

Zagadka niskoenergetycznych stanów 0^+ w jądrach parzysto-parzystych

Waldemar Urban
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

współpraca:

T. Rząca-Urban, J. Wiśniewski

G. Simpson,

I. Ahmad,

A.G. Smith,

Uniwersytet Warszawski

LPSC Grenoble

Argonne National Laboratory

Manchester University

(w ramach kolaboracji Eurogam II i Gammasphere)

Seminarium Srodowiskowe ZFJ - ŚLCJ - NCBJ
04.04.2019

Plan seminarium

1. Wstęp – historia i motywacja
2. Eksperymenty - techniki doświadczalne
- nowe wyniki pomiarów
3. Interpretacja wyników
4. Wnioski i perspektywy



Prolog

(N. Cook, „Models of the Atomic Nucleus”, 2-nd Ed., Springer 2010)

1911 - jądro atomowe, Rutherford

1929 - model kropli cieczy, G. Gamow

ok. 1930, N. Bohr -> E. Rutherford: brak struktury jądra

1932 - odkrycie neutronu, J.Chadwick

1932 - jądro: protony + neutrony, W.Heisenberg

1935 - mezonowa teoria sił jądrowych, H.Yukawa (wymiana proton-neutron)

1936 - model jądra złożonego, N. Bohr (droga swobodna ok. 3 fm)

1937 - model cząstek niezależnych, E.Wigner

1939 - model kropłowy, N.Bohr, J.Wheeler (rozszczerzenie)

1949 - model powłokowy, M.Goeppert-Mayer, J. H. Jensen (opis kwantowy, oddz. spin-orbita, 2 jamy potencjału, droga swobodna > 20 fm ?)

1951 - zakaz Pauliego w jamie potencjału, V.Wiesskopf

1953 - model kolektywny jądra, A.Bohr, B.Mottelson, J.Rainwater

(„kwantyzacja modelu kropłowego”, deformacja, drgania β i γ)

1955 - model powłokowy w zdeformowanym potencjale, S.G. Nilsson, PhD

----- koniec Złotego Wieku -----

Ostatnie 60 lat - dominacja modelu powłokowego

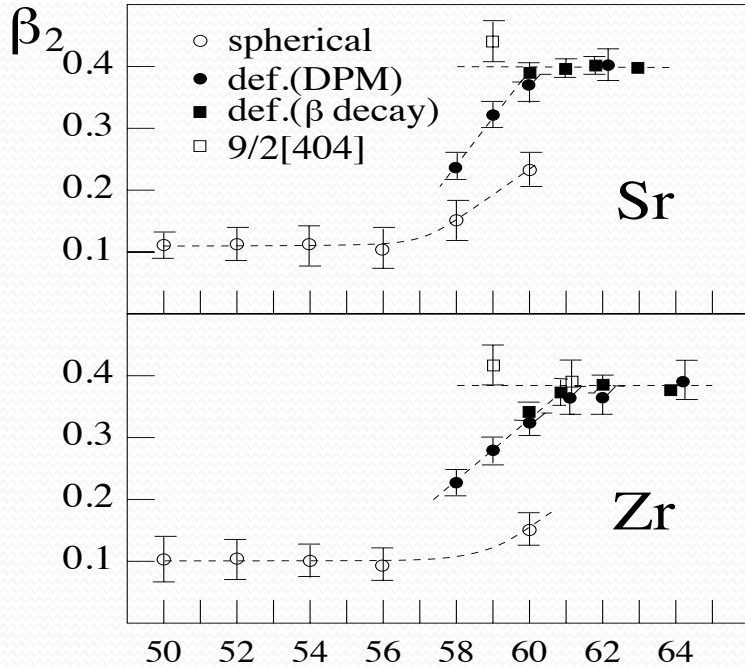
Czego nie można opisać w znanych modelach ? Egzotyka vs. dokładność ?

Deformacja i wzbudzenia kolektywne !

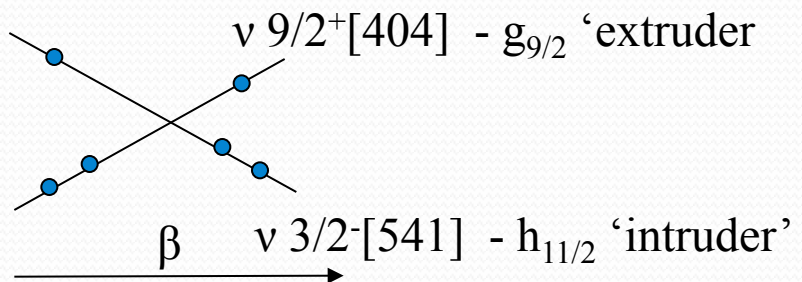
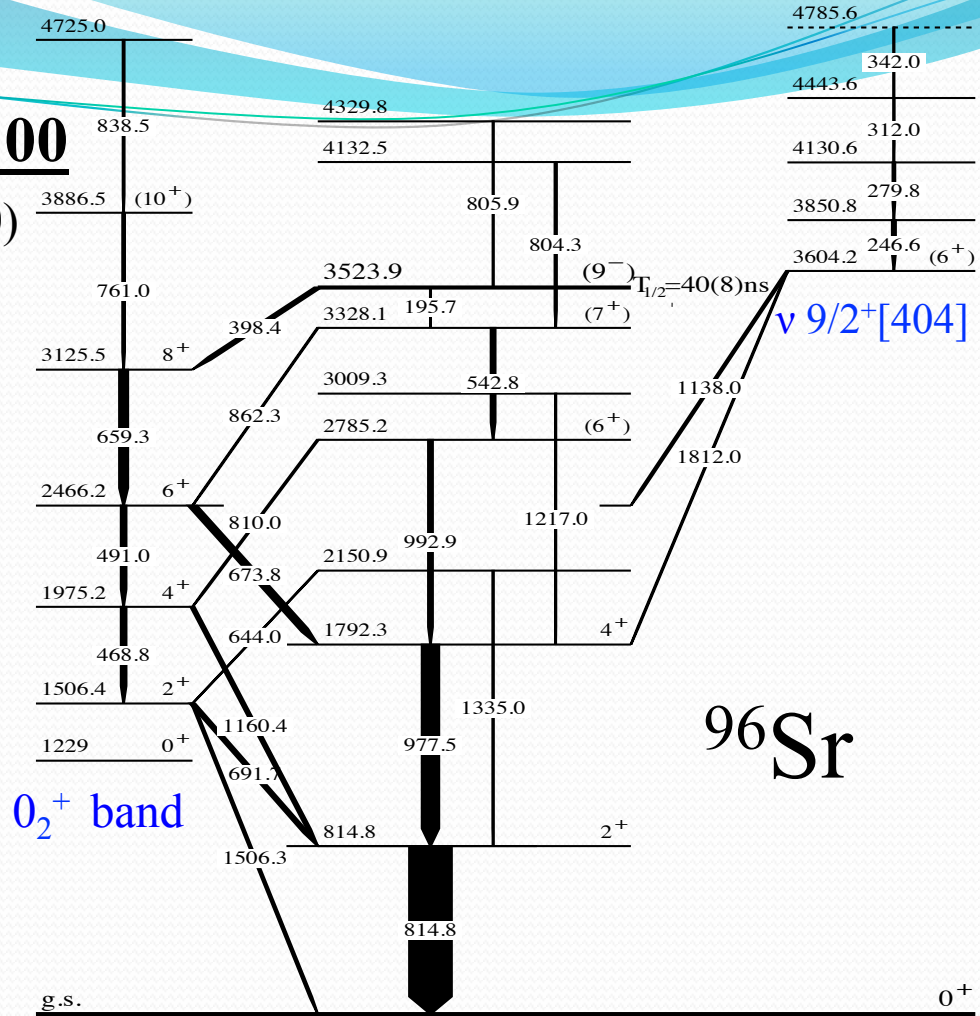
1. Wstęp

zmiana kształtu w obszarze $A \sim 100$

odkrycie - Chieftetz, et al., PRL 25, 38 (1970)



WU, et al., Nucl. Phys. A 689, 605 (2001)



$g_{9/2}$ neutron 'extruder'

WU, et al., Eur. Phys. J. A 22, 241 (2004)

Kleinheinz et al. PRL 32, 68 (1977)

$A \sim 150$, $\nu 11/2-[505] - h_{11/2}$ 'extruder'

Mechanizm zmiany kształtu - przejście fazowe I-go czy II-go rzędu ?

dwa minima (przejście I rodz.) [Sheline, et al., Phys. Lett. B 41, 115 (1972)]

wzbudzenia $2p-2h$, $\pi p_{1/2}$ do $\pi g_{9/2}$, [K. Heyde, et al, Phys. Rep. 102, 291 (1983)]

spin-orbit-partner (SOP) - przyciąganie $\nu g_{7/2}$ i $\pi g_{9/2}$ w stanie podstawowym

(przejście II rodz.) [F. Federman, S.Pittel, Phys. Lett. B 69, 385 (1977)]

populacja deformation-driving $\nu h_{11/2}$ [J. Skalski, et al Nucl. Phys. A 559, 221 (1993)]

[T. Werner, J. Dobaczewski, M. Guidry, W. Nazarewicz, Nucl. Phys. A 559, 221 (1993)]

$\nu 9/2[404]$ w jądrach parzysto-parzystych ? $\nu 9/2[404]$ między $\nu d_{5/2}$ a $\nu g_{7/2}$?

Ewolucja deformacji: Ru vs. Sr

- Ru: $V \sim 400$ keV [W.U., R.F. Casten, et al., PRC 031304(R), (2013)]

- Sr: $V \sim 40$ keV

[H.T. Fortune, Nucl. Phys.
A 957, 184 (2017)]

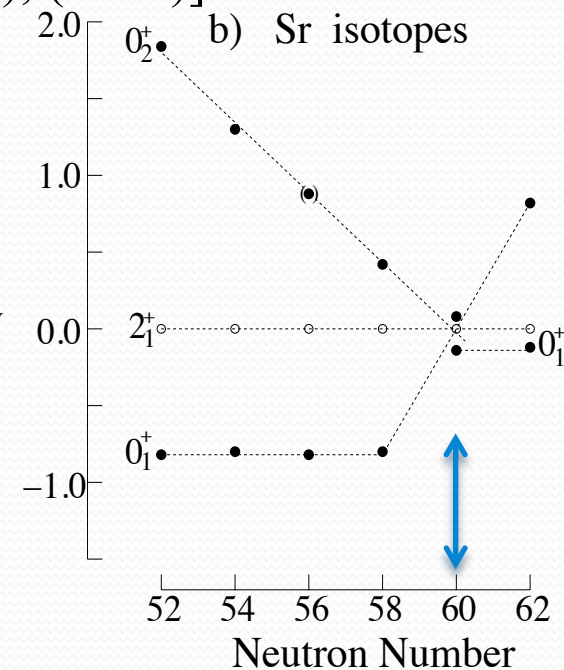
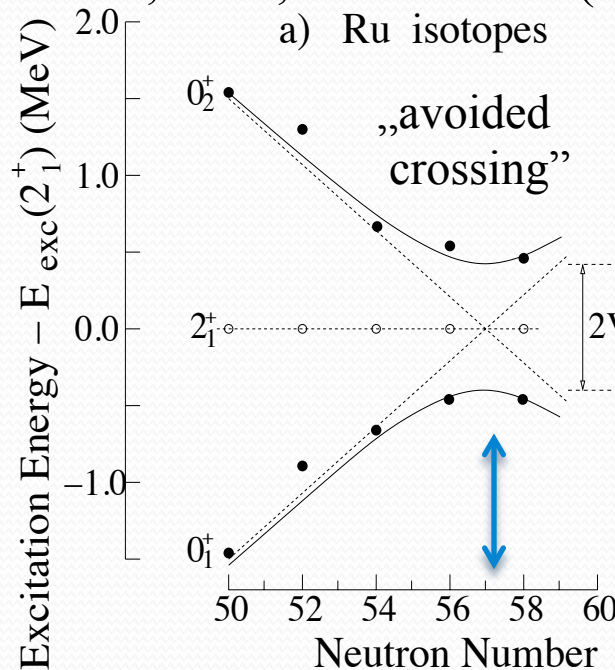
- SOP w Ru ale nie w Sr

- jaki mechanizm dla Sr ?

- populacja $\nu h_{11/2}$ - gdzie
jest $\nu h_{11/2}$ w ^{95}Sr , ^{97}Zr ?

[T.Rząca-Urban et al.

PRC 98, 064315 (2018)]



2. Eksperymenty - techniki doświadczalne

dokładne pomiary - precyzyjne detektory

- zaawansowane techniki analizy

- pomiary w pobliżu ścieżki stabilności

systematyczne pomiary - pomiary w łańcuchach izo-tonów/-topów (**systematyki**)

Eurogam II [P.Nollan, et al. Ann.Rev.Nucl.Part. Sci. 44,561 (1994)]

130 det. (Ge, Clover, LEP)

rozszczerzenie ^{248}Cm

Exp. 1994, 2×10^{10} zdarzeń $\gamma\gamma$

**Gammasphere [Y-Yang Lee,
Nucl.Phys. A 520, c641 (1990)]**

ok. 200 det. Ge

rozszczerzenie ^{252}Cf

Exp. 2000, 2×10^{11} zdarzeń $\gamma\gamma$

EXILL, ILL Grenoble
FIPPS, ILL Grenoble
układ 6 BE/LEP, JYFL



Eksperymenty - wyniki pomiarów

Pasmo wibracyjne na drugim stanie 0^+ w jądrze $^{98}\text{Sr}_{60}$

- drugi stan 0^+ w ^{98}Sr to najniższy stan wzbudzony 0^+ [F. Schussler, et al., Nucl. Phys. A 339, 415 (1980)]

- nowe poziomy i przejścia

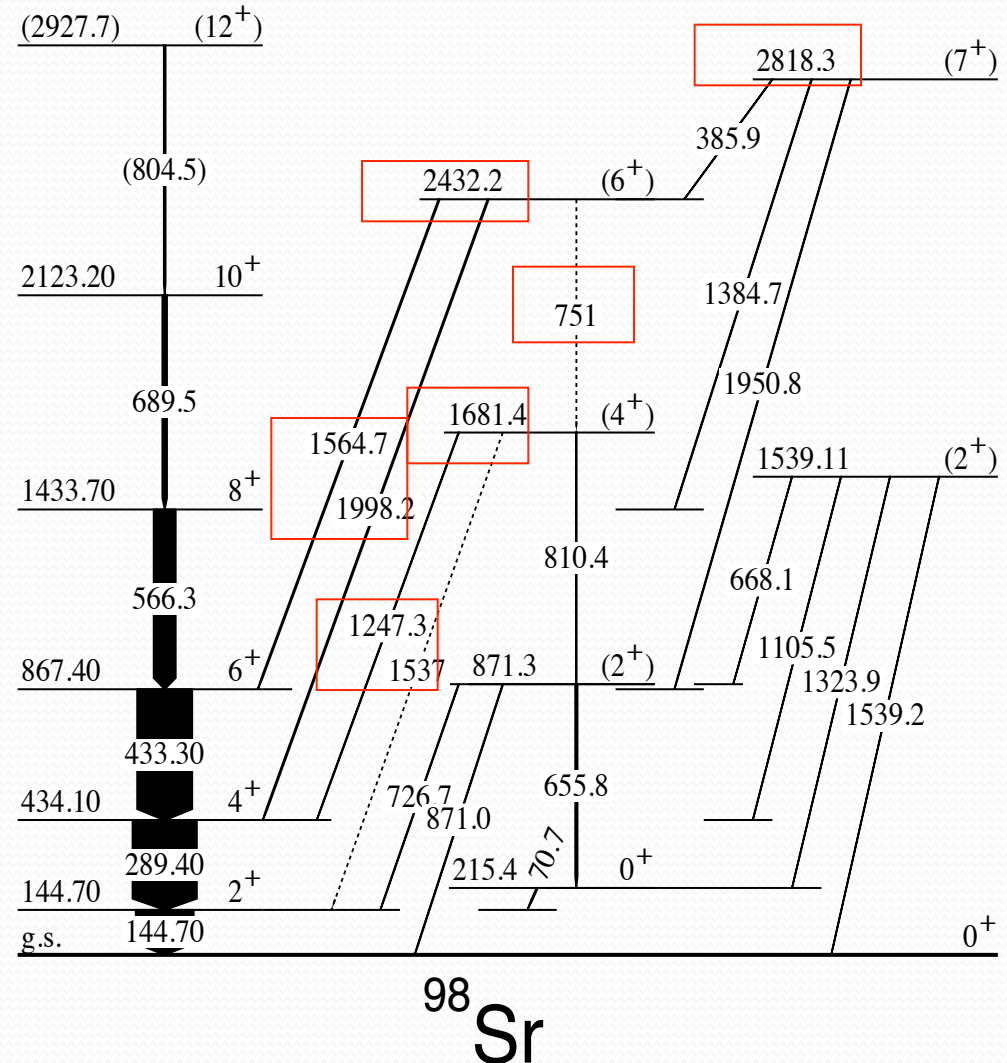
- pasmo wibracyjne

- liczne rozpady do pasma stanu podstawowego

ale

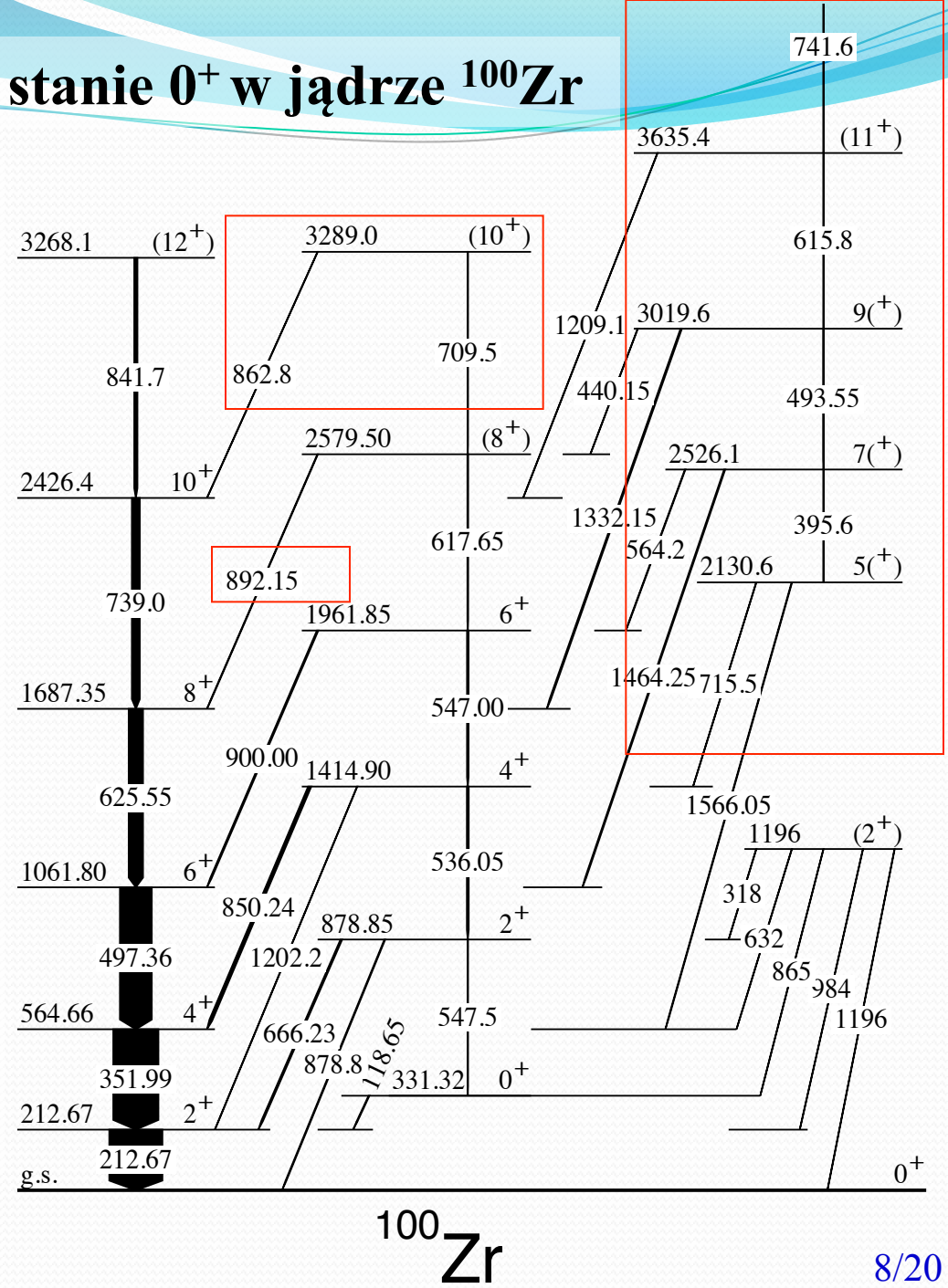
słabe oddziaływanie z pasmem stanu podstawowego ?

- mieszanie z wieloma stanami (wątpliwa analiza oddz. 2 stanów)



Pasmo wibracyjne na drugim stanie 0^+ w jądrze ^{100}Zr

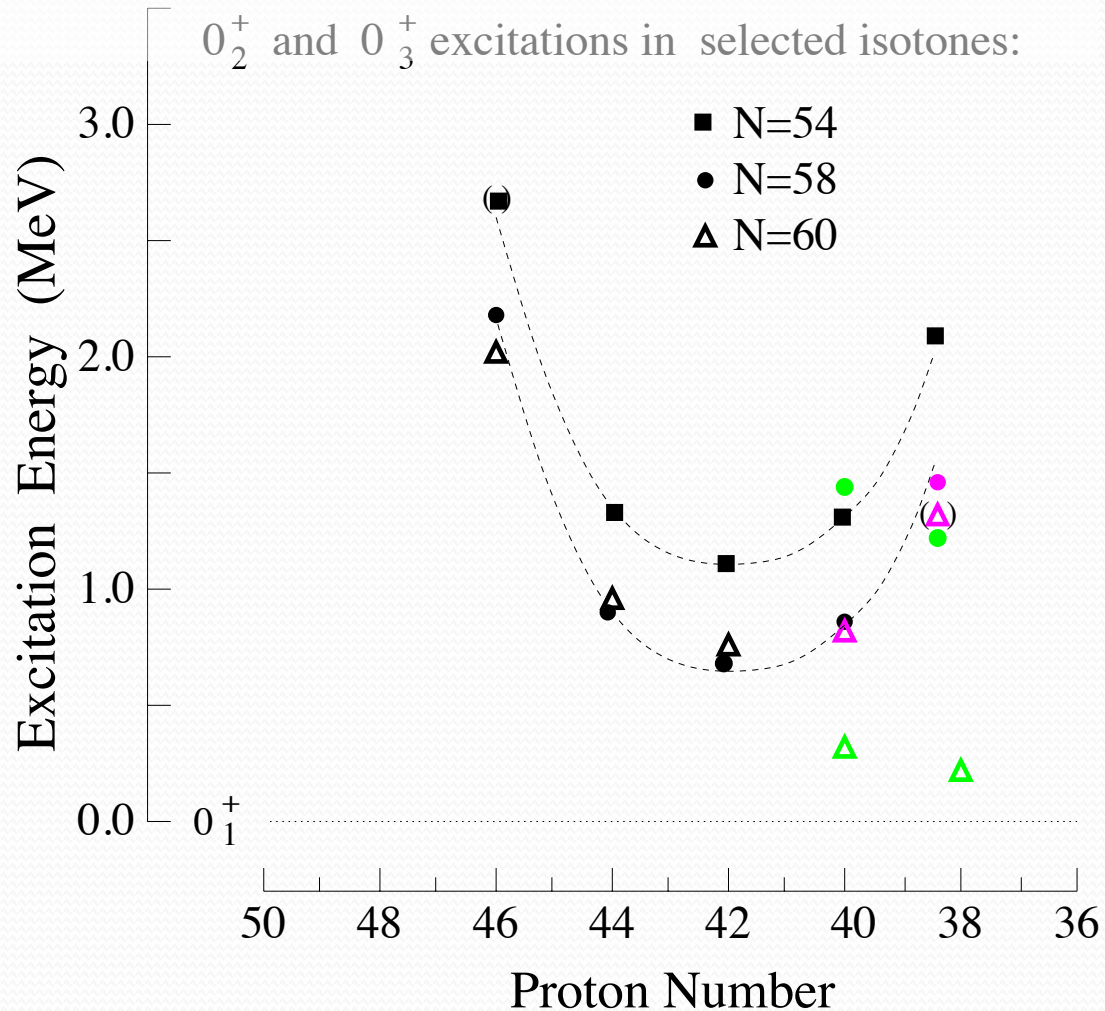
- drugi stan 0^+ w ^{100}Zr [F. Khan, et al., Z. Phys. A 283 ,105 (1977)]
- nowe lub zmienione poziomy, przejścia lub spiny i parzystości
- pasmo wibracyjne
- liczne rozpady do pasma stanu podstawowego
- ale**
- słabe oddziaływanie z pasmem stanu podstawowego ?
- mieszanie z innymi pasmami i stanami (wątpliwa analiza oddz. 2 stanów)



Interpretacja stanów wzbudzonych 0^+

Systematyka wybranych stanów 0^+ w jądrach z obszaru $A \sim 100$ w funkcji liczby protonów

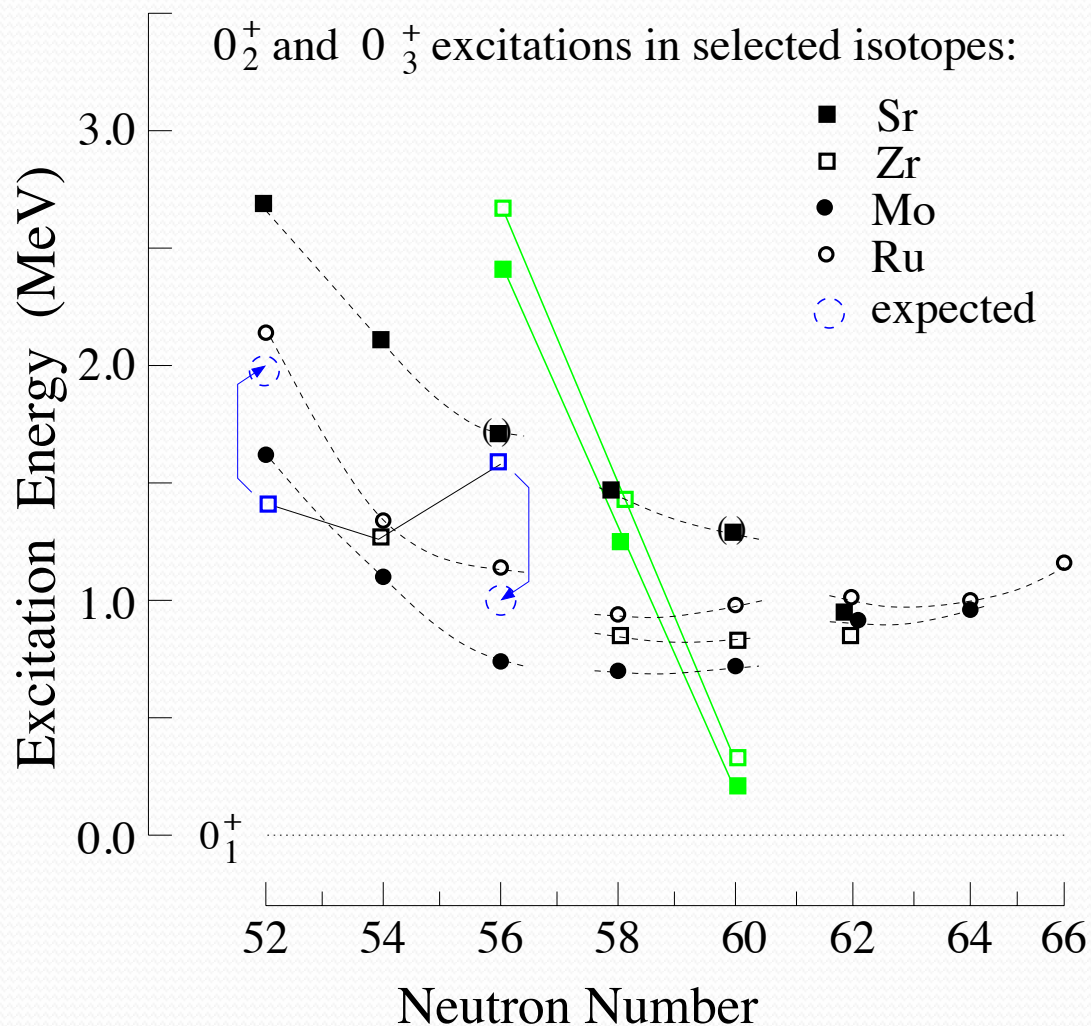
- zależność typu $E_{II}-E_I$ w oddz. dwóch stanów lub energii wzbudzenia „intrudera” 2p-2h [K.Heyde, J.L. Wood, Rev. Mod. Phys. 83, 1467 (2001)]
- zależność dla $N=58$ taka sama jak dla $N=54$
- dla $N=60$ stany 0^+ ^{98}Sr i ^{100}Zr poza systematyką ! Tu pasują trzecie stany 0^+
- inne wyjątki



[dane z prac własnych i bazy nndc.bnl.gov]

Systematyka wybranych stanów 0^+ w jądrach z obszaru $A \sim 100$ w funkcji liczby neutronów

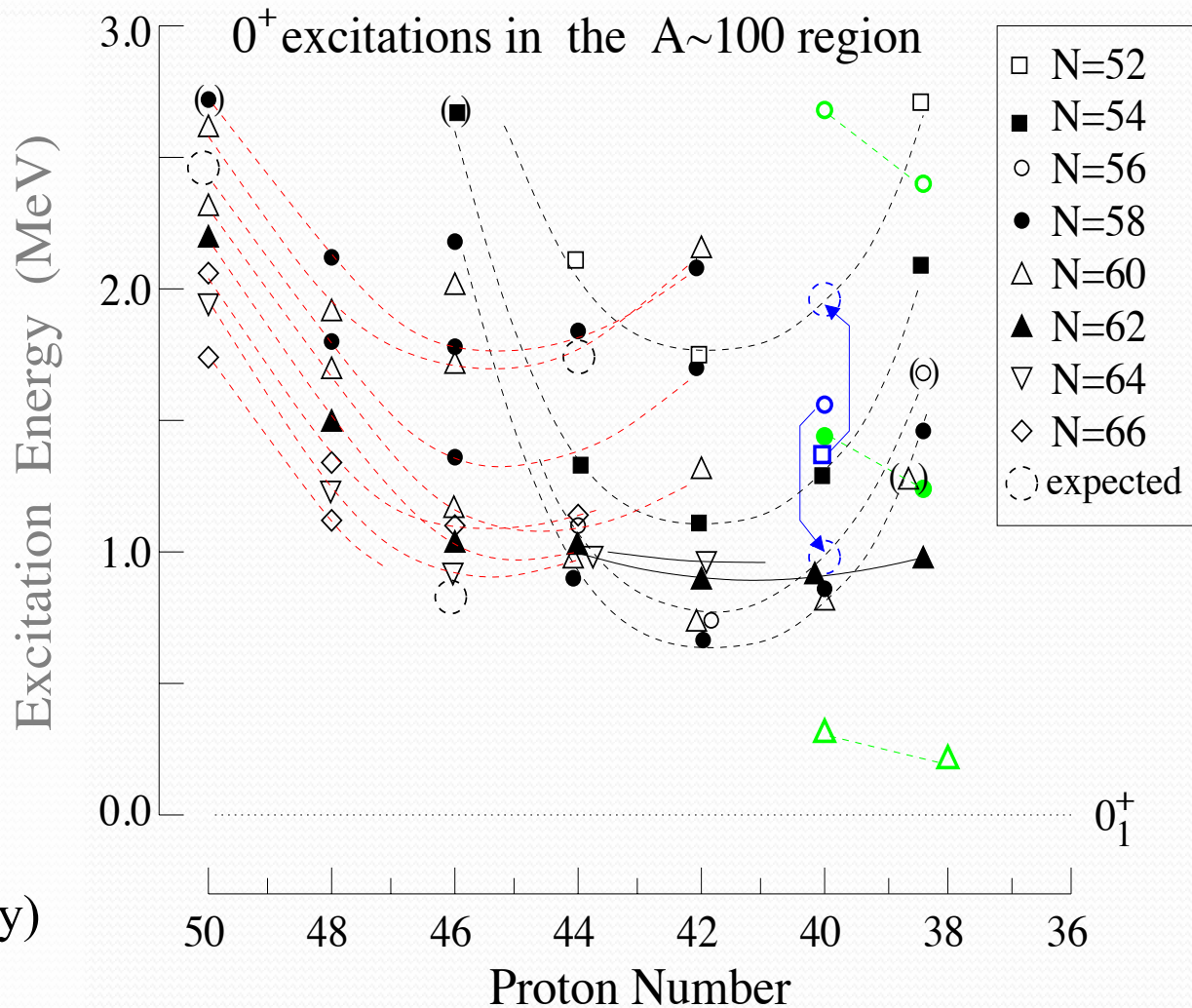
- zależność : energia stanów 0^+ maleje ze wzrostem liczby neutronów
- zależność podobna dla izotopów Sr, Zr, Mo oraz Ru : obsadzone kolejne powłoki $d_{5/2}$, $g_{7/2}$ oraz $h_{11/2}$ (?)
- stany 0^+ ^{98}Sr i ^{100}Zr poza systematyką ! Tu inna zależność (**zielone linie**)
- inne wyjątki



Systematyka stanów 0^+ w jądrach z obszaru $A \sim 100$

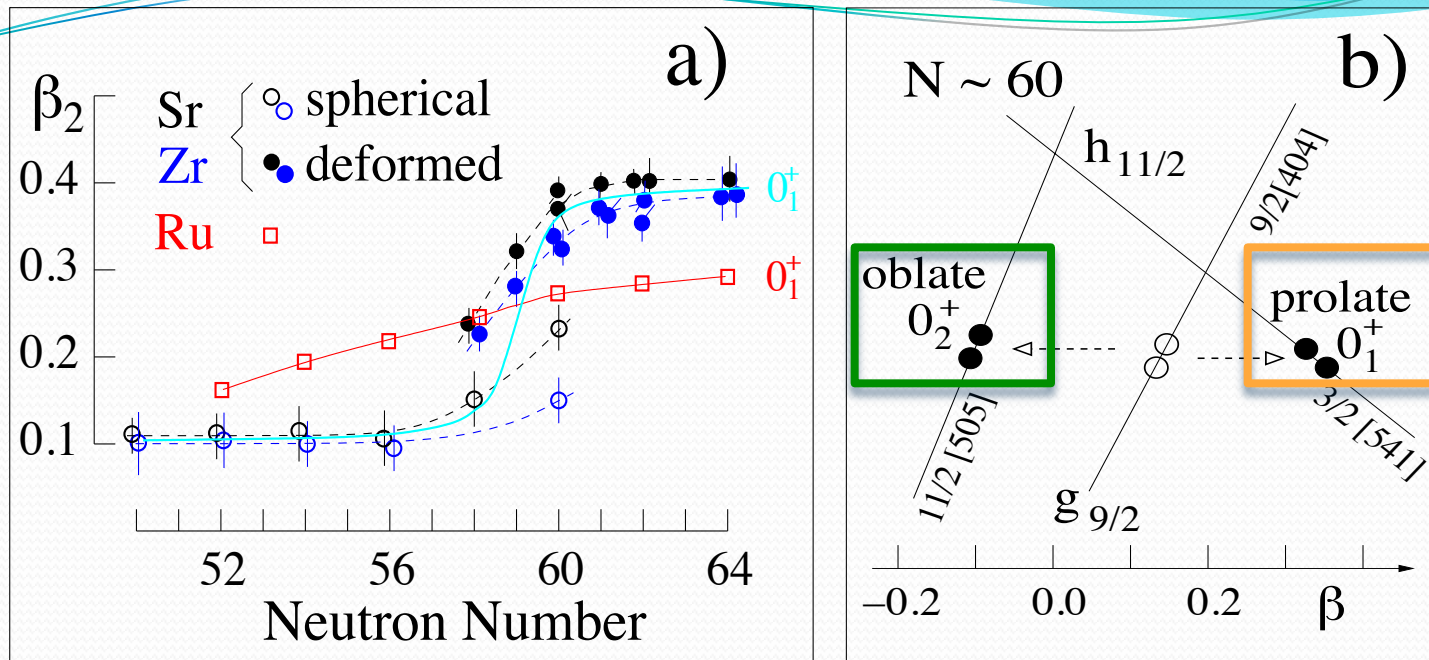
(63 stany: wszystkie stany 0_2^+ , większość stanów 0_3^+)

- zależność typu $E_{II}-E_I$ dla wzbudzenia 2p-2h neutronu z $d_{5/2}$ do $g_{7/2}$ oddziałującego z
 - a) protonami $g_{9/2}$ (czarne krzywe przerywane)
 - b) z dziurami protonowymi $g_{9/2}$ (czerwone krzywe)
- zależność „płaska” dla izotonów $N > 60$ (czarne ciągłe linie)
- stany 0^+ ^{98}Sr i ^{100}Zr poza systematyką ! (zielone punkty)
- inne wyjątki



[dane z prac własnych i bazy nndc.bnl.gov]

Interpretacja stanów 0^+ i deformacji w obszarze $A \sim 100$



- dla większości punktów wzbudzenia 2p-2h neutronu z $d_{5/2}$ do $g_{7/2}$ oddziałującego z protonami $g_{9/2}$ (czarne „parabole”) lub z dziurami $g_{9/2}$ (czerwone „parabole”) SOP dla stanów wzbudzonych 0^+ . „Avoided crossing” ze stanami podstawowymi.
- drugi stan 0^+ w ^{98}Sr i ^{100}Zr (zielone punkty) - wzbudzenia 2p-2h pary z ekstrudera $\nu 9/[404]$ do intrudera $11/2[505]$, **kształt oblate, mała deformacja** (Rys. b)
- stan podstawowy 0^+ w ^{98}Sr i ^{100}Zr - wzbudzenia 2p-2h pary z ekstrudera $\nu 9/[404]$ do intrudera $3/2[541]$, **kształt prolate, duża deformacja**
- dla $N \sim 59$ gdzie $9/2[404]$ zbliża się do poziomu Fermiego, efekt „extrudera” (Rys.b) nakłada się na efekt „paraboli” (Ru na Rys.a) powodując lokalny wzrost deformacji

Wzbudzenia kolektywne typu β

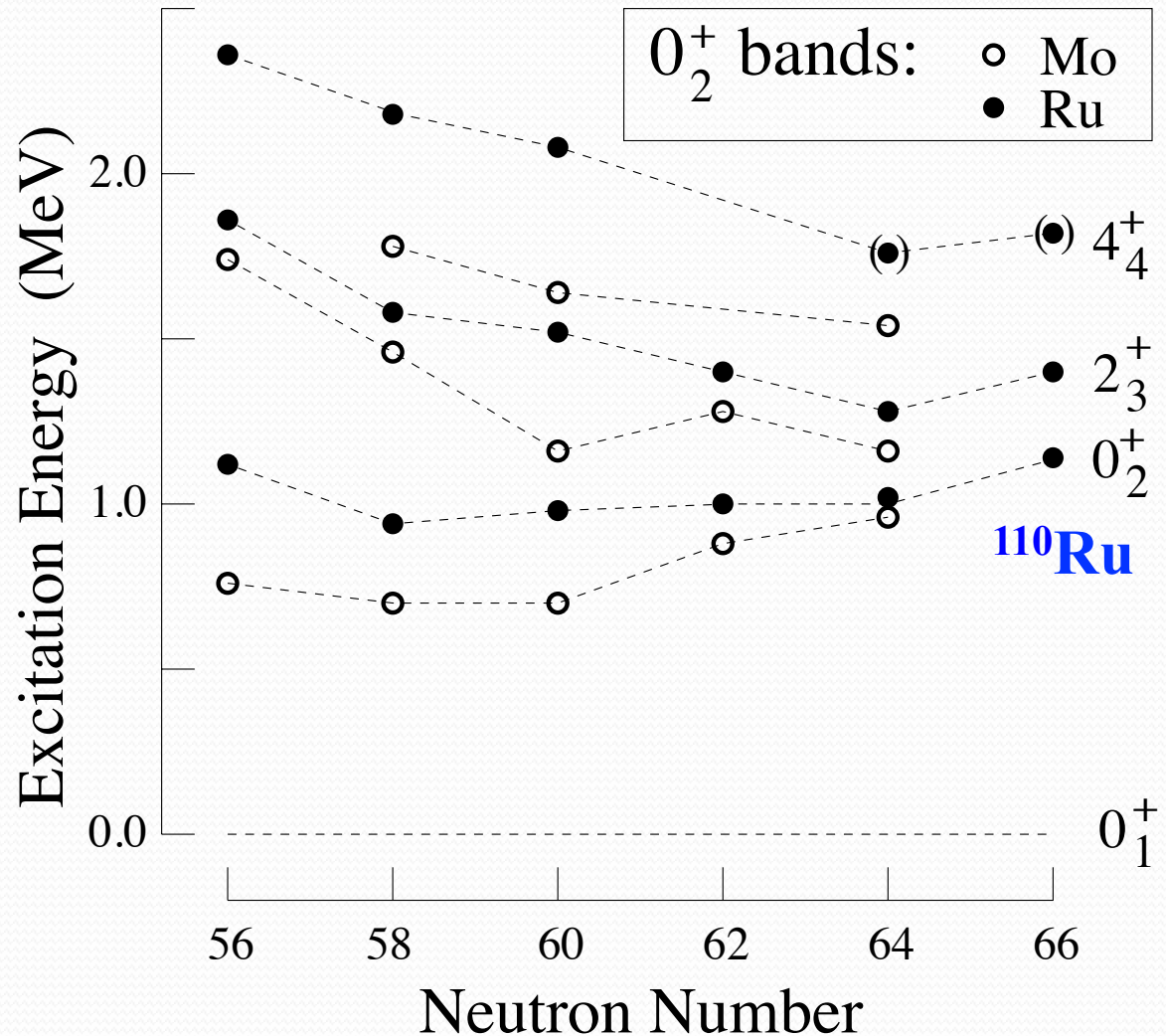
(rzadki rodzaj wzbudzenia [P.E. Garrett, J. Phys. G Nucl.Part.Phys. 27, R1 (2001)])

- zależność „płaska” dla izotonów $N > 60$ (czarne ciągłe linie w systematyce)

- nie 2p-2h ?

- wibracje $K=0$?

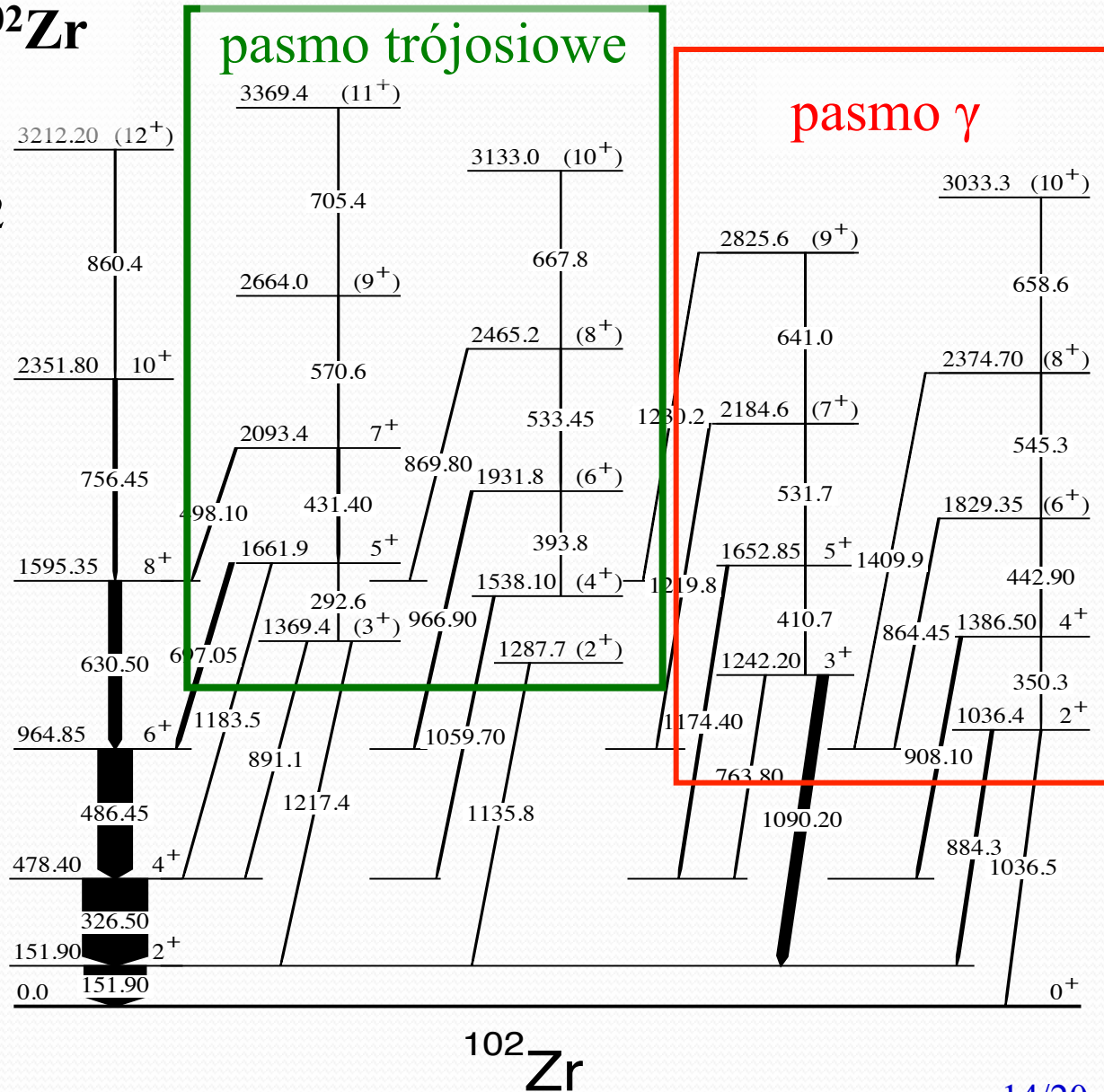
- w ^{110}Ru regularne pasmo rotacyjne na drugim 0^+ rozpadające się głównie do pierwszego stanu 2^+
możliwe pasmo β

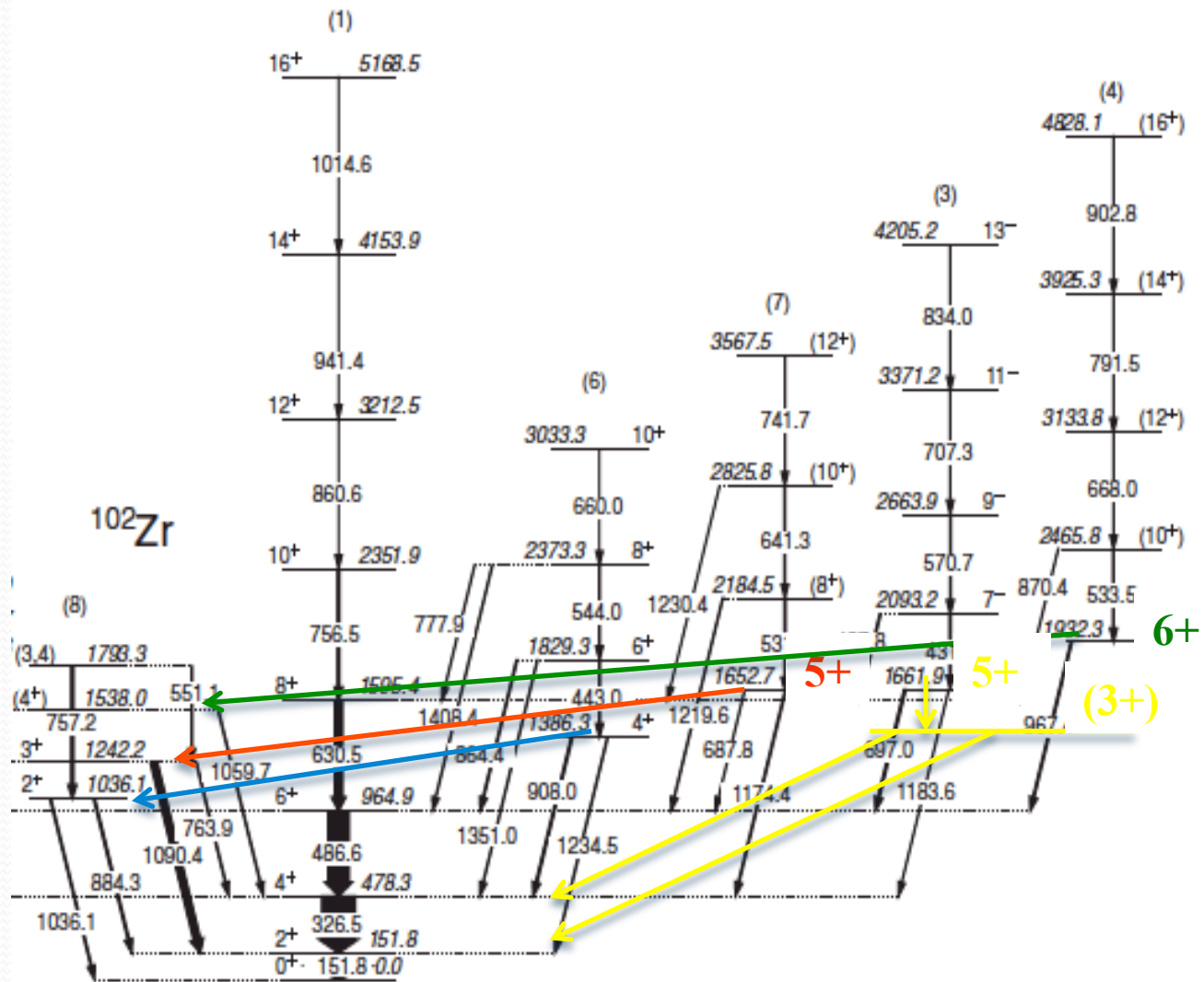
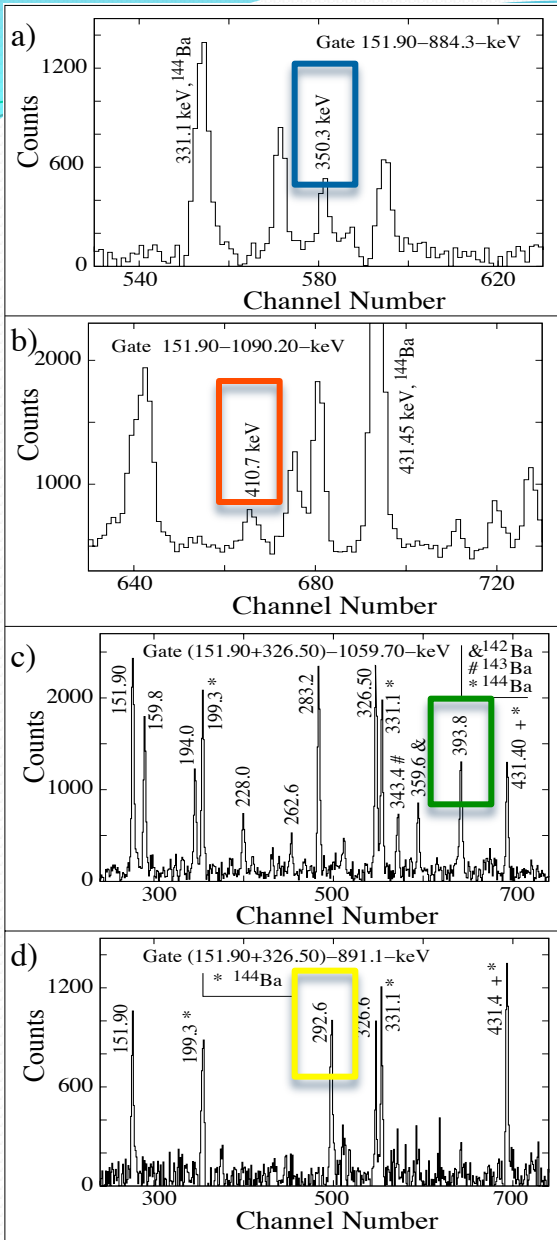


Wzbudzenia kolektywne typu γ

pasma $K=2$ w jądrze ^{102}Zr
nowy efekt

- dwa kolektywne pasma $K=2$ w jednym jądrze
- pojawiająca się w izotopach Zr kolektywność γ wyjaśnia problem „maksymalnej” kolektywności γ w Mo





„Aligned spin” i „alignment” w pasmach jądra ^{102}Zr

Pasmo $K=0$, g.s. - alignment początkowy zero, powolny, duży alignment przy wysokich częstościach :

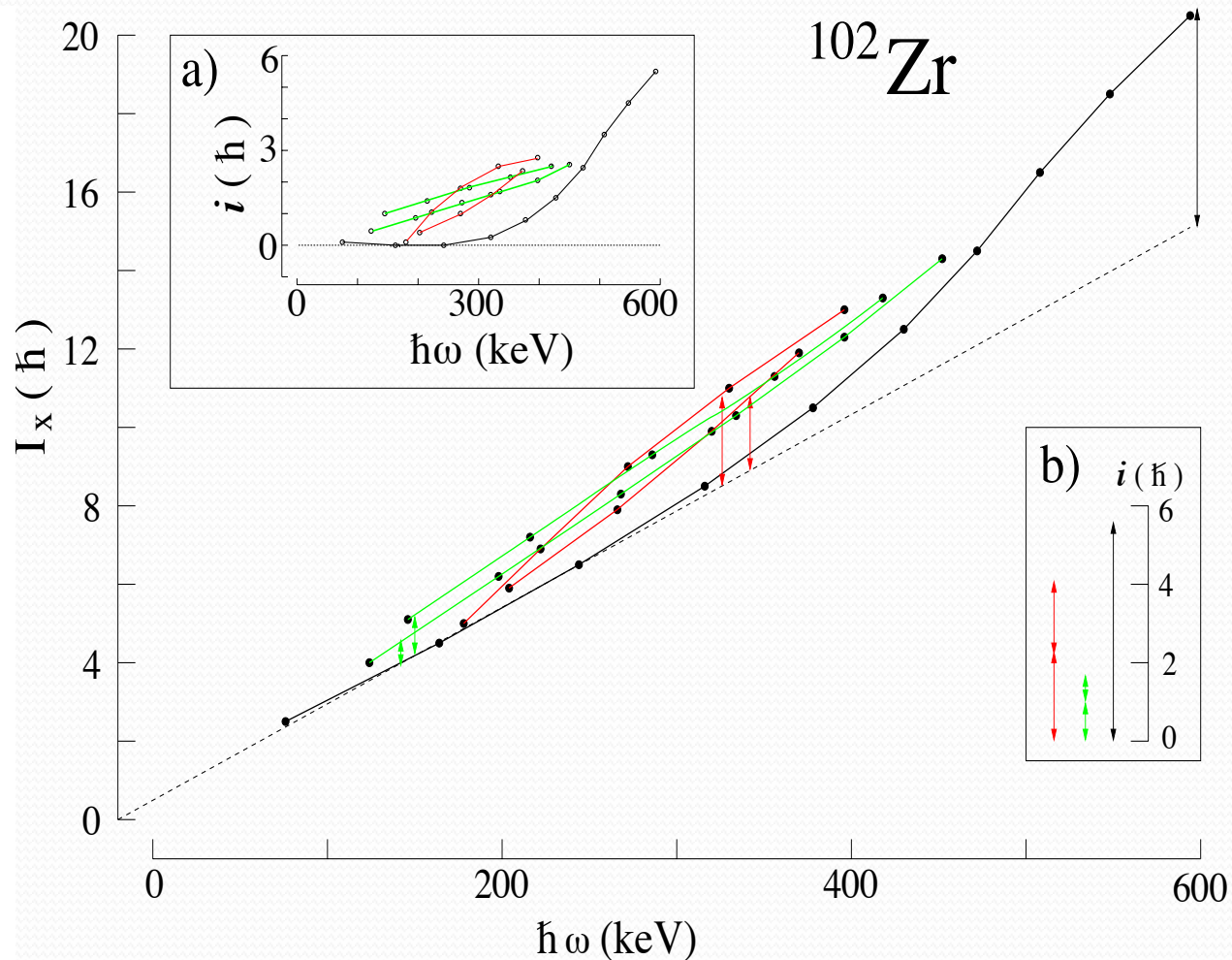
uszeregowanie neutronów $h11/2$

Pasmo $K=2$ „czerwone” - alignment początkowy zero, szybki alignment, $i=4 h$, przy niskich częstościach :

uszeregowanie fononu kwadrupolowego

Pasmo $K=2$ „zielone” - alignment początkowy mały, powolny alignment, „sztywna rotacja” :

pasmo trójosiowe z domieszką $2q.p.$



[dane wysoko-spinowe z pracy H.Hua, D.Cline, et al., PRC 69, 014317 (2004) - rozszczepienie $U238$ indukowane cząstkami alfa na cienkiej tarczy. **Spiny i parzystości skorygowane w obecnej pracy.**]

„Staggering” w pasmach K=2 jądra ^{102}Zr

Staggering, $S(I)$ [E. McCutchan, et al.
PRC 76, 024306 (2007)]

$$S(I) = [E(I) - E(I-1)] - [E(I-1) - E(I-2)]$$

normowany do $E_{\text{exc}}(2^+)$

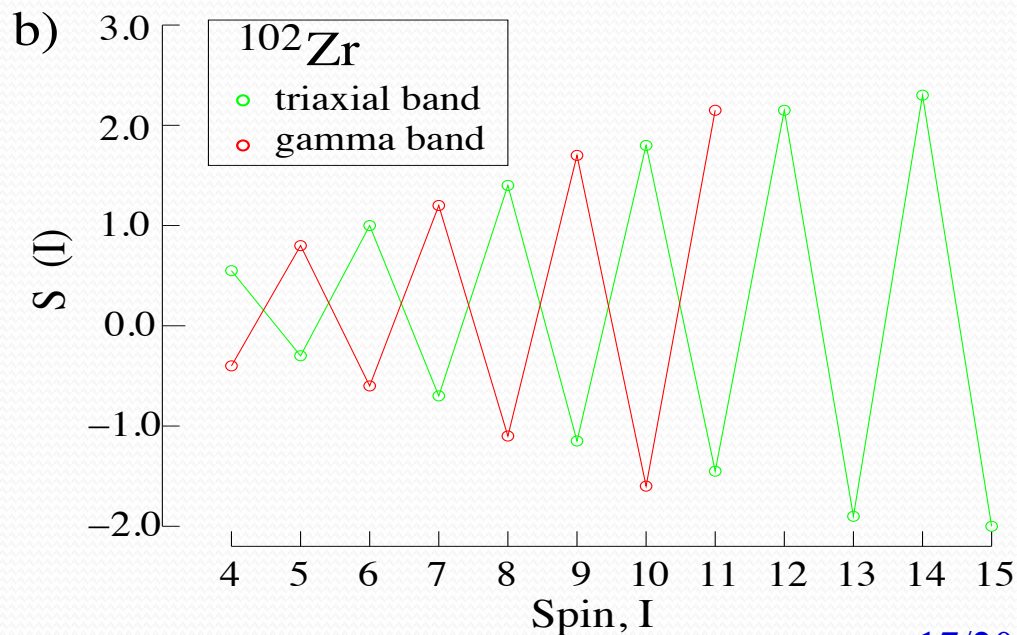
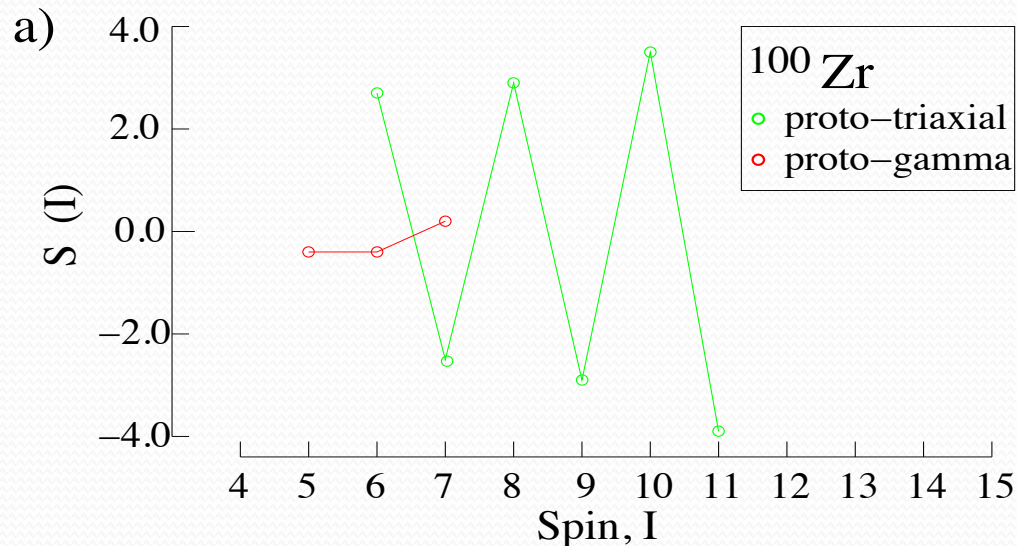
W jądrze ^{102}Zr

- pasmo K=2 „czerwone” - staggering charakterystyczny dla pasma typu γ
- pasmo K=2 „zielone” - staggering charakterystyczny dla pasma trójosiowego

ale

mieszanie konfiguracji γ ,
trójosiowych i 2 q.p.

K. Nomura, et al., PRL 108, 132501 (2012)



Model powłokowy i kolektywność γ w obszarze $A \sim 90$

- kolektywność w izotonach $N=53$ j-1 anomaly

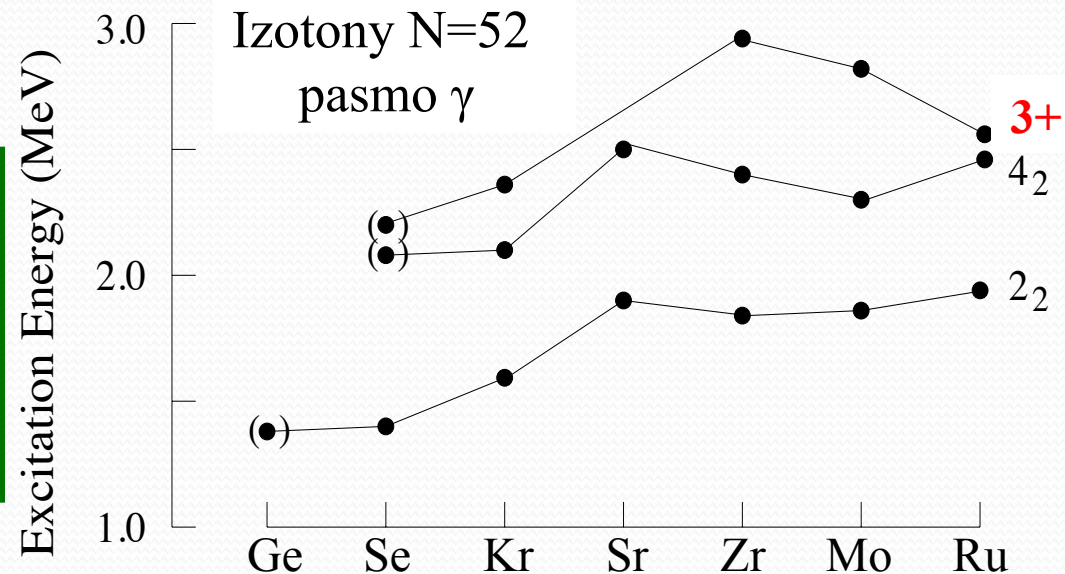
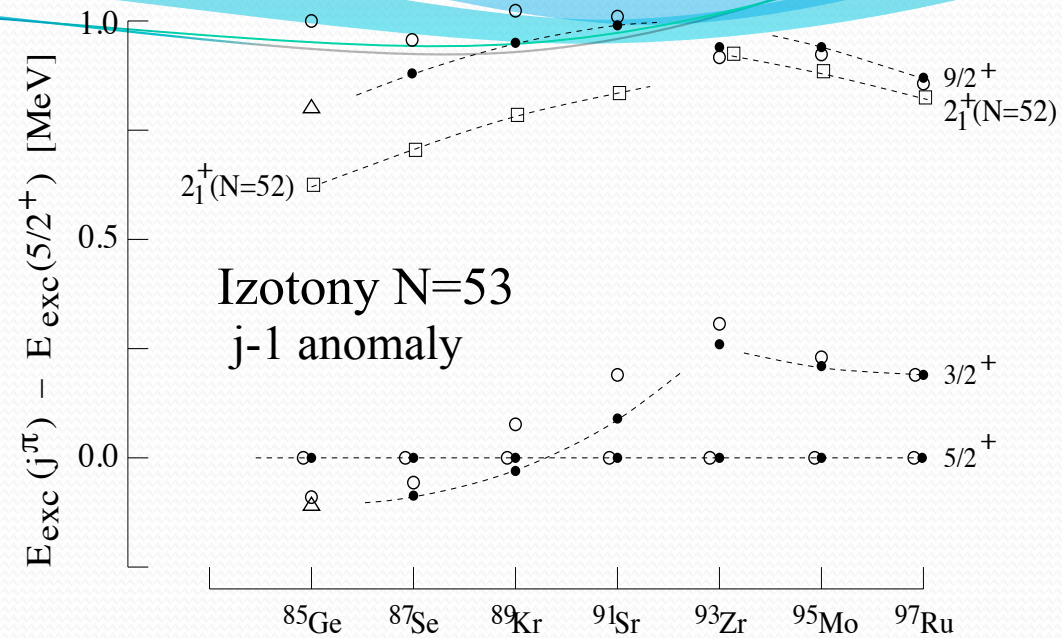
T. Rząca-Urban, K. Sieja, WU, et al.,
Phys. Rev. C 88, 034302 (2013)
M. Czerwiński, T. Rząca-Urban, WU et al.,
Phys. Rev. C 92, 014328 (2015)

- kolektywność γ dla $28 < Z < 50$

T. Materna, WU, K. Sieja, et al.,
Phys. Rev. C 92, 034305 (2015)
T. Rząca-Urban, K. Sieja, WU, et al.,
Phys. Rev. C 95, 064302 (2017)

- kolektywność z obliczeń LS-SM B(E2) up to 30 W.u. ($\beta_2 \sim 0.2$)

K. Sieja, et al., PRC 88, 034327 (2013)



Model powłokowy vs. zdeformowany potencjał (model Nilssona)

MC-SM - nowy opis zmiany kształtu w izotopach Zr

[T.Togashi, Y.Tsunoda, T.Otsuka, and N.Shimizu, Phys. Rev. Lett. 117, 172502 (2016)]

- type-II shell evolution („self-reinforcing effect”) - duże obsadzenie powłoki $\pi g_{9/2}$
- II order (quantum) phase transition - B(E2) od 5 W.u. (N=58) do 100 W.u. (N=60)
- orbital $\nu g_{9/2}$ nieobecny (5 MeV poniżej poziomu Fermiego)

jak przybliżyć orbital $\nu 9/2[404]$ do poziomu Fermiego ?

Wnioski i perspektywy

Wnioski

Przedstawiono nowe dane nt. stanów 0^+ w jądrach z obszaru mas $A \sim 100$ oraz nowe interpretacje takich stanów jako wzbudzeń wielocząstkowych. Przedstawiono także nowe dane nt. kolektywności γ w jądrach Zr oraz β w Ru. Te i inne ostatnie wyniki wskazują, że wzbudzenia γ są powszechne oraz, że wzbudzeń typu β nie można wykluczyć. Oba modele, kropłowy i powłokowy, choć oparte na krańcowo różnych założeniach, są istotne przy opisie własności jąder.

Program dalszych badań

- weryfikacja systematyki stanów 0^+
 - przewidywane nowe stany 0^+
 - własności stanów 0^+ na tej samej paraboli (reakcje transferu)
- spektroskopia orbitala $\nu 9/2^+[404]$
- analogiczne badania w obszarze $A \sim 150$ (orbital $\nu 11/2-[505]$)