

# Dozimetrické veličiny a jednotky používané v radiačnej ochrane

doc. Ing. Róbert HINCA, PhD

4. decembra 2015 1

## 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.

4. decembra 2015 Dozimetria a radiačná ochrana 2

## Špecifická 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.

## 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  $\text{J.kg}^{-1}$  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

## 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<sup>-1</sup>.
- Pre silno prenikavé žiarenie sa odporúča hĺbka  $d=10$  mm.
- Pre slabo prenikavé žiarenie sa používa pre kožu hĺbka 0,07 mm a pre očné 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.

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

7

## 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, ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , n, p, ...)
- externé a interné ožiarenie,
- ožiarenie rôznych častí tela, (ruky, oko, pľúca...)
- orgánov a tkanív (s rôznou radiosenzitivitou),
- rôzne individuality (v zmysle zdravotného stavu, telesnej zdatnosti, veku, pohlavia a individuálnej senzitivity resp. predispozícií)
- profesionálne ožiarenie aj obyvateľstvo

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

8

## Veličiny a jednotky charakterizujúce zdroje ionizujúceho žiarenia

- Aktivita, A (Bq)
- Konštanta premeny,  $\lambda$  ( $s^{-1}$ )
- Stredná doba života rádioaktívnych jadier,  $\tau$  (s)
- Doba polpremeny (polčas premeny),  $T_{1/2}$  (s)
- Energia emitovaných častíc ( $eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$ ,  $10^{-15}$  – femto  
  - pre  $^{137}Cs$  predstavuje 661 keV asi 106 fJ)
- Maximálna a stredná energia spojitého  $\beta$  spektra (eV)
- Zastúpenie v diskretnom spektre  $\alpha, \gamma$  (%) príslušnej čiary
- Emisia zdroja
- Uhlová emisia zdroja

$$\dot{N}_z = \frac{dN_z}{dt}$$

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

9

## Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

10

## Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Účinný prierez interakcie (celkový  $\sigma_t$ , uhlový  $\sigma_\Omega$ , spektrálny  $\sigma_E$ ), ( $1b = 10^{-28} \text{ m}^2$ )
- Makroskopický účinný prierez interakcie  $\Sigma$  ( $\text{m}^{-1}$ )
- Lineárny súčiniteľ zoslabenia  $\mu$  ( $\text{m}^{-1}$ )
- Lineárny súčiniteľ prenosu energie  $\mu_{tr}$  ( $\text{m}^{-1}$ )
- Lineárny súčiniteľ absorpcie energie  $\mu_E$  ( $\text{m}^{-1}$ )
- Lineárna brzdná schopnosť  $S$  ( $\text{Jm}^{-1}$ )
- Lineárny prenos energie  $L$  resp. LET ( $\text{Jm}^{-1}$ )
- Celková ionizačná schopnosť častice
- Lineárna ionizácia, stredná energia ionizácie  $W(\text{eV})$

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

11

## 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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

12

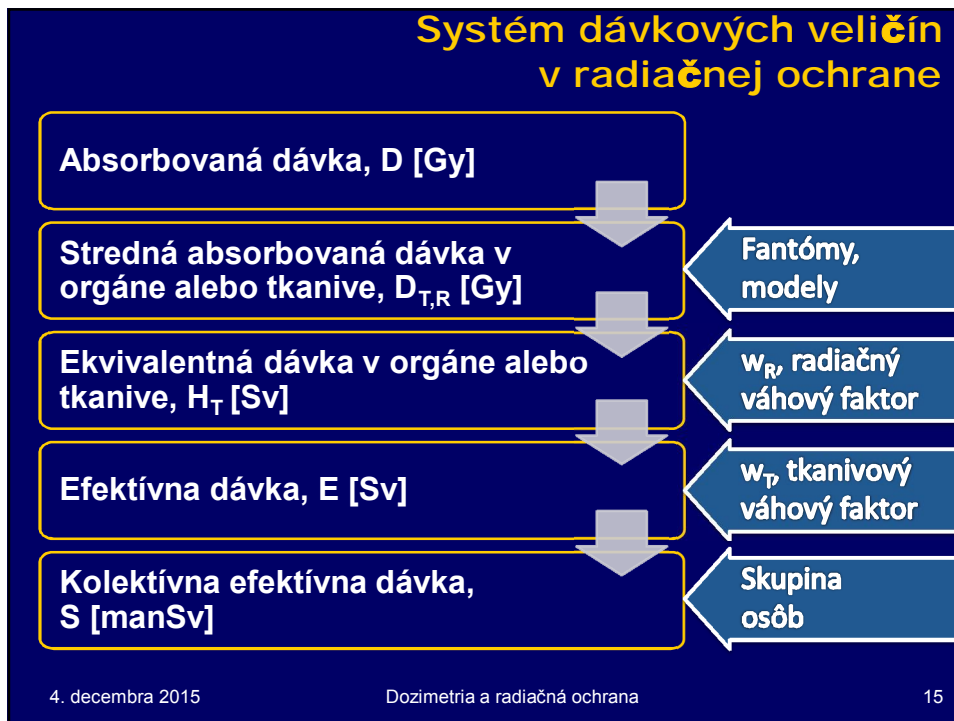
## Veličiny radiačnej ochrany

### • 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 ( $\text{Gy}=\text{J}/\text{kg}$ )
- 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)



### 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.

4. decembra 2015      Dozimetria a radiačná ochrana      16



## Zákon rádioaktívnej premeny

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

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

- Konštanta proporcionality  $\lambda$  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  $t$ ,
  - ┆  $\lambda$  - 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.

### Stredná doba života

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

- Stredná hodnota  $\tau$  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 $\lambda$ [s<sup>-1</sup>]

- **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.

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

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

## 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)

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

$$A = \lambda N$$

## Becquerel

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

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

je aktivita 1 g rádia  $^{226}\text{Ra}$

## 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 <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
hmotnostná aktivita	$a_m$	$a_m = \frac{A}{m}$	becquerel na kilogram	Bq kg <sup>-1</sup>	kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
objemová aktivita	$a_V$	$a_V = \frac{A}{V}$	becquerel na meter kubický	Bq m <sup>-3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
plošná aktivita	$a_S$	$a_S = \frac{A}{S}$	becquerel na meter štvorcový	Bq m <sup>-2</sup>	m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
dĺžková aktivita	$a_l$	$a_l = \frac{A}{l}$	becquerel na meter	Bq m <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
rýchlosť emisie (emanácia) aktivity	$\frac{A}{t}$	$\frac{A}{t}$	becquerel za sekundu	Bq s <sup>-1</sup>	s <sup>-2</sup>

$n$  - 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  $A$

## 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**

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

25

## Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

26

## Fluencia častíc

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

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

27

## Príkon fluencie

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

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

28

## Radiancia častíc, Radiancia energie

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

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

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

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

## Fluencia energie častíc, Príkion fluencie energie častíc

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

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

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

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

## Hustota prúdu častíc

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

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.

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

## Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- **Účinný prierez interakcie** (celkový  $\sigma_T$ , uhlový  $\sigma_\Omega$ , spektrálny  $\sigma_E$ ), ( $1\text{b} = 10^{-28} \text{m}^2$ )
- **Makroskopický účinný prierez interakcie  $\Sigma$  ( $\text{m}^{-1}$ )**
- **Lineárny súčiniteľ zoslabenia  $\mu$  ( $\text{m}^{-1}$ )**
- **Lineárny súčiniteľ prenosu energie  $\mu_{tr}$  ( $\text{m}^{-1}$ )**
- **Lineárny súčiniteľ absorpcie energie  $\mu_E$  ( $\text{m}^{-1}$ )**
- **Lineárna brzdná schopnosť  $S$  ( $\text{Jm}^{-1}$ )**
- **Lineárny prenos energie  $L$  resp. LET ( $\text{Jm}^{-1}$ )**
- **Celková ionizačná schopnosť častice**
- **Lineárna ionizácia, stredná energia ionizácie  $W(\text{eV})$**



## Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- **Lineárny súčiniteľ zoslabenia  $\mu$  ( $\text{m}^{-1}$ )**
- **Lineárny súčiniteľ prenosu energie  $\mu_{tr}$  ( $\text{m}^{-1}$ )**  
sa používa na popis prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabité sekundárne častice
  - ▮  $N$  je počet častíc s energiou  $E$  dopadajúcich kolmo na vrstvu  $dx$  pričom vznikajú nabité častice so sumárnou kinetickou energiou  $dE_K$
- **Lineárny súčiniteľ absorpcie energie  $\mu_E$  ( $\text{m}^{-1}$ )** 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.

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

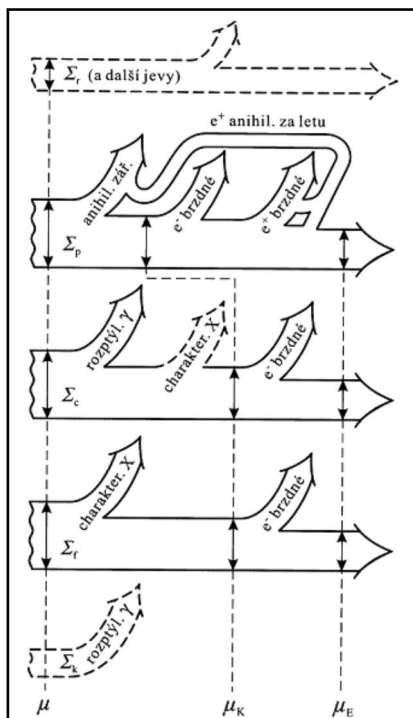
$$\mu_{tr} = \frac{1}{NE} \frac{dE_K}{dx}$$

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

33



Koeficient prenosu energie  
Koeficient absorpcie energie

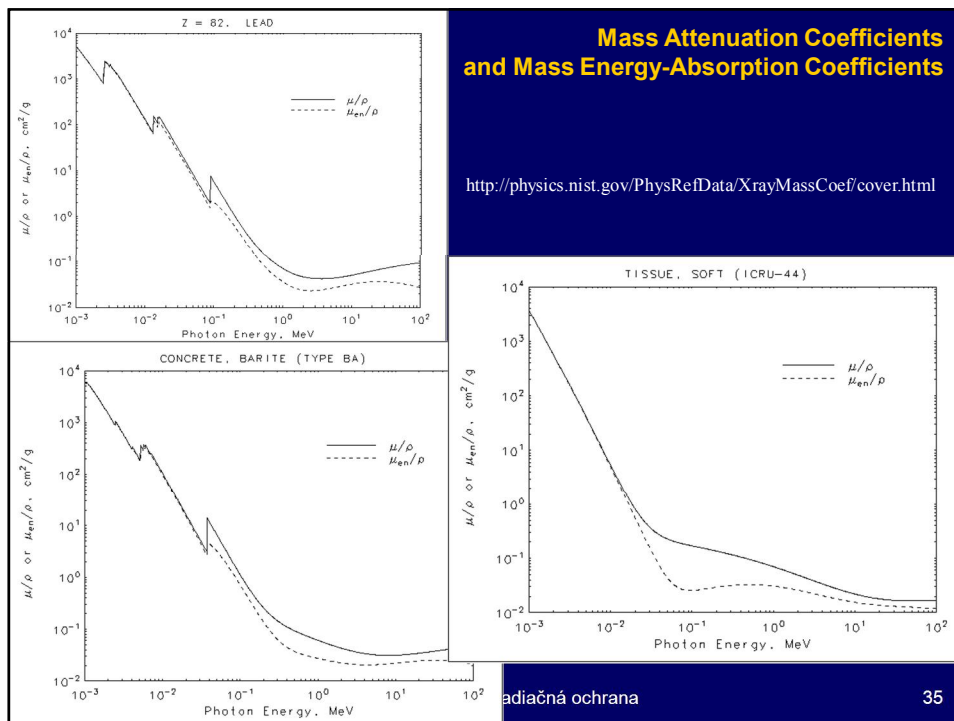
- $\Sigma_K$  - koherentný rozptyl
- $\Sigma_f$  - fotoefekt
- $\Sigma_C$  - Comptonov rozptyl
- $\Sigma_p$  - tvorba párov
- $\Sigma_r$  - fotojadrové reakcie

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

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

Dozimetria a radiačná ochrana

34



## Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- **Lineárna brzdná schopnosť S** ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$ ) aj [ $\text{eV}\cdot\text{m}^{-1}$ ] vyjadruje mieru energetických strát pozdĺž dráhy nabitých častíc v danom materiáli.

▮ 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) [ $\text{MeV}\cdot\text{cm}^{-1}$ ] je mierou energie **odovzdanej** pri prechode ionizujúceho žiarenia elektrónom látky v danom mieste. Niekedy je LET ohraničená energiou  $\Delta$ , ktorá ohraničuje minimálnu energiu elektrónov ktoré berieme do úvahy. Elektróny s vyššou energiou uletia preč.

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

- Pre  $\Delta = \infty$  platí  $LET = S$

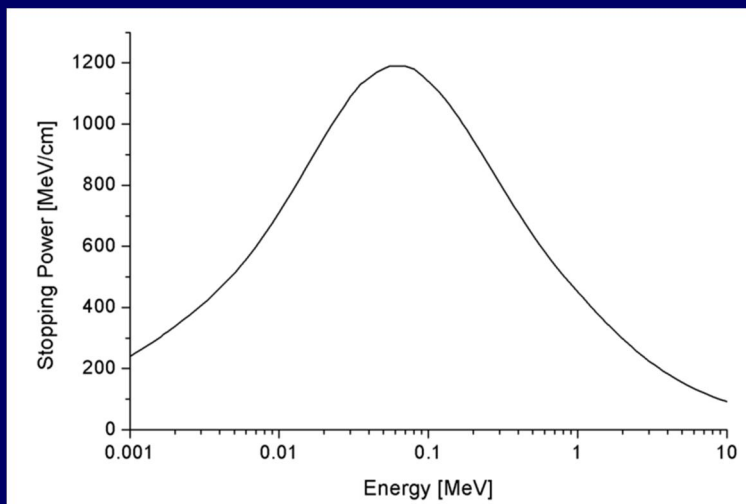
$$L = \frac{dE}{dx}$$

- **Lineárna ionizácia J** ( $\text{m}^{-1}$ ) vyjadruje počet vytvorených iónových párov na jednotku dráhy vyjadruje veličina

- **Stredná energia ionizácie W** (eV)

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

## Brzdná schopnosť hliníka pre protóny

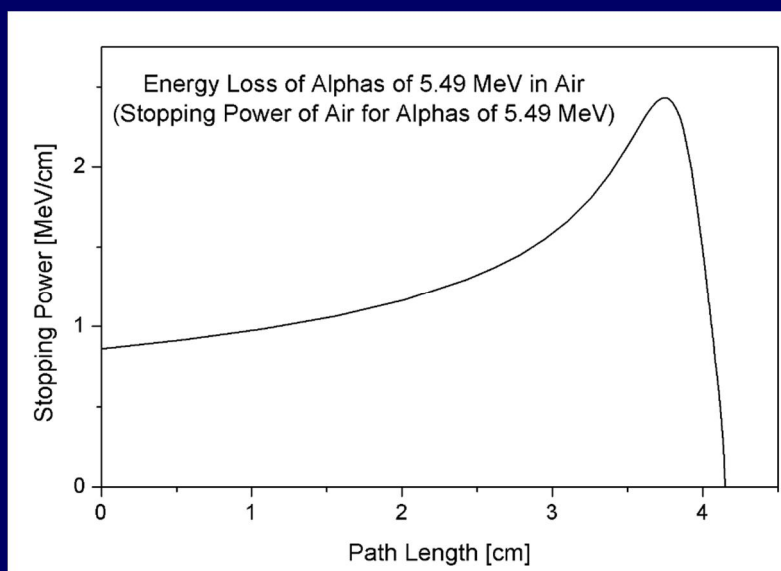


4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

37

## Brzdná schopnosť vzduchu pre alfa častice



4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

38

## Intenzita ionizácie vzduchu $\alpha$ časticami



4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

39

## 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.

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

40

## Odobzdaná energia

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

- Ionizujúce žiarenie odovzdá v určitom objeme látky energiu  $E$ , ktorá sa nazýva odobzdaná 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)
- $\sum Q$  - 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 odobzdaná energia

- Hmotnostná odobzdaná energia  $z$  [ $\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je podiel odobzdanej energie látky v uvažovanom objeme a hmotnosti tejto látky.
- Limitná hodnota strednej hmotnostnej odobzdanej energie pre  $m \rightarrow 0$  sa blíži k absorbovanej dávke v bode.

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

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

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

## Absorbovaná dávka

- **Absorbovaná dávka** [ $\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] v danom bode pre každé IŽ je podiel strednej odovzdanej energie  $dE$  látky 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.  $D_{\text{vzd}}$  - vzduch,  $D_{\text{tk}}$  - 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  $dt$ .

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

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

43

## Lineárny prenos energie Lineárna zrážková brzdná schopnosť

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

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

$dl$  je vzdialenosť v látke

$L$  [ $\text{eV} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ]

**LET - Linear Energy Transfer**  
**S - Stopping power**

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

44

## KERMA $K$ [ $\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

- 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

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

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

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

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

- $F_K$  - kermový faktor, tabelovaná veličina
- **Fluencia energie častíc**  $\Psi$  [ $\text{J m}^{-2}$ ] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc  $dR$  dopadajúcej do malej gule s plochou hlavného rezu  $dS$  a tejto plochy.

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

- **Koeficient prenosu energie**  $\mu_{tr}$  [ $\text{m}^{-1}$ ] ( $\mu_{\gamma}$ )
- $N$  je počet častíc s energiou  $E$  dopadajúcich kolmo na vrstvu  $dx$  pričom vznikajú nabité častice so sumárnou kinetickou energiou  $dE_K$ .

$\mu$                        $\mu_K$                        $\mu_E$

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

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

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

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.

tria a radiačná ochrana
47

## 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**  $\Phi$  [ $m^{-2}$ ] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.
  - ▮ **Fluencia energie častíc**  $\Psi$  [ $J m^{-2}$ ] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc  $dR$  dopadajúcej do malej gule s plochou hlavého rezu  $dS$  a tejto plochy.



## Vzťah medzi kermou a dávkou

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

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

Energia (MeV)	100 · (μ <sub>tr</sub> - μ <sub>E</sub> ) / μ <sub>tr</sub>		
	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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

49

## Expozícia

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

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

§μ<sub>E,m</sub> - hmotnostný koeficient absorpcie energie

§W<sub>i</sub> - 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 pozitronov v objemovom elemente o hmotnosti dm a tejto hmotnosti.**
- Jednotkou expozície je [C·kg<sup>-1</sup>].
- Staršou jednotkou je röntgen 1R=2,58·10<sup>-4</sup> C·kg<sup>-1</sup>.
- Vo vzduchu platí prevod na kermu: 1R = 8,76 mGy

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

50

## Kermová výdatnosť' $V_{K,\delta}$ [Gy.m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

$$V_{K,\delta} = K_{\delta} I^2$$

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

- 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.
- $\delta$  je minimálna energia uvažovaných fotónov.
- Kermu z rádionuklidového zdroja môžeme vypočítať z kermovej výdatnosti [Gy.m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>].
- Univerzálnejšou charakteristikou rádionuklidov je kermová konštanta gama  $\Gamma^{\delta}$ .

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

51

## Dávkový ekvivalent

- Dávkový ekvivalent v ľubovoľnom mieste biologického väziva je daný vzťahom

$$H = D.Q.N^* \quad [\text{Sv}]$$

- D - absorbovaná dávka, [Gy]
- Q - faktor kvality, [1 (bezrozmerná veličina)]
- N - súčin všetkých ďalších (v súčasnosti ešte neznámych) modifikujúcich faktorov. V súčasnosti 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  $dL$

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

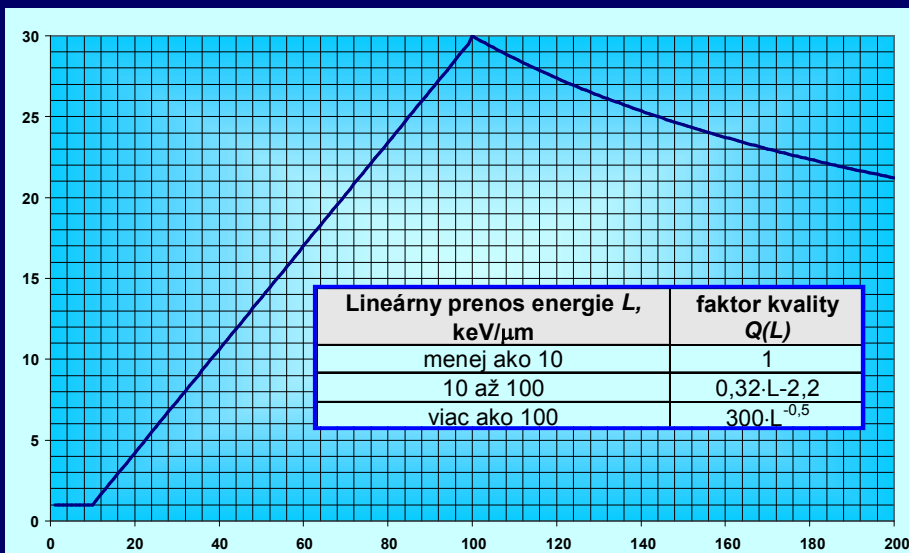
52

## 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 $Q(L)$



### Veličiny používané na účely limitovania.

- Stredná absorbovaná dávka v orgáne  $D_T$
- Radiačný váhový faktor  $w_R$
- Tkanivový váhový faktor  $w_T$
- 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  $S$

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

55

### 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  $\varepsilon_T$  tkanivu alebo orgánu a hmotnosti tkaniva alebo orgánu  $m_T$
- Nazýva sa tiež aj orgánová dávka.

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

56

### Ekvivalentná dávka v tkanive alebo orgáne $H_T$

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

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

### 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
$\alpha$ - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20

## 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	$2,5 + 18,2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, E_n < \text{MeV}$
10 keV - 100 keV	10	
100 keV - 2 MeV	20	$5,0 + 17,0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, 1\text{MeV} < E_n < 50\text{MeV}$
2 MeV - 20 MeV	10	
> 20 MeV	5	$2,5 + 3,25e^{-[\ln(0,04E_n)]^2/6}, E_n > 50\text{MeV}$
Protóny > 2 MeV	5	2
$\alpha$ - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20	20

Referenčné žiarenie pre súbor radiačných váhových faktorov v doporčení ICRP 103 bolo nízkoenergetické fotónové žiarenie, ktorého energia nebola konkretizovaná.

V doporčení ICRP 60 bolo konkretizované fotónové žiarenie s energiou nad 200 keV a boli brané do úvahy dáta od  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{60}\text{Co}$ .

## Fotóny, elektróny a mezóny

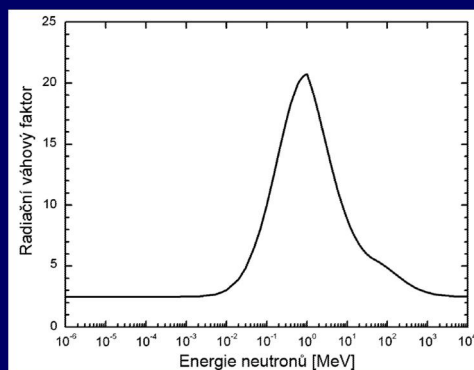
- Fotóny, elektróny a mezóny sú druhy žiarenia s nízkou hodnotou LET (<10 keV/ $\mu\text{m}$ ). Môže sa použiť  $w_R=1$  na určenie ekvivalentnej a efektívnej dávky pri hodnotení a usmeňovaní ožiarenia v oblasti nízkych dávok.
- Reálne sa hodnota  $w_R$  líši od 1 a prejavuje sa to v individuálnom retrospektívnom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

## 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.



4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

61

## 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.

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

62

## 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.

4. decembra 2015

63

## Efektívna dávka

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

jednotkou je  $J \cdot kg^{-1}$   
s názvom sievert, Sv

Efektívna dávka 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)

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

64



## 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
Plúca	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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

65

## 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
Plúca	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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

66

## Úväzok ekvivalentnej dávky Úväzok efektívnej dávky

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

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

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

## Kolektívna ekvivalentná dávka

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

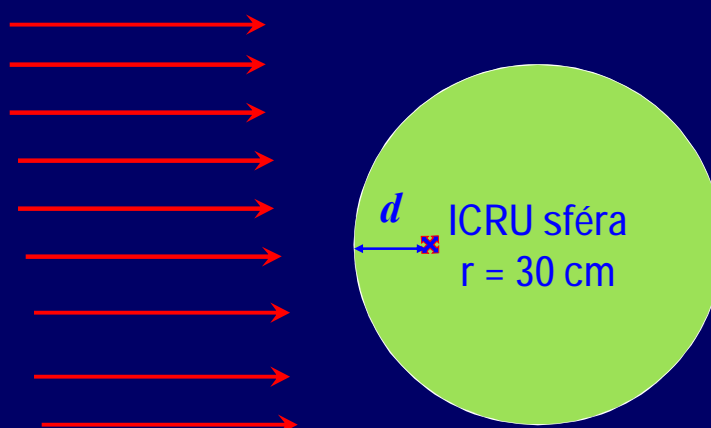
- $N_i$  je počet jednotlivcov v populačnej skupine  $i$ , ktorí obdržali strednú ekvivalentnú dávku  $\bar{H}_{T,i}$

## Kolektívna efektívna dávka $S$

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

- $\bar{E}_i$  je stredná efektívna dávka pre jednotlivca z populačnej podskupiny  $i$ , ktorej zodpovedá počet členov  $P_i$ .

## Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$



### Smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$

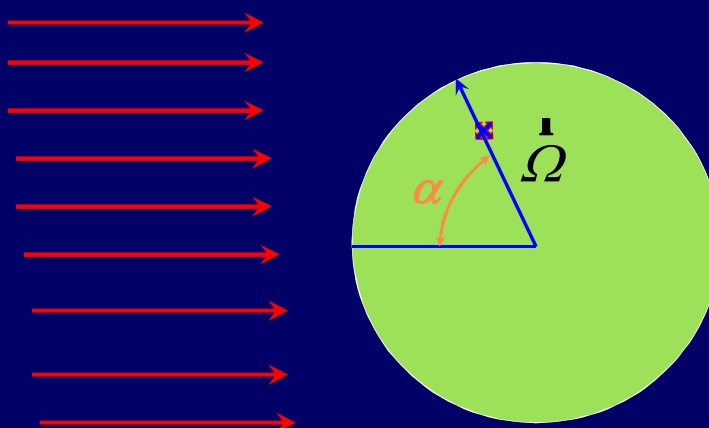
- Pre smerový dávkový ekvivalent  $H'(d, \Omega)$  treba špecifikovať smer  $\Omega$ , teda uhol pod ktorým je meraný objekt otočený k smeru poľa ionizujúceho žiarenia.
- Smerový dávkový ekvivalent môže byť určený aj len pre **rozšírené pole**, teda bez smerového usmernenia. Vtedy treba zvoliť vhodný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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

71

### Smerový dávkový ekvivalent $H^*(d, \Omega)$



4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

72

## ICRU sféra

- sféra s priemerom 30 cm, vyhotovená z tkanivu ekvivalentného materiálu:
  - | hustotou  $1\text{g}\cdot\text{cm}^3$  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

## 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  $H_p(10)$ , ekvivalentnej dávke v koži povrchový osobný dávkový ekvivalent  $H_p(0,07)$ .

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

75

## Hodnotenie ožiarenia

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

76

## 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  $g$ .

## 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.

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

79

## 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<sup>-3</sup>],

$B$  je množstvo vdychovaného vzduchu v jednom roku [m<sup>3</sup>.rok<sup>-1</sup>].

**Hodnoty množstva vdychovaného vzduchu pre jednotlivé skupiny osôb**

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



## 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 úroveň efektívnej dávky pre pracovníkov

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

81

## 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.

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

82

## 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  $f_1$  charakterizujúcim frakciu, ktorá prechádza v tráviacom ústrojenstve do telesných tekutín.

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

83

### 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 <sup>-1</sup> /(Bq.m <sup>-3</sup> )]
Ar-37	4,1.10 <sup>-15</sup>
Ar-39	1,1.10 <sup>-11</sup>
Ar-41	5,3.10 <sup>-9</sup>
Kr-74	4,5.10 <sup>-9</sup>
Kr-76	1,6.10 <sup>-9</sup>
Kr-77	3,9.10 <sup>-9</sup>
Kr-79	9,7.10 <sup>-10</sup>
Kr-81	2,1.10 <sup>-11</sup>
Kr-83m	2,1.10 <sup>-13</sup>
Kr-85	2,2.10 <sup>-11</sup>

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

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

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

84

**Tabuľka č. 7**  
**Koeficienty efektívnej dávky pre rozpustné alebo reaktívne plyny**

Nuklid/chemická forma	$t_{1/2}$	$h_{inh}$ [Sv.Bq <sup>-1</sup> ]
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	$1,4 \cdot 10^{-8}$
<b>I-126 para</b>	<b>13,0 d</b>	<b><math>2,6 \cdot 10^{-8}</math></b>
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	$1,9 \cdot 10^{-9}$
<b>I-131 para</b>	<b>8,04 d</b>	<b><math>2,0 \cdot 10^{-8}</math></b>
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	$9,2 \cdot 10^{-10}$

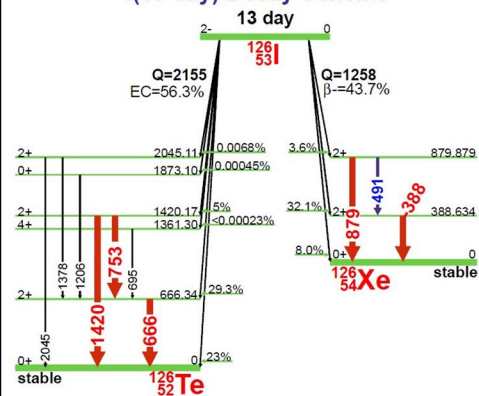
4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

85

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

**<sup>126</sup>I (13 day) Decay Scheme**



**GAMMA-RAY ENERGIES AND INTENSITIES**

Nuclide: <sup>126</sup>I Half Life: 13.11(5) day  
 Detector: 2.5 cm<sup>2</sup> x 4 mm Ge (Li) Method of Production: <sup>127</sup>I(γ,n)

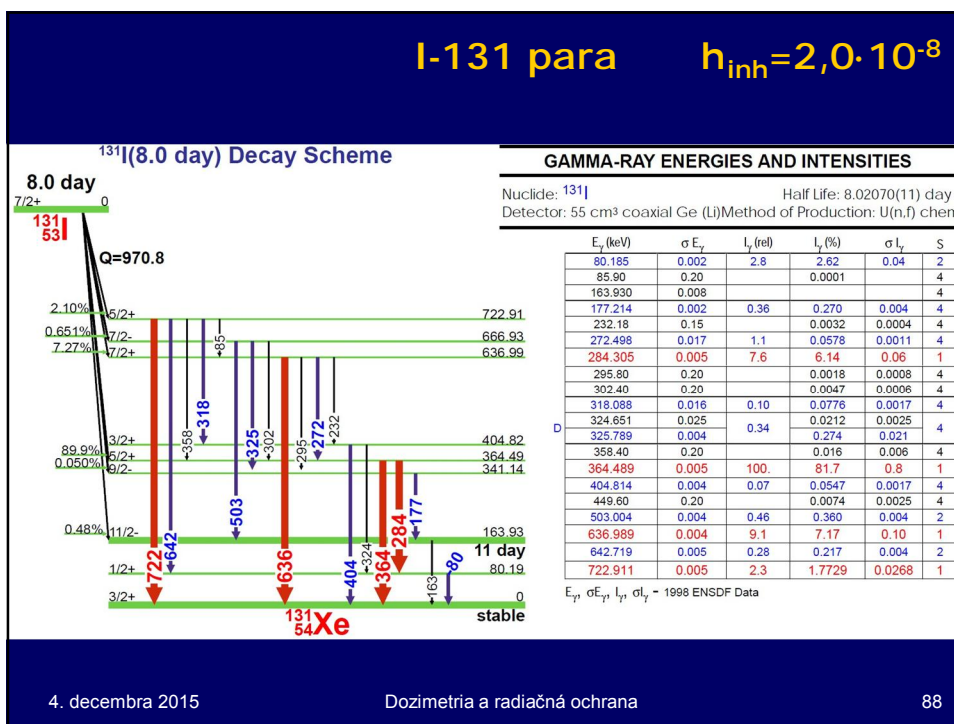
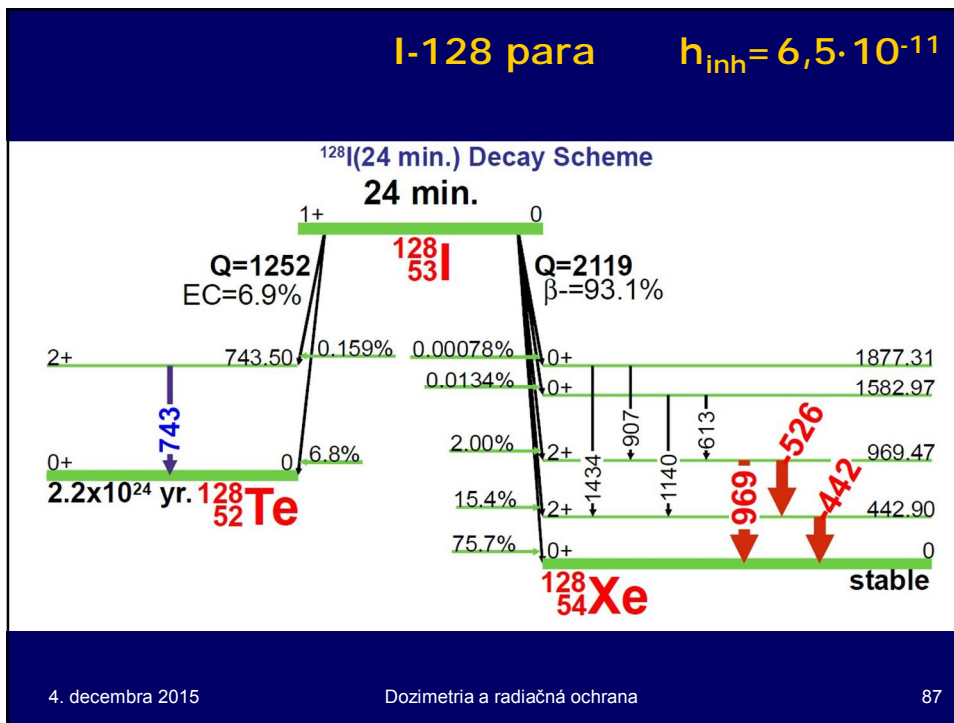
	$E_\gamma$ (keV)	$\sigma E_\gamma$	$I_\gamma$ (rel)	$I_\gamma$ (%)	$\sigma I_\gamma$	S
	388.633	0.011	100.	34.	3.	1
	491.243	0.011	9.5	2.86	0.25	2
	511.006		5.8	2.3	0.3	2
Ann.	666.331	0.012	94.0	33.1	2.4	1
	695.			0.0002		4
	753.819	0.013	11.6	4.2	0.3	1
	879.876	0.013	2.5	0.76	0.07	1
	1206.8	0.3		0.0004	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

$E_\gamma, \sigma E_\gamma, I_\gamma, \sigma I_\gamma$  - 1998 ENSDF Data

4. decembra 2015

Dozimetria a radiačná ochrana

86



## Detekcia a meranie ionizujúceho žiarenia

4. decembra 2015

doc. Ing. Róbert Hinca, PhD.



### Fyzikálne procesy používané na detekciu IŽ



Mechanizmus	Použitie	Typ zariadenia	Typ detektora
<b>Ionizácia</b> IŽ môže priamo ( $\alpha, \beta$ ) alebo nepriamo ( $\gamma, X, n$ ) ionizovať prostredie detektora	Monitorovanie radiácie	1. Ionizačné komory 2. Proporcionálne p. 3. GM počítače 4. Polovodivé det.	1. plynné 2. plynné 3. plynné 4. pevná látka
<b>Scintilácia</b> Záblesky svetla pri deexcitácii atómov v detekčnom kryštále sú konvertované na elektrický signál vo fotonásobici.	Monitorovanie radiácie	scintilacné detektory	kryštál alebo tekutá látka
<b>Termoluminiscencia</b> Elektróny sú v TLD kryštáloch zachytené v pasclach po excitácii žiarením. Vyslobodenie z pasce sa deje prostredníctvom dodania tepla za emisie fotónov svetla, ktoré sa registrujú fotonásobicom.	Osobná dozimetria	TLD dozimeter	kryštál
<b>Chemické reakcie</b> Žiarenie môže spôsobiť resp. urýchliť niektoré chemické reakcie. Vyhodnotenie chemických zmien môže dať informáciu o absorbovanej dávke.	Osobná dozimetria	fotografický film Železnatý roztok $Fe^{2+} + OH \rightarrow Fe^{3+} + OH^-$	Fotoemulzia Frickeho dozimeter
<b>Ohrev</b> Ionizujúce žiarenie pri interakcii odovzdáva energiu absorpčnému prostrediu, ktorá za tým zohrieva. Ohrev je proporcionálny absorbovanej dávke.	Kalibrácia meracích prístrojov a štandardov	kalorimeter	tekutá alebo pevná látka
<b>Biologické zmeny</b> Žiarenie spôsobuje zmeny v biologickom tkanive (frekvencia chromozómových aberácií), ktoré môžu byť za určitých okolností využité na určenie dávky	Havarijná situácia	biologické tkanivo	biologické tkanivo

## Základné procesy pri detekcii žiarenia



Primárne častice	Proces interakcie	Nabité priamo ionizujúce častice
$\alpha$ - častice	ionizácia a excitácia Coulombovskými silami	primárne častice a sekundárne elektróny
$\beta$ - častice	ionizácia a excitácia Coulombovskými silami	primárne a sekundárne elektróny
	emisia brzdného žiarenia	elektróny z interakcie brzdného žiarenia
fotóny $\gamma$ a X	fotoelektrický jav	fotoelektróny
	Comptonov rozptyl	Comptonove elektróny
	tvorba párov $e^-$ a $e^+$	vzniknuté páry $e^-$ a $e^+$
	koherentný rozptyl	-
	fotojadrová reakcia	produkty reakcie
neutróny	pružný rozptyl	odrazené jadrá (ľahké)
	nepružný rozptyl	odrazené jadrá a elektróny po interakcii vzniknutých fotónov
	radiačný záchyt ( $n, \gamma$ )	elektróny po interakcii vzniknutých fotónov
	jadrové reakcie ( $n, \alpha$ ), ( $n, p$ )...	nabité produkty reakcií
	štiepenie jadier	štiepne fragmenty

## Základné parametre detektorov IŽ



- | citlivosť,
- | účinnosť,
- | časové rozlíšenie (mŕtva doba),
- | energetické (amplitúdové) rozlíšenie,
- | selektivita,
- | vlastný šum,
- | veľkosť a polarita výstupného signálu a
- | stabilita
- | energetický rozsah – od MDA do maximálnej merateľnej aktivity.

## Citlivosť – sensitivity

referenčná odozva na radiáciu  
reference radiation response



- Citlivosť** detektora je vzťah medzi výsledným meraným údajom detektora (napr. amplitúdou impulzov) a určitým parametrom ionizujúceho žiarenia (napr. energiou častice). Citlivosť ako veličina má rozmer, ktorý závisí od druhu meracieho prístroja (radiametrický, dozimetrický) a podmienok merania.

$I_{rp}$  - je údaj v dôsledku konvenčne pravej aktivity referenčného zdroja a pozadia,

$I_b$  - údaj výlučne od pozadia,

$A_t$  - konvenčne pravá aktivita referenčného zdroja.

- A/Bq
- $s^{-1}/(Bq/cm^2)$

$$R_{ref} = \frac{I_{rp} - I_b}{A_t}$$

## sensitivity vs. efficiency



### sensitivity

for a given value of the measured quantity, ratio of the variation of the observed variable to the corresponding variation of the measured quantity

Example: sensitivity is the ratio between the net true count rate and the activity of radiation source. This sensitivity depends on the nature of the radiation issuing radionuclide.

### detector efficiency

ratio of the number of detected photons to the number of photons of the same type which are incident on the detector in the same time interval

## Účinnosť (intrinzická-vnútrotná)



- I **Účinnosť** detektora - udáva pravdepodobnosť registrácie jednotlivej častice.
- I Je to podiel počtu zaregistrovaných impulzov k počtu častíc, ktoré sa dostali do citlivého objemu detektora, nazývame, prelietavajúcej cez detektor.
- I Účinnosť je teda veličina bezrozmerná teda v %.

## Mŕtva doba



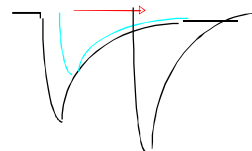
Keď sa registrovaná častica dostáva do interakcie s detekčným prostredím, určitú dobu trvá, kým proces ionizácie prebehne, dôjde k rekombinácii, vytvorený elektrický náboj sa odvedie alebo vzбудené atómy sa vrátia do základného stavu.

Po túto dobu je detektor necitlivý k ďalším prichádzajúcim časticiam resp. nedokáže od seba oddeliť výstupné signály zodpovedajúcej kvality.

**Mŕtva doba je minimálny časový interval, ktorý musí uplynúť medzi príchodom dvoch po sebe nasledujúcich častíc, aby boli zaregistrované oddelene a to je vlastne časové rozlíšenie detektora**

Detektor	Mŕtva doba
Ionizačná komora	$10^{-4}$
Proporcionálny detektor	$10^{-5}$
GM detektor	$10^{-4}$
Scintilačný detektor	$10^{-8}$
Polovodičový detektor	$10^{-9}$

Mŕtva doba detektora





## Postup pri stanovení mŕtvej doby metódou dvoch žiaričov



Na tento účel sú potrebné dva zdroje rádionuklidov o ktoré sa zaujímame, pričom aktivita každého je okolo 10 % ale nie viac, ako je maximálny rozsah zariadenia.

Najskôr meriame počet impulzov **pozadia** v príslušnom energetickom pásme. Nech je početnosť rovná **B**.

Ďalej umiestnime jeden zo zdrojov do meracej polohy. Táto početnosť sa rovná **C<sub>1</sub>**. Vyjadríme čistú početnosť **n<sub>1</sub>=C<sub>1</sub>-B**

Ďalej umiestnite do meracej pozície ďalší zdroj tak aby nebola v žiadnom prípade ovplyvnená detekcia žiarenia z prvého zdroja a aby sa žiadnym spôsobom tento zdroj nerušil. Táto celková početnosť je **C<sub>12</sub>** a **n<sub>12</sub>=C<sub>12</sub>-B**

Odstránime prvý zdroj a zmeráme ďalšiu početnosť **C<sub>2</sub>** a **n<sub>2</sub>=C<sub>2</sub>-B**

Čas počítania impulzov musí byť taký, aby sme získali minimálne 10<sup>5</sup> impulzov zo zdrojov a 10<sup>4</sup> z pozadia (pokiaľ tento čas neprekročí 3000 s).

Mŕtva doba  $\mu$ (s) keď **C<sub>1</sub>**, **C<sub>2</sub>**, **C<sub>12</sub>** a **B** sú vyjadrené v s<sup>-1</sup> sa vypočíta zo vzťahu:

$$\mu = \frac{C_1 + C_2 - C_{12} - B}{C_1^2 + C_2^2 - (C_{12}^2 + B^2)}$$

## Iné vyjadrenie príkladu na mŕtvu dobu



- | Vychádzame z nasledovných predpokladov:
- | Ak detektor zaregistruje dopadne **n (=100 s<sup>-1</sup>)** impulzov za sekundu a po registrácii každého bude detektor mŕtvy po dobu  **$\tau$  (=10<sup>-4</sup> s)** tak detektor bude citlivý iba  $(1-n\tau) = (1-0,01)=0,99$  časť z doby merania.
- | Detektor zaregistruje nižšiu početnosť  **$n=n_0(1-n\tau)=99$  s<sup>-1</sup>** v porovnaní s početnosťou dopadajúcich častíc **n<sub>0</sub>**

$$n_{01} = \frac{n_1}{1 - n_1\tau}$$

$$n_{012} = n_{01} + n_{02}$$

$$n_{02} = \frac{n_2}{1 - n_2\tau}$$

$$\frac{n_{12}}{1 - n_{12}\tau} = \frac{n_1}{1 - n_1\tau} + \frac{n_2}{1 - n_2\tau}$$

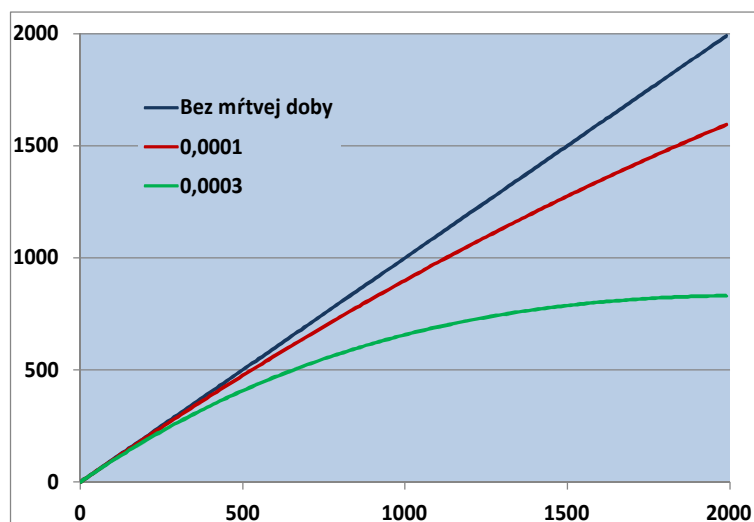
$$n_{012} = \frac{n_{12}}{1 - n_{12}\tau}$$

Za predpokladu  $n_1\tau \ll 1$  a  $n_2\tau \ll 1$  zanedbáme súčin  $n_1n_2n_{12}\tau$  a dostaneme

$$\tau = \frac{n_1 + n_2 - n_{12}}{2n_1n_2}$$

## Korekcia na mŕtvu dobu

$$n_0 = \frac{n}{1 - n\tau}$$



## Energetická rozlišovacia schopnosť



Najdôležitejším parametrom **spektrometrického** detektora je jeho energetická rozlišovacia schopnosť.

Proces transformácie energie častice na amplitúdu impulzu má **pravdepodobnostný** charakter.

Preto ak aj je energia detekovaných častíc rovnaká, zodpovedajúce impulzy na výstupe detektora majú rôzne amplitúdy, t.j. amplitúdy sú rozdelené podľa určitého pravdepodobnostného zákona (**Gaussovhovho rozdelenia**).

## Relatívne energetické rozlíšenie (relative energy resolution)



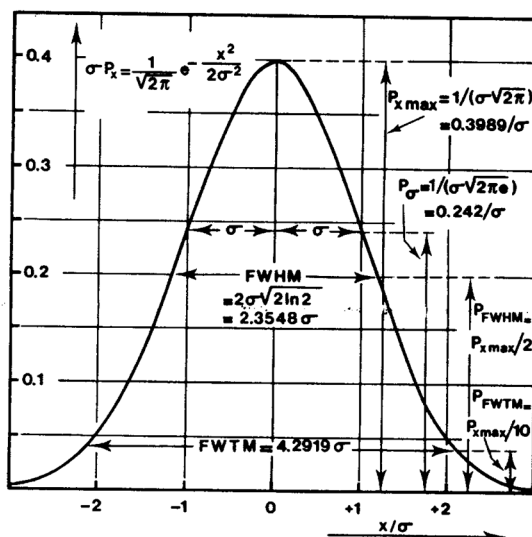
- FWHM - Full width at half maximum
- úplná šírka medzi dvomi bodmi spektra umiestnenými na obidvoch stranách ťažiska energetickej oblasti o ktorú sa zaujímate, kde je početnosť (počet impulzov za sekundu) v energetickom kanále polovičná vzhľadom k maximu píku

$$\varepsilon_R = \frac{\text{úplná šírka vyjadrená v energii (alebo čísle kanála)}}{\text{energia (alebo číslo kanála) ťažiska energetického píku o ktorú sa zaujímate}}$$

$$R_E = \frac{\Delta E}{E_0}$$

Detektor	Rozlíšenie pre 662 keV	Hustota g/cm <sup>3</sup>
LaBr <sub>3</sub> (Ce)	2,8 - 4,0%	5,29
Nal(Tl)	7-10 %	3,7
HPGe	0,2 % (pre 1,3 MeV)	5,35

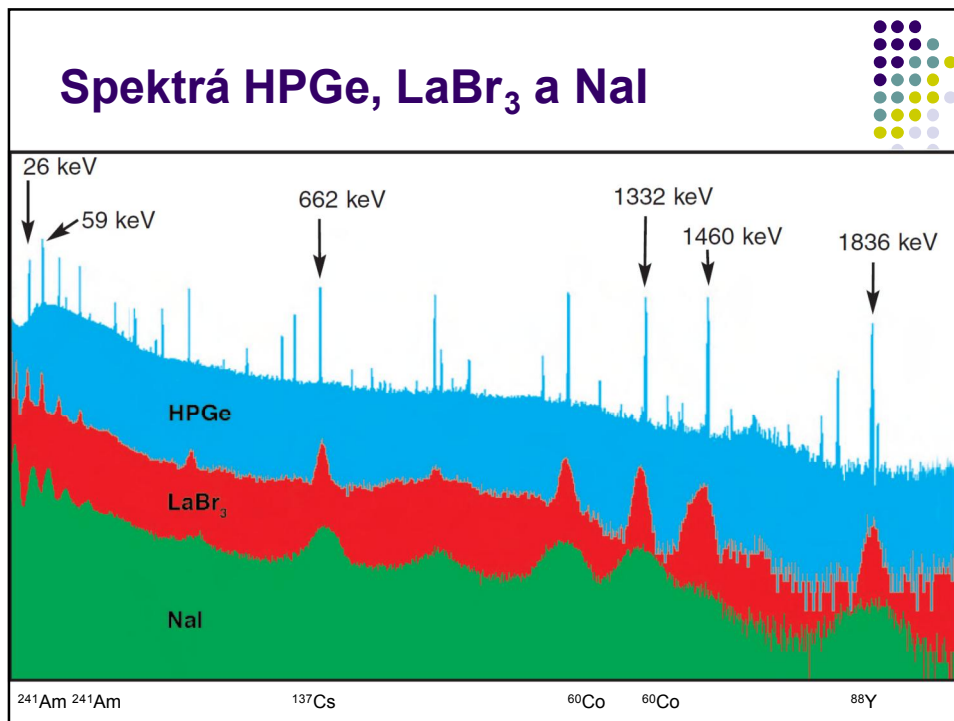
## Energetické rozlíšenie $R_E$



$$R_E = \frac{\Delta E}{E_0}$$

**Energetické rozlíšenie  $R_E$**  je definované pomerom šírky píku  $\Delta E$ , odmeranej v polovičnej výške píku k polohe maxima tohto píku  $E_0$ .

V anglickej literatúre sa  $\Delta E$  označuje **FWHM** – Full Width at Half Maximum



### Príklad pre požiadavku energetického rozlíšenia spektrometrického prístroja

- I Relatívne energetické rozlíšenie, pokiaľ sa týka FWHM prístroja založeného na **scintilačnom detektore** nesmie prekročiť 10% pre 661,7 keV gama čiaru cézia Cs-137 a musí byť uvedený výrobcom.
- I Energetické rozlíšenie prístroja založeného na **germániovom polovodičovom detektore** nesmie prekročiť hodnotu FWHM 2% pre 661,7 keV gama čiaru cézia Cs-137 a nesmie prekročiť 4,0 keV pre 1,3325 MeV gama čiaru kobaltu Co-60 a musí byť uvedený výrobcom.

## Selektivita



- Vhodnosť použitia detektora len pre určitý druh žiarenia sa posudzuje podľa jeho **selektivity**, ktorá udáva pomer citlivosti detektora pre registráciu požadovaného (skúmaného) druhu žiarenia k citlivosti detektora na ostatné druhy žiarenia.

## Energetický rozsah – od MDA do maximálnej merateľnej aktivity



### Minimálna detegovateľná aktivita

Stanovenie minimálnej detegovateľnej početnosti má byť urobené podľa STN ISO 11929. Pre každé jednotlivé meranie sa môže minimálna detegovateľná aktivita stanoviť zo vzťahu:

kde  $\varepsilon$  je účinnosť detekcie (nie účinnosť detektora, správnejšie by bolo použiť citlivosť) pre meranie konkrétneho rádionuklidu v stanovenom orgáne, spravidla vyjadrená v početnosti na jednotkovú aktivitu ( $s^{-1}Bq^{-1}$ );

$L_D$  (*limit of decision*) je detekčný limit vyjadrený v jednotkách početnosti ( $s^{-1}$ )

### Maximálne merateľná aktivita

Pre referenčný nuklid maximálna merateľná aktivita uvedená výrobcom musí byť taká, aby žiadna chyba spôsobená mŕtvou dobou v detekčnom systéme nevnesla chybu do merania väčšiu ako 10 %.

Ak dosadíme do  $n = n_0(1 - n\tau)$  podmienku  $n_0 = 1,1 \cdot n$  (detektor zaregistruje  $n$ , pričom dopadne  $n_0$ )

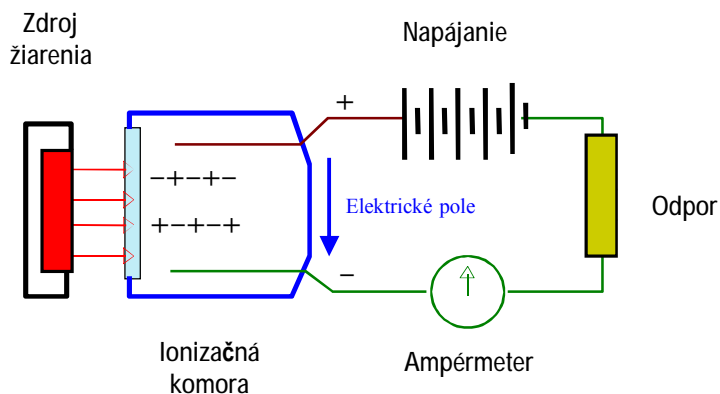
$$MDA = \frac{L_D}{\varepsilon}$$

$$n_{\max} = \frac{0,1}{1,1 \cdot \tau}$$

## Princípy využitia ionizácie na detekciu žiarenia (plynom plnené detektory)



Ionizujúce žiarenie priamo alebo nepriamo ionizuje plynné prostredie detektora



## Počít iónových párov N



Priemerný počet iónových párov, ktoré sa vytvoria po odovzdaní energie  $E$  od primárnej častice vrátane párov vytvorených sekundárnymi elektrónmi v plyne jednotkového objemu závisí od energie potrebnej na vytvorenie jedného iónového páru. Stredná energia potrebná na vytvorenie IP je  $w$ .

$$N = \frac{E}{V \cdot w}$$

$E$  – energia častice vstupujúcej do detektora

$w$  – stredná energia ionizácie plynu

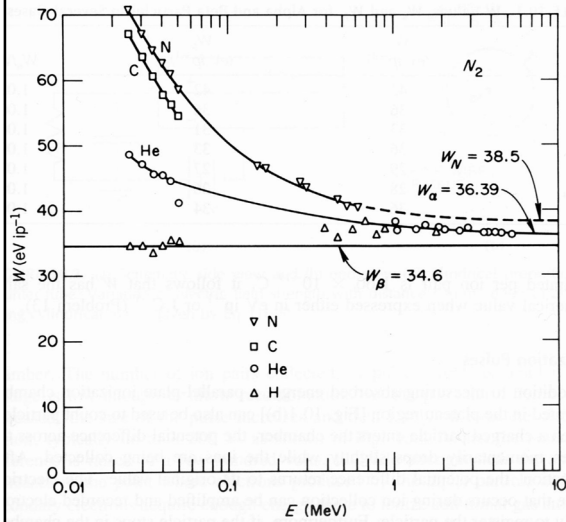
Pre viac častíc:

*Přikon fluencie* = hustota toku častíc ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

*Přikon fluencie energie monoenergetických častíc s energiou  $E$*

$$N = \frac{\Phi \cdot E}{V \cdot w} = \frac{\Psi}{V \cdot w}$$

## Stredná energia ionizácie plynu $w$ (eV/ip)



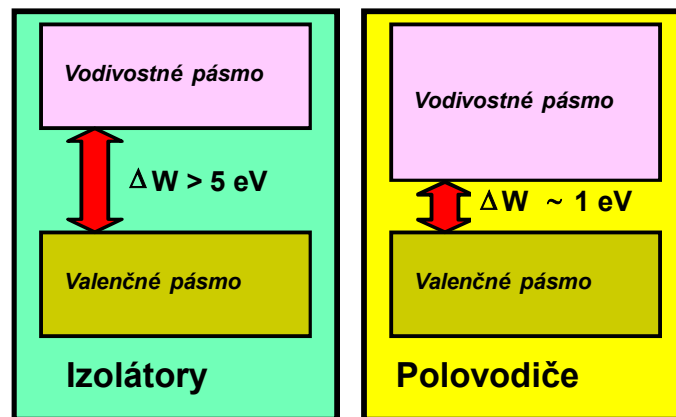
Hodnoty  $w$  v dusíku pre beta častice (elektróny aj protóny), alfa častice (jadrá He), jadrá uhlíka a dusíka v závislosti na ich energii.

Pre ťažšie častice energia potrebná na vytvorenie jedného IP je pri vysokých energiách približne konštantná (t.j. **energia častice môže byť odvodená od počtu vytvorených IP**) ale pri nízkych energiách narastá, pretože narastá podiel energie stratenej na **excitáciu** na úkor ionizácie.

## Stredná energia ionizácie plynu $w$ (eV/ip)

Plyn	Alfa žiarenie	Beta žiarenie	$w_\alpha/w_\beta$
He	43	42	1,02
H <sub>2</sub>	36	36	1,00
O <sub>2</sub>	33	31	1,06
CO <sub>2</sub>	36	33	1,09
CH <sub>4</sub>	29	27	1,07
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28	26	1,08
Vzduch	36	34	1,06

## Ionizácia v izolátoroch a polovodičoch Šírka zakázaného pásma



Izolátorom je napríklad plyn argón, polovodičom je napríklad kremík ( $\Delta W = 1,12 \text{ eV}$ ). Stredná energia potrebná na vytvorenie jedného iónového páru je pre polovodič **kremík 3.6 eV** a pre argón **15 eV**.

## Iónová bilancia v jednotke objemu ionizačnej komory

$$\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

- |  $N$  - počet iónov, ktoré vznikajú v jednotke objemu za jednotku času
- |  $n$  - počet iónov, ktoré sa už v jednotkovom objeme nachádzajú
- |  $\alpha$  - koeficient rekombinácie
- |  $i$  - ionizačný prúd prechádzajúci obvodom
- |  $e$  - náboj iónu
- |  $V$  - objem ionizačnej komory
- |  $\alpha n^2$  - počet iónov, ktoré zanikli rekombináciou v jednotke objemu
- |  $i/Ve$  - počet iónov pozbieraných elektródami



## Iónová bilancia v stacionárnom stave



$$\frac{dn}{dt} = 0$$

$$\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

- | Ak elektrické pole nie je pripojené,  $i = 0$  a teda  $N = \alpha n^2$ .
- | Z toho dostaneme maximálny počet existujúcich iónových párov  $n$ .

$$n = \sqrt{\frac{N}{\alpha}}$$

## Iónová bilancia v stacionárnom stave



$$\frac{dn}{dt} = 0$$

$$\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

- | Keď ionizačný prúd dosiahne hodnotu nasýtenia,  $i = i_{nas}$ , rekombinácia bude nulová  $\alpha n^2 = 0$  a prúd z detektora bude  $i$ .
- | Energia absorbovaná v celom objeme detektora bude rovná  $E_{abs} = \Phi \cdot E = i \cdot w / e$
- | *Prúd nasýtenia je priamo úmerný energii absorbovanej v plyne.*

$$i = i_{nas} = VeN$$

$$i = \frac{e \Phi E}{w}$$

$$E_{abs} = \frac{i \cdot w}{e}$$

## Minimálny detekovateľný príkon fluencie energie



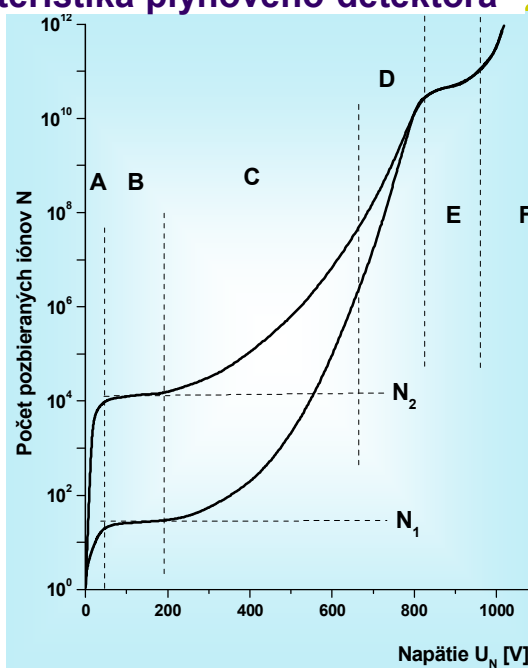
- | Dobrý ampérmeter je schopný odmerať prúdy na úrovni  $10^{-16}$  A.
- | To zodpovedá energii absorbovanej v plyne detektora  $E=iw/e$
- | Nech máme plyn so strednou energiou ionizácie  $w=30$  eV.
- | Vieme, že elementárny náboj je  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  C.
- | Vieme, že  $IA=IC \cdot s^{-1}$

$$E_{abs} = \frac{i \cdot w}{e} = \frac{(10^{-16} \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}) \times 30 \text{ eV}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 1,88 \times 10^4 \text{ eV} \cdot \text{s}^{-1}$$

Taký prúd môže byť vytvorený napr. jednou beta časticou o energii 18,8 keV za sekundu, ktoré za zabrzdia v objeme detektora.

## Voltampérová charakteristika plynového detektora

- A. oblasť Ohmovho zákona, nevyužíva sa na detekciu IŽ
- B. oblasť nasýteného prúdu, ionizačné komory
- C. proporcionálna oblasť, plynové zesilnenie, proporcionálne detektory
- D. oblasť čiastočnej proporcionality, nevyužíva sa detekciu
- E. Geiger - Müllerova oblasť
- F. oblasť samovoľného výboja korónové a iskrové detektory

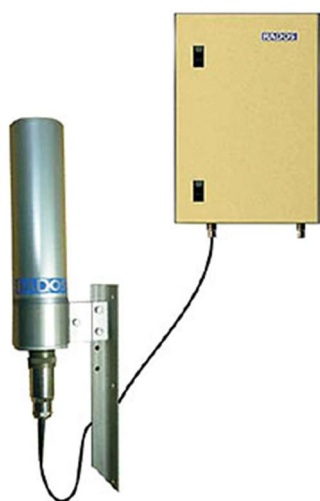


## Príklady použitia GM detektorov



Osobné dozimetre

## GM trubica ako monitor prostredia



- | Detekované žiarenie: gama a X, energetická odozva zodpovedá priestorovému dávkovému ekvivalentu  $H^*(10)$
- | Energetický rozsah: 50 keV až 3 MeV pre rozsah dávkového príkonu 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  až 10 mSv/h a 80 keV až 3 MeV pre rozsah dávkového príkonu 10 mSv/h až 10 Sv/h
- | Typ detektora: 2 halogenové samozhášacie energeticky kompenzované GM trubice

## Plynové detektory neutrónov na báze He-3



- (1) The counter length can be agreed with the customer.  
 (2) PC–proportional counter mode (with gas amplification)  
 IIC–Impulse ionization chamber mode (without gas amplification)  
 (3) He-3 pressure in the counter CN-04 can be increased up to 6 atm, if ordered specifically  
 (4) In case of isotropic flow of thermal neutrons, registration efficiency increases if He-3 pressure is increased, too.

Counter type	CN-01	CN-03	CN-04
Diameter	30 mm	18 mm	30 mm
Length of the operating part (1)	900 mm	100 mm	970 mm
Operation mode (2)	IIC	PC	PC, IIC
He-3 pressure	2 atm	7 atm	2 atm (3)
Own background, not more	0.01 imp/s	0.001 imp/s	0.001 imp/s
Insulation resistance, not less	1011 Om	1011 Om	1011 Om
Operating voltage	400 V	1200 V	400-1200 V
Efficiency of registration of thermal neutrons(4), not less	50%	70%	60%
Charge collection time	4 mcs	2 mcs	2 mcs
Length of working plateau	–	200 V	200 V
Plateau tilt for 100V	–	1%	1%
Operating temperature range	± 50°C	± 50°C	± 50°C
Weight, not more than	0.6 kg	0.2 kg	0.5 kg

## FHT 65 L/LX Monitor kontaminácie rúk a nôh

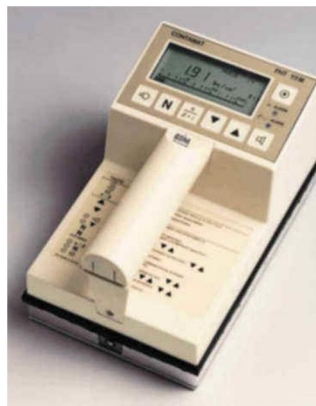
- | **FHT 65 L:**
- | prietokový plynový proporcionálny detektor **Ar+CH<sub>4</sub>, Ar+CO<sub>2</sub> or CH<sub>4</sub>** for **alpha/beta** monitoring
- | **FHT 65 LX:**
- | Uzavretý **xenónový detektor** na **gama** monitoring



## FHT 111 M Contamat ®



- | Meranie povrchovej kontaminácie alfa, beta a gama rádionuklidmi.
- | Používa veľkoplošný proporcionálny plynový detektor a mikroprocesor na výpočty.
- | Výsledok merania v cps, Bq or Bq/cm<sup>2</sup>
- | Súčasné meranie alfa a beta
- | 10 referenčných izotopov v pamäti
- | alarmy
- | vyhľadávací režim so zvukom
- | možnosť odrátania pozadia
- | pamäť pre 128 nameraných údajov

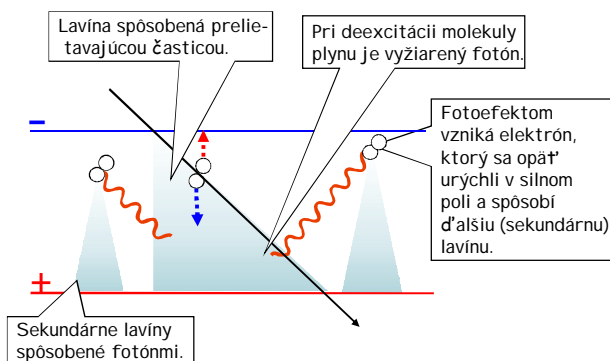


## Geiger-Müllerova trubica



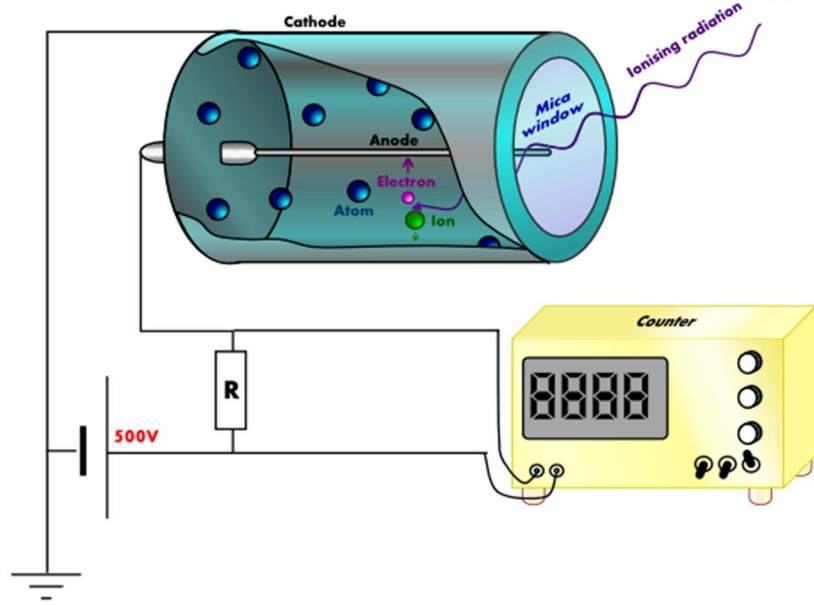
- | Geiger-Müllerov počítač funguje pri tak vysokom napätí, že jediný pár spôsobí výboj v plyne. Dostávame veľký signál, ktorý nezávisí na energii a druhu dopadajúcej častice.

Namiesto jednej lavíny vzniká veľa lavín pozdĺž celej dĺžky anódy. Tieto sekundárne lavíny sú spôsobené fotónmi, ktoré sú emitované pri deexcitácii molekúl. Fotóny prelietavajú detektorom a spôsobujú ďalšiu ionizáciu.

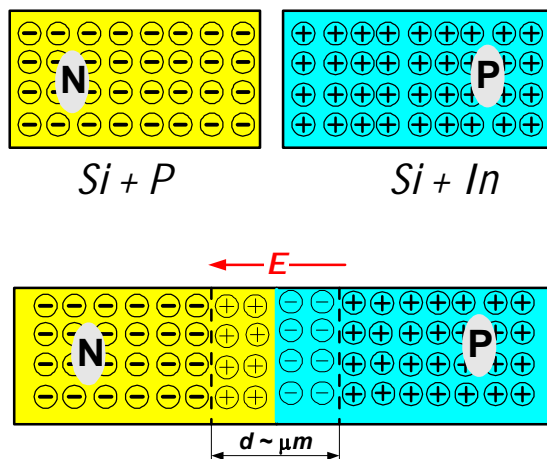


Náplňou detektoru sú vzácne plyny (argón), do ktorých sa pridáva prímes (napr. etylén), ktorý pohlcuje fotóny vznikajúce pri deexcitácii a tým preruší („zahasí“) výboj.

## Geiger-Müllerov počítač so sľudovým okienkom



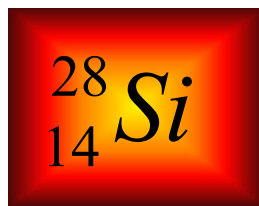
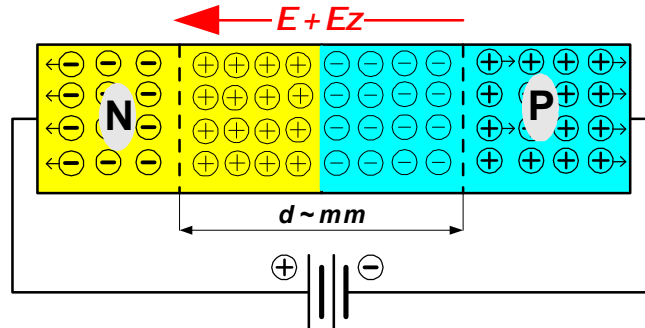
## Polovodičové detektory Vytvorenie ochudobnenej vrstvy



Pri spojení polovodiča typu p a n vznikne v okolí rozhrania **oblasť priestorového náboja** nazývaná tiež P-N prechod.

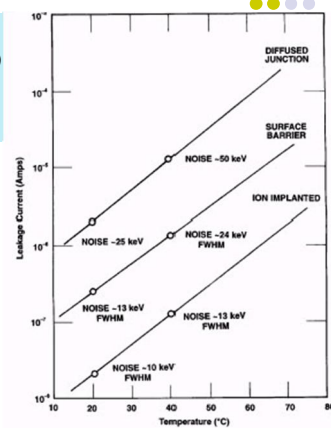
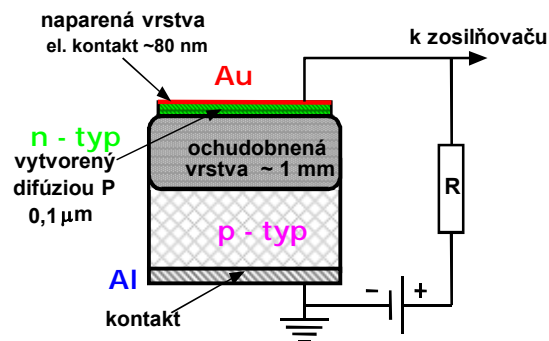
Oblasť kladného náboja je tvorená ionizovanými donormi v polovodičoch typu n a oblasť záporného náboja je tvorená ionizovanými akceptormi v polovodičoch typu p.

## Vytvorenie ochudobnenej vrstvy



## Polovodičové kremíkové detektory

1. **DJ** - detektory s difúznou vrstvou (Diffused Junction)
2. **SBD** - detektory s povrchovou bariérou (Surface Barrier Detector)
3. **PIPS** - pasivované detektory s ióno-implantovaným kontaktom (Passivated Implanted Planar Silicon)



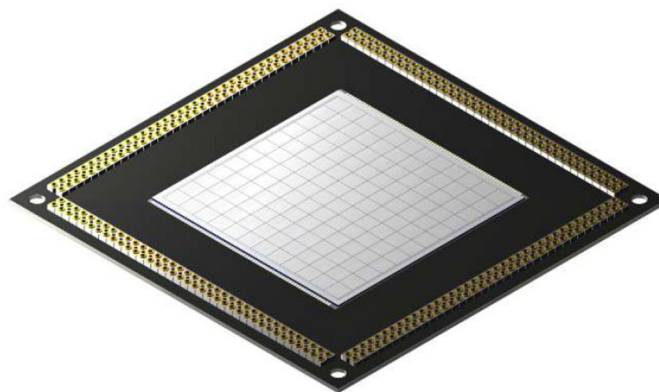
## Single area totally depleted ion implanted



**MSD024 detector supplied as an alpha monitor.**

RADIATION HARDNESS:	Survival to $10^{14}$ Neutrons, $10^{15}$ Protons
CAPACITANCE:	Subject to depletion depth e.g. 40 pF/cm for 300 $\mu\text{m}$
LEAKAGE CURRENT:	1 nA/cm to 8 nA/cm subject to active area and depletion depth.
OPERATING TEMPERATURE RANGE:	-65°C to +125°C
ENVIRONMENTAL TESTING OPTIONS:	Space qualified, military, industrial, research, physics projects.

## Silicon position sensitive pixel detector



**MSPX 12x12 with double metal tracking mounted on a double stack transmission PCB.**



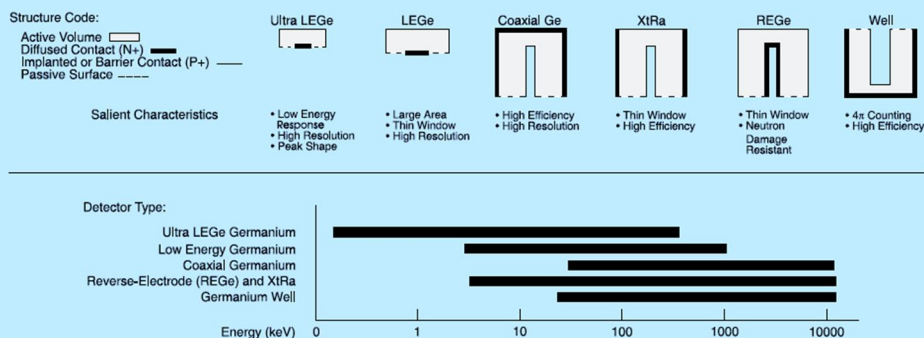
## Pravdepodobnosť prechodu elektrónov z valenčného do vodivostného pásma vplyvom tepelných excitácií.

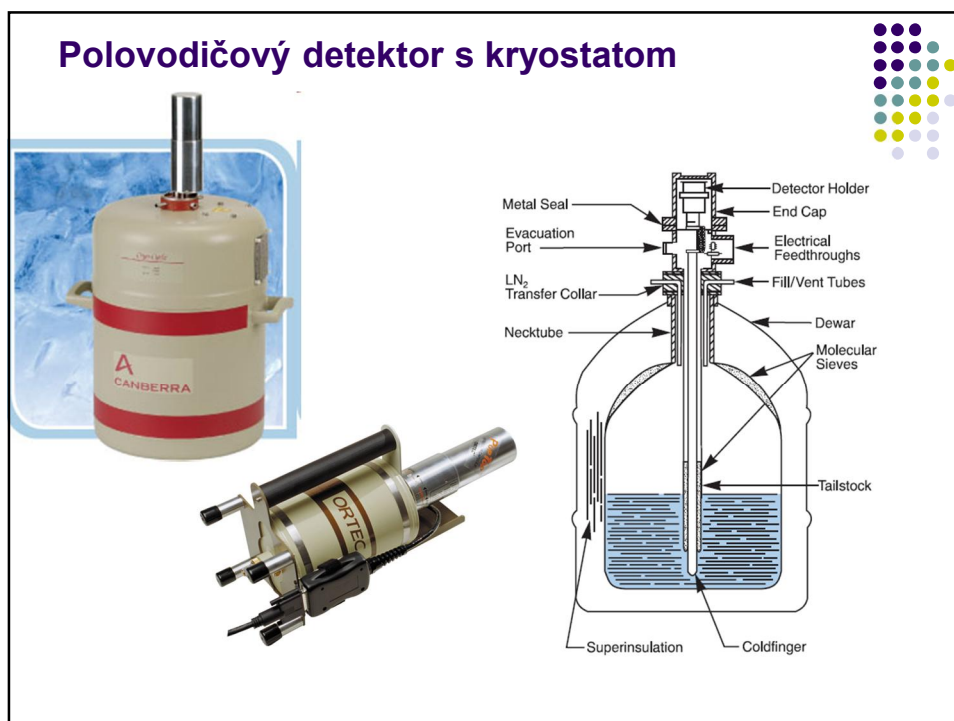


$$p(T) = \text{const} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right)$$

- | Šírka zakázaného pásma  $\Delta W$
- | pri T=300 K:  $\Delta W_{\text{Si}} = 1,115 \text{ eV}$        $\Delta W_{\text{Ge}} = 0,665 \text{ eV}$
- | pri T= 0 K:  $\Delta W_{\text{Si}} = 1,165 \text{ eV}$        $\Delta W_{\text{Ge}} = 0,746 \text{ eV}$
- | Nosiče náboja, ktoré sa vytvárajú v pracovnom objeme polovodiča vplyvom tepelných excitácií spôsobujú v detekčnom obvode šumový prúd.
- | Šumový prúd by nemal presahovať  $10^{-10} - 10^{-8} \text{ A}$ , aby sme mohli registrovať prúd vznikajúci ionizujúcim žiarením.
- | Túto podmienku spĺňa:
  - | kremík už pri izbovej teplote,
  - | germánium sa musí chladíť na teplotu kvapalného dusíka (T = 77 K).

## Rôzne typy Ge detektorov a ich vlastnosti

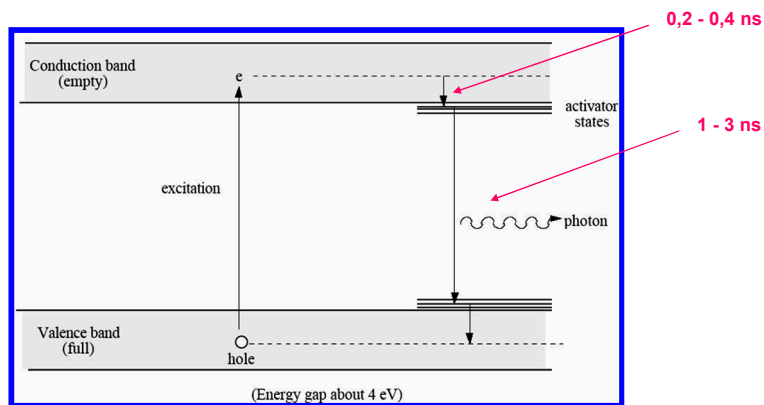




## Luminiscencia

- I **Luminiscencia** predstavuje emisiu svetla niektorými látkami - luminofórmami. Luminofóry môžu absorbovať energiu, časť tejto energie si uchovať a premeniť ju na svetelné žiarenie.
- I **Scintilácia** - okamžitá, nestimulovaná, rýchla luminiscencia, vyvolaná dopadom ionizujúceho žiarenia
- I **Termoluminiscencia** - oneskorená luminiscencia stimulovaná teplom
- I **Rádiotermoluminiscencia** - termoluminiscencia, ktorá vzniká len po predchádzajúcom ožiarení ionizujúcim žiarením
- I **Fotoluminiscencia** - luminiscencia stimulovaná svetlom
- I **Fluorescencia** - fotoluminiscencia, ktorá trvá len dovtedy kým trvá osvetlenie
- I **Fosforescencia** - fotoluminiscencia, ktorá trvá aj po prerušení osvetlenia

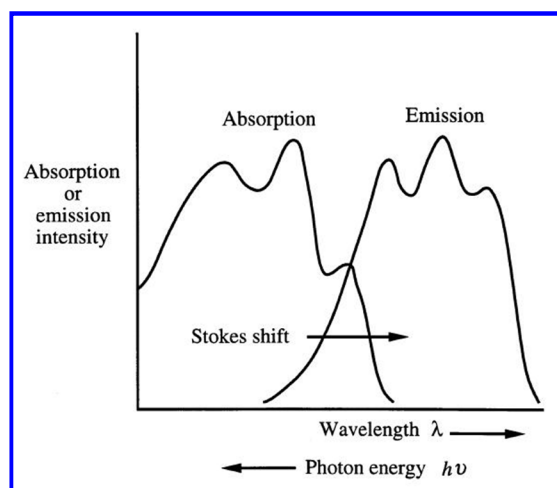
## Vznik scintilácií



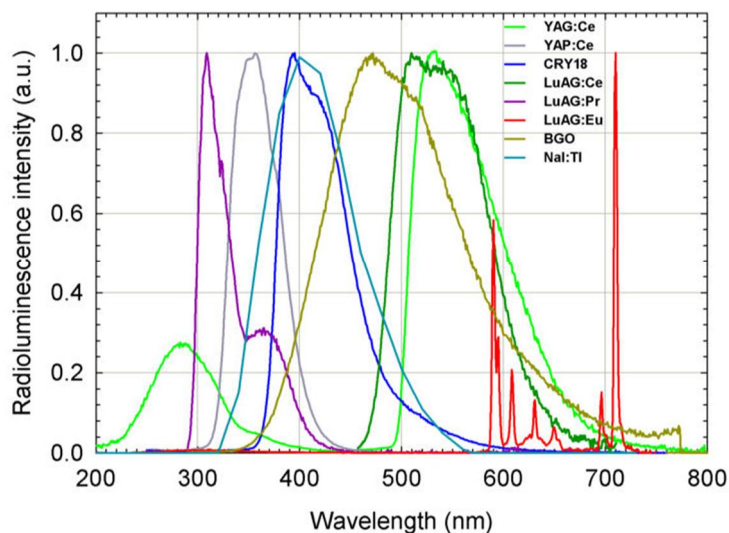
**Inorganické scintilátory**, ako napr.  $\text{NaI(Tl)}$  generujú svetelné záblesky pri deexcitácii na energetických hladinách aktivátora.

**Organické scintilátory**, ako napr. polystyrén  $(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2)_n$  zasa pri deexcitácii z molekulových hladín (UV záblesky).

## Posun spektra fotónov v scintilátore



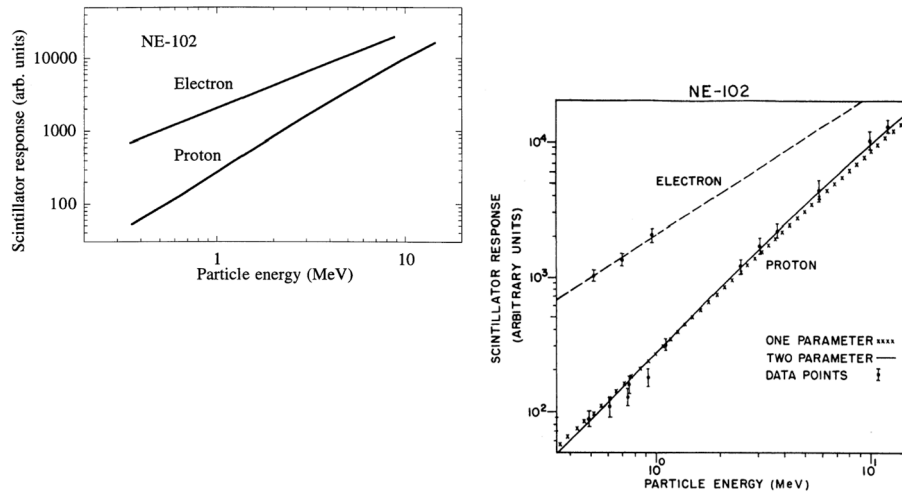
## Emisné spektrum scintilátorov



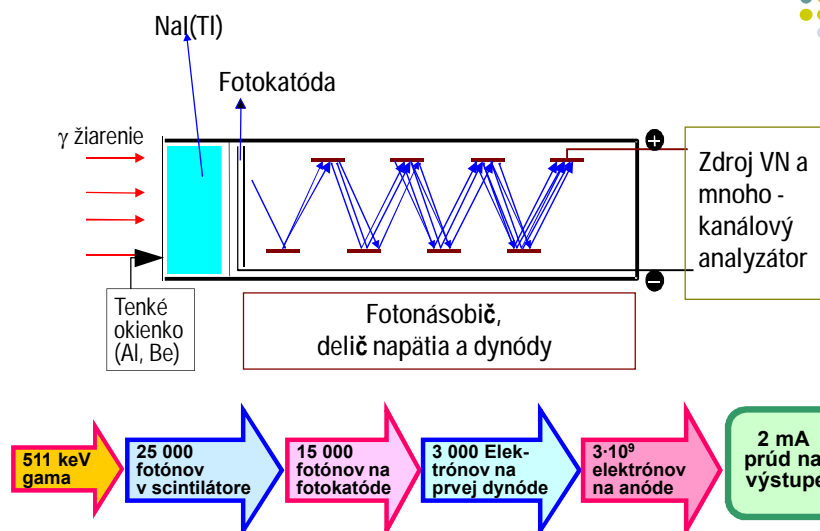
## Požiadavky na scintilátory

- | Vysoká **luminiscenčná účinnosť** - pomer absorbovanej a emitovanej energie. Relatívna luminiscenčná účinnosť udáva pomer k štandardu, ktorým je NaI(Tl) pre gama žiarenie a antracén pre beta.
- | Maximum intenzity vyžarovaného svetla ( $\lambda_{\max}$ ) musí ležať v oblasti maximálnej citlivosti použitého fotonásobiča.
- | Scintilátor musí byť čo **najprehľadnejší** pre vyžarované svetlo.
- | **Dosvit** scintilátora má byť čo najkratší, aby mal detektor vysokú rozlišovaciu schopnosť.
- | **Hustota** scintilátora by mala byť čo najväčšia, aby mali väčšiu schopnosť absorbovať gama žiarenie.
- | Intenzita vyžarovaného svetla má byť **úmerná** energii žiarenia (mernej ionizácii). To umožňuje použiť scintilátory na spektrometriu.

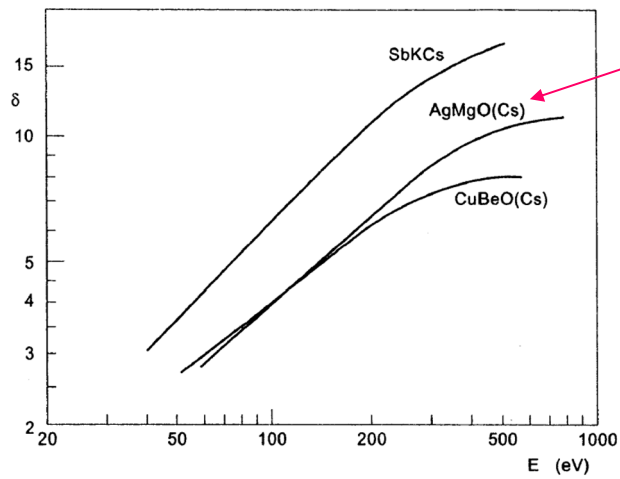
## Intenzita vyžarovaného svetla je úmerná energii žiarenia (mernej ionizácii)



## Principiálna schéma scintilačného detektora

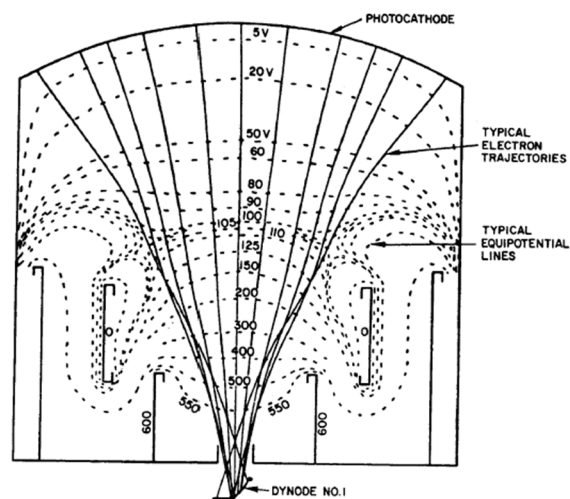


## Výt'azok elektrónov na dynódach v závislosti od ich energie



Materiál dynód

## Usmernenie elektrónov z fotokatódy na prvú dynódu



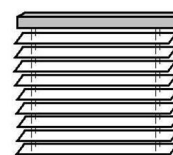
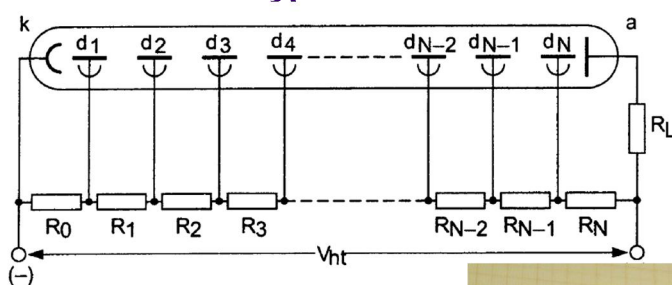
## Materiál fotokatódy

QE - Quantum Efficiency



Cathode type	Composition	Peak QE	Peak $\lambda$
S1	AgOCs	0.4%	800 nm
S10	BiAgOCs	7%	420 nm
S11	CS <sub>3</sub> SbO	21%	390 nm
S20 (multi-alkali)	Na <sub>2</sub> KSbCs	22%	380 nm
Bialkali	K <sub>2</sub> CsSb	27%	380 nm
Bialkali (high temp)	Na <sub>2</sub> KSb	21%	360 nm
Bialkali (high temp)	KCsRbSb	24%	440 nm
Bialkali	RbCsSb	25%	450 nm
Solar blind	CeTe	18%	200 nm
Solar blind	CsI	15%	135 nm

## Delič napätia fotonásobiča Fotonásobič typu benátska roleta



Spravidla dosahuje pripojené VN 1-2 kV, pričom je rozdelené na 8-14 dynód s potenciálovým rozdielom 100 - 150 V.

Aby sa lepšie zozbieral náboj na prvej dynóde, je tam potenciálový rozdiel väčší ( $R_0 = 3 \cdot R_1$ )

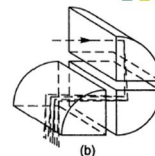
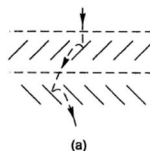


## Rôzne usporiadanie dynód



a) **Venetian blind – benátska roleta**

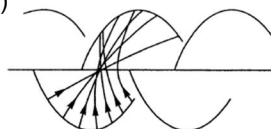
Allows simple input system with high collection efficiency. Good gain stability, but mediocre timing performance



b) **Box and Grid:** characteristics similar to a)

c) **Linear focusing – časovo fokusované:**

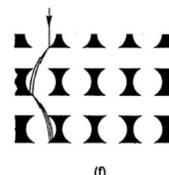
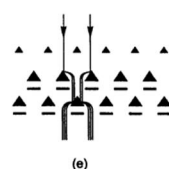
good timing characteristics



d) **Circular cage – kruhová sieťka:** compact

e) Mesh dynodes – **sieť dynód:**

f) low gain, but usable up to  $B=1T$



g) Foil dynodes – **dierkovaná fólia:**

perforated metal foils – particularly useful for multi-channel anodes

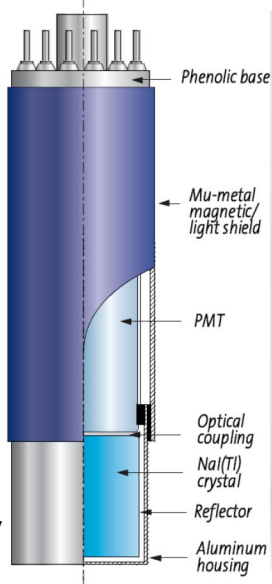
## Napájacia päťica a scintilačný detektor s integrovaným fotonásobičom



**Scintilačný kryštál**, napr. NaI(Tl) je umiestnený v hermetickom púzde z ľahkého kovu (Al) natretom z vnútra svetelným reflektorom.

Optickým spojom je pripojený k okienku **fotonásobiča (PMT – photomultiplier tube)**, ktorý je vo svetlotesnom magneticky odtienenom púzde. Detekčná časť je ukončená bázovými kontaktami uchytenými v izolátore (fenoplast).

**Napájacia päťica** obsahuje deličku vysokého napätia pre fotonásobič, predzosilňovač impulzov a v moderných prístrojoch aj mnohokanálový analyzátor impulzov.





## Parametre moderných scintilátorov



Physical properties	NaI:Tl	YAG:Ce	LuAG:Ce	YAP:Ce	BGO	CaF:Eu	CsI:Tl
<b>Density[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>3.67</b>	<b>4.57</b>	<b>6.73</b>	<b>5.37</b>	<b>7.13</b>	<b>3.18</b>	<b>4.51</b>
Hardness [Mho]	28.5	8.5	8.6	-	4	2	5.8
Index of refraction	1.85	1.82	1.84	1.95	2.15	1.44	1.78
Crystal structure	Cubic	Cubic	Cubic	Rhombic	Cubic	Cubic	Cubic
Melting point [°C]	651	1970	2020	1875	1050	1360	621
Hygroscopic	Yes	No	No	No	No	No	Slightly
Linear coef. thermal expansion [10 <sup>-5</sup> /K]	4.75	0.8-0.9	-	0.4-1.1	0.7	1.95	5
<b>Chemical formula</b>	<b>NaI</b>	<b>Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub></b>	<b>Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub></b>	<b>YAlO<sub>3</sub></b>	<b>Bi<sub>4</sub>(GeO<sub>4</sub>)<sub>3</sub></b>	<b>CaF<sub>2</sub></b>	<b>CsI</b>
<b>Luminescence properties</b>							
Integrated light output [% NaI:Tl]	100	40	20	70	15-20	50	45
Wavelength of max. emission [nm]	415	550	535	370	480	435	550
Decay constant [ns]	230	70	70	25	300	940	900
Afterglow [% at 6 ms]	0.5-5	<0.005	-	<0.005	<0.005	<0.3	<2
Radiation length [cm] for 511 keV	2.9	3.5	-	2.7	1.1	3.05	1.86
Photon yield at 300 K [10 <sup>3</sup> Ph/MeV]	38	35	20	25	8-10	23	52

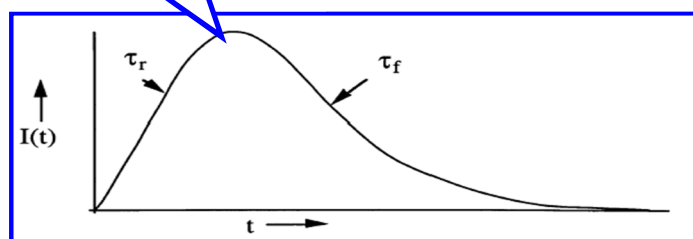
## Rozlišovacia schopnosť scintilátora závisí od dosvitu

Časový priebeh svetelného záblesku v scintilátore s časovými konštantami  $\tau_r$  a  $\tau_f$

$$I(t) = I_0 \left( e^{-t/\tau_f} - e^{-t/\tau_r} \right)$$

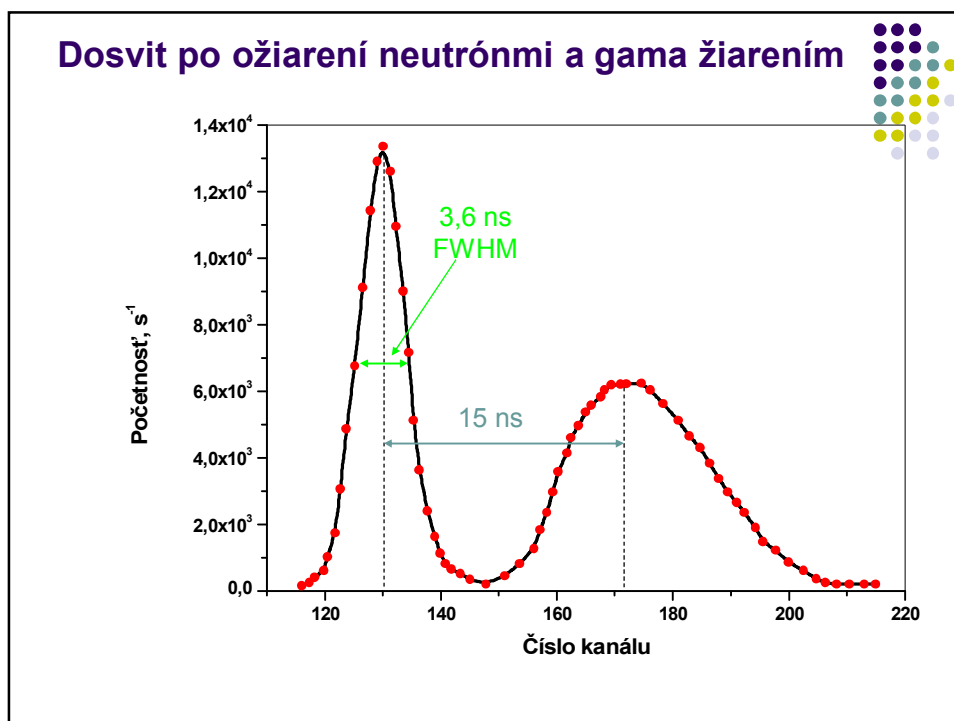
$\tau_r$  - rise, vzostup

$\tau_f$  - fall, pokles resp. dosvit



$\tau_f$  - dosvit charakterizuje čas, za ktorý klesne intenzita svetelného záblesku e - krát, má byť čo najkratší!





### Prehľad anorganických (kryštalických) scintilačných materiálov

Materiál	$\lambda_{\max}$ (nm)	$\tau_f$ (ns)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Fotónov na 1 MeV
Nal(Tl) (20°C)	415	230	3.67	38 000
pure Nal (-196°C)	303	60	3.67	76 000
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (20°C)	480	300	7.13	8 200
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (-100°C)	480	2000	7.13	24 000
CsI(Na)	420	630	4.51	39 000
CsI(Tl)	540	800	4.51	60 000
CsI(pure)	315	16	4.51	2 300
CsF	390	2	4.64	2 500
BaF <sub>2</sub> (slow)	310	630	4.9	10 000
BaF <sub>2</sub> (fast)	220	0.8	4.9	1 800
Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> (Ce)	440	60	6.71	10 000
CdWO <sub>4</sub>	530	15000	7.9	7 000
CaWO <sub>4</sub>	430	6000	6.1	6 000
CeF <sub>3</sub>	340	27	6.16	4 400
PbWO <sub>4</sub>	460	2, 10, 38	8.2	500
Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> (Ce)	420	40	7.4	30 000
YAlO <sub>3</sub> (Ce)	390	31	5.35	19 700
Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> (Ce)	420	70	2.70	45 000

Mnohonásobná emisia

## Vlastnosti organických scintilátorov



Material	State	$\lambda_{\max}$ [nm]	$\tau_f$ [ns]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	photons/MeV
Anthracene	crystal	447	30	1.25	$1.6 \cdot 10^4$
Pilot U	plastic	391	1.4	1.03	$1.0 \cdot 10^4$
NE104	plastic	406	1.8	1.03	$1.0 \cdot 10^4$
NE102	liquid	425	2.6	1.51	$1.2 \cdot 10^4$



## Svetlovody - light guides



- | A variety of raw materials are used depending on the scintillation material and application:
  - | organic glass (PMMA)
  - | special organic glass for near UV
  - | optical glass (BK7)
  - | quartz glass
  - | organic glass or quartz glass fibers
  - | fiber optic plate (FOP) or taper
  - | sapphire
  - | YAG(pure)

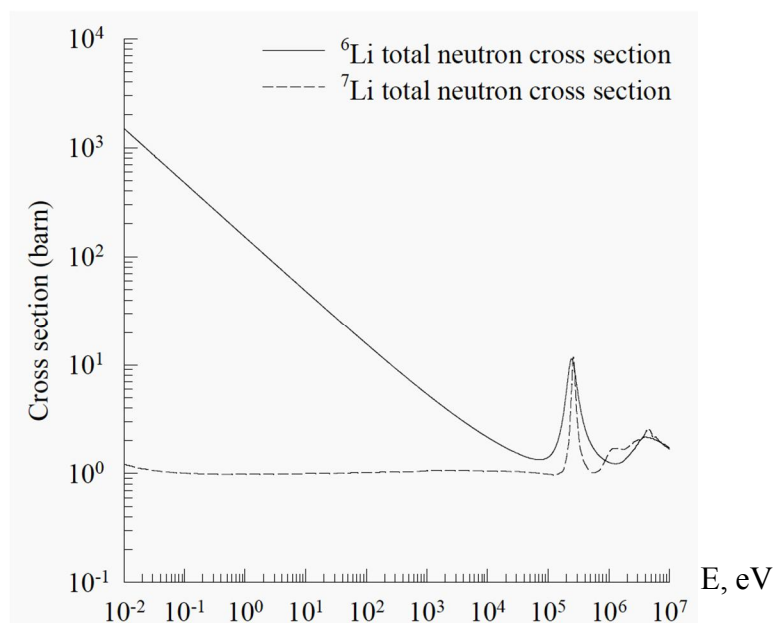


## Scintilačný detektor neutrónov na báze ${}^6\text{Li}$

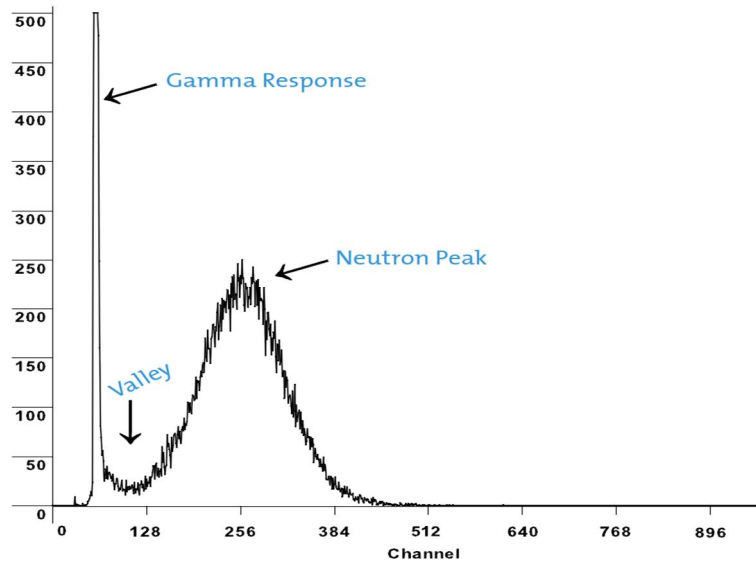


- |  ${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}(\text{Ag})$  je homogénne zmiešané so spojivom a vylisované na 100  $\mu\text{m}$  tenké fólie
- | Využíva sa reakcia  ${}^6\text{Li} + n = {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4.8 \text{ MeV}$
- | Produkty reakcie spôsobujú v ZnS záblesky, ktoré sa svetlovodom s vlnovým posunom vedú k fotonásobiču
- | Impulzy od gama žiarenia sa oddeľujú diskriminátorom (PSD – Pulse Shape Discriminator)

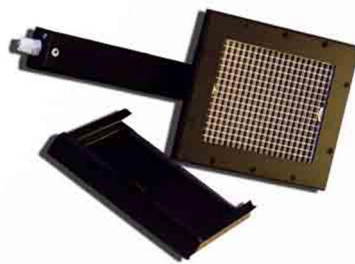
## Mikroskopický účinný prierez lítia



## Scintilačný detektor neutrónov na báze ${}^6\text{Li}$



## ALPHA-BETA SURFACE CONTAMINATION DETECTOR



<b>Detector</b>	<b>Plastic scintillator + ZnS</b>
Measurement range of alpha radiation energy	3–10 MeV
Measurement range of beta radiation energy	0.3–3 MeV
Measurement range of alpha flux density	$1.5 \times 10^3$ p/min $\text{cm}^2$
Measurement range of beta flux density	$2\text{--}5 \times 10^3$ p/min $\text{cm}^2$
Measurement error	$\pm 20\%$
Protection	IP54
Working temperature	0 to + 50° C (or - 25 to + 50° C)
Power supply	9–18 V, 40 mA

## FHT 59 C, FHT 59 Si... Monitor aerosólov

- I Meranie **celkovej alfa a beta aktivity** aerosólov v plynných výpustiach jadrových zariadení.  
Detektor: scintilačný resp. polovodičový kremíkový (s povrchovou bariérou alebo PIPS).
- I **Celková aktivita** sa líši od **sumárnej aktivity** tým, že pri meraní sa používa spoločná účinnosť detekcie pre všetky detekovateľné rádionuklidy.
- I Pre alfa aktivitu sa používa účinnosť pre amerícium  $^{241}\text{Am}$  a pre beta aktivitu účinnosť pre  $^{90}\text{Sr}$ .



## Stacionárne meradlo skrytej rádioaktivity

- I Použitie:
  - I monitorovanie rádioaktivity v doprave (autá, vlaky, lode)
  - I na hraničných prechodoch, na letiskách, v železniarňach, šrotoviskách, jadrových zariadeniach.
- I Modulárne usporiadanie umožňuje použitie 2 až 8 veľkoplošných plastických scintilačných detektorov 100 x 50 x 5 cm typ FHT 1388

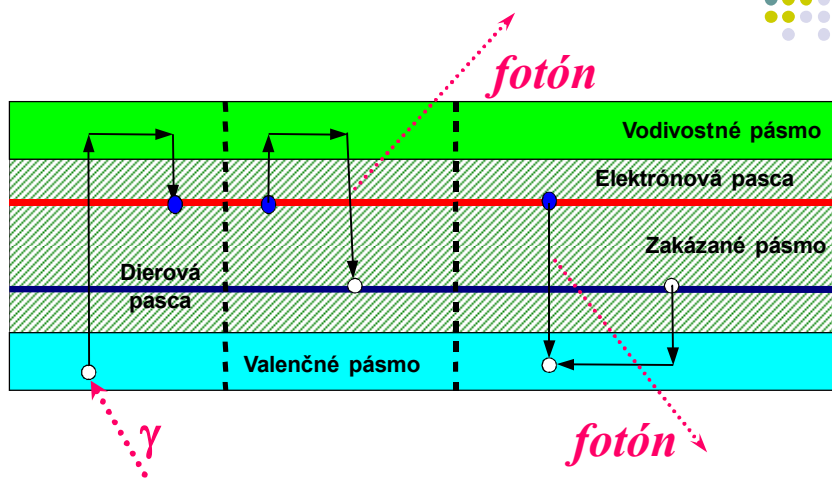


## TLD dozimetre



- I **Luminiscencia** predstavuje emisiu svetla niektorými látkami - luminofórmami. Luminofóry môžu absorbovať energiu, časť tejto energie si uchovať a premeniť ju na svetelné žiarenie.
- I Využitie v dozimetrii:
- I **Scintilácia** - okamžitá, nestimulovaná, rýchla luminiscencia
- I **Termoluminiscencia** - oneskorená luminiscencia stimulovaná teplom
- I Fotoluminiscencia - oneskorená luminiscencia stimulovaná svetlom (UV)

## Podstata TLD



## Charakteristiky materiálov TLD



### Charakteristiky niektorých termoluminiscenčných materiálov

Typ TLD	Z <sub>ef</sub>	Hlavný pik (°C)	Emisné maximum (nm)	Relatívna citlivosť	Fading (pri 25 °C)
LiF:Ti,Mg	8,3	200	400	1	5%/rok
LiF:Na,Mg	8,3	200	400	1	5%/rok
LiF:Mg,Cu,P	8,3	210	400	25	5%/rok
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Mn	7,3	220	605	0,2	4%/mesiac
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Cu	7,3	205	368	2	10%/2mesiace
Mg <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Dy	8,4	190	490	10	4%/mesiac
BeO	7,1	190	200-400	0,2	8%/2mesiace
CaSO <sub>4</sub> :Dy	14,5	220	480-570	30	1%/2mesiace
CaSO <sub>4</sub> :Tm	14,5	220	452	30	1-2%/2mesiace
CaF <sub>2</sub> :Mn	16,3	260	500	5	16%/2tyždne
CaF <sub>2</sub> (prír.)	16,3	260	380	23	veľmi malý
CaF <sub>2</sub> :Dy	16,3	215	480-570	15	8%/2mesiace

## Používanie TLD dozimetrov





## TLD dozimetre SLM



1. **TLD typu BG2 je schopný monitorovať:**
  - I fotónové žiarenie v energetickom rozsahu 20 keV – 10 MeV (t.j. aj X žiarenie)
  - I beta žiarenie v energetickom rozsahu 170 keV – 2,7 MeV fotónového a beta žiarenia
2. **TLD typu NBG je schopný monitorovať** okrem fotónového a beta žiarenia vo vyššie uvedených rozsahoch aj tepelné neutróny (albedo dozimeter)
3. **Prstový aj náramkový TLD** je určený ako doplnkový dozimeter pre použitie na pracoviskách so zvýšeným rizikom ožiarenia prstov, resp. rúk, kde sa vyskytujú zdroje fotónového žiarenia energie 20 keV až 10 MeV. Výsledok merania odozvy dozimetra sa udáva ako **ekvivalentná dávka** v mieste umiestnenia TLD (na najexponovanejšom mieste končatín) v jednotkách Sievert. Bez bližšej špecifikácie ožarovacích podmienok možno prstovým a náramkovým TLD merať hodnoty od 0,1 mSv do 20 Sv s presnosťou do  $\pm 35\%$ .

## TLD dozimetre SLM



- I Výsledok merania odozvy uvedených TLD je podľa Nariadenia vlády č. 345/2006 Z.z. uvádzaný v jednotkách Sievert (Sv) ako:
  - I **osobný dávkový ekvivalent Hp(10)**  
**osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 10 mm**
  - I **ekvivalentná dávka v očnej šošovke Hp(3)**  
**osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 3 mm**
  - I **ekvivalentná dávka v koži a končatinách Hp(0,07)**  
**osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 0,07 mm**
  - I **osobný dávkový ekvivalent od neutrónov Hpn(10)**
- I Z hodnôt vyššie uvedených veličín sa dá stanoviť aj efektívna dávka z externých zdrojov  $I\dot{Z}$  ( $E_{ext}$ ).
- I Bez bližšej špecifikácie ožarovacích podmienok možno uvedenými celotelovými osobnými TLD merať hodnoty od 0,05 mSv do 20 Sv s presnosťou lepšou ako  $\pm 35\%$ .
- I Odozva TLD mierne klesá s časom a pri spracovaní nameraných dát sa uvažuje s korekciou.

## Fyzikálne parametre TLD



- I TLD z LiF materiálov, používané pri vyhodnocovaní systémov HARSHAW 6600 sú charakterizované veľmi dobrou **lineárnou závislosťou odozvy** dávky v rozsahu od 0,01 mGy do 1 Gy a supralineárnou závislosťou od 1 do 20 Gy.
- I Súčasne sú charakteristické **nízkou energetickou závislosťou** v oblasti pod 100 keV (30 keV/137Cs = cca 1,3) a prakticky nezávislosťou odozvy v celom zvyšnom rozsahu energií detekovaného gama žiarenia.
- I Odozva meraného signálu TLD voči prijatej dávke nelineárne klesá s časom, ale pri vyhodnocovaní je korigovaná diferencovanou kalibráciou pre rôzne typy dozimetrov a rôzne doby expozície.

## Fyzikálne parametre TLD – vplyv okolia



- I Vzhľadom na integrálny charakter TLD, každý integruje aj informáciu o dávke z externého IŽ z prírodných zdrojov, t.j. aj v dobe, keď ho pracovník nepoužíva priamo pri práci so zdrojmi IŽ, ako aj počas jeho uloženia a transportu od užívateľa do OOD SLM a späť.
- I **Úroveň prírodného pozadia** v našej zemepisnej oblasti, na základe dlhodobých meraní TL dozimetrami sa pohybuje od cca 0,04 do 0,08 mSv/ mesiac, v závislosti od časových variácií kozmického žiarenia a skutočných radiačných parametrov okolia.
- I Informáciu o dávke môže nepriaznivo ovplyvniť tiež **teplota** okolia (vysoké teploty nad 35°C) a ďalšie fyzikálne podmienky (priame UV žiarenie, el. výboj a pod.) ako aj **znečistenie** citlivých častí TLD (mastné kyseliny, prach a pod.). Je dôležité preto chrániť TLD pred všetkými škodlivými vplyvmi prostredia, puzdra zbytočne neotvárať a TLD udržiavať v čistote.

## Výhody TLD Dozimetrie:



1. Široký **interval** merania dávok gama žiarenia.
2. Vysoká **citlivosť**, jednoduché použitie, malé rozmery.
3. **Malý fading** (strata údajov), čo umožňuje dlhodobé použitie.
4. Vyhodnocovaný svetelný signál je priamo **úmerný** absorbovanej dávke čo uľahčuje kalibráciu meraní.
5. LiF kryštál je pre osobnú dozimetriu gama žiarenia vhodný **tkanivu ekvivalentný** materiál. (To neplatí pre neutróny. Svetelný signál je veľmi závislý od energie neutrónov).

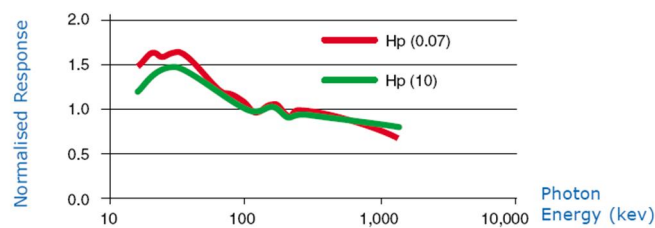
## Nevýhody TLD dozimetrov.



1. Vyhodnocovanie dozimetrov **zničí** nameraný záznam a preto môže byť vykonané len raz.
2. Bez vyhodnocovania sa nedá povedať, či bol detektor ožiarený alebo nie. Je treba všetky dozimetre **vyhodnotiť** a žíhaním pripraviť pre použitie v ďalšom období.
3. Prach na detektore môže pri vyhodnocovaní splanúť a byť zaregistrovaný ako **falošný** signál.
4. TLD materiál je citlivý na **UV** svetlo a preto musí byť uzavretý do nepriehľadného obalu.

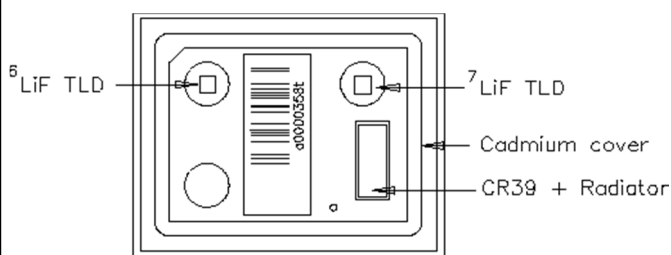
## Gama a beta TLD dozimetre

Detection	X-ray and Gamma-ray	Beta Particles
Dose Range Measured	0.05 mSv to 10 Sv	0.05 mSv to 10 Sv
Energy Range Detected	10 keV to 10 MeV for Hp (0.07) 15 keV to 10 MeV for Hp (10)	700 keV to 3.5 MeV ( $E_{max}$ ) for Hp (0.07)
Periods of Use	2, 4, 8, 13 weekly (calendar issue periods are also available)	2, 4, 8, 13 weekly (calendar issue periods are also available)



Závislosť odozvy TLD dozimetra od energie pre Hp(10) a Hp(0.07) normalizovaná k žiareniu cézia-137 na hodnotu 0,9.

## TLD osobný dozimeter neutrónov



Izotopy  ${}^6\text{Li}$  a  ${}^7\text{Li}$  sú citlivé na beta a gama žiarenie.

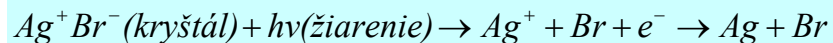
Len  ${}^6\text{Li}$  je citlivý na tepelné neutróny (0.025 eV to 0.6 MeV) reakciou



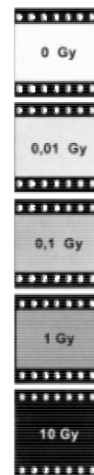
Dozimeter obsahuje tabletky  ${}^7\text{LiF}$  a  ${}^6\text{LiF}$ . Celý je pokrytý kadmiovým plieškom aby odmietol priame pomalé neutróny. Detektor potom detekuje iba neutróny, ktorých zdrojom sú nadtepelné neutróny, spomalené v tele pracovníka a odrazili sa z vnútra tela späť do detektora. Taký dozimeter sa nazýva **albedo** dozimeter.

Na detekciu rýchlych neutrónov sa používa stopový detektor CR39+radiator.

## Filmové dozimetre



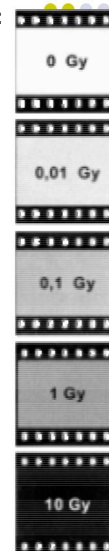
- I Ich činnosť je založená na schopnosti ionizujúceho žiarenia spôsobiť sčernenie citlivej fotografickej vrstvy (vytvorenej suspenziou zŕn halogenidov striebra AgBr v želatíne).
- I Stupeň sčernenia citlivej vrstvy je úmerný dávke žiarenia, ktoré na ňu dopadne a vyhodnocuje sa densitometrom.
- I Za predpokladu správnej expozície (spredu) je citlivosť filmových dozimetrov na fotóny ( $E > 0,1 \text{ MeV}$ ) 0,10 mGy až 0,15 Gy pre rutinnú dozimetriu a 0,05 Gy až 10 Gy pre dozimetriu havarijnú.



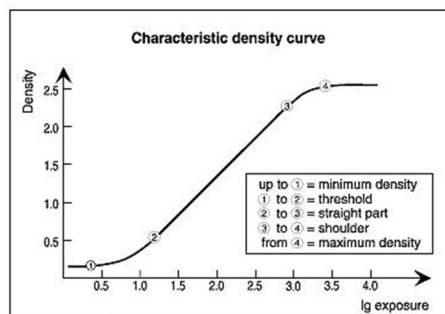
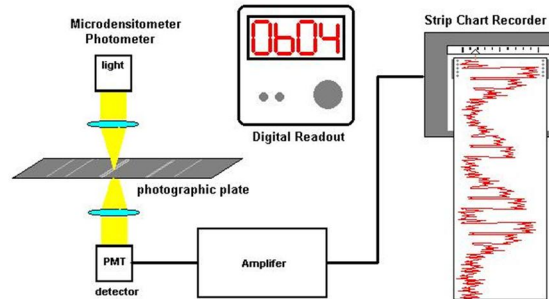
## Neistoty merania filmovými dozimetrami

- I Neistoty v údajoch filmových dozimetrov súvisia najmä s týmito faktormi:
  - I energetická závislosť filmu,
  - I smerová závislosť veľkosti sčernenia od dávky,
  - I nepresnosť pri ciachovaní,
  - I nehomogenita emulzie a
  - I chyby merania optickej hustoty densitometrom.

Citlivosť filmových dozimetrov			
Typ žiarenia	Rutinná dozimetria	Havarijná dozimetria	Presnosť merania
$\gamma$ ( $E > 0,1 \text{ MeV}$ )	0,1-150 mGy	0,05-10 Gy	$\pm 25 \%$
$\beta$ ( $E > 0,7 \text{ MeV}$ )	0,1-150 mGy	0,05-10 Gy	$\pm 25 \%$

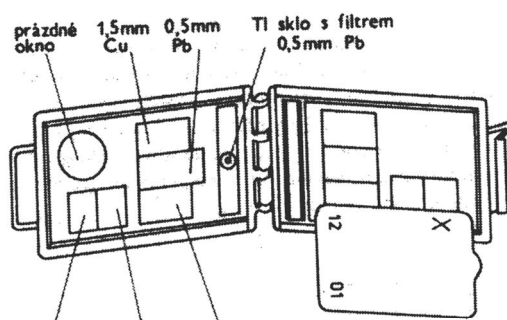


## Vyhodnocovanie filmových dozimetrov



Characteristic Curve © AGFA (1999)

## Filmové dozimetre s filtrami



150 mg/cm<sup>2</sup> umělá hmota

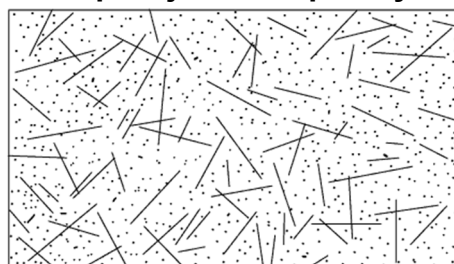
0,05mm Cu

0,5mm Cu



## Stopové detektory

- Žiarenie pri interakcii v tuhých látkach vytvára reťazové defekty - stopy (tracks), ktoré sú viditeľné pod elektrónovým mikroskopom, alebo po chemickom leptaní sa dajú zväčšiť a sú viditeľné aj pod obyčajným mikroskopom.
- Sú vhodné hlavne na meranie nabitých častíc a neutrónov (hlavne meranie radónu v ovzduší).
- Dávka sa určuje počítaním stôp na jednotke plochy detektora.



Positions of Measured Particle Tracks in the Cellulose Nitrate (CN) Layer of the PNTD Stack Flown on Cosmos 936

## Aktivačné detektory

- Sa používajú na určovanie hustoty toku neutrónov ( $\varphi$ ) a energetického spektra neutrónov, od ktorých závisí indukovaná aktivita  $A_i$  v materiále aktivačného detektora.

$$A_i = (1 - e^{-\lambda t}) \cdot \varphi \cdot \sigma_a \cdot \frac{\rho \cdot N_A \cdot M}{A}$$

$\sigma_a$  - účinný prierez aktivácie

$\rho$  - obsah nuklidu na 1 kg prvku

$N_A$  - Avogadrova konštanta

$M$  - hmotnosť prvku v detektore

$A$  - atómová hmotnosť

## Charakteristiky aktivačných detektorov

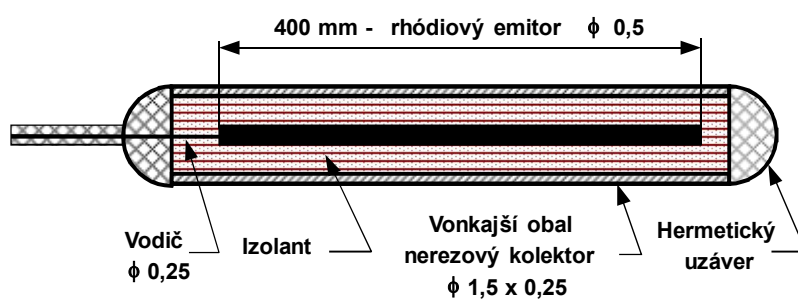
### Vybrané prahové aktivačné detektory

Prvok	$T_{1/2}$	Prah (MeV)
$^{19}\text{F}(n,2n)$	109,7 min	11,6
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	15,0 h	4,9
$^{27}\text{Al}(n,p)$	9,46 min	3,8
$^{64}\text{Zn}(n,p)$	12,7 h	2,0
$^{115}\text{In}(n,n')$	4,5 h	0,5
$^7\text{Li}(n,\alpha)$	12,3 r	3,8
$^{24}\text{Mg}(n,p)$	15,0 h	6,0

### Aktivačné detektory tepelných neutrónov

Prvok	$T_{1/2}$	Prvok	$T_{1/2}$
$^{55}\text{Mn}$	2,58 h	$^{107}\text{Ag}$	2,3 min
$^{59}\text{Co}$	10,4 min	$^{115}\text{In}$	54,1 min
$^{63}\text{Cu}$	12,87 h	$^{164}\text{Dy}$	1,3 min
$^{65}\text{Cu}$	5,14 min	$^{197}\text{Au}$	2,695 d

## Schéma samonapájacieho detektora



Materiál emitörov: Rh, Pt, Hf, V, Co, Ag

Používané izolátory:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , MgO ( $R_{300^\circ\text{C}} = 10^8 \Omega$ )

Materiál kolektorov: nerez, inconel 600 (Ni 60%, Cr 23%, Fe15%)



## Charakteristiky emitorov



Emitter Material	Rhodium	Vanadium	Cobalt	Hafnia (HfO <sub>2</sub> )	Silver	Platinum
Emitter Diameter mm	0.46	2.0	2.0	1.24	0.65	0.51
Emitter Length mm	400	100	210	7000	7000	3050
Insulator Type	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Collector Material	Inconel	Inconel	Inconel	Stainless Steel	Stainless Steel	Inconel
Collector Diameter mm	1.57	3.5	3.5	3.0	3.0	1.6
Thermal Neutron Sensitivity A/nv	3.6x10 <sup>-20</sup>	4.8x10 <sup>-21</sup>	5.4x10 <sup>-21</sup>	7.9x10 <sup>-20</sup>	42x10 <sup>-20</sup>	2.5x10 <sup>-22</sup>
Co <sup>60</sup> Gamma Sensitivity A/R/HR	7.0x10 <sup>-17</sup>	4.0x10 <sup>-17</sup>	5.6x10 <sup>-17</sup>	2.8x10 <sup>-16</sup>	13.5x10 <sup>-16</sup>	3.4x10 <sup>-16</sup>
Insulation Resistance ohms						
20°C	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>10</sup>	>10 <sup>9</sup>	>10 <sup>12</sup>
300°C	>10 <sup>8</sup>	>10 <sup>8</sup>	>10 <sup>8</sup>	>10 <sup>8</sup>	>10 <sup>7</sup>	>10 <sup>8</sup>
Response Time (0-63%)	1.1 Minutes	5.5 Minutes	Prompt	Prompt	0.5 Minutes	Prompt
Burn-up Rate %/month at 10 <sup>13</sup> nv	0.39	0.01	0.09	0.30	0.16	0.03

## Charakteristiky materiálov emitorov



Emitter Material	Stable Isotope	% Composition	Activation Cross-section (barns)	Resulting Nuclide	Half-life
Vanadium	<sup>23</sup> V <sup>50</sup>	0.24	100	<sup>23</sup> V <sup>51</sup>	Stable
	<sup>23</sup> V <sup>51</sup>	99.76	4.9	<sup>23</sup> V <sup>52</sup>	3.76 Minutes
Rhodium	<sup>45</sup> Rh <sup>103</sup>	100	11(8%)	<sup>45</sup> Rh <sup>104m</sup>	4.4 Minutes
			135(92%)	<sup>45</sup> Rh <sup>104</sup>	42 seconds
Cobalt	<sup>27</sup> Co <sup>59</sup>	100	37	<sup>27</sup> Co <sup>60</sup>	5.27 years
Hafnia	<sup>72</sup> Hf <sup>174</sup>	0.18	390	<sup>72</sup> Hf <sup>175</sup>	70 days
	<sup>72</sup> Hf <sup>176</sup>	5.20	15	<sup>72</sup> Hf <sup>177m</sup>	51.4 min
	<sup>72</sup> Hf <sup>177</sup>	18.50	380	<sup>72</sup> Hf <sup>178m</sup>	31 years
	<sup>72</sup> Hf <sup>178</sup>	27.14	75	<sup>72</sup> Hf <sup>179m</sup>	25.1 days
	<sup>72</sup> Hf <sup>179</sup>	13.75	65	<sup>72</sup> Hf <sup>180m</sup>	5.5 hours
	<sup>72</sup> Hf <sup>180</sup>	35.23	14	<sup>72</sup> Hf <sup>181m</sup>	42.4 days
Silver	<sup>47</sup> Ag <sup>107</sup>	51.82	35	<sup>47</sup> Ag <sup>108</sup>	2.42 min
	<sup>47</sup> Ag <sup>109</sup>	48.18	93	<sup>47</sup> Ag <sup>110</sup>	24.4 seconds
Platinum	<sup>78</sup> Pt <sup>192</sup>	0.78	14	<sup>78</sup> Pt <sup>193m</sup>	4.3 days
	<sup>78</sup> Pt <sup>194</sup>	32.90	2	<sup>78</sup> Pt <sup>195m</sup>	4.1 days
	<sup>78</sup> Pt <sup>195</sup>	33.80	24	<sup>78</sup> Pt <sup>196</sup>	Stable
	<sup>78</sup> Pt <sup>196</sup>	25.30	1	<sup>78</sup> Pt <sup>197m</sup>	1.3 hours
	<sup>78</sup> Pt <sup>198</sup>	7.22	4	<sup>78</sup> Pt <sup>199</sup>	30.8 min.

## Použitie SPND



- | Mapovanie hustoty toku neutrónov v aktívnej zóne
- Regulácia reaktora (okamžité SPND)
- Lokálna ochrana aktívnej zóny (okamžité SPND v LWR, RBMK)

## Charakteristiky rhódiového emitora $^{103}\text{Rh}$



- |  $^{103}\text{Rh}$  charakterizuje reakcia (n, $\beta$ ) s účinným prierezom 145 barn pre tepelné neutróny a rezonanciou pri  $E=1,25$  eV.
- | Burn-up rate (vyhorenie) dosahuje **0.39%** za mesiac v poli tep. neutrónov s hustotou toku  $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .
- | Beta emisia s energiou 2.44 MeV.
- | SPND s rhódiovým emitomom má relatívne vysokú senzitivitu ale vysoké vyhorenie,
- | 92% signálu má polčas premeny 42 s.
- | 8% signálu má polčas premeny 4.4 min.

## SPND na báze $^{51}\text{V}$



- |  $^{51}\text{V}$  má účinný prierez **n-beta** interakcie s tepelnými neutrónmi 4.9 barnov
- |  $1/v$  závislosť účinného prierezu bez rezonancií v oblasti tepelných a epitepelných neutrónov.
- | Rýchlosť vyhorenia je nízka **0.012%/mesiac** v poli tep. neutrónov s hustotou toku  $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .
- | 99% signálu má polčas rozpadu 3.76 minutes, 1% signálu je okamžitá.
- | Paralelná beta emisia 2.6 Mev.
- | Má relatívne nízku citlivosť a malú rýchlosť vyhorenia,
- | Veľmi oneskorený signál.

## SPND na báze $^{195}\text{Pt}$



- |  $^{195}\text{Pt}$  has a **n-gamma** interaction with a 24 barn thermal neutron cross-section and a parallel gamma-photon reaction.
- | The burn-up rate is 0,03%/month in a thermal neutron flux of  $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .
- | The signal is **prompt** and has both neutron and gamma components.
- | A SPND with a platinum emitter is sensitive to both gamma and neutron fluxes with **93% of the signal current due to gamma flux** response and **7% due to neutron flux** response in a typical light water reactor core.
- | A SPND with a platinum emitter has a relatively low sensitivity, low burn-up rate and a prompt signal.

### SPND na báze $^{59}\text{Co}$



- |  $^{59}\text{Co}$  má n-gamma interakciu s účinným prierezom 37 barn pre tepelné neutróny.
- | Rýchlosť vyhárania je 0,094%/mesiac v poli tepelných neutrónov  $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .
- | Signál je okamžitý ale vyžaduje si dlhodobú kompenzáciu signálu od vznikajúcich izotopov  $^{60}\text{Co}$  and  $^{61}\text{Co}$ .
- | Má relatívne nízku senzitivitu, strednú rýchlosť vyhorenia a okamžitú odozvu.

### SPND na báze Hf



- | Hf has a n-gamma interaction with a 115 barn thermal neutron cross-section and parallel gamma-photon reaction.
- | The average burn-up rate is 0.3%/month in a thermal neutron flux of  $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .
- | 96% of the signal is prompt, 4% of signal is delayed as gamma-radiation from fission products.
- | A SPND with a hafnia emitter has relatively low sensitivity, high burn-up rate, perturbs the local power density and has a prompt signal.

## SPND na báze Ag



Ag has a n-beta interaction with a 64.8 barn cross-section for thermal neutrons and a few resonances in the range 5-134 eV.

The burn-up rate is 0.16%/ month in a thermal neutron flux of  $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

66% of the initial signal has a half-life of 24.4 seconds.

25% of the signal has a half-life of 2.42 minutes.

9% of the signal is a prompt signal.

A SPND with a silver emitter has an average sensitivity, average burn-up rate, average perturbation of local power density and has a (two-fold) delayed signal.

## Ďakujem za pozornosť

Ing. Róbert Hinca, PhD.



### Príklad pre meranie a analýzu neistôt merania povrchovej kontaminácie



- | Na meranie sa vzťahuje norma IEC 60325:2002 - Radiation protection instrumentation – Alpha, beta and alpha/beta (beta energy > 60keV) contamination meters and monitors.
  
- | V príklade budeme uvažovať kontamináciu povrchu nuklidom  $^{14}\text{C}$ .
- | Merací rozsah v impulzoch za sekundu :  $(10 \div 10\,000) \text{ s}^{-1}$
- | Plocha detektora: 100 cm<sup>2</sup>

### Model function – funkcia pre výpočet aktivity obecne



$$M = F \cdot K \cdot (C - B)$$

- | M – meraná veličina, teda plošná aktivita v Bq.m<sup>-2</sup>
- | F – kalibračný faktor Bq.m<sup>-2</sup>/s<sup>-1</sup>=Bq.m<sup>-2</sup>.s
- | K – korekčný faktor
- | C – indikovaná hodnota s<sup>-1</sup>
- | B – pozadie

## Model merania – funkcia pre výpočet aktivity

$$A = F \cdot \frac{(C - B)}{D} \cdot K_n K_{HV} K_{temp} K_{hum} K_{d,air} K_{d,geo} K_{uni} K_{sur}$$

- | A – nameraná hodnota plošnej aktivity  $^{14}\text{C}$ ,  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$
- | B – nameraná hodnota pozadia,  $\text{s}^{-1}$
- | C – nameraná hodnota početnosti impulzov,  $\text{s}^{-1}$
- | D – plocha detektora v  $\text{cm}^2$
- | F – kalibračný faktor pre referenčný beta rádionuklid,  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}/\text{s}^{-1}$
- |  $K_n$  – korekčný faktor pre nelinearitu
- |  $K_{HV}$  – korekčný faktor pre nestabilitu zdroja napájania
- |  $K_{temp}$  – korekčný faktor pre okolitú teplotu
- |  $K_{hum}$  – korekčný faktor pre vlhkosť
- |  $K_{d,air}$  – korekčný faktor pre absorpciu vo vzduchu medzi detektorom a vzorkou
- |  $K_{d,geo}$  – korekčný faktor pre geometriu merania
- |  $K_{uni}$  – korekčný faktor pre nehomogenitu kontaminácie (non-uniformity)
- |  $K_{sur}$  – korekčný faktor na absorpciu beta na povrchu

## Celkový výsledok merania plošnej aktivity

- | Výpočet hodnôt  $K_{uni}$  a  $K_{sur}$  nie je v norme špecifikovaný.
- | Nech sú v príklade nasledovné hodnoty:
  - | C = 1600  $\text{s}^{-1}$
  - | B = 4  $\text{s}^{-1}$
  - | D = (100 ± 1)  $\text{cm}^2$
  - | F = (40 ± 8)  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}/\text{s}^{-1}$
  - | d = (10 ± 2) mm - vzdialenosť detektor vzorka
  - | Pri kalibrácii bola vzdialenosť detektor vzorka 5 mm.
  - | Toto treba vziať do úvahy pri výpočte  $K_{d,air}$  a  $K_{d,geo}$

### Vplyv vzdialenosti $K_{d,air}$



- I Norma nešpecifikuje vzdialenosť povrch - detektor počas merania, my budeme uvažovať 10mm.
- I Vzdialenosť počas merania nie je fixovaná.
- I Pre nízkoenergetické beta žiarenie, ako je to u  $^{14}\text{C}$  (155 keV), je presná vzdialenosť významná.
- I Pri zmene vzdialenosti na 8mm, 10mm a 12mm sa mení účinnosť o 15%, 19% a 23%.
- I Potom  $K_{d,air}$  sa mení v rozmedzí od  $1/(1-0,15)$  do  $1/(1-0,23)$  teda od 1,18 do 1,3. Platí:  $K_{d,air} = 1,24 \pm 0,06$

### Vplyv vzdialenosti $K_{d,geo}$



- I Zmena vzdialenosti mení uhol medzi detektorom a zdrojom - priestorový uhol (solid angle).
- I Pre nekonečný rovnomerne kontaminovaný povrch bude vplyv zmeny vzdialenosti na uhol nulový. Naopak najväčší bude pre bodový zdroj.
- I Budeme uvažovať zmenu vzdialenosti v rozmedzí  $(10 \pm 2)$  mm od veľkoplošného detektora 100mm x 100mm. Účinnosť v tomto prípade bude nižšia o  $(10 \pm 2)\%$ , potom  $K_{d,geo} = 1,11 \pm 0,02$ .
- I Takúto zmenu potom môžeme považovať za najvyšší odhad vplyvu geometrie pri meraní v rozmedzí vzdialeností od 5mm do 15 mm.



### Vplyv nehomogenity, $K_{uni}$



- | Vplyv nie je v norme presne špecifikovaný.
- | Nehomogenity rozloženia aktivity sa dajú identifikovať inými meraniami. Vieme zobrať do úvahy nehomogenitu detekcie žiarenia v detektore.
- | Tieto dve hodnoty sú pre dané meranie porovnateľné a boli stanovené na  $K_{uni}=1,0\pm 0,025$ .

### Absorbcia na povrchu $K_{sur}$



- | Na povrchu sa môžu nachádzať odstrániteľné mastnoty alebo iné nečistoty.
- | Iné vplyvy netreba brať do úvahy
- | Uvažujme, že vrstva je v rozmedzí od  $(0 \div 10) \text{ mg.cm}^{-2}$
- | To predstavuje pre  $^{14}\text{C}$  redukciu účinnosti  $(0 \div 76)\%$  čo sa znamená že  $1 \leq K_{sur} \leq 4,17$  teda  $K_{sur} = 2,59 \pm 1,59$

### Ostatné korekčné faktory



- I Pre tento príklad budeme uvažovať hodnoty ostatných korekčných faktorov na úrovni maximálnej prípustnej hodnoty:
- I  $K_n = 1,0 \pm 0,1$ ;
- I  $K_{hv} = 1,00 \pm 0,01$ ;
- I  $K_{temp} = 1,0 \pm 0,05$ ;
- I  $K_{hum} = 1,0 \pm 0,025$ ;

### Bilancia neistôt



Veličina	Najlepší odhad	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok neistoty k výslednej hodnote
C	1600 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup> sqrt(1600)	Normálne	1,43 cm <sup>-2</sup>	57 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
B	4 s <sup>-1</sup>	2 s <sup>-1</sup> sqrt(4)	Normálne	1,43 cm <sup>-2</sup>	3 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
D	100 cm <sup>2</sup>	0,6 cm <sup>2</sup>	Rovnomerné	-22,8cm <sup>-4</sup>	-14 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
F	40	8	Normálne	56,9s <sup>-1</sup>	455 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
K <sub>n</sub>	1,0	0,1/√3=0,058	Rovnomerné	2276s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	132 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
K <sub>HV</sub>	1,0	0,01/√3=0,006	Rovnomerné	2276s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	13 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
K <sub>temp</sub>	1,0	0,05/√3=0,029	Rovnomerné	2276s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	66 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
K <sub>hum</sub>	1,0	0,025/√3=0,014	Rovnomerné	2276s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	32 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
K <sub>d,air</sub>	1,24	0,06/√3=0,035	Rovnomerné	1835s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	64 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
K <sub>d,geo</sub>	1,11	0,02/√3=0,012	Rovnomerné	2050s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	25 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
K <sub>uni</sub>	1,0	0,025/√3=0,014	Rovnomerné	2276s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	32 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
K <sub>sur</sub>	2,59	1,59/√3=0,918	Rovnomerné	879s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	807 s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>

$$A = (2276 \pm 944) \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$$

## Výsledok merania povrchovej emisie



$$A = (2,3 \pm 1,9) \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}\text{cm}^{-2}$$

Uvedená rozšírená neistota merania je stanovená vynásobením štandardnej neistoty merania koeficientom rozšírenia  $k=2$ , ktorý pre normálne rozdelenie zodpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95%.

Koeficienty citlivosti charakterizujú ako sa mení výsledok merania pri zmene vstupného parametra  $\Delta F/\Delta x_i$  a získava sa ako parciálna derivácia funkcie merania  $F$  od vstupného parametra  $X_i$ .

$$\text{Potom platí: } \Delta y_i = (\partial F / \partial x_i) \cdot \Delta x_i$$

## Kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach



- I IEC 60761-1:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 1: Všeobecné požiadavky.
- I IEC 60761-2:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 2: Zvláštne požiadavky pre monitory **aerosólov** vrátane transuránových aerosólov.
- I IEC 60761-3:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 3: Zvláštne požiadavky pre monitory **vzácných plynov**
- I IEC 60761-4:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 4: Zvláštne požiadavky pre monitory **iódu**
- I IEC 60761-5:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 5: Zvláštne požiadavky pre monitory **trícia**

### IEC 60761-2:2002 Časť 2: Zvláštne požiadavky pre monitory aerosólov vrátane transuránových aerosólov.



- I Aerosóly sa zo vzdušiny zachytávajú na statický filter alebo kazetu (kártridž) alebo pohyblivý filter, filtračnú pásku pod kruhovou alebo štvorcovou geometriou.
- I Pri meraní alfa aktivity je dôležité minimalizovať absorbciu žiarenia vo filtri.
- I Zabezpečiť rovnomerné rozloženie aktivity po ploche filtra.
- I Zabezpečiť aby sa aerosól neukladal na ostatných častiach zariadenia.
- I Treba minimalizovať vplyv pozadia –  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  ...
- I Zamedziť únikom vzdušiny cez netesnosti.
- I Zariadenie má zabezpečiť aj zber vzorky pre doplnkové resp. zálohové laboratórne meranie, použiteľné aj pre overenie správnosti merania.

### Meradlo aerosólov. Detektor.



- I Veľkosť pracovnej plochy detektora by mala korešpondovať s veľkosťou aktívnej časti meranej vzorky.
  - Pri meraní celkovej aktivity alfa/beta môže byť detektor väčší ako vzorka,
  - pri alfa spektrometrickom meraní by plochy mali byť podobné.
- I Detektorové okienko musí byť z materiálu o hrúbke:
  - Pri meraní celkovej aktivity alfa menej ako  $2 \text{ mg/cm}^2$  (to zodpovedá ekvivalentnej strate energie  $3,2 \text{ MeV}$ )
  - Pri meraní celkovej beta aktivity musí hrúbka zodpovedať energetickému spektru meraných častíc. Môže ju stanoviť výrobca.
  - Pri použití alfa spektrometrického merania musí výrobca špecifikovať rozlišovaciu schopnosť zariadenia a vplyv pozadia resp. spôsob kompenzácie prírodných rádionuklidov (radón, tórium - oneskorené meranie).

### Referenčný materiál pre kalibráciu



- I Pri typovej skúške sa používa rádioaktívny aerosól so stanovenou certifikovanou objemovou aktivitou a známym AMAD (activity median aerodynamic diameter). Napr. AMAD=0,4  $\mu\text{m}$ .
- I Ako referenčný materiál môžu byť použité rádionuklidy:
  - I  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{204}\text{Tl}$  alebo  $^{137}\text{Cs}$  pre beta žiarenie
  - I  $^{239}\text{Pu}$  alebo  $^{241}\text{Am}$  pre alfa.
- I Rozšírená kombinovaná štandardná neistota referenčných materiálov musí byť menšia ako  $\pm 10\%$  ( $k=2$ ).

### Referenčná odozva pri meraní aerosólov



- I Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 20% od hodnoty deklarovanej výrobcom.
- I Pri meraní zmiešanej alfa/beta rádioaktivity nesmie krížová účinnosť (crossover) beta žiarenia v alfa kanáli prekročiť 2% a alfa žiarenia v beta kanáli 25%.

## Zmena detekčnej účinnosti pri zmene energie beta žiarenia



- I Test sa robí minimálne s tromi zdrojmi:
  - I  $E_{b,max} \leq 0,4 \text{ MeV}$  ( $^{60}\text{Co}$ )
  - I  $E_{b,max}$  v rozmedzí od 0,4 do 1 MeV ( $^{137}\text{Cs}$ )
  - I  $E_{b,max} \geq 1 \text{ MeV}$  ( $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{90}\text{Y}$ )
  
- I Pre alfa žiarenie sa test nevyžaduje, lebo účinnosť nevykazuje závislosť na energii alfa žiarenia.

## Zoznam vhodných beta rádionuklidov pre meradlá aerosolov



Rádionuklid	Polčas	Maximálna energia beta spektra MeV
$^{63}\text{Ni}$	96 y	0,0659
$^{14}\text{C}$	5730 y	0,1565
$^{203}\text{Hg}$	46,6 d	0,2122
$^{147}\text{Pm}$	2,6234 y	0,2247
$^{45}\text{Ca}$	163 d	0,2569
$^{60}\text{Co}$	5,271 y	0,3179
$^{137}\text{Cs}$	30,0 y	0,51155(94,6%) a 1,1732(5,4%)
$^{185}\text{W}$	75,1 d	0,4324
$^{204}\text{Tl}$	3,779 y	0,7634 (97,4%)
$^{36}\text{Cl}$	$3,01 \times 10^5$ y	0,70955 (98,1%)
$^{198}\text{Au}$	2,696 d	0,28241 (1,3 %) 0,9607 (98,7%)
$^{89}\text{Sr}$	50,5 d	1,4913
$^{32}\text{P}$	14,29 d	1,7104
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	29,12 y	0,545 a 2,2839

Beta s energiou menšou ako 0,01MeV a výťažkom menej ako 1% nie je uvedené

## Referenčná odozva pri meraní vzácnych plynov



- I Relatívna chyba merania nesmie byť väčšia ako 15 % pri štandardných podmienkach merania a pri kalibrácii urobenej v súlade s predpisom výrobcu.
- I Merať je možné gama alebo beta žiarenie. Pri gama-spektrometrickom meraní musí výrobca špecifikovať rozlíšenie prístroja.

## Zoznam vhodných rádionuklidov pre meradlá vzácnych plynov



Plynný žiarič	Pevný žiarič	$E_{\text{beta}} \text{ stred, MeV}$	$E_{\text{beta}} \text{ max, MeV}$	$E_{\text{gama}}, \text{ MeV}$	polčas
$^{85}\text{Kr}$	$^{185}\text{W}$	0,251	0,67	-	10,72 y
	$^{204}\text{Tl}$	0,127	0,427	-	75,1d
		0,244	0,766	-	3,779 y
$^{133}\text{Xe}$	$^{241}\text{Am}$	0,101	0,346	0,081	5,245 d
		-	-	0,060	432,2 y
	$^{185}\text{W}$	0,127	0,427	-	75,1 d
$^{135}\text{Xe}$	$^{143}\text{Pr}$	0,307	0,92	0,25	9,09 h
		0,314	0,933	-	13,56 d
	$^{204}\text{Tl}$	0,244	0,766	-	3,779 y
	$^{203}\text{Hg}$	0,058	0,214	0,279	46,6 d
$^{41}\text{Ar}$	$^{89}\text{Sr}$	0,459	0,198	1,29	1,827 h
		0,583	0,463	-	50,5 d
	$^{60}\text{Co}$	0,096	0,314	1,17/1,33	5,271 y
	$^{137}\text{Cs}/^{137}\text{Ba}$	0,173/0,425	0,514/1,176	0,662	30,0 y
	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	0,196/0,935	0,546/2,27	-	29,12 y

Beta s energiou menšou ako 0,01MeV a výtlačkom menej ako 1% nie je uvedené

## Referenčná odozva pri meraní jódu



- I Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 20% od hodnoty deklarovanej výrobcom.
- I Chemická forma jódu musí zodpovedať tej, na ktorú bolo meradlo vyrobené. Môže sa použiť iód  $^{131}\text{I}$  vo forme molekulového jódu alebo v organickej forme ako  $\text{ICH}_3$  (metyliodid) alebo  $\text{HIO}_3$  (kyselina iodičná).
- I Záměny nuklidov sú možné kvôli malému polčasu referenčných zdrojov:
  - I  $^{133}\text{Ba}$  miesto  $^{131}\text{I}$  a  $^{129}\text{I}$  miesto  $^{125}\text{I}$ .

## Referenčná odozva pri meraní trícia



- I Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 15% od hodnoty deklarovanej výrobcom.
- I Na meranie referenčnej odozvy sa používa plynň referenčný materiál s obsahom trícia v chemickej forme na akú bolo meradlo vyrobené.
- I Neistota stanovenia objemovej aktivity trícia nesmie presiahnuť 7%(k=2).



### Kontinuálne monitorovanie aktivity v plyných výpustiach



- I STN IEC 60 861:2006 Zariadenie na kontinuálne monitorovanie rádionuklidov emitujúcich žiarenie beta a gama vo vypúšťaných kvapalinách.
- I Nahradzujúce normy: STN EN 60 861:2009-01 (35 6567) platí od 1.1.2009

### Detektory na meranie aktivity v kvapalných výpustiach



- I Môžu sa použiť detektory beta žiarenia, pričom treba zobrať do úvahy efektívnu plochu detektora, hrúbku, geometriu merania a závislosť účinnosti na energii žiarenia.
- I Pri meraní gama žiarenia treba určiť energetickú závislosť účinnosti detektora a pri použití gamaspektrometrickej analýzy energetickú závislosť rozlíšenia detektora.
- I Na zníženie vplyvu pozadia treba použiť tienenie alebo kompenzačné meranie iným detektorom.

## Referenčná odozva pri meraní kvapalných výpustí



- | Relatívna chyba merania nesmie prekročiť 15% .
- | Na meranie referenčnej odozvy sa používa kvapalný referenčný materiál s obsahom nuklidu:
- | Pre gama monitory –  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$
- | Pre beta monitory – ako v tabuľke pre aerosóly.

## Meranie kermu a dávky. dozimetre

### Vzťah medzi dávkou resp. kermou a aktivitou bodového žiariča

$$D = konst \cdot \frac{A}{r^2} \qquad K = \Gamma \cdot \frac{A}{r^2}$$

kde

D - je dávkový príkon, v praxi obvykle v [mGy/h] (jednotkou absorbovanej dávky je gray, 1 Gy = 1 J×kg<sup>-1</sup>),

konst - je koeficient úmernosti, závislý od druhu rádionuklidu (výťažku emitovaných fotónov s energiou E), ako aj na absorpčných vlastnostiach absorbujúcej látky; obvykle sa udáva v jednotkách [mGy·m<sup>2</sup>/h·GBq] a pre kermu alebo expoziáciu sa označuje  $\Gamma$

K - je kermový príkon [mGy/h]

$\Gamma$  - gama konštanta, konštanta vzdušného kermového príkonu

A - je aktivita zdroja - musí byť definované jeho rádionuklidové zloženie; [GBq]

r - je vzdialenosť od zdroja; [m].

## Γ - gama konštanta, konštanta vzdušného kermového príkonu

Predstavuje vzdušný kermový príkon vo vzdialenosti 1 m od bodového zdroja s aktivitou 1 Bq.

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

$$\Gamma = K(A = 1Bq, r = 1m) = \varphi \cdot E \cdot \frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\varphi \cdot E}{4\pi r^2} \cdot \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

Toto je výraz pre výpočet gama konštanty pre prípad zdroja emitujúceho fotóny o energii E s výťažkom  $\gamma=100\%$ . Vo všeobecnosti treba spočítať sumu všetkých fotónov s prihliadnutím na ich energie a výťažky.

## Gama konštanta pre zdroj emitujúci fotóny s energiou E

Bodový zdroj s aktivitou 1 GBq (t.j.  $10^9$  premien za sekundu) so 100% výťažkom fotónov s energiou E [MeV] vysiela do priestoru (priestorový uhol  $4\pi$ )  $3,6 \times 10^{12}$  fotónov za hodinu. Tieto fotóny predstavujú za 1 hodinu energiu  $3,6 \times 10^{12} \times E \times 10^6 \times 1,602 \cdot 10^{-19}$  [J], ktorá sa šíri priestorom a v danom mieste sa odovzdá látke s hmotnostným koeficientom prenosu energie ( $\mu_{tr}/\rho$ ) [ $m^2/kg$ ].

Pre monoenergetický žiarič so 100% výťažkom fotónov s energiou E dostaneme:

$$\Gamma \left[ \frac{mGy \cdot m^2}{h \cdot GBq} \right] = \frac{3,6 \cdot 10^{12} \cdot E \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{4\pi} \cdot \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) = 0,0459 \cdot E \cdot \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)$$

## Kermová gama konštanta pre cézium $^{137}\text{Cs}$

Například pre  $^{137}\text{Cs}$  s 85% výťažkom na energii 662 keV a 6,5% na 32,7 keV dostaneme konštantu vzdušného kermového príkonu:

$$\Gamma_{\text{Cs}} = 0,0459 \cdot (0,662 \cdot 0,85 \cdot 0,00293 + 0,0327 \cdot 0,065 \cdot 0,0125) = 0,0767 \frac{\text{mGy} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}}$$

$$= 2,13 \cdot 10^{-17} \frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{Bq}} \approx 90,2 \text{ fW} \cdot \text{Bq}^{-1}$$

Treba zdôrazniť, že ak bude absorbujuťou látkou niečo iné ako vzduch (napr. voda), tento údaj sa trochu zmení, pretože sa zmenia hodnoty transportných koeficientov, takže pri presných meraniach treba zmenu absorbujucej látky zohľadniť.

## Dávka pre fotónové žiarenie

$$D = \Phi [E \cdot (\mu_{en}) / \rho]$$

kde

$\Phi$  - fluencia fotónov,  $\text{m}^{-2}$

$\mu_{en}/\rho$  - hmotnostný koeficient absorpcie energie,  $\text{m}^2/\text{kg}$

Vzťah platí v materiáli za podmienky **rovnováhy**, teda vtedy, keď kinetická energia, počet a smery šírenia sekundárnych **elektrónov**, vznikajúcich v dôsledku ožiarenia sú v meranom objeme materiálu homogénne.

Pre daný materiál môžeme tiež napísať:

$$D_{mat} = \Phi \left( \frac{dE_{mat}}{\rho_{mat} \cdot dx} \right) = \Phi \cdot \frac{S_{mat}}{\rho} = \Phi \cdot S_{mat}$$

## Princíp Bragga - Graya

Ak detektor žiarenia nedeformuje rovnováhu v meranom objeme, môžeme považovať dávku v detektore rovnú dávke v materiále. Rovnováha v detektore nastáva vtedy, keď elektróny opúšťajúce detektor sú dopĺňané elektrónmi vznikajúcimi v stene detektora (ak je stena hrubšia ako je dolet elektrónov). Potom dávka v materiále  $D_{mat}$  môže byť stanovená meraním dávky v detektore  $D_{det}$  pričom:

$$D_{mat}/D_{det} = S_{mat}/S_{det}$$

$$D_{mat} = w \cdot N \cdot S_{mat}/S_{det}$$

$w$  – stredná energia potrebná na vytvorenie jedného iónového páru v jednotke hmotnosti materiálu detektora J/ip

$S_{mat, det}$  – hmotnostná brzdná schopnosť v meranom materiále resp. detektore J.m<sup>2</sup>/kg

$N$  – počet iónových párov vznikajúcich v detektore na jednotky hmotnosti, ip/kg

Napríklad pomer brzdných schopností vody a vzduchu (MeV.cm<sup>2</sup>/g) je 1,85/1,66=1,11

Preto:

$$D_{voda} = 1,11 \cdot D_{vzduch}$$

## Dávkový príkon od bodového zdroja

$$\dot{D} = \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{A \cdot E}{4\pi r^2} \cdot \frac{\mu_{en}}{\rho}$$

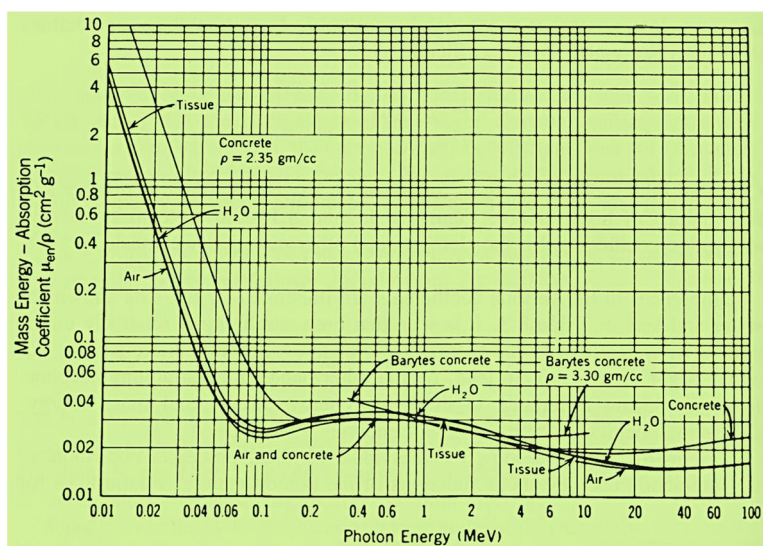
- $\mu_{en}/\rho$  v širokom intervale energií (od 60keV do 2 MeV) a pre mnohé materiály je približne rovnaké = **0,0027 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>**
- E uvedené v elektrónvoltoch treba previesť na Joule

$$1\text{eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\dot{D} [\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}] = \frac{A \cdot E(\text{eV}) \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19}}{4\pi r^2} \cdot 0,0027 = 3,44 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{AE}{r^2}$$

$$\dot{D} [\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}] = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{A [\text{MBq}] E [\text{keV}]}{r^2}$$

$$\mu_{\text{en}}/\rho$$



### Výpočet príkonu absorbovanej dávky od $^{137}\text{Cs}$

$$A = 1 \text{ GBq}$$

$$E = 661,7 \text{ keV}$$

$$r = 1 \text{ m}$$

$$\dot{D} [\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}] = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{A [\text{MBq}] E [\text{keV}]}{r^2}$$

$$\dot{D} = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot 661,7 = 82 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$

## Meranie dávkového príkonu ionizačnou komorou v prúdovom režime

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

$$D \left[ \frac{J}{kg} \right] = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{E_{abs}}{V \cdot \rho}; \quad n = \frac{E_{abs}}{w}; \quad Q = n \cdot e$$

kde

$E_{abs}$  – energia absorbovaná v detektore

$w$  je priemerná energia na vytvorenie jedného iónového páru vo vzduchu,

$e$  je náboj elektrónu; ak sa energia na vytvorenie iónového páru uvedie v eV,

$Q$  – náboj vytvorený v detektore

$m$  je hmotnosť vzduchu s hustotou  $\rho$  v komore s objemom  $V$ .

## Vyjadrenie dávkového príkonu s použitím stredných hodnôt resp. pri ustálenom stave

$$D = k \cdot I \quad k = \frac{D}{I} = \frac{D}{t} \cdot \frac{t}{Q} = \frac{D}{Q} = \frac{E_{abs}}{V \cdot \rho \cdot \frac{E_{abs}}{w} \cdot e}$$

$$k = \left( \frac{w}{e} \right) \cdot \frac{1}{m} = \left( \frac{w}{e} \right) \cdot \frac{1}{V \cdot \rho}$$

$k$  – je vlastne prevodová konštanta (kalibračný faktor) ionizačnej komory, jednotka je  $Gy \cdot s^{-1} / A = Gy / C$

Na vytvorenie jedného iónového páru pri ionizácii vzduchu sa v priemere spotrebuje energia  $w = 34$  eV, ktorá takmer nezávisí od energie fotónu, ktorý ionizáciu spôsobil.



## Teoretický výpočet kalibračného faktora ionizačnej komory

$$k = \left( \frac{w}{e} \right) \cdot \frac{1}{m} = \left( \frac{w}{e} \right) \cdot \frac{1}{V \cdot \rho}$$

Vzduchová ionizačná komôrka s objemom  $V = 0,125 \text{ cm}^3$  má v normálnych podmienkach ( $\rho = 1,21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) kalibračnú konštantu:

$$k = \frac{34 \cdot eV}{1,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot 1,21 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ Gy/C}$$

Príkon absorbovanej dávky  $1 \text{ Gy/s}$  v takej ionizačnej komore spôsobí prúd  $4,4 \text{ nA}$ .

## Rádionuklidy vhodné na kalibráciu dozimetrov

RN	Polčas (rokov)	Energia gama, (keV)	Kermová konštanta gama ( $\text{mGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ )	Merná aktivita, ( $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Doporučená chemická forma
$^{60}\text{Co}$	5,272	1173,3 1332,5	308	$3,7 \cdot 10^{15}$	kov
$^{137}\text{Cs}$	30,1	661,6	76,8	$8,51 \cdot 10^{14}$	chlorid
$^{241}\text{Am}$	433	59,54	3,76	$1,11 \cdot 10^4$	oxid

## Kalibrácia dozimetrov

- Vo všeobecnosti kalibrácia dozimetrov predstavuje stanovenie odozvy dozimetrov na jednotkovú dávku.
- Odozva dozimetrov závisí od množstva parametrov a preto môže byť stanovená ako funkcia mnohých premenných:
  - veľkosť dávky – odozva nemusí byť lineárna
  - energetická a uhlová závislosť odozvy
  - závislosť na teplote
  - podmienky vyhodnocovania, fading...