

Jadrová spektroskopie

Jadrová izoméria



Izomér - definícia



Dlhožijúca metastabilná vzbudená hladina atómového jadra...

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

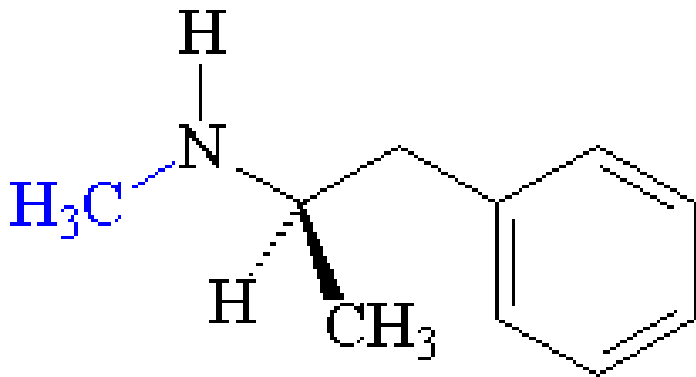
Iná definícia slovíčka „dlhožijúca hladina“

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

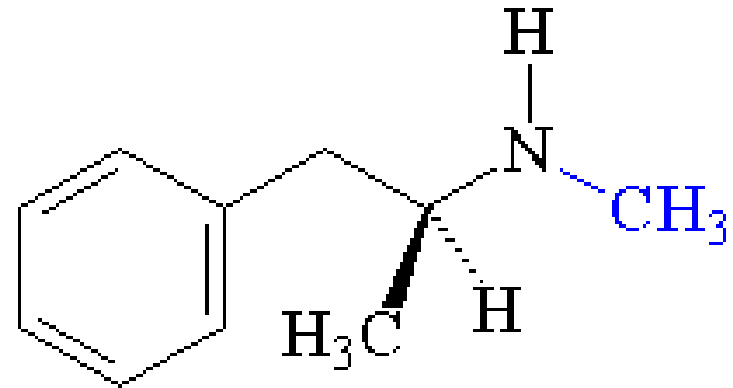
J. Cerny, J. Hardy Annu. Rev. Nucl. Sci. 27 (1977) 333

Väčšinou rádovo viac ako nanosekundy.

Molekulová izoméria



L-metamphetamin
bez psycho-aktívnych účinkov



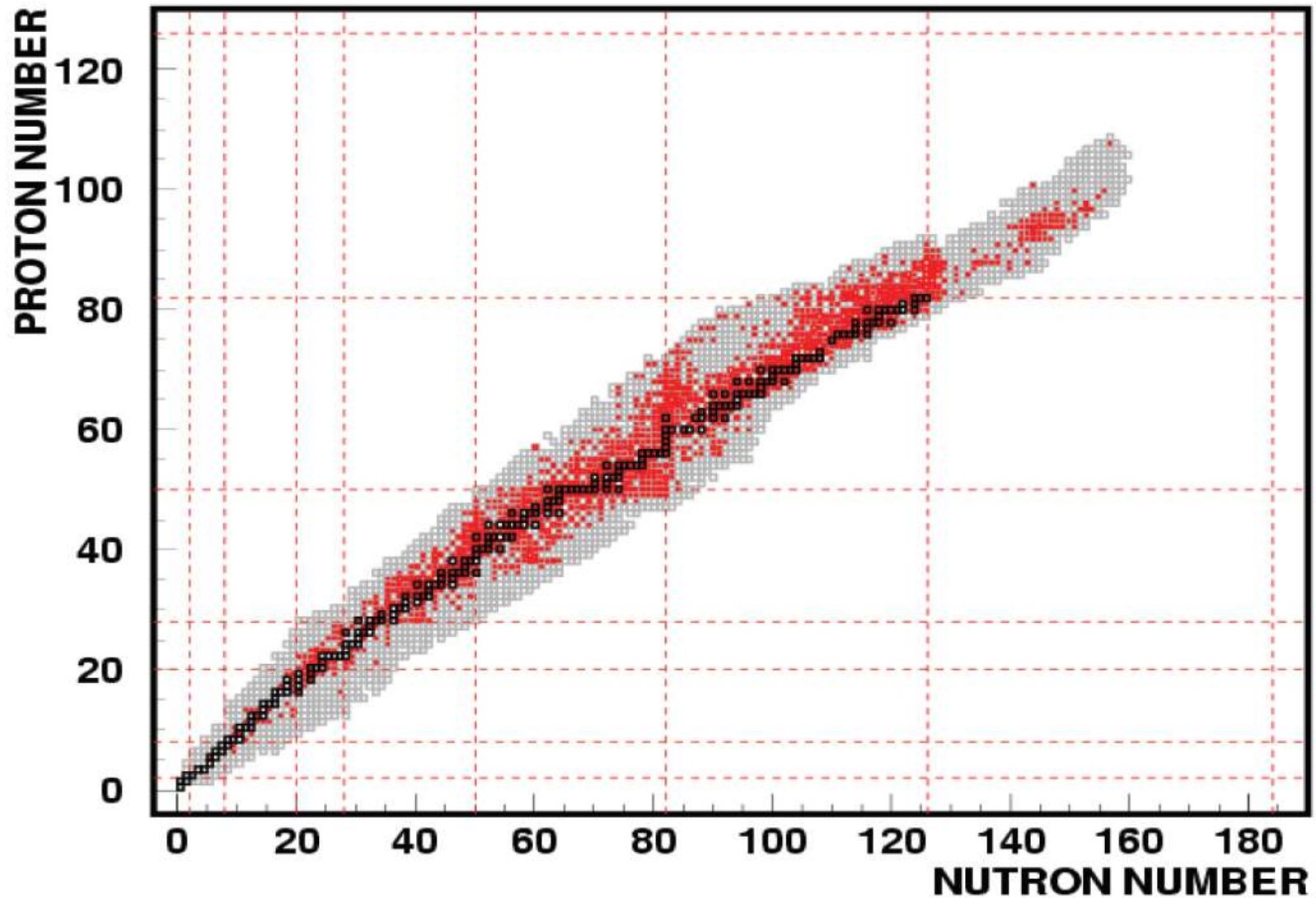
D-metamphetamin
psycho-aktívna molekula

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}U bol popri rozpadu zo základného stavu ^{234}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}Ta , 9^- , $E^* = 75 \text{ keV}$, $T_{1/2} > 10^{15}$ rokov

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

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

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

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

Neutrónovo bohaté: ^{130}Cd (predbežné)

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

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

Typy izomérov

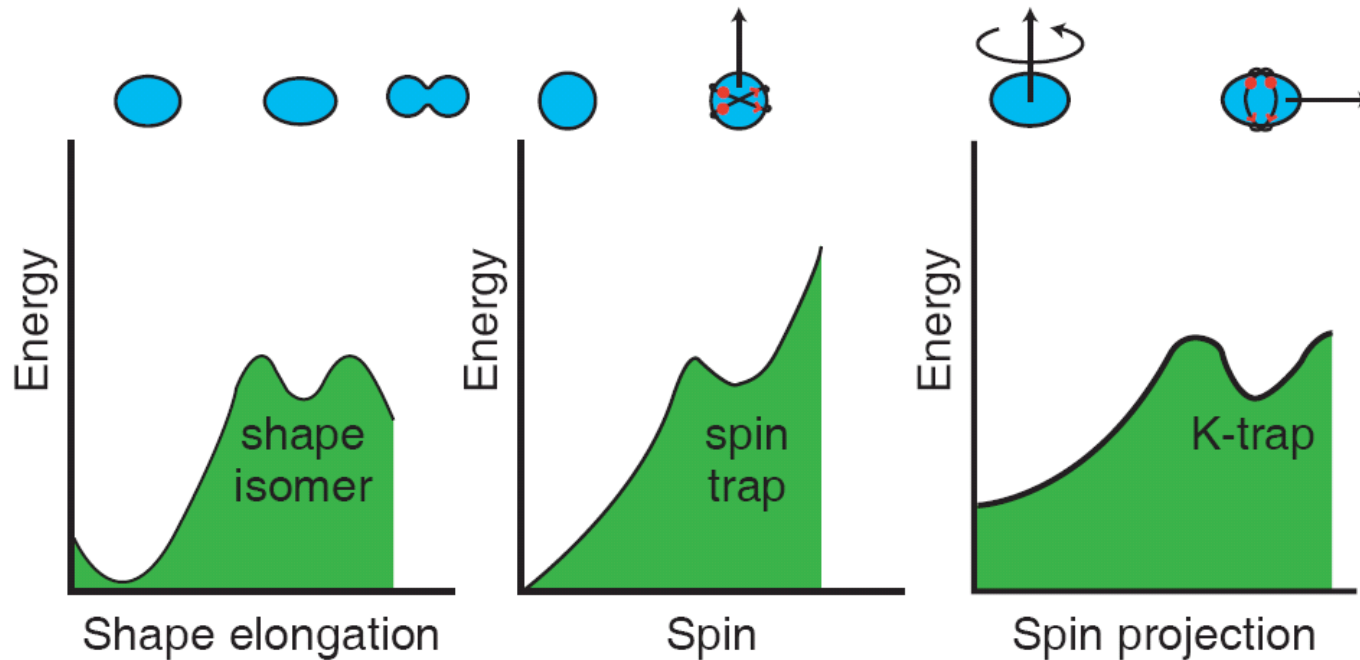


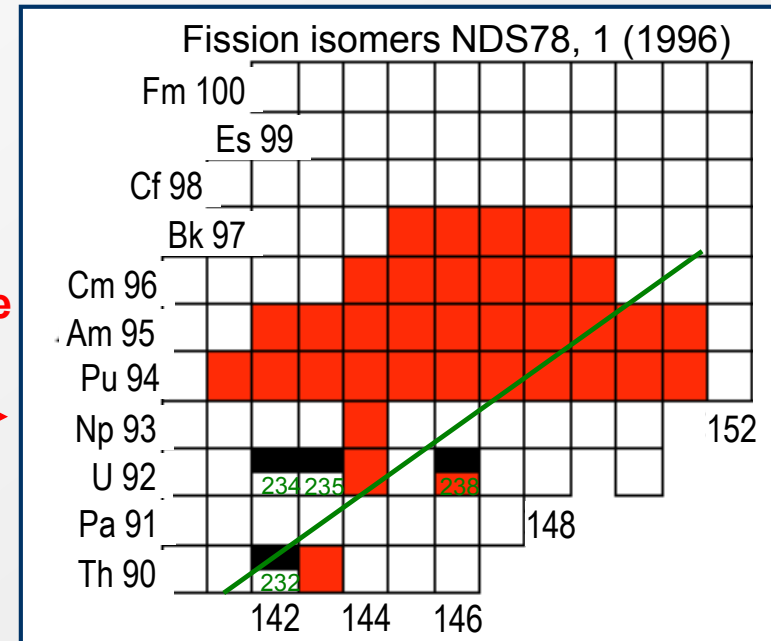
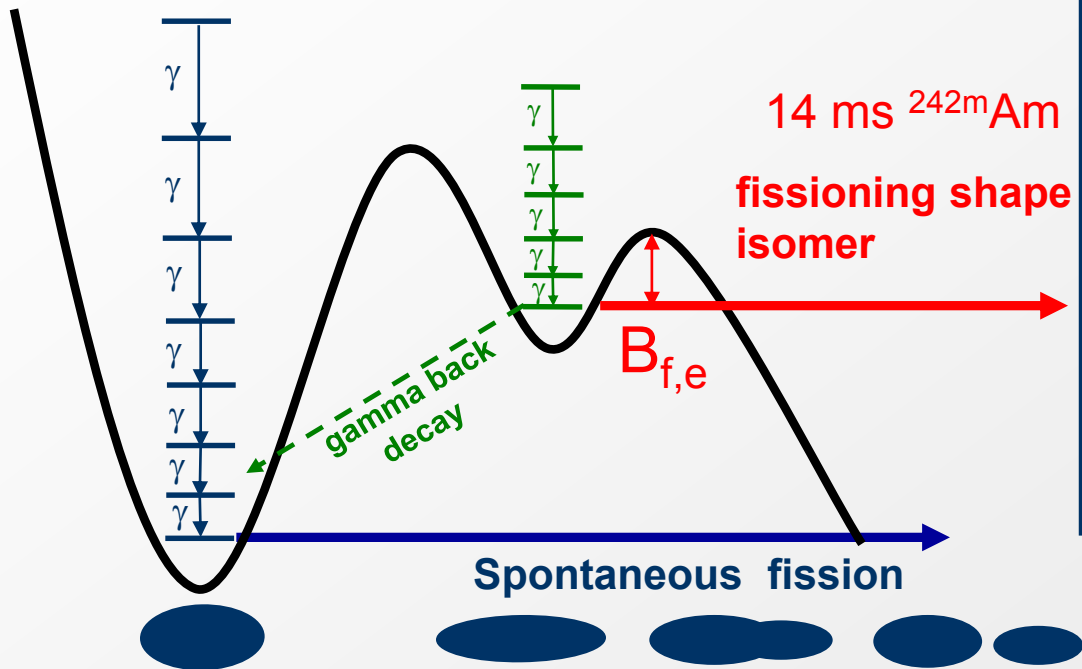
Figure 1 Excitation energy as a function of various nuclear variables. The secondary energy minima are responsible for the different kinds of isomers: **a**, shape isomers; **b**, spin traps; **c**, *K*-traps. In each case, the relevant nuclear shapes are illustrated; where appropriate, angular momentum 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 ($T_{1/2,f} \sim \text{ns-ms}$)



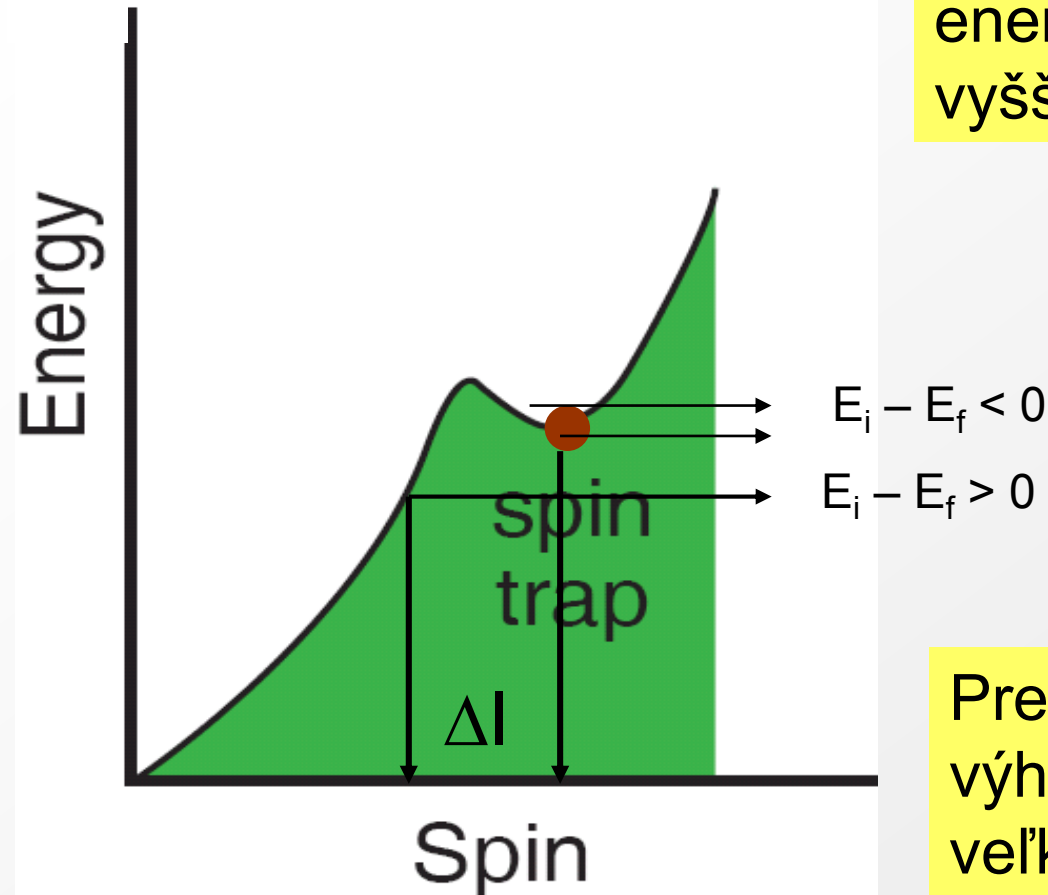
- Discovery: 1962 Fissioning shape isomers (V.M. Polikanov et al.)
- **Populate states in the second well (typical $E^* = 2-3 \text{ MeV}$)**
- Lower and thinner $B_{\text{fis,external}} \Rightarrow$ shorter $T_{1/2}$
- e.g. ^{242g}Am $T_{1/2} = 141 \text{ y}$, but ^{242m}Am $T_{1/2} = 14 \text{ ms}$!



Spinová pasca

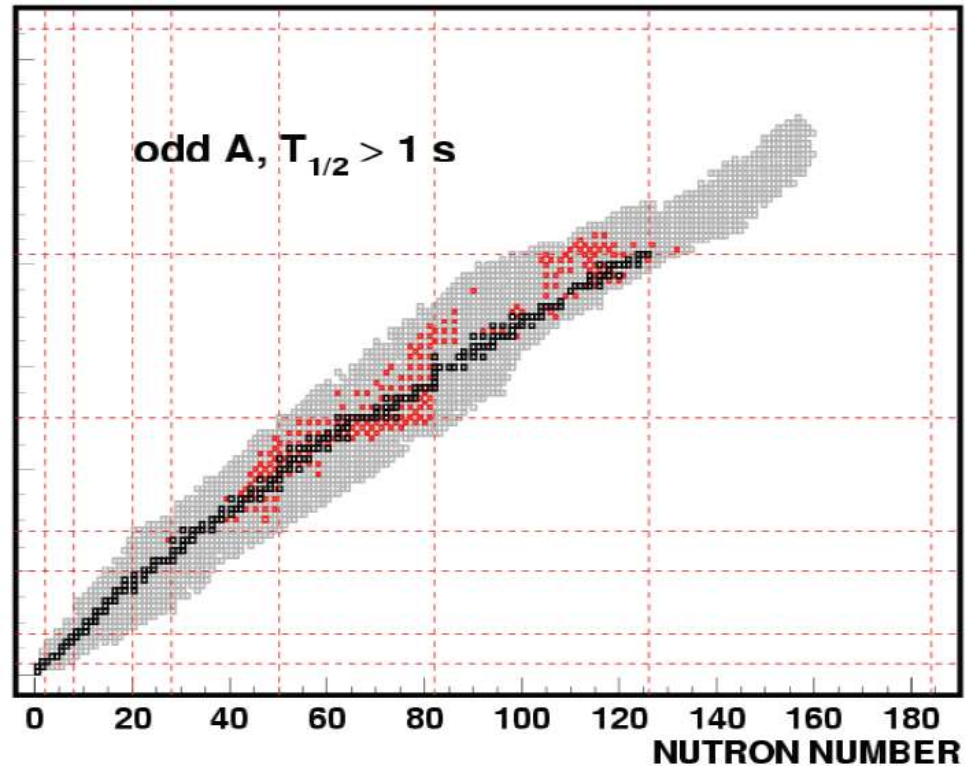
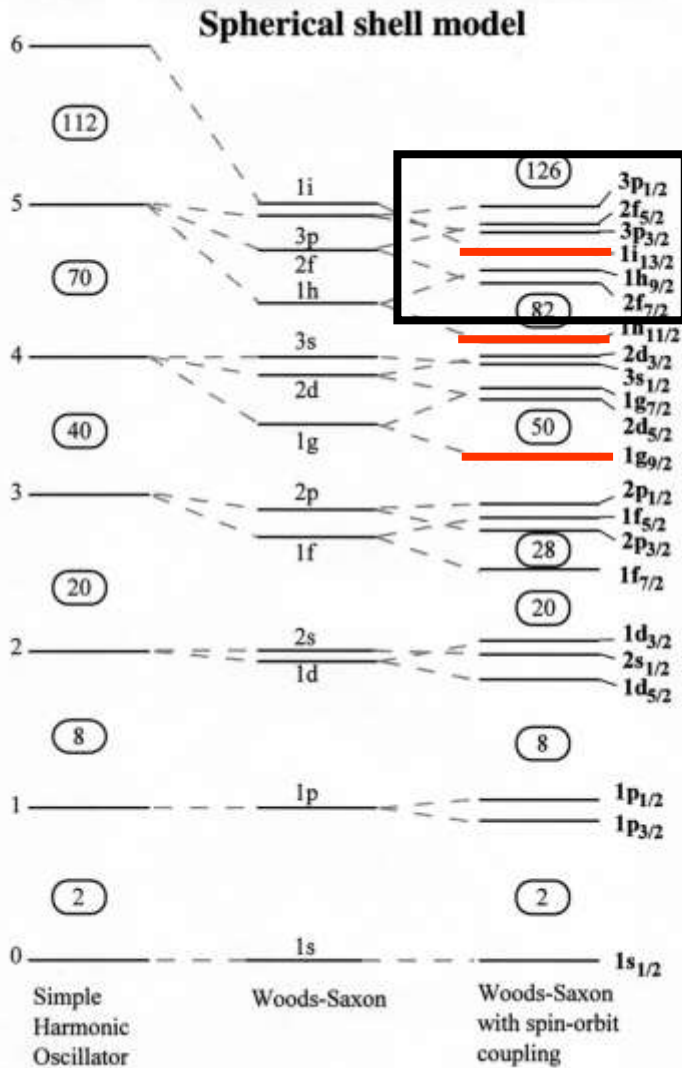


Malá zmena spinu vedie iba energeticky vyššie stavy



Prechod na energeticky výhodný stav si vyžaduje veľkú zmenu spinu

Ako vznikne spinová pasca?



islands of long lived isomers

$38 < N < 50$

$64 < N < 82$

$100 < N < 126$

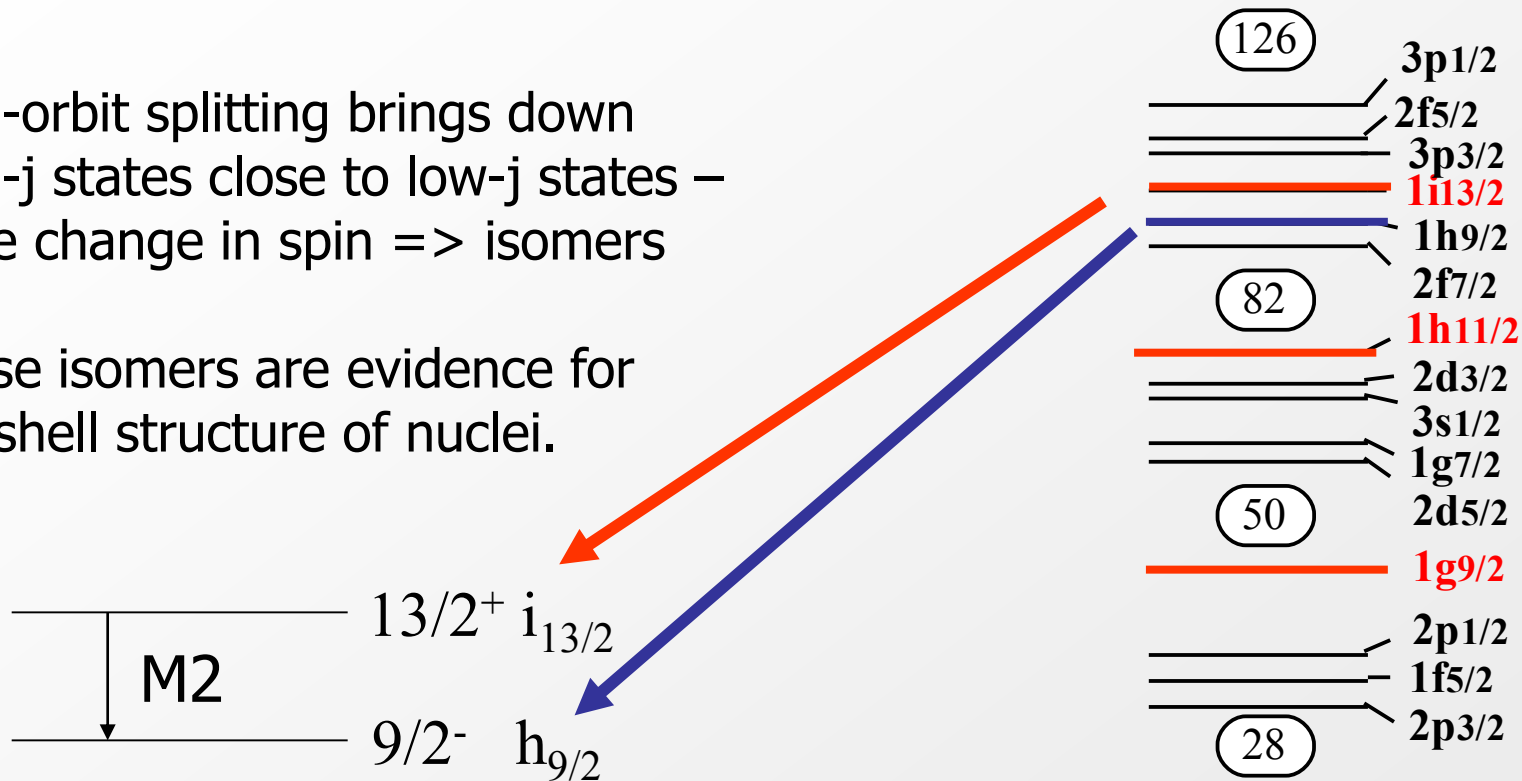
Pre formovanie spin. pasce
je kľúčová prítomnosť orbitalov
s vysokým spinom

Ako vznikne spinovú pascu

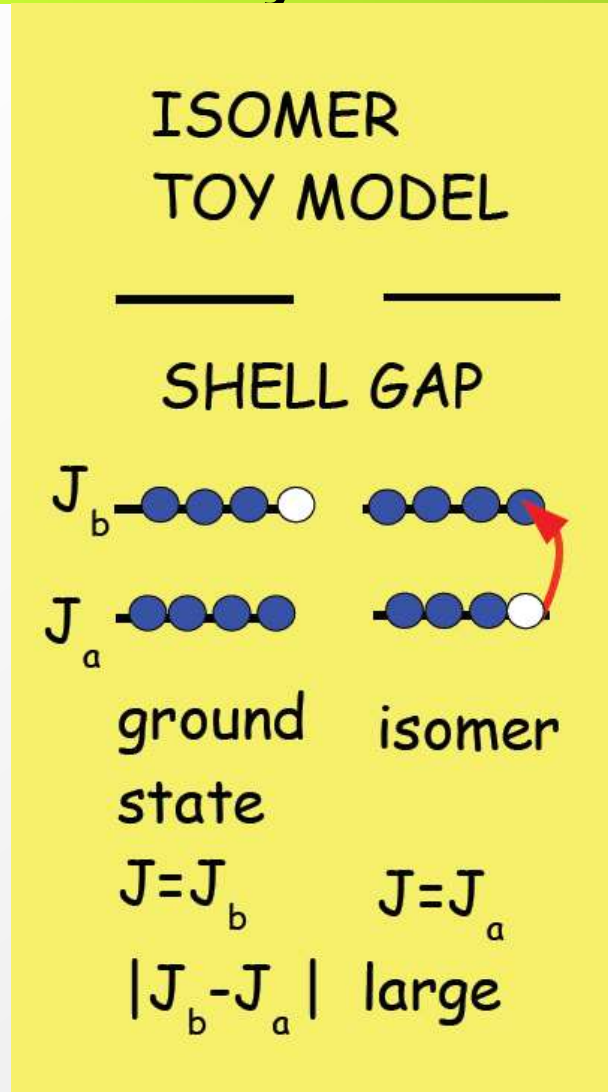


Spin-orbit splitting brings down high-j states close to low-j states – large change in spin => isomers

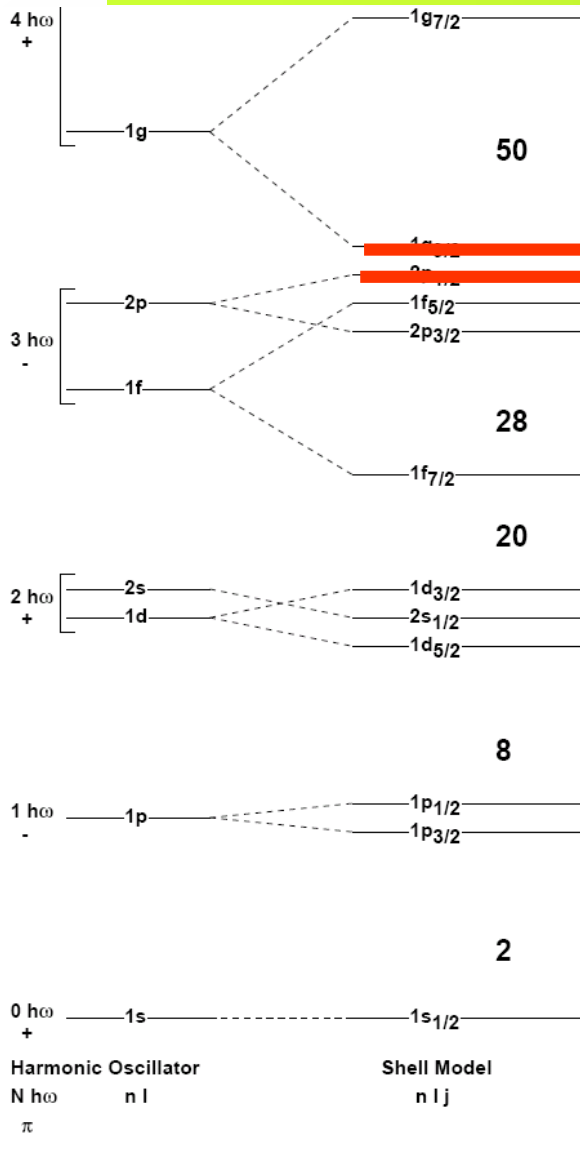
These isomers are evidence for the shell structure of nuclei.



Tvorba izomérov v blízkosti uzavretých vrstiev

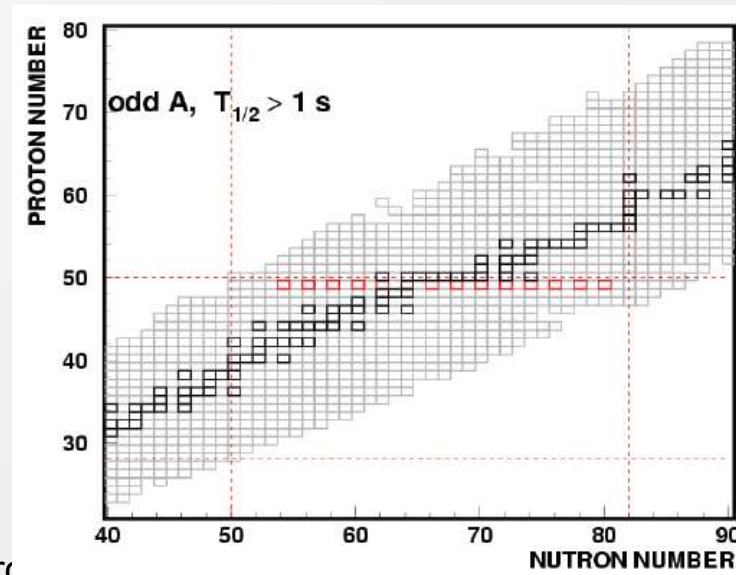


Izoméry india ($Z = 49$)

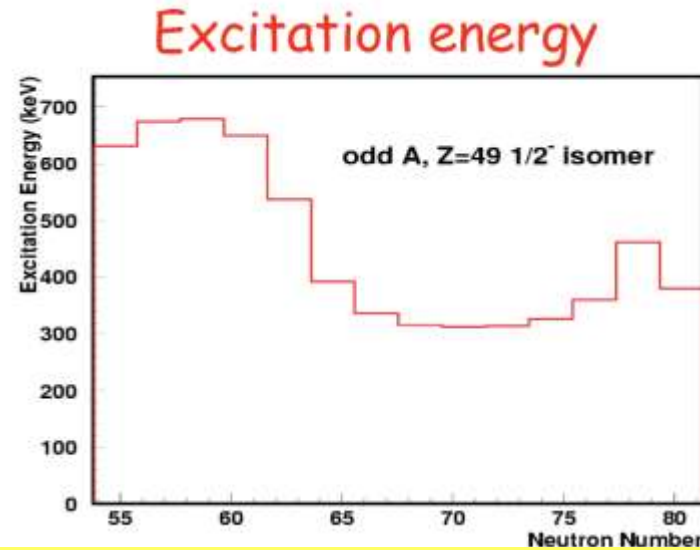
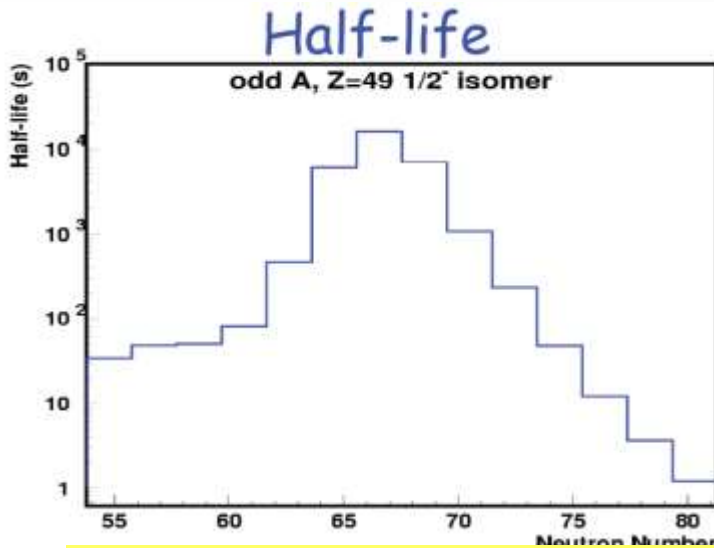


$1g_{9/2}$
 $2p_{1/2}$

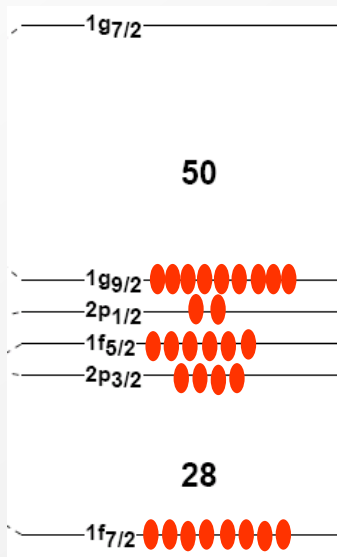
Prakticky všetky izotopy India s nepárnou hmotnosťou tvoria dlhožijúce izoméricé stavy. Prečo?



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'



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

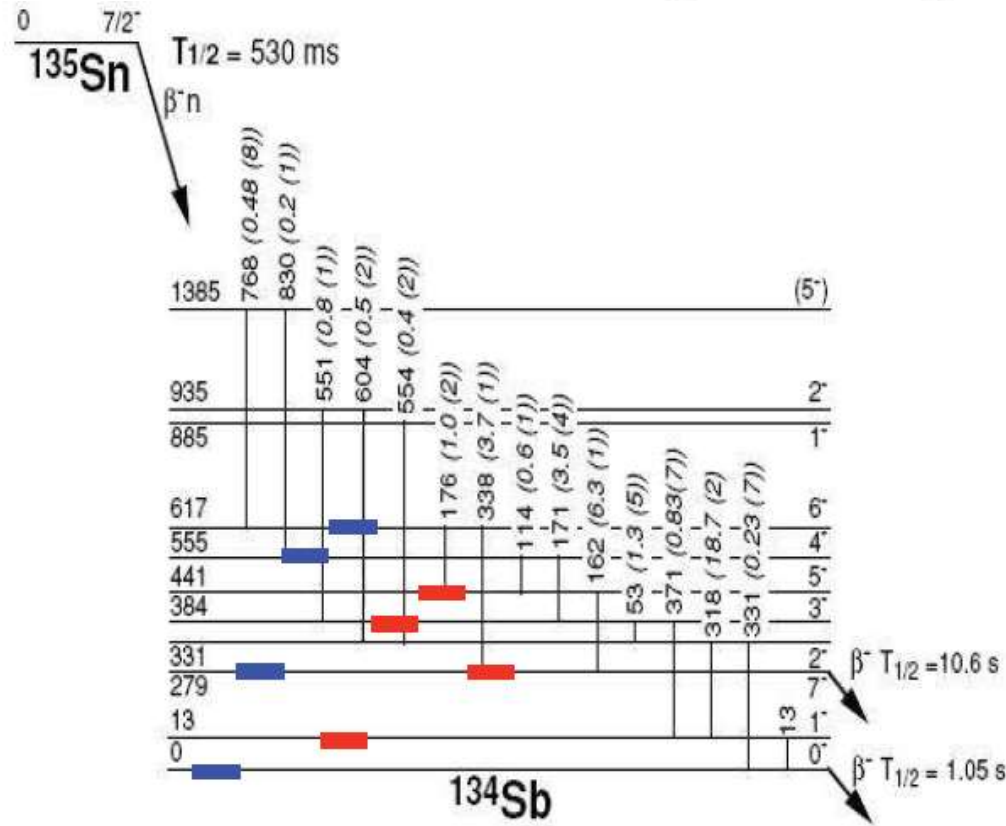


FIG. 9. The levels of ^{134}Sb populated in the β^-n decay of 530-ms ^{135}Sn .

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.

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

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

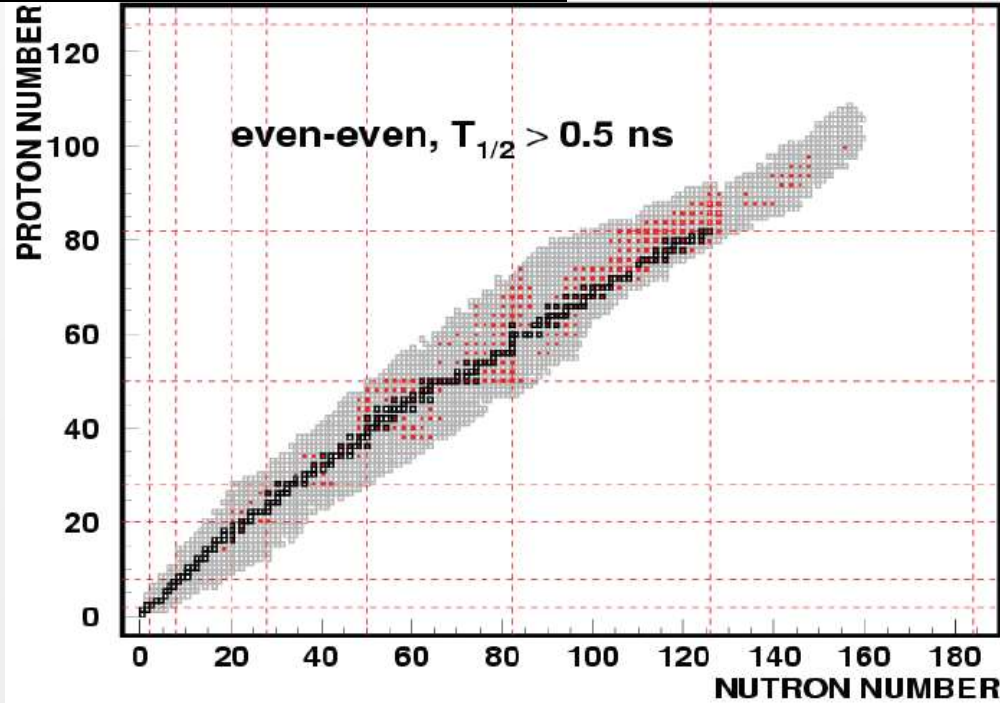
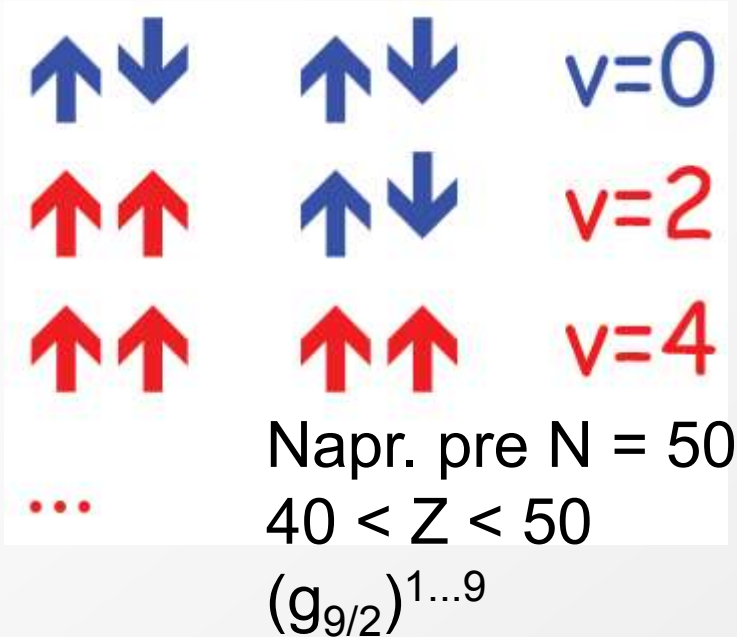
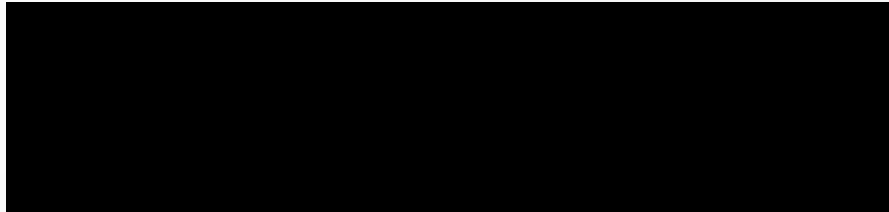
Vtedy sa zavádza člen B(Eλ) a B(Mλ) (kde λ je multipolarita prechodu), ktorý indikuje koľkonásobne je prechod rýchlejší alebo pomalší

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

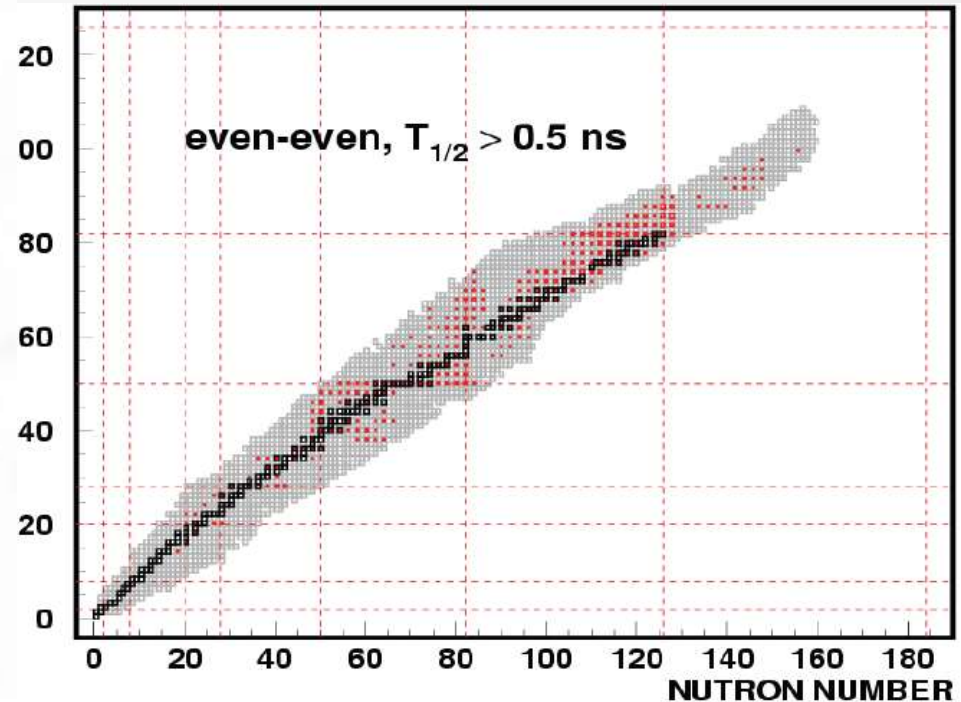
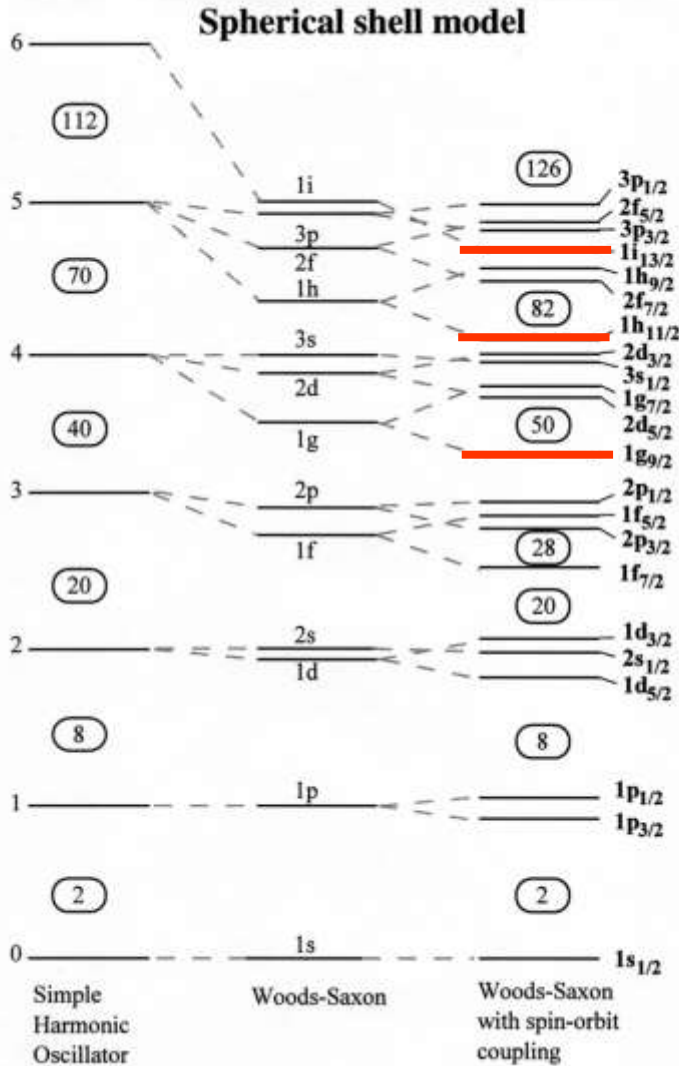
Seniority izoméry



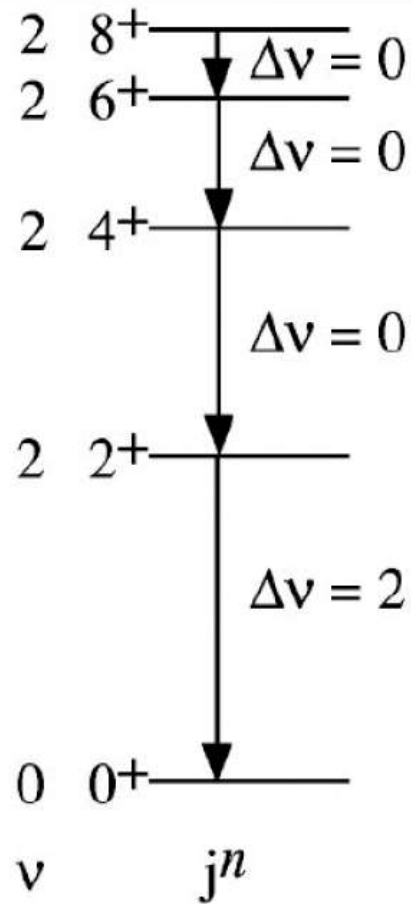
Špecifický prípad keď nastáva previazanosť (coupling) v rámci orbitalu. Zavádzame kvantové číslo seniorita (ν) udávajúce počet nespárovaných nukleónov v orbitale. Počet nukleónov v orbitale je n . Potom platí:



Seniority izoméry

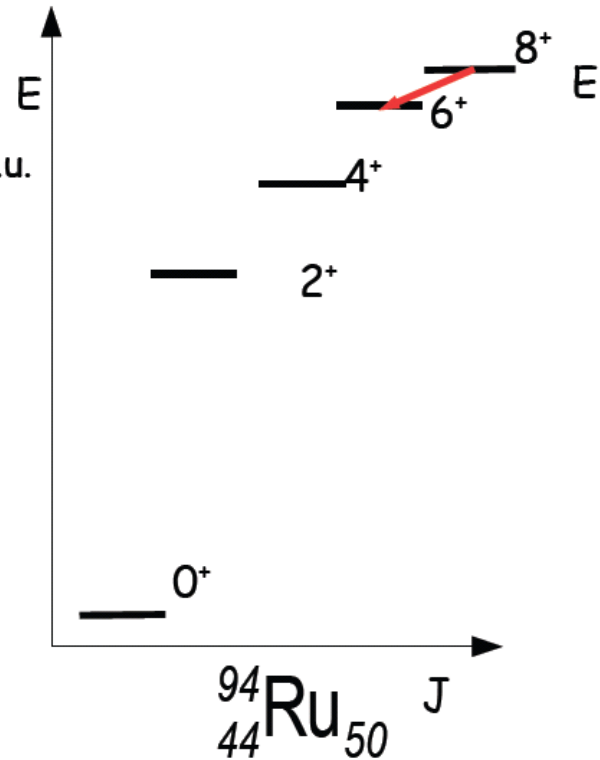


Príklad ^{94}Ru



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

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



p.153
w''

Izoméry v deformovanom jadre



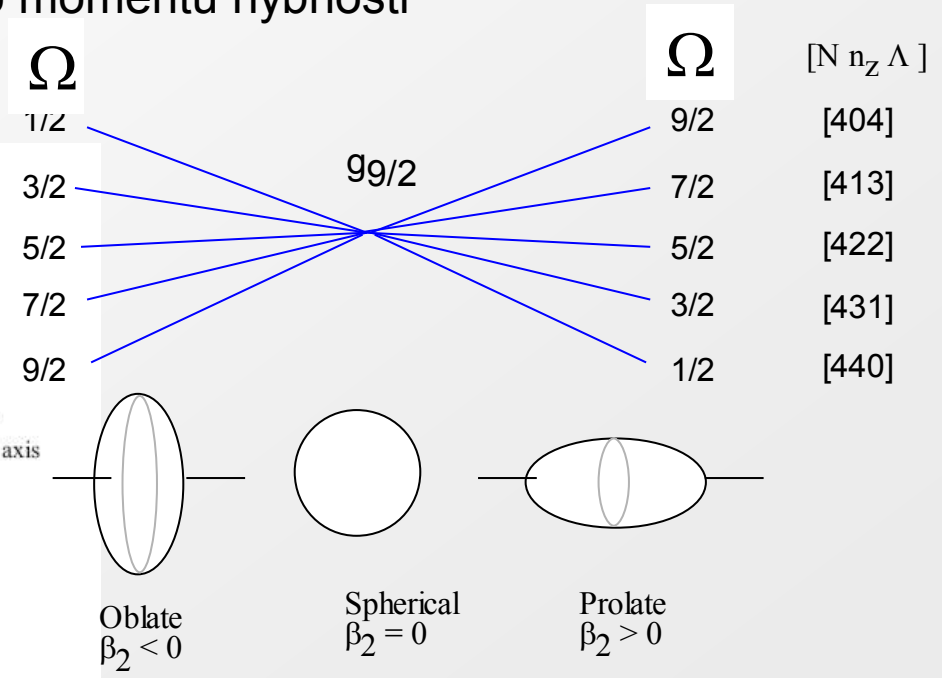
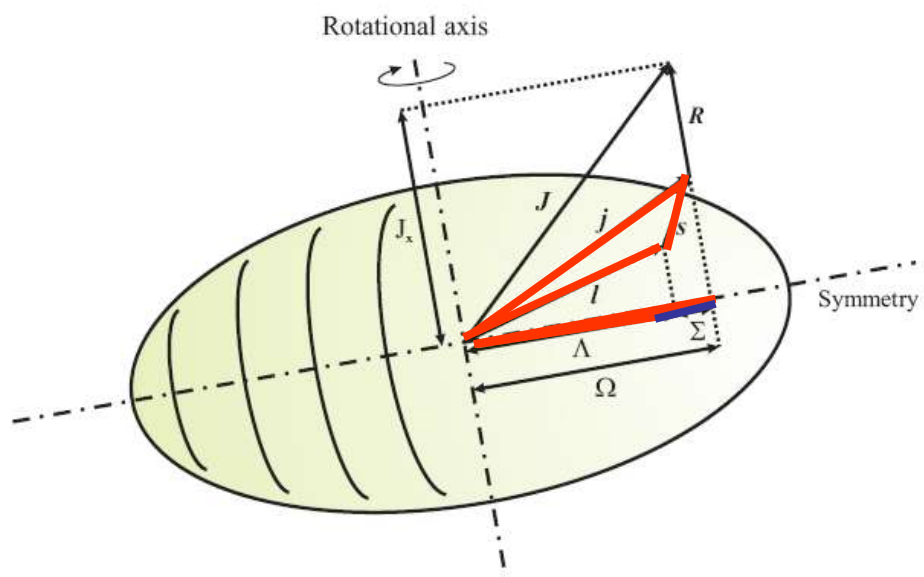
Nilssonov model opisujúci jednočasticový pohyb v deformovanom potenciáli. Zavádzajú sa nové tzv. asymptotické kvantové čísla.

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

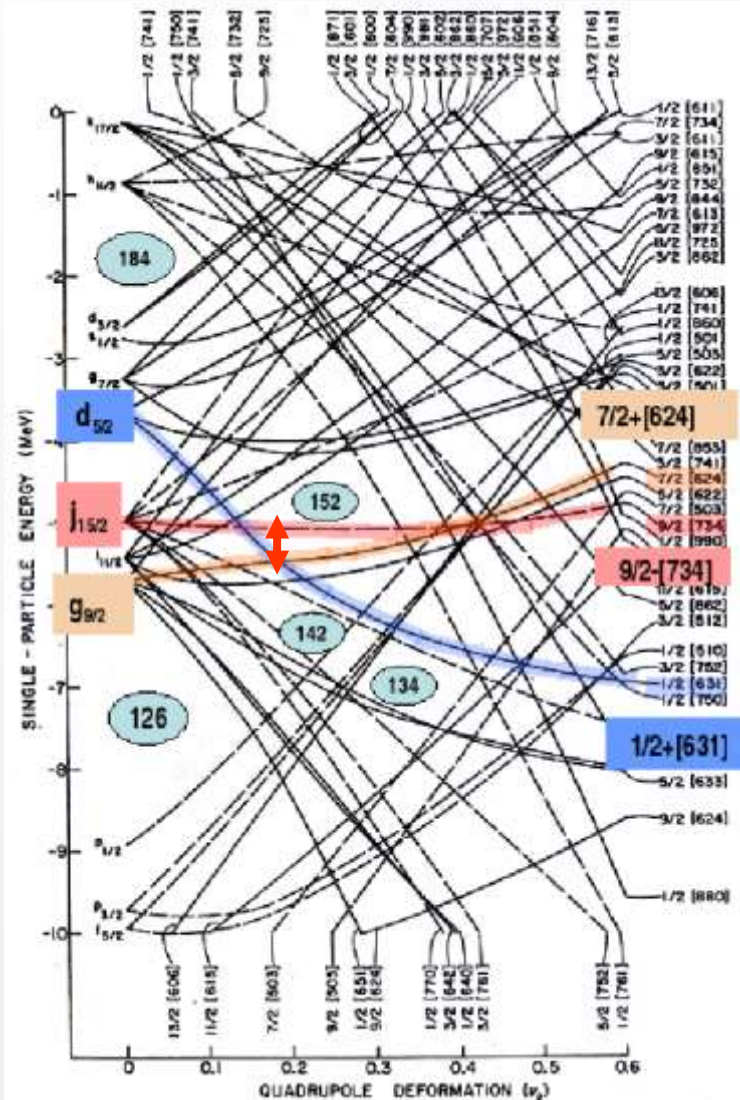
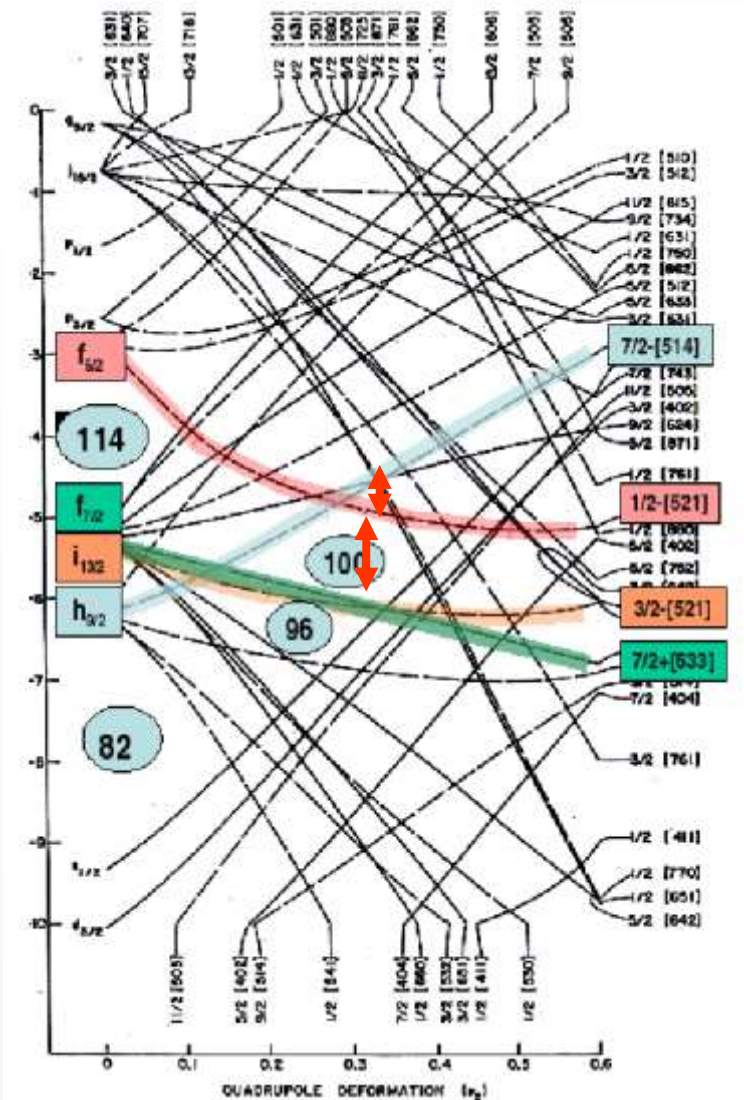
Ω - projekcia momentu hybnosti do osi symetrie (j_z)

Σ, Λ – projekcie orbitalneho a spinoveho momentu hybnosti

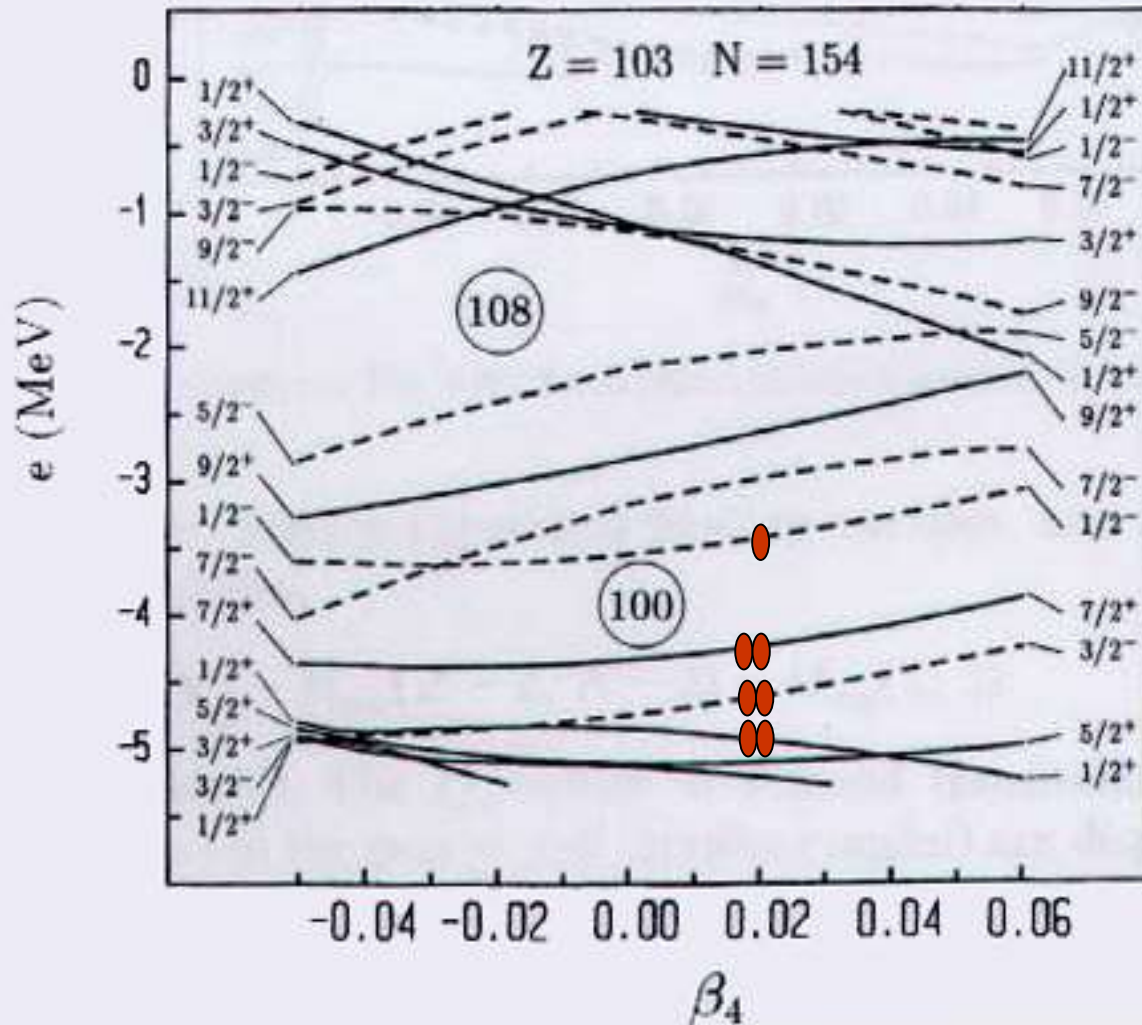
n_z – kvantové číslo oscilátora



Jednočasticové izoméry



Jednočasticový izomér

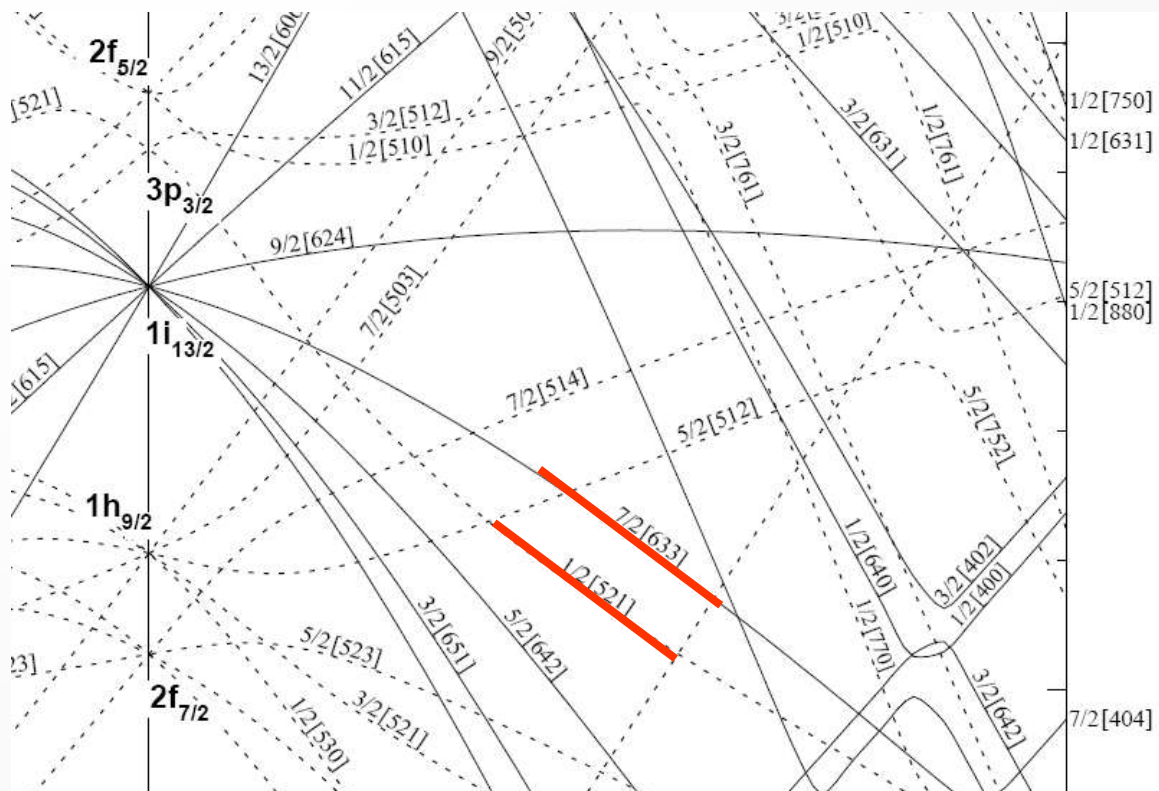


$J^\pi = 7/2^-$
 $J^\pi = 1/2^-$

↓ 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}Hf ,
 ^{169}Yb (46s),
 ^{167}Er (2.3 s),
 ^{165}Dy (1.3 min)

$$1/2^- \rightarrow 7/2^+$$
$$L = |\Omega_1 - \Omega_2| = 3 \Rightarrow E3$$

Pár príkladov

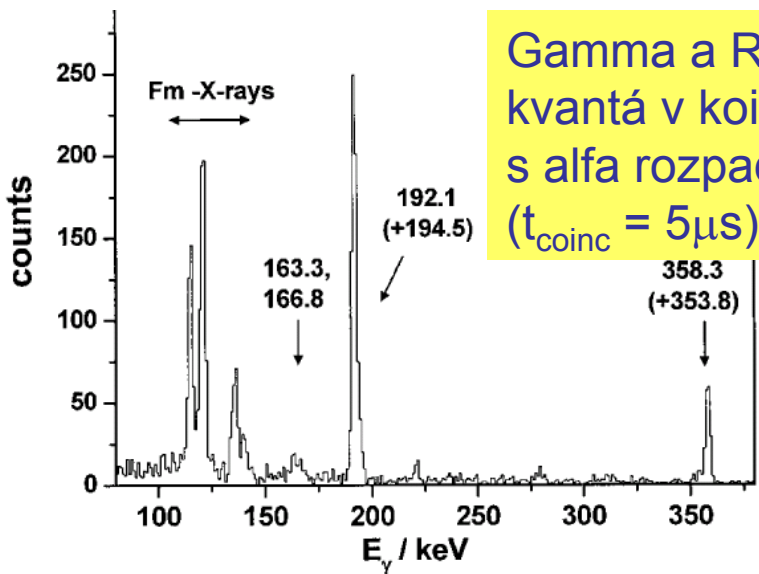


				104	Rf	Rf 253 48ms	Rf 254 23ms	Rf 255 1.64s 8.722 8.69... 203 142	Rf 256 6.2ms	Rf 257 3.9s		
				103	Lr	Lr 252 0.36s	Lr 253 1.49s 0.57s	Lr 254 13s	Lr 255 21.5s	Lr 256 25.9s		
			102	No	No 250 0.25ms	No 251 0.76s	No 252 2.3s	No 253 1.7m	No 254 0.28s	No 255 3.1m		
101	Md	Md 245 0.35s	Md 246 0.9ms	Md 247 1.0s	Md 248 1.12s 0.2s	Md 249 7s	Md 250 24s	Md 251 52s	Md 252 4.0m	Md 253 2.3m	Md 254 ~6m 10m 28m	
100	Fm	Fm 243 0.18s	Fm 244 3ms	Fm 245 4.2s	Fm 246 1.1s	Fm 247 9.2s 35s	Fm 248 36s	Fm 249 2.6m	Fm 250 1.8s	Fm 251 5.30h	Fm 252 25.4h	Fm 253 3.0d
99	Es	Es 242 16s	Es 243 20s	Es 244 37s	Es 245 1.1m	Es 246 7.7m	Es 247 4.55m	Es 248 27m	Es 249 1.70h	Es 250 2.2h	Es 251 33h	Es 252 472d
98	Cf	Cf 241 3.78m	Cf 242 3.68m	Cf 243 10.7m	Cf 244 19.4m	Cf 245 43.6m	Cf 246 35.7h	Cf 247 3.11h	Cf 248 333d	Cf 249 351a	Cf 250 13.1a	Cf 251 898a
		143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153

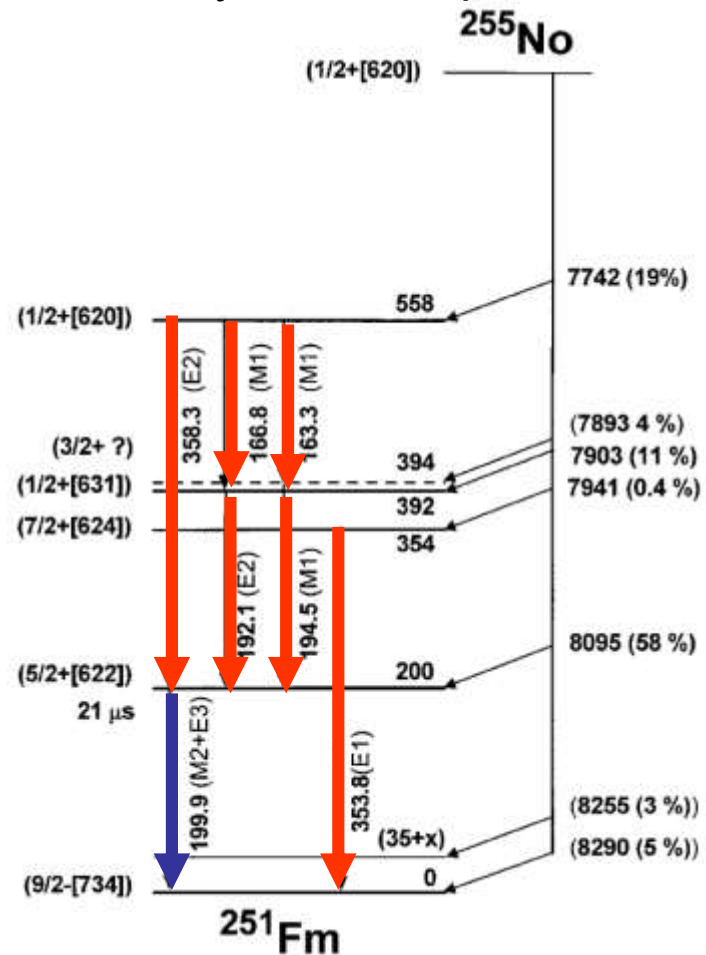
Príklad identifikácie izomérneho stavu



γ a RTG kvantá emitované zo vzбудených stavov obsadzovaných alfa rozpadom ^{255}No

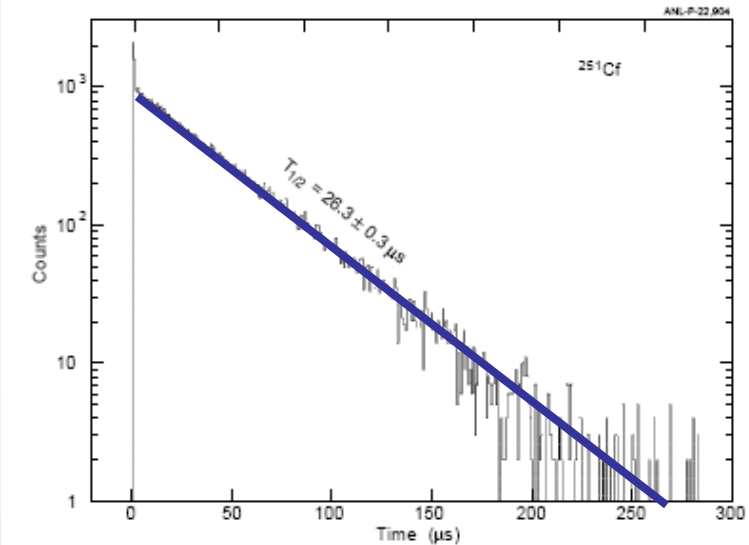
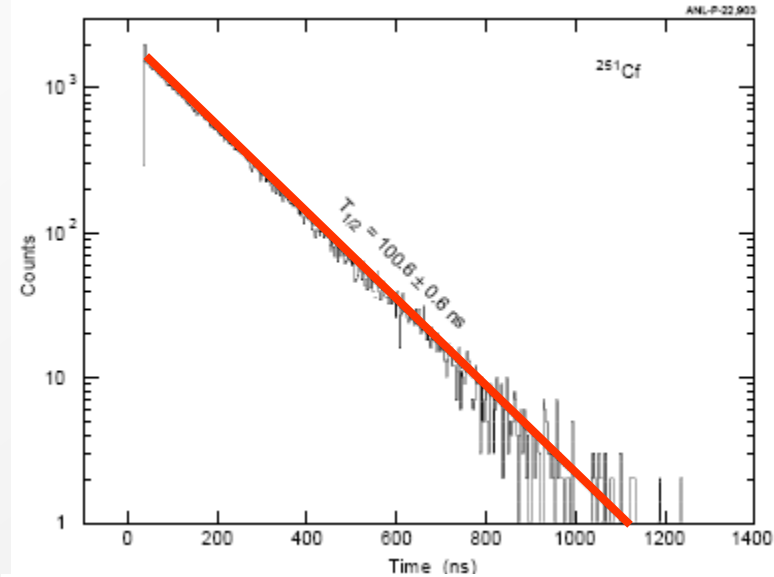
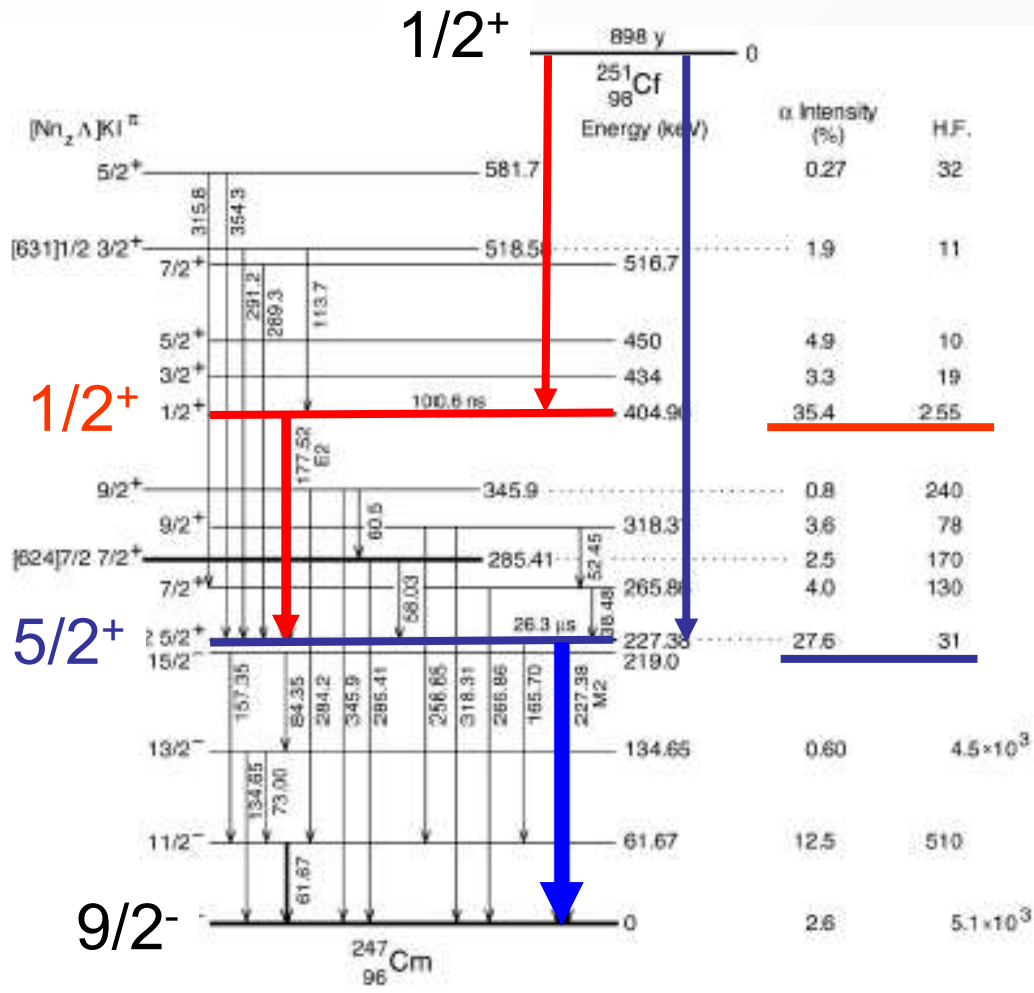


Gamma a RTG kvantá v koincidencii s alfa rozpadom ($t_{\text{coinc}} = 5\mu\text{s}$)



F.P. Hessberger et al Eur. Phys. J. A66 (2006) 165
Jadrová izoméria

Doba života izoméru





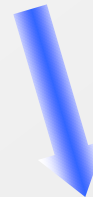
Pre zopakovanie: Komplikácie s vnútornou konverziou

S rastúcim protónovým číslom, rastúcou multipolaritou prechodu a klesajúcou energiou prudko rastie koeficient vnútornej konverzie

$$\alpha_K(EL) \propto Z^3 \left(\frac{L}{L+1} \right) \left(\frac{2m_e c^2}{E} \right)^{L+5/2}$$



Important for heavy nuclei, where inner electron shells are closer to the nucleus



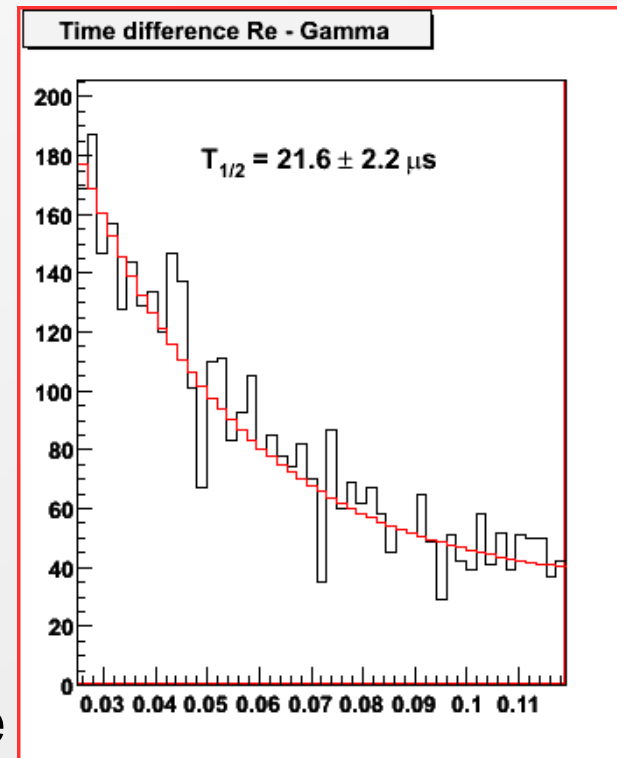
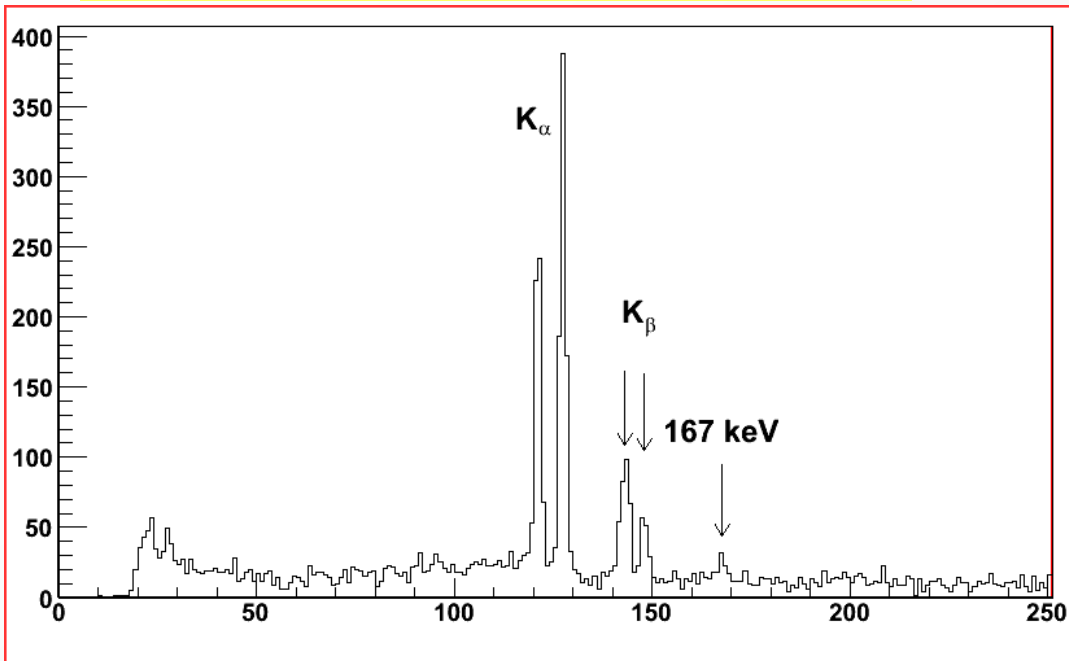
Important for low-energy transitions

Príklad priradenia izomérneho prechodu



Gamma a RTG kvantá cca $100 \mu\text{s}$
po syntéze jadra ^{253}No a implantácii
do detekčného systému

$Z = 100$; $L = 2$; $E = 167 \text{ keV}$



Prechod je identifikovaný ako M2 na základe

- koeficientu vnútornej konverzie
- pravdepodobnosti prechodu (polčasu)

Výberové pravidlo pre $\Delta\Lambda$



Izomér v ^{181}Ta

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

482 keV

7/2⁺[404]

5/2⁺[402]

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

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

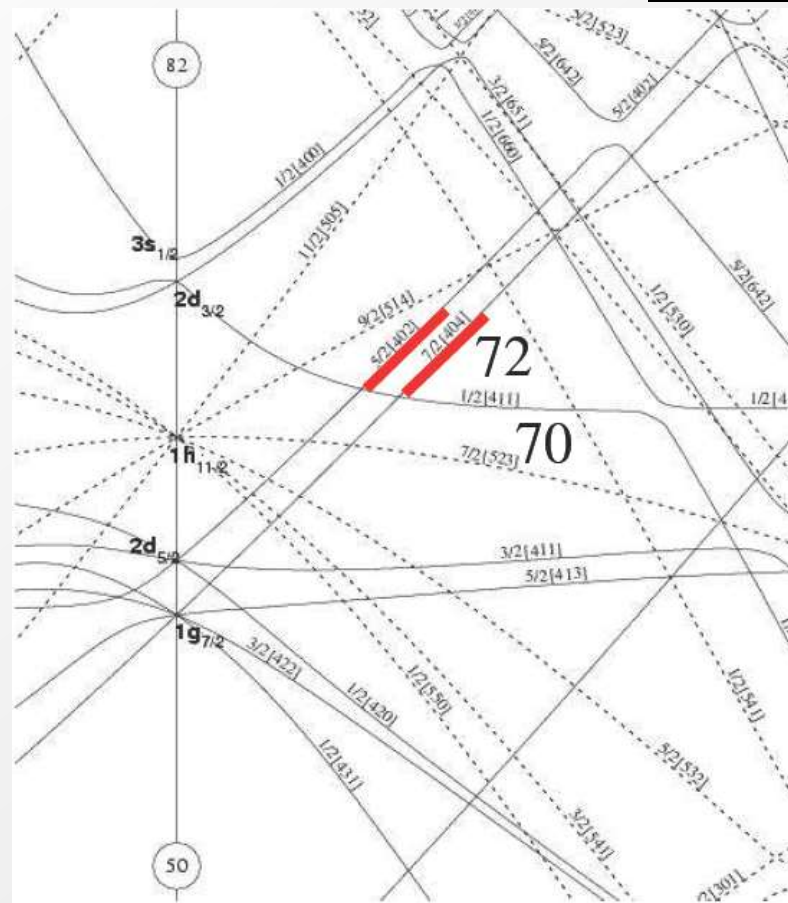
$$7/2^+[404] \quad \Sigma = -1/2$$

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

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

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

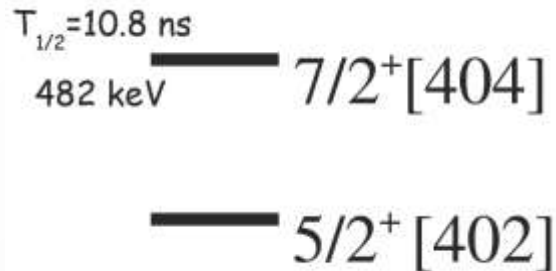
P.Olbratowski et al. Acta. Phys. Pol. 32(2001) 865
26. 4. 2018



Výberové pravidlo pre $\Delta\Lambda$



Izomér v ^{181}Ta



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

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

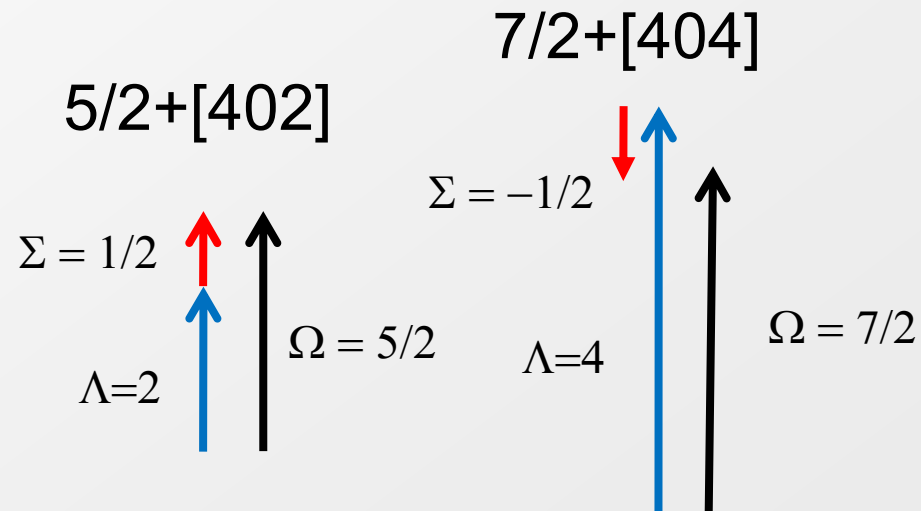
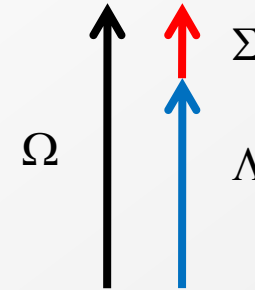
$$7/2^+[404] \quad \Sigma = -1/2$$

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

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

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

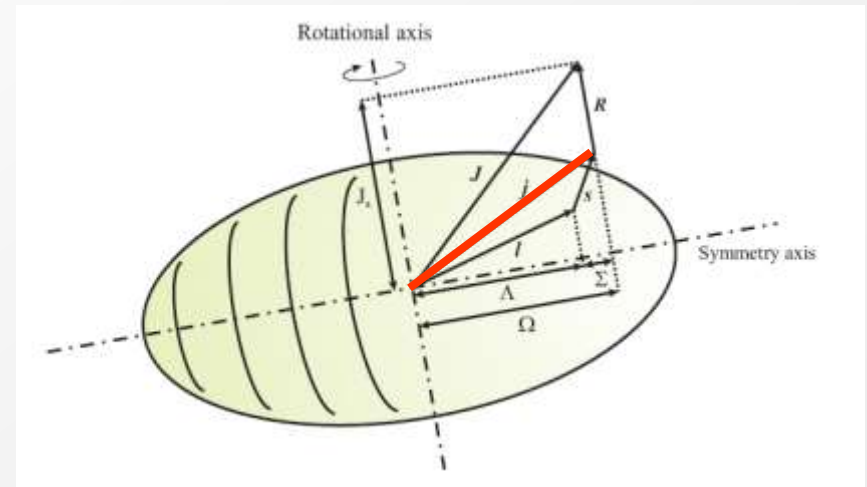
P.Olbratowski et al. Acta. Phys. Pol. 32(2001) 865



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.

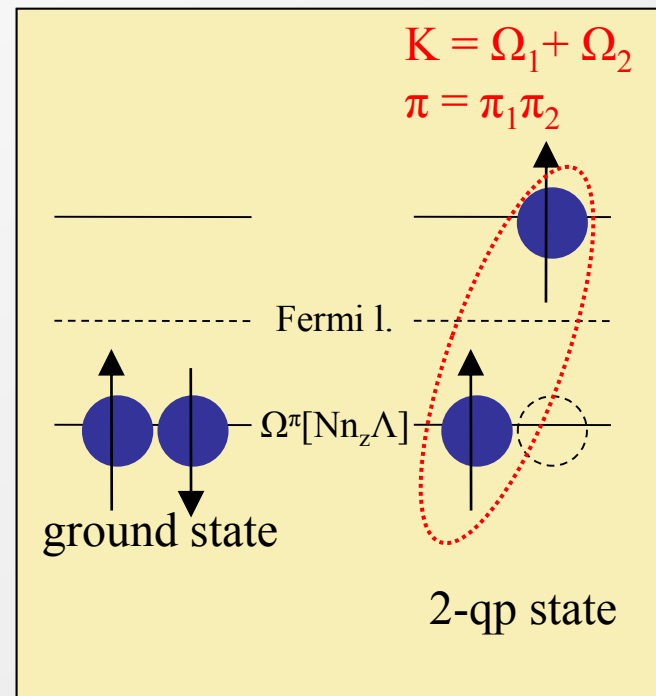
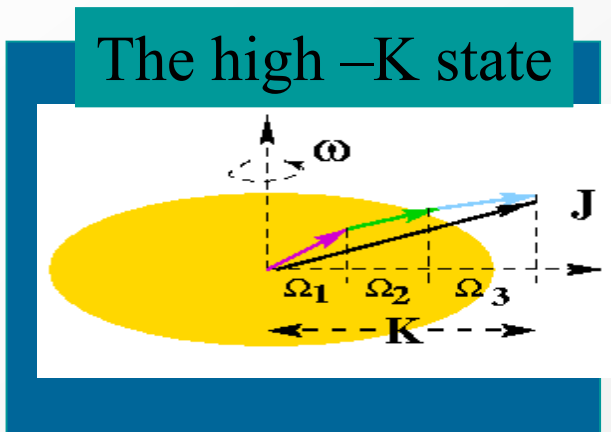


K izoméry

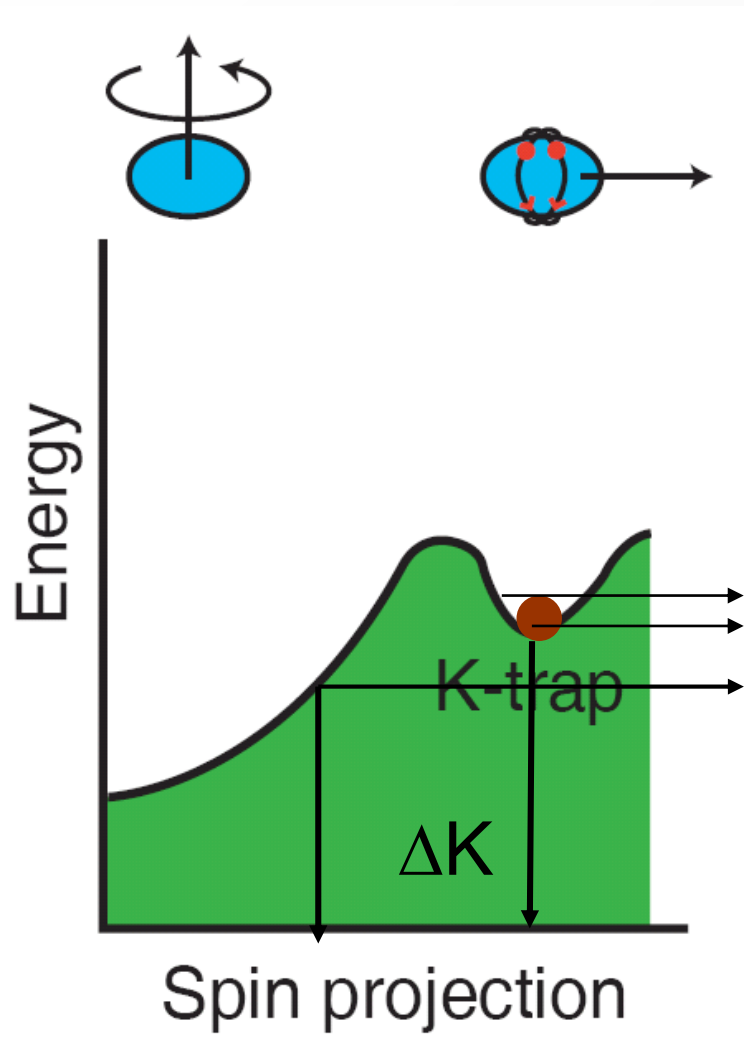


Pre jednočasticový prípad je priemet momentu hybnosti (spinu) j do osi symetrie Ω

Pri viacerých časticách je priemet celkového momentu hybnosti súčtom všetkých Ω_i



K pasca



Malá zmena K vedie iba energeticky vyššie stavy

$$E_i - E_f < 0$$

$$E_i - E_f > 0$$

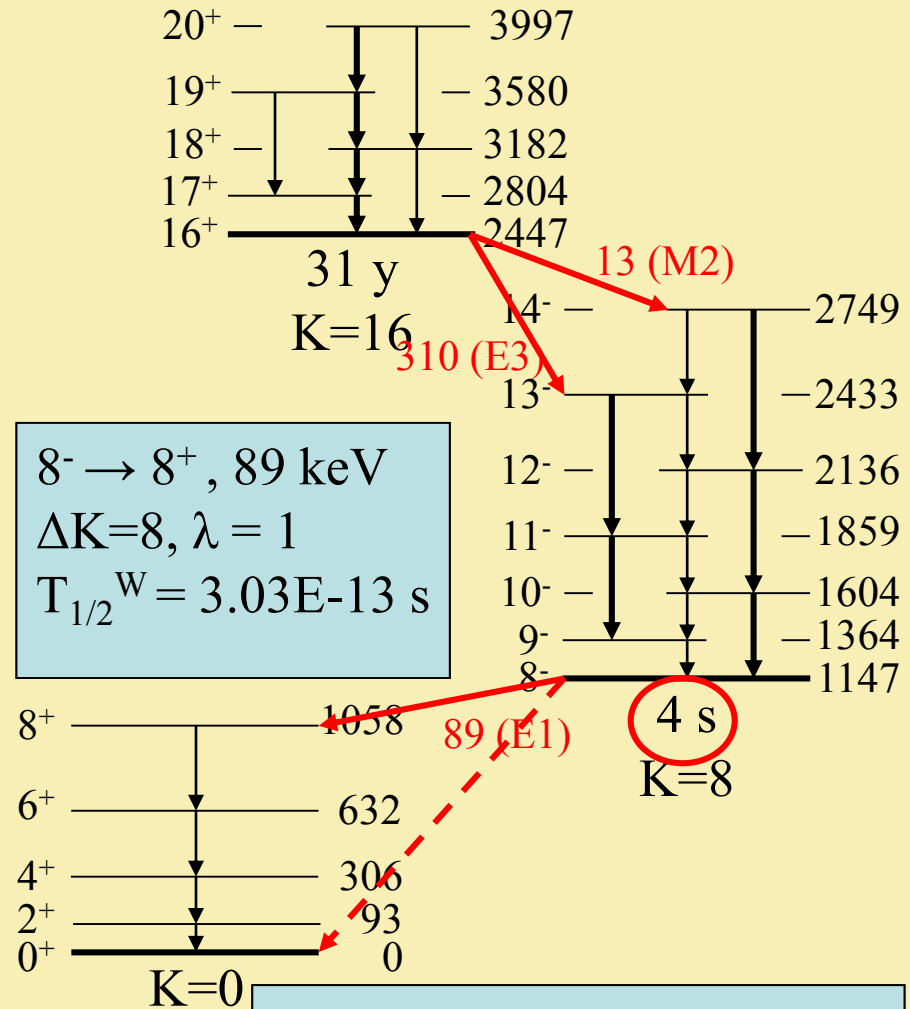
Prechod na energeticky výhodný stav si vyžaduje veľkú zmenu K

K-hindrance in ^{178}Hf



- Violated selection rule:
 - $\lambda \geq \Delta K$
- Hindrance factor:
 - $HF = \frac{T_{1/2}^{\text{exp.}}}{T_{1/2}^W}$
- Degree of hindrance:
 - $\nu = \Delta K - \lambda$
- Loebner systematics:
 - $HF > 100^\nu$

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



Fictive K-allowed transition

254No



								Rf 253 48ms	Rf 254 23ms	Rf 255 1.64s 8.722 8.69... 203 142 0.48a g 0.52sf	Rf 256 6.2ms 0.98sf 8.79 0.005a	Rf 257 3.9s 9.02 8.87 8.78 8.74sf a e				
			104	Rf												
			103	Lr				Lr 252 0.36s 9.02 8.97	Lr 253 1.49s 0.57s 8.72sf 8.79sf	Lr 254 13s 8.46 8.41 0.78a 0.22e	Lr 255 21.5s 8.43 8.37	Lr 256 25.9s 8.52 8.43 8.39				
			102	No			No 250 0.25ms sf	No 251 0.76s 8.62 8.58 <0.003sf	No 252 2.3s 8.42 8.37	No 253 1.7m 8.01	No 254 0.28s 8.10 0.10 0.00	No 255 3.1m 8.12 8.08 7.93 0.61a 0.39e 187...g; e sf				
	101	Md	Md 245 0.35s 8.64 8.68a	Md 246 0.9ms 8.74 8.56	Md 247 1.0s ??a ??e	Md 248 1.12s 0.2s	Md 249 7s 8.42a	Md 250 24s 8.32 8.36	Md 251 52s 0.2a e	Md 252 4.0m 8.03	Md 253 2.3m 7.82 7.75	Md 254 ~6m 0.07a 0.93e	Md 255 10m 7.55 0.10a e	Md 256 28m (<0.50a) e	Md 257 10m (<0.50a) e	Md 258 28m (a) e
	100	Fm	Fm 243 0.18s 8.55	Fm 244 3ms 8.64 8.68a	Fm 245 4.2s 8.15	Fm 246 1.1s 8.25	Fm 247 9.2s 35s 8.18a	Fm 248 36s 7.87 7.87 7.83	Fm 249 2.6m 7.87 7.87 7.83	Fm 250 1.8s 7.53	Fm 251 30m 0.15a 0.85e	Fm 252 5.30h 7.43a 6.68 6.78	Fm 253 25.4h 7.04 7.00	Fm 254 3.0d 2.3-5sf g e	Fm 255 3.0d 6.94 6.67 272;(145...) g	Fm 256 3.0d 0.88e
	99	Es	Es 242 16s 7.92	Es 243 20s ??e ??a	Es 244 37s 7.899 7.939	Es 245 1.1m 0.3a 0.7e	Es 246 7.7m 7.57 0.04a e	Es 247 4.55m 7.73 0.4a 0.6e	Es 248 27m 7.36 0.1a 0.9e	Es 249 1.70h 7.323 0.07a e 7.275	Es 250 2.2h 6.91 6.88	Es 251 33h 0.0025a e	Es 252 472d 6.78 6.72 380; 813... g	Es 253 33h 989 829 6.492 6.462 0.0049a g	Es 254 472d 6.63 6.56	Es 255 472d 0.0001b e
	98	Cf	Cf 241 3.78m 7.432	Cf 242 3.68m 0.75e 0.25a	Cf 243 10.7m 7.392 7.358	Cf 244 19.4m ??e ??a	Cf 245 43.6m 7.06 0.14a e	Cf 246 35.7h 7.209 7.174	Cf 247 3.11h 7.137 0.35a 0.64e	Cf 248 333d 6.750 6.708	Cf 249 351a 6.26 6.22	Cf 250 13.1a 5.81 5.76	Cf 251 898a 6.03 5.99	Cf 252 898a 6.01 5.85 5.68	Cf 253 898a 7.7-4sf ge	Cf 254 898a 177; 227 g
			143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153			

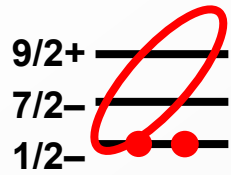
^{254}No – K-isomers



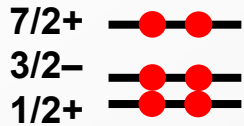
Calculated configuration:

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

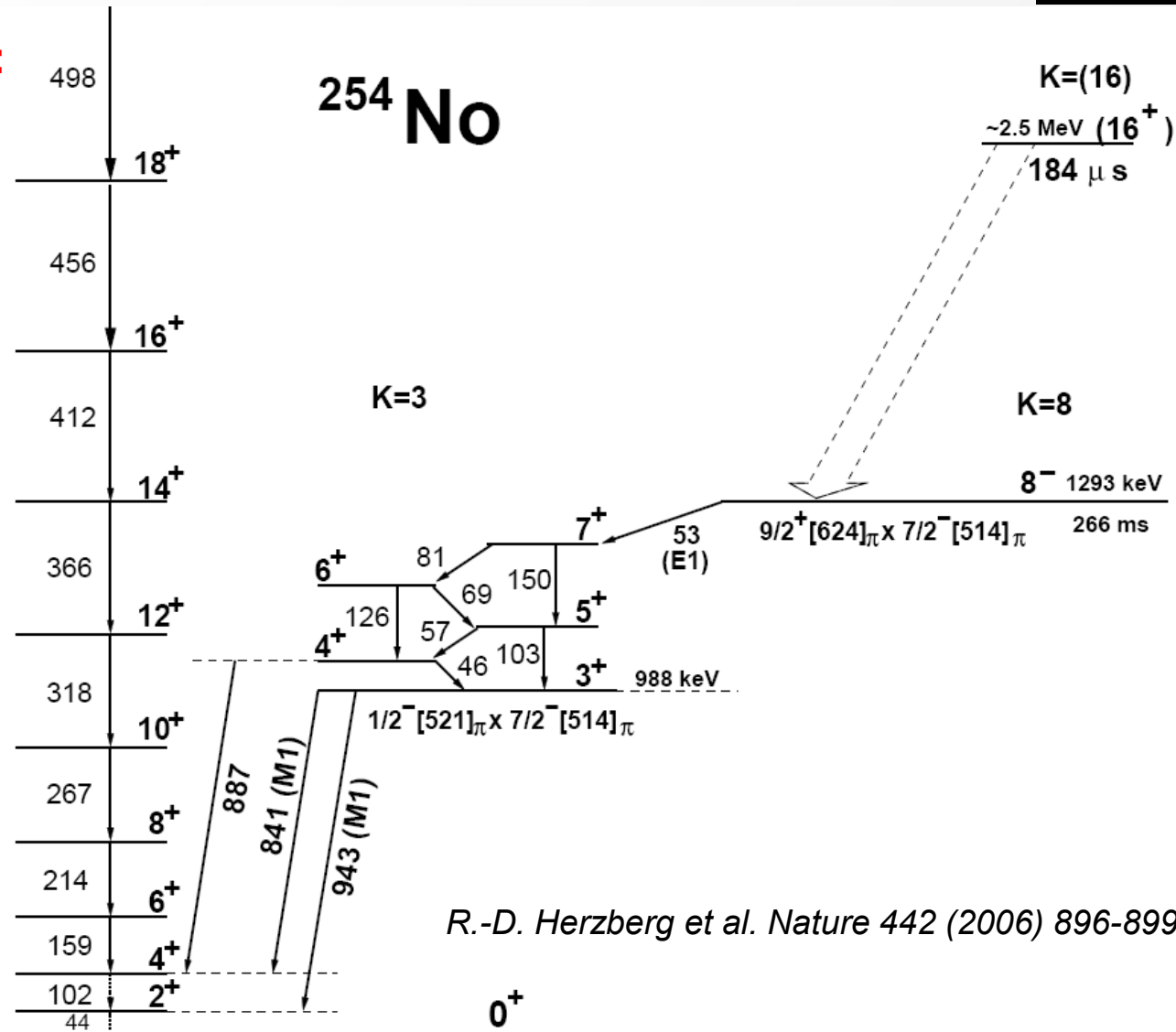
$\pi 7/2^- [514] \otimes \pi 9/2^+ [624]$



100



Z



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

K-hindrance

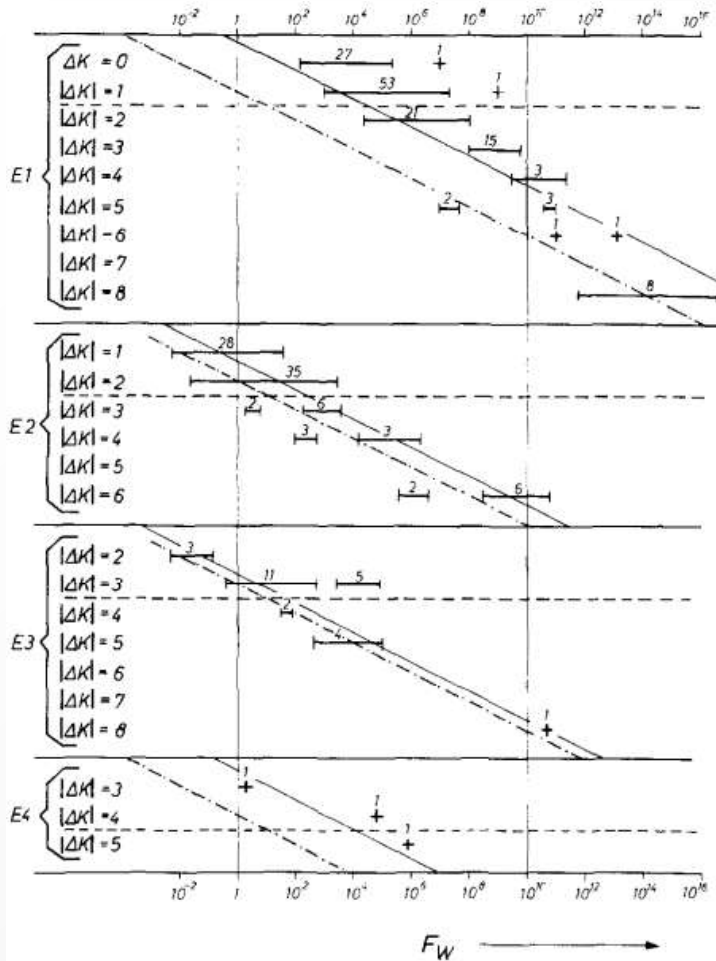


Fig. 1. Range of hindrance factors relative to the Weisskopf estimate F_W of electric γ -ray transitions for different $|\Delta K|$ values (for explanation see text).

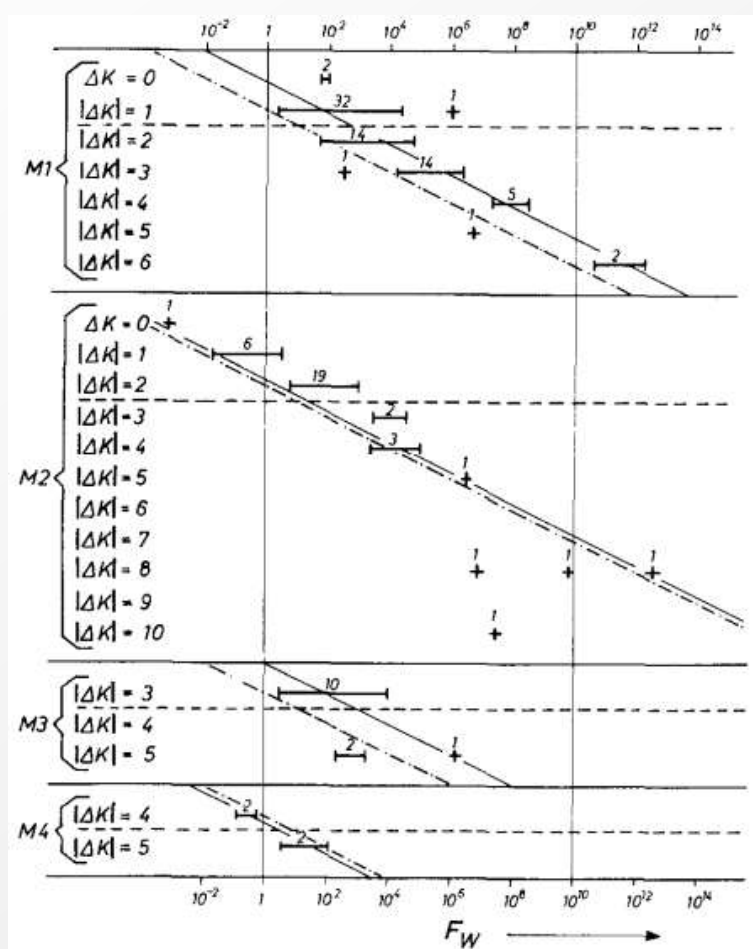


Fig. 2. Range of hindrance factors relative to the Weisskopf estimate F_W of magnetic γ -ray transitions for different $|\Delta K|$ values.

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

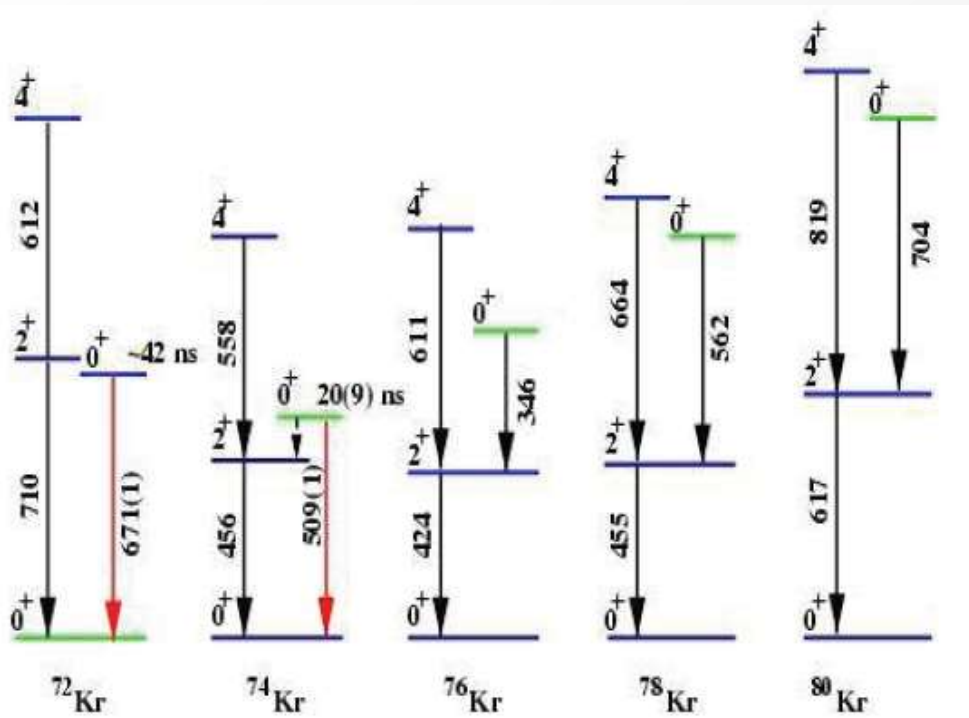
K.E.G. Lobner, *Physics Letters* 26B, 369 (1968)

Tvarové izoméry



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

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

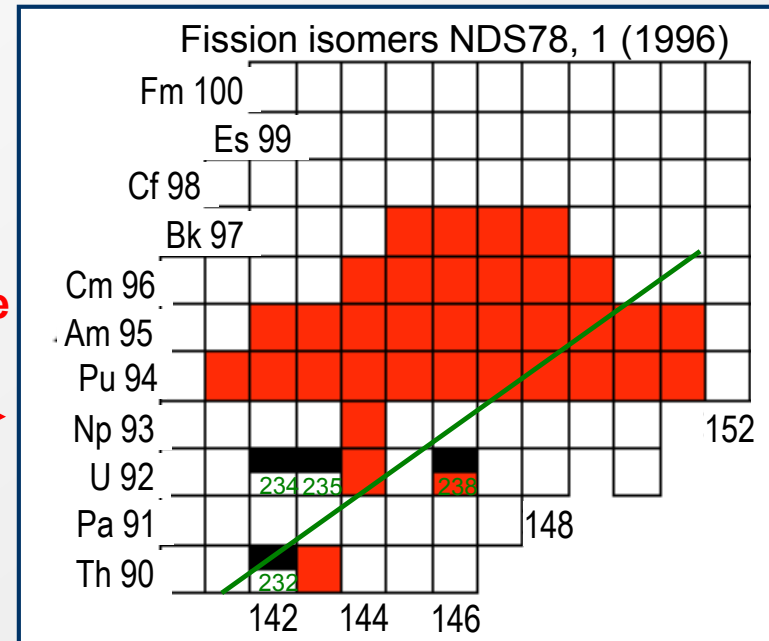
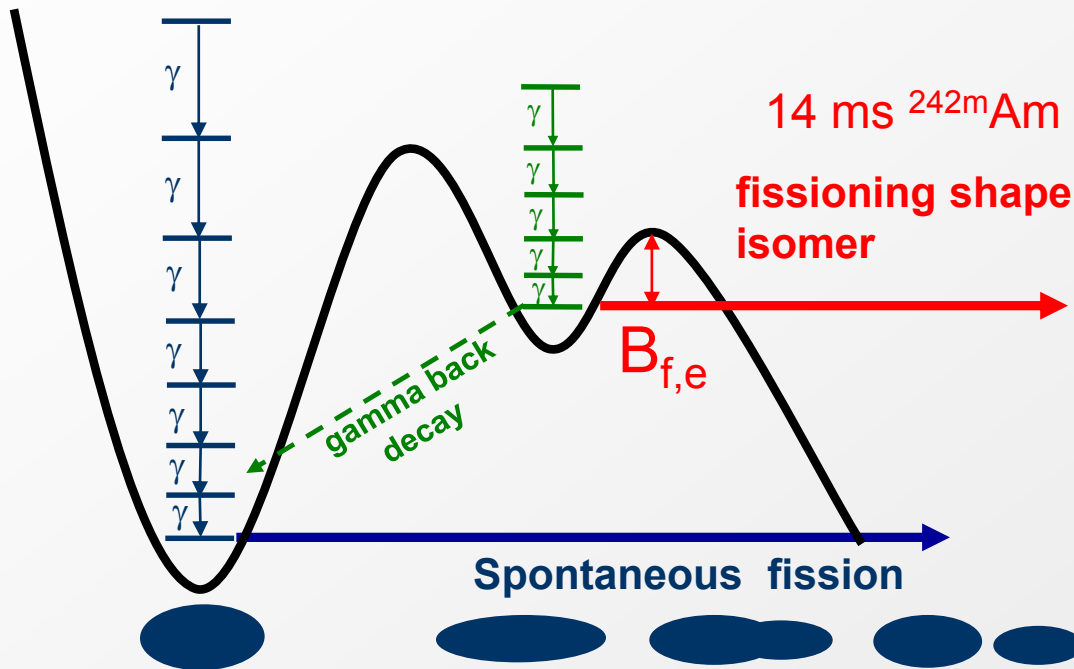


- Možná deexcitácia procesmi:
- a) Vnútrotná konverzia
 - b) Emisia e^+e^- párov ($E^* > 1022 \text{ keV}$)
 - c) Dvojfotónová emisia

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 páрно-párnych 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

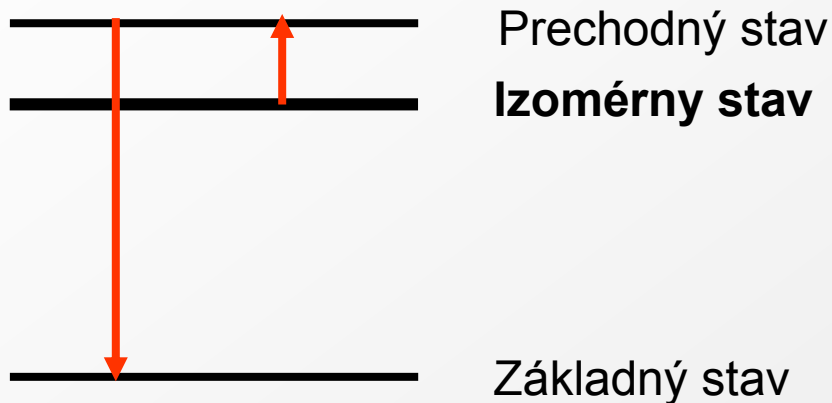
- Izomérické terče a zväzky – možnosť štúdia spinu na jadrové reakcie

Indukovaná deexcitácia



Možnosť uvoľniť energiu uloženú v izomére

Možné aplikácie, tohto času zväčša hypotetického charakteru.

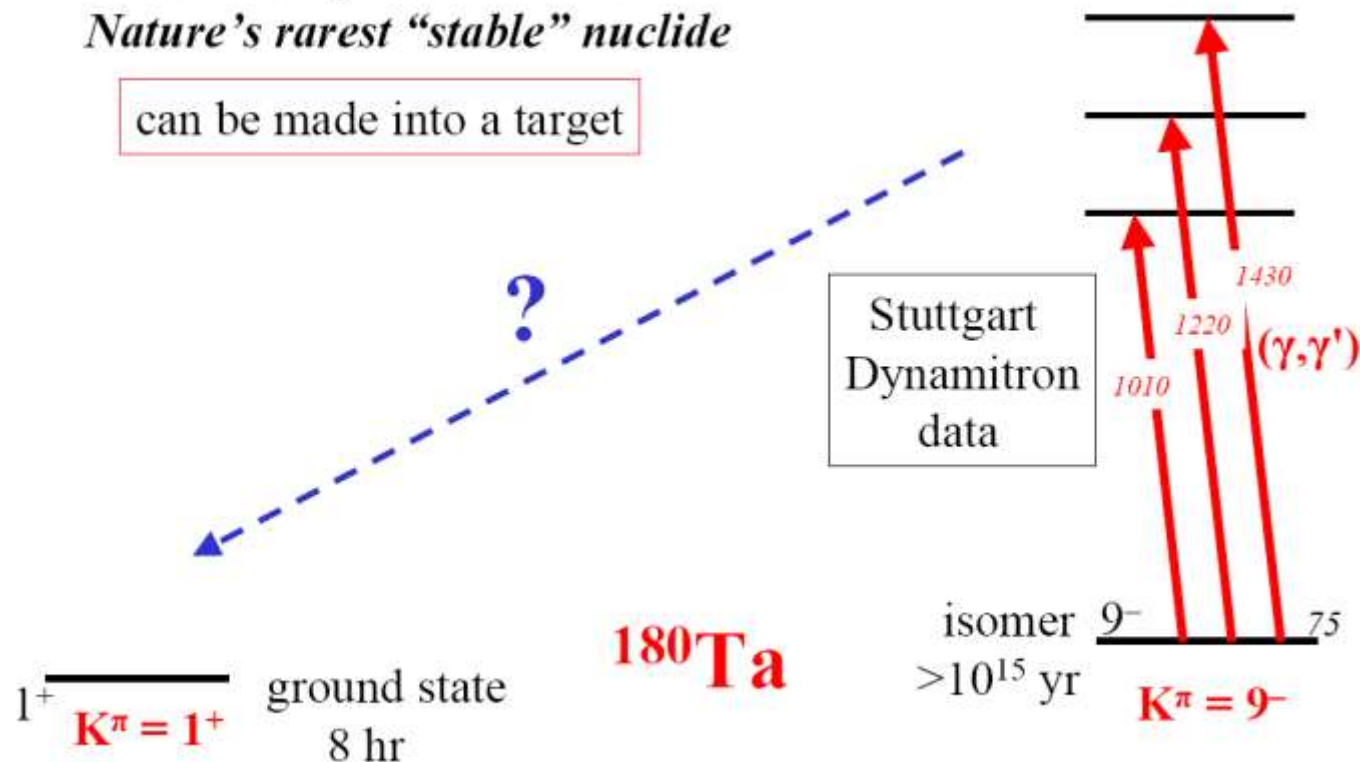


Deexcitácia ^{180}Ta



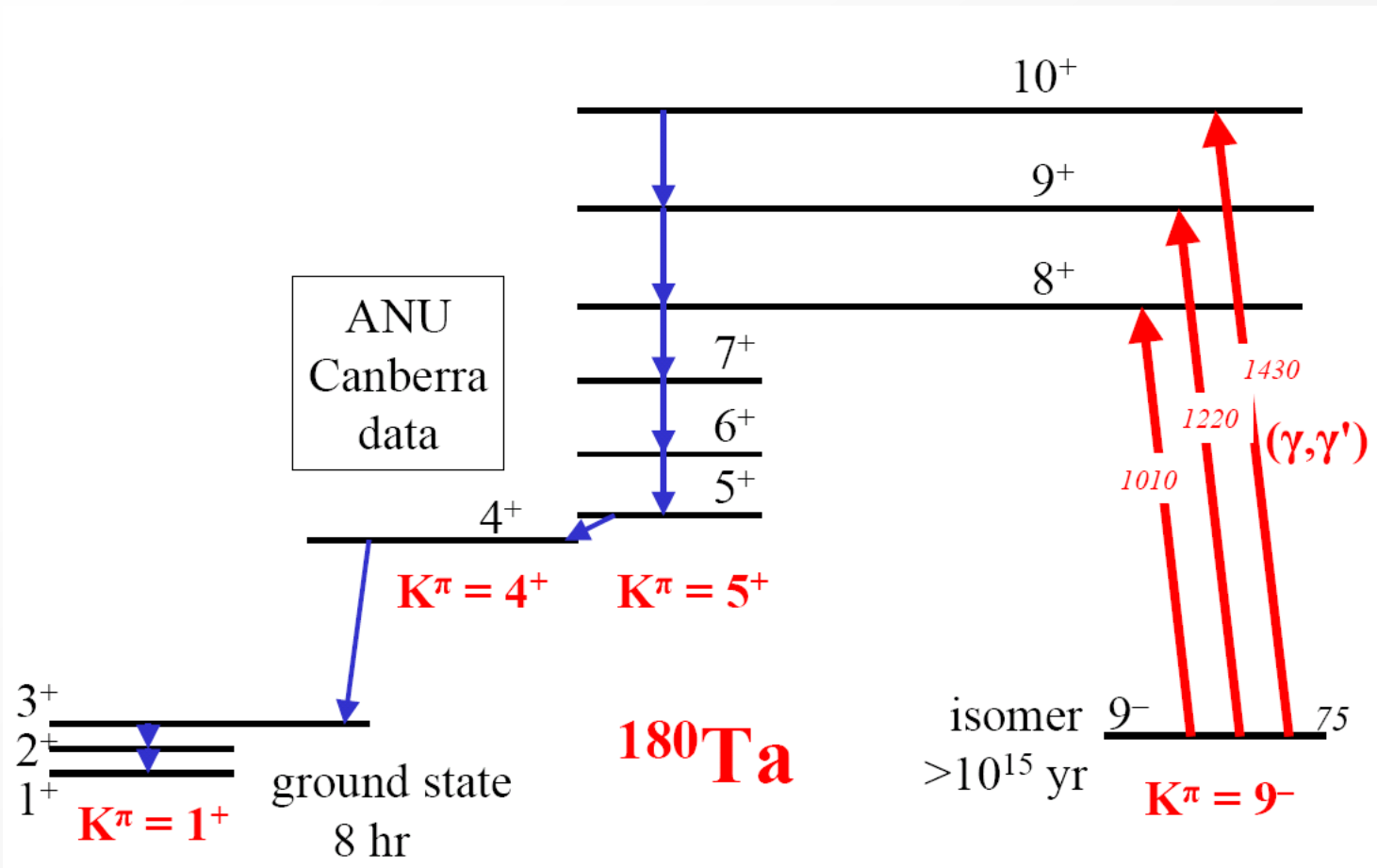
Nature's only "stable" isomer
Nature's rarest "stable" nuclide

can be made into a target



[Belic et al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 5242]

Deexcitácia ^{180}Ta



P. Walker et al. Phys. Rev. C64 (2001) 061302

Hypotetické využitia – gamma lasery, zbrane, batérie...

Napr. 1g $^{182\text{m}2}\text{Hf}$ má v sebe 10000 krát viac energie ako 1g TNT (testy neboli úspešné)

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)

