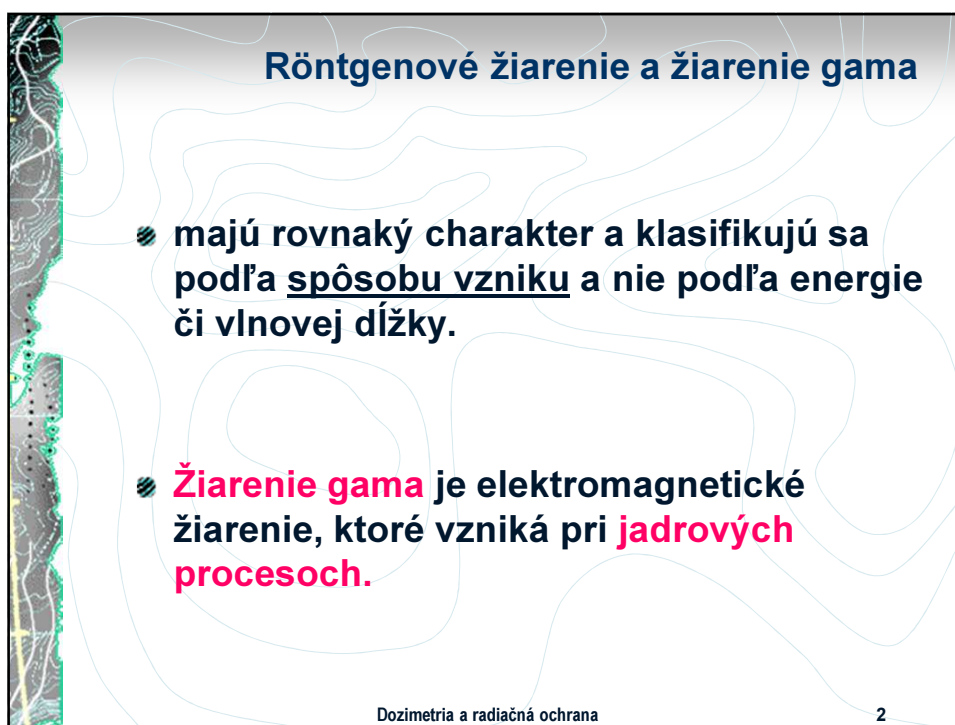
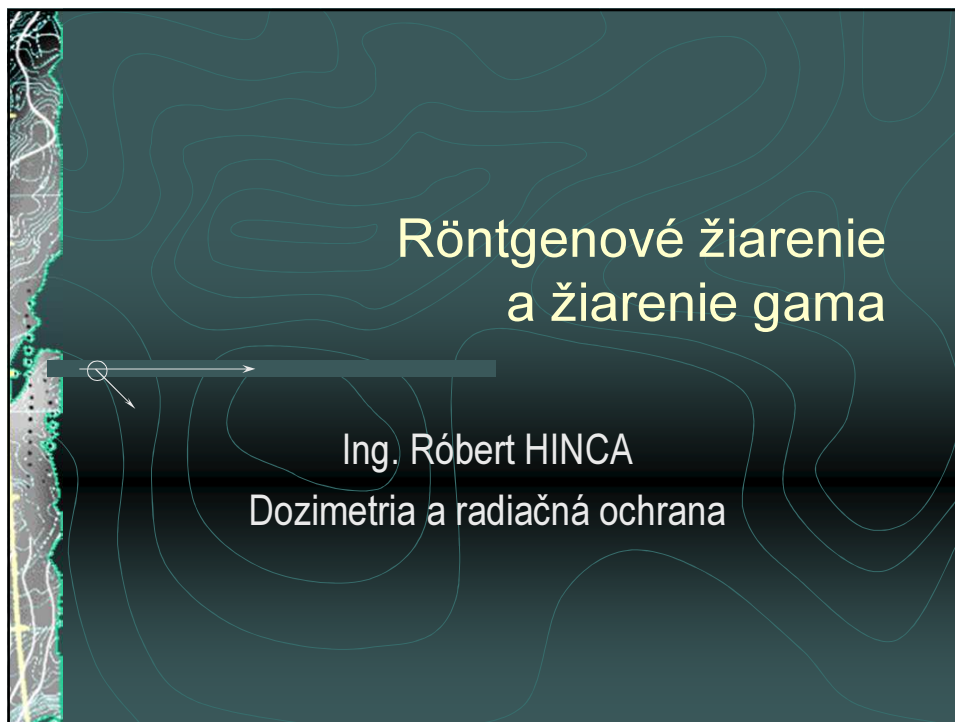




## Röntgenové žiarenie a žiarenie gama

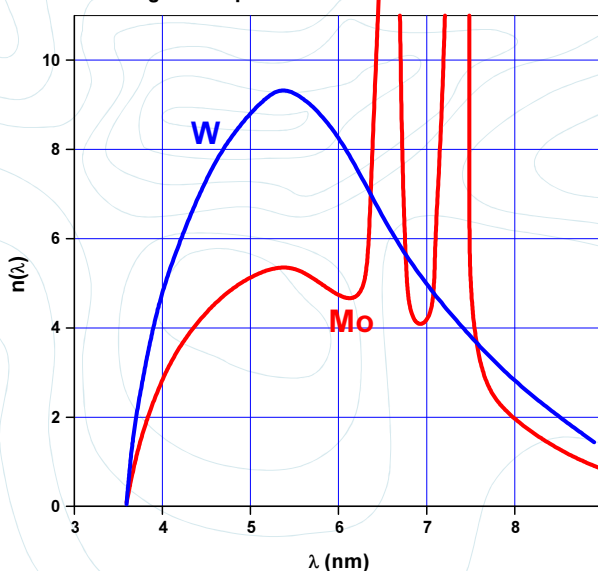
- Všeobecne možno povedať, že pojem Röntgenové žiarenie zahŕňa tie druhy elektromagnetického ionizujúceho žiarenia, ktoré vzniká **mimo atómového jadra**
- Röntgenové žiarenie (RTG) je:
  - žiarenie, ktoré sprevádza **elektrónové prechody** a ich interakcie (zahŕňa čiarové spektrá charakteristického 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.  $K_{\alpha}$ , prechodu M-K Ch.ž.  $K_{\beta}$  a pod.

Dozimetria a radiačná ochrana

4

## Vlnové a korpuskulárne vlastnosti

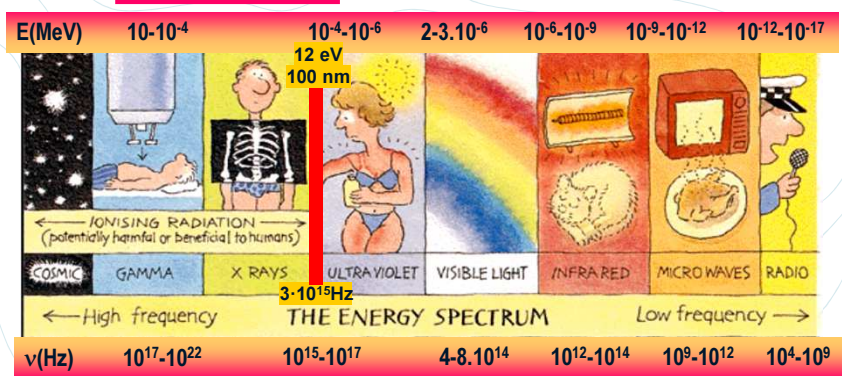
- Vlnová dĺžka gama a RTG. žiarenia sa pohybuje v rozmedzí od  $10^{-8}\text{m}$  (röntgenové žiarenie) do  $10^{-12}\text{m}$  (žiarenie  $\gamma$ ).
- Energia fotónov  $E_\gamma$  je spojená s ich vlnovou dĺžkou podľa vzťahu:

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

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$h = 4,141 \cdot 10^{-21} \text{ MeV.s}$$

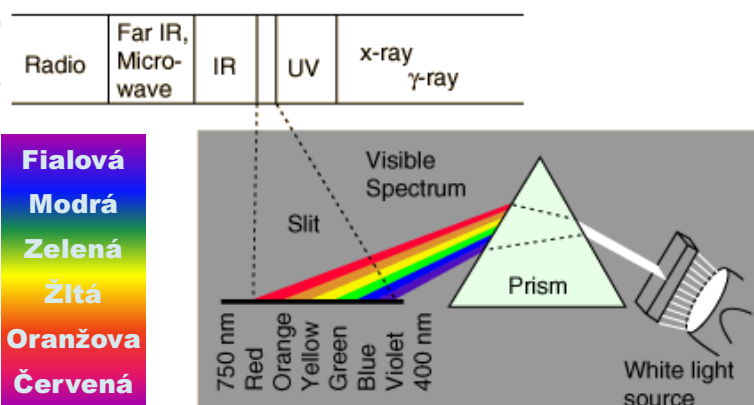
$$c = 2,99 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$



Dozimetria a radiačná ochrana

5

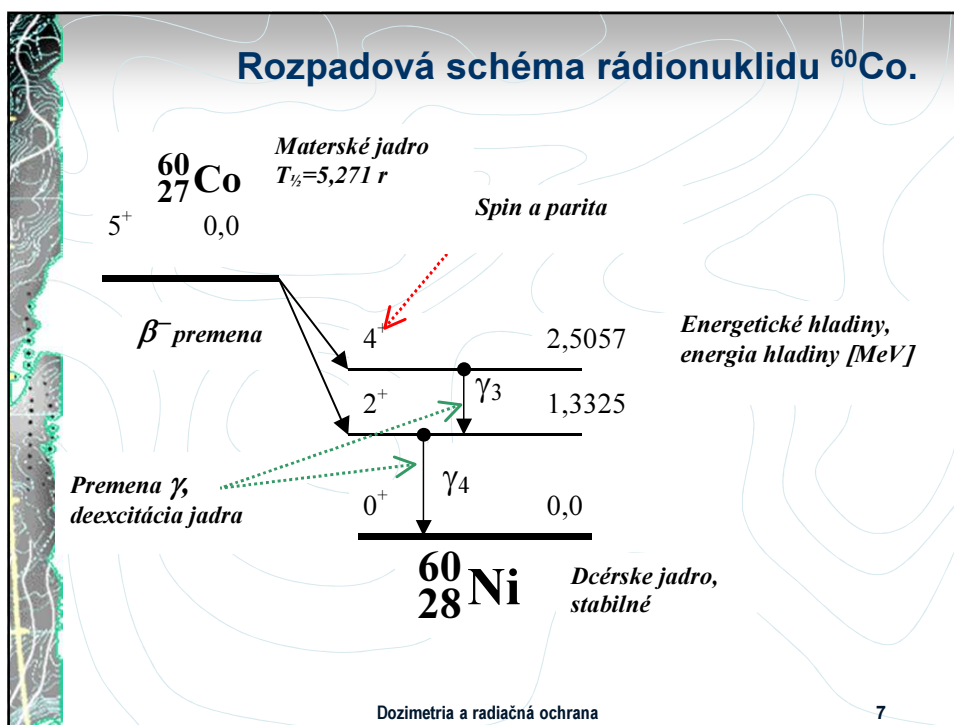
## Frekvenčný rozsah viditeľného svetla



Frequencies: 4 - 7.5 x 10<sup>14</sup> Hz  
Wavelengths: 750 - 400 nm  
Quantum energies: 1.65 - 3.1 eV

Dozimetria a radiačná ochrana

6



7

### Absorpcia žiarenia gama v látke

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

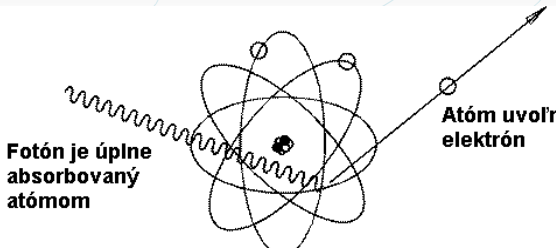
**Deje sa tak týmito interakciami:**

- 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  $\gamma$  žiarenia s atómom, pri ktorom prejde všetka jeho energia na niektorý elektrón atómového obalu.**

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

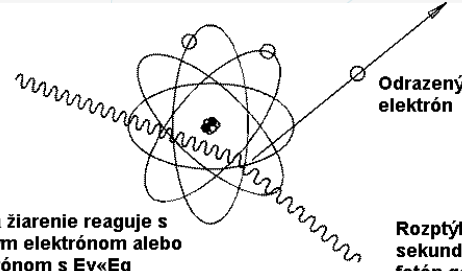
**S rastom energie  $\gamma$  žiarenia klesá absorpčný koeficient, s rastom protónového čísla materiálu  $Z$  rastie  $\tau \sim NZ^5(h\nu)^{-3}$ .**

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

Dozimetria a radiačná ochrana

9

## Comptonov rozptyl



Gama žiarenie reaguje s voľným elektrónom alebo elektrónom s  $E_v \ll E_g$

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  $E_\gamma$  je energia fotónu **pred** zrážkou s voľným elektrónom

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

Ak by všetka energia  $E_\gamma$  prešla na voľný elektrón,  
potom energia rozptýleného elektrónu po zrážke bude

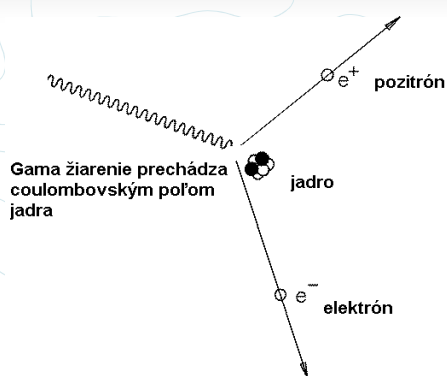
$$E_e = E_\gamma = mv^2/2$$

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  $\gamma$  s energiami 511 keV.

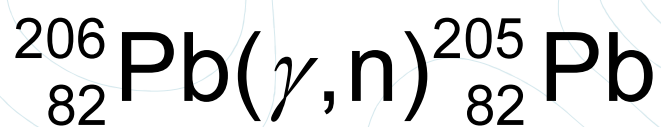
Ked' fotón  $\gamma$  žiarenia, ktorého energia je vyššia ako 1.022 MeV prenikne do Coulombovského poľa jadra, môže dôjsť k vytvoreniu páru elektrón + pozitron.

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  $(\gamma,p)$  má ešte vyššiu prahovú energiu
- Ďalšie reakcie:  $(\gamma,2n)$ ,  $(\gamma,np)$ ,  $(\gamma,\alpha)$ ,  $(\gamma,f)$

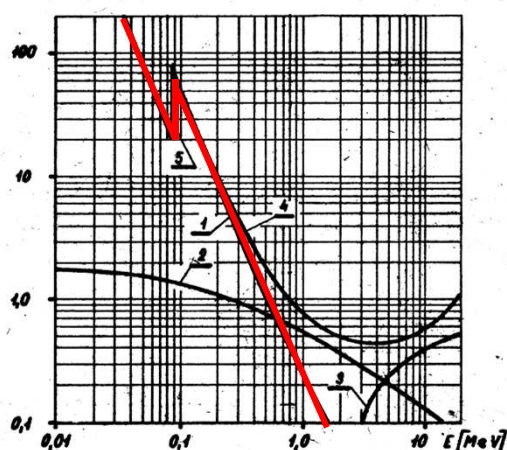


Dozimetria a radiačná ochrana

13

## Lineárny koeficient zoslabenia pre gama žiarenie

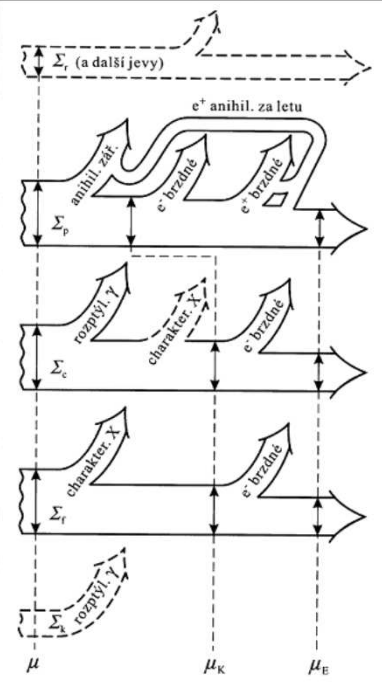
$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$



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

Dozimetria a radiačná ochrana

14



**Koeficient prenosu energie**  
**Koeficient absorpcie energie**

$\Sigma_K$  - koherentný rozptyl  
 $\Sigma_f$  - fotoefekt  
 $\Sigma_C$  - Comptonov rozptyl  
 $\Sigma_p$  - tvorba párov  
 $\Sigma_r$  - fotojadrové reakcie

Zoslabenie zväzku všetkými procesmi v látke zohľadňuje lineárny koeficient zoslabenia  $\mu$  [ $\text{m}^{-1}$ ].

Prenos energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú sekundárne častice zohľadňuje **koeficient prenosu energie**  $\mu_{tr}$  [ $\text{m}^{-1}$ ] ( $\mu_K$ ).

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

Dozimetria a radiačná ochrana

15

### Definícia: Lineárny koeficient zoslabenia $\mu$ [ $\text{m}^{-1}$ ]

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

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

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.

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

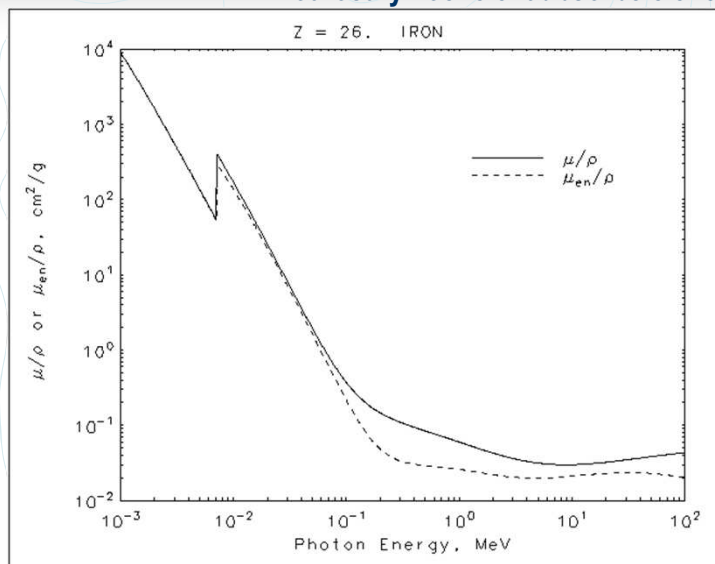
Absorpčný zákon v uvedenej forme platí pomerne presne, ak je lúč dopadajúci na absorbátor úzky a keď pomocou clôn zabezpečíme aby aj na detektor dopadal len úzky lúč.

Hovoríme o úzkom paralelnom zväzku.

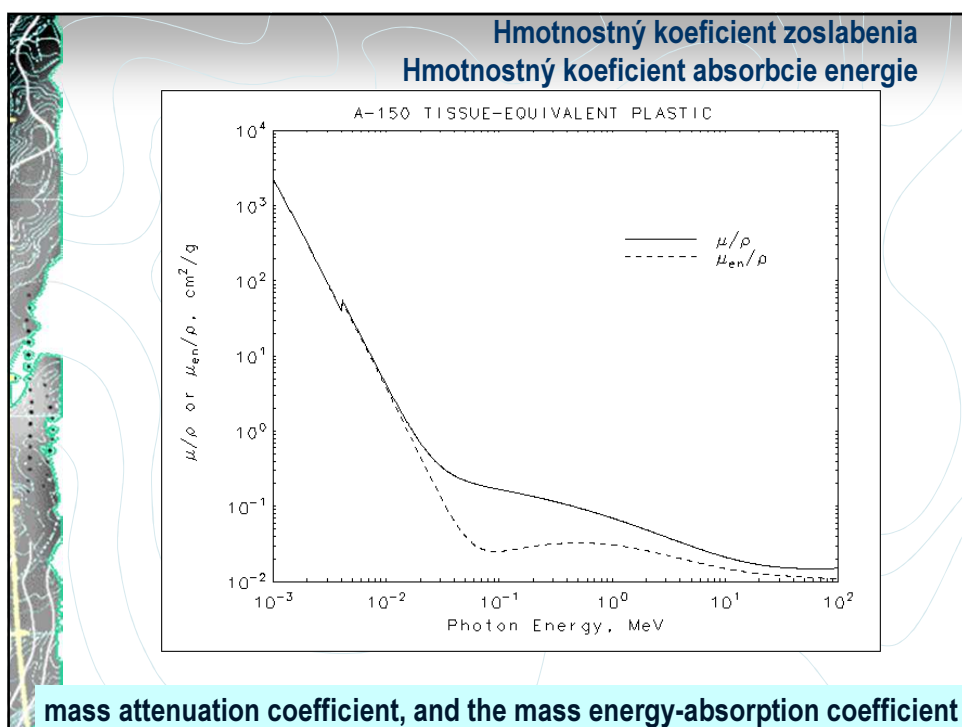
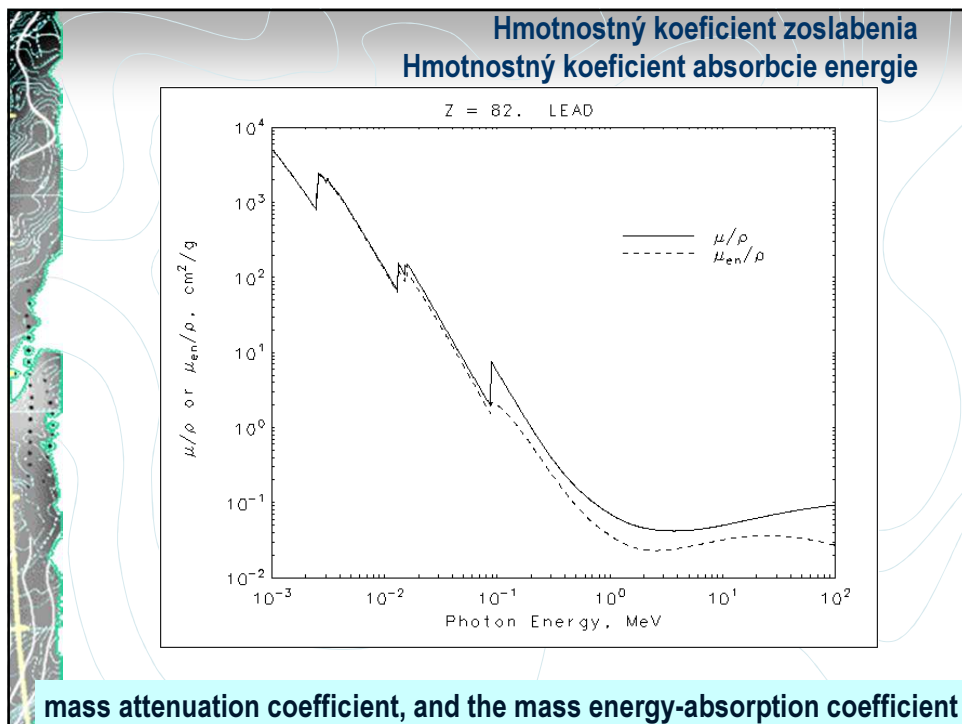
Dozimetria a radiačná ochrana

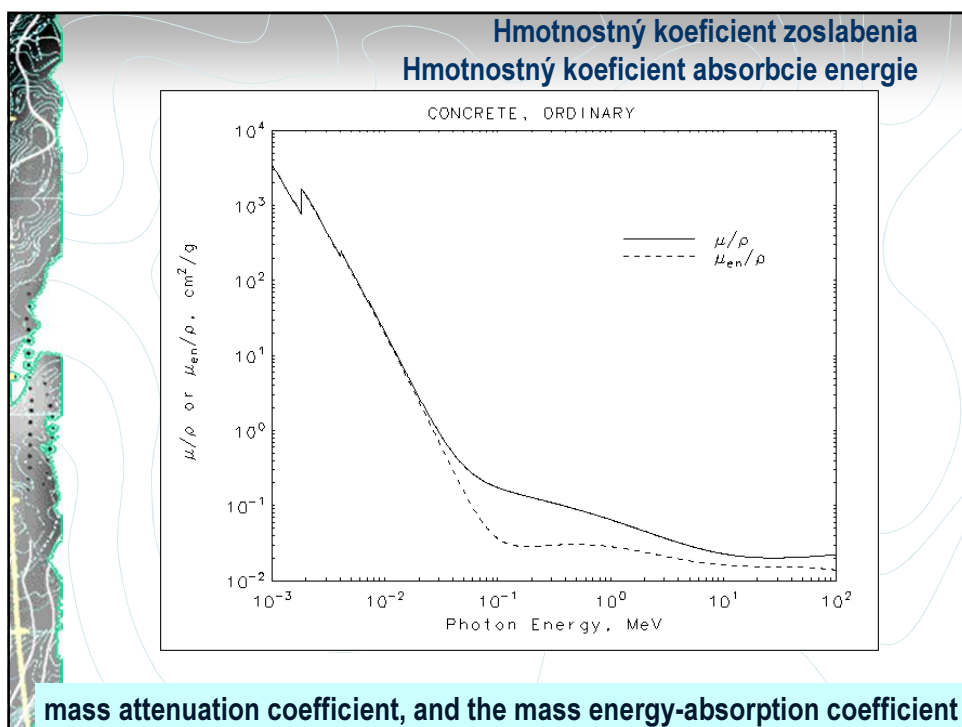
17

### Hmotnostný koeficient zoslabenia Hmotnostný koeficient absorpcie energie



mass attenuation coefficient, and the mass energy-absorption coefficient





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

| 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  $^{60}\text{Co}$  bola použitá energia 1250 keV

Dozimetria a radiačná ochrana

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

| Materiál       | <sup>137</sup> Cs | <sup>137</sup> Cs | <sup>60</sup> Co | <sup>60</sup> 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  
 $x\rho = 13,4 \text{ g.cm}^{-2}$  (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<br>MeV | $\mu$<br>$\text{cm}^{-1}$ | $\mu x$ |      |      |      |      |       |      |
|----------|---------------------------|---------|------|------|------|------|-------|------|
|          |                           | 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 $^{60}\text{Co}$ a $^{137}\text{Cs}$

| Materiál       | Polhrúbka pre $^{137}\text{Cs}$ | Polhrúbka pre $^{60}\text{Co}$ |
|----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 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

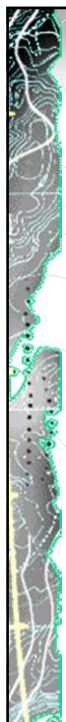
$$k = \frac{I_0}{I} = \frac{1}{B \cdot e^{-\mu x}}$$

$$k = 2^n$$

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

| kI(E(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 <sup>4</sup> | 1,05 |     |     |     |      |      |      |      |      | 14,2 |      |
| 10 <sup>5</sup> | 1,15 |     |     |     |      |      |      |      |      | 17,4 |      |
| 10 <sup>6</sup> | 1,45 |     |     |     |      |      |      |      |      | 20,4 |      |
| 10 <sup>7</sup> | 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 ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $E_\gamma = 661 \text{ keV}$ ) 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 ocelevej 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 ocelevej ochrany 17 cm, **olovo 6,5 cm**, voda 129 cm, betón 61,1 cm, **urán 3,4 cm**.

Dozimetria a radiačná ochrana

29