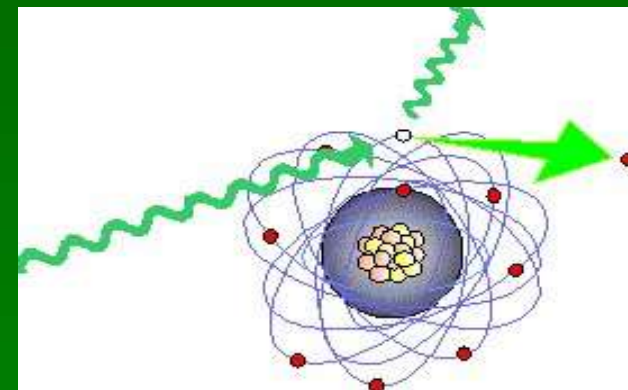
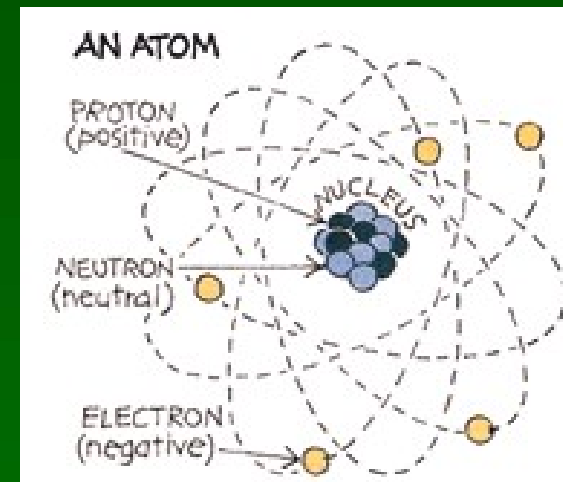


# **Biologické účinky ionizujícího záření**

- 1) Základní pojmy**
- 2) Zdroje ionizujícího záření**
- 3) Následky expozice  
ionizujícímu záření**
- 4) Ionizující záření v medicíně**
- 5) Praktikum**

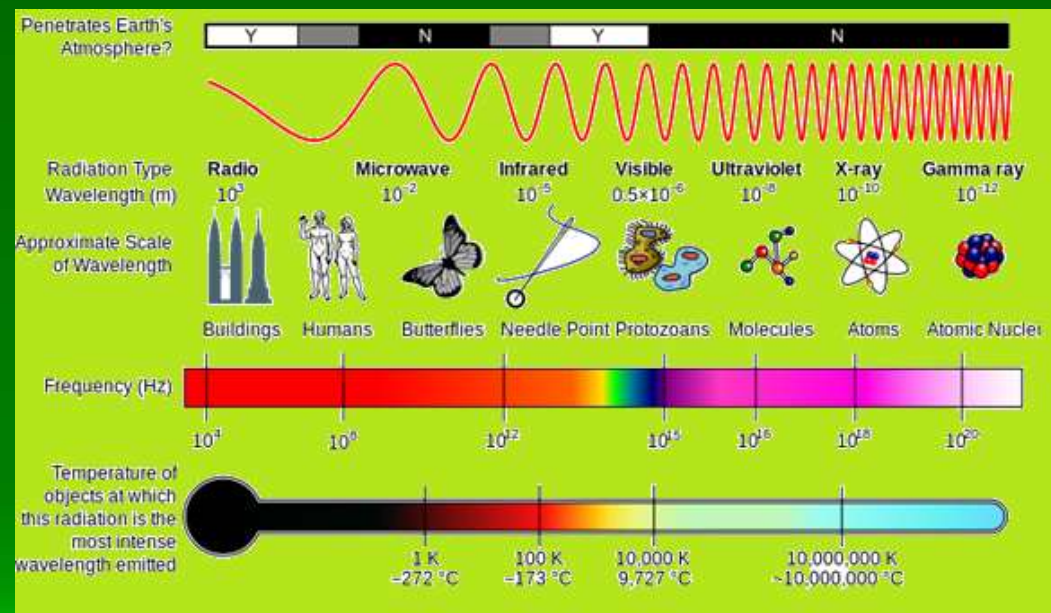
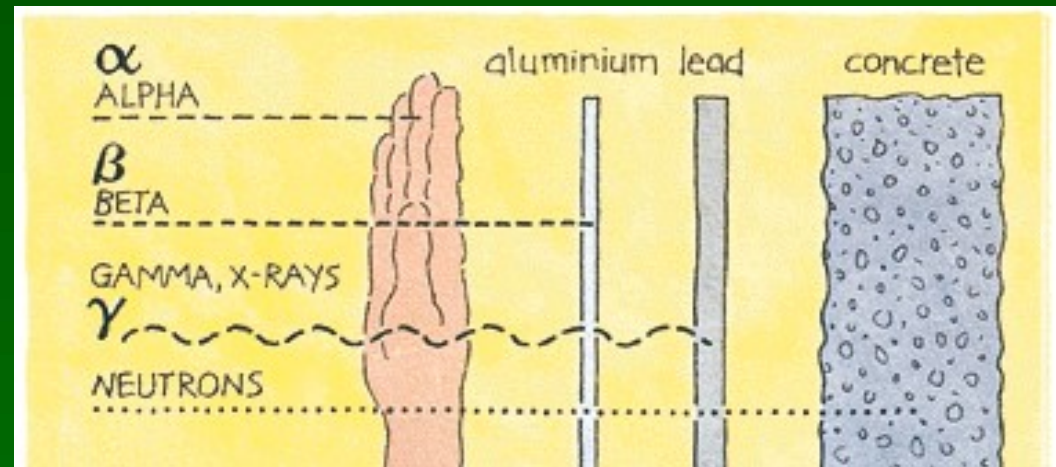
# Co je to ionizující záření?

- **částicové** nebo **elektromagnetické** záření, kdy částice/foton nesou dostatečnou energii k **ionizaci** atomů a molekul (odstraněním elektronu z jejich orbity)
  - produkuje elektricky nabitě částice (= ionty)
  - ionizace je v makromolekulách, z nichž je složen organizmus, biologicky velmi významná



# Typy ionizujícího záření?

- $\alpha$  =  $\alpha$ -částice (atomy helia  ${}^4_2\text{He}$ )
- $\beta$  = elektrony ( $\beta^-$ ) nebo pozitrony ( $\beta^+$ )
- $\gamma$ , rentgen = elektromagnetické vlnění (fotony)
- neutrony
- protony
- štěpné produkty
- kosmické záření (částice – např. miony)



# Veličiny a jejich jednotky

- dávka ionizujícího záření kterou osoba obdržela se vyjadřuje jako **absorbovaná energie**, jednotkou je **gray** (Gy)
  - $1\text{Gy} = 1\text{ J/kg}$  (dříve rad = 1/100 Gy)
- stejná dávka v Gy různých typů záření způsobuje různý biologický efekt (1Gy  $\alpha$ -radiace má větší efekt než 1Gy  $\beta$ -záření) → radiační efekt se vyjadřuje jako **dávkový ekvivalent**, jednotkou je **sievert** (Sv; dříve rem = 1/100 Sv)
  - bez ohledu na typ záření, 1 Sv vede ke stejnému biologickému efektu
  - příklad:  $1\text{Gy}=1\text{Sv}$  pro RTG,  $\gamma$ - nebo  $\beta$ -záření;  $1\text{Gy}=2\text{-}10\text{Sv}$  pro protony;  $1\text{Gy}=3\text{-}20\text{Sv}$  pro neutrony (v závislosti na energii) a  $1\text{Gy}=20\text{Sv}$  pro  $\alpha$ -záření a štěpné produkty

# Cesty vstupu ionizujícího záření do organismu a srovnání efektů

- Ozáření ze vzdáleného zdroje (neutrony  $> \gamma \gg \beta^*$ ;  $\alpha = 0$ )
- Kontakt zářiče s povrchem těla ( $\gamma > \beta^*$ ;  $\alpha \sim 0$ ; neutronové zářiče se nevyskytují)
- Kontakt zářiče s vnitřním prostředím ( $\alpha > \beta > \gamma$ ; neutronové zářiče se nevyskytují)

\* povrch těla

# Dávkový ekvivalent vs. efektivní dávka

- Obojí má jednotku Sv
- Dávkový ekvivalent: bere v úvahu jen druh záření
- Efektivní dávka: bere v úvahu i vlastnosti ozářené tkáně (násobí se koeficientem: gonády/kostní dřeň/GIT > parenchymatózní orgány > mozek/kost/kůže)
- Předpokládá závažnější efekt/vyšší pravděpodobnost efektu se stoupající dávkou
- Z definice, efektivní dávku záření v Sv je nutno chápat s rezervou u:
  - > 10 Sv (dávka vyšší než letální)
  - < 100 mSv (empiricky není jasná závislost onemocnění na dávce)

# Zdroje ionizujícího záření\*

- Přírozené (2,1 mSv/rok)
  - kosmické (0,3 mSv/rok)
    - expozice roste s nadmořskou výškou a zeměpisnou šířkou
  - pozemské zdroje (0,4 mSv/rok)
    - radioaktivní rozpad přirozených radioizotopů (půda a skála)
  - radon (1,1 mSv/rok)
    - plyn, vzniká radioaktivním rozpadem
    - nejrozšířenější izotop  $^{222}_{86}\text{Rn}$  pochází z radia  $^{226}_{88}\text{Ra}$  (původně z  $^{238}_{92}\text{U}$ )
    - prochází  $\alpha$ -rozpadem s několika následujícími rozpady v krátké době
  - potraviny (0,3 mSv/rok)
    - především  $^{40}_{19}\text{K}$
- Arteficiální (2,0 mSv/rok)
  - medicína (1,9 mSv/rok)
    - diagnostika, terapie, sterilizace
  - ostatní arteficiální (<0,1 mSv/rok)
    - spotřební produkty
    - následky radioaktivního spadu (jaderné testy, Černobyl...)
    - nukleární energetika

\* Německo 2005

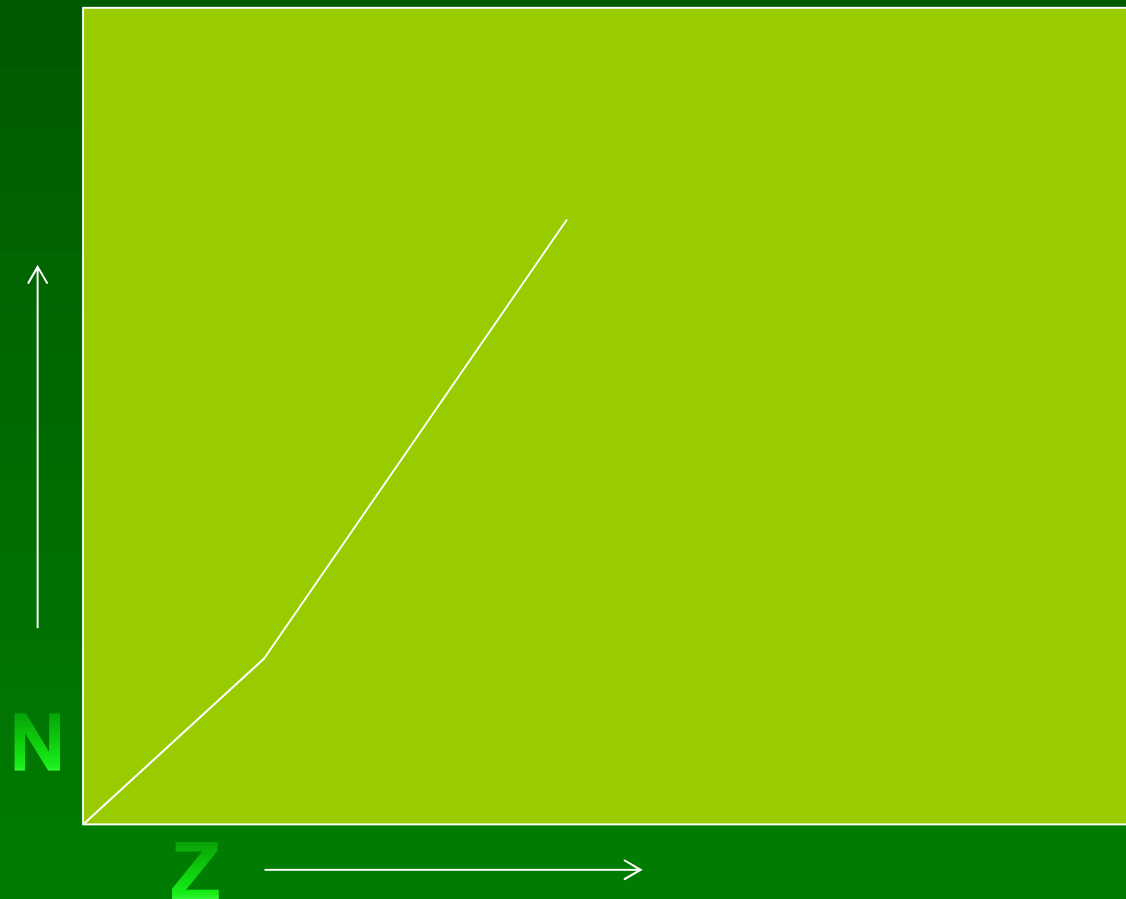


# Co je to radioaktivita?

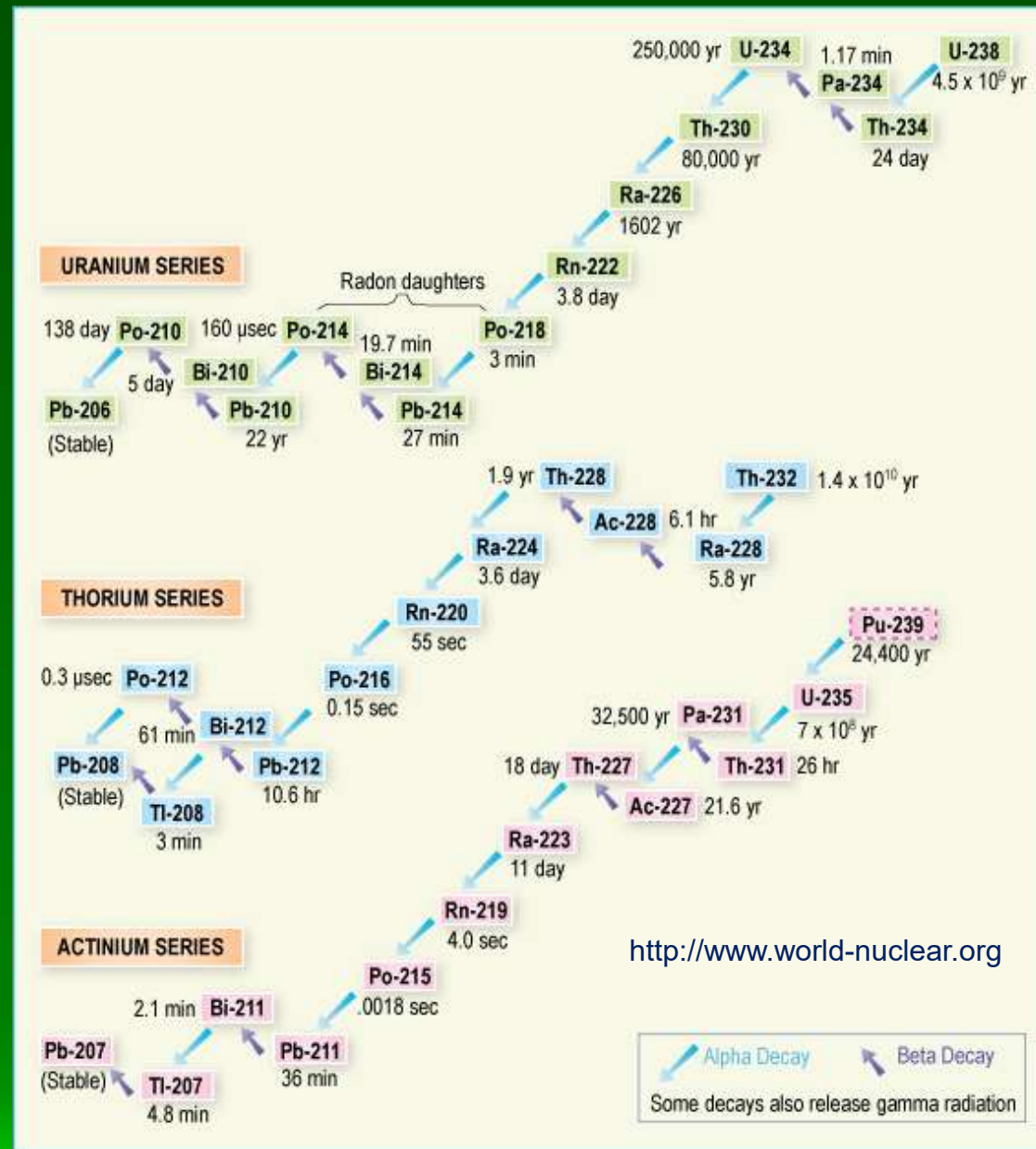
- většina atomů v přírodě je stabilních
- některé mají přebytek vnitřní energie (tzn. vysokou hmotnost v přepočtu na 1 nukleon –  $E=mc^2$ ), která se uvolňuje při rozpadu za vzniku nových prvků =“**radioaktivní rozpad**”
- Nejstabilnější jsou atomy poblíž tzv. „řeky stability“ (typický poměr protonů a neutronů v jádře)
  - při rozpadu se přebytek vnitřní energie uvolňuje jako  $\gamma$ -záření nebo částice
- **rychlost radioaktivního rozpadu** radioaktivní látky vyjadřují jednotky **becquerel** (Bq)
  - 1 Bq=1 atomický rozpad/s (dříve 1 curie =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq)

# Řeka stability

- Atomy vlevo nahoře mají přebytek neutronů – záření  $\beta^-$
- Atomy vpravo dole mají přebytek protonů – záření  $\beta^+$  nebo záchyt elektronu
- Atomy vpravo nahoře jsou celkově velké – záření  $\alpha$  (nebo štěpná reakce)
- Atomy vlevo dole jsou stabilní, ale za extrémních teplot se můžou slučovat (jaderná fúze – hvězdy, vodíková bomba)



# Rozpadové řady



# Graye, sieverty, becquerely

- Dávkový ekvivalent nebo efektivní dávku (Sv) nelze přímo měřit (jedná se vždy o odhad)
- Radioaktivitu nelze jednoduše převést na absorbovanou dávku
  - Závisí na způsobu kontaktu se zdrojem, jeho biologickou dostupností, vylučováním a na vlastnostech radioaktivního nuklidu
  - Příklad: Draslík vlastního těla: 5 kBq ~ 200  $\mu$ Gy/rok ~ 200  $\mu$ Sv/rok

# Vyberte nejvýznamnější zdroj radioaktivity v prostředí...

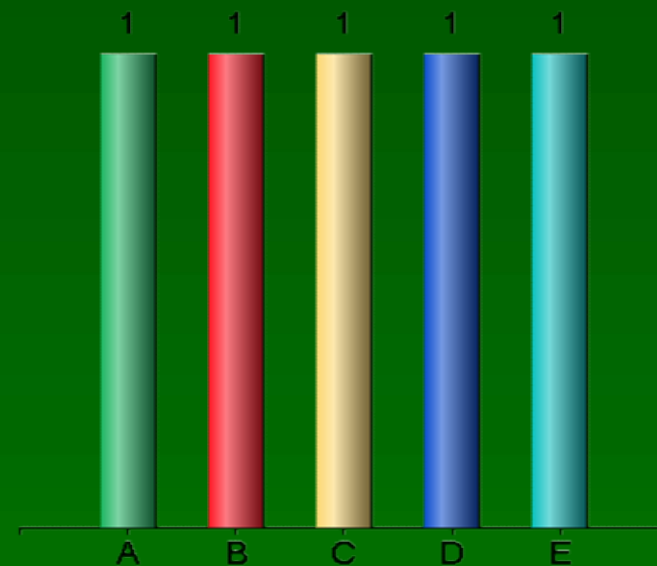
A. Draslík  $^{40}_{19}\text{K}$  v potravě

✓ B. Radon  $^{222}_{86}\text{Rn}$  ve vzduchu (budovy, doly)

C. Uran a thorium v horninách

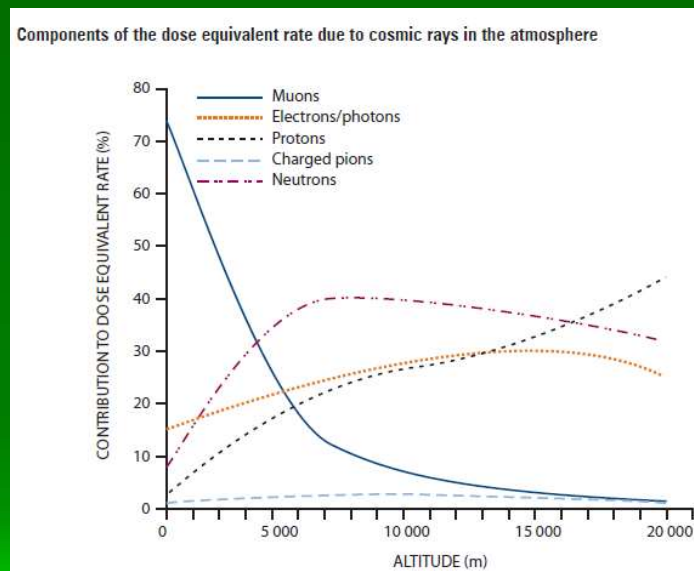
D. Spad z jaderných testů a Černobylu

E. Startéry v zářivkách



# Kosmické záření

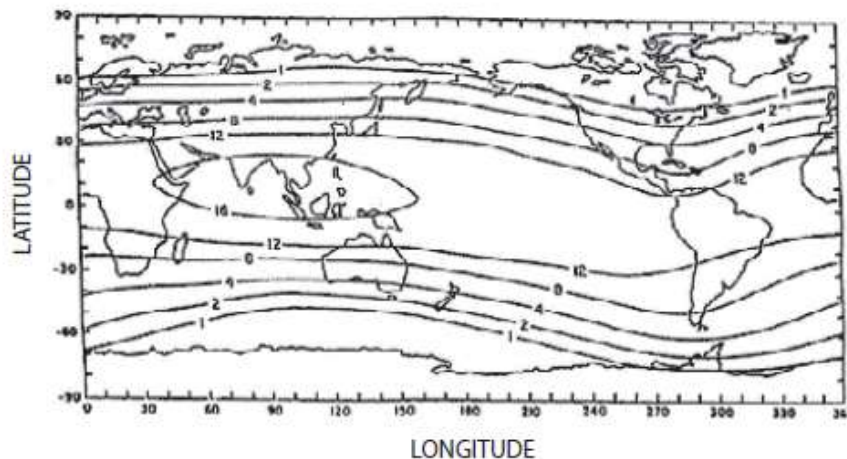
- Primární – 90% protonů, 9%  $\alpha$ -částic, 1% elektronů,  $\gamma$ -záření
  - Galaktické kosmické záření (stálé pozadí) vs. sluneční (11-leté oscilace)
  - Převažuje ve vyšších vrstvách atmosféry, kosmickém prostoru – magnetickým polem Země je směřováno do van Allenových pásů a k zemským pólům
- Sekundární – vzniká v důsledku interakcí primárního kosmického záření a atmosféry
  - Na úrovni mořské hladiny dominují miony, v 10000 km (letová hladina) neutrony
  - Expozice vzrůstá s nadmořskou výškou ( $\downarrow$ atmosféra) a zeměpisnou šířkou ( $\downarrow$ magnetické pole)
  - Vznikají tak také některé lehké radioaktivní nuklidy ( $^{14}_6\text{C}$ ,  $^3_1\text{H}$ )



# Kosmické záření – efekty nadmořské výšky a zeměpisné šířky

- Na rovníku projde magnetickým polem pouze vysokoenergetické záření
- Ve vysokých výškách (dominance protonů/neutronů) je v blízkosti magnetických pólů výrazně vyšší expozice (cca 0,1 mSv pro transatlantický let v blízkosti severního magnetického pólu vs. 0,03 přes rovník)
- V nízkých výškách (dominance mionů) je efekt malý (miony vznikají především při reakcích o vysoké energii)
- Energie částic je měřena v **elektronvoltech** ( $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ )

Figure III. Vertical cut-off rigidity,  $R_c$  (in GV), at 20 km altitude [S30]



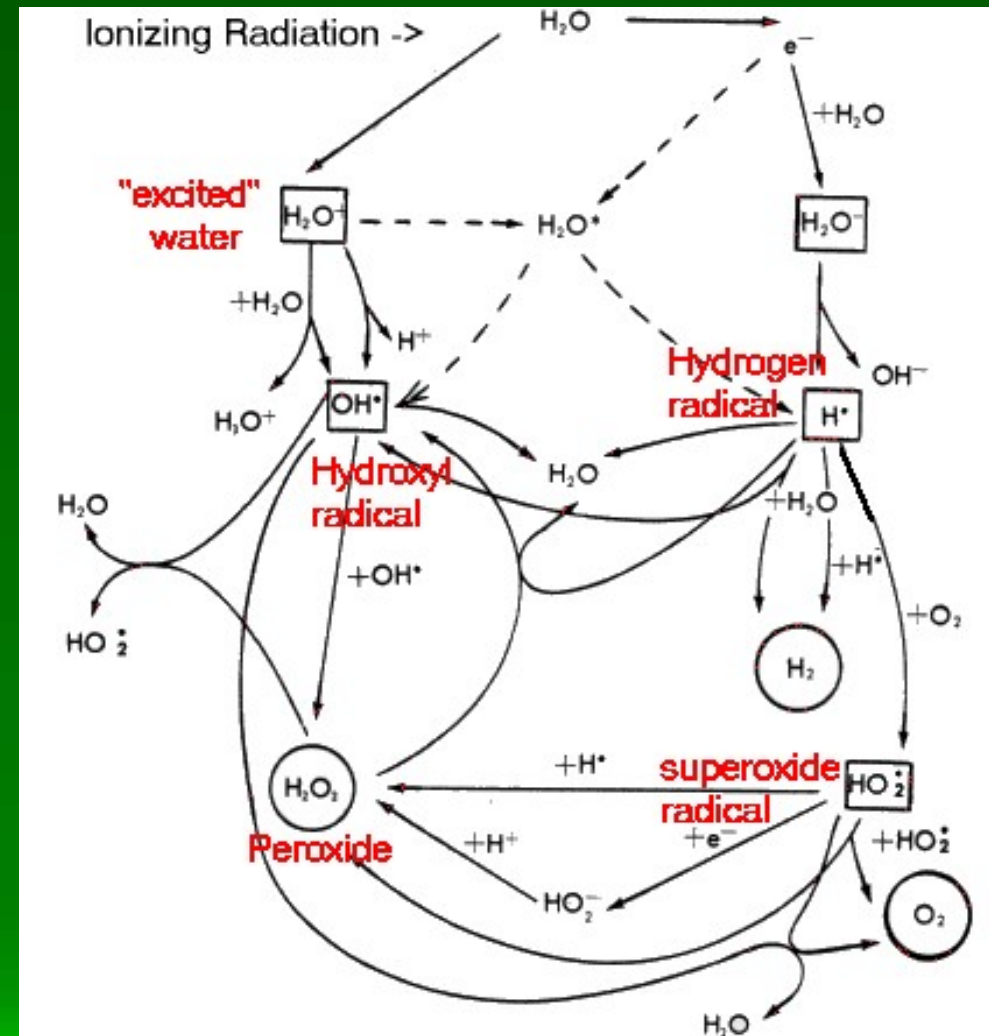
# Veličiny a jejich jednotky - shrnutí

jednotka	veličina	definice	použití
Elektronvolt (eV)	Energie částice	$1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$	Určuje ionizující schopnost částice / kvanta ( $> 10\text{eV}$ )
Gray (Gy)	Absorbovaná dávka	1 J / kg ionizujícího záření	Celková energie nesená ionizujícím zářením - např. v radioterapii, měřená dozimetry
Rad	Absorbovaná dávka	= 1 cGy	Viz gray
Sievert (Sv)	Dávkový ekvivalent	1 Gy x radiační váhový faktor	Bere v úvahu typ záření
	Efektivní dávka	1 Gy x radiační váhový faktor x tkáňový váhový faktor	Bere v úvahu také vlastnosti ozářené tkáně
Rem	Dávkový ekvivalent	1 rad x radiační váhový faktor	Viz sievert
	Efektivní dávka	1 rad x radiační váhový faktor x tkáňový váhový faktor	Viz sievert – jak dávkový ekvivalent, tak efektivní dávka jsou odhady !
Roentgen (R)	Expozice	Ionizující záření, které vytváří $3,7 \times 10^{10} \text{ C}$ v $1 \text{ cm}^3$ suchého vzduchu	Měření dozimetry (1R ~ 1 rad)
Becquerel (Bq)	Radioaktivita	1 rozpad / s	Užitečné v určování radioaktivní kontaminace
Curie (Ci)	Radioaktivita	$3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ (37 GBq)	Viz becquerel



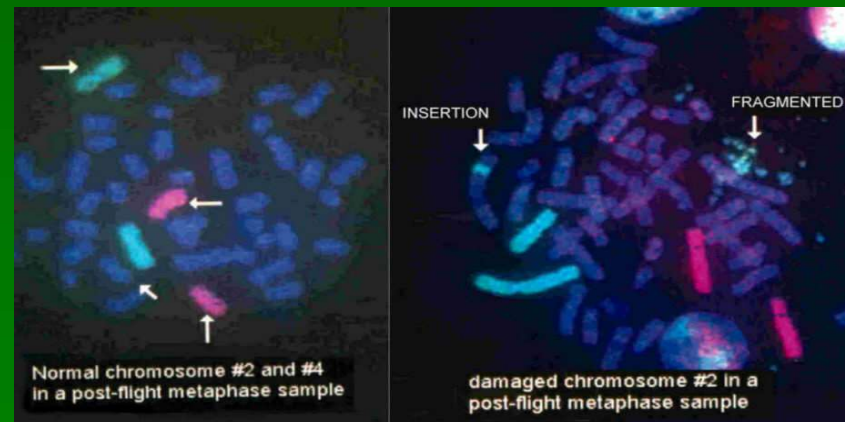
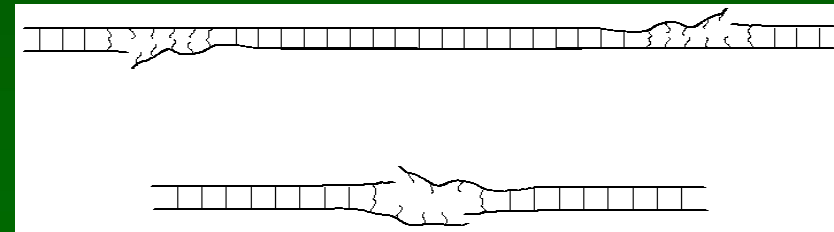
# Biologický efekt a následky ionizujícího záření

- Přímá ionizace makromolekul
- Nepřímo prostřednictvím “radiolýzy” vody
  - volné kyslíkové radikály
- Důsledky:
  - reparace
  - blokáda cyklu → apoptóza (především u rychle proliferujících buněk)
  - perzistující změna (mutace DNA)

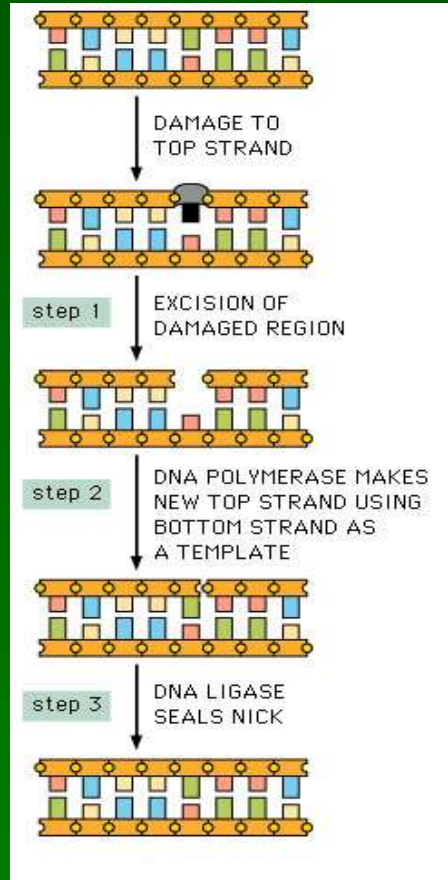


# Typy a důsledky lézí DNA

- single strand breaks (SSB)
  - cca 1000 na jednu buňku a 1 Gy
- double strand breaks (DSB)
  - cca 70 na jednu buňku a 1 Gy



# DNA reparace



- *in situ* reparace – nespecifická (např. donory vodíku)
- excisní reparace (SSB)
  - base excision repair
  - nucleotide excision repair
- homologní rekombinace (DSB - oprava za použití druhého chromosomu)
- nehomologní připojení
  - translokace
  - inzerce/delece
- mismatch – bodová mutace
- letální (apoptóza)
- U SSB úspěšnost téměř 100 %, u DSB jen asi 75 %

# Absorbovaná dávka ionizujícího záření je udávána v...

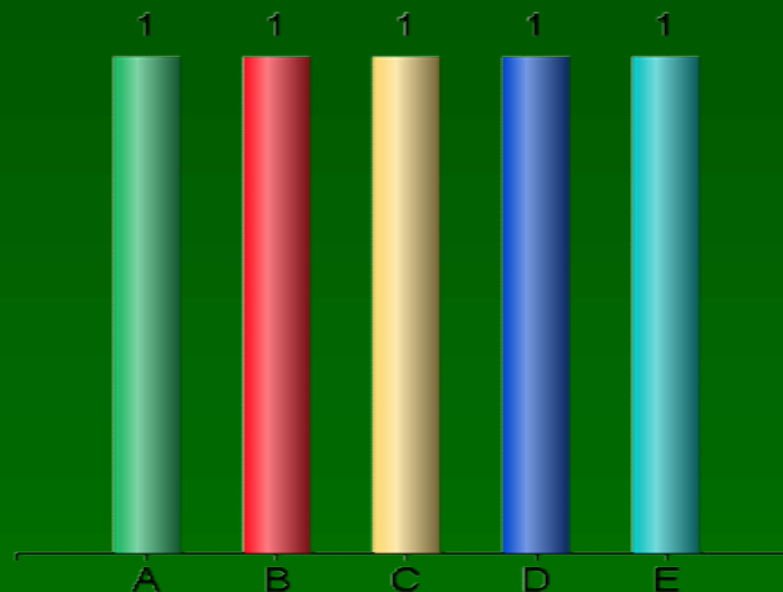
A. Sievertch

B. Becquerelech

C. Elektronvoltech

D. Joulech

✓ E. Grayích



# Charakter biologického účinku

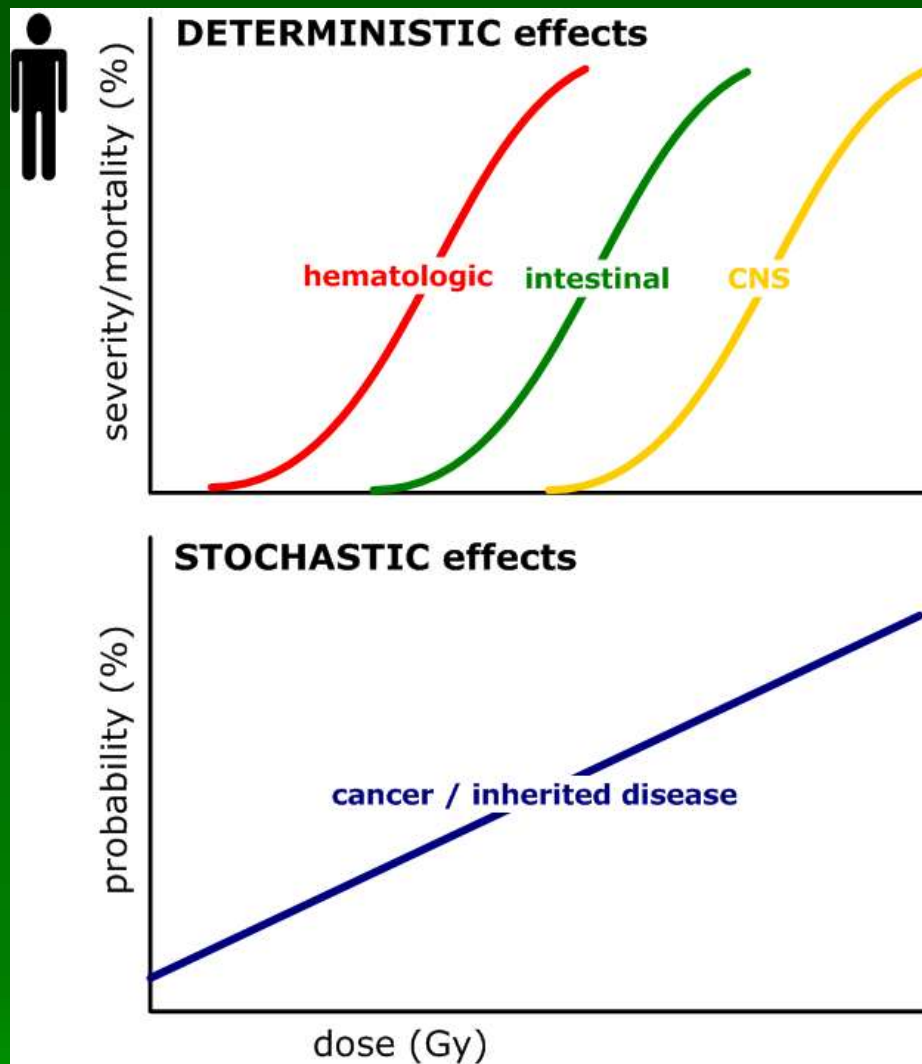
## ■ Deterministický

- **závažnost závisí** (“je determinována”) **na dávce**
- manifestace **specifická**
  - poškození typických tkání a orgánů
- efekt se objevuje jen při překročení **prahové dávky**
- poškození je důsledkem zániku **velkého množství buněk**
- nástup příznaků brzy po expozici (**krátká latence**)
- typy:
  - akutní radiační syndrom (ak. nemoc z ozáření)
    - celotělové ozáření dávkou >1Gy
  - chronický post-radiační syndrom (celkově nebo lokálně)
    - sterilita, katarakta, radiační dermatitida, alopecie, endarteritis obliterans, pneumonitis, ...
  - poškození plodu *in utero*

## ■ Stochastický

- **pravděpodobnost roste s dávkou** (ne závažnost!)
- manifestace **méně specifická**
  - poškození různých tkání a orgánů
- plynulý nárůst rizika **bez “bezpečné” prahové dávky**
- k efektu stačí poškození **jediné buňky**
- manifestace opožděná (**dlouhá latence**, typicky roky)
- typy:
  - somatické mutace - nádory
    - leukemie, št. žláza, plíce, ml. žláza, skelet
  - germinativní mutace (oocyt, spermie) – vrozený genetický defekt

# Deterministické × stochastické

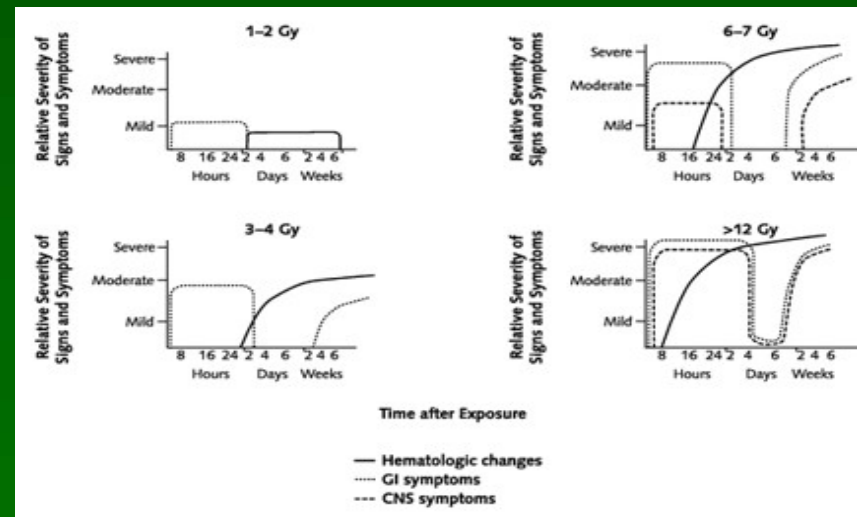


# Radiosenzitivita tkání

- Tkáně s vysokou rychlostí buněčného dělení, rychlým metabolismem a vysokými nutričními nároky jsou senzitivní k účinkům ionizujícího záření, zhruba v pořadí:
  - 1) Krvetvorné tkáně, střevní epitel, gonády
  - 2) Kůže, další epitely
  - 3) Oční čočka, vaskulatura, kost a chrupavka v růstu
  - 4) Parenchymatózní orgány, dospělá chrupavka a kost, endokrinní žlázy
  - 5) Mozek, mícha, sval

# Akutní radiační syndrom

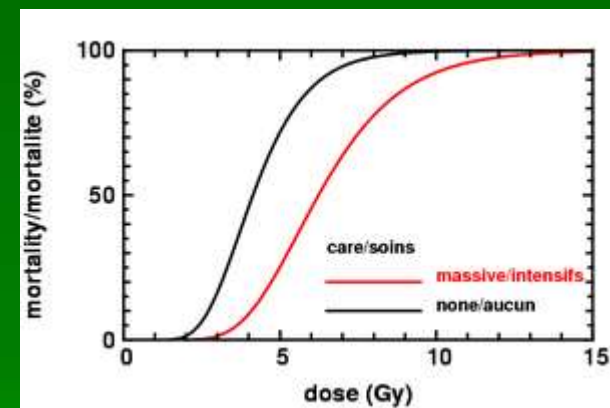
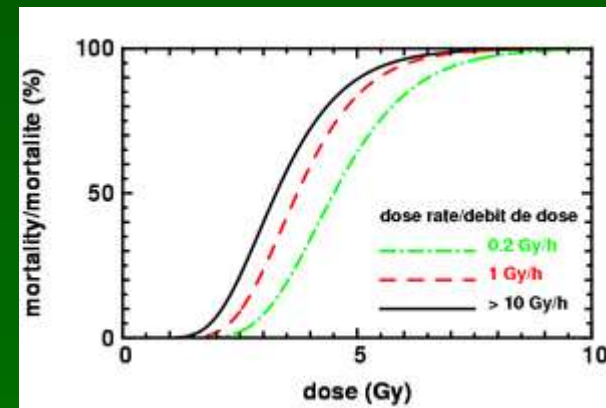
- postihuje hlavně **hematopoetický**, **gastrointestinální** a **cerebrovaskulární** systém
- časový průběh, rozsah a závažnost odstupňovaná podle dávky → **deterministický** efekt
- od několika hodin do několika měsíců po expozici
- LD 50 (tj. dávka vedoucí k 50% úmrtí) je cca 5 Sv, LD 100 cca 10 Sv
- Většina údajů pochází ze sledování přeživších z Hirošimy/Nagasaki





# ARS – letální dávka

- LD 50 (tj. dávka vedoucí k 50% úmrtí) je cca 5 Sv, LD 100 cca 10 Sv
- Většina údajů pochází ze sledování přeživších z Hirošimy/Nagasaki
- Jaderné zbraně – typicky kombinace:
  - $\gamma$ -záření, neutrony (cca 15 % energie výbuchu)
  - termického poškození (cca 35 % energie)
  - poškození rázovou vlnou (cca 50 % energie)



# Fáze ARS

- 1) Fáze prodromů (hodiny až dny po expozici)
- 2) Fáze latence (zlepšení symptomů, hodiny až týdny v závislosti na dávce)
- 3) Fáze manifestního onemocnění (obvykle týdny)
- 4) Uzdravení (až 2 roky) nebo smrt

Vyšší absorbovaná dávka → kratší trvání jednotlivých fází a horší prognóza

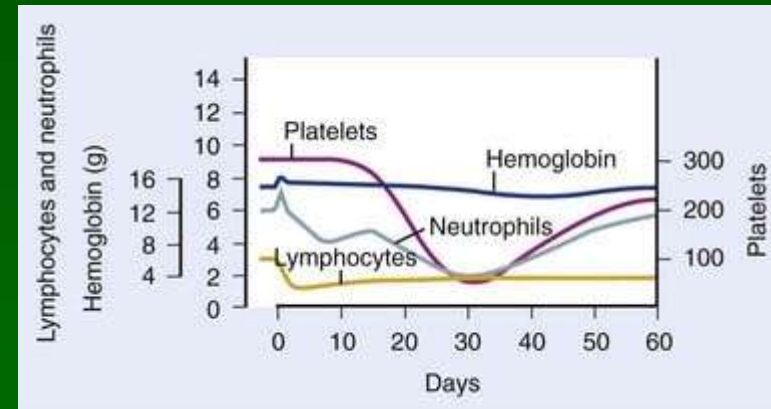
# Formy ARS

- Hematopoetický syndrom (>1Gy)
  - 1) retikulocytopenie, lymfopenie + granulocytóza
  - 2) granulocytopenie (→ imunodeficience)
  - 3) trombocytopenie (→ krvácivost)
  - 4) anemie (→ hypoxie)
- GIT syndrom (>6-10Gy)
  - časný (hodiny) – nevolnost, zvracení, diarrhea
  - pozdní (dny) – ztráta intestinální integrity
    - malabsorpce, dehydratace, toxemie/sepse, ileus, krvácení
- Cerebrovaskulární syndrom (>cca 50 Gy)
  - porucha hematoencefalické bariéry
  - bolest hlavy, porucha kognitivních funkcí, dezorientace, ataxie, křeče, vyčerpání a hypotenze
- Kožní
  - erytém, popáleniny, edém, porucha hojení ran
  - epilace

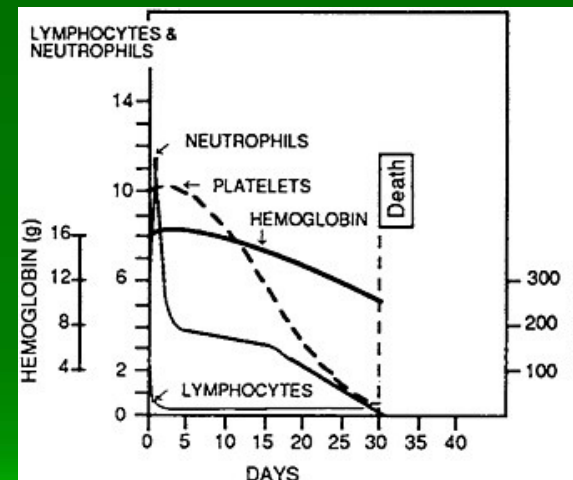
# Hematopoetický syndrom

- ozáření kostní dřeně (>1Gy) vede k exponenciálnímu zániku buněk - **hematologická krize**
  - hypoplazie až aplazie dřeně + periferní pancytopenie (infekce, krvácení)
- subpopulace **kmenových bb.** je selektivně více **radio-rezistentní**, (pravděpodobně díky převaze bb. v G<sub>0</sub> fázi)
  - nezbytné pro regeneraci
- anemie je pozdním důsledkem (erytrocyty ~120 dní)!
- masivní **stresová reakce** (glukokortikoidy) přispívá k lymfopenii (cytolytický efekt) a paradoxně oddalují nástup granulocytopenie (uvolnění zásob granulocytů z dřeně a sleziny)

2 Gy



5 Gy



# Vývoj krevního obrazu v závislosti na dávce

- Počet neutrofilů má tendenci k úvodnímu vzestupu a přechodným remisím před kritickým obdobím
- Symptomatická anemie je vzácná, obvykle je následkem gastrointestinálního krvácení (trombocytopenie + GIT forma)

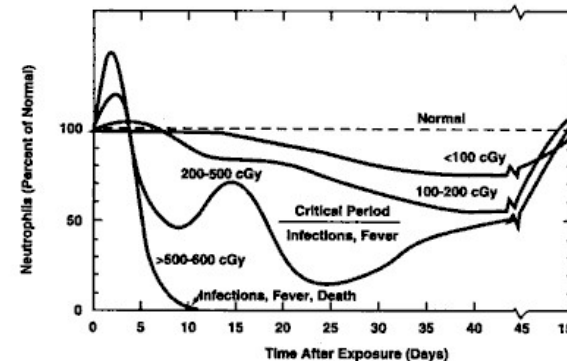


Figure 6-II. Smoothed Average Time-Course of Neutrophil Changes in Human Cases from Accidental Exposure as a Function of Dose

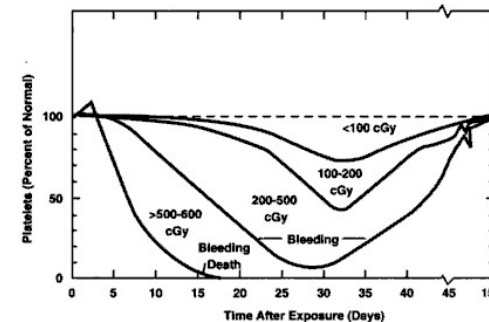


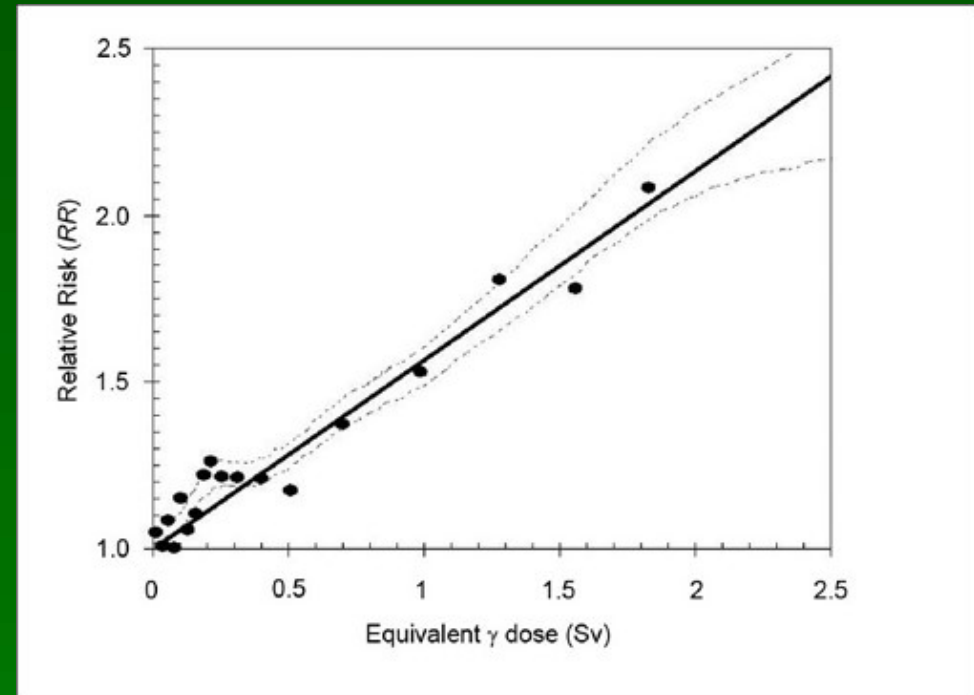
Figure 6-III. Smoothed Average Time-Course of Platelet Changes in Human Cases from Accidental Radiation Exposure as a Function of Dose

# Embryo, fetus, germinativní buňky

- Těhotenství – poškození plodu *in utero*
  - <3 týdny (blastogeneze)
    - “vše nebo nic”
      - genové a chromozomové mutace zpravidla vedou k abortu
  - 3. – 8. týden (organogeneze)
    - růstová retardace
    - teratogenní - kongenitální deformity
      - mikrocefalie, mikroftalmie, spina bifida, rozštěpy, ...
  - 8. – 15. týden (časná fetální období)
    - mentální retardace
    - zvýš. náchylnost k nádorovým onem. u dětí (leukemie)
  - později
    - obdobně jako po narození
- Sterilita
  - spermatogeneze – dočasná sterilita u mužů (od cca 0,5 Sv, trvalá od cca 5 Sv)
  - ovaria – nutná velká dávka k vyvolání sterility u žen (cca 5 Sv), sterilita je pak trvalá
- Germinativní mutace
  - vrozené abnormality

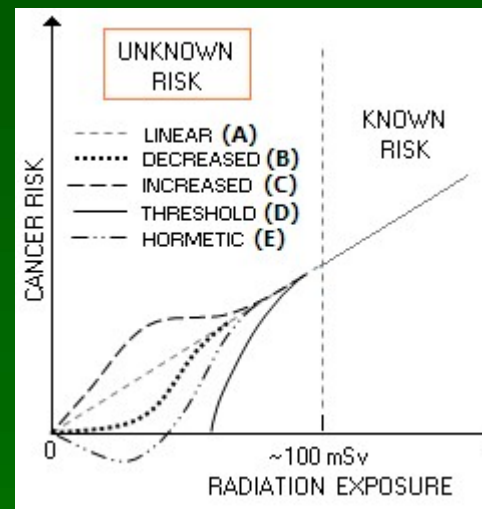
# Riziko nádorových onemocnění

- u vysokých dávek roste riziko lineárně s celoživotní expozicí
- cca 1 případ nádorového onemocnění na 100 osob exponovaných dávkovým ekvivalentem 100 mSv (RR 1,024)
- pod 100 mSv je závislost nejasná
- riziko je větší u dětí a u žen, kolem cca 40 let se rozdíl mezi pohlavími stírá



# Riziko nádorových onemocnění – nízké dávky

- Málo empirických dat pro lidskou populaci
- „linear no-threshold model“ – předpoklad lineárního efektu také u nízkých dávek
- hormeze – předpokládané protektivní účinky u velmi nízkých dávek záření (existují údaje o stimulaci antioxidantních mechanismů a nižší mortalitě ze studií na zvířatech – zejm. u trvalého ozařování)





# K rozvoji deterministických účinků dochází zhruba od...

A. 100 mSv

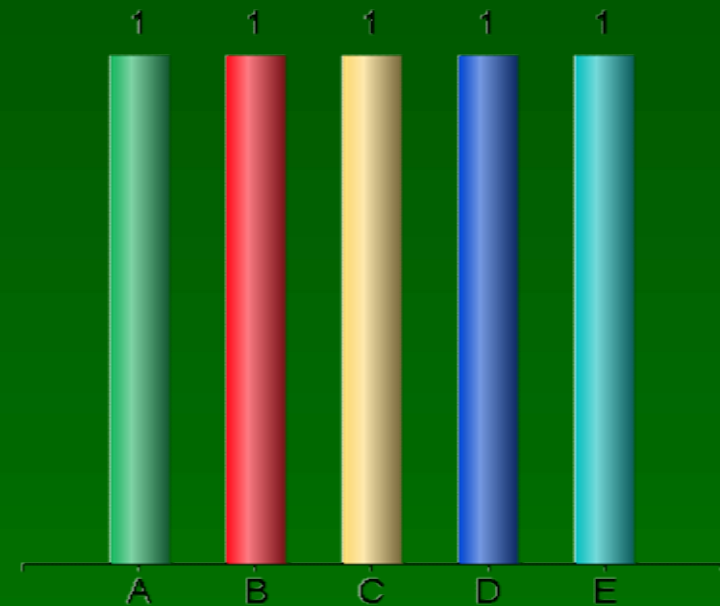


B. 500 mSv

C. 2 Sv

D. 5 Sv

E. 10 Sv



# Radiační expozice v medicíně – zobrazovací vyšetření

- záření RTG,  $\gamma$  nebo  $\beta^+$  (PET)
- RTG snímek hrudi 0,1 mSv
- RTG snímek bederní páteře 1,5 mSv
- CT hlavy 2 mSv
- CT hrudi 7 mSv
- celotělové CT 10 mSv
- scintigrafie ledvin 1,8-2,2 mSv
- scintigrafie kostí 6,3 mSv
- PET mozku 14 mSv
- zátěžová scintigrafie srdce 9,4-41 mSv
- koronarografie 20 mSv
- koronarografie + PCI 30 mSv

# Profesionální expozice (v medicíně a jinde)

## ■ Přírodní zdroje

- horníci v uranových dolech
- horníci v uhelných dolech
- horníci v ostatních dolech
- kosmonauti
- posádky letadel

## ■ Umělé zdroje

- pracovníci v jaderných zařízeních
- armáda (výroba a testy jaderných zbraní)
- zdravotnický personál
  - intervenční kardiologové
  - Intervenční radiologové
  - ostatní radiologové
  - ortopedi
  - nukleární medicína (lékaři a sestry)
  - technici

# Profesionální expozice v medicíně

Figure L. Occupational exposures due to diagnostic radiology in Greece for various job categories

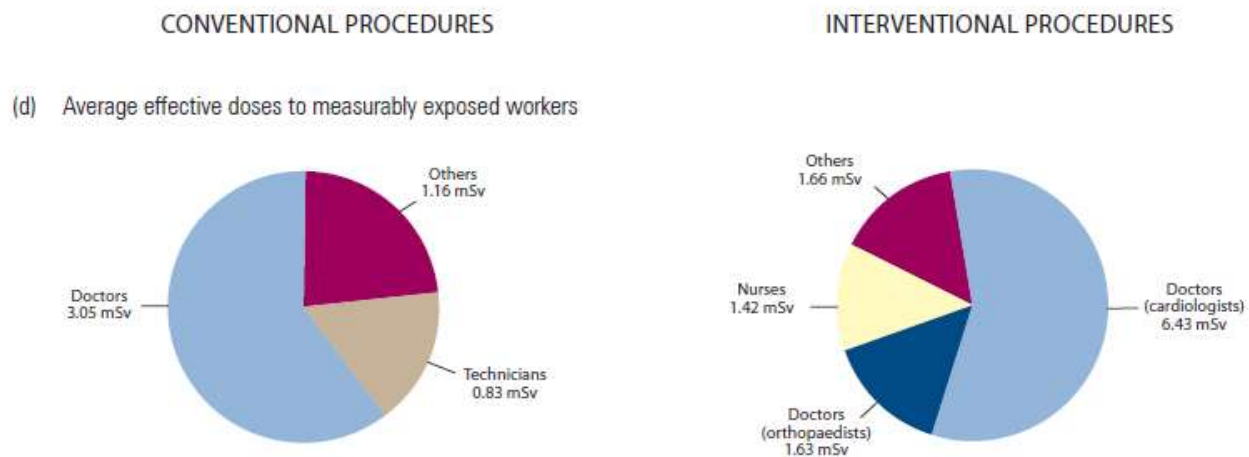


Figure LIII. Occupational exposures due to nuclear medicine in Greece

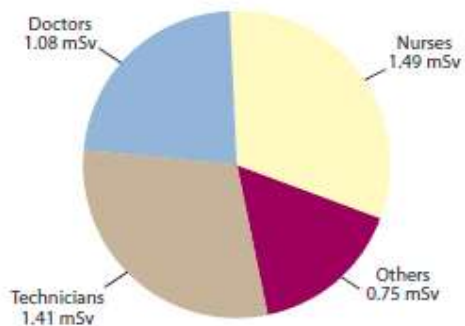


Figure LIV. Worldwide trends in occupational exposure due to radiotherapy

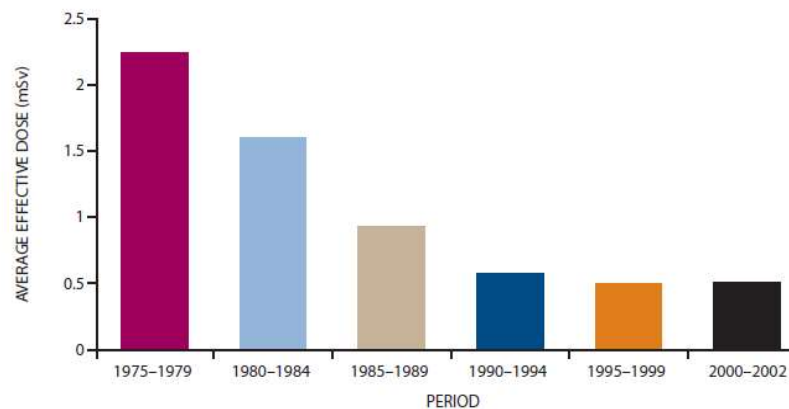
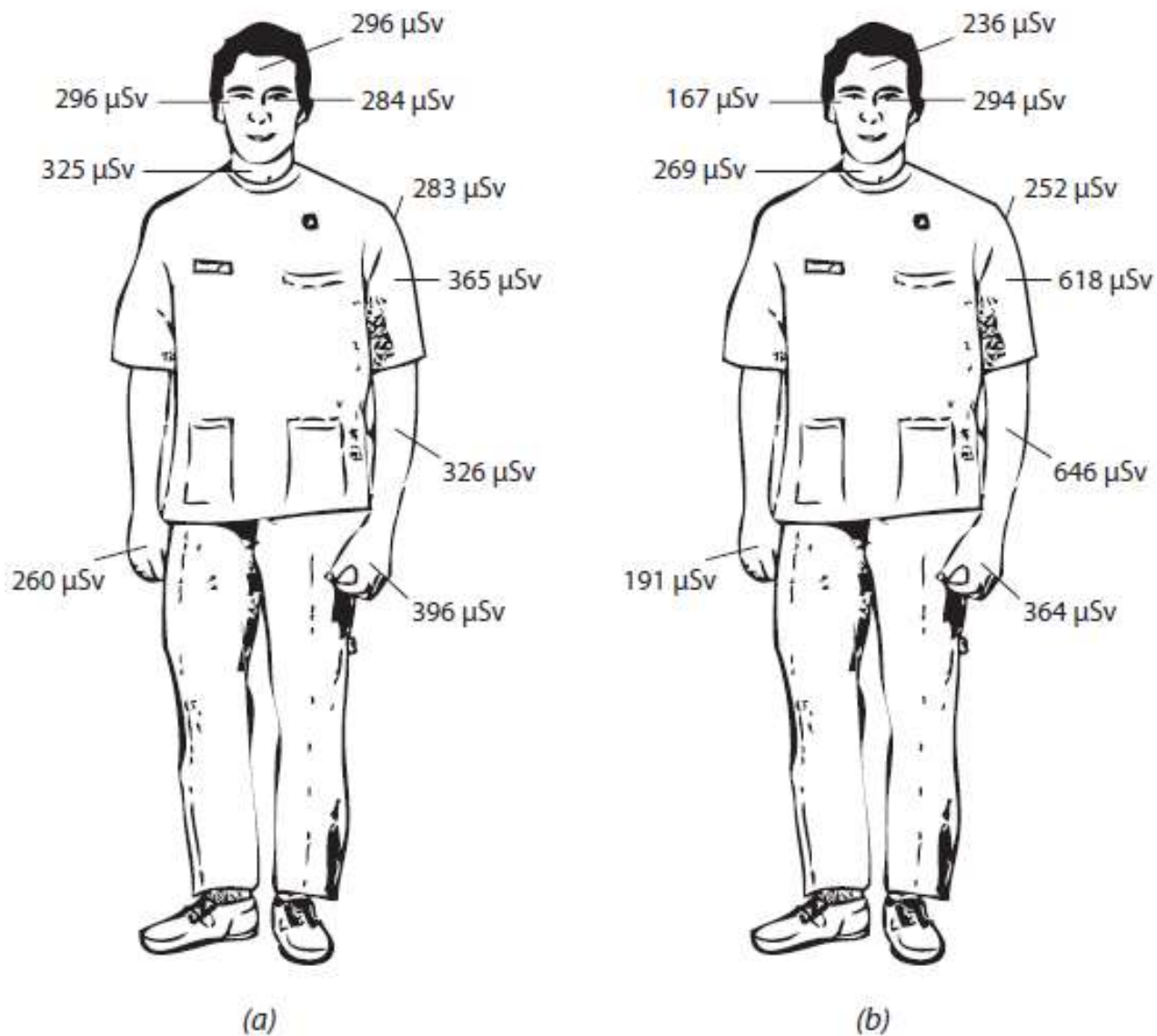


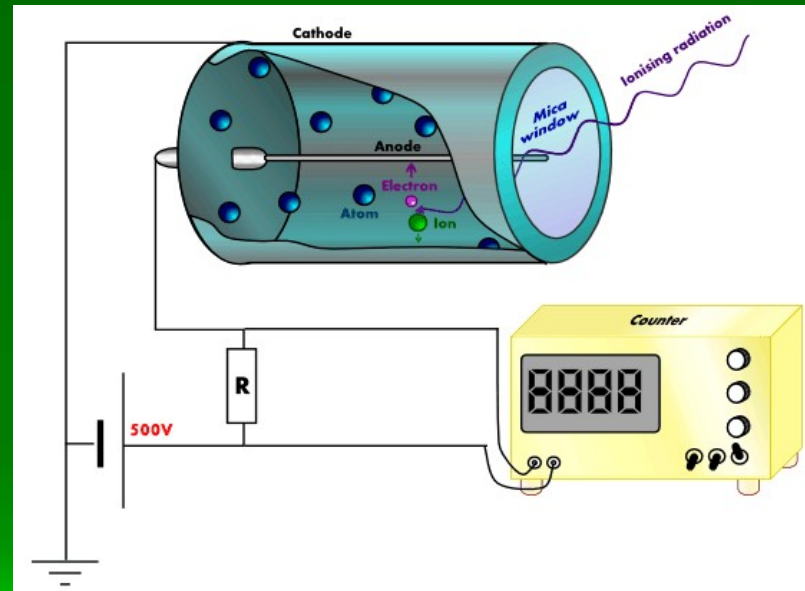
Figure LIV. Worldwide trends in occupational exposure due to radiotherapy

**Figure XLVIII.** Dose levels for (a) interventional radiologist and (b) interventional cardiologist  
Average values of 83 procedures performed by ten specialists in six laboratories [V7]



# Detekce ionizujícího záření

- Geiger-Müllerův počítač
  - Hlavní částí je trubice naplněná plynem (vzácný plyn + halogen)
  - Okraj trubice tvoří katodu, tyčinka uvnitř anodu
  - Ionizace plynu způsobí zkrat, který je zaznamenán čítačem
  - GM počítač měří počet impulzů za minutu (lze pak odhadnout dávku za minutu)



# Dozimetry

- Měří celkovou absorbovanou **dávku** ionizujícího záření
- Filmové dozimetry – využívají změny barvy filmu účinkem ionizujícího záření
- Termoluminiscenční dozimetry (TLD) – elektrony uvolněné ionizujícím zářením se zachycují na mřížce, při zahřátí se vrací a při návratu do stavu o nižší potenciální energii uvolňují viditelné či UV záření
- Opticky stimulovaná luminiscence (OSL) – podobný princip, místo zahřátí se používá zelené světlo – vhodná pro automatizovanou detekci

# Protiradiační opatření



Hygienické limity: 20 mSv/rok pro pracovníky, 1 mSv/rok pro ostatní („okolostojící“)

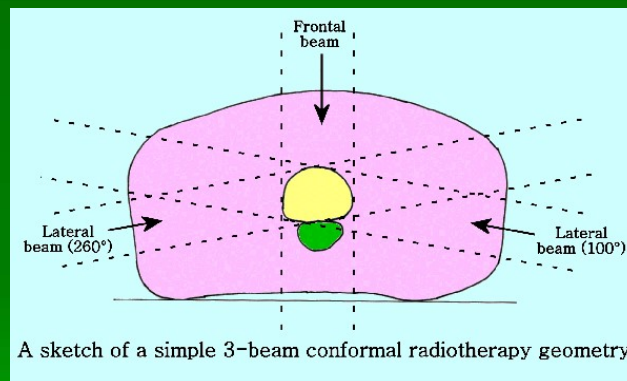


# Radiační expozice v medicíně - radioterapie

- různé druhy ionizujícího záření
- řádově desítky grayů (sievertů) – **deterministické poškození tkáně je účel terapie**
- teleterapie
- brachyterapie
- radiofarmaka
- rizika: poškození zdravé tkáně, sekundární nádory
- redukce rizik: frakcionace (obvykle 2 Gy na dávku), soustředění paprsků

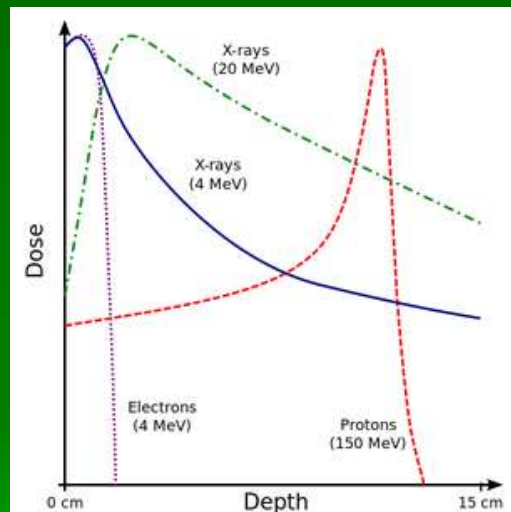
# Radiosenzitivita nádorů

- Zhruba odpovídá tkáni, ze které vznikly
  - vysoká: lymfomy, seminom, medulloblastom
  - střední: většina karcinomů
  - nízká: sarkomy, gliom, maligní melanom
- Další faktory:
  - hypoxie (snižuje radiosenzitivitu)
  - fáze buněčného cyklu (radiosenzitivita v  $M > G2 > G1 > S > G0$ )
    - frakcionace umožňuje postupné zasažení buněk nádorů ve vulnerabilních fázích cyklu
  - produkce p53 (zvyšuje radiosenzitivitu), růstových faktorů (snižují radiosenzitivitu)



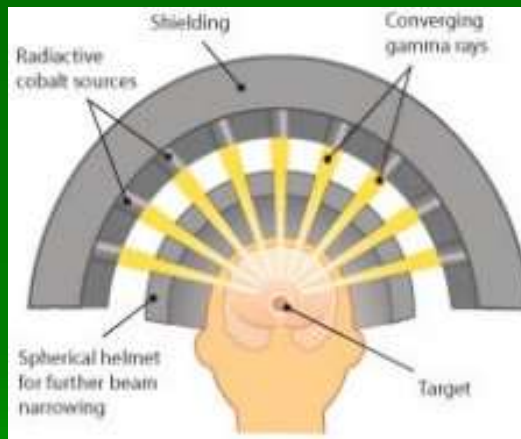
# Teleterapie – RTG vs. protony

- Elektromagnetické záření je zachyceno spíše povrchověji, protony více ve hloubce („Braggův vrchol“ – hloubka, kde je zachyceno největší množství protonů)
- Průnik elektromagnetického záření je větší u vyšších energií (= kratších vlnových délek)
- Vedle protonů lze použít i urychlená větší jádra (např. uhlík)
- Elektronová teleterapie – kožní tumory
- Záchytná neutronová terapie – pacientovi je podán neradioaktivní bór  $^{10}_5\text{B}$ , který je vycytán buňkami tumoru a ozářen neutrony:  $^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{11}_5\text{B} \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\alpha$



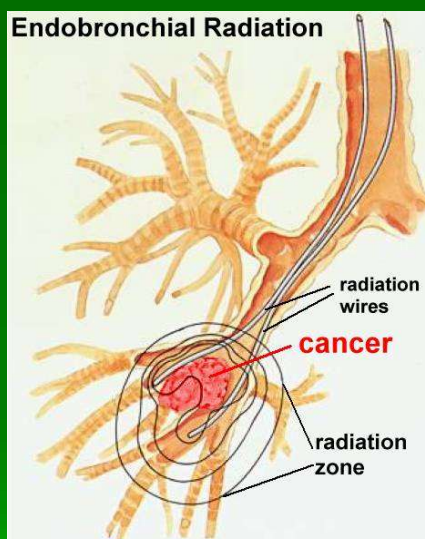
# Gama nůž

- = stereotaktická radiochirurgie
- Specifická forma teleterapie používaná u mozkových tumorů
- K lebce je chirurgicky připevněna helma s kolimátory
- Pacientova hlava vjede do radiační jednotky obsahující  $201\ ^{60}_{27}\text{Co}$  zdrojů s kolimovaným zářením
- Soustředění paprsků zabraňuje poškození okolní tkáně



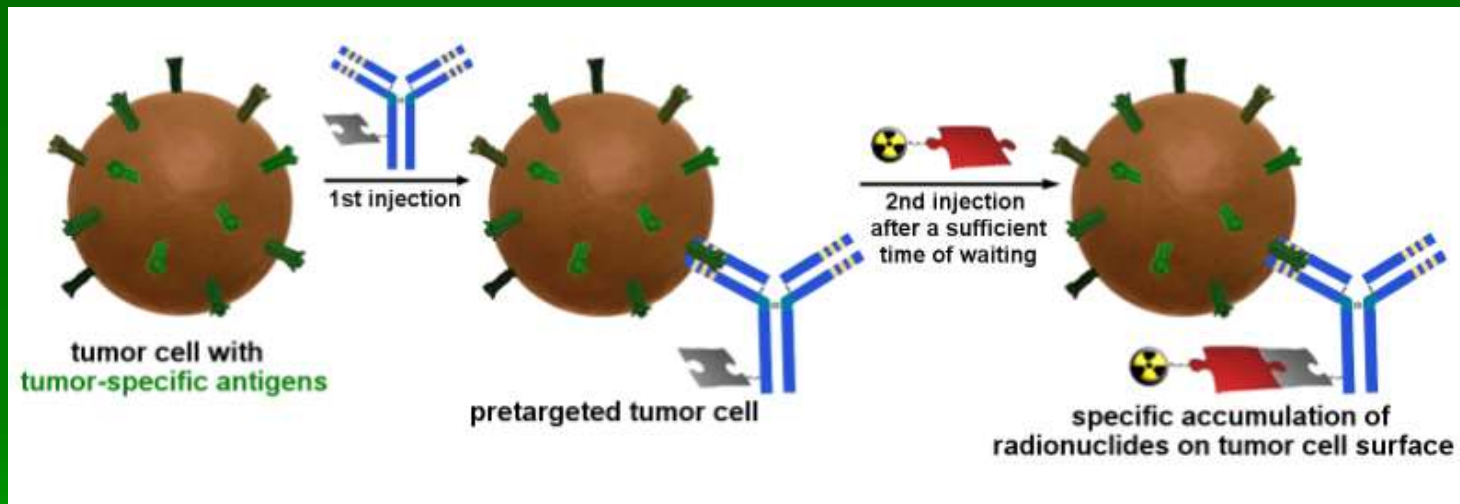
# Brachyterapie

- Zdroj záření ( $\beta^-$ ) se zavede lokálně do místa nádoru
- Výhody oproti teleterapii:
  - Vysoká dávka s menšími systémovými účinky
  - Menší ozáření okolních tkání
- Nevýhody
  - Dávka v cílové tkáni není homogenní – vysoká dávka v okolí zdroje, riziko nedostatečného efektu na okrajích nádoru
- Radioterapie rozpustnými  $\alpha$ -zářiči - radium  $^{224}_{88}\text{Ra}$



# Radiofarmaka

- Obvykle se podávají i.v. a jsou specificky vychytány buňkami nádor, které jsou následně zničeny
- Radiojód  $^{131}_{53}\text{I}$  – nádory štítné žlázy
- Stroncium  $^{89}_{38}\text{Sr}$ , radium  $^{223}_{88}\text{Ra}$  – kostní metastázy (nuklidy tvoří depozita v kosti)
- Fosfor  $^{32}_{15}\text{P}$  (lokálně vpichován do dutých nádorů mozku)
- Radioaktivně značené protilátky (např.  $^{90}_{39}\text{Y}$ ) – cílené proti buňkám lymfomů



# Pro teleterapii hluboko uložených nádorů jsou vhodné

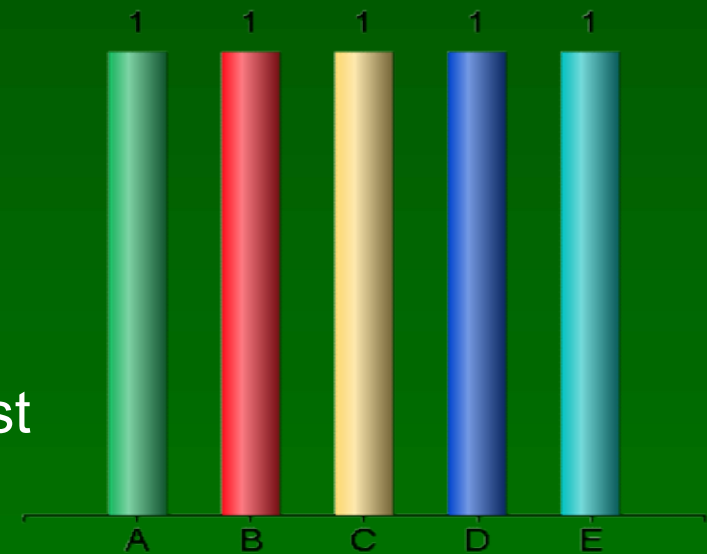
A. Pozitrony (pro schopnost anihilace)

B. Miony (pro spontánní rozpad)

C. Elektrony (pro ostře ohraničenou oblast ionizace)

✓ D. Protony (kvůli Braggově vrcholu)

E.  $\alpha$ -částice (pro vysokou kinetickou energii)



Praktikum:

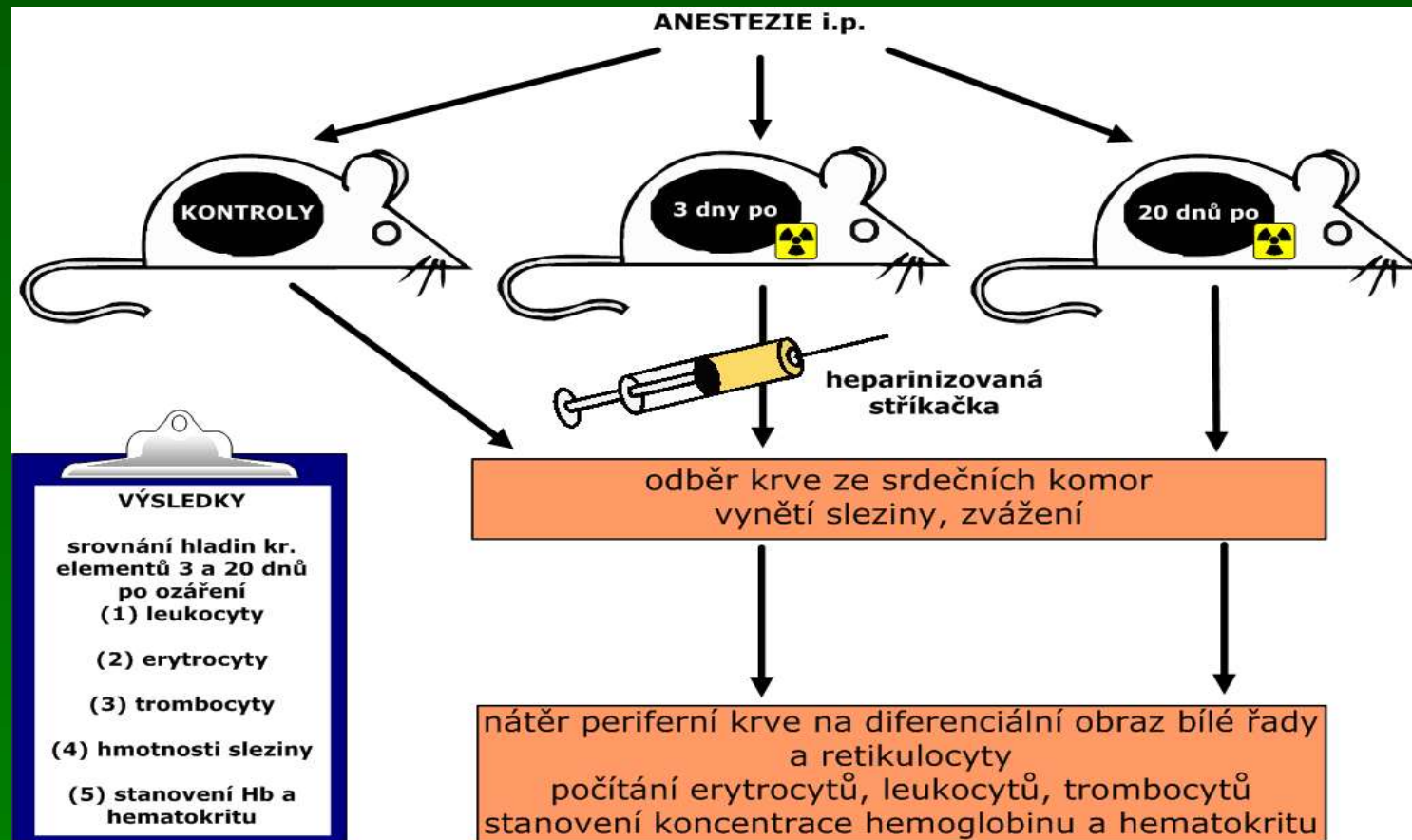
**EXPERIMENTÁLNĚ  
NAVOZENÝ AKUTNÍ  
RADIČNÍ SYNDROM U  
POKUSNÉHO ZVÍŘETE**



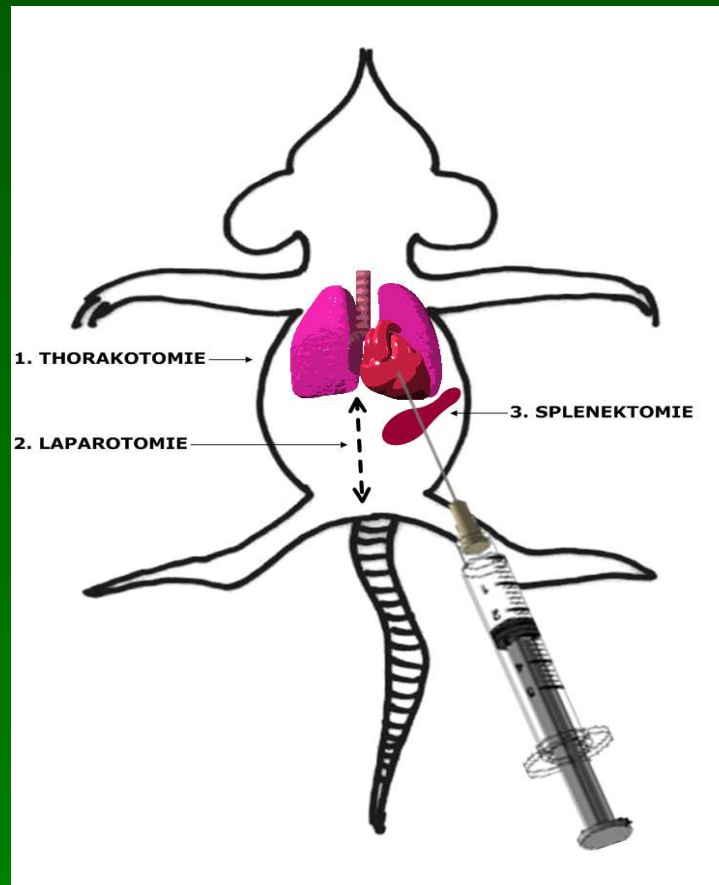
# Cíl praktika

- na hematologických parametrech dokumentovat deterministické účinky ionizujícího záření
- sledovat dynamiku změn periferního krevního obrazu jako následku změny v kostní dřeni
- akutní radiační syndrom je modelovou situací, na které lze ukázat princip regulace hematopoézy

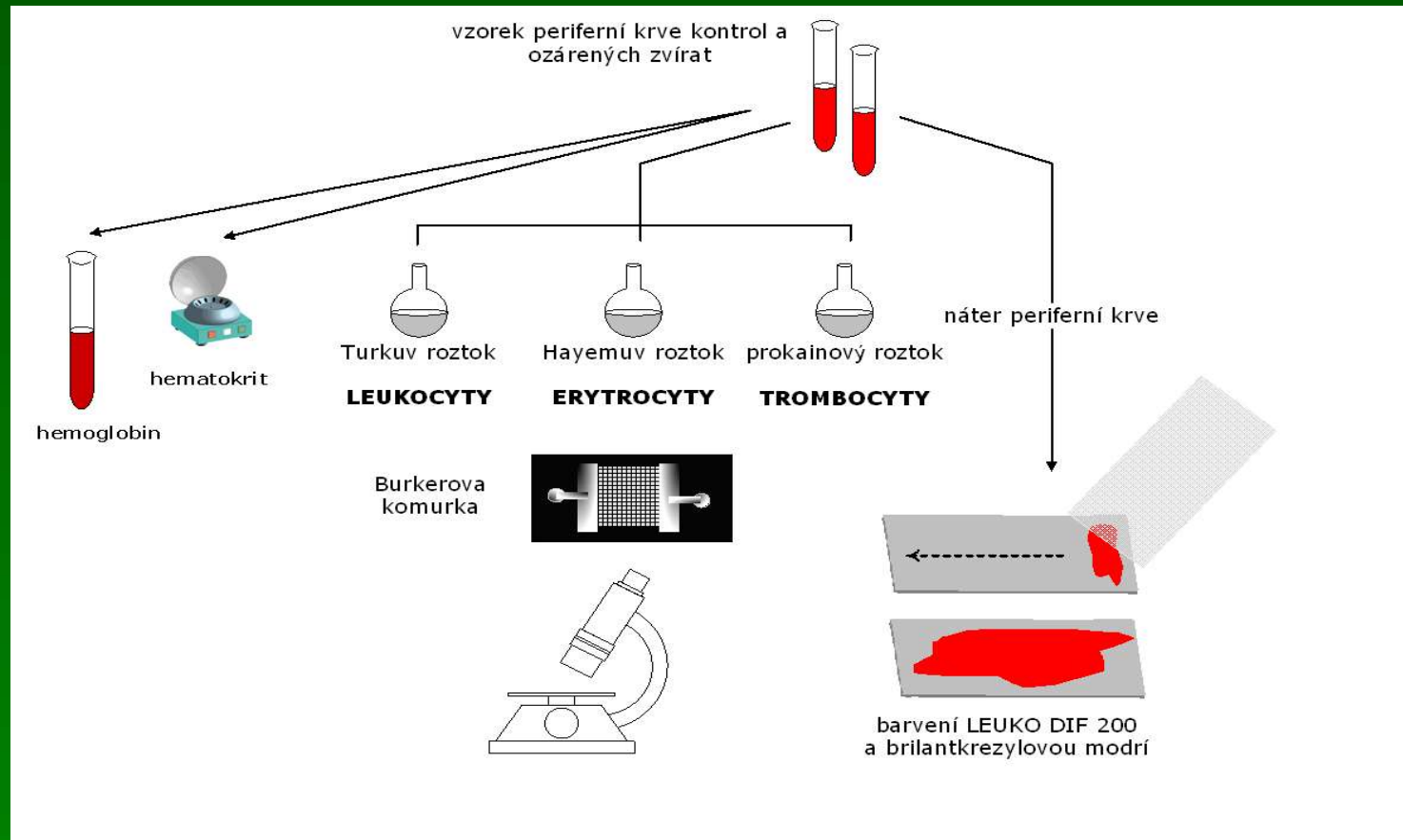
# Praktikum I - design



# Praktikum I – operační postup



# Praktikum I - hodnocení



# Účinky ionizujícího záření na krevetvornou tkáň

Praktikum II – hodnocení nátěrů periferní krve