

Röntgenové žiarenie a žiarenie gama

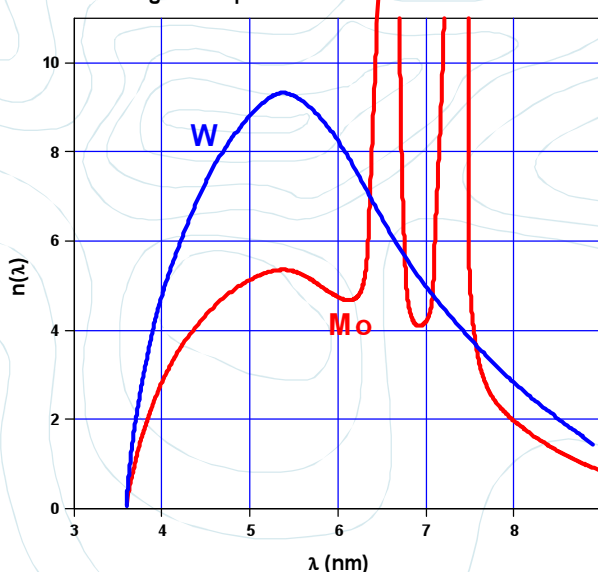
- Všeobecne možno povedať, že pojem Röntgenové žiarenie zahŕňa tie druhy elektromagnetického ionizujúceho žiarenia, ktoré vzniká mimo atómového jadra
- Röntgenové žiarenie (RTG) je:
 - žiarenie, ktoré sprevádza **elektrónové prechody** a ich interakcie (zahŕňa čiarové spektrá charakteristického žiarenia),
 - spojité **brzdové žiarenie** vznikajúce pri spomaľovaní ťažkých nabitých častíc,
 - **anihilačné žiarenie** pochádzajúceho z anihilácie párov elektrón - pozitron.

Dozimetria a radiačná ochrana

3

Spektrum röntgenky

Energetické spektrum žiarenia X z W a Mo terčika



Charakteristické röntgenové žiarenie vzniká v dôsledku nepružného rozptylu nabitých častíc – urýchlených elektrónov s atómom, pričom z obalu vyletí orbitálny elektrón napr. z vrstvy K.

Vakanciu zaplní elektrón z vyššej orbity, čím sa spustí kaskáda prechodov spojených s emisiou série charakteristického žiarenia.

Prechody na K orbitu sa označujú ako K-séria, pričom L-K prechodu zodpovedá Ch.ž. K_{α} , prechodu M-K Ch.ž. K_{β} a pod.

Dozimetria a radiačná ochrana

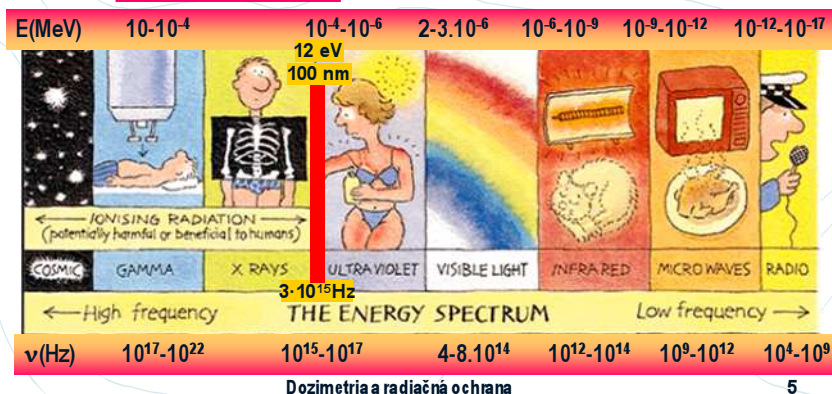
4

Vlnové a korpuskulárne vlastnosti

- Vlnová dĺžka gama a RTG. žiarenia sa pohybuje v rozmedzí od 10^{-8}m (röntgenové žiarenie) do 10^{-12}m (žiarenie γ).
- Energia fotónov E_γ je spojená s ich vlnovou dĺžkou podľa vzťahu:

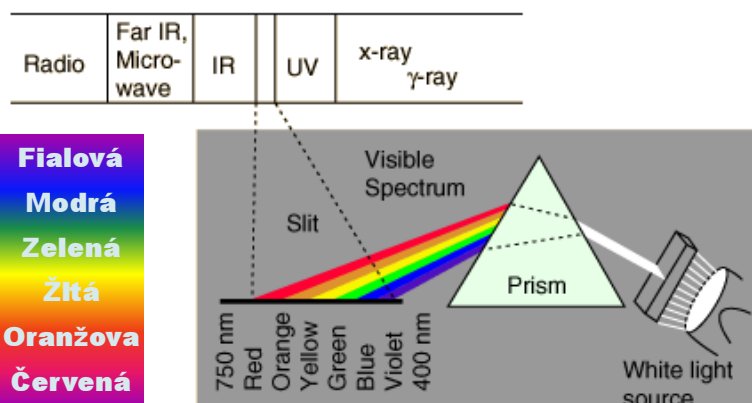
$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\begin{aligned} h &= 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \\ h &= 4,141 \cdot 10^{-21} \text{ MeV.s} \\ c &= 2,99 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \end{aligned}$$



5

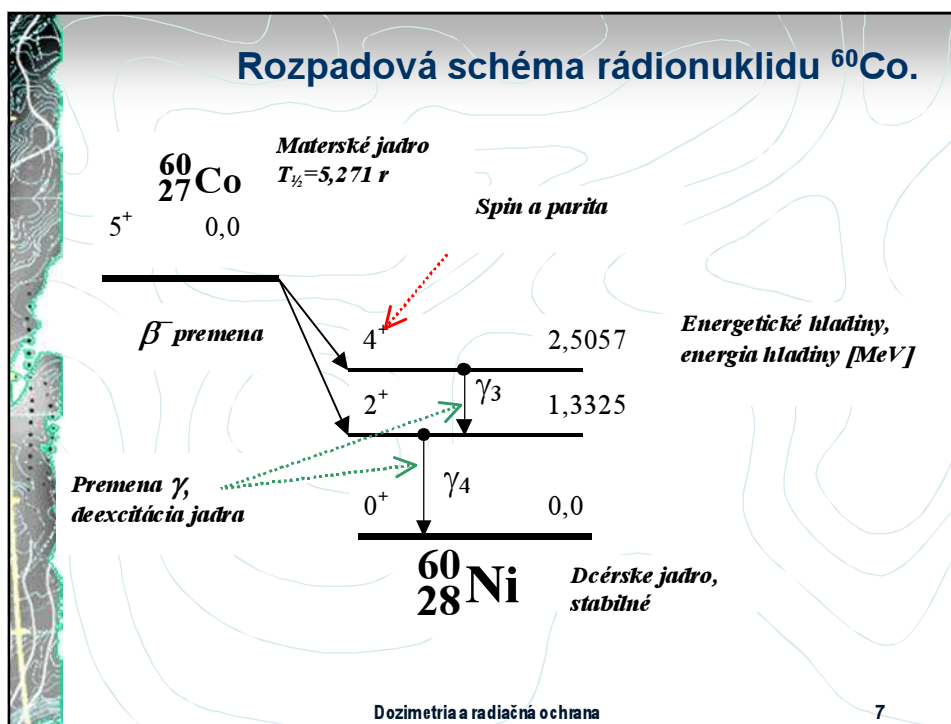
Frekvenčný rozsah viditeľného svetla



Frequencies: $4 - 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$
Wavelengths: 750 - 400 nm
Quantum energies: 1.65 - 3.1 eV

Dozimetria a radiačná ochrana

6



Absorpcia žiarenia gama v látke

Skutočná absorpcia fotónov je určovaná premenou ich energie na kinetickú energiu elektrónov absorbujúceho prostredia.

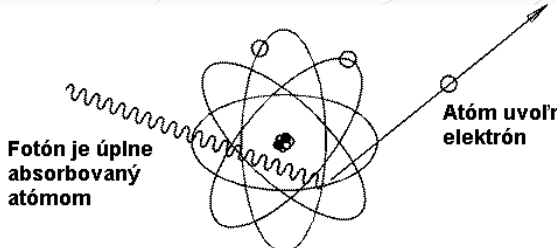
Deje sa tak týmito interakciami:

- 1. Fotoelektrický efekt (fotoefekt),
- 2. Comptonov efekt (rozptyl),
- 3. Tvorba párov elektrón – pozitron
- 4. Fotojadrové reakcie.

Dozimetria a radiačná ochrana

8

Fotoefekt



Fotón je úplne absorbovaný atómom

Atóm uvoľní elektrón

Fotoefekt je taký typ interakcie γ žiarenia s atómom, pri ktorom prejde všetka jeho energia na niektorý elektrón atómového obalu.

Uvoľní sa elektrón a jeho kinetická energia bude: $E_k = h\nu - E_v$.

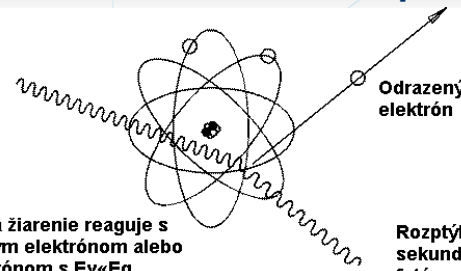
S rastom energie γ žiarenia klesá absorpčný koeficient, s rastom protónového čísla materiálu Z rastie $\tau \sim NZ^5(h\nu)^{-3}$.

V mieste, kde odovzdaná energia nie je dostatočná na vyrazenie K elektrónu pozorujeme skokovú zmenu τ - hranu absorpčného pásu K.

Dozimetria a radiačná ochrana

9

Comptonov rozptyl



Gama žiarenie reaguje s voľným elektrónom alebo elektrónom s $E_v \ll E_\gamma$

Odrazený elektrón

Rozptýlený sekundárny fotón gama

Pri interakcii fotónu s voľným elektrónom, alebo s elektrónom, ktorého energia väzby je zanedbateľne malá oproti energii fotónu, dochádza ku Comptonovmu rozptylu.

Fotón odovzdá časť svojej energie elektrónu a nový fotón s menšou energiou odletí z miesta interakcie iným smerom.

Koeficient absorpcie spojený s Comptonovým efektom je úmerný protónovému číslu Z ($\sigma \sim NZ$), lebo so stúpajúcim Z stúpa aj počet elektrónov s ktorými môže fotón reagovať.

Dozimetria a radiačná ochrana

10

Fotoefekt na voľnom elektróne nie je možný!

Nech E_γ je energia fotónu **pred** zrážkou s voľným elektrónom

Impulz fotónu je potom **$2E_\gamma/c$** .

Ak by všetka energia E_γ prešla na voľný elektrón, potom energia rozptýleného elektrónu po zrážke bude

$$E_e = E_\gamma = mv^2/2$$

a impulz elektrónu **po** zrážke bude

$$mv = 2E_\gamma/v$$

Impulz elektrónu po zrážke musí byť rovný impulzu fotónu a to platí len pre $v=c$, čo v skutočnosti nie je možné!

Tvorba párov elektrón - pozitron



Tvorba párov dominuje pri vysokých energiách a vysokých Z .
Vznikajúce pozitrony prakticky okamžite anihilujú s elektrónmi za vzniku dvoch fotónov γ s energiami 511 keV.

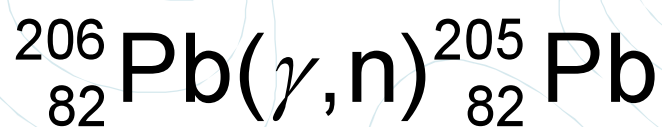
Ked' fotón γ žiarenia, ktorého energia je vyššia ako 1.022 MeV prenikne do Coulombovského poľa jadra, môže dôjsť k vytvoreniu páru elektrón + pozitron.

Vzniknuté častice majú kinetickú energiu, ktorá sa rovná kinetickej energii pôvodného fotónu, zmenšenej o energiu ekvivalentnú pokojovej hmotnosti elektrónu a pozitronu $E_k = h\nu - 2mc^2$.

Pravdepodobnosť vzniku páru rastie úmerne so Z^2 . ($\kappa \sim NZ^2$)

Fotojadrové reakcie

- Fotón môže byť absorbovaný jadrom a vyraziť z neho nukleón.
- Fotón musí mať dostatočnú energiu na to, aby nukleón prekonal väzobné sily.
- napr. reakcia uvedená nižšie je možná iba pri $E_{\gamma\min}=8,09 \text{ MeV}$
- Reakcia (γ, p) má ešte vyššiu prahovú energiu
- Ďalšie reakcie: $(\gamma, 2n)$, (γ, np) , (γ, α) , (γ, f)

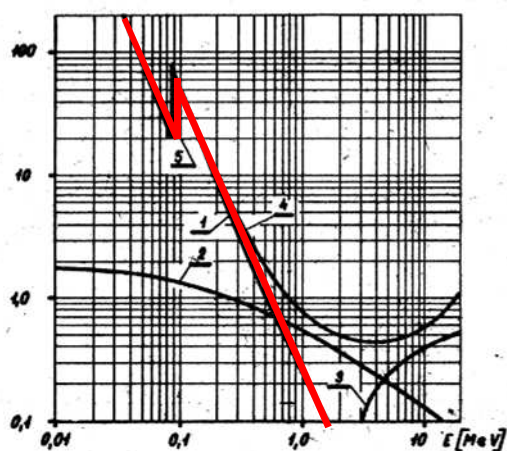


Dozimetria a radičná ochrana

13

Lineárny koeficient zoslabenia pre gama žiarenie

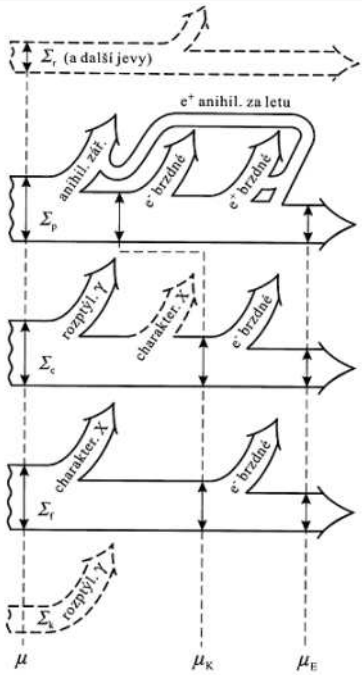
$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$



1. Fotoefekt,
2. Comptonov efekt,
3. Tvorba párov,
4. Celkový koeficient absorpcie,
5. Hrana absorpčného pásu (K) pre olovo

Dozimetria a radičná ochrana

14



Koeficient prenosu energie
Koeficient absorpcie energie

Σ_K - koherentný rozptyl
 Σ_f - fotoefekt
 Σ_C - Comptonov rozptyl
 Σ_p - tvorba párov
 Σ_r - fotojadrové reakcie

Zoslabenie zväzku všetkými procesmi v látke zohľadňuje lineárny koeficient zoslabenia μ [m^{-1}].

Prenos energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú sekundárnu časticu zohľadňuje koeficient prenosu energie μ_{tr} [m^{-1}] (μ_E).

Časť odovzdanej energie sa odnesie mimo uvažovaného objemu. To zohľadňuje koeficient absorpcie energie $\mu_E = \mu_{tr} (1-G)$ [m^{-1}], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

Dozimetria a radiačná ochrana 15

Definícia: Lineárny koeficient zoslabenia μ [m^{-1}]

- Charakterizuje zoslabenie zväzku pri prechode látkou.
- Je úmerný pravdepodobnosti interakcie na jednotke dráhy.
- Je to vlastne makroskopický účinný prierez Σ_{tot} pre úbytok častíc zo zväzku.
- Hustota prúdu častíc J sa pri prechode vrstvou dx zníži o dJ .

$dJ = -\mu \cdot J \cdot dx$

→

$$\mu = -\frac{1}{J} \frac{dJ}{dx}$$

Hustota prúdu častíc J [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] je definovaná ako vektorová veličina, ktorej integrál normálovej zložky cez každú plochu sa rovná celkovému počtu častíc I prechádzajúcich cez danú plochu $e_n dA$ za malý časový interval dt , delený týmto intervalom.

$$\int J \cdot e_n dA = \frac{dI}{dt}$$

Dozimetria a radiačná ochrana 16

Absorpčný zákon pre úzky paralelný zväzok

Pri prechode röntgenového alebo gama žiarenia cez hmotné prostredie dochádza k jeho zoslabovaniu podľa exponencionálneho zákona.

$$J(x) = J_0 \cdot e^{-\mu x}$$

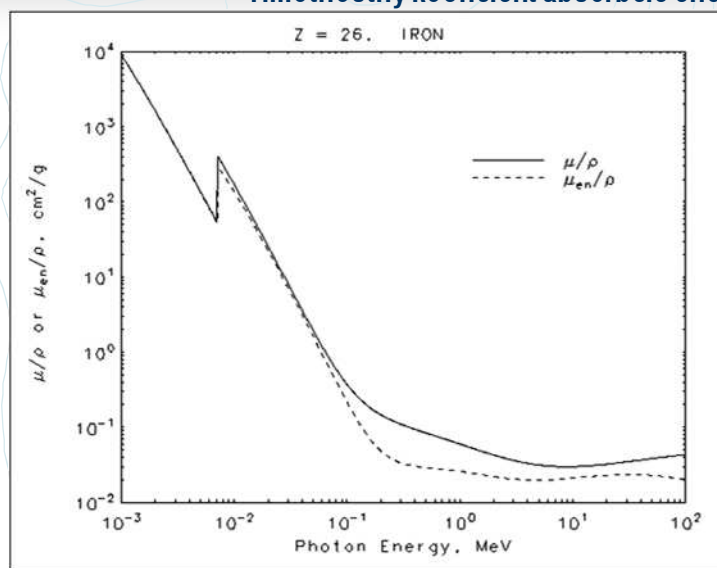
Absorpčný zákon v uvedenej forme platí pomerne presne, ak je lúč dopadajúci na absorbátor úzky a keď pomocou clón zabezpečíme aby aj na detektor dopadal len úzky lúč.

Hovoríme o úzkom paralelnom zväzku.

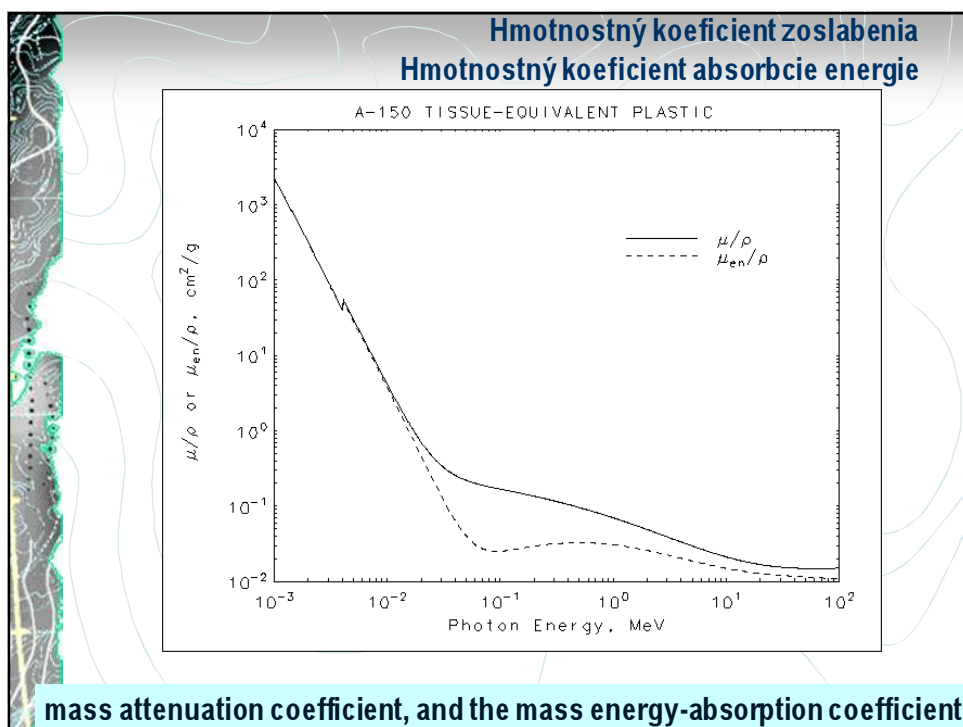
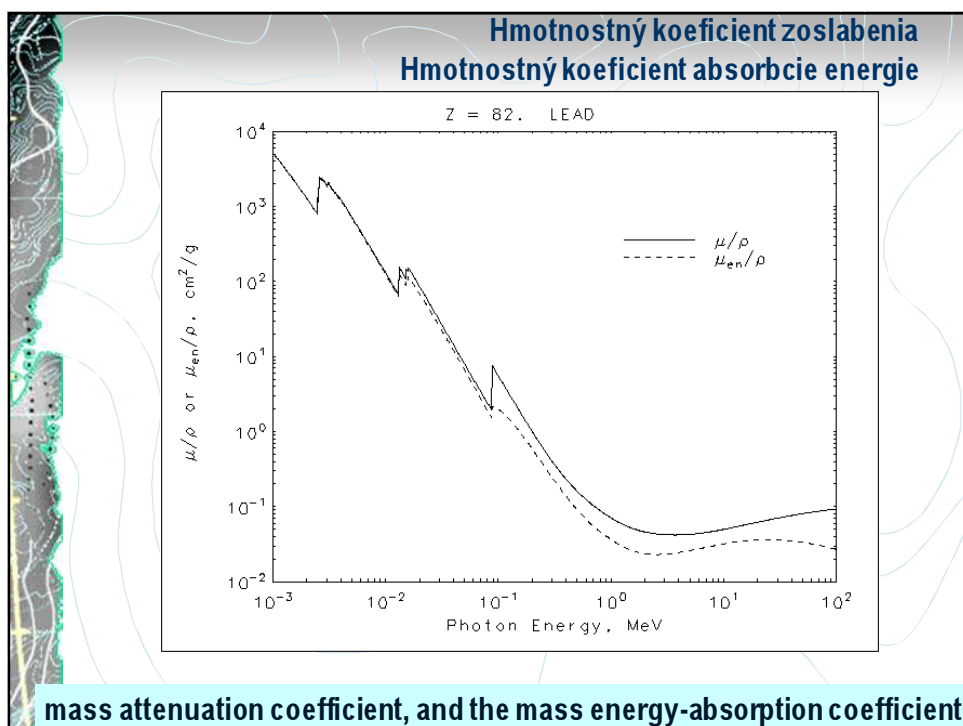
Dozimetria a radiačná ochrana

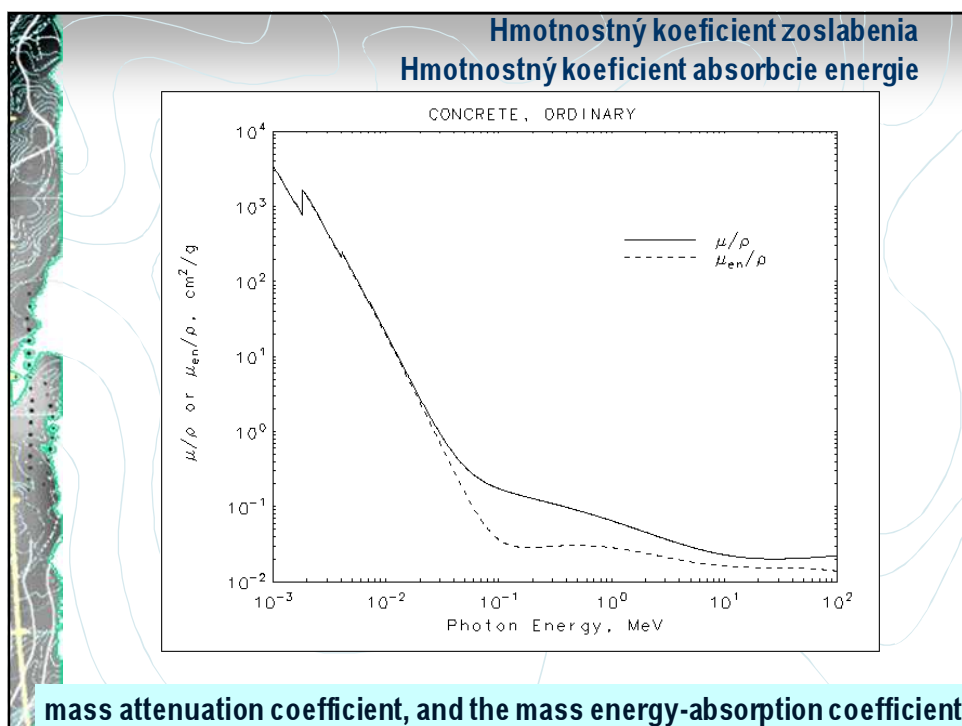
17

Hmotnostný koeficient zoslabenia Hmotnostný koeficient absorpcie energie



mass attenuation coefficient, and the mass energy-absorption coefficient





Hmotnostný koeficient zoslabenia μ (cm^2g^{-1})
rôznych materiálov pre fotóny emitované z ^{137}Cs a ^{60}Co

Materiál	662 keV	1173 a 1333 keV
Vzduch	0,08055	0,05687
Betón obyčajný	0,08236	0,05807
Olovo	0,1248	0,05876
Urán	0,1490	0,06370
Voda	0,08956	0,06323
Plastický scintilátor	0,08732	0,06166
Živé tkanivo	0,08857	0,06253

Pre ^{60}Co bola použitá energia 1250 keV

Dozimetria a radičná ochrana

Hrúbka zodpovedajúca 10x zoslabeniu pre úzky zväzok pre rôzne tienenia a rôzne žiarenie

Materiál	¹³⁷ Cs	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	⁶⁰ Co
	úzky zväzok	široký zväzok	úzky zväzok	široký zväzok
Urán	0,9 cm	1,1 cm	1,9 cm	2,4 cm
Olovené sklo	2 cm	-	3,6 cm	-
Olovo	1,9 cm	2,2 cm	3,5 cm	4,5 cm
Železo	4 cm	6,6 cm	5,5 cm	8,8 cm
Betón obyčajný	12,4 cm	23,9 cm	16,9 cm	28,1 cm
Voda	26,7 cm	54,3 cm	36,4 cm	65 cm

$x = 1$ cm olova predstavuje tzv. plošnú hustotu
 $x_p = 13,4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (hmotnostná hrúbka, hrúbka)

Dozimetria a radiačná ochrana

23

Absorpčný zákon pre široký zväzok

- Ak na detektor dopadá široký zväzok, registruje sa aj rozptýlené žiarenie a do absorpčného zákona treba zaviesť korekciu faktorom B:

$$J = J_0 B \cdot e^{-\mu x}$$

Veličina $B(E_\gamma, Z, \mu x) > 1$ a nazýva sa **nárastový faktor**.

Určuje koľkokrát sa zvýši intenzita žiarenia za absorbátorom v dôsledku mnohonásobného rozptylu v porovnaní s úzkym paralelným zväzkom.

Dozimetria a radiačná ochrana

24

Nárastový faktor B pre olovo

E MeV	μ cm^{-1}	μx						
		1	2	4	7	10	15	20
0,5	1,70	1,24	1,41	1,68	1,99	2,26	2,27	2,71
1,0	0,77	1,35	1,66	2,21	2,95	3,65	4,34	5,25
2,0	0,508	1,35	1,68	2,37	3,41	4,49	6,33	8,27
3,0	0,468	1,29	1,59	2,25	3,39	4,74	7,46	10,7
4,0	0,472	1,23	1,49	2,06	3,20	4,72	8,33	13,7
5,11	0,481	1,18	1,38	1,89	3,01	4,71	9,64	19,0
6,0	0,494	1,15	1,33	1,79	2,87	4,70	10,91	25,2
8,0	0,520	1,11	1,24	1,59	2,48	4,11	10,68	29,5
10	0,550	1,09	1,19	1,46	2,16	3,49	9,25	27,6

Dozimetria a radiačná ochrana

25

Polhrúbka $d_{1/2}$

- Hrúbka vrstvy látky zoslabujúca hustotu prúdu častíc v jednosmernom zväzku na polovicu pôvodnej hodnoty

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu}$$

Dozimetria a radiačná ochrana

26

Hrúbka zodpovedajúca 2x zoslabeniu pre rôzne tienenia a žiarenie a ^{60}Co a ^{137}Cs

Materiál	Polhrúbka pre ^{137}Cs	Polhrúbka pre ^{60}Co
Urán	0,3 cm	0,6 cm
Olovené sklo	0,6 cm	1,1 cm
Olovo	0,6 cm	1,1 cm
Železo	1,2 cm	1,7 cm
Betón obyčajný	3,7 cm	5,1 cm
Voda	8 cm	11 cm

Výpočty sú pre úzky zväzok

Dozimetria a radiačná ochrana

27

Výpočet ochrany pomocou koeficienta zoslabenia určenie hrúbky olovenej ochrany

$$k = \frac{I_0}{I} = \frac{1}{B \cdot e^{-\mu x}}$$

$$k = 2^n$$

k - koeficient (krátnosť) zoslabenia
n - počet polhrúbok materiálu

kIE(MeV)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5
2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,15	1,3	1,7
5	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,5	1,9	2,2	3,2	3,5	4,8
10	0,3									4,9	
50	0,4									6,3	
100	0,5									8,0	
1000	0,7	1,5	2,4	3,3	4,4	5,7	6,95	8,1	10,0	11,1	15,4
10 ⁴	1,05									14,2	
10 ⁵	1,15									17,4	
10 ⁶	1,45									20,4	
10 ⁷	1,7	3,4	5,4	7,6	10,1	12,6	15,2	17,8	20,3	22,5	31,2

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

Príklad

- Bodový zdroj žiarenia (^{137}Cs , $E_\gamma = 661 \text{ keV}$) spôsobuje vo vzdialenosti 0,1 m dávkový príkon $10^{-3} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$. Predpokladá sa pracovná vzdialenosť 2 m. Treba určiť hrúbku ocelej ochrany, aby pri pracovnom čase 36 hodín za týždeň nedostal pracovník dávkový ekvivalent väčší ako povoľuje príslušný predpis (t.j. napr. 20 mSv/rok).
- Limitnej ročnej efektívnej dávke 20 mSv zodpovedá dávkový príkon (pre fotóny) $3 \cdot 10^{-9} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ ($20 \cdot 10^{-3} / 50 \cdot 36 \cdot 3600$).
- Spomínaný zdroj žiarenia však v danom mieste (2 m) spôsobuje dávkový príkon $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$. ($10^{-3} / 20^2$)
- Dávkový príkon treba teda znížiť 834 - krát ($k = 2,5 \cdot 10^{-6} / 3 \cdot 10^{-9}$). Pomocou takto určenej krátnosti zoslabenia k nájdeme v tabuľkách potrebnú hrúbku ochrany
- V danom prípade bude pre $k=1000$ hrúbka ocelej ochrany 17 cm, **olovo 6,5 cm**, voda 129 cm, betón 61,1 cm, **urán 3,4 cm**.

Dozimetria a radiačná ochrana
29