

# Jadrová izoméria

Upresnenie a  
doplnenia k PhD JF



# Izomér - definícia



Dlhožijúca metastabilná vzbudená hladina atómového jadra...

Prakticky závisí od uhla pohľadu – čo je daný experiment schopný merať.

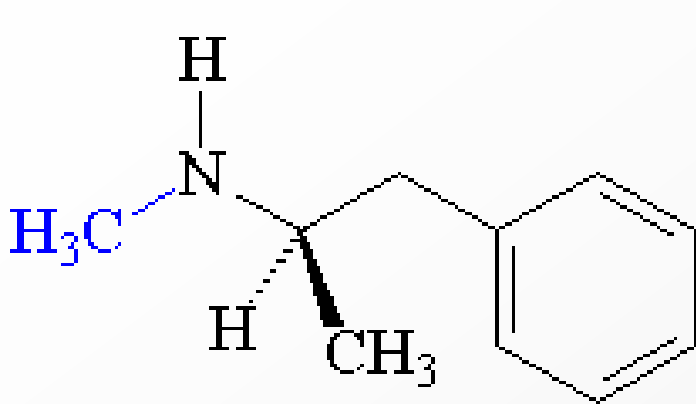
Iná definícia slovíčka „dlhožijúca hladina“

Dlhožijúca hladina = dostatočne dlho žijúca na to aby sa vytvorila príslušná atómová štruktúra.

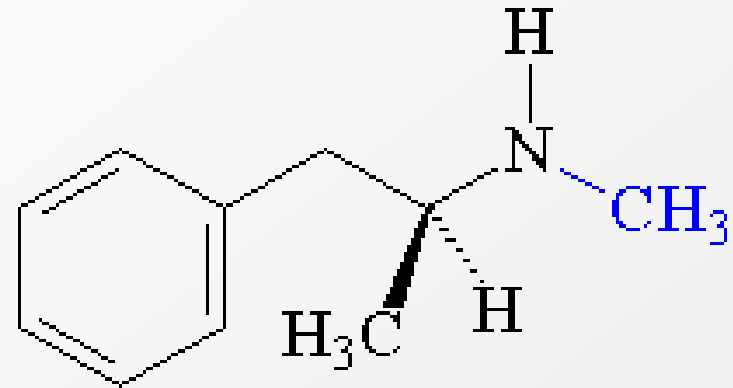
*J.Cerny, J. Hardy Annu. Rev. Nucl. Sci. 27 (1977) 333*

Väčšinou rádovo viac ako nanosekundy.

# Molekulová izoméria



L-metamphetamin  
bez psycho-aktívnych účinkov



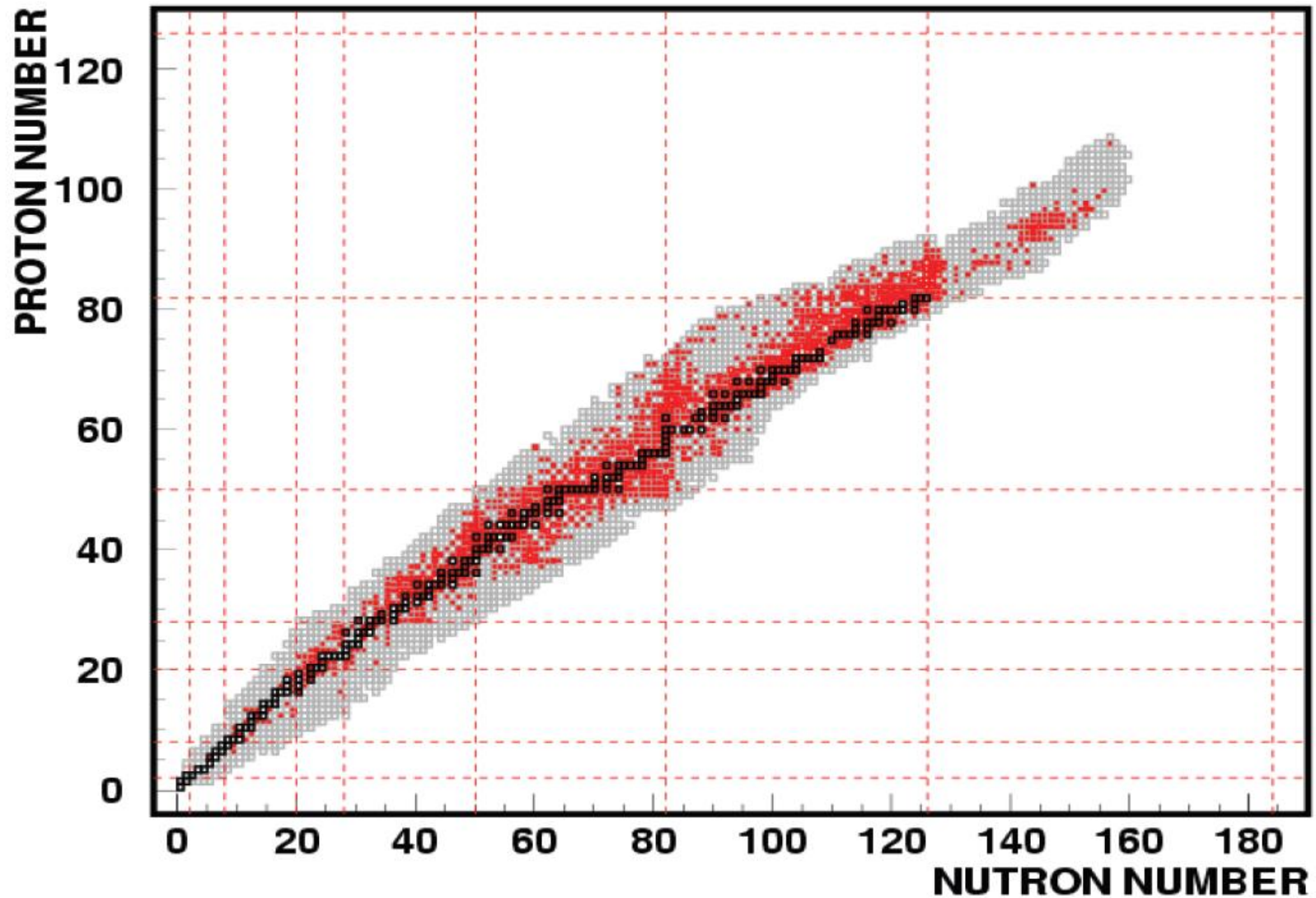
D-metamphetamin  
psycho-aktívna molekula

# Trochu histórie



- 1917 – F. Soddy (idea)  
„nuclei having the same charge and the same mass but still not identical“ – „isotopy of the second kind“  
(*Nature* 99 (1917) 414)
- 1921 O. Hahn (objav)  
z prírodného rozpadového reťazca  $^{238}\text{U}$  bol popri rozpadu zo základného stavu  $^{234}\text{Pa}$  ( $T_{1/2} = 6.7 \text{ h}$ ) zistený aj rozpad s polčasom  $T_{1/2} = 1.15 \text{ m}$   
**(mimočodom excitačná energia dodnes nie je známa!!!)**
- 1935 Objav umelo vytvorených izomérov v izotopoch india (Szilard a Chalmers) a brómu (Kurchatov a Fermi)  
**Stále neexistovala teória tvorby izomérených stavov**
- 1936 – teória izoméru C.F. v Weizsäcker  
(*Naturwissenschaften* 24 (1936) 813)
- 1949 – len 75 známych izomérov (*E. Segre a A.C. Helmholtz Rev. Mod. Phys.* 21 (1941) 271)  
Teraz už cca 2600 izomérov a 2800 jadier

# Oblasti jadrovej izomérie



# Zaujímavé izoméry



Dlhý polčas:  $^{180}\text{Ta}$ ,  $9^-$ ,  $E^* = 75 \text{ keV}$ ,  $T_{1/2} > 10^{15}$  rokov

Vysoký spin:  $^{212}\text{Fr}$ ,  $34^+$ ,  $E^* = 8.5 \text{ MeV}$ ,  $T_{1/2} = 24 \mu\text{s}$

Vysoká energia:  $^{152}\text{Er}$ ,  $\approx 36$ ,  $E^* = 13 \text{ MeV}$ ,  $T_{1/2} = 11 \text{ ns}$

Nízka energia:  $^{229}\text{Er}$ ,  $3/2^+$ ,  $E^* \approx 5.5 \text{ eV}$ ,  $T_{1/2} \approx 10 \text{ h}$

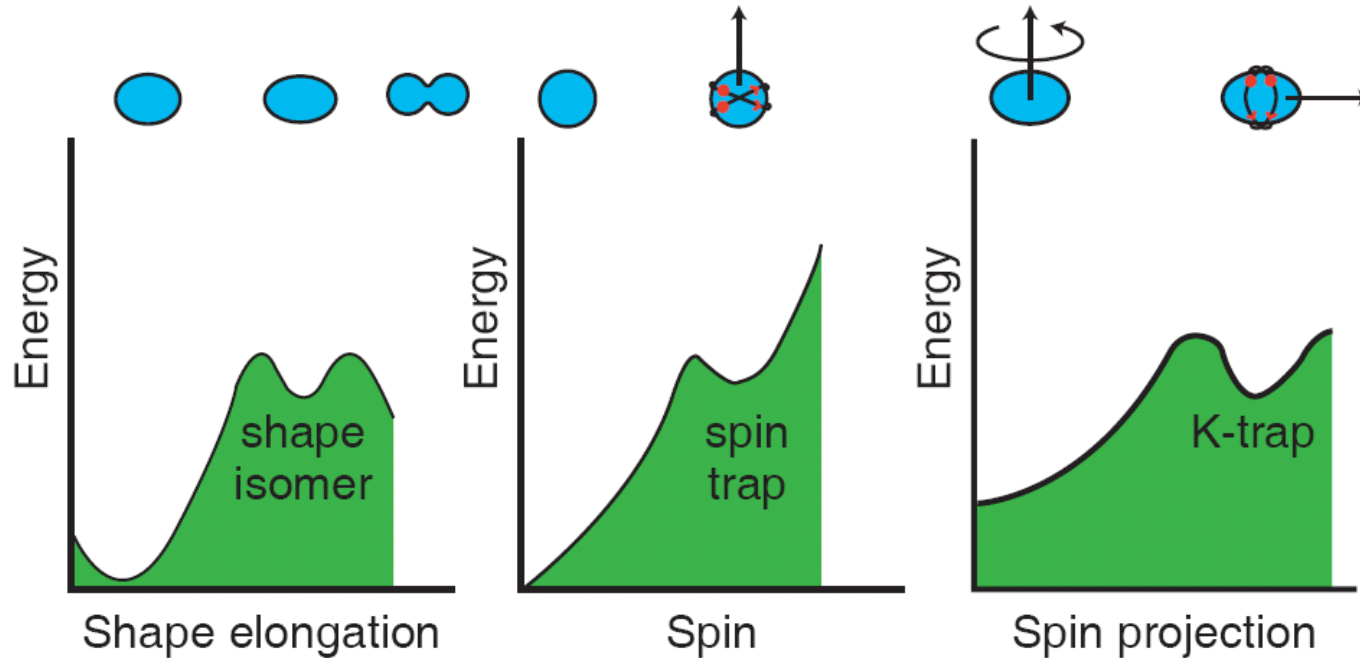
Protónovo bohaté:  $^{94}\text{Ag}$ ,  $21^+$ ,  $E^* = 5.8 \text{ MeV}$ ,  $T_{1/2} = 300 \text{ ms}$

Neutrónovo bohaté:  $^{130}\text{Cd}$  (predbežné)

Vysoká hmotnosť:  $^{270}\text{Ds}$ ,  $(10^-)$ ,  $E^* \approx 1 \text{ MeV}$ ,  $T_{1/2} \approx 6 \text{ ms}$

$^{254}\text{No}$ ,  $\approx 16$ ,  $E^* \approx 2.5 \text{ MeV}$ ,  $T_{1/2} = 184 \mu\text{s}$

# Typy izomérov



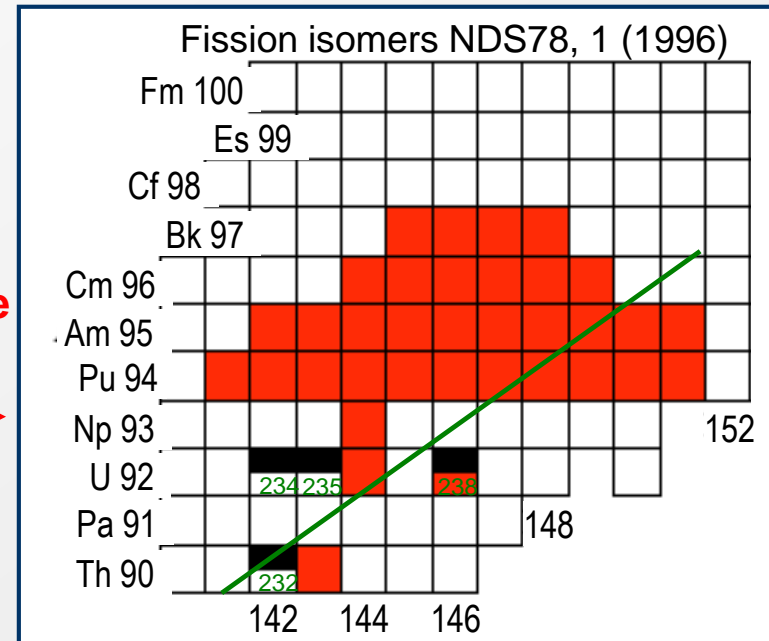
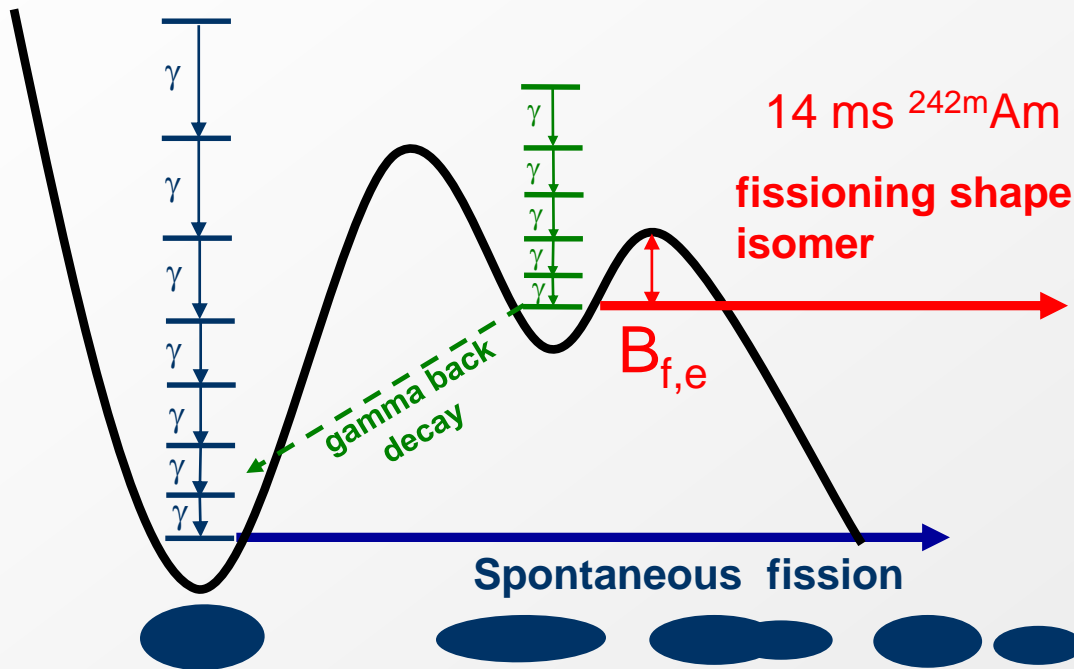
**Figure 1** Excitation energy as a function of various nuclear variables. The secondary energy minima are responsible for the different kinds of isomers: **a**, shape isomers; **b**, spin traps; **c**, *K*-traps. In each case, the relevant nuclear shapes are illustrated; where appropriate, angular momentum vectors are shown as arrows. For both the spin trap and the *K*-trap, the angular momentum comes from a small number of orbiting nucleons (two are illustrated in red in each case).

*P. Walker, G. Dracoulis Nature 399 (1999) 35 -40*

# Fissioning Shape Isomers ( $T_{1/2,f} \sim \text{ns-ms}$ )

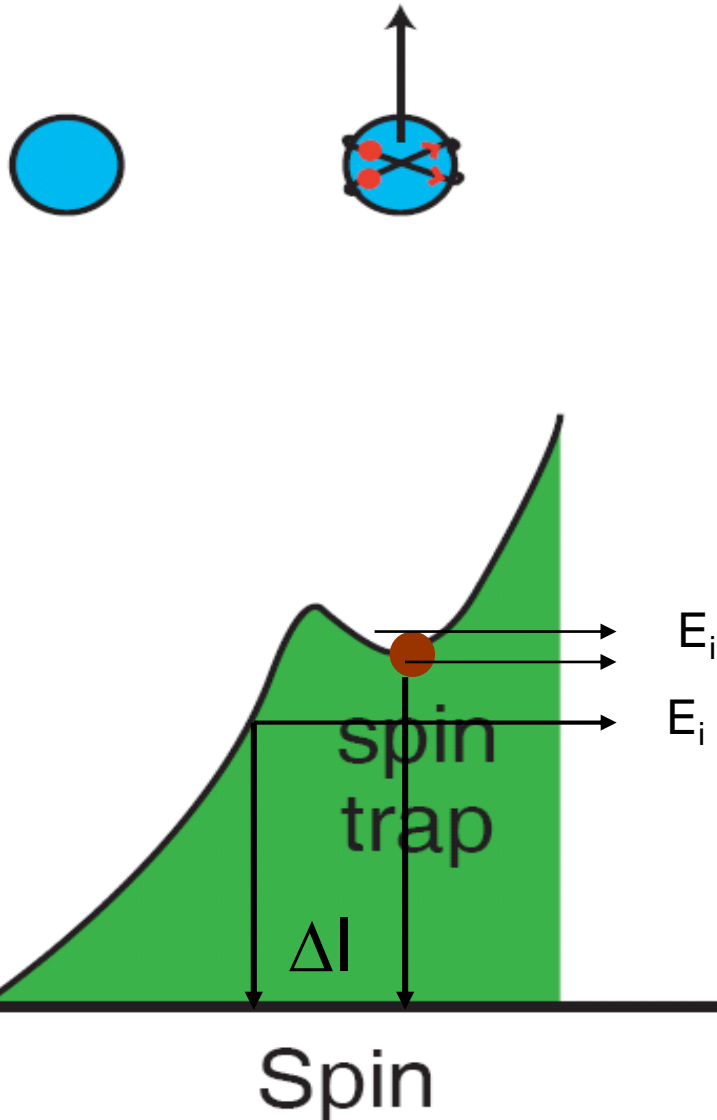


- Discovery: 1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)
- **Populate states in the second well (typical  $E^* = 2-3 \text{ MeV}$ )**
- Lower and thinner  $B_{\text{fis,external}} \Rightarrow$  shorter  $T_{1/2}$
- e.g.  $^{242g}\text{Am}$   $T_{1/2} = 141 \text{ y}$ , but  $^{242m}\text{Am}$   $T_{1/2} = 14 \text{ ms}$ !





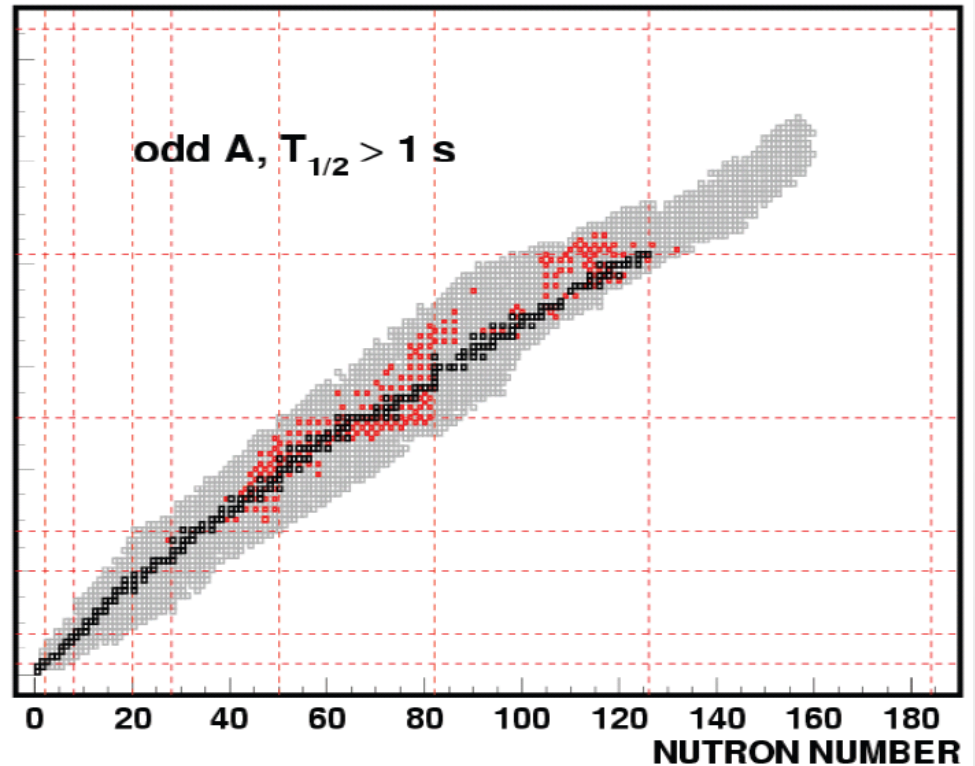
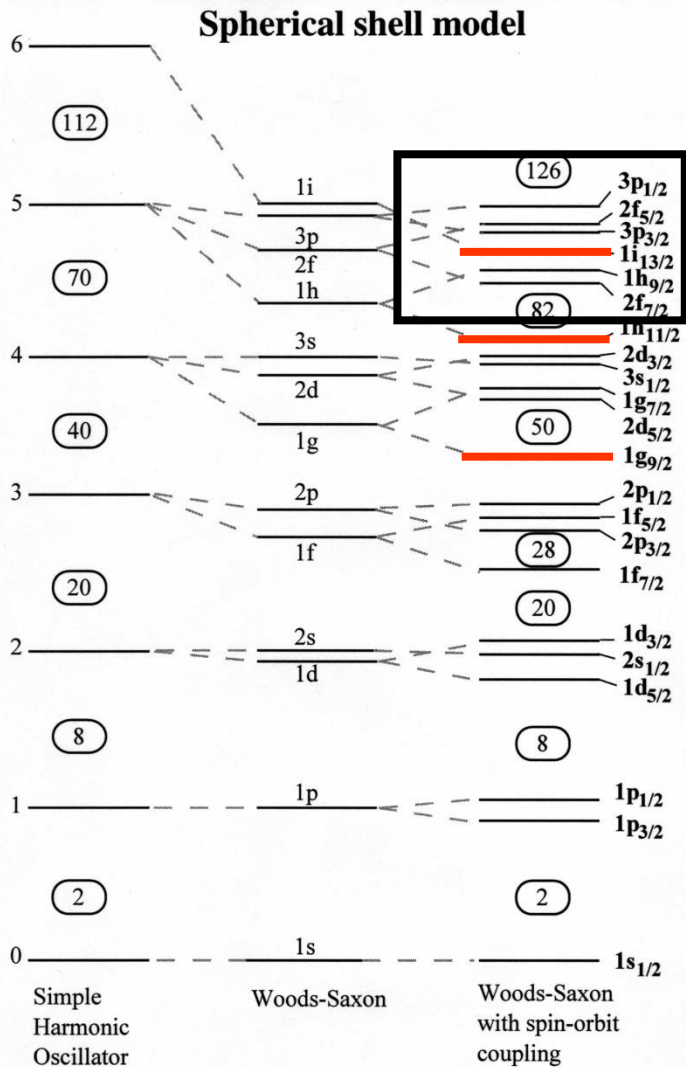
# Spinová pasca



Malá zmena spinu vedie iba energeticky vyššie stavy

Prechod na energeticky výhodný stav si vyžaduje veľkú zmenu spinu

# Ako vznikne spinová pasca?



islands of long lived isomers

$38 < N < 50$

$64 < N < 82$

$100 < N < 126$

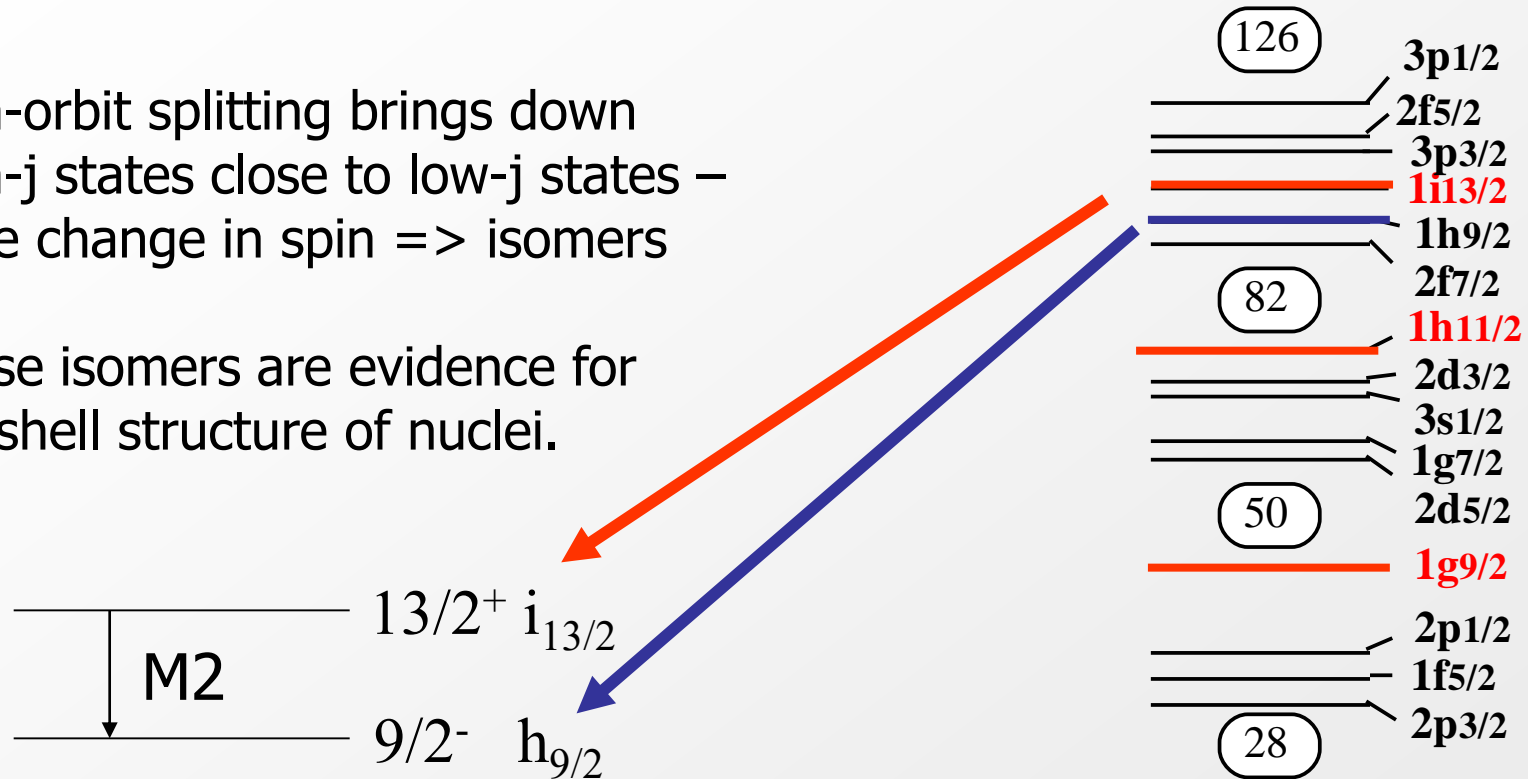
Pre formovanie spin. pasce  
je klúčová prítomnosť orbitalov  
s vysokým spinom

# Ako vznikne spinovú pascu

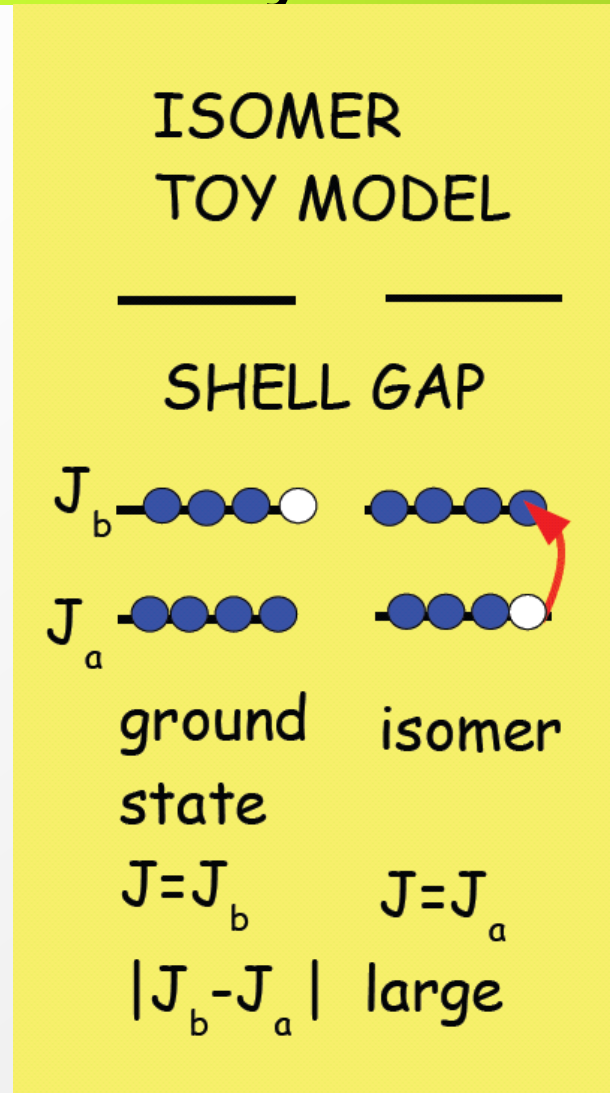


Spin-orbit splitting brings down high-j states close to low-j states – large change in spin => isomers

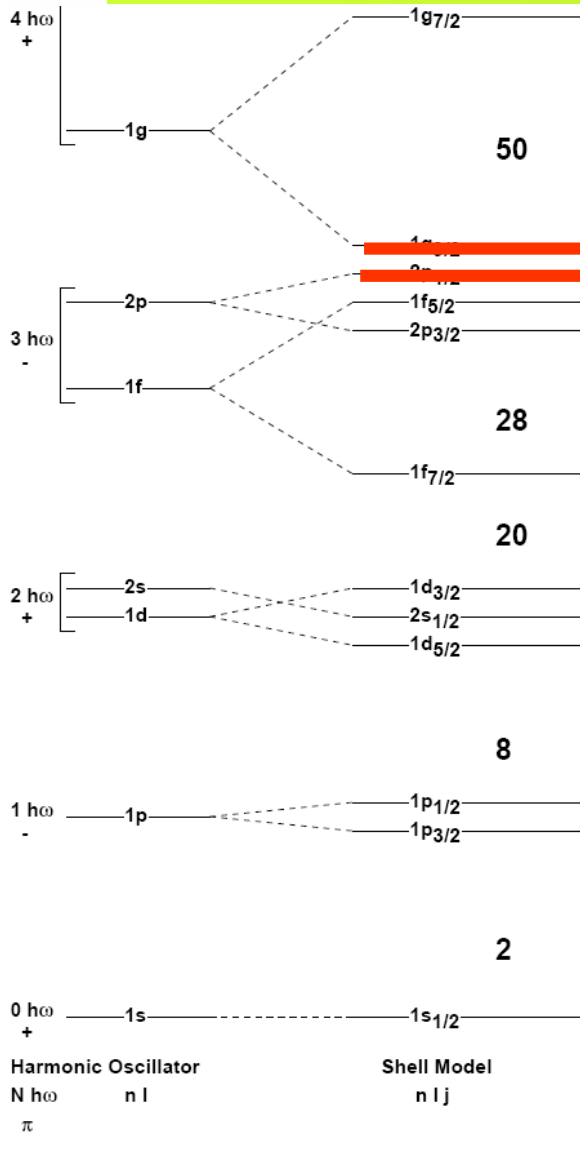
These isomers are evidence for the shell structure of nuclei.



# Tvorba izomérov v blízkosti uzavretých vrstiev

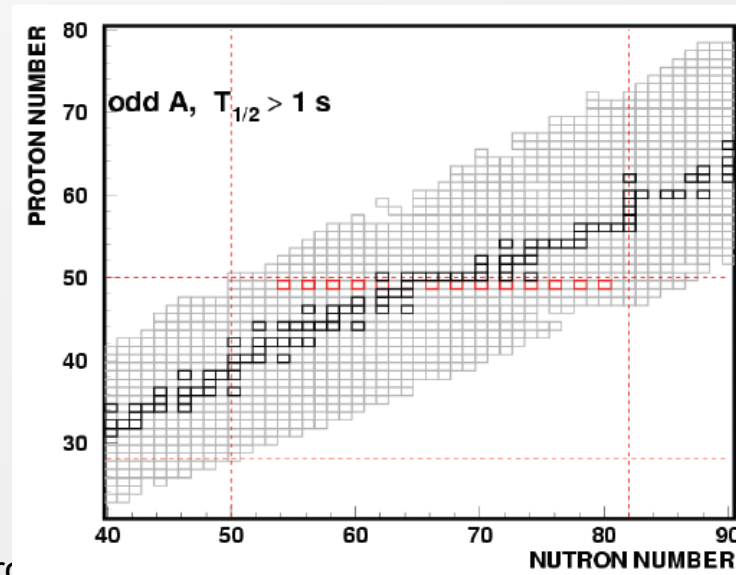


# Izoméry india ( $Z = 49$ )

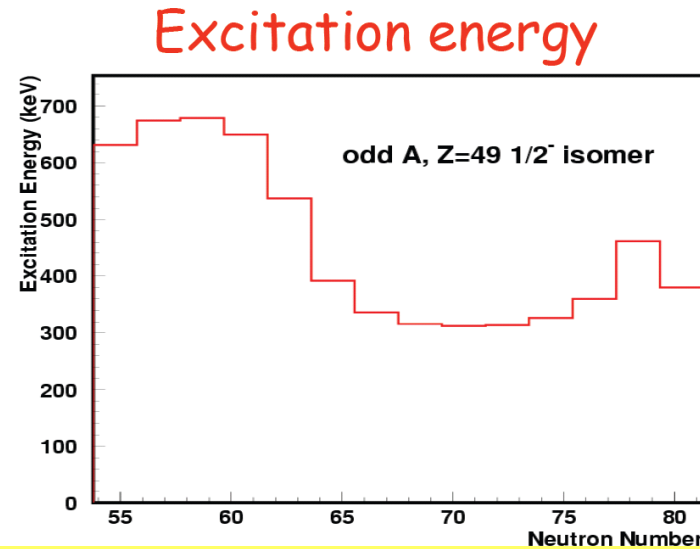
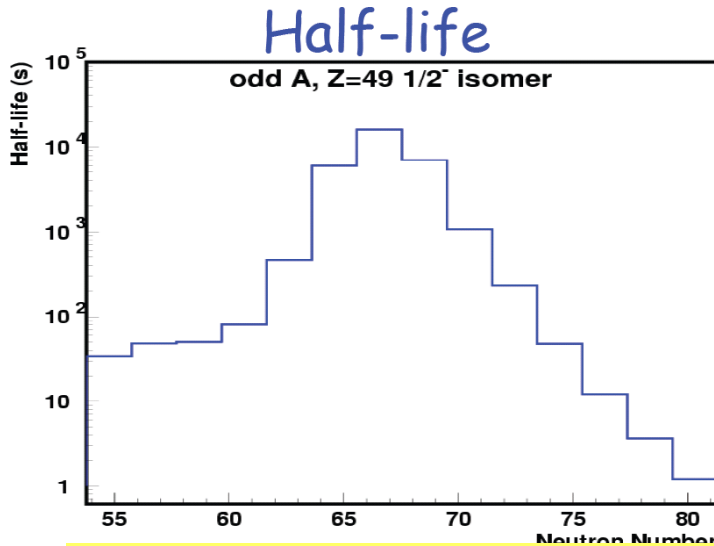


$1g_{9/2}$   
 $2p_{1/2}$

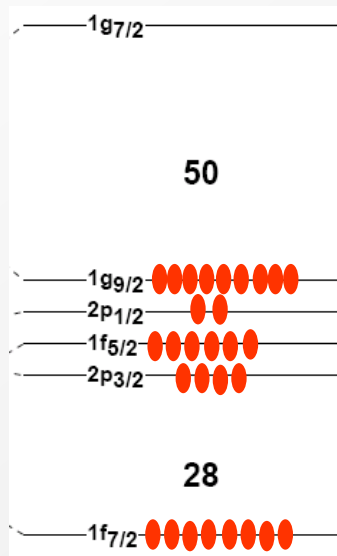
Prakticky všetky izotopy India s nepárnou hmotnosťou tvoria dlhožijúce izoméricé stavy. Prečo?



# Systematiky 1/2- izomerov v In



Veľmi dlho žijúce (od minút po hodiny) vysoko ležiace (300 – 700 keV)



základný stav: jeden nespárovaný protón  
v  $1g_{9/2}$  orbitale  $\Rightarrow$  spin  $9/2$

Excitovaný stav: protón z  $2p_{1/2}$  orbitalu sa presunie  
do  $1g_{9/2}$  orbitalu, na  $2p_{1/2}$  ostáva nespárovaný  
protón  $\Rightarrow$  spin  $1/2$

$|9/2 - 1/2| = 4 \Rightarrow$  povolené prechody M4 a E5

Rovnaká situácia nastala v izotopoch Tália

# Protón-neutrón viazanost'



$$^{134}\text{Sb} = ^{132}\text{Sn} \times (\pi g_{7/2} \times \nu f_{7/2}) \quad 7-$$

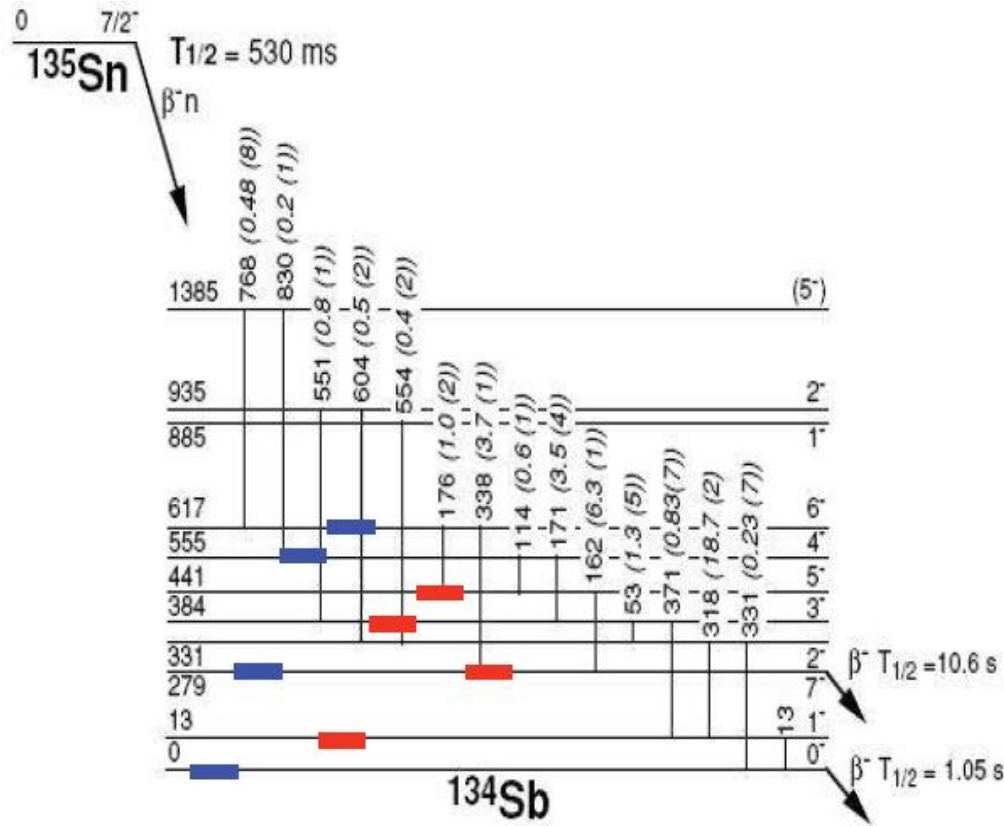


FIG. 9. The levels of  $^{134}\text{Sb}$  populated in the  $\beta^-n$  decay of 530-ms  $^{135}\text{Sn}$ .

J. Shergur et al. *C* 71(2005) 064321

# B(Eλ) a B(Mλ) hodnoty



Často sa stáva, že rýchlosť gamma prechody nie je v súlade s odhadom podľa vzťahov.

$$\lambda_{electric} = 10^{21} \frac{4.4(l+1)}{l[(2l+1)!!]^2} \left(\frac{3}{l+3}\right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{197}\right)^{2l+1} R^{2l} \text{ sec}^{-1}$$

$$\lambda_{magnetic} = 10^{21} \frac{1.9(l+1)}{l[(2l+1)!!]^2} \left(\frac{3}{l+3}\right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{197}\right)^{2l+1} R^{2l-2} \text{ sec}^{-1}$$

Vtedy sa zavádza člen B(Eλ) a B(Mλ) (kde λ je multipolarita prechodu), ktorý indikuje koľkonásobne je prechod rýchlejší alebo pomalší

Definícia pre magnetický prechod je ekvivalentná. Takže keď je B(Eλ) > 1, prechod je rýchlejší ako sa očakáva.

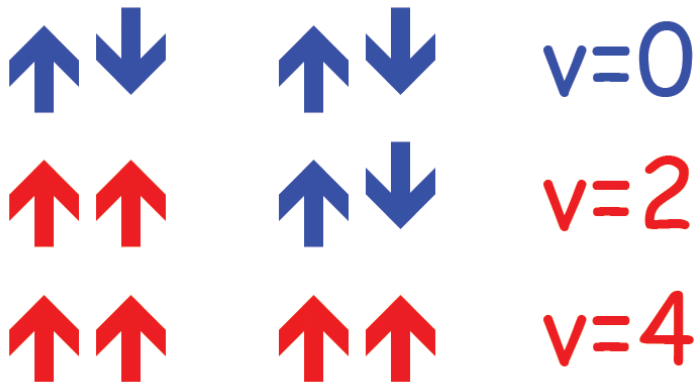


# Seniority izoméry

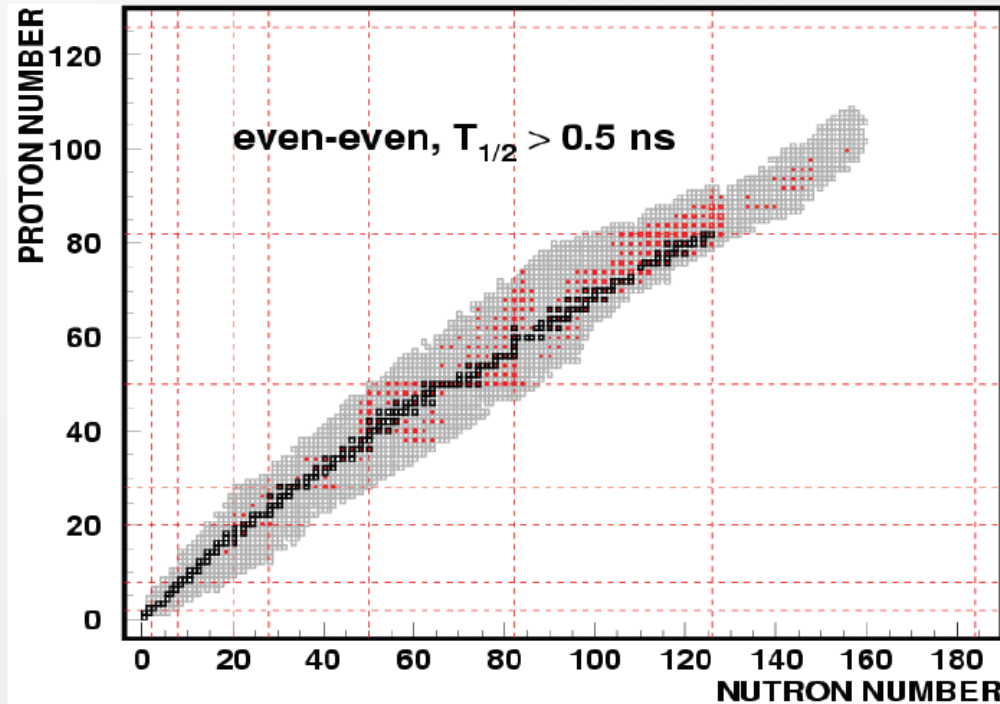


Špecifický prípad keď nastáva previazanosť (coupling) v rámci orbitalu. Zavádzame kvantové číslo seniorita ( $\nu$ ) udávajúce počet nespárovaných nukleónov v orbitale. Počet nukleónov v orbitale je  $n$ . Potom platí:

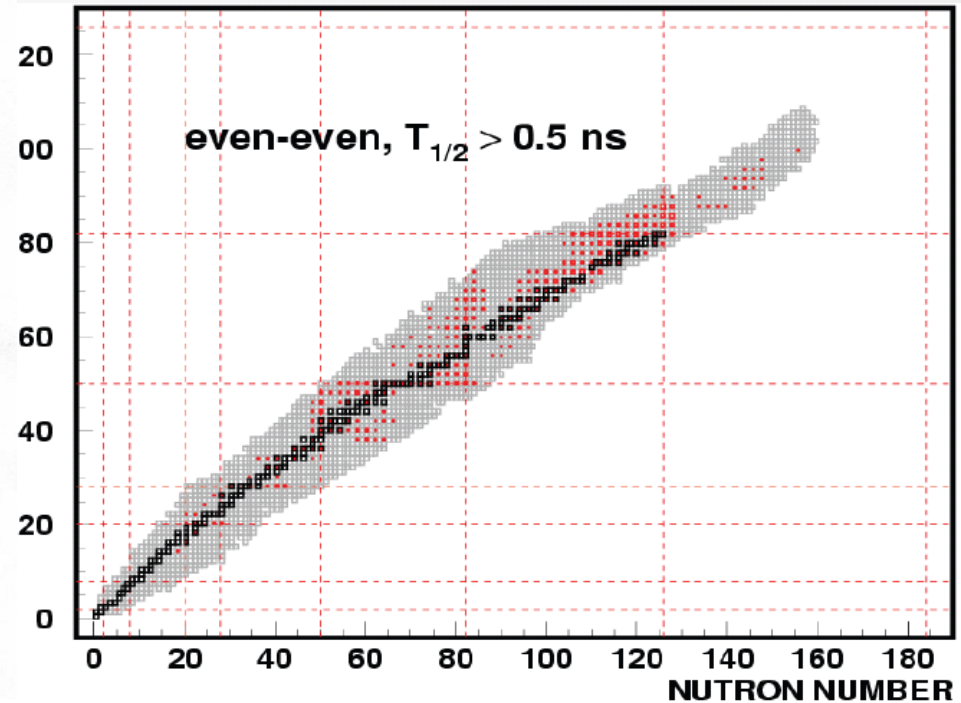
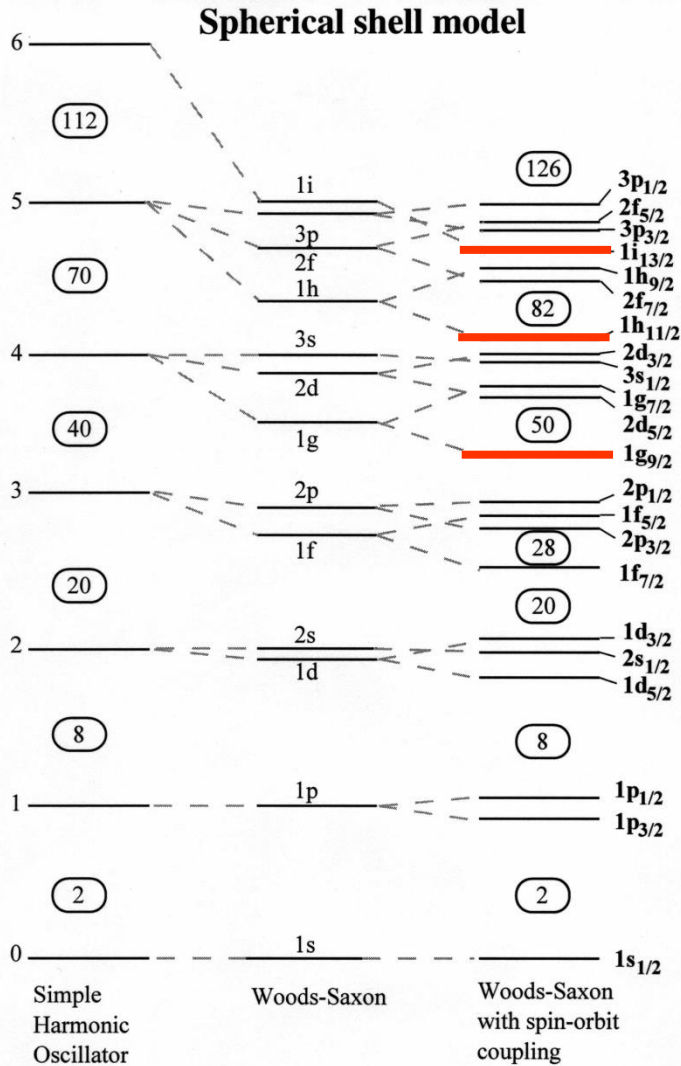
$$B(E2, J \rightarrow J - 2) \approx \left( \frac{\Omega - n}{\Omega - \nu} \right)^2$$



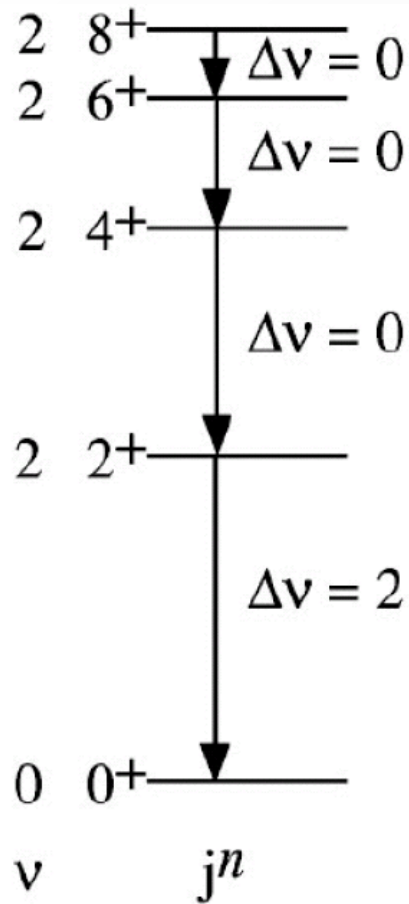
Napr. pre  $N = 50$   
 $40 < Z < 50$   
 $(g_{9/2})^{1...9}$



# Seniority izoméry

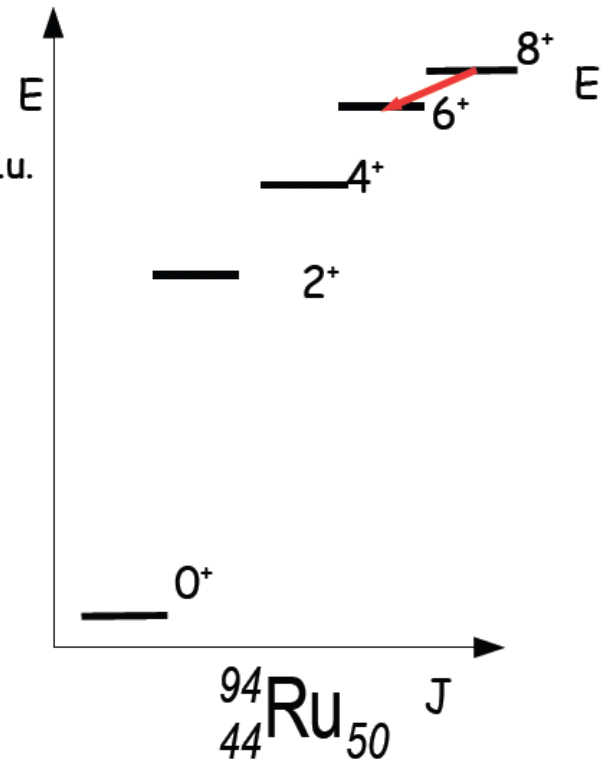


# Príklad $^{94}\text{Ru}$



$T_{1/2} = 71 \mu\text{s}$   
 $(T_{1/2}^W = 330 \text{ ns})$   
 $B(E2) \sim 3 \times 10^{-3} \text{ W.u.}$

$(\nu g_{9/2})^4$



p.153  
w''

# Izoméry v deformovanom jadre



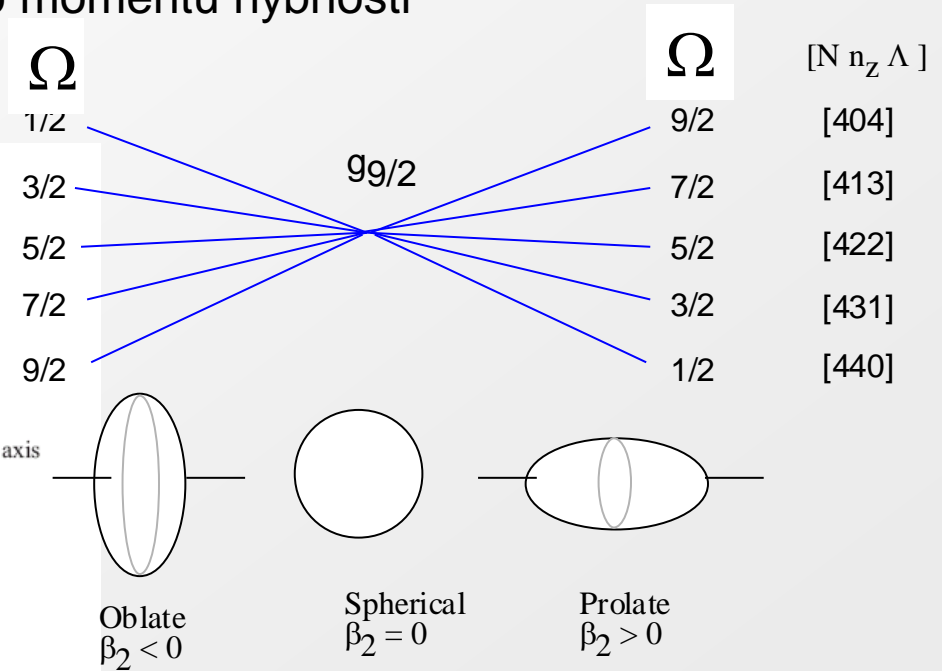
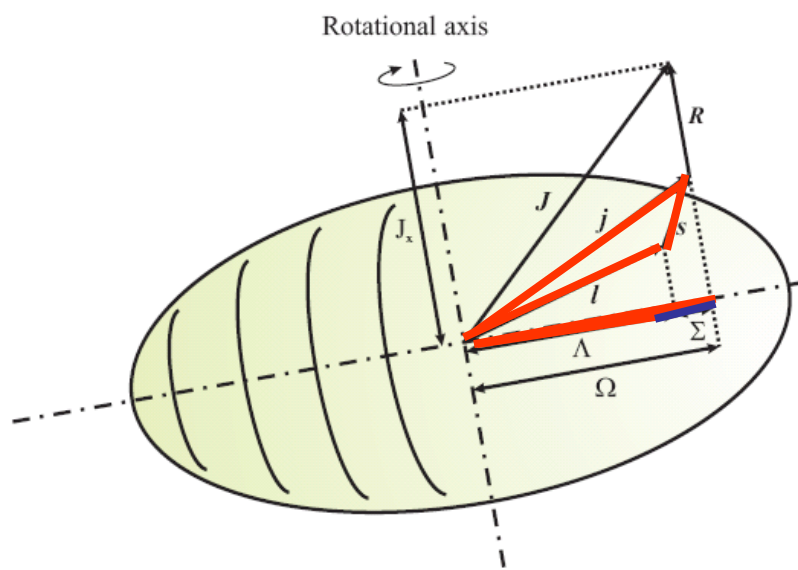
Nilssonov model opisujúci jednočasticový pohyb v deformovanom potenciáli. Zavádzajú sa nové tzv. asymptotické kvantové čísla.

$j$  - moment hybnosti častice (orbitálny moment hybnosti plus spin)

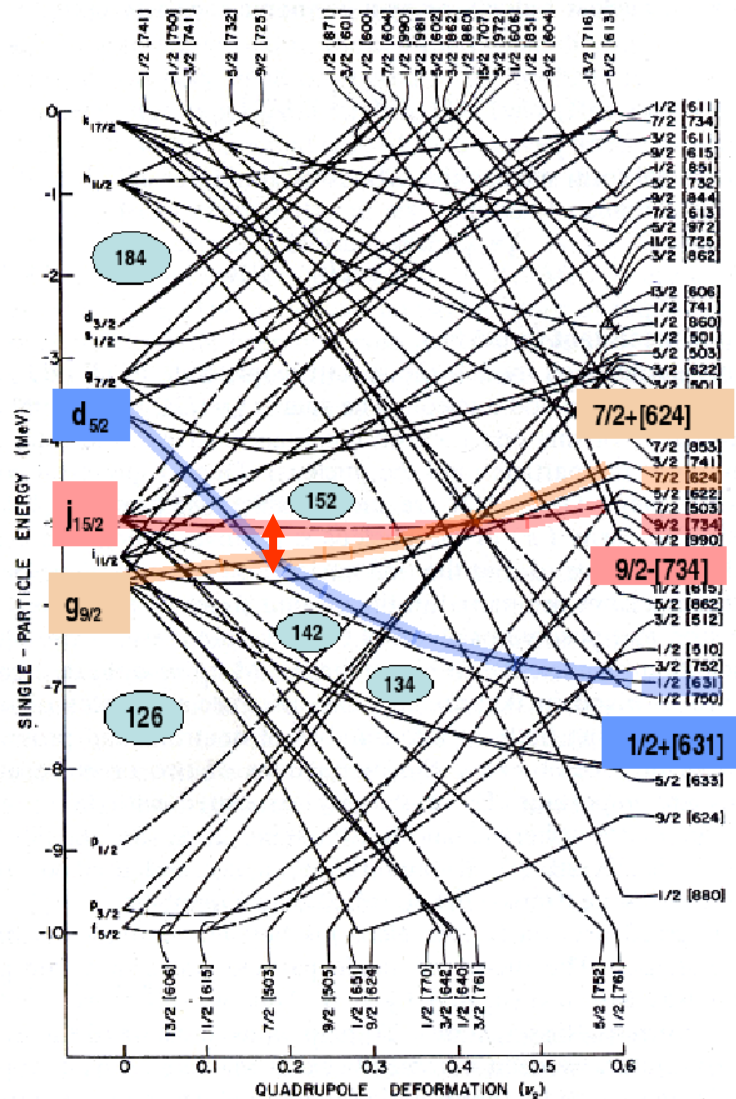
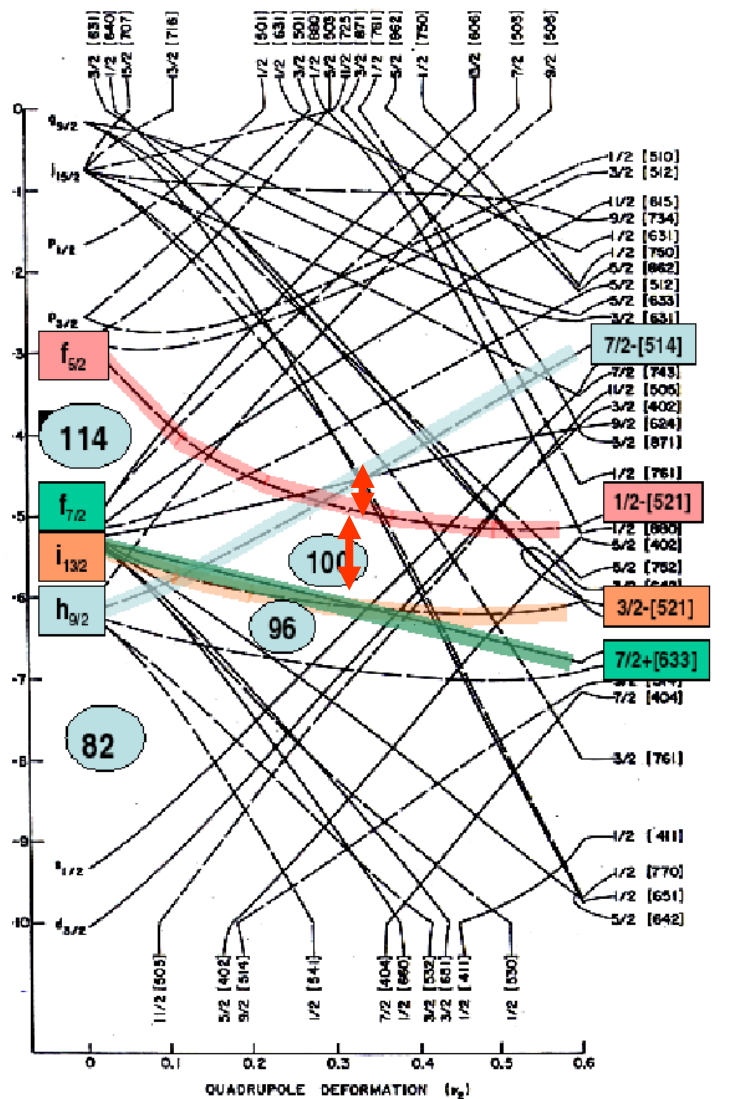
$\Omega$  - projekcia momentu hybnosti do osi symetrie ( $j_z$ )

$\Sigma, \Lambda$  – projekcie orbitalneho a spinoveho momentu hybnosti

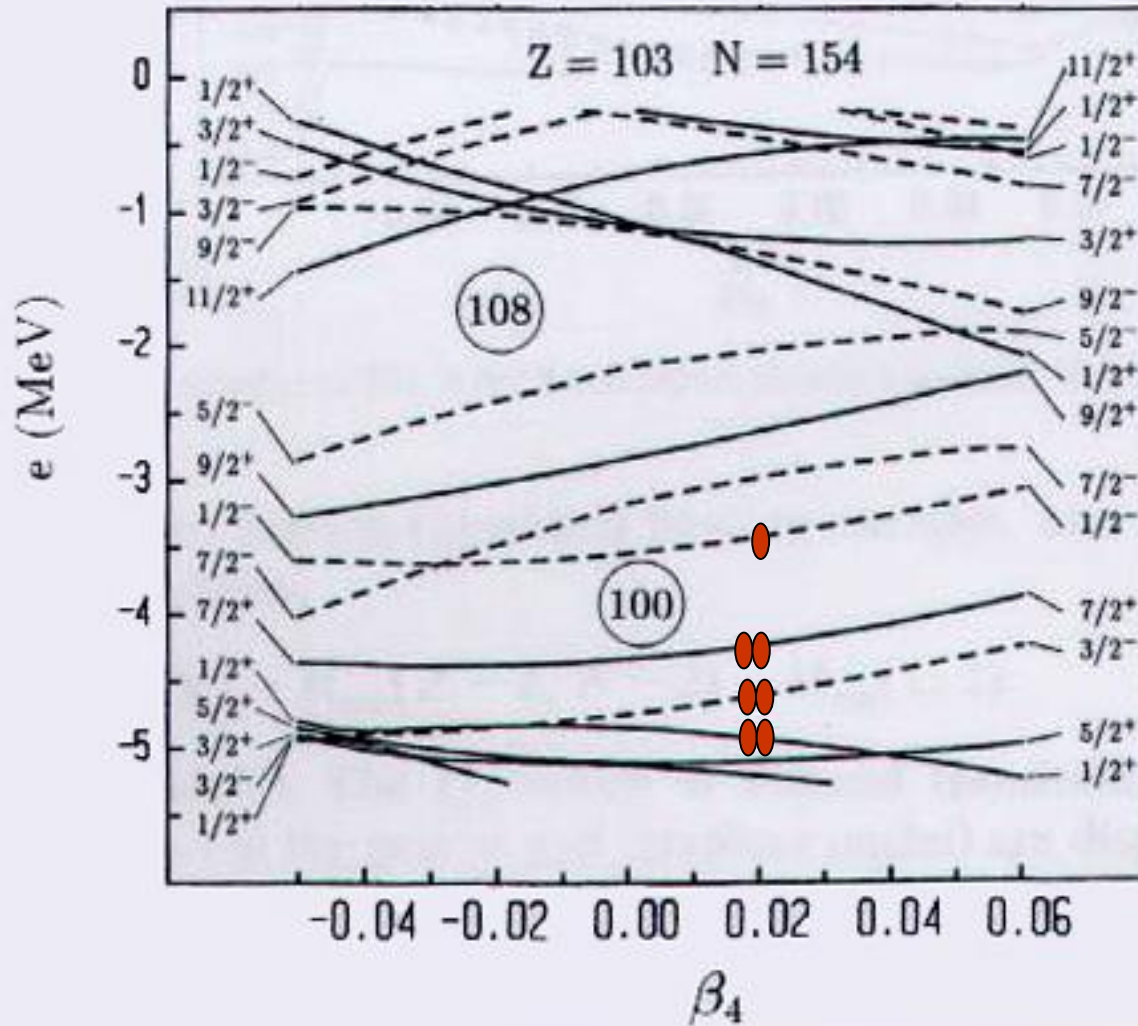
$n_z$  – kvantové číslo oscilátora



# Jednočasticové izoméry



# Jednočasticový izomér

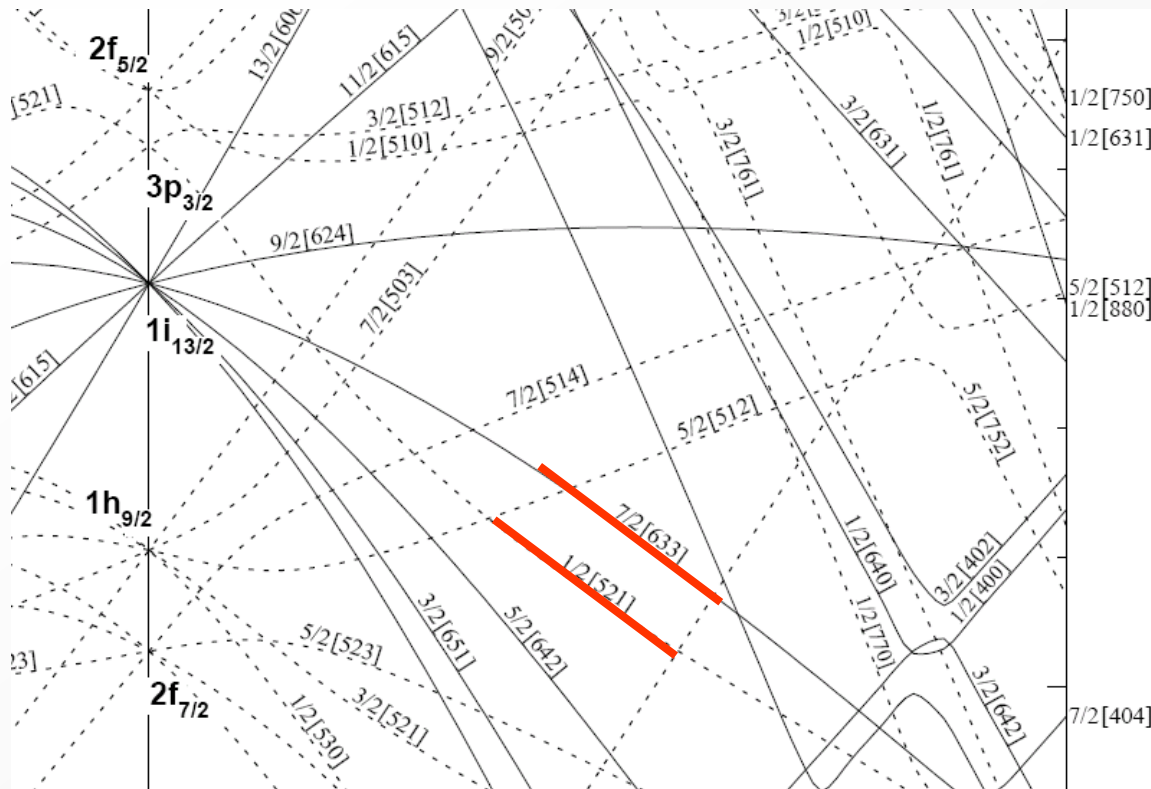


$J^\pi = 7/2^-$   
 $J^\pi = 1/2^-$

↓ M3 prechod  
 Pre 100 keV rozdiel  
 energie cca sekundy

Možnosť identifikovať  
 jednočasticové hladiny,  
 ich energiu aj charakter

# Izoméry s nepárnym A v oblasti $Z = 66 - 80$



Pre  $N = 99$ :

$^{171}\text{Hf}$ ,

$^{169}\text{Yb}$  (46s),

$^{167}\text{Er}$  (2.3 s),

$^{165}\text{Dy}$  (1.3 min)

$1/2^- \rightarrow 7/2^+$

$L = |\Omega_1 - \Omega_2| = 3 \Rightarrow E3$

# Výberové pravidlo pre $\Delta\Lambda$



Izomér v  $^{181}\text{Ta}$

$T_{1/2} = 10.8 \text{ ns}$

482 keV  $7/2^+[404]$

$5/2^+[402]$

$$\Omega = \Lambda + \Sigma$$

$5/2^+[402] \quad \Sigma = 1/2$

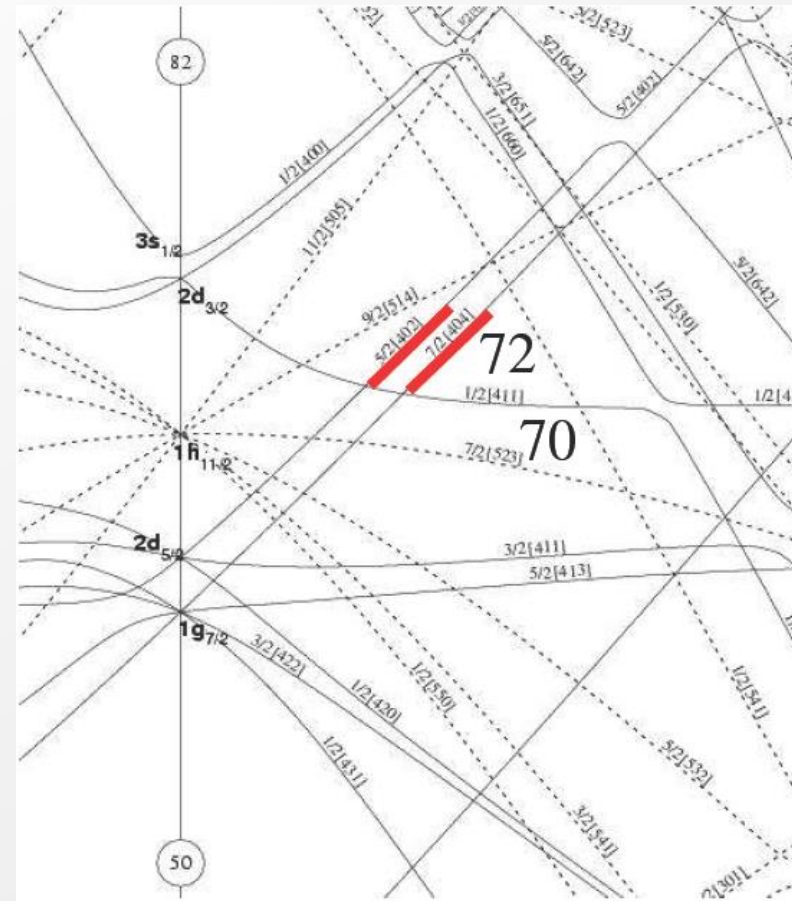
$7/2^+[404] \quad \Sigma = -1/2$

$\Delta\Sigma = -1 \quad \Delta\Lambda = 2$

M1 transition is forbidden  
because of the  $\Delta\Lambda = 1, 0$   
selection rule for M1 transition

see also  $^{175\text{m}}\text{Lu}$

P.Olbratowski et al. Acta. Phys. Pol. 32(2001) 865  
29. 5. 2019





# Výberové pravidlo pre $\Delta\Lambda$



Izomér v  $^{181}\text{Ta}$

$T_{1/2} = 10.8 \text{ ns}$

482 keV  $7/2^+[404]$

$5/2^+[402]$

$$\Omega = \Lambda + \Sigma$$

$5/2^+[402] \quad \Sigma = 1/2$

$7/2^+[404] \quad \Sigma = -1/2$

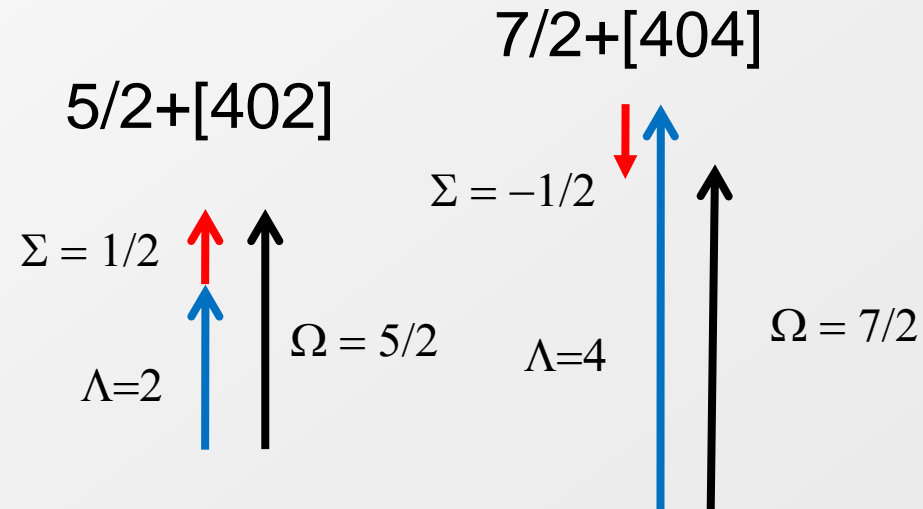
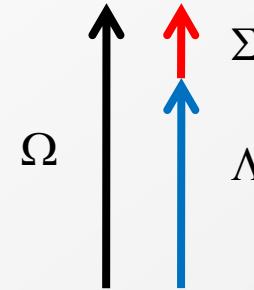
$\Delta\Sigma = -1 \quad \Delta\Lambda = 2$

M1 transition is forbidden  
because of the  $\Delta\Lambda = 1, 0$   
selection rule for M1 transition  
see also  $^{175\text{m}}\text{Lu}$

P. Olbratowski et al. Acta. Phys. Pol. 32(2001) 865

29. 5. 2019

Jadrová izoméria

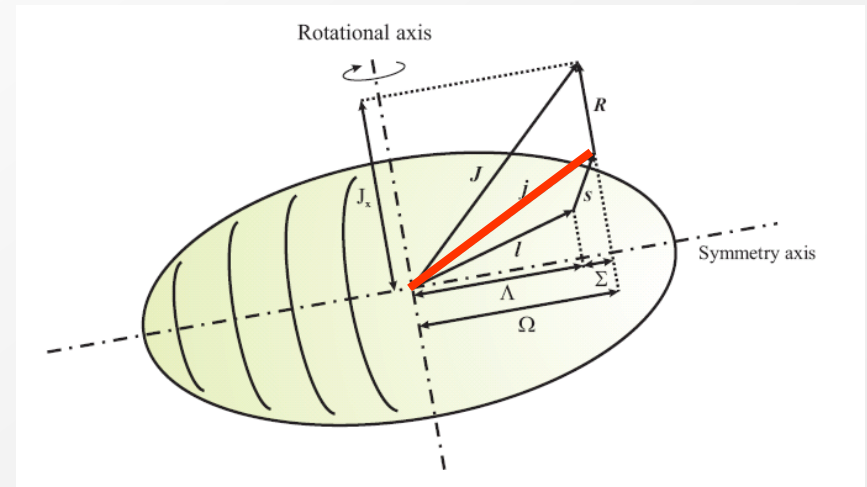


25/10

# K izoméry



- Izoméry kde dochádza k veľkej zmene kvantového čísla  $K$ . Čo to to  $K$  vlastne je?
- $K$  – je priemet momentu hybnosti  $j$  do osi symetrie.

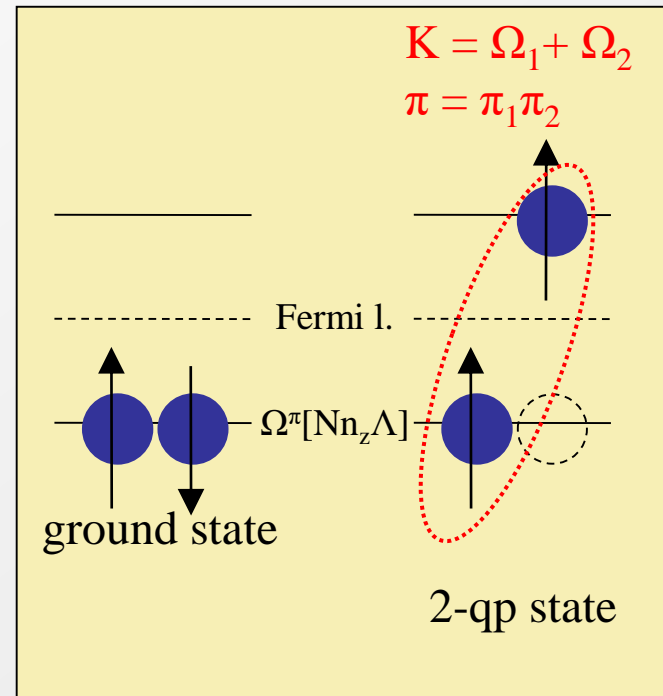
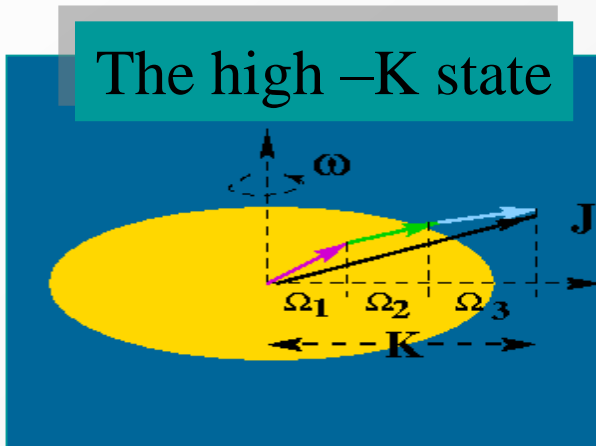


# K izoméry

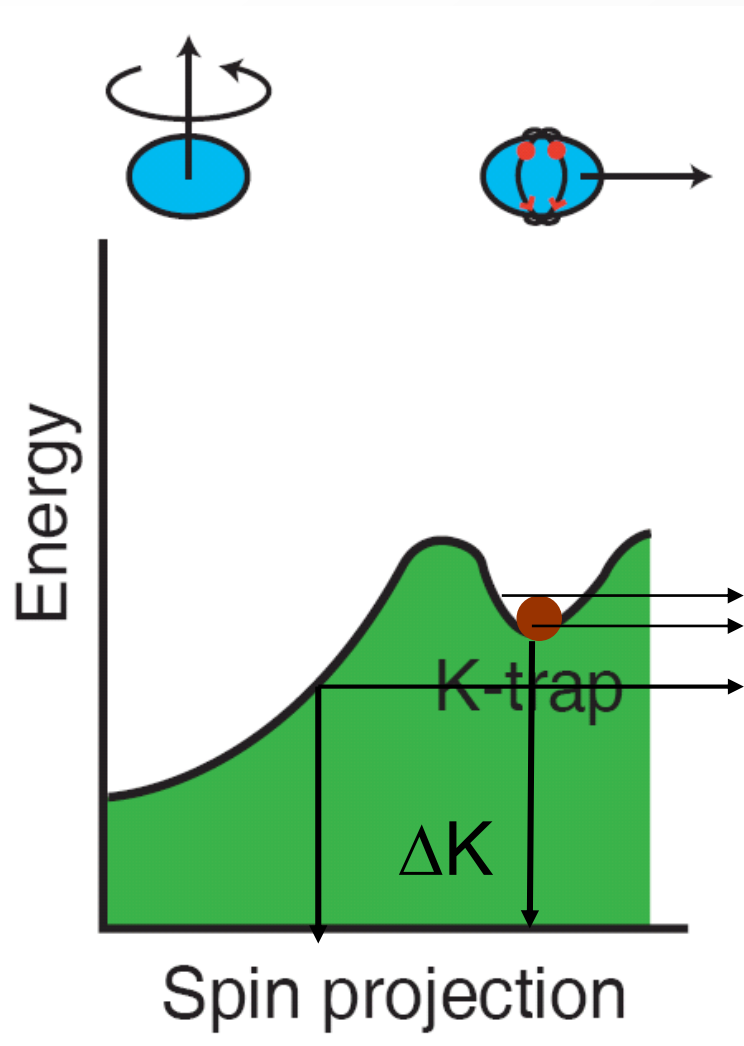


Pre jednočasticový prípad je priemet momentu hybnosti (spinu)  $j$  do osi symetrie  $\Omega$

Pri viacerých časticiach je priemet celkového momentu hybnosti súčtom všetkých  $\Omega_i$



# K pasca



Malá zmena  $K$  vedie iba energeticky vyššie stavy

$$E_i - E_f < 0$$

$$E_i - E_f > 0$$

Prechod na energeticky výhodný stav si vyžaduje veľkú zmenu  $K$

# K-hindrance in $^{178}\text{Hf}$



- Violated selection rule:

$$- \lambda \geq \Delta K$$

- Hindrance factor:

$$- HF = \frac{T_{1/2}^{\text{exp.}}}{T_{1/2}^{\text{W}}}$$

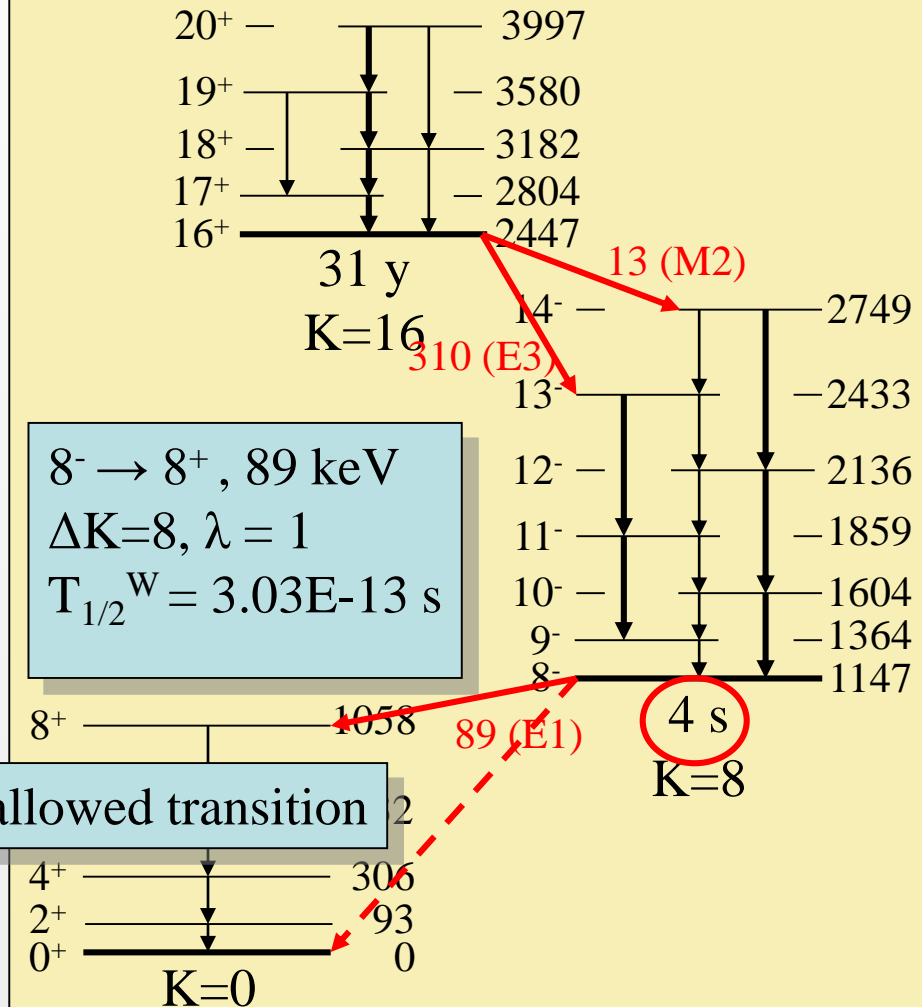
- Degree of hindrance:

$$- \nu = \Delta K - \lambda$$

- Loebner system

$$- HF > 100^\nu$$

Hyp. Interact. **135** (2001) 83



# 254No



				104	Rf		Rf 253	Rf 254	Rf 255	Rf 256	Rf 257	
				103	Lr		Lr 252	Lr 253	Lr 254	Lr 255	Lr 256	
			102	No		No 250	No 251	No 252	No 253	No 254	No 255	
101	Md	Md 245	Md 246	Md 247	Md 248	Md 249	Md 250	Md 251	Md 252	Md 253	Md 254	
100	Fm	Fm 243	Fm 244	Fm 245	Fm 246	Fm 247	Fm 248	Fm 249	Fm 250	Fm 251	Fm 252	Fm 253
99	Es	Es 242	Es 243	Es 244	Es 245	Es 246	Es 247	Es 248	Es 249	Es 250	Es 251	Es 252
98	Cf	Cf 241	Cf 242	Cf 243	Cf 244	Cf 245	Cf 246	Cf 247	Cf 248	Cf 249	Cf 250	Cf 251
		143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153

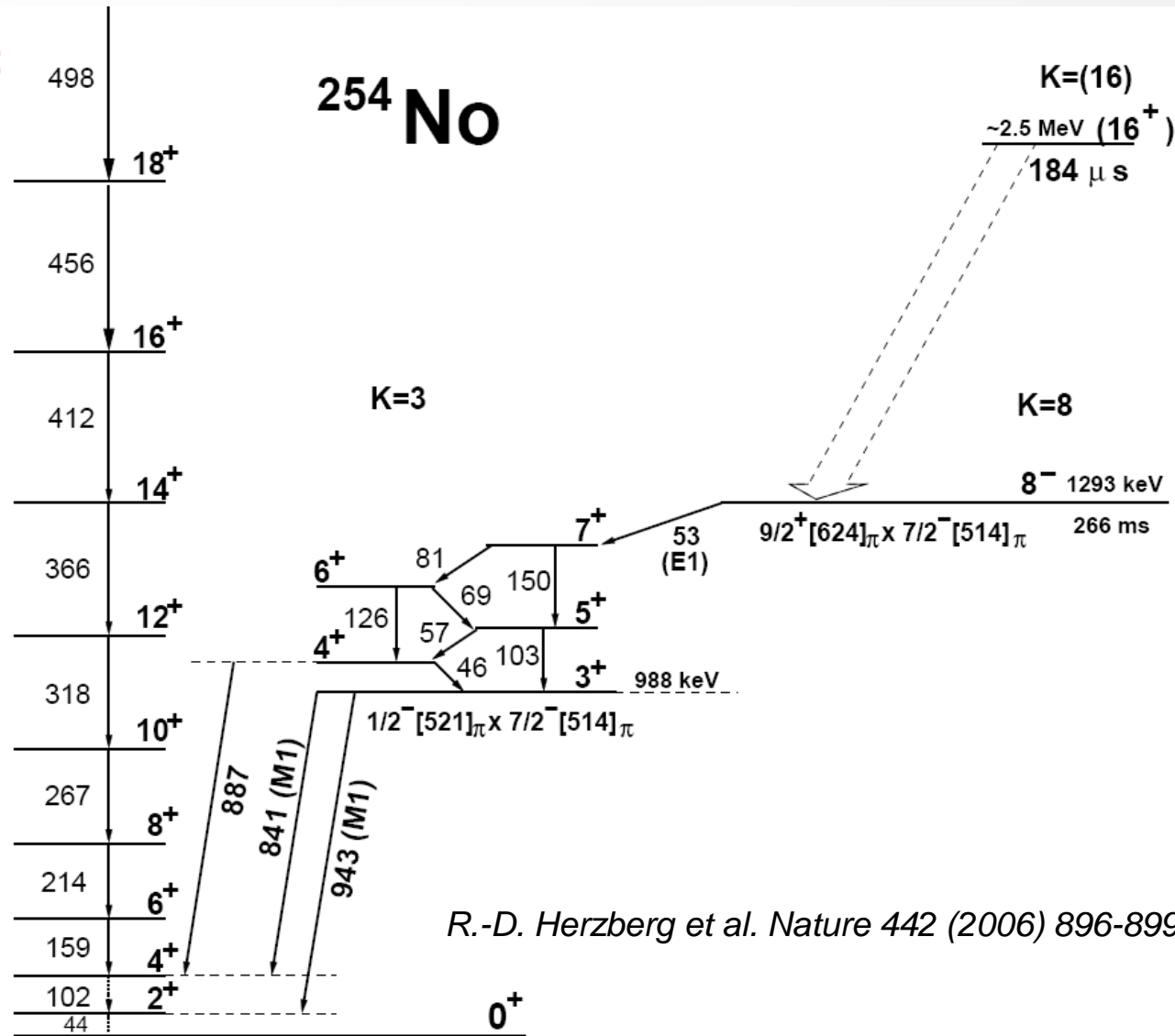
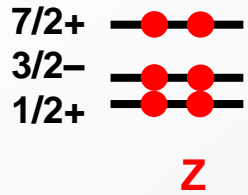
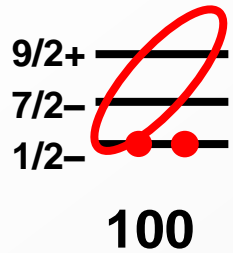
# $^{254}\text{No}$ – K-isomers



Calculated configuration:

$K_{\pi}=8^{-}$   $E_{\text{exc}} = 1.44 \text{ MeV}$

$$\pi 7/2^{-} [514] \otimes \pi 9/2^{+} [624]$$



R.-D. Herzberg et al. Nature 442 (2006) 896-899

V. G. Soloviev  
J. Nucl. Phys. 54 (1991) 1232-1238

# K-hindrance

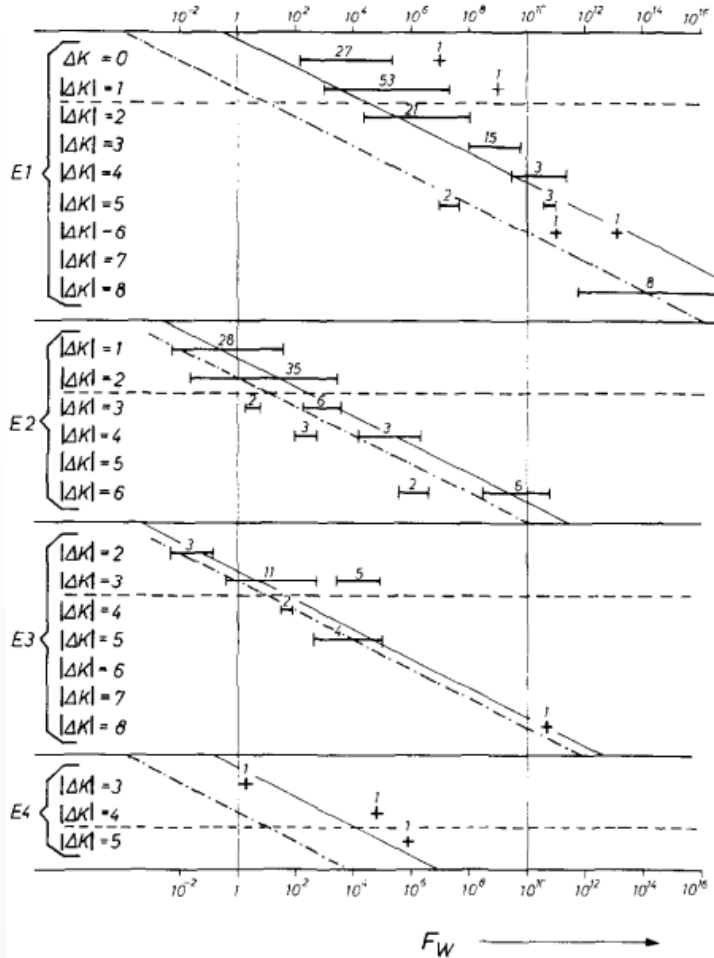


Fig. 1. Range of hindrance factors relative to the Weisskopf estimate  $F_W$  of electric  $\gamma$ -ray transitions for different  $|\Delta K|$  values (for explanation see text).

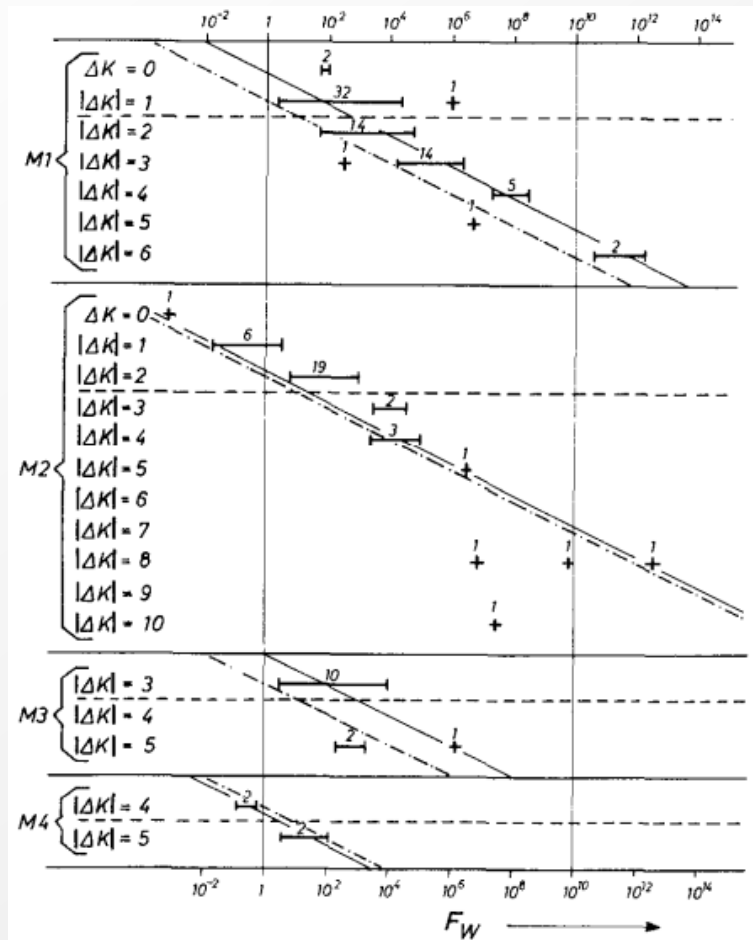


Fig. 2. Range of hindrance factors relative to the Weisskopf estimate  $F_W$  of magnetic  $\gamma$ -ray transitions for different  $|\Delta K|$  values.

$$F_W = \frac{T_{1/2}^{\text{exp.}}}{T_{1/2}^W}$$

K.E.G. Lobner, *Physics Letters* 26B, 369 (1968)



# Príklad: $^{178}\text{Hf}$



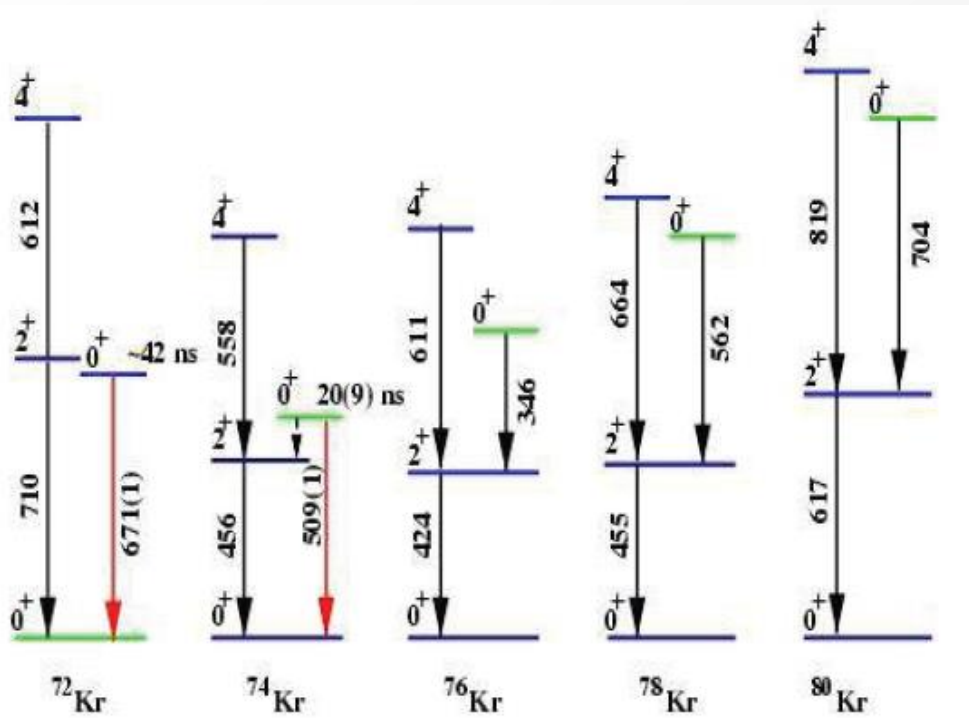
- Odhadnite dobu života hladiny, ktorá sa deexcituje 310 keV E3 prechodom v  $^{178}\text{Hf}$  medzi 4-qp stavom  $16+$  a  $14-$  (rotačný stav na 2qp stave  $8+$ )

# Tvarové izoméry



Pre páрно-párne jadrá máme možné „intruder“ stavy s rôznou deformáciou.

Deexcitujú sa prechodmi  $0^+ \rightarrow 0^+$  pri ktorých je emisia  $\gamma$  kvanta zakázaná.



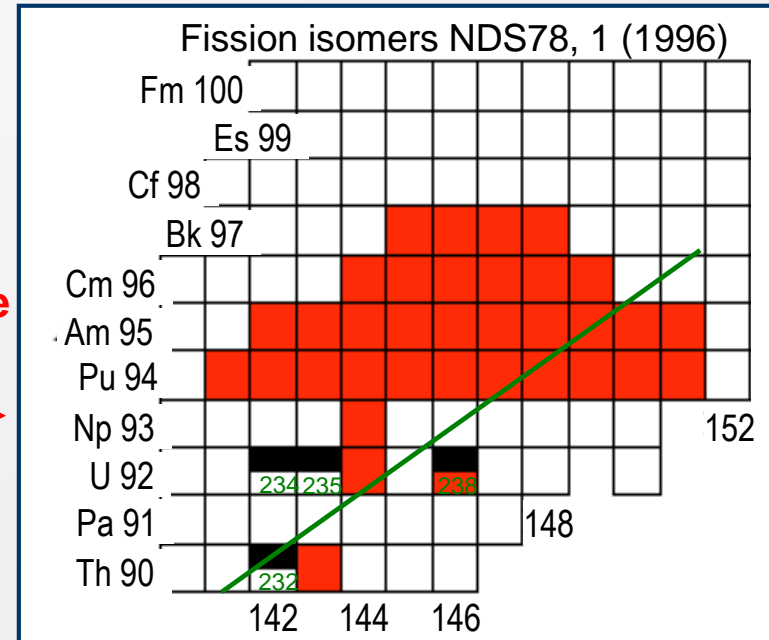
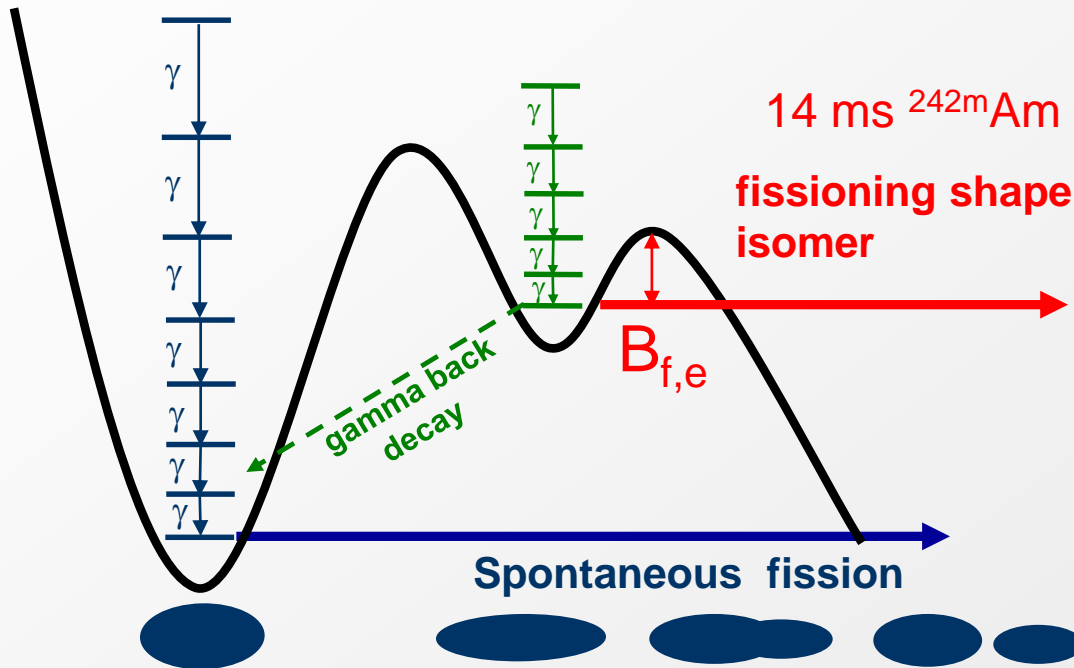
Možná deexcitácia procesmi:

- Vnútrotná konverzia
- Emisia  $e^+e^-$  párov ( $E^* > 1022$  keV)
- Dvojfotónová emisia

# Fissioning Shape Isomers ( $T_{1/2,f} \sim \text{ns-ms}$ )



- Discovery: 1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)
- **Populate states in the second well (typical  $E^* = 2-3 \text{ MeV}$ )**
- Lower and thinner  $B_{\text{fis,external}} \Rightarrow$  shorter  $T_{1/2}$
- e.g.  $^{242\text{g}}\text{Am}$   $T_{1/2} = 141 \text{ y}$ , but  $^{242\text{m}}\text{Am}$   $T_{1/2} = 14 \text{ ms}$ !



# Zhrnutie – typy izomérov



- **Spinové izoméry**  
rozhoduje zmena spinu... Rôzne typy izomérov vo sférických aj deformovaných jadrách
- **K-izoméry**  
rozhoduje zmena projekcie spinu  
Deformované jadrá
- **Tvarové izoméry**  
stavy s rôznou deformáciou v párnopárných jadrách  
stavy so sekundárnym minimom štiepnej bariéry

# Info ktoré môžeme získať z izomérov



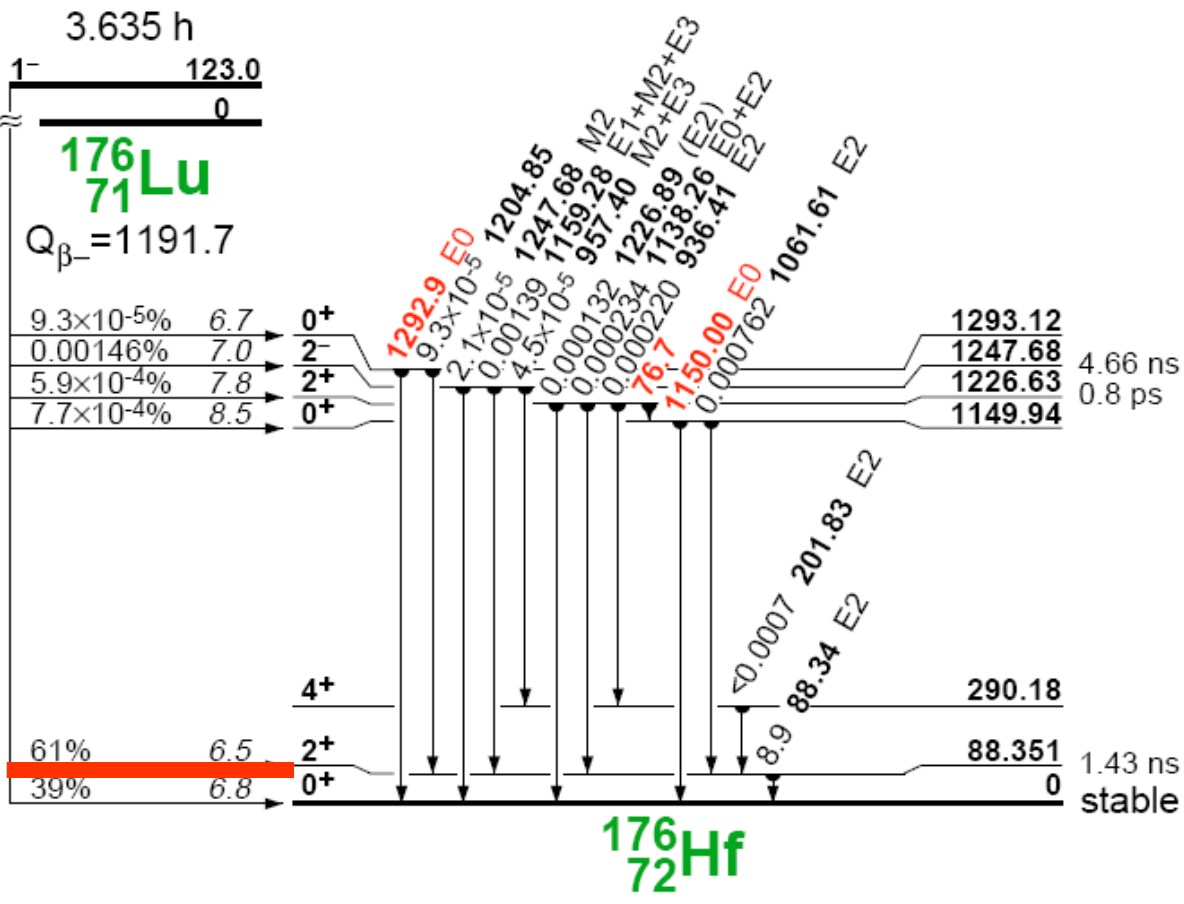
- Informácie o jednočasticových hladinách
- Informácie o párovaní nukleónov
- Možnosť študovať excitované stavy, ktoré by inak neboli experimentálne sledované
  
- Izomérické terče a zväzky – možnosť štúdia spinu na jadrové reakcie

# Rozpad izoméru



- V prípade vysoko nepravdepodobnej de-excitácie izoméru prichádza do úvahy priamo rádioaktívna premena izoméru.
- Identifikácia – iné rozpadové charakteristiky (polčas, energia prip. Typ premeny)

# 176Lu



$\text{Log } f \approx 2$

$T_{1/2\text{part}} = 5.95 \text{ h}$

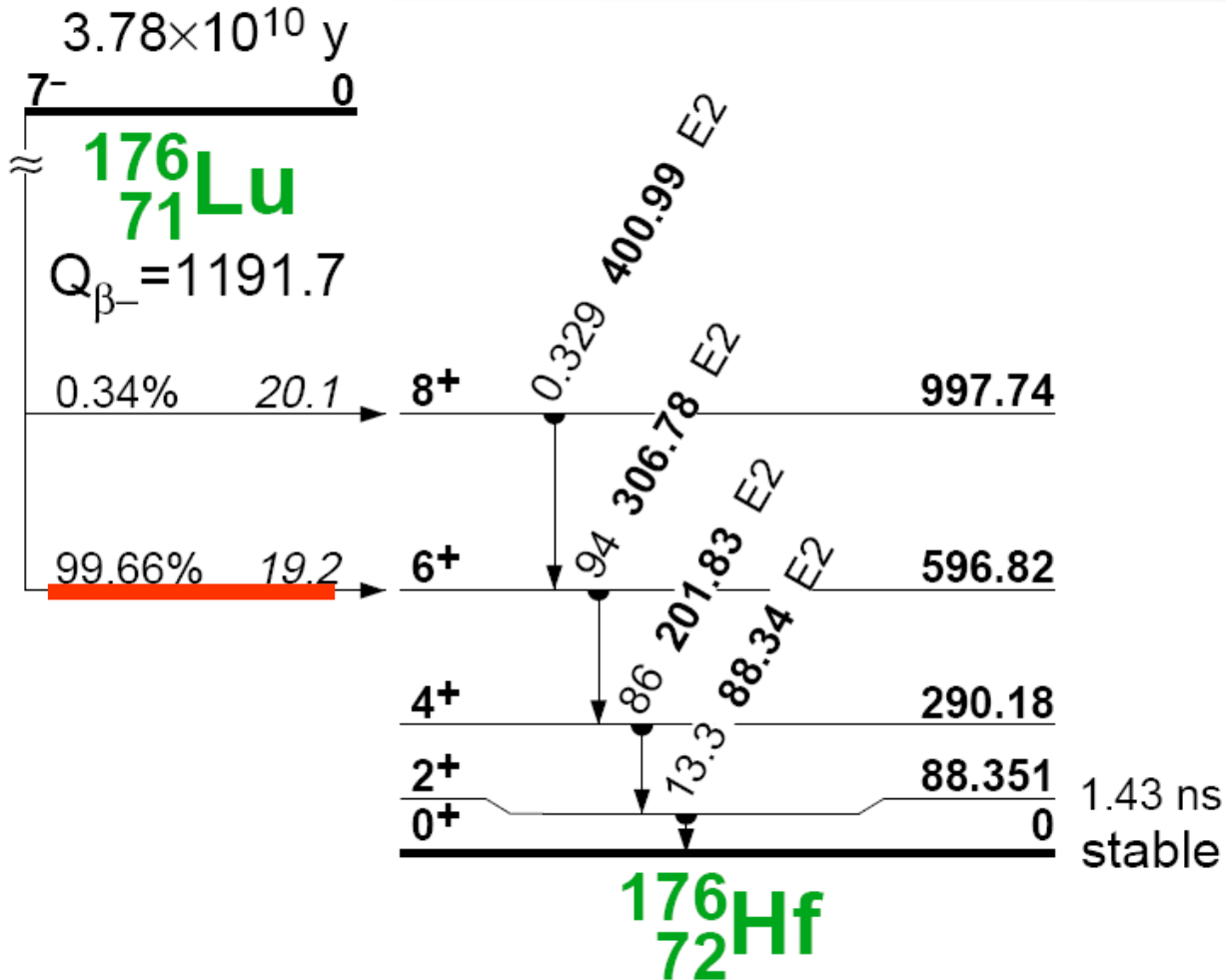
$\text{Log } t \approx 4.33$

$\text{Log } ft \approx 6.33$

Prvý zakázaný

Zmena spinu o 0,1,2  
a zmena parity

# $^{176}\text{Lu}$



$\text{Log } f \approx 2$

$T_{1/2\text{part}} = 3,78 \times 10^{10} \text{ r}$

$\text{Log } t \approx 18$

$\text{Log } ft \approx 20$

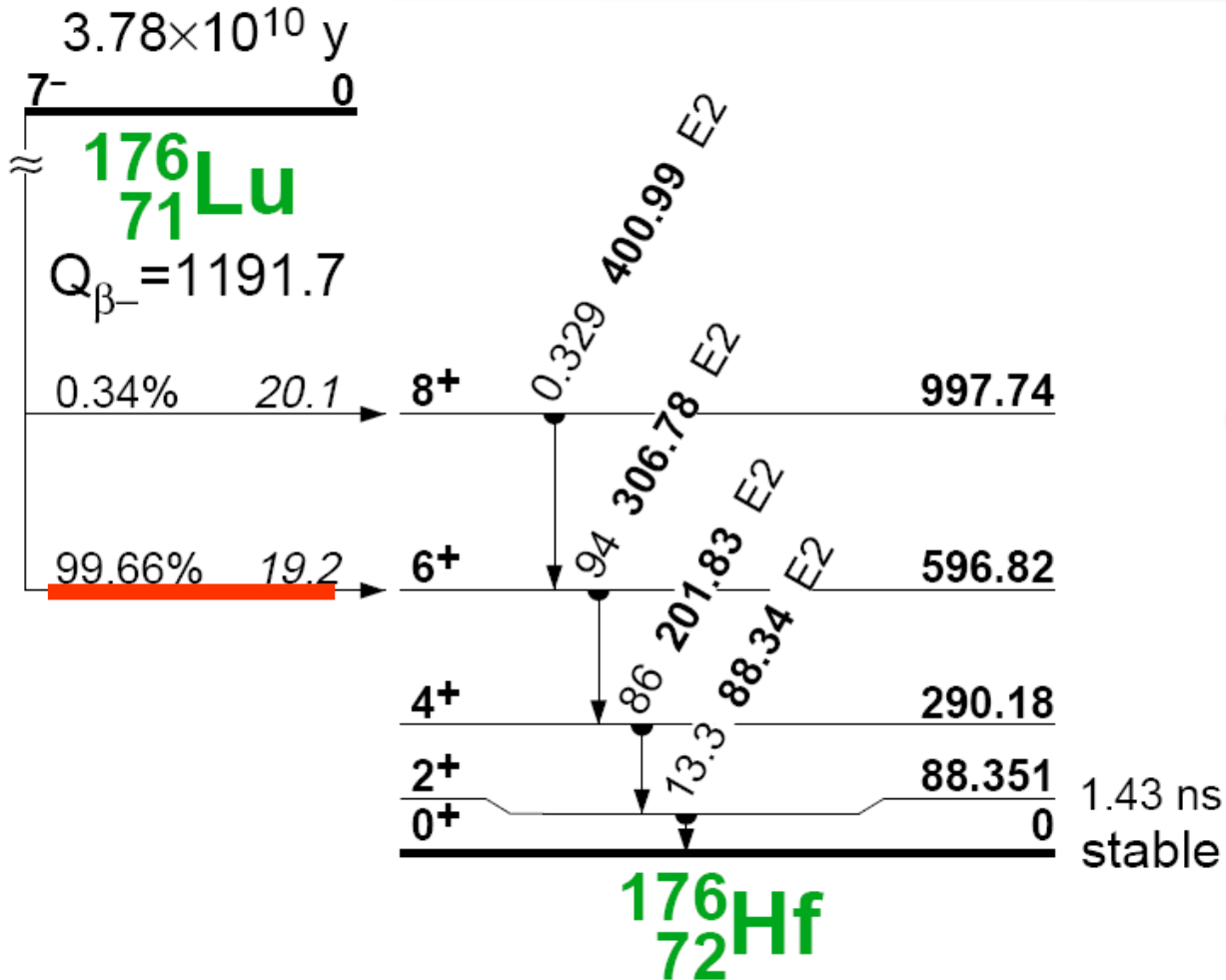
Tretí, alebo štvrtý  
zakázaný

Zmena spinu o 3-5 a  
možná zmena parity.

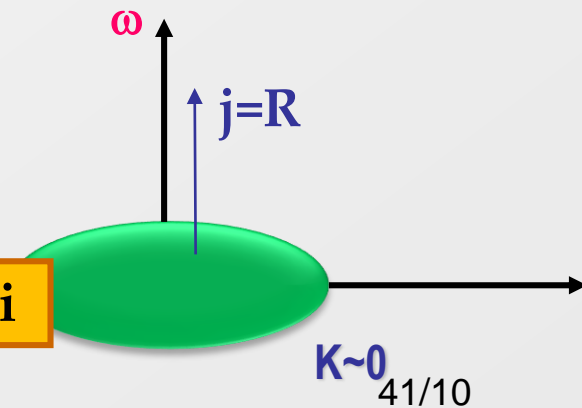
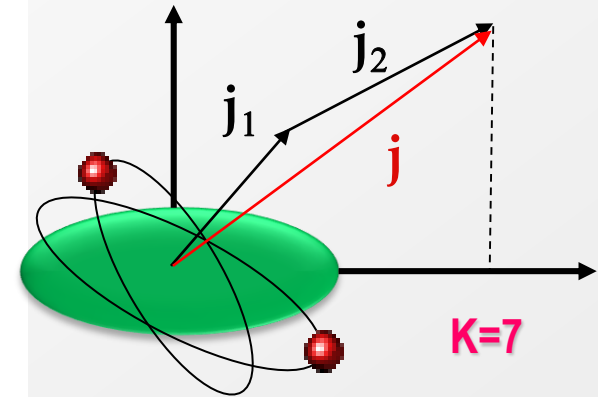
**Rozpor z realitou!**



# $^{176}\text{Lu}$



Prvý zakázaný  
 $5 < \log ft < 10$



Veľká zmena v orientácii uhlového momentu hybnosti