

Rola orbitali typu ekstruder w powstawaniu deformacji

Jakub Wiśniewski

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
jakub.wisniewski@fuw.edu.pl

Seminarium Zakładu Fizyki Jądrowej

Plan seminarium

1. Aktualny stan wiedzy dotyczący deformacji w $A \sim 100$
2. Eksperymenty. Metody analizy. Nowe wyniki.
3. Struktura izotopów Sr ($50 < N < 60$)
4. Perspektywy i dalsze badania
5. Podsumowanie

Defromacja w obszarze $A \sim 100$

Pierwsza obserwacja:

D.A. Arseniev *et al.* NPA **139** 269 (1969)

E. Chieftetz *et al.* PRL **25** 38 (1970)

Mechanizmy zmiany kształtu:

- **Współistnienie kształtów**

R.K. Sheline *et al.* PLB **41** 115 (1972)

J. Skalski *et al.* NPA **559** 221 (1993)

T.R. Werner *et al.* NPA **578** 1 (1994)

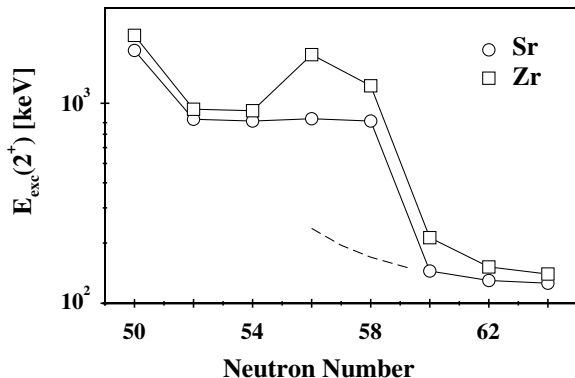
- **Orbitale parterskie (SOP) – $\nu g_{7/2}$, $\pi g_{9/2}$**

F. Federman, S.Pittel PLB **69** 385 (1977)

- **Populacja orbitali – $\pi g_{9/2}$, $\nu h_{11/2}$**

A. Kumar *et al.* PRC **32** 2116 (1985)

M.A.C. Hotchkis *et al.* PRL **64** 2123 (1990)



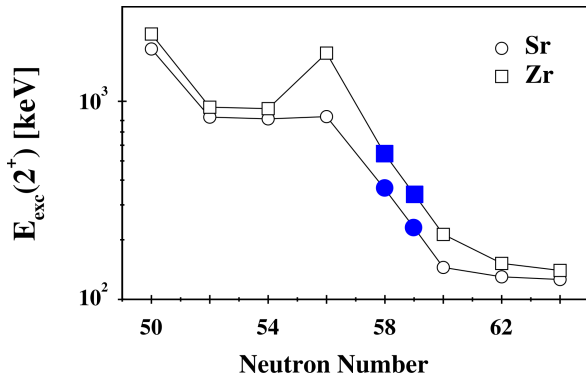
W. Urban *et al.* NPA **689** 605 (2001)

Populacja orbitala $\nu h_{11/2}$

W. Urban *et al.* NPA 689 605 (2001)

- Identyfikacja pasm rotacyjnych dla $N=58,59$
→ współistnienie kształtu dla $N < 60$
- Deformacja wzrasta stopniowo

“shape change .. is most likely due to an occupancy of three or more deformation - driving orbitals of $\nu h_{11/2}$ parentage”



Odkrycie orbitala $\nu 9/2[404]$ w obszarze $A \sim 100$

P. Kleinheinz *et al.* PRL 32 68 (1974)

- silnie zdeformowane struktury zidentyfikowane w $A \sim 150$ zbudowane na $[\nu 11/2[505]]^{-1}$

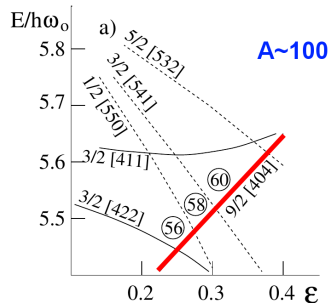
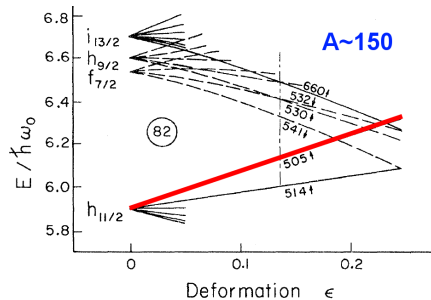
”This ... picture ... might provide the means to identify similar phenomenas in other regions of nuclear chart“ $\rightarrow A \sim 100$

W. Urban *et al.* EPJA 16 11 (2003)

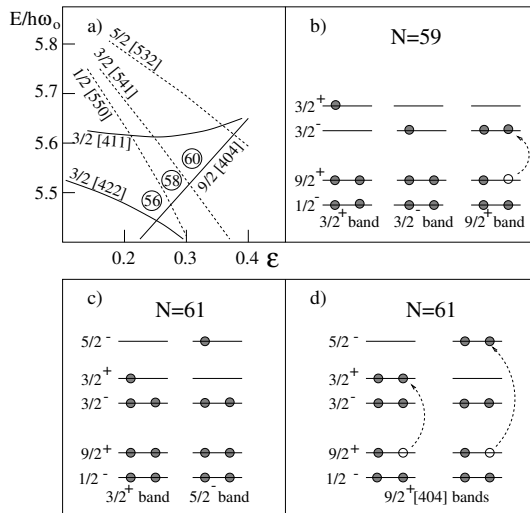
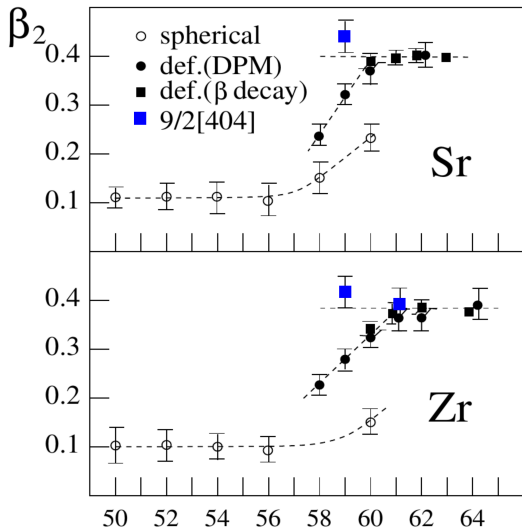
J.K. Hwang *et al.* PRC 67 054304 (2003)

W. Urban *et al.* EPJA 22 241 (2004)

- obserwacja orbitalu $\nu 9/2[404]$ w obszarze $A \sim 100 \rightarrow {}^{99}\text{Zr}, {}^{97}\text{Sr}, {}^{101}\text{Zr}$



Odkrycie orbitala $\nu 9/2[404]$ w obszarze $A \sim 100$



Systematyka stanów 0^+ dla jąder z obszaru $A \sim 100$

W. Urban *et al.* PRC 99, 064325 (2019)

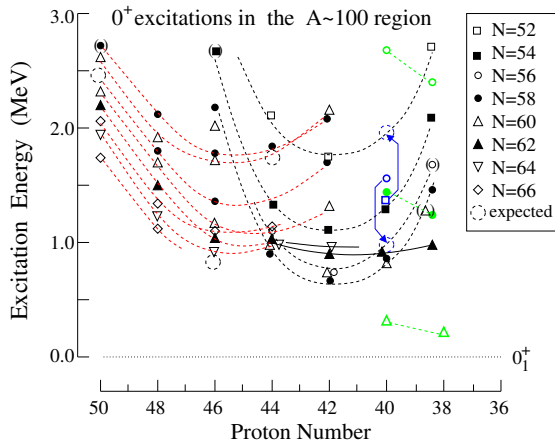
Fenomenologiczna klasyfikacja stanów wzbudzonych

- **63** stany 0^+ – wszystkie 0_2^+ i część 0_3^+
- większość daje się wpisać w „parabole”

K. Heyde *et al.* PLB 155, 303 (1985)

J.L. Wood *et al.* PR 215, 101 (1992)

- **wzbudzenia „intruderowe”** $2p - 2h - d_{5/2} \rightarrow g_{7/2}, h_{11/2}$
- oddziaływanie z $\pi g_{9/2}$ ($[\pi g_{9/2}]^{-1}$)
- **SOP** dla wzbudzonych 0^+
- **stopniowy wzrost deformacji** wraz z N



Systematyka stanów 0^+ dla jąder z obszaru $A \sim 100$

W. Urban *et al.* PRC 99, 064325 (2019)

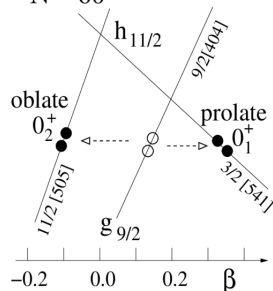
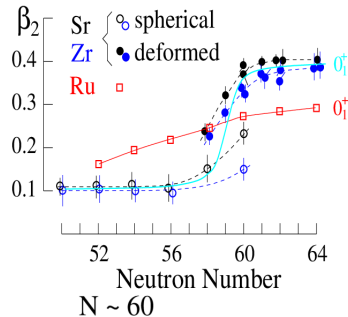
- **avoided crossing** → kolektywność przekazywana do stanu podstawowego 0_1^+

“extra effect, enhancing and accelerating the shape-change process, is needed for Sr and Zr isotopes”

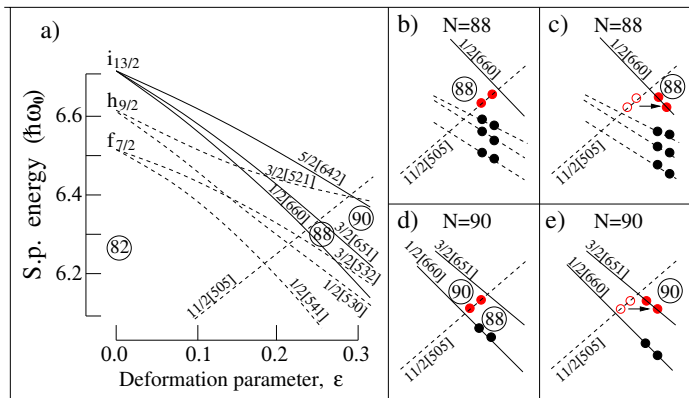
P.E. Garrett *et al.* PRL 47, 5 (2011)

J.F. Sharpey-Schafer *et al.* EPJA 55, 15 (2019)

- **extruder mechanism** – $2h-2p$ z ekstrudera na orbital “*deformation driving*” → **pairing isomer**
- 0_1^+ w ^{98}Sr i ^{100}Zr $9/2[404] \rightarrow 3/2[541]$
prolate – duża deformacja
- 0_2^+ w ^{98}Sr i ^{100}Zr $9/2[404] \rightarrow 11/2[505]$
oblate – mała deformacja



Ekstruder jako katalizator zmiany kształtu – $A \sim 150$



W. Urban et al. PRC 102, 064321 (2020)

- $11/2[505] \rightarrow$ wzrost deformacji przy $N=88$

- **extruder mechanism** – $2p-2h$

$N=88$ $11/2[505] \rightarrow 1/2[660]$

$N=90$ $11/2[505] \rightarrow 3/2[651]$

“... $11/2[505]$ orbital plays multiple role in generating nuclear deformation and shape coexistence in the $A \sim 150$ region, acting as a kind of catalyst for the two phenomena.”

Eksperymenty

Gammasphere

P. Nolan et al. NPA 520, c641 (1990)

110 detektorów germanowych
rozszczipienie ^{252}Cf (2000)

EXILL

M. Jentschel et al. JINST 12, P11003 (2017)

10 EXOGAM + 6 GASP + 2 ILL
(n,f) ^{235}U – 16 dni (2012)

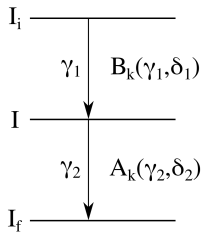
FIPPS

C. Micheagnoli et al. EPJ 193, 04009 (2018)

8 detektorów germanowych typu Clover
(n, γ) ^{98}Mo – 85h (2017)



Pomiary korelacji kątowych



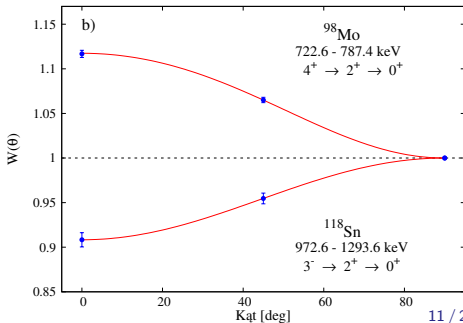
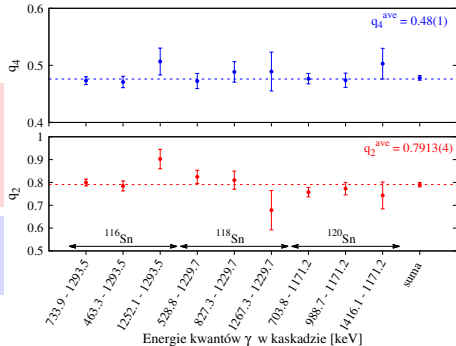
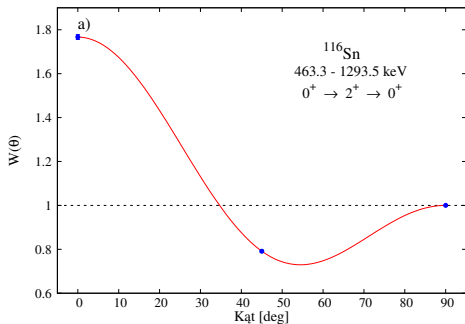
$$W^{th}(\theta) = 1 + \sum a_k^{th} P_k(\cos(\theta))$$

$$a_k^{th} = B_k(\gamma_1) A_k(\gamma_2)$$

$$W^{exp}(\theta) = 1 + \sum a_k^{exp} q_k P_k(\cos(\theta))$$

$0^\circ \rightarrow 4$ pary
 $45^\circ \rightarrow 16$ par
 $90^\circ \rightarrow 8$ par

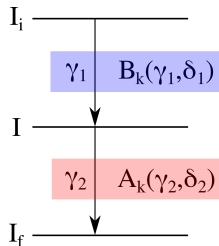
 $135^\circ \rightarrow 45^\circ$
 $180^\circ \rightarrow 0^\circ$



Pomiary polaryzacji liniowej

$$P(\theta) = \frac{W(\theta, \psi = 0^\circ) - W(\theta, \psi = 90^\circ)}{W(\theta, \psi = 0^\circ) + W(\theta, \psi = 90^\circ)}$$

$$W(\theta, \psi) = \sum_{\lambda} B_{\lambda}(\gamma_1) [A_{\lambda_2} P_{\lambda} \cos(\theta) + 2A_{\lambda_2}(\gamma_2, Q_{x'2}) \times \\ \times \sqrt{\frac{(\lambda - 2)!}{(\lambda + 2)!}} P_{\lambda}^{(2)}(\cos\theta) \cos 2\varphi]$$



$$P_{th} = \pm \frac{3A_2(\gamma_2)B_2(\gamma_1) + \frac{5}{4}A_4(\gamma_2)B_4(\gamma_1) + \frac{8\delta_1}{1+\delta_1^2}A_2(\gamma_2)F_2(12I_i I)}{2 - A_2(\gamma_2)B_2(\gamma_1) + \frac{3}{4}A_4(\gamma_2)B_4(\gamma_1)}$$

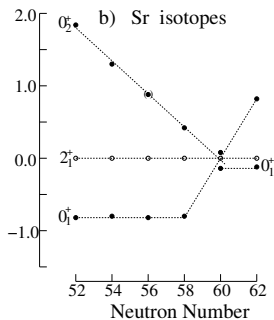
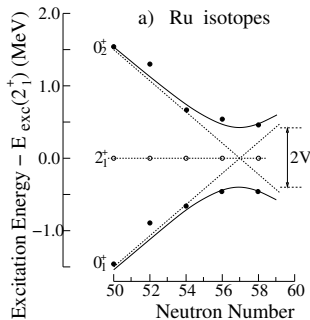
W. Urban JINST (to be published)

$$P_{th} = \pm \frac{3A_2(\gamma_2)B_2(\gamma_1) + \frac{5}{4}A_4(\gamma_2)B_4(\gamma_1) - \frac{8\delta_2}{1+\delta_2^2}B_2(\gamma_1)F_2(12I_f I)}{2 - A_2(\gamma_2)B_2(\gamma_1) + \frac{3}{4}A_4(\gamma_2)B_4(\gamma_1)}$$

Struktura izotopów Sr o liczbie neutronów $50 \leq N \leq 58$

^{90}Sr ^{92}Sr ^{94}Sr ^{96}Sr

- Gammasphere \rightarrow ^{252}Cf
- EXILL \rightarrow $(n,f)^{235}\text{U}$
- **nowe stany wzbudzone**
- **weryfikacja spinów i parzystości**
 - \rightarrow korelacje kątowe
 - \rightarrow polaryzacja liniowa
- **23** nowe stany wzbudzone
- **30** nowych (poprawionych) przejść γ
- **57** nowych (poprawionych) spinów i parzystości



W. Urban *et al.* PRC 99, 064325 (2019)

Ru \rightarrow **silnie oddziaływanie**

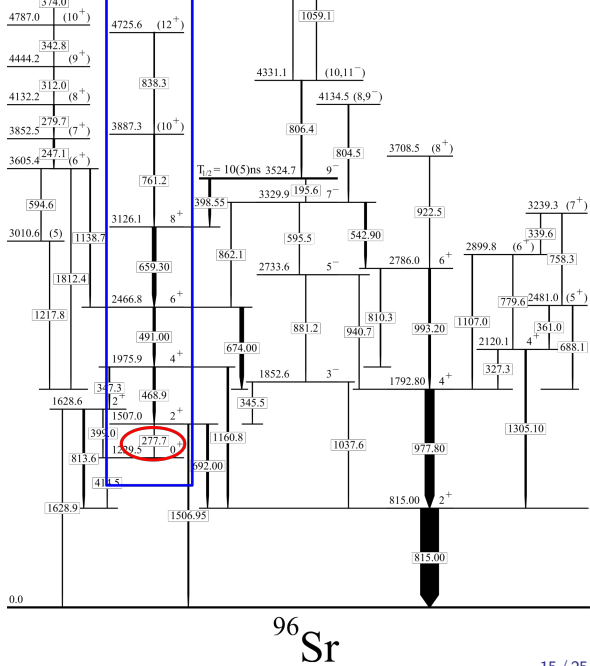
Sr \rightarrow **słabe oddziaływanie**

$E_{exc}(0_2^+) = 215.4 \text{ keV} \rightarrow$ **różne struktury**

“... there is more than one mechanism involved in this process.”

Nowe wyniki – ^{96}Sr

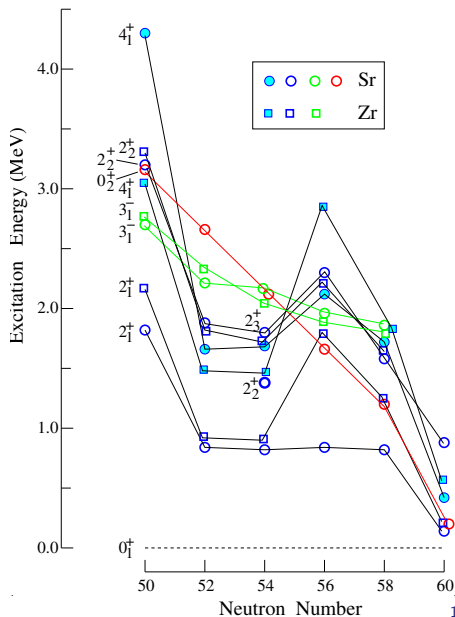
- nowe przejście **277.7 keV** ($2^+ \rightarrow 0^+$)
- $T_{1/2} = < 6 \text{ ps} \rightarrow \geq 38(8) \text{ W.u.}$
- **zdeformowane pasmo** na stanie 0_2^+
- poziom **3524.7 keV** – $40(8) \text{ ns} \rightarrow 10(5) \text{ ns}$
W. Urban *et al.* NPA **689** 605 (2001)



Własności izotopów $^{90-96}\text{Sr}$

- kolektywność wzrasta powoli wraz z N
- wzrost dla N=56 $\rightarrow \nu d_{5/2}$
- stany 3^- \rightarrow korelacje oktupolowe

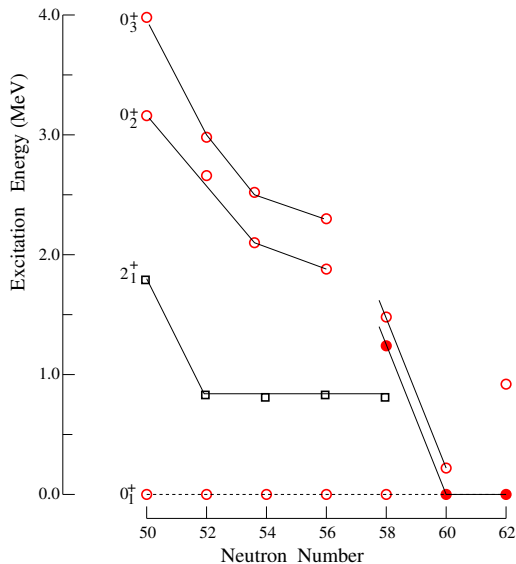
“Above N=58 there is a spectacular lowering of all the levels. This suggests another mechanism of excitation there ...”



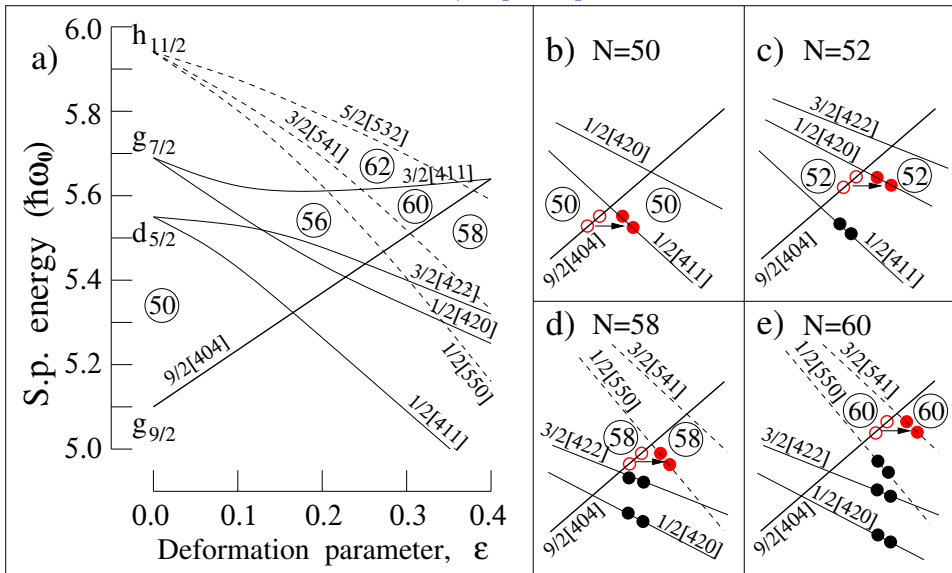
Własności izotopów $^{90-96}\text{Sr}$ – stany 0^+

- energia wzbudzenia stanów 0^+ powoli ulega obniżeniu, po czym gwałtownie spada dla $N=60$
- słabe oddziaływania pomiędzy 0_2^+ i 0_3^+
- porównanie ze stanami 2_1^+ → **to nie są wibracje**

Wzbudzone stany 0^+ mogą być populowane poprzez wzbudzenie $2p - 2h$



Własności izotopów $^{90-96}\text{Sr} - 9/2[404]$

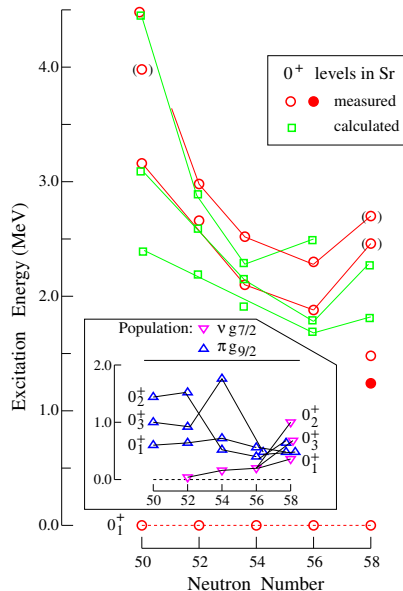


Własności izotopów $^{90-96}\text{Sr} - 0^+$ obliczenia LSSM

- odtworzona tendencja spadkowa stanów wzbudzonych 0_2^+ dla $50 \leq N \leq 56$
- przesunięcie o **0.5 MeV**
- dla $N=58$ stan 0_2^+ **zdeformowany**

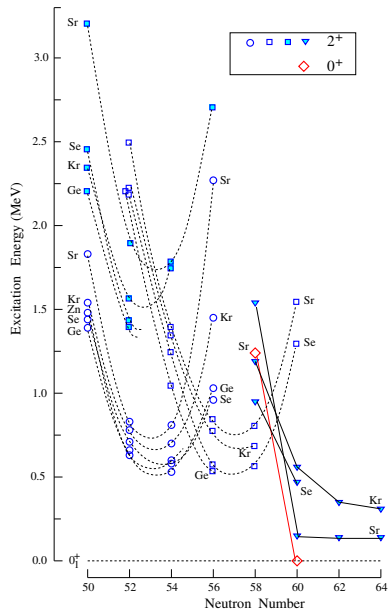
“we do not expect it to appear in the present calculations due to a missing deformation-driving mechanism in the model space used.”

- 0^+ ($N < 58$) $\rightarrow \pi(f, p) \otimes \nu d_{5/2}^n$



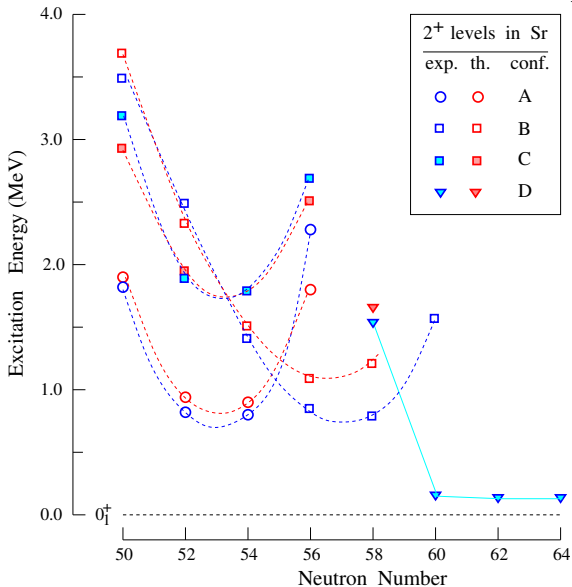
Własności izotopów $^{90-96}\text{Sr}$ – stany 2^+

- nowa klasyfikacja stanów 2^+
- 53 stany 2^+ – $32 \leq Z \leq 38$
 $50 \leq N \leq 60$
- trzy struktury, każda odpowiadająca innej konfiguracji protonowej
- paraboliczne kształty - poziom Fermiego „przechodzący” przez różne orbitale neutronowe

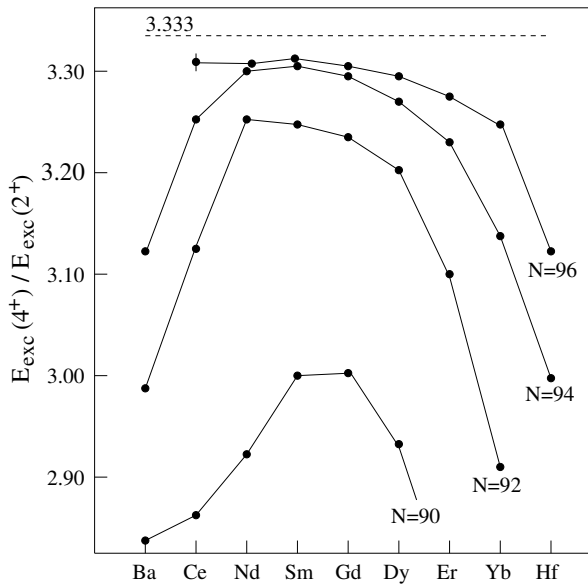
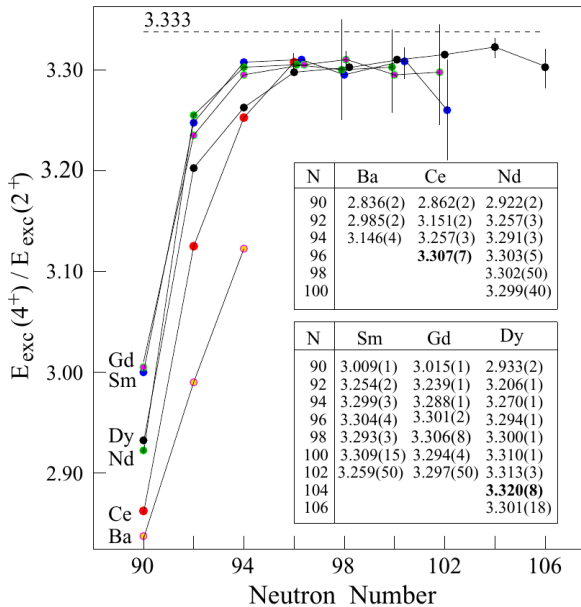


Własności izotopów $^{90-96}\text{Sr} - 2^+$ obliczenia LSSM

- zgodność wyników eksperymentalnych z obliczeniami LSSM
- obliczenia odtwarzają przecięcie pomiędzy strukturami A i B
- **A** – $f_{5/2}$ (6), $p_{3/2}$ (3.32), $p_{1/2}$ (0.68)
- **B** – $f_{5/2}$ (5.09), $p_{3/2}$ (3.65), $p_{1/2}$ (1.26)
- Stany 2^+ są zdominowane przez konfiguracje jednocząstkowe
- nie przyczyniają się do budowania kolektywności kwadrupolowej
- stanowią jednak szkielet dla innych wzbudzeń kolektywnych (γ -wibracje)

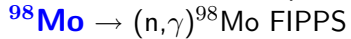
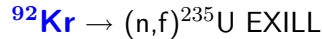
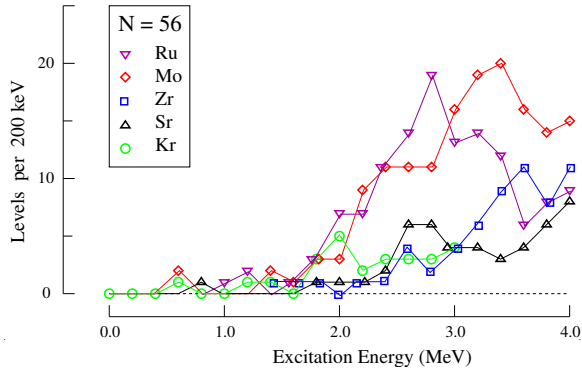
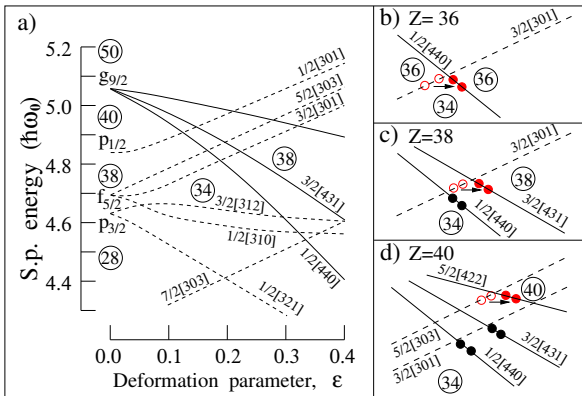


Ekstruder protonowy $9/2^+[404]$ w $A \sim 150$



Perspektywy i dalsze badania – izotony N=56

- deformacja w obszarze $A \sim 100 \rightarrow \nu h_{11/2}$
- katalizator deformacji $\rightarrow 9/2^+[404]$
- **Rola orbitali $\pi g_{9/2}$?**



(1971) 41 poziomów – 233 przejścia γ

(2021) **184** poziomy – **740** przejść γ

Podsumowanie

- ▶ przedstawiono nowe wyniki eksperymentalne dla izotopów $^{90-96}\text{Sr}$ populowanych w reakcji rozszczepienia ^{252}Cf oraz ^{235}U
- ▶ zidentyfikowano 23 nowe poziomy i 30 nowych przejść, w szczególności przejście $277.7\text{ keV } 2^+ \rightarrow 0^+$ w ^{96}Zr
- ▶ wykorzystując pomiary korelacji kątowych oraz polaryzacji liniowej wyznaczono lub zmieniono 57 nowych spinów i parzystości
- ▶ zaproponowano mechanizm generacji stanów 0^+ oraz ewolucji deformacji w izotopach Sr wykorzystujący katalityczne własności orbitala typu ekstruder $9/2^+[404]$
- ▶ zaproponowano nową klasyfikację stanów 2^+ , potwierdzoną przez obliczenia LSSM
- ▶ pokazano, że orbitale protonowe typu ekstruder, również mogą odgrywać istotną rolę w powstawaniu deformacji. Zaprezentowano plany dalszych badań.

Grupa Warszawska

W. Urban, T. Rząca-Urban – *Faculty of Physics, University of Warsaw*

Obliczenia LSSM

K. Sieja – *Université de Strasbourg, IPHC*

EXILL / FIPPS

C. Micheagnoli A. Blanc, M. Jentschel, P. Mutti, U. Köster, T. Soldner – *ILL, Grenoble*

G. de France – *Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL)*

G. S. Simpson – *LPSC, Université Joseph Fourier Grenoble*

C.A. Ur – *INFN, Legnaro*

Eurogam II / Gammasphere

A.G. Smith – *The University of Manchester*

J.P. Greene – *Argonne National Laboratory*

G. S. Simpson – *LPSC, Université Joseph Fourier Grenoble*