



- základní pojmy a veličiny
- mechanismus ztráty energie
- interakce ionizujícího záření s hmotou



záření emitované radioaktivními nuklidy

keV-MeV

ionizační energie atomů a molekul

< 25 eV

při průchodu látkou vyvolá toto záření

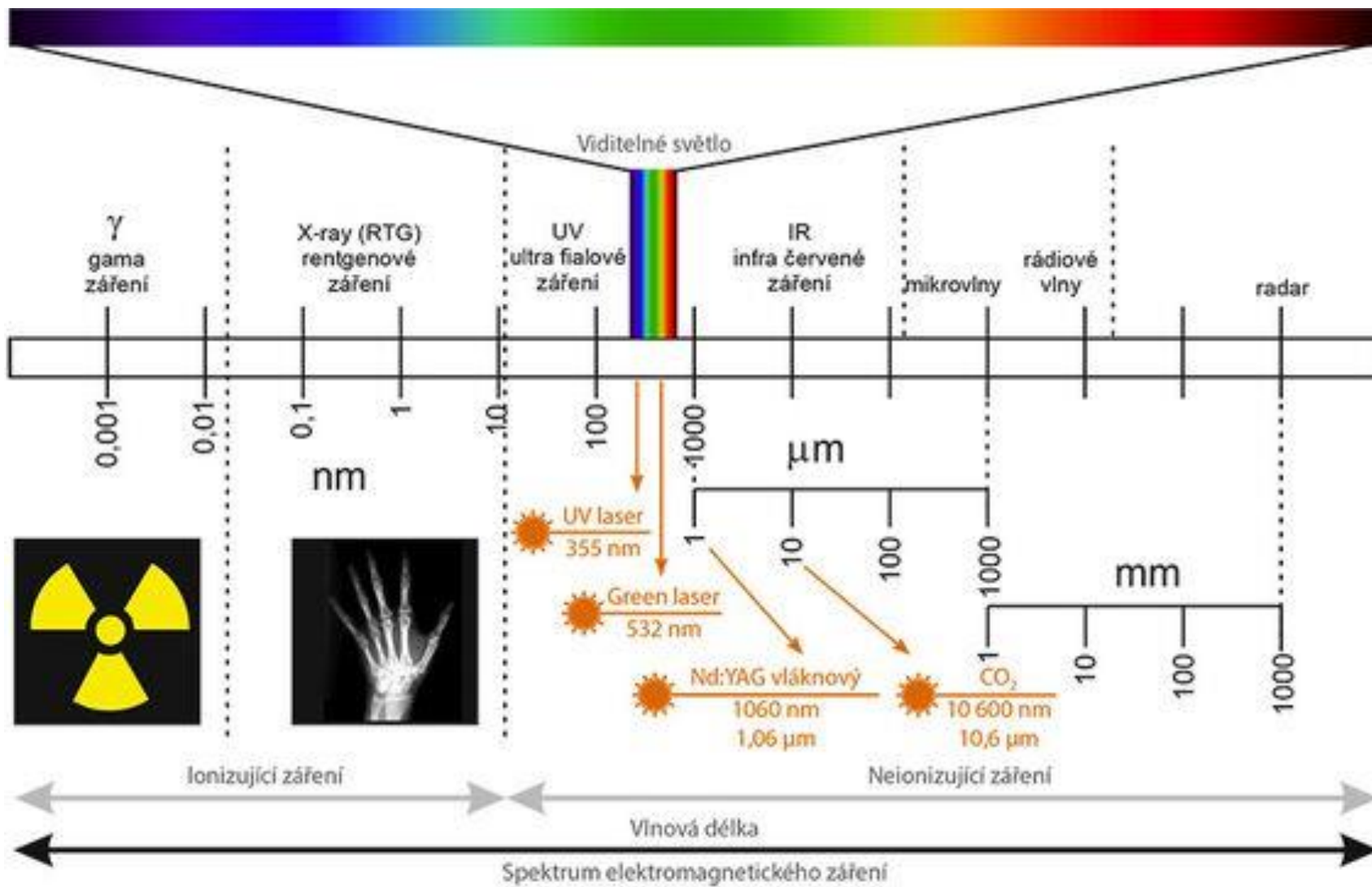
ionizaci

excitaci

poměr ionizovaných a excitovaných stavů: 1:2



Ionizující záření





Interakce ionizujícího záření s hmotou

Srážky IZ s částicemi prostředí

Pružné (celková E_{kin} se zachovává)

Thomsonův – Rayleighův rozptyl

Nepružné (celková E_{kin} se nezachovává)

Jaderné reakce, záchyt elektronu

Ionizace, excitace (elektronové brzdění)

Radiace (brzdné zář., Čerenkovovo zář.)

Polarizace atomů (efekt hustoty)

Přímo ionizující záření

Nabitě částice, např. α , β , p, d, ionty

Nepřímo ionizující záření

Částice bez el. náboje, např. fotony, n



Druhy záření

Těžké nabité částice

Hlavně nepružné srážky s elektronovým obalem atomu – excitace, ionizace

Elektrony

Hlavně nepružné srážky s obalem a pružné srážky s jádry

Elektromagnetické záření

Sekundární ionizace elektrony

Neutrony

Interakce s jádry – pružný a nepružný rozptyl



Interakce ionizujícího záření s hmotou

Co se stane s částicemi ?

dolet (dosah), absorpce, přeměna

Co se stane s látkou ?

ionizace, vznik sekundární aktivity,
radiační poškození...



Veličina charakterizující průlet ionizujícího záření
látkovým prostředím

dolet (dosah)

$$R = g(\underbrace{z, e, v, m}_{\text{částice}}, \underbrace{n_e, \bar{I}}_{\text{látka}})$$

n_e ... hustota elektronů (cm^{-3})

\bar{I} ... střední budící potenciál



dráha částice je přímá

částice přichází o část kinetické energie a dále

pokračuje v průniku

absorpce nastává, až kinetická energie klesne na energii

srovnatelnou s ionizační

maximum ionizace nastává krátce před doletem





sdělená energie - energie, kterou prostřední získá interakcí s ionizujícím zářením

lineární přenos energie - rozložení sdělené energie podél dráhy částice

$$L = \frac{dE}{dx}$$

Z ... nábojové číslo částice

n ... hustota elektronů absorbujícího prostředí - počet elektronů v objemové jednotce

v ... rychlost částic



dolet α částic

dolet α -částic ve vzduchu
max. 10 cm

$$R = 0,0033 E^{3/2}$$

R vzdálenost v m, E v MeV

počet párů iontů na celé dráze α -částice ve vzduchu

$$6,25 \cdot 10^4 R^{2/3}$$

hustota elektronů v kapalinách a tuhých látkách je cca 1000x větší než v plynech

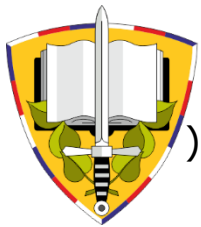
lineární přenos energie je proto cca 10^3 x větší

dosah záření je o tři řády kratší (pro α -záření jsou to desítky μm)



dolet α částic

T (MeV)	Vzduch (mm)	Hliník (μm)	Tkáň (μm)
4.0	25	16	31
4.5	30	20	37
5.0	35	23	43
5.5	40	26	49
6.0	46	30	56
6.5	52	34	64
7.0	59	38	72
7.5	66	43	81
8.0	74	48	91
8.5	81	53	100
9.0	89	58	110
9.5	98	64	120
10.0	106	69	130



dolet β částic

- rychlé elektrony se spojitým spektrem energií
- dráha je lomená - mnohonásobný Coulombovský rozptyl na jádrech nebo elektronech v obalu
- přenos energie je menší jako u α částic
- větší pronikavost, dosah v absorbujícím prostředí
- příčinou je menší náboj elektronu a jeho větší rychlost při stejné energii

$$v = \sqrt{2E / m}$$



Dolet lehkých nabitých částic (e^-)

T (MeV)	Vzduch (m)	Voda (mm)	Hliník (mm)	T (MeV)	Vzduch (m)	Voda (mm)	Hliník (mm)
0.01	0.00229	0.00247	0.00127	0.70	2.51	2.78	1.31
0.02	0.00773	0.00841	0.00422	0.75	2.75	3.04	1.44
0.03	0.0161	0.0175	0.00870	0.80	2.98	3.31	1.56
0.04	0.0266	0.0290	0.0143	0.85	3.22	3.57	1.68
0.05	0.0394	0.0431	0.0212	0.90	3.45	3.84	1.80
0.06	0.0541	0.0591	0.0289	0.95	3.70	4.11	1.93
0.07	0.0708	0.0774	0.0378	1.0	3.94	4.38	2.06
0.08	0.0889	0.0974	0.0474	1.2	4.90	5.47	2.56
0.09	0.109	0.119	0.0578	1.4	5.87	6.56	3.07
0.10	0.130	0.143	0.0693	1.6	6.82	7.66	3.57
0.15	0.256	0.281	0.135	1.8	7.78	8.75	4.07
0.20	0.407	0.448	0.214	2.0	8.83	9.84	4.59
0.25	0.587	0.638	0.314	2.2	9.68	10.9	5.07
0.30	0.763	0.841	0.400	2.4	10.61	12.0	5.59
0.35	0.959	1.06	0.514	2.6	11.51	13.1	6.07
0.40	1.17	1.29	0.611	2.8	12.46	14.2	6.59
0.45	1.38	1.52	0.722	3.0	13.41	15.3	7.74
0.50	1.60	1.77	0.837	4.0	17.86	20.6	9.84
0.55	1.82	2.01	0.952	5.0	22.28	25.8	11.89
0.60	2.05	2.27	1.07	6.0	25.16	31.0	14.26
0.65	2.27	2.52	1.19	8.0	34.38	41.3	–



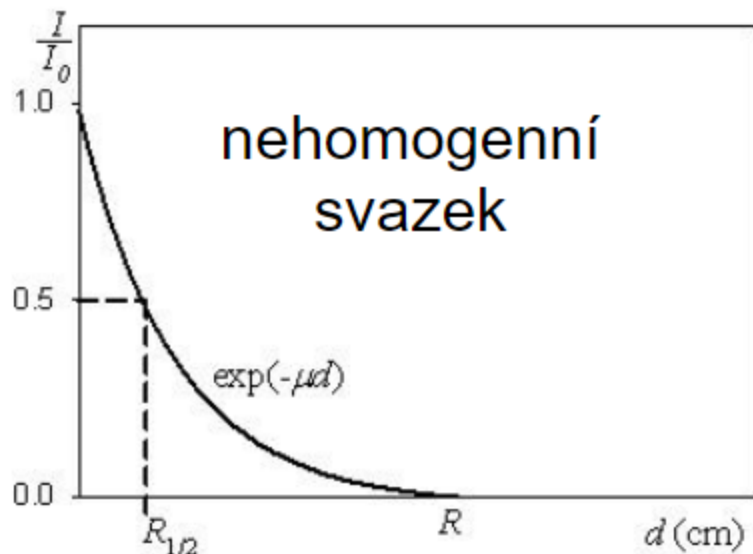
absorpční křivka pro β^- záření

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

d - tloušťka vrstvy (m)

μ - lineární absorpční koeficient (m^{-1})

závisí na hustotě elektronů
absorbujícího prostředí a
energii β^- záření



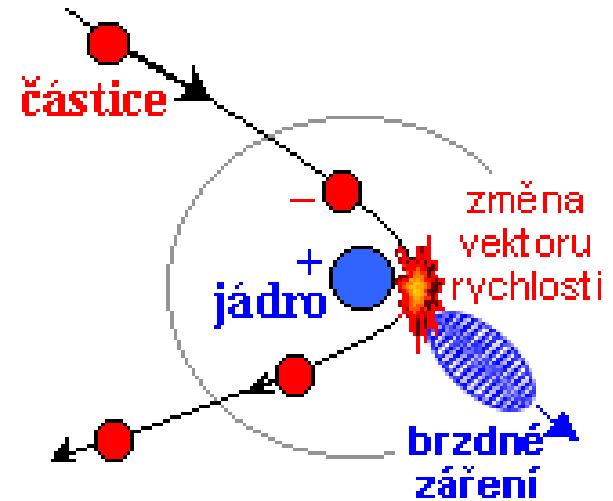


brzdné záření

vzniká při průchodu β^- záření látkou

pohybují-li se β^- částice v blízkosti jádra, jsou elektrickým polem jádra zpomaleny a vyzařuje se přitom elektromagnetické záření z oblasti spojitého rentgenova záření

brzdné záření vzniká v prostředích v látkách s vysokým Z a při velkých energiích β^- záření



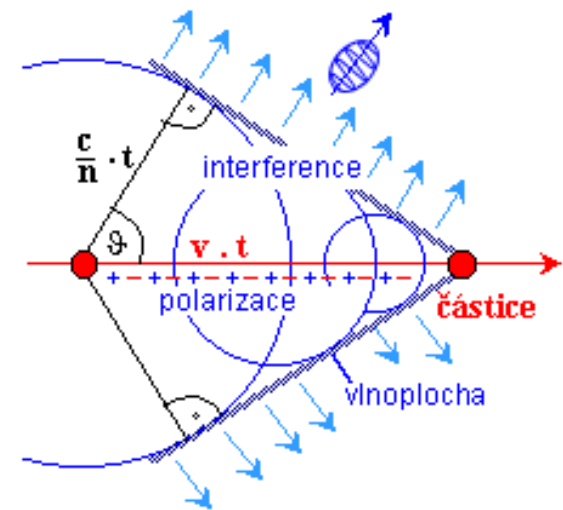
$$\lambda = 0,1 - 0,4 \text{ nm}$$

$$\text{tj. } 60 - 250 \text{ keV}$$



Čerenkovovo záření

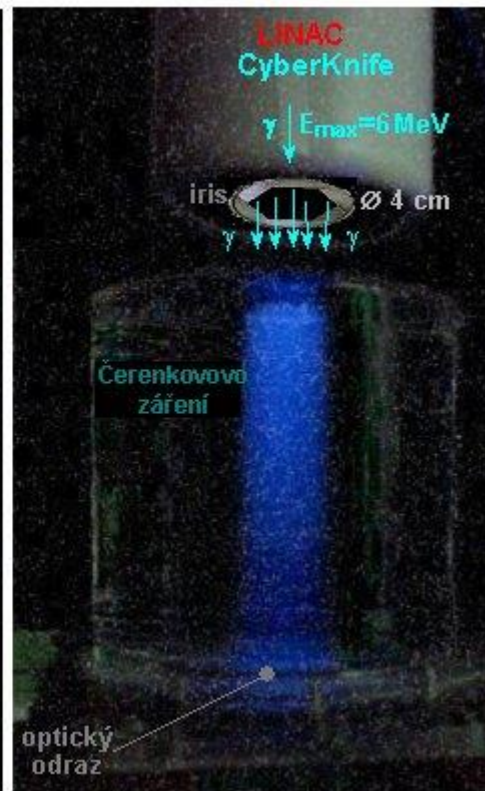
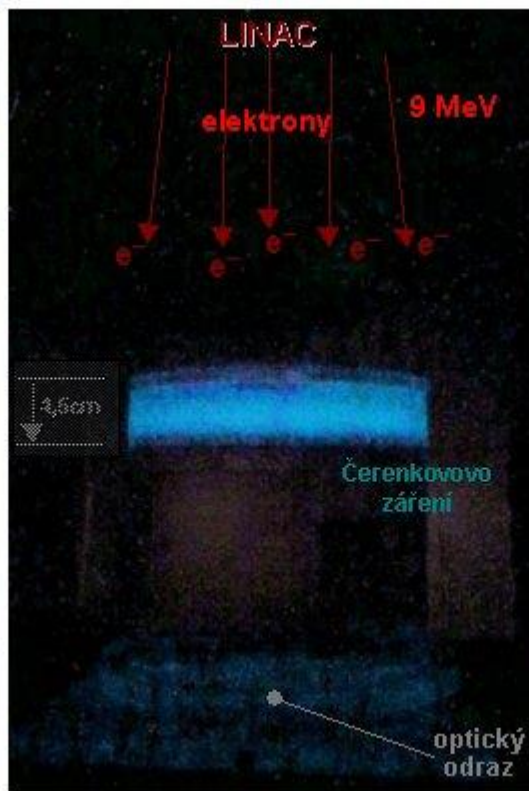
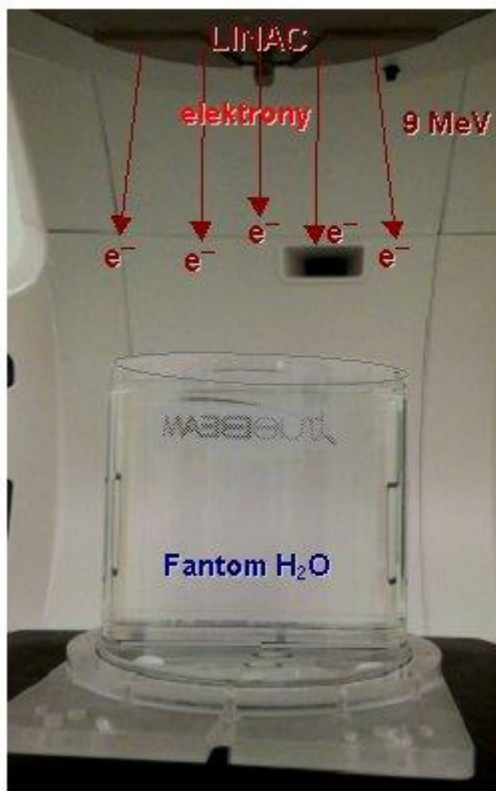
- vzniká při průchodu β^- záření průhledným prostředím (voda, sklo)
- rychlost β^- částic v prostředí je větší než rychlost světla v této látce
- β^- záření vytváří při průchodu rázovou elektromagnetickou vlnu, která se projeví jako světelný záblesk
- ve vodě vzniká Čerenkovovo záření pro $E_\beta > 0,26 \text{ MeV}$



$$v_\beta > c/n$$



Čerenkovovo záření





interakce γ záření s hmotou

neionizující procesy

- bez interakce - kvantum záření může volně proletět mezi atomy látky,
- často k tomu dochází zvláště u tvrdého záření při průchodu lehkými materiály

- Rayleighův koherentní rozptyl záření na elektronech vázaných v atomovém obalu, při němž se přenáší pouze hybnost, nikoli energie
- lehký foton se odráží od celého atomu, jehož hmotnost je mnohonásobně větší



interakce γ záření s hmotou

neionizující procesy

- Thomsonův rozptyl na volných elektronech
- Excitace elektronů na vnějších slupkách atomů, načež se při deexcitaci vyzařuje viditelné nebo infračervené záření

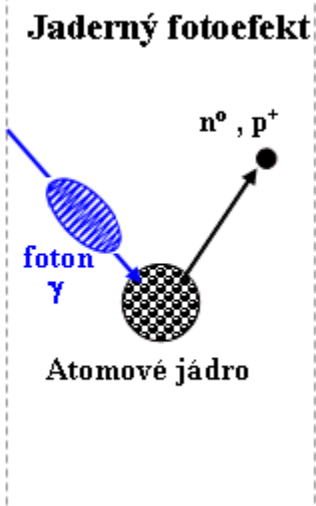
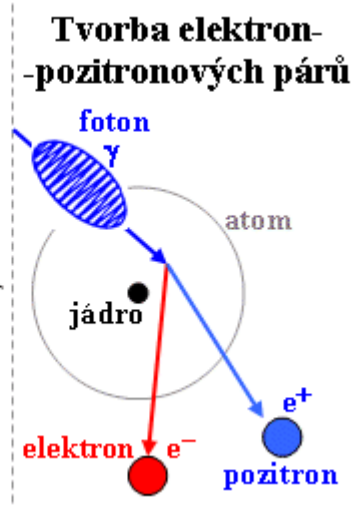
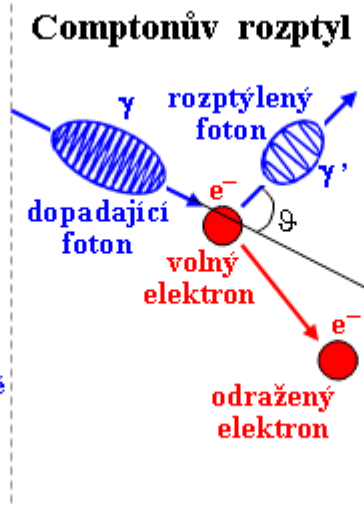
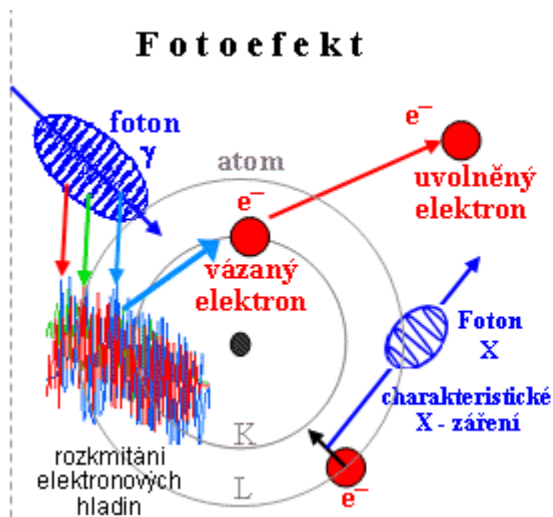


interakce γ záření s hmotou

- γ -záření neionizuje prostředí tak jako hmotné částice nesoucí náboj
- k ionizaci dochází nepřímo účinkem sekundárních elektronů, které v látce vznikají čtyřmi ději



interakce γ záření s hmotou



$E_\gamma \sim 0,1 \text{ MeV}$

$0,1 - 2 \text{ MeV}$

$> 1,02 \text{ MeV}$

$8-10 \text{ MeV}$



interakce γ záření s hmotou

- sekundární elektrony způsobují ionizaci a excitaci podobně jako u β - záření
- γ záření má velkou pronikavost \Rightarrow sekundární elektrony jsou řidčeji rozloženy kolem dráhy částice
- lineární přenos energie je malý a dosah záření velmi velký (často se nedá určit)

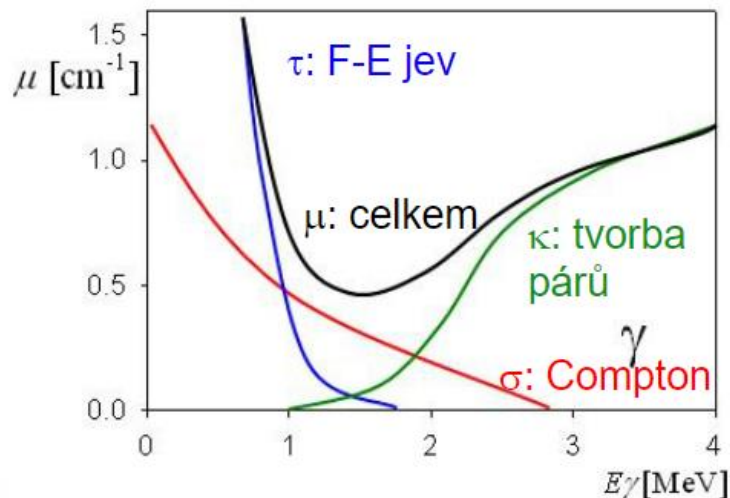


interakce γ záření s hmotou

- zeslabení svazku γ -záření se řídí stejným vztahem jako u β - záření

$$I = I_0 \exp(-\mu d)$$

$$\mu = \sigma + \tau + \kappa \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$





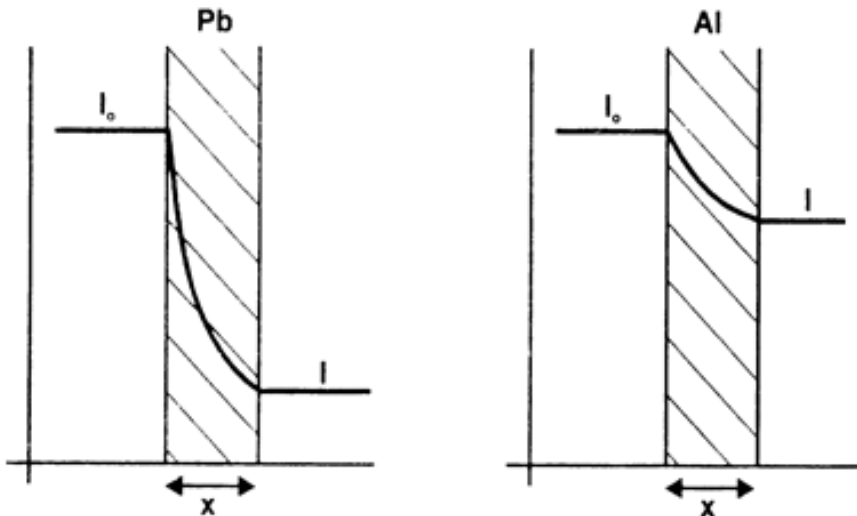
interakce γ záření s hmotou

Lineární absorpční koeficient (m^{-1}) γ záření.

látka	1 MeV	3 MeV
lidská tkáň	7,0	3,9
cihly	12,9	7,4
beton	15,4	8,8
ocel	46	28
olovo	80	47
běžné sklo	14	8
olovnaté sklo	44	26



interakce γ záření s hmotou



Vliv protonového čísla absorbující látky na pokles intenzity γ záření (srovnává se záření o určité energii a počáteční intenzitě při průchodu stejně silnou vrstvou dvou různých látek).



interakce γ záření s hmotou

protože často nelze určit dosah γ -záření, vyjadřuje se pronikavost tohoto záření pomocí tzv. **polotloušťky**

- tloušťka vrstvy látky, která zeslabí intenzitu záření na polovinu

$$I = I_0 / 2 \rightarrow d_{1/2} = \ln 2 / \mu$$



interakce γ záření s hmotou

Polotloušťky (cm) pro absorpci γ záření v některých látkách.

E_γ (MeV)	voda	beton	olovo
0,1	42	17	0,15
0,5	72	34	4
1,0	98	46	9,3
5,0	230	110	15



absorpce neutronů

volné neutrony se spontánně rozpadají radioaktivitou β^- s poločasem asi 12 minut na protony, elektrony a (anti)neutrina

ionizaci prostředí způsobují až sekundární částice, vznikající při interakci neutronů s jádry atomů (odražená lehká jádra, záření β , protony, částice alfa, apod.)



absorpce neutronů

Neutrony po vstupu do látky reagují téměř výhradně s atomovými jádry, a to čtyřmi způsoby:

pružný rozptyl
nepružný rozptyl
radiační záchyt
jaderná reakce



pružný rozptyl

- neutrony ztrácejí při průchodu látkou svou energii srážkami s atomovými jádry

$$\Delta E = E \frac{4mM}{(m + M)^2}$$

ΔE úbytek energie neutronu
při jedné srážce
 m hmotnost neutronu
 M hmotnost jádra

- nejúčinněji se neutrony zpomalují při srážkách s lehkými jádry
- při srážce neutronu s jádrem vodíku se $\Delta E = E$
- veškerá energie se při jediné srážce přenesse celá na proton, který získá značnou energii a opouští své místo (velké nebezpečí pro živé organismy)



nepružný rozptyl

- neutron opět předá část své energie jádru, avšak tato energie se spíše než na mechanický pohyb jádra spotřebuje na zvýšení vnitřní energie jádra - nastane excitace jádra
- při návratu jádra do původního stavu (deexcitaci vzbuzených jaderných hladin) se vyzáří foton záření gama, který již vyvolává ionizaci mechanismy popsanými výše (fotoefekt, Comptonův rozptyl, ...)



radiační záchyt

- neutron je jádrem pohlcen a zůstane v něm vázaný
- následně je emitován jeden nebo více fotonů záření gama (při deexcitaci jaderných hladin vzbuzených při absorpci neutronu)
- záření gama pak již vyvolává ionizaci
- další ionizace pak může nastat i následně a dlouhodobě, jádra jež pohltila neutron jsou často radioaktivní a rozpadají se za vyzáření dalšího ionizujícího záření, především beta- a gama



radiační záchyt

- radiační záchyt neutronů je neúčinnější pro pomalé neutrony s nízkou energií
- látky, které neúčinněji zachycují neutrony, jsou zvláště bor a kadmium, které se proto používají jako stínící materiál pro neutronové záření a pro regulaci neutronového toku v jaderných reaktorech
- záchyt neutronů v jádrech se používá ve velmi citlivé analytické metodě neutronové aktivační analýze



jaderné reakce

po vniknutí neutronu do jádra je emitována jiná částice, např. proton nebo částice alfa

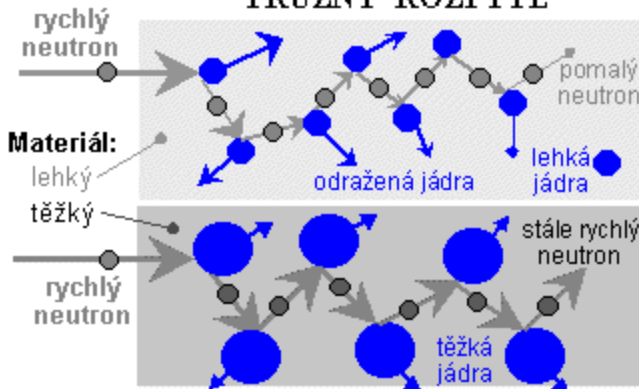
do kategorie jaderných reakcí fakticky patří i radiační záchyt, jenže bez emise těžké částice

radiační záchyt a další reakce vyvolané neutrony se používají pro výrobu umělých radionuklidů, především β^- , v jaderných reaktorech

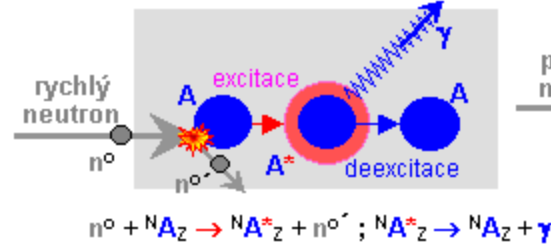


absorpce neutronů

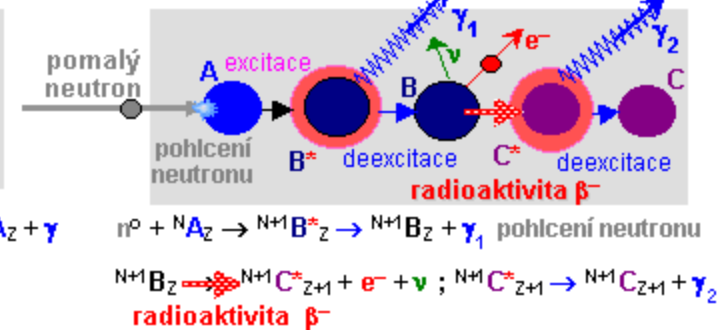
PRUŽNÝ ROZPTYL



NEPRUŽNÝ ROZPTYL



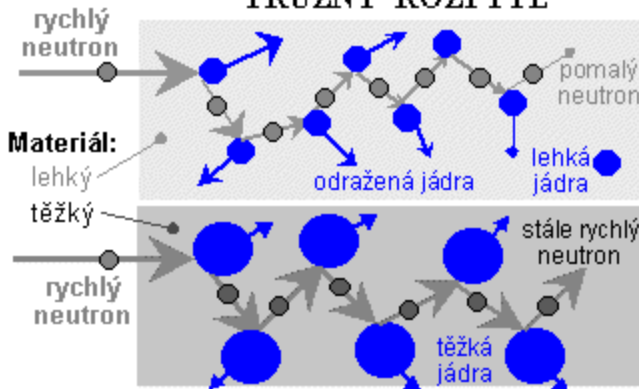
ZÁCHYT NEUTRONU + AKTIVACE



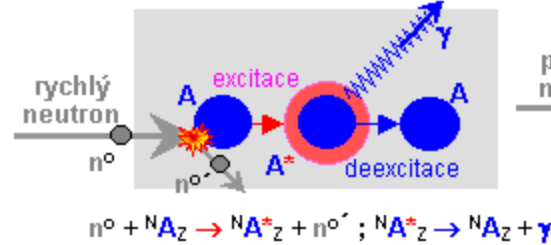


absorpce neutronů

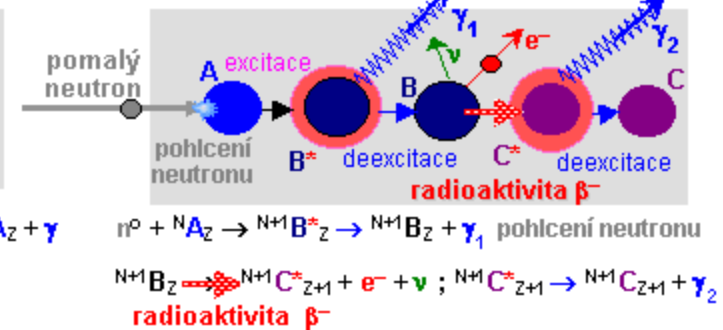
PRUŽNÝ ROZPTYL



NEPRUŽNÝ ROZPTYL

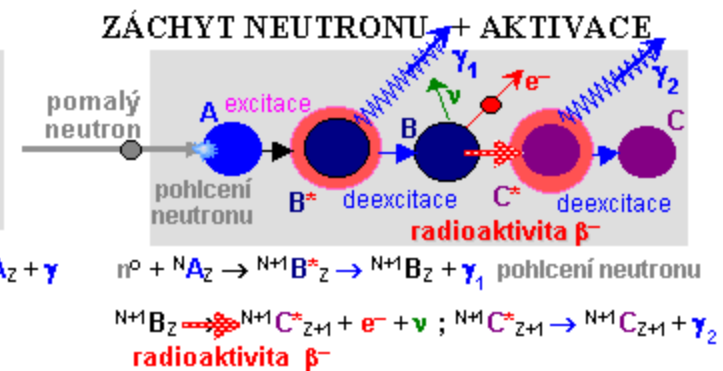
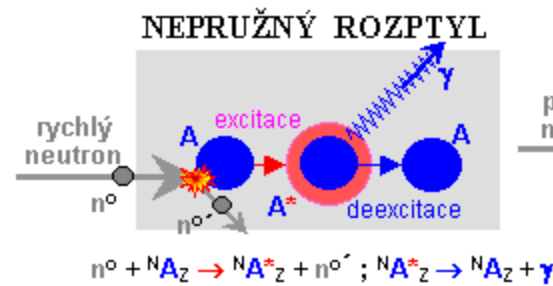
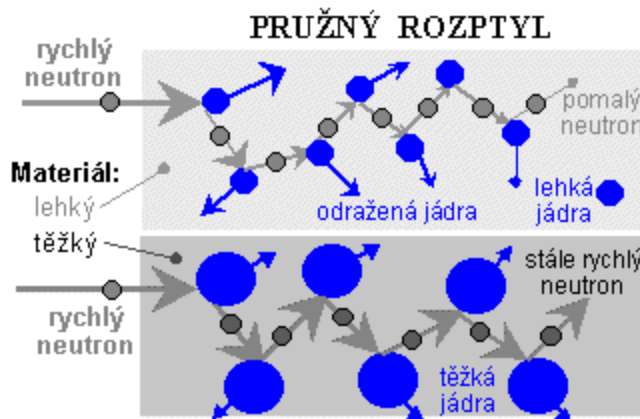


ZÁCHYT NEUTRONU + AKTIVACE





absorpce neutronů





Univerzita obrany
v Brně

Ionizující záření

odkazy na studijní materiály

<https://slideplayer.cz/slide/2935760/>

<https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>