

# Radioaktivní záření, jeho druhy, detekce a základní vlastnosti

Týden vědy na FJFI 2018

Miloš Tichý, Katedra jaderných reaktorů

milos.tichy@fjfi.cvut.cz

# Obsah

- Radioaktivní záření: částicové (nabitě částice nebo neutrony), elektromagnetické
- Vlastnosti: interakce s látkou
- Principy detekce
- Úvod do praktik:
  - Dolet  $\alpha$
  - Zeslabení  $\gamma$  záření

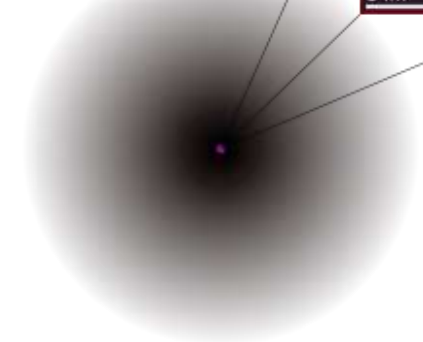
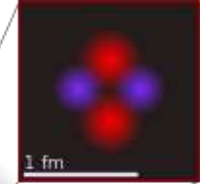
# Literatura

- Gerndt, J., Průša P. : Detektory ionizujícího záření, skripta České vysoké učení technické, 2011,
- Musílek, L., Dozimetrie neutronů, skripta CVUT, 1998, Bodansky David, Nuclear Energy, Springer, New York, 2010
- Cerny Joseph (ed.): Nuclear Spectroscopy and Reactions, Academic Press N.Y. & London 1974
- Petržílka Václav: Základy jaderné fyziky I.a II., SPN Praha 1967
- Wikipedia
- Miglierini Marcel, Jadrová a neutronová fyzika, přednáška, Bratislava 2011
- RNDr. Vojtěch Ullmann, Jaderná a radiační fyzika, nukleární medicína, <http://astronuklfyzika.cz/>
- <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>

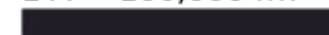
# Názvosloví

- Nukleonové (atomové, hmotnostní) číslo:  $A$ , počet nukleonů v jádře
- Protonové číslo:  $Z$ , počet protonů v jádře
- Nuklid: stejné  $A$  i  $Z$
- Izotop: stejné  $Z$ ,  $A$  může být rozdílné (iso-topos, na stejném místě Mendělejevovy tabulky ( ${}^{12}_6C$ ,  ${}^{13}_6C$ ,  ${}^{14}_6C$ ))
- Izobar: stejné  $A$ ,  $Z$  může být rozdílné ( ${}^{40}_{18}Ar$ ,  ${}^{40}_{19}K$ ,  ${}^{40}_{20}Ca$ )
- Isomer: stejné jádro ( $A$  i  $Z$  stejné), liší se energetický stav
- Mateřské jádro: jádro před rozpadem
- Dceřiné jádro: jádro vzniklé rozpadem
- Rozpadová řada: skupina nuklidů spojené řetězovým rozpadem

# Radioaktivní záření: kde se bere?



1 Å = 100,000 fm



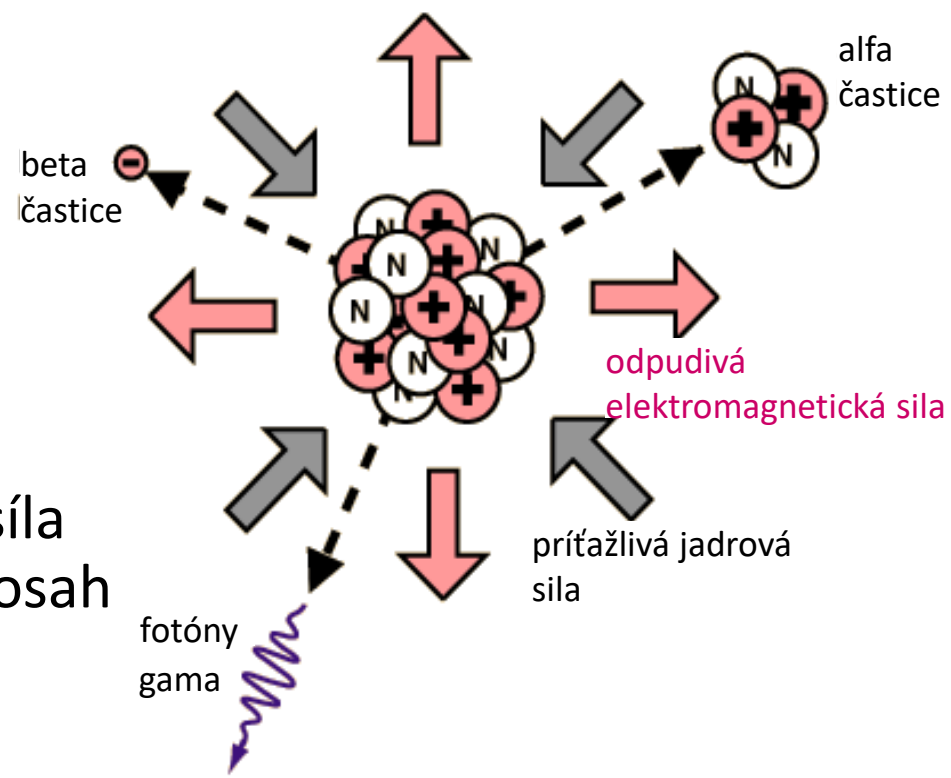
- Atom= jádro +elektronový obal  
(radius  $\sim \text{Å}$ ,  $10^{-10}\text{m}$ )
- Jádro: protony a neutrony (radius  $\sim \text{fm}$ )
- Radioaktivita je následek dějů v jádře: „část jádra“ je emitována
- „část jádra“= radioaktivní záření (částice nebo elektromagnetické záření-viz dále)
- (Přirozená) radioaktivita: Samovolný rozpad jádra vyskytujícího se v přírodě:
  - Energie původního stavu je větší než souhrn energií (klidové a kinetické) konečného stavu

$$m_0 c^2 > m_c c^2 + \sum m_i c^2 + \sum E_i$$

- Umělá (indukovaná) radioaktivita: rozpad jádra vzniklého jadernou reakcí lidským přičiněním

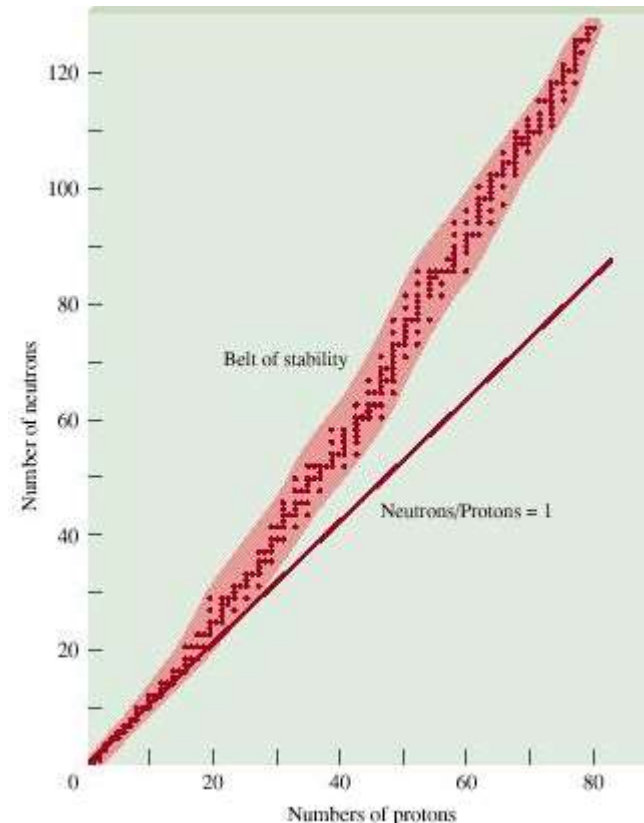
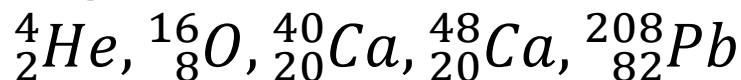
# Stabilita jader

- Síly působící v jádře:
  - Přitažlivá jaderná síla, krátký dosah
  - Odpuzivá elektromagnetická síla (coulombovská), nekonečný dosah
- Klasický pohled: stabilní a nestabilní jádra
- Stabilní jádra:
  - Stabilní nebo se rozpadají velmi pomalu (až neměřitelně pomalu),
  - definice stability konvencí: poločas  $\approx$  existence Země ( $4,5 \cdot 10^9$  let)



# Stabilita jader

- Vznik jader:
  - $H^1$ ,  $H^2$ ,  $He^4$ ,  $He^3$ ,  $Li$ ,  $Be$  vznikly během velkého třesku
  - Ostatní před  $4.5 \cdot 10^9$  při vzniku hvězd;
- Za stabilní se považuje cca 250-290 nuklidů 92 prvků
- „Nejvyšší“ (největší A) stabilní isotop:  $Pb^{209}$
- „Pás stability“ poměr  $A/Z > 2$  tj. relativní přebytek neutronů
- Empirický pohled + slupkový model jádra: stabilnější jsou
  - Jádra se sudým Z a A
  - Jádra s Z, A rovným „magickým“ číslům: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 (zcela zaplněné slupky)
  - dvojnásobně magická jádra (Z i N jsou „magická“)

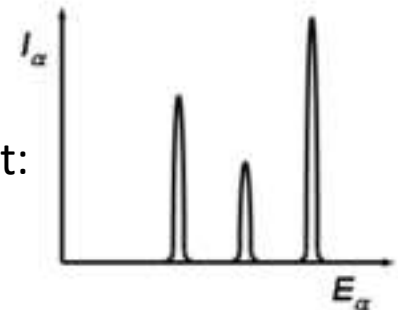
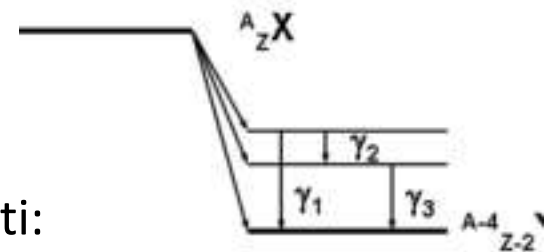


# Radioaktivní záření: co to je?

- Radioaktivní záření:
  - Částicové :
    - nabité částice (seřazené podle hmotnosti):
      - elektron, positron ( $e^+$ ,  $e^-$ ) tj. záření  $\beta$
      - proton  $p^+$ ,
      - částice (záření)  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ ),
      - větší atomová jádra než helium
    - neutrony
  - Elektromagnetické tj. fotony (viz dále)

Nejčastější případy:

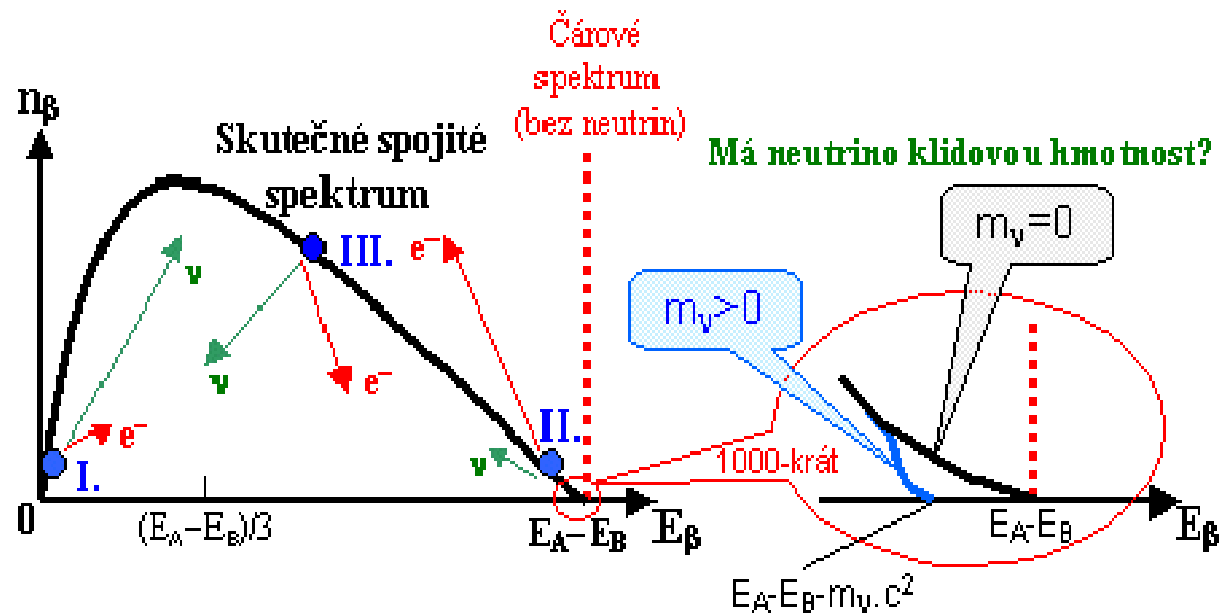
- **Alfa  $\alpha$ :** proud heliových jader  
přebytek energie mateřského jádra se rozdělí na tři části:
  - hmotu  $\alpha$ -částice
  - kinetickou energii  $\alpha$  a dceřiného jádra (rozdělení podle hmotnosti-deterministické)
  - doprovodné  $\gamma$  záření (deexcitace jádra)=> monoenergetické, ale jednomu mateřskému jádru může patřit:  
několik rozdělení energií (kanálů reakce)=>  $\alpha$ -částice s různou energií (+různé energie  $\gamma$ )





# Radioaktivní záření: co to je? (2)

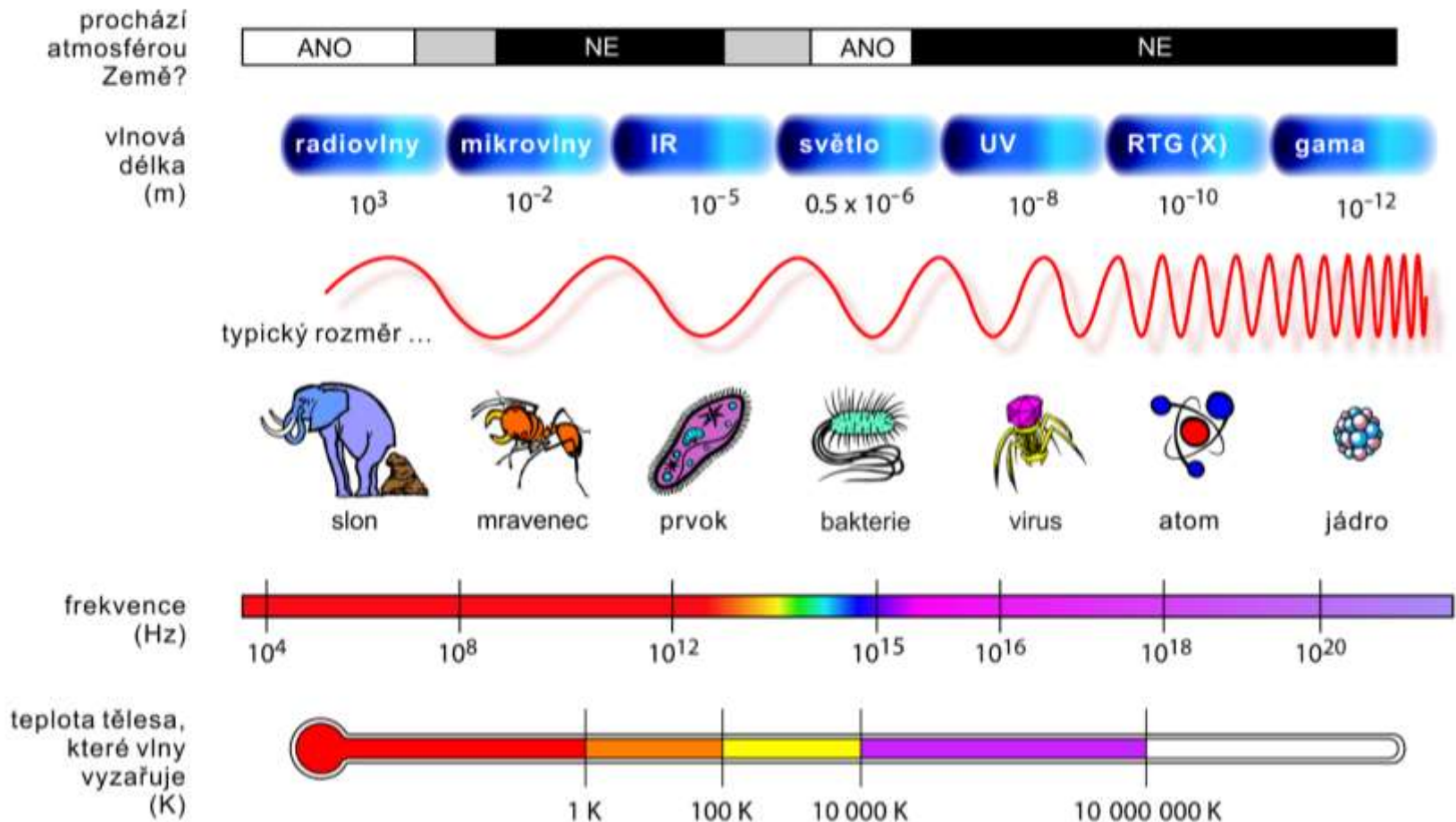
- **Beta  $\beta$ :** proud elektronů nebo pozitronů
    - přebytek energie mateřského jádra se rozdělí na tři části:
      - hmotu  $\beta$ -částice (elektron, pozitron)
      - kinetickou energii  $\beta$  a neutrina (jenom kinetická energie) – náhodný proces
      - Zbytek: doprovodné  $\gamma$  záření (deexcitace jádra)
- => polyenergetické (spojité) spektrum



# Radioaktivní záření: co to je? (3)

- **Gama  $\gamma$ :** proud fotonů  
přebytek energie mateřského jádra se vyzáří jako elektromagnetické záření (foton)-  $\gamma$  částice; doprovází často  $\alpha$ ,  $\beta$  rozpad
- Záření  $\gamma$  je jen malá část širokého spektra elektromagnetického záření

## ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM



# Radioaktivní záření: co to je? (4)

## rtg.+ $\gamma$ záření

- Tři skupiny elektromagnetického záření lišící se frekvencí a zdrojem:
  - $\gamma$  záření z jaderných reakcí: přebytečná energie jádra je vyzářena ve formě kvanta=>čarové (monoenergetické) spektrum
  - rtg. brzdové záření: elektron je brzděn v elektromagnetickém poli atomů => spojité spektrum: rentgenka pro zobrazování
  - rtg. charakteristické záření: urychlený elektron excituje elektron v obalu a deexcitace je spojena s vyzářením kvanta kvanta=> čarové (monoenergetické) spektrum

# Radioaktivní záření: co to je? (4)

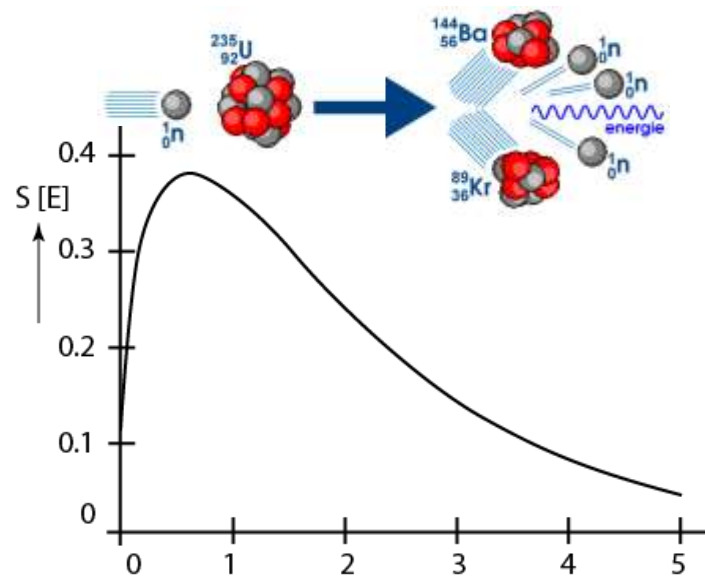
- Neutrony: vznik
  - Neutron je vyražen z jádra nabitou částicí ( $p^+$ ,  $\alpha$ , nebo i větší atomová jádra) nebo fotonem ( $\gamma$ ,  $n$ )
  - Štěpení: jádro se rozpadne na dva kusy+(2-3)neutrony
  - Tříštění: jádro se rozpadne na řadu kusů +několik neutronů (např. u Pb 16neutrnů/jádro)
  - Neutron doprovází  $\beta$ rozpad (místo doprovodného  $\gamma$  záření)

- Přebytek energie se rozdělí na kinetickou energii

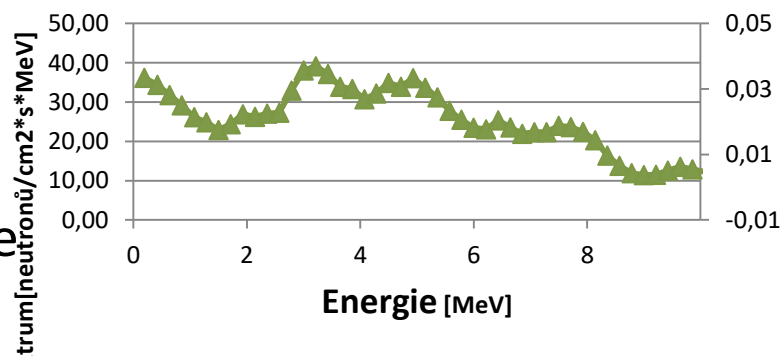
- Dceřiného(-ných) jádra(-er)
- Neutronu(-ů)

⇒ Z konkrétní reakce: mono-energetické (čarové) spektrum, ale

např. štěpení probíhá v mnoha kanálech reakce naráz => poly-energetické spektrum



Neutronové spektrum, zdroj AmBe



# Jaká je intenzita radioaktivního záření:

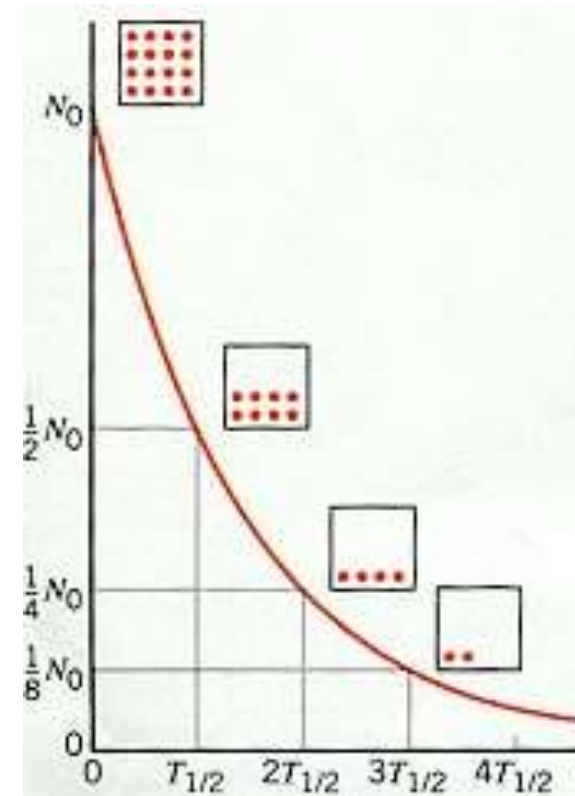
## rozpadový zákon

- Pozorování: počet jader (daného nuklidu) ve vzorku  $N$  klesá exponenciálně v čase  $t$  konstantní rychlostí

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

- $N, N_0$  počet jader v čase  $t$ , resp.  $t = 0$
- $\lambda$  je rozpadová konstanta, základní parametr rychlosti rozpadu, pravděpodobnost rozpadu za 1s
- $A, A_0$  (radio)aktivita, počet rozpadů v čase  $t$ , resp.  $t = 0$ ,
- $A = \lambda N \Rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$
- Jednotky aktivity:
  - SI: Becquerel Bq, 1 rozpad/s
  - Starší: Curie  $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{Bq}$  (aktivita 1g Ra)
- Odvozené parametry:
  - **Poločas rozpadu**  $T_{1/2}$ ; doba za kterou se rozpadne polovina jader
  - **Střední doba života jádra**  $\tau$

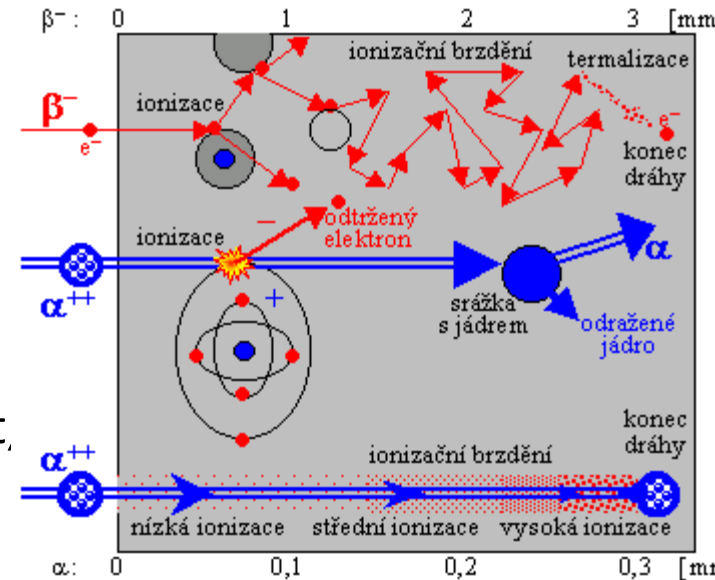
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau * \ln 2, \tau = \frac{1}{\lambda}$$



# Jak se projeví radioaktivní záření?

## Interakce s hmotou

- Interakce s obalem atomu:
  - Významné případy:
    - Těžké nabitě částice (coulombovská interakce)
    - Elektrony (coulombovská interakce)
    - Záření  $\gamma$  (tři konkurenční jevy: fotoefekt, Comptonův jev, tvorba párů)
- Interakce s jádrem: neutrony nebo nabitě částice s vysokou energií (z urychlovače),  $(\gamma, n)$  reakce



# Interakce s elektronovým obalem

- Ionizace – strhávání elektronů z obalu látky
  - Přímou ionizující - nabitou částice:  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ ),  $\beta$  ( $e^+$ ,  $e^-$ ),  $p^+$
  - Nepřímou ionizující:
    - $\gamma$ : „obere“ atom o elektron, tři konkurenční jevy: fotoefekt, Comptonův jev, tvorba párů
    - ${}^1_0n$  : jaderná reakce na konverzním materiálu=> ionizace nabitou částicí
- Excitace elektronů - předání části energie záření elektronu: neionizující radioaktivní záření, elektromagnetické s energií nižší než energie nutná k ionizaci (nižší frekvence než rtg.)
- Čerenkovovo záření: elektromagnetické záření ve viditelném spektru jako důsledek interakce částice s hmotou pohybuje-li se rychleji než světlo v daném prostředí

# Interakce s obalem atomu: těžké nabité částice

- Částice interagují s řadou elektronů současně
- Mechanismy interakce:
  - Ionizace: uvolnění elektronu(ů) z obalu, poté se elektrony nevrací zpět (pozdější rekombinace)
  - Excitace: elektronu je dodána energie, posun mezi slupkami, elektron se vrací zpět, vyzáří elektromagnetické záření (rtg. nebo  $\gamma$ )



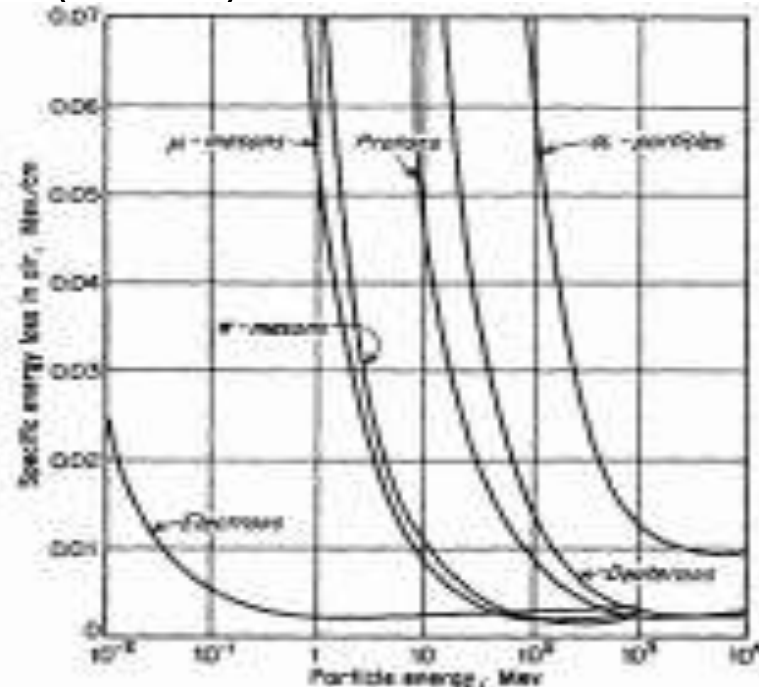
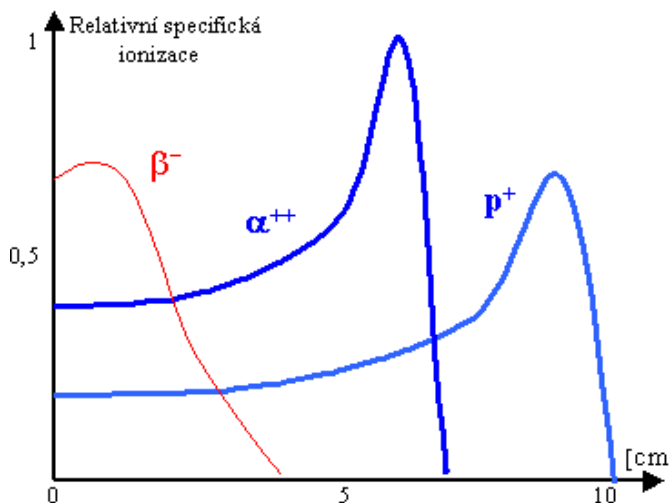
# Interakce s obalem atomu: těžké nabité částice

- Hmotnost částice  $\gg$  hmotnost  $e^- \Rightarrow$  přímá dráha, interakce s mnoha elektrony
- Jak rychle se částice zastaví: brzdná schopnost materiálu tj. schopnost odebrat energii závisí na
  - energii (rychlosti) a náboji částice,  $v, z$
  - atomovém čísle materiálu  $Z$
  - hustotě (počtu atomů v jednotce objemu  $N$ ) a ionizačním potenciálu materiálu  $I$

Betheho formule:

$$S = \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N * Z \left( \ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right)$$

- Kde se předává nejvíc energie: Braggova křivka:



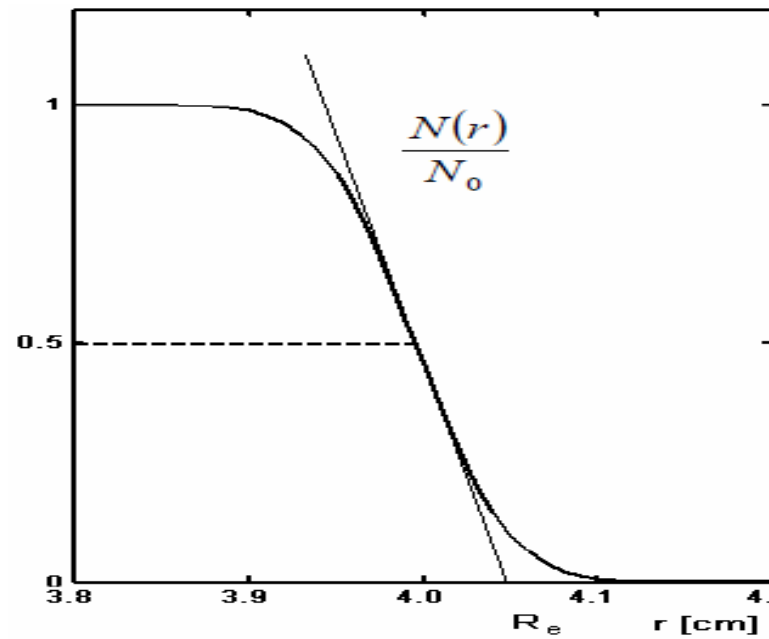
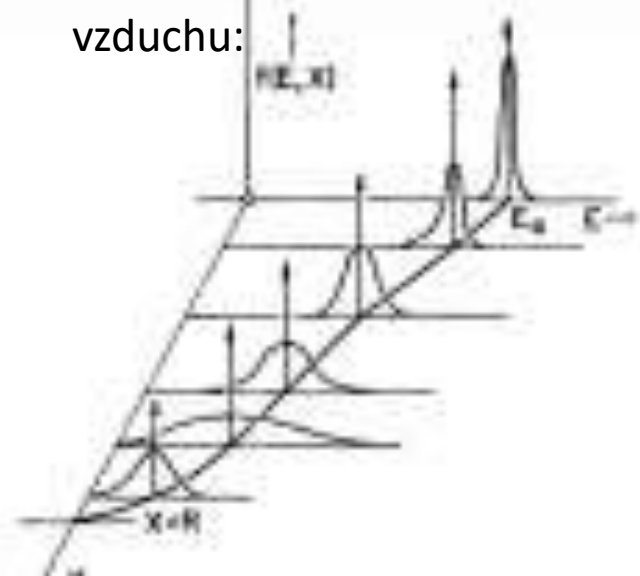
# Interakce s obalem atomu: těžké nabité částice

- Částice (např.  $\alpha$ ) postupně ztrácí energii až se zastaví tj. počet částic je prakticky stálý po celou dráhu
- Kam doletí: dolet = vzdálenost do úplného zabrzdění
- Dolet pro  $\alpha$  částice 5,5 MeV:

materiál	vzduch	voda	mylar	papír	hliník	měď	zlato
Dolet [mm]	40	0,048	0,036	0,034	0,024	0,001	0,0075

- Podstatně větší schopnost ionizace než ostatní typy záření => snadná ochrana před vnějším ozářením, ale velmi nebezpečné pro vnitřní ozáření

První úloha: měření doletu  $\alpha$  částic ve vzduchu:



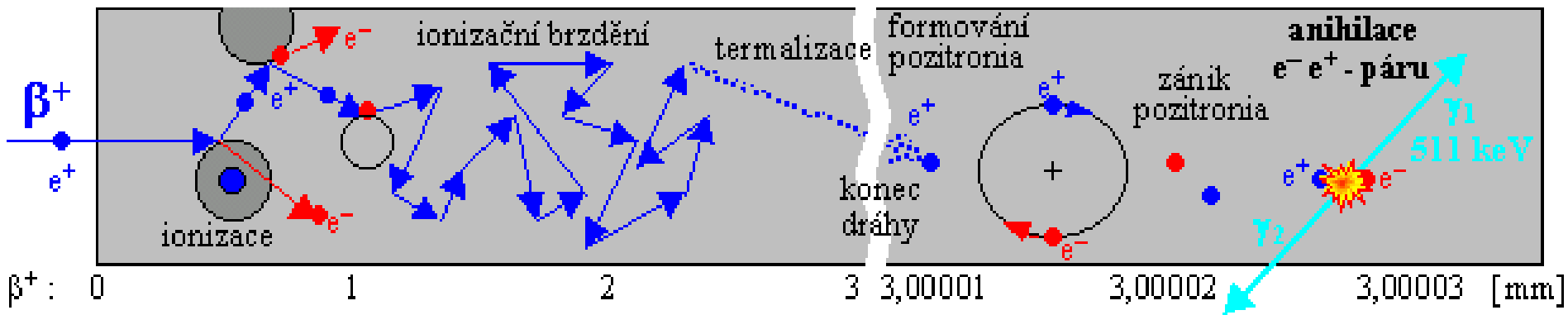
# Interakce s hmotou: elektrony

- Shodná hmota interagujících částic => křivolaká dráha
- $\beta$  záření má spojité spektrum
- Monoenergetické elektrony mají „dolet“ podobně jako  $\alpha$ , ale těžko měřitelný při křivolaké dráze
- Dva mechanismy ztráty energie: Celková ztráta energie je součet ztrát
  - Ionizací+ excitací orbitálních elektronů

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \frac{2\pi e^4 N Z}{m_0 v^2} \left\{ \ln \frac{m_0 v^2 E}{2I^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} - f\left(\frac{v}{c}\right) \right\}$$

- Brzdění elektronu v elektromagnetickém poli atomu=> brzdné záření (rtg. záření)

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_r = \frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_0^2 c^4} \left\{ 4 \ln \frac{2E}{m_0 c^2} - \frac{4}{3} \right\}$$



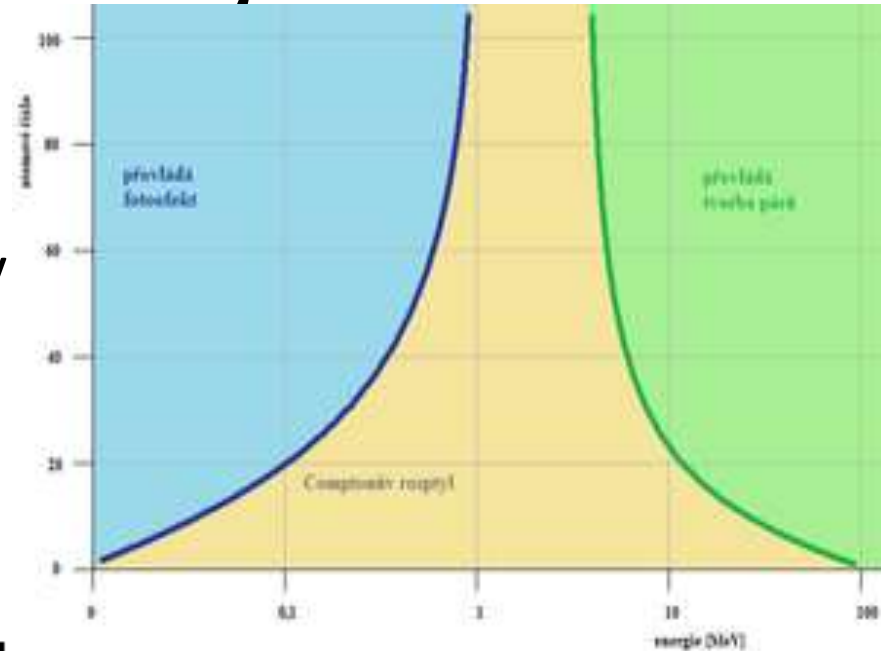
# Interakce s hmotou: elektrony (2)

- Přestože elektron je po poměrně krátké dráze zcela zabrzděn tj. přestává být „zářením“ => „makro pohled“:
- zeslabovací křivka se aproximuje  $I = I_0 e^{-\mu t}$ ,
  - $\mu$ -charakterizuje materiál pro danou energii  $\beta$ ,
  - $t$  –tloušťka materiálu
- Zeslabení pro elektrony 1keV:
- Polotloušťka= zeslabení záření na 1/2

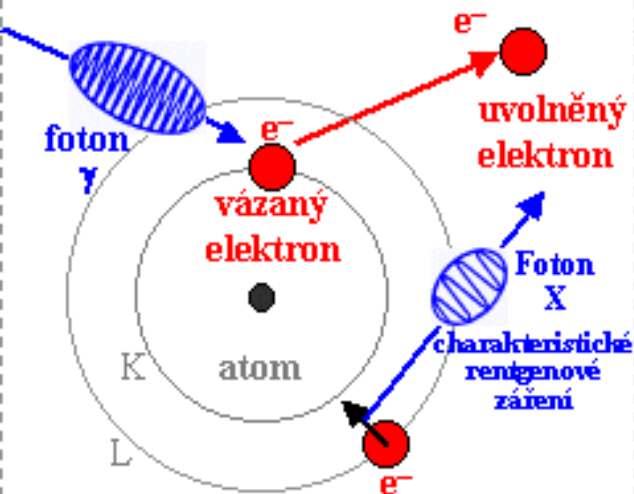
Materiál	Ag	Al	Au	Cu	Si
Polotloušťka [nm]	0,46	0,36	0,41	0,50	0,24

# Interakce s hmotou: $\gamma$ záření

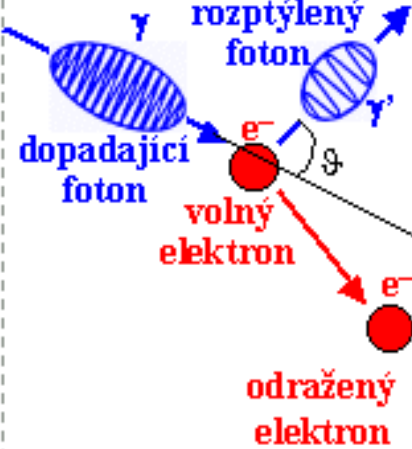
- Foton interaguje s individuálním elektronem(!) zanikne nebo ztratí podstatnou část energie
- podstatné jsou tři konkurenční jevy
  - fotoefekt,
  - Comptonův jev,
  - tvorba párů



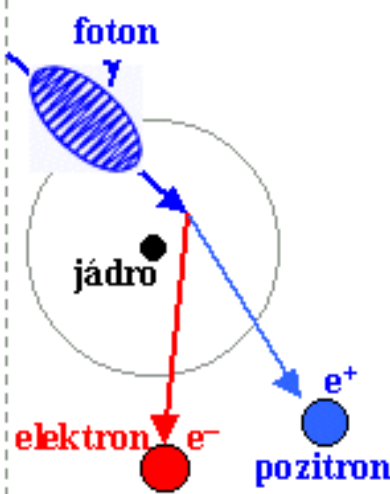
F o t o e f e k t



Comptonův rozptyl



-pozitronových párů

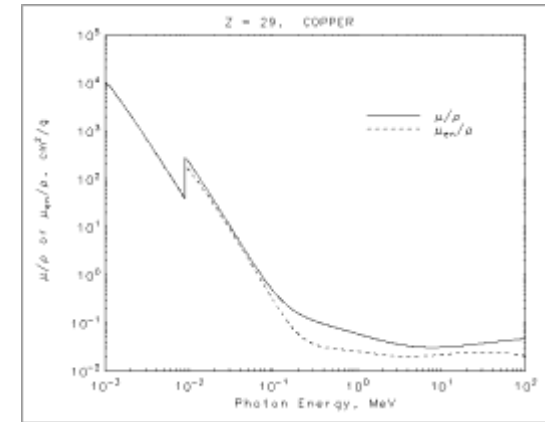


# Interakce s hmotou: $\gamma$ záření, makro-pohled

- Úzký svazek: zeslabovací křivka se aproximuje:

$$I = I_0 e^{-\mu t},$$

- $\mu$  je lineární zeslabovací koeficient
  - závislý na energii  $\gamma$  a hustotě a atomovém čísle materiálu
  - sčítají se příspěvky od tří mechanismů
  - $\mu/\rho$  je hmotnostní zeslabovací faktor sčítá se po přítomných prvcích, nezávisí na hustotě (tj. kompozici, teplotě,...)
- Střední volná dráha  $\lambda = 1/\mu$



- Polotloušťka

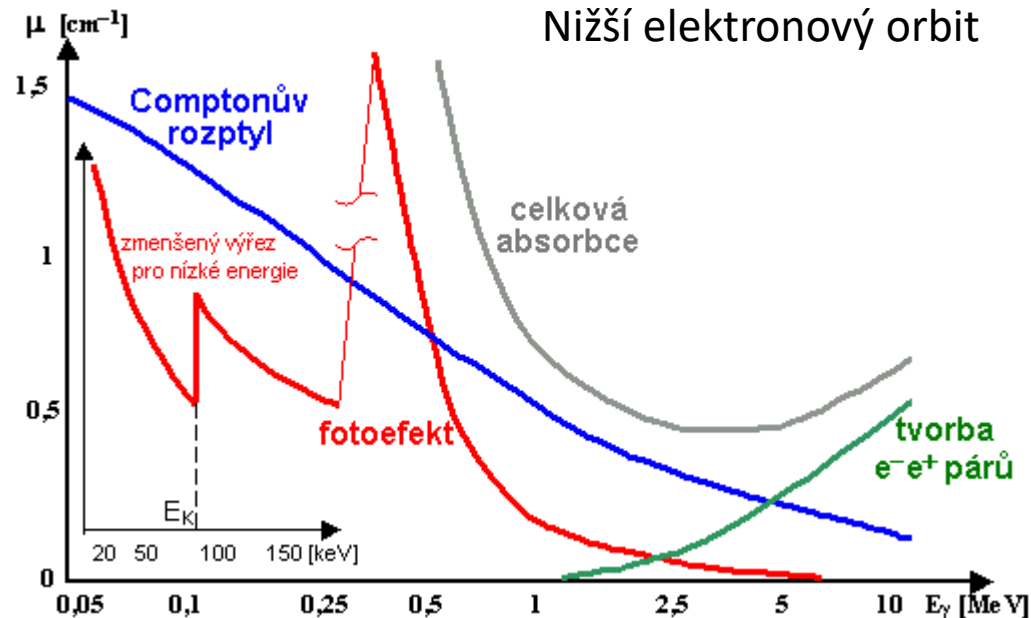
$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

tloušťka která zeslabí záření na 1/2

- Široký svazek, příspěvek rozptýlených fotonů: build up factor B:

$$I = I_0 B(t, E_\gamma) e^{-\mu t}$$

- 2. úloha: měření  $\mu$

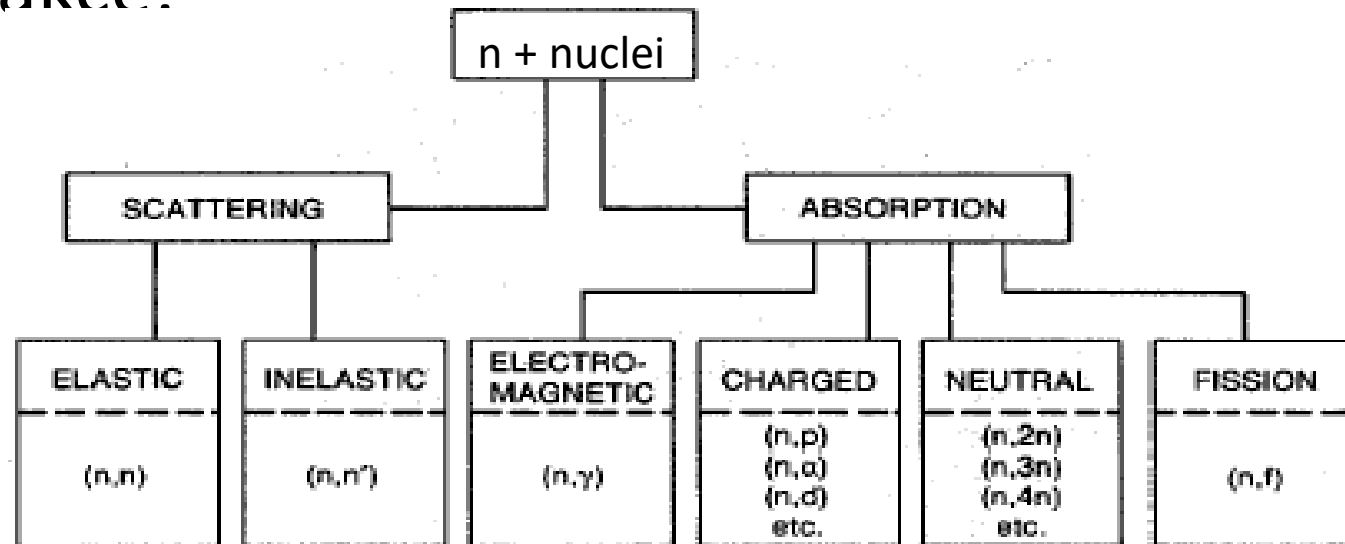


# Interakce s jádrem

- Jaderné reakce: nabitá částice, foton nebo neutron se trefí do jádra „chráněného“ kladným nábojem:
  - Okamžité reakce: pružný a nepružný rozptyl
  - Zpožděné reakce: složené jádro setrvává v excitovaném stavu po dobu (ns- $\infty$ ); pro delší časy: aktivace (detekce, ozáření)
  - Nejsnazší projektil: neutron-nemá náboj
  - Nabité částice: urychlením se podstatně zvyšuje pravděpodobnost reakce

# Interakce s hmotou: neutrony

- Jaderné reakce:



- Makropohled: zeslabovací křivka  $I = I_0 e^{-\Sigma t}$ 
  - $\Sigma = N\sigma$  makroskopický účinný průřez
  - N je počet atomů/cm<sup>3</sup>,
  - $\sigma$  mikroskopický účinný průřez-pravděpodobnost reakce, silně závisí na energii
- 3. úloha: měření zeslabení neutronů: porovnání polyetylénu, PE+B, Pb



# Proč detekovat: důvody detekce radioaktivního záření

- Monitorování radiační situace (dozimetrie)
- Vědecké cíle: detekce, spektrometrie, měření trajektorií
- Zobrazování
- a další...

# Jak detekovat radioaktivní záření?

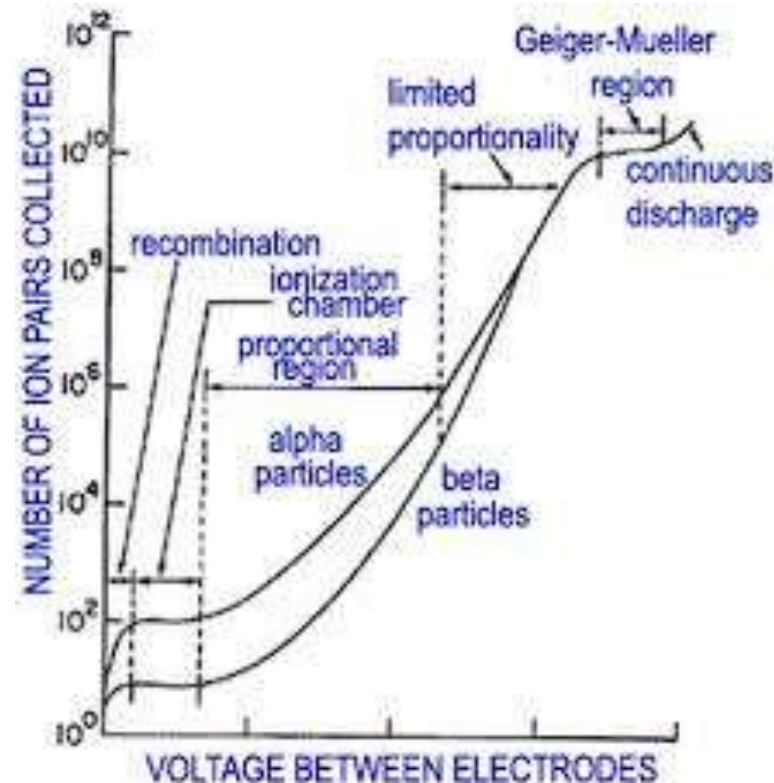
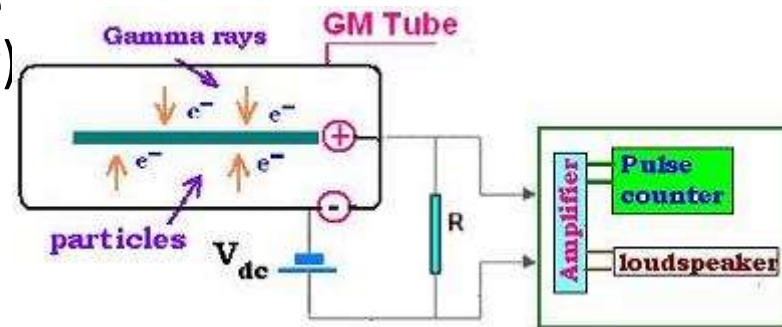
## Detektory:

- Plynové: ionizace plynu a jeho vybíjení na elektrodách
- Scintilační: fluorescence a detekce světelného záblesku
- Polovodičové: „ionizace“ v pevné fázi
- Fotografické: chemická reakce jako při klasické fotografii
- Termoluminiscenční: excitace elektronu do metastabilního stavu
- Kalorimetrické: ionizace, zbrzděné elektrony ohřejí látku
- Další...
- Detekce neutronů: konverse na nabitou částici + detekce nabité částice

# Plynový detektor

- Částice ionizuje plyn v detektoru, náboj vytvořený ionty je sbírán na elektrodách (je mezi nimi elektrostatické pole-kondenzátor)
- Pro detekční elektroniku může být náboj malý proto se zesiluje zvýšením napětí - různé režimy práce:

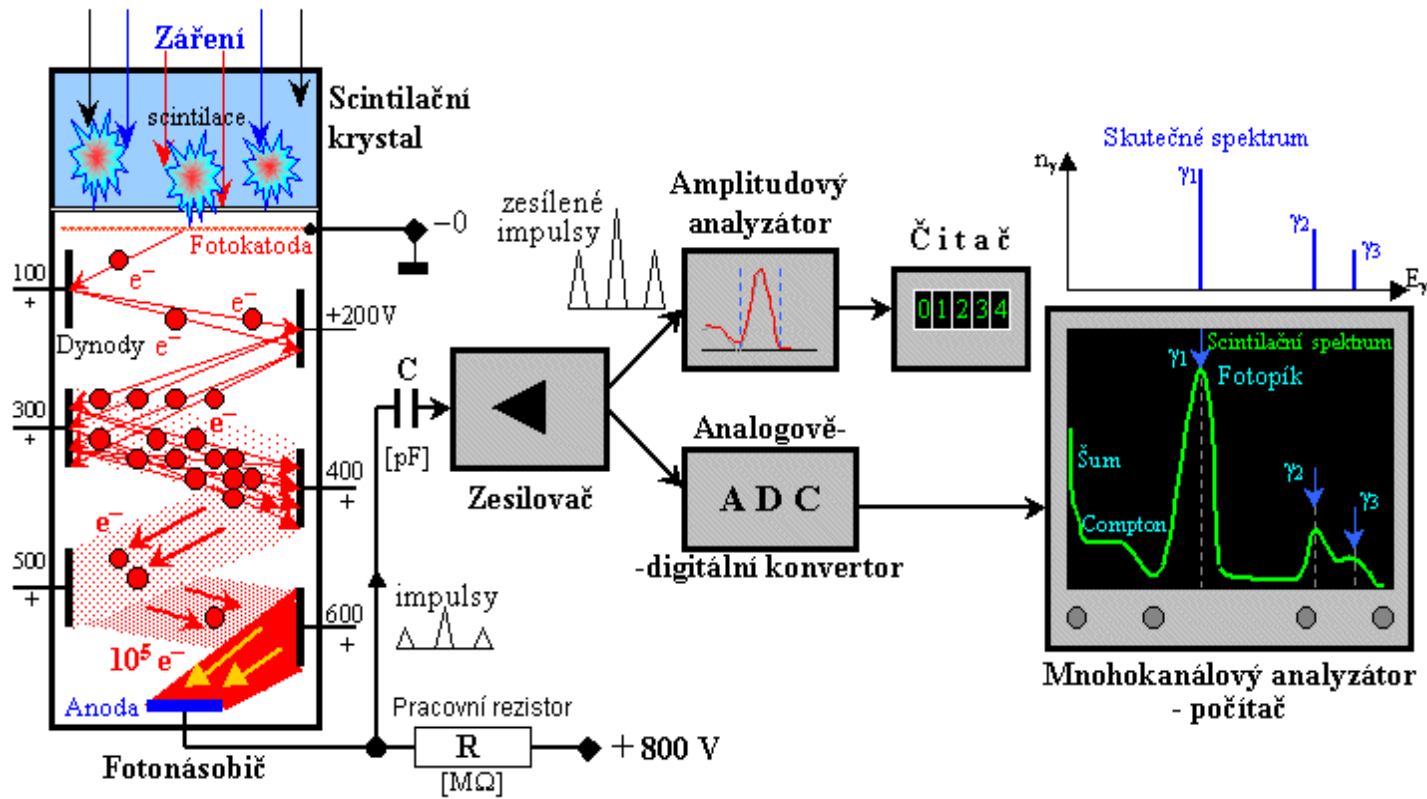
- Ionizační komora: sebere se pouze náboj vytvořený ionizací,
  - Velikost impulsu je úměrná typu částice a její energii
  - Pouze pro silně ionizující částice
- Proporcionální komora: ionty dále ionizují-sebraný náboj je proporcionální primárnímu
  - Velikost impulsu úměrný typu částice a její energii
  - I pro slabě ionizující částice
- Geiger-Müllerův počítač: sekundární ionizace, vznikne výboj
  - velikost nezávisí na primárním náboji,
  - dostatečně vysoký impuls pro snadnou registraci



# Scintilační detektor

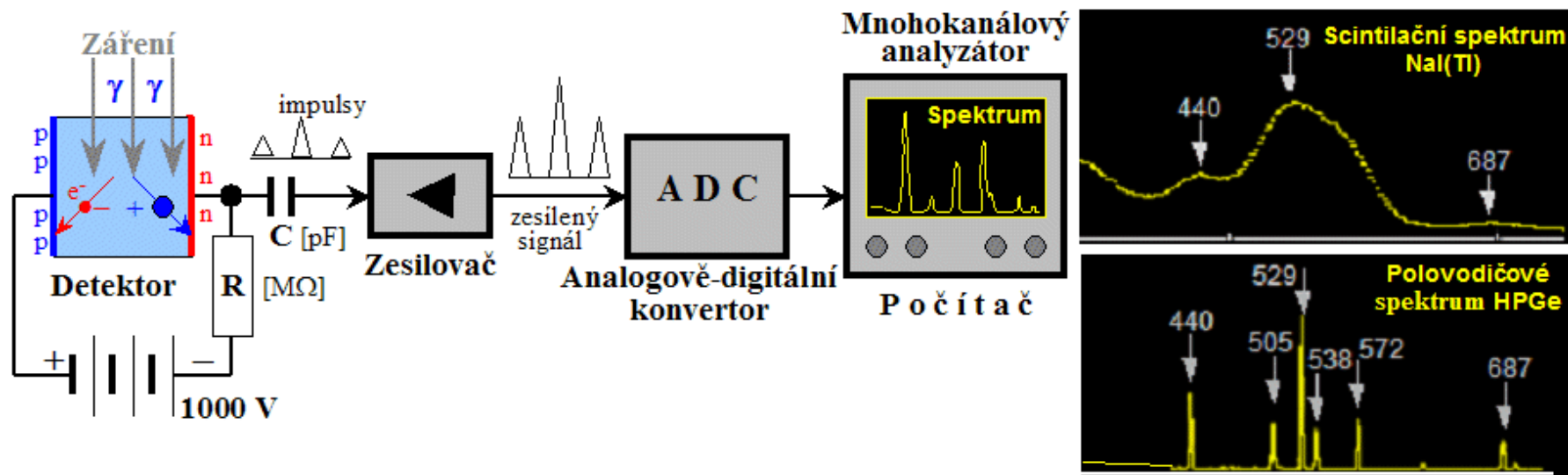
- Elektrony uvolněné  $\gamma$  zářením nebo elektrony  $\beta$  záření excitují elektrony z obalu atomu scintilátoru
- Zpětný proces (de-excitace) doprovázen vyzářením fotonu ve viditelné oblasti
- Foton dopadne na fotokatodu a vyrazí elektron (fotoefekt)
- Kaskádové zmnožení ve fotonásobiči (elektronka s katodou, cca 15 dynodami a anodou)

- Desítky scintilačních materiálů
- Hlavní scintilátory:
  - NaI s Th
  - (Poly)styrén
  - LiI s Eu (neutrony)
- Hlavně pro  $\gamma$  záření
- Tloušťka a pokrytí scintilátoru limituje použití pro nabitě částice (samoabsorbce)



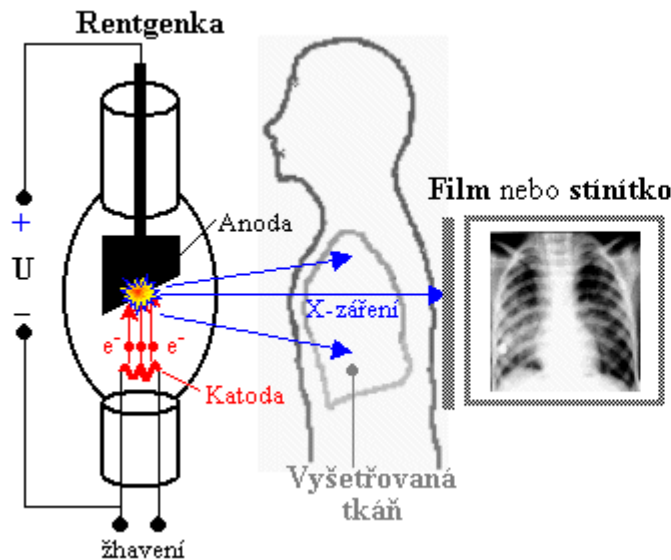
# Polovodičový detektor

- Ionizace v pevné látce: excitovaný elektron překoná zakázaný pás a putuje k anodě
- Detektor je dioda zapojená v závěrném směru: dopadající záření způsobí průraz
- Nejčastější materiály: Ge, Si
- Řada technologií vytvoření p-n přechodu (Si(Li), Ge(Li), HPGe, driftované-planární)
- Povrchový Si detektor použit v 1. úloze

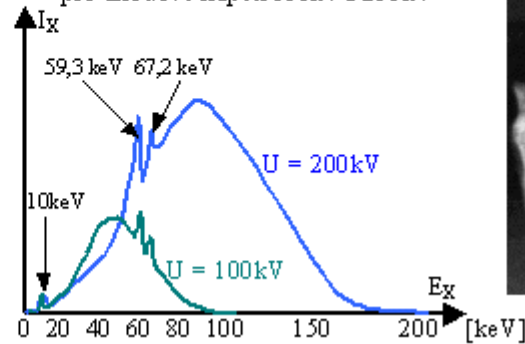


# Fotografická detekce

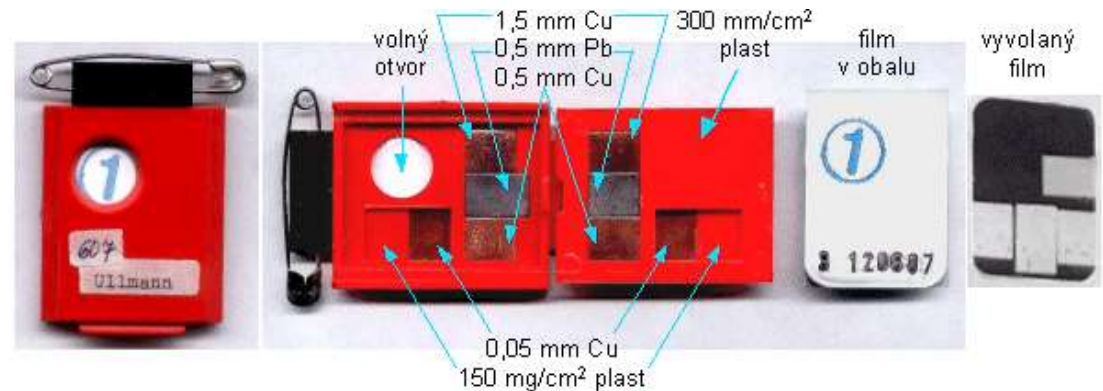
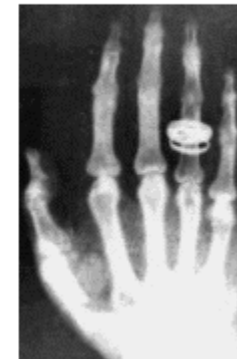
- Radioaktivní záření uvolní z AgBr stříbro
- Použitelné pro všechny druhy záření (i nízkoenergetické elm. záření světlo-klasická fotografie)
- Hustota stříbra odpovídá intenzitě záření
- Použití: osobní dozimetrie, zobrazování (rentgenologie)



**Spektrum X-záření z rentgenky**  
pro anodové napětí 100kV a 200kV



První historický snímek  
pořízený Roentgenem



# Detekce neutronů

- Totéž jako detekce ostatních druhů radioaktivního záření s konverzí

Reaction	$\sigma$ /barn (for thermal n)	Detector
$n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + p + 0.765 \text{ MeV}$	5400	${}^3\text{He}$ gas detector
$n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li}^* + \alpha + 2.3 \text{ MeV}$ $\rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha + 2.8 \text{ MeV}$	3840	$\text{BF}_3$ gas detector B-lined detectors
$n + {}^{235}\text{U} \rightarrow \text{fission fragments} + 195 \text{ MeV}$	580	Fission (gas) Chamber
$n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} + \alpha + 4.79 \text{ MeV}$	940	Scintillator detector
$n + {}^{157}\text{Gd} \rightarrow {}^{158}\text{Gd}^* \rightarrow {}^{158}\text{Gd} + \gamma, e$	255000	${}^{157}\text{Gd}$ doped plastic and liquid scintillators

# Shrnutí

- Záření alfa je
  - proud kladně nabitých jader helia (částic alfa)
  - Přímá dráha, intenzita konstantní po celé dráze
  - Dosah:
    - ve vzduchu několik cm,
    - pevná látka: zlomky mm
  - Lze zastavit listem papíru
- Záření  $\beta$  je
  - proud (záporně/kladně) nabitých elektronů/pozitronů
  - Klikatá dráha, zeslabení popsáno exponenciálním úbytkem s rychlým poklesem
  - odstínit lze 1 cm plexiskla nebo 1 mm olova,
  - při stínění urychlených elektronů těžkým materiálem (kovy) vzniká brzdné rtg. záření
- Záření  $\gamma$  je elektromagnetické záření (vysoké frekvence),
  - proud vysoce energetických fotonů, žádný elektrický náboj
  - Zeslabení popsáno exponenciálním úbytkem
  - Stínění velmi silnými štíty z (slitin) kovů velké hustoty (např. olovo)
  - čím vyšší hustota a tloušťka štítu, tím více je záření odstíněno.
- Neutronové záření:
  - Proud neutronů, žádný náboj
  - Zeslabení popsáno exponenciálním úbytkem, celkový účinný průřez je součtem účinných průřezů od konkurenčních reakcí (rozptyl, pohlcení, (n,nabitá částice)...)
  - Materiály bohaté na vodík (voda, parafín, polyetylen) rozptylují a málo pohlcují: dominantní reakce (n,n)
  - Účinné stínění: zpomalení (vodíkaté materiály)+pohlcení např. bor (karbid boru, gadolinium), kombinace: voda s kyselinou boritou



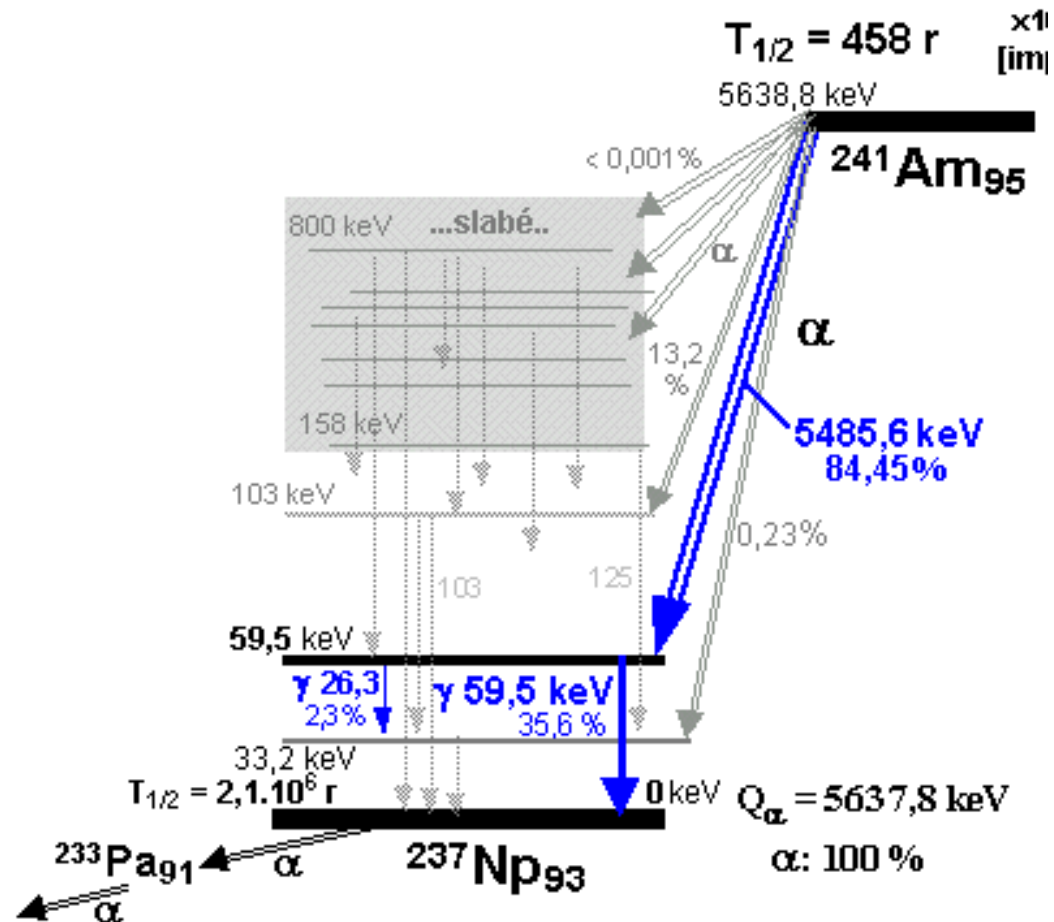
# Úlohy

1. Dolet alfa částic
2. Pohlcení gama záření

# 1. Úloha: dolet $\alpha$ částic

- Cíl: změřit dolet  $\alpha$  částic a ověřit počáteční energii

- Přístroje a materiály:
  - Zdroj  $\text{Am}^{241}$ ,
  - povrchově bariérový Si polovodičový detektor,
  - předzesilovač s napájením,
  - amplitudový analyzátor



# 1. Úloha: dolet $\alpha$ částic

- Postup:

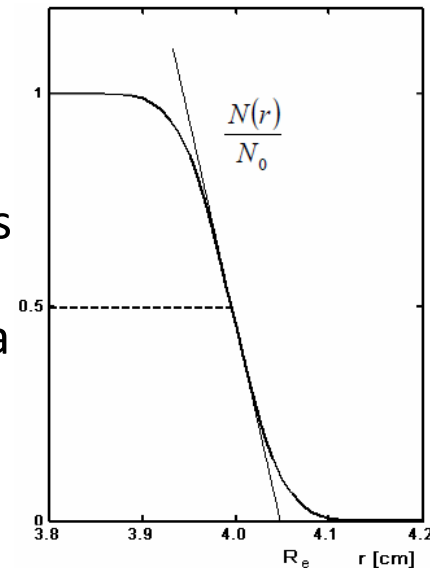
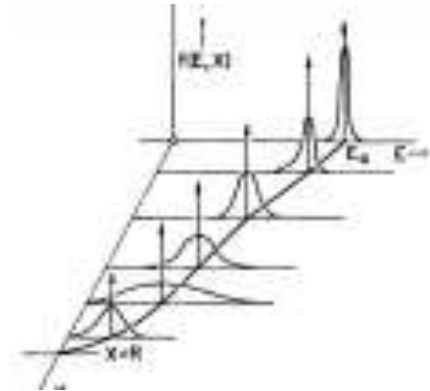
- měříme počet  $\alpha$  částic v závislosti na vzdálenosti od zdroje (25-38mm)
- naměřené intenzity (plochy píku) korigujeme na geometrii zdroj-detektor a normalizujeme (intenzita<sub>25mm</sub>=1)

$$N_{kor} = \frac{4\pi(d + s)^2}{P} N_{měř}, [d] = mm$$

- $d$  [mm] vzdálenost detektor (zapouzdření)-zdroj
- $s$  [mm] zapuštění detektoru (=2,5mm?)
- $P$  [mm<sup>2</sup>] plocha detektoru (=6mm<sup>2</sup>)
- Vyneseme graf intenzita-vzdálenost od zdroje, body proložíme polynomem a odečteme extrapolovaný průsečík s osou- $x =$  dolet
- Spočteme energii  $\alpha$  částic podle Geigerova empirického vzta pro dolet ve vzduchu:

$$R_s = 0,318 E_k^{3/2}$$

- Porovnáme energii  $\alpha$  částic s hodnotou z literatury



# 2. Úloha: zeslabení $\gamma$ záření různými materiály

- Cíl: porovnat schopnost různých materiálů zeslabit  $\gamma$  záření a ověřit teoretický exponenciální vztah pro zeslabení
- Postup:
  - Změříme intenzitu nestíněného zdroje a po stínění různými vrstvami hliníku, olova a mědi
  - Naměřené hodnoty vyneseme do grafu; a porovnáme s teoretickým vztahem  $I = I_0 B(t, E_\gamma) e^{-\mu t}$
  - Vyneseme v ln stupnici  $\ln(I)$  a stanovíme  $\mu$
  - Zhodnotíme možnost vyvodit hodnotu zeslabení z jednoduchého měření
- Přístroje a materiály:
  - zdroj Cs137,
  - Scintilační detektor NaI(Tl)
  - Kombinovaný přístroj DA310 (zdroj VN, zesilovač, multikanálový analyzátor),
  - destičky z Al, Pb, Cu různé tloušťky