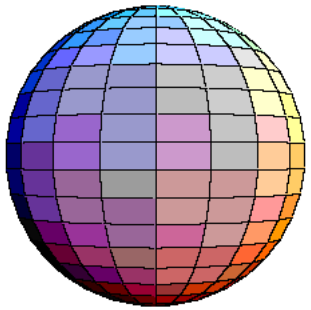
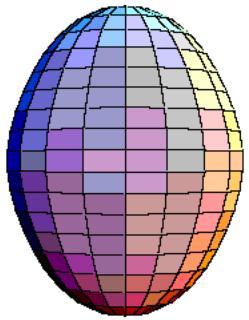
Jądra o dużych deformacjach.
Jądra o wysokich spinach.

1. Kształty jąder atomowych
2. Powstawanie deformacji jądra
3. Model rotacyjny jądra
4. Jądra w stanach wzbudzonych o wysokich spinach
5. Stany superzdeformowane
6. Niewyjaśnione obserwacje i niepotwierdzone przewidywania
7. Jądra trójosiowe
8. Inne przyczyny występowania dużych deformacji
9. Pasma rotacyjne w jądrach prawie sferycznych

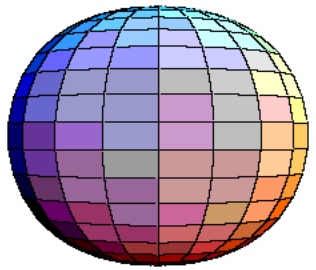
Kształty jąder atomowych



Jądro sferyczne

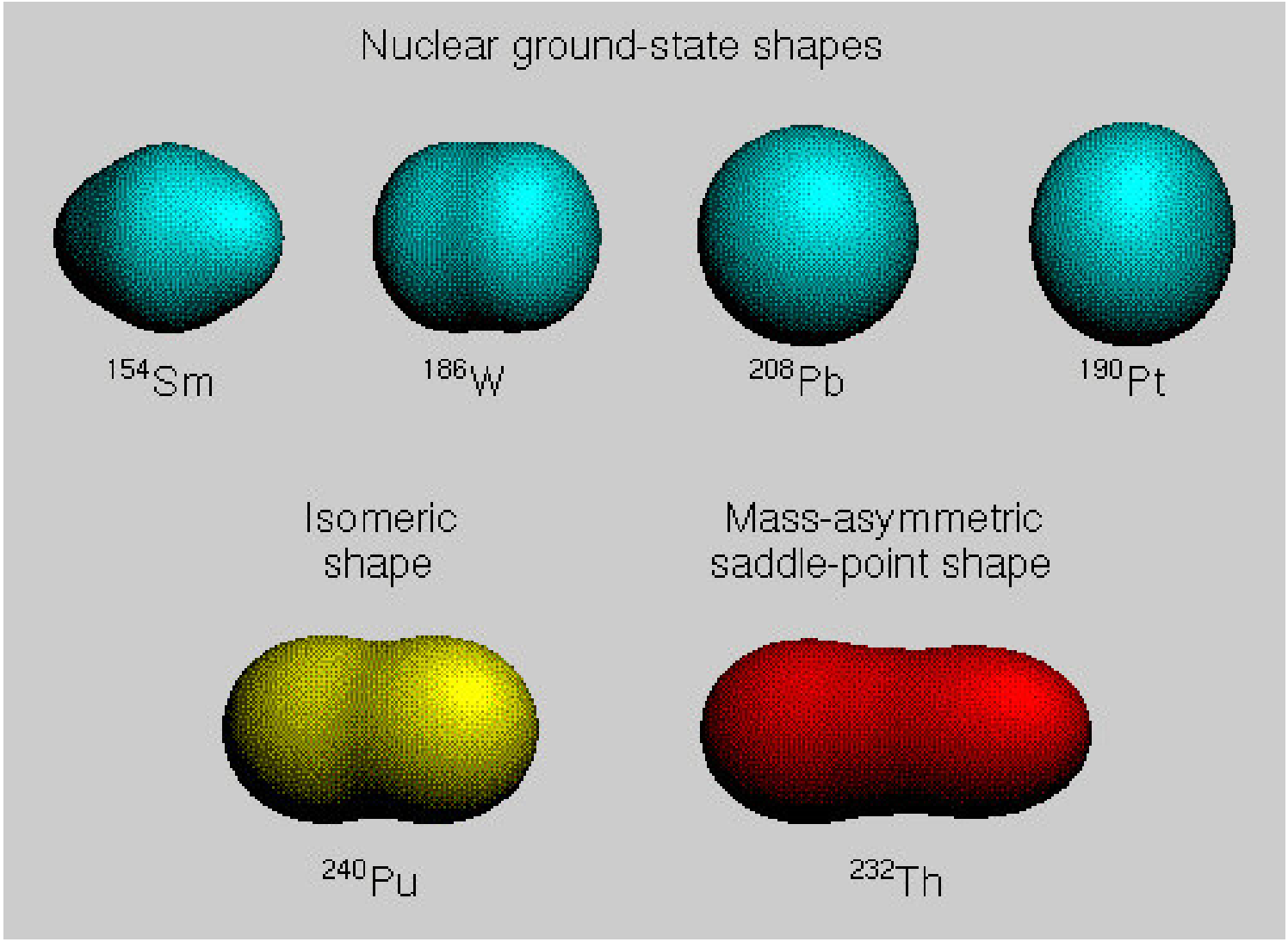


Jądro wydłużone
ang. *prolate*

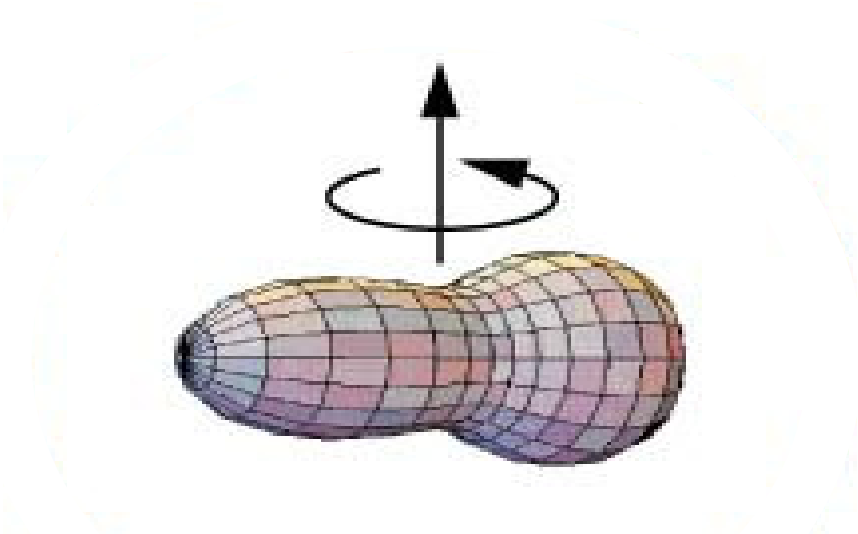


Jądro spłaszczone
ang. *oblate*

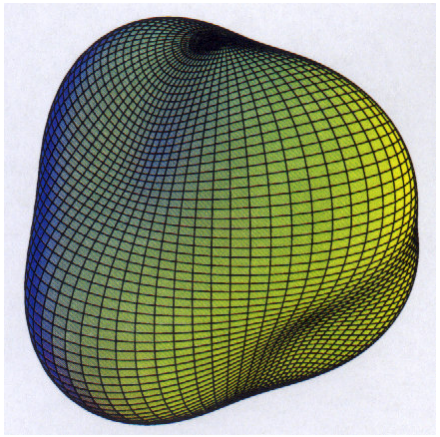
Kształty jąder atomowych



Poszukiwane kształty jąder atomowych



Jądro hiperzdeformowane



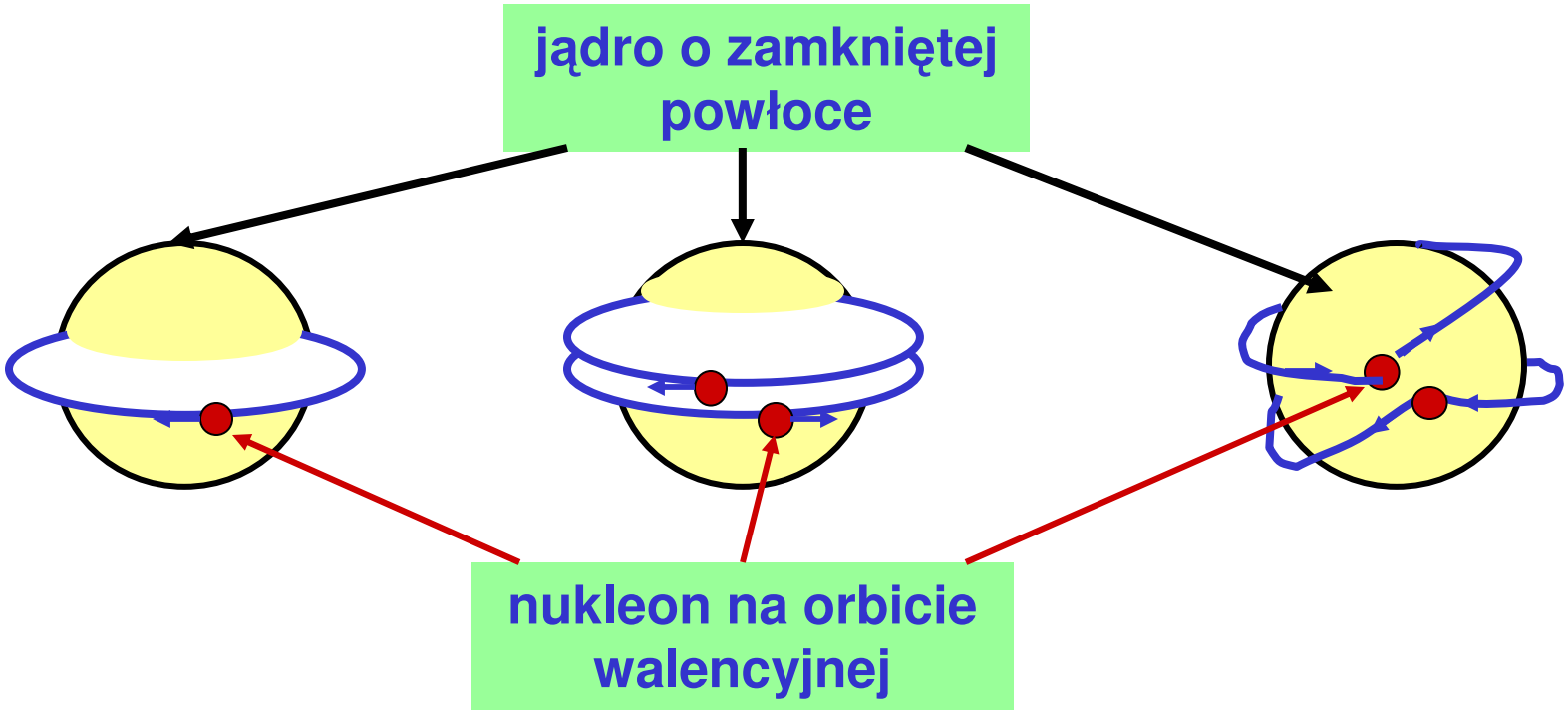
Jądro tetraedryczne

Powstawanie deformacji jądra

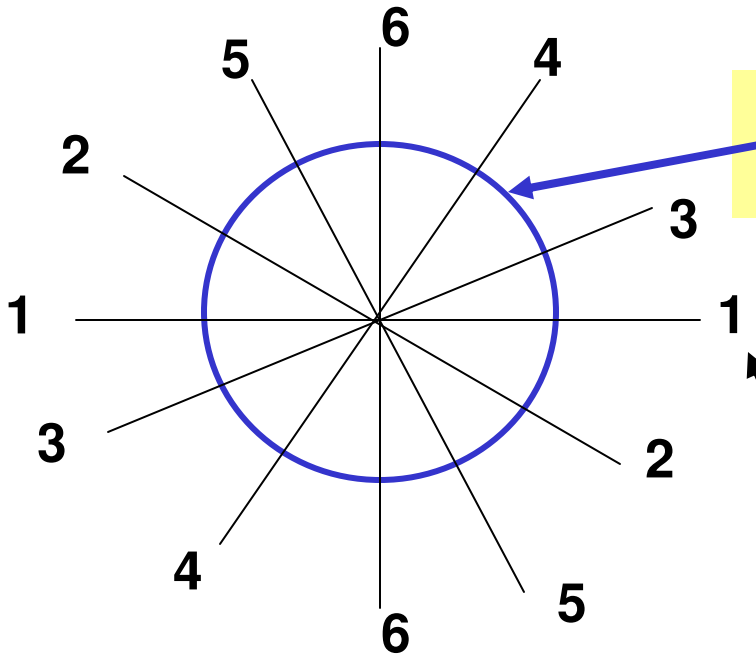
1. Oddziaływania resztkowe

a) długo zasięgowe siły - grupowanie orbit nukleonów

b) krótko zasięgowe siły (siły pairing) – rozkład symetryczny orbit

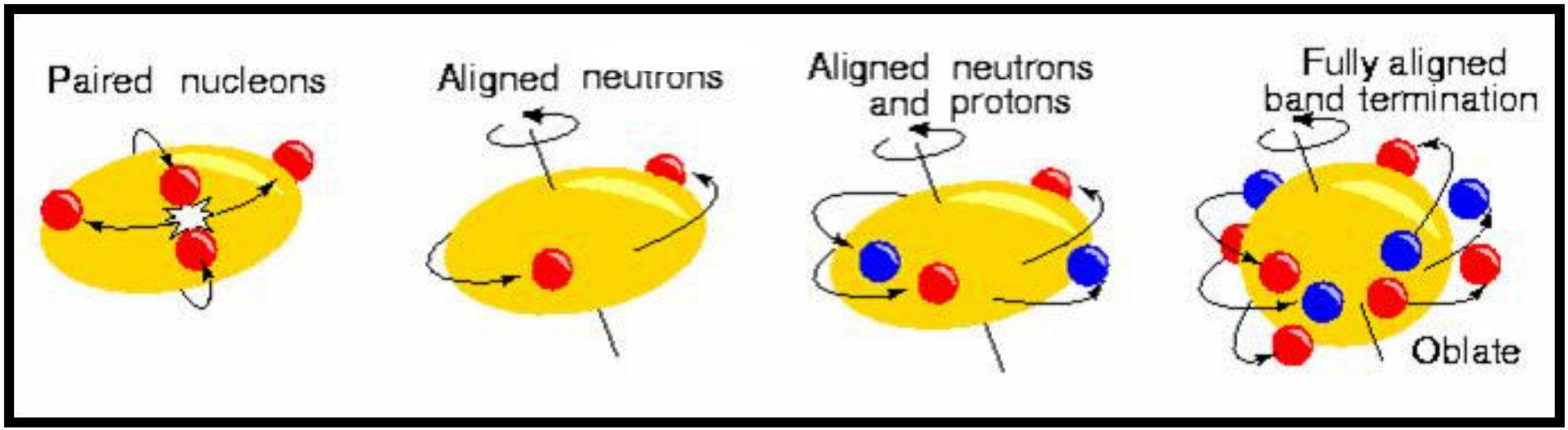


Powstawanie deformacji jądra



jądro o zamkniętej powłoce

możliwe orbity w następnej powłoce



Powstawanie deformacji jądra

Obszary jąder zdeformowanych:

zapełnione „pół”powłoki

n=2 ^{7}Li, Be, B, C

n=3 Mg, Al, Si

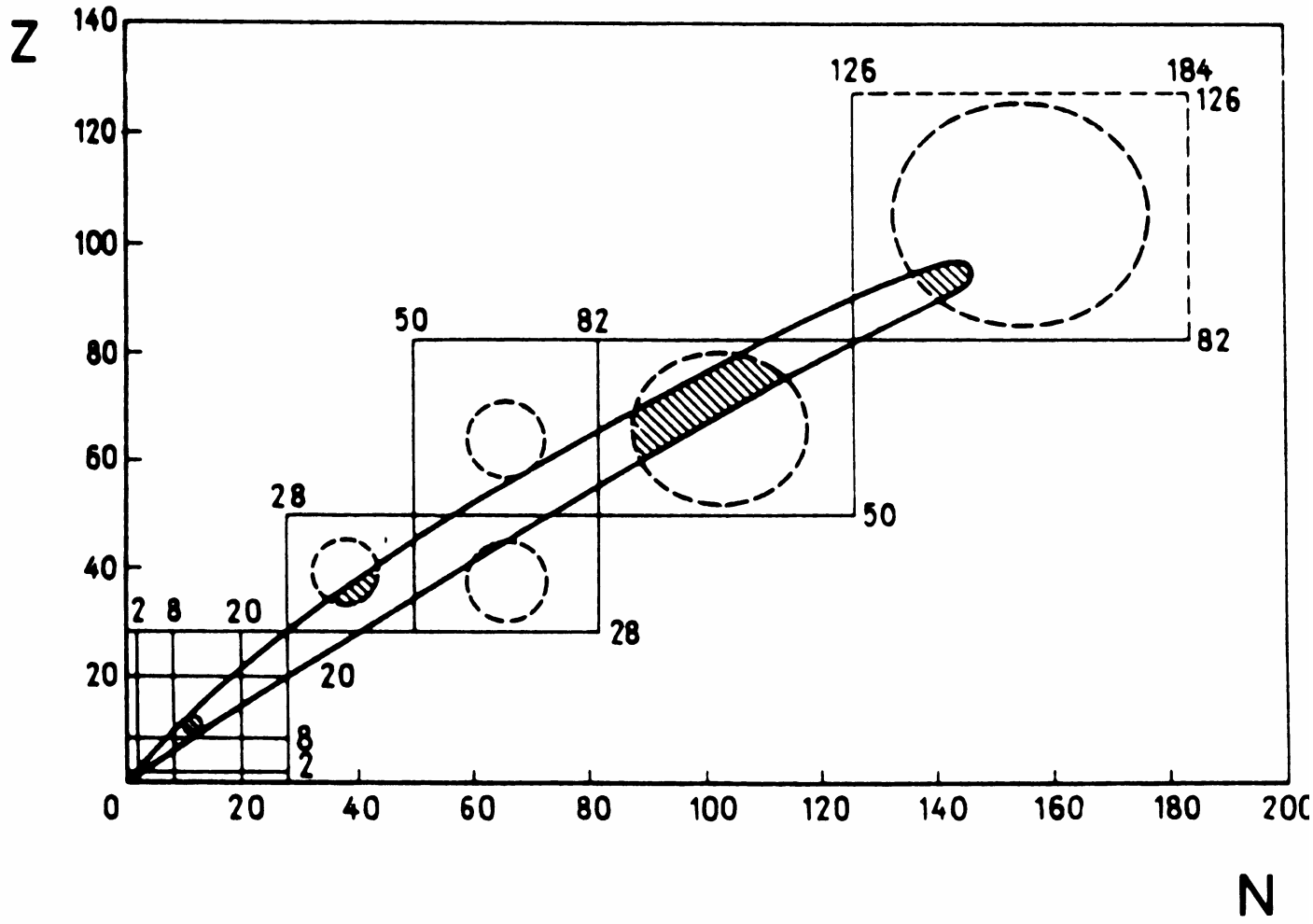
n=5 dla protonów i n=6 dla neutronów

ziemie rzadkie, Ta, W

n=6 dla protonów i n=7 dla neutronów

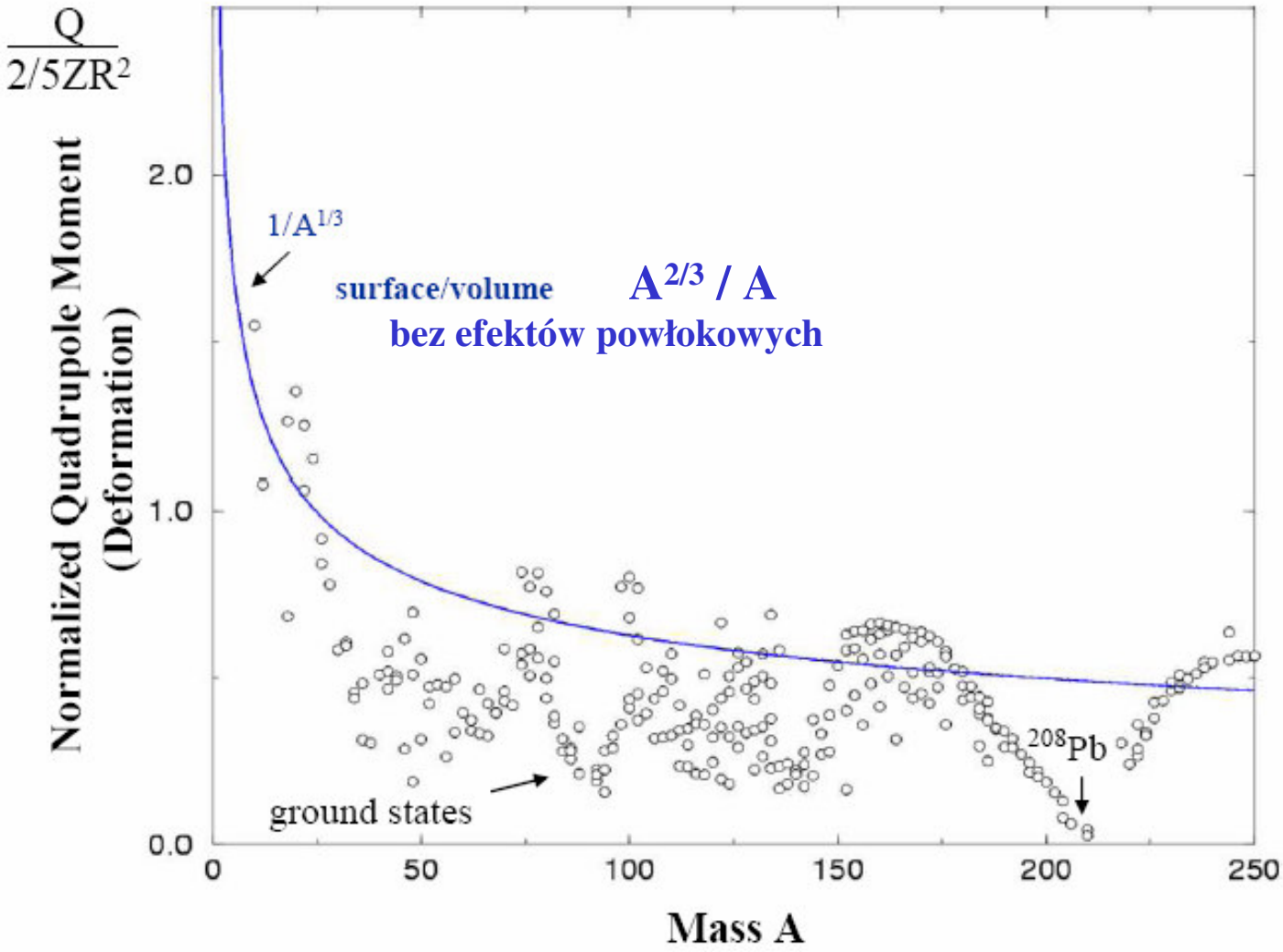
Th, U, transuranowce

Jądra zdeformowane



Deformacja jąder w stanach podstawowych

(konkurencja: rdzeń – nukleony walencyjne)



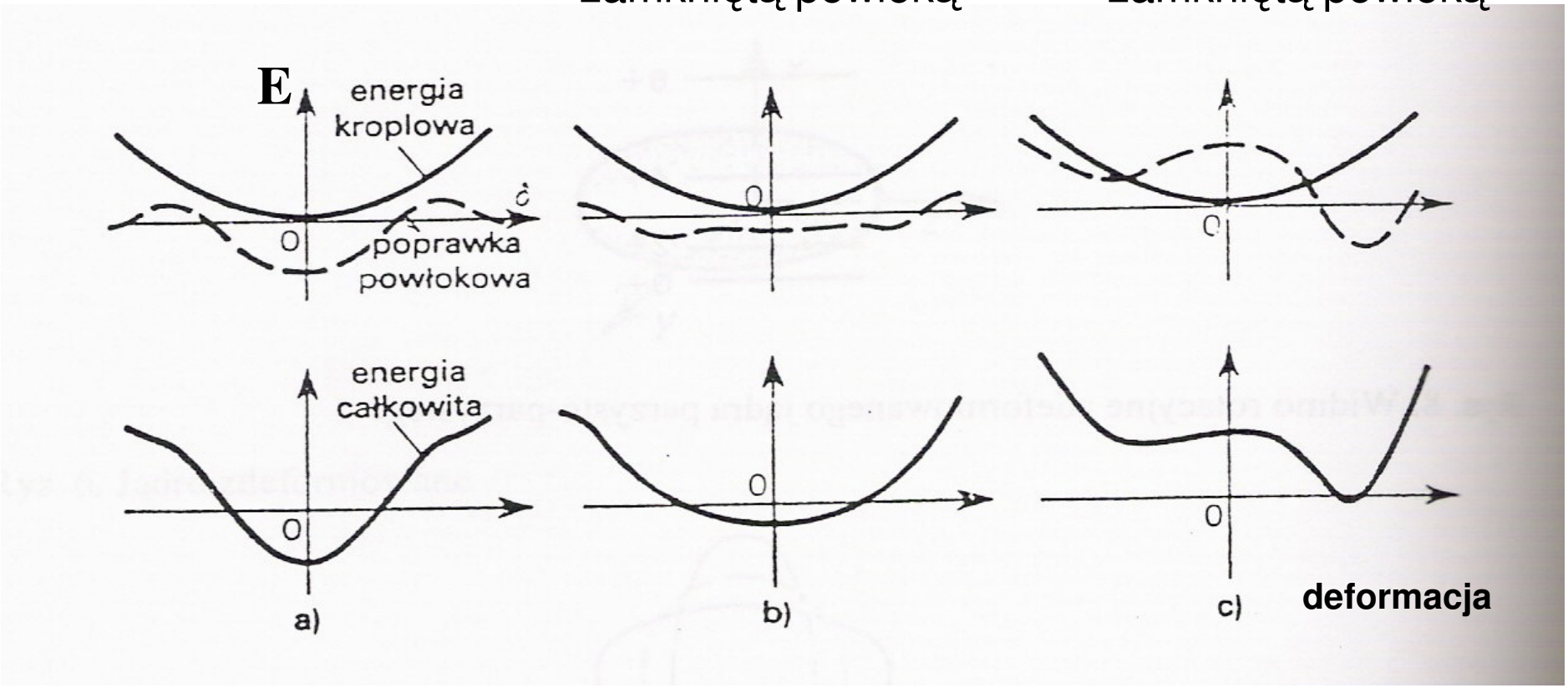
Zależność energii jądra od deformacji kwadrupolowej

$$E_{całkowita} = E_{kropli} + E_{powłokowa} + E_{rot}$$

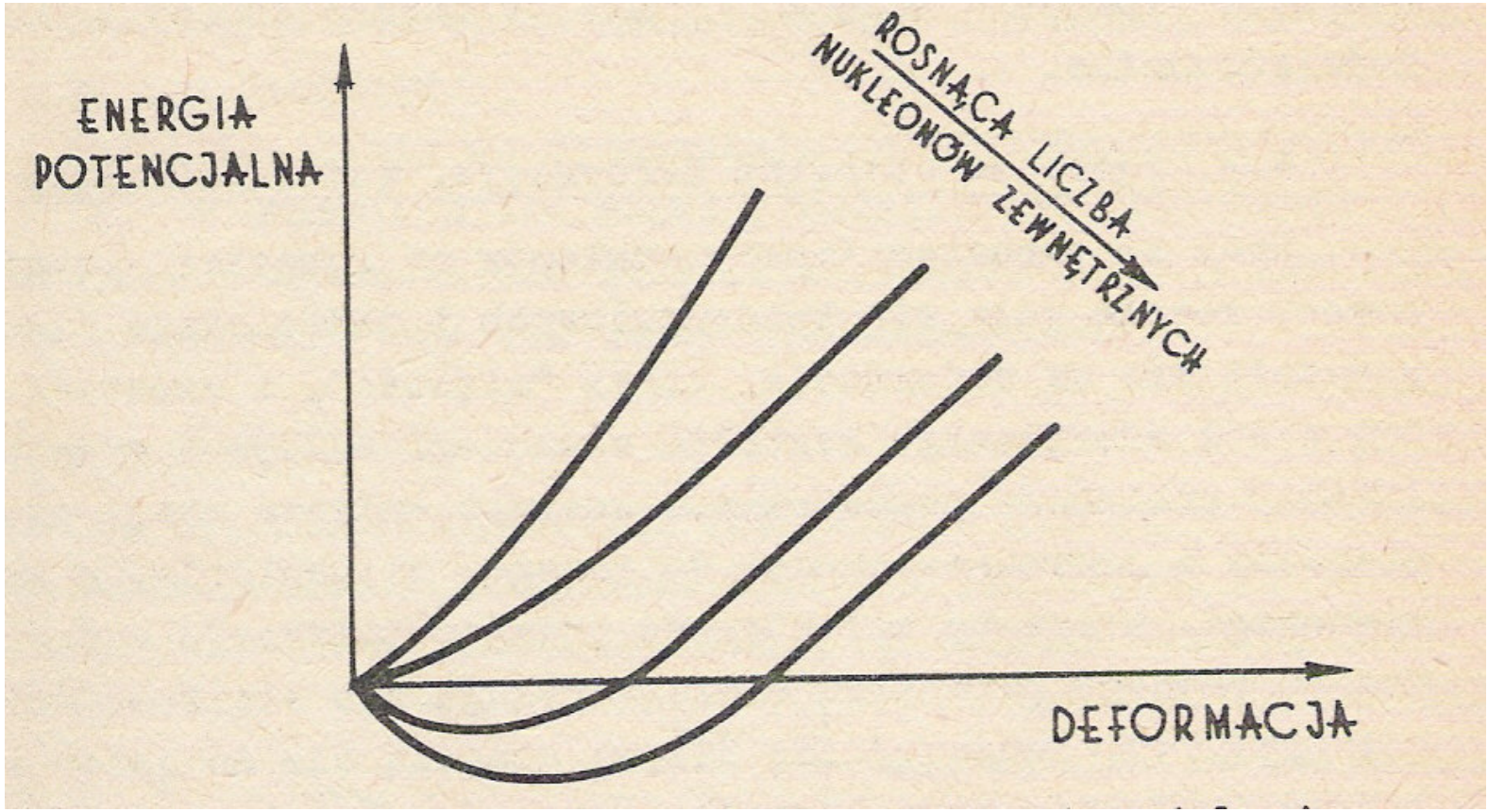
jądro o zamkniętej powłoce

jądro o małej liczbie nukleonów poza zamkniętą powłoką

jądro o dużej liczbie nukleonów poza zamkniętą powłoką

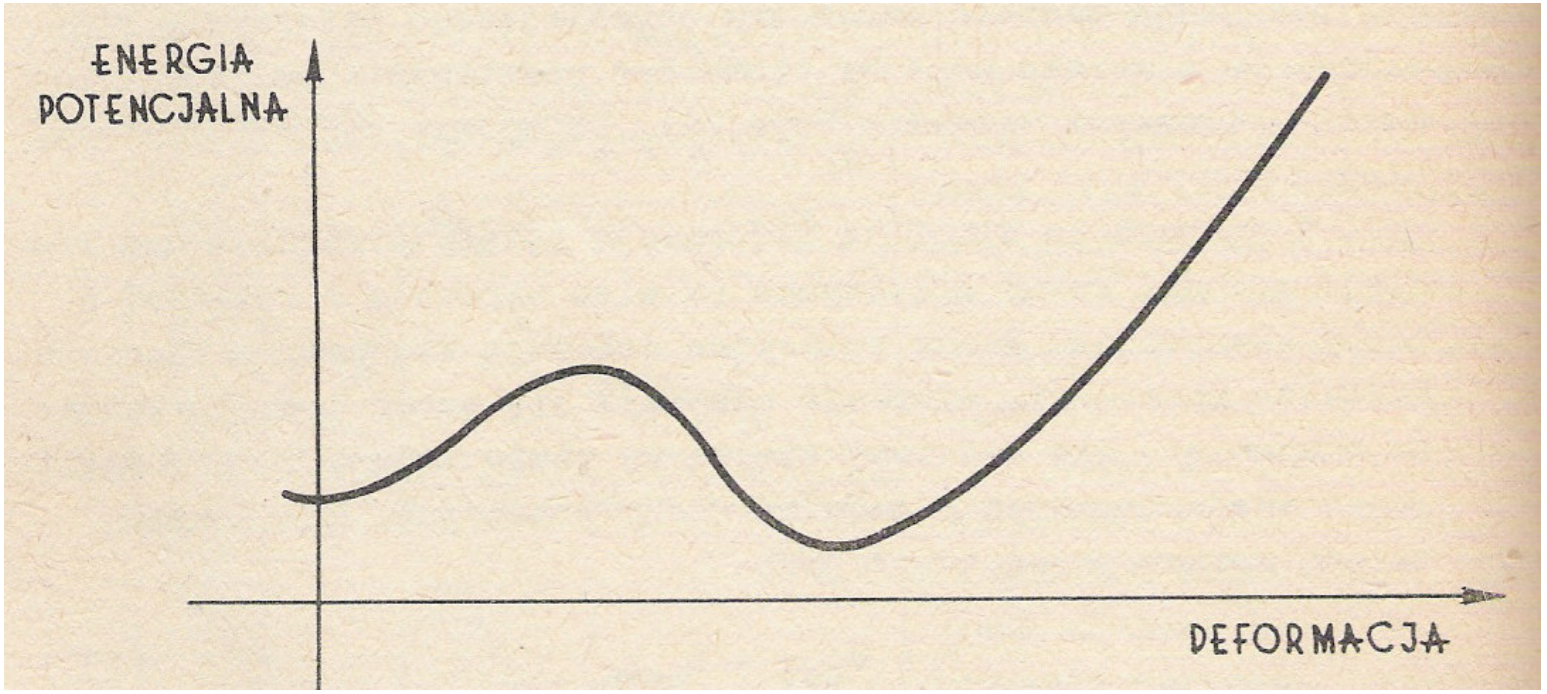


Zależność energii jądra od deformacji kwadrupolowej

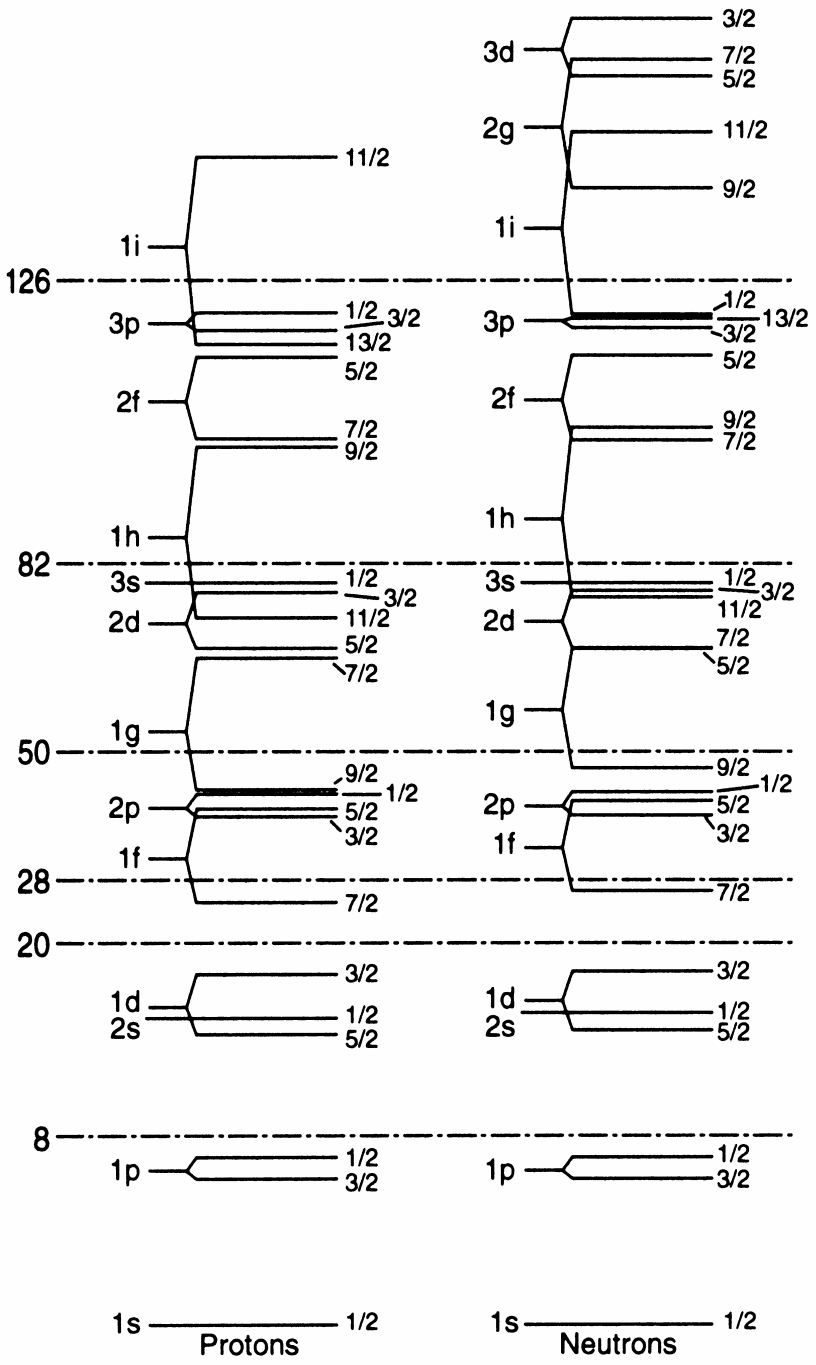


Jeden kształt równowagi

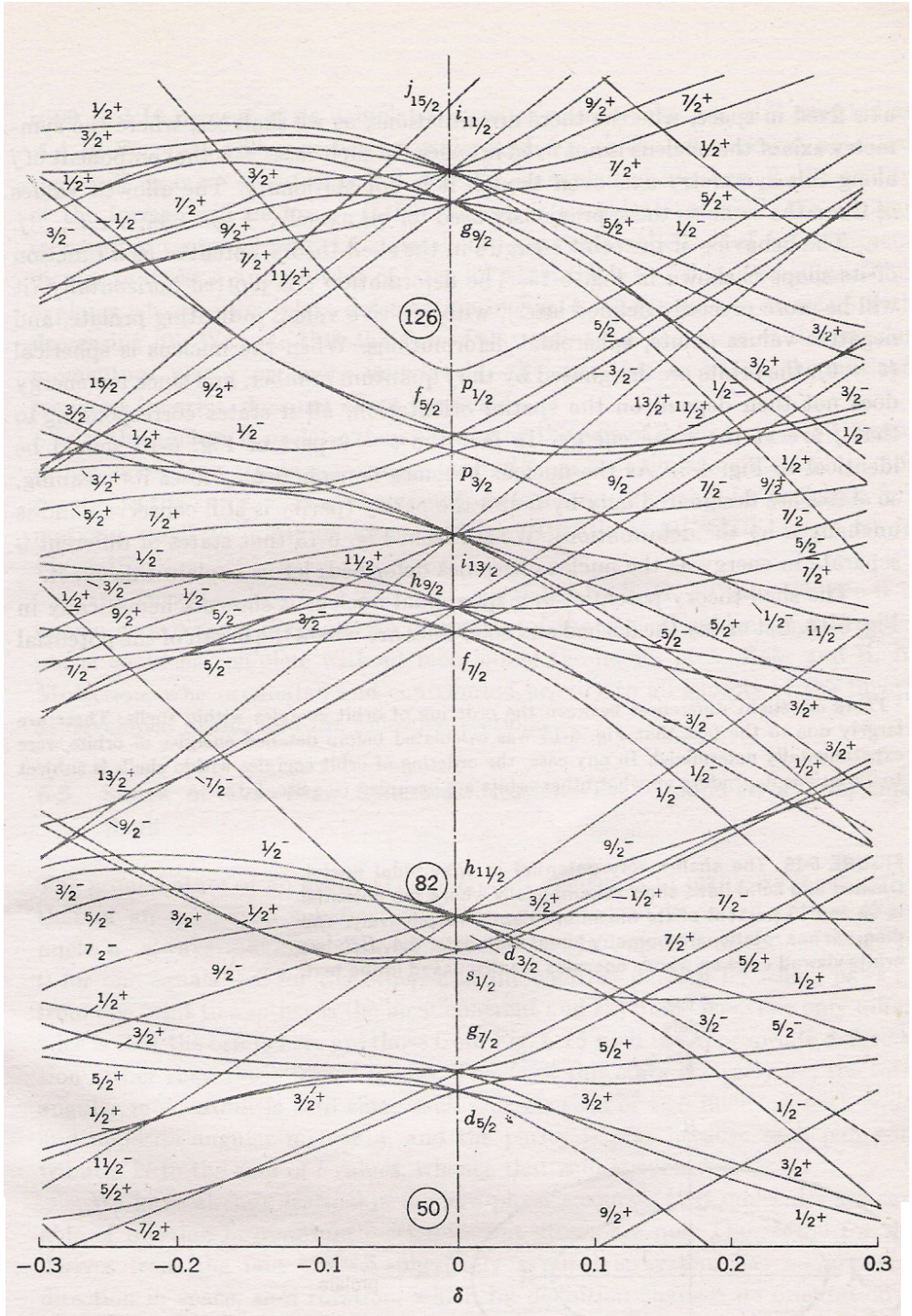
Zależność energii jądra od deformacji kwadrupolowej



Dwa kształty równowagi



Schemat poziomów w modelu powłokowym i liczby magiczne dla jąder sferycznych

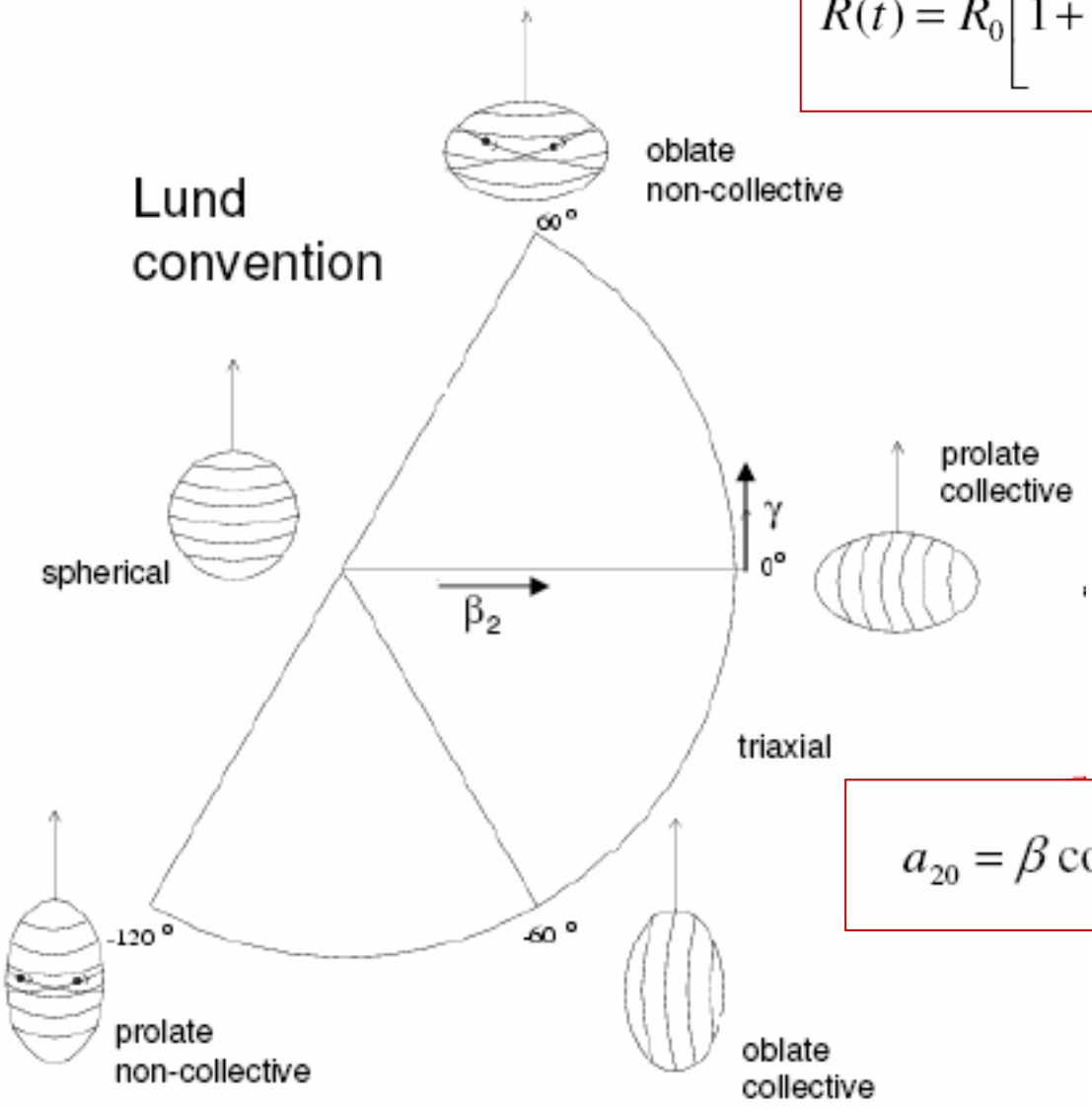


Energie stanów własnych nukleonów w jądrze

w zależności od deformacji kwadrupolowej

Jądra zdeformowane – opis kształtu jądra

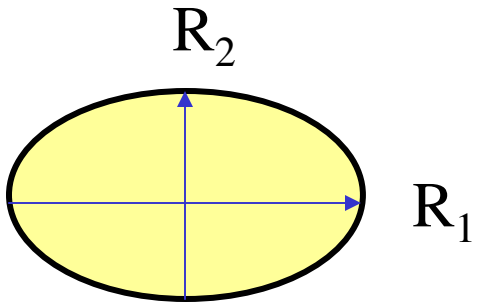
$$R(t) = R_0\left[1 + \sum_{\lambda}\sum_{\mu=-\lambda}^{+\lambda} a_{\lambda\mu}(t)\, Y_{\lambda\mu}(\vartheta,\varphi)\right]$$



$$a_{20} = \beta\cos\gamma \qquad a_{22} = a_{2-2} = \frac{1}{\sqrt{2}}\beta\sin\gamma$$

Jądra zdeformowane

Opis kształtu jądra



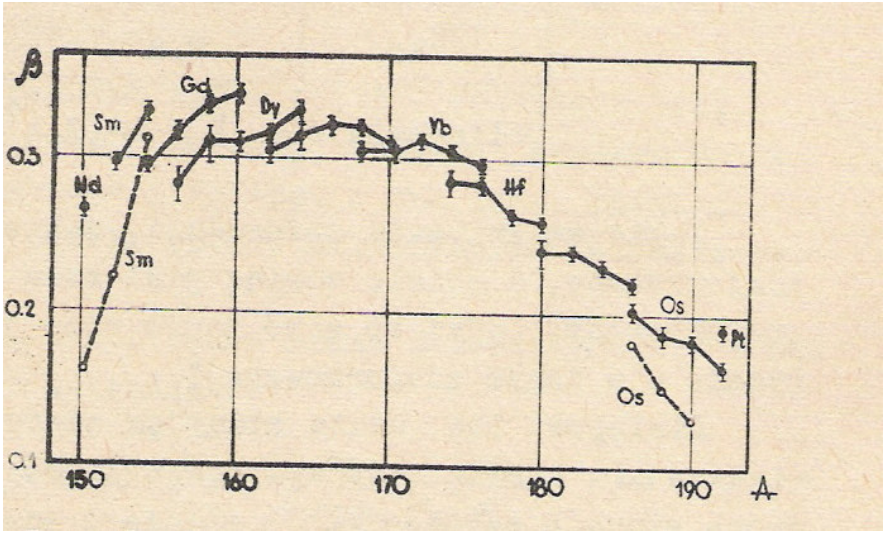
$$R = R_0 (1 + \Sigma\, a_{\lambda\mu}\, Y_{\lambda\mu} (\vartheta, \varphi))$$

Dla jąder osiowo symetrycznych

o deformacji kwadrupolowej

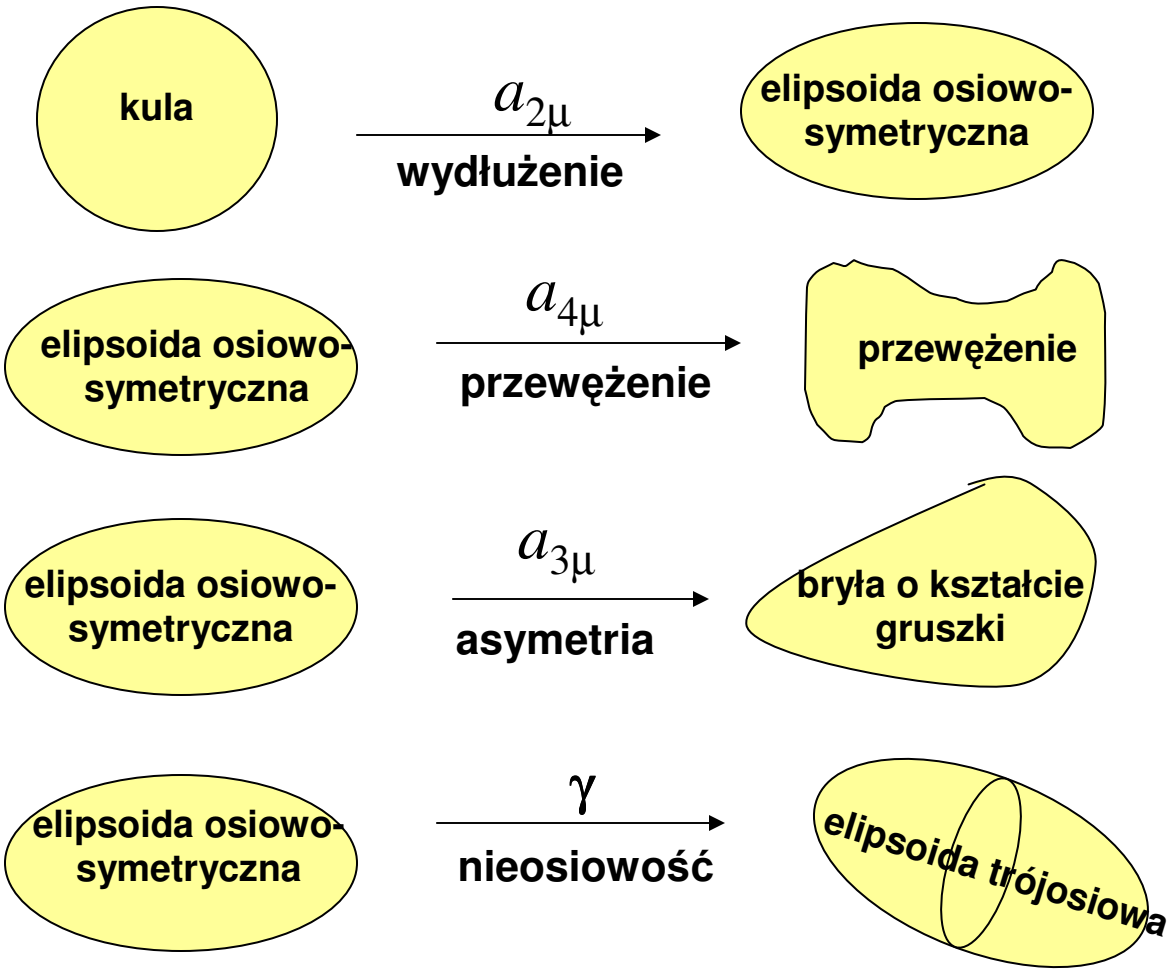
$$R = R_0 (1 + \beta_2\, Y_2 (\vartheta, \varphi))$$

Współczynnik deformacji dla jąder w stanie podstawowym



$$\beta_2 = (4/3)\, \sqrt{\pi/5}\, (R_1 - R_2)/R_0$$

$$R = R_0 (1 + \Sigma\, a_{\lambda\mu}\, Y_{\lambda\mu} (\vartheta, \varphi))$$



brak symetrii odbiciowej

Model rotacyjny jądra

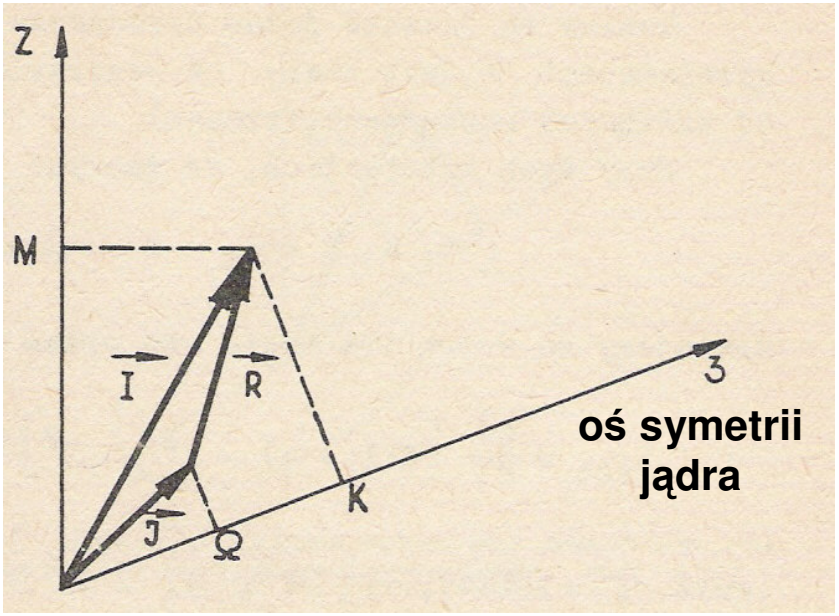
J - całkowity moment pędu ruchu wewnętrznego

R - całkowity moment pędu ruchu rotacyjnego zdeformowanego jądra

I - wypadkowy moment pędu

$$\bar{J} + \bar{R} = \bar{I}$$

$\mathfrak{I}$ **- moment bezwładności jądra**



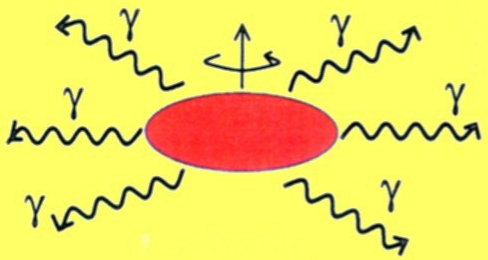
Energia rotacji

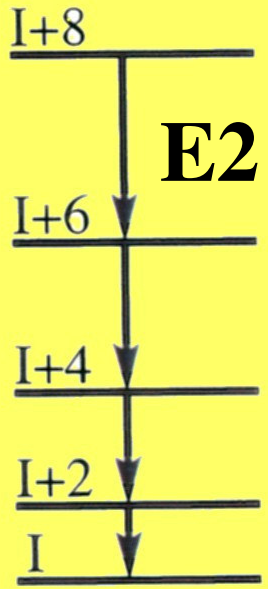
gdy J =0

$$E_{rot} = \frac{\bar{R}^2}{2\mathfrak{I}} = \frac{I(I+1)\hbar^2}{2\mathfrak{I}}$$

Dla jąder zdeformowanych

Model rotacyjny jądra





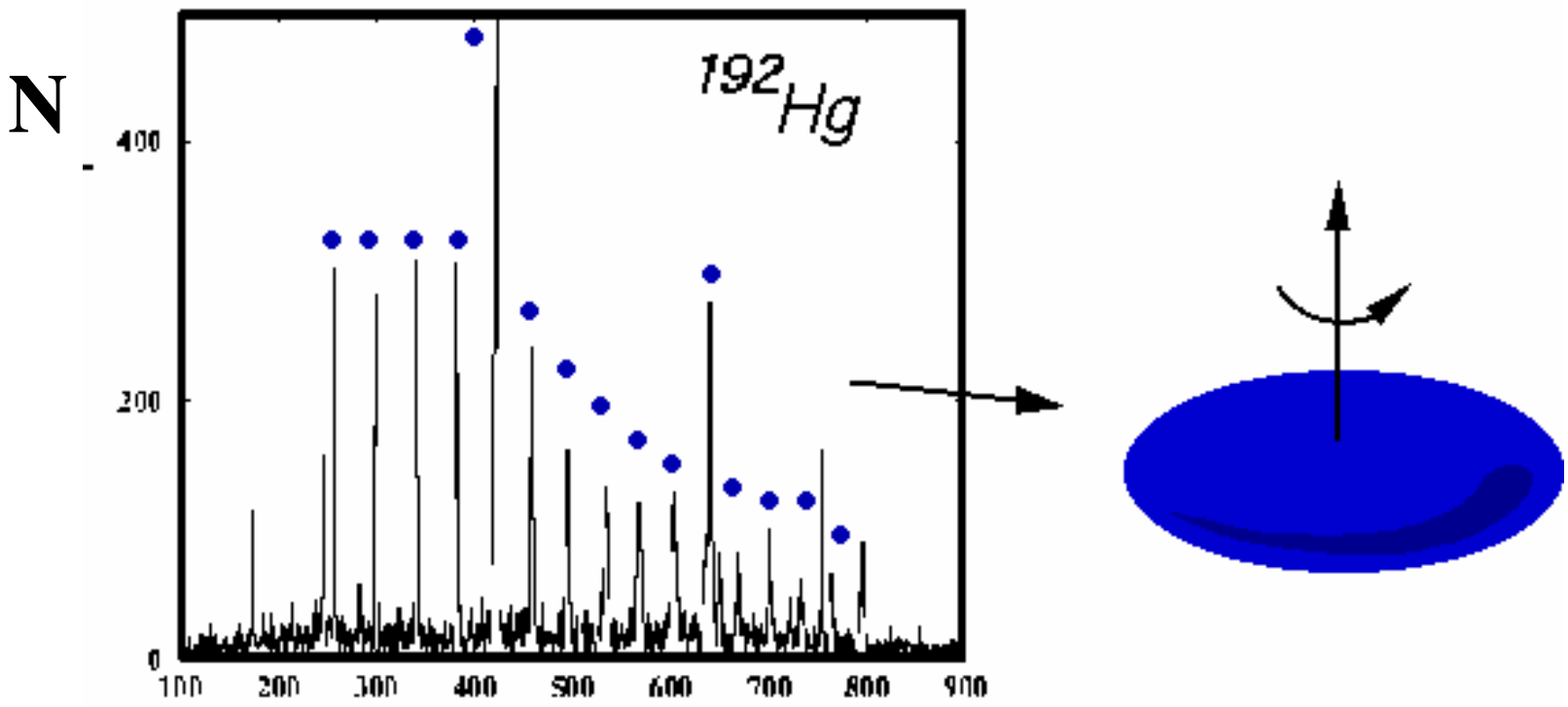
$$E_{rot}(I) = \frac{\hbar^2 I(I+1)}{2\Im}$$

$$E(I+2) - E(I) = E_\gamma(I) = \frac{\hbar^2(4I+6)}{2\Im}$$

$$\Delta E_\gamma = E_\gamma(I+2) - E_\gamma(I) = \frac{4\hbar^2}{\Im}$$

Energia poziomów rotacyjnych

Widmo kwantów γ

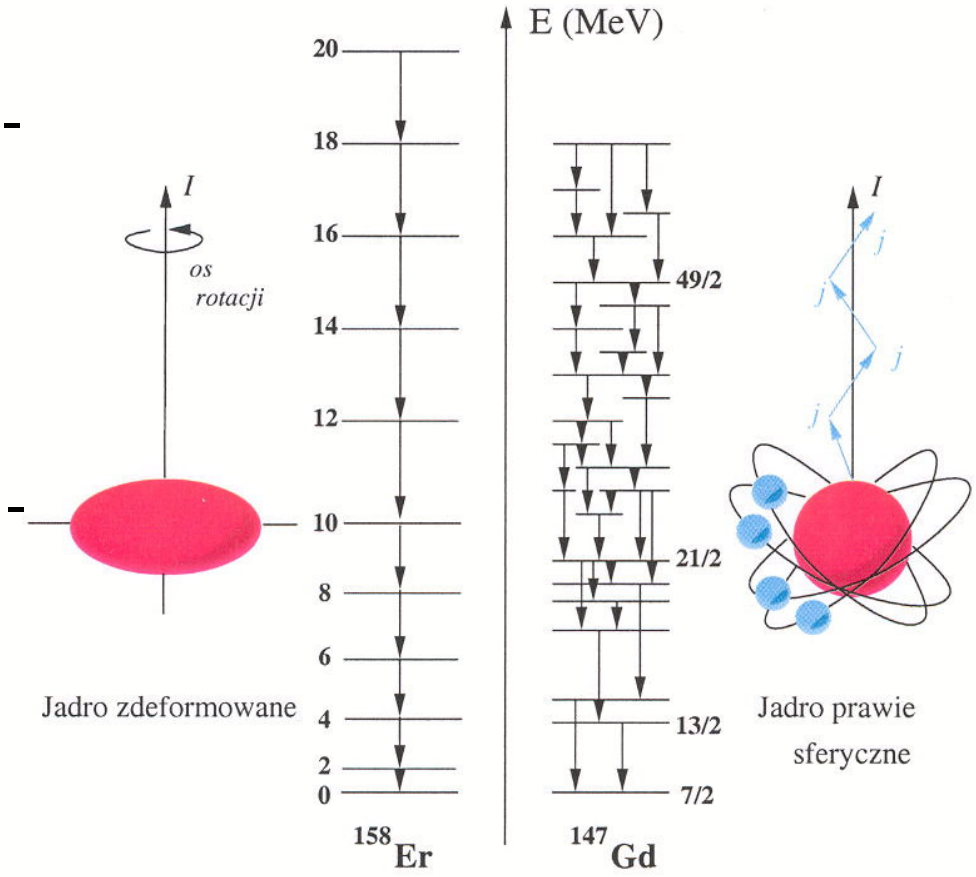


E_γ [keV]

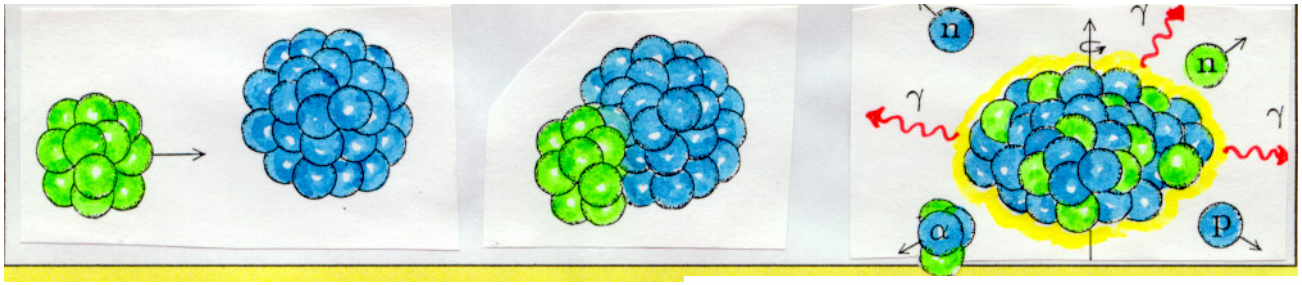
Jądra w stanach wzbudzonych o wysokich spinach $I \leq 70\ \hbar$

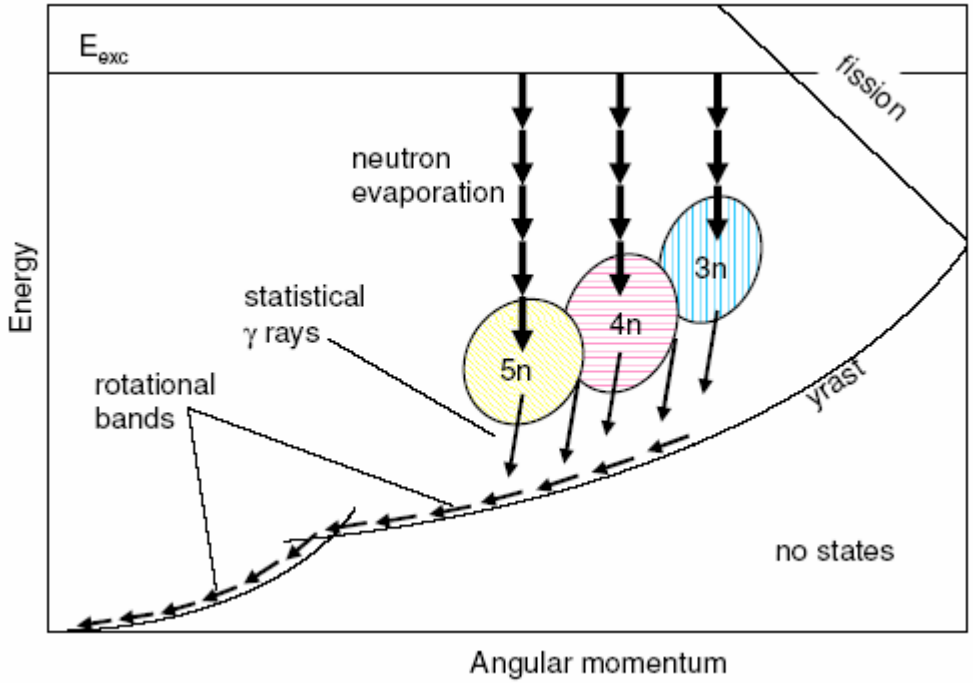
1. Dla jąder o dużej deformacji - kolektywna rotacja względem osi prostopadłej do osi symetrii

2. Dla jąder o małej deformacji - niekolektywna rotacja- zmiana konfiguracji walencyjnych nukleonów



Wytwarzanie jąder w stanach wzbudzonych o wysokich spinach - Reakcja fuzji ciężkich jonów

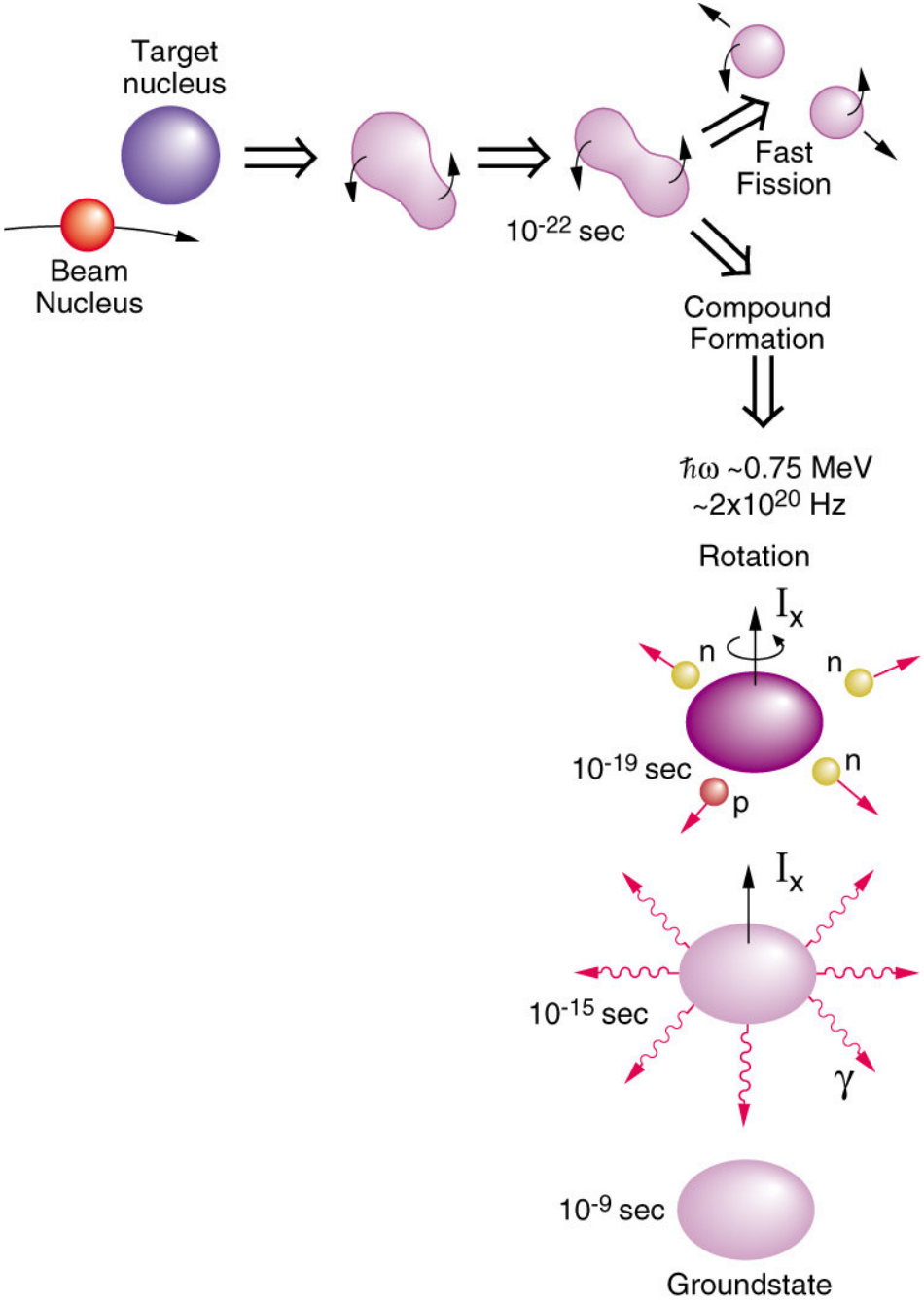




*I - spin jądra C**

*J - moment bezwładności C**

$$E_{rot} = I\,(I+1)\hbar^2/(2J)$$

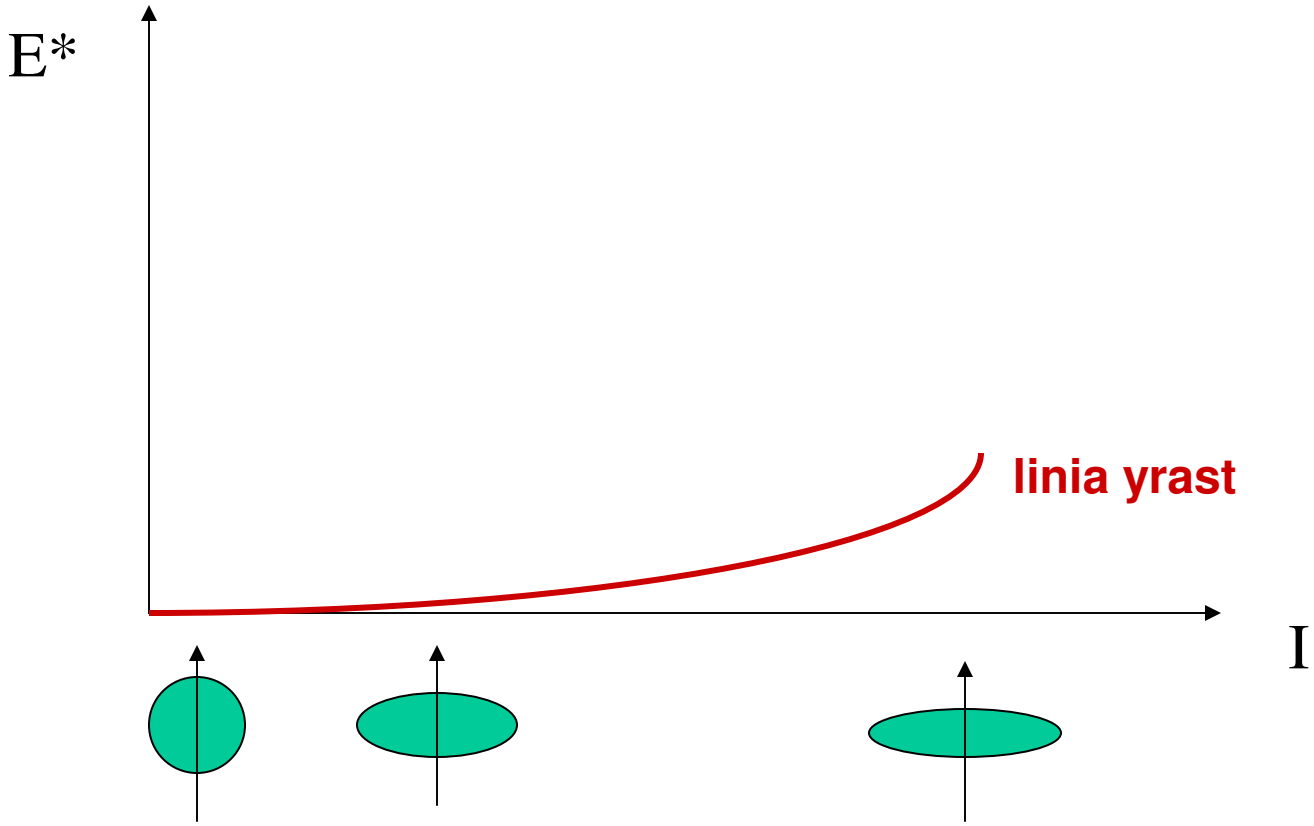


Wytwarzanie jąder w stanach wzbudzonych o wysokich spinach –

Reakcja fuzji ciężkich jonów

Powstawanie deformacji jądra c.d.

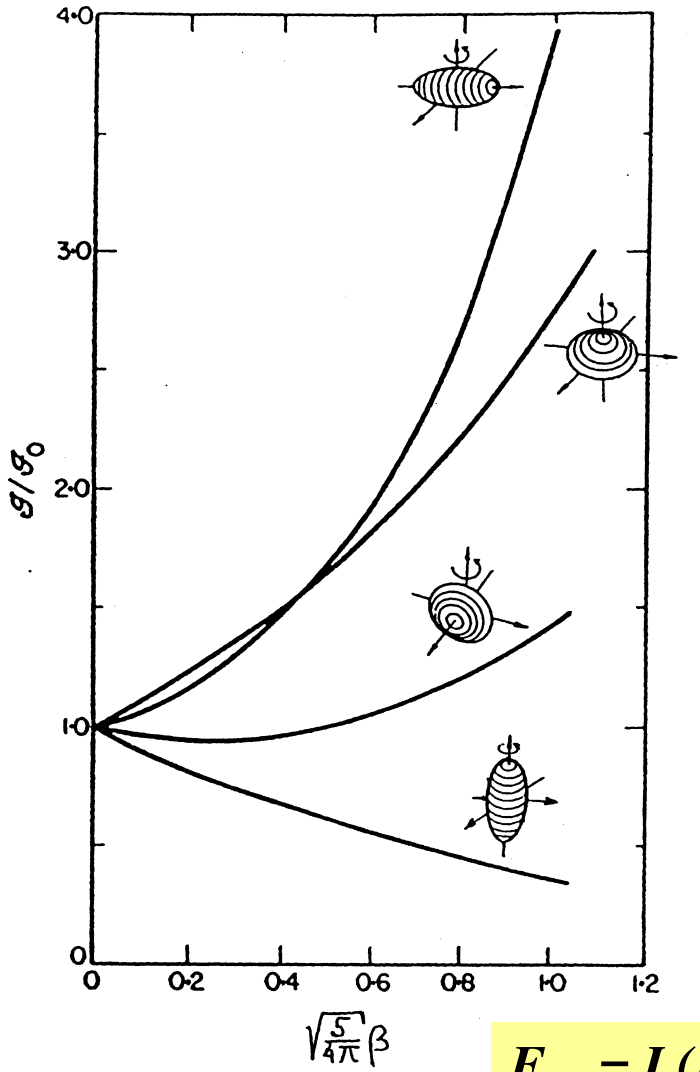
2. Zmiana kształtu jądra pod wpływem wzrostu momentu pędu



a) niestabilność Jacobiego

b) stany superzdeformowane

Niestabilność Jacobiego

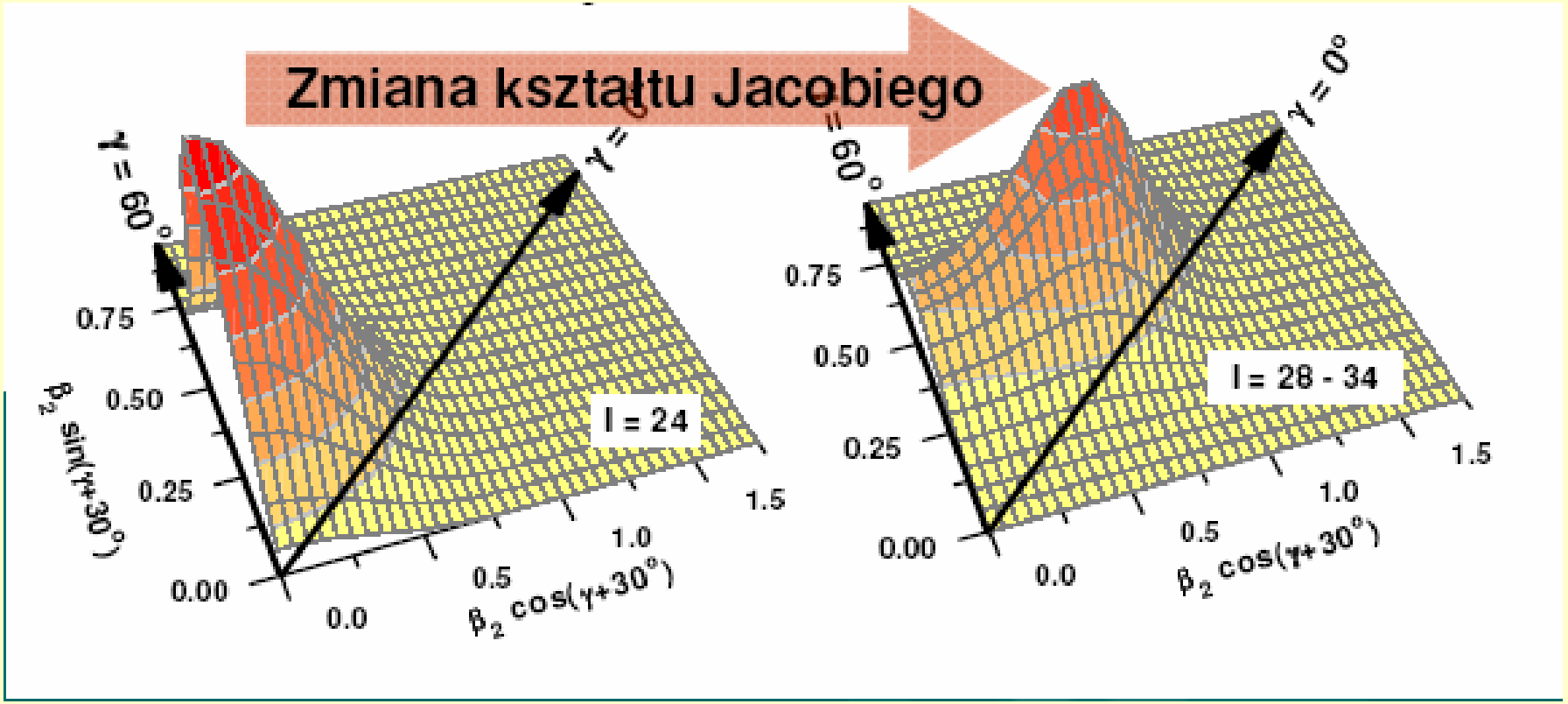


Obiekty astronomiczne (gwiazdy, planety)	Jądro atomowe
masa Słońca ~ $1.99 \cdot 10^{30}$ kg	masa ~$1.67A \cdot 10^{-27}$ kg
promień Słońca (średni) ~$6.96 \cdot 10^{8}$ m	promień R~$1.2A \cdot 10^{-15}$ m
długozasięgowe siły grawitacyjne	krótkozasięgowe siły jądrowe
Prawa mechaniki klasycznej	Prawa mechaniki kwantowej

$$E_{rot} = I\,(I+1)\hbar^2/(2J)$$

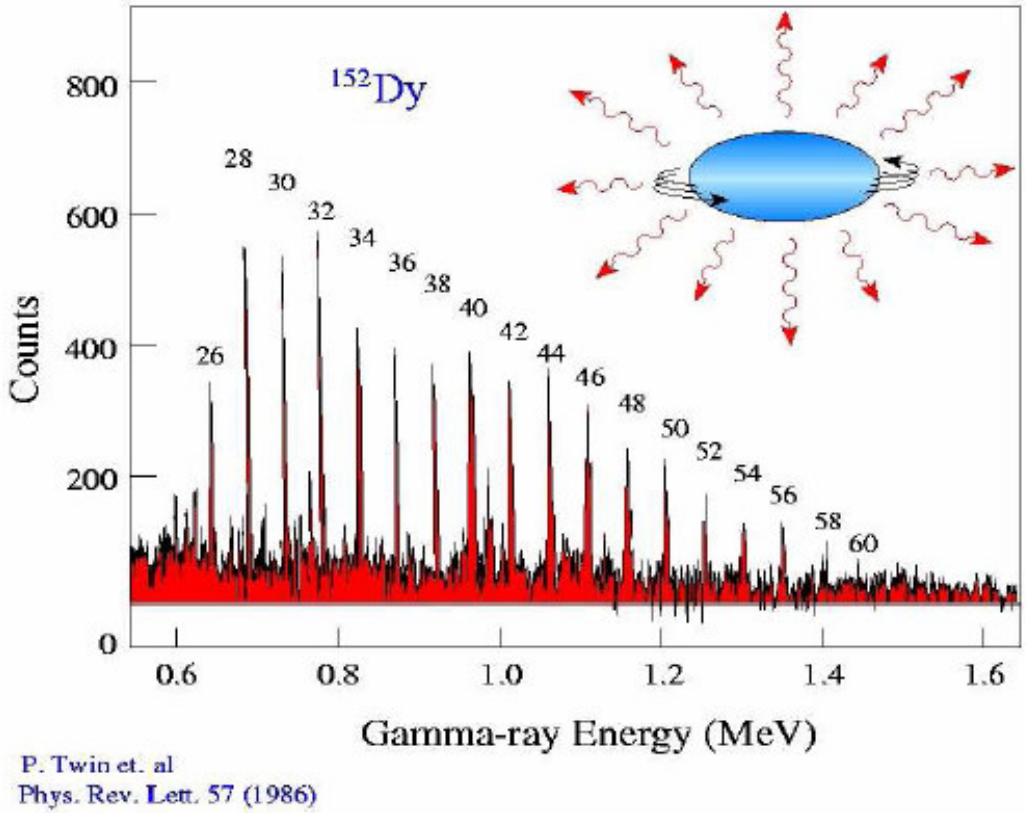
Powstawanie deformacji jądra c.d.

3. Zależność kształtu jądra od temperatury jądra (energii wzbudzenia jądra) – fluktuacje kształtu jądra



Jądra superzdeformowane

Po raz pierwszy zaobserwowane w ^{152}Dy w 1986 r., R_1:R_2 =2:1



P. Twin et. al
Phys. Rev. Lett. 57 (1986)

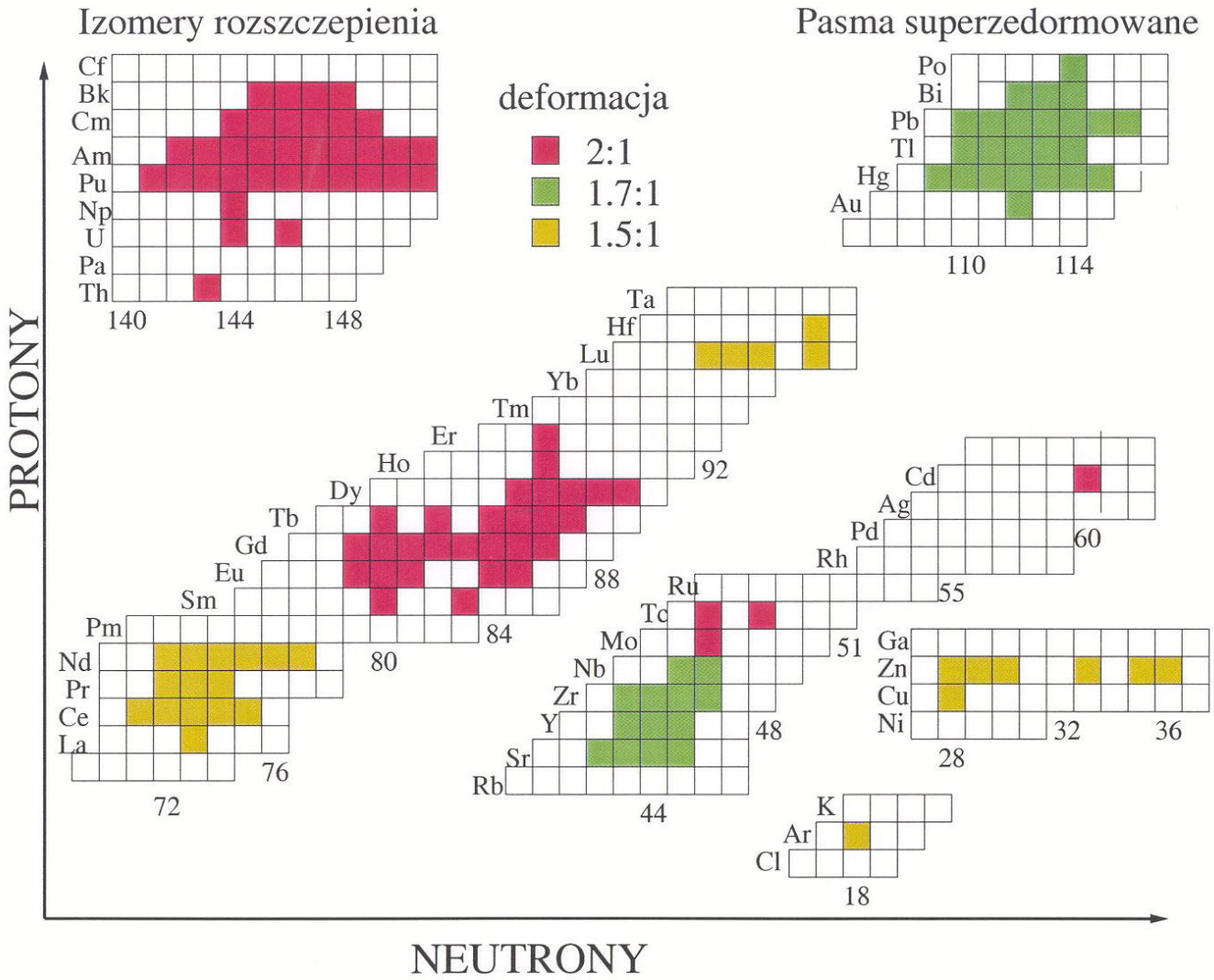
TESSA 3 – ^{152}Dy

P.J. Twin et al PRL 57 (1986)

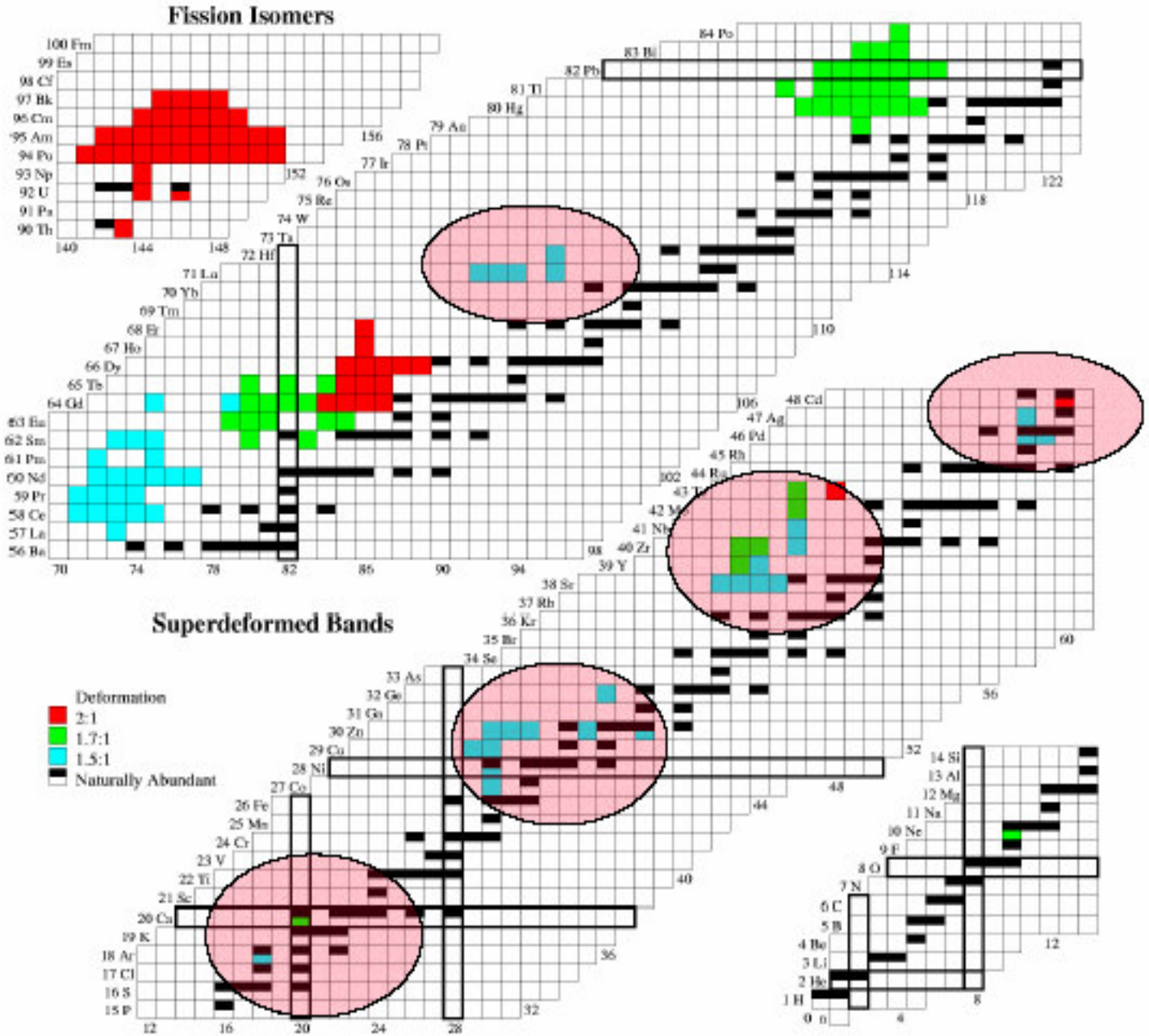
A major achievement for our field

Jądra superzdeformowane

Po raz pierwszy zaobserwowane w ^{152}Dy w 1986 r., R_1:R_2 =2:1. Dziś znane ok. 300 pasm superzdeformowanych.

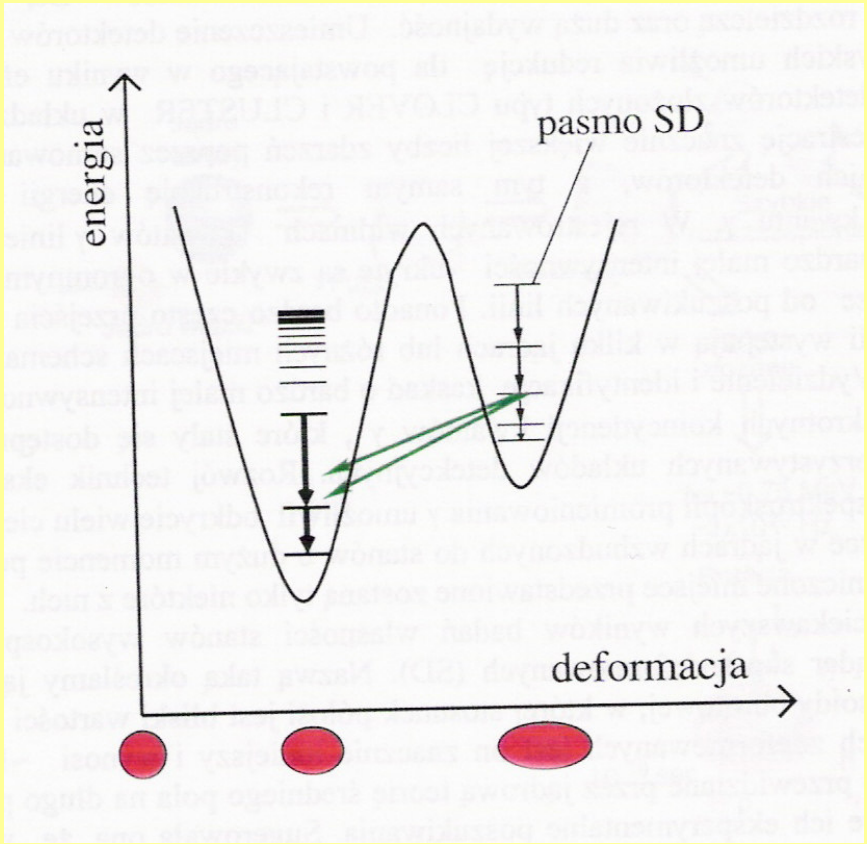


Uaktualnione wyniki (2006)

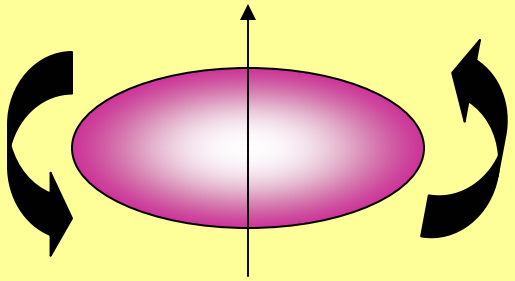


Jądra superzdeformowane

Duża rola efektów powłokowych

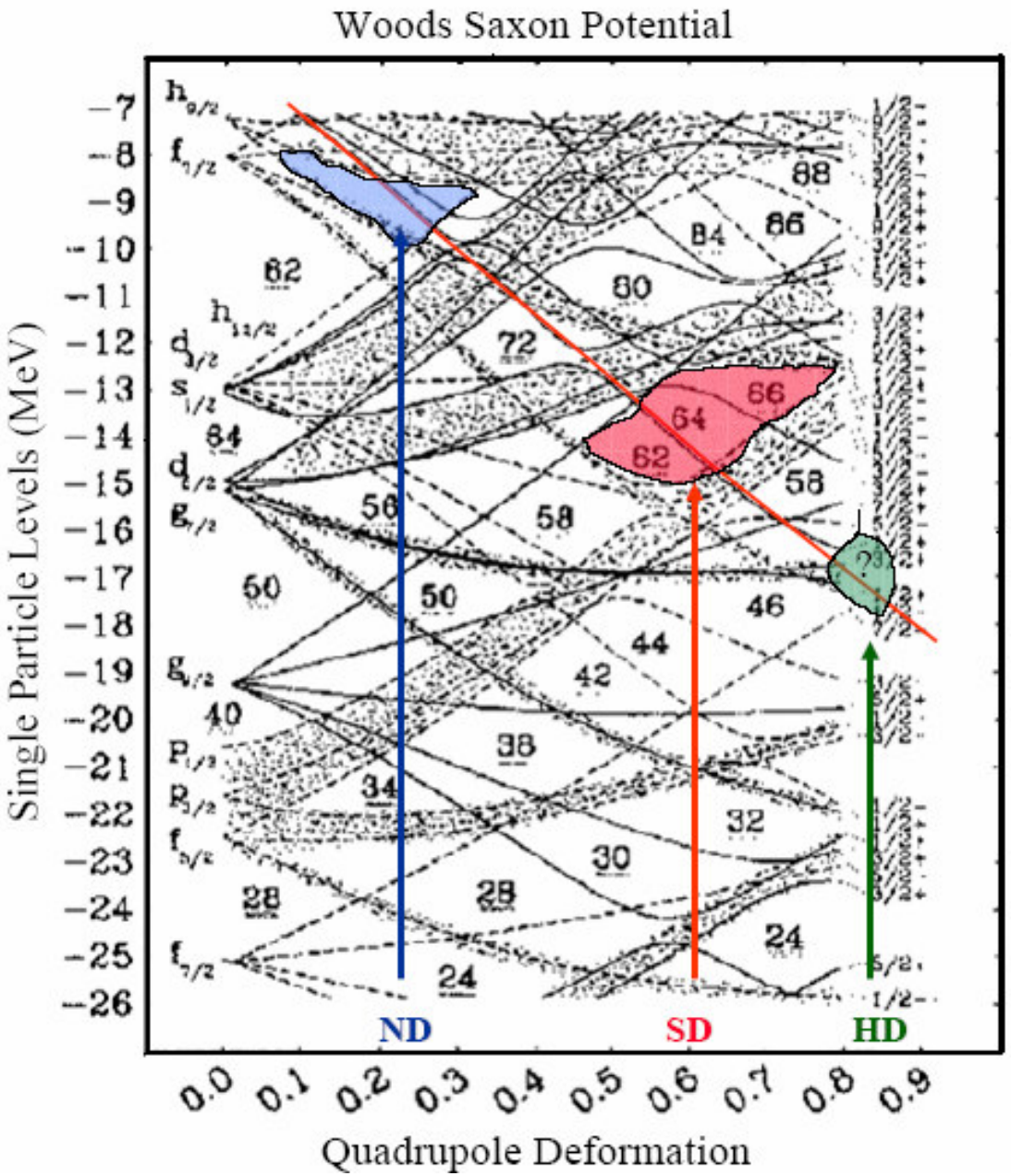


Super-deformacja



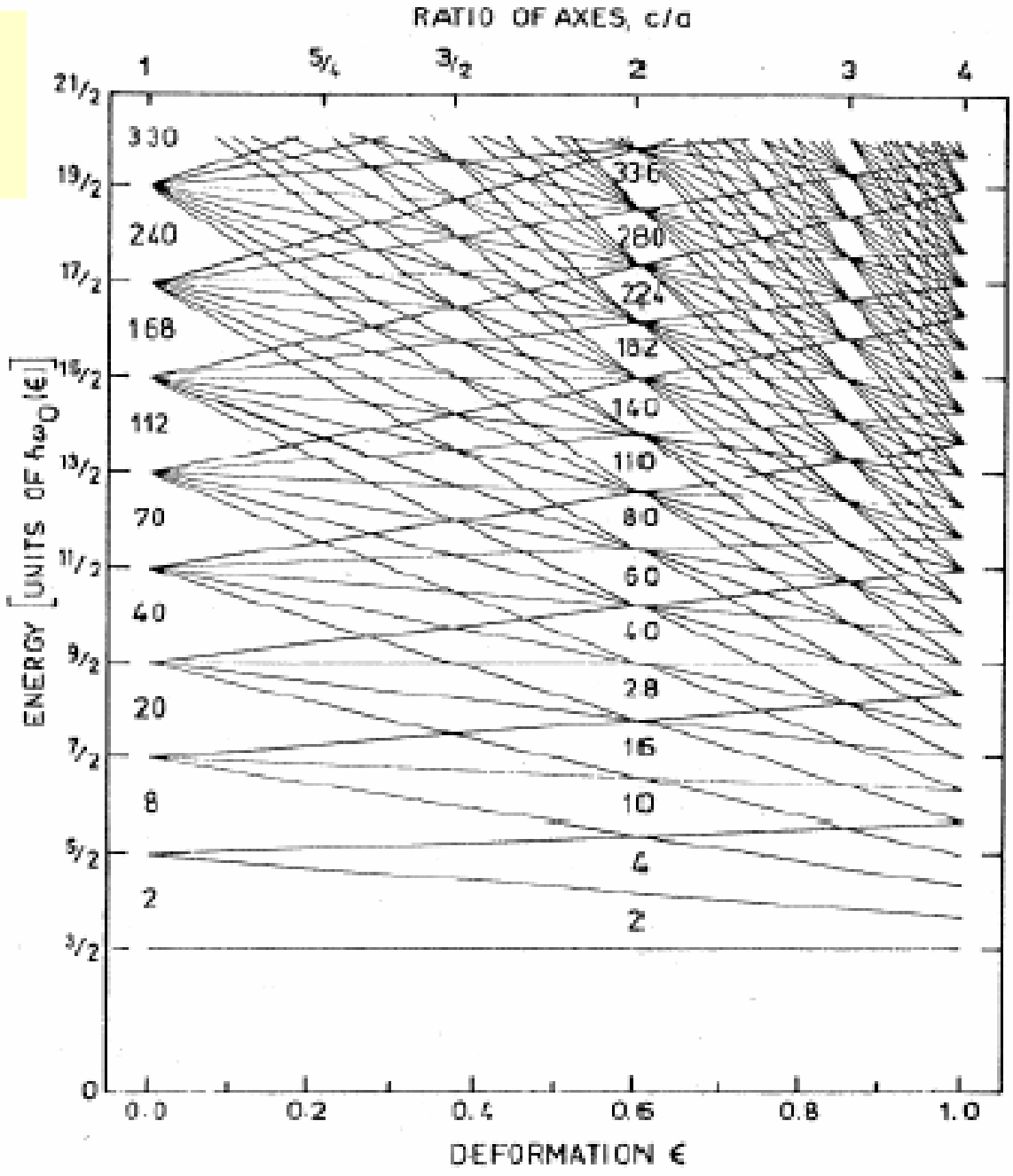
Bardzo silna deformacja (stosunek osi 2:1) i wiele stanów rotacyjnych

Jądra superzdeformowane - rola efektów powłokowych

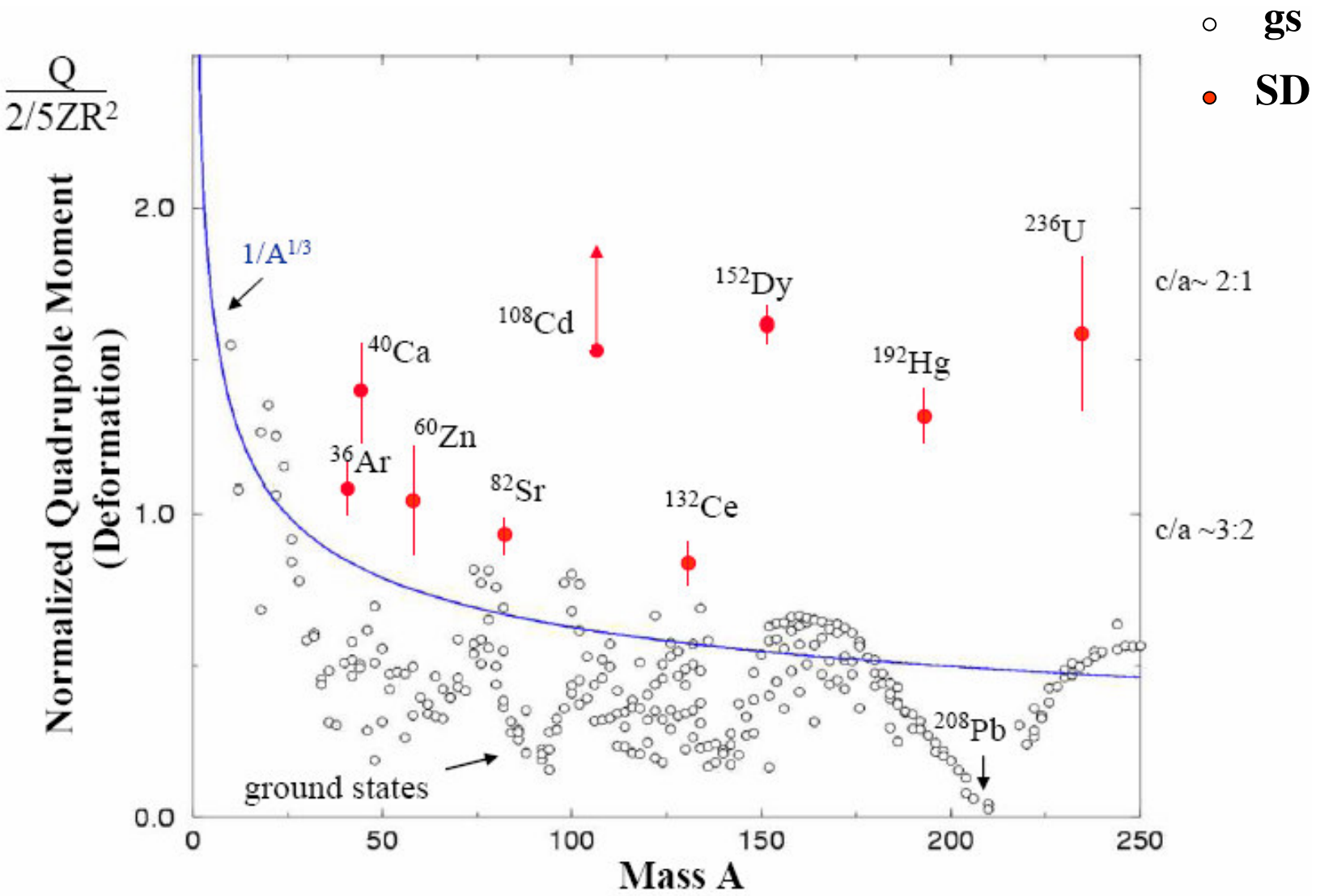


1. **Przerwy energetyczne stabilizują deformację;**
2. **Występują przy tej samej deformacji niezależnie od A**
3. **Pasma superzdeformowane odpowiadają w większości wzbudzeniom jednocząstkowym**

Przerwy energetyczne w potencjale zdeformowanym

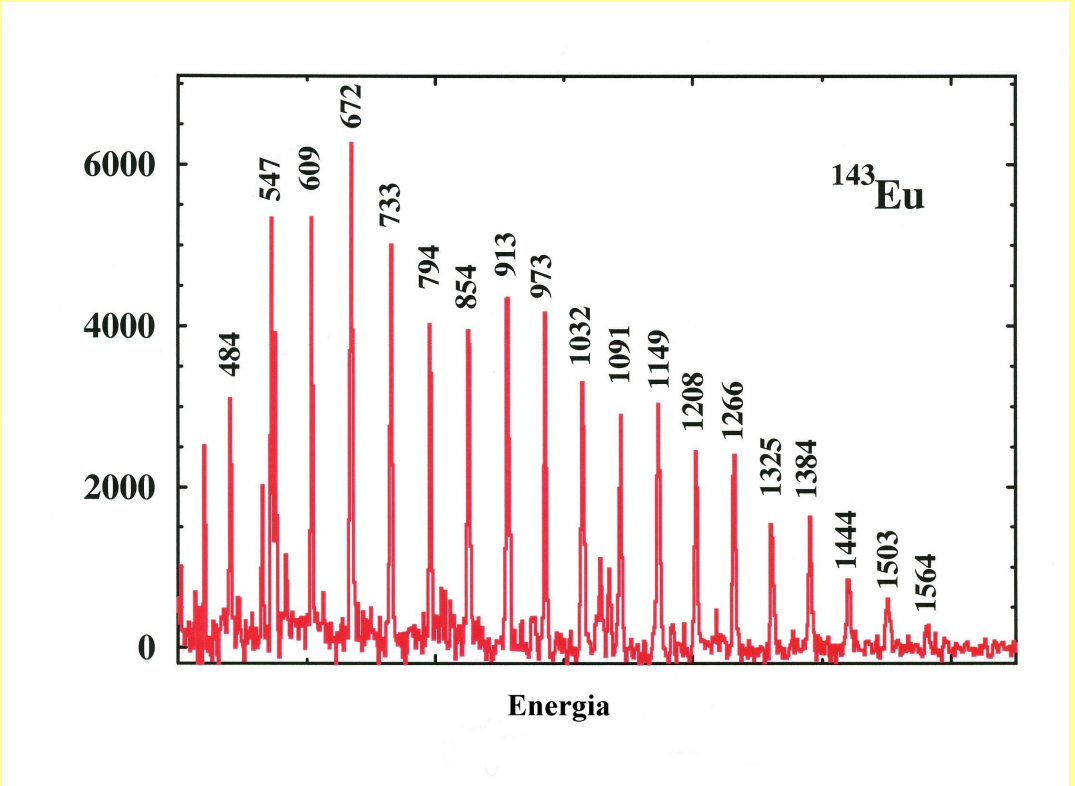


Wpływ struktury powłokowej na deformację



Co mierzymy ?

Pomiar energii emitowanych fotonów



Pomiar czasów życia

Opis aparatury i metodyki eksperymentów – następny wykład

Jądra superzdeformowane – wyniki obserwacji

1. Obserwuje się szereg przejść elektromagnetycznych łączących stany rotacyjne - wiele równoodległych linii w widmie kwantów γ

2 Przejścia te mają charakter kwadrupolowy E2.

3. Z różnicy energii ΔE_γ między kolejnymi liniami można wyznaczyć moment bezwładności jądra, a stąd R_1:R_2 i deformację jądra ($\beta_2 = 0.5$-0.6)

$$\Im = \frac{4\hbar}{\Delta E_\gamma}$$

4. Momenty kwadrupolowe wyznaczone z czasów życia tych jąder są znacznie większe niż dla jąder zdeformowanych.

5. W większości przypadków nieznane są przejścia łączące stany SD ze stanami o mniejszej deformacji

Stany superzdeformowane (SD)

Niewyjaśnione obserwacje i niepotwierdzone przewidywania:

1. Występowanie identycznych pasm rotacyjnych w różnych jądrach

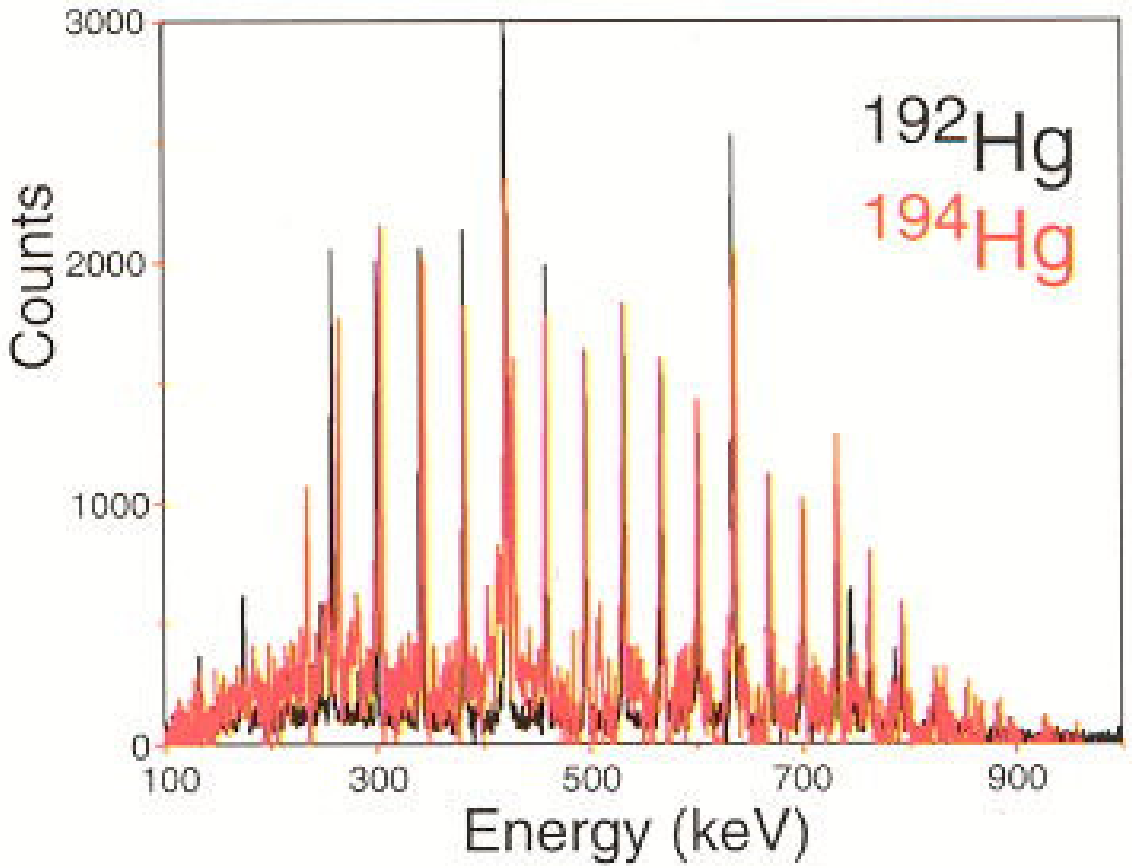
teoria: $\mathfrak{J} \sim MR^2 \sim A^{5/3}$

dla A= 150 zmiana A $\rightarrow$ A+1 powoduje zmianę $\mathfrak{J}$ o 1%,

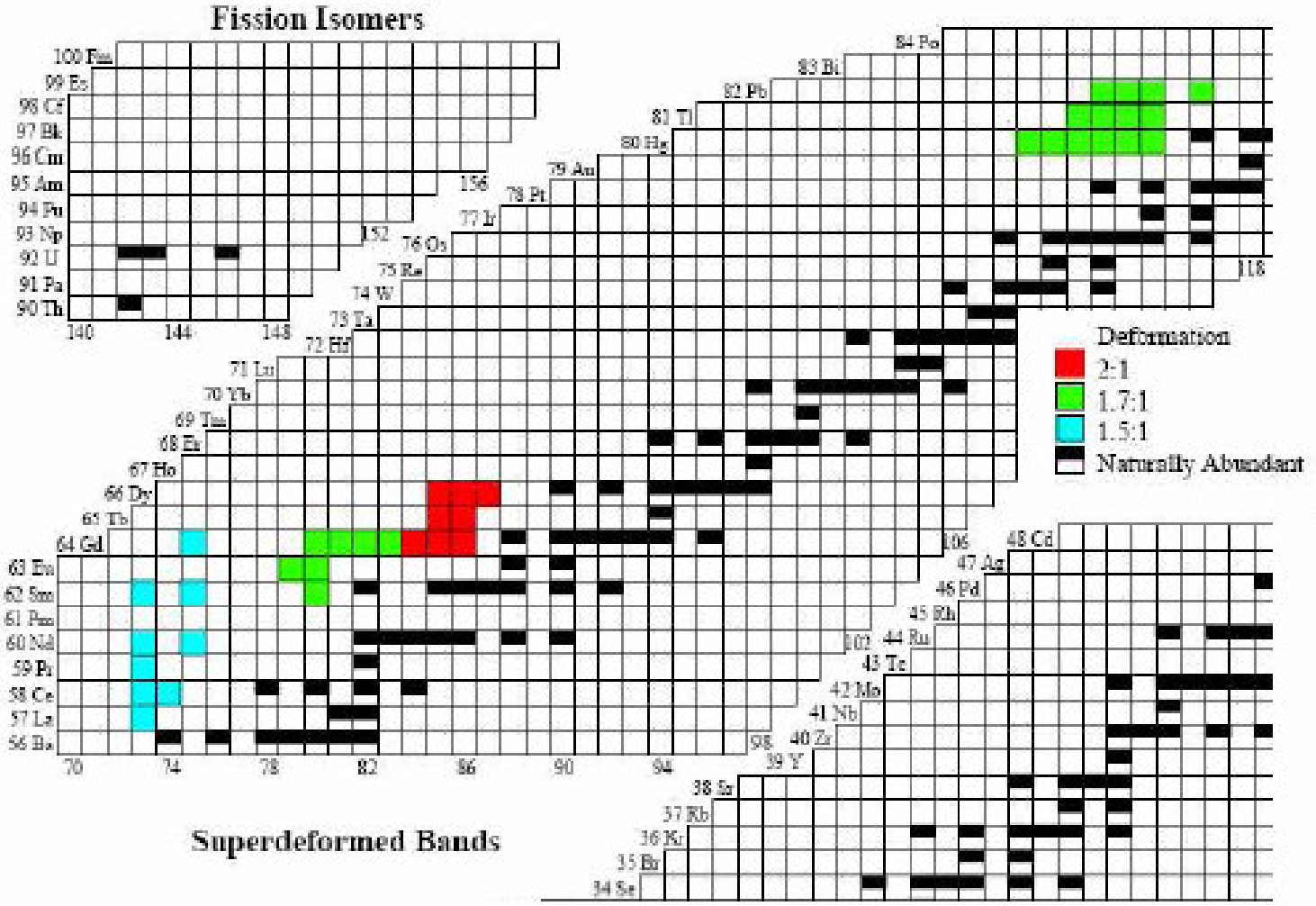
a więc dla E_{rot} = 1 MeV zmianę E_{rot} o 10 keV

exp: zmiana A $\rightarrow$ A+ 1(4) powoduje zmianę E_{rot} o 1-3 keV

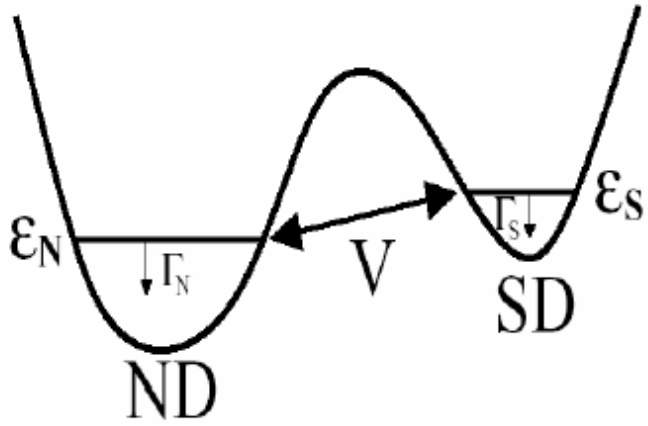
Występowanie identycznych pasm rotacyjnych w różnych jądrach

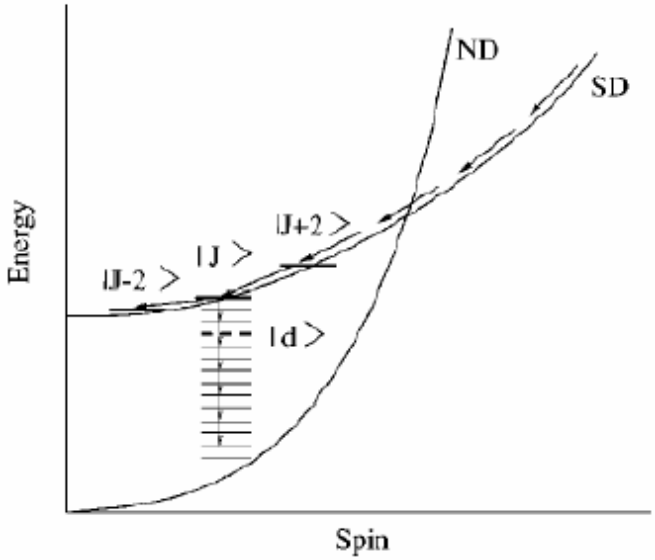


Występowanie identycznych pasm rotacyjnych w obszarze A≈ 130, 150 i 190



2. Trudności obserwacji rozpadu stanów SD do stanów ND





Tunelowanie

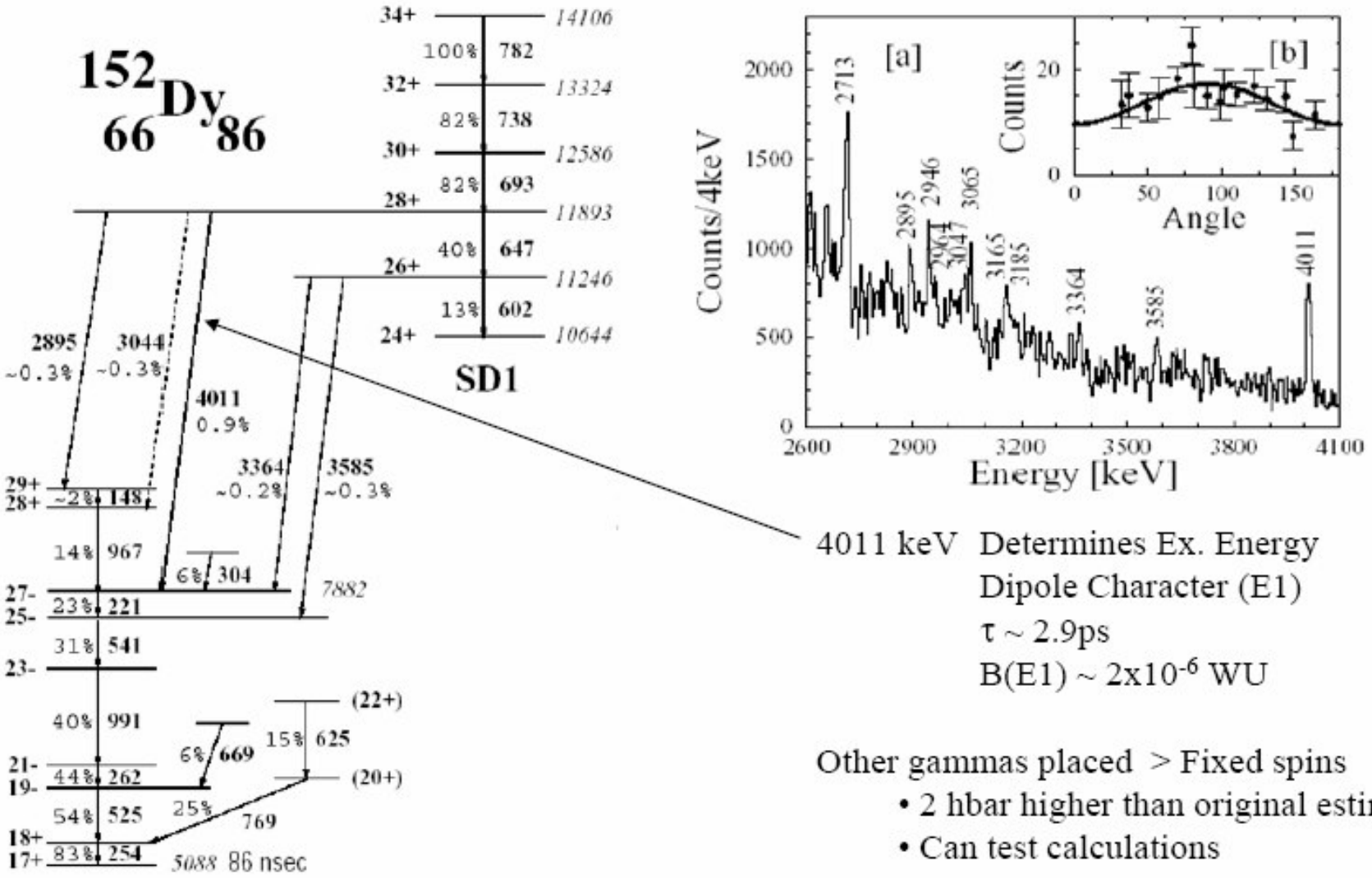
Rozpad statystyczny ?

Zależność od Ex i A

- Status
  - A~40 "All" linked
  - A~60 (~50% linked)
  - A~80 (1 linked)
  - A~130 (~50% linked)
  - A~150 (^{149}Gd, ^{152}Dy)
  - A~190 (^{194}Hg, ^{194}Pb, ^{192}Pb)
  - A~240 (^{236,238}U)

Obserwacja rozpadu stanów SD do stanów ND

T.Lauritsen et al., PRL **88** (2002) 042501



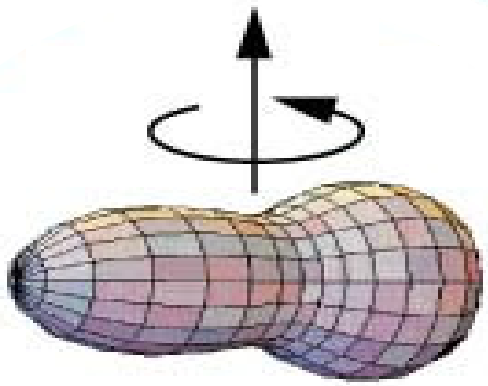
4011 keV Determines Ex. Energy
Dipole Character (E1)
$\tau \sim 2.9$ps
B(E1) ~ 2×10^{-6} WU

Other gammas placed > Fixed spins
- 2 hbar higher than original estimate
- Can test calculations

E1 decays (similar for ^{194}Hg)

Stany hiperzdeformowane (HD)

Teoria przewiduje, że dla niektórych jąder może wystąpić trzecie minimum w energii potencjalnej - odpowiadające deformacji ok. $\beta_2 = 1.1$ i $R_1:R_2 = 3:1$.

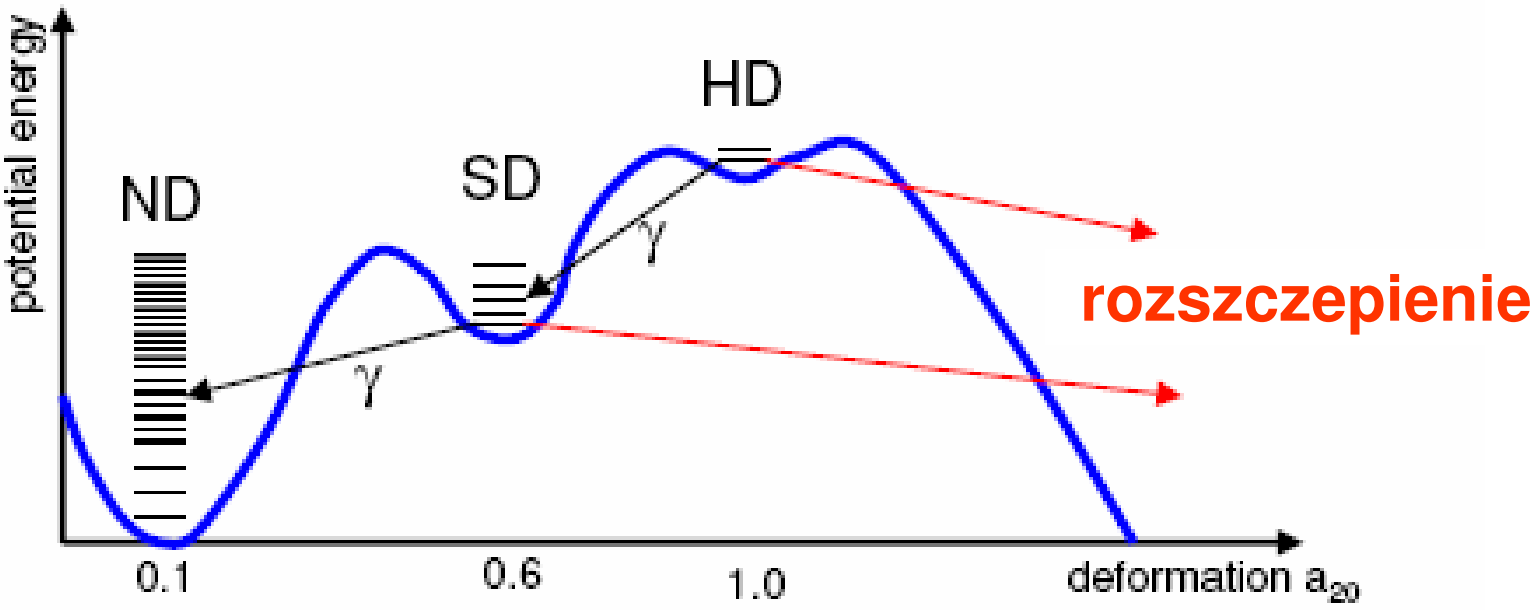


- jako wynik efektów powłokowych i oddziaływań kulombowskich

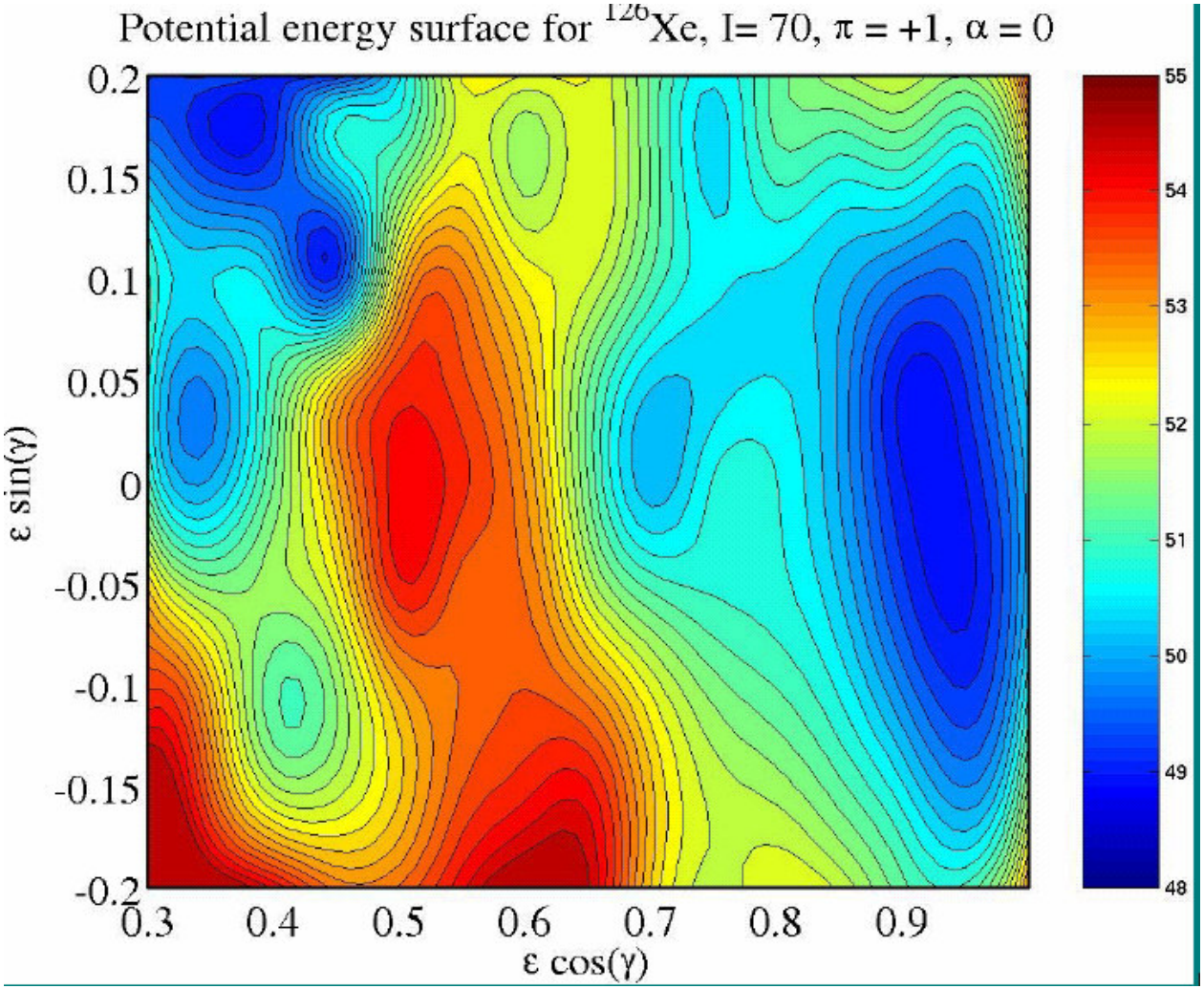
- krótki czas życia na spontaniczne rozszczepienie

Jak dotąd nie znaleziono dowodów na istnienie HD. Poszukiwania w obszarze A~ 100 Cd/Sn, A~120 Ba/Xe

Stany hiperzdeformowane (HD)



Jądra hiperzdeformowane



^{126}Xe

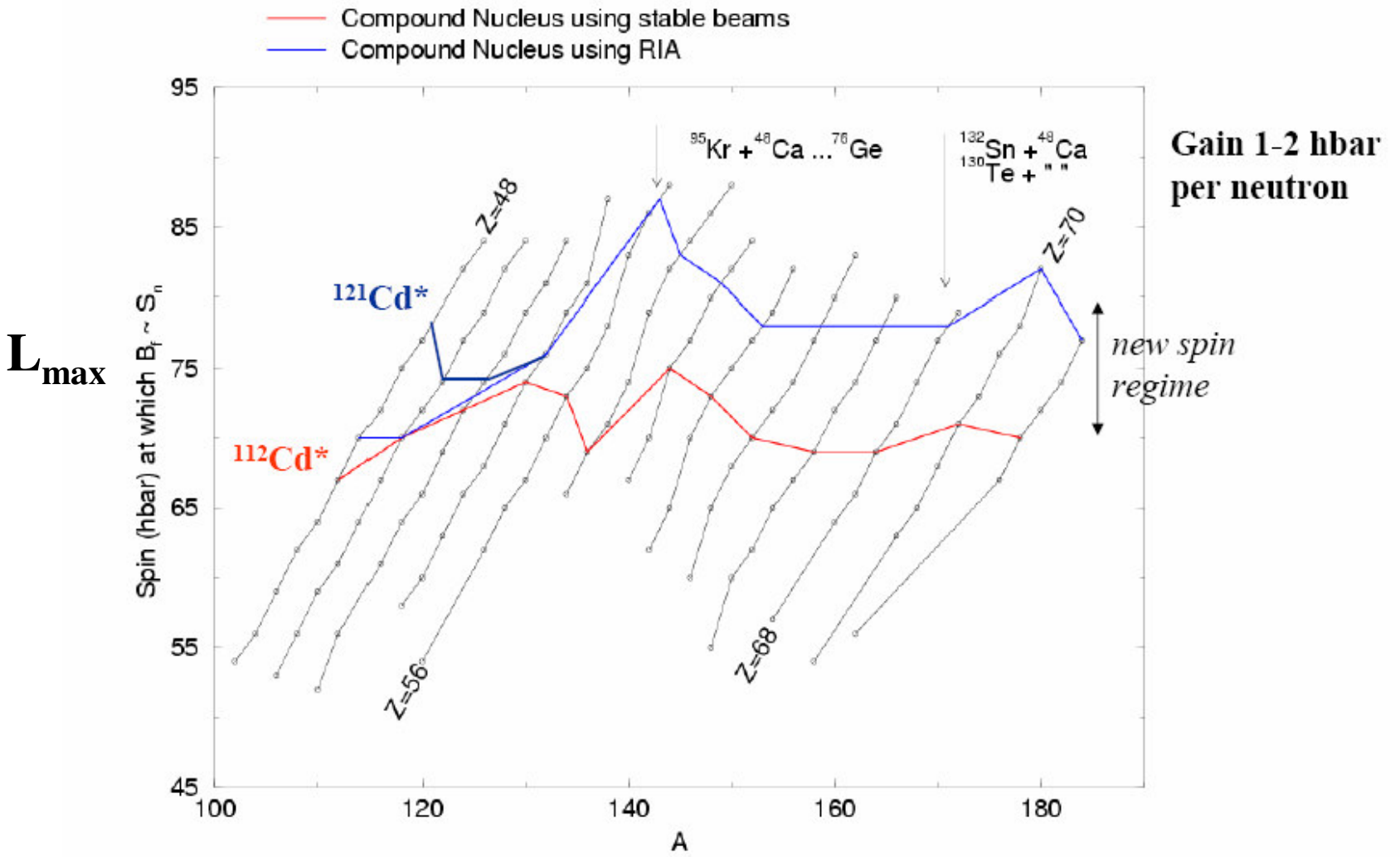
I=70 $\hbar$

Poszukiwanie hiperdeformacji w jądrach ^{126}Xe

- Reaction : ^{82}Se (^{48}Ca,xn) $^{130-x}$Xe
- Xe-1 with the Vivitron and Euroball-VI in June 2001, E_b = 195 MeV. Analysis completed.
- Xe-2 with ATLAS and Gammasphere in December 2003, E_b = 206 MeV. Analysis in progress.

HD - Perspektywy na przyszłość

1. **Wiązki radioaktywne**
2. **Detektory o większej wydajności (GRETA, AGATA)**



Jądra trójosiowe – efekt kolebania (ang. wobbling)

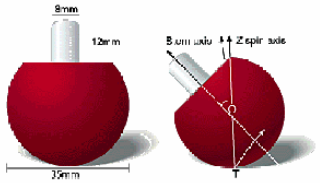
Dla trójosiowego jądra o różnych momentach bezwładności względem 3 osi głównych możliwa jest rotacja kolektywna względem każdej osi. Możliwy jest przekaz momentu pędu z ruchu rotacyjnego względem osi o największym momencie bezwładności do dwóch pozostałych. Ten przekazywany moment pędu jest skwantowany.

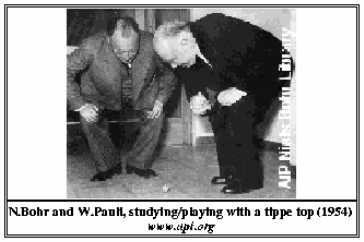
Energia wzbudzenia jądra:

$$E(I,n_w) = I\,(I+1)\,\hbar^2/(2J_{max}) + \hbar\,\omega_w\,(n_w + 1/2)$$

Jądra trójosiowe – efekt kolebania (ang. wobbling)

Tippe Top



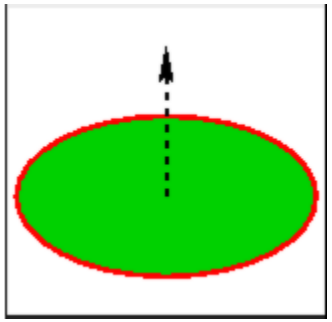


N.Bohr and W.Pauli, studying/playing with a tippe top (1954)
www.aip.org

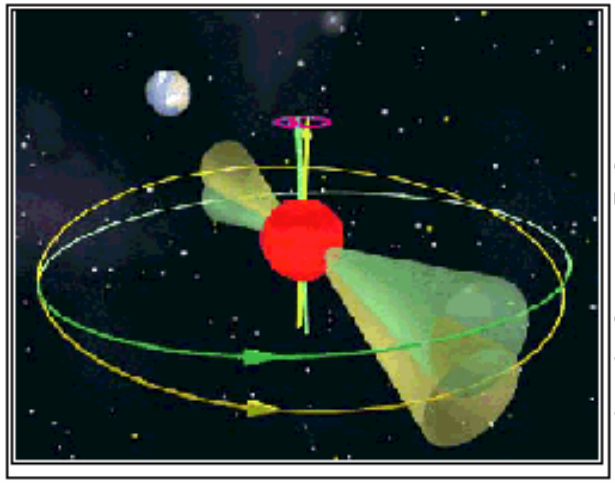
In 1950s' a study of the ***Tippe Top*** was quite fashionable
and tremendous amount of papers are published on it;
e.x., A.R. Del Campo, *Am.J.Phys. 23, 544 (1955).*

A modern approach (numerical methods) to solve the equation of a tippe top was done
by R.Cohen in MIT *Am.J.Phys. 45, 12 (1977).*

Recently, its mechanics is discussed again from a chaotic mechanics point of view.
(see *arXiv:chao-dyn/9501008*)



Wobbling Pulsar/NeutronStar (PSR B1828-11)



Rotaional frequency (Omega_z):
about 2.5 times/sec
(radius about 10 Km)

Wobbling Period :
about 1000 (days)
... due to deformation?

Nature (2000)

Wobbling Motion of the Earth

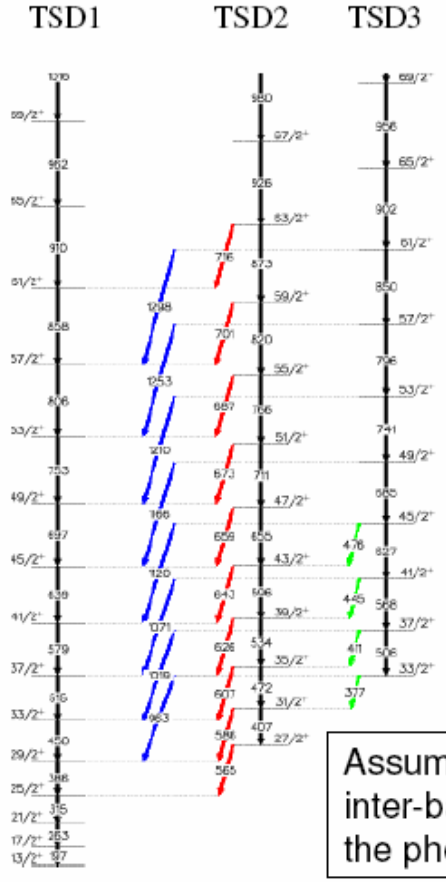
Period of Precession :
about 306 (days)
... due to oblate symmetry (axial symmetry).

Chandler wobble:
about 420 (days)
...(elatisity, streaming of water and air)

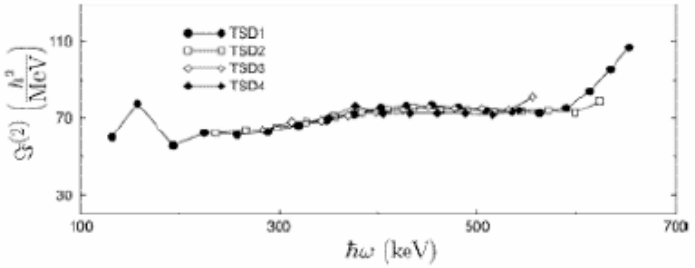
Goldstein (1980) Addison-Wesley .

Jądra trójosiowe – efekt kolebania (ang. wobbling)

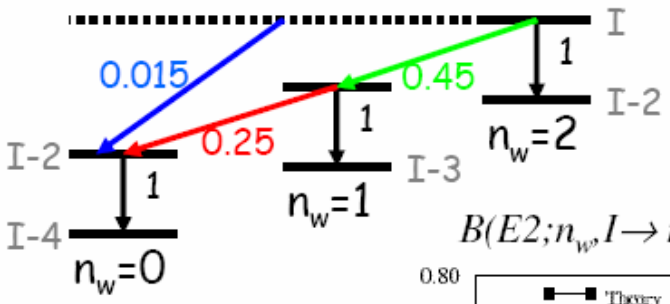
Evidence for the wobbling mode in ^{163}Lu



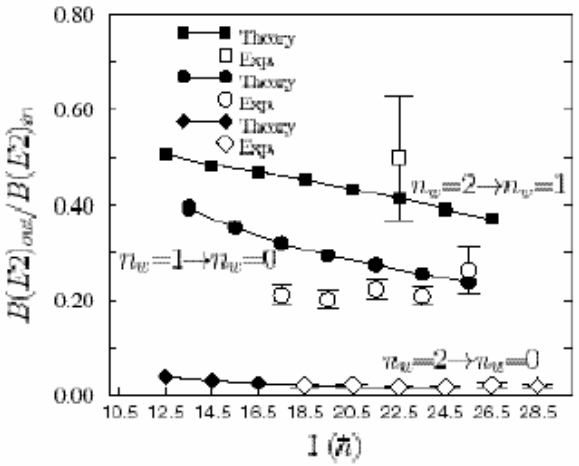
Family of bands with very similar rotational properties.



Part. Rotor calc., B(E2)'s



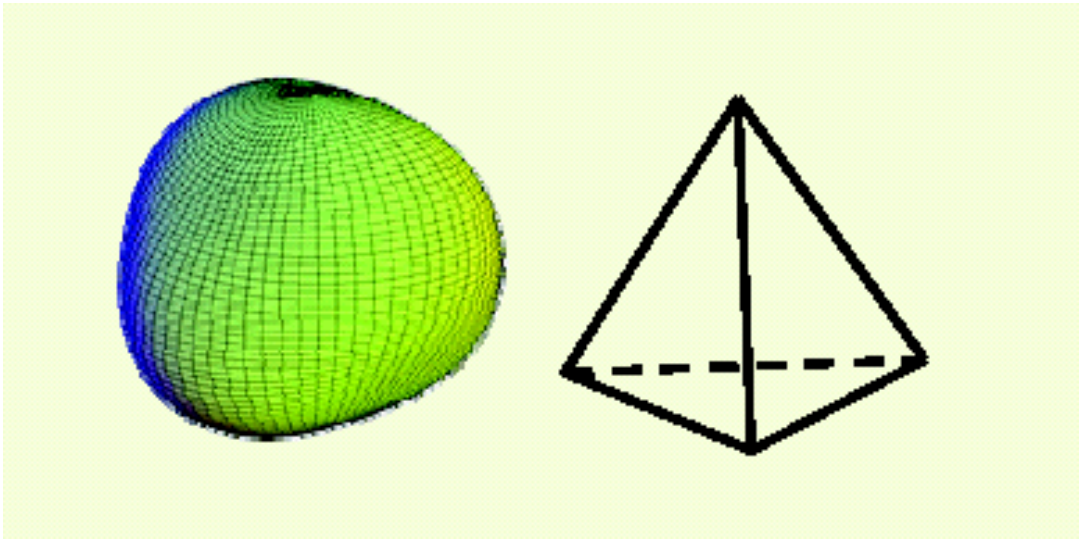
$$B(E2;n_w, I \rightarrow n_w\text{-}1, I\text{-}1) \propto n_w/I$$

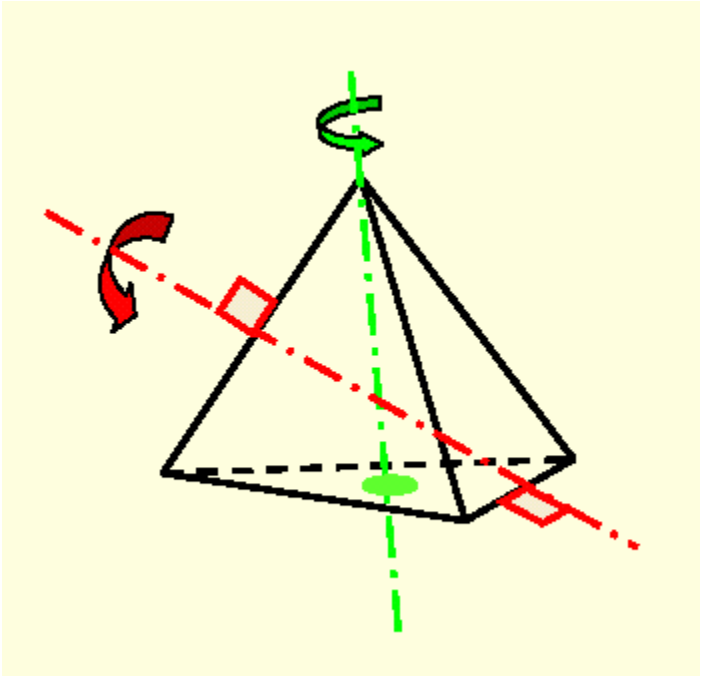


Assuming E2 character for the inter-band transitions, they follow the phonon rule.

D.R. Jensen et al.,
Phys. Rev. Lett. 89, 142503 (2002)

Jądra tetraedryczne



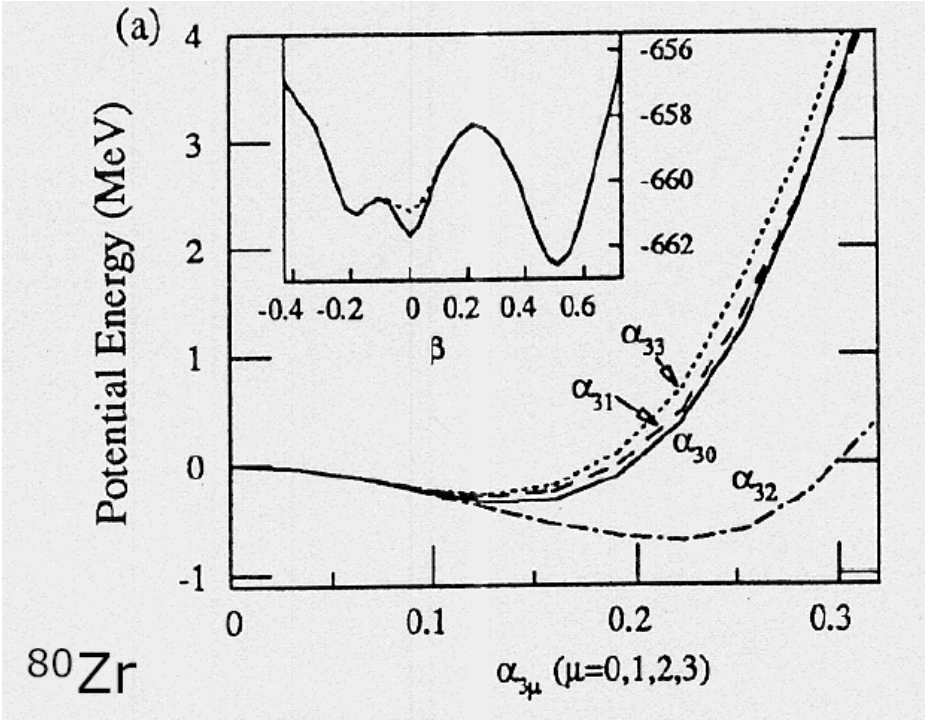


Jądra tetraedryczne

$$R = R_0 (1 + \Sigma \alpha_{\lambda\mu} Y_{\lambda\mu} (\theta, \varphi))$$

1. Symetrię tetraedryczną definiuje się przez $\alpha_{32} \neq 0$

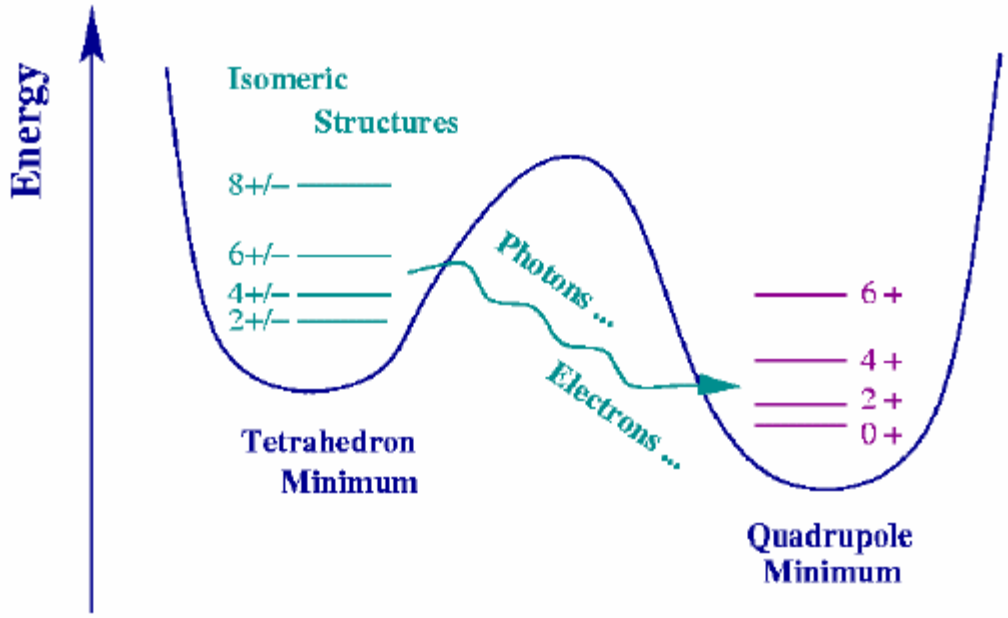
pozostałe $\alpha_{\lambda\mu} = 0$



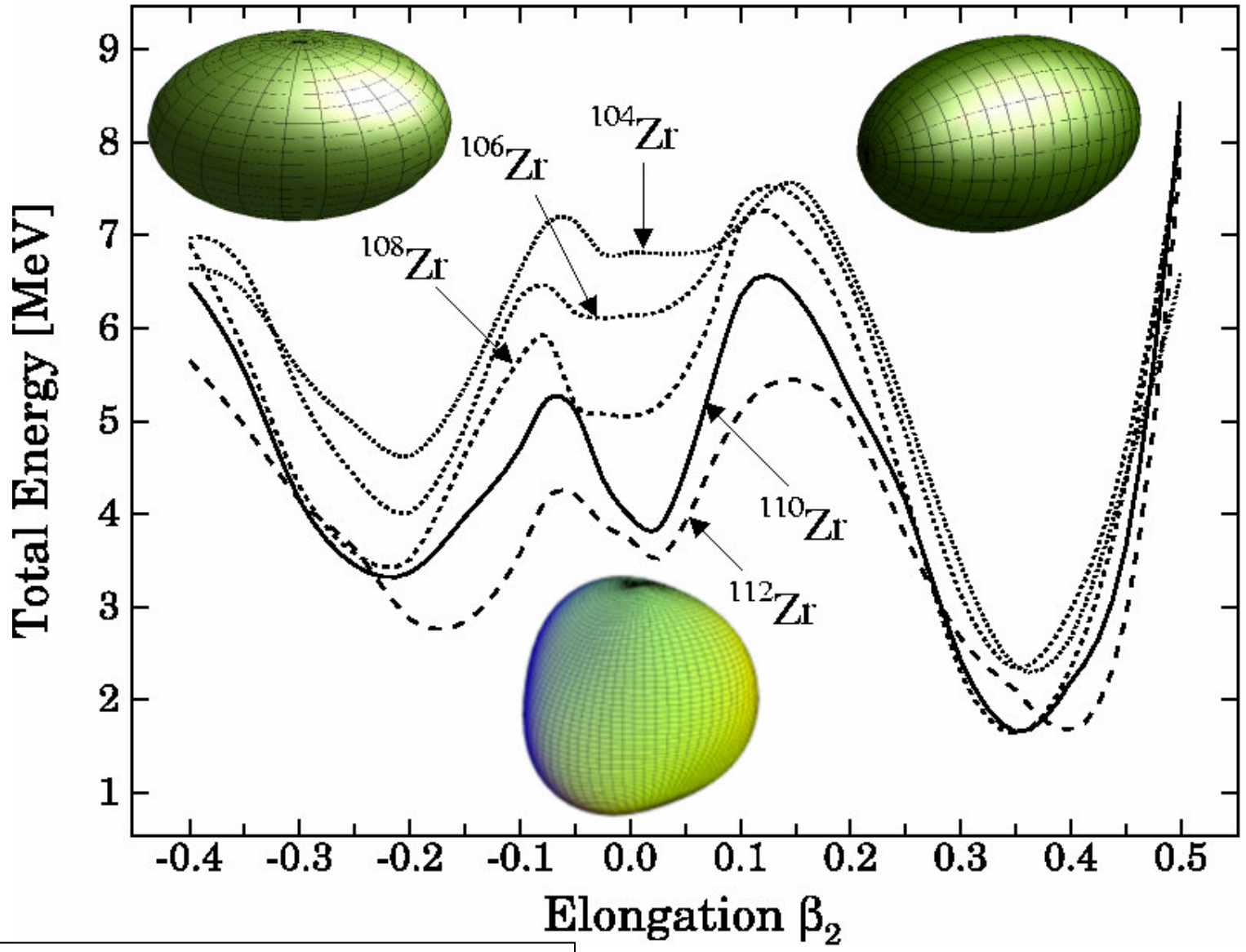
Jądra tetraedryczne

Istnienie jako wynik bardzo silnych efektów powłokowych

1. **Kształt tetraedryczny oczekiwany dla izomerów kształtu**
2. **Małe deformacje α_{32}= 0.1-0.3**
3. **Spin 0^+**
4. **Stany wzbudzone**
5. **Konkurencja - stany o normalnych deformacjach**



Przewidywania teoretyczne



N. Schunk, J. Dudek, A. Góźdź, P. Regan, Phys. Rev. C 69, 061305R

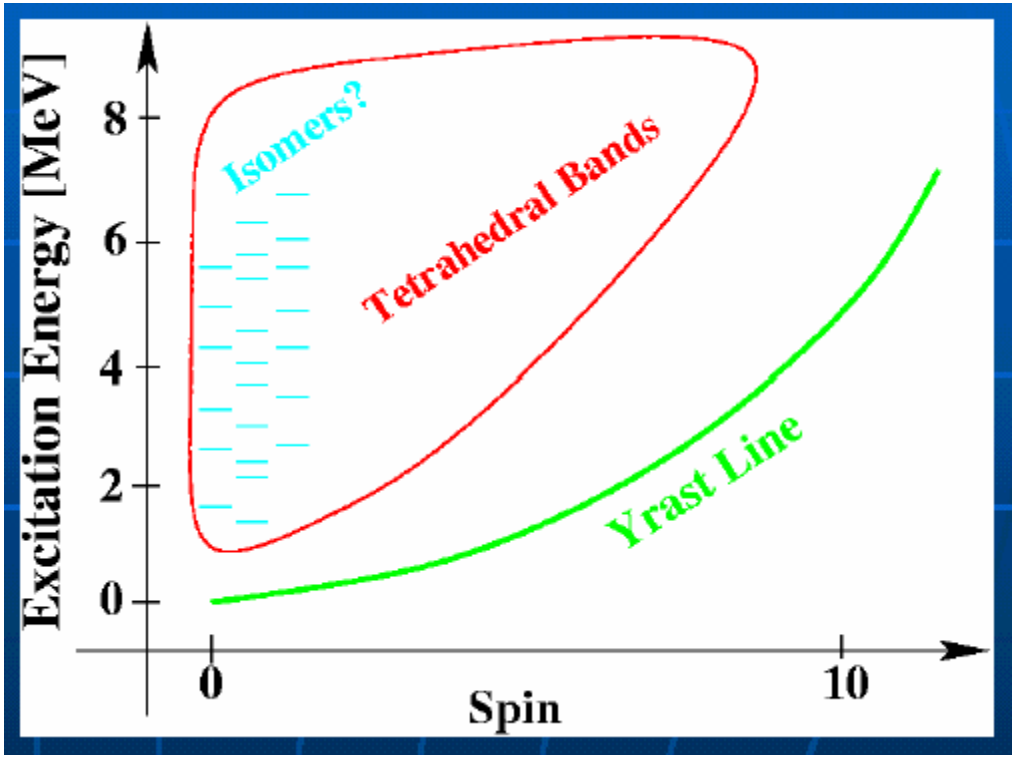
Przewidywane warunki obserwacji w eksperymencie

1. Stany o niskim spinie

2. Energia wzbudzenia
Ex ≈ 0.5 - kilka MeV

3. Jądra o liczbach magicznych tetraedrycznych

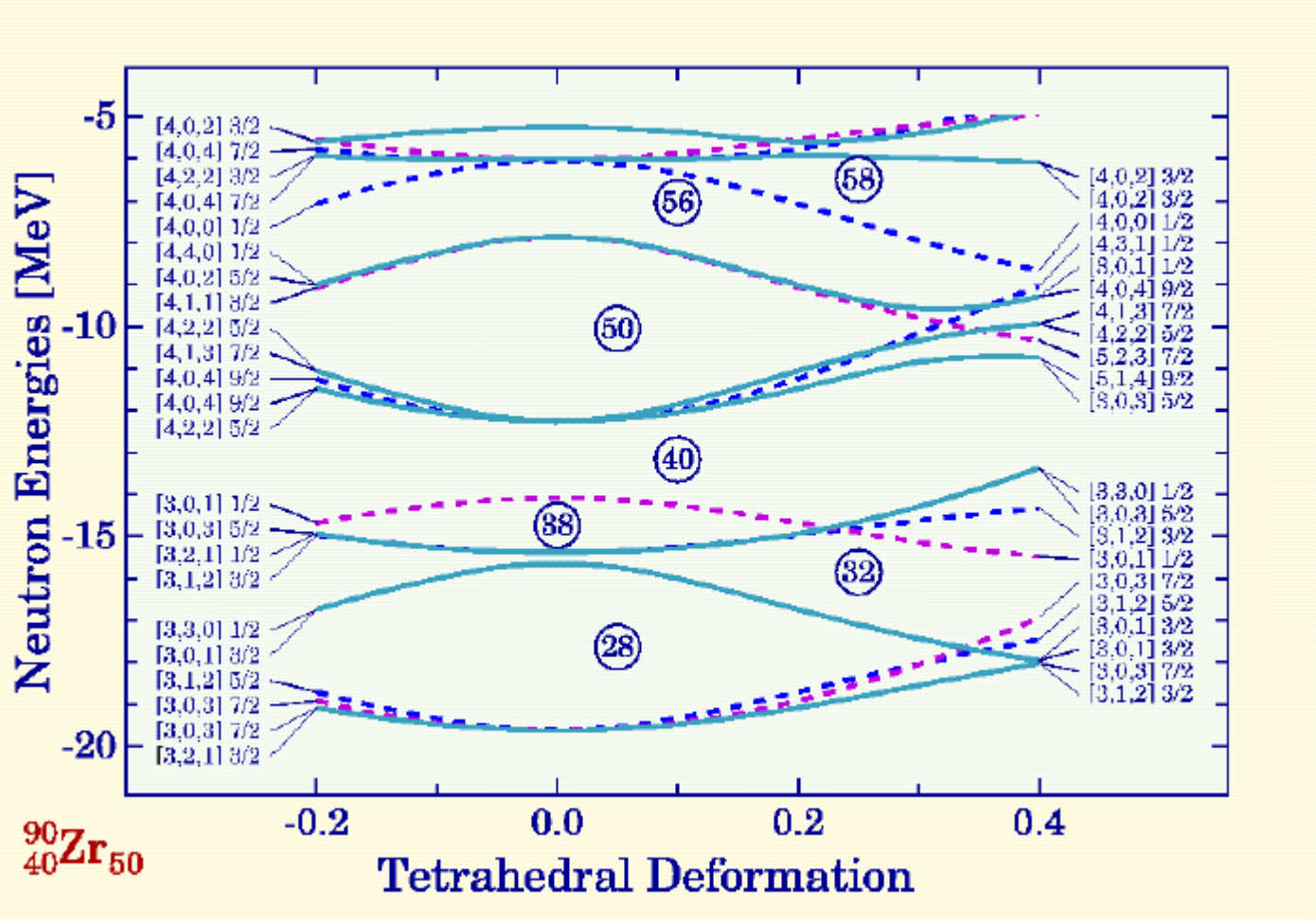
4. Przejścia γ typu E3
(E1 i E2 niemożliwe)



Tetraedryczne liczby magiczne

Z= 16, 20, 32, 40, 56-58, 70, 90-94, 100, 112, 126

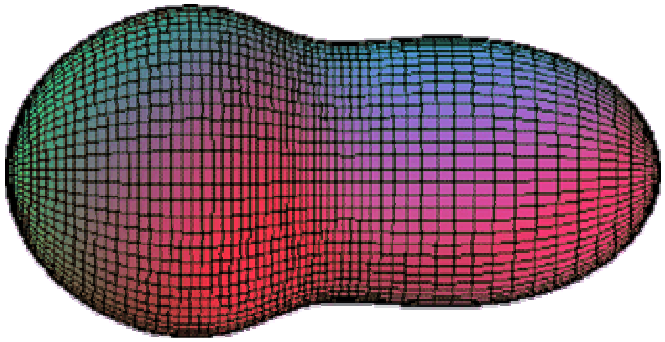
N= 16, 20, 32, 40, 56-58, 70, 90-94, 100, 112, 136



Inne przyczyny występowania dużych deformacji

1. Izomeria kształtu w rozszczepieniu

^{222}**Ra**



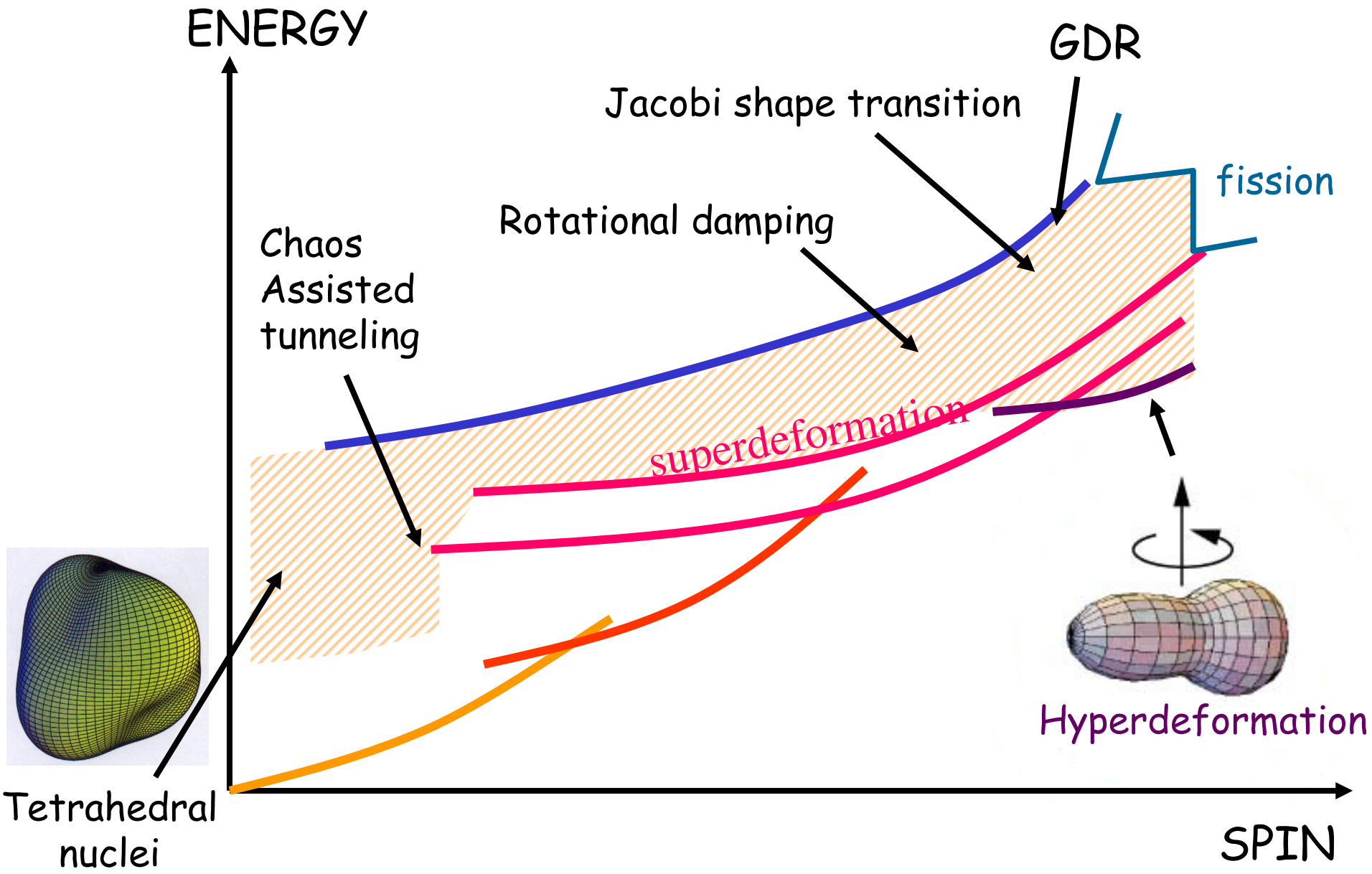
$\beta_2 = 0.6$

2. Egzotyczne kształty jąder lekkich

$^{12}C =$ α α α

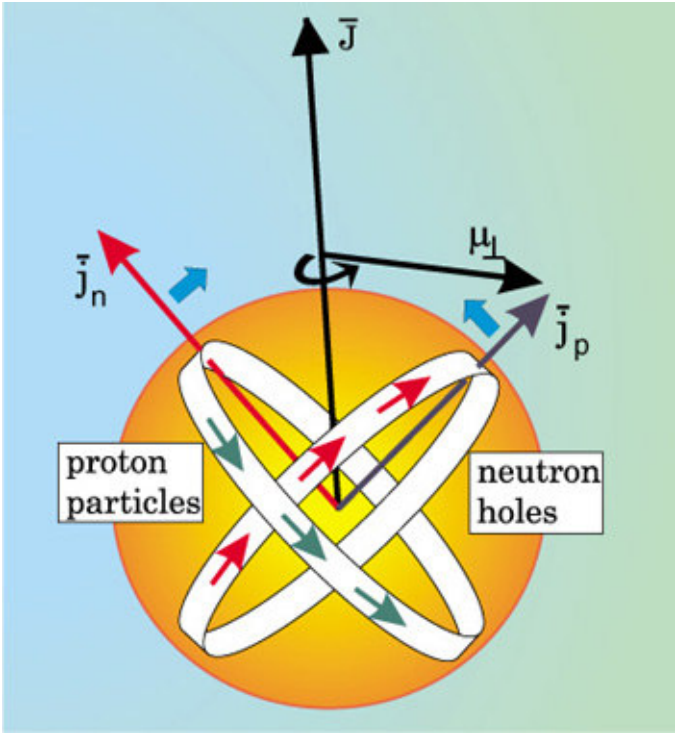
stan o Ex= 10.3 MeV

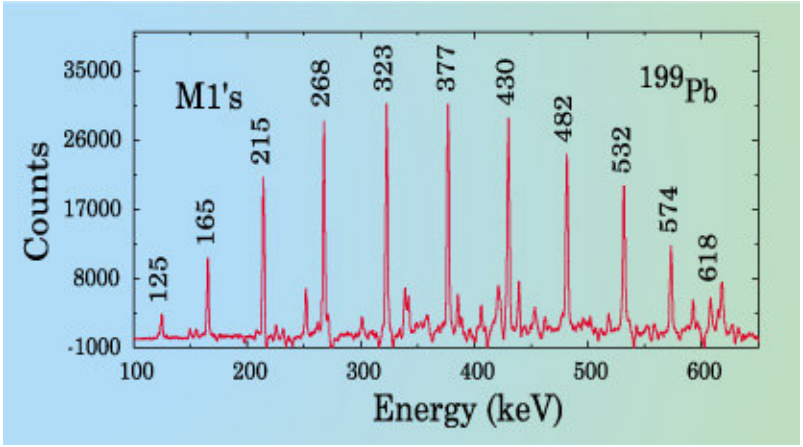
A domain rich of new exotic phenomena to be discovered



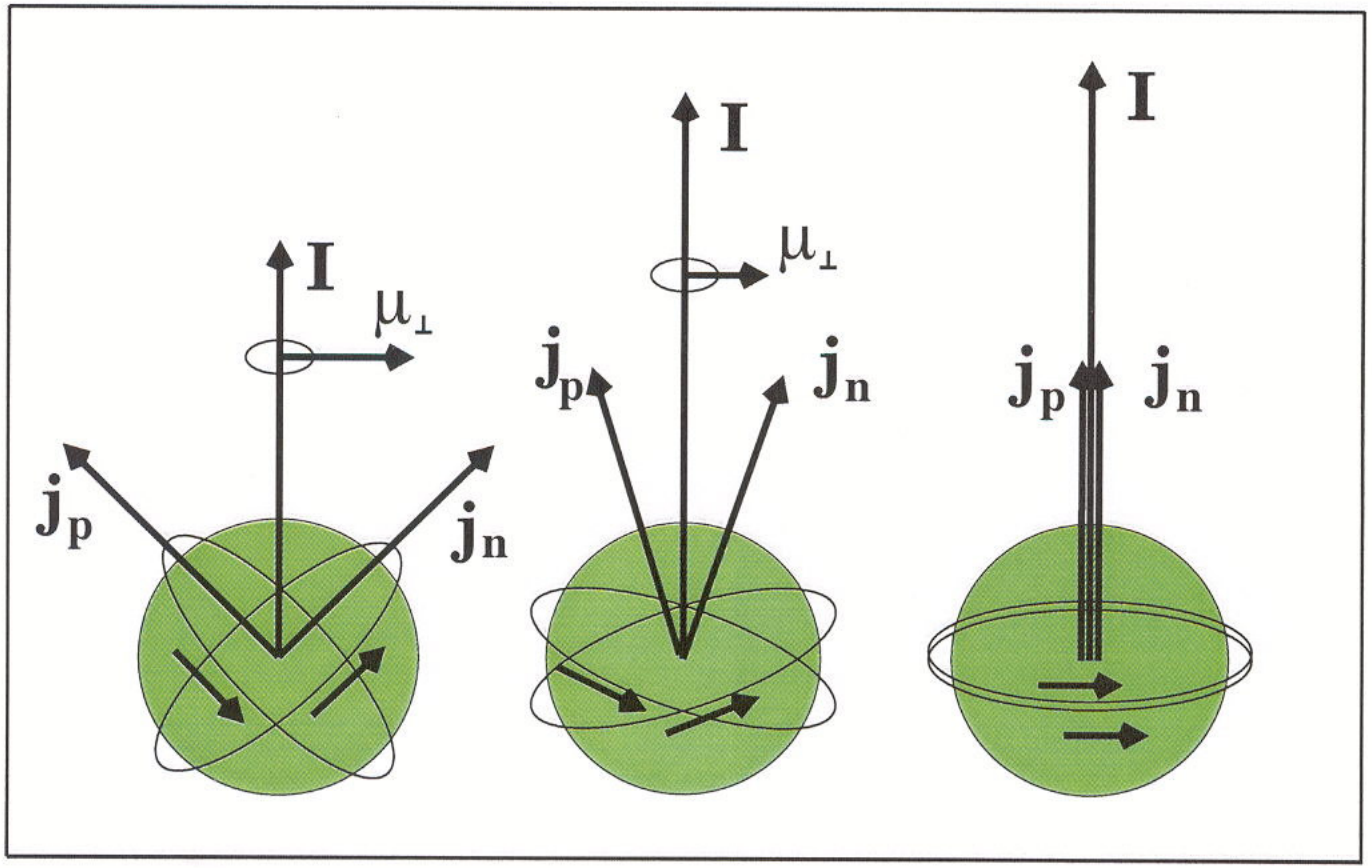
Pasma rotacyjne w jądrach prawie sferycznych

1. Wywołane przez sprzężenie momentów pędu walencyjnych protonów i dziur neutronowych
2. Rozpad stanów poprzez promieniowanie typu M1
3. Obserwacja dla jąder w obszarze A ≈ 190, 140, 110, 80

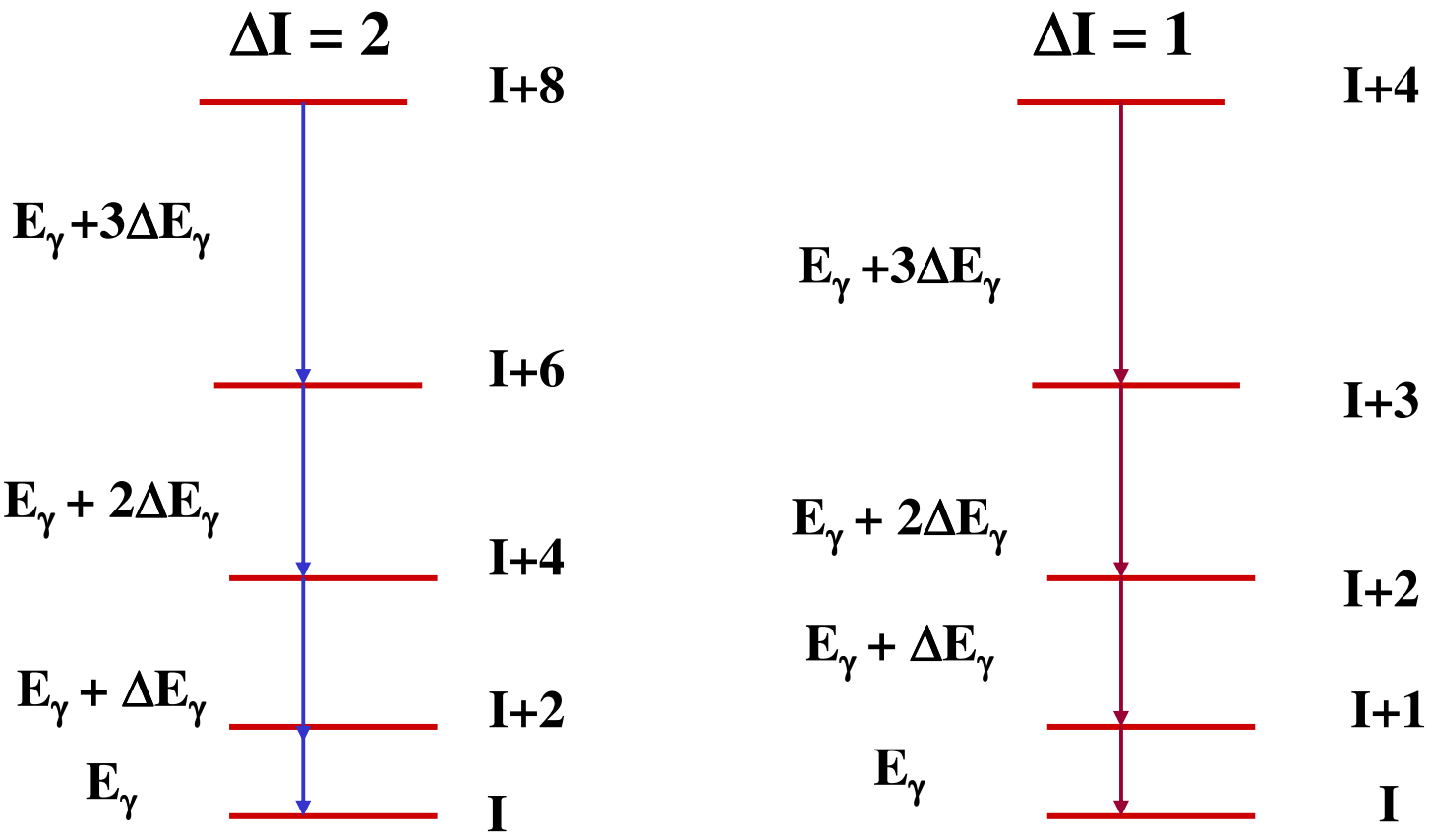




Pasma rotacyjne w jądrach prawie sferycznych

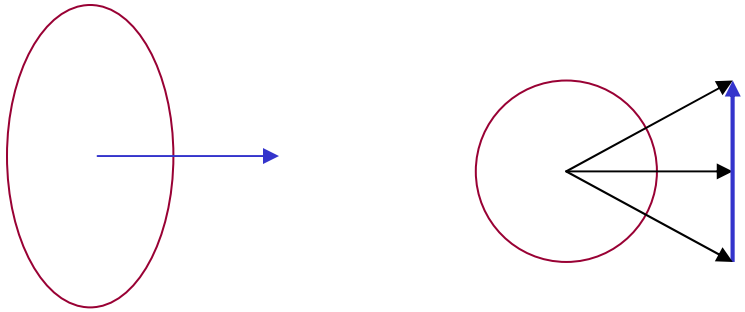


Porównanie rotacji elektrycznej i magnetycznej

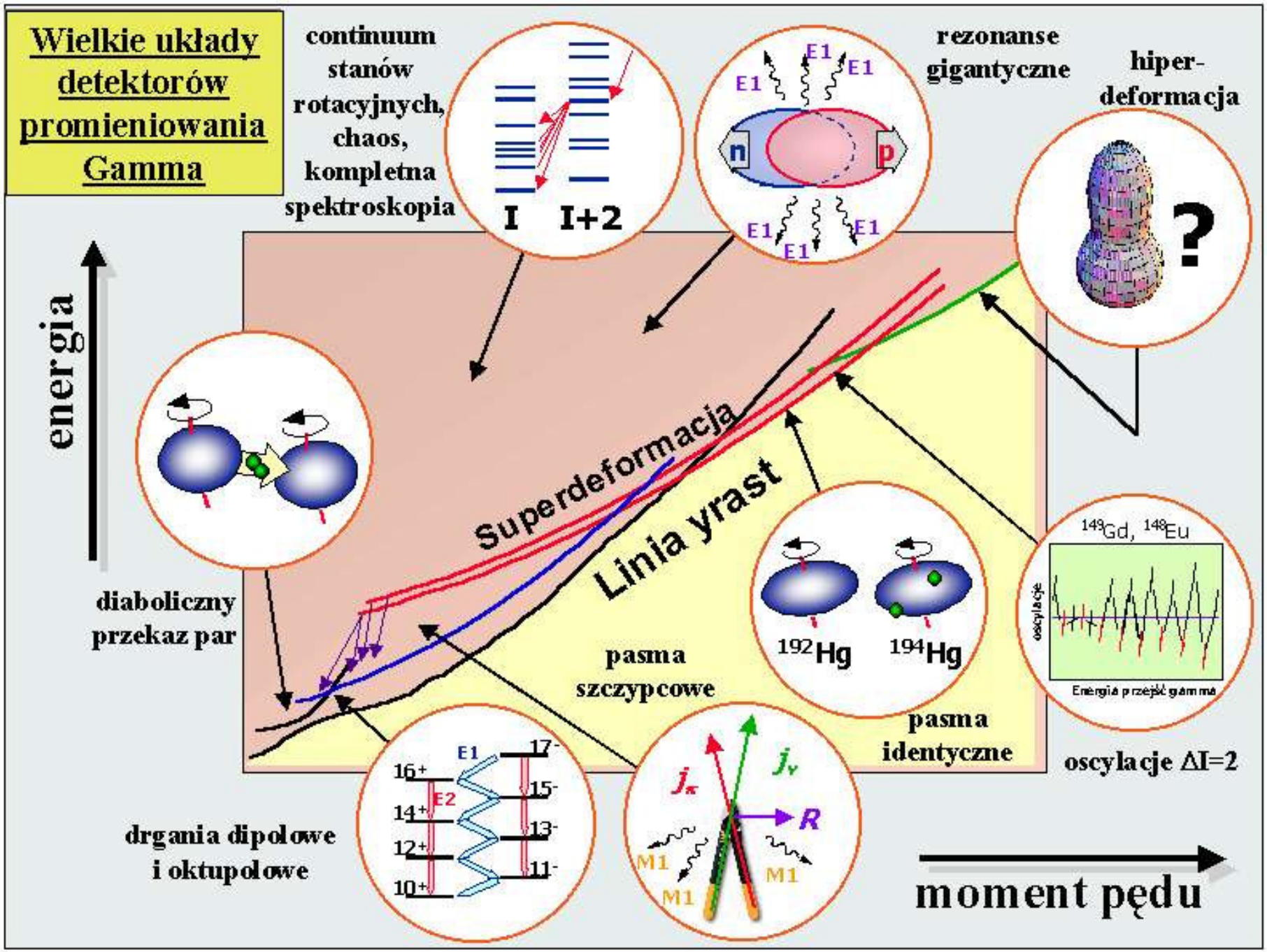


Porównanie rotacji elektrycznej i magnetycznej

1. **Pasma rotacyjne**
2. **Anizotropowość**
   (R.E. – rozkład materii, R.M. – rozkład prądów)
3. **Wyróżniony kierunek**



4. **Duże momenty pędu**
5. **Liczba nukleonów biorących udział we wzbudzeniu**


Wielkie układy detektorów promieniowania Gamma
continuum stanów rotacyjnych, chaos, kompletna spektroskopia
I
I+2
rezonanse gigantyczne
E1
n
p
hiper-deformacja
?
energia
Superdeformacja
Linia yrast
diaboliczny przekaz par
pasma szczypcowe
192Hg
194Hg
pasma identyczne
149Gd, 148Eu
oscylacje
Energia przejść gamma
oscylacje ΔI=2
drgania dipolowe i oktupolowe
E1
E2
16+
14+
12+
10+
17-
15-
13-
11-
jπ
jν
R
M1
moment pędu