

## Dozimetrické veličiny a jednotky používané v radiačnej ochrane



Aktuálne definície sa nachádzajú v  
Zákone o radiačnej ochrane 87/2018 Z.z.

doc. Ing. Róbert HINCA, PhD

1

## Ožiarenie

**Ožiarenie** je vystavenie pôsobeniu ionizujúceho žiarenia.

**Havarijné ožiarenie** je ožiarenie jednotlivcov, ktoré je bezprostredným dôsledkom radiačnej havárie alebo radiačnej nehody; nezahŕňa ožiarenie v ohrození.

**Ožiarenie v ohrození** je ožiarenie jednotlivcov, ktorí vykonávajú potrebný neodkladný zásah s cieľom

- **pomôcť** ohrozeným osobám,
- **zabrániť** ožiareniu veľkého počtu osôb, alebo
- **zachrániť** materiálne hodnoty alebo majetok,

pričom by mohol byť **prekročený niektorý z limitov** ožiarenia ustanovených pre pracovníkov. Ožiarenie v ohrození je prípustné len u **dobrovoľníkov**.

2

## Činnosť vedúca k ožiareniu Zdravotná ujma

**Činnosť vedúca k ožiareniu** je ľudská aktivita, ktorá vedie alebo by mohla viesť ku zvýšeniu ožiarenia osôb

- a) umelým zdrojom ionizujúceho žiarenia,
- b) prírodným zdrojom ionizujúceho žiarenia v prípadoch, keď sú prírodné rádionuklidy spracúvané pre ich rádioaktívne, štiepne alebo množivé charakteristiky,
- c) okrem prípadu ožiarenia v ohrození.

**Zdravotná ujma** je odhad rizika skrátenia dĺžky života a zhoršenia kvality života v populácii po ožiarení ionizujúcim žiarením. Zahŕňa ujmu následkom **somatických poškodení, nádorových ochorení a vážnych genetických porúch.**

3

## Základné pojmy radiačnej ochrany

**Radiačná ochrana** je ochrana ľudí a životného prostredia pred ožiarением a pred jeho účinkami vrátane prostriedkov na jej dosiahnutie.

**Rádioaktívna látka** je každá látka, ktorá obsahuje jeden alebo viac rádionuklidov, ktorých aktivita alebo hmotnostná aktivita, alebo objemová aktivita nie je z hľadiska radiačnej ochrany zanedbateľná.

**Rádionuklid** je druh atómov, ktoré majú rovnaký počet protónov, rovnaký počet neutrónov, rovnaký energetický stav a ktoré podliehajú samovoľnej premene v zložení alebo v stave atómových jadier.

4

## Základné pojmy radiačnej ochrany

**Rádioaktívny žiarič** je rádioaktívna látka, ktorej aktivita a hmotnostná aktivita presahujú hodnoty aktivity a hmotnostnej aktivity uvedené v prílohe č. 2 v tabuľke č. 1. Nariadenia vlády 345/2006 Z.z. SR z 10. mája 2006 o základných bezpečnostných požiadavkách na ochranu zdravia pracovníkov a obyvateľov pred ionizujúcim žiarením

Rádioaktívna látka je **rádioaktívny žiarič** ak obsahuje

- a) jeden rádionuklid, ktorého **aktivita** a súčasne **hmotnostná aktivita** sú väčšie ako hodnoty aktivity a hmotnostnej aktivity uvedené vo Vyhláske, alebo
- b) niekoľko rádionuklidov, ktorých súčet podielov **aktivít** a hodnôt aktivít uvedených vo Vyhláske a súčasne súčet podielov **hmotnostných aktivít** a hodnôt hmotnostných aktivít uvedených vo Vyhláske je väčší ako jeden.

5

Rádioaktívna látka je **rádioaktívny žiarič** ak

$$\{A \rangle A_i^{LIM}\} \wedge \{a_m \rangle a_m^{LIM}\}$$

$$\left\{ \sum_i \frac{A_i}{A_i^{LIM}} \rangle 1 \right\} \wedge \left\{ \sum_i \frac{a_{mi}}{a_{mi}^{LIM}} \rangle 1 \right\}$$

6

Nuklid	Aktivita [Bq]	Hmotnostná aktivita [kBq/kg]
H-3	$10^9$	$10^6$
Be-7	$10^7$	$10^5$
C-14	$10^7$	$10^4$
O-15	$10^9$	$10^2$
F-18	$10^6$	10
Na-22	$10^6$	10
Na-24	$10^5$	10
Si-31	$10^6$	$10^3$
P-32	$10^5$	$10^3$
P-33	$10^6$	$10^3$
S-35	$10^6$	$10^3$
Cl-36	$10^6$	$10^4$
Cl-38	$10^5$	10
Ar-37	$10^6$	$10^6$
Ar-41	$10^9$	$10^2$
K-40	$10^6$	$10^2$
K-42	$10^6$	$10^2$
K-43	$10^6$	10
Ca-45	$10^7$	$10^4$
Ca-47	$10^6$	10
Sc-46	$10^6$	10
Sc-47	$10^6$	$10^3$
Sc-48	$10^5$	10
V-48	$10^5$	10
Cr-51	$10^7$	$10^3$
Mn-51	$10^5$	10
Mn-52	$10^5$	10
Mn-52m	$10^5$	10
Mn-53	$10^9$	$10^4$
Mn-54	$10^6$	10
Mn-56	$10^5$	10
Fe-52	$10^6$	10
Fe-55	$10^6$	$10^4$
Fe-59	$10^6$	10
Co-55	$10^6$	10
Co-56	$10^5$	10
Co-57	$10^6$	$10^2$
Co-58	$10^6$	10
Co-58m	$10^7$	$10^4$
Co-60	$10^5$	10
Co-60m	$10^6$	$10^3$
Co-61	$10^6$	$10^2$

### Aktivity a hmotnostné aktivity umožňujúce vyňatie rádionuklidu alebo rádioaktívnej látky spod administratívnej kontroly

Nuklid	Aktivita, Bq	Hm. aktivita, kBq/kg
H-3	$10^9$	$10^6$
Co-60	$10^5$	10
I-131	$10^6$	$10^2$
Cs-137	$10^4$	10
Ra-226	$10^4$	10
U-235	$10^4$	10
U-238	$10^4$	10
Pu-239	$10^4$	1
Am-241	$10^4$	1
Cf-252	$10^4$	10

7

## Základné pojmy radiačnej ochrany

- **Zdroj ionizujúceho žiarenia** je rádioaktívna látka, prístroj alebo zariadenie schopné emitovať ionizujúce žiarenie alebo produkovať rádioaktívne látky.
- **Generátor ionizujúceho žiarenia** je elektrický prístroj alebo elektrické zariadenie, ktoré obsahuje súčiastky pracujúce s potenciálovým rozdielom väčším ako 5 kV.
- **Ionizujúce žiarenie** je žiarenie prenášajúce energiu vo forme častíc alebo elektromagnetických vln s vlnovou dĺžkou do 100 nm alebo frekvenciou nad  $3 \cdot 10^{15}$  Hz, ktoré má schopnosť priamo alebo nepriamo utvárať ióny.
- Mobilný fungujú v pásme 900, 1800 a 2600 MHz, teda jedná sa o neionizujúce žiarenie.

8

## Ionizujúce žiarenie

$$\nu^{\min} = 3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,141 \cdot 10^{-21} \text{ MeV} \cdot \text{s}$$

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

$$\lambda^{\max} = 10^{-7} \text{ m} = 100 \text{ nm}$$

$$E_{\gamma}^{\min} = 12,4 \text{ eV}$$

9

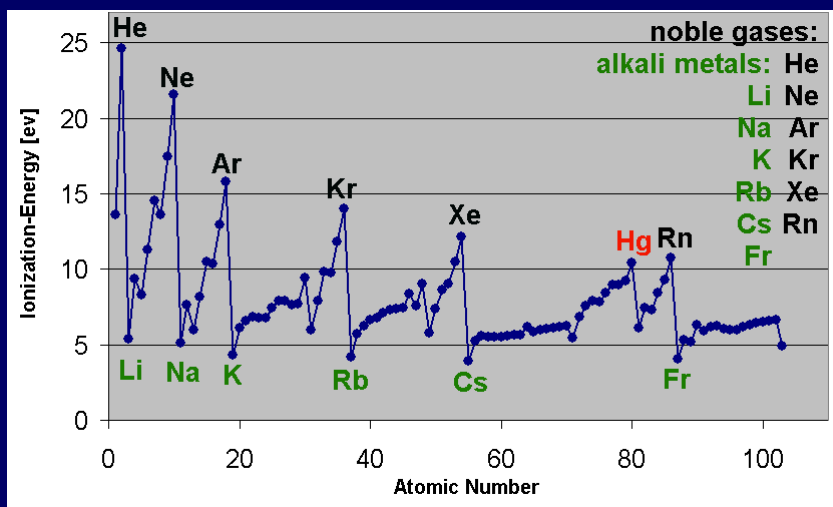
## Odkiaľ sa vzal prah 13 eV

- Energetický ekvivalent maximálnej vlnovej dĺžky fotónov, ktoré môžu byť emitované atómom vodíka.
- Alternatívne to predstavuje minimálnu energiu fotónov, ktoré dokážu ionizovať atóm vodíka.
- Táto hodnota sa nazýva **Rydbergova konštanta**
- Môže byť vypočítaná pomocou kvantovej mechaniky a je využívaná v atómovej fyzike na výpočet spektier žiarenia.

$$1Ry = 13,6056923 \cdot \text{eV}$$

10

## Ionizačná energia rôznych prvkov



Ionizačná energia má periodický charakter s maximami pre vzácne plyny a minimami pre alkalické kovy.

11

## Smerná hodnota, Medzná dávka

**Smerná hodnota** je ukazovateľ alebo kritérium na posudzovanie radiačnej ochrany, ktorého prekročenie alebo nesplnenie spravidla signalizuje podozrenie, že radiačná ochrana nie je **optimalizovaná**.

**Medzná dávka** je obmedzenie budúcej dávky jednotlivca, ktorá môže byť spôsobená daným zdrojom ionizujúceho žiarenia, používa sa v etape plánovania alebo projektovania pri optimalizácii radiačnej ochrany.

12

## 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.

13

## Špecifiká veličín radiačnej ochrany

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

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

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

14

## Operačné (pracovné) veličiny

Používajú sa pri monitorovaní priestoru a osôb meradlami s cieľom preskúmať situácie externého ožiarenia a možnosti 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.

15

## 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  $H^*(d)$**  a **smerový dávkový ekvivalent  $H'(d, \Omega)$** .

16



## 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

17

## 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) =  $\text{J.kg}^{-1}$ .
- Pre silno prenikavé žiarenie sa odporúča hĺbka  **$d=10$  mm**.
- Pre slabo prenikavé žiarenie sa používa pre kožu hĺbka **0,07 mm** a pre 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.

18

## 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

19

## 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  $^{137}\text{Cs}$  predstavuje 661 keV asi  $10^6$  fJ)
- Maximálna a stredná energia spojitého  $\beta$  spektra (eV)
- Zastúpenie v diskretnom spektre  $\alpha$ ,  $\gamma$  (%) príslušnej čiary
- Emisia zdroja
- Uhlová emisia zdroja

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

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

20

### Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Fluencia častíc ( $\text{m}^{-2}$ )
- Príkon fluencie častíc ( $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )  
– hustota toku
- 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  $J$  ( $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )  
– vektorová veličina, ostatné sú skalárne

21

### 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  $W(\text{eV})$

22

## 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

23

## 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.

24

## Veličiny používané pri hodnotení ožiarenia

- Prijem rádionuklidu – aktivita (Bq)
- Absorbovaná dávka ( $\text{Gy} = \text{J/kg}$ )
- Ekvivalentná dávka (Sv), radiačný váhový faktor (1)
- Efektívna dávka (Sv), tkanivový váhový faktor (1)
- Úväzok ekvivalentnej dávky (Sv)
- Úväzok efektívnej dávky (Sv)
- Dávkový ekvivalent, osobný, priestorový, smerový (Sv)
- Kolektívna efektívna dávka (manSv)

25

## System dávkových veličín v radiačnej ochrane



26

## 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.

27

## 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.

28

## 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.

29

## 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.

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

30

### 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.

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

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

31

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

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

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

32



## 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)

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

$$A = \lambda N$$

33

## Becquerel

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

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

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

34

## 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	$\dot{A}$	$\dot{A} = \frac{A}{t}$	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  $A$

35

## 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**

36

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

37

## 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.

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

38

## 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  $dt$ .

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

39

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

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

40

## Fluencia energie častíc, Príkon 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.

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

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

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

41

## 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.

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

42

## 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  $W(\text{eV})$

43

## Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

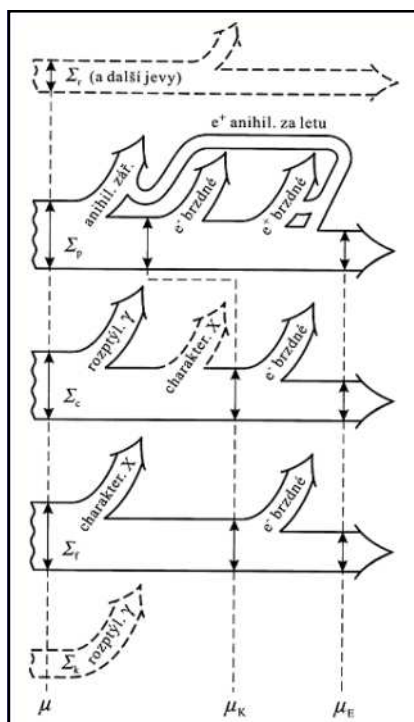
- Lineárny súčiniteľ zoslabenia  $\mu$  ( $\text{m}^{-1}$ )
- Lineárny súčiniteľ prenosu energie  $\mu_{tr}$  ( $\text{m}^{-1}$ )  
sa používa na popis prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú sekundárnu časticu
  - $N$  je počet častíc s energiou  $E$  dopadajúcich kolmo na vrstvu  $dx$  pričom vznikajú nabitú časticu 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.

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

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

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

44



Koeficient prenosu energie  
Koeficient absorpcie energie

$\Sigma_K$  - koherentný rozptyl

$\Sigma_f$  - fotoefekt

$\Sigma_C$  - Comptonov rozptyl

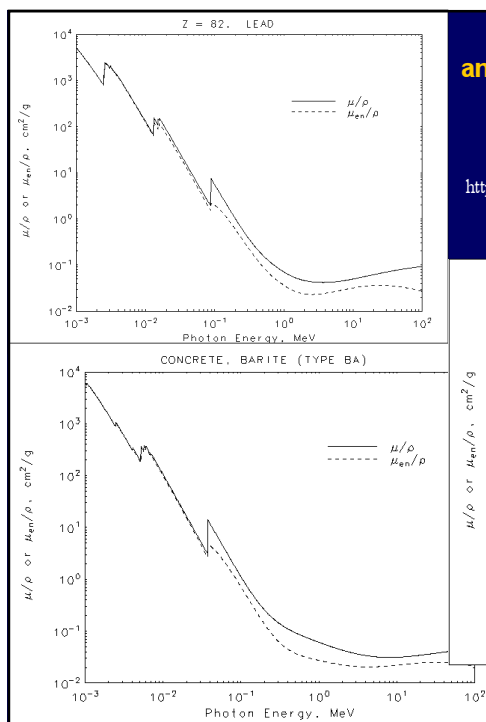
$\Sigma_p$  - tvorba párov

$\Sigma_r$  - fotojadrové reakcie

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

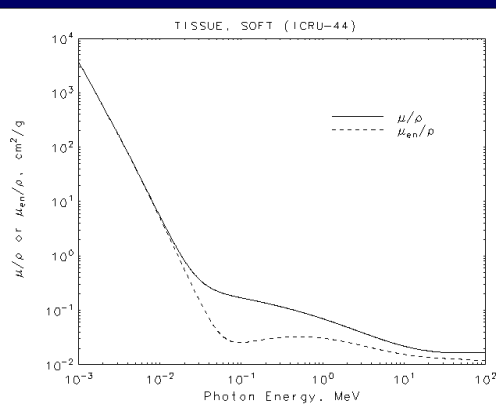
Časť odovzdanej energie sa odnesie mimo uvažovaného objemu. To zohľadňuje **koeficient absorpcie energie**  $\mu_E = \mu_{tr} (1-G)$  [ $m^{-1}$ ], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

45



### Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients

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



46

## 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 nabitkej častice v danom materiáli.

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

- 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

- **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  $LET = S$

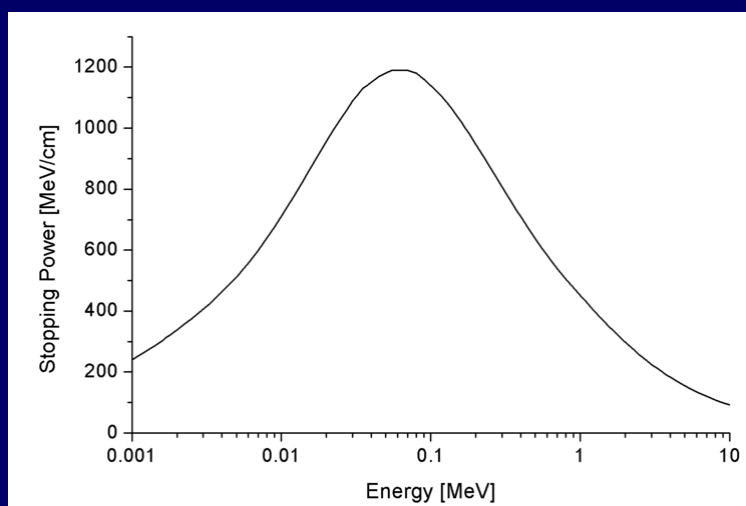
$$L = \frac{dE}{dx}$$

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

- **Stredná energia ionizácie  $W_i$**  (eV)

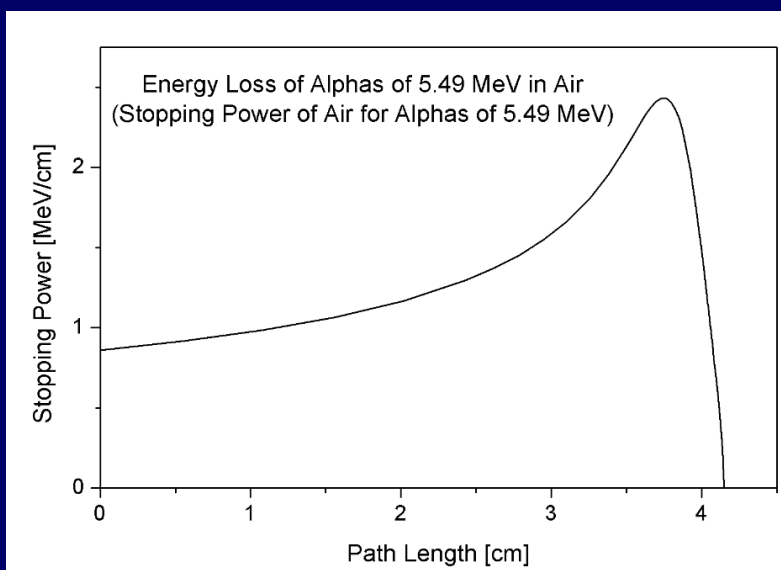
$$L = W_x \cdot J = \frac{\text{energia}}{1 \text{ iónový pár}} \cdot \frac{\text{počet iónových párov}}{\text{jednotka dráhy}} = \frac{\text{energia}}{\text{jednotka dráhy}}$$

## Brzdná schopnosť hliníka pre protóny





## Brzdňá schopnosť vzduchu pre alfa častice



49

## Intenzita ionizácie vzduchu $\alpha$ časticami



50

## 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.

51

## Odovzdaná energia

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

- Ionizujúce žiarenie odovzdá v určitom objeme látke energiu  $E$ , ktorá sa nazýva odovzdaná energia alebo tiež integrálna absorbovaná dávka dávka. Jednotkou je [J] alebo [MeV]
- $R_{in}$  ( $R_{out}$ ) vyjadruje sumárnu energiu všetkých častíc iž vstupujúcich do uvažovaného objemu (vychádzajúcich z objemu)
- $\sum Q$  - 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.

52

## Hmotnostná odovzdaná energia

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

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

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

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

53

## Absorbovaná dávka

- Absorbovaná dávka [ $\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] v danom bode pre každé  $\bar{z}$  je podiel strednej odovzdanej energie  $d\bar{E}$  látke v objemovom elemente  $dV$  a jeho hmotnosti  $dm$ .
- Dávka závisí od ožarovaného materiálu, preto sa pre presnosť uvádza aj látka, ku ktorej sa vzťahuje, napr.  $D_{\text{vzd}}$  - 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  $dt$ .

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

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

54

## 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

55

## 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.

56

## Vzt'ah medzi kermou a fluenciou častíc

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

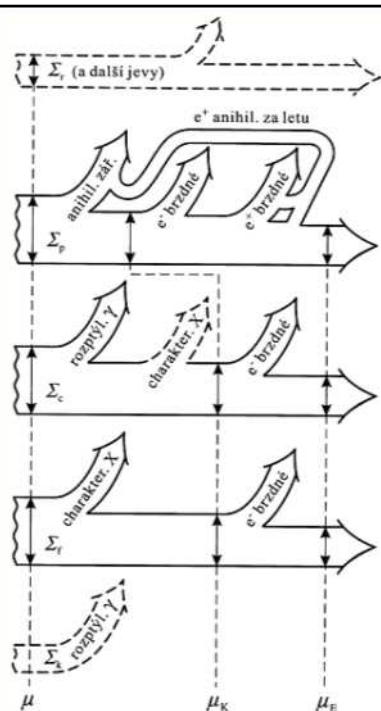
$$\Phi = \frac{dN}{dS}$$

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

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

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

57



### Koeficient prenosu energie Koeficient absorpcie energie

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

Z hľadiska prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú 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.

58

### Vzt'ah 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 hlavného rezu  $dS$  a tejto plochy.

59

### Vzt'ah 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

60

## Expozícia

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

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

▪  $\mu_{E,m}$  - hmotnostný koeficient absorpcie energie

▪  $W_i$  - stredná energia ionizácie

▪  $e$  - elementárny náboj

- Expozícia (ožiarenie) je najstaršia dozimetrická veličina.
- Je definované len pre fotónové žiarenie vo vzduchu.
- Vyjadruje podiel absolútnej hodnoty celkového elektrického náboja  $dQ$  iónov rovnakého znamienka vzniknutých vo vzduchu po zabrzdení všetkých uvoľnených elektrónov a pozitronov v objemovom elemente o hmotnosti  $dm$  a tejto hmotnosti.
- Jednotkou expozície je  $[C \cdot kg^{-1}]$ .
- Staršou jednotkou je röntgen  $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$ .
- Vo vzduchu platí prevod na kermu:  $1R = 8,76 mGy$

61

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

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

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

- 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  $[Gy \cdot m^2 \cdot s^{-1}]$ .
- Univerzálnejšou charakteristikou rádionuklidov je kermová konštanta gamma  $I^{\delta}$ .

62

## Dávkový ekvivalent

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

$$H = D \cdot Q \cdot N^* \quad [Sv]$$

- 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  $dL$

63

## Dávkový ekvivalent operačné veličiny

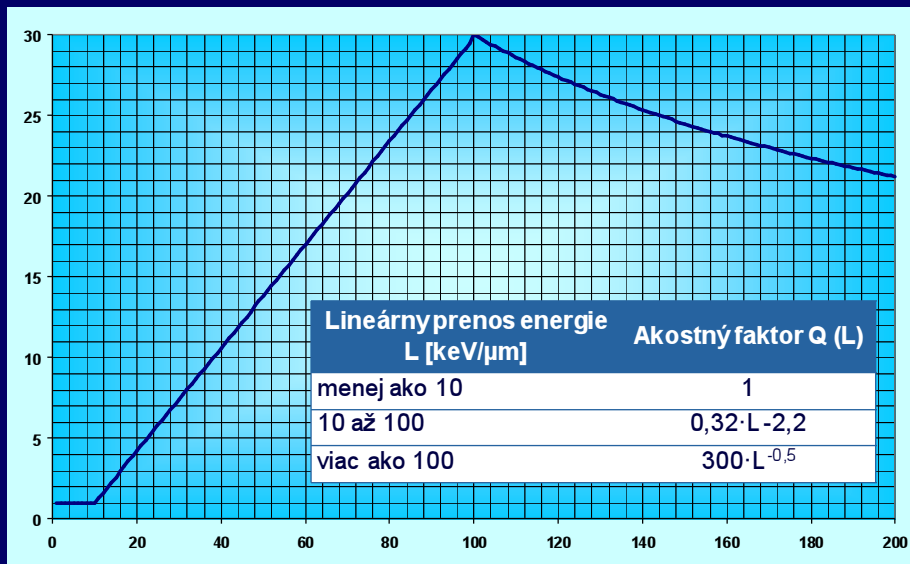
- je veličina používaná na základe odporúčaní ICRU\* (Medzinárodná komisia pre radiačné jednotky a merania), ktoré definujú tzv. operačné – pracovné veličiny
  - priestorový dávkový ekvivalent
  - smerový dávkový ekvivalent
  - osobný dávkový ekvivalent
- Pre účely radiačnej ochrany sa používa ekvivalentná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

\*ICRU Publication No. 51/1993

64



## Výpočet faktora kvality $Q(L)$



65

## 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  $S$

66

### 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.

67

### 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>.

68

## Hodnoty radiačného váhového faktora $w_R$

Druh žiarenia	Radiačný váhový faktor $w_R$
Fotóny	1
elektróny a mióny	1
protóny a nabité pióny	2
častice alfa, ťažké jadrá, štiepne fragmenty	20
neutróny, $E_n < 1 \text{ MeV}$	$2,5 + 18,2 \cdot e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
neutróny, $1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5,0 + 17,0 \cdot e^{-[\ln(2 \cdot E_n)]^2/6}$
neutróny, $E_n > 50 \text{ MeV}$	$2,5 + 3,25 \cdot e^{-[\ln(0,04 \cdot E_n)]^2/6}$

69

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

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

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

70

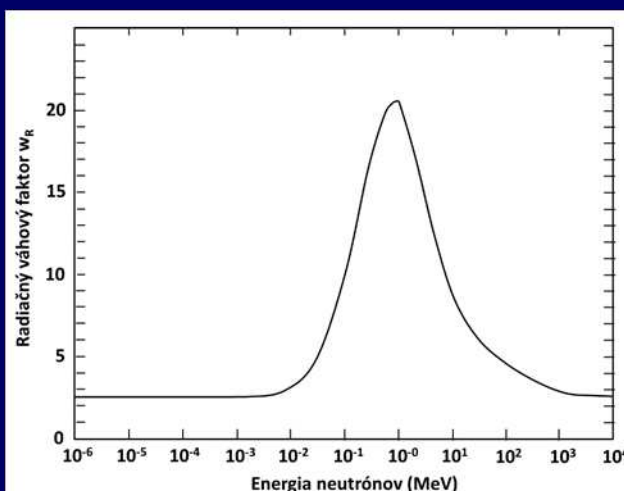
## Fotóny, elektróny a mezóny

- Fotóny, elektróny a mezóny sú druhy žiarenia s nízkou hodnotou LET ( $<10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ). Môže sa použiť  $w_R=1$  na určenie ekvivalentnej a efektívnej dávky pri hodnotení a usmerňovaní ožiarovania 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.

71

## $w_R$ silne závisí od energie neutrónov

V porovnaní s predchádzajúcou stupňovitou funkciou si treba všimnúť zníženú hodnotu  $w_R$  v oblasti nízkych energií a energií nad 100 MeV. Hodnoty sa blížia k 2,5 namiesto pôvodných 5.



## Protóny a pióny

- Dolet protónov o energii 10 MeV v tkanive je 1,2 mm a klesá s nižšími energiami. Tieto protóny sú teda absorbované v koži.
- Radiačný 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.

73

## 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  $RBE=10\div20$  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.

74

## Stanovenie ekvivalentnej dávky v koži pri povrchovej kontaminácii

$$H_K = \sum_i H_{K,i} = \sum_i \bar{A}_{K,i} \cdot C_{K,i} \cdot S_{K,i} \cdot T$$

$H_{K,i}$  je ekvivalentná dávka v koži od rádionuklidu  $i$ ,

$\bar{A}_{K,i}$  je priemerná povrchová aktivita rádionuklidu  $i$  na koži alebo odeve,

$C_{K,i}$  je konverzný koeficient príkonu ekvivalentnej dávky v koži rádionuklidu  $i$ ,

$S_{K,i}$  je tieniaci faktor pre zoslabenie beta žiarenia v odeve a

$T$  je doba expozície.

Konverzný koeficient  $C_{K,i}$  predstavuje nominálnu hodnotu príkonu ekvivalentnej dávky v koži ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ) na jednotkovú povrchovú aktivitu rádionuklidu ( $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ ).

Pre tieniaci faktor  $S_{K,i}$  charakterizujúci zoslabenie beta žiarenia bežným odevom sa odporúča používať hodnoty: 0,20 pre letné obdobie, 0,30 pre obdobie jar a jeseň, 0,001 pre zimné obdobie a 0,00 pre kožu nechránenú odevom.

75

Rádionuklid	( $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}/\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	Konverzné koeficienty príkonu ekvivalentnej dávky v koži $C_{K,i}$ ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}/\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	
H-3	0.00	As-76	2.10
C-14	0.32	Se-75	0.14
F-18	1.90	Br-77	0.01
Na-22	1.70	Br-82	1.50
Na-24	2.20	Rb-87	1.90
Al-26	1.80	Sr-85	0.06
P-32	1.90	Sr-89	1.80
P-33	0.86	Sr-90/Y-90	3.50
S-35	0.35	Y-90	2.00
Cl-36	1.80	Zr-95/Nb-95	1.60
K-40	1.50	Mo-99/Tc-99m	1.90
K-42	2.20	Tc-99m	0.25
K-43	1.90	Tc-99	1.20
Ca-45	0.84	Ru-103/Rh-103m	0.78
Ca-47/Sc-47	3.50	Ru-106/Rh-106	2.20
Sc-46	1.40	Ag-110m	0.68
Sc-47	1.50	Ag-111	1.80
Cr-51	0.015	Cd-109	0.54
Mn-52	0.761	In-111	0.38
Mn-54	0.062	In-113m	0.73
Mn-56	2.40	In-115m	1.30
Fe-52	1.10	Sn-125	2.30
Fe-55	0.016	Sb-122	2.20
Fe-59	0.97	Sb-124	2.20
Co-56	0.55	Sb-126	1.80
Co-57	0.12	Te-123m	1.10
Co-58	0.30	Te-132	0.78
Co-60	0.78	I-123	0.38
Ni-63	0.00	I-124	0.52
Ni-65	2.20	I-125	0.021
Cu-64	1.00	I-131	1.60
Cu-67	1.30		
Zn-65	0.076		
Ga-66	1.60		
Ga-67	0.35		
Ga-68	1.80		
		Cs-131	0.01
		Cs-134	1.40
		Cs-137	1.60
		Ba-133	0.13
		Ba-140/La-140	3.80
		La-140	2.10
		Ce-139	0.49
		Ce-141	1.80
		Ce-143	2.00
		Pr-143	1.70
		Pm-147	0.60
		Sm-153	1.60
		Eu-152	0.92
		Eu-154	2.10
		Eu-156	1.20
		Er-169	1.10
		Yb-169	1.00
		Re-186	1.80
		Re-188	2.30
		Ir-192	1.90
		Au-198	1.70
		Hg-197	0.092
		Hg-203	0.89
		Tl-201	0.27
		Tl-204	1.60
		Pb-210	0.0084
		Po-210	6.90E-07
		U-235	0.18
		U-238	2.30E-03
		Pu-238	3.70E-03
		Pu-239	1.40E-03
		Am-241	0.019
		Cm-244	2.20E-03
		Cf-252	3.20E-03

## Efektívna dávka

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

jednotkou je  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$   
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)

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

77

## Tkanivový váhový faktor $w_T$ podľa ICRP 103

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor $w_T$
kostná dreň (červená)	0,12
hrubé črevo	0,12
pľúca	0,12
žalúdok	0,12
Prsia	0,12
ostatné orgány a tkanivá <sup>a)</sup>	0,12
gonády	0,08
močový mechúr	0,04
pažerák	0,04
pečeň	0,04
štítna žľaza	0,04
povrch kostí	0,01
Mozog	0,01
slinné žľazy	0,01
Koža	0,01

<sup>a)</sup>  $w_T$  pre ostatné tkanivá (0,12) sa vzťahuje na aritmetický priemer stredných dávok v 13 orgánoch a tkanivách oboch pohlaví; ostatné tkanivá sú: nadobličky, hrudná dutina, žľezník, srdce, obličky, lymfatické uzliny, sval, sliznica dutiny ústnej, pankreas, prostata (muži), tenké črevo, slezina, týmus, maternica/krček maternice (ženy).

78

## 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

79

## Úväzok ekvivalentnej dávky

je časový integrál príkonu ekvivalentnej dávky v orgáne alebo tkanive T  
za čas  $\tau$  od prijmu rádionuklidu.

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

- Na účel hodnotenia veľkosti ožiarenia osôb a sledovania dodržiavania limitov ožiarenia sa pre výpočet úväzku ekvivalentnej dávky u osôb starších ako 18 rokov sa počíta s obdobím 50 rokov a u osôb mladších ako 18 rokov s obdobím 70 rokov od prijmu rádionuklidov.
- Jednotkou úväzku ekvivalentnej dávky je **Sievert (Sv)**.

80



## Úvázok efektívnej dávky

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

- je súčet úvázkov ekvivalentných dávok  $H_T(\tau)$  v orgáne alebo tkanive  $T$  za čas  $\tau$  od príjmu rádionuklidov vynásobených príslušným tkanivovým váhovým faktorom  $w_T$ .
- Jednotkou úvázku efektívnej dávky je **Sievert (Sv)**.

81

## Úvázok efektívnej dávky z príjmu rádionuklidov požitím alebo vdýchnutím za kalendárny rok

$$E(50) = \sum_j h(g)_{j,ing} \cdot I_{j,ing} + \sum_j h(g)_{j,inh} \cdot I_{j,inh}$$

- kde  $E(50)$  je úvázok efektívnej dávky z vnútorného ožiarenia za obdobie 50 rokov po prijme rádionuklidov,
- $I_{j,ing}$  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 pre výpočet úvázku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu  $j$  (Sv/Bq) potravou pre vekovú skupinu  $g$
- $h(g)_{j,inh}$  je konverzný faktor pre výpočet úvázku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu  $j$  (Sv/Bq) dýchaním pre vekovú skupinu  $g$ .

82

### Stanovenie efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarenia rádionuklidmi rozptýlených v ovzduší

Osoby, ktoré sa nachádzajú vo vnútri rádioaktívneho mraku, v ktorom sú rozptýlené rádionuklidy emitujúce gama žiarenie, sú vystavené celotelovému externému ožiareniu. Efektívna dávka z vonkajšieho ožiarenia gama žiarením z rádioaktívneho mraku sa stanoví pomocou vzťahu:

$$E_{Ext} = T \cdot \sum_i \bar{A}_{V,i} \cdot C_{V,i}$$

kde  $E_{Ext}$  je efektívna dávka z vonkajšieho ožiarenia,  $T$  je doba expozície,

$\bar{A}_{V,i}$  je priemerná objemová aktivita rádionuklidu  $i$  v ovzduší a

$C_{V,i}$  je konverzný koeficient efektívnej dávky rádionuklidu  $i$ .

Konverzný koeficient predstavuje nominálnu hodnotu príkonu efektívnej dávky ( $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ) na jednotkovú objemovú aktivitu rádionuklidu ( $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

83

Rádionuklid	( $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1} / \text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ )				
H-3	0.0E+00	Zr-93	0.0E+00	Cs-134	3.4E-04
C-14	0.0E+00	Zr-95	1.6E-04	Cs-136	4.8E-04
Na-22	4.8E-04	Zr-97	4.1E-05	Cs/Ba-137	1.3E-04
Na-24	1.0E-03	Nb-94	3.4E-04	Cs-138	5.2E-04
P-32	0.0E+00	Nb-95	1.7E-04	Ba-133	7.8E-05
P-33	0.0E+00	Mo-99	3.4E-05	Ba-139	7.8E-06
S-35	0.0E+00	Tc-99	1.1E-10	Ba-140	4.1E-05
Cl-36	1.8E-12	Tc-99m	2.8E-05	La-140	5.2E-04
K-40	3.4E-05	Ru-103	1.0E-04	La-141	9.3E-06
K-42	6.3E-05	Ru-105	1.7E-04	La-142	6.7E-04
Ca-45	3.4E-15	Ru/Rh-106a	4.4E-05	Ce-141	1.6E-05
Sc-46	4.4E-04	Pd-109	1.4E-07	Ce-143	5.6E-05
Ti-44	2.8E-05	Ag-110m	5.9E-04	Ce-144	3.7E-06
V-48	6.3E-04	Cd-109	4.8E-07	Ce/Pr-144a	1.1E-05
Cr-51	6.7E-06	Cd-113m	0.0E+00	Nd-147	2.8E-05
Mn-54	1.9E-04	In-114m	1.9E-05	Pm-145	3.5E-06
Mn-56	4.1E-04	Sn-113	1.8E-06	Pm-147	7.8E-10
Fe-55	4.8E-09	Sn-123	1.5E-06	Pm-149	2.5E-06
Fe-59	2.6E-04	Sn-125	6.7E-05	Pm-151	1.9E-10
Co-58	2.1E-04	Sn-126	1.0E-05	Eu-152	2.5E-04
Co-60	5.6E-04	Sb-124	4.1E-04	Eu-154	2.7E-04
Ni-63	0.0E+00	Sb-126	5.9E-04	Eu-155	1.2E-05
Cu-64	4.1E-05	Sb-127	1.4E-04	Gd-153	1.9E-05
Zn-65	1.3E-04	Sb-129	3.2E-04	Tb-160	2.4E-04
Ge-68	1.9E-08	Te-127m	6.7E-07	Ho-166m	3.5E-04
Se-75	8.5E-05	Te-129	1.1E-05	Ir-170	1.0E-06
Kr-85	4.8E-07	Te-129m	7.4E-06	Yb-169	5.9E-05
Kr-85m	3.4E-05	Te-131m	3.1E-04	Hf-181	1.1E-04
Kr-87	1.9E-04	Te-132	4.4E-05	Ta-182	2.8E-04
Kr-88	4.8E-04	Te-134	1.9E-04	W-187	1.0E-04
Kr-89	4.4E-04	I-125	2.3E-06	Ir-192	1.7E-04
Rb-86	2.1E-05	I-129	1.8E-06	Au-198	8.5E-05
Rb-88	1.5E-04	I-131	8.1E-05	Hg-203	4.8E-05
Rb-89	4.8E-04	I-132	5.2E-04	Tl-204	2.1E-07
Sr-89	3.0E-08	I-133	1.3E-04	Pb-210	2.8E-07
Sr-90	0.0E+00	I-134	5.9E-04	Bi-207	3.4E-04
Sr-91	1.5E-04	I-135	3.5E-04	Bi-210	0.0E+00
Y-90	0.0E+00	Xe-131m	1.8E-06	Po-210	1.9E-09
Y-91	7.8E-07	Xe-133	7.4E-06		
		Xe-133m	6.3E-06		
		Xe-135	5.2E-05		
		Xe-135m	9.3E-05		
		Xe-137	4.1E-05		
		Xe-138	2.6E-04		

 $C_{V,i}$ 

Ra-226	1.4E-06
Ac-227	2.7E-08
Ac-228	2.0E-04
Th-227	2.2E-05
Th-228	4.1E-07
Th-230	8.1E-08
Th-232	4.1E-08
Pa-231	6.3E-06
U-232	5.6E-08
U-233	5.2E-08
U-234	3.2E-08
U-235	3.3E-05
U-236	2.6E-08
U-238	2.2E-08
U-240	1.5E-07
Np-237	4.8E-06
Np-239	3.6E-05
Pu-236	2.5E-08
Pu-238	1.9E-08
Pu-239	1.7E-08
Pu-240	1.8E-08
Pu-241	0.0E+00
Pu-242	1.6E-08
Am-241	4.1E-06
Am-242m	1.0E-07
Am-243	1.1E-05
Cm-242	2.1E-08
Cm-243	2.7E-05
Cm-244	1.8E-08
Cm-245	1.5E-05
Cm-246	1.5E-08
Cf-252	1.6E-08

### 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  $H_{T,i}$

85

### Kolektívna efektívna dávka $S$

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

- $E_i$  je stredná efektívna dávka pre jednotlivca z populačnej podskupiny  $i$ , ktorej zodpovedá počet členov  $N_i$ .
- Jednotkou kolektívnej efektívnej dávky je **man.Sievert (man.Sv)**.

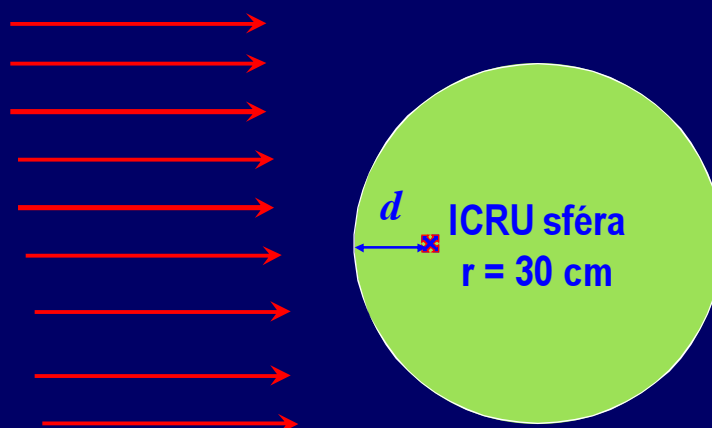
86

## Osobný dávkový ekvivalent - $H_p(d)$

- Osobný dávkový ekvivalent -  $H_p(d)$  je dávkový ekvivalent v mäkkom tkanive v určitom bode pod povrchom tela v hĺbke tkaniva  $d$ .
- Na účel osobnej dozimetrie, pre stanovenie efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarenia, ekvivalentnej dávky v každom orgáne ľudského tela s výnimkou kože a očnej šošovky zodpovedá hĺbkový osobný dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v hĺbke tkaniva 10 mm.
- Ekvivalentnej dávke v koži zodpovedá povrchový osobný dávkový ekvivalent  $H_p(0,07)$  v hĺbke 0,07 mm a ekvivalentnej dávke v očnej šošovke zodpovedá osobný dávkový ekvivalent  $H_p(3)$  v hĺbke 3 mm.
- Pri nerovnomernom ožiarení kože, pre ekvivalentnú dávku v koži sa berie do úvahy priemer z plochy  $1 \text{ cm}^2$  v najviac ožiarenej oblasti kože.

87

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



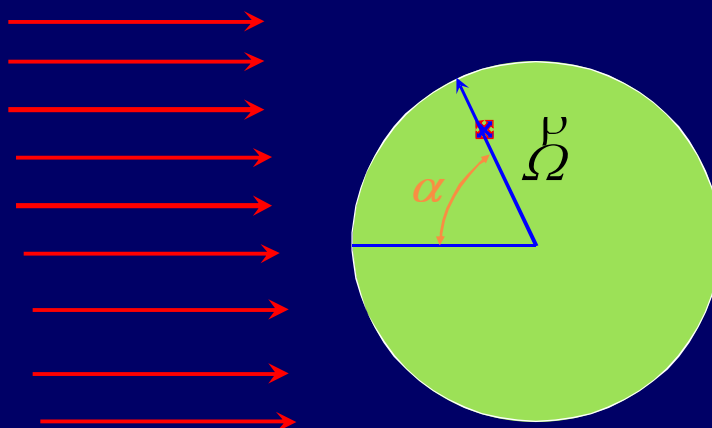
88

### 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  $\Omega$ .

89

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



90

## 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.

91

## 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

92

## 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  $H_p(0,07)$ .

93

## 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.

94

## Porovnanie s limitom

- Limity efektívnej dávky  $E$  sa vzťahujú na súčet efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarovania 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.

95

## Limity ožiarovania

**Limit ožiarovania** je hodnota ročnej alebo päťročnej efektívnej dávky alebo ročnej ekvivalentnej dávky, ktorá zodpovedá hornej hranici **prijateľného** rizika **stochastického** poškodenia zdravia v dôsledku ožiarovania pre jednotlivca aj spoločnosť a ktorá vylučuje výskyt deterministických účinkov ožiarovania

Sú ustanovené pre **pracovníkov, praktikantov, študentov a obyvateľov**.

Vzťahujú sa na **súčet príslušných dávok z vonkajšieho ožiarovania počas daného obdobia a úväzkov dávok z príjmu rádionuklidov počas toho istého obdobia**, pričom pre osoby staršie ako 18 rokov veku sa uvažuje časové obdobie 50 rokov a pre osoby mladšie ako 18 rokov veku časové obdobie do dosiahnutia veku 70 rokov.

96



### Efektívna dávka na účel osobného monitorovania pracovníkov Celková efektívna dávka, (mSv)

$$E = E_{external} + E(50) = Hp(10) + \sum_j h(g)_{j,ing} \cdot I_{j,ing} + \sum_j h(g)_{j,inh} \cdot I_{j,inh}$$

$Hp(10)$  je osobný dávkový ekvivalent v hĺbke tkaniva 10 mm,

$E(50)$  je úväzok efektívnej dávky z vnútorného ožiarenia za obdobie 50 rokov po prijíme rádionuklidov

$E_{external}$  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  $g$ .

97

### 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].

- Pri stanovení príjmu rádionuklidov z vody sa používajú pre jednotlivé skupiny osôb nasledovné hodnoty ročného príjmu vody: deti do 2 rokov 0,25 m<sup>3</sup> vody vo forme kvapaliny, deti od 2 do 17 rokov 0,45 m<sup>3</sup> vody vo forme kvapaliny a osoby staršie ako 17 rokov 1 m<sup>3</sup> vody, z toho 0,7 m<sup>3</sup> vo forme kvapaliny.
- Pri stanovení ročného príjmu rádionuklidov potravou je potrebné vychádzať zo štatistických prehľadov ročnej spotreby jednotlivých potravín a to osobitne pre jednotlivé vekové kategórie.

98

## 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>].

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

99

## Konverzné faktory $h_{inh}$ a $h_{ing}$

Tabuľka č. 4

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

Prvok	Polčas rozpadu	Inhalácia				Ingescia	
		typ	$f_1$	$h_{inh}$ [Sv/Bq]		$f_1$	$h_{ing}$ [Sv/Bq]
				$d_{ama} = 1 \mu m$	$d_{ama} = 5 \mu m$		
<b>vodík</b>							
H-3	12,3 r			Pozri tabuľku 7		1	$1,8 \cdot 10^{-11}$
(tríciovaná voda)							
organicky viazané	12,3 r			Pozri tabuľku 7		1	$4,2 \cdot 10^{-11}$
trícium							
<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	$2,2 \cdot 10^{-9}$
		M	0,5	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$		

100

### 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.

101

### 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.

102

**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>

103

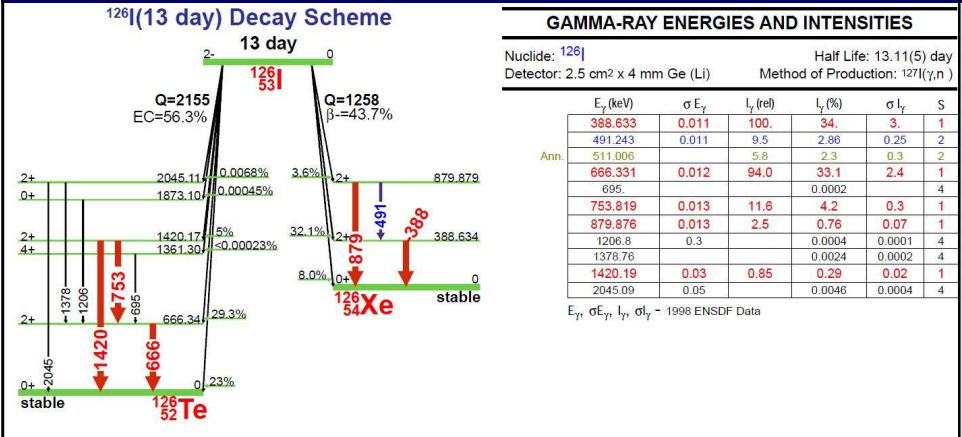
**Tabuľka č. 7**  
**Koeficienty efektívnej dávky pre rozpustné alebo reaktívne plyny**

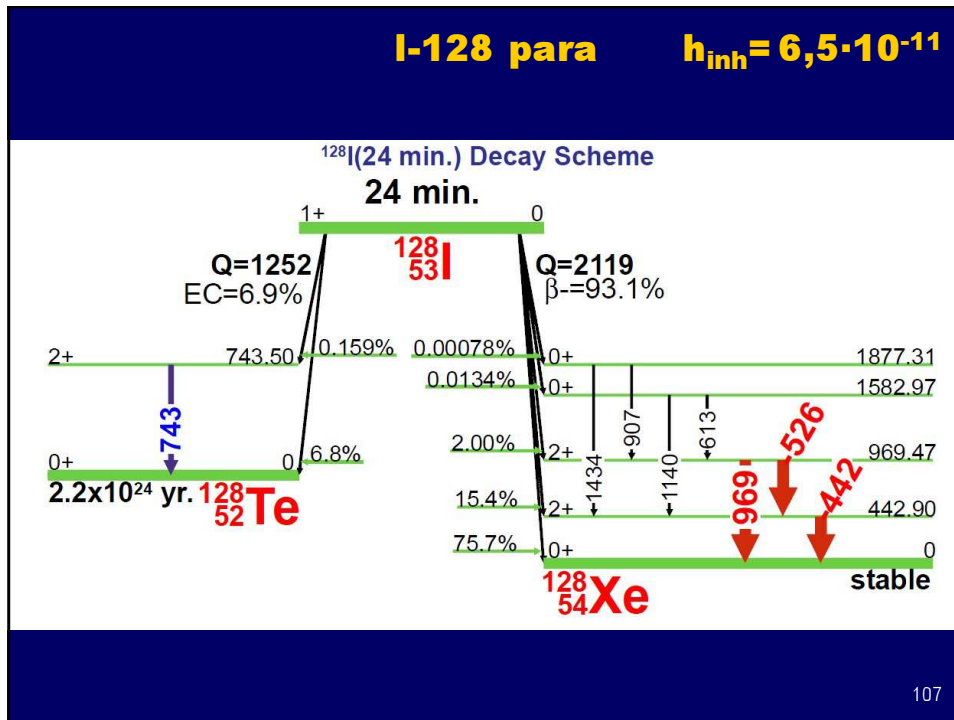
Nuklid/chemická forma	t <sub>1/2</sub>	h <sub>inh</sub> [Sv.Bq <sup>-1</sup> ]
H-3 plyn	12,3 r	1,8 · 10 <sup>-15</sup>
H-3 vodná para	12,3 r	1,8 · 10 <sup>-11</sup>
H-3 organicky viazané trícium	12,3 r	4,1 · 10 <sup>-11</sup>
I-120 para	1,35 h	3,0 · 10 <sup>-10</sup>
I-120m para	0,88 h	1,8 · 10 <sup>-10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

104

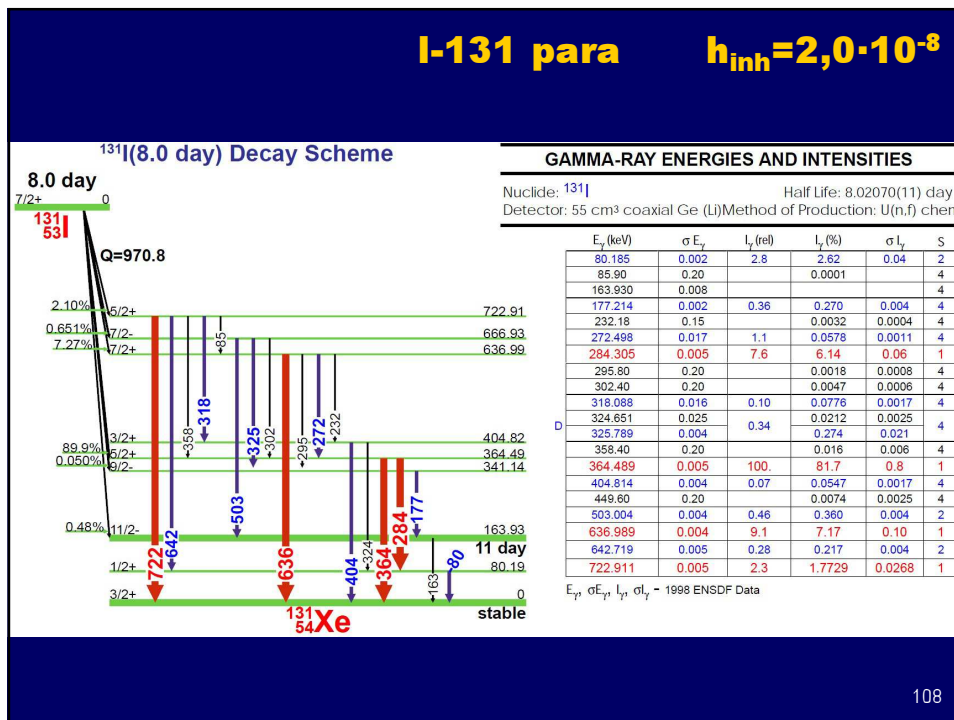


I-126 para  $h_{inh}=2,6\cdot10^{-8}$



**I-128 para** **$h_{inh}=6,5 \cdot 10^{-11}$** 

107

**I-131 para** **$h_{inh}=2,0 \cdot 10^{-8}$** 

108