

Zagadka niskoenergetycznych stanów 0^+ w jądrach parzysto-parzystych $A \sim 150$

Waldemar Urban

Wydział Fizyki

współpraca:

T. Rząca-Urban, J. Wiśniewski

Uniwersytet Warszawski

A.G. Smith

Manchester University

J.P. Greene

Argonne National Laboratory

(w ramach kolaboracji Eurogam II i Gammasphere)

Seminarium Środowiskowe ZFJ - ŚLCJ – NCBJ, 12.06.2025



Trochę historii

1911 - jądro atomowe, Rutherford

1929 - model kropli cieczy, G. Gamow: sukces w opisie mas jąder

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

1937 - model cząstek niezależnych, E. Wigner

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

1949 - model powłokowy, M. Goeppert-Mayer, J. H. Jensen (droga swobodna > 20 fm ?)

1951 - zakaz Pauliego w jamie potencjału, V. Weisskopf

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

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

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

Kolejne 70 lat to dominacja prostych modeli

Jak opisywane są najniższe wzbudzenia 0^+ ?

0_2^+ jako złożenie dwóch drgań 2_1^+ : stan dwu-fononowy

w sferycznych izotopach Cd jako podręcznikowy przykład

odrzucony [P. Garret, et al., J. Phys G. 37, 064826 (2010);

Phys. Scr. 93, 063001 (2018)]

0_2^+ jako tzw. wibracja β – D.R. Bes, Nucl. Phys. 49, 544 (1963)

nadal proponowany w jądrach zdeformowanych

[np. J.B. Gupta, Nucl. Phys. A 990, 162 (2019)]

odrzucony [P. Garret, et al., J. Phys G. 27, R1 (2001)]

(uwaga często terminem „wibracja β ” opisuje się wszystkie inne stany 0_2^+ : stan dwu-fononowy, wibracje γ -fonon, wibracje $\gamma\gamma$)

zdecydowanie odrzucony [J. Sharpey-Schafer, et al.,

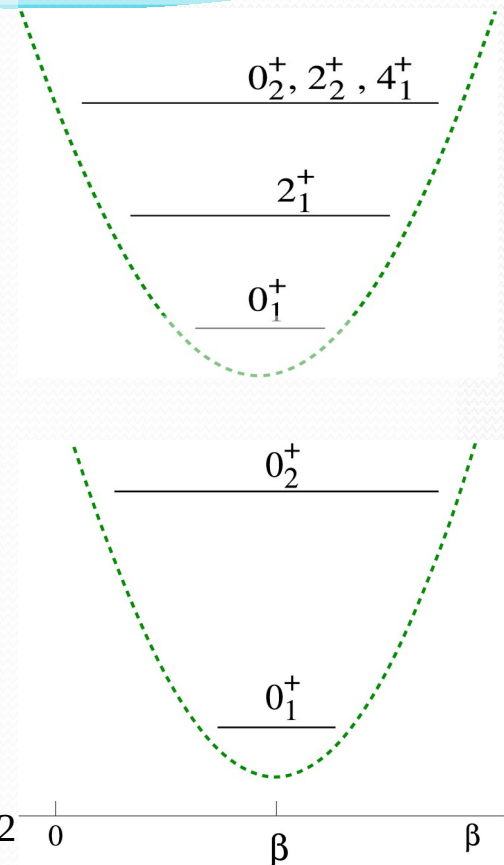
„154Gd. Configuration dependent pairing and lack of β vibration”,

Eur. Phys. J. A 47:5 (2011);

„Decline and fall of nuclear β - and γ -vibrations”, Proc. of SAIP202

„The conjecture of Bohr and Mottelson that the lowest $K^\pi = 0^+$ and $K^\pi = 2^+$ rotational bands in deformed nuclei could be identified as “vibrations” of the quadrupole shape, turns out to be fallacious.”

0_2^+ jako tzw. wibracja pairing / pairing isomer / pair excitation



0_2^+ jako **wibracja pairing** [D.R. Bes, R.A. Brogila, „Pairing vibrations”, Nucl. Phys. 80, 289 (1966)]

$$H = H_{s.p.} + H_p, \quad H_p = -G P^+ P, \quad P^+ = \sum P_u^+, \quad P_u^+ = c_u^+ c_{\bar{u}}^+$$

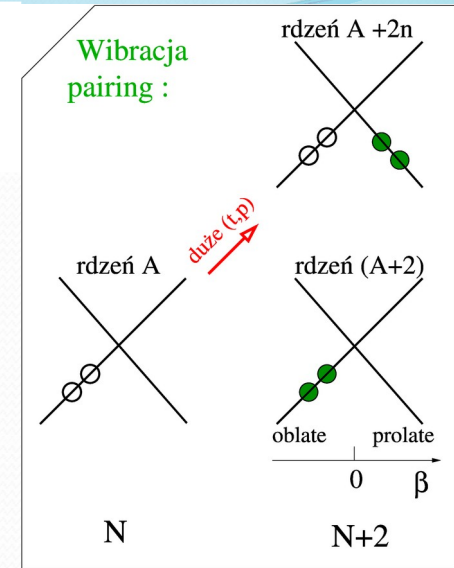
(bez zachowania liczby cząstek !)

- (p,t) transfer w aktywnowcach - **nie ma wibracji pairing !**

[J.V. Maher, PRL 25, 302 (1970); PRC 5,1380 (1972)]

- **różny pairing dla orbitali typu prolate i oblate** [R.E. Griffin, Phys. Lett 36B, 281(1971)]

- obliczenia (aktywnowce) - **nie ma różnicy !** [R.R. Chasman, PRL 28, 1275 (1972)]



0_2^+ jako **pairing isomer**

- pojedynczy, pusty orbital oblate $1/2[501]$, $G_{pp} \sim G_{oo} > G_{po}$ w powłokach $\nu p_{1/2}, \nu f_{5/2}$

objaśnia (p,t) w aktywnowcach, problemy z energią 0_2^+ [W.I. van Rij, PRL 28, 50 (1971)]

- pairing vibration to 2 dziury w orbitalu oblate [R.F. Casten, Phys. Lett. 40B, 333 (1972)]

- pairing monopolowy i kwadrupolowy [D.R. Bes, Phys. Lett 40 B, 338 (1972)]

- pairing isomer - podsumowanie [I. Ragnarsson, R.A. Broglia, Nucl.Phys. A263,315 (1976)]

- pair-hopping model [F.Barranco, Nucl.Phys. A512, 253 (1990); R.A.Brogila, PRC 49, 552 (1994)]

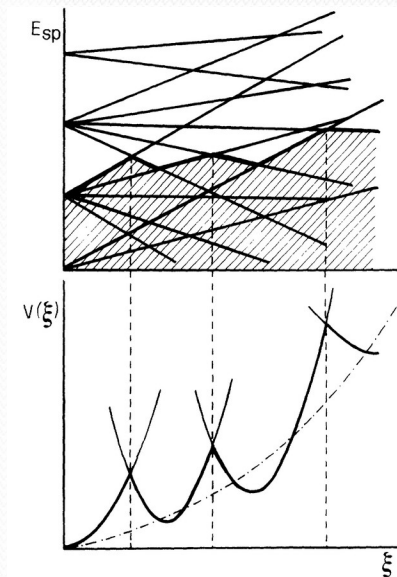
“At each crossing, pairs of particles in time-reversal states jump from occupied to empty levels under the influence of the residual interactions.

A natural choice for the residual interaction is the pairing interaction.”

- $11/2^- [505]$ neutron - pairing isomer w lantanowcach, jeden orbital, różny pairing dla orbitali prolate i oblate [R.J. Peterson, J.D. Garrett, Nucl. Phys. A414, 59 (1984)]

- współczesna referencja - 0_2^+ jako „second vacuum” oraz wzbudzenie $(11/2^- [505])^{-2}$

[J.F. Sharpey-Schafer, Eur. Phys. J A 59:183 (2023)]



0_2^+ jako pair excitation

B.R. Mottelson and S.G. Nilsson,
Letter to The Editor, Phys. Rev. 99, 1615 (1955)

„In particular, the dramatic increase in the nuclear deformation from neutron number $N=88$ to $N=90$ follows as a consequence of the breaking up of the $h_{11/2}$ shell which occurs at this point.”

^{151}Gd , P. Kleinheinz, et al. PRL 32, 68 (1974)

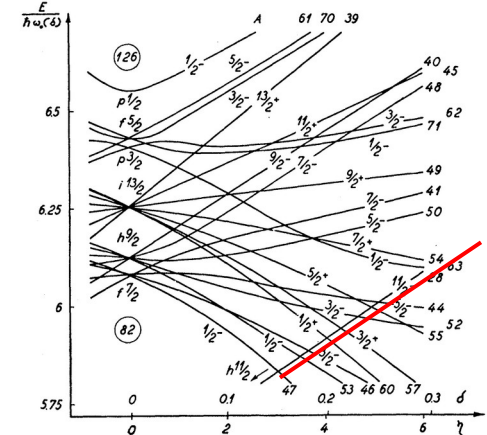
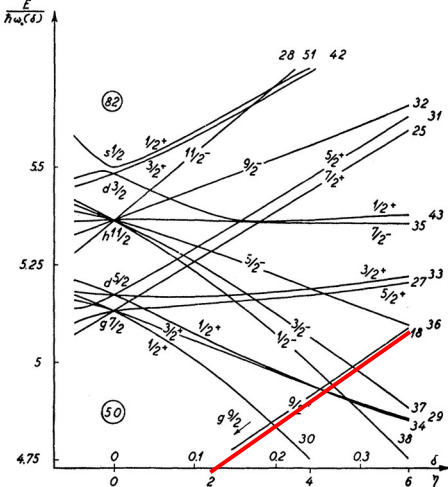
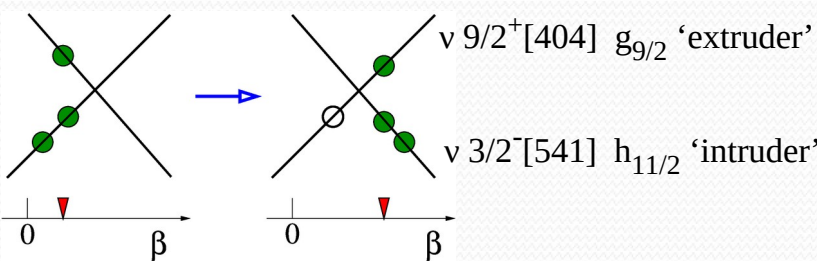


FIG. 2. Same as Fig. 1 but for neutrons from $N=82$ to $N=126$.

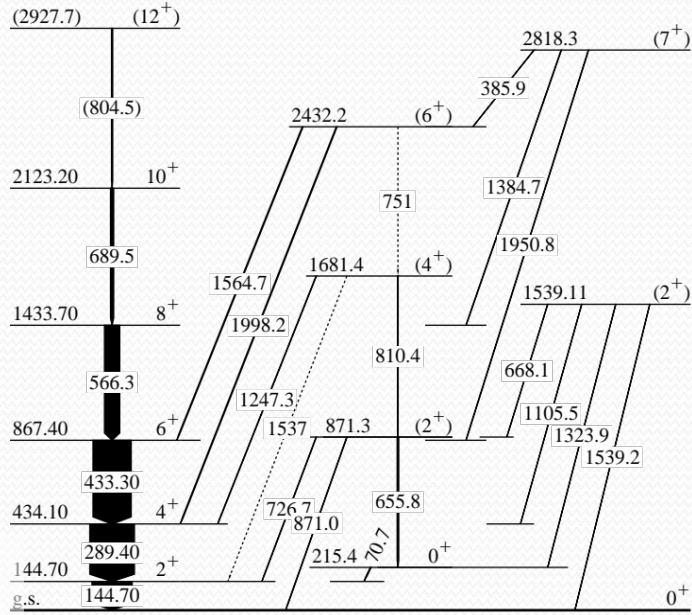
$\nu 11/2^- [505]^{-1}$, $\nu h_{11/2}^{-1}$ hole state (‘extruder’) generuje **zdeformowane** stany wzbudzone w izotonach $N=87$

$A \sim 100$: neutron, $9/2^+ [404]$, 1038.5-keV ‘extruder’ w $^{99}\text{Zr}_{59}$

W.U., et al., Eur. Phys. J. A 22, 241 (2003)



F. Schussler, Nucl. Phys. A 339, 415 (1980) - stan 0_2^+ w ^{98}Sr ,
najniższy znany stan wzbudzony 0^+ - **to nie jest wibracja pairing !**

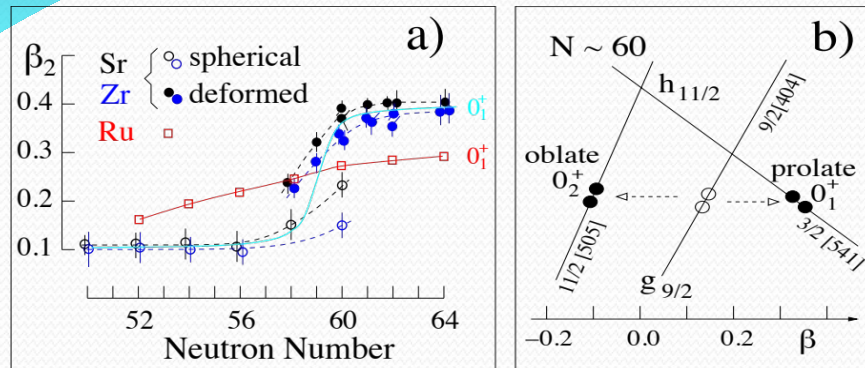


^{98}Sr

[W.U., et al., Phys. Rev. C 99, 064325 (2019)]

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

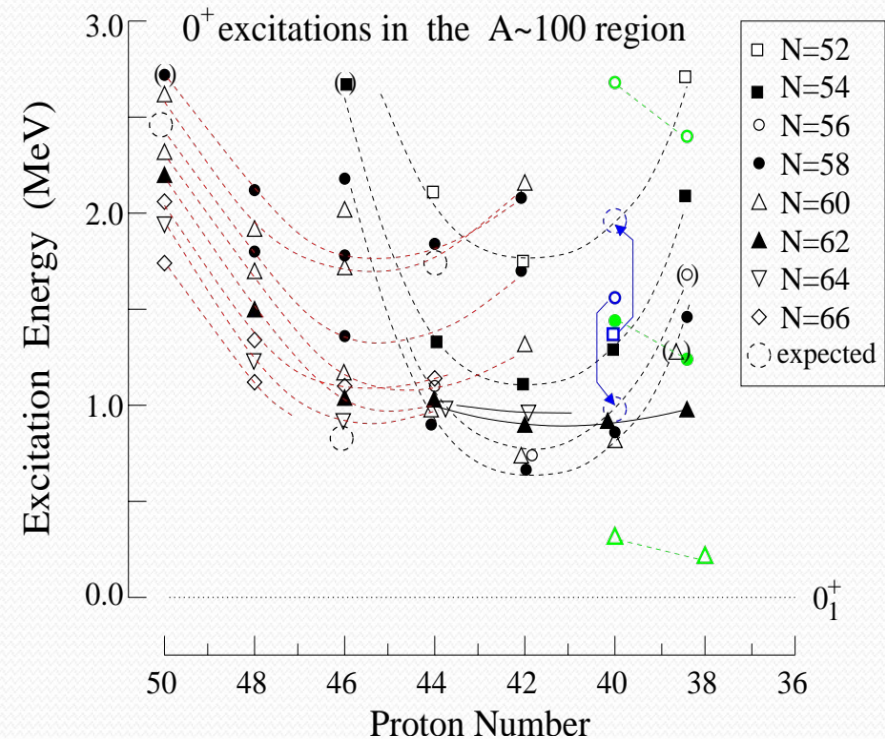
Systematyka stanów 0^+ w jądrach z obszaru $A \sim 100$



- stan podstawowy 0^+ w ^{98}Sr i ^{100}Zr to wzbudzenie pary neutronów z ekstrudera $\nu 9/[404]$ do intrudera $3/2^- [541]$, **kształt prolate**, duża deformacja – rys. (b)
- populacja orbitala **deformation-driving**, $\nu h_{11/2}$
- [Kumar and Guyne, Phys. Rev. C 32, 2116 (1985); Skalski, Heenen, Bonche, Nucl.Phys. A559, 221 (1993)]
- stan 0_2^+ w ^{98}Sr , ^{100}Zr (zielone punkty) to wzbudzenie pary neutronów z ekstrudera $\nu 9/[404]$ do intrudera $11/2^- [505]$, **kształt oblate** – rys. (b)

[W.U., et al., Phys. Rev. C 99, 064325 (2019)]

63 stany - wszystkie stany 0_2^+ , większość stanów 0_3^+



0_2^+ to wzbudzenia pary neutronów z $d_{5/2}$ do $g_{7/2}$ gdzie następuje oddziaływanie SOP z protonami $g_{9/2}$ (czarne „parabole”) lub z dziurami $g_{9/2}$ (czerwone „parabole”).

Pomiary: systematyki wzbudzeń w łańcuchach izotonów/ izotopów

Gammasphere

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

ok. 200 det. Ge, rozszczepienie ^{252}Cf

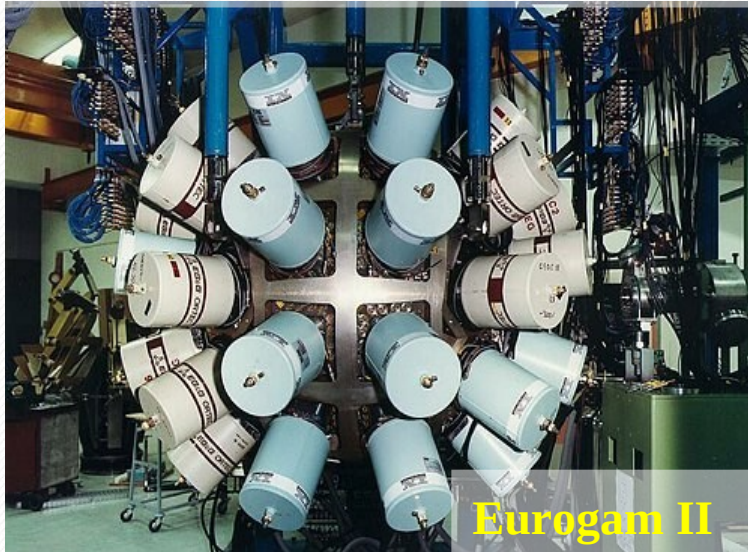
Pomiar 2000, 2×10^{11} zdarzeń $\gamma\gamma$

Eurogam II

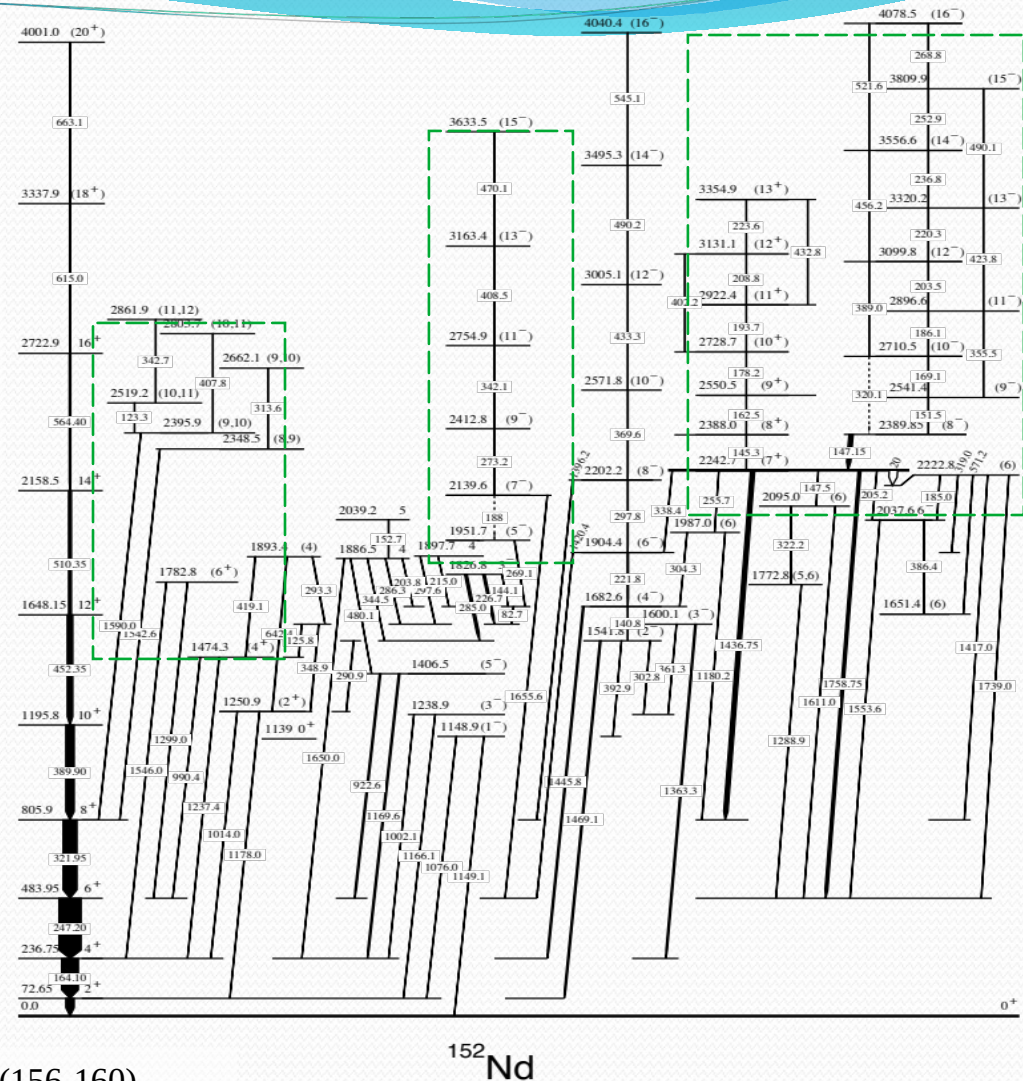
[P.Nollan, Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 44, 561 (1994)]

130 det. (Clover, LEP), rozszczepienie ^{248}Cm

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



Eurogam II



^{152}Nd

Opublikowane: Sr(88-96), Zr(96-102), Nd(154-156), Sm(156-160)

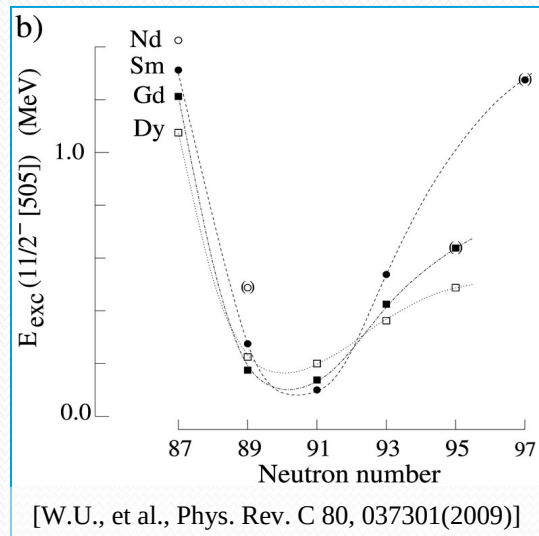
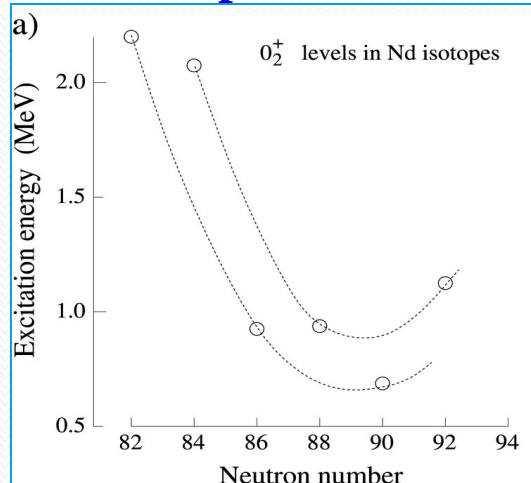
Analizowane : Zr (92-98), **Nd (146 - 152)**

Planowane: Ce(140-154), Sm (152-154), Sr (98-102), Zr(102-104)

[W.U., et al., Nd 2025] - to be published]

Systematyki wzbudzeń 0_2^+

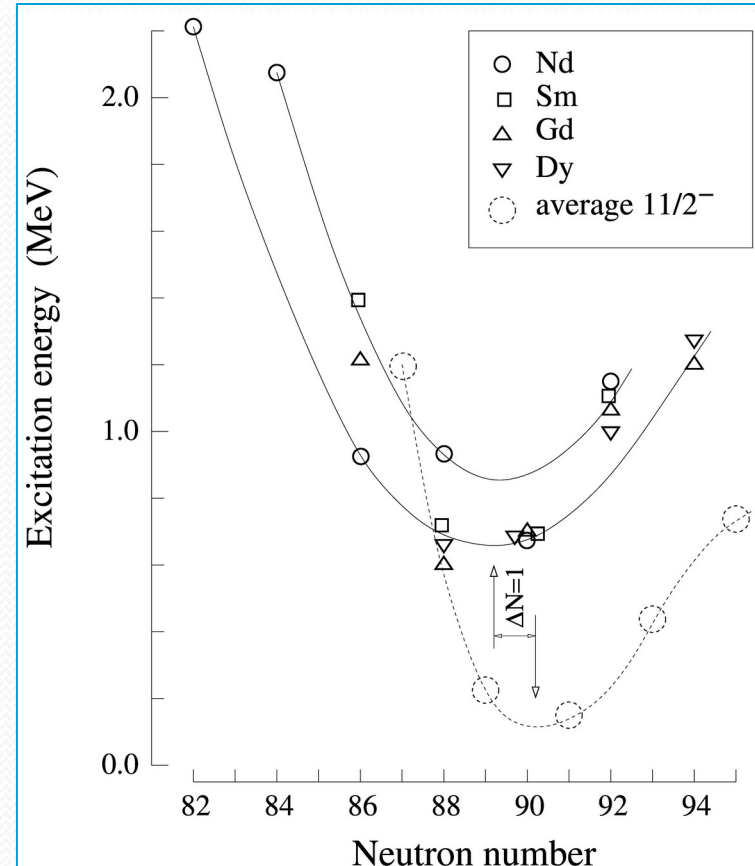
w izotopach Nd



[J.F. Sharpey-Schafer, et al., Eur. Phys. J. A 55:15 (2019)]

0_2^+ w izotonach $N=90$, ^{152}Sm , ^{154}Gd

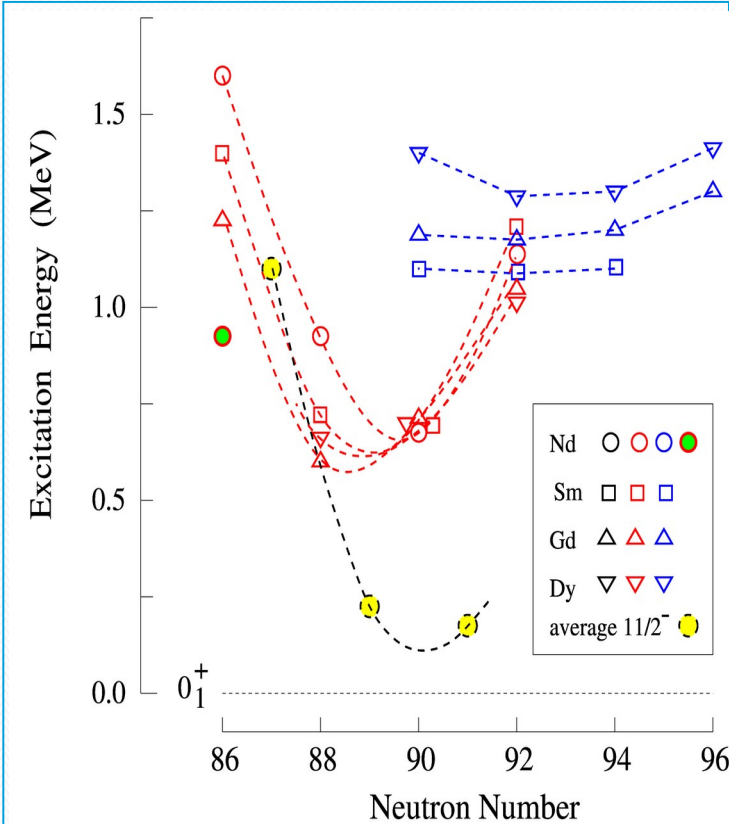
oraz w ich izotonach



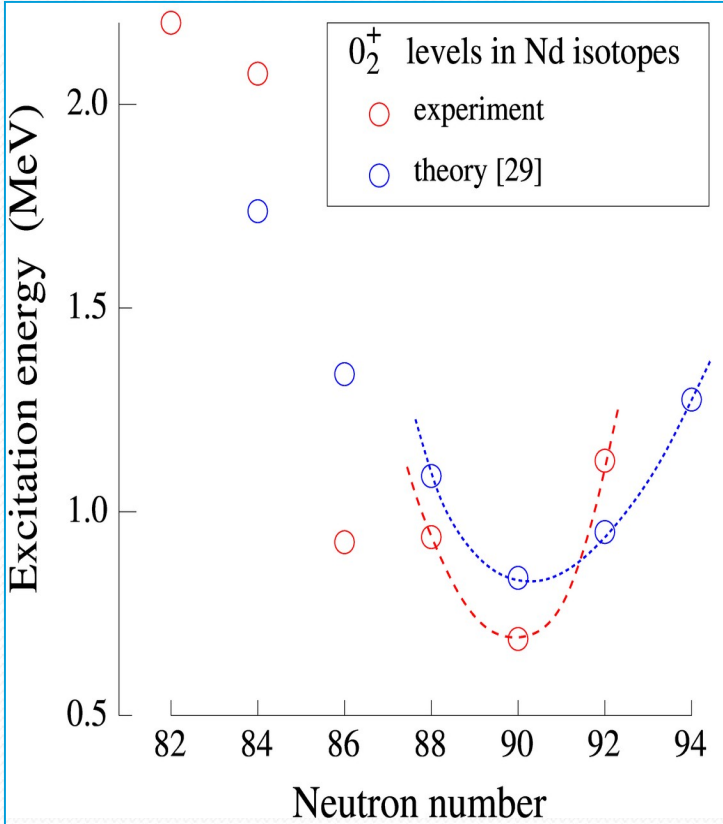
- korelacja wzbudzeń 0_2^+ ze wzbudzeniami $11/2^- [505]$
- nieco różne systematyki w izotonach łańcucha Nd
- bardzo podobne energie 0_2^+ przy $N=90, 92$

[W.U., et al., Nd 2025]

Systematyki wzbudzeń 0^+ w izotopach Nd

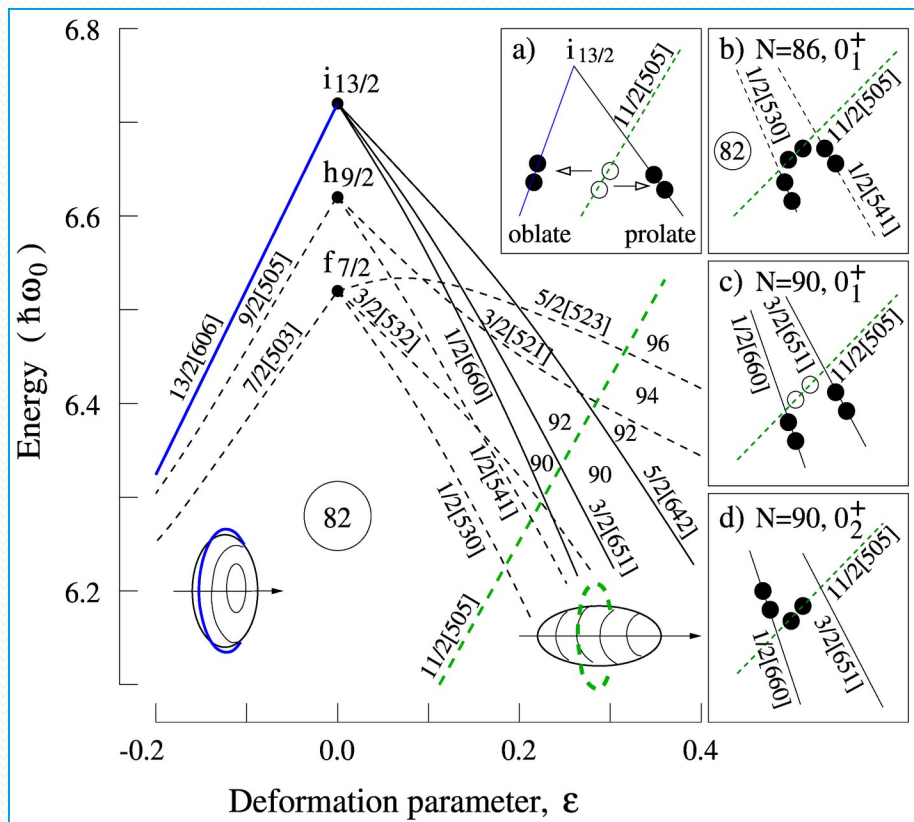


[W.U., et al., Nd 2025]



GCM with relativistic PC-F1 eff. Int.
[T. Niksic, et al., PRL 99, 092502 (2007)]

(dominujące wzbudzenia par nukleonów)



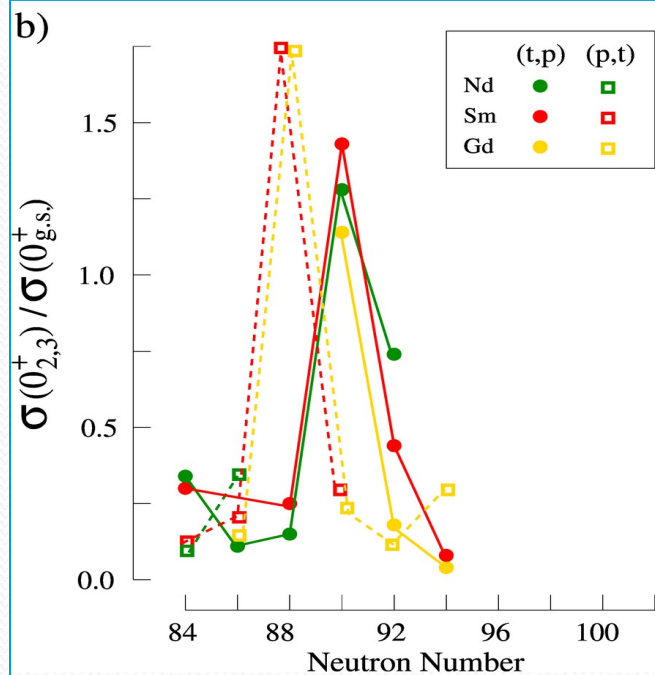
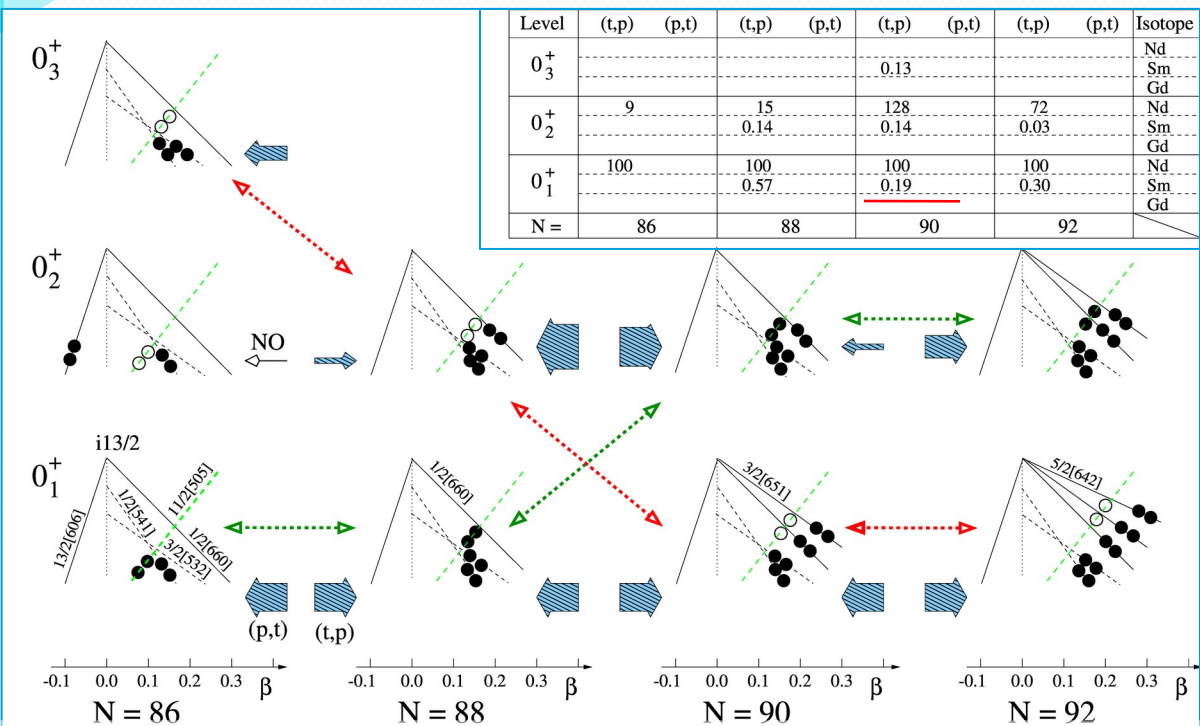
Proponowane konfiguracje neutronowe :

- $- \mathbf{0}_1^+, {}^{146}\text{Nd} : \nu [(\frac{1}{2}^- [541])^2 \otimes (11/2^- [505])^2]$
 $- \mathbf{0}_2^+, {}^{146}\text{Nd} : \nu [(\frac{13}{2}^+ [606])^2 \otimes (11/2^- [505])^{-2}]$ - oblate
 $- \mathbf{0}_3^+, {}^{146}\text{Nd} : \nu [(\frac{3}{2}^- [532])^2 \otimes (11/2^- [505])^{-2}]$ - prolate
 $- \mathbf{0}_1^+, {}^{148}\text{Nd} : \nu [(\frac{3}{2}^- [532])^2 \otimes (11/2^- [505])^2]$
 $- \mathbf{0}_2^+, {}^{148}\text{Nd} : \nu [(\frac{1}{2}^+ [660])^2 \otimes (11/2^- [505])^{-2}]$
 $- \mathbf{0}_1^+, {}^{150}\text{Nd} : \nu [(\frac{3}{2}^+ [651])^2 \otimes (11/2^- [505])^{-2}]$
 $- \mathbf{0}_2^+, {}^{150}\text{Nd} : \nu [(\frac{1}{2}^+ [660])^2 \otimes (11/2^- [505])^2]$

Poziomy Nilssona - neutrony [G. Andersson, Nucl. Phys. A 268, 205 (1976)]

[W.U., et al., Nd 2025]

Dominujące konfiguracje neutronowe w jądrach parzysto-parzystych z obszaru $A \sim 150$ - związek z przekrojem na transfer pary neutronów



1. [R. Chapman, et al., Nucl.Phys. A186, 603(1972)]

bezwzględne wartości przekrojów dla Sm

- **gwałtowny wzrost (t,p) przy N=90**

2. [A. Aprahamian, et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 143, 104173 (2025)]

kompilacja względnych wartości przekrojów $A \sim 150$

- **gwałtowny wzrost (p,t) przy N=88**

3. Uwaga ! dla $Z > 60$ suma (t,p) do 0_2^+ i 0_3^+

[W.U., et al., Nd 2025]

- gwałtowny wzrost deformacji od N=88 do N=90 - **akcja ekstrudera $11/2^- [505]$**

powodująca nagłe obsadzenie powłoki $i_{13/2}$ przez **dwie** pary neutronów

- przecięcie konfiguracji 0_1^+ i 0_2^+ między N=88 a N=90 (avoided crossing)

- w izotonach N=90 duży transfer (t,p) do 0_2^+ oraz mały do 0_1^+

- w izotonach N=88 duży transfer (p,t) do 0_2^+

- brak (p,t) do 0_2^+ oraz duże (p,t) do 0_3^+ w ^{146}Nd

Wnioski i perspektywy

Wnioski

Dane dla stanów 0^+ w jądrach przejściowych z obszarów mas $A \sim 100$ i $A \sim 150$ sugerują interpretację tych stanów jako wzbudzeń wielocząstkowych z domieszką wzbudzeń kolektywnych.

Udział kolektywności rośnie wraz z liczbą nukleonów walencyjnych.

Dostępne dane wskazują, że w jądrach zdeformowanych nie można wykluczyć istnienia wzbudzeń 0^+ typu wibracja β .

Co dalej ?

Eksperyment i fenomenologia :

- systematyki E_{ex} , przekroju na transfer, przejść $E0$, wiązania S_{2n} , czasów $T_{1/2}$ dla stanów 0^+ i 2^+
- spektroskopia orbitali 'extruder' (ν $9/2^+[404]$, ν $11/2-[505]$, π $9/2^+[404]$, π $11/2-[505]$)
- nowe techniki wyznaczania czasów życia poziomów i nowa analiza energii S_{2n}

Obliczenia :

- rozwój 'hybrydowych' modeli wzbudzeń w jądrze (m.in. wzbudzenia par nukleonów)
- opis poszczególnych wzbudzeń w wielu jądrach

Epilog



Pieter Bruegel młodszy „Alchemik”, ok. 1600 r. DOMENA PUBLICZNA

Wystąpienie dedykuję córce Joannie