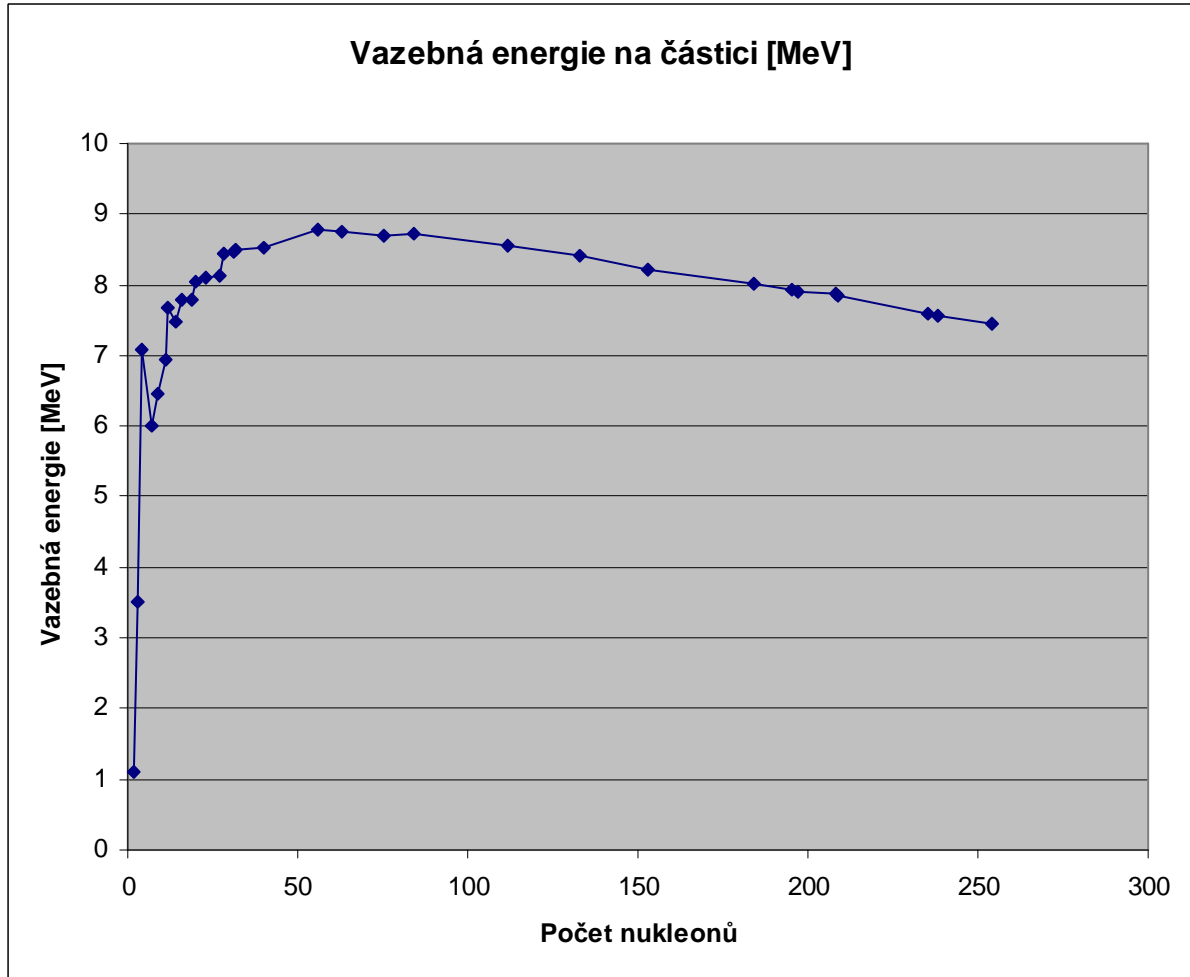


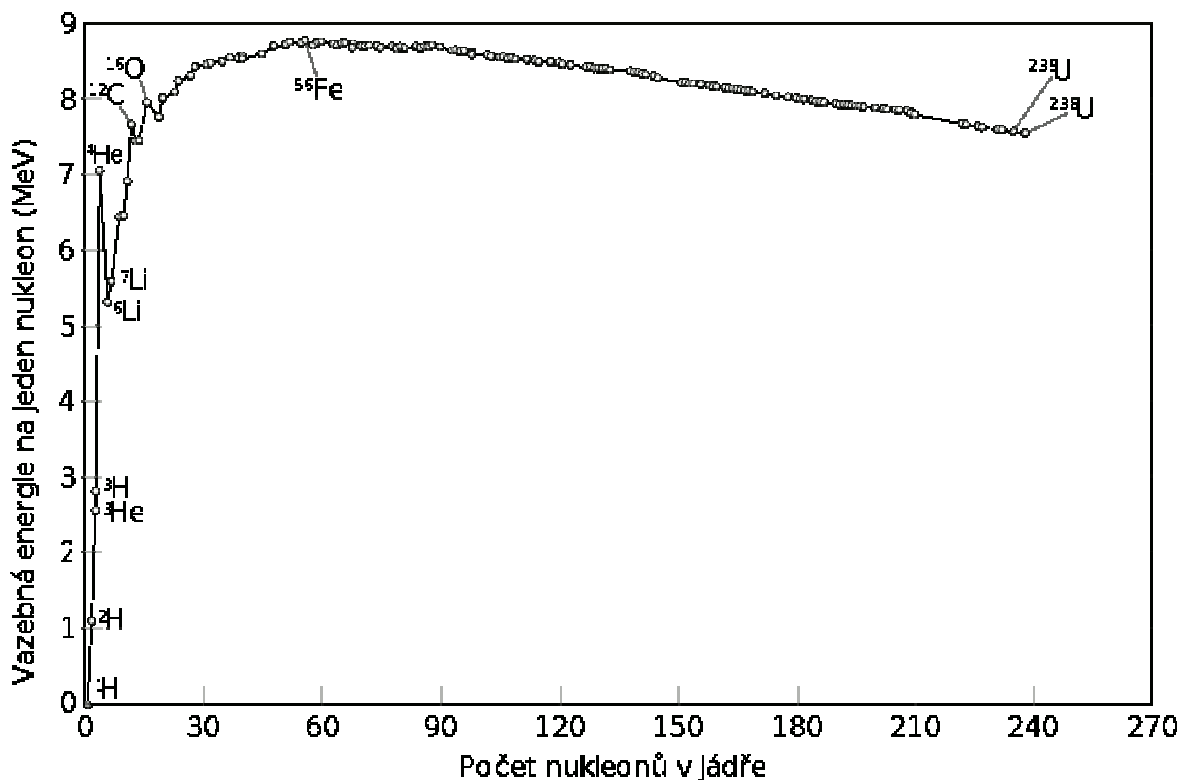
### 6.3.5 Radioaktivita

**Předpoklady: 6304**

Graf závislosti vazebné energie na počtu částic v jádře pro částice z minulé hodiny



Stejný graf pro větší počet jader



Zdroj: Wikipedia.cz

**Př. 1:** Jak se podle grafu mění vazebná energie připadající na jeden nukleon s počtem nukleonů. Při jakých jaderných reakcích (reakce při kterých se jádra spojují nebo rozbíjejí) se uvolňuje energie?

- Pro jádra s počtem nukleonů menším než 56 vazebná energie při zvětšování jádra většinou roste (částice jsou v jádře drženy čím dál pevněji a mají čím dál menší energii).
- Pro jádra s počtem nukleonů větším než 56 vazebná energie při zvětšování jádra klesá (částice jsou v jádře drženy čím dál volněji a mají čím dál větší energii).

Při výrobě energie energii uvolňujeme  $\Rightarrow$  energie částic musí klesat  $\Rightarrow$

- můžeme slučovat lehká jádra do jader těžších (ale ne moc těžších než je jádro  $^{56}_{26}\text{Fe}$ ),
- můžeme rozbít těžká jádra (těžší než  $^{56}_{26}\text{Fe}$ ) na jádra lehčí.

Po svém vzniku obsahoval vesmír z velké většiny vodík a téměř žádná jádra větší než  $^7_3\text{Li}$   $\Rightarrow$  těžší jádra vznikají slučováním lehčích ve hvězdách.

**Př. 2:** Jaký důsledek má slučování jader ve hvězdě? K jak velkým jádrům může hvězda slučováním dojít?

Slučováním jader vzniká obrovské množství energie  $\Rightarrow$  hvězda září.

Vznik prvků za železem spotřebovává energii  $\Rightarrow$  "hasí" by hvězdu  $\Rightarrow$  hvězda vyrábí jádra lehčí než železo.

Prvků těžších než železo vzniká jen málo a většinou pouze při extrémních událostech jako jsou výbuchy supernov (kdy se také z hvězdy dostávají do okolního porstoru).

Existují magická nukleonová čísla (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126), tato jádra mají sférický tvar a jsou mimořádně stabilní.

Přesný popis chování nukleonů v jádře nemáme (neumíme přesně popsat jadernou sílu)  $\Rightarrow$  modely částečně vysvětlující vlastnosti jader.

#### **Kolektivní model**

- Nukleony se v jádře chaoticky pohybují a silně na sebe působí (jako částice v kapce vody).
- Dobře vysvětluje jaderné štěpení a jiné jaderné reakce.

#### **Model nezávislých částic**

- Nukleony jsou popsány kvantovými čísly, a protože patří mezi fermiony, nemohou být najednou ve stejném stavu. Aby mohlo dojít ke srážce, musí existovat prázdné stavy, do kterých by mohly nukleony po srážce přejít, takových stavů je málo  $\Rightarrow$  srážky jsou vzácné.
- Dobře popisuje existenci magických čísel, problémy se štěpením.

#### **Kombinovaný model**

- Část nukleonů tvoří uzavřené slupky s magickými počty nukleonů (slupky se chovají jako v modelu nezávislých částic), okolo kterých se chaoticky ohybují ostatní nukleony, které tím vytváří nepravidelnosti (jako v kolektivním modelu).

Většina jader je nestabilní a časem se rozpadá. Jakým způsobem?  
Nestabilní (radioaktivní) jádra vyzařují různé druhy záření.

Přírodní radioaktivní záření:

- **záření  $\alpha$** : proud částic  ${}^4_2\alpha$  (jádra hélia), velká energie 2 až 8 MeV, velká hmotnost částic, elektrický náboj  $\Rightarrow$  značný vliv na okolí.  
Silná interakce s okolím  $\Rightarrow$  malý dosah (několik cm ve vzduchu, odstínění už listem papíru). Nebezpečí, pokud dochází k  $\alpha$  rozpadu přímo v těle.
- **záření  $\beta$  (někdy se značí také  $\beta^-$ )**: proud elektronů, energie desetin MeV, pronikavost řádově 100 x větší než u  $\alpha$  záření (1 m ve vzduchu, 1 mm v kovu).
- **záření  $\gamma$** : EM záření vlnové délky pod 300 pm, vzniká při přechodu jádra z excitovaného stavu (často jde o druhou fázi radioaktivní přeměny, která začala  $\alpha$  nebo  $\beta$  rozpadem). Nejpronikavější, nejvíce pohlcováno v látkách s velkou  $A_r$   $\Rightarrow$  stínění olovem (vyšetření na RTG) (intenzita se sníží na polovinu po průchodu 1 cm olova nebo 6 cm betonu).

Další druhy jaderného záření můžeme pozorovat u uměle připravených jader:

- **záření  $\beta^+$** : proud pozitronů, ostatní vlastnosti podobné záření  $\beta^-$ .
- **neutronové záření**: proud neutronů, neutrony nemají náboj  $\Rightarrow$  brzdí se pouze srážkami s jádry atomů. Pohlcením neutronu se některá stabilní jádra mění na radioaktivní.

**Př. 3:** Co je divného na existenci  $\beta^-$  a  $\beta^+$  záření? Navrhni řešení.

Záření  $\beta^-$  je proud elektronů vylétávajících z jádra, ale v jádře se žádné elektrony nevyskytují  $\Rightarrow$  elektrony musí v jádře vznikat (například přeměnou neutronu na proton).

Záření  $\beta^-$  je důsledkem přeměny neutronu na proton popsané rovnicí:

$n \rightarrow p + e^- + \nu$ , kde  $\nu$  je částice neutrino, která odnáší část uvolněné energie.

Záření  $\beta^+$  je důsledkem přeměny protonu na neutron  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ .

**Dodatek:** Neutrino patří mezi nejhůře polapitelné částice ve vesmíru, s hmotou interaguje velmi neochotně, jeho střední dráha (dráha, kterou urazí než se srazí z jinou částicí) má délku tisícovek světelných let. Jeho existence byla předpovězena v roce 1930, jako vysvětlení skutečnosti, že při  $\beta$  rozpadech se zmenšoval moment hybnosti soustavy a elektrony vylétaly s různou energií (chybějící moment hybnosti i různě velkou část energie odnáší z jádra právě neutrino). Detekováno bylo poprvé až v roce 1953, dosud není jasné, zda je jeho klidová hmotnost nulová nebo ne.

**Př. 4:** Zpomalování neutronů při průchodu látkou závisí na váze atomových jader. Jsou neutrony více zpomalovány v látkách s velkou nebo v látkách s malou relativní atomovou hmotností?

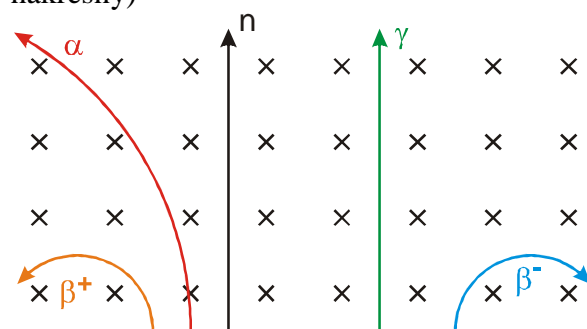
Už při rozboru Franck-Hertzova pokusu jsme si ukazovali, že pohybující se kulička předává energii nejnázne kuličkám o srovnatelné hmotnosti (pingpongový míček se od daleko těžší kuličky odrazí s téměř stejnou rychlostí)  $\Rightarrow$  neutrony budou lépe zpomalovat srážky s lehčími jádry.

Pronikavost neutronů v materiálech s těžkými jádry je větší než pronikavost  $\gamma$  záření, materiálech s lehkými jádry je situace obrácená.

**Př. 5:** Zakresli, jak se budou jednotlivé druhy záření chovat při průchodu magnetickým polem.

Magnetické pole působí na elektricky nabitě částice  $\Rightarrow$  působí na všechny druhy záření, kromě neutronů a  $\gamma$  záření.

Dráhy jednotlivých druhů záření v magnetickém poli (indukční čáry vstupují kolmo do nákresny)



Částice záření  $\beta^+$  a  $\beta^-$  jsou podstatně lehčí než částice záření  $\alpha$ , proto je magnetické pole stáčí po kružnici o menším poloměru.

**Př. 6:** K vytvoření jednoho páru iontů ve vzduchu je třeba energie 30 eV. Kolik párů iontů vytvoří ve vzduchu do úplného zbrždění částice  $\alpha$  ?

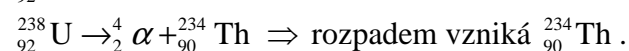
Energie částice  $\alpha$  2 až 8 MeV  $\Rightarrow$  střední hodnota 5 MeV.

$$n = \frac{5000000}{30} = 170000$$

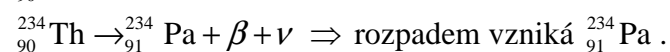
Částice  $\alpha$  vytvoří ve vzduchu typicky sto tisíc iontů.

**Př. 7:** Jedním z přírodních radioaktivních prvků je  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , který vyzařuje částice  $\alpha$  (takzvaný  $\alpha$  rozpad). Vzniklý nuklid se dále rozpadá, postupně se vyzáří dvě částice  $\beta$ . Jaké nuklidy při tomto ději postupně vznikají?

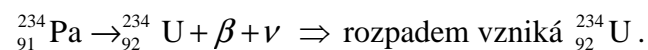
${}_{92}^{238}\text{U}$ , rozpad  $\alpha$   $\Rightarrow$  vzniká nuklid, který o dva neutrony a dva protony méně  $\Rightarrow$



${}_{90}^{234}\text{Th}$ , rozpad  $\beta$   $\Rightarrow$  vzniká nuklid, který o jeden neutron méně a jeden proton více  $\Rightarrow$

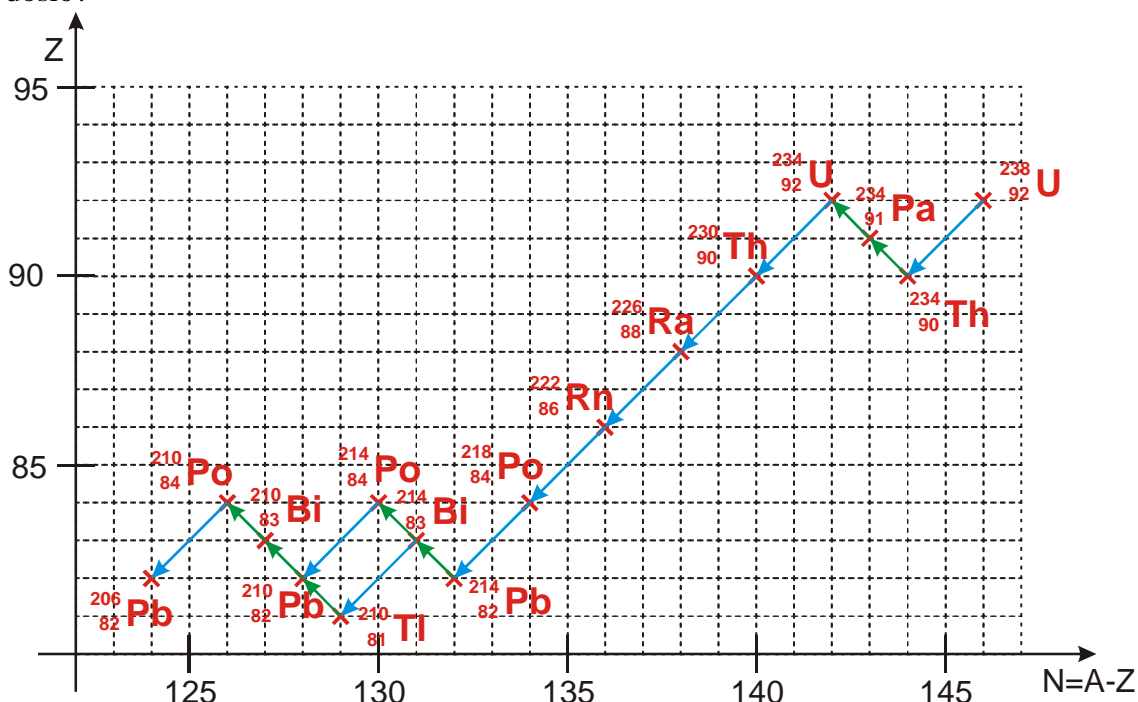


${}_{91}^{234}\text{Pa}$ , rozpad  $\beta$   $\Rightarrow$  vzniká nuklid, který o jeden neutron méně a jeden proton více  $\Rightarrow$



Posloupnost nuklidů, které vznikají při postupné přeměně vyzařováním  $\alpha$  a  $\beta$  částic se nazývá rozpadová řada. V předchozím příkladu jsme se zabývali počátkem uranové rozpadové řady.

**Př. 8:** Na diagramu je zakreslena uranová rozpadová řada. Jakým způsobem je vyznačen rozpad  $\alpha$ , jakým způsobem rozpad  $\beta$ ? Ke kolika rozpadům obou druhů postupně došlo?



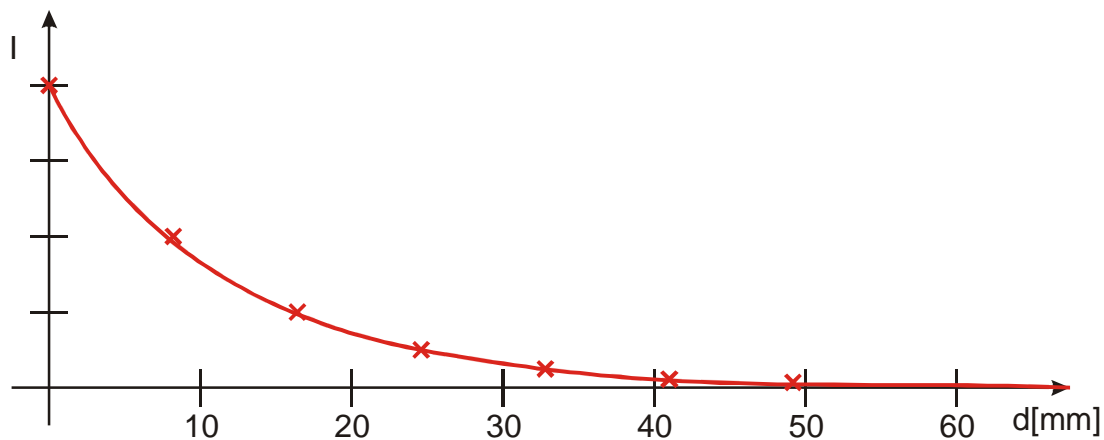
Rozpad  $\alpha$  je vyznačen modrou šipkou, rozpad  $\beta$  zelenou. Došlo celkem k osmi rozpadům  $\alpha$  a šesti rozpadům  $\beta$ .

V zemské kůře se stále nachází určité množství uranu  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , proto rozpady v této řadě neustále probíhají, hlavně v horninách, které uran obsahují ve větším množství (například v žule).

Nejnebezpečnější částí této rozpadové řady je přeměna  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^4_2\alpha + {}^{222}_{86}\text{Rn}$ , při které vzniká radioaktivní plyn radon, který se uvolňuje z horniny stoupá k povrchu a může se shromažďovat v nevětraných místnostech budov. Po vdechnutí radonu do plic může dojít k jeho rozpadu  ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^4_2\alpha + {}^{218}_{84}\text{Po}$  přímo v těle (v plicích), částice  $\alpha$  pak brzdí přímo v tkáni, kde může přispět ke vzniku rakoviny.

Intenzita  $\gamma$  záření při průchodu látkovým prostředím klesá exponenciálně. Například intenzita záření  $\gamma$  o energii 0,8 MeV se zmenší na polovinu po průchodu olověnou destičkou o tloušťce 8,2 mm. Po průchodu vrstvou olova o tloušťce 16,4 mm by se intenzita zmenšila na čtvrtinu. Tedy každých 8,2 mm olova znamená zmenšení intenzity záření na polovinu předchozího stavu.

**Př. 9:** Nakresli graf závislosti intenzity záření  $\gamma$  na tloušťce olova, kterým prochází. Předpokládej, že každých 8,2 mm olova znamená pokles intenzity na polovinu předchozí hodnoty.



**Př. 10:** Jaká část záření  $\gamma$  o energii 0,8 MeV projde vrstvou olova o tloušťce 3 cm? Jak tlustou vrstvou olova potřebujeme, aby se intenzita záření snížila na setinu původní hodnoty?

Sledujeme intenzitu záření.

po 0 mm ...  $I_0$

po 8,2 mm ...  $I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)$  (intenzita se zmenšila na polovinu)

po 2 · 8,2 mm ...  $I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right) = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2$  (poloviční intenzita se zmenšila na polovinu)

po 3 · 8,2 mm ...  $I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)^2 = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3$

po  $x$  mm ...  $I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{8,2}}$

po 3 cm ....  $I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{30}{8,2}} = 0,079 \Rightarrow$  po průchodu 3 cm olova se intenzita záření sníží na 7,9% původní hodnoty.

Intenzita se má snížit na setinu původní hodnoty  $\Rightarrow I = 0,01 \cdot I_0$

$$0,01 \cdot I_0 = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{8,2}}$$

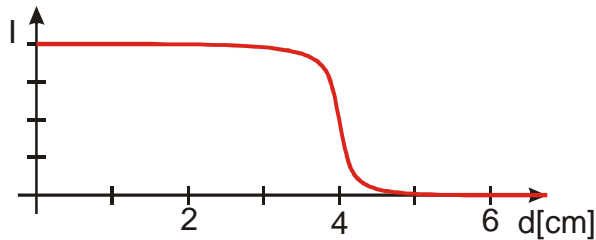
$$0,01 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{8,2}}$$

$$\log 0,01 = \log \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{8,2}} = \frac{d}{8,2} \cdot \log \frac{1}{2}$$

$$d = \frac{\log 0,01}{\log 0,5} \cdot 8,2 \text{ mm} = 54,5 \text{ mm}$$

Záření musí projít vrstvou olova silnou 54,5 mm, aby se jeho intenzita snížila na setinu původní hodnoty.

**Př. 11:** (BONUS) Na obrázku je graf závislosti intenzity záření  $\alpha$  na vzdálenosti uražené ve vzduchu. Vysvětli, proč intenzita záření  $\alpha$  na tloušťce nezávisí exponenciálně jako u záření  $\gamma$ -



Jak srážka fotonu  $\gamma$  záření, tak částice  $\alpha$  je náhodná událost, ale:

- již první srážka fotonu znamená, že se přestane šířit dál v původním směru (buď se pohltí nebo rozptýlí),
- částice  $\alpha$  se srazí s částicemi vzduchu stotisíckrát než se zastaví.

⇒

- Fotonů ubývá již od prvních mikrometrů od zdroje (některé se srazí hned na počátku cesty).
- Částic  $\alpha$  začne ubývat až před čtvrtým centimetrem, protože až při této vzdálenosti vykonají první částice potřebný počet srážek, aby se zastavily. Ostatní se zastaví na velmi podobné vzdálenosti, protože počet potřebný počet srážek je obrovský a případné odchylky ve vzdálenostech mezi nimi se v tak velkém počtu velmi dobře vyrovnají (rozdíly v doletu jsou spíše způsobeny rozdílnou energií jednotlivých částic).

**Shrnutí:** Některé nuklidy se samovolně rozpadají, čímž uvolňují radioaktivní záření.