

RADIAČNÍ BIOFYZIKA

PŘEDNÁŠKA 8

VELIČINY a JEDNOTKY

Martin Falk

BFU AVCR Brno

Email: falk@ibp.cz

Tel.: 728-084060

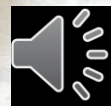
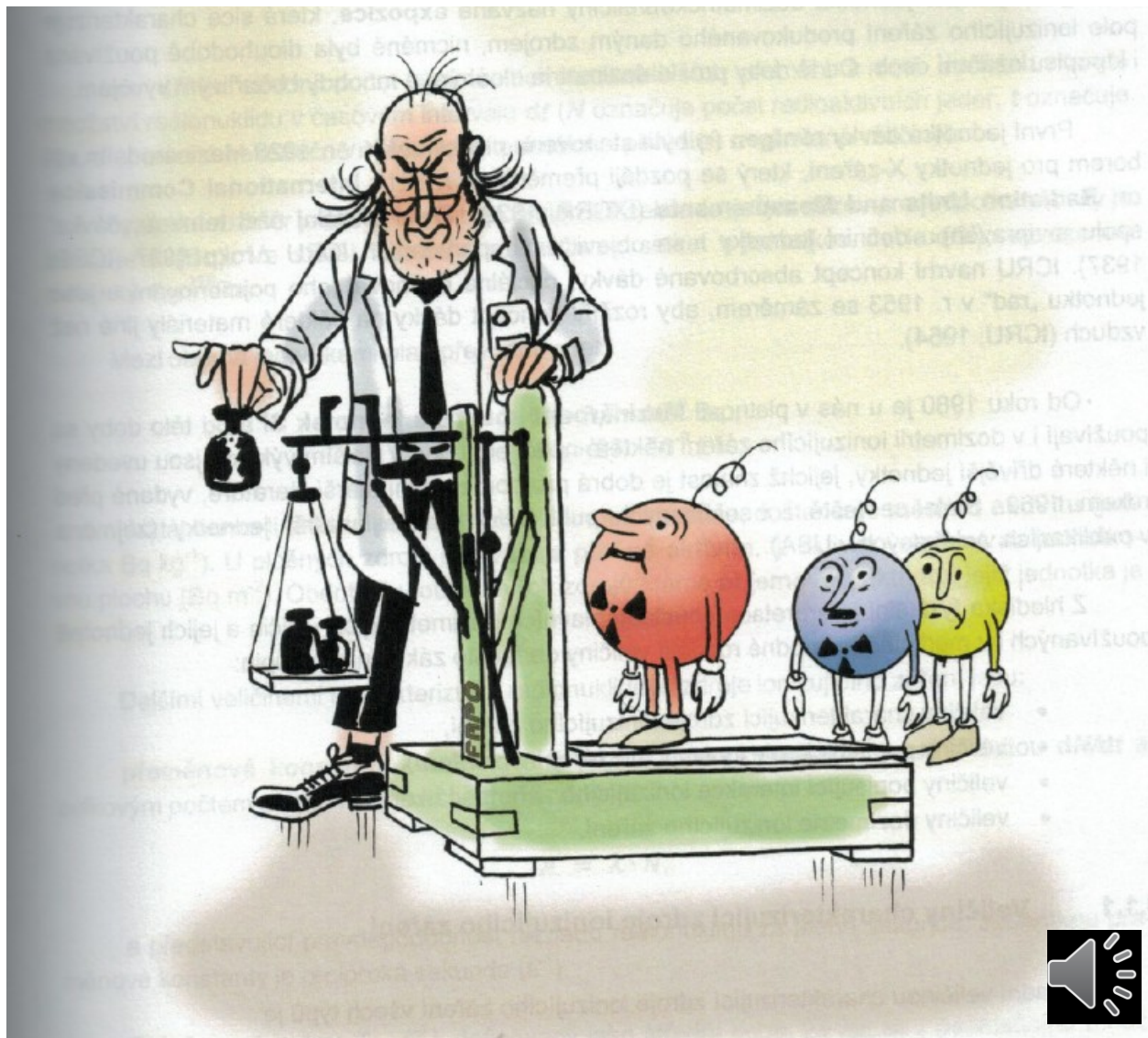


VELIČINY a JEDNOTKY

Charakterizující:

1. Zdroje IZ
2. Pole IZ
3. Interakce IZ
4. Dozimetrické
5. Biologického účinku

(vliv na člověka)

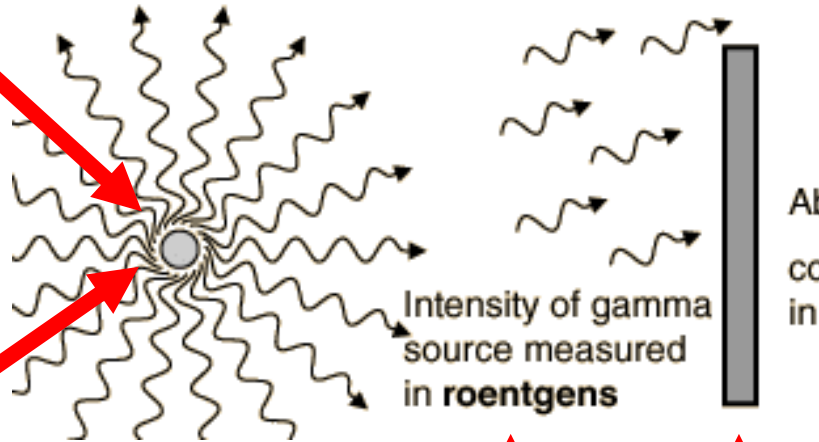


Veličiny vztahující IZ

Přirozený zdroj –
Aktivita [Bq, Ci]



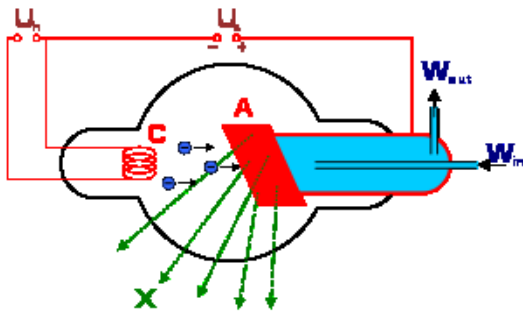
Activity of radioactive source
measured in
becquerels
or **curies**



Film badge or dosimeter
measures personnel
exposure in **rems** or
sieverts.



Absorbed dose in **rads** or **grays**
converted to dose-equivalent
in **rems** or **sieverts**



Umělé zdroje – Emise částic

Fluence, fluenční tok

Absorbovaná dávka [Gy], expozice, kerm

Ekvivalentní dávka [Sv]
Efektivní dávka [Sv]



A. CHARAKTERISTIKA ZDROJE

1. Emise (obecně) $\varphi_p = \frac{dN}{dt}$

Jednotkou emise částic je reciproká sekunda (s^{-1}).



2. Aktivita [s^{-1}]

Veličinou charakterizující pouze radionuklidové zdroje ionizujícího záření je aktivita A daného množství radionuklidu, definovaná jako podíl

Aktivita (základní veličina) - počet samovolných přeměn v daném množství látky za jednotku času

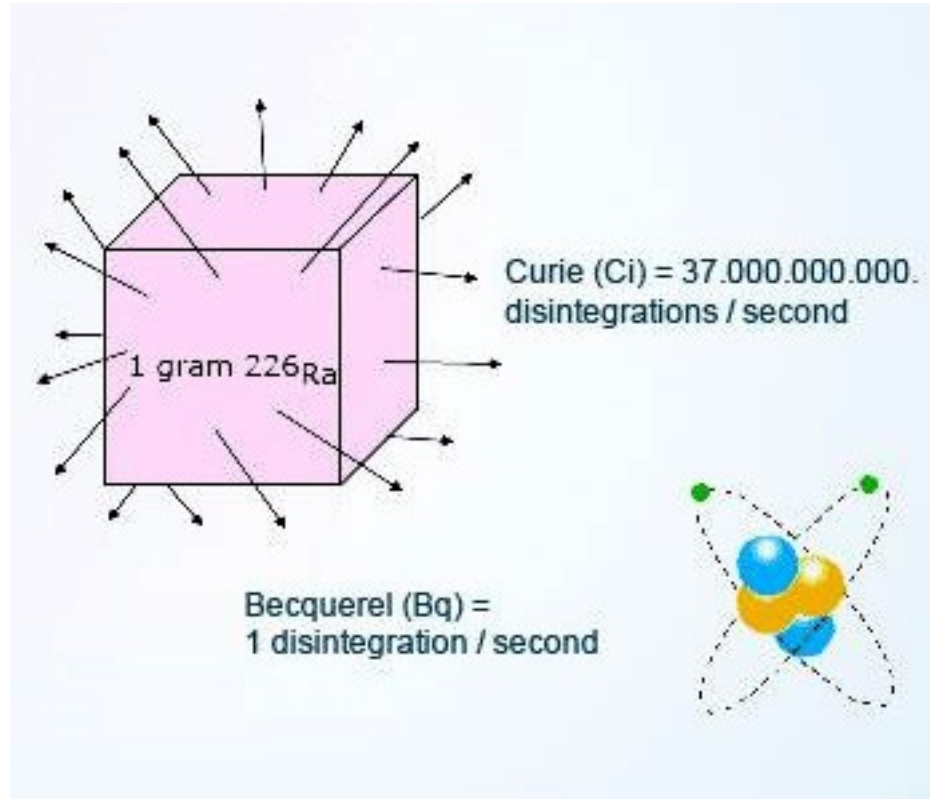
$$A = - \frac{dN}{dt},$$

počet rozpadajících se atomů
čas

kde dN je střední počet spontánních radioaktivních přeměn, k nimž dochází v tomto množství radionuklidu v časovém intervalu dt (N označuje počet radioaktivních jader, t označuje čas, d znamená nekonečně malý – infinitesimální – přírůstek uvažované veličiny).



Jednotky aktivity



1 Bq = 1 rozpad/s



Fyzikální rozměr jednotky aktivity je reciproká sekunda (s^{-1}) a název pro jednotku aktivity je **becquerel (Bq)**. Ve starší literatuře se můžeme setkat s jednotkou **curie (Ci)**, odvozenou z aktivity 1 g ^{226}Ra .

Mezi oběma jednotkami platí převodní vztah:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq, tzn. } 3,7 \times 10^{10} \text{ rozpadů/s}$$
$$1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci} \rightarrow 27 \text{ pCi} = \text{tzn. } 1 \text{ rozpad/s}$$



3. Měrná aktivita

K přesnější charakteristice radionuklidu je nutné vztáhnout aktivitu k vhodné hmotnostní, objemové nebo plošné jednotce (např. kg, m³, m²). Pak obdržíme

Vztáhneme-li aktivitu na jednotkovou hmotnost zářiče, dostaneme **měrnou aktivitu** (jednotka Bq kg⁻¹). U plošných zdrojů se uvažuje **plošná aktivita**, tj. aktivita vztažená na jednotkovou plochu (Bq m⁻²). Obdobně u objemových zdrojů máme **objemovou aktivitu**, jejíž jednotka je Bq m⁻³.

- **Měrná aktivita** - aktivita vztažená na určité množství – objem, plochu, hmotnost, látkové množství...

- objemovou aktivitu

$$a_V = \frac{A}{V} \quad \begin{matrix} [\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}] \\ (\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}, \text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}) \end{matrix}$$

$$a_S = \frac{A}{S}$$

- plošnou aktivitu

- hmotnostní aktivitu

$$a_m = \frac{A}{m} \quad [\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}]$$

$$a_n = \frac{A}{n} \quad [\text{Bq}\cdot\text{mol}^{-1}]$$

Aktivita nevyovídá nic o uvolněné energii, počtu částic...

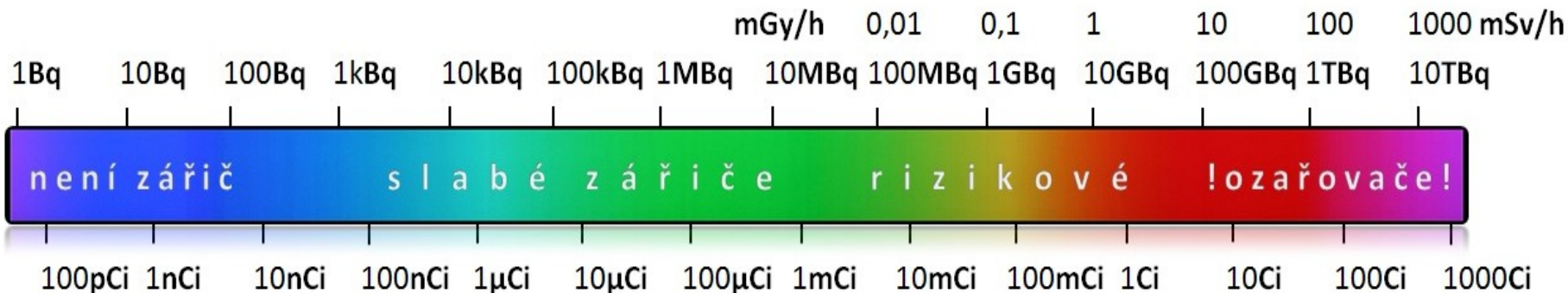
je potřeba definovat jiné veliči



Příklady měrných aktivit zdroje

ZEVNÍ OZÁŘENÍ (UZAVŘENÝ ZÁŘIČ)

dávkový příkon P v 1 m od „bodového“ nestíněného zářiče (přibližně):



běžné aktivity v 1 kg látek

limity ročních příjmů aktivit

poškození, smrt (po příjmu aktivity)

VNITŘNÍ KONTAMINACE OSOB (OTEVŘENÝ ZÁŘIČ + ROZPTYL + PŘÍJEM)

- Podloží (horniny): desítky až stovky Bq/kg
- Průměrná objemová aktivita radonu v ČR – 120 Bq/m³
- Slabé zářiče: do 1 MBq
- Ozařovače ve zdravotnictví: 100 GBq až 10 TBq (10¹² Bq)
- Množství ²³⁹Pu v atomových zbraních: 10¹⁰ – 10¹² Bq
- Lidské tělo 100 Bq/kg tzn. pro 70 kg člověka 7 000 Bq
- Radioaktivní prameny (lázně Teplice): 1 837 Bq/kg
- Radioaktivní prameny (lázně Jáchymov): 10 000 Bq/kg

Dle SÚJB



I člověk je radioaktivním zářičem (⁴⁰K)



Radioaktivita některých materiálů

1 dospělý člověk (100 Bq/kg)	7000 Bq
1 kg kávy	1000 Bq
1 kg superfosfátového hnojiva	5000 Bq
Vzduch v průměrném domě (100 m ²) v Austrálii (radon)	3000 Bq
Vzduch v průměrném domě (100 m ²) v Evropě (radon)	až 30 000 Bq
1 domácí požární detektor kouře (obsahuje americium)	30 000 Bq
Radioisotopový zářič pro lékařskou diagnostiku (příklad)	70 milionů Bq
Radioisotopový zářič pro lékařskou terapii (příklad)	100 000 000 milionů Bq (100 TBq)
1 kg vitrifikovaných vysokoaktivních odpadů po 50 letech	10 000 000 milionů Bq (10 TBq)
1 luminiscenční světelné znamení „Exit“ (obsahuje tritium)	1 000 000 milionů Bq (1 TBq)
1 kg uranu	25 milionů Bq
1 kg uranové rudy (naleziště Kanada, 15 %)	25 milionů Bq
1 kg uranové rudy (naleziště Austrálie, 0.3 %)	500 000 Bq
1 kg nízkoaktivních jaderných odpadů (příklad)	1 milionů Bq
1 kg uhelného popílku	2000 Bq
1 kg granitu (žuly)	1000 Bq



4. PŘEMĚNOVÁ KONSTANTA

Dalšími veličinami charakterizující radionuklidové zdroje ionizujícího záření jsou:

přeměnová konstanta λ – definovaná jako konstanta úměrnosti mezi aktivitou dN/dt a celkovým počtem atomů N , dosud nepřeměněných,

λ_p = physical decay constant

$$\lambda = \frac{A}{N} \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

celkový počet atomů \rightarrow

dN/dt
počet
rozpadajících se
atomů/čas

a představující pravděpodobnost rozpadu radionuklidu za jednu sekundu. Jednotkou přeměnové konstanty je reciproká sekunda (s^{-1}).

Isotope	Half life	Decay constant (s^{-1})
Uranium 238	4.5x10 ⁹ years	5.0x10 ⁻¹⁸
Plutonium 239	2.4x10 ⁴ years	9.2x10 ⁻¹³
Carbon 14	5570 years	3.9x10 ⁻¹²
Radium 226	1622 years	1.35x10 ⁻¹¹
Free neutron 239	15 minutes	1.1x10 ⁻³
Radon 220	52 seconds	1.33x10 ⁻²
Lithium 8	0.84 seconds	0.825
Bismuth 214	1.6x10 ⁻⁴ seconds	4.33x10 ³
Lithium 8	6x10 ⁻²⁰ seconds	1.2x10 ¹⁹



Aktivita vyjádřená pomocí rozpadové konstanty λ

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

počet rozpadajících se atomů

celkový počet atomů

$$n = \frac{m}{M} \quad N_{av} = \frac{N}{n}$$

$$A = \lambda N_{AV} n$$

Avogadrova konst.

látkové množství

$$A = \lambda \frac{m}{M} N_{av}$$

kde m – hmotnost radionuklidu

M – molární hmotnost radionuklidu

N_{av} – Avogadrovo číslo ($6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

vyjadřuje počet částic v jednotkovém látkovém množství (v 1 molu)


$$A = \frac{0,693 m}{T M} N_{av}$$

kde T – poločas rozpadu radionuklidu.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda}$$

Radioactive half-life

Radioactive decay constant



5. Poločas přeměny $T_{1/2}$ (T_f) = poločas rozpadu, definovaný jako střední doba, za niž se z počátečního množství daného radionuklidu spontánně přemění právě jedna polovina:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda} \approx 0.693\tau$$

Radioactive half-life

Radioactive decay constant

Mean lifetime

STŘEDNÍ DOBA ŽIVOTA τ [s]

Rovná se převrácené hodnotě λ .

Definuje tedy střední dobu, za niž dojde k přeměně dané entity

Např.: pro neutrony je $T_{1/2}$ cca 10.3 min, $\lambda = 0.067/\text{min}$ a $\tau = 14.8$ min

Jednotkou poločasu přeměny je sekunda (s).

2.

Z biologického hlediska je důležitou charakteristikou radionuklidů **tzv. biologický poločas T_b** , který je definován jako doba, za kterou se vyloučí z organismu (případně z oblasti zájmu) právě polovina podané látky (bez ohledu na její fyzikální rozpad).

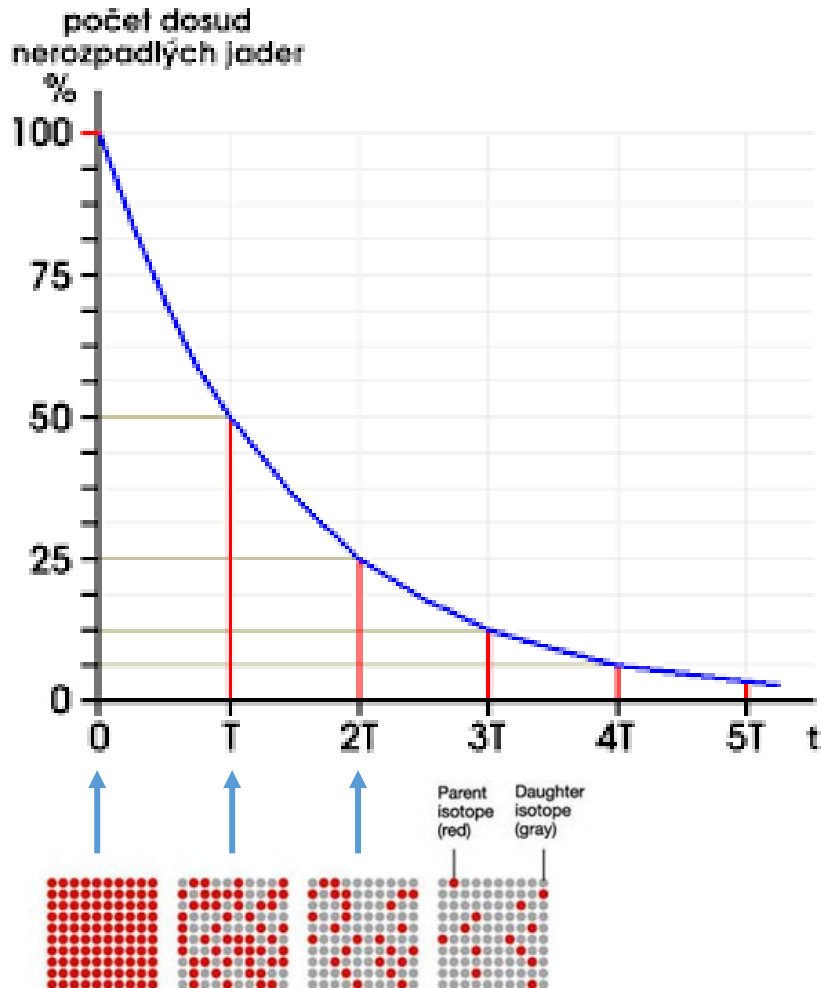
Veličina, která spojuje účinky fyzikálního rozpadu a biologických procesů ovlivňujících jeho eliminaci z organismu se nazývá **efektivní poločas T_{ef}** a je dána vztahem:

3.

$$\frac{1}{T_{ef}} = \frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_b} \rightarrow T_{ef} = \frac{T_b \cdot T_{1/2}}{T_b + T_{1/2}}$$



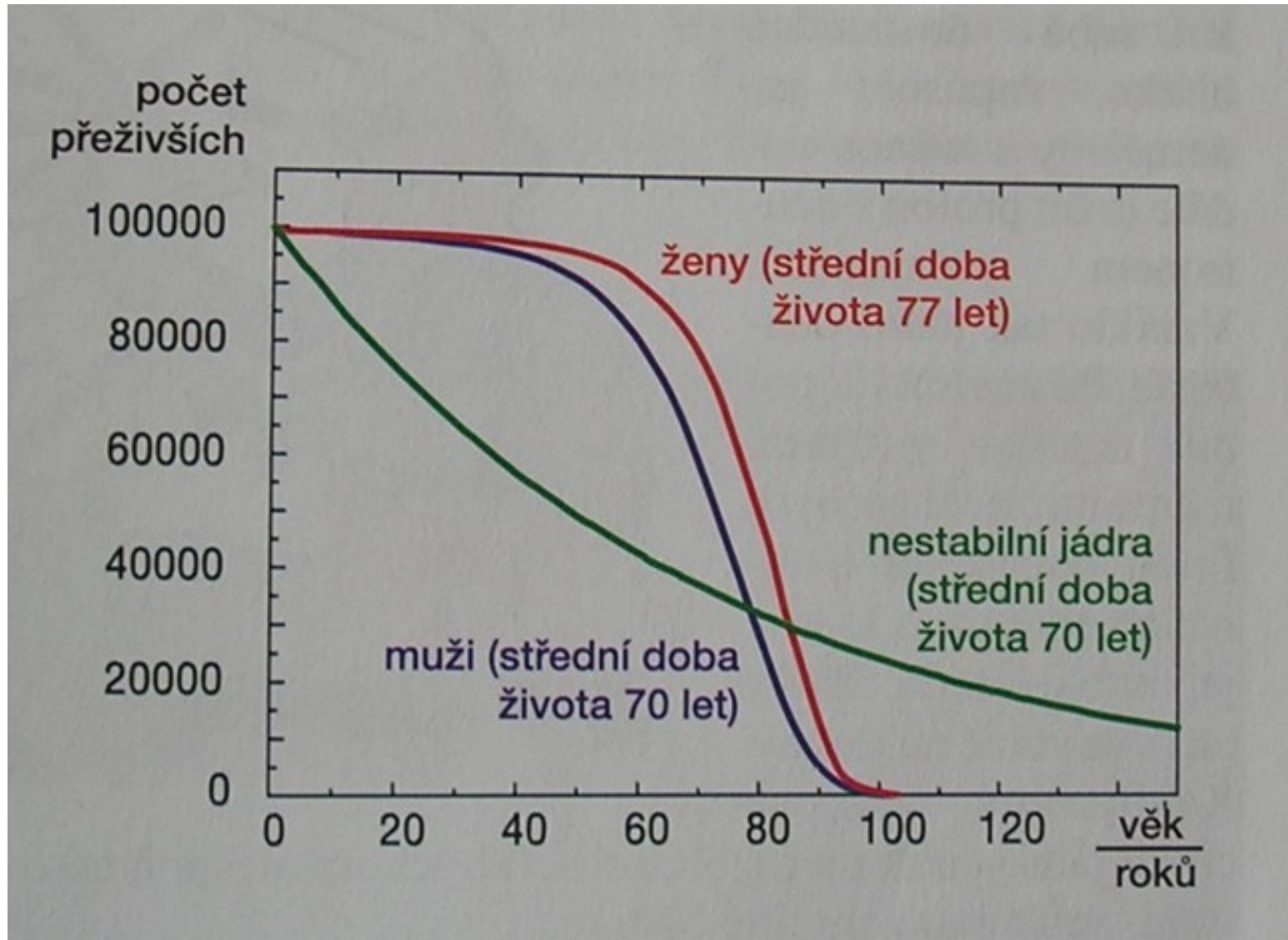
Radioaktivita ubývá s časem. Každý radionuklid má charakteristickou konstantu - poločas přeměny.



- Ionizující záření není závislé na změnách teploty, tlaku, ani na chemických reakcích radionuklidů. **Ubývá** však s časem.
- **Poločas přeměny** je doba, za kterou se přemění právě polovina všech radioaktivních jader přítomných na začátku děje. Za další poločas přeměny se pak rozpadne opět polovina (tj. zbývá 1/4 původních jader) atd.
- **Jaderná přeměna je statistický děj** a její pravděpodobnost je stejně veliká pro všechny stejně velké časové intervaly.
- Za dobu odpovídající 10 poločasům přeměny klesne aktivita na tisícinu původní hodnoty.
- Za tuto dobu radioizotop prakticky zanikne (vymře). Přeměněné atomy ovšem nezmizí - staly se z nich atomy dceřiného prvku.
- Poločasy přeměn se pohybují od zlomků sekundy do milionů let.



Poločas rozpadu



Aktivita v čase

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda_p N \quad \lambda_p = \text{physical decay constant}$$



$$A(t) = A_0 e^{-\lambda_p t}$$



$$A_t = A_0 e^{-\frac{0,693}{T} t},$$

kde A_0 - počáteční aktivita radionuklidu v čase $t = 0$ (Bq)

A_t - aktivita radionuklidu v čase t (Bq)

T - poločas přeměny radionuklidu (s).



B. Veličiny charakterizující pole záření

Zdroje ionizujícího záření vytvářejí kolem sebe v prostoru i v látkovém prostředí, které je obklopují, určitá pole ionizujícího záření. K základnímu dozimetrickému popisu libovolného pole záření v určitém bodě postačí tyto základní fyzikální informace:

- energie záření, (de facto charakterizuje i zdroj IZ)
- fluence energie, resp. fluence částic.

Quantity:	Formula:	Unit:
Fluence (Φ)	$\phi = \frac{dN}{dA}$	cm^{-2}
Fluence Rate (φ)	$\varphi = \frac{d\phi}{dt}$	$cm^{-2} \cdot s^{-1}$
Energy Fluence (Ψ)	$\psi = \frac{dE}{dA}$	$\frac{MeV}{cm^2}$
Energy Fluence Rate (Ψ)	$\psi = \frac{d\psi}{dt}$	$MeV \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$

Table 1: Mathematical relationship and units of quantities used to describe ionizing radiation.



1. ENERGIE záření

- Velmi důležitá veličina:
- Energie záření charakterizuje jak **samotné záření**, tak i jeho **zdroj**
- Energie emitovaných částic je totiž jednoznačnou charakteristickou radionuklidu
- Na energii závisí i další (biologicky) důležité vlastnosti záření – **hustota ionizace, dolet**
- Jednotkou energie IZ je **joule [J]**, používá se však spíše vyjádření v elektronvoltech [eV] a jeho násobcích – **keV, MeV**
- Platí: **$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$** ($= 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg}$)
 $1 \text{ J} = 6.24150913 \times 10^{18} \text{ eV}$ ($= 10^7 \text{ erg}$)



Charakteristickou veličinou ionizujícího záření je jeho energie E . Pro korpuskulární částici je to celková energie počítaná podle relativistického vztahu:

$$E = m \cdot c^2$$

kde m je relativistická hmotnost částice (kg),
 c rychlost světla ve vakuu (m s^{-1}).

Pro elektromagnetické záření, kterému je přisuzován vlnový charakter, je energie kvanta záření vyjádřena vztahem:

$$E = h \cdot \nu$$

kde h je Planckova konstanta ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$),
 ν kmitočet (frekvence) uvažovaného záření (s^{-1}).

Hlavní jednotkou energie je joule (J). V jaderné fyzice a dozimetrii se energie záření obvykle vyjadřuje v jednotkách elektronvolt (eV) a v jeho násobcích: kiloelektronvolt (keV), mega-elektronvolt (MeV).

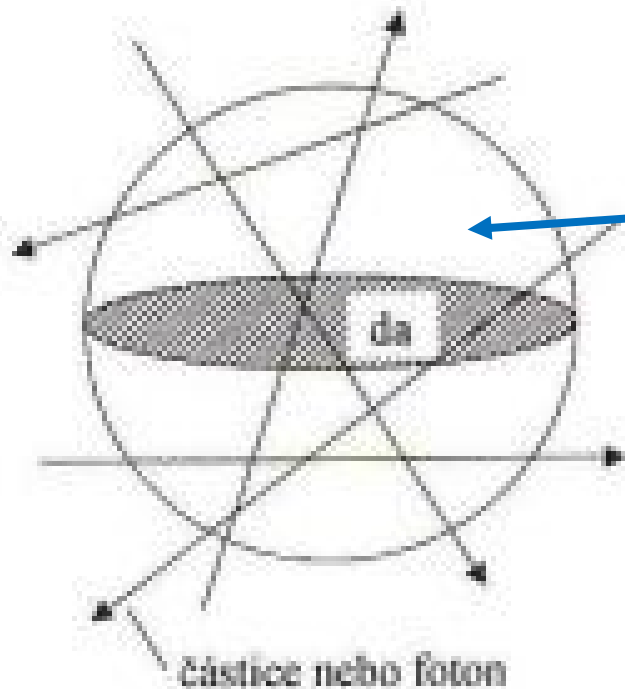
Tato vedlejší jednotka souvisí s hlavní jednotkou energie (joule) vztahem

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



2 FLUENCE ČÁSTIC / FOTONŮ

Pole IZ dále charakterizuje **fluence částic nebo fotonů Φ** neboli hustota toku částic nebo fotonů). Je to poměr počtu částic dN , které vstoupily v daném bodě měření do koule s plochou hlavního řezu da , a této plochy.



$$\phi = \frac{dN}{da} \quad [\text{m}^{-2}]$$

Φ - fluence částic;
 dN - počet částic nebo fotonů, jež vstoupily do koule s plošným obsahem da hlavního řezu.
Jednotkou fluence je m^{-2} .

Obrázek k definici fluence (hustoty prošlých částic:

částice přicházející ze všech směrů, čárkovaně je vyznačen hlavní řez koule o ploše da



3. Příkon fluence částic (hustota toku částic)

Často se používá další veličiny, která popisuje rychlost růstu fluence v daném časovém okamžiku, a tou je **příkon fluence částic** nebo fotonů (hustota toku částic nebo fotonů); je dán poměrem přírůstku fluence za časový interval dt .

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

φ - *příkon fluence částic*;

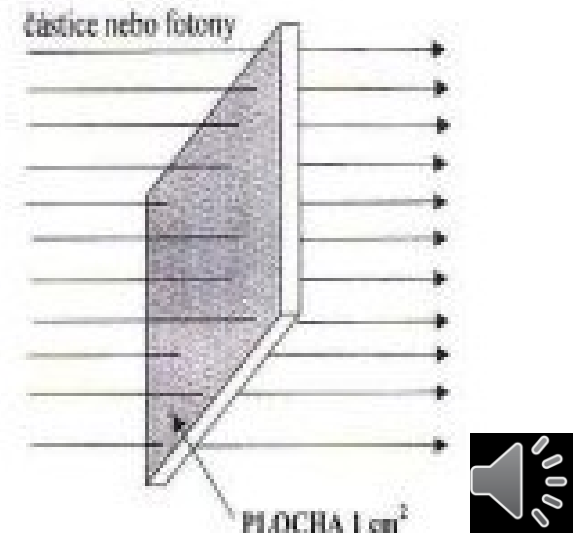
Φ - *fluence částic*;

dt - *časový interval*.

Jednotkou příkonu fluence je $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Ve speciálním případě širokého rovnoběžného homogenního svazku částic nebo fotonů udává tato veličina počet částic nebo fotonů, jež projdou plochou 1 m^2 (umístěnou kolmo na jejich směr) za 1 s.

Obrázek: je znázorněn rovnoběžný svazek částic a plocha 1 cm^2 umístěná kolmo na směr jejich šíření.



Monoenergetic beam	Polyenergetic beam
Particle fluence, Φ [m^{-2}]	
$\Phi = \frac{dN}{dA}$	$\Phi_E(E) = \frac{d\Phi}{dE}(E)$
Energy fluence, Ψ [J/m^{-2}]	
$\Psi = \frac{dE}{dA} = \frac{dN}{dA}E = \Phi E$	$\Psi_E(E) = \frac{d\Psi}{dE}(E) = \frac{d\Phi}{dE}(E)E$
Particle fluence rate, $\dot{\Phi}$ [$\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	
$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt}$	
Energy fluence rate (intensity), $\dot{\Psi}$ [$\text{J}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]	
$\dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt}$	



C. Veličiny popisující interakci ionizujícího záření s látkou

Popis interakcí nenabitých (nepřímoionizujících) záření

- fotony a neutrony
- Zcela jiný charakter interakcí s hmotou než přímoionizující IR, tudíž i jiné veličiny popisující tyto interakce.
- Typickým rysem interakcí je zde jejich diskrétní povaha
- K interakcím dochází s určitou pravděpodobností, závislé na druhu částic, jejich energii a druhu absorbující látky
- Při jedné interakci může dojít ke ztrátě velké části či dokonce veškeré energie částice/fotonu

Veličiny

- Účinný průřez – pravděpodobnost interakce částic s atomy látky
- Součinitel zeslabení – viz. přednáška „Ochrana před IZ“
- Součinitel přenosu energie
- Součinitel absorpce energie



Zeslabení svazku záření γ nebo rentgenového záření se vyjadřuje pomocí **lineárního součinitele zeslabení m** vztahem:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu d}$$

φ_0 - příkon fluence fotonů před zeslabením;

φ - příkon fluence po průchodu vrstvou materiálu o tloušťce d ;

E - Eulerovo číslo, základ přirozených logaritmů ($e = 2,71$);

μ - lineární absorpční koeficient;

d - tloušťka absorbátoru.

Jednotkou lineárního součinitele zeslabení je $\mathbf{m^{-1}}$; častěji se používá $\mathbf{cm^{-1}}$.



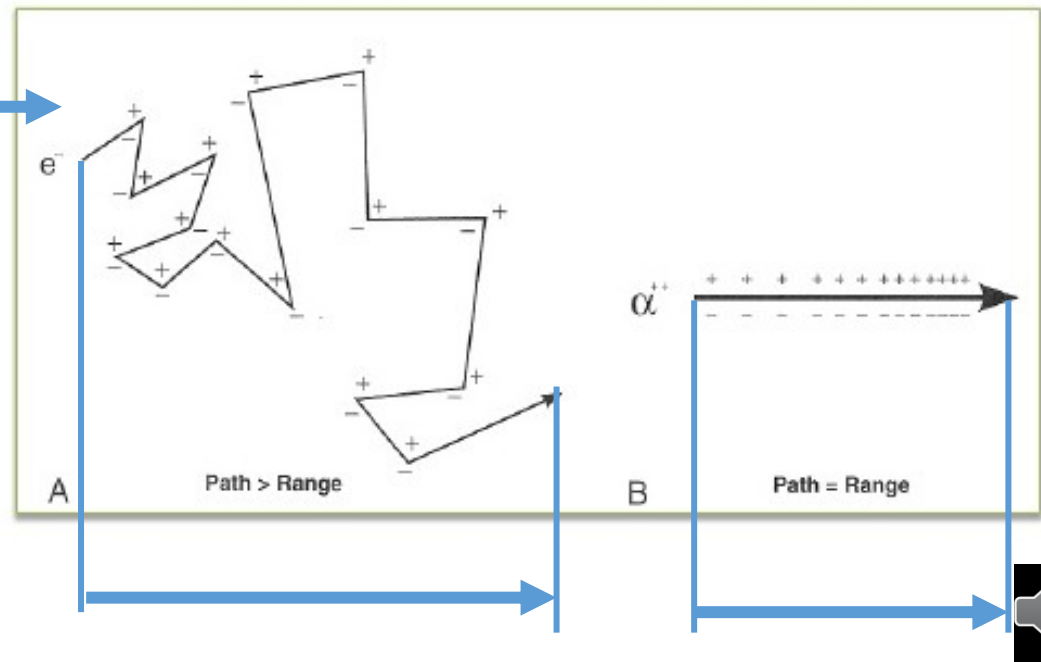
C. Veličiny popisující interakci ionizujícího záření s látkou

Popis interakcí nabitých (přímoionizujících) záření

- Ztrácejí svou energii (z makroskopického hlediska) v zásadě kontinuálním způsobem

Veličiny

- Dosah částic
- Brzdná schopnost
- Lineární přenos energie (LET)
– viz později



D. DOZIMETRICKÉ VELIČINY

- Přímoionizující záření: **Dávka a dávkový příkon**
- Nepřímoionizující záření: **Kerma, expozice (a jejich příkony)**

DOZIMETRICKÉ VELIČINY – 1. ABSORBOVANÁ DÁVKA

Základní veličinou je **absorbovaná dávka D** , která je definována jako poměr střední energie $\overline{d\varepsilon}$ sdělené v objemovém elementu dávky o hmotnosti dm a hmotnosti tohoto elementu.

Krátce lze říci, že absorbovaná dávka je energie ionizujícího záření absorbovaná v jednotce hmotnosti ozařované látky v určitém místě.

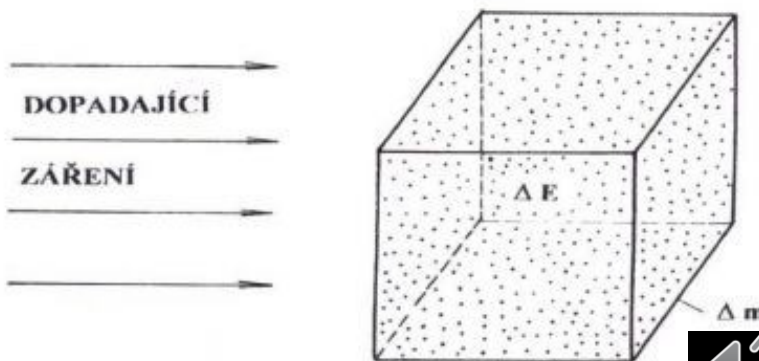
D - absorbovaná dávka;

$d\varepsilon$ - střední energie;

dm - hmotnost látky.

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

ABSORBOVANÁ DÁVKA $D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$



ΔE - ENERGIE ABSORBOVANÁ V Δm

Jednotkou absorbované dávky je J.kg^{-1} , pro který byl zaveden název **gray (Gy)**.

1 Gy = 100 rad (Radiation Absorbed Dose)



2. Dávkový příkon

je poměr přírůstku dávky dD
za čas dt .

D - dávkový příkon;

dD - přírůstek dávky;

dt - časový interval.

Jednotkou je $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$, často se dávkový příkon
vyjadřuje v $\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ nebo v $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$.

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

nízký příkon

Stejná dávka

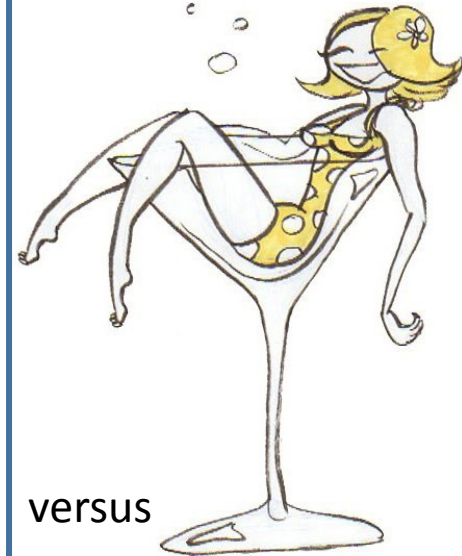
vysoký příkon



versus



Stejná dávka
nízký příkon



versus

vysoký příkon



3. Kerma K

je definována pro nepřímooionizující záření
Kinetic Energy Released per unit MAss

Charakterizuje energii předanou v daném prostředí primárními nenabitými částicemi/fotony částicím nabitým

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

Jednotkou kermy je, stejně jako jednotkou absorbované dávky, $\text{J/kg} = \mathbf{Gy}$.

K - kerma;

dE_k - součet počátečních kinetických energií

všech nabitých částic

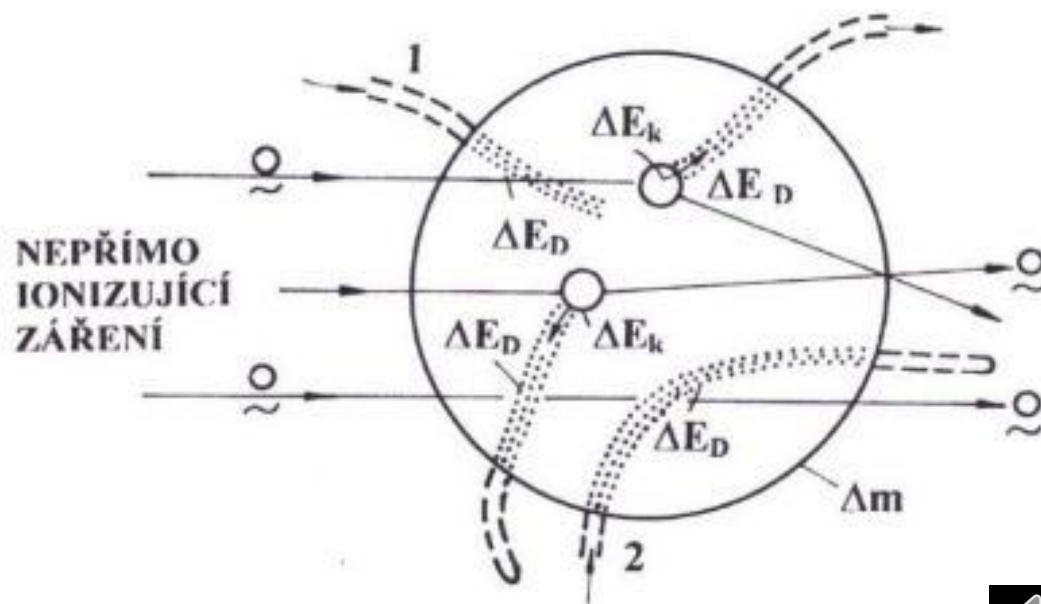
uvolněných nenabitými

ionizujícími částicemi v

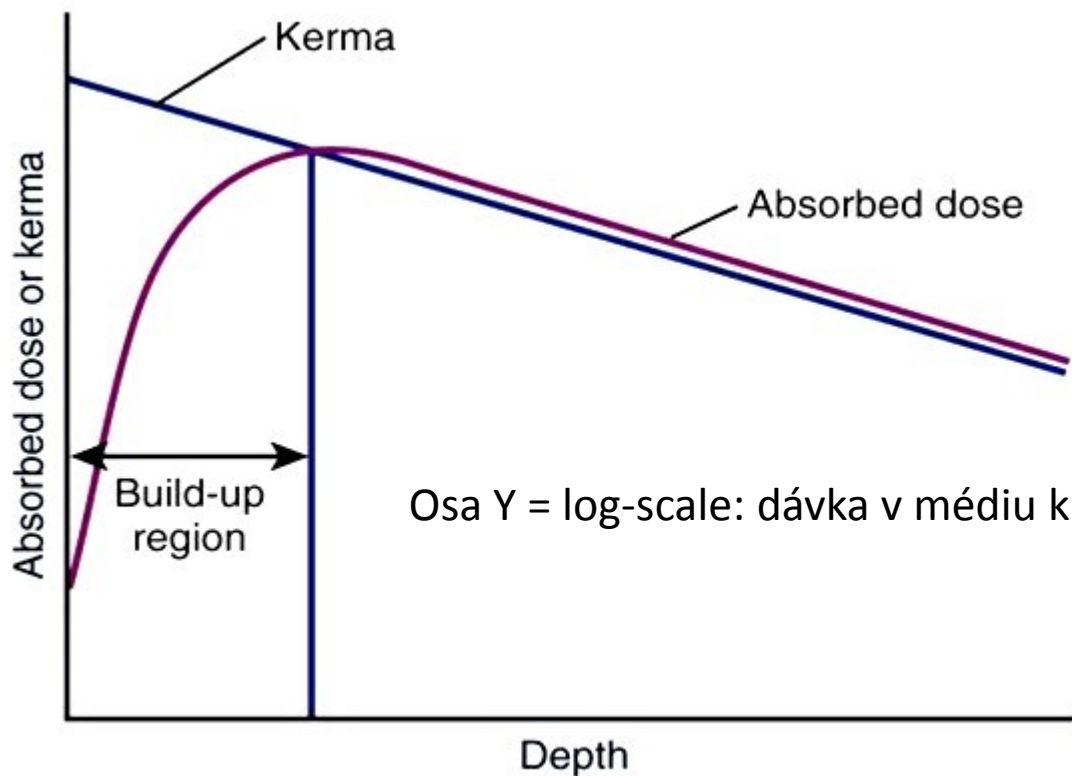
určitém objemu látky o

hmotnosti dm ;

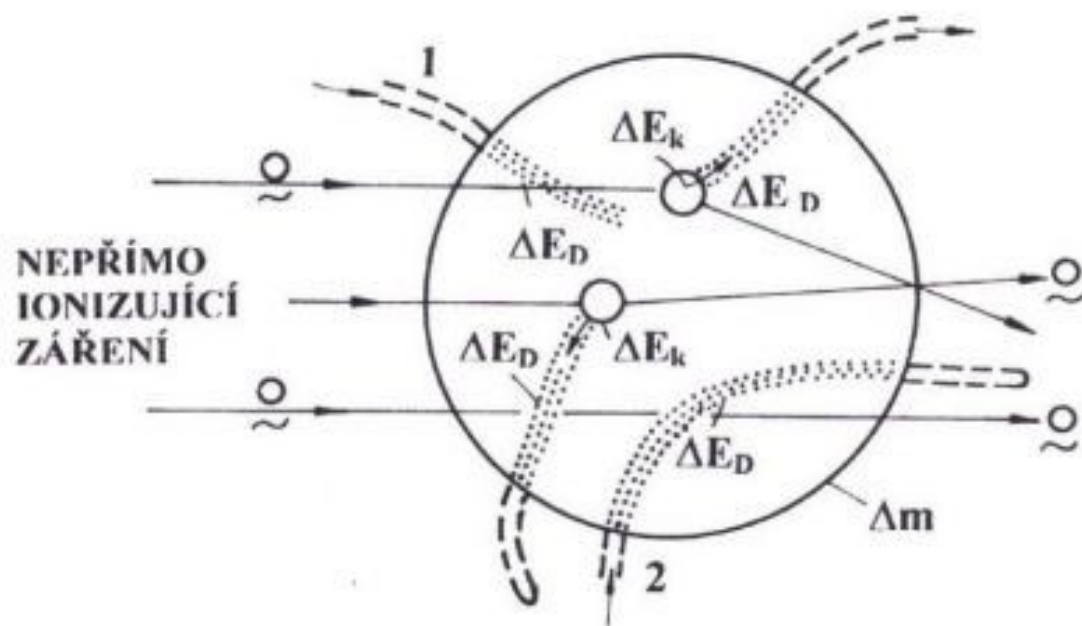
dm - hmotnost látky.



- Za podmínky rovnováhy nabitých sekundárních částic se kerma rovná absorbované dávce.



- Rovnováha nabitých částic existuje v případě, že energie odnesená nabitými částicemi mimo uvažovaný objem (část energie ΔE_k) se rovná energii vnesené do tohoto objemu nabitými částicemi z jeho okolí (částice 1 a 2).
- Pro fotonové záření je podmínka rovnováhy nabitých částic (elektronová rovnováha) splněna, je-li energie záření nižší než 3 MeV.
- V takovém případě lze veličinu „**kerma**“ nahradit „**dávka**“.



- **Dávka** v uvažovaném objemu charakterizuje celkovou energii absorbovanou při ozáření tohoto objemu - rovná se součtu dílčích příspěvků ΔE_D označených tečkovaně.
- **Kerma** charakterizuje energii sdělenou nepřímo ionizujícím zářením při první srážce nabitým částicím (elektronům, protonům) - tato energie ΔE_k je označena šipkou.



KERMA vs ABSORBOVANÁ DÁVKA

- Pro kermu platí, že může být definována v jakémkoli materiálu (nutno uvést, ke kterému materiálu se vztahuje; má stejnou jednotku jako abs. energie ($\text{J/kg} = \text{Gy}$)).
- KERMA je definována pouze pro nenabitě (nepřímo ionizující) částice, tj. fotony a neutrony.
- **KERMA**: popisuje první krok při interakci nenabitých částic s látkou – předání energie nenabitých částic částicím nabitým (sekundární záření, zejména elektrony)
- energie sekundárně vzniklých částic nemusí zůstat v objemu dV , ve kterém částice vznikly, tzn. KERMA pracuje pouze s počáteční kinetickou energií vzniklých částic.
- Kinetická energie elektronů je pak využita na excitaci a ionizaci atomů látky → **ABSORBOVANÁ DÁVKA** (popisuje druhý krok interakce nenabitých částic s látkou, jde o popis depozice energie nabitých částic v látce.



KERMA vs ABSORBOVANÁ DÁVKA

Dalším rozdílem je objem látky, ke kterému se veličiny vztahují:

Kerma = objem, ve kterém došlo ke vzniku částic, tzn. kde byla předána energie nenabitých částic nabitým.

Dávka = objem, ve kterém se deponovala kinetická energie sekundárně vzniklých nabitých částic.

4. Kermový příkon K

je přírůstek kermy dK za časový interval dt .

K - kermový příkon;

dK - přírůstek kermy;

dt - časový interval.

$$K = \frac{dK}{dt}$$

Jednotkou kermového příkonu je $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$.



5. Expozice X

definovaná výhradně jen pro vzduch, je dána poměrem:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad \begin{array}{l} \text{coulomb} \\ [\mathbf{C.kg^{-1}}; \mathbf{R}] \end{array}$$

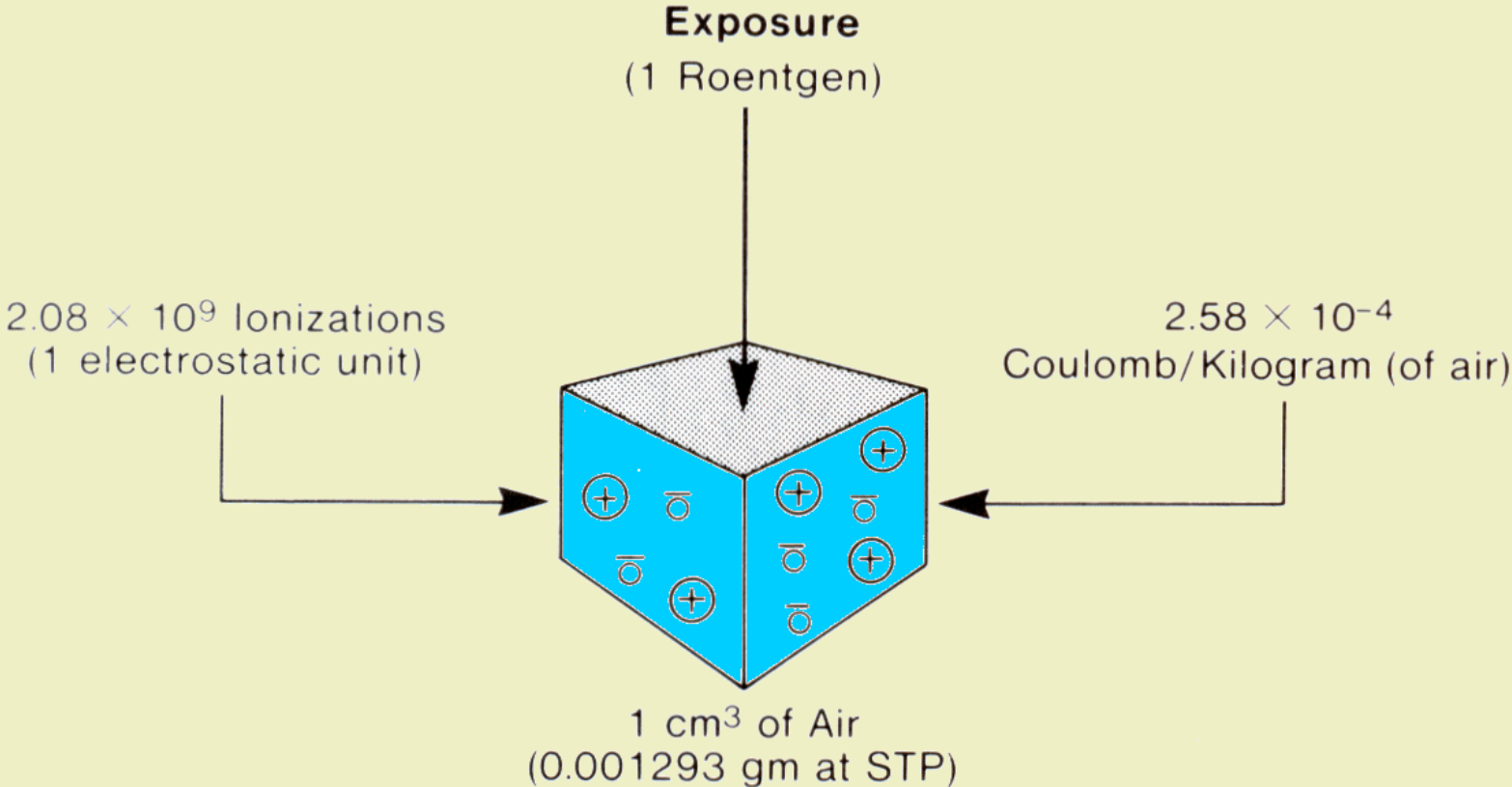
$$1 \text{ C/kg} = 3\,876 \text{ R} \quad 1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

dQ - absolutní hodnota celkového *elektrického náboje iontů jednoho znaménka* vzniklých ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny fotony v objemovém elementu vzduchu o hmotnosti dm ;
 dm - hmotnost látky.

1 C odpovídá 6.24×10^{18} ionizacím



Exposure is the quantity most commonly used to express the amount of radiation delivered to a point. The conventional unit for exposure is the roentgen (R), and the SI unit is the coulomb per kilogram of air (C/kg):

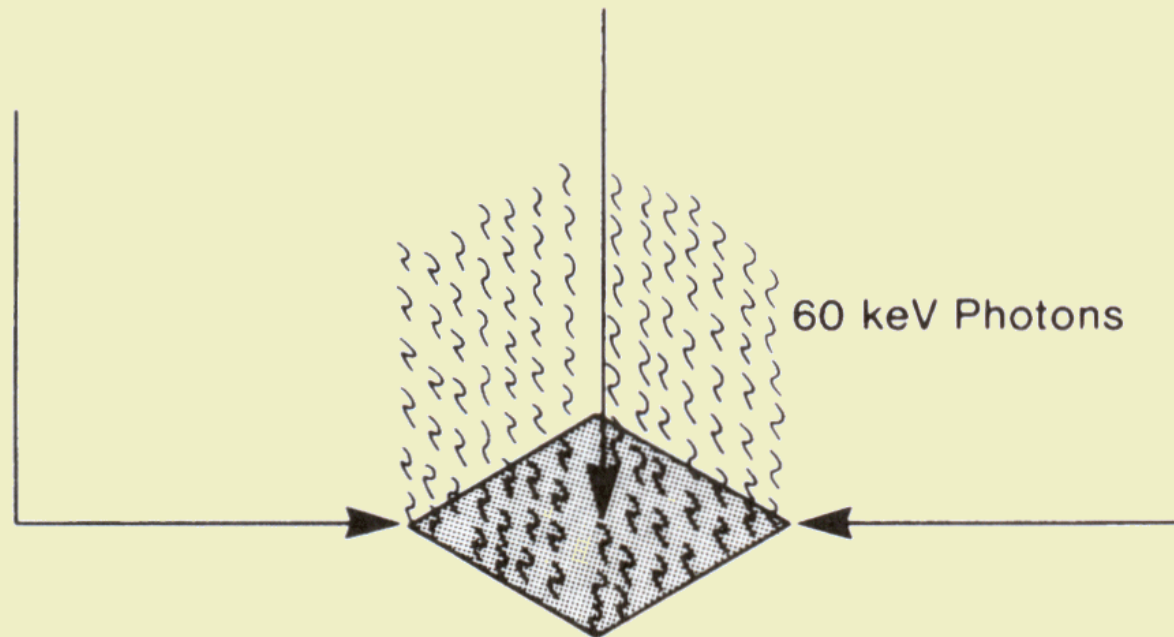


Photon Fluence

Exposure

Energy Fluence

$$(3.1 \times 10^{10} \text{ photons/cm}^2) = (1 \text{ Roentgen}) = (3000 \text{ ergs/cm}^2)$$



Expozice (fotony/neutrony) je úměrná fluenci fotonů a fluenci energie
Vztah závisí na energii fotonů protože jak počet fotonů, které interagují
s okolními atomy, tak i množství vyvolaných ionizací (sekundárními e-)
závisí na E fotonů

Pro E = 60 keV, expozice 1 R odpovídá fluenci fotonů asi $3 \times 10^{10} / \text{cm}^2$.



6. Expoziční příkon X je přírůstek expozice dX za časový interval dt .

$$X = \frac{dX}{dt}$$

X - expoziční příkon;

dX - přírůstek expozice;

dt - časový interval.

Jednotkou expozičního příkonu je $\text{C.kg}^{-1}\text{s}^{-1} \rightarrow \text{A.kg}^{-1}$

Veličina expozice se dnes v dozimetrické praxi používá jen pro etalonáž ionizujícího záření - místo ní se doporučuje používat [kermu](#) ([dávku](#)) ve vzduchu nebo ve tkáni.



7. LINEÁRNÍ PŘENOS ENERGIE (LPE)

(LET - Linear Energy Transfer)

- Při úvahách o účincích ionizujícího záření je základní veličinou především **absorbovaná dávka** ve zkoumané látce.
- Dávka je však makroskopickou veličinou a nezahrnuje v sobě okamžité rozložení lokální energie přenesené na látku, které může výsledné účinky záření ovlivnit.
- Řada jevů vyvolaných IZ (chemické změny, genetické změny, mutace, úhyn buněk) závisí na prostorovém rozložení dílčích přenosů energie jednotlivých ionizujících částic na ozařovanou látku.
- Z tohoto důvodu byla (pro nabitě částice) zavedena veličina zvaná **lineární přenos energie (spadá mezi jednotky popisující interakce IZ s prostředím, ale má zásadní význam v dosimetrii)**



Lineární přenos energie

$$L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\Delta}$$

[J.m⁻¹]

v radiobiologii častěji

[keV.μm⁻¹]

L - lineární přenos energie;

dl - vzdálenost, kterou ionizující částice prošla;

dE - ztráta energie nabitě částice v důsledku srážek s elektrony při jejím průchodu vzdáleností v látce a přenosem energie menším než je určitá omezující hodnota *D*.

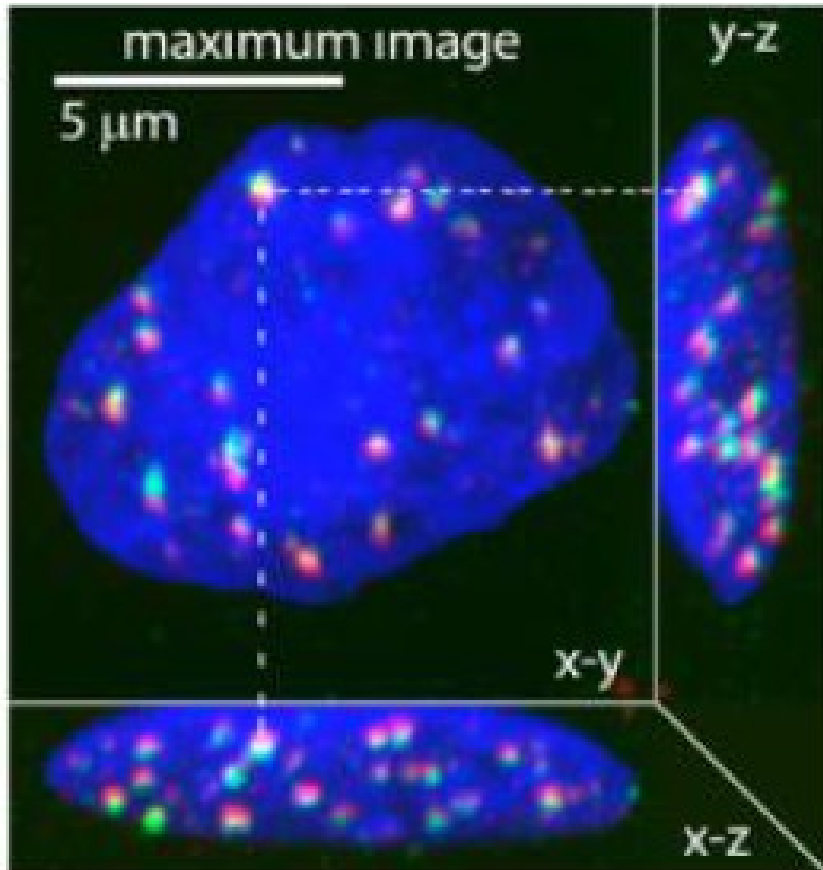
Vysoký LPE: částice α, protony ...

Nízký LPE: elektrony, záření γ a rentgenové záření.

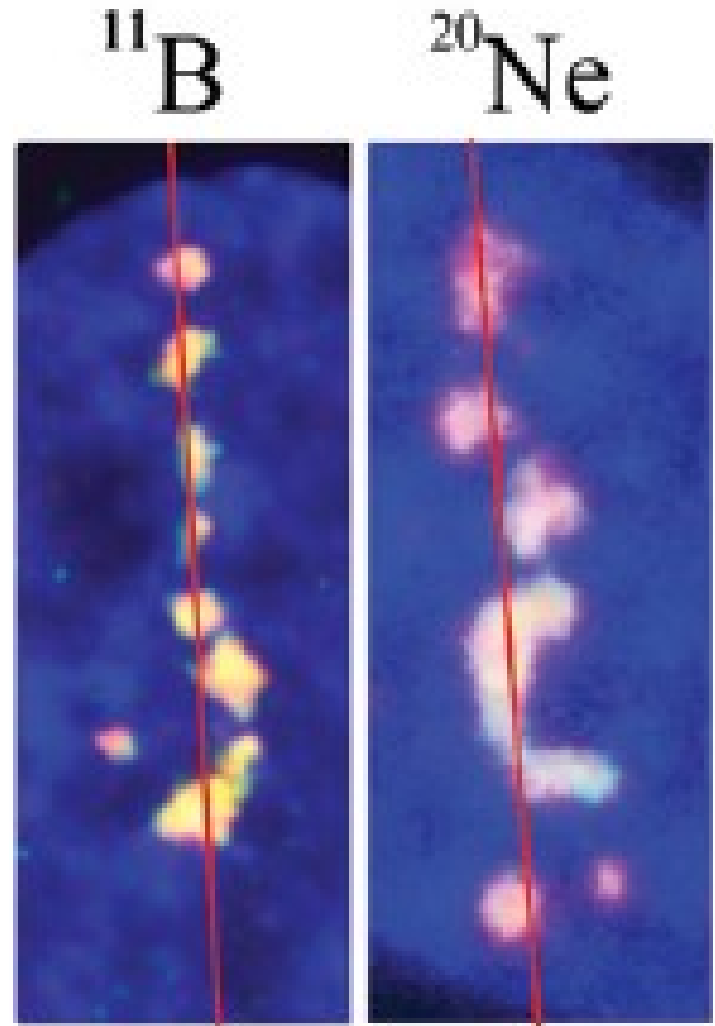
Záření s vysokým LPE = **hustě ionizující záření**,

Záření s nízkým LPE = **řídce ionizující záření**.



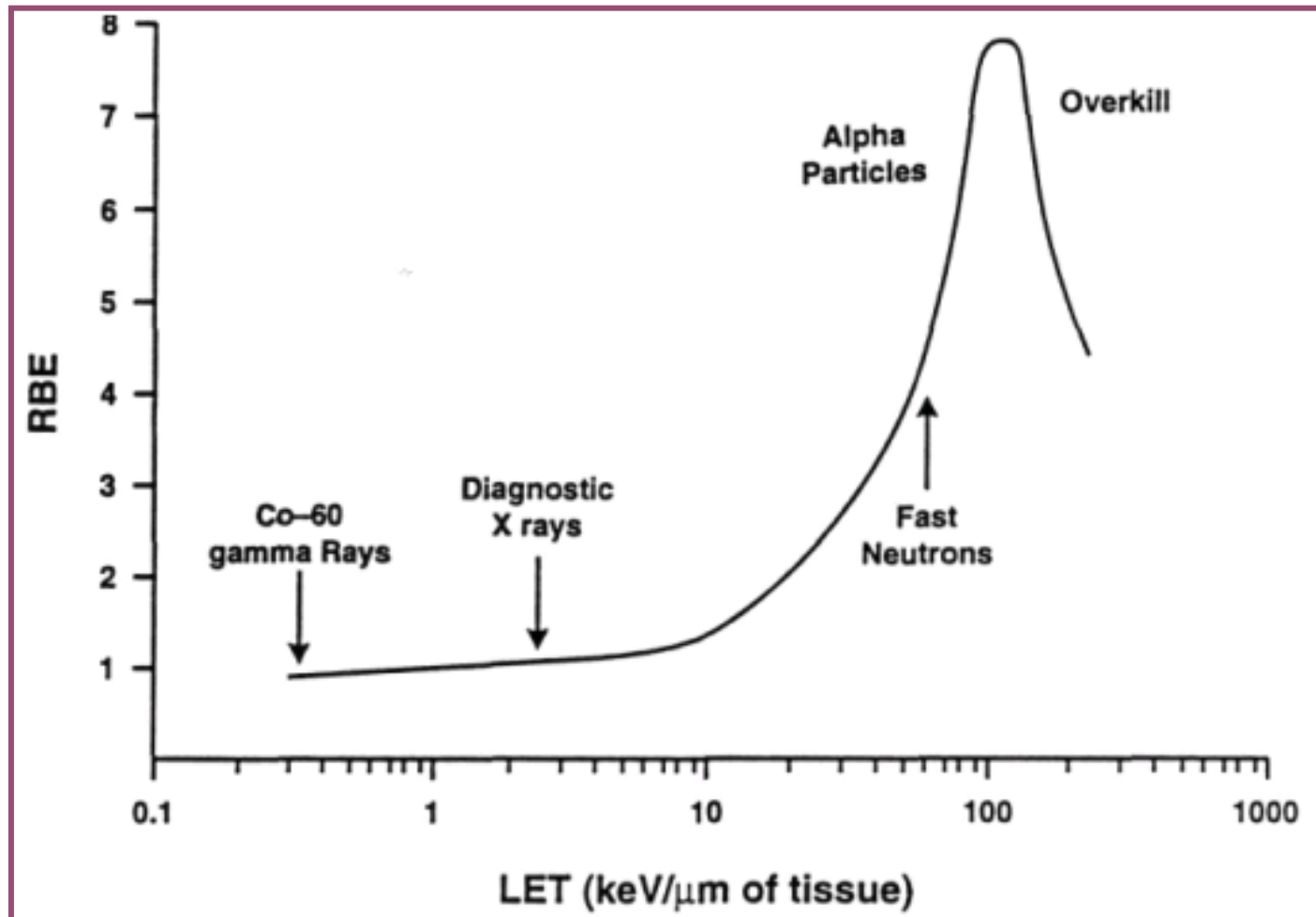


Low-LET (γ -rays)

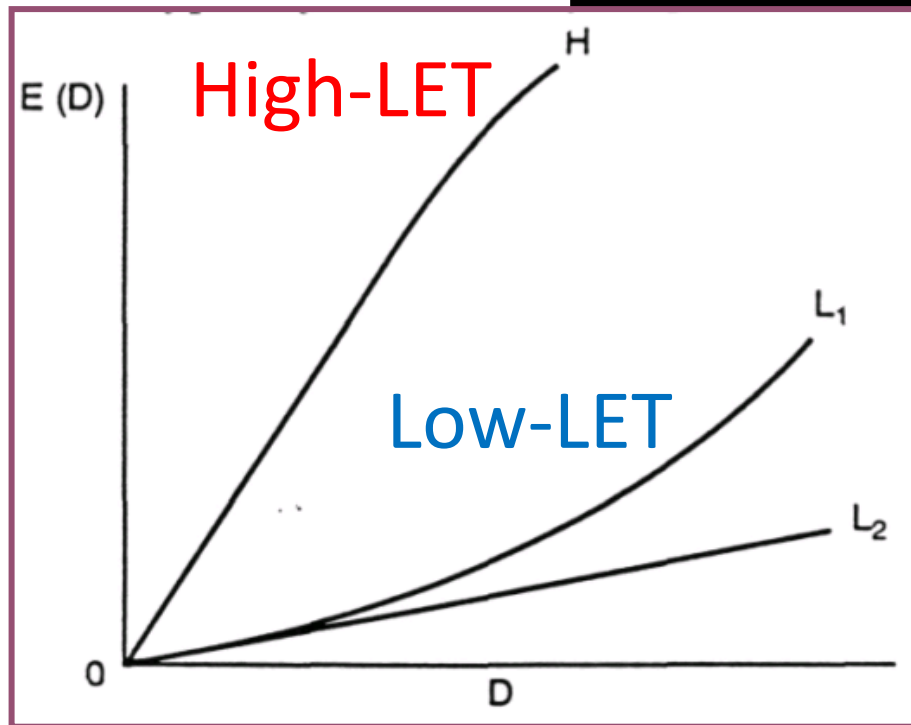


High-LET ^{11}B and ^{20}Ne ions 

For low LET radiation, $\Rightarrow \text{RBE} \propto \text{LET}$, for higher LET the RBE increases to a maximum, the subsequent drop is caused by the overkill effect.



Dose-response curves.

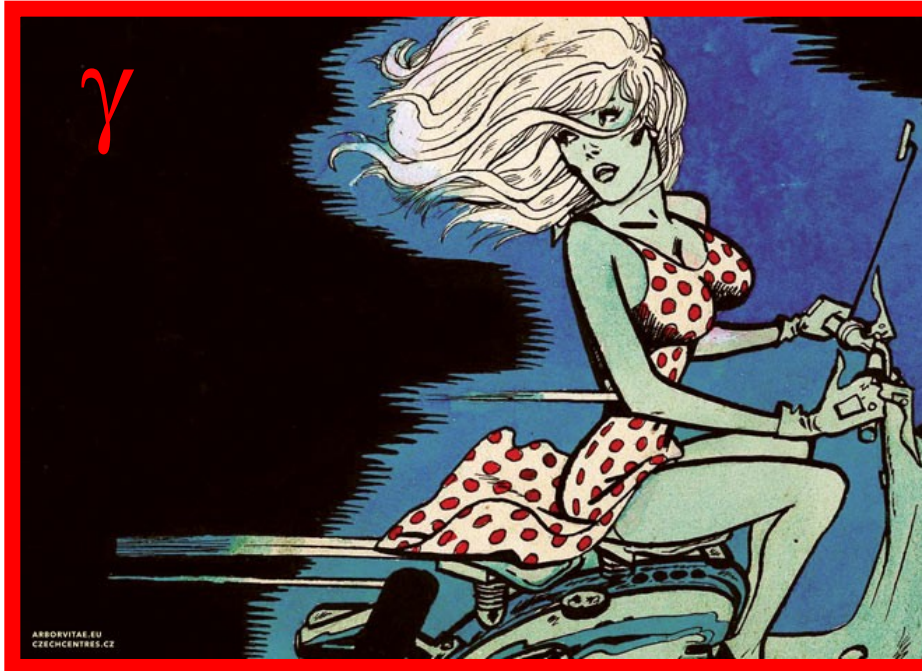


Schematic representation of dose-response function $E(D)$ at low doses D for high-LET (curve H) and low-LET (curve L_1) radiations. L_2 is the extension of the linear beginning of L_1 .



HLOUBKOVÁ DEPOZICE DÁVKY

1. ENERGIE/RYCHLOST částice



gama foton: hmotnost 0, rychlost v , dolet obrovský, počet ionizací/ztráty energie na jednotku dráhy - malý

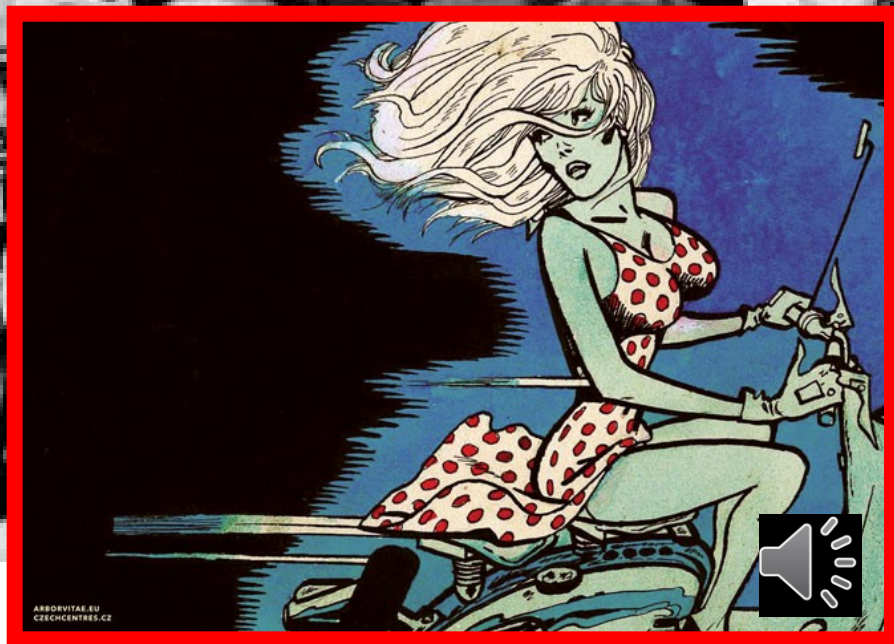
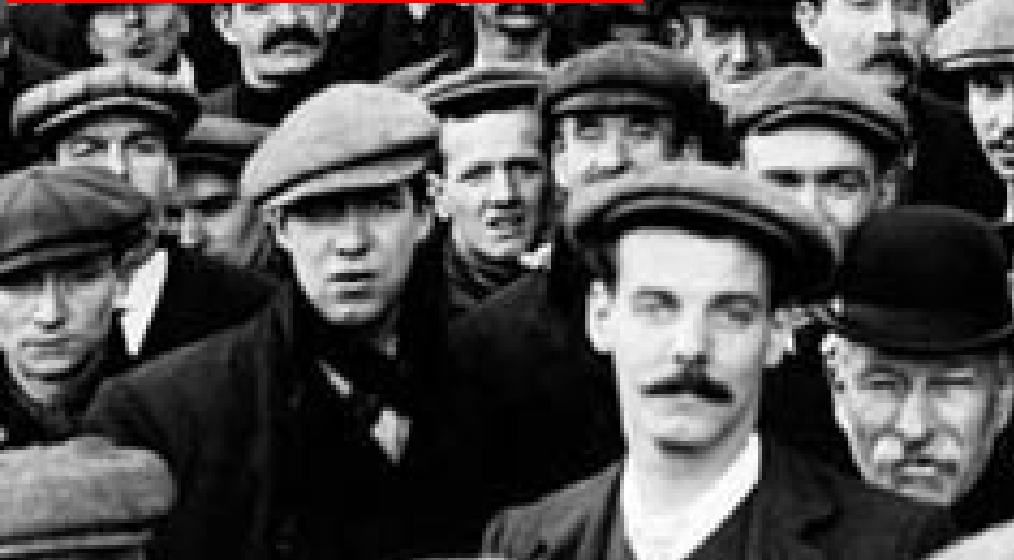


těžký iont: hmotnost velká, rychlost malá, dolet malý, počet ionizací/ztráty energie na jednotku dráhy – obrovský (proměnlivý)

Falk M: Indukce chromozomálních aberací ionizujícím zářením různých kvalit



2. HMOTNOST / VELIKOST

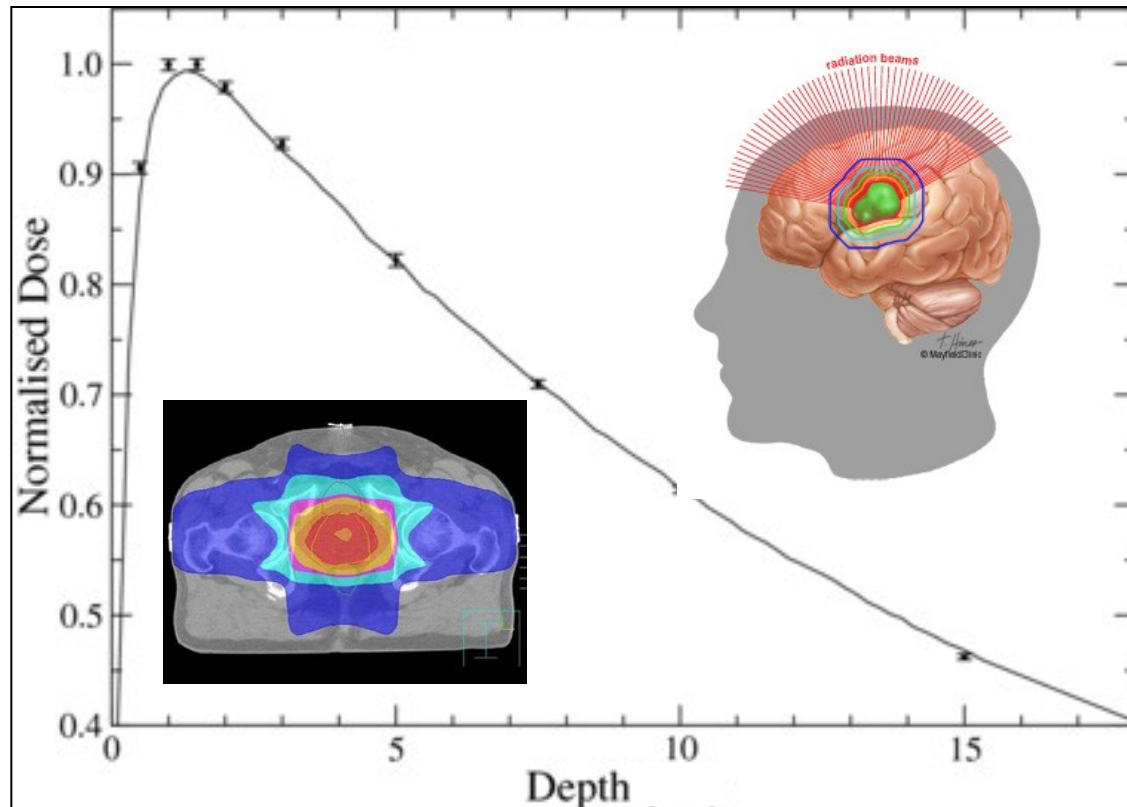


Falk M

3. NÁBOJ



Současná radioterapie: paprsky gama, X



pokožka → zdravá tkáň (životně důležitá) → tumor

Gama rays

Výhody metody

- levná
- technicky nenáročná
- „méně citlivá“ na pohyb orgánů (dýchání, srdeční trp)

Nevýhody

- dávka klesá se vzdáleností
- velké poškození zdravé tkáně
- nízký zabíjecí účinek na jednotku dávky (velké množství nádorů je radiorezistentních)

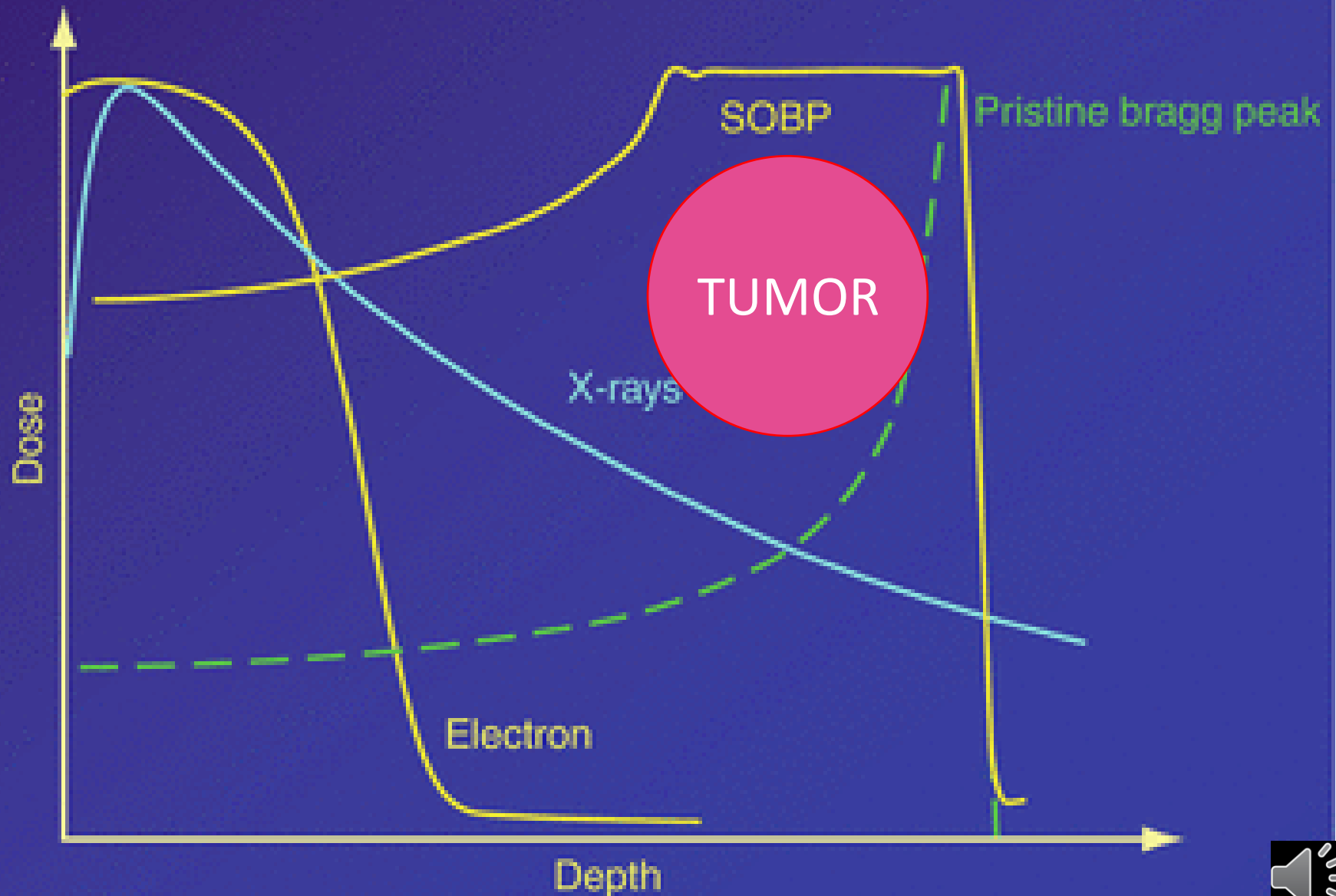


frakcionovaná terapie

- časově
- prostorově



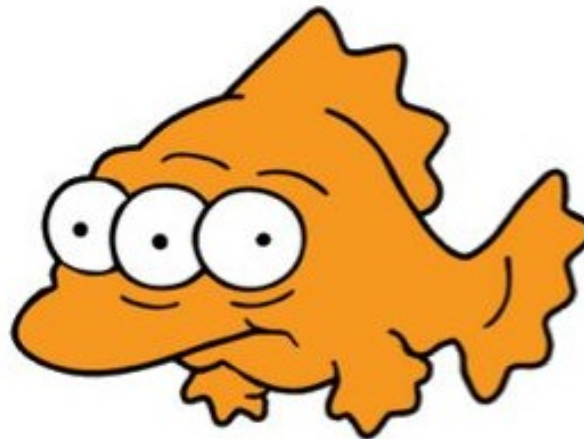
Percent depth dose for X-rays, electrons, and protons (pristine and SOBP)



Účinky záření na organismy

- odhad rizika -

- každé záření má jiný biologický účinek (RBU)
- a též každý orgán (typ buněk) jinak citlivý ke vzniku nádorů
- často komplikováno kombinací vnějšího a vnitřního ozáření



Účinky záření na organismy - odhad rizika, RBU -

- Odhad biologického účinku s ohledem na vlastnosti záření
- **α** : nabité (2+) velké částice, velmi silně ionizující záření – mnoho poškození na trase průletu částice tkání (ionizační kanál)
- **RTG a γ** : vysoká pronikavost, ale ve srovnání s alfa mnohem menší poškození podél dráhy průletu
- **β** : nabité a částicové povahy jako alfa, e- je však oproti alfa malý a proniká hlouběji do tkáně. Biologický účinek je bližší záření gama.
- Pro kvantifikaci relativního biologického účinku různých druhů záření byl zaveden tzv. **tkáňový radiační faktor w_R** , někdy též nazývaný jako **relativní biologická účinnost RBU** (relative biological efficiency, **RBE**)



RADIAČNÍ VÁHOVÝ FAKTOR

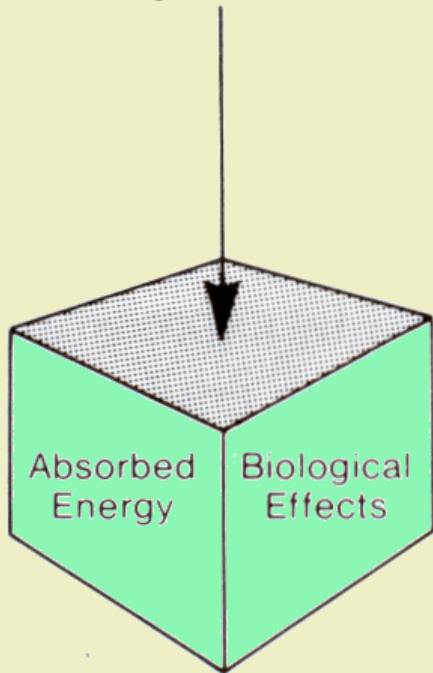
→ RBE

Druh záření	w_R
Fotony a elektrony všech energií (gama, RTG, beta)	1
Neutrony s energií 10 keV + protony	5
Neutrony s energií 10 - 100 keV	10
Neutrony s energií 0,1 - 2 MeV	20
Neutrony s energií 2 - 20 MeV	10
Záření α těžké ionty	20 >20

RADIOBIOLOGICAL EFFICIENCY (radiobiologická účinnost, RBU



Exposure



Absorbed Dose
(Energy Concentration)
1 rad = 100 ergs/gram
1 gray = 1 joule/kilogram
1 gray = 100 rad

Dose Equivalent
(Biological Impact)
1 rem = 10 mSv

Exposure \xrightarrow{f} Absorbed Dose \xrightarrow{Q} Dose Equivalent

1 R $\xrightarrow{(0.93-0.96)^*}$ \approx 1 rad (10 mGy) $\xrightarrow{(1)^*}$ \approx 1 rem (10 mSv)

* diagnostic quality X and gamma in soft tissue



Ekvivalentní dávka

- pro odhad deterministických účinků (kromě nemoci z ozáření se týkají ozářené oblasti těla) se používá tzv. **EKVIVALENTNÍ DÁVKA H_T** (ekvivalentní dávka pro orgán T):

$$H_T = D_{TR} \times W_R$$

H pro orgán T (např. čočku) = absorbovaná dávka záření R v orgánu T x **WR**
(**radiační váhový faktor**)

[wR je bezrozměrný, rozměr je tedy J/kg = Gy, pro odlišení však zavedena jednotka **Sv (Sievert)**]
starší jednotkou byl **rem** = 0,01 Sv (Radiation Equivalent in Man)

- Jednotka Sv tedy již zohledňuje biologickou účinnost toho kterého záření a upřesňuje tak odhad možných následků ozáření
- Z biologického hlediska má rozlišování Gy a Sv význam pro dávky do cca. 10 Gy. Od této hranice je již rozdílný efekt různých záření zanedbatelný oproti efektu vyplývajícímu z dávky – jednotka Sv od této hranice ztrácí význam a užívá se Gy
- Je-li člověk ozářen více druhy záření zároveň (např. gama a neutrony), jednotlivé dávky H_{TR} se pro daný orgán T sčítají ($H_{TR}(\gamma) + H_{TR}(n_0)$ atd.)



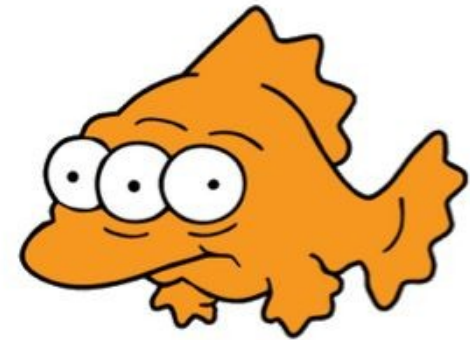
SIMPSONS GUIDE TO RADIATION



Bequerel [Bq]
How brightly your
Cesium glows



Gray [Gy]
How brightly
Cesium will make
you glow



Sieverts [Sv]
How many extra
eyes will you have
after glowing?



Dávkový ekvivalent

- z hlediska biologické účinnosti je obdobou ekvivalentní dávky **dávkový ekvivalent (H)**:
- H = součin absorbované dávky a **jakostního činitele (Q)**, který je funkcí lineárního přenosu energie $Q(L)$
- jednotkou je opět [Sv]

$$H = D \times Q \text{ [Sv]}$$

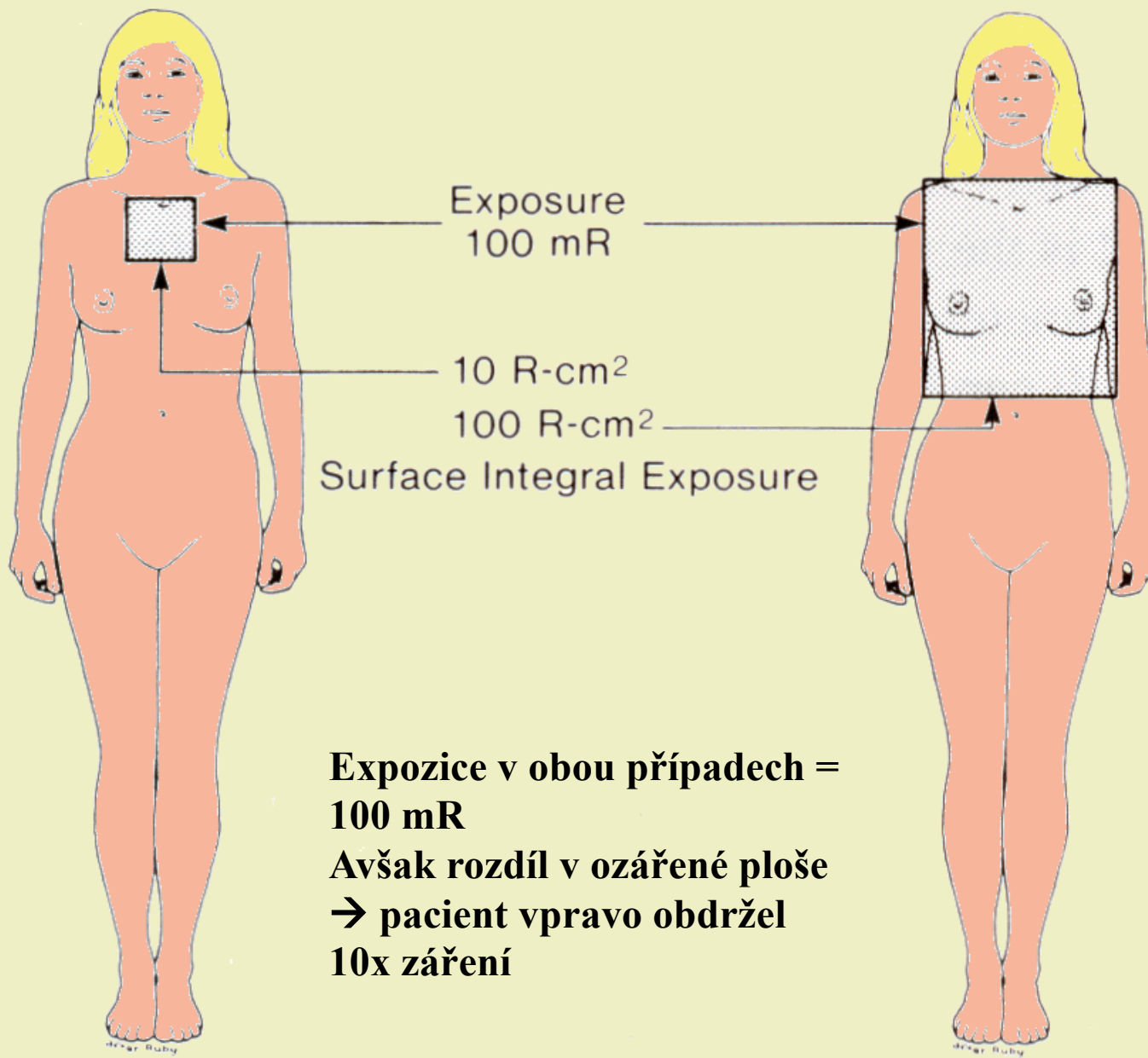
- **POZNÁMKA**: rozdíl mezi radiačním váhovým faktorem a jakostním činitelem spočívá v jejich definici, číselně si však víceméně odpovídají. W_R odráží závažnost biologických účinků vyvolaných zářením a je nespojitý,
- zatímco **Q** odráží ionizační vlastnosti záření a funkce $Q(L)$ má spojitý charakter.
- Z biologického hlediska si tedy ekvivalentní dávka a dávkový ekvivalent číselně odpovídají



Další veličiny používané v radiační ochraně

- Osobní pronikavý hloubkový dávkový ekvivalent $H_p(10)$
- (jednotka Sv) - je **součet dávkových ekvivalentů** od různých druhů záření v měkké tkáni v **hloubce 10 mm pod povrchem těla (povrch orgánů)**. Tato veličina může být měřena dozimetrem na povrchu těla pokrytým tkáni ekvivalentním materiálem vhodné tloušťky.
- Osobní povrchový dávkový ekvivalent $H_s(0,07)$
- (jednotka Sv) - stejná def. jako $H_p(10)$ pro hloubku **0,07 mm pod povrchem těla (hloubka živé části kůže pod zrohovatělou vrstvou)**.
- Kolektivní efektivní dávka (S , KED)
- suma dávek všech členů analyzované skupiny (pracovníků s IZ v daném podniku apod.)
- jednotka Sv, zejména v anglicky psané literatuře se často uvádí **manSv**, což je Sievert kolektivní dávky





**Expozice v obou případech =
100 mR**
Avšak rozdíl v ozářené ploše
→ pacient vpravo obdržel
10x záření



Odhad rizika stochastických účinků, efektivní dávka -

- pro odhad stochastických účinků IZ je nutné stanovit dávku absorbovanou všemi ozářenými orgány a tuto dávku korigovat na citlivost příslušného orgánu k IZ
- zavádí se proto tzv. **EFEKTIVNÍ DÁVKA (E)**

$$E = \sum_T H_T \times w_T = \sum_T D \times w_R \times w_T$$

kde E je efektivní dávka, H_T je ekvivalentní dávka a w_T je tkáňový váhový faktor
 w_T je bezrozměrný a jednotkou je tedy opět **Sv (Sievert)**

suma w_T pro všechny orgány = 1

w_T vyjadřuje relativní riziko vzniku stochastických poškození v orgánu T

Efektivní dávka - součet absorbovaných dávek vážených jak s ohledem na biologickou účinnost záření (součet ekvivalentních dávek) tak na radiační citlivost orgánů a tkání pro všechny ozářené orgány

zahrnuje jak dávky z vnějšího ozáření, tak i z vnitřní kontaminace



Radiační ochrana – výpočet efektivní ekvivalentní dávky

Tkáňové váhové faktory pro stanovení efektivní dávky

bladder	0.05
bone surface	0.01
bone marrow	0.12
breast	0.05
colon	0.12
esophagus	0.05
gonads	0.20
liver	0.05
lung	0.12
skin	0.01
stomach	0.12
thyroid	0.05
everything else	0.05
<hr/>	
whole body	1.00

Tkáň, orgán	w_T
gonády	0,20
mléčná žláza	0,05
červená kostní dřeň	0,12
plíce	0,12
štítná žláza	0,05
povrch kostí	0,01
tlusté střevo	0,12
žaludek	0,12
játra	0,05
kůže	0,01
ostatní tkáně a orgány	0,05



Tabulka 8.2 Tkáňové váhové faktory

Tkáň, orgán	ICRP 26 Tkáňový váhový faktor w_T	ICRP 60 Tkáňový váhový faktor w_T	ICRP 103 Tkáňový váhový faktor w_T
Gonády	0,25	0,20	0,08
Červená kostní dřeň	0,12	0,12	0,12
Tlusté střevo	-	0,12	0,12
Plice	0,12	0,12	0,12
Žaludek	-	0,12	0,12
Močový měchýř	-	0,05	0,04
Mléčná žláza	0,15	0,05	0,12
Játra	-	0,05	0,04
Jícen	-	0,05	0,04
Štítná žláza	0,03	0,05	0,04
Mozek	-	-	0,01
Slinné žlázy	-	-	0,01
Kůže	-	0,01	0,01
Povrchy kostí	0,03	0,01	0,01
Ostatní orgány a tkáně *)	0,3	0,05	0,12



EFFECTIVE DOSE

(Sum of Organ/Tissue Doses
x
Tissue Weighting Factors)

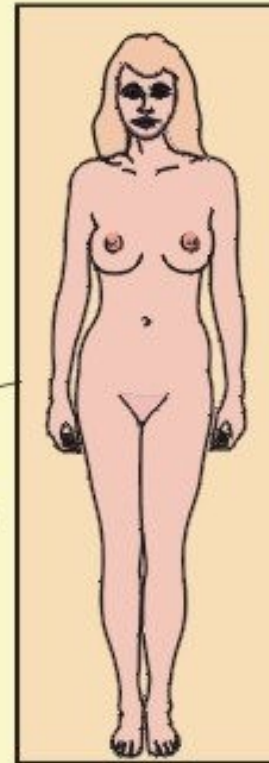
EXAMPLES



LUNGS/CHEST FILM
25mrad x 0.12=3mrad

BREAST/MAMMOGRAM
300mrad x 0.15=45mrad

TOTAL BODY/ BACKGROUND
300mrad x 1=300mrad
(Per year)



Let's look at an illustration. If the the dose to the breast, MGD, is 300 mrad for two views, the effective dose is 45 mrad because the tissue weighting factor for the breast is 0.15. What this means is that the radiation received from one mammography procedure is less than the typical background exposure for a period of two months.

It is generally assumed that the exposure to natural background radiation is somewhat uniformly distributed over the body. Since the tissue weighting factor for the total body has the value of one (1), the effective dose is equal to the absorbed dose. The assumed to be 300 mrad in the illustration.



$$\sum_T w_T = 1 . \quad E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T \sum_R w_T \cdot w_R \cdot D_{T,R}.$$

Pacient je nerovnoměrně ozářen zářením gama na plicích střední dávkou 20 mGy a štítná žláza je ozářena střední dávkou 10 mGy. Tkáňový váhový faktor pro plíce je $w_T = 0,12$ a tkáňový váhový faktor štítné žlázy je $w_T = 0,04$. Radiační váhový faktor w_R je pro fotonové záření roven 1.

Pokud nejsou ozářeny žádné další orgány, je efektivní dávka dána

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

$$E = w_R \cdot \sum_T w_T \cdot D_T = (0,12 \cdot 1 \cdot 20) + (0,04 \cdot 1 \cdot 10) = 2,8 \text{ mSv} .$$

Lze konstatovat, že radiační zátěž po ozáření plic a štítné žlázy středními dávkami 20 Gy a 10 mGy je stejná jako při rovnoměrném homogenním ozáření celého těla střední dávkou 2,8 mGy.

Při homogenním ozáření celého těla totiž každý orgán obdrží střední dávku 2,8 mGy. Vzhledem k tomu, že součet tkáňových váhových faktorů je 1, bude celková efektivní dávka 2,8 mSv.



RADIAČNÍ OCHRANA – základní veličiny

	měřitelnost	týká se:	hodnotí riziko:
DÁVKOVÝ EKVIVALENT (H, Sv)	ANO	dávky v referenčním bodě (dozimetr)	nemá biologický smysl
EKVIVALENTNÍ DÁVKA (H_T , Sv)	pouze výpočtem	dávky v daném orgánu	deterministické účinky
EFEKTIVNÍ DÁVKA (E, Sv)	teoreticky ano, prakticky ne*	celého těla (součet dávek přes všechny orgány)	stochastické účinky

* museli bychom mít detektor ve tvaru orgánu, ze stejného materiálu jako orgán atd.



VNITŘNÍ KONTAMINACE- odhad rizika, ÚVAZEK EFEKTIVNÍ DÁVKY -

nebezpečná

0.6 μg ^{210}Po
několika Gy)

biokinetika

chemickou

formou fyzikálně chemickými vlastnostmi

inhalace ingesce

přes

poraněnou

neporušenou pokožku



VNITŘNÍ KONTAMINACE- odhad rizika, ÚVAZEK EFEKTIVNÍ DÁVKY -

- Složení lidského těla: kyslík, uhlík, vodík a velké množství ostatních prvků –
- téměř všechny tyto prvky mají radioaktivní izotopy, které, když se dostanou do těla
- sledují stejné biokinetické cesty jako jejich neradioaktivní izotopy.
- Některé prvky (např. fosfor, jód, draslík) se podílejí na zcela specifických metabolických procesech, čímž je též řízena jejich distribuce a transport v těle.



BIOGENNÍ RADIONUKLIDY

- nebezpečné jsou tedy zejména tzv. **biogenní radionuklidy**, které mohou být v organismu inkorporovány namísto „fyziologických“ prvků

Biogenní radionuklidy	Prvek	Kritický orgán
^{131}I , ^{132}I	I	štítná žláza
^{137}Cs →	K →	svalovina
$^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$	Ca	Kosti, zuby
T (^3H , trícium)		celé tělo
	atd.	

Orgány, kde se kumulují biogenní radionuklidy se nazývají **KRITICKÉ ORGÁNY**. Kritické orgány mohou akumulovat velké množství daného radionuklidu, takže výsledná koncentrace v něm může například 1000x překročit koncentraci v sousedním orgánu. Proto, i když je tento orgán například odolný vůči působení IZ, může být po kontaminaci příslušným biogenním radionuklidem snadno poškozen.



Problémy výpočtu dávek z vnitřního ozáření

Z uvedených hledisek je odhad dávek z vnitřního ozáření poněkud složitější než odhad při externím ozáření. Jde zejména o následující důvody:

- dávky z vnitřního ozáření **nelze měřit přímo**
- distribuce radionuklidu v těle může být velmi **nehomogenní**
- dávky z vnitřního ozáření **se realizují v delším časovém období**
- **každý prvek se chová jinak**
- chování radionuklidu v organismu **závisí na jeho fyzikální a chemické formě**
- a **cestě vstupu do organismu**
- distribuce radionuklidu **se může časem měnit;**
- jsou-li přítomny nebo **vznikají-li dceřiné radionuklidy**, jejich kinetika v organismu se může lišit od kinetiky radionuklidu mateřského
- Tyto problémy se řeší **matematickým modelováním** chování radionuklidů v organismu.



VNITŘNÍ KONTAMINACE- odhad rizika, ÚVAZEK EFEKTIVNÍ DÁVKY -

• VELIČINY POPISUJÍCÍ VNITŘNÍ KONTAMINACI

- *Ozařování orgánů a tkání je nerovnoměrné a časově proměnné v závislosti na postupné změně obsahu radionuklidů v jednotlivých částech těla vnitřním transportem a radioaktivní přeměnou. Ozařování trvá, dokud se radioaktivní látka vyloučením nebo přeměnou z těla neodstraní (což však zcela nenastane nikdy)*

BIOLOGICKÝ POLOČAS T_B

- doba, za níž množství radioaktivní látky v těle klesne vylučovacími procesy na polovinu

EFEKTIVNÍ POLOČAS T_E

- je to poločas, který zohledňuje jak fyzikální poločas rozpadu kontaminujícího radionuklidu, tak i biologický poločas jeho vylučování

$$T_E = \frac{t_{1/2} \times T_B}{t_{1/2} + T_B}$$

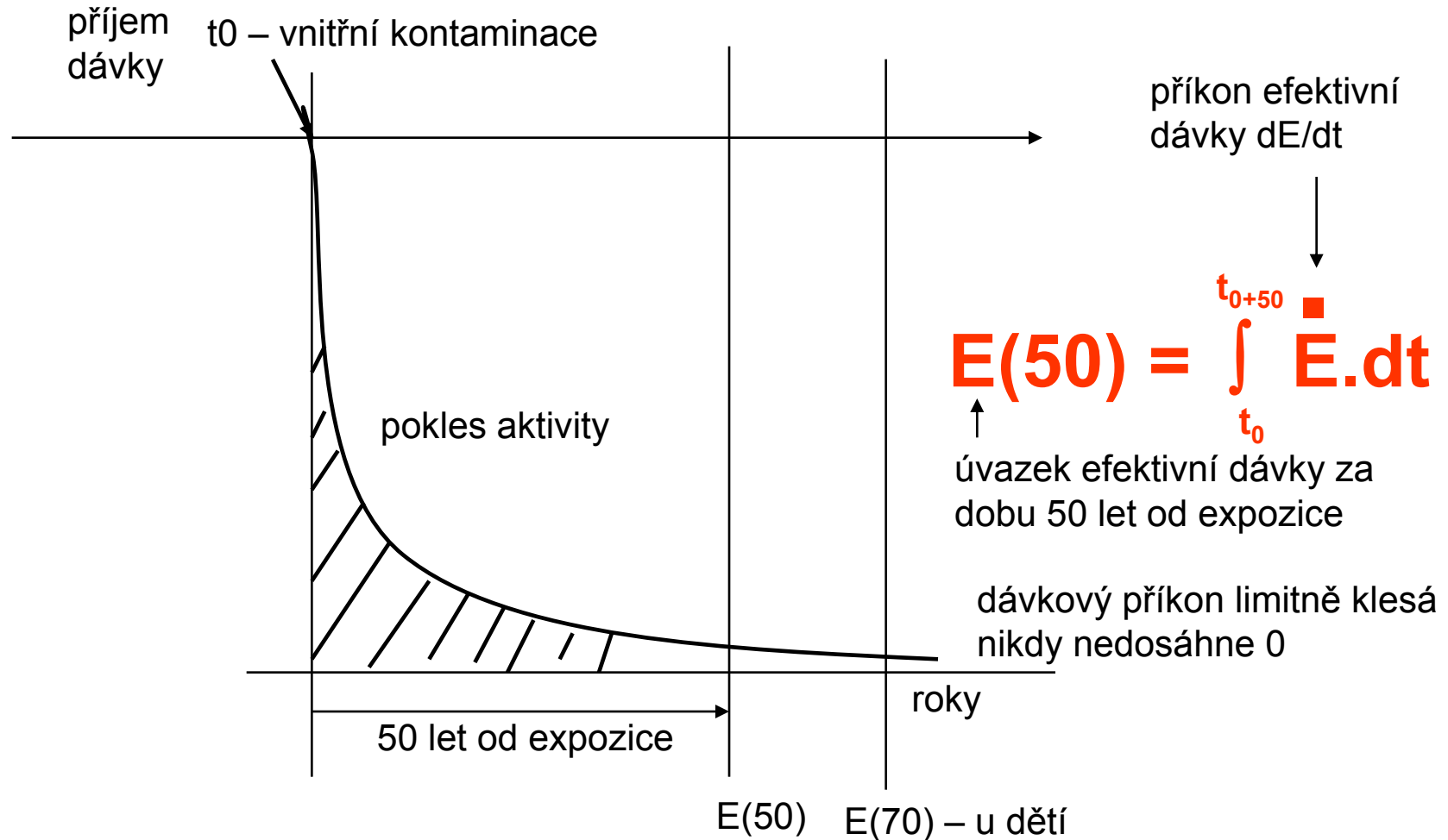


VNITŘNÍ KONTAMINACE- odhad rizika, ÚVAZEK EFEKTIVNÍ DÁVKY -

- .Množství radioaktivních látek je charakterizováno v jednotlivých fázích postupně třemi veličinami:
- - **příjem $I(t)$ radionuklidu [Bq]**-množství radioaktivní látky vyjádřené její aktivitou A , které vstoupí některou z možných cest do organismu (inhalací, ingescí a resorpcí intaktní nebo poraněnou kůží; v nukleární medicíně zavedením přímo do krevního řečiště).
- **Rozložení příjmu v čase:**
- - **obyvatelstvo** - typický trvalý příjem inhalací (produkty radonu), ingescí přes potravinové řetězce (přírodní radionuklidy, globální spad, havárie jaderných zařízení)
- - **pracovníci s IZ**- typický jednorázový krátkodobý příjem převážně inhalací (nehoda)
- POZN.: Dále uvažujeme jednorázový příjem.
- - **retence $R(t)$ radionuklidu [Bq]**- množství radioaktivní látky vyjádřené její aktivitou A zadržované v celém organismu v čase t po jednorázovém příjmu I .
- Analogicky $R_i(t)$ v i -té části (orgánu a pod.)
- Časový průběh je popsán retenční funkcí.
- - **exkrece $E(t)$ radionuklidu [Bq]**- množství radioaktivní látky
- vyjádřené její aktivitou A , které se vyloučí v čase t po jednorázovém příjmu I některou z možných cest.
- Časový průběh je popsán exkreční funkcí.
- - **exkreční rychlost $E'(t)$ [Bq*s-1] používá se [Bq*d-1]**



VNITŘNÍ KONTAMINACE- odhad rizika, ÚVAZEK EFEKTIVNÍ DÁVKY -



Dose quantities

Absorbed dose

Energy deposited in a kilogram of a substance by the radiation



Equivalent dose

Absorbed dose weighted for harmful effects of different radiations
(radiation weighting factor w_R)

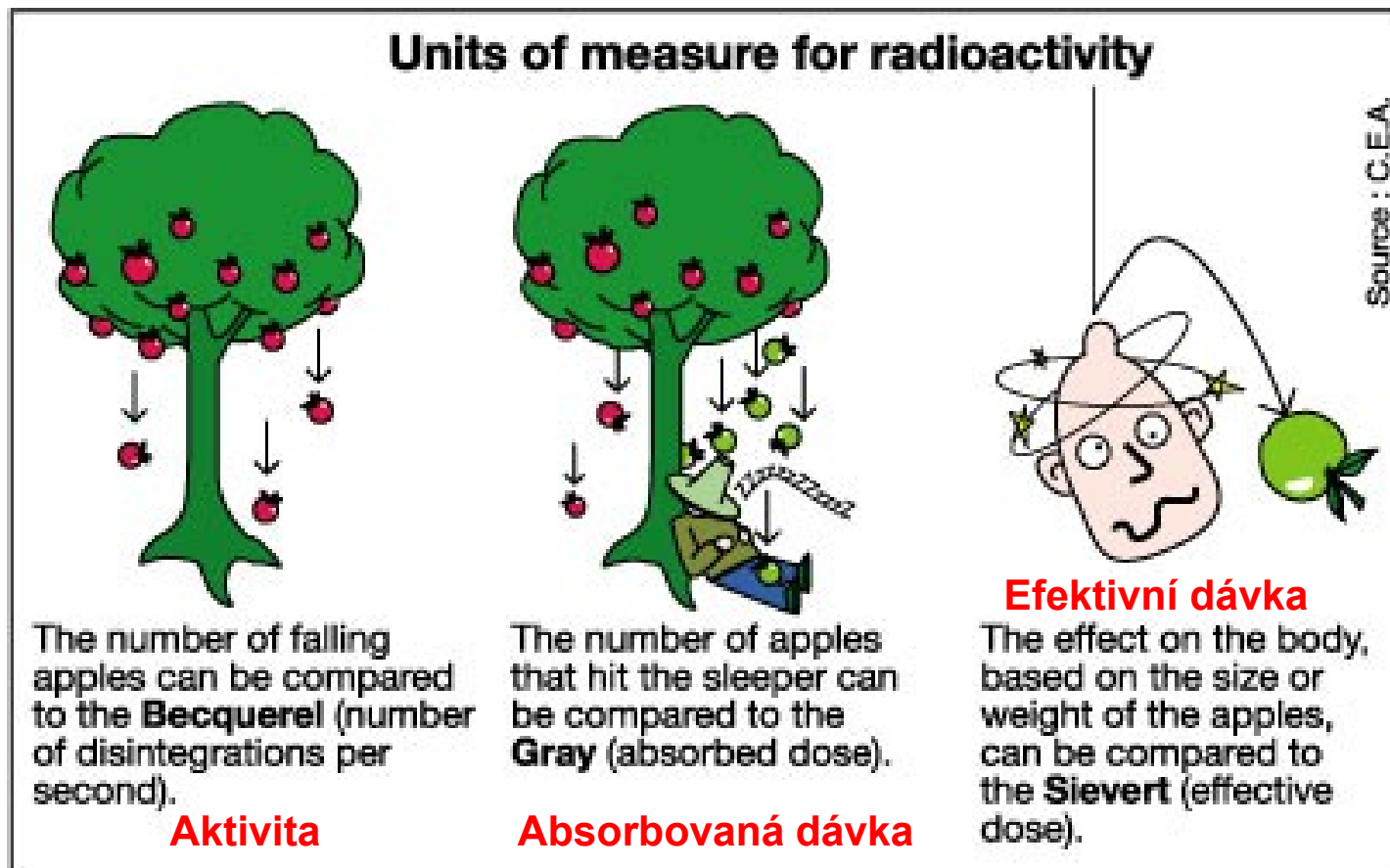


Effective dose

Equivalent dose weighted for susceptibility to harm of different tissues
(tissue weighting factor w_T)



Důležité radio(bio)logické jednotky



V souvislosti s různým RBU různých typů ioniz. záření zavedena

dávkový ekvivalent, H [Sievert] ([absorbovaná dávka](#) [Gy] vážená [jakostním činitelem](#) daného záření)

ekvivalentní dávka, H_T [Sievert] ([střední absorbovaná dávka](#) v orgánu nebo tkáni [Gy] vážená [radiačním váhovým faktorem](#))

efektivní dávka, E [Sievert] (součet [ekvivalentních dávek](#) v jednotlivých tkáních či orgánech vážených [tkáňovým váhovým faktorem \$w_T\$](#) , jež vyjadřuje rozdílnou radiosenzitivitu orgánů a tkání z hlediska pravděpodobnosti vzniku [stochastických účinků](#) (zhoubných nádorů a genetických změn)



Veličiny záření

Fyzikální veličiny	
Aktivita	Počet jaderných přeměn za jednotku času. Měří se jako počet přeměn za sekundu a vyjadřuje se v jednotkách becquerel (Bq).
Absorbovaná dávka	Množství energie deponované zářením v jednotce hmotnosti látky. Jednotkou je jeden gray (Gy), což je joul na kilogram.
Odvozené veličiny	
Ekvivalentní dávka	Je to absorbovaná dávka násobená radiačním faktorem (w_R), který zohledňuje skutečnost, že různé typy záření způsobují při stejné absorbované dávce různou míru poškození. Vyjadřuje se v sievertch (Sv), což jsou jouly na kilogram.
Efektivní dávka	Je to ekvivalentní dávka násobená tkáňovým faktorem (w_T), který zohledňuje rozdílnou míru vnímavosti různých orgánů a tkání na vyvolání poškození toutéž ekvivalentní dávkou. Vyjadřuje se v sievertch (Sv), což jsou jouly na kilogram.
Kolektivní dávka	Součet všech efektivních dávek členů dané populace nebo dané skupiny lidí. Vyjadřuje se v jednotkách man-sievert (man Sv).



