

## Röntgenové žiarenie a žiarenie gama

Ing. Róbert HINCA  
Dozimetria a radiačná ochrana

## Röntgenové žiarenie a žiarenie gama

- majú rovnaký charakter a klasifikujú sa podľa spôsobu vzniku a nie podľa energie či vlnovej dĺžky.
- **Žiarenie gama** je elektromagnetické žiarenie, ktoré vzniká pri **jadrových procesoch**.

Dozimetria a radiačná ochrana

2

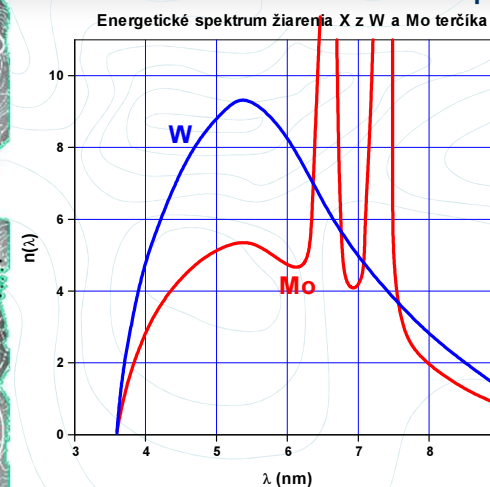
## Röntgenové žiarenie a žiarenie gama

- 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 - pozitrón.

Dozimetria a radiačná ochrana

3

## Spektrum röntgenky



Dozimetria a radiačná ochrana

4

## Vlnové a korpuskulárne vlastnosti

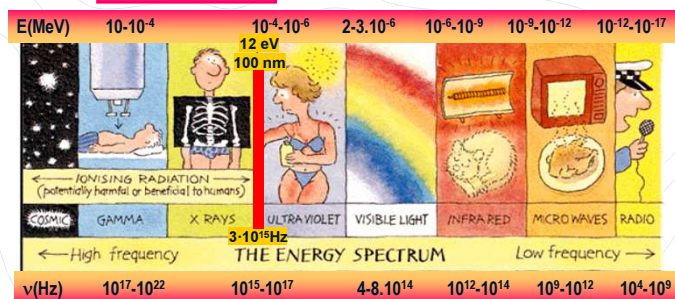
- Vlnová dĺžka gama a RTG. žiarenia sa pohybuje v rozmedzí od  $10^{-8}\text{m}$  (röntgenové žiarenie) do  $10^{-12}\text{m}$  (žiarenie  $\gamma$ ).
- Energia fotónov  $E_\gamma$  je spojená s ich vlnovou dĺžkou podľa vzťahu:

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

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

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

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



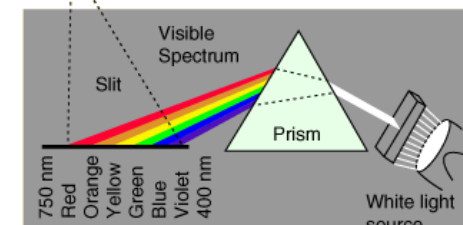
Dozimetria a radiačná ochrana

5

## Frekvenčný rozsah viditeľného svetla

Radio	Far IR, Micro-wave	IR	UV	x-ray γ-ray
-------	--------------------	----	----	----------------

Fialová  
Modrá  
Zelená  
Žltá  
Oranžová  
Červená

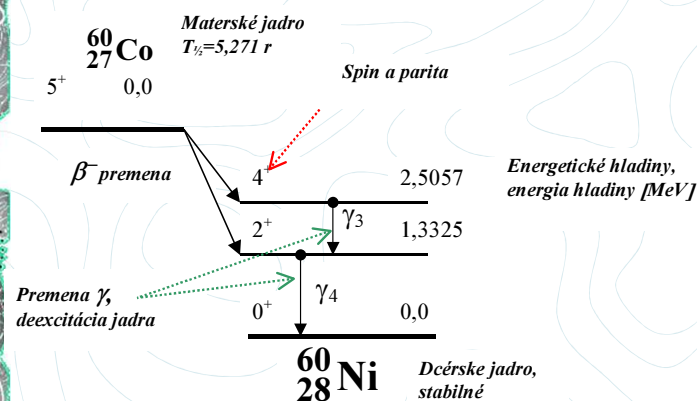


Frequencies:  $4 - 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$   
Wavelengths: 750 - 400 nm  
Quantum energies: 1.65 - 3.1 eV

Dozimetria a radiačná ochrana

6

## Rozpadová schéma rádionuklidu $^{60}\text{Co}$ .



Dozimetria a radiačná ochrana

7

## Absorpcia žiarenia gama v látke

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

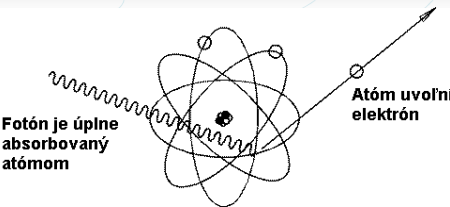
Deje sa tak týmito interakciami:

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

Dozimetria a radiačná ochrana

8

### Fotoefekt



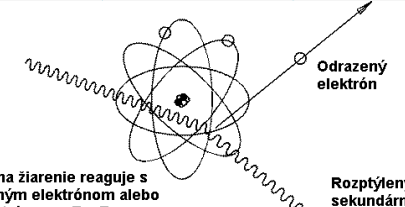
Fotón je úplne absorbovaný atómom

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  $E_v \ll E_\gamma$

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  $E_\gamma$  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

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

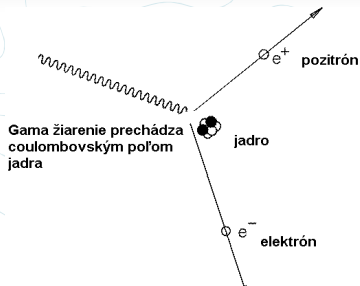
a impulz elektrónu **po** zrážke bude

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

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

Dozimetria a radiačná ochrana 11

### Tvorba párov elektrón - pozitron



Gama žiarenie prechádza coulombovským poľom jadra

jadro

$e^+$  pozitron

$e^-$  elektrón

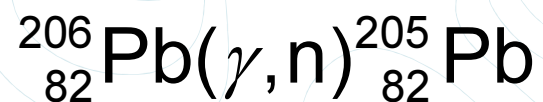
Ked' fotón  $\gamma$  žiarenia, ktorého energia je vyššia ako 1.022 MeV prenikne do Coulombovského poľa jadra, môže dôjsť k vytvoreniu páru elektrón + pozitron. Vzniknuté častice majú kinetickú energiu, ktorá sa rovná kinetickej energii pôvodného fotónu, zmenšenej o energiu ekvivalentnú pokojovej hmotnosti elektrónu a pozitronu  $E_k = h\nu - 2mc^2$ . Pravdepodobnosť vzniku páru rastie úmerne so  $Z^2$ . ( $\kappa \sim NZ^2$ )

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.

Dozimetria a radiačná ochrana 12

### 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:  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, np)$ ,  $(\gamma, \alpha)$ ,  $(\gamma, f)$

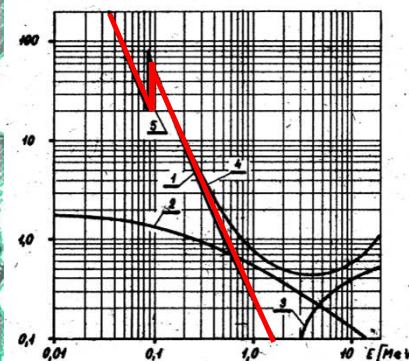


Dozimetria a radiačná ochrana

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

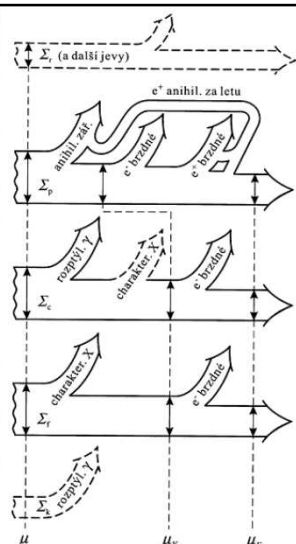
### Koeficient prenosu energie Koeficient absorpcie energie

- $\Sigma_K$  - 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  $\mu \text{ [m}^{-1}\text{]}$ .

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

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



Dozimetria a radiačná ochrana

15

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

- Charakterizuje zoslabenie zväzku pri prechode látkou.
- Je úmerný pravdepodobnosti interakcie na jednotku 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  $dJ$ .

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

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

Hustota prúdu častíc  $J \text{ [m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]}$  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.

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

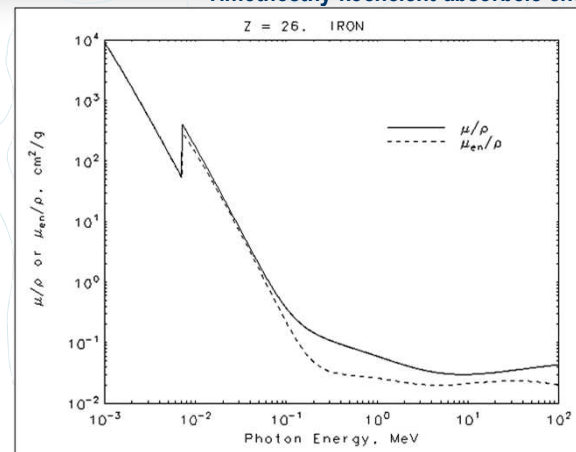
Absorpčný zákon v uvedenej forme platí pomerne presne, ak je lúč dopadajúci na absorbátor úzky a keď pomocou clón zabezpečíme aby aj na detektor dopadal len úzky lúč.

Hovoríme o úzkom paralelnom zväzku.

Dozimetria a radiačná ochrana

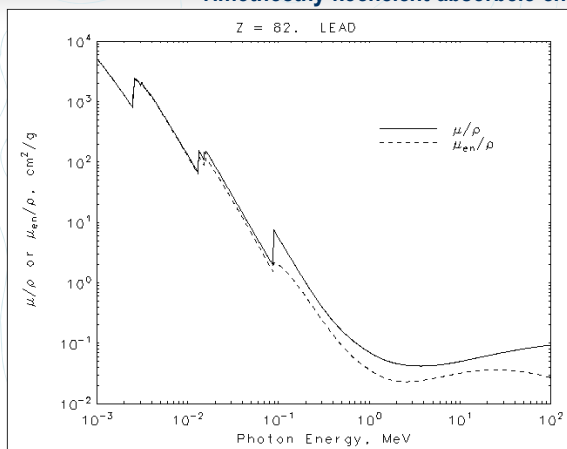
17

### Hmotnostný koeficient zoslabenia Hmotnostný koeficient absorpcie energie



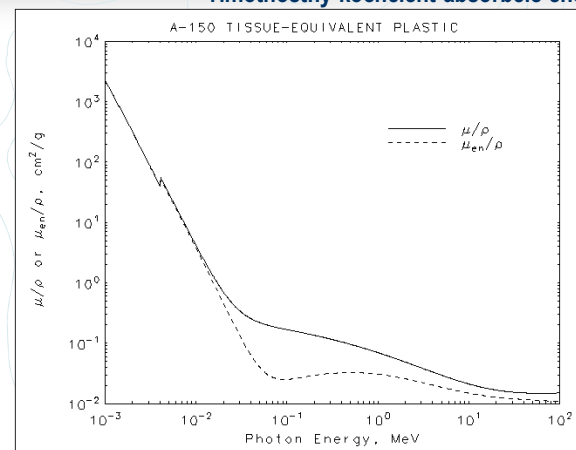
mass attenuation coefficient, and the mass energy-absorption coefficient

### Hmotnostný koeficient zoslabenia Hmotnostný koeficient absorpcie energie

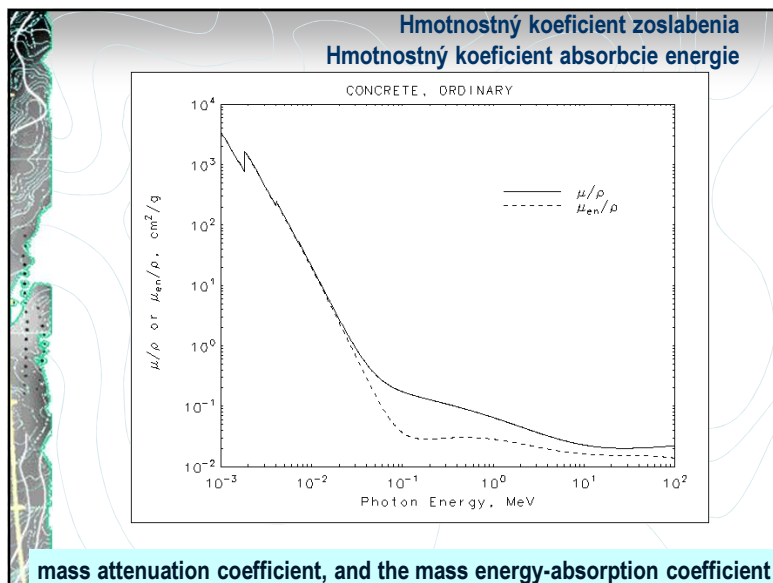


mass attenuation coefficient, and the mass energy-absorption coefficient

### 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 22

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

Materiál	$^{137}\text{Cs}$ úzky zväzok	$^{137}\text{Cs}$ široký zväzok	$^{60}\text{Co}$ úzky zväzok	$^{60}\text{Co}$ 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

## Nárástový faktor B pre olovo

E MeV	$\mu$ $\text{cm}^{-1}$	$\mu x$						
		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

kE(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	

**Příklad**

- Bodový zdroj žiarenia ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $E_\gamma = 661 \text{ keV}$ ) spôsobuje vo vzdialenosti 0,1 m dávkový príkon  $10^{-3} \text{ Gy.s}^{-1}$ . 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)  $3 \cdot 10^{-9} \text{ Gy.s}^{-1}$  ( $20 \cdot 10^{-3} / 50 \cdot 36 \cdot 3600$ ).
- Spomínaný zdroj žiarenia však v danom mieste (2 m) spôsobuje dávkový príkon  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Gy.s}^{-1}$ . ( $10^{-3} / 20^2$ )
- 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