Zdroje žiarenia α

Charakteristika žiarenia
Interakcia s látkou

α žiarenie

S **α-premenou** sa stretávame u ťažkých jadier od olova vyššie a jadier niektorých vzácnych zemín.

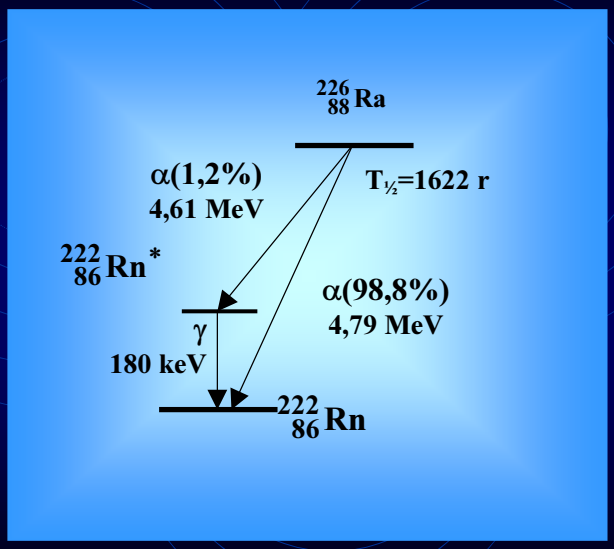
Jadrová α-premena prebieha podľa nasledovného vzťahu:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y'' + {}^{4}_{2}\alpha $$

A – hmotnostné číslo, udáva počet nukleónov v jadre
Z – atómové číslo (protónové číslo), udáva počet protónov v jadre

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

α-premena



α žiarenie

- Energetické spektrum emitovaných α častíc má obvykle niekoľko diskrétnych čiar.
- Energia emitovaných častíc je pomerne vysoká, lebo len taká častica je schopná opustiť jadro cez Coulombovu potenciálnu bariéru.
- Vznikajúce dcérske jadro môže byť excitované ale excitačná energia je malá. Sprievodné γ žiarenie má spravidla nízku energiu.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Urán ako α žiarič

	Alpha Emission Products:		Photon Emission Products:	
	Fraction	Energy(MeV)	Fraction	Energy(MeV)
U-238	0.230000	4.147000	0.000970	0.066376
	0.770000	4.196000	0.088313	0.013000
U-235	0.015000	4.344000	0.010000	0.202120
	0.017000	4.502000	0.015000	0.109140
	0.021000	4.414000	0.020629	0.105000
	0.042000	4.556000	0.027289	0.089953
	0.046000	4.325000	0.044590	0.093350
	0.050000	4.598000	0.047000	0.163350
	0.057000	4.217000	0.047000	0.205310
	0.060000	4.370000	0.105000	0.143760
	0.110000	4.364000	0.309130	0.013000
	0.550000	4.396000	0.540000	0.185720

Príklady zdrojov žiarenia α

Rádionuklid	Polčas premeny	Energia častíc α [MeV]
^{238}U	$4{,}468 \cdot 10^{9}$ rokov	4,198; 4,149; 4,041
^{235}U	$7{,}038 \cdot 10^{8}$ rokov	17 čiar medzi 4,599 a 4,155
^{232}Th	$1{,}405 \cdot 10^{10}$ rokov	4,010; 3,952; 3,828
^{226}Ra	1600 rokov	4,785; 4,602
^{222}Rn	3,8235 dní	5,490
^{220}Rn	55,6 s	6,288
^{214}Po	$1{,}643 \cdot 10^{-4}$ s	7,687
^{212}Po	$3{,}05 \cdot 10^{-7}$ s	8,785; 9,497; 10,43; 10,55
^{210}Po	138,8 dní	5,297

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Typické alfa spektrum plutónia

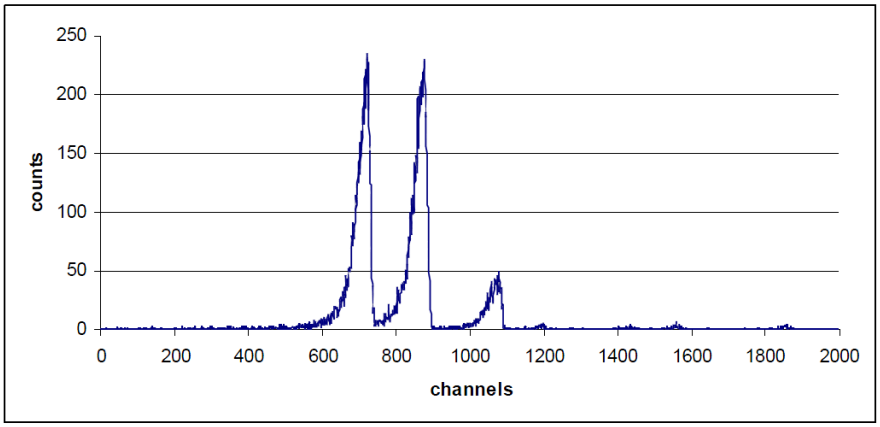


Fig. V-1. Typical plutonium alpha spectrum with ^{242}Pu as yield tracer. Peaks in the spectrum from left to right are: ^{242}Pu, $^{239,24}Pu$, ^{238}Pu

Radiačné parametre izotopov plutónia

Radioactive Properties of Key Plutonium Isotopes

Isotope	Half-Life	Specific Activity *(Ci/g)*	Decay Mode	Radiation Energy *(MeV)*		
				Alpha *(α)*	Beta *(β)*	Gamma *(γ)*
Pu-236	2.9 yr	540	α	5.8	0.013	0.0021
Pu-238	88 yr	17	α	5.5	0.011	0.0018
Pu-239	24,000 yr	0.063	α	5.1	0.0067	<
Pu-240	6,500 yr	0.23	α	5.2	0.011	0.0017
Pu-241	14 yr	100	β	<	0.0052	<
Pu-242	380,000 yr	0.0040	α	4.9	0.0087	0.0014
Pu-244	83,000,000 yr	0.000018	α	4.6	0.0071	0.0012

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Typické alfa spektrum amerícia

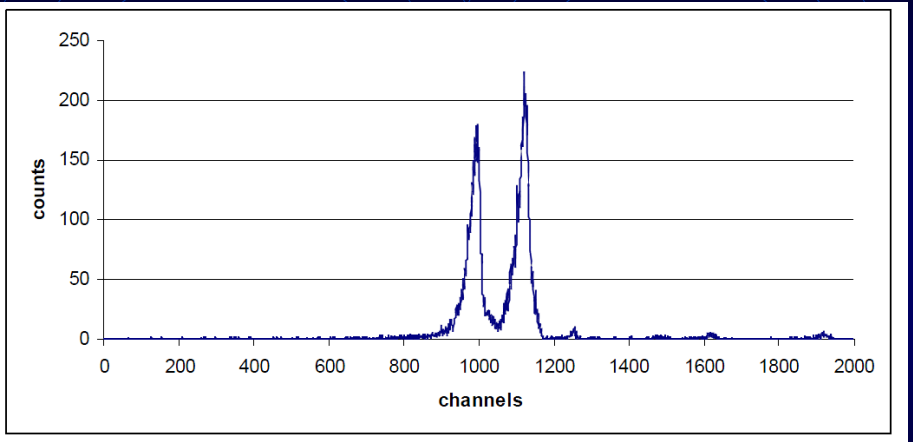


Fig. V-2. Typical americium alpha spectrum with ^{243}Am as yield tracer. Peaks in the spectrum from left to right are: ^{243}Am, ^{241}Am

Prechod α žiarenia látkou

- Pri prechode - α častíc cez hmotné prostredie dochádza k **pružnému rozptylu** na elektrónoch a jadrách atómov prostredia, pričom prakticky nedochádza k stratám energie.
- Dochádza aj k **nepružným zrážkam** s orbitálnymi elektrónmi. Pri týchto zrážkach dochádza k ionizácii a vzbudzovaniu atómov a molekúl, prípadne k disociácii molekúl, čo je sprevádzané stratami energie - častíc.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Prechod α žiarenia látkou

Energetické straty na ionizáciu a excitáciu prostredia vyjadrujeme pomocou veličiny **L - stredné lineárne straty**. Závisia od:

- Náboja častice ze
- Rýchlosti častice v
- Druhu brzdiacej látky (Z- atómové číslo, N - jadrová hustota)

$$L = \frac{dE}{d\ell} \leq K \cdot \frac{N \cdot Z \cdot z^2 e^4}{v^2}$$

Vzťah pre stredné lineárne straty

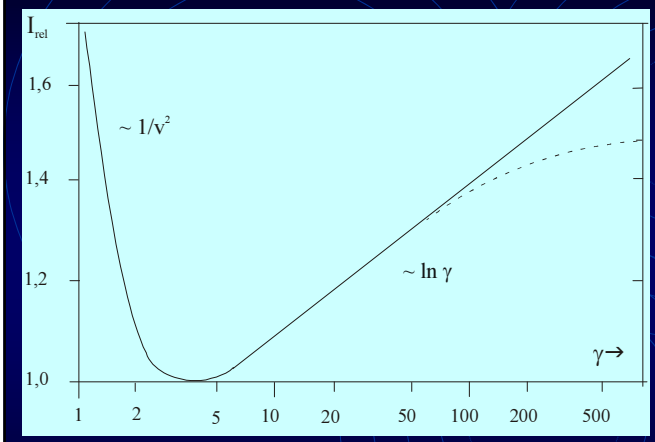
Stratu energie počas letu častice vyjadruje kvantovo-mechanický vzťah, ktorý odvodil M. A. Bethe:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi \cdot z^2 e^4}{m_e v^2} nZ \left[ln \frac{2 m_e v^2}{I(1-\beta)^2} - \beta^2 \right]$$

kde:
- m_e je pokojová hmotnosť elektrónu,
- ze je elektrický náboj brzdenej častice ,
- v je rýchlosť brzdenej častice,
- n je počet atómov brzdiaceho prostredia v jednotke objemu,
- Z je atómové číslo brzdiaceho prostredia,
- I je efektívny ionizačný potenciál
- β je relativistická rýchlosť častice.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

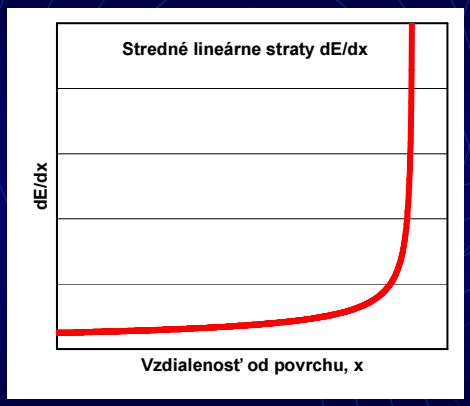
Typická závislosť relatívnych špecifických strát energie v plynoch pri normálnych podmienkach od Lorentzovho faktora.



Podľa Betheho modelu interakcie relativistický rast energetických strát s rastom energie častíc neustále pokračuje. Experimenty však ukázali, že tento rast je pomalší /ako logaritmický/, až sa nakoniec zastaví. Pri veľmi vysokých energiách už energetické straty nezávisia od energie častíc a krivka ionizačných strát vychádza na tzv. Fermiho plató. Preto v r. 1933 vypracoval F. Bloch komplexnejší model interakcie ťažkých častíc na základe kvantovej relativistickej elektrodynamiky.

$I_{rel} = (dE/dx)/(dE/dx)min.$; $\gamma = E/E_0 = m/m_0 = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
$E_{0;\ m0}$ – pokojová energia a hmotnosť častice
E; m – celková relativistická energia a hmotnosť častice

Stredné lineárne straty častíc α

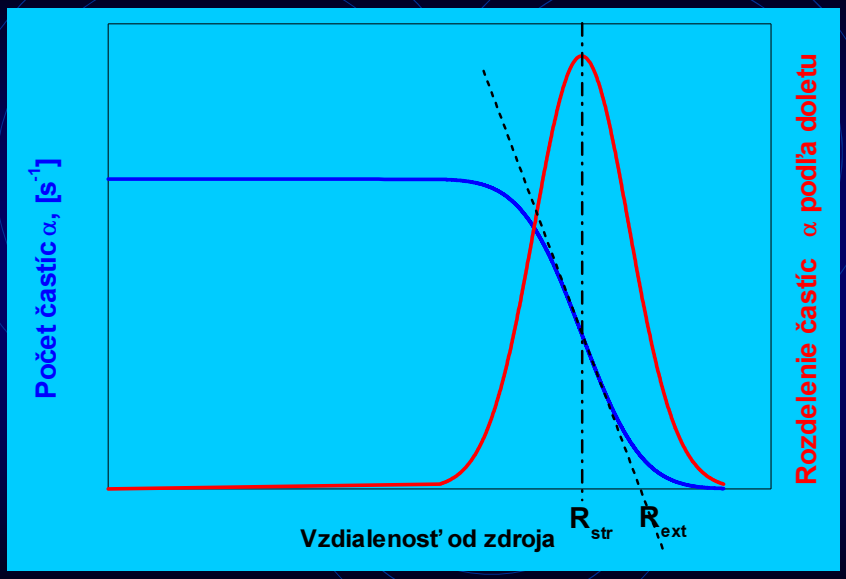


Stredné lineárne straty na ionizáciu a vzbudzovanie sú nepriamo úmerné štvorcu rýchlosti častice.

Najväčšiu ionizáciu budeme pozorovať na konci dráhy častice, keď v→0.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Dolet častíc α v látke



Stredné lineárne straty energie

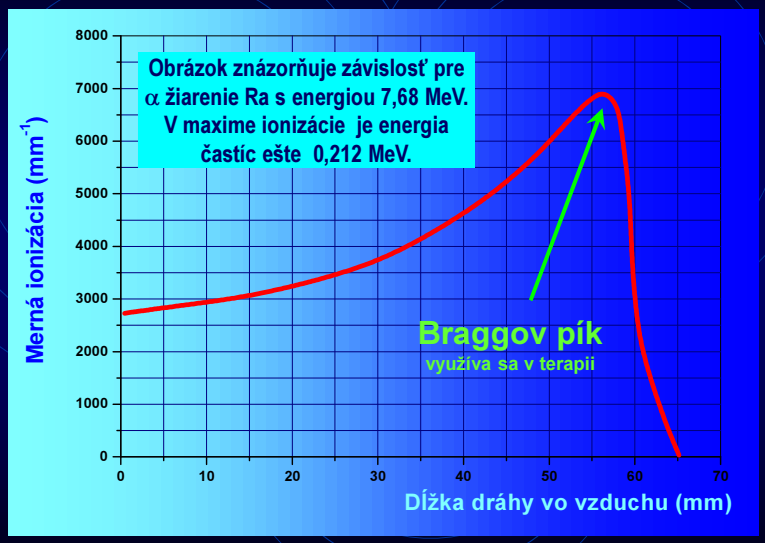
V zahraničnej literatúre sa pre stredné lineárne straty používajú veličiny: *S - Stopping power (lineárna zrážková brzdná schopnosť)* a *LET - Linear Energy Transfer (lineárny prenos energie)*, ktoré sú definované podobne.

Počet vytvorených iónových párov na jednotku dráhy vyjadruje veličina ***J - merná ionizácia*** [m^{-1}]. Ak poznáme strednú energiu ionizácie v prostredí x W_x [J, resp. MeV], môžeme vypočítať lineárny prenos energie L podľa vzťahu:

$$L = W_x \cdot J = \frac{energia}{1\ iónový\ \ pár} \cdot \frac{počet\ \ iónových\ \ párov}{jednotka\ \ dráhy} = \frac{energia}{jednotka\ \ dráhy}$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Intenzita ionizácie vzduchu α časticami



Intenzita ionizácie vzduchu α časticami

- Energia potrebná na vytvorenie jedného iónového páru vo vzduchu je
  W_{vzd} = 34 eV
- Ak je energia emitovaných častíc 7,68 MeV, môžeme vypočítať celkový počet iónových párov N_p, vznikajúcich pozdĺž dráhy jednej častice

$$N_p = \frac{7{,}68 \cdot 10^6\, eV}{34 eV} = 226\,000 \text{ iónových párov}$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Dosah (dolet) α častíc vo vzduchu

Dolet α častíc o energiách 3 - 7 MeV vo vzduchu určíme približne zo vzťahu:

$$R_\alpha = 0{,}318 \cdot \sqrt{E_\alpha^3} \quad [cm, MeV]$$

$$R_\alpha = 0{,}56 \cdot E_\alpha \quad [cm, MeV, E_\alpha \leq 4\,MeV]$$

Presnosť týchto empirických vzťahov je 10%.

Dosah α častíc v rôznych materiáloch

$$R_{x\alpha} = 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt{A_x E_\alpha^3}}{\rho_x} \quad [m,\ MeV,\ kg \cdot m^{-3}]$$

A_x je hmotnostné číslo prostredia

ρ_x - merná hmotnosť [kg.m^{-3}]

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Dolet α častíc v rôznych materiáloch

Eα MeV	Vzduch [cm]	Biol. tkanivo [μm]	Hliník [μm]
4	2,5	31	16
5	3,5	43	23
6	4,6	56	30
7	5,9	72	38
8	7,4	91	48
9	8,9	110	53
10	10,6	130	69

Ochrana pred α žiarením

- Z pohľadu radiačnej ochrany je α žiarenie nebezpečné hlavne pri ***vnútornom ožiarení*** po inhalácii alebo ingescii a pri ožiarení očí.
- Povrchová vrstva pokožky dokáže pohltiť všetko žiarenie α.
- Pri navrhovaní tienenia v jadrových zariadeniach netreba α žiarenie brať do úvahy, lebo tienenie navrhované pre γ žiarenie úplne odtieni aj všetko α žiarenie.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Detektory alfa žiarenia

- Na detekciu častíc a je možné použiť veľa rozličných typov detektorov, napríklad:
  - impulzné ionizačné komory,
  - plynové proporcionálne počítače s tenkým okienkom, alebo s interným zdrojom,
  - scintilačné detektory (kvapalné scintilátory, čisté alebo aktivované NaI, aktivované CsI a ZnS a plastické detektory),
  - polovodičové detektory Si(Li), HPGe, kremíkové povrchovo bariérové detektory a diódy s difúznym prechodom.

Detekcia alfa žiarenia

- Pri meraní treba brať do úvahy dolet častíc v pevných látkach na úrovni desiatok mikrometrov a z toho vyplývajúci veľký vplyv **samoabsorbcie** v meranom objeme, **absorbcie vo vzduchu** medzi detektorom a meraným materiálom, absorbcie v okienku meracieho prístroja a podobne.
- Na meranie sa najčastejšie používajú plynové detektory s okienkom z tenkej **mylarovej fólie** alebo bezokienkové na priame meranie, tenké **scintilačné** plastické fólie hlavne na báze **ZnS(Hg)** a kremíkové **polovodičové detektory** (PIPS, SiLi), ktoré majú aj dobré spektrometrické vlastnosti.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Detekcie alfa žiarenia v JZ

- v jadrových zariadeniach má praktický význam
  - stanovenie alfa aktivity aerosólov vo vzduchu technologických priestorov a plynných výpustiach,
  - stanovenie alfa aktivity skladovaných a vypúšťaných kvapalných médií,
  - stanovenie alfa aktivity povrchov a rádioaktívnych materiálov.

Meranie alfa aktivity v ŽP

- Stanovenie **celkovej alfa aktivity** vody, vzduchu a potravín.
- Spektrometrické stanovenie **aktivity** prírodných **rádionuklidov** a umelých kontaminantov v zložkách biosféry (voda, vzduch, pôda...), rastlinách a živočíchoch.
- Pozri VYHLÁŠKU MZ SR č. 528/2007 Z.z. o požiadavkách na obmedzenie ožiarenia z prírodného žiarenia

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

VYHLÁŠKA MZ SR č. 528/2007 Z.z. o požiadavkách na obmedzenie ožiarenia z prírodného žiarenia

- Smernou hodnotou na vykonanie opatrení na zníženie obsahu prírodných rádionuklidov v stavebných výrobkoch určených na výstavbu stavieb s pobytovými priestormi je hmotnostná aktivita ^{226}Ra v stavebnom výrobku 120 $Bq.kg^{-1}$.
- Index hmotnostnej aktivity stavebných materiálov

$$I = \frac{a_{Ra}}{300} + \frac{a_{Th}}{200} + \frac{a_K}{3\,000},$$

27

Vyhláška MZ SR č. 528/2007 Z.z.: Rozbor a hodnotenie obsahu prírodných rádionuklidov v dodávanej vode

a) celková objemová aktivita alfa
b) celková objemová aktivita beta
c) objemová aktivita 222Rn pri vode
d) objemová aktivita 226Ra, ak celková objemová aktivita alfa presiahne smernú hodnotu
e) obsah uránu, ak celková objemová aktivita alfa po odčítaní príspevku od 226Ra presiahne smernú hodnotu
f) objemové aktivity ďalších rádionuklidov emitujúcich žiarenie alfa uvedených v tabuľke č. 3, ak celková objemová aktivita alfa po odčítaní príspevku 226Ra a uránu presiahne smernú hodnotu na vykonanie opatrení

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Vyhláška MZ SR č. 528/2007 Z.z.: Rozbor a hodnotenie obsahu prírodných rádionuklidov v dodávanej vode

g) objemová aktivita 40K, ak celková objemová aktivita beta presiahne smernú hodnotu na vykonanie opatrení

h) objemové aktivity ďalších rádionuklidov emitujúcich žiarenie beta uvedených v tabuľke č. 3, ak celková objemová aktivita beta po odčítaní príspevku 40K presiahne smernú hodnotu na vykonanie opatrení

Tabuľka č. 2
Smerné hodnoty na vykonanie opatrení

Druh dodávanej vody	Celková objemová aktivita alfa [Bq.l^{-1}]	Celková objemová aktivita beta [Bq.l^{-1}]	Objemová aktivita ^{222}Rn [Bq.l^{-1}]
Pramenitá voda „vhodná na prípravu stravy pre dojčatá“	0,1	0,2	20
Prírodná minerálna voda	1,0	2,0	100
Pramenitá voda, balená pitná voda, pitná voda	0,2	0,5	100

Najvyššie prípustné hodnoty obsahu rádionuklidov v dodávanej vode

Tabuľka č. 3
Najvyššie prípustné hodnoty obsahu rádionuklidov v dodávanej vode

Rádionuklid	Pramenitá voda „vhodná na prípravu stravy pre dojčatá“ [Bq.l^{-1}]	Prírodná minerálna voda [Bq.l^{-1}]	Pramenitá voda, balená pitná voda, pitná voda [Bq.l^{-1}]
^{210}Pb	0,1	0,8	0,3
^{210}Po	0,1	0,5	0,2
^{222}Rn	–	600	300
^{223}Ra	0,2	5,0	1,5
^{224}Ra	0,3	7,5	2,3
^{226}Ra	0,2	1,9	0,6
^{228}Ra	0,1	0,7	0,3
^{234}U	1,8	12,1	3,9
^{235}U	1,9	12,6	4,1
^{238}U	2,0	13,2	4,3

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Kalibračné energie alfa (keV)

Jednoduché emitory				Premenové reťazce			
^{148}Gd	3182,71(3)*	^{210}Po	5304,38(7)	^{228}Th	5423,20(22)	^{211}Bi	6622,9(6)
^{232}Th	4013(3)	^{241}Am	5485,60(12)		5340,31(15)		6278,8(6)
	3954(8)		5442,90(13)	^{224}Ra	5685,42(15)	^{219}Rn	6819,1(3)
^{238}U	4197(5)	^{238}Pu	5499,07(20)		5448,7(12)		6553,0(3)
	4150(5)		5456,3(2)	^{212}Bi	6089,94(4)		6424,7(3)
^{235}U	4599(2)	^{236}Pu	5767,66(8)		6050,83(4)	^{215}Po	7386,2(8)
	4400(2)		5721,00(10)	^{220}Rn	6288,13(10)	^{226}Ra	4784,38(25)
	4374(4)	^{244}Cm	5804,82(5)	^{216}Po	6778,3(5)		4601,7(2)
	4368(3)		5762,70(5)	^{212}Po	8785,08(12)	^{222}Rn	5489,52(30)
^{230}Th	4687,7(15)	^{242}Cm	6112,77(8)	^{227}Th	6038,06(15)	^{218}Po	6002,40(9)
	4621,2(15)		6069,42(12)		5977,71(10)	^{214}Po	7686,90(6)
^{234}U	4774,8(9)	^{253}Es	6632,57(5)		5756,96(10)		
	4722,6(9)		6591,4(5)	^{223}Ra	5747,2(4)		
^{239}Pu	5156,70(14)				5716,16(29)		
	5143,9(2)				5607,34(30)		
	5105,1(2)				5539,8(9)		

Opatrenia na obmedzenie ožiarenia z radónu

- Pri projektovaní **nových stavieb s pobytovými priestormi** a projektovaní rekonštrukcií stavieb s pobytovými priestormi navrhujú tak, aby nebola prekročená hodnota objemovej aktivity radónu **200 Bq.m^{-3}** v priemere za rok.
- Smernou hodnotou na vykonanie opatrení na obmedzenie ožiarenia v **existujúcich stavbách s pobytovými priestormi** je objemová aktivita radónu **400 Bq.m^{-3}** v priemere za rok.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Celková aktivita

- **Celková aktivita** sa líši od **sumárnej aktivity** tým, že pri meraní sa používa spoločná účinnosť detekcie pre všetky detekovateľné rádionuklidy.
- Etalón pre kalibráciu sa vyberá podľa meraného materiálu a je zvyčajne definovaný v norme.
- Pre alfa aktivitu sa zvyčajne používa kalibračný etalón amerícium ^{241}Am (^{239}Pu)
- Pre beta aktivitu účinnosť pre ^{90}Sr (^{36}Cl,^{204}Tl, ^{40}K, ^{137}Cs, ^{60}Co).

33

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Zdroje žiarenie β

Vlastnosti žiarenia β

Interakcia β žiarenia s látkou

Častice β

- Najčastejšia rádioaktívna premena je **premena β**, a to niektorý z typov premeny:
  - β^-,
  - β^+ alebo
  - **EZ elektrónový záchyt, angl. EC – electron capture**

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

β premena

- β žiarenie pochádza z jadra a vzniká rozpadom nukleónov.
- Pri rozpade neutrónu vzniká elektrón, protón a antineutríno.
- Pri rozpade protónu vzniká neutrón, pozitrón a neutríno.

Niekedy sa rozlišuje záporný a kladný elektrón: negatrón a pozitrón

β^- premena

- Pri premene β^- sa v jadre premení jeden neutrón na protón, elektrón a antineutríno.

$$ {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \nu^- $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^- + \nu^- $$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

β^+ premena

- Pri β^+ premene sa v jadre premení jeden protón na neutrón, pozitrón a neutríno.

$$ {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e + \nu $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y' + e^{+} + \nu $$

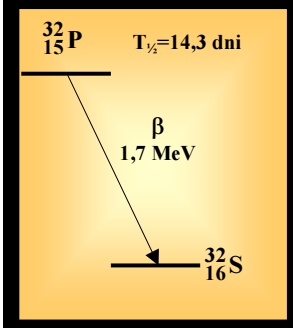
Elektrónový záchyt

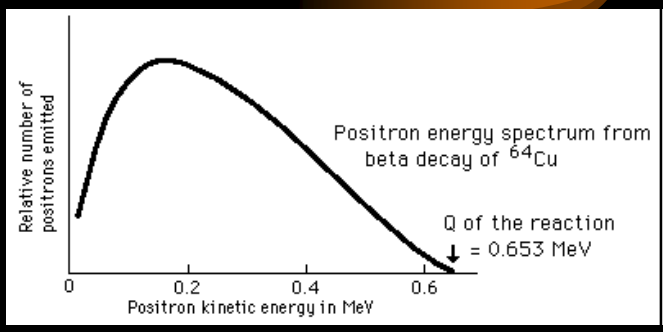
Pri *elektrónovom záchyte* (EZ) jadro pohltí elektrón z vnútorných orbít atómového obalu, ktorý sa zlúči s protónom za vzniku neutrónu a neutrína.

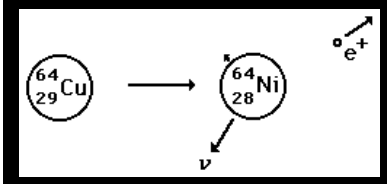
$$ {}^{A}_{Z}X + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y' + \nu $$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Príklady β premeny a β spektra







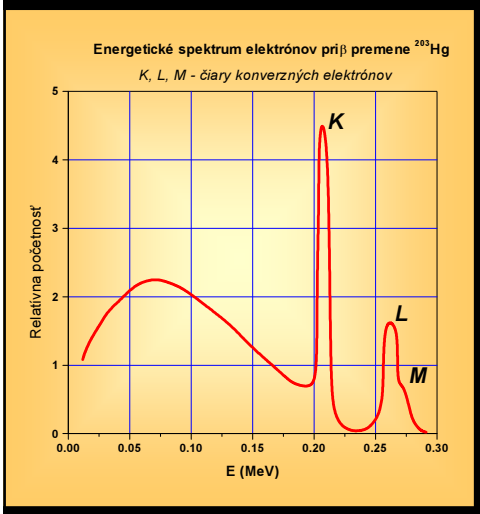
Spojité spektrum vysvetlil Fermi v roku 1930 tak, že predpokladal existenciu **neutrína a antineutrína**, ktoré pri beta premene odnáša časť energie a chýbajúci spin. Samotné neutríno bolo experimentálne potvrdené až v roku 1956.

Vlastnosti β spektra

- **Energetické spektrum** emitovaných β častíc je spojité, lebo pri premene vznikajú vždy dve častice (elektrón a antineutríno alebo pozitrón a neutríno), pričom sa energia môže medzi ne rozdeliť v ľubovoľnom pomere.
- V spojitom spektre elektrónov sa môžu objaviť aj **diskrétne čiary Augerových a konverzných elektrónov .**

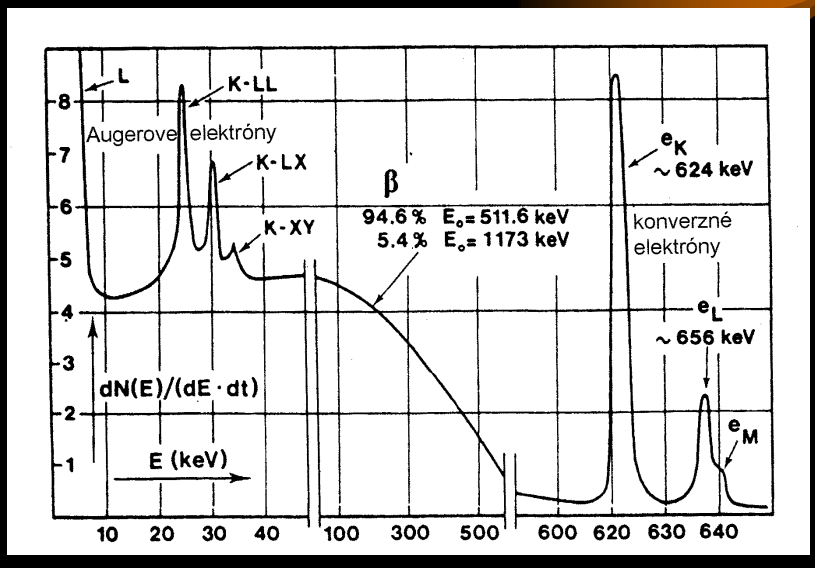
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Vlastnosti β spektra



- Emisia konverzných elektrónov je konkurenčný proces emisii fotónov, keď je excitačná energia odovzdaná obalovému elektrónu z orbít blízkych jadru (K prípadne L) namiesto emisie fotónu. Nejedná sa teda o β premenu.
- Energia konverzného elektrónu sa rovná energii príslušného prechodu γ, zníženej o ich väzobnú energiu na danej orbite atómu.
- Uvolnené miesto na vnútornej orbite sa obsadzuje vonkajšími elektrónmi, čo je sprevádzané emisiou charakteristického žiarenia X.
- Vnútorná konverzia je pravdepodobnejšia u atómov ťažkých prvkov, kde sú elektrónové orbity bližšie k jadru.

Spektrum elektrónového žiarenia pri premene ^{137}Cs



TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Interakcia β častíc s hmotným prostredím

- β častice pri prechode hmotným prostredím strácajú svoju energiu v dôsledku **pružných a nepružných zrážok** a v dôsledku emisie tzv. **brzdného žiarenia**, ktoré vzniká premenou kinetickej energie častice pri brzdení.
- Výsledkom nepružných zrážok je ionizácia a excitácia atómov prostredia.
- Brzdné žiarenie má charakter röntgenového žiarenia.
- Hovoríme o **ionizačných a radiačných stratách**.

Interakcia β častíc s hmotným prostredím

- Pomer radiačných a ionizačných strát vyjadruje vzťah:

$$\tau = \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_r}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_i} = \frac{E_\beta Z}{800}$$

E_β - je maximálna energia β spektra (MeV),

Z - protónové číslo absorbátora.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Interakcia β častíc s hmotným prostredím

Zoslabovanie počtu elektrónov, pochádzajúcich zo zdrojov so spojitým spektrom, približne vyjadruje vzťah:

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

N_0 je pôvodný počet elektrónov,

N - počet elektrónov po prechode absorbátorom hrúbky x,

μ - lineárny súčiniteľ zoslabenia.

Interakcia β častíc s hmotným prostredím

Hrúbka polovičného zoslabenia:

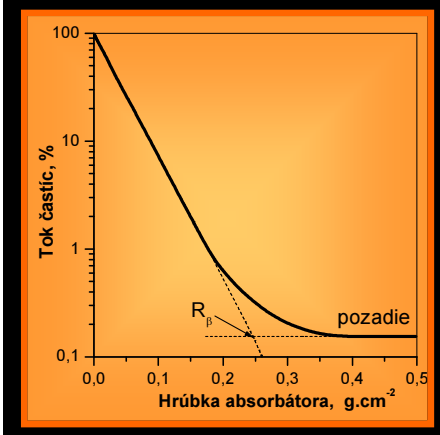
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\mu d_{1/2}}$$

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

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0{,}693}{d_{1/2}\rho} \qquad [kg \cdot m^{-2}]$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Prechod β častíc látkou



Exponenciálna závislosť zoslabenia zväzku elektrónov v materiáloch platí pre elektróny s vysokou energiou.
Elektróny strácajú energiu hlavne pri pružnom rozptyle, pričom sa len málo odkláňajú od pôvodného smeru. Teoreticky sa dá ukázať, že stredný uhol rozptylu je nepriamo úmerný energii elektrónu a priamo úmerný odmocnine hrúbky materiálu, ktorým elektrón prešiel. Čím je energia elektrónov nižšia, tým väčší je vplyv rozptylu a tým viac sa pôvodný zväzok rozširuje.
Pri priblížení energie k energii tepelného pohybu sa znižovanie intenzity spomalí až sa nakoniec ustáli na úrovni pozadia, kedy môžeme pohyb elektrónov považovať za difúzny.

Dolet β častíc

Približné empirické vzťahy pre určenie doletu β častíc:

Pre hliník: $R_{Al}=2{,}5\cdot E_{max}$ [mm, MeV]

Pre vzduch: $R_{vzd}=4\cdot E_{max}$ [m, MeV]

Pre iné materiály:

$$R_X = R_{Al}\frac{\left(\frac{Z}{A}\right)_{Al}}{\left(\frac{Z}{A}\right)_X}$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Ochrana a meranie beta žiarenia

- Beta žiarenie rádionuklidov je **slabo prenikavé** žiarenie a z tohto pohľadu k nemu treba pristupovať pri meraní a RO.
- Dolet beta častíc s typickou energiou v pevných látkach (Al) je **1-3 mm**. Vo vzduchu sú to **metre**.
- Z pohľadu merania má význam:
  - meranie **vonkajšieho ožiarenia** osobným dozimetrom pre slabo prenikavé žiarenie
  - meranie **kontaminácie odevov a povrchu tela** beta rádionuklidmi
  - meranie **vnútornej kontaminácie** beta rádionuklidmi nepriamymi metódami z moču a exkrétov (napr. **^{3}H, ^{90}Sr**) na obsah ťažko merateľných rádionuklidov (nemôžeme použiť gamaspektrometriu, fastscan a pod.)

Prechod β častíc látkou

Prechod β častíc látkou má zložitejšiu povahu ako prechod častíc α.

Rozdiely sú spôsobené tým, že β častice sú podstatne ľahšie, majú menší náboj, väčšiu rýchlosť a ich dráha v látke je kľukatá.

Dosah β častíc v látke je preto väčší ako častíc α.

Energia [MeV]	Vzduch [m]	Voda [mm]	Hliník [mm]
0,01	0,00229	0,00247	0,00127
0,1	0,130	0,143	0,0693
1,0	3,94	4,38	2,06
2,0	8,73	9,84	4,59
3,0	13,41	15,3	7,74
4,0	17,86	20,6	9,84
5,0	22,28	25,8	11,89

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Ochrana pred β žiarením

- Ako ochranu pred žiarením volíme ľahký **materiál s malým Z**, kvôli zníženiu radiačných strát, najčastejšie hliník pre jeho dostupnosť a mechanické vlastnosti.
- Pri vysokoenergetickom žiarení vzhľadom na brzdné žiarenie navrhujeme ochranu kombinovanú (napr. Al - Fe, Al - Pb a pod.), aby sme energiu brzdného žiarenia znížili na minimum.

Empirické výpočty ochrany

Pre hliník môžeme stanoviť hrúbku polovičného zoslabenia z empirického vzťahu:

$$d_{1/2} = 1{,}5.10^{-4}\, E_{max}^{-1{,}33} \quad [m, MeV]$$

Uvedený vzťah platí s vyhovujúcou presnosťou pre $0{,}5 < E_{max} < 6$ MeV.

$$\mu_m = 2{,}23 \cdot E_{max}^{-1{,}33} \quad [m^2 \cdot kg^{-1},\ MeV]$$

Pre ten istý materiál určíme hmotnostný súčiniteľ zoslabenia

Pre ľubovoľný iný materiál (v rozsahu od H po Cu):

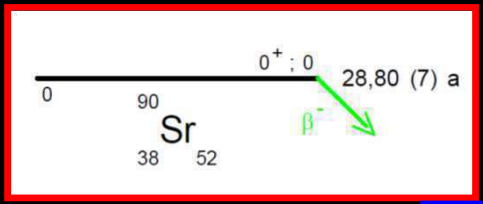
$$d_{1/2} = 9.5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{Z}{A}\right) \cdot \sqrt{E_{max}^{3}} \quad [m, MeV]$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

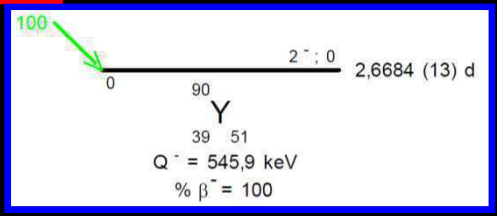
Ochrana pred β žiarením

- V okolí reaktora, ktorý je aj zdrojom iných, prenikavejších druhov žiarenia (fotóny, neutróny) budovaniu ochrany pred β žiarením **nie je potrebné** venovať mimoriadnu pozornosť, pretože navrhnutá ochrana pred spomínanými druhmi žiarenia stačí odfiltrovať aj sprievodné žiarenie β.
- Pri vysokoenergetickom žiarení vzhľadom na vznikajúce brzdné žiarenie treba však **preveriť**, či je ochrana dostatočná.

Rozpadová schéma pre „čistý“ beta žiarič ^{90}Sr



90Sr		Energy keV	Electrons per 100 disint.
$\beta^-_{0,0}$	max:	545,9 (14)	100
$\beta^-_{0,0}$	avg:	196 (1)	



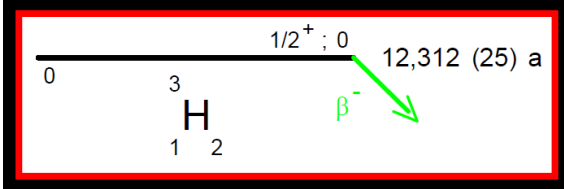
90Y		Energy keV	Electrons per 100 disint.
$ec^{\pm}_{1,0}$	(Zr)	768,7 (6)	0,00319 (5)
$\beta^-_{0,2}$	max:	93,5 (17)	0,0000014 (3)
$\beta^-_{0,2}$	avg:	24,5 (5)	
$\beta^-_{0,1}$	max:	519,1 (17)	0,017 (6)
$\beta^-_{0,1}$	avg:	163,7 (6)	
$\beta^-_{0,0}$	max:	2279,8 (17)	99,983 (6)
$\beta^-_{0,0}$	avg:	926,7 (8)	

Gamma Emissions

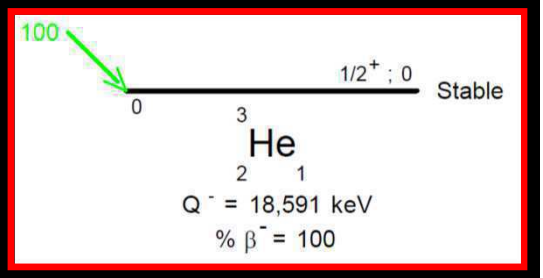
90Y	Energy keV	Photons per 100 disint.
$\gamma_{2,0}$(Zr)	2186,254 (10)	0,0000014 (3)

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Rozpadová schéma pre čistý beta žiarič ^{3}H

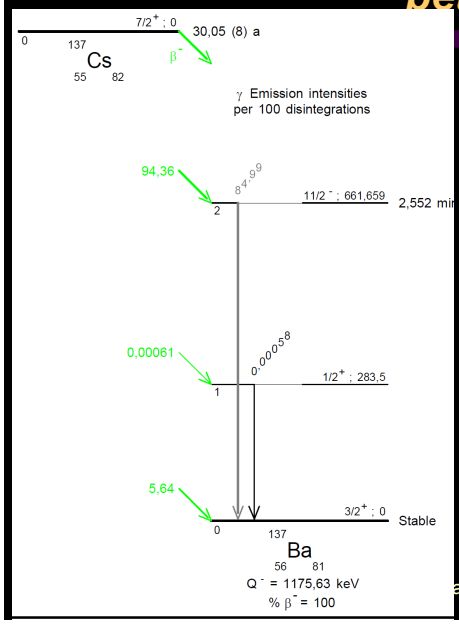


		Energy keV	Electrons per 100 disint.
$\beta^-_{0,0}$	max:	18,564 (3)	100
$\bar{\beta}^-_{0,0}$	avg:	5,68 (1)	



Dolet takého žiarenia je cca. 2 mm vo vzduchu resp. 2 μm vo vode.

Rozpadová schéma typického beta-rádionuklidu ^{137}Cs

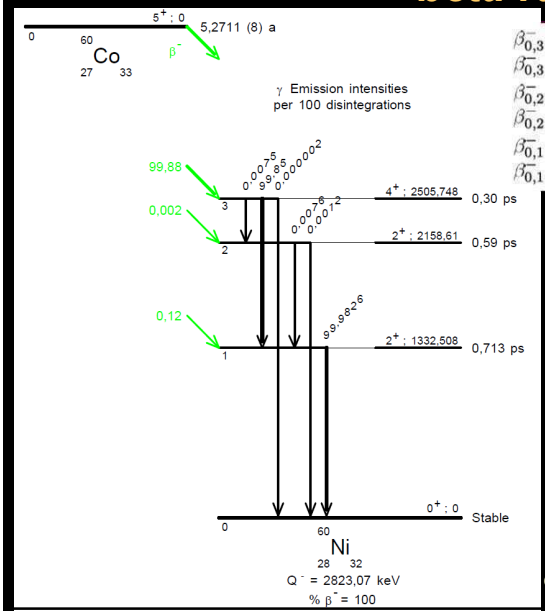


$\beta^-_{0,2}$	max:	513,97	(17)	94,36 (28)
$\bar{\beta}^-_{0,2}$	avg:	174,32	(6)	
$\beta^-_{0,1}$	max:	892,1	(2)	0,00061 (8)
$\bar{\beta}^-_{0,1}$	avg:	300,57	(8)	
$\beta^-_{0,0}$	max:	1175,63	(17)	5,64 (28)
$\bar{\beta}^-_{0,0}$	avg:	416,26	(8)	

	Energy keV	Photons per 100 disint.
$\gamma_{1,0}$(Ba)	283,5 (1)	0,00058 (8)
$\gamma_{2,0}$(Ba)	661,657 (3)	84,99 (20)

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Rozpadová schéma typického beta-rádionuklidu ^{60}Co



$\beta^-_{0,3}$	max:	317,32	(21)	99,88 (3)
$\bar{\beta}^-_{0,3}$	avg:	95,6	(1)	
$\beta^-_{0,2}$	max:	664,46	(21)	0,002
$\bar{\beta}^-_{0,2}$	avg:	274,8	(1)	
$\beta^-_{0,1}$	max:	1490,56	(21)	0,12 (3)
$\bar{\beta}^-_{0,1}$	avg:	625,6	(1)	

	Energy keV	Photons per 100 disint.
$\gamma_{3,2}$(Ni)	347,14 (7)	0,0075 (4)
$\gamma_{2,1}$(Ni)	826,10 (3)	0,0076 (8)
$\gamma_{3,1}$(Ni)	1173,228 (3)	99,85 (3)
$\gamma_{1,0}$(Ni)	1332,492 (4)	99,9826 (6)
$\gamma_{2,0}$(Ni)	2158,57 (3)	0,0012 (2)
$\gamma_{3,0}$(Ni)	2505,692 (5)	0,0000020 (4)

ochrana

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Röntgenové žiarenie a žiarenie gama

Ing. Róbert HINCA
Dozimetria a radiačná ochrana

Röntgenové žiarenie a žiarenie gama

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

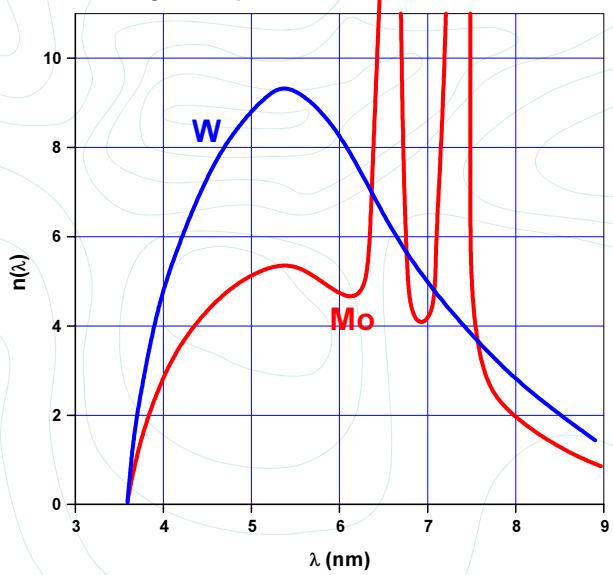
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

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 (zahrňuje čiarové spektrá charakteristického žiarenia),
  - spojité **brzdné žiarenie** vznikajúce pri spomaľovaní ťažkých nabitých častíc,
  - **anihilačné žiarenie** pochádzajúceho z anihilácie párov elektrón - pozitrón.

Spektrum röntgenky

Energetické spektrum žiarenia X z W a Mo terčíka



Charakteristické röntgenové žiarenie vzniká v dôsledku nepružného rozptylu nabitej častice – 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.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

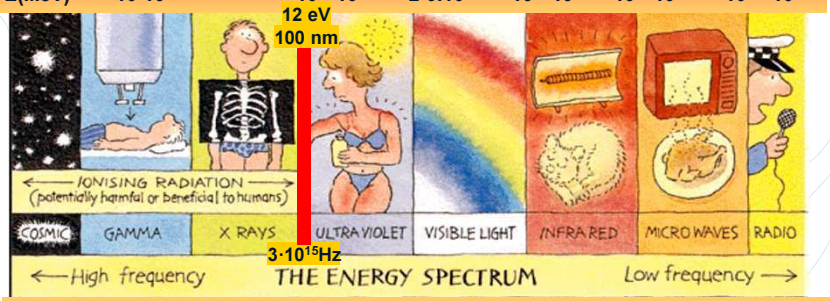
Vlnové a korpuskulárne vlastnosti

- 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:

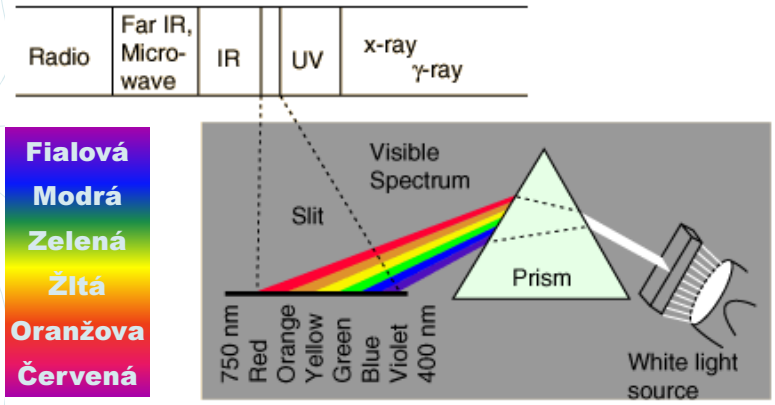
$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$h = 6{,}626.10^{-34}$ J.s
$h = 4{,}141.10^{-21}$ MeV.s
$c = 2{,}99.10^{8}$ m.s^{-1}

E(MeV)	10-10^{-4}	10^{-4}-10^{-6}	2-3.10^{-6}	10^{-6}-10^{-9}	10^{-9}-10^{-12}	10^{-12}-10^{-17}
ν(Hz)	10^{17}-10^{22}	10^{15}-10^{17}	4-8.10^{14}	10^{12}-10^{14}	10^{9}-10^{12}	10^{4}-10^{9}



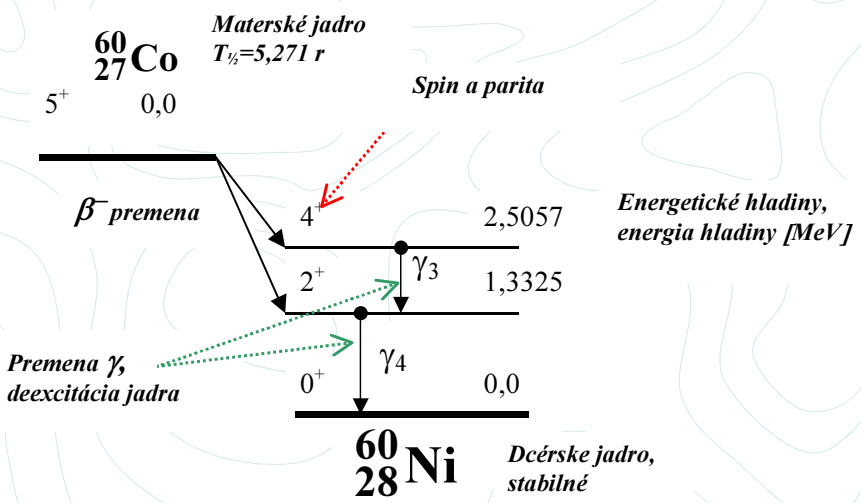
Frekvenčný rozsah viditeľného svetla



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

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Rozpadová schéma rádionuklidu ^{60}Co.



Absorpcia žiarenia gama v látke

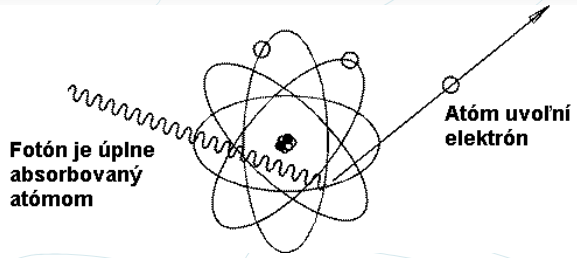
Skutočná absorpcia fotónov je určovaná premenou ich energie na kinetickú energiu elektrónov absorbujúceho prostredia.

Deje sa tak týmito interakciami:

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

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Fotoefekt



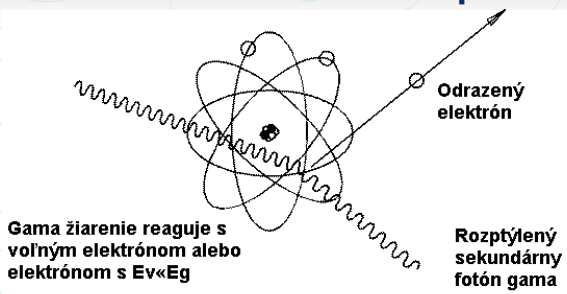
Fotoefekt je taký typ interakcie γ žiarenia s atómom, pri ktorom prejde <u>všetka jeho energia</u> na niektorý elektrón atómového obalu.

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

S rastom energie γ žiarenia klesá absorbčný 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.

Comptonov rozptyl



Pri interakcii fotónu s <u>voľným elektrónom</u>, 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.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

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

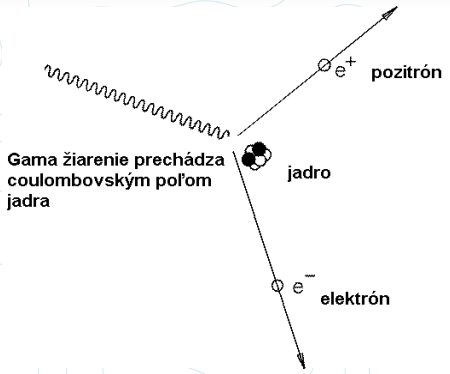
$$E_e=E_\gamma=mv^2/2$$

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 - pozitrón



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

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

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

Tvorba párov dominuje pri vysokých energiách a vysokých Z.

Vznikajúve pozitróny prakticky okamžite anihilujú s elektrónmi za vzniku dvoch fotónov γ s energiami 511 keV.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Fotojadrové reakcie

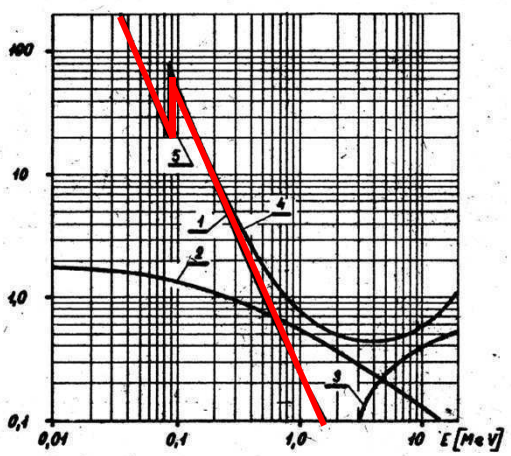
- Fotón môže byť absorbovaný jadrom a vyraziť z neho nukleón.
- Fotón musí mať dostatočnú energiu na to, aby nukleón prekonal väzobné sily.
- napr. reakcia uvedená nižšie je možná iba pri $E_{\gamma min}$=8,09 MeV

- Reakcia (γ,p) má ešte vyššiu prahovú energiu
- Ďalšie reakcie: (γ,2n), (γ,np), (γ, α), (γ,f)

$$^{206}_{82}Pb(\gamma,n)^{205}_{82}Pb$$

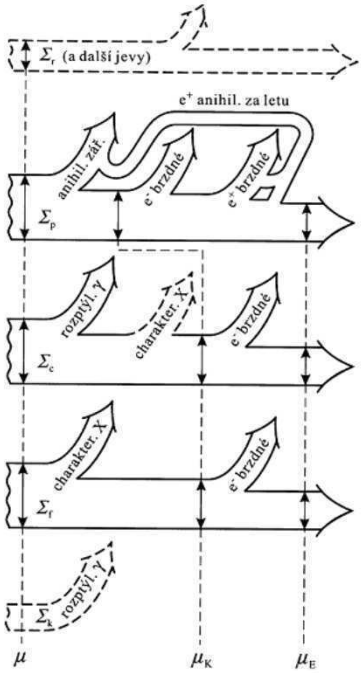
Lineárny koeficient zoslabenia pre gama žiarenie

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



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

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.



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 nabité sekundárne častice zohľadňuje **koeficient prenosu energie** μ_{tr} **[m^{-1}]** (μ_K).

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.

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.

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

Hustota prúdu častíc J [m^{-2}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.

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

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Absorpčný zákon pre úzky paralelný zväzok

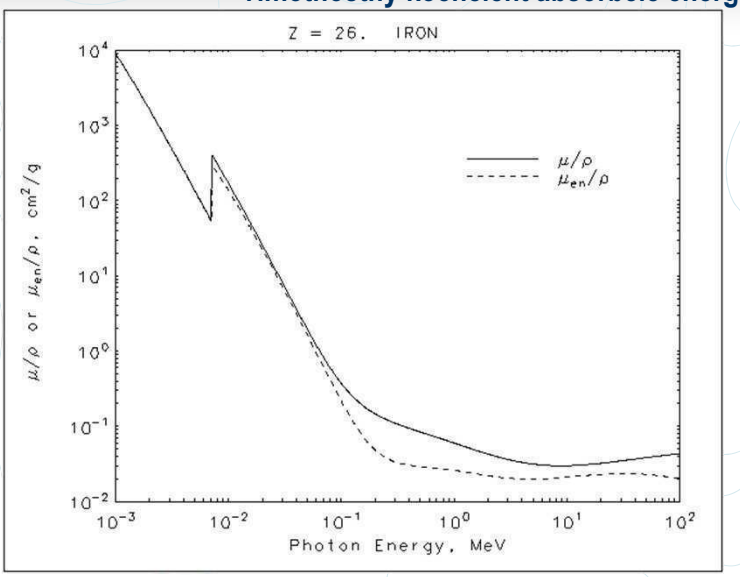
Pri prechode röntgenového alebo gama žiarenia cez hmotné prostredie dochádza k jeho zoslabovaniu podľa exponencionálneho zákona.

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

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.

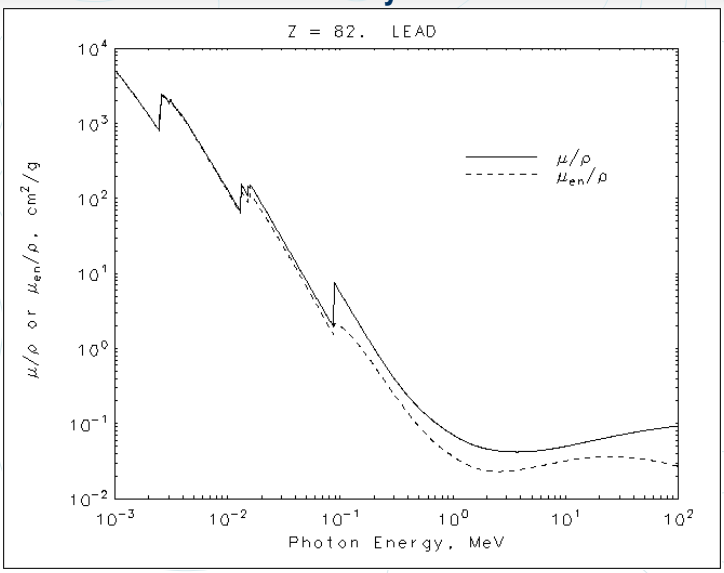
Hmotnostný koeficient zoslabenia
Hmotnostný koeficient absorbcie energie



mass attenuation coefficient, and the mass energy-absorption coefficient

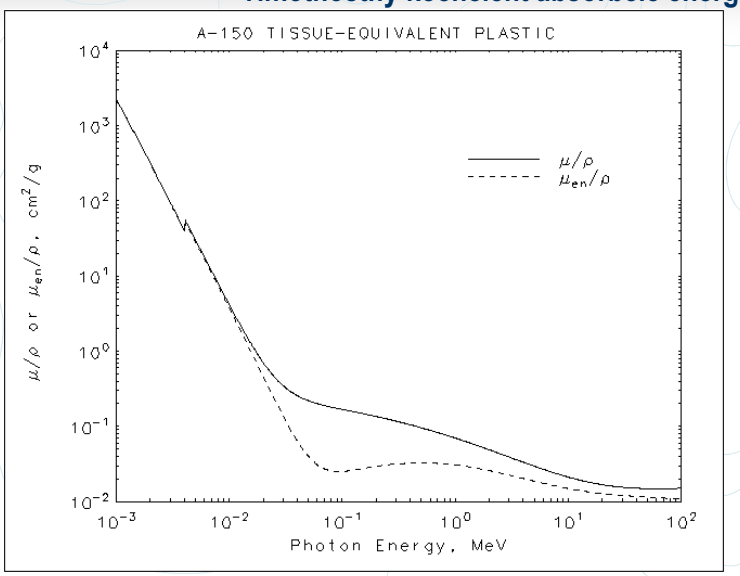
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Hmotnostný koeficient zoslabenia
Hmotnostný koeficient absorbcie energie



mass attenuation coefficient, and the mass energy-absorption coefficient

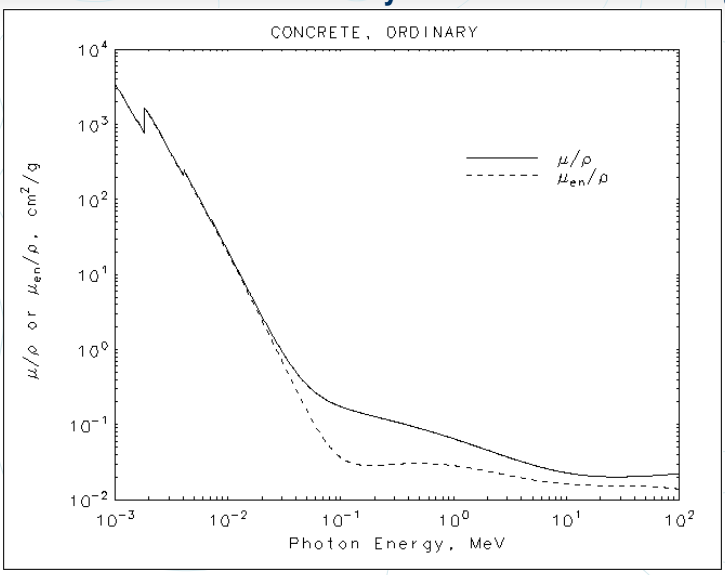
Hmotnostný koeficient zoslabenia
Hmotnostný koeficient absorbcie energie



mass attenuation coefficient, and the mass energy-absorption coefficient

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Hmotnostný koeficient zoslabenia
Hmotnostný koeficient absorbcie 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

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

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

Materiál	^{137}Cs úzky zväzok	^{137}Cs široký zväzok	^{60}Co úzky zväzok	^{60}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
$x\rho = 13{,}4\ g.cm^{-2}$ (hmotnostná hrúbka, hrúbka)

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.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

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

Polhrúbka $d_{1/2}$

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

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

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

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

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

k\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
10^4	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

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Príklad

- Bodový zdroj žiarenia (^{137}Cs, E_γ = 661 keV) spôsobuje vo vzdialenosti 0,1 m dávkový príkon 10^{-3} Gy.s^{-1}. Predpokladá sa pracovná vzdialenosť 2 m. Treba určiť hrúbku oceľovej 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) 3.10^{-9} Gy.s^{-1} (20.10^{-3}/50.36.3600).
- Spomínaný zdroj žiarenia však v danom mieste (2 m) spôsobuje dávkový príkon $2,5.10^{-6}$ Gy.s^{-1}. ($10^{-3}/20^2$)
- Dávkový príkon treba teda znížiť 834 - krát (k= $2,5.10^{-6}$/ 3.10^{-9}). Pomocou takto určenej krátnosti zoslabenia k nájdeme v tabuľkách potrebnú hrúbku ochrany
- V danom prípade bude pre k=1000 hrúbka oceľovej ochrany 17 cm, **olovo 6,5 cm**, voda 129 cm, betón 61,1 cm, **urán 3,4 cm**.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

ZDROJE NEUTRÓNOV

Vlastnosti neutrónového žiarenia

Dozimetria a radiačná ochrana

Ing. Róbert Hinca

Neutrón

- Neutrón môže byť viazaný v jadre ako **nukleón**. Vtedy je stabilný.
- Neutrón môže existovať ako **voľná častica**. Vtedy je nestabilný a podlieha beta premene s polčasom 10,3 min (stredná doba života 10,3/0,693=14,9 min).
- V prírode v podstate neexistujú nuklidy, ktoré by podliehali spontánnej premene spojenej s emisiou neutrónov s výnimkou spontánneho štiepenia uránu.
- Podiel štiepení na premene ^{235}U je 7.10^{-9} a ^{238}U je $5,45.10^{-5}$ (ostatné je alfa premena).

2

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Rozdelenie neutrónov

- Tepelné (pomalé) neutróny (0-0,1 keV)
  - ultrastudené ($E<10^{-7}$ eV), majú vlnové vlastnosti
  - studené ($E<5\cdot10^{-3}$ eV), majú vlnové vlastnosti
  - tepelné ($E<0,1$ eV), charakteristická difúzia v látke
- Nadtepelné (rezonančné) neutróny (0,1-500 eV), charakteristické je spomaľovanie ($\sigma_s \sim 1/v$) a rezonančný záchyt (n,γ)
- Rýchle neutróny (0,2 - 2 MeV), pružný a nepružný rozptyl, prahové jadrové reakcie
- Veľmi rýchle neutróny (E>20 MeV), spalačné reakcie, roztrieštenie jadier

3

Rozdelenie neutrónov podľa rýchlosti (energie)

$$E_p = kT$$

$$\overline{E} = \frac{4kT}{\pi}$$

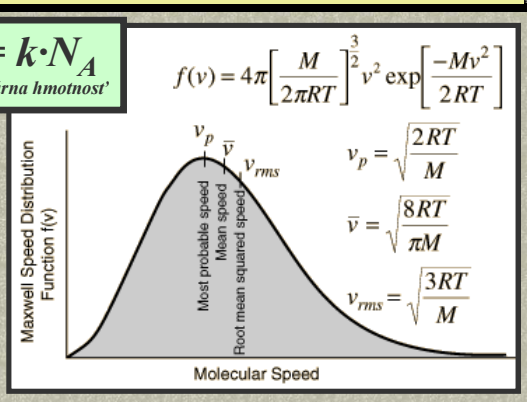
$$E_{rms} = \frac{3}{2}kT$$

$$R = k\cdot N_A$$

M - molárna hmotnosť

Bolzmannova konštanta
$k = 1,38\cdot10^{-23}$ J·K^{-1}
J = 6,25 ·10^{18} eV

$$f(v) = 4\pi\left[\frac{M}{2\pi RT}\right]^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left[\frac{-Mv^2}{2RT}\right]$$



$$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

T[K]	E_p[eV]	E_{rms}[eV]	v_p[ms^{-1}]	v_{rms}[ms^{-1}]
300	0.025	0.039	2222	2740
600	0.052	0.077	3144	3870

4

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Zdroje neutrónov

PROCES	PRÍKLAD	VÝŤAŽOK NEUTRÓNOV
(α, n), (γ, n)	^{226}Ra - Be zdroj (α, n) ^{124}Sb - Be zdroj (γ, n)	502 n na 10^6 α 5,1 n na 10^6 γ
Urýchľovače častíc (p, n), (d, n), (α, n)	7Li(p,n), ^{12}C(d,n), ^{9}Be (α,n), ^{2}H(d,n), ^{3}H(p,n), ^{3}H(d,n)	2.10^{11} n/(μC.sr)
Delenie (n, f)	^{235}U v reaktore	1 / delenie
Jadrová syntéza	400 keV deuteróny a tríciový terčík	4.10^{-5} / d
(γ, n) a foto-delenie (γ, f) Reakcie s brzdným elektrónovým žiarením	100 MeV elektróny a uránový terčík,	5.10^{-2} / e
Spalačná reakcia	800 - 1600 MeV protóny a terčík z ťažkého kovu	30 n / p

5

Reakcie v rádionuklidových zdrojoch neutrónov

$$^{9}Be + \alpha \rightarrow {}^{12}C + {}^{1}n$$
$$^{13}C + \alpha \rightarrow {}^{16}O + {}^{1}n$$
$$^{7}Li + \alpha \rightarrow {}^{10}B + {}^{1}n$$
$$^{19}F + \alpha \rightarrow {}^{22}Na + {}^{1}n$$

$$\gamma + {}^{9}Be \rightarrow {}^{8}Be + {}^{1}n$$
$$\gamma + {}^{2}H \rightarrow {}^{1}H + {}^{1}n$$

6

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Charakteristiky niektorých zdrojov (γ,n)

Zdroj	Polčas rozpadu	Terčové jadro	Výťažok neutrónov na 10^{10} Bq γ, n/s
^{24}Na	15 hod	Be D	340 000 330 000
^{28}Al	67 dní	Be	32 600
^{38}Cl	3 roky	Be	43 100
^{88}Y	107 dní	Be D	229 000 160
^{124}Sb	60.2 dní	Be	210 000

7

Charakteristiky Be(α,n) zdrojov

Zdroj	Polčas rozpadu	Výťažok neutrónov na 10^6 častíc α
^{239}Pu/Be	24 000 rokov	57
^{210}Po/Be	138 dní	69
^{238}Pu/Be	87,4 rokov	79*
^{241}Am/Be	433 rokov	70
^{244}Cm/Be	18 rokov	100*
^{226}Ra/Be	1 602 rokov	502*
^{227}Ac/Be	21,6 rokov	702

* veličina určená výpočtom

8

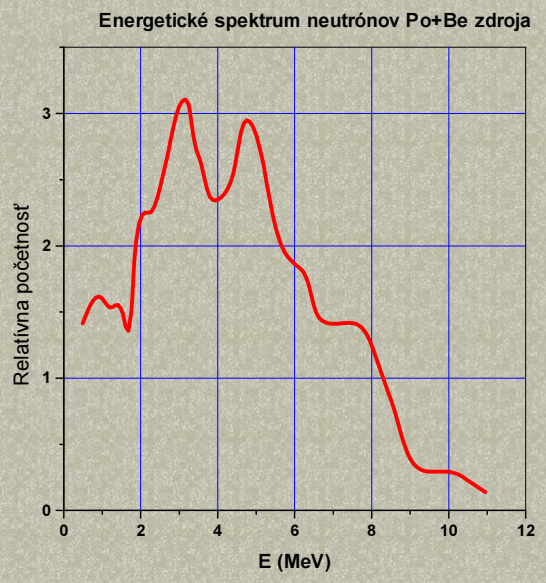
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

^{252}Cf

- Izotop **^{252}Cf** emituje neutróny **spontánne po štiepení**.
- Tento prvok sa v prírode nevyskytuje.
- V jadrovom reaktore vzniká izotop **^{252}Cf** z izotopu **^{238}U** (^{242}Pu) sériou záchytných reakcií neutrónov a následných beta rozpadov.
- **^{252}Cf** sa rozpadá α rozpadom na ^{248}Cm (E_α=6,2 MeV 96,91%) alebo sa spontánne štiepi (3,09%) s $T_{½}$=2,647 roka.
- Pri štiepení emituje v priemere 3,7675 neutrónov, teda na 100 rozpadov emituje 3,09x3,7675=11,627 neutrónov.
- 1 mg čistého ^{252}Cf emituje cca. $2{,}36 \cdot 10^9$ n/s.

9

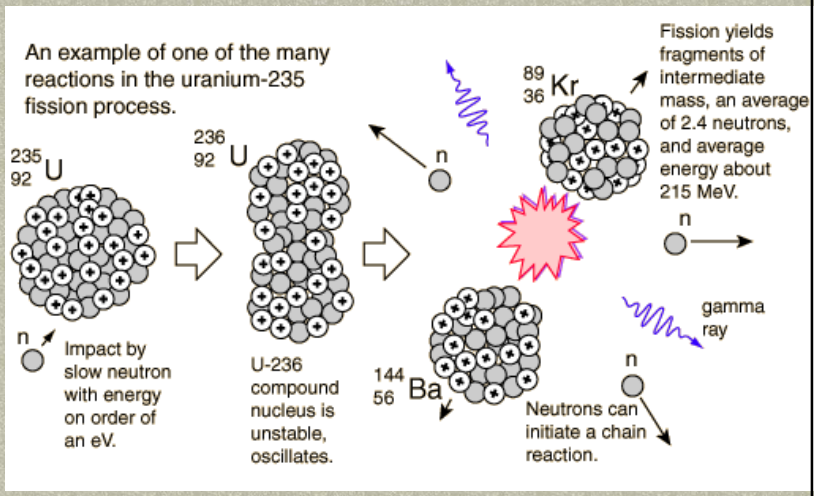
Energetické spektrum rádionuklidového zdroja



10

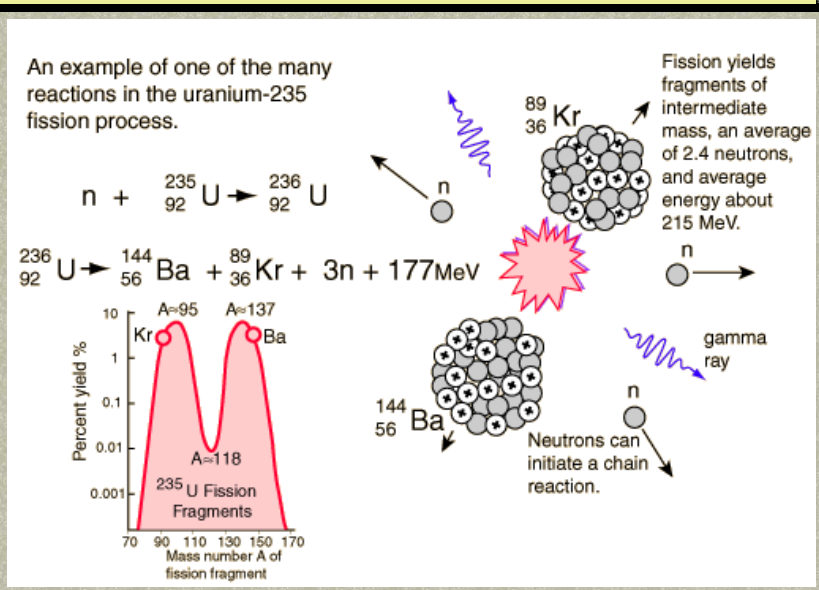
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Produkcia neutrónov pri štiepnej reakcii



11

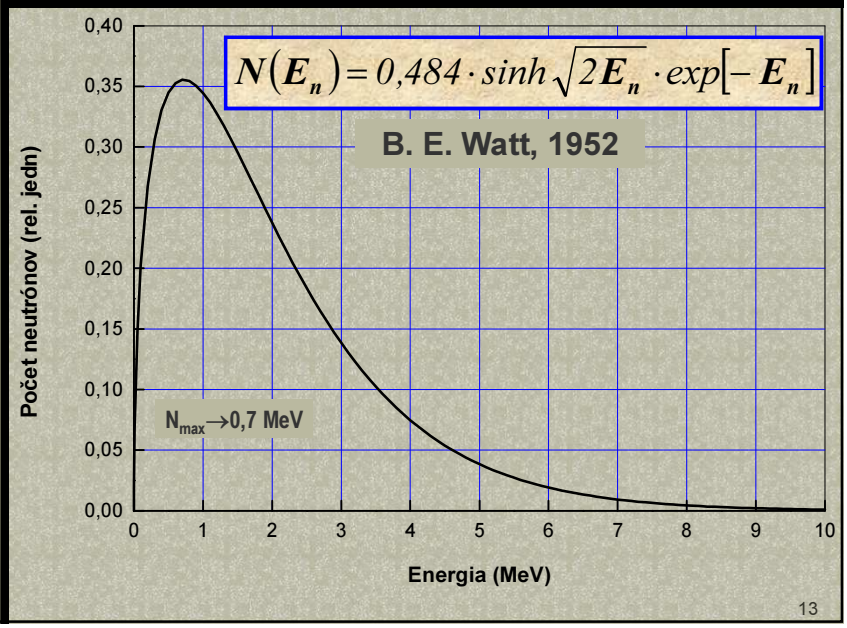
Príklad štiepnej reakcie



12

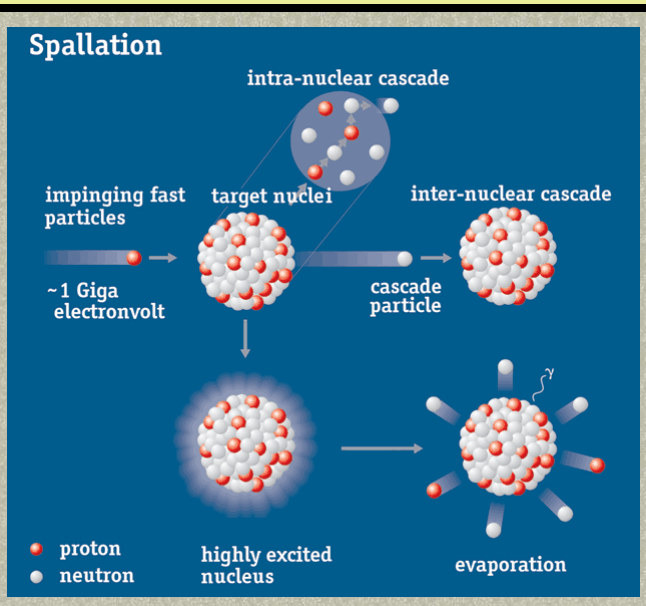
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Energetické spektrum štiepnych neutrónov ^{235}U



13

Spalačná reakcia

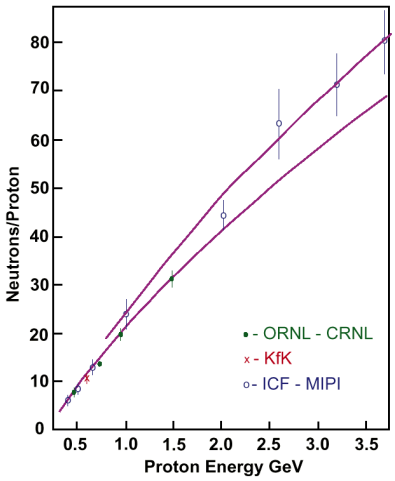


14

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Charakteristiky spalačných zdrojov

Neutron Production versus Proton Energy



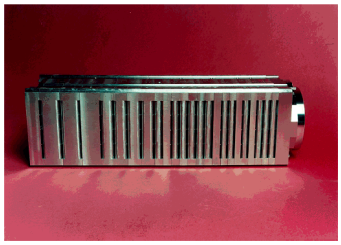
Physical and Mechanical Properties of Target Materials

	W	Ta	Pt	Pb	U
Atomic number	74	73	78	82	92
Atomic weight	183.84	180.95	195.08	207.2	238.02
Cross section for thermal neutrons, b	18.5	22	9	0.18	7.7
Density g/cm^3	19.3	16.6	21.5	11.3	19.05
Melting point	3410	3000	1772	327	1135
UTS MPa	1000	300	150	12	386
Thermal expansion coefficient 10^{6}/K	4.5	6.3	8.8	28.9	36.1
Neutrons/proton at 800 MeV	13.9	13.7	14.6	15.4	34.0
Resonance absorption cross section b	352	600	355	0.16	290

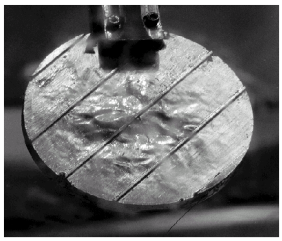
15

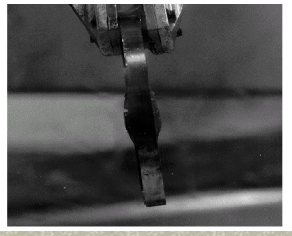
Konštrukcia terčíka a jeho radiačné poškodenie

The ISIS Target Construction



Uranium





16

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Základné procesy pri interakcii neutrónov s látkou

- **Pružný rozptyl** - neutrón odovzdáva časť svojej energie odrazenému jadru, pričom sa mení smer jeho dráhy.
- **Nepružný rozptyl** (n,n′) - neutrón s dostatočnou energiou je pohltený jadrom, ktoré sa dostáva do excitovaného stavu. Pri prechode do základného stavu môže excitované jadro emitovať jeden alebo viac fotónov (n,n′,γ).
- **Radiačný záchyt** - (n,γ) veľmi pravdepodobný proces tepelných neutrónov a rezonančných neutrónov.
- **Uvoľňovanie nabitých častíc** - (n,α), (n,d), (n,f), (n,p). Proces je najpravdepodobnejší pre ľahké jadrá a rýchle neutróny (typickým príkladom sú reakcie vzniku α z jadier Li, B).
- **Štiepenie** - (n,f)
- **Roztrieštenie jadier** - spalačná reakcia

17

Interakcia neutrónov s látkou

- Mierou pravdepodobnosti interakcie neutrónov s látkou je **účinný prierez** σ [m^2].
- Staršou jednotkou je barn (1 b = 10^{-28} m^2).
- Vo všeobecnosti je definovaný pre danú terčovú entitu a pre danú interakciu alebo proces vyvolaný dopadajúcimi nabitými alebo nenabitými časticami daného typu a energie ako **podiel pravdepodobnosti tejto reakcie alebo deja pre danú terčovú entitu a fluencie dopadajúcich častíc**.

$$\sigma = \frac{P}{\Phi}$$

18

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Mikro- a makroskopický účinný prierez

- σ_a - účinný prierez pre záchyt
- σ_s - účinný prierez pre rozptyl
- σ_f - účinný prierez pre štiepenie
- σ_{tot} - celkový účinný prierez

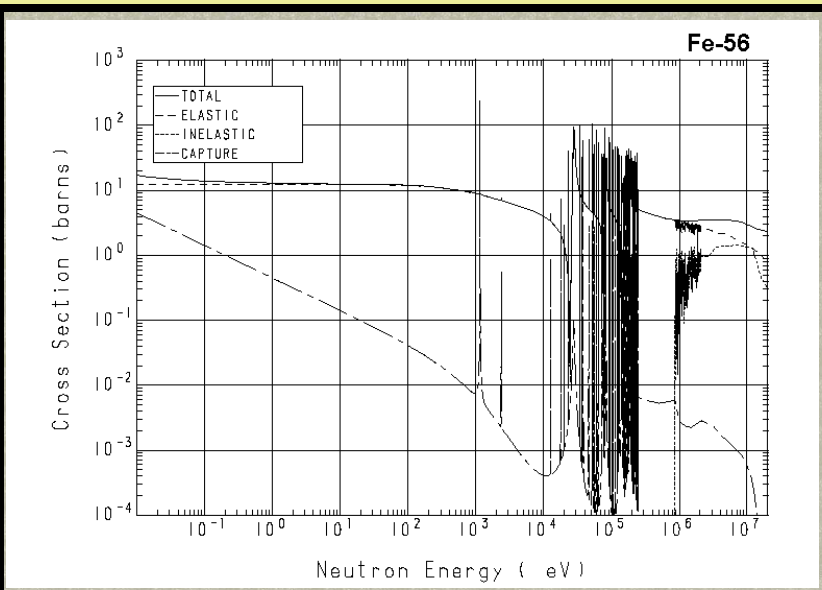
$$\sigma_{tot} = \sum_i \sigma_i$$

- Σ - makroskopický (objemový) účinný prierez [m^{-1}]
- $\Sigma = n\sigma$, kde n je hustota jadier [m^{-3}]

$$\Sigma = \sum_i n_i \sigma_i$$

19

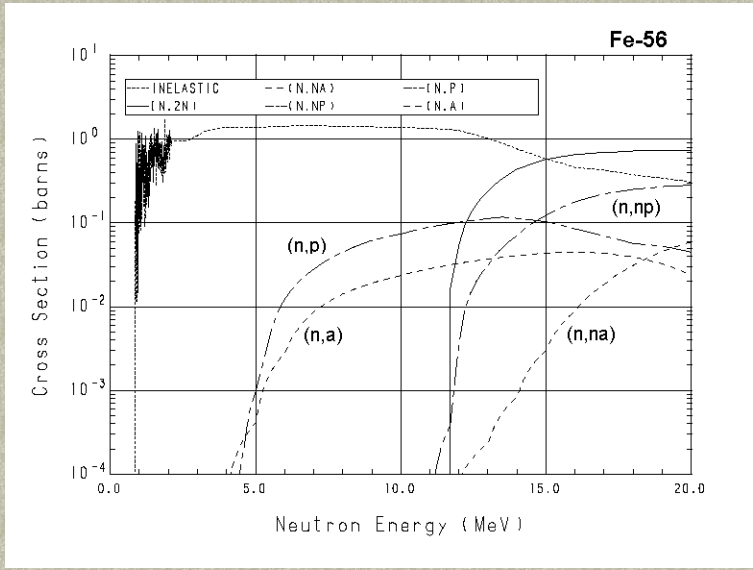
Účinný prierez interakcie neutrónov



20

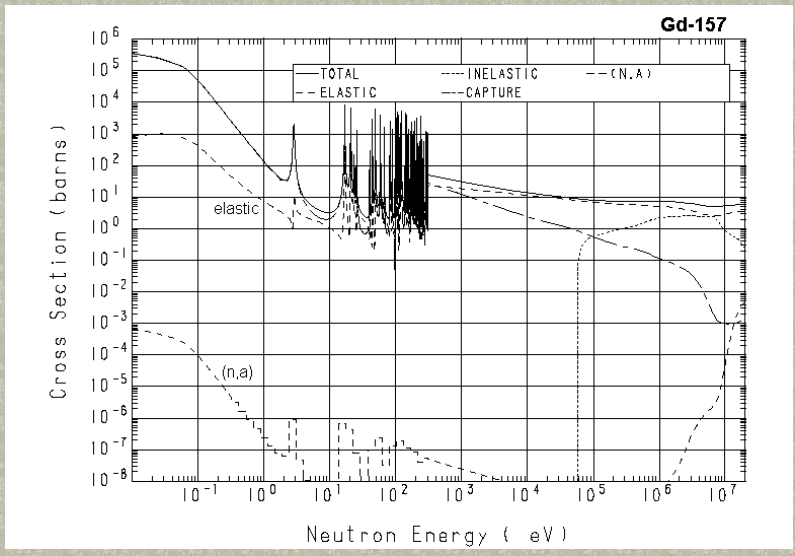
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Účinný prierez interakcie neutrónov



21

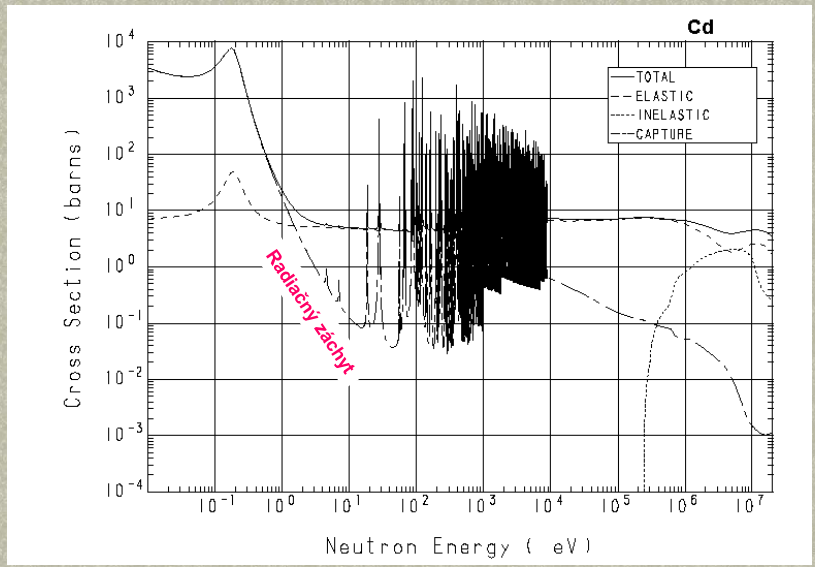
Účinný prierez interakcie neutrónov



22

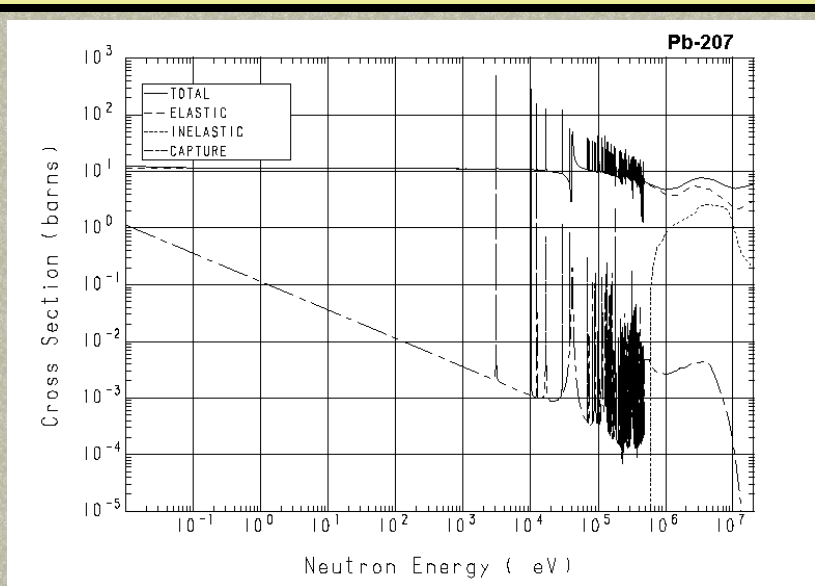
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Účinný prierez interakcie neutrónov



23

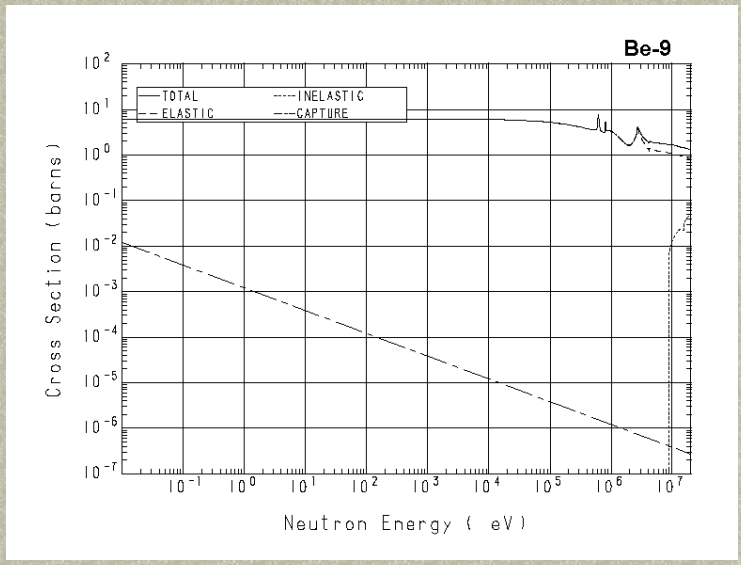
Účinný prierez interakcie neutrónov



24

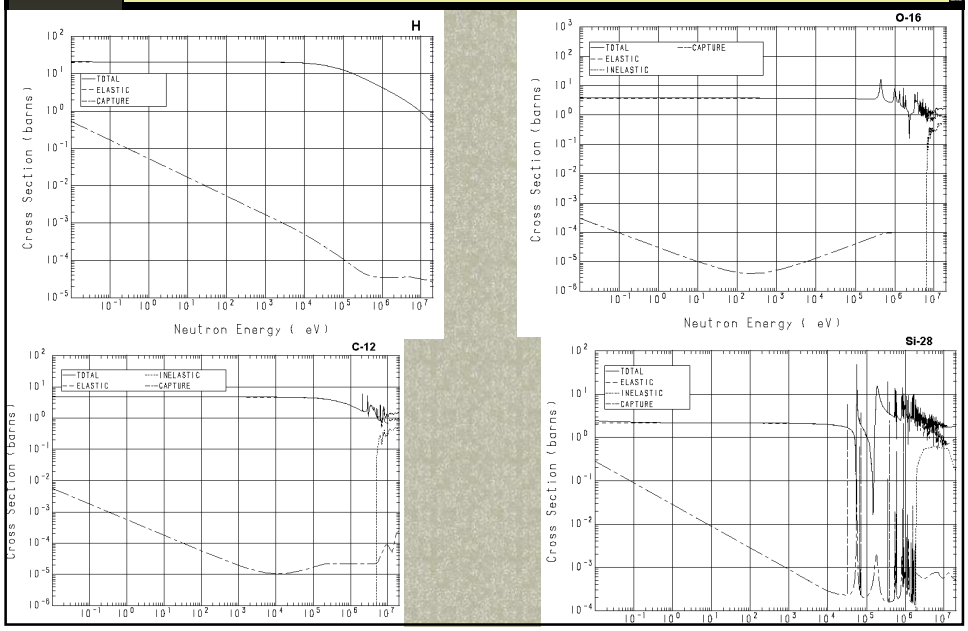
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Účinný prierez interakcie neutrónov



25

Účinný prierez interakcie neutrónov



TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Zoslabovanie toku neutrónov v látke

- Zoslabovanie úzkeho kolimovaného zväzku neutrónov prebieha podľa exponenciálneho zákona

$$\varphi_x = \varphi_0 . e^{-n\sigma_t x} = \varphi_0 . e^{-\Sigma_t x}$$

$$\sum = n\sigma = \frac{\rho N_A}{A}\sigma$$

27

Relaxačná dĺžka λ

- Recipročná hodnota veličiny Σ, sa nazýva **relaxačná dĺžka** daného materiálu, čo je vzdialenosť, na ktorej pôvodná hustota toku neutrónov poklesne e - krát.

$$\varphi_x = \varphi_0 . e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

- Hustotu toku neutrónov vo vzdialenosti R od izotropného bodového zdroja neutrónov, z ktorého vyletuje N_0 neutrónov za jednotku času, určíme zo vzťahu

$$\varphi_R = \frac{N_0}{4\pi R^2} e^{-\frac{R}{\lambda}}$$

28

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Relaxačná dĺžka pre neutróny s E~1 MeV

Materiál	ρ (g·cm^{-3})	λ (cm)
Grafit	1,67	13,2
Hliník	2,7	14,8
Betón	2,2	11
Voda	1	9
Železo	7,6	12,6
Karbid bóru	1,3	14,6
Polyetylén	0,92	6,5
Titán	4,5	10
Olovo	11,34	18

29

Princípy návrhu ochrany pred neutrónmi

- Absorbcia neutrónov je najvyššia v oblasti tepelných, pomalých a rezonančných energií. Rýchle neutróny treba najprv **spomaliť**.
- Stredná strata energie neutrónov pri pružnom rozptyle je maximálna pre **ľahké jadrá** a rastie s poklesom protónového čísla Z absorbátora. Rýchle neutróny sú účinne spomaľované takými látkami, ako sú voda, parafín, PE, plasty, betón a pod.
- Na **absorpciu** tepelných neutrónov treba vybrať materiál s veľkým účinným prierezom absorpcie, napr. zlúčeniny bóru, zlúčeniny kadmia, betón a pod.
- Po zachytení tepelných neutrónov vždy vzniká sekundárne γ žiarenie , ktoré pri navrhovaní ochrany treba brať do úvahy. Najlepšie pohlcuje **gama** žiarenie ťažký materiál.

30

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Spomaľovanie neutrónov

Materiál	A	ξ	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a$	n (E_0=2MeV, E_n=0,025 eV)
Vodík	1	1,0	66	18
Voda		0,927	67	19
Deutérium	2	0,726	5820	25
Berýlium	9	0,208	160	85
Uhlík	12	0,158	169	115
Kyslík	16	0,120	487	150
Urán	238	0,00838		2172

ξ Priemerný logaritmický dekrement energie
$\xi\Sigma_s$ Spomaľovacia schopnosť
$\xi\Sigma_s/\Sigma_a$ Moderačný pomer
n Počet zrážok potrebných na spomalenie neutrónu

31

Priemerný logaritmický dekrement energie ξ

- - je priemerná hodnota nárastu **letargie** pri pružných zrážkach medzi neutrónmi a jadrami, ktorých kinetická energia je zanedbateľná vzhľadom na kinetickú energiu neutrónov.
- Letargia $u=ln(E_0/E)$, kde E_0 je referenčná energia a E je aktuálna kinetická energia neutrónu.
  - *Pre E_0=2MeV, E_n=0,025 eV, bude u=18*
  - *Počet zrážok potrebných na spomalenie neutrónu:*

$$n = \frac{u}{\xi}$$

32

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Voda

- Voda sa používa nielen ako moderátor, ale vďaka veľkému obsahu vodíkových atómov aj ako ochranný materiál - absorbátor.
- Po niekoľkých zrážkach s atómami vodíka sa neutróny rýchlo spomalia do tepelných energií a absorbujú sa.
- Pri absorpcii tepelných neutrónov jadrami vodíka pri reakcii H(n,γ)D vznikajú záchytné fotóny γ, ktorých energia E = 2,23 MeV. Ich množstvo možno znížiť doplnkovou ochranou, napr. použitím boritej vody. V takom prípade budú tepelné neutróny absorbované bórom podľa reakcie B(n,α)Li. Záchytné žiarenie bude mať energiu 0,5 MeV. Boritá voda je však silný korozívny materiál.

33

Oceľ

- Oceľ je základný konštrukčný materiál reaktorov. Má dobré konštrukčné aj mechanické vlastnosti. V porovnaní s olovenou ochranou je oceľová ochrana pred gama žiarením o 30% ťažšia. Pre ochranu pred neutrónmi je oceľová v porovnaní s olovenou účinnejšia.
- Železo, ktoré oceľ obsahuje, sa aktivuje, vzniká pritom izotop ^{59}Fe , ktorý emituje fotóny o energii 1,1 MeV a 1,29 MeV. Okrem toho vzniká záchytné žiarenie s energiou E = 7,7 MeV.
- Prímesi, ktoré oceľ obsahuje (Co, Mn, Ta), môžu byť tiež aktivované. V oceli by mangánu nemalo byť viac ako 0,2%, kobalt a tantal by mal byť prítomný iba v stopových množstvách.

34

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Betón

- Betón je základným ochranným materiálom. Obsahuje rôzne plnivá, navzájom spojené cementom. Sú to najmä kysličníky Ca, Si, Al, Fe a ľahké jadrá, ktoré účinne pohlcujú žiarenie a spomaľujú rýchle neutróny pri pružných a nepružných zrážkach.
- Zoslabovanie toku neutrónov závisí od obsahu vody v materiále, z ktorého ochrana pozostáva.
- Absorbovanie neutrónového toku v betónovej ochrane možno zlepšiť pridaním do nej zlúčenín bóru. Najčastejšie sa používa karbid bóru B_4C.

35

Grafit

- **Grafit** má výborné tepelné vlastnosti, je dobrým **moderátorom i reflektorom**. Je ľahko obrábateľný. Jeho nevýhodou je, že po ožiarení neutrónmi sa jeho kryštalická mriežka narúša, čo mení jeho mechanické vlastnosti.

36

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Kadmium

- Kadmium vynikajúco pohlcuje neutróny o energii menšej ako 0,5 eV.
- Vrstva kadmia o hrúbke 1 mm zníži tok tepelných neutrónov 10^9 krát, pričom vzniká záchytné žiarenie o energii 7,5 MeV.
- Nemá dobré mechanické vlastnosti. Častejšie ho z týchto dôvodov používajú v zliatine s olovom.

37

Polyetylén

- Polyetylén $(CH_2)n$ obsahuje väčšie množstvo vodíkových atómov v jednotke objemu ako voda, preto je lepší moderátor.
- Mäkne pri 115°C, čo obmedzuje jeho použitie v reaktore.
- Pri vyšších teplotách horí, pričom vzniká voda a CO_2.
- Jeho lineárna rozťažnosť je 13 krát väčšia, ako u železa.
- Je dobre tvarovateľný.
- Kvôli zníženiu záchytného žiarenia sa do polyetylénu pridávajú zlúčeniny, obsahujúce bór. Komerčne je z takého materiálu dostupný tzv. "neutrónstop".

38

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Parafín

- Parafín podobne ako polyetylén sa používa na spomaľovanie rýchlych neutrónov.

Záver

- Najčastejšie sa používa kombinovaná ochrana.
- Optimálnymi sú kombinácie ťažkých materiálov s látkami s vysokým obsahom vodíka, napr.: Pt, Os, Ir, Rh s polyetylénom alebo parafínom, Cd + polyetylén alebo parafín, W + H_2O a i.

39

40

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Dozimetrické veličiny a jednotky používané v radiačnej ochrane

doc. Ing. Róbert HINCA, PhD

Ožiarenie človeka ionizujúcim žiarením

Môže spôsobiť

- krátkodobé zdravotné následky
- dlhodobé zdravotné následky

Vysoké dávky žiarenia spravidla spôsobujú okamžité poškodenie orgánov a tkanív, ako následok úmrtia veľkého počtu buniek, ktoré môžu napokon viesť k úmrtiu ožiareného jedinca. Takému typu poškodenia hovoríme tkanivové reakcie (predtým nestochastické alebo deterministické efekty).

Nízke dávky žiarenia nespôsobujú tkanivové reakcie, avšak poškodenie genetickej informácie v bunkách môže neskôr spôsobiť vznik rakoviny alebo dedičné poškodenia či ochorenia u potomstva. Tieto poškodenia sa nazývajú stochastické.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Špecifiká veličín radiačnej ochrany

Úlohou je **kvantifikovať rozsah** ožiarenia ionizujúcim žiarením celého tela a jednotlivých častí tela vplyvom externého a interného ožiarenia.

Vplyv ožiarenia závisí od energie pohltenej v orgánoch alebo tkanivách a je vyjadrený dávkou.

Stanovená dávka sa následne porovnáva s limitom, ktorý má zabezpečiť, že tkanivové reakcie nenastanú a pravdepodobnosť stochastických následkov bude na prijateľnej úrovni.

Operačné (pracovné) veličiny

Používajú sa pri monitorovaní priestoru a osôb meradlami s cieľom preskúmať situácie externého ožiarenia a možností príjmu rádionuklidov vdýchnutím alebo požitím.

Používajú sa pri vyhodnotení dozimetrických veličín radiačnej ochrany.

Poskytujú **konzervatívne odhady** hodnôt veličín radiačnej ochrany.

Boli navrhnuté a vyvinuté ICRU.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Pracovné (operačné) veličiny
pre ožiarenie z vonkajších zdrojov

- Sú odvodené z dávkového ekvivalentu v bode fantómu alebo tela, závisia od typu a energie žiarenia v bode a preto môžu byť vypočítané na základe fluencie v bode.
- Pre monitorovanie osôb sa používa osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$.
- Pre monitorovanie priestoru priestorový dávkový ekvivalent a smerový dávkový ekvivalent $H^*(d)$ a $H'(d,\Omega)$.

Osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$

$H_p(d)$ je dávkový ekvivalent v mäkkých tkanivách v hĺbke *d* pod stanoveným bodom tela.

Jeho jednotkou je $J.kg^{-1}$ a nazýva sa sievert [Sv].

Veličina $H_p(d)$ je meraná detektorom, ktorý sa nosí na povrchu tela a je obklopený primeranou hrúbkou materiálu tkanivu ekvivalentného.

V osobnej dozimetrii sa používa:

- *$H_p(10)$ - pre odhad efektívnej dávky E*
- *$H_p(0,07)$ - pre odhad ekvivalentnej dávky na kožu*
- *$H_p(3)$ - pre odhad ekvivalentnej dávky v očnej šošovke*

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$

- **Priestorový dávkový ekvivalent** $H^*(d)$ je dávkový ekvivalent v bode radiačného poľa, ktorý by bol vytvorený zodpovedajúcim **rozšíreným a usporiadaným poľom** v ICRU sfére v hĺbke d na polomere, ktorý je opačný ako smer poľa.
- Jednotkou je sievert (Sv) = $J.kg^{-1}$.
- Pre silno prenikavé žiarenie sa odporúča hĺbka d=10 mm.
- Pre slabo prenikavé žiarenie sa používa pre kožu hĺbka 0,07 mm a pre očnú šošovku 3 mm.
- Hodnota $H^*(10)$ predstavuje dávkový ekvivalent v hĺbke 10 mm ICRU gule a slúži ako odhad ekvivalentnej dávky u osoby, vyskytujúcej sa v meranom priestore, v hĺbke 10 mm.

Efektívna dávka (ICRP 60, 1990)

základná veličina radiačnej ochrany

predtým aj efektívny dávkový ekvivalent (1977)

Navrhnutá ako **univerzálna dozimetrická veličina** použiteľná na preukázanie splnenia limitov ožiarenia. Musí brať do úvahy rôzne aspekty ožiarenia

- všetkými typmi ožiarenia, (α, β, γ, n, p, ...)
- externé a interné ožiarenie,
- ožiarenie rôznych častí tela, (ruky, oko, pľúca...)
- orgánov a tkanív (s rôznou rádiosenzitivitou),
- rôzne individuality (v zmysle zdravotného stavu, telesnej zdatnosti, veku, pohlavia a individuálnej senzitivity resp. predispozícií)
- profesionálne ožiarenie aj obyvateľstvo

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Veličiny a jednotky charakterizujúce zdroje ionizujúceho žiarenia

- Aktivita, A (Bq)
- Konštanta premeny, λ (s^{-1})
- Stredná doba života rádioaktívnych jadier, τ (s)
- Doba polpremeny (polčas premeny), $T_{½}$ (s)
- Energia emitovaných častíc (eV = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$J, 10^{-15} – femto
  - pre 137Cs predstavuje 661 keV asi 106 fJ)
- Maximálna a stredná energia spojitého β spektra (eV)
- Zastúpenie v diskrétnom spektre α, γ (%) príslušnej čiary
- Emisia zdroja
- Uhlová emisia zdroja

$$\dot{N}_z = \frac{dN_z}{dt} \qquad \dot{N}_{\Omega,z} = \frac{d\dot{N}_z}{d\Omega}$$

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Fluencia častíc (m^{-2})
- Príkon fluencie častíc ($m^{-2}s^{-1}$)
- Radiancia častíc ($m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$)
- Fluencia energie ($J.m^{-2}$)
- Príkon fluencie energie ($J.m^{-2}s^{-1}$)
- Radiancia energie ($J.m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$)
- Hustota prúdu častíc J ($m^{-2}s^{-1}$)

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Účinný prierez interakcie (celkový σ_t, uhlový σ_Ω, spektrálny σ_E), (1b = 10^{-28} m^2)
- Makroskopický účinný prierez interakcie Σ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ absorbcie energie μ_E (m^{-1})
- Lineárna brzdná schopnosť S (Jm^{-1})
- Lineárny prenos energie L resp. LET (Jm^{-1})
- Celková ionizačná schopnosť častice
- Lineárna ionizácia, stredná energia ionizácie W(eV)

Veličiny dozimetrie ionizujúceho žiarenia

- Charakterizujú energiu absorbovanú v látke alebo jej ionizačné prejavy.
- Dajú sa odvodiť od z veličín popisujúcich pole žiarenia a koeficientov interakcie.
- Môžeme ich definovať priamo a priamo ich aj merať.
- Dozimetrické veličiny pre meranie a výpočty:
  - odovzdaná energia,
  - absorbovaná dávka,
  - príkon absorbovanej dávky,
  - lineárny prenos energie,
  - dávkový ekvivalent, príkon DE,
  - osobný, priestorový a smerový DE

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Veličiny radiačnej ochrany

- veličiny na účely limitovania:
  - stredná absorbovaná dávka v orgáne,
  - ekvivalentná dávka,
  - efektívna dávka,
  - úväzok ekvivalentnej dávky,
  - úväzok efektívnej dávky,
  - kolektívna ekvivalentná dávka,
  - kolektívna efektívna dávka.

Veličiny používané pri hodnotení ožiarenia

- Príjem rádionuklidu – aktivita (Bq)
- Absorbovaná dávka (Gy=J/kg)
- Ekvivalentná dávka (Sv), radiačný váhový faktor (1)
- Efektívna dávka (Sv), tkanivový váhový faktor (1)
- Úväzok ekvivalentnej dávky (Sv)
- Úväzok efektívnej dávky (Sv)
- Dávkový ekvivalent, osobný, priestorový, smerový (Sv)

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Systém dávkových veličín v radiačnej ochrane

Absorbovaná dávka, D [Gy]

Stredná absorbovaná dávka v orgáne alebo tkanive, $D_{T,R}$ [Gy] ← Fantómy, modely

Ekvivalentná dávka v orgáne alebo tkanive, H_T [Sv] ← w_R, radiačný váhový faktor

Efektívna dávka, E [Sv] ← w_T, tkanivový váhový faktor

Kolektívna efektívna dávka, S [manSv] ← Skupina osôb

Aktivita, zákon rádioaktívnej premeny

- **Rádioaktívna premena** predstavuje spontánnu premenu jadier, pričom vznikajú nové jadrá alebo sa mení ich energetický stav
- Pri rádioaktívnej premene jadro emituje najmenej jednu časticu.
- Rádioaktívna premena je vlastnosťou jadra atómu a závisí len od jeho vnútorného stavu. Vonkajšími vplyvmi sa rádioaktívna premena nedá nijak ovplyvniť.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Zákon rádioaktívnej premeny

- **Množstvo premenených jadier dN za čas dt je priamo úmerný pôvodnému počtu rádioaktívnych jadier.**

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

- **Konštanta proporcionality λ sa nazýva konštanta premeny a charakterizuje danú RAL.**

Zákon rádioaktívnej premeny

- Integrovaním v časovom intervale 0-t za predpokladu, že v čase $t = 0$, $N = N_0$, dostaneme zákon rádioaktívnej premeny:

$$N = N_0\, e^{-\lambda t}$$

  - N_0 - je počet rádioaktívnych jadier v čase t = 0,
  - N - stredný počet ešte nerozpadnutých jadier v čase t,
  - λ - konštanta premeny (rozpadová konštanta).

- Rádioaktívna premena je náhodný proces, ktorý sa riadi exponenciálnym rozdelením.
  - **Náhodnou veličinou je čas, za ktorý sa jadro rozpadne od začiatku jeho pozorovania – exponenciálne rozdelenie nemá pamäť.**

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Stredná doba života

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

- Stredná hodnota τ náhodnej veličiny s exponenciálnym rozdelením $N = N_0 e^{-\lambda t}$ sa nazýva **stredná doba života**.
- Stredná doba života udáva čas za ktorý klesne počet rádioaktívnych jadier e-krát, čo vyplýva zo zákona rozpadu.

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda\tau} = N_0 \cdot e^{-1} = \frac{N_0}{e} \cong 0{,}368 N_0$$

Konštanta premeny λ [s^{-1}]

- **Vyjadruje intenzitu rádioaktívnej premeny.** Pre daný rádionuklid v danom energetickom stave ju definujeme ako podiel pravdepodobnosti dP, že jadro tohoto rádionuklidu podľahne za malý časový interval dt rádioaktívnej premene a tohoto časového intervalu.

$$\lambda = \frac{dP}{dt}$$

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Doba polpremeny $T_{1/2}$ (STN ISO 31-9)

- **Polčas premeny** $T_{1/2}$, **vyjadruje priemerný časový interval, za ktorý sa premení polovica rádionuklidu.**

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

Aktivita

- **Aktivita - charakterizuje okamžité množstvo rádioaktívnej látky**.
- Je to podiel strednej hodnoty počtu spontánnych jadrových premien z daného energetického stavu dN vyskytujúcich sa v množstve rádionuklidu, za malý časový interval dt a tohto časového intervalu. (Definícia STN ISO 31-10)

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

$$A = \lambda N$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Becquerel

- Jednotkou aktivity je reciproká sekunda [s^{-1}], ktorá dostala názov po objaviteľovi rádioaktivity: **Becquerel [Bq].**

1 Ci=3,7×10^{10} Bq

je aktivita 1 g rádia ^{226}Ra

Veličiny odvodené od aktivity

Veličina			Jednotka		
Názov	**Značka**	**Definícia**	**Názov**	**Značka**	**Rozmer**
molárna aktivita	a_n	$a_n = \frac{A}{n}$	becquerel na mol	Bq mol^{-1}	s^{-1} mol^{-1}
hmotnostná aktivita	a_m	$a_m = \frac{A}{m}$	becquerel na kilogram	Bq kg^{-1}	kg^{-1} s^{-1}
objemová aktivita	a_V	$a_V = \frac{A}{V}$	becquerel na meter kubický	Bq m^{-3}	m^{-3} s^{-1}
plošná aktivita	a_S	$a_S = \frac{A}{S}$	becquerel na meter štvorcový	Bq m^{-2}	m^{-2} s^{-1}
dĺžková aktivita	a_l	$a_l = \frac{A}{l}$	becquerel na meter	Bq m^{-1}	m^{-1} s^{-1}
rýchlosť emisie (emanácia) aktivity	$\dot{A}$	$\dot{A} = \frac{A}{t}$	becquerel za sekundu	Bq·s^{-1}	s^{-2}

n *- látkové množstvo rádioaktívnej látky o aktivite A*

m *-hmotnosť rádioaktívnej látky o aktivite A*

V *- objem rádioaktívnej látky o aktivite A*

S *- plocha na ktorej je aktivita A rozložená*

l *- dĺžka na ktorej je aktivita A rozložená*

t *- časový interval, za ktorý sa rovnomerne uvoľňuje aktivita A*

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Využívajú spojité funkcie v priestore a čase, ktoré vyjadrujú:
  - počty častíc prechádzajúce daným miestom za dané časové obdobie
  - počty častíc prechádzajúce daným miestom v danom časovom okamžiku
  - sumárnu energiu častíc prechádzajúcich daným miestom za dané časové obdobie
  - sumárnu energiu častíc prechádzajúcich daným miestom v danom časovom okamžiku

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Fluencia častíc (m^{-2})
- Príkon fluencie častíc ($m^{-2}s^{-1}$)
- Radiancia častíc ($m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$)
- Fluencia energie ($J.m^{-2}$)
- Príkon fluencie energie ($J.m^{-2}s^{-1}$)
- Radiancia energie ($J.m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$)
- Hustota prúdu častíc J ($m^{-2}s^{-1}$)

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Fluencia častíc

- **Fluencia častíc** Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.

$$\Phi = \frac{dN}{dS}$$

Príkon fluencie

- **Príkon fluencie (hustota toku častíc)** φ [m^{-2}s^{-1}] popisuje okamžitú situáciu v danom bode. Definuje ju pomer fluencie častíc $d\Phi$ za časový interval dt.

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt}$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Radiancia častíc, Radiancia energie

- **Radiancia častíc** ***p*** [$m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$] vyjadruje uhlové rozdelenie častíc na danom mieste.

$$p = \frac{d\varphi}{d\Omega}$$

- **Radiancia energie** ***r*** [$J\ m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$]

$$r = \frac{d\psi}{d\Omega}$$

Fluencia energie častíc, Príkon fluencie energie častíc

- **Fluencia energie častíc** Ψ [$J\ m^{-2}$] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc dR dopadajúcej do malej gule s plochou hlavého rezu dS a tejto plochy.

$$\Psi = \frac{dR}{dS}$$

- **Príkon fluencie energie častíc** (hustota toku energie) ψ [$J\ m^{-2}s^{-1}$]

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt}$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Hustota prúdu častíc

- **Hustota prúdu častíc *J*** [$m^{-2}s^{-1}$]
  je definovaná ako vektorová veličina, ktorej integrál normálovej zložky cez určitú plochu sa rovná celkovému počtu častíc I prechádzajúcich cez element plochy $e_n dA$ za malý časový interval dt, delený týmto intervalom.
  - Je mierou šírenia častíc určitým smerom. V izotropnom poli je hustota prúdu častíc nulová, v rovnobežnom zväzku sa v smere zväzku rovná hustote toku častíc a v opačnom smere zápornej hodnote hustoty toku častíc.

$$Je_n dA = \frac{dI}{dt}$$

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- **Účinný prierez interakcie**
  (celkový σ_t, uhlový σ_Ω, spektrálny σ_E), (1b = 10^{-28} m^2)
- **Makroskopický účinný prierez interakcie Σ (m^{-1})**
- **Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})**
- **Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})**
- **Lineárny súčiniteľ absorbcie energie μ_E (m^{-1})**
- **Lineárna brzdná schopnosť S (Jm^{-1})**
- **Lineárny prenos energie L resp. LET (Jm^{-1})**
- **Celková ionizačná schopnosť častice**
- **Lineárna ionizácia, stredná energia ionizácie W(eV)**

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- **Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})**

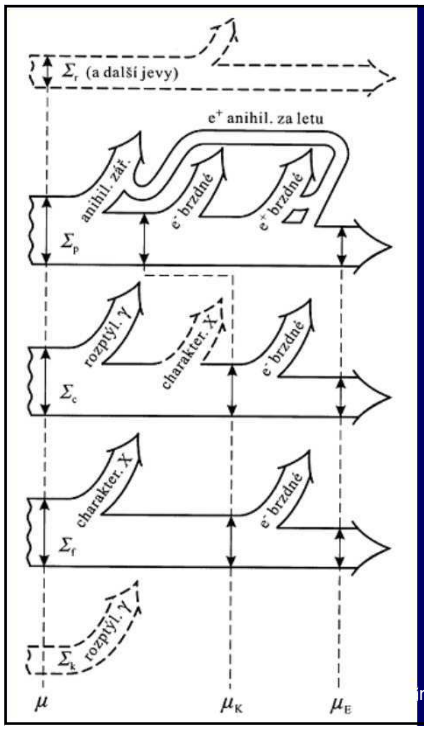
$$\mu = -\frac{1}{J}\frac{dJ}{dx}$$

- **Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})** sa používa na popis prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabité sekundárne častice
  - ***N*** je počet častíc s energiu ***E*** dopadajúcich kolmo na vrstvu ***dx*** pričom vznikajú nabité častice so sumárnou kinetickou energiou dE_K.

$$\mu_{tr} = \frac{1}{NE}\frac{dE_K}{dx}$$

- **Lineárny súčiniteľ absorbcie energie μ_E (m^{-1})** zohľadňuje tú časť odovzdanej energie, ktorá sa odnesie mimo uvažovaného objemu.
  - $\mu_E = \mu_{tr}(1-G)$, kde *G* je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

$$\mu_E = \mu_{tr}(1-G)$$



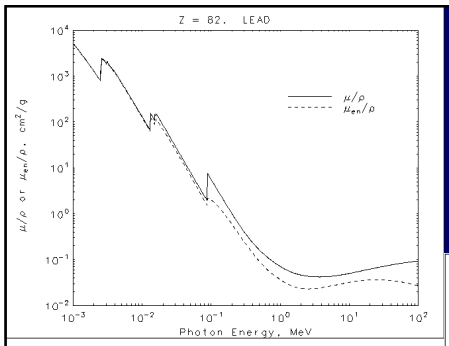
Koeficient prenosu energie
Koeficient absorpcie energie

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

Z hľadiska prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabité sekundárne častice sa preto používa **koeficient prenosu energie μ_{tr} [m^{-1}]** (μ_K).

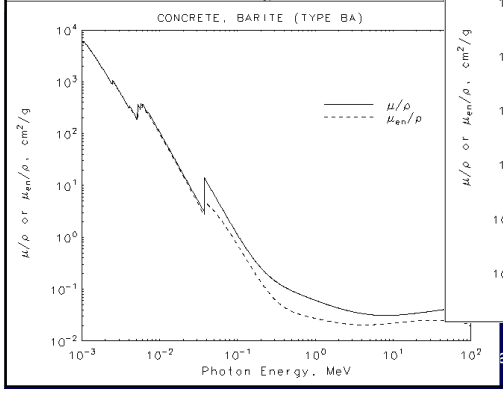
Časť odovzdanej energie sa odnesie mimo uvažovaného objemu. To zohľadňuje **koeficient absorpcie energie** $\mu_E = \mu_{tr}(1-G)$ [m^{-1}], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

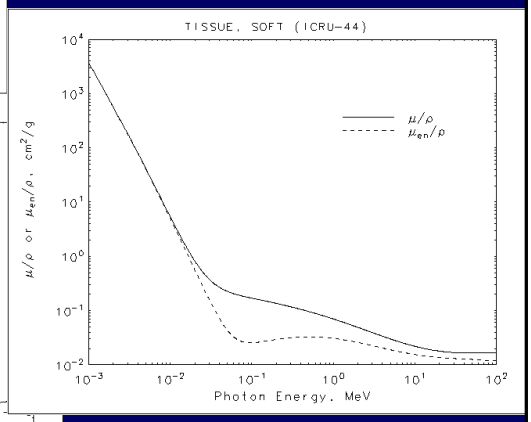
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.



Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients

http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html





Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- **Lineárna brzdná schopnosť S** ($J \cdot m^{-1}$) aj [$eV \cdot m^{-1}$] vyjadruje mieru energetických strát pozdĺž dráhy nabitej častice v danom materiále.
  - Nabité častice strácajú energiu hlavne zrážkami s elektrónmi, pri ktorých dochádza k ionizácii a excitácii atómov (ionizačné resp. **zrážkové straty**) a **radiačnými stratami** prejavujúcimi sa emisiou brzdného žiarenia

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

- **Lineárny prenos energie L** (LET) [$MeV \cdot cm^{-1}$] je mierou energie **odovzdanej** pri prechode ionizujúceho žiarenia elektrónom látky v danom mieste. Niekedy je LET ohraničená energiou Δ, ktorá ohraničuje minimálnu energiu elektrónov ktoré berieme do úvahy. Elektróny s vyššou energiou uletia preč.
- Pre Δ=∞ platí LET=S

$$S = S_{col} + S_{rad}$$

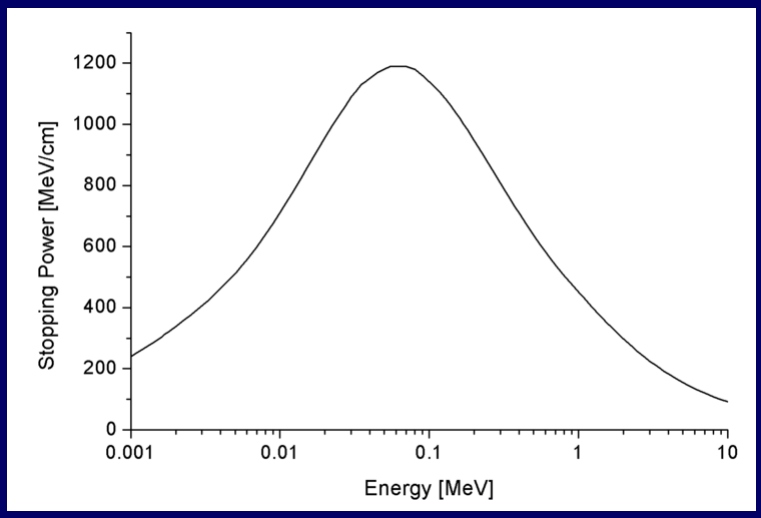
$$L = \frac{dE}{dx}$$

- **Lineárna ionizácia J** (m^{-1}) vyjadruje počet vytvorených iónových párov na jednotku dráhy vyjadruje veličina
- **Stredná energia ionizácie** W_i(eV)

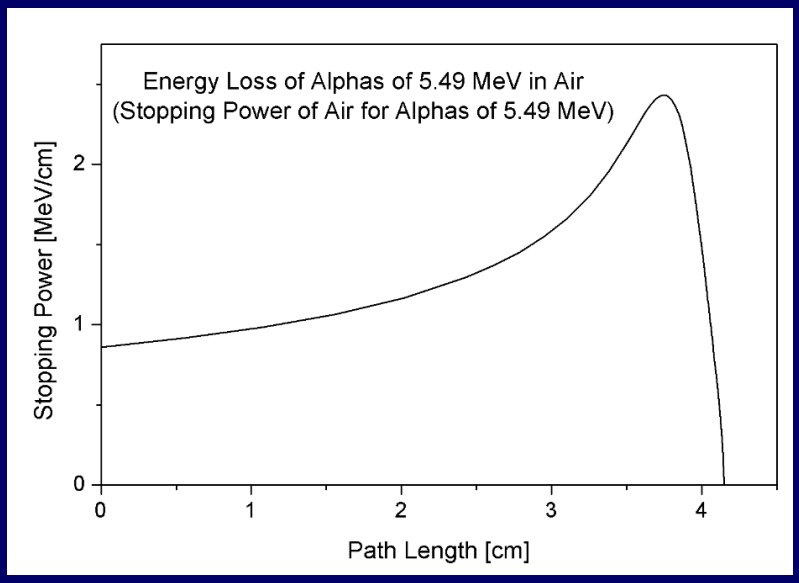
$$L = W_x \cdot J = \frac{energia}{1\ ión\acute{o}v\acute{y}\ \ p\acute{a}r} \cdot \frac{po\check{c}et\ \ ión\acute{o}v\acute{y}ch\ \ p\acute{a}rov}{jednotka\ \ dr\acute{a}hy} = \frac{energia}{jednotka\ \ dr\acute{a}hy}$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Brzdná schopnosť hliníka pre protóny



Brzdná schopnosť vzduchu pre alfa častice



TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Intenzita ionizácie vzduchu α časticami

Veličiny dozimetrie ionizujúceho žiarenia

- Charakterizujú energiu absorbovanú v látke alebo jej ionizačné prejavy.
- Dajú sa odvodiť z veličín popisujúcich pole žiarenia a koeficientov interakcie.

- Dozimetrické veličiny pre meranie a výpočty:
  - odovzdaná energia, absorbovaná dávka, príkon absorbovanej dávky, lineárny prenos energie, dávkový ekvivalent, príkon DE, osobný, priestorový a smerový DE
- Dozimetrické veličiny na účely limitovania:
  - stredná absorbovaná dávka v orgáne, ekvivalentná dávka, efektívna dávka, úväzok ekvivalentnej dávky, úväzok efektívnej dávky, kolektívna ekvivalentná dávka, kolektívna efektívna dávka.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Odovzdaná energia

$$E = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

- Ionizujúce žiarenie odovzdá v určitom objeme látke energiu E, ktorá sa nazýva odovzdaná energia alebo tiež integrálna absorbovaná dávka dávka. Jednotkou je [J] alebo [MeV]
- R_{in} (R_{out}) vyjadruje sumárnu energiu všetkých častíc IŽ vstupujúcich do uvažovaného objemu (vychádzajúcich z objemu)
- ΣQ - vyjadruje sumu všetkých energetických ekvivalentov zmien pokojových hmotností jadier a elementárnych častíc v danom objeme pri akýchkoľvek jadrových premenách. Pokles vyjadruje kladné znamienko, nárast záporné.

Hmotnostná odovzdaná energia

- **Hmotnostná odovzdaná energia z [Gy = J·kg^{-1}]** je podiel odovzdanej energie látke v uvažovanom objeme a hmotnosti tejto látky.
- Limitná hodnota strednej hmotnostnej odovzdanej energie pre m→0 sa blíži k absorbovanej dávke v bode.

$$z = \frac{E}{m}$$

$$D = \lim_{m \to 0} \bar{z}$$

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Absorbovaná dávka

- Absorbovaná dávka [Gy = J×kg^{-1}] v danom bode pre každé IŽ je podiel strednej odovzdanej energie dE látke v objemovom elemente dV a jeho hmotnosti dm.
- Dávka závisí od ožarovaného materiálu, preto sa pre presnosť uvádza aj látka, ku ktorej sa vzťahuje, napr. D_{vzd} - vzduch, D_{tk} - tkanivo...
- Dávka popisuje odovzdávanie energie za určitý časový úsek. Okamžitú situáciu popisuje dávkový príkon.
- Príkon absorbovanej dávky (dávkový príkon) vyjadruje prírastok dávky dD v časovom intervale dt delený časovým intervalom dt.

$$D = \frac{d\overline{E}}{dm}$$

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Lineárny prenos energie
Lineárna zrážková brzdná schopnosť

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

dE je energia odovzdaná v danom mieste látke pri prechode malej vzdialenosti cez látku

dl je vzdialenosť v látke

L [eV·m^{-1},keV·μm^{-1}]

LET - Linear Energy Transfer
S - Stopping power

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

KERMA K [Gy = J·kg^{-1}]

- Dávka sa vzťahuje k odovzdávaniu energie v danom mieste (t.j. z nabitých častíc na častice látky). Ak sú primárne častice nenabité, prvým krokom je interakcia s látkou a odovzdanie energie nabitým časticiam. Tento krok popisuje **kerma** (Kinetic Energy Released in MAtter).
- Kerma sa vzťahuje len na nenabité žiarenie a pre danú látku.
- dE_K je sumárna počiatočná kinetická energia všetkých nabitých častíc v uvažovanom objeme dV uvoľnených nenabitými časticami žiarenia.

$$K = \frac{dE_K}{dm}$$

Okamžitú situáciu popisuje **kermový príkon**.

Vzťah medzi kermou a fluenciou častíc

$$K = \Psi \cdot \mu_{tr,m} = \Phi \cdot E \cdot \mu_{tr,m} = F_K \cdot \Phi$$

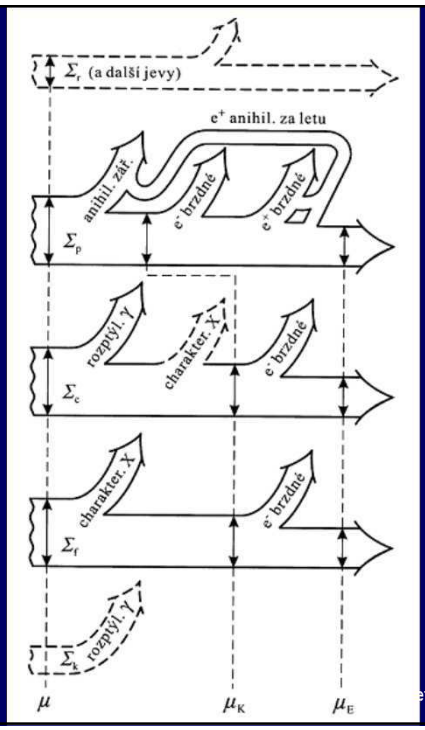
$$\Phi = \frac{dN}{dS}$$

$$\Psi = \frac{dR}{dS}$$

$$\mu_{tr} = \frac{1}{NE}\frac{dE_K}{dx}$$

- **Fluencia častíc** Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.
- F_k - kermový faktor, tabelovaná veličina
- **Fluencia energie častíc** Ψ [J m^{-2}] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc dR dopadajúcej do malej gule s plochou hlavého rezu dS a tejto plochy.
- **Koeficient prenosu energie** μ_{tr} **[m^{-1}]** (μ_K)
- N je počet častíc s energiu E dopadajúcich kolmo na vrstvu dx pričom vznikajú nabité častice so sumárnou kinetickou energiou dE_K.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.



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

Z hľadiska prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabité sekundárne častice sa preto používa **koeficient prenosu energie** μ_{tr} **[m^{-1}]** (μ_K).

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.

Vzťah medzi dávkou a fluenciou častíc

$$D = \Psi \cdot \mu_{E,m} = \Phi \cdot E \cdot \mu_{E,m}$$

- **Koeficient absorpcie energie $\mu_E = \mu_{tr}\,(1-G)$ [m^{-1}], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie. Vyjadruje teda energiu ktorá zostane absorbovaná v danom objeme.**
  - **Fluencia častíc Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.**
  - **Fluencia energie častíc Ψ [J m^{-2}] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc *dR* dopadajúcej do malej gule s plochou hlavého rezu *dS* a tejto plochy.**

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Vzťah medzi kermou a dávkou

$$D = \Psi \cdot \mu_{E,m}$$

$$K = \Psi \cdot \mu_{tr,m}$$

Energia (MeV)	$100\cdot(\mu_{tr} - \mu_E)/\mu_{tr}$		
	Z=6	Z=29	Z=82
0,1	0	0	0
1,0	0	1,1	4,8
10,0	3,5	13,5	26

E(MeV)	1-G vzduch
0,01	1,0
0,1	1,0
1	1,0
1,5	0,996
2,0	0,995
3,0	0,991
5,0	0,984
8,0	0,972
10,0	0,964

Expozícia

$$X = \frac{|dQ|}{dm}$$

$$X = \Psi \cdot \mu_{E,m} \frac{e}{W_i}$$

- $\mu_{E,m}$ - hmotnostný koeficient absorpcie energie
- W_i - stredná energia ionizácie
- e - elementárny náboj

- Expozícia (ožiarenie) je najstaršia dozimetrická veličina.
- Je definované len pre fotónové žiarenie vo vzduchu.
- **Vyjadruje podiel absolútnej hodnoty celkového elektrického náboja dQ iónov rovnakého znamienka vzniknutých vo vzduchu po zabrzdení všetkých uvoľnených elektrónov a pozitrónov v objemovom elemente o hmotnosti dm a tejto hmotnosti.**
- Jednotkou expozície je [$C\cdot kg^{-1}$].
- Staršou jednotkou je röntgen $1R=2{,}58\cdot10^{-4}\ C\cdot kg^{-1}$.
- Vo vzduchu platí prevod na kermu: 1R = 8,76 mGy

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Kermová výdatnosť $V_{K,\delta}$ [Gy.m^2.s^{-1}]

$$V_{K,\delta} = \dot{K}_\delta l^2$$

$$\Gamma^\delta = \frac{V_{K,\delta}}{A}$$

- **Kermová výdatnosť $V_{K,\delta}$ je charakteristika zdroja uvádzaná v jeho dokumentácii.**
- **Je obdobou expozičnej výdatnosti.**
- **Závisí na druhu rádionuklidu, jeho aktivite, konštrukcii a rozmerov zdroja.**
- **δ je minimálna energia uvažovaných fotónov.**
- **Kermu z rádionuklidového zdroja môžeme vypočítať z kermovej výdatnosti [Gy.m^2.s^{-1}].**
- **Univerzálnejšou charakteristikou rádionuklidov je kermová konštanta gama Γ^δ.**

Dávkový ekvivalent

- **Dávkový ekvivalent** v ľubovoľnom mieste biologického väziva je daný vzťahom

H = D.Q.N* [Sv]

  - D - absorbovaná dávka, [Gy]
  - Q - faktor kvality, [1 (bezrozmerná veličina)]
  - N - súčin všetkých ďalších (v súčasnosti ešte neznámych) modifikujúcich faktorov. V súčastnosti hodnota N = 1 a teda sa nemusí pri výpočte zohľadňovať.
    - ** - norma STN ISO 31-10 obsahuje uvedenú definíciu, iná norma STN 01 1310 už zohľadňuje odporúčanie ICRU vypustiť hodnotu N.*
- Pri presných výpočtoch sa využíva dávkový ekvivalent v závislosti od presnej veličiny lineárneho prenosu energie L.

$$H = \int_L Q(L) D_L dL$$

$$D_L = \frac{dD}{dL}$$

D_L - rozdelenie absorbovanej dávky podľa lineárneho prenosu energie,

- je podiel príspevku dávky dD v intervale $(L,L+dL)$ a tohto intervalu dL

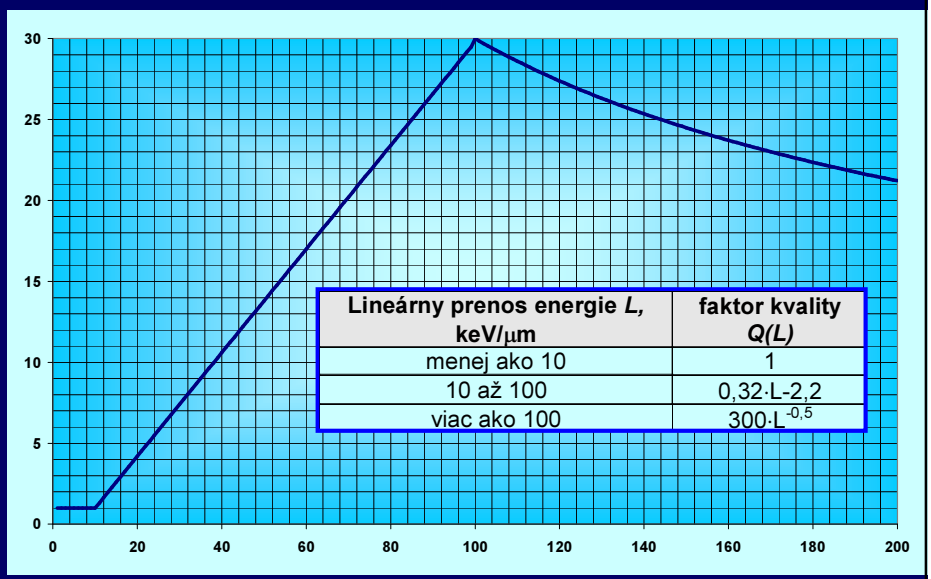
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Dávkový ekvivalent operačné veličiny

- je veličina používaná na základe odporúčaní ICRU* (Medzinárodná komisia pre radiačné jednotky a merania), ktoré definujú tzv. operačné – pracovné veličiny
  - priestorový dávkový ekvivalent
  - smerový dávkový ekvivalent
  - osobný dávkový ekvivalent
- Pre účely radiačnej ochrany sa používa ekvivalentná dávka.

*ICRU Publication No. 51/1993

Výpočet faktora kvality *Q(L)*



Lineárny prenos energie *L*, keV/μm	faktor kvality *Q(L)*
menej ako 10	1
10 až 100	0,32·L-2,2
viac ako 100	$300 \cdot L^{-0,5}$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Veličiny používané na účely limitovania.

- Stredná absorbovaná dávka v orgáne D_T
- Radiačný váhový faktor $\mathbf{w_R}$
- Tkanivový váhový faktor $\mathbf{w_T}$
- Ekvivalentná dávka v tkanive alebo orgáne H_T
- Efektívna dávka E
- Úväzok ekvivalentnej dávky $H_T(\tau)$
- Úväzok efektívnej dávky $E(\tau)$
- Kolektívna ekvivalentná dávka S_T
- Kolektívna efektívna dávka S

Stredná absorbovaná dávka v orgáne D_T

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D \cdot dm$$

- m_T **je hmotnosť tkaniva alebo orgánu**
- D **je absorbovaná dávka v hmotnostnom elemente** dm
- D_T **sa rovná pomeru odovzdanej energie** ε_T **tkanivu alebo orgánu a hmotnosti tkaniva alebo orgánu** m_T
- **Nazýva sa tiež aj orgánová dávka.**

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Ekvivalentná dávka v tkanive alebo orgáne H_T

$$H_T = \sum_R w_R . D_{T,R}$$

- $D_{T,R}$ je stredná absorbovaná dávka v biologickom tkanive T spôsobená žiarením typu R.
- Radiačný váhový faktor ω_R vyjadruje rozdielny biologický účinok jednotlivých druhov ionizujúceho žiarenia (RBU).
- Názov hlavnej jednotky dávkového ekvivalentu a ekvivalentnej dávky je sievert (Sv) = $J.kg^{-1}$.

Hodnoty radiačného váhového faktora w_R

Druh žiarenia a jeho energia	w_R
Fotóny všetkých energií	1
Elektróny všetkých energií	1
Neutróny, energia E	
< 10 keV	5
10 keV - 100 keV	10
100 keV - 2 MeV	20
2 MeV - 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protóny > 2 MeV	5
α - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Hodnoty radiačného váhového faktora w_R

Druh žiarenia a jeho energia	w_R, (ICRP 60)	w_R, (ICRP 103)
Fotóny všetkých energií	1	1
Elektróny všetkých energií	1	1
Neutróny, energia E		spojitá funkcia:
< 10 keV	5	$2{,}5+18{,}2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$,E_n<MeV
10 keV - 100 keV	10	
100 keV - 2 MeV	20	$5{,}0+17{,}0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$,1MeV<E_n<50MeV
2 MeV - 20 MeV	10	
> 20 MeV	5	$2{,}5+3{,}25e^{-[\ln(0{,}04E_n)]^2/6}$,E_n>50MeV
Protóny > 2 MeV	5	2
α - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20	20

Referenčné žiarenie pre súbor radiačných váhových faktorov v doporučení ICRP 103 bolo nízkoenergetické fotónové žiarenie, ktorého energia nebola konkretizovaná.
V doporučení ICRP 60 bolo konkretizované fotónové žiarenie s energiou nad 200 keV a boli brané do úvahy dáta od ^{137}Cs a ^{60}Co.

Fotóny, elektróny a mezóny

- Fotóny, elektróny a mezóny sú druhy žiarenia s nízkou hodnotou LET (<10 keV/μm). Môže sa použiť w_R=1 na určenie ekvivalentnej a efektívnej dávky pri hodnotení a usmerňovaní ožiarenia v oblasti nízkych dávok.
- Reálne sa hodnota w_R líši od 1 a prejavuje sa to v individuálnom retrospektívnom hodnotení rizika, kde treba uvažovať detailnejšie informácie o poli žiarenia a príslušných hodnotách RBE.

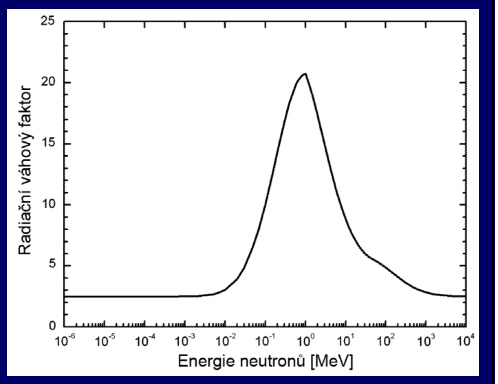
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Neutróny

RBE silne závisí od energie neutrónov.

V porovnaní s predchádzajúcou stupňovitou funkciou si treba všimnúť zníženú hodnotu w_R v oblasti nízkych energií a energií nad 100 MeV.

Hodnoty sa blížia k 2,5 namiesto pôvodných 5.



Protóny a pióny

- Dolet protónov o energii 10 MeV v tkanive je 1,2 mm a klesá s nižšími energiami. Tieto protóny sú teda absorbované v koži.
- Radiační váhový faktor o hodnote 2 je doporučený pre všetky energie protónov a nahradzuje predchádzajúcu hodnotu 5.
- Pióny sú častice vznikajúce hlavne interakciou kozmického žiarenia s jadrami prvkov atmosféry.
- Pre nabité pióny všetkých energií sa uvažuje w_R=2.
- Brať do úvahy ožiarenie piónmi je treba u personálu lietadiel a pracovníkov urýchľovačov vysokoenergetických častíc.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Žiarenie alfa, štiepne produkty a ťažké ióny

RBE pre **alfa** sa týka hlavne interného ožiarenia alfa rádionuklidmi (hlavne Rn, ale aj Pu, Po, Ra, Th, U).

Dostupné dáta ukazujú na RBE=10÷20 pre rakovinu pľúc, a menšie hodnoty pre leukémiu a zhubný nádor kostí. Preto je w_R=20 konzervatívna voľba.

Podobne ako u alfa sa pre **štiepne produkty a ťažké ióny** uvažuje interné ožiarenie, krátke dolety a vysoká ionizačná schopnosť. Radiačný váhový faktor w_R=20 je stanovený dostatočne konzervatívne.

Pri vonkajšom ožiarení ťažkými nabitými časticami (napr. v kozme) treba použiť realistickejší prístup.

Efektívna dávka

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

jednotkou je J·kg^{-1}
s názvom sievert, Sv

<u>Efektívna dávka</u> E je súčtom ekvivalentných dávok H_T vo všetkých orgánoch alebo tkanivách vynásobených príslušným tkanivovým váhovým faktorom w_T.

w_T vyjadruje relatívny príspevok k celkovej zdravotnej ujme daného tkaniva v porovnaní s ostatnými tkanivami pri rovnomernom ožiarení celého tela nízkymi dávkami. (jedná sa o stochastické následky, hlavne rakovinu)

$$E = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R} = \sum_R w_R \sum_T w_T \cdot D_{T,R}$$

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Tkanivový váhový faktor w_T podľa ICRP 60

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor w_T
Gonády	0,20
Červená kostná dreň	0,12
Hrubé črevo	0,12
Pľúca	0,12
Žalúdok	0,12
Močový mechúr	0,05
Mliečna žľaza	0,05
Pečeň	0,05
Pažerák	0,05
Štítna žľaza	0,05
Koža	0,01
Povrchy kostí	0,01
Ostatné orgány a tkanivá	0,05

Tkanivový váhový faktor w_T

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor w_T, (ICRP 60)	Tkanivový váhový faktor w_T, (ICRP 103)
Gonády	0,20	0,08
Červená kostná dreň	0,12	0,12
Hrubé črevo	0,12	0,12
Pľúca	0,12	0,12
Žalúdok	0,12	0,12
Močový mechúr	0,05	0,04
Mliečna žľaza	0,05	0,12
Pečeň	0,05	0,04
Pažerák	0,05	0,04
Štítna žľaza	0,05	0,04
Koža	0,01	0,01
Povrchy kostí	0,01	0,01
Slinná žľaza	-	0,01
Mozog	-	0,01
Ostatné orgány a tkanivá	0,05	0,12

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Úväzok ekvivalentnej dávky
Úväzok efektívnej dávky

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t)\,dt$$

$$E(\tau) = \sum_T w_T \cdot H_T(\tau)$$

- τ ak nie je špecifikované, tak sa normálne ráta pre profesionálnych pracovníkov 50 rokov u obyvateľstva 70 rokov

Kolektívna ekvivalentná dávka

$$S_T = \sum_i \overline{H}_{T,i} \cdot N_i$$

- ***N_i je počet jednotlivcov v populačnej skupine i, ktorí obdržali strednú ekvivalentnú dávku $H_{T,i}$***

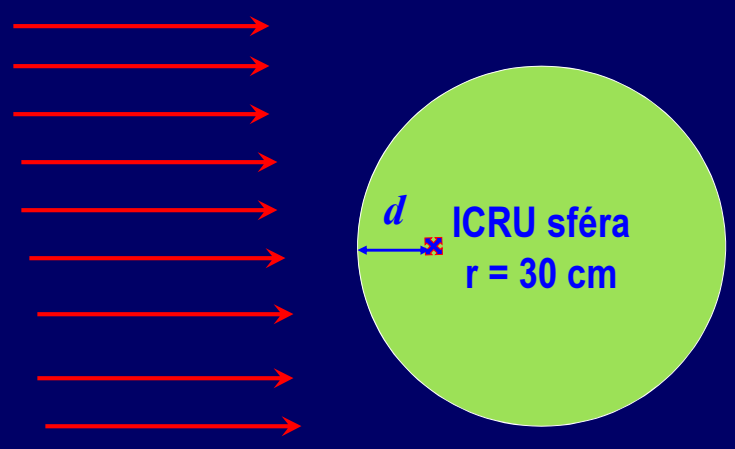
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Kolektívna efektívna dávka S

$$S = \sum_i \overline{E}_i P_i$$

- E_i je stredná efektívna dávka pre jednotlivca z populačnej podskupiny i, ktorej zodpovedá počet členov P_i.

Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$

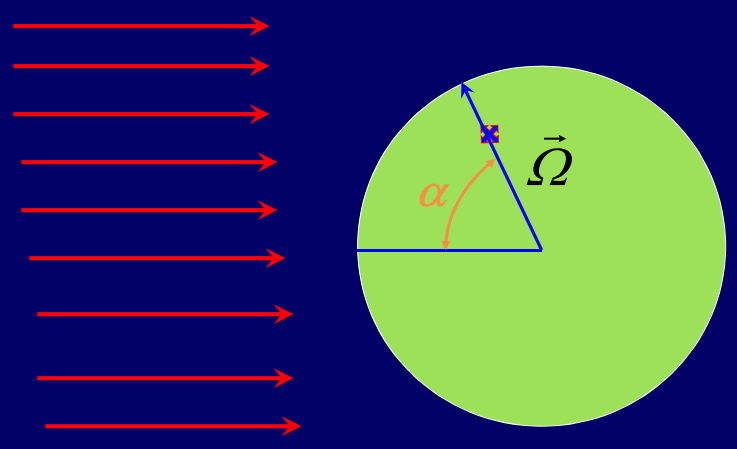


TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Smerový dávkový ekvivalent *H'(d,Ω)*

- Pre **smerový dávkový ekvivalent** ***H'(d,Ω)*** treba špecifikovať smer *Ω*, teda uhol pod ktorým je meraný objekt otočený k smeru poľa ionizujúceho žiarenia.
- Smerový dávkový ekvivalent môže byť určený aj len pre **rozšírené pole**, teda bez smerového usmernenia. Vtedy treba zvoliť vhodný súradnicový systém, s ohľadom na ktorý sa bude definovať smer *Ω*.

Smerový dávkový ekvivalent *H*(d,Ω)*



TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

ICRU sféra

- sféra s priemerom 30 cm,vyhotovená z tkanivu ekvivalentného materiálu:
  - hustotou 1g·cm^3 a hmotnostným zložením
    - 76,2% kyslíka,
    - 11,1 % uhlíka,
    - 10,1% vodíka a
    - 2,6% dusíka.

Silno (slabo) prenikavé žiarenie

- ak dávkový ekvivalent odovzdaný malej ploche citlivej vrstvy kože je menej (viac) ako 10-násobok efektívneho dávkového ekvivalentu pre danú orientáciu tela v homogénnom a jednosmernom poli ionizujúceho žiarenia
- pre slabo prenikavé žiarenie je dôležité poznať dávkový ekvivalent v očnej šošovke alebo v koži
- za slabo prenikavé žiarenie sa považuje fotónové žiarenie s energiou do 15 keV, alfa a beta žiarenie

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Hodnotenie vonkajšieho a vnútorného ožiarenia

- Pri osobnom monitorovaní a monitorovaní priestorov sa pre prenikavé žiarenie odporúča používať hĺbka 10 mm, pre slabo prenikavé 0,07 mm a pre oko 3 mm.
- Pri vonkajšom ožiarení ekvivalentnej dávke v každom orgáne s výnimkou kože zodpovedá hĺbkový osobný dávkový ekvivalent Hp(10), ekvivalentnej dávke v koži povrchový osobný dávkový ekvivalent Hp(0,07).

Hodnotenie ožiarenia

- Ak ide o nerovnomerné ožiarenie, pre ekvivalentnú dávku v koži sa berie do úvahy priemer z plochy 1 cm^2 v najviac ožiarenej oblasti.
- Ekvivalentnej dávke v očnej šošovke zodpovedá osobný dávkový ekvivalent Hp(3) v hĺbke 3 mm.
- Pri monitorovaní prostredia sa používa priestorový dávkový ekvivalent H* (d), smerový dávkový ekvivalent H' (d, Ω), pričom d je hĺbka v mm pod povrchom ICRU sféry a Ω je uhol dopadu.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Porovnanie s limitom

- Limity efektívnej dávky *E* sa vzťahujú na súčet efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarenia a úväzkov efektívnej dávky z jednotlivých príjmov rádioaktívnej látky v kalendárnom roku zo všetkých zdrojov ionizujúceho žiarenia, ktorým sú vystavené osoby pracujúce so zdrojmi žiarenia a jednotlivci z obyvateľstva.

Celková efektívna dávka, (mSv)

$$E = E_{external} + \sum_j h(g)_{j,ing} \cdot I_{j,ing} + \sum_j h(g)_{j,inh} \cdot I_{j,inh}$$

$E_{external}$ je príslušná efektívna dávka z vonkajšieho ožiarenia,

$I_{j,ing}$ je príjem rádionuklidu j (Bq) potravou za rok,

$I_{j,inh}$ je príjem rádionuklidu j (Bq) dýchaním za rok,

$h(g)_{j,ing}$ je konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) potravou pre rôzne vekové skupiny g,

$h(g)_{j,inh}$ je konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) dýchaním pre rôzne vekové skupiny g.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Príjem rádionuklidov potravou $I_{j,ing}$ (Bq)

$$I_{j,ing} = \sum_P a_{P,j} \cdot P_P$$

$a_{P,j}$ je priemerná ročná merná aktivita j-tého rádionuklidu v potravine P a vode [Bq/kg, resp. Bq/l],

P_P je spotreba potravy P v jednom roku [kg].

Ročnú spotrebu potravy je potrebné určiť zo štatistických prehľadov, a to osobitne pre jednotlivé vekové kategórie.

Príjem rádionuklidov dýchaním $I_{j,inh}$ (Bq)

$$I_{j,inh} = a_{V,j} \cdot B$$

$a_{V,j}$ je priemerná ročná merná aktivita j-tého rádionuklidu vo vzduchu [Bq.m^{-3}],

B je množstvo vdychovaného vzduchu v jednom roku [m^3.rok^{-1}].

Hodnoty množstva vdychovaného vzduchu pre jednotlivé skupiny osôb

Skupina osôb	Vek v rokoch	B (m^3.rok^{-1})
Pracovníci so zdrojmi ionizujúceho žiarenia	nad 18	2000
Ostatní obyvatelia	0 – 1	1000
	1 – 2	2000
	2 – 7	4000
	7 – 12	6000
	12 – 17	8000
	nad 17	8500

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

Tabuľka č. 4
Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing} na prepočet príjmu rádionuklidov vdýchnutím (inhaláciou) aerosólov a požitím (ingesciou) na úväzok efektívnej dávky pre pracovníkov

Prvok	Polčas rozpadu	Inhalácia				Ingescia	
Nuklid		typ	f_1	h_{inh} [Sv/Bq] d_{ama} = 1 µm	h_{inh} [Sv/Bq] d_{ama} = 5 µm	f_1	h_{ing} [Sv/Bq]
vodík							
H-3 (tríciovaná voda)	12,3 r			Pozri tabuľku 7		1	$1,8.10^{-11}$
organicky viazané trícium	12,3 r			Pozri tabuľku 7		1	$4,2.10^{-11}$
berýlium							
Be-7	53,3 d	M	0,005	$4,8.10^{-11}$	$4,3.10^{-11}$	0,005	$2,8.10^{-11}$
		S	0,005	$5,2.10^{-11}$	$4,6.10^{-11}$		
Be-10	$1,60\ 10^{6}$ r	M	0,005	$9,1.10^{-9}$	$6,7.10^{-9}$	0,005	$1,1.10^{-9}$
		S	0,005	$3,2.10^{-8}$	$1,9.10^{-8}$		
uhlík							
C-11	0,340 h			Pozri tabuľku 7		1	$2,4.10^{-11}$
C-14	$5,73\ 10^{3}$ r			Pozri tabuľku 7		1	$5,8.10^{-10}$
fluór							
F-18	1,83 h	F	1	$3,0.10^{-11}$	$5,4.10^{-11}$	1	$4,9.10^{-11}$
		M	1	$5,7.10^{-11}$	$8,9.10^{-11}$		
		S	1	$6,0.10^{-11}$	$9,3.10^{-11}$		
sodík							
Na-22	2,60 r	F	1	$1,3.10^{-9}$	$2,0.10^{-9}$	1	$3,2.10^{-9}$
Na-24	15,0 h	F	1	$2,9.10^{-10}$	$5,3.10^{-10}$	1	$4,3.10^{-10}$
horčík							
Mg-28	20,9 h	F	0,5	$6,4.10^{-10}$	$1,1.10^{-9}$	0,5	$2,2.10^{-9}$
		M	0,5	$1,2.10^{-8}$	$1,7.10^{-8}$		

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

- Konverzné faktory h_{inh} pre príjem inhaláciou sú uvedené v závislosti od typu absorpcie v pľúcach.
- Pri bližšie neidentifikovaných rádionuklidoch a chemických formách rádioaktívnych látok alebo vlastností vdychovaného aerosólu sa aktivita prisudzuje tým rádionuklidom a ich formám, prípadne takému aerosólu, pre ktorý je stanovený najvyšší konverzný faktor.

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

- Absorpcia v pľúcach je vyjadrená typom **F, M alebo S** charakterizujúcim v modelových výpočtoch rýchlosť, ktorou látka prechádza z pľúc do telesných tekutín (F – rýchlo, M – stredne, S – pomaly), a koeficientom $\mathbf{f_1}$ charakterizujúcim frakciu, ktorá prechádza v tráviacom ústrojenstve do telesných tekutín.

Konverzné faktory na prepočet objemových aktivít vzácnych rádioaktívnych plynov na príkon efektívnej dávky u dospelých jednotlivcov z obyvateľstva a u pracovníkov

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d^{-1}/(Bq.m^{-3})]
Ar-37	$4{,}1.10^{-15}$
Ar-39	$1{,}1.10^{-11}$
Ar-41	$5{,}3.10^{-9}$
Kr-74	$4{,}5.10^{-9}$
Kr-76	$1{,}6.10^{-9}$
Kr-77	$3{,}9.10^{-9}$
Kr-79	$9{,}7.10^{-10}$
Kr-81	$2{,}1.10^{-11}$
Kr-83m	$2{,}1.10^{-13}$
Kr-85	$2{,}2.10^{-11}$

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d^{-1}/(Bq.m^{-3})]
Kr-85m	$5{,}9.10^{-10}$
Kr-87	$3{,}4.10^{-9}$
Kr-88	$8{,}4.10^{-9}$
Xe-120	$1{,}5.10^{-9}$
Xe-121	$7{,}5.10^{-9}$
Xe-122	$1{,}9.10^{-10}$
Xe-123	$2{,}4.10^{-9}$
Xe-125	$9{,}3.10^{-10}$
Xe-127	$9{,}7.10^{-10}$
Xe-129m	$8{,}1.10^{-11}$

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d^{-1}/(Bq.m^{-3})]
Xe-131m	$3{,}2.10^{-11}$
Xe-133m	$1{,}1.10^{-10}$
Xe-133	$1{,}2.10^{-10}$
Xe-135m	$1{,}6.10^{-9}$
Xe-135	$9{,}6.10^{-10}$
Xe-138	$4{,}7.10^{-9}$

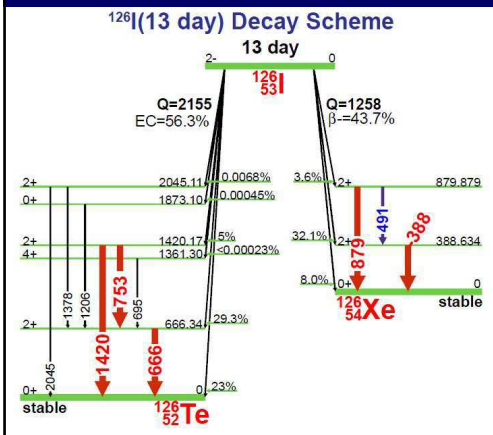
TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

Tabuľka č. 7

Koeficienty efektívnej dávky pre rozpustné alebo reaktívne plyny

Nuklid/chemická forma	$t_{1/2}$	h_{inh} [Sv.Bq^{-1}]
H-3 plyn	12,3 r	$1,8 \cdot 10^{-15}$
H-3 vodná para	12,3 r	$1,8 \cdot 10^{-11}$
H-3 organicky viazané trícium	12,3 r	$4,1 \cdot 10^{-11}$
I-120 para	1,35 h	$3,0 \cdot 10^{-10}$
I-120m para	0,88 h	$1,8 \cdot 10^{-10}$
I-121 para	2,12 h	$8,6 \cdot 10^{-11}$
I-123 para	13,2 h	$2,1 \cdot 10^{-10}$
I-124 para	4,18 d	$1,2 \cdot 10^{-8}$
I-125 para	60,1 d	$1,4 \cdot 10^{-8}$
I-126 para	**13,0 d**	**$2,6 \cdot 10^{-8}$**
I-128 para	**0,42 h**	**$6,5 \cdot 10^{-11}$**
I-129 para	$1,57 \cdot 10^{7}$ r	$9,6 \cdot 10^{-8}$
I-130 para	12,4 h	$1,9 \cdot 10^{-9}$
I-131 para	**8,04 d**	**$2,0 \cdot 10^{-8}$**
I-132 para	2,30 h	$3,1 \cdot 10^{-10}$
I-132m para	1,39 h	$2,7 \cdot 10^{-10}$
I-133 para	20,8 h	$4,0 \cdot 10^{-9}$
I-134 para	0,88 h	$1,5 \cdot 10^{-10}$
I-135 para	6,61 h	$9,2 \cdot 10^{-10}$

I-126 para $h_{inh}=2,6 \cdot 10^{-8}$



GAMMA-RAY ENERGIES AND INTENSITIES

Nuclide: ^{126}I — Half Life: 13.11(5) day

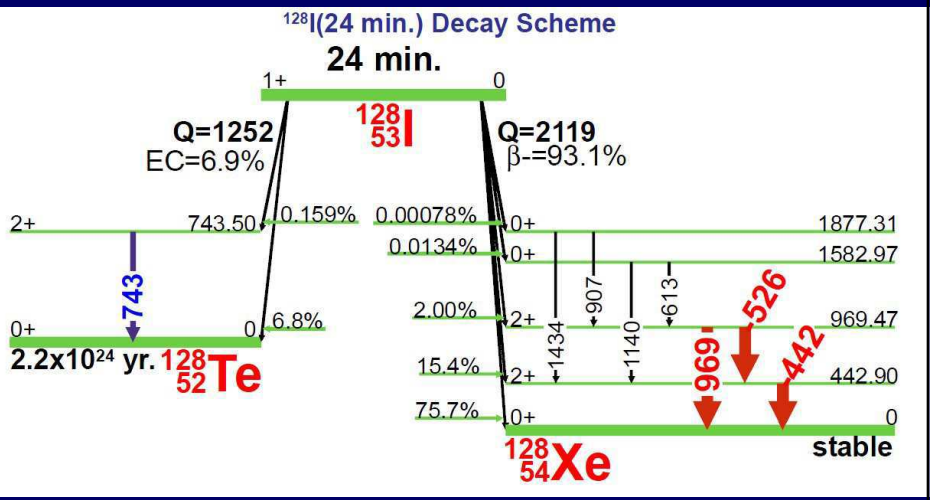
Detector: 2.5 cm^2 x 4 mm Ge (Li) — Method of Production: ^{127}I(γ,n)

	E_γ (keV)	σE_γ	I_γ (rel)	I_γ (%)	σI_γ	S
	388.633	0.011	100.	34.	3.	1
	491.243	0.011	9.5	2.86	0.25	2
Ann.	511.006		5.8	2.3	0.3	2
	666.331	0.012	94.0	33.1	2.4	1
	695.			0.0002		4
	753.819	0.013	11.6	4.2	0.3	1
	879.876	0.013	2.5	0.76	0.07	1
	1206.8	0.3		0.0004	0.0001	4
	1378.76			0.0024	0.0002	4
	1420.19	0.03	0.85	0.29	0.02	1
	2045.09	0.05		0.0046	0.0004	4

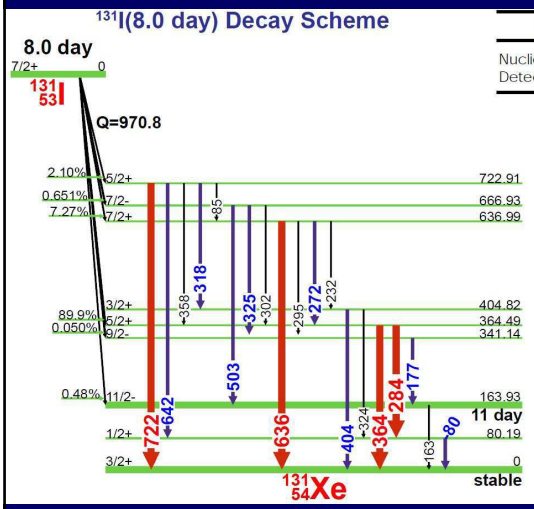
E_γ, σE_γ, I_γ, σI_γ - 1998 ENSDF Data

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.

I-128 para h_{inh}=6,5·10^{-11}



I-131 para h_{inh}=2,0·10^{-8}



GAMMA-RAY ENERGIES AND INTENSITIES

Nuclide: ^{131}I Half Life: 8.02070(11) day

Detector: 55 cm³ coaxial Ge (Li)Method of Production: U(n,f) chem

E_γ (keV)	σ E_γ	I_γ (rel)	I_γ (%)	σ I_γ	S
80.185	0.002	2.8	2.62	0.04	2
85.90	0.20		0.0001		4
163.930	0.008				4
177.214	0.002	0.36	0.270	0.004	4
232.18	0.15		0.0032	0.0004	4
272.498	0.017	1.1	0.0578	0.0011	4
284.305	0.005	7.6	6.14	0.06	1
295.80	0.20		0.0018	0.0008	4
302.40	0.20		0.0047	0.0006	4
318.088	0.016	0.10	0.0776	0.0017	4
D 324.651	0.025	0.34	0.0212	0.0025	4
325.789	0.004		0.274	0.021	
358.40	0.20		0.016	0.006	4
364.489	0.005	100.	81.7	0.8	1
404.814	0.004	0.07	0.0547	0.0017	4
449.60	0.20		0.0074	0.0025	4
503.004	0.004	0.46	0.360	0.004	2
636.989	0.004	9.1	7.17	0.10	1
642.719	0.005	0.28	0.217	0.004	2
722.911	0.005	2.3	1.7729	0.0268	1

E_γ, σE_γ, I_γ, σI_γ - 1998 ENSDF Data

TRIAL MODE − a valid license will remove this message. See the keywords property of this PDF for more information.