

Radioaktivní záření, jeho druhy, detekce a základní vlastnosti

Týden vědy na FJFI 2025

Miloš Tichý, Katedra jaderných reaktorů

milos.tichy@fjfi.cvut.cz

Obsah

- Radioaktivní záření: co to je, kde se to bere?
 - částicové (nabité částice nebo neutrony),
 - elektromagnetické
- Vlastnosti radioaktivního záření: interakce s látkou
- Principy detekce radioaktivního záření
- Úvod do laboratorního měření:
 - Dolet α záření
 - Zeslabení γ záření

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

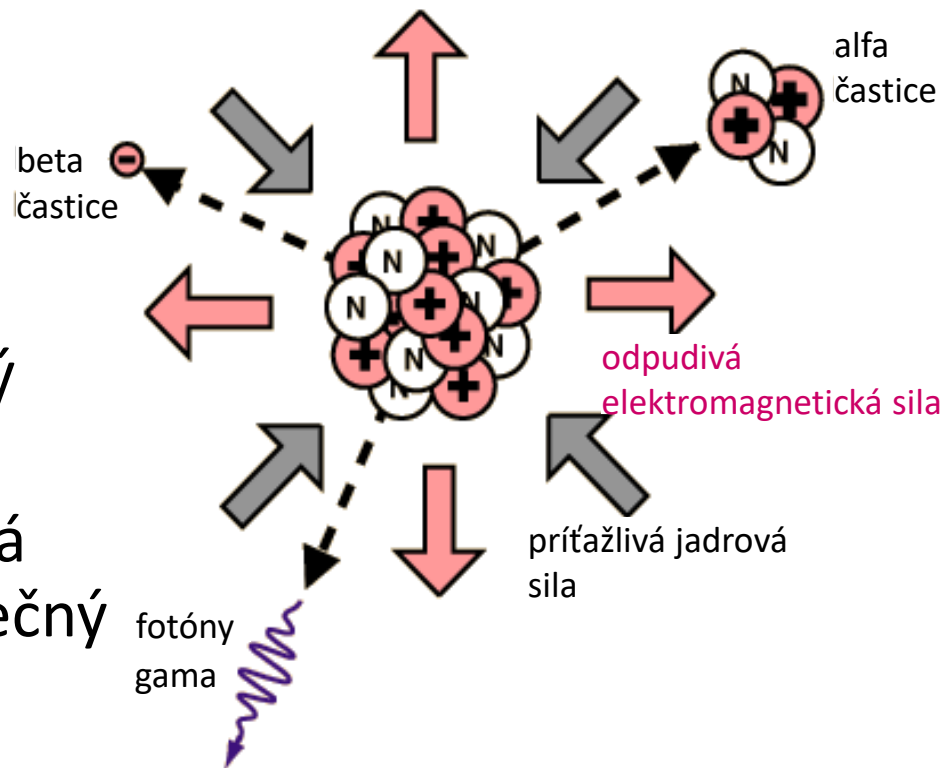
- $$1 \text{ \AA} = 100,000 \text{ fm}$$

součet kinetických energií
všech částic + dceřiného
jádra

- 10^{-15} **femto** f **biliardtina** 0,000 000 000 000 001 **dán.** femten – „patnáct“ fm – femto**metr**

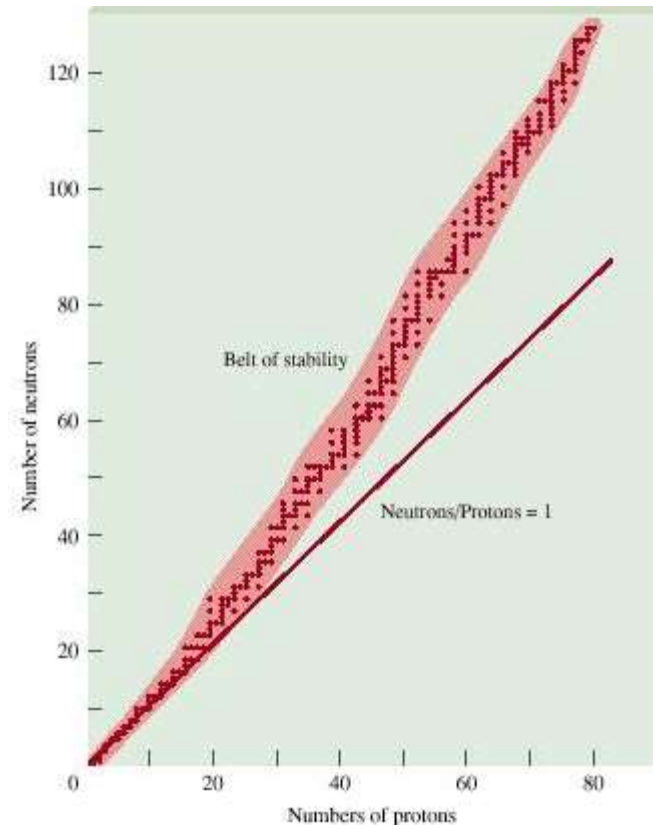
Stabilita jader

- Síly působící v jádře:
 - Přitažlivá jaderná síla, krátký dosah, velká intenzita
 - Odpuzivá elektromagnetická síla (coulombovská), nekonečný dosah, menší intenzita
- Klasický pohled: stabilní a nestabilní jádra
- Z měření vyplývá, že stabilní jádra: 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 $4.5 \cdot 10^9$ lety 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 A jsou „magická“)
 4_2He , ${}^{16}_8O$, ${}^{40}_{20}Ca$, ${}^{48}_{20}Ca$, ${}^{208}_{82}Pb$



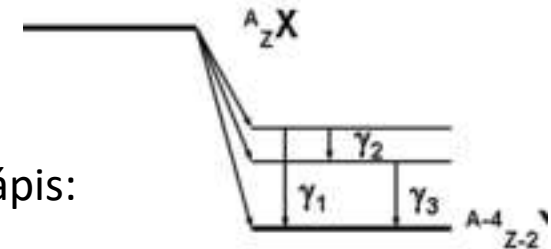
Radioaktivní záření: co to je? Kus jádra!

- Radioaktivní záření a ionizující záření:
 - „Radioaktivní“ vypovídá o původu: změna v jádře atomu; z názvu prvku radium, pozorována přirozená emise α (a γ) záření
 - „Ionizující“ vypovídá co záření způsobuje: ionizaci tj. „sebrat“ atomu elektron
 - Ne-ionizující záření je takové, že nemá dostatečnou energii k ionizaci
- Radioaktivní záření:
 - Částicové :
 - nabité částice (seřazené podle hmotnosti):
 - elektron, positron (e^+ , e^-) tj. záření β
 - proton p^+ ,
 - částice (záření) α (${}^4_2\text{He}$),
 - větší atomová jádra než helium
 - neutrony
 - Elektromagnetické tj. fotony (viz dále)

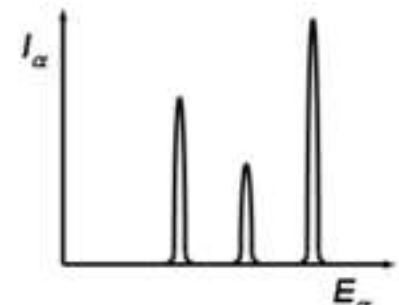
Radioaktivní záření: co to je? (1)

- **Alfa α :** proud heliových jader, 2 neutrony+2 protony
přebytek energie mateřského jádra se rozdělí na tři části:
 - hmotu α -částice
 - kinetickou energii α a dceřiného jádra (rozdělení podle hmotnosti-deterministické)
 - doprovodné γ záření (deexcitace jádra)=>spektrum je monoenergetické (všechny α -částice mají stejnou energii)
ale jedno mateřské jádro se může rozpadat několika kanály reakce => jsou emitovány α -částice s několika energiemi (+různé energie γ): čarové spektrum

Symbolický zápis:

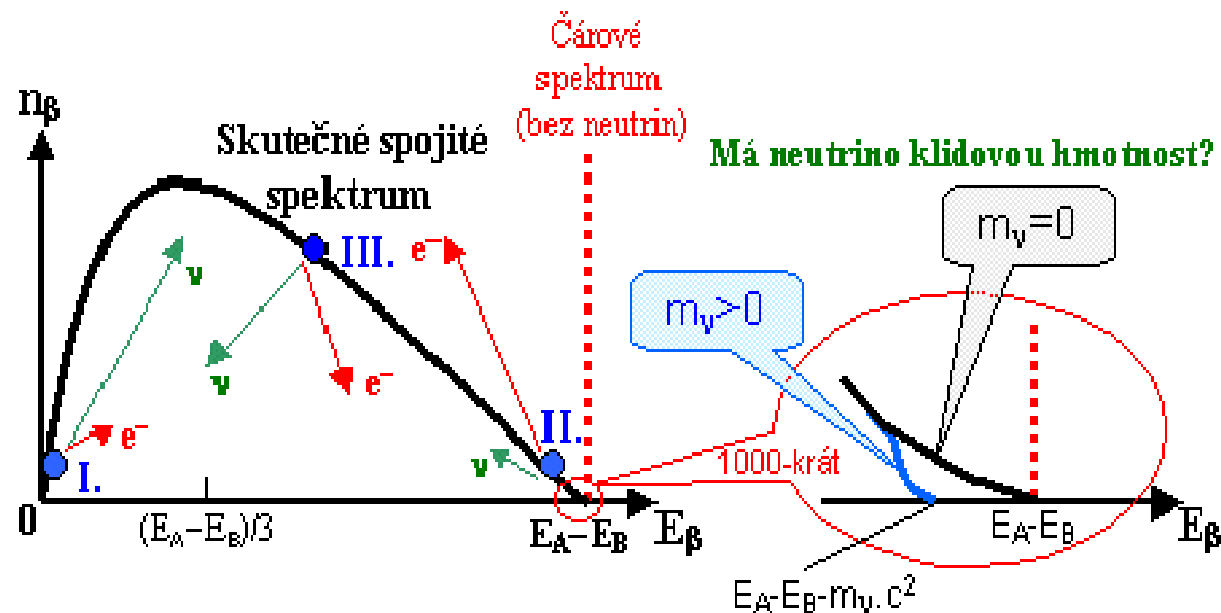


Spektrum energií:



Radioaktivní záření: co to je? (2)

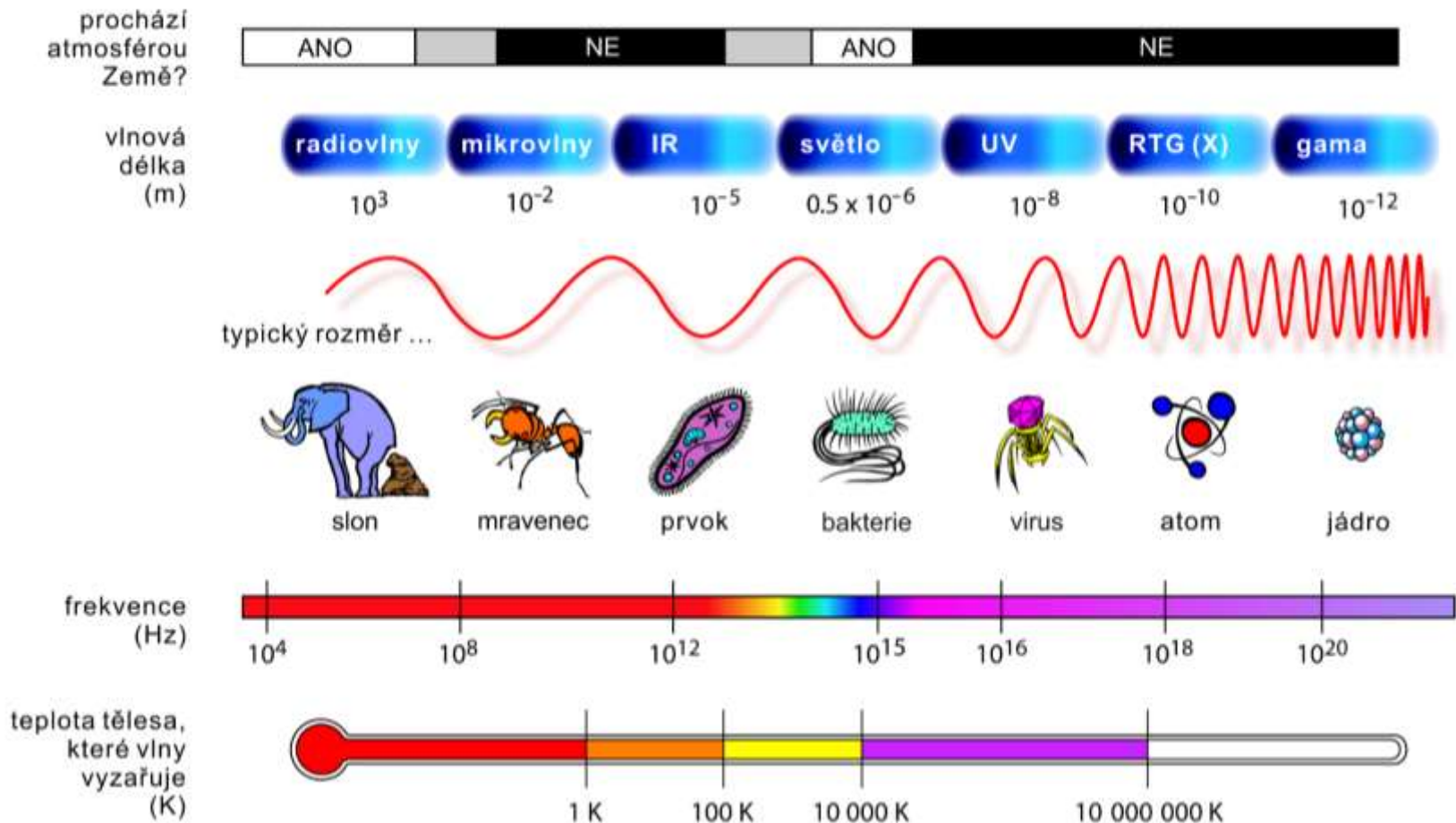
- **Beta β :** proud elektronů nebo pozitronů (hmota elektronu je 1/2000 hmoty protonu)
 - přebytek energie mateřského jádra se rozdělí na tři části:
 - hmotu β -částice (elektron, pozitron)
 - kinetickou energii β a neutrina (jenom kinetická energie) – náhodný proces
 - zbytek: doprovodné γ záření (deexcitace jádra)
- => polyenergetické (spojité) spektrum, rozdělení kinetické energie elektronu a neutrina je náhodné



Radioaktivní záření: co to je? (3)

- **γ záření:** proud fotonů
přebytek energie mateřského jádra se vyzáří jako elektromagnetické záření (foton)- γ částice; doprovází často α , β rozpad
- Záření γ je jen malá část širokého spektra elektromagnetického záření

ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM



Radioaktivní záření: co to je? (4)

rtg.+ γ záření

- Tři skupiny elektromagnetického záření lišící se frekvencí a zdrojem:
 - γ 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

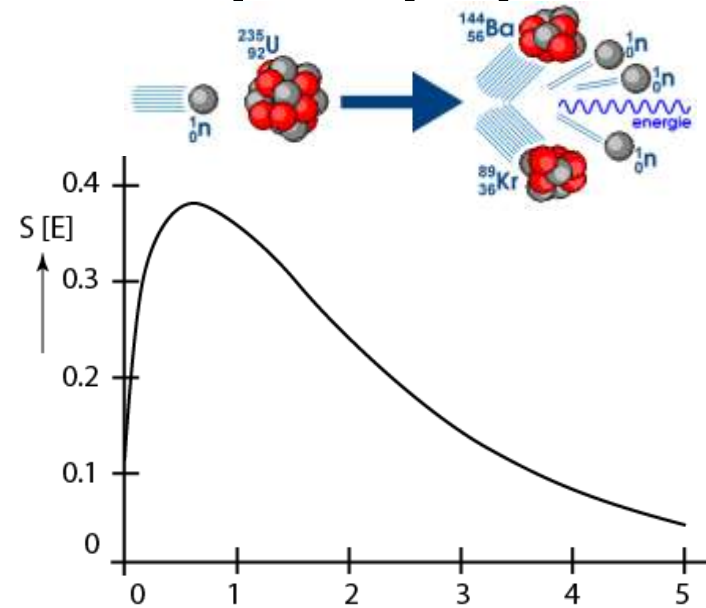
Radioaktivní záření: co to je? (4)

- Neutrony: vznik
 - Neutron je vyražen z jádra nabitou částicí (p^+ , α , nebo i větší atomová jádra) nebo fotonem (γ , 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 β rozpad (místo doprovodného γ záření)

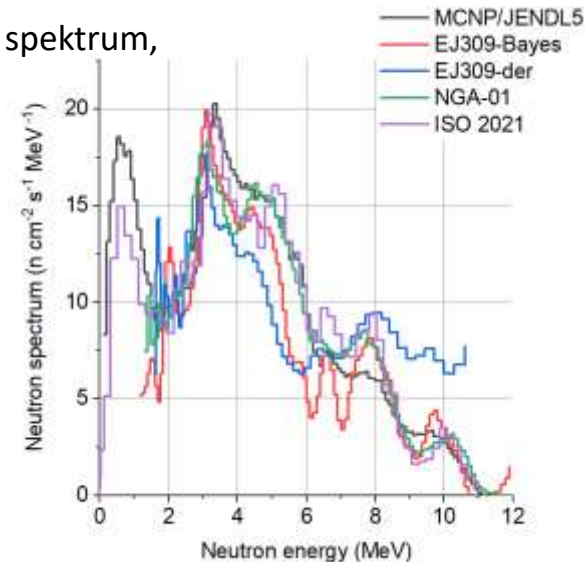
- Přebytek energie se rozdělí na kinetickou energii

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

⇒ Z konkrétní reakce: čarové spektrum, ale
Např. štěpení probíhá v mnoha kanálech reakce
současně => spojité (poly-energetické)
spektrum



Neutronové spektrum,
zdroj AmBe



Jaká je intenzita radioaktivního záření:

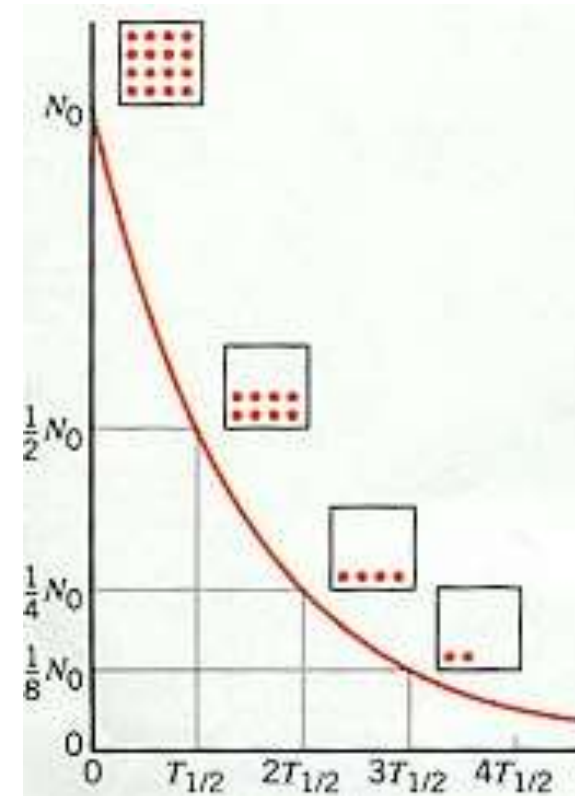
rozpadový zákon

- 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. $t = 0$
- λ 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 1Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (aktivita 1g Ra)
- Odvozené parametry:
 - **Poločas rozpadu $T_{1/2}$** ; doba za kterou se rozpadne polovina jader
 - **Střední doba života jádra τ**

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



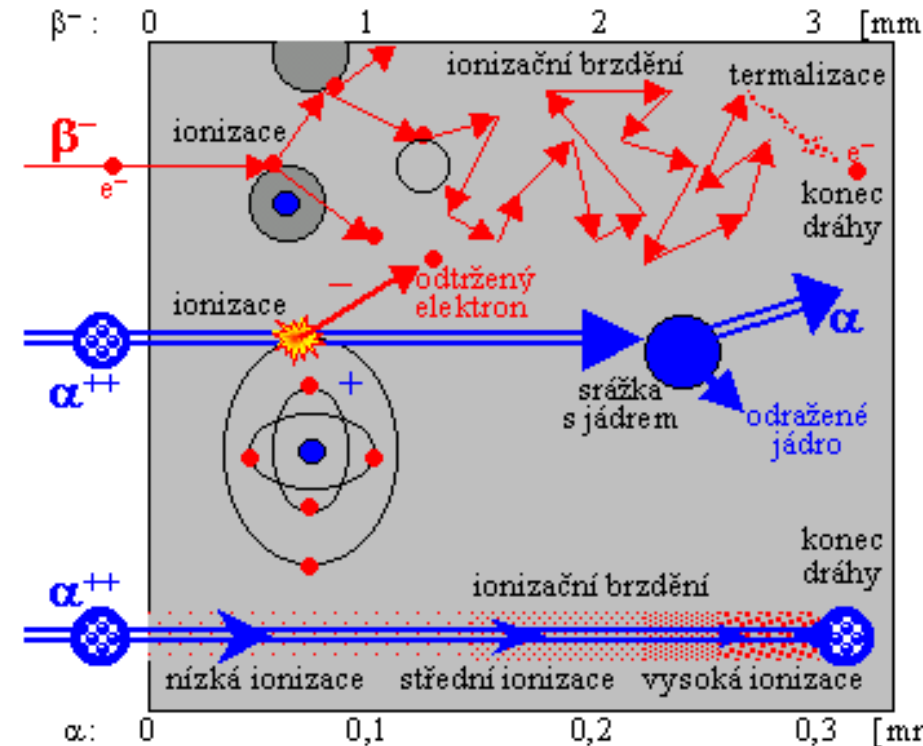
Jak se projeví radioaktivní záření?

Interakce s hmotou

- Interakce s obalem atomu: radioaktivní záření odebírá elektrony atomům-ionizace

- Významné případy:

- Těžké nabité částice (coulombovská interakce)
- Elektrony (coulombovská interakce)
- Záření γ (tři konkurenční jevy: fotoefekt, Comptonův jev, tvorba párů)



- Interakce s jádrem:
 - neutrony
 - nabité částice s vysokou energií (z urychlovače),
 - (γ, n) reakce

Interakce s elektronovým obalem

- Ionizace – strhávání elektronů z obalu atomu látky
 - Přímá ionizující - nabitá částice: α (${}^4_2\text{He}$), β (e^+ , e^-), p^+
 - Nepřímá ionizující:
 - γ : „obere“ atom o elektron, mechanismus: tři konkurenční jevy: fotoefekt, Comptonův jev, tvorba párů
 - 1_0n : jaderná reakce na konverzním materiálu=> ionizace vzniklou 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 γ)

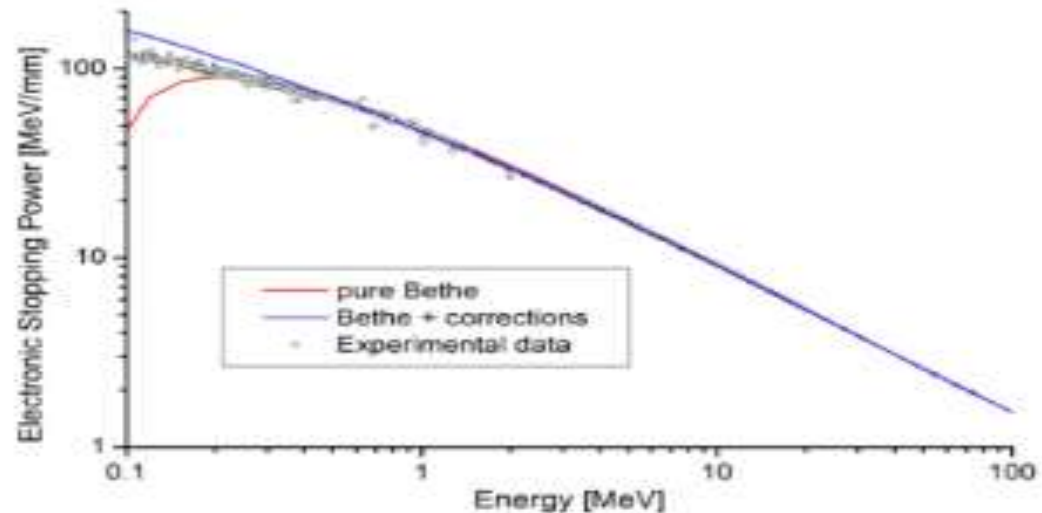
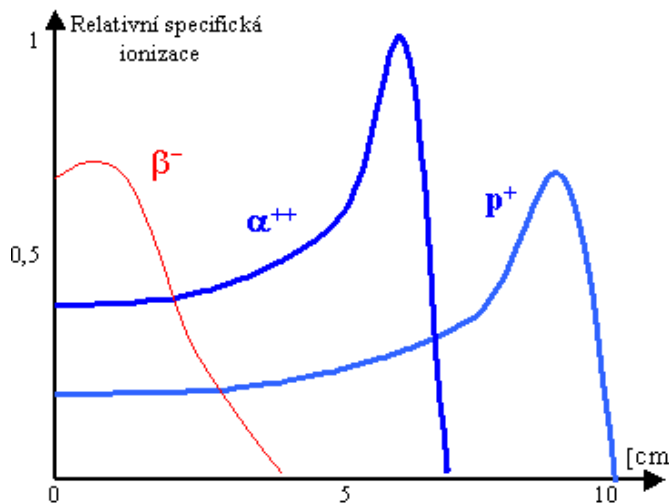
Interakce s obalem atomu: těžké nabitě částice

- Hmotnost částice $\gg$ hmotnost e^- $\Rightarrow$ přímá dráha, interakce s mnoha elektrony
- Jak rychle se částice zastaví: brzdná schopnost materiálu S 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:



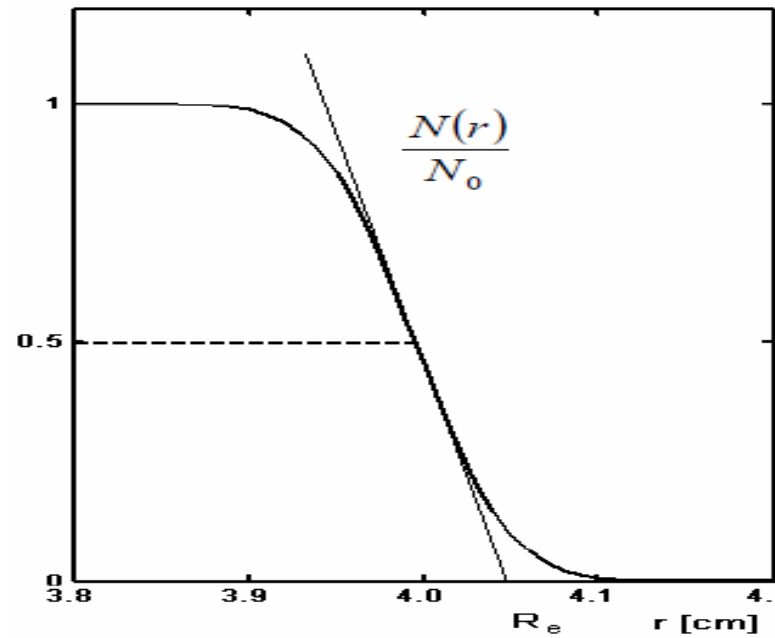
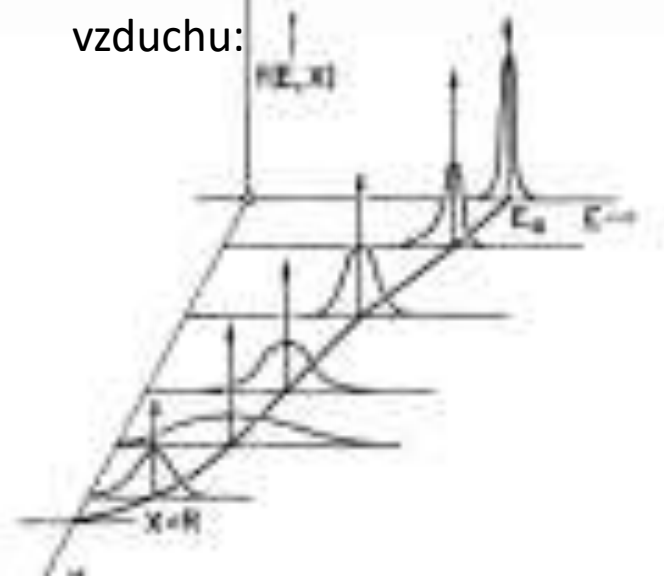
Interakce s obalem atomu: těžké nabité částice

- Částice (např. α) postupně ztrácí energii až se zastaví tj. počet částic je prakticky stálý po celou dráhu
- Kam doletí: dolet = vzdálenost do úplného zabrzdění
- Dolet pro α 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 α částic ve vzduchu:



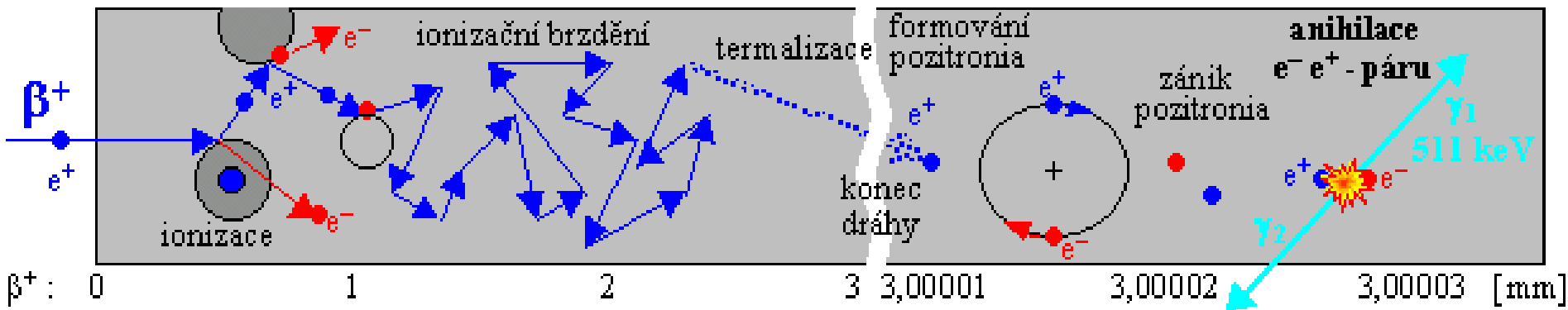
Interakce s hmotou: elektrony

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

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

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

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



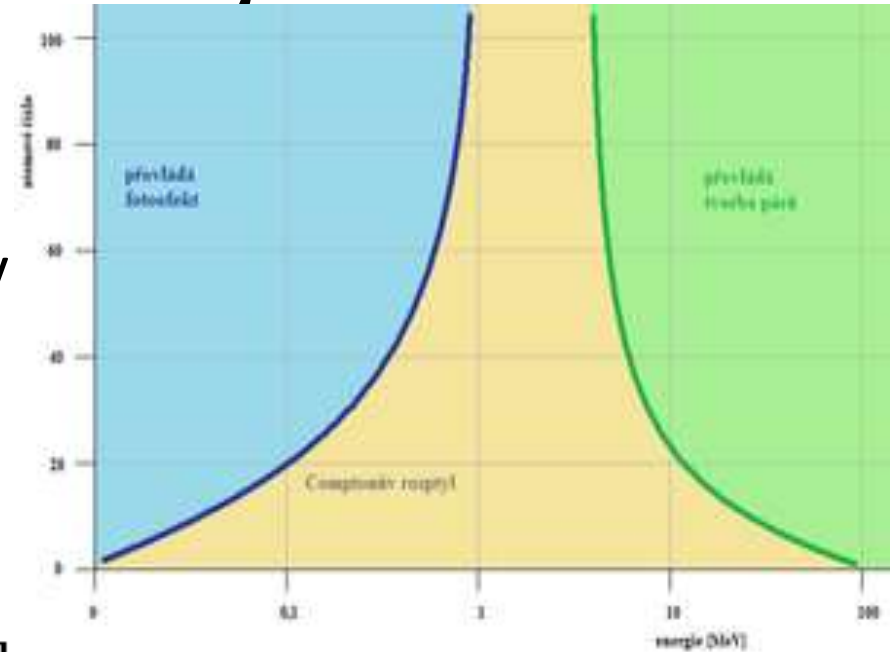
Interakce s hmotou: elektrony (2)

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

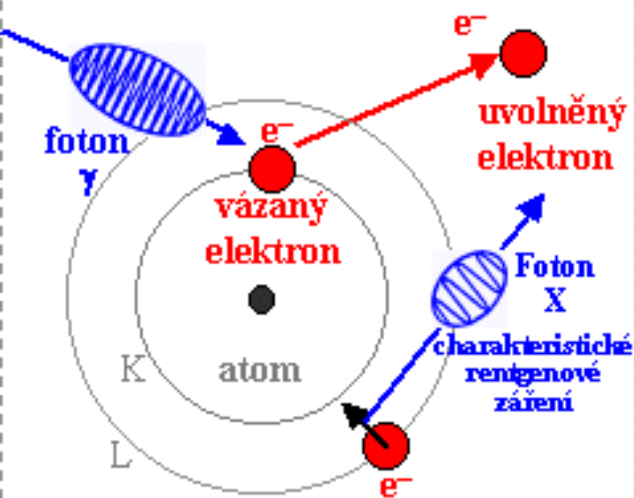
Materiál	Ag	Al	Au	Cu	Si
Polotloušťka [nm]	0,46	0,36	0,41	0,50	0,24

Interakce s hmotou: γ záření

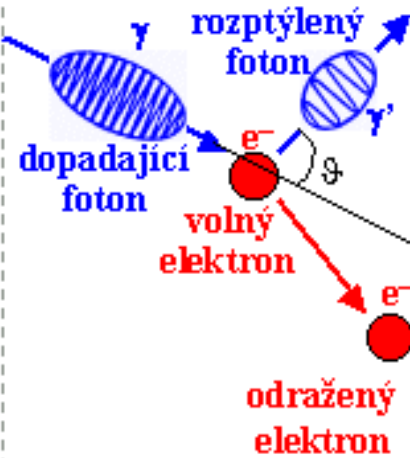
- Foton interaguje s individuálním elektronem(!) zanikne nebo ztratí podstatnou část energie
- podstatné jsou tři konkurenční jevy
 - fotoefekt,
 - Comptonův jev,
 - tvorba párů



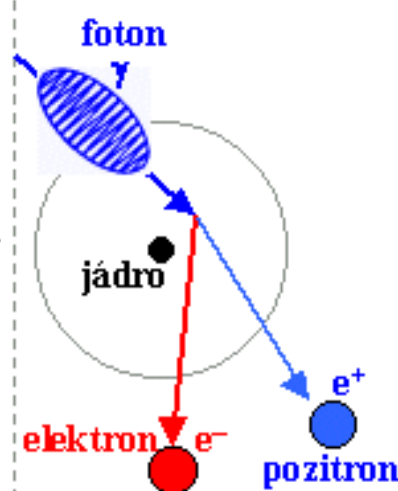
Fotoefekt



Comptonův rozptyl



-pozitronových párů



Interakce s hmotou: γ záření, makropohled

- Makropohled: zeslabovací křivka se aproximuje (pro úzký svazek, popisuje střední počet γ kvant, nikoli historii jednotlivého kvanta):

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

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

- Polotloušťka

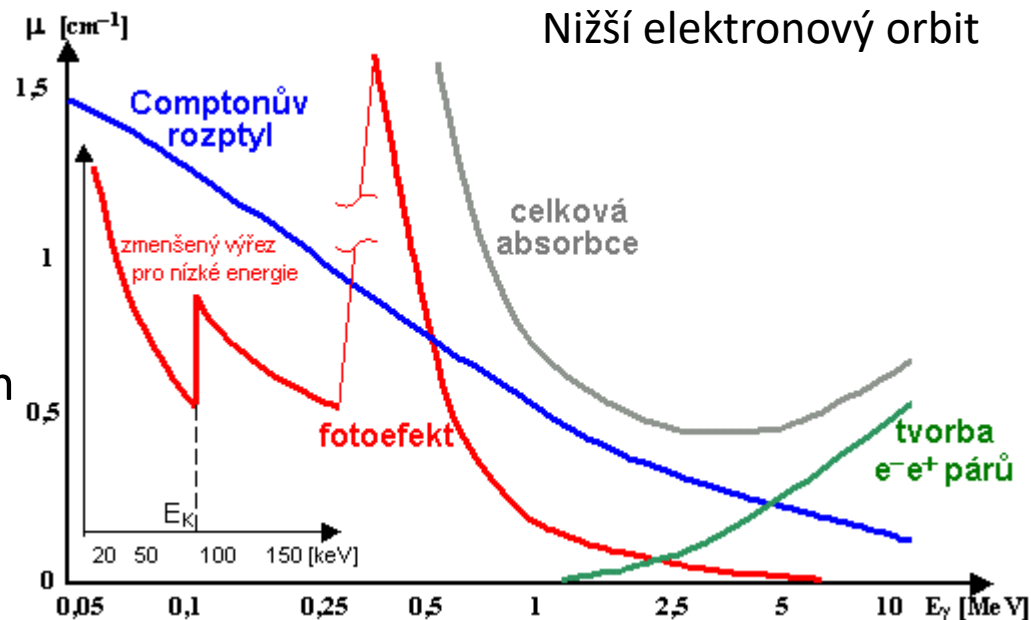
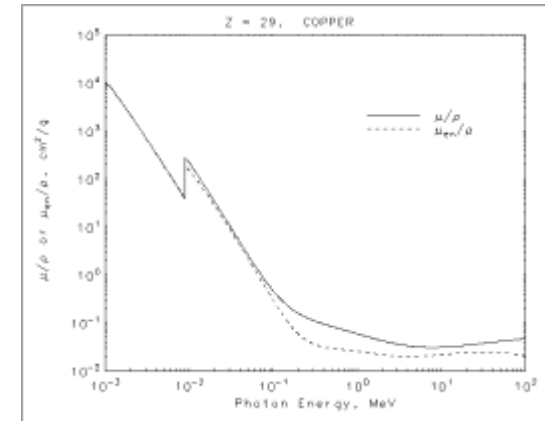
$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu},$$

tloušťka která zeslabí záření na 1/2

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

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

- 2. úloha: měření zeslabovacího koeficientu μ

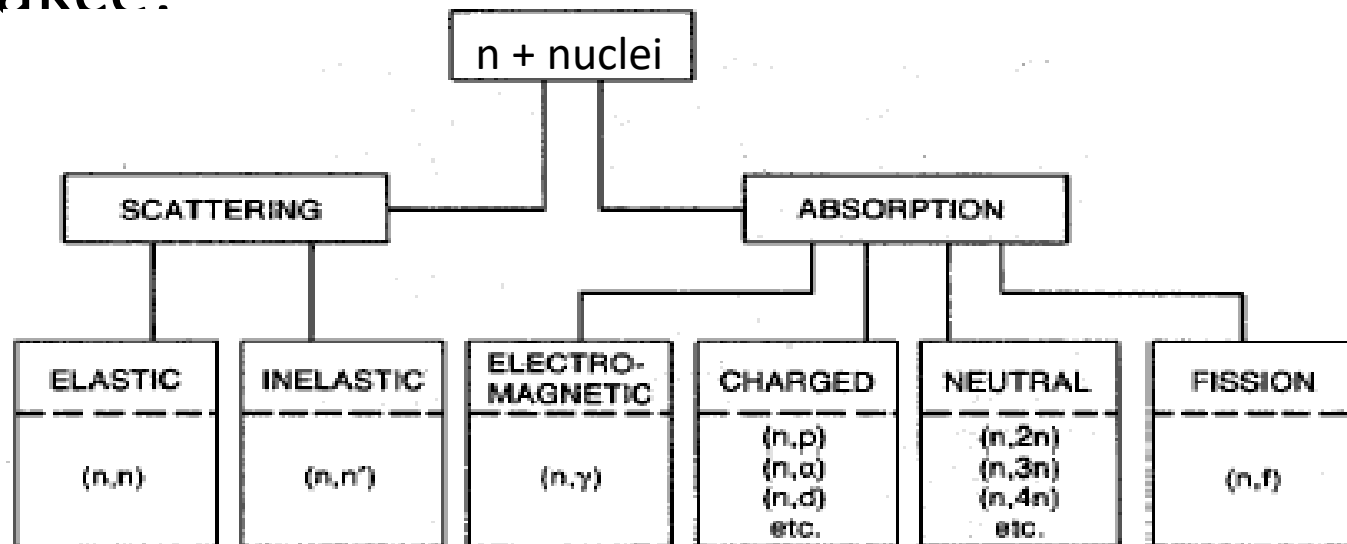


Interakce s jádrem

- 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- ∞); 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/cm³,
 - σ mikroskopický účinný průřez-pravděpodobnost reakce, silně závisí na energii

Proč detekovat: důvody detekce radioaktivního záření

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

Jak detekovat radioaktivní záření?

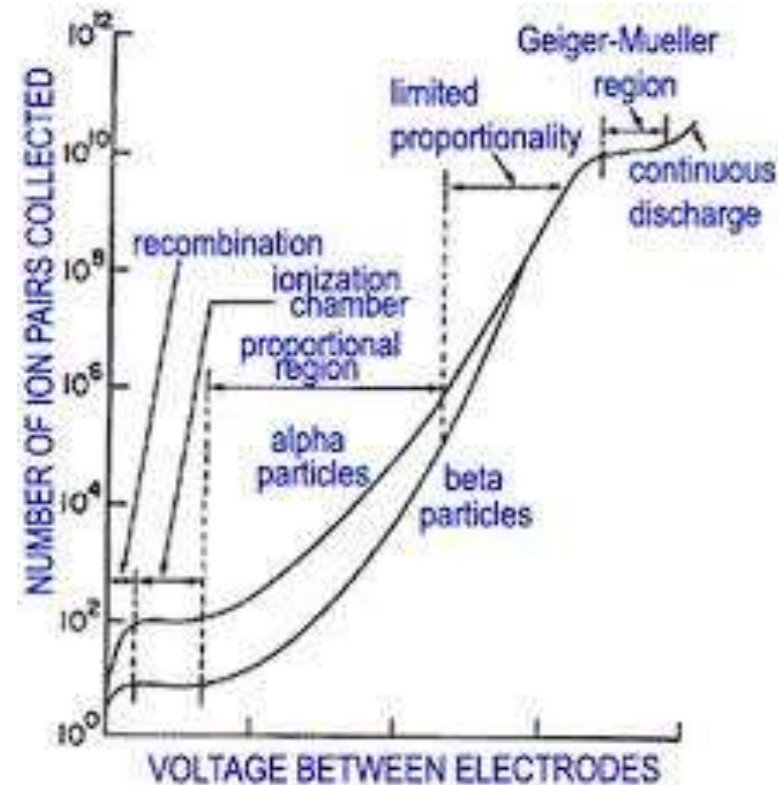
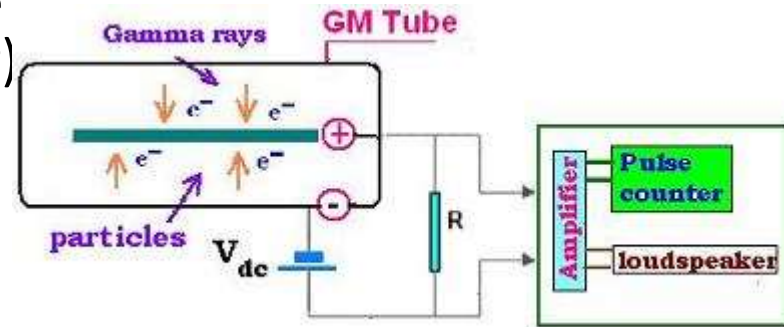
Detektory:

- 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 a deexcitace s uvolněním tepla
- Kalorimetrické: ionizace, zbrzděné elektrony ohřejí látku
- Další...
- Detekce neutronů: konverse na nabitou částici + detekce nabitě 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
 - Použitelné 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 γ zářením nebo elektrony β 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)

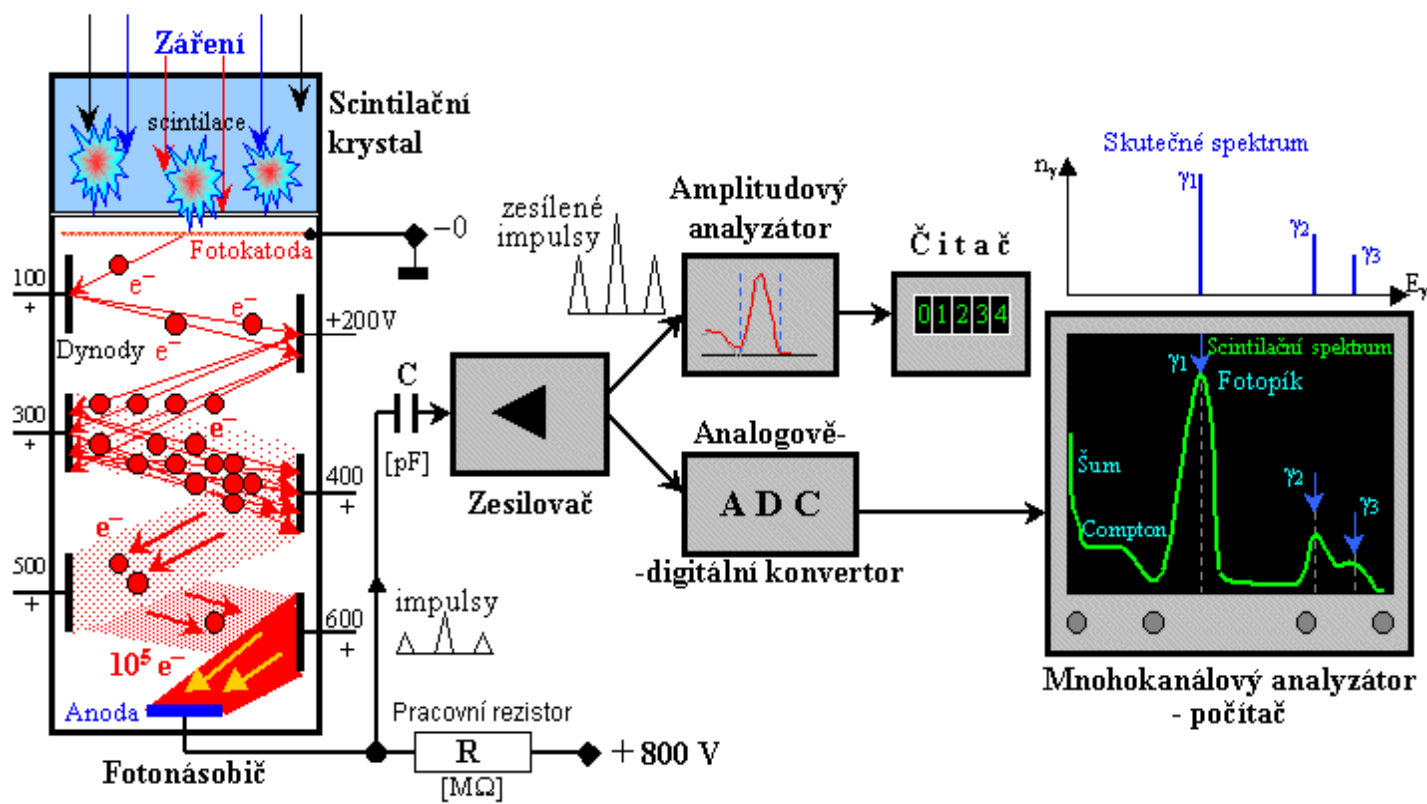
- Desítky scintilačních materiálů

- Hlavní scintilátory:

- NaI s Th
- (Poly)styrén
- LiI s Eu (neutrony)

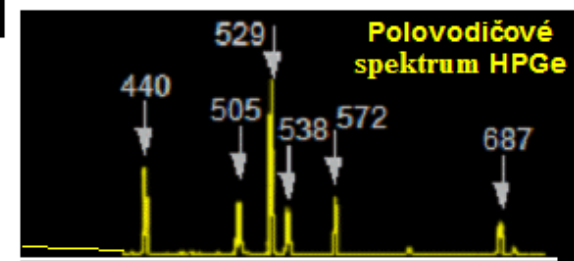
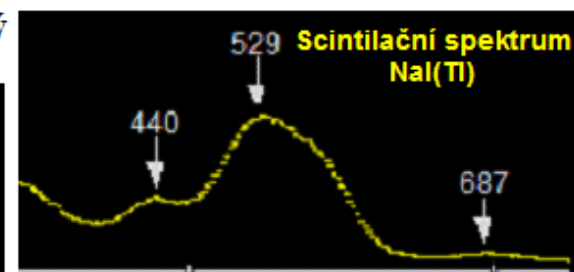
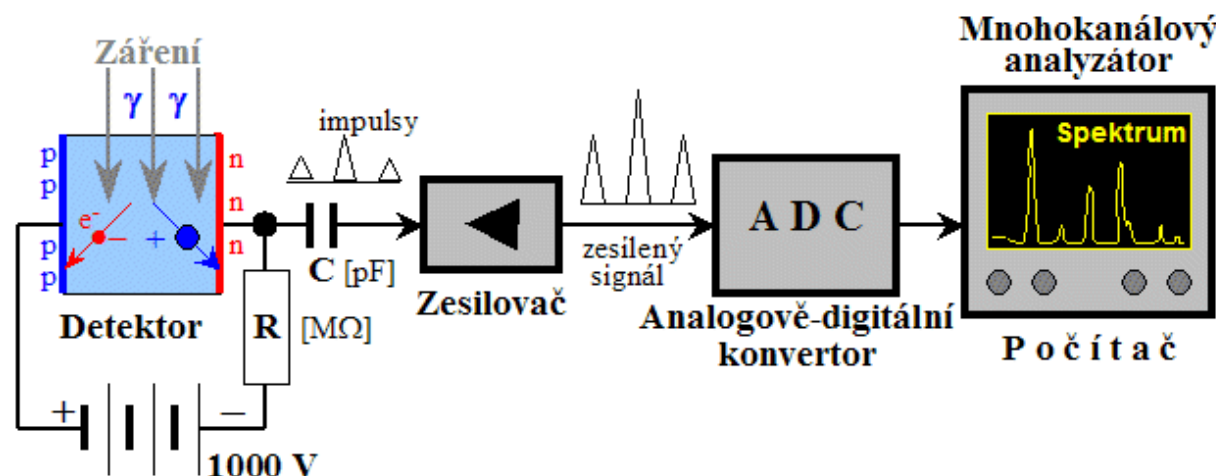
- Hlavně pro γ záření

- Tloušťka a pokrytí scintilátoru limituje použití pro nabitě částice (samoabsorbce)



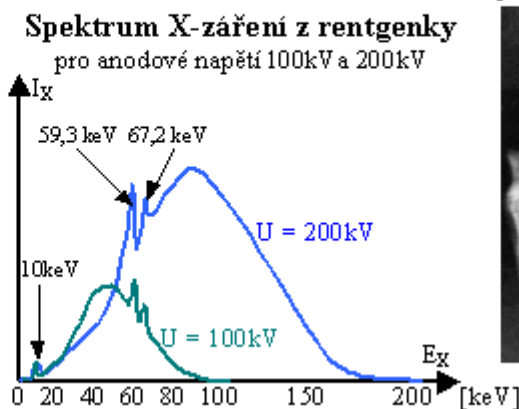
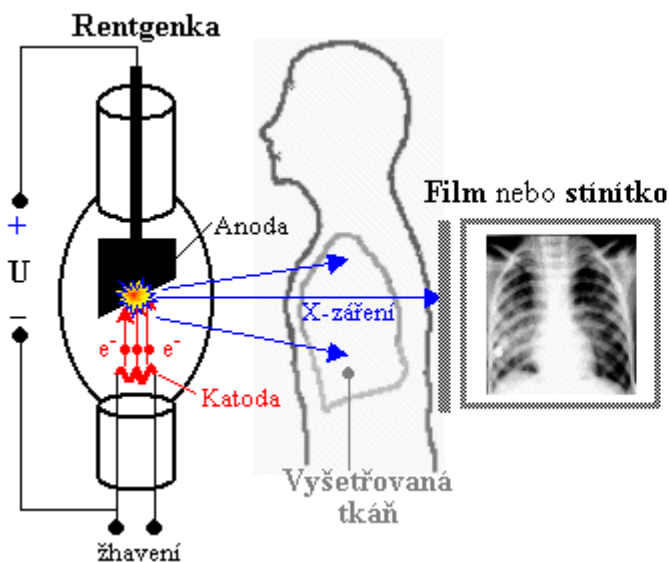
Polovodičový detektor

- 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

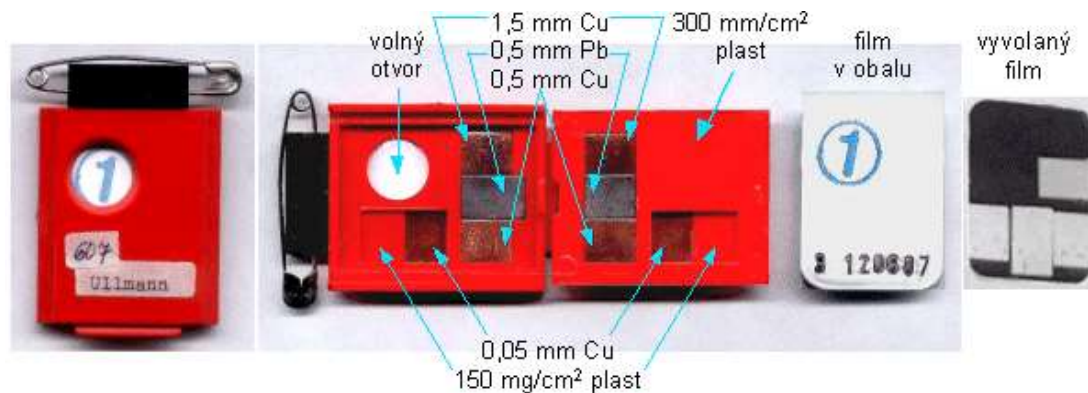
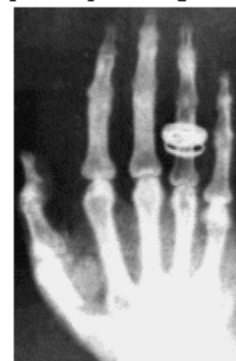


Fotografická detekce

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



První historický snímek
pořízený Roentgenem



Detekce neutronů

- Totéž jako detekce ostatních druhů radioaktivního záření s konversí

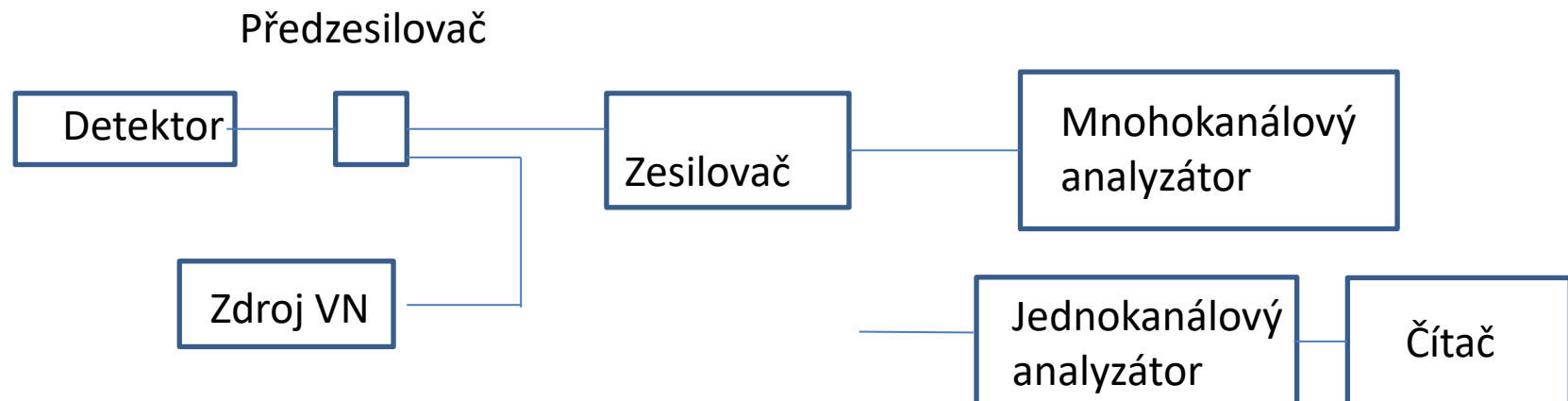
Reaction	σ /barn (for thermal n)	Detector
$n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + p + 0.765 \text{ MeV}$	5400	${}^3\text{He}$ gas detector
$n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li}^* + \alpha + 2.3 \text{ MeV}$ $\rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha + 2.8 \text{ MeV}$	3840	BF_3 gas detector B-lined 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, intensita konstantní po celé dráze
 - Dosah:
 - ve vzduchu několik cm,
 - pevná látka: zlomky mm
 - Lze zastavit listem papíru
- Záření β 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 γ 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 elektrický 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 je pružný rozptyl (n,n)
 - Účinné stínění: zpomalení (vodíkaté materiály)+pohlcení např. bor (karbid boru, gadolinium), kombinace: voda s kyselinou boritou

Typický detekční řetězec

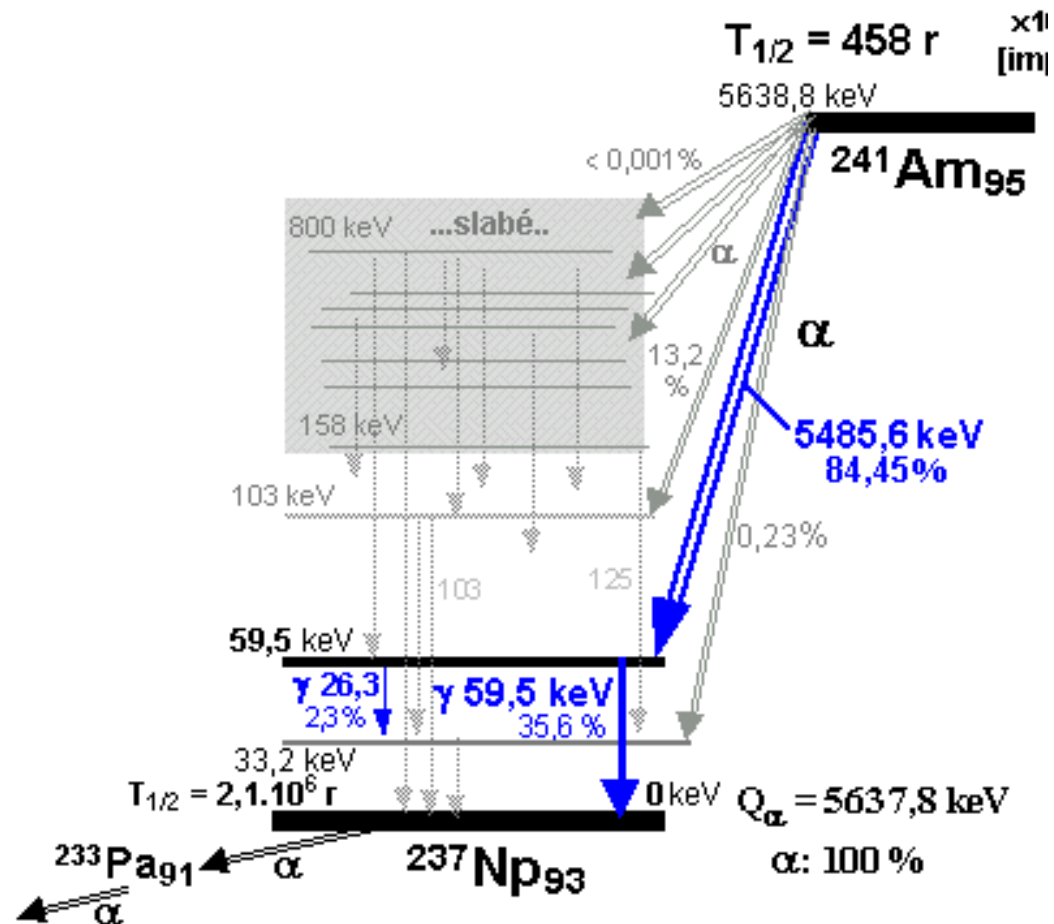
- Detektor, předzesilovač, zdroj vysokého napětí (VN, HV), zesilovač, jedno/mnoho-kanálový analyzátor, čítač
- VN u plynových počítačů i scintilátorů zajišťuje násobení náboje vzniklého ionizací tj. zvyšuje odstup signálu od šumu
- Předzesilovač je potřeba u
 - polovodičových detektorů, které mají malý náboj sebraný na p-n přechodu
 - uspořádání, kde je zesilovač dále než 10m od detektoru (dlouhý kabel)
- Multikanálový analyzátor: změří amplitudu každého pulsu a přidá „1“ do kanálu odpovídajícího té amplitudě =>
 - měříme častost (frekvenci) pulsů s určitou amplitudou
 - amplituda pulsu obvykle odpovídá energii detekované částice, vidíme energetické spektrum



1. Úloha: dolet α částic

- Cíl: změřit dolet α částic a ověřit počáteční energii

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



1. Úloha: dolet α částic

- Postup:

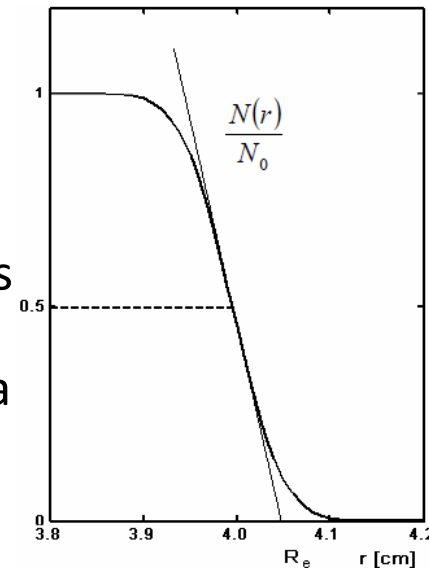
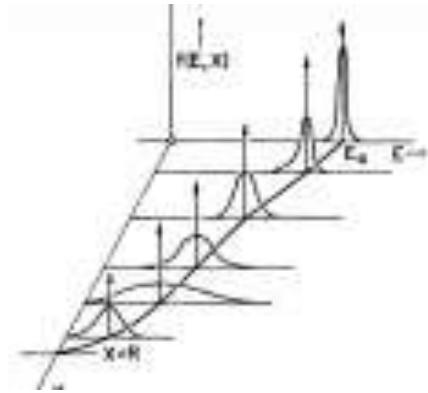
- měříme počet α částic v závislosti na vzdálenosti od zdroje (25-38mm) , je úměrný ploše píku v multikanálovém analyzátoru
- naměřené intenzity (plochy píku) korigujeme na geometrii zdroj-detektor a normalizujeme (intenzita_{25mm}=1)

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

- d [mm] vzdálenost detektor (zapouzdření)-zdroj
- s [mm] zapuštění detektoru (=2,5mm?)
- P [mm²] plocha detektoru (=6mm²)
- Vyneseme graf intenzita-vzdálenost od zdroje, body proložíme polynomem a odečteme extrapolovaný průsečík s osou- x = dolet
- Spočteme energii α částic podle Geigerova empirického vzta pro dolet ve vzduchu:

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

- Porovnáme energii α částic s hodnotou z literatury



2.Úloha: zeslabení γ záření různými materiály

- Cíl: porovnat schopnost různých materiálů zeslabit γ 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 $I = I_0 e^{-\mu x}$: vyneseme $\ln I(x)$ jako funkci tloušťky stínění x a stanovíme μ (směrnice přímky proložené naměřenými hodnotami)
 - Zhodnotíme možnost vyvodit hodnotu zeslabení z jednoduchého měření srovnáním naměřených hodnot s hodnotami z literatury např.
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>

- Přístroje a materiály:
 - zdroj Cs137, energie 662keV,
 - Scintilační detektor NaI(Tl)
 - Kombinovaný přístroj DA310 (zdroj VN, zesilovač, multikanálový analyzátor),
 - destičky z Al, Pb, Fe, Cu různé tloušťky

