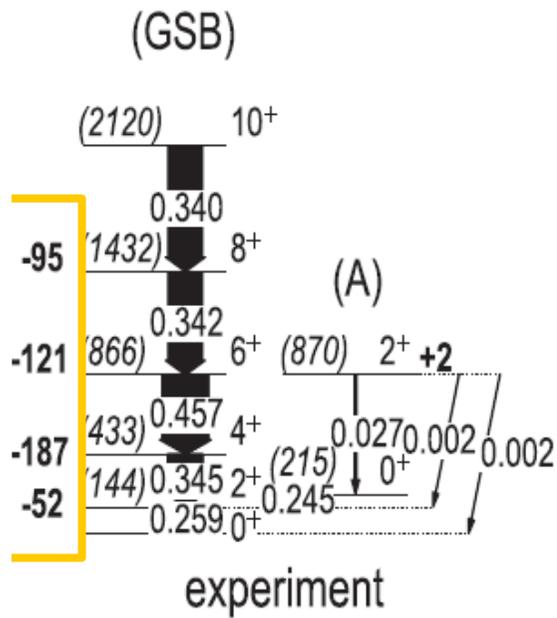


Inversion des états prolats et oblates

•Le calcul limité à l'axialité reproduit le calcul « Skyrme »

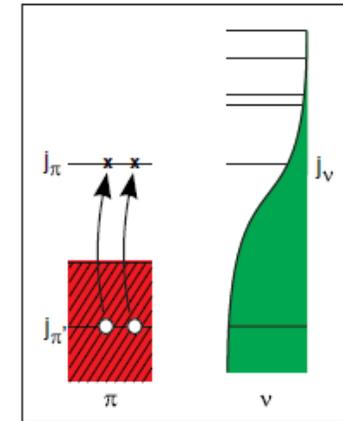
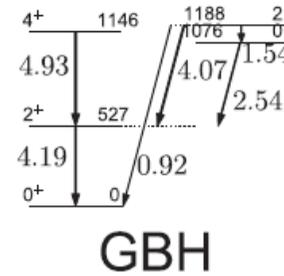
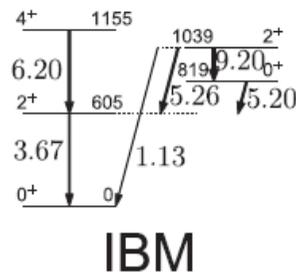
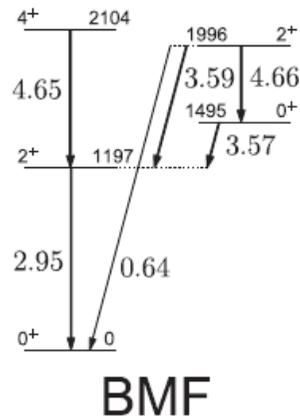
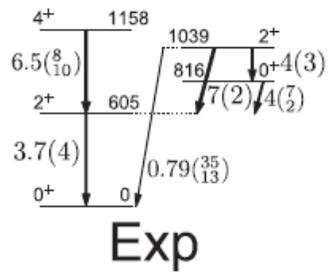
La triaxialité est la clés dans la description de la coexistence de formes ?

$^{98}\text{Sr}$



Faible mélange  
Contribution de la triaxialité  
Pas de bande K=2

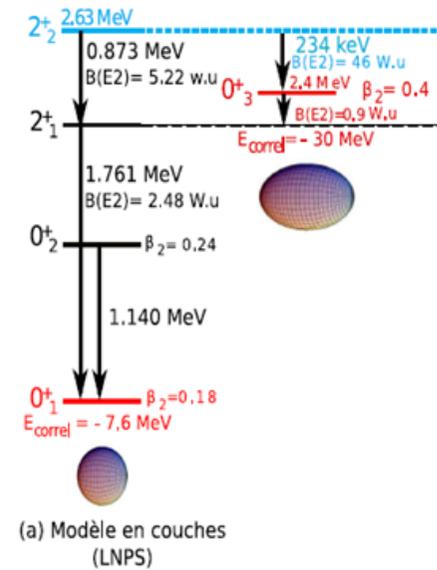
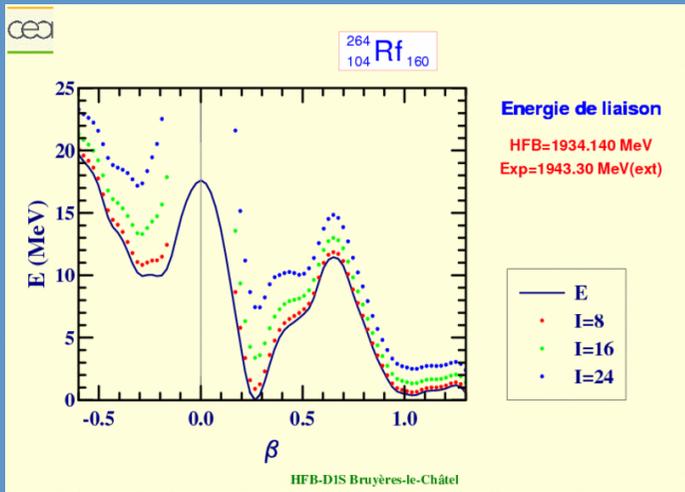
$^{198}\text{Po}$



Expérience :  
 Fort mélange de configuration  $J > 2$   
 Pas de triaxialité dans l'état fondamental

BMF et GBH inclus la triaxialité  
 IBM inclus explicitement l'excitation 2p-2h

La superdéformation est un exemple extrême de coexistence de formes



(a) Modèle en couches (LNPS)  
 $^{68-70}\text{Ni}$ ,  $^{42}\text{Ca}$  ?

La coexistence de formes reflète la compétition mesurable, identifiable, entre deux ou trois configurations au sein du même noyau à basse énergie d'excitation.

Le défi reste la description, théorique et expérimentale, de chacune des configurations ainsi que leur interaction et leur évolution en fonction du spin et de l'isospin

L'énergie d'excitation de l'état  $0^+_2$  fait intervenir le pairing et l'interaction multipolaire p-n

Les faisceaux radioactif ré-accélérés ont permis un bond en avant dans la description expérimentale mais pose d'autres questions :

Mélange des fonctions d'onde entre états intrus et états « normaux » et ses conséquences ?

→ Le mélange est toujours présent mais à des degrés divers et la relation avec la triaxialité ou "gamma softness" n'est pas clair

Peut-on identifier un mécanisme valable, un ou des degrés de liberté quelque soit la région de masse ?