

Jadrová spektroskopía

Gama spektroskopía





Predpokladané poznatky



- Určovanie charakteru deexcitácií jadra ako napr. $2^+ \rightarrow 0^+$ je E2 (L=2, parita sa nemení)
- Pojmy ako vnútorná konverzia či auger elektróny
- Weisskopf vzťahy pre pravdepodobnosť prechodu

Vnútorňá konverzia

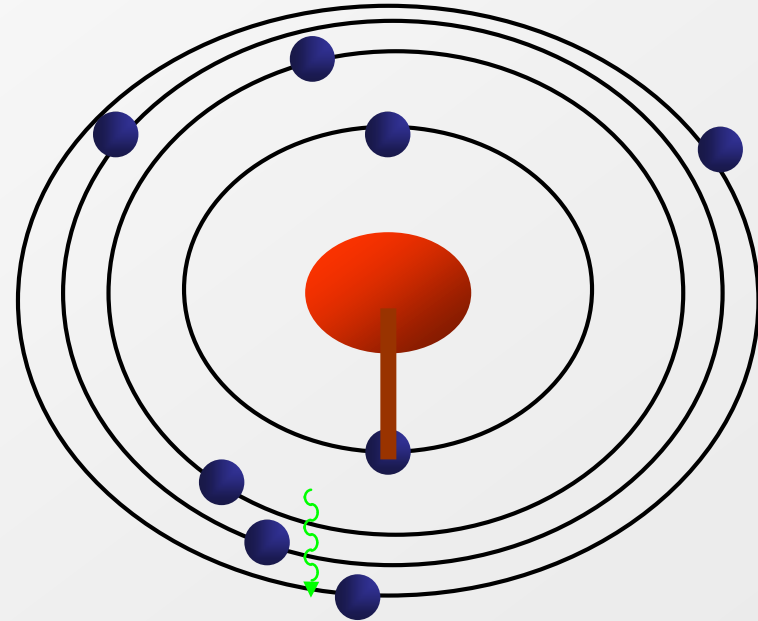
Elektromagnetické pole jadra môže interagovať s elektrónom v atómovom obale a odovzdať mu energiu postačujúcu na opustenie atómového obalu.

Energia emitovaného elektrónu je:

$$E_e = \Delta E - B_e - T_r$$

B_e - väzbová energia elektrónu

T_r - kinetická energia jadra



Pozor: ide o odlišný proces ako fotoefekt!



Väzbové energie elektrónov

B_e pre Polónium

K vrstva 93.1 keV

L_1 vrstva 16.9 keV

L_2 vrstva 16.2 keV

L_3 vrstva 13.8 keV

M_1 vrstva 4.1 keV

M_2 vrstva 3.8 keV

...

M_5 vrstva 2.7 keV

N_1 vrstva 0.9 keV

...

$K_{\alpha 1}$ 76.2 keV $I \approx 0.19$

$K_{\alpha 2}$ 76.9 keV $I \approx 27.7$

$K_{\alpha 3}$ 79.3 keV $I \approx 46.1$

...



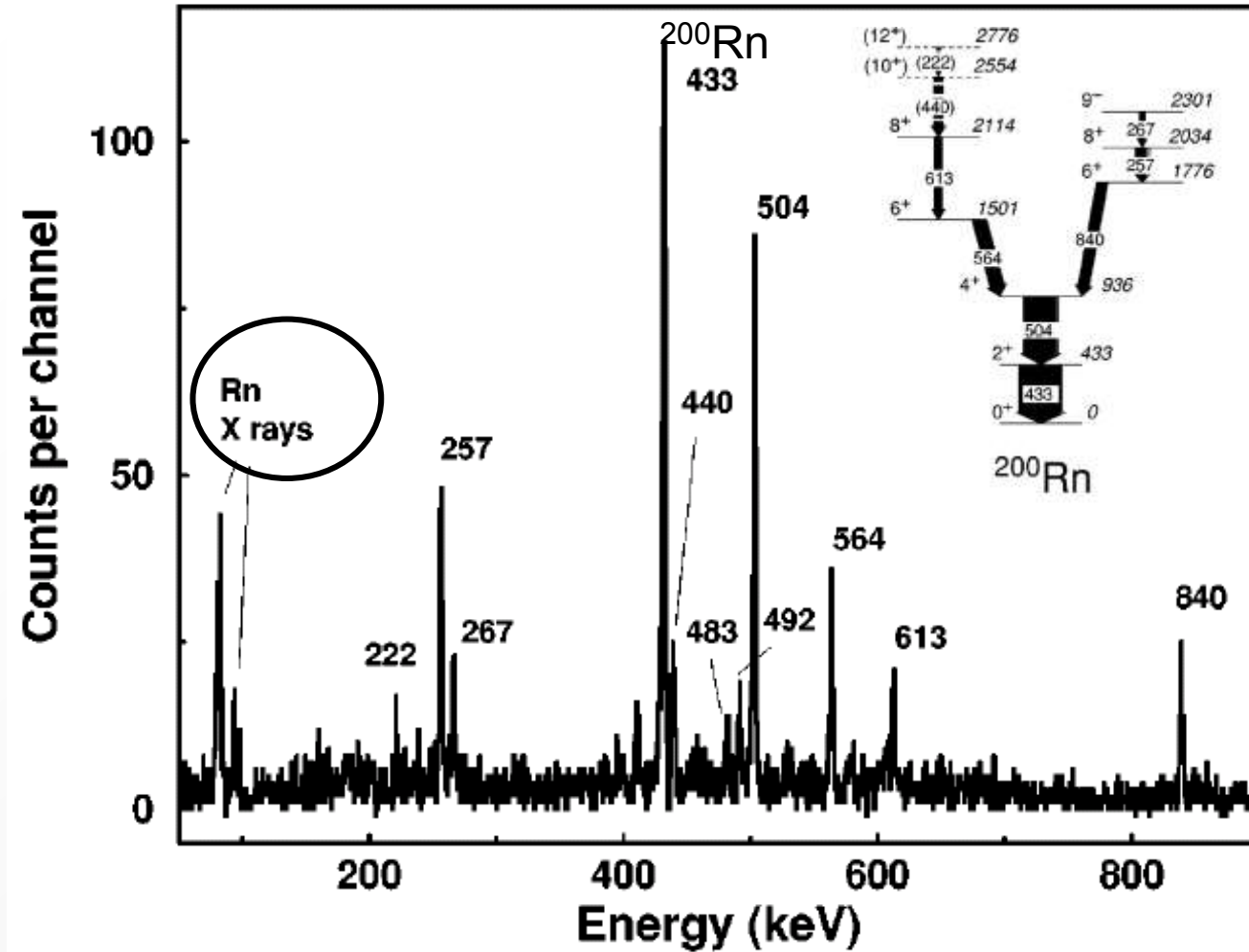
Označovanie X-ray prechodov



Classical designation (Siegbahn notation)	Associated initial - final shell vacancies
K_{α_1}	K - L ₃
K_{α_2}	K - L ₂
K_{α_3}	K - L ₁
K_{β_1}	K - M ₃
K_{β_2}	K - N ₂ N ₃
K_{β_3}	K - M ₂
K_{β_4}	K - N ₄ N ₅
K_{β_5}	K - M ₄ M ₅
KO _{2,3}	K - O ₂ O ₃
KP _{2,3}	K - P ₂ P ₃
L_{α_1}	L ₃ - M ₅
L_{α_2}	L ₃ - M ₄
L_{β_1}	L ₂ - M ₄
$L_{\beta_{2,15}}$	L ₃ - N ₄ N ₅
L_{β_3}	L ₁ - M ₃
L_{β_4}	L ₁ - M ₂

R. B. Firestone Table of isotopes
8th edition (1996) table F-43

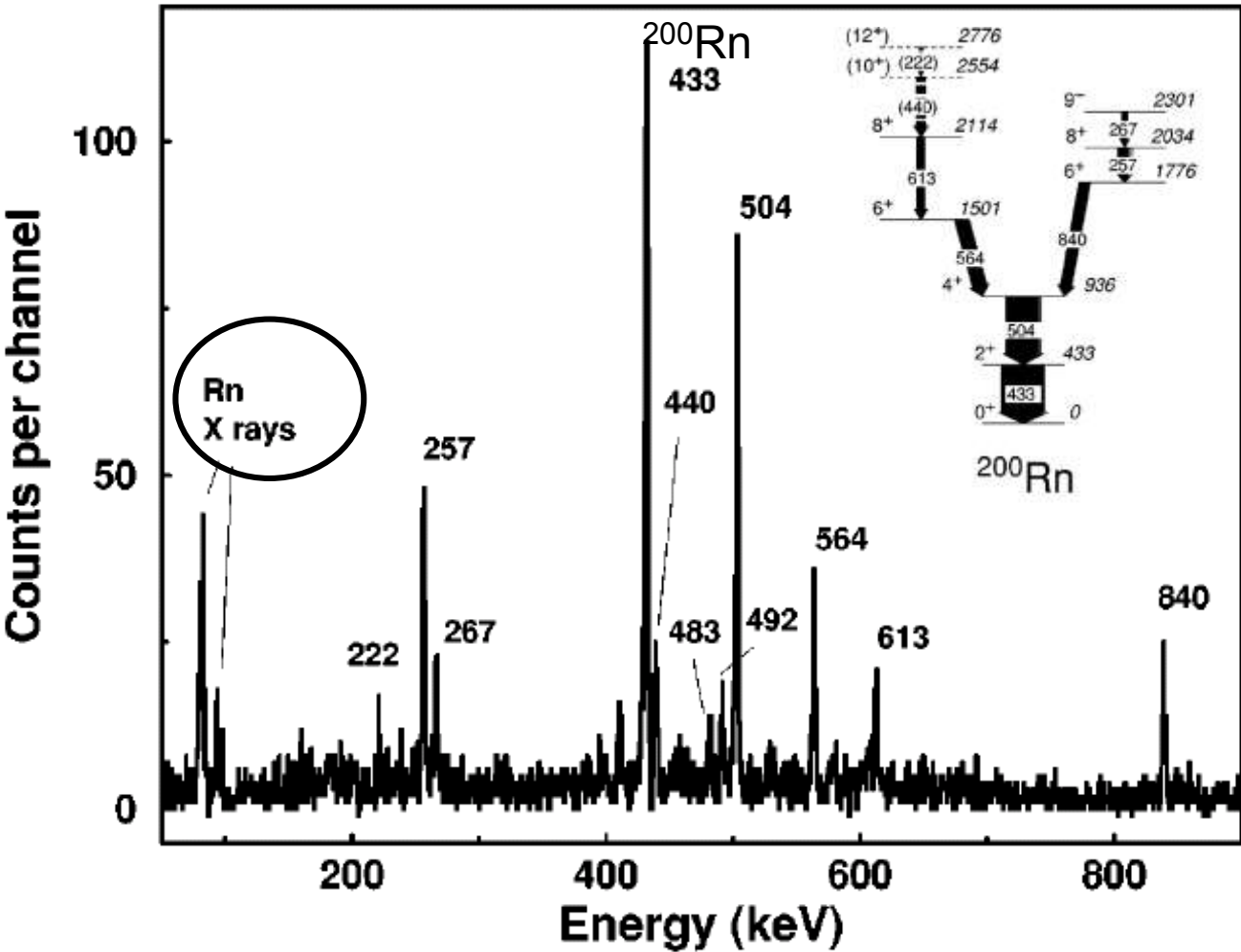
K-X-rays



V meraniach sa okrem γ kvánt registrujú taktiež RTG kvantá typické pre príslušný prvok. Napr. pri deexcitácii kolektívnych excitácií ^{200}Rn sa emitujú príslušné energie gama prechodov a taktiež aj RTG prechody s typickými energiami pre Rn.

Dobson et al Phys. Rev. C66 (2002) 064321

K-X-rays



Priradenie RTG kvánt sa realizuje zvyčajne na základe súladu energií a pomeru. Ten je nemenný pre príslušný chemický prvok. Napr. RTG kvantá z konverzie na K vrstve pre radón sú:

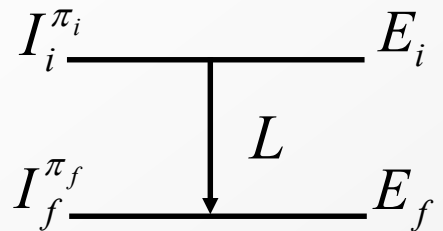
- $K_{\alpha 1}$ 83.8 keV $I \approx 46$
- $K_{\alpha 2}$ 81.1 keV $I \approx 27.9$
- $K_{\alpha 3}$ 80.3 keV $I \approx 0.06$

Dobson et al Phys. Rev. C66 (2002) 064321

Koeficient vnútornej konverzie

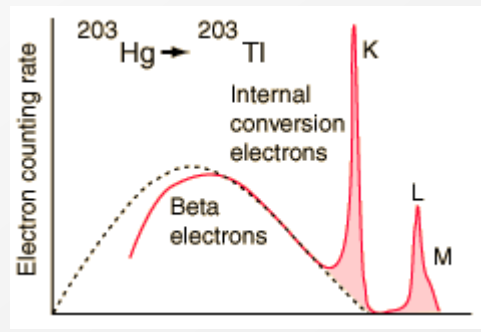
$$\alpha^{tot} = \frac{I_{ce}}{I_{\gamma}} = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \dots$$

Celkový koeficient vnútornej konverzie je súčtom koeficientov konverzie na jednotlivých vrstvách v atómovom obale.



$$E_{\gamma} = E_i - E_f$$

$$E_i = E_{\gamma} - B_i, i = K, L, \dots$$



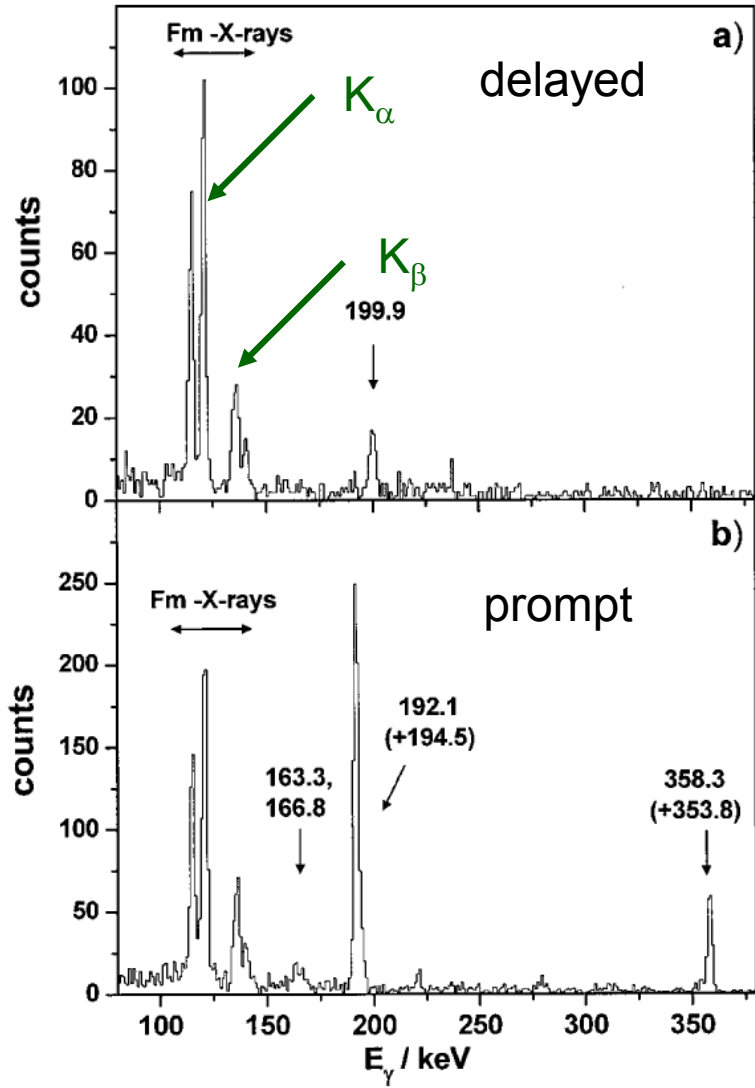
$$\alpha_K(EL) \propto Z^3 \left(\frac{L}{L+1} \right) \left(\frac{2m_e c^2}{E} \right)^{L+5/2}$$



Vnútrná konverzia narastá s protónovým číslom

Vnútrná konverzia narastá s klesajúcou energiou prechodu.

K-X-rays



Vzbudený stav dcérskeho jadra, obsadený rádioaktívnym rozpadom, sa môže deexcitovať emisiou γ alebo RTG kvanta.

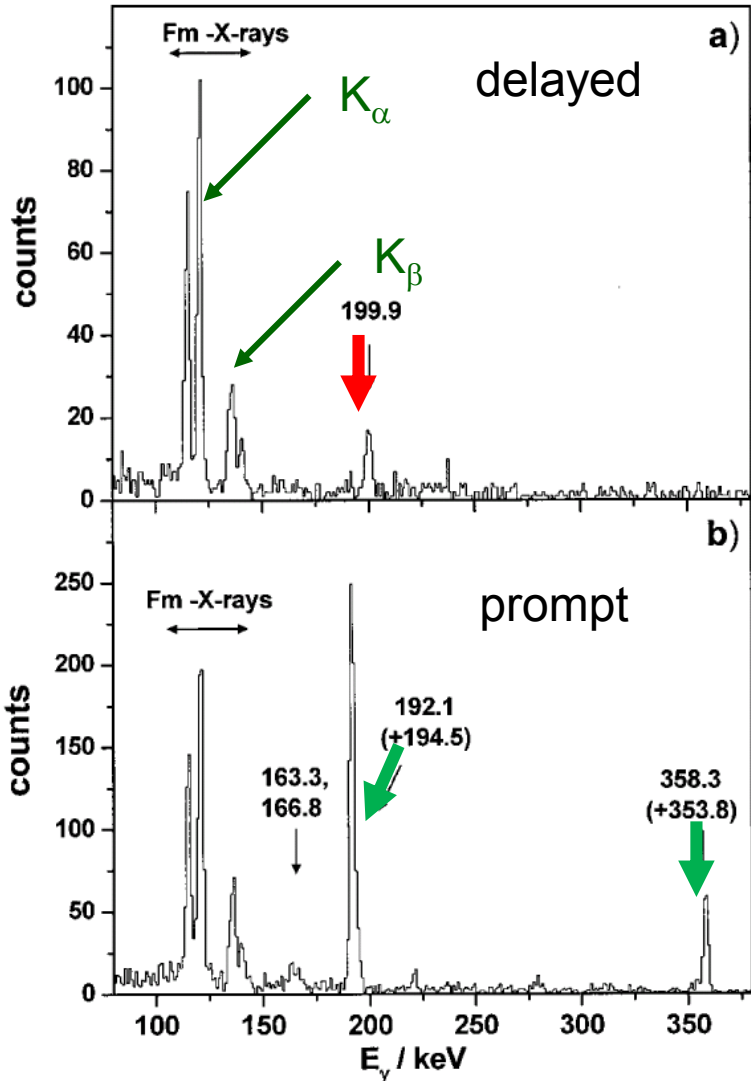
Preto keď sledujeme napríklad fotóny registrované detekčným systémom (zvyčajne Ge detektory) v koincidencii s α rozpadmi môžeme vidieť samotné gama prechody, alebo RTG kvantá dcérskeho izotopu.

Príklad ukazuje spektrá fotónov registrovaných okamžite, alebo oneskorene po α rozpade vrátane charakteristických prechodov pre fermium:

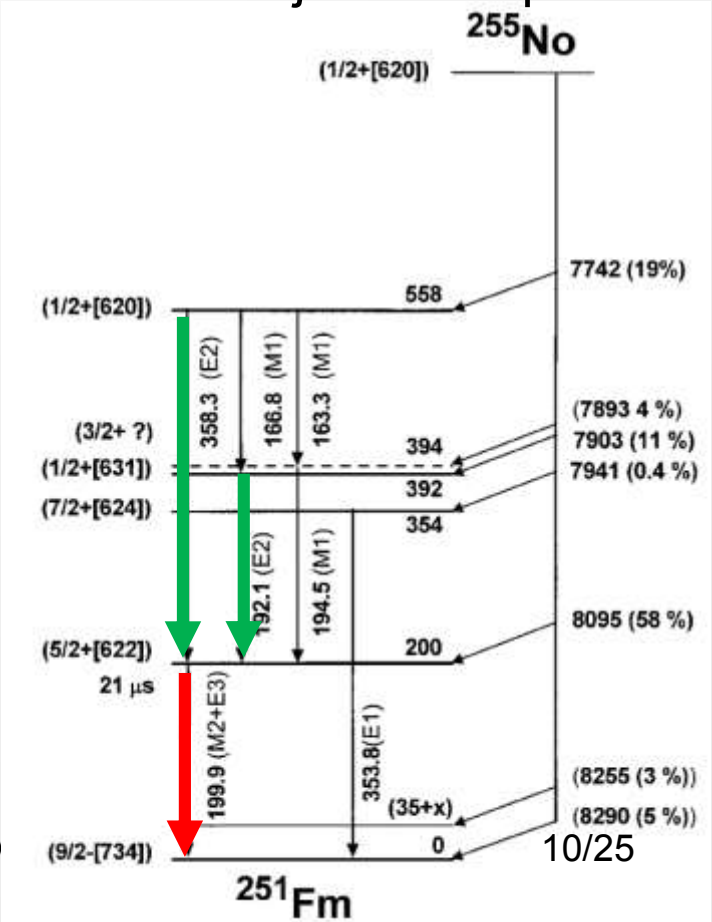
- $K_{\alpha 1}$ 121.6 keV $I \approx 44.1$
- $K_{\alpha 2}$ 115.3 keV $I \approx 28.9$
- $K_{\alpha 3}$ 114.3 keV $I \approx 0.20$

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

K-X-rays



a) Z pomeru emitovaných γ a RTG kvant pri deexcitácii vzbudeného stavu viem určiť koeficient vnútornej konverzie (pozor na účinnosti detektorov). Následne viem určiť charakter prechodu a teda aj zmenu spinu resp. parity.

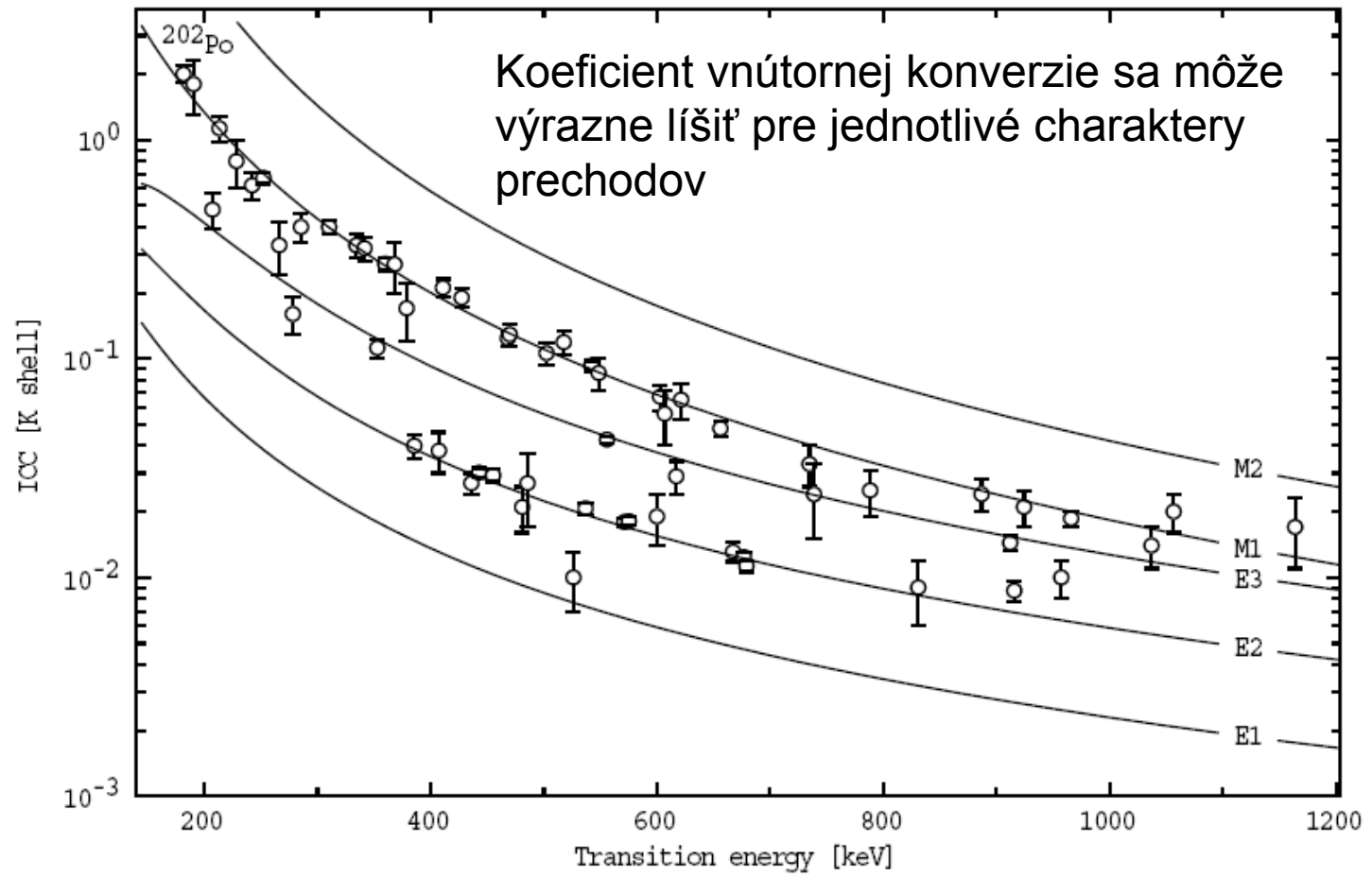


F.P. Hessberger et al. Eur. Phys. J. A66 (2006) 165

26. 4. 2018

MSJS - Gamma prechody

Koeficient vnútornej konverzie vs. charakter prechodu





BrICC



<http://bricc.anu.edu.au/>

Koeficient vnútornej konverzie (ICC – internal conversion coefficient) závisí od protónového čísla, energii prechodu a multipolarity žiarenia.

Zaujíma nás najmä:
Celkový koeficient vnútornej konverzie
Koeficient konverzie na jednotlivých vrstvách

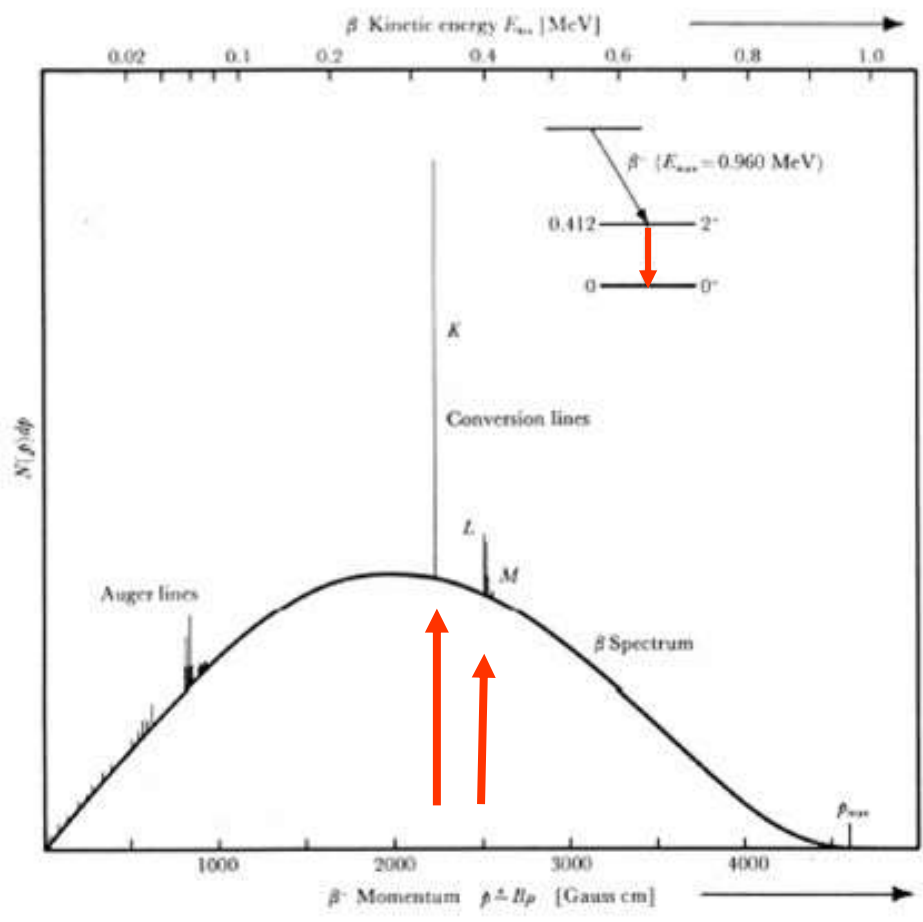
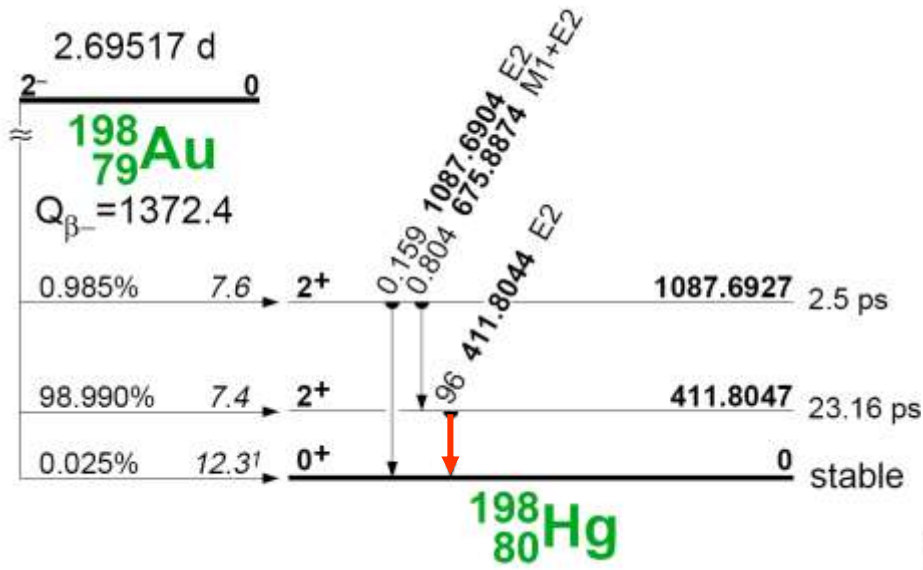
Z (atomic number or symbol)

 γ-energy (in keV)
 Uncertainty
 Enter (optional) uncertainty in energy as **x** or **+x-y**
 Multipolarity
 δ Uncertainty
 Enter (optional) uncertainty in δ as **x** or **+x-y**
 Show Subshells Data Set

BrIccS v2.3 (9-Dec-2011)
 Z=87 (Fr, Francium)
 γ-energy: 256 keV
 Data Sets: BrIccFO

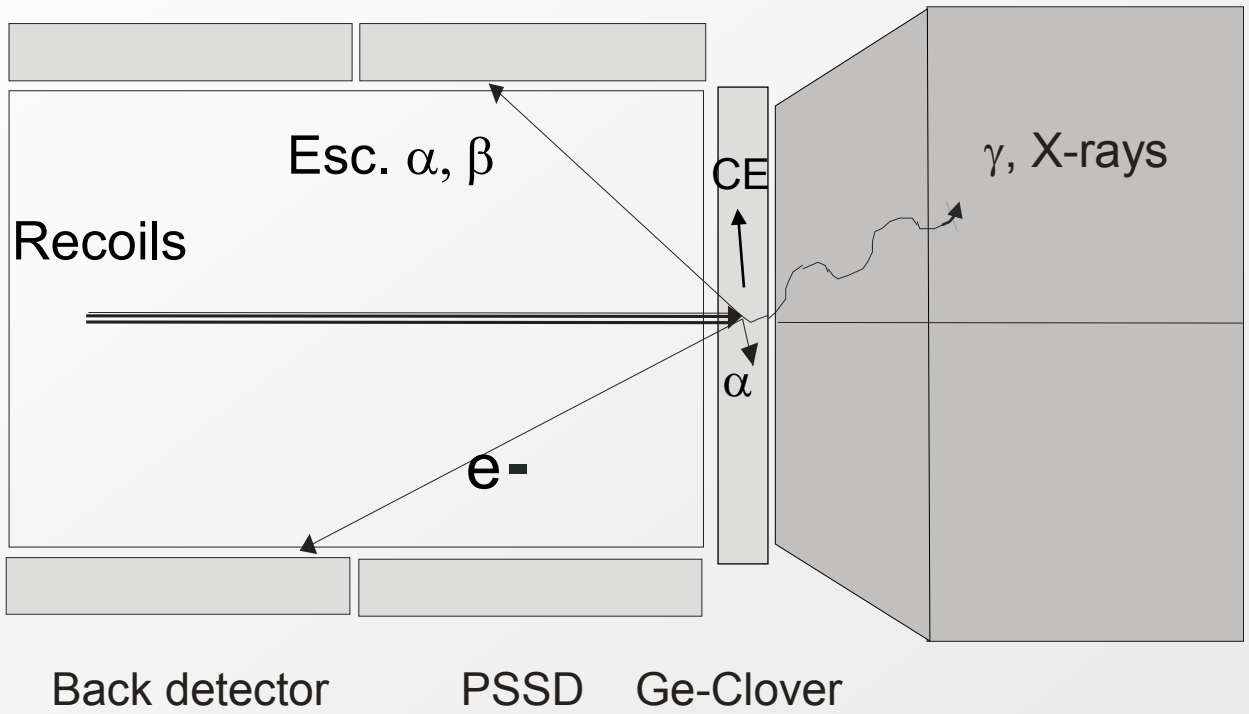
Shell	E(ce)	E2
Tot		0.238 (4)
K	154.87	0.0979 (14)
L-tot	238.76	0.1034 (15)
K/L		0.946 (19)
M-tot	251.83	0.0275 (4)
L/M		3.76 (8)

Elektróny z vnútornej konverzie

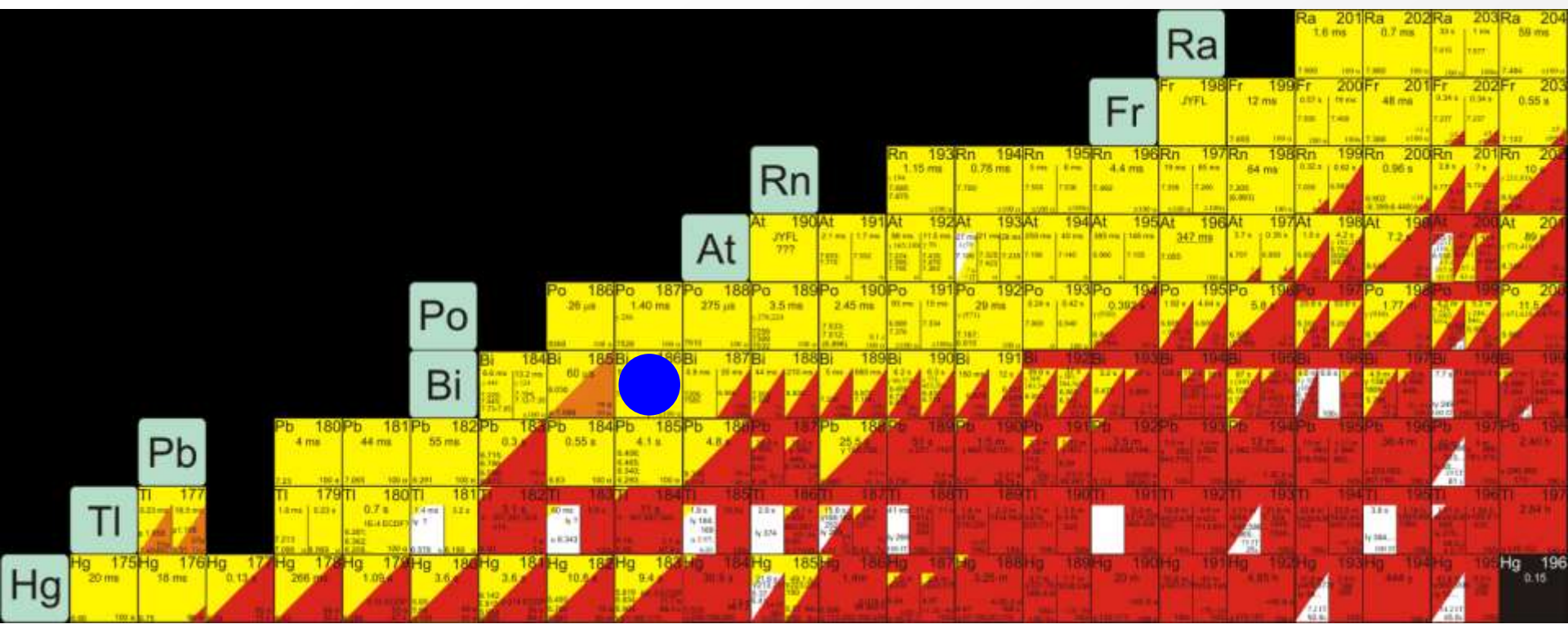


Rozpad jadra implantovaného v detektore

Špecifický prípad – alfa rozpad jadra implantovaného v detektore. V prípade alfa rozpadu na vzбудenú hladinu detektor registruje nielen alfa rozpady, ale aj elektróny z vnútornej konverzie, pričom príde k sumácii signálu.



α - CE summing – example



α - CE summing – problém implantovaných jadier

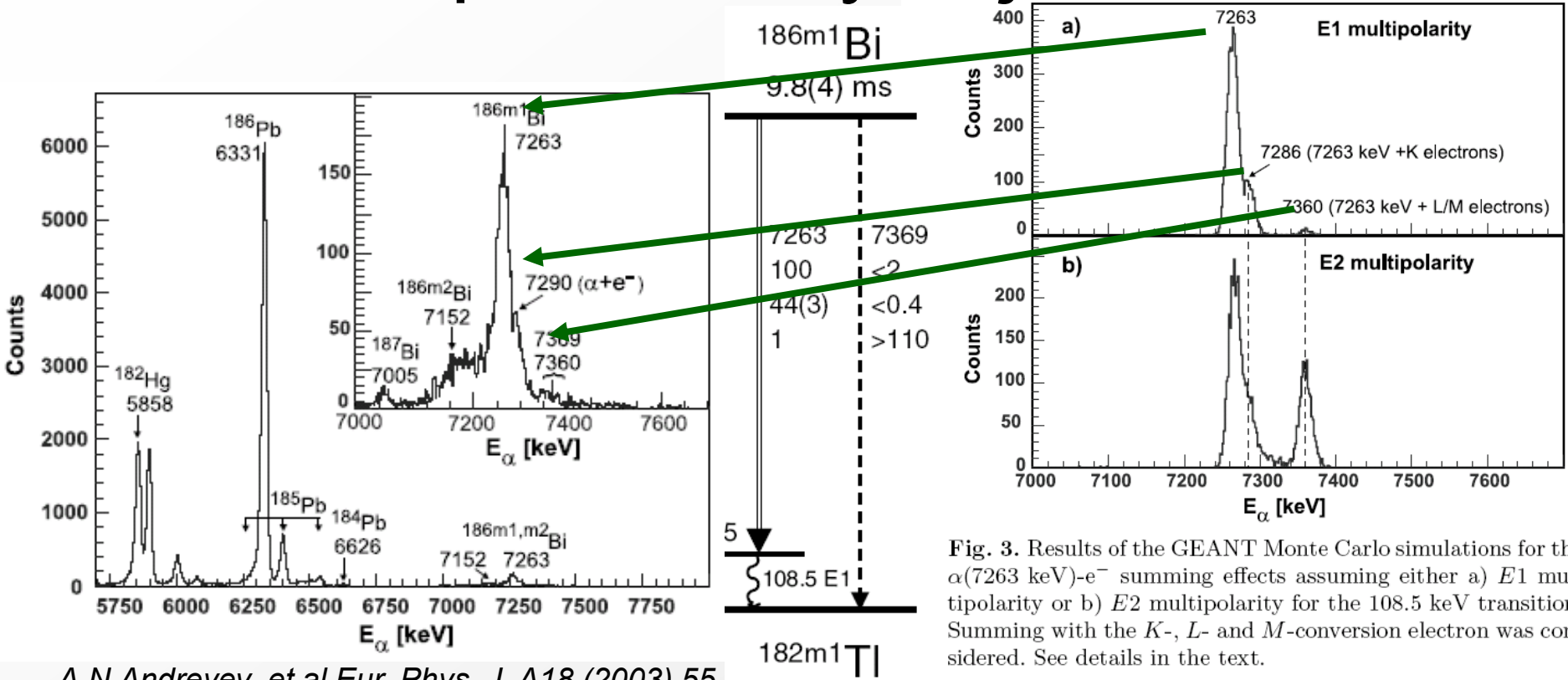


Fig. 3. Results of the GEANT Monte Carlo simulations for the $\alpha(7263 \text{ keV})-e^-$ summing effects assuming either a) $E1$ multipolarity or b) $E2$ multipolarity for the 108.5 keV transition. Summing with the K -, L - and M -conversion electron was considered. See details in the text.

A.N.Andreyev et al Eur. Phys. J. A18 (2003) 55-

V koincidencii so 7263 keV α rozpadom sa registroval 108 keV gamma prechod

<http://wwwrphysse.anu.edu.au/nuclear/bricc/>

$$\alpha_{\text{tot}}(E1) = 0.35 \quad \alpha_{\text{tot}}(E2) = 4.2 \quad \alpha_{\text{tot}}(M1) = 6.8 \quad \alpha_{\text{tot}}(M2) = 53.5$$

Pravdepodobnosť emisie gama kvanta

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

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

kde R je polomer jadra vo fm, energia je v MeV a l je zmena spinu.

S rastúcou multipolaritou prechodu a klesajúcou energiou klesá pravdepodobnosť prechodu. Vysoký rozdiel spinu medzi dvomi hladinami môže spôsobiť vznik izoméru.



Porovnanie E1 a E2 prechodu

Príklad: Máme E1 a E2 prechod s $E_\gamma = 1$ MeV pre jadro s $A = 100$.

Aké sú pomery pravdepodobnosti prechodu?

$$R = 1.25 \times 100^{1/3} = 5.80 \text{ fm}$$

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

$$\lambda_{electric} = 10^{21} \frac{4.4(2)}{l[3]^2} \left(\frac{3}{4}\right)^2 \left(\frac{1}{197}\right)^3 5.8^2 = 1.21 \times 10^{15} \text{ sec}^{-1} \quad T_{1/2} = 5 \times 10^{-16} \text{ s}$$

$$\lambda_{electric} = 10^{21} \frac{4.4(3)}{l[5 \cdot 3 \cdot 1]^2} \left(\frac{3}{5}\right)^2 \left(\frac{1}{197}\right)^5 5.8^4 = 4.03 \times 10^{10} \text{ sec}^{-1} \quad T_{1/2} = 2 \times 10^{-11} \text{ s}$$

Porovnanie E2 a M2

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

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

$$\frac{\lambda_{electric}}{\lambda_{magnetic}} = 2.3R^2$$

$$T_{1/2} = 2 \times 10^{-11} \text{ s}$$

Pre E2 v jadre s $A = 100$ a $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ máme $\lambda = 4 \times 10^{10} \text{ sec}^{-1}$

Pre M2 v jadre s $A = 100$ a $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ máme $\lambda = 5.2 \times 10^8 \text{ sec}^{-1}$

$$T_{1/2} = 1.5 \times 10^{-9} \text{ s}$$

Porovnanie pre M2: 1MeV vs 0.5 MeV

$$T_{1/2} = 1.5 \times 10^{-9} \text{ s}$$

Pre M2 v jadre s $A = 100$ a $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ máme $\lambda = 5.2 \times 10^8 \text{ sec}^{-1}$

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

$$1 \text{ MeV} \rightarrow 0.5 \text{ MeV} \Rightarrow \lambda(0.5 \text{ MeV})/\lambda(1 \text{ MeV}) = 0.125$$

Pre M2 v jadre s $A = 100$ a $E_\gamma = 0.5 \text{ MeV}$ máme $\lambda = 6.5 \times 10^7 \text{ sec}^{-1}$

$$T_{1/2} = 1.2 \times 10^{-8} \text{ s}$$