

Radiační ochrana

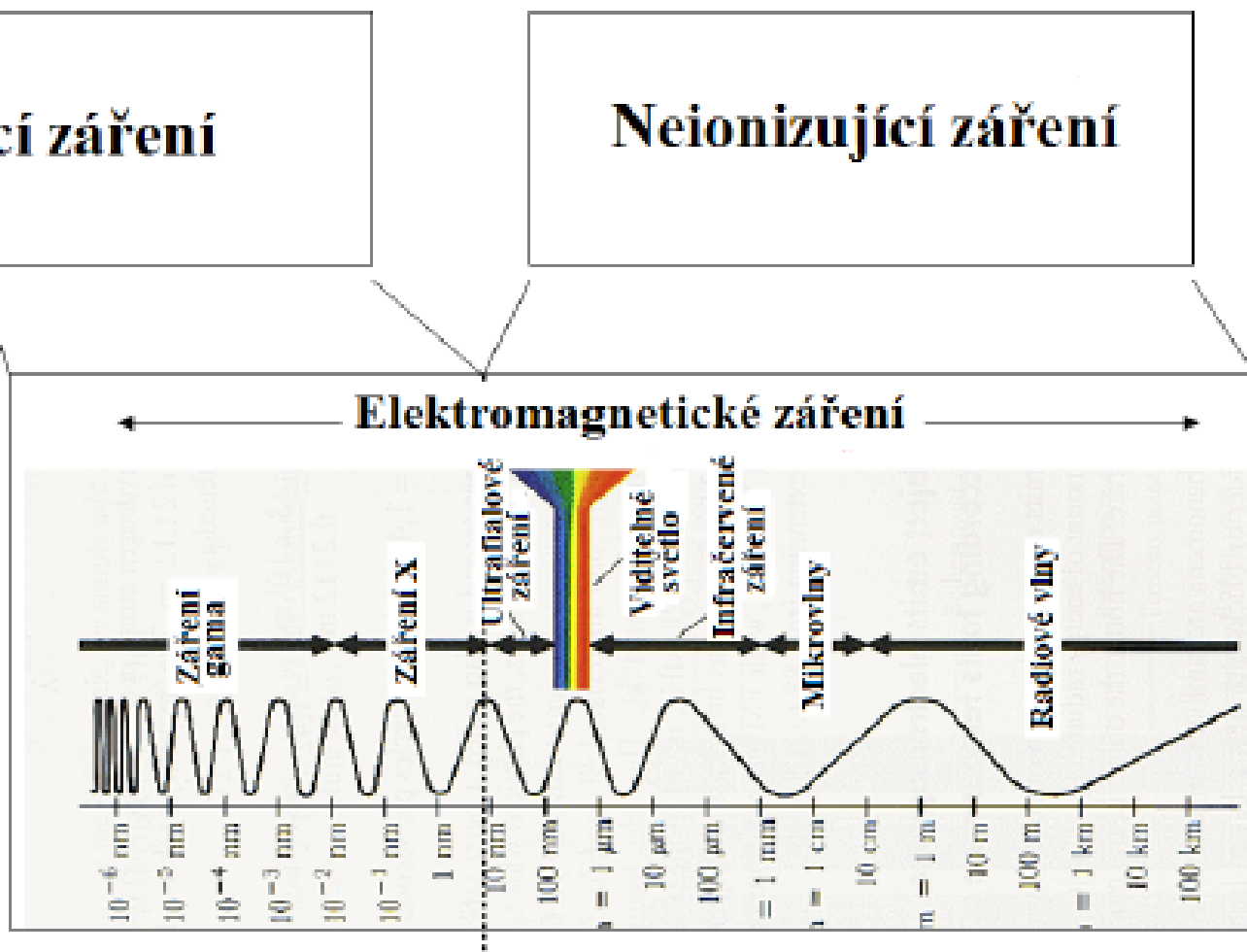
Ionizující a neionizující záření

Ionizující záření

Neionizující záření

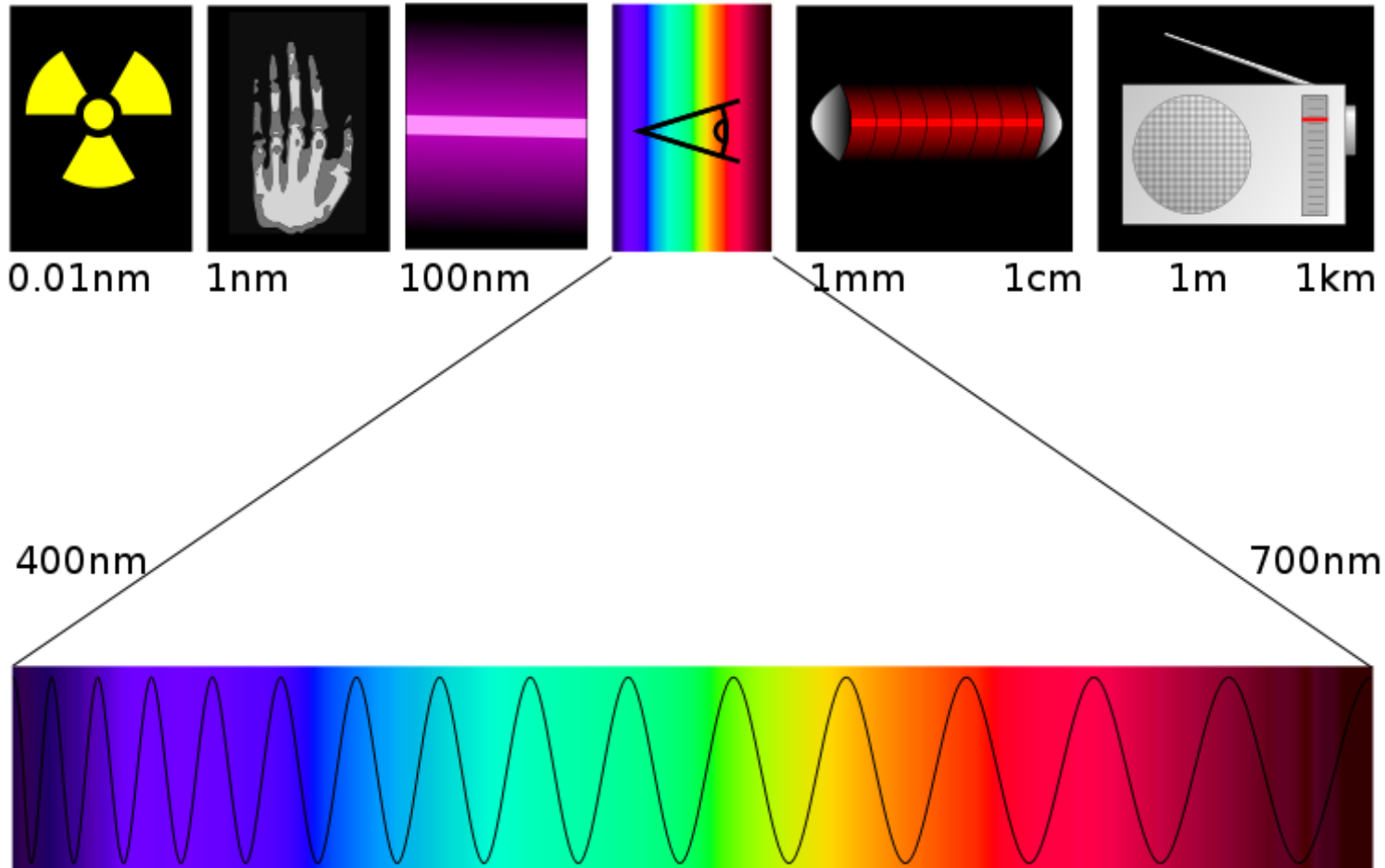
Částice

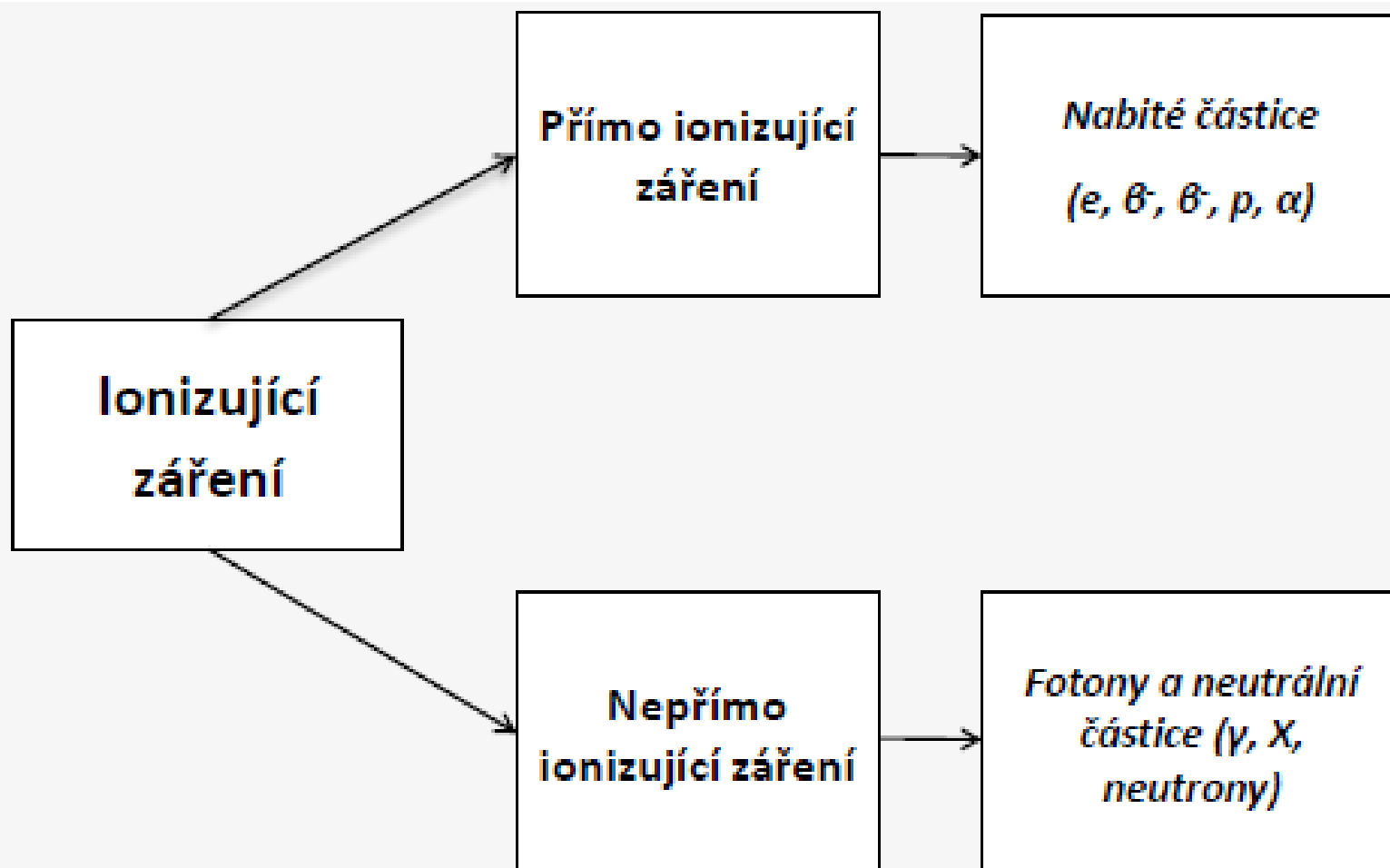
- alfa
- beta
- neutron
- atd.



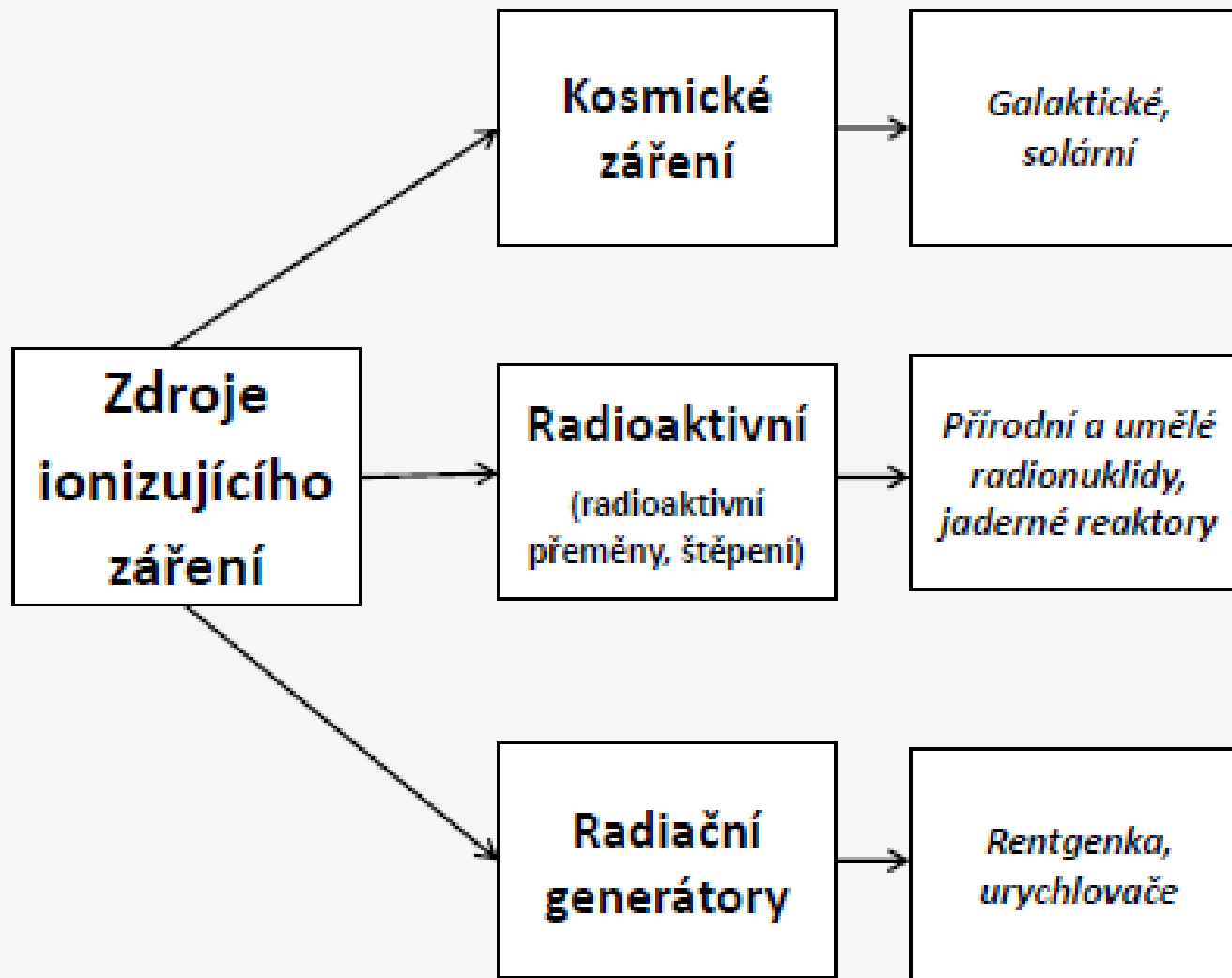
Ilustrace vlastností ionizujícího a neionizujícího záření

Elektromagnetické spektrum





Dva druhy ionizujícího záření



Principiální zdroje ionizujícího záření



Pohled na typický lineární urychlovač elektronů, který slouží k ozařování nádorů v režimu elektronů nebo záření X



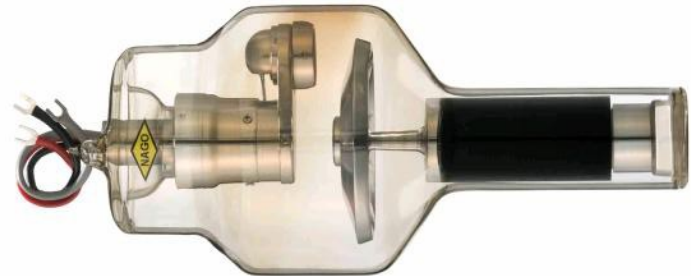
Pohled na jeden z reaktorů Jaderné elektrárny Dukovany



Pohled na experty sledující stopy pohybu částic v urychlovači LHC v CERN

RTG záření

- **Elektromagnetické vlnění o velmi krátkých vlnových délkách a vysokých frekvencích.**
- Jeho vlnové délky odpovídají hodnotám **10 nanometrů až 100 pikometrů** (10^{-8} - 10^{-12} m)
- Vzniká při přeměně energie rychle se pohybujících elektronů, které dopadají na povrch kovové elektrody, na energii elektromagnetického záření. Příkladem je rentgenka.



- Přirozené záření X vzniká za teplot milionů stupňů Celsia např. na Slunci a šíří se kosmem.

Radioaktivita

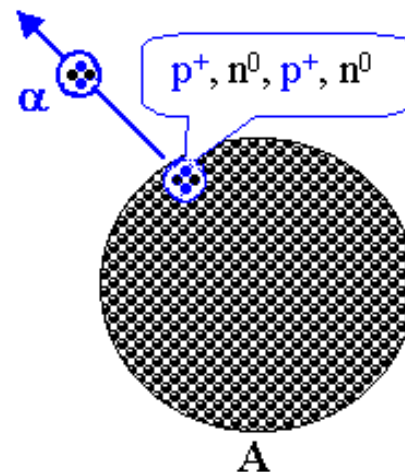
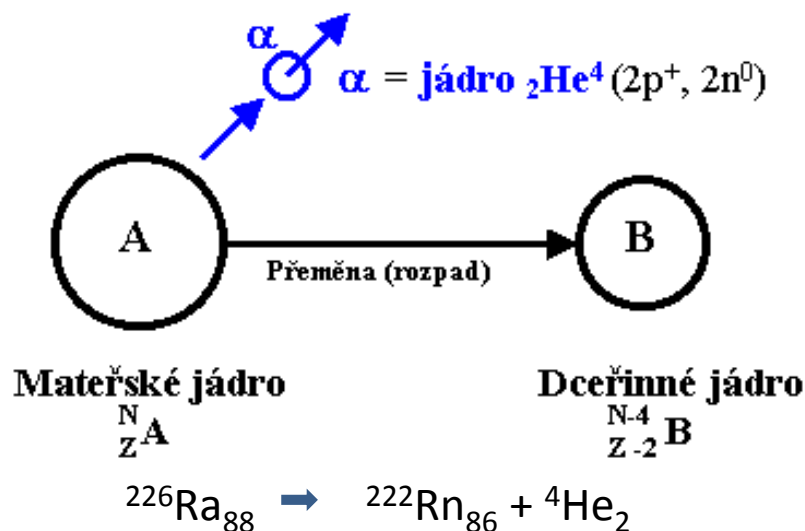
- Radioaktivita je jev, kdy dochází k samovolné vnitřní přeměně atomových jader, přičemž je emitováno vysokoenergetické záření.
- Jádra vykazující tuto vlastnost se nazývají radionuklidy
- Příslušná veličina se nazývá **aktivita** (zářiče, preparátu či obecně množiny jader) a je definována jako **počet jader**, který se **přeměňuje za jednotku času**, nebo ekvivalentně jako úbytek počtu jader (dosud nepřeměněných) za jednotku času.
- **Jednotkou aktivity je 1 rozpad za 1 sekundu.** Tato jednotka byla na počest francouzského průkopníka v oblasti radioaktivity Henri Becquerela nazvána 1 **Becquerel** : **1 Bq = 1rozpad/1sekundu**
- Čím větší je radioaktivita dané látky (vzorku) v Bq, tím více jader za sekundu se nám přeměňuje a tím intenzivnější záření látka do svého okolí \



Radioaktivita alfa

Při této jaderné přeměně se vyzařuje **částice α** , která je **jádrem hélia** ${}^4\text{He}_2$ – obsahuje tedy 2 protony p^+ a 2 neutrony n^0 . Z mateřského jádra s N nukleony a Z protony částice α odnáší 2protony a 2neutrony, takže vzniklé dceřiné jádro bude mít $N-4$ nukleony a $Z-2$ protony - v Mendělejevově periodické tabulce prvků bude posunuto o **2 místa doleva** směrem k jednodušším prvkům.

Radioaktivita α



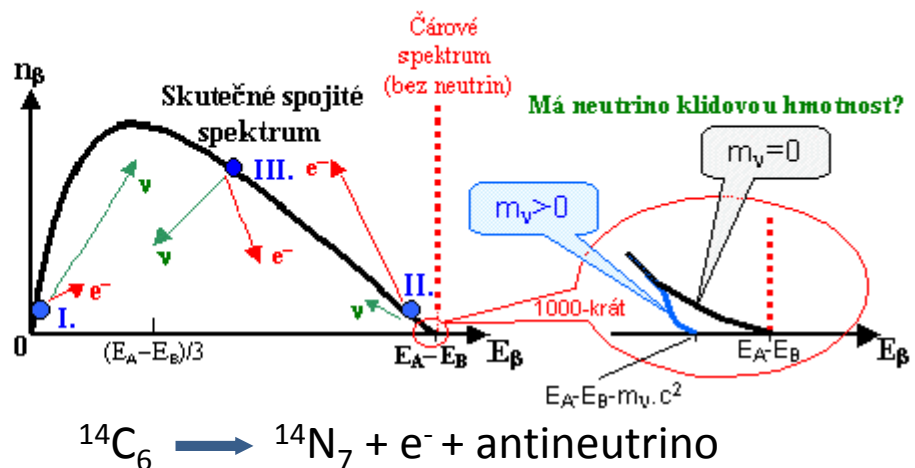
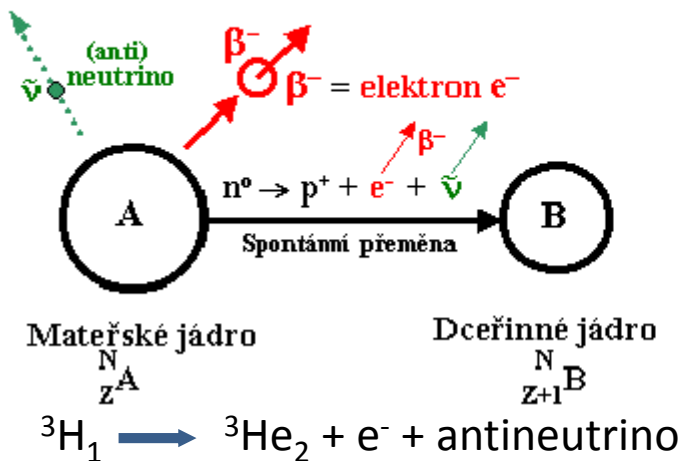
- Proud jader helia, která mají velkou kinetickou energii (2-8 MeV) a tím pádem silné ionizační účinky.
- Působí na ně elektrické a magnetické pole, pohlcuje je list papíru nebo několik cm vzduchu.
- Zářič alfa je nebezpečný při požití nebo vdechnutí - v organismu ho nic neodstíní.

Radioaktivita beta ⁻

Při této jaderné přeměně je z mateřského jádra vysokou rychlostí emitována částice β^- , což není nic jiného než obyčejný **elektron e^-** - stejný jako je v atomovém obalu.

Při přeměně β^- se nukleonové číslo nemění, avšak jelikož se jeden neutron změnil na proton, **protonové číslo se zvýší o 1** - dceřiné jádro se posune o **jedno místo doprava** v Mendělejevově periodické tabulce.

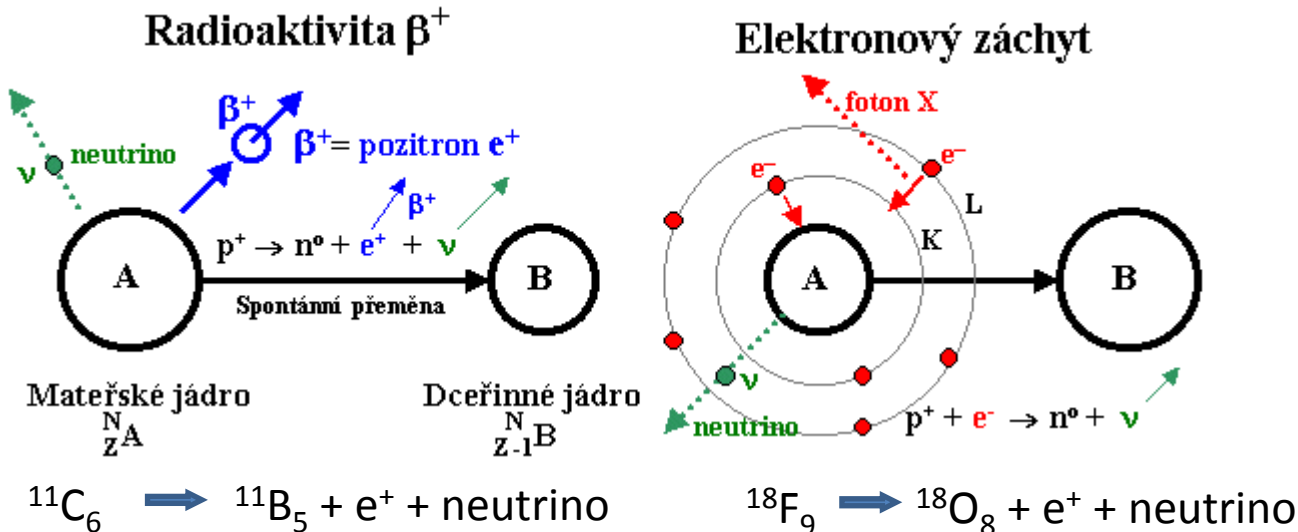
Radioaktivita β^-



- Proud elektronů o energii až 10 MeV emitovaných z jádra
- Pohybují se rychlostí blízkou rychlosti světla.
- Vychylují se v elektrickém i magnetickém poli a jsou pohlcovány tenkým plechem.

Radioaktivita beta ⁺

Při této jaderné přeměně je jádrem emitována **částice β^+** , což je antičástice k elektronu e^- - **pozitron e^+** . Neutron n^0 jakožto legitimní nukleon zůstává v jádře vázán silnou interakcí, zatímco pozitron e^+ vyletí velkou rychlostí ven jako částice β^+ . Při radioaktivitě β^+ se nukleonové číslo nemění (stejně jako u β^-), avšak protonové číslo se **zmenší o 1** - dceřiné jádro se posune o jedno místo **doleva** v Mendělejevově periodické tabulce.

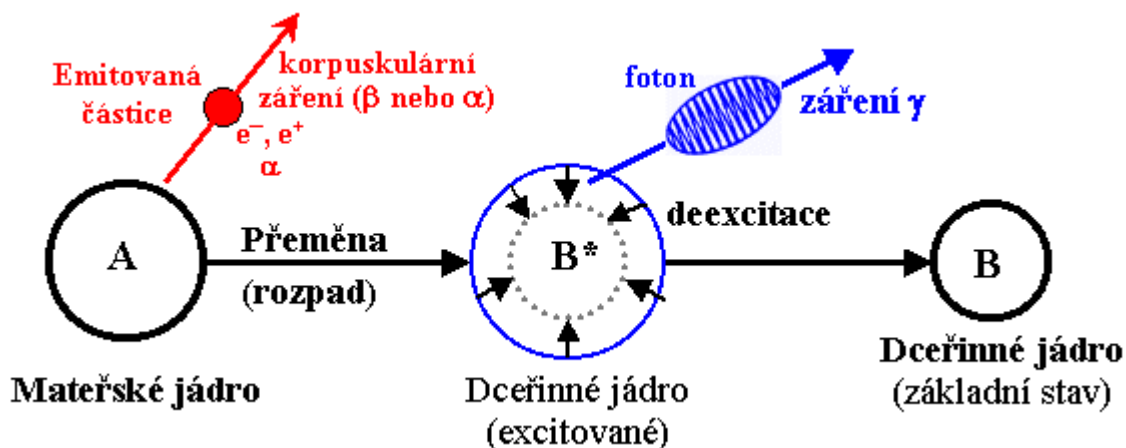


- proud pozitronů (antielektronů - kladný náboj) emitovaných z jádra
- Pohybují se rychlostí blízkou rychlosti světla.
- Vychyluje se v elektrickém i magnetickém poli.

Radioaktivita gama

Záření gama je vysokoenergetické elektromagnetické záření vznikající deexcitací vzbuzených hladin atomového jádra.

U radioaktivity se jedná o deexcitaci vzbuzených hladin dceřiného jádra vzniklého po radioaktivní přeměně. Dceřiné jádro **B** po radioaktivní přeměně vzniká většinou v **energeticky excitovaném stavu B***; můžeme si představit, že jádro je "nafouknuté" - nukleony jsou od sebe více vzdálené. Takové "nafouknuté" jádro B* zpravidla velmi rychle "splaskne" - nastane **deexcitace**, při níž se příslušný energetický rozdíl **vyzáří** ve formě kvanta - **fotonu** - tvrdého elektromagnetického záření - **záření gama**. Vyzářením kvant gama se stabilizují energetické poměry v jádře. Dceřiné jádro **B** pak již zůstává v základním stavu.



- elektromagnetické vlnění o vlnové délce kratší než má rentgenové záření. Je nejpronikavější. V magnetickém a elektrickém poli se neodchyluje.
- Má silné ionizační účinky. Neexistuje samostatně, doprovází alfa a beta záření.
- Je nejškodlivější - způsobuje nemoc z ozáření, rakovinu a genetické změny, ale také ničí mikroorganismy => sterilizace.

Stínění záření gama

- Pro záření gama a X jsou nejvhodnějšími stínícími materiály látky s velkou měrnou hmotností (hustotou) a protonovým číslem – především **olovo**, wolfram, uran 92. Používají se olověné kontejnery pro přepravu a skladování zářičů, zástěny z olověného plechu, tvarované olověné cihly atd.
- Pro účinné odstínění záření gama o energii cca 100keV stačí vrstva olova tloušťky 2mm; čím vyšší je energie fotonů záření gama, tím silnější vrstvu stínění je nutno použít.
- Pokud je potřeba zachovat optickou viditelnost, používá se **olovnaté sklo** s vysokým obsahem kysličníku olova v tavenině.

Stínění záření beta

- K odstínění záření β^- stačí **lehké materiály** (jako je plexisklo nebo hliník) tloušťky cca 5-10mm, nejlépe v kombinaci s následnou **tenkou vrstvou olova** k odstínění brzdného elektromagnetického záření vzniklého zabrzděním elektronů v lehkém stínícím materiálu.
- Olovo samotné není vhodným stínícím materiálem pro záření beta, neboť v něm vzniká tvrdé a intenzivní brzdné záření, k jehož odstínění by bylo nutno použít zbytečně silnou vrstvu olova.

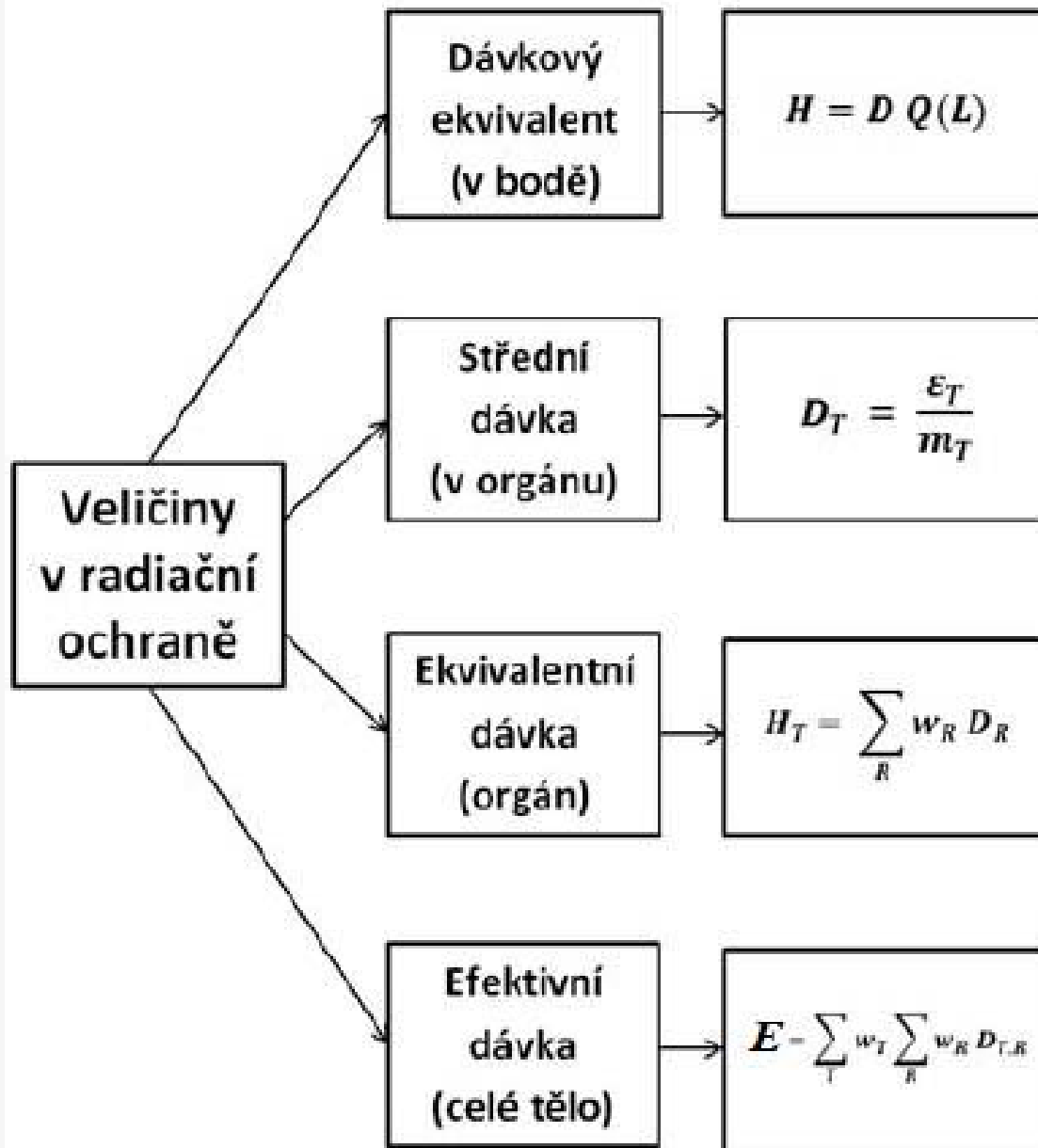
Stínění záření alfa

- Záření α , vzhledem k jeho **malé pronikavosti**, lze odstínit velmi snadno. Stačí tenká vrstva (milimetrová) lehkého materiálu, třeba plastu. Často není proti záření alfa potřeba stínit vůbec, protože i ve vzduchu je dolet částic a jen několik centimetrů, při vyšších energiích max. desítky centimetrů. Pokud je zářič smíšený alfa+gama, stínění proti gama automaticky dokonale odstíní i záření alfa.

Stínění neutronového záření

- Stínění proti neutronům je obecně složitějším problémem než proti záření beta či gama. Neutrony jsou totiž jediné z běžných druhů částic, které neinteragují s elektronovým obalem atomů látky, ale pouze s jádry atomů, prostřednictvím silné interakce.
- Jedná-li se o **rychlé neutrony**, je třeba je nejprve **zpomalit**, aby mohly být účinně pohlceny vhodným **absorbátorem**. Neutrony se nejúčinněji zpomalují průchodem látkami z lehčích atomů. Pro absorpci takto zpomalených neutronů se pak využívá jejich **záchyt** vhodnými jádry atomů. Nejúčinnější absorpce probíhá v kadmii, bóru, či indiu.
- Absorpce neutronů v jádrech kadmia nebo boru je doprovázena emisí **záření gama**, které je potřeba rovněž odstínit, a to těžkým materiálem - olovem.

Stínění proti neutronům tedy obecně musí sestávat ze tří vrstev: vrstva lehkého materiálu bohatého na vodík (např. polyetylén), vrstva kadmia nebo bóru, a nakonec vrstva olova.



Hlavní veličiny v radiační ochraně

Veličiny a jednotky

- **Aktivita** - počet jaderných přeměn za jednotku času.
Jednotkou je **becquerel (Bq)**.
- **Dávka** – množství energie předané jednotce hmotnosti prostředí.
Jednotkou je **gray (Gy)**.
(Přirovnání: absorbovaná dávka 10 Gy způsobí akutní nemoc z ozáření. Pro muže o hmotnosti 80 kg to představuje energii 800 J. Sklenice vody o objemu 3 dcl se touto energií ohřeje o 0,6 stupně C.)
- **Dávkový ekvivalent** – zohledňuje to, že různé druhy záření mají při shodné dávce různý vliv na živou tkáň. Jednotkou je **sievert (Sv)**.
- **Příkon dávkového ekvivalentu** – působení záření v čase (**Sv/h**)
Přirovnání: hrubým odhadem lze říci, že materiál s aktivitou 300 Bq/l nás ozáří dávkovým ekvivalentem 10 μ Sv (záleží na druhu záření).

Fyzikální účinky ionizujícího záření

- změna polohy částic tvořících krystalovou mřížku, vznik vakancí a intersticiálních atomů
- tepelné účinky (kinetická energie)
- elektrické účinky (vznikají nabitě částice)
- „tepelné špičky“ – poruchy, vzniklé krátkodobým lokálním ohřevem při průchodu částice (např. mikrokrystalky orientované jiným směrem než původní krystal)
- vznik atomů jiného druhu v jaderných reakcích

Jejich důsledkem je změna mechanických, elektrických a dalších vlastností látek, jako např. změny objemu, křehnutí materiálů, změna adsorpčních a katalytických vlastností, změny doby života nosičů náboje v polovodičích, vzrůst vodivosti izolátorů, změny barvy.

Příklady využití:

Výroba polovodičů
(monokrystal křemíku dopovaný zářením, aby měl žádané vlastnosti)

Radiační barvení skla
(fasáda Nové scény ND)



Chemické účinky ionizujícího záření

- primární procesy: vznik iontů, volných elektronů, radikálů, případně ve složitějších systémech i různých molekulárních produktů disociace
- sekundární procesy: bimolekulární chemické reakce, záchyt elektronů na částicích s velkou elektronovou afinitou za vzniku záporných iontů, rekombinace elektronů a kladných iontů za vzniku radikálů atp.

Primární procesy jsou bezprostředním důsledkem interakce záření s materiálem, k sekundárním procesům dochází následně mezi produkty primárních procesů. Může dojít k řetězové reakci.

V organických látkách :

- rozrušování a změny uspořádání kovalentních vazeb v molekulách, degradace nebo naopak síťování nebo roubování polymerů,
- polymerace monomerů

Příklady využití:

radiační vulkanizace
vytvrzování laků



Biologické účinky ionizujícího záření

Chemický základ

- excitace, ionizace (do 10^{-14} s po interakci)
- radiolýza vody, vznik radikálů
- štěpení kovalentní vazby
- vznik složitějších molekul

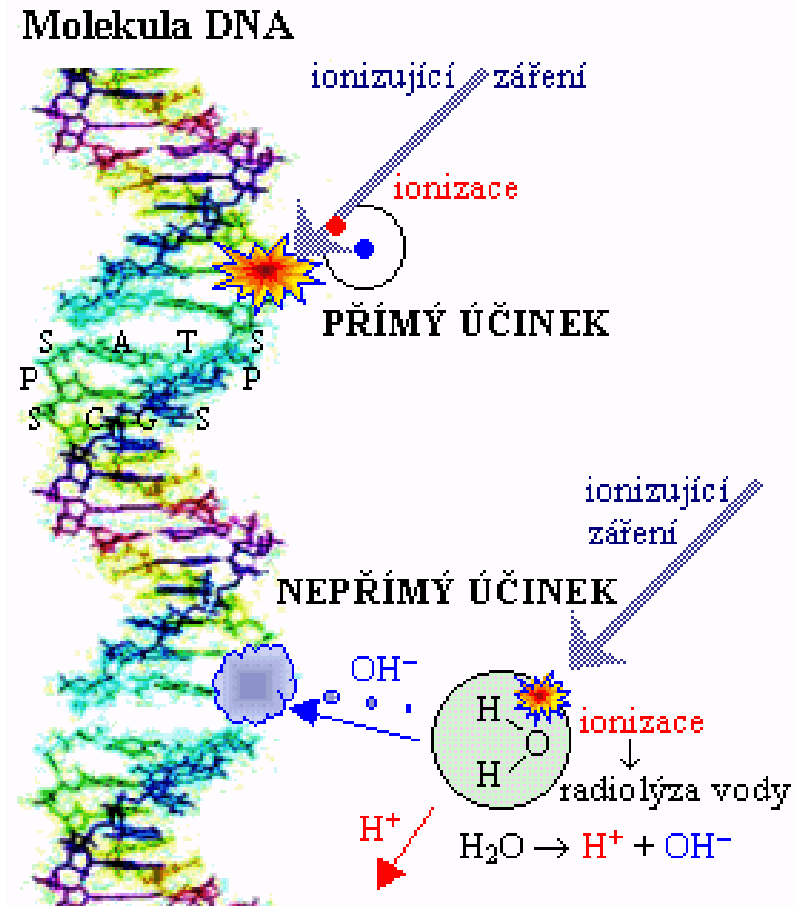
Ve tkáni vzniká peroxid vodíku, atomární vodík a vysoce reaktivní radikály

- (tím více, čím je tkáň více okysličená)

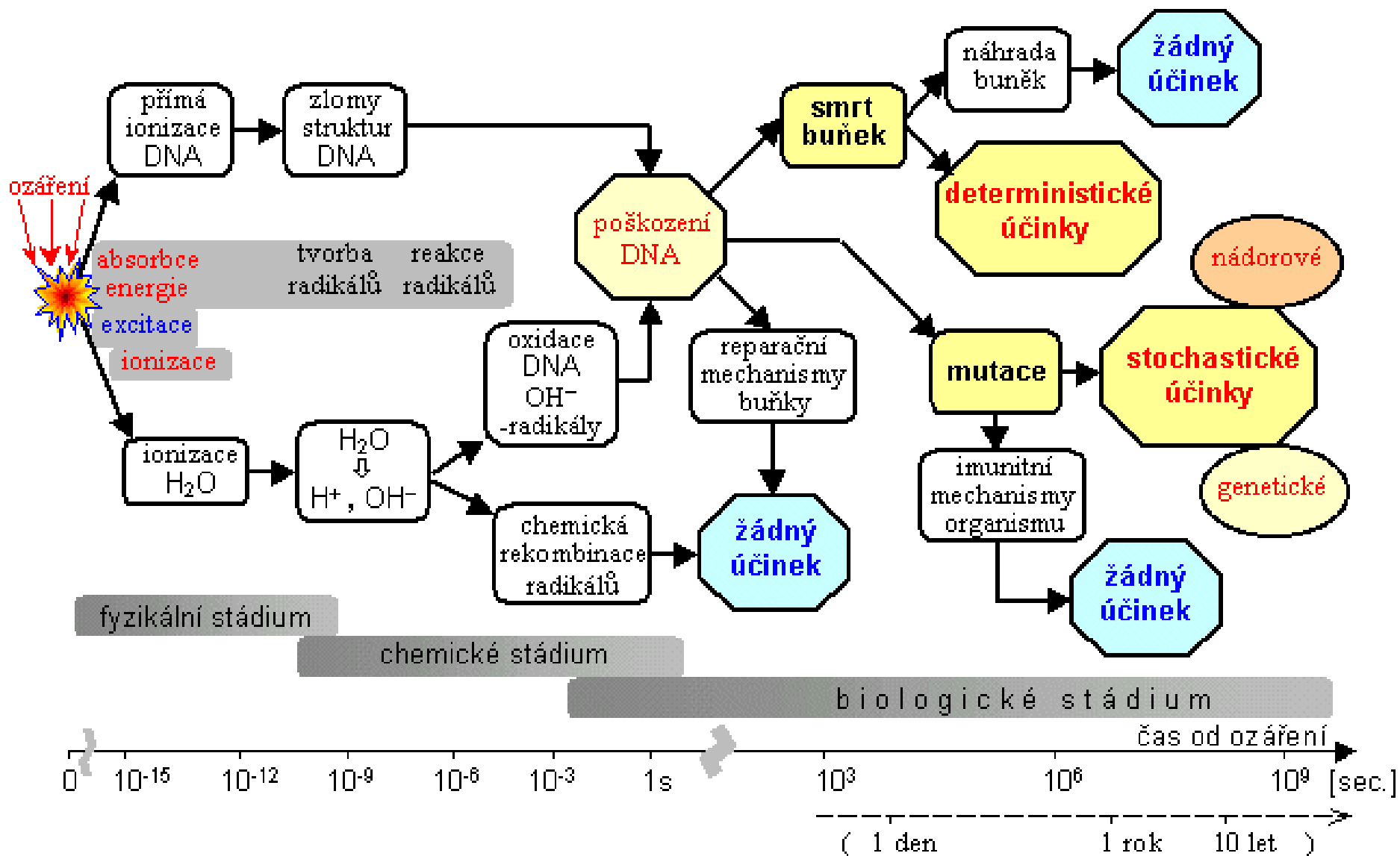
Buňka

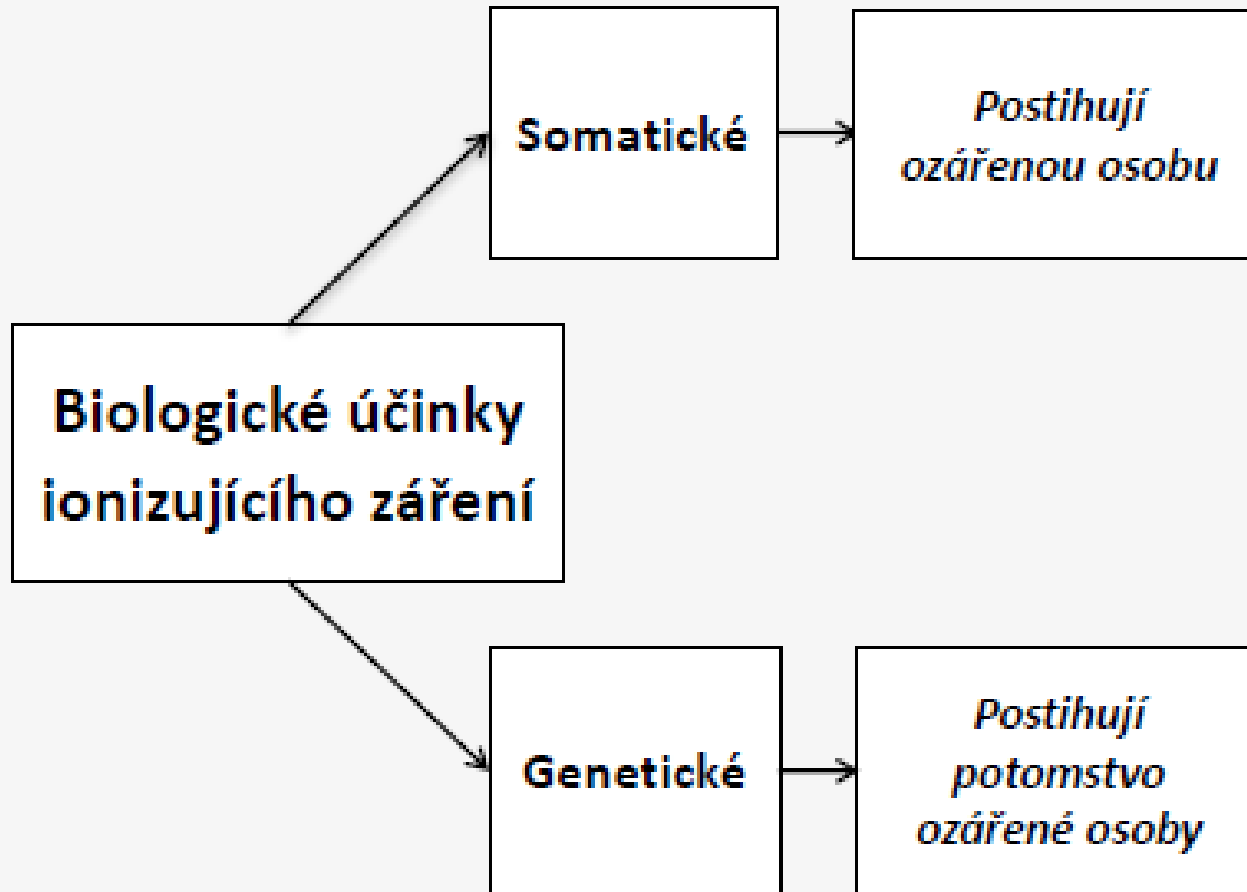
- Přímý účinek (změna makromolekuly přímým zásahem nebo sekundárním elektronem)
- Nepřímý účinek (radiolýza, vznik cizích bílkovin, změny propustnosti membrán)

Možnost reparace - stejná dávka rozložená v čase má menší nebo žádné účinky ve srovnání s jednorázovou dávkou

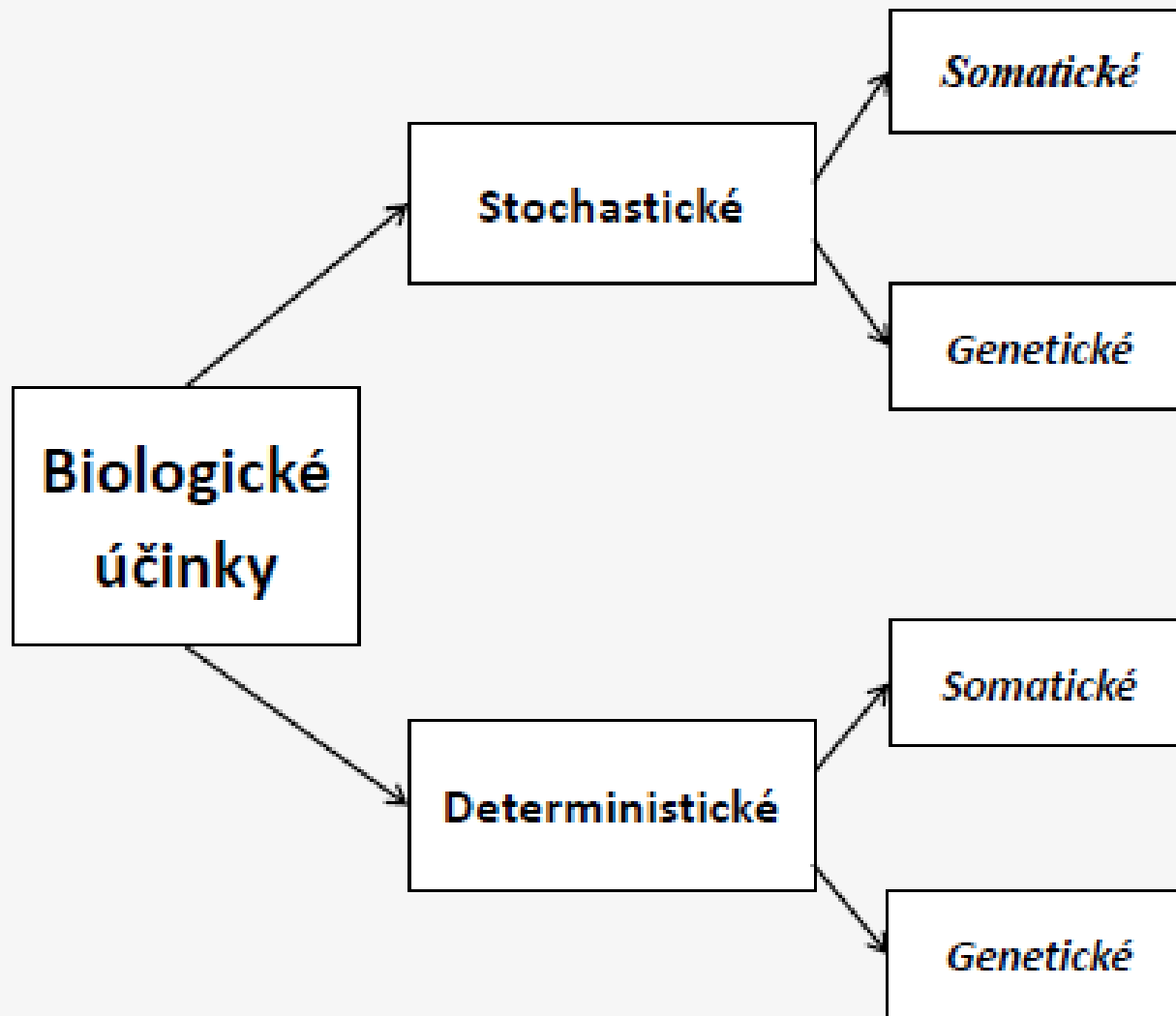


Biologický efekt RTG a gama záření





Biologické účinky ionizujícího záření s ohledem na postižené osoby



Biologické účinky ionizujícího záření s ohledem na charakter postižení

Účinky záření na lidský organizmus

Stochastické (nahodilé) - poškozeno málo buněk, podprahová dávka nebo opakované malé dávky

- Dá se vypočítat pouze pravděpodobnost újmy, žádná újma nemusí nastat
- Lze odhalit (ověřit) jen pozorováním velkého množství osob
- Riziko malých dávek? Vědci se zatím neshodují, nelze potvrdit ani vyvrátit, neexistuje totiž vzorek lidí, kteří by nebyli vystaveni vůbec žádné radiaci.
- Je známo, že existuje „ochranný efekt“ záření (hormeze) – v místech s vyšší radioaktivitou bývá menší výskyt rakoviny (buňky reparují jakékoliv poškození)

Nestochastické účinky (deterministické) - po ozáření velkou dávkou, mnoha buněk, projeví se v krátké době

- Příklady
 - Lokální dermatitida
 - Zákal oční čočky
 - Poškození plodu
 - Poruchy plodnosti
 - Akutní nemoc z ozáření

Stochastické účinky

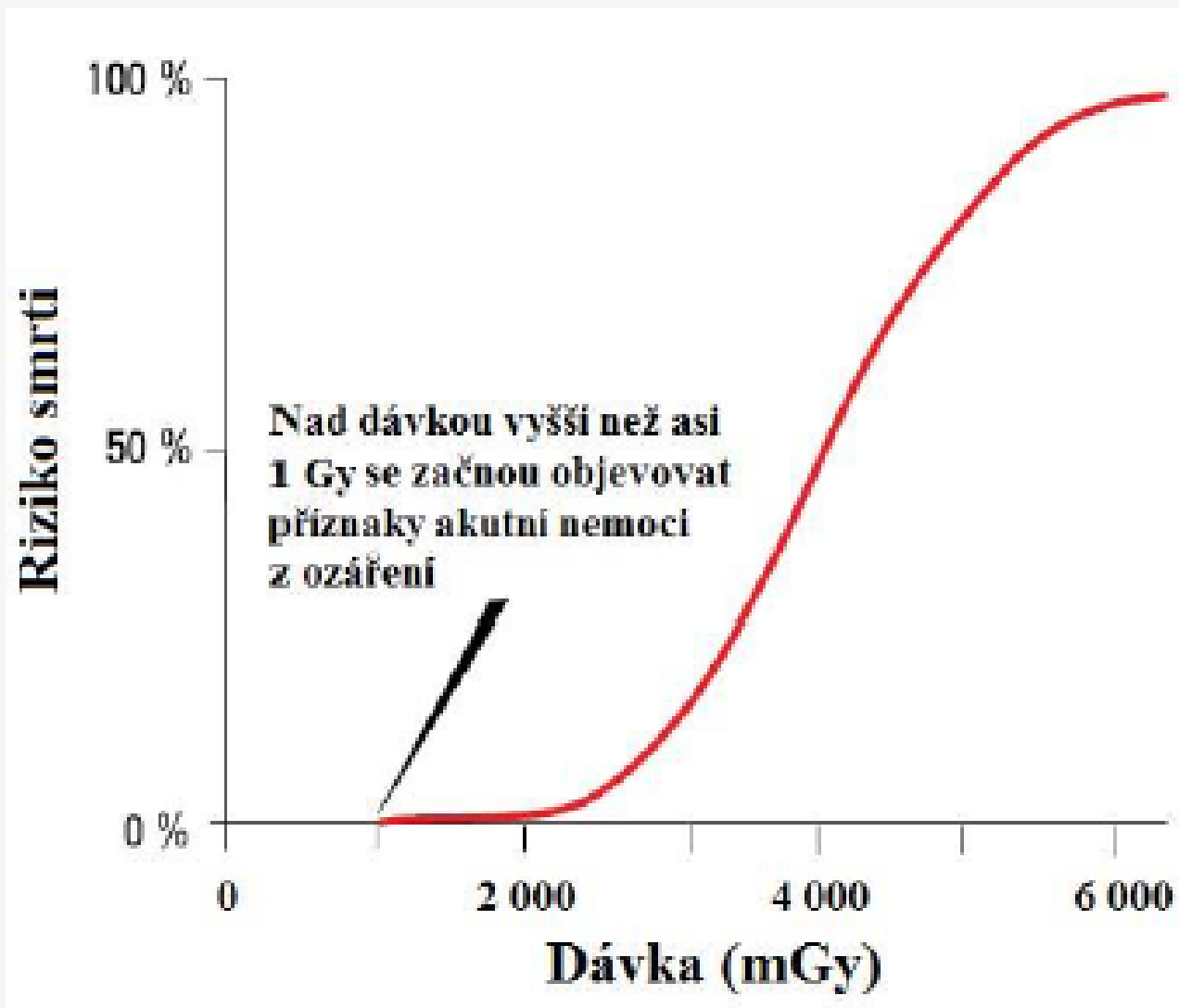
- Pokud dávka záření není velká, s naprostou většinou poškození biologicky aktivních látek se organismus úspěšně vyrovná svými reparačními mechanismy. I při malých dávkách však existuje určitá pravděpodobnost, že některá poškození se opravit nepodaří resp. při opravě dojde k "chybě", která může vyústit v *mutace*.
- Pokud se **mutované buňky** dále dělí, mohou vzniknout pozdní trvalé následky genetického nebo nádorového charakteru
- Mají pravděpodobnostní charakter - u jedinců z ozářeného souboru osob se poškození či onemocnění vyskytují **náhodně** s určitou pravděpodobností, která roste s dávkou. Stochastické účinky mohou nastat samozřejmě i při vyšších dávkách, po příp. odeznění účinků deterministických.
- U stochastických účinků závažnost postižení a průběh vzniklého onemocnění **nejsou závislé na výši dávky**; na absorbované dávce závisí pouze **pravděpodobnost výskytu** nádorového či genetického poškození. Jde přitom o chorobné stavy, které i bez vlivu záření se "samovolně" vyskytují v populaci. V jednotlivých konkrétních případech není možné radiačně indukované nádory a genetické změny odlišit od samovolně vzniklých případů, jejich klinický obraz je **stejný**
- Ionizační ozáření pouze **zvyšuje pravděpodobnost** vzniku těchto onemocnění, příslušné riziko je *přídavné* k ostatním rizikům.
- Průměrný *koeficient rizika* vzniku radiačně indukovaného maligního onemocnění se odhaduje na $0,005 \text{ Sv}^{-1}$ (tj. pokud 1000 osob obdrží dávku 1Sv, lze očekávat, že u 5 z nich to vyvolá fatální zhoubný nádor).

Deterministické účinky

- Při vysokých dávkách záření je počet poškozených molekul biologicky aktivních látek již natolik vysoký, že buňky ani organismus nejsou schopny je zcela opravit – větší **část buněk hyne**, vzniká **nemoc z ozáření**. Poškození tkáně je zde přímo úměrné obdržené dávce záření, není již náhodné, je naopak **předvídatelné**.
- Deterministické účinky se klinicky projevují až po dosažení určité **prahové dávky**, přičemž s rostoucí dávkou roste jednak pravděpodobnost vzniku poškození (tj. při ozáření souboru osob roste počet jedinců, u nichž lze poškození prokázat; při vyšších dávkách se účinky projeví u každého), jednak u daného jedince se **zvyšuje závažnost poškození**.
- Základním patogenním mechanismem je **snížení počtu buněk** (*deplece* buněk) v ozářené tkáni. Na škodlivém účinku se podílejí i **toxické látky**, vznikající při zániku a rozkladu velkého počtu buněk.
- Pokles počtu buněk se stoupající dávkou proto zpočátku nezpůsobuje v ozařované tkáni žádné funkční potíže, teprve při vyšších dávkách vede deficit buněk k somatickým projevům.
- Hodnota prahové dávky pro člověka kolem **1Gy** je jen **průměrná** (*celotělová*) a orientační.
- Každá tkáň má obecně **jinou prahovou dávku** projevu deterministických účinků, závislou na *radiosenzitivitě buněk a funkční rezervě* v tkáni - např. přibližně: kůže 3Gy, plíce 5Gy, spermie 0,3Gy, oční čočka 1,5Gy, vyvíjející se zárodek in utero 0,1Gy,



Pohled na projevy deterministických biologických účinků ionizujícího záření



Závažnost deterministických biologických účinků ozáření se s dávkou zvyšuje (účinky se objevují nad určitou prahovou dávkou)

Vnímavost tkání k vyvolání akutních klinických změn (destrukce tkáně)

- ✦ lymfoidní orgány, aktivní kostní dřeň, pohlavní žlázy, střevo;
- ✦ kůže a epiteliální výstelky (hltnan, jícen, žaludek, močový měchýř), oční čočka;
- ✦ jemné cévy, rostoucí chrupavka, rostoucí kost;
- ✦ zralá chrupavka a kost, dýchací ústrojí, žlázy zažívacího traktu, endokrinní žlázy;
- ✦ svaly, centrální nervový systém.

I. Časné účinky ozáření

Akutní nemoc z ozáření (akutní poradiační syndrom)

- Vzniká po jednorázovém ozáření celého těla (či jeho větší části) dávkami většími než asi 3Gy. Klinický průběh zde závisí na velikosti dávky:
- Při dávkách od cca 3 do 8Gy vzniká **krevní** (dřeňová, hematologická) forma způsobená poškozením orgánů krvetvorby. V krevním obraze výrazně poklesne počet bílých krvinek, lymfocytů, klesá i počet červených krvinek a krevních destiček. Pokud jsou v kostní dřeni zachovány ostrůvky funkčních kmenových buněk krvetvorby, může jejich dělením docházet k postupné regeneraci po 6-8 týdnech. Při dávkách kolem 10Gy jsou buňky krvetvorby zpravidla nevratně zničeny, dávka je smrtelná, pokud se nepodaří kostní dřeň úspěšně nahradit transplantací.
- Při dávkách vyšších než 10Gy se navíc rozvíjí **střevní** (gastrointestinální) forma nemoci z ozáření, způsobená zničením buněk střevní výstelky. Zde dochází k závažným poruchám hospodaření organismu s tekutinami a minerály.
- Při ještě vyšších dávkách na úrovních desítek a stovek Gy nastupuje velmi rychle po ozáření **nervová** forma akutní nemoci z ozáření, spojená se zánikem většího množství nervových buněk, následnými poruchami orientace a koordinace, bezvědomím a smrtí.

Stupeň závažnosti akutní nemoci z ozáření v závislosti na dávce, odpovídající klinická forma a prognóza

stupeň závažnosti	dávka ($\pm 30\%$) Gy	klinická forma	prognóza
lehký	1 – 2	dřeňová	zcela příznivá
střední	2 – 4		příznivá
těžký	4 – 6		poměrně příznivá
velmi těžký	6 – 8		poměrně nepříznivá
	8 – 30	střevní	zcela nepříznivá
	30	neurovaskulární	

SDRUŽENÉ A KOMBINOVANÉ RADIČNÍ POŠKOZENÍ

Kombinované radiační poškození organismu (mixty) znamená navíc další poškození např. popálením, poraněním.

Sdružené radiační poškození organismu vzniká v případě, kdy dojde k zevnímu ozáření a k vnější a vnitřní kontaminaci.

LÉČBA AKUTNÍHO RADIČNÍHO SYNDROMU



- ✦ laická;
- ✦ předlékařská;
- ✦ lékařská;
- ✦ specializovaná.

PRINCIPY LAICKÉ POMOCI

- ✦ zástava krvácení, ošetření zlomenin a jiných úrazů, ošetření popálenin
- ✦ potlačení pocitu na zvracení
- ✦ širokospektrá antibiotika
- ✦ psychofarmaka
- ✦ vnější dekontaminace
- ✦ jódová profylaxe



VNĚJŠÍ DEKONTAMINACE

- ✦ opláchnutí vodou (proud teplé vody od hlavy) a následně kůži otřeme houbou nebo kartáčem a dekontaminujeme vhodným detergentem, znovu opláchnutí proudem vody a pokožku osušíme, u nechodících toto opatření se provádí pomocí tamponů;
- ✦ pro dekontaminaci dutiny ústní je vhodné vyčistit zuby zubním kartáčkem a dutinu v průběhu čištění opakovaně vypláchneme 3% roztokem kyseliny citronové nebo jiným lehce kyselým roztokem;
- ✦ oblast hltanu dekontaminujeme vykloktáním 3% roztoku peroxidu vodíku;
- ✦ dutinu nosní, oči, spojivkový vak a uši dekontaminujeme vodou, fyziologickým roztokem nebo borovou vodou;

možné detergenty: kyselé mýdlo, případně 10% roztok EDTA, 1% roztok DTPA, dekontaminaci lze provést i obyčejným mýdlem nebo JARem.

PRINCIPY PŘEDLÉKAŘSKÉ POMOCI

- ✦ zástava krvácení, ošetření zlomenin a jiných úrazů, ošetření popálenin
- ✦ potlačení pocitu na zvracení
- ✦ širokospektrá antibiotika
- ✦ psychofarmaka
- ✦ vnější dekontaminace
- ✦ podání antidot
- ✦ odběr biologického materiálu



SPECIALIZOVANÁ PRACOVNÍŠTĚ



Všeobecná fakultní
nemocnice, Praha



Ústav hematologie a krevní
transfúze, Praha



aseptická jednotka
(life island)



Fakultní nemocnice,
Hradec Králové



Fakultní nemocnice Bohunice,
Brno

PŘEHLED ANTIDOT I

Přehled látek bránících vstřebání nebo urychlujících eliminaci radionuklidů z organismu

radionuklid	antidotum	účinná látka	dávky a způsob aplikace
Jód	Kalium jodid	kalii iodidum	0,13 g p.o.
Cesium	Radiogardase-Cs	berlínská modř (hexacyanoferrat)	1g p.o. , dále 3 x 1g/den
Plutonium, Americium, Lanthanidy, transurany	Ditripentat	Ca DTPA (calcium-trinatrium- pentetat)	1g v pomalé infúzi
Stroncium	Gasterin gel MgSO ₄	aluminium fosfát magnesium sulphuricum	10 sáčků p.o. 1 lžice p.o.
Tricium	tekutiny Urandyl	chlortalidonum	p.o nebo i.v. diuretikum 3x týdně 100 mg
Uran	fyzilogický roztok s bikarbonátem sodným	natrium hydrogencarbonicum	250 ml 1,4 % v infúzi
Směs štěpných produktů	Kalium jodid p.o. + Gasterin gel p.o., Ca-DTPA v infúzi, za 3 hodiny Radiogardase-Cs p.o.		

PŘEHLED ANTIDOT II

Doporučené léčebné postupy při vnitřní kontaminaci

radionuklid	medikace	forma podání	účinek
jód	jodid draselný (KI)	až 7 tbl. po 130 mg	kompetitivní inhibice jódu ve štítné žláze
plutonium yttrium	dietyltriamin pentaocetát vápenatý (DTPA)	Ca-DTPA ve 250 ml 5% fyziologického roztoku, podávat déle než 30 minut	vyvázání
uran	bikarbonát sodný	pomalá infúze 250 ml 14% roztoku	alkalizace moči
cesium rubidium thalium	berlínská modř	v ml vody, p.o., 7 dní	mobilizace z orgánů
radium, stroncium	síran barnatý alginát sodný	BaSO ₄ - ve 250 ml vody alginát sodný - 10 mg ve 250 ml vody	snížení vstřebávání
trícium	voda	podat 6 - 12 litrů vody denně	ředění a vylučování
olovo polonium kobalt	D-penicilamin	1 g/den, i.v. po 4 - 6 hod., p.o.	vyvázání

Akutní radiační dermatitida

- při ozáření kůže dávkami nad 3Gy dochází k dermatitidě 1.stupně - k erytému (zrudnutí) kůže a ztrátě ochlupení,
- při dávkách nad 10Gy vzniká dermatitida 2.stupně spojená s puchýři a vředy na kůži, dále k nekróze (dermatitis 3.stupně).
- radiační dermatitidy jsou doprovázeny degenerativními změnami kůže a obtížně se hojí.

Radiační záněty

- Tkáň jimi reaguje na rychlý zánik většího počtu buněk za vzniků zplodin buněčného rozkladu.

Poškození fertility

RADIAČNÍ POŠKOZENÍ PO 22 MĚSÍCÍCH PO OZÁŘENÍ



II. Pozdní účinky ozáření

- mohou se projevit po několika měsících, letech až desítkách let latence od ozáření.

Vznikají buď jako:

1. deterministické účinky po intenzivním ozáření, dlouhodobé či opakované expozici menšími dávkami záření (nenádorová pozdní poškození) - **pozdní radiotoxicita**

- jsou způsobeny poškozením tkání s pomalou obnovou efektorových buněk a tedy s nízkou proliferační aktivitou kmenových buněk.
- poškození kmenových buněk ozářením se projeví až při potřebě jejich mitózy pro doplnění buněk efektorových, což zde bývá s odstupem řádově měsíců. Pak teprve poškozené kmenové buňky hynou a v tkáni se začne projevovat nedostatek efektorových buněk.
- tkáně tohoto typu (jako jsou pojivové tkáně, svalové tkáně, ledviny) s pomalým buněčným dělením mají nízkou radiosenzitivitu a pomalou reakci na ozáření. Účinky však přetrvávají dlouho, někdy jsou i trvalé.

2. stochastické účinky (nádorová a genetická postižení).

Poškození embrya a plodu

- lidský zárodek a plod, tvořený intenzívně se dělícími buňkami, je **velice citlivý** k ionizujícímu záření; k jeho poškození může dojít již při ozáření dávkou od 0,1Gy.
 - charakter poškození plodu ionizujícím zářením závisí, kromě výše dávky, především na **stádiu vývoje**, tj. na době uplynulé od oplodnění.
1. v **počátečních fázích** (v prvních 3 týdnech), kdy počet buněk v zárodku je ještě malý a jejich funkce není specializována, má jejich radiační poškození zpravidla za následek **zánik zárodku** a ukončení gravidity.
 - charakter tohoto účinku v raném stádiu embrya se někdy označuje heslem "*všechno nebo nic*" - zárodek buď zanikne, nebo přežije bez následků.
 2. v období hlavní **organogeneze** (od 3. do 8.týdne) může ozáření způsobit **malformace** ve vyvíjejících se orgánech zárodku.
 3. při ozáření plodu v období **2.-6.měsíce** gravidity se objevuje riziko **vývojových poruch a mentálního postižení** narozeného dítěte.
 4. V **posledním trimestru** gravidity již nastupuje relativně vyšší **radiorezistence**.

Obecně lze říci, že ozáření plodu vede k podstatně **vyššímu riziku** stochastických účinků **nádorového charakteru**, než je tomu při ozáření dospělých osob.

POŠKOZENÍ PLODU IN UTERO



- období 3. - 8. týdne (období embryogeneze): vysoké riziko vzniku malformací;
- zvlášt' citlivý je základ CNS - porucha může vést k deformitám postihujícím mozek, míchu, oko; často postižena kostra a močový trakt;
- období 8. - 15. týdne: při výbuchu atomové pumy v Japonsku - vyšší výskyt dětí postižených mentální retardací (pokles IQ cca 30 % na 1 Sv).

III. Kombinace časných a pozdních radiačních účinků

- Jednotlivé orgány jsou často tvořeny různými druhy funkčně propojených tkání - rychle i pozdně reagujících, v rámci jednoho orgánu. Při ozáření proto nejdříve nastoupí časná akutní radiotoxicita, po jejím odeznění se pak s časovým odstupem může projevit následná (konsekvenční) pozdní radiotoxicita. Např. při ozáření plic může po akutní radiační pneumonitidě postupně dojít k rozvoji pozdní plicní fibrózy.

Mezi pozdní účinky záření zařazujeme následující druhy radiačního poškození :

1. Deterministické účinky

- **chronická radiační dermatitida** - vyskytovala se zvláště u rentgenologů, kteří prováděli skiaskopická rentgenová vyšetření bez dostatečné ochrany.
- **zákal oční čočky** (katarakta) může vzniknout po ozáření očí dávkami vyššími než cca 4-8 Gy.

2. Stochastické účinky

- **zhoubné nádory** - jsou nejzávažnějšími pozdními somatickými účinky stochastické povahy. Mohou vznikat jako následek **mutací**, které vyústí ve ztrátu kontroly nad dělením buněk a **maligní transformaci** postižených buněk
- **genetické změny** se projevují postižením potomstva ozářených osob na základě mutací v zárodečných buňkách.

Seznam úrovní ozáření a jejich příznaků

0,05 – 0,2 Sv

- **Příznaky:** Žádné příznaky. Úroveň je potenciálně nebezpečná pro pozdější vznik rakoviny a změny v genetickém kódu

0,2 – 0,5 Sv

- **Příznaky:** Žádné znatelné symptomy. Počet červených krvinek se dočasně snižuje.

0,5 – 1 Sv - Mírná nemoc z ozáření

- **Příznaky:** Bolesti hlavy a zvýšené riziko infekce z důvodu narušení imunitních buněk. Dočasná sterilita u mužů je možná.

1 – 2 Sv - Lehká otrava ozářením

- **Příznaky:** Typickými příznaky jsou mírná až střední nevolnost s příležitostným zvracením začínajícím 3 až 6 hodin po ozáření a končícím do jednoho dne. Dále následuje desetidenní až čtrnáctidenní latentní fáze, po které se objeví lehké symptomy jako vyčerpanost. Imunitní systém je utlumený; nemoci se léčí pomaleji a je zvýšené riziko infekce. Dočasná mužská neplodnost je obvyklá. U těhotných žen nastane spontánní potrat nebo narození mrtvého plodu.
- 10% úmrtnost po 30 dnech.

2 – 3 Sv - Vážná otrava radiací

- **Příznaky:** Nevolnost je obvyklá, s 50% rizikem zvracení. Příznaky nastupují od 1 do 6 hodin po ozáření a končí po jednom až dvou dnech. Poté nastává latentní fáze, při které vypadají všechny vlasy a chlupy po těle, objeví se únava a celkově nezdravý vzhled. Při takovýchto úrovních ozáření prudce klesne počet leukocytů (bílých krvinek), což výrazně zvyšuje nebezpečí infekcí. Existuje možnost permanentní ženské sterility. Rekonvalescence trvá několik měsíců.
- 35% úmrtnost po 30 dnech.

3 – 4 Sv - Vážná otrava radiací

- **Příznaky:** Symptomy jsou podobné jako u dávky 2 – 3 Sv, navíc s nekontrolovatelným krvácením z úst, zpod kůže a z ledvin (vnitřní krvácení).
- 50% úmrtnost po 30 dnech.

4 – 6 Sv - Vážná otrava radiací

- **Příznaky:** Příznaky začínají půl hodiny až 2 hodiny po ozáření a končí do dvou dnů. Po 7 až 14 dnech latentní fáze, nastávají stejné příznaky jako po 3 – 4 Sv. Při této úrovni je obvyklá ženská sterilita. Rekonvalescence trvá několik měsíců až rok. Pokud je expozice radiaci delší, zasažený umírá na infekce a vnitřní krvácení.
- 60% úmrtnost po 30 dnech.

6 – 10 Sv - Akutní otrava ozářením

- **Příznaky:** Přežití závisí na intenzivní lékařské péči. Kostní dřev je skoro kompletně zničená, je nezbytná její transplantace. Gastrické a střevní tkáně jsou vážně poškozené. Příznaky začínají 15 až 30 minut po ozáření a končí do dvou dní; mezitím je pětidenní až desetidenní fáze, po které postižený umírá na infekci nebo vnitřní krvácení. Rekonvalescence trvá několik let a osoba se pravděpodobně nikdy plně nezotaví.
- Téměř 100% úmrtnost po 14 dnech.

10 – 50 Sv - Akutní otrava ozářením

- **Příznaky:** Expozice takovéto úrovně vede ke spontánním symptomům po 5 až 30 minutách. Po silné vyčerpanosti a okamžité nevolnosti způsobené přímou aktivací chemických receptorů v mozku po ozáření nastává perioda několika dní relativní pohody, nazývaná latentní fáze. Poté buněčná smrt v gastrické a střevní tkáni, způsobující masivní průjem, střevní krvácení a ztrátu vody, vede k vodo-elektrolytické imbalanci. Smrt nastane s deliriem a kómatem způsobeným selháním oběhu. Úmrtí je prakticky nevyhnutelné; jedinou léčbou je podávání léků utišujících bolest.
- 100% úmrtnost po 7 dnech.

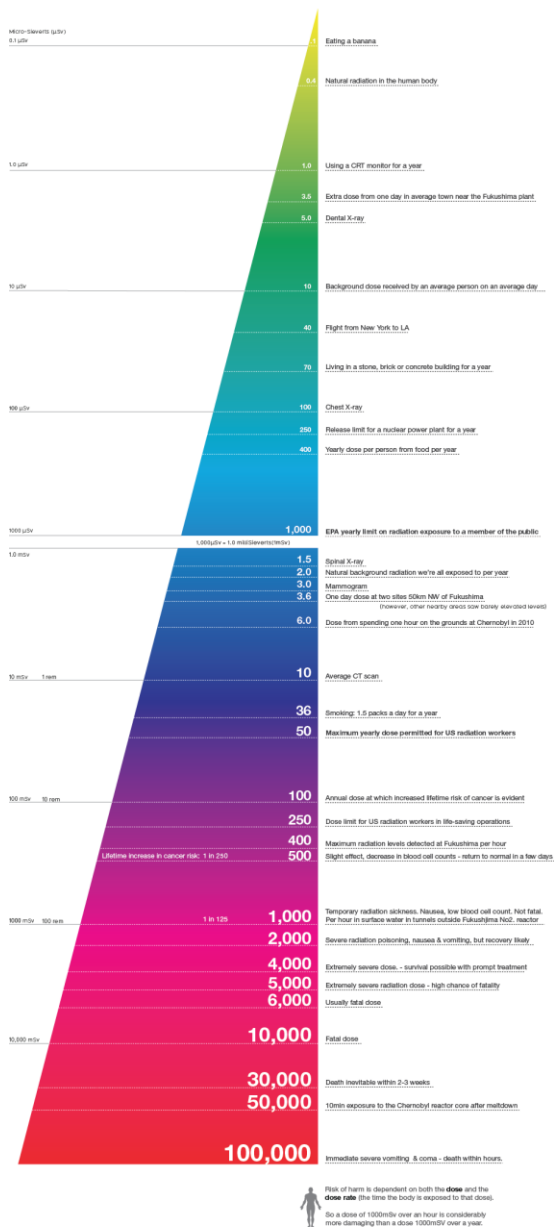
50 – 80 Sv - Akutní otrava ozářením

- **Příznaky:** Okamžitá dezorientace a kóma v řádech minut nebo sekund. Smrt nastává po několika hodinách kolapsem nervového systému.
- 100% úmrtnost.

> 80 Sv - Akutní otrava ozářením

- **Příznaky:** Předpokládá se okamžitá smrt.
- 100% úmrtnost.

Radiation Dosage Chart



Porovnání radiačních dávek

Překlad:

- 0,1 mikroSv - Snědení 1 banánu
- 0,4 mikroSv - Přírodní radioaktivita lidského těla
- 1 mikroSv - Užívání CRT monitoru (starší TV obrazovky) po 1 rok
- 3,5 mikroSv - Extra dávka za 1 den poblíž Fukušimy (duben 2011)
- 5 mikroSv - RTG zubů
- 10 mikroSv - Dávka z přírodního pozadí pro průměrného jednotlivce za 1 den
- 40 mikroSv - Let z New Yorku do Los Angeles
- 70 mikroSv - Bydlení v kamenné nebo betonové budově po 1 rok
- 100 mikroSv - RTG snímek hrudníku
- 250 mikroSv - Dovolovaný limit ročních výпустí jaderné elektrárny v UK
- 400 mikroSv - Roční dávka pro průměrnou osobu z potravin
- 1 mSv - EPA (US Environmental Protection Agency) roční limit povoleného dodatečného ozáření jednotlivce z veřejnosti
- 1,5 mSv - RTG snímek páteře
- 2 mSv - Záření z přírodních zdrojů v UK, kterému je vystaven průměrný jedinec
- 3 mSv - Mammogram
- 3,6 mSv - Extra dávka za 1 den v místě 50 km SZ od Fukušimy, kde byla zjištěna vyšší úroveň radiace (v jiných místech je podstatně nižší)
- 6 mSv - Dávka za 1 hodinu strávenou v Černobylu v r. 2010
- 10 mSv - Průměrný CT scan
- 36 mSv - Kouření 1 a ½ balíčku cigaret denně po dobu 1 roku (tabák obsahuje polonium a další přírodní radioizotopy)
- 50 mSv - Maximální roční dávka povolená pro profesionální pracovníky se zářením v USA i ČR
- 100 mSv - Roční dávka, při které může ke zvýšení pravděpodobnosti onemocnění rakovinou
- 250 mSv - Dávkový limit pro záchranáře v USA když zachraňují životy u radiačních havárií
- 400 mSv - Maximální radiační úroveň změřená ve Fukušimě za hodinu
- Zvýšení rizika rakoviny u 1 člověka z 250 (500 mSv), lékařsky zjiřitelné změny krevního obrazu (pokles počtu krvinek), návrat do normálu během několika dní
- 1 000 mSv - Dočasná nemoc z ozáření, zvracení, pokles počtu krvinek, není smrtelné. Tento dávkový příkon za 1 hodinu byl naměřen na hladině vody v podzemním tunelu pod Fukušimským reaktorem č. 2
- 2 000 mSv - Vážná nemoc z ozáření, zvracení, uzdravení pravděpodobné.
- 4 000 mSv - Extrémně vážné ozáření, přežití možné při okamžité lékařské pomoci
- 5 000 mSv - Extrémně vážné ozáření, vysoká pravděpodobnost úmrtí
- 6 000 mSv - obvykle smrtelná dávka
- 10 000 mSv - smrtelná dávka
- 30 000 mSv - smrt během 2 - 3 týdnů
- 50 000 mSv - 10 minut v aktivní zóně černobylského reaktoru po roztavení paliva
- 100 000 mSv - smrt do několika hodin

Riziko záleží nejen na dávce, ale také na době expozice. Např. 1 000 mSv během hodiny znamená mnohem vážnější újmu než rozložené během 1 roku.

Poznámka: je použita logaritmická stupnice, tj. rozestup hodnot není jednotkový, ale vždy desetinašobný! Trojúhelník je pouze grafický prvek.

Zdroj: BBC, Guardian, Mayo Clinic

Letální dávky pro různé organizmy

Organismus	Dávka (kGy)
Vyšší živočichové včetně savců	0,005 - 0,01
Hmyz	0,01-1
Plísně	2,5 - 6
Kvasinky	5 - 20
Nesporulující bakterie	0.5 - 10
Sporulující bakterie	10 - 50
Viry	10 - 1500

LETÁLNÍ DÁVKA $LD_{50/60}$

radiosenzitivita v závislosti na fylogenezu

Biologický druh

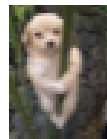
LD_{50} [Gy]

člověk



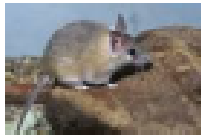
4 - 5

pes



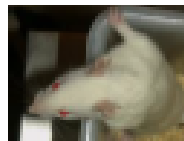
2,5 - 3

myš



7 - 10

krysa



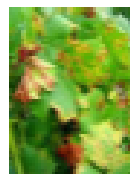
7 - 10

hmyz



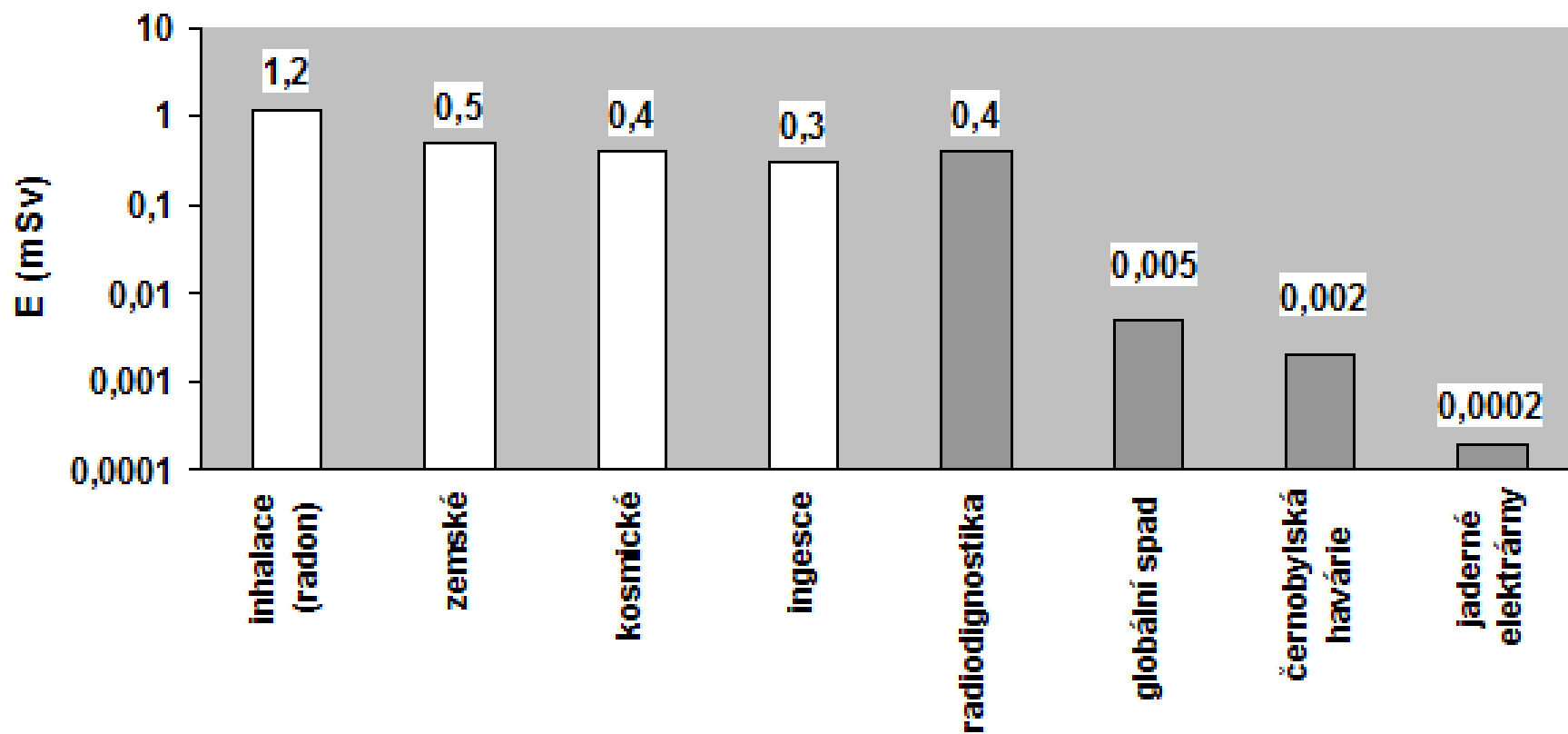
100 - 1 000

plíseň

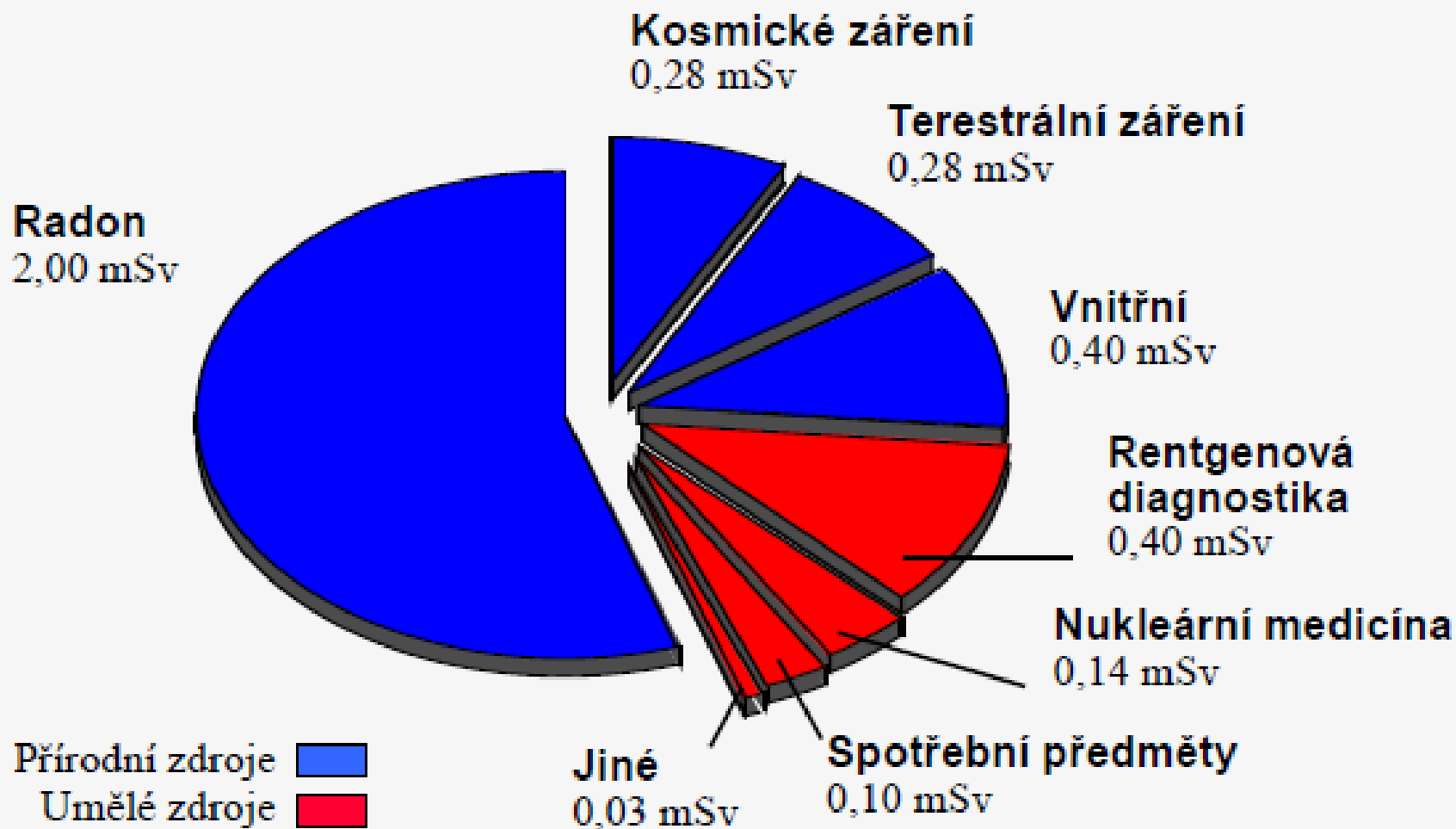


300 - 500

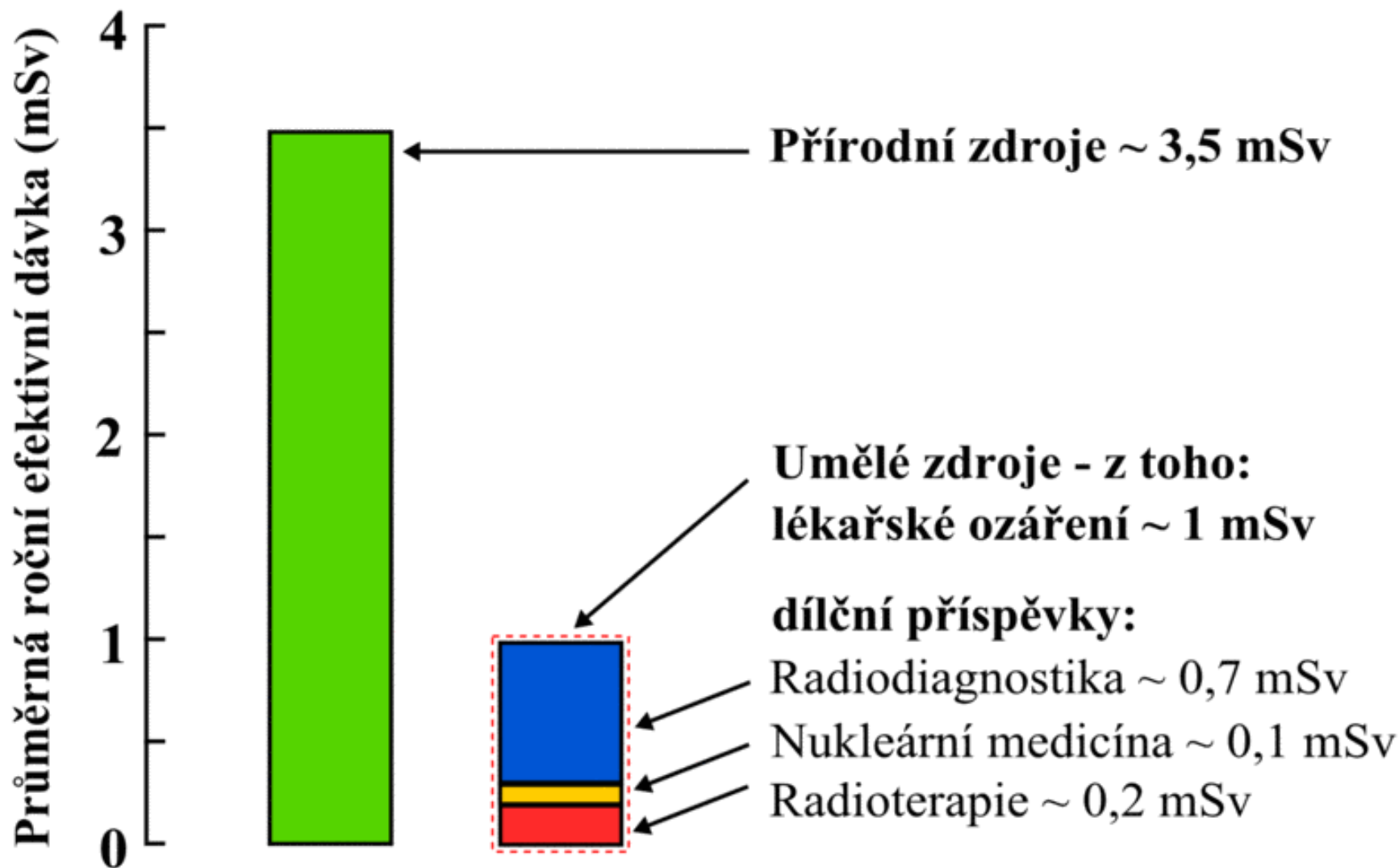
Průměrná roční efektivní dávka na obyvatele od různých zdrojů ionizujícího záření, celkem 2,8 mSv (UN SCEAR 2000)



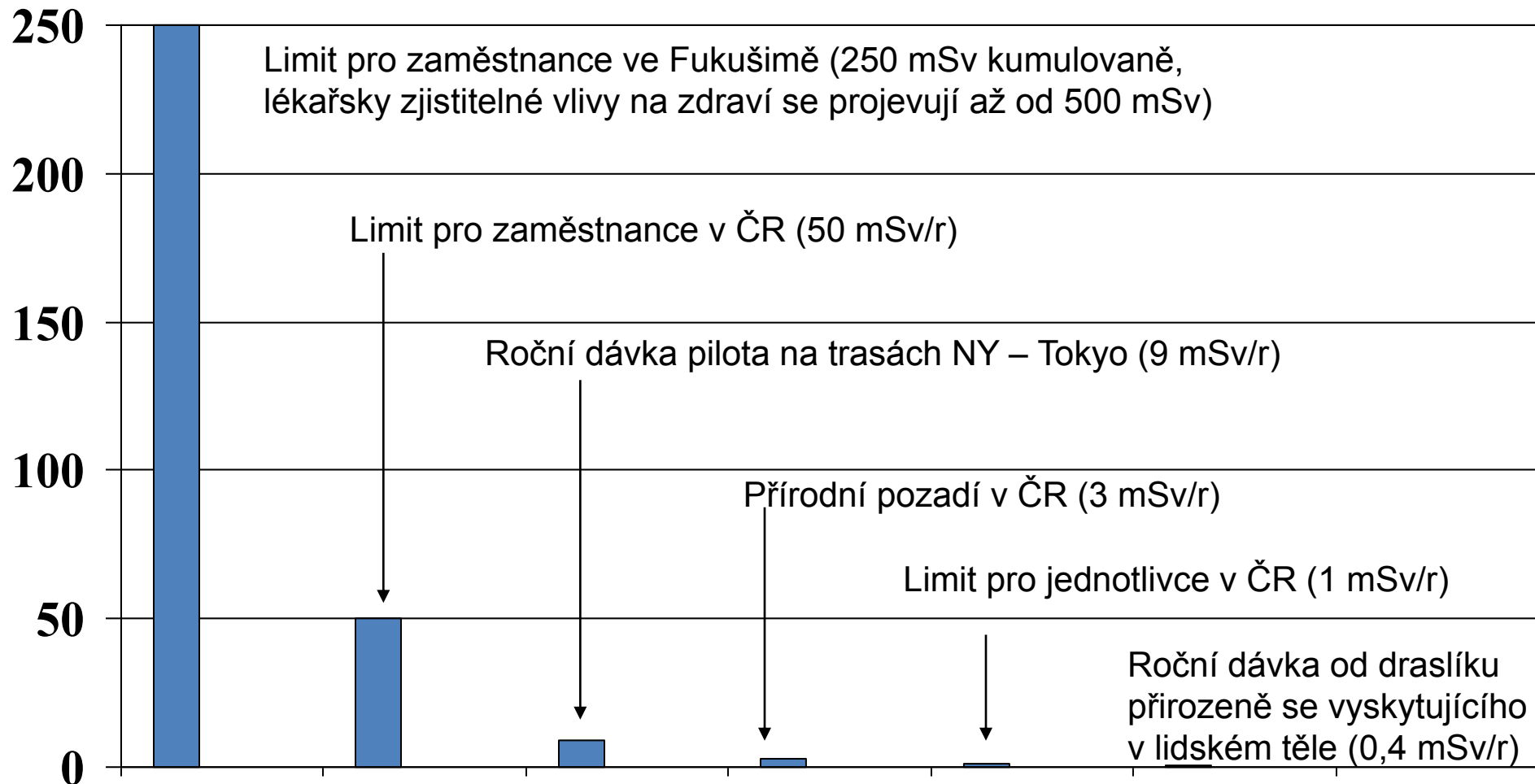
Střední roční dávka



Průměrná roční efektivní dávka obyvatele ČR z přírodních a umělých zdrojů

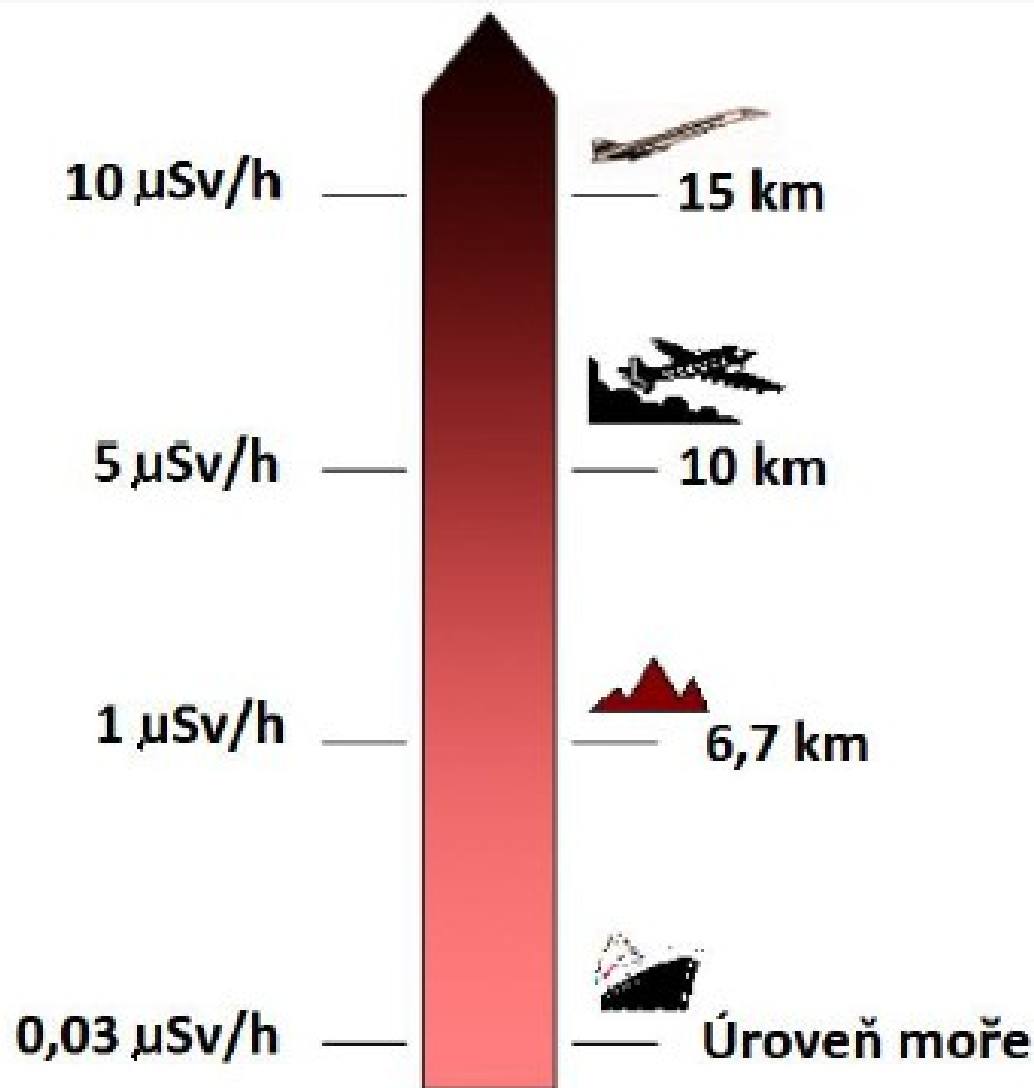


Porovnání některých radiačních dávek



Roční příspěvek z činnosti všech jaderných průmyslových zařízení se pohybuje v setinách mSv

Vliv nadmořské výšky na úroveň kosmického záření



Vyhláška č. 307/2002 Sb.

ekvivalentní dávka H_T

je součin radiačního váhového faktoru w_R uvedeného v tabulce č. 1 a střední absorbované dávky $D_{T,R}$ v orgánu nebo tkáni T pro ionizující záření R, nebo součet takových součinů, jestliže pole ionizujícího záření je složeno z více druhů nebo energií, čili

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

efektivní dávka E

je součet součinů tkáňových váhových faktorů w_T uvedených v tabulce č.2 a ekvivalentní dávky H_T v ozářených tkáních nebo orgánech T, čili

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

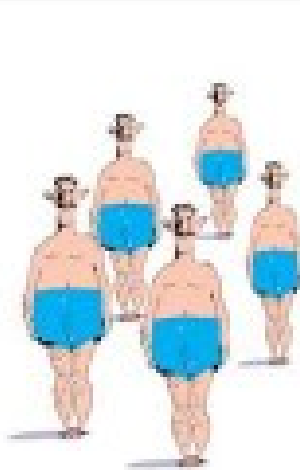
kolektivní efektivní, popř. ekvivalentní dávka což je součet efektivních popř. ekvivalentních dávek všech jednotlivců v určité skupině,

Tabulka č. 1
Radiační váhové faktory

Typ záření a příp. energie	Radiační váhový faktor w_R
fotony	1
elektrony, miony	1
neutrony, méně než 10 keV	5
neutrony, 10keV až 100 keV	10
neutrony, 100 keV až 2 MeV	20
neutrony, 2 MeV až 20 MeV	10
neutrony, více než 20 MeV	5
protony, více než 2 MeV, (mimo odražené)	5
částice alfa, těžká jádra, štěpné fragmenty	20

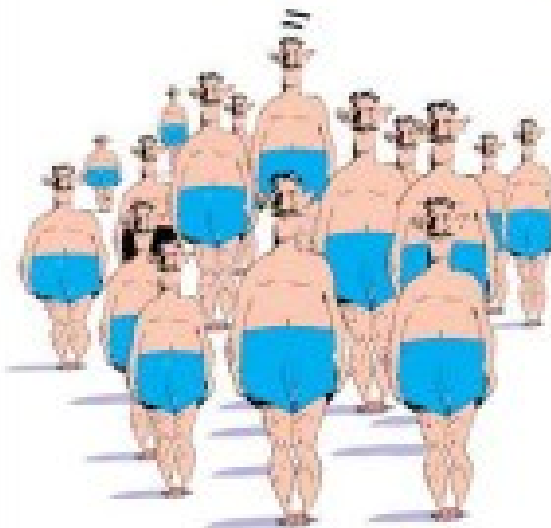
Tabulka č. 2.
Tkáňové váhové faktory

Tkáň, orgán	Tkáňový váhový faktor w_T
Gonády	0,20
Červená kostní dřeň	0,12
Tlusté střevo	0,12
Plíce	0,12
Žaludek	0,12
Močový měchýř	0,05
Mléčná žláza	0,05
Játra	0,05
Jícen	0,05
Štítná žláza	0,05
Kůže	0,01
Povrchy kostí	0,01
Ostatní orgány a tkáně*)	0,05



200 osob, každý obdržel
efektivní dávku 100 mSv

$200 \times 0,1 \times 0,05 = 1$,
tj. jeden případ výskytu
rakoviny



20 000 osob, každý obdržel
efektivní dávku 1 mSv

$20\ 000 \times 0,001 \times 0,05 = 1$,
tj. jeden případ výskytu
rakoviny

**Ilustrace stochastických účinků na dvou skupinách osob s různou
efektivní dávkou, ale stejnou kolektivní efektivní dávkou**

w_T je tkáňový váhový faktor vyjadřující radiosenzitivitu terčového orgánu z hlediska stochastických účinků ionizujícího záření

Pro potřeby výpočtu jsou jako ostatní orgány a tkáně (zbytek těla) voleny následující tkáně a orgány:

~~nadledvinky, mozek, vzestupná část tlustého střeva, tenké střevo, ledviny, svaly, slinivka břišní, slezina, thymus, děloha~~. Hlavní seznam obsahuje orgány, které mohou být s jistou pravděpodobností ozářeny selektivně. O některých z nich je známo, že mohou být citlivější ke vzniku nádoru. Jestliže se i u ostatních tkání a orgánů následně prokáže možnost rizika vzniku nádoru, budou rovněž se svou specifickou hodnotou w_T zahrnuty do hlavního seznamu, případně budou zařazeny do seznamu orgánů a tkání tvořících zbytek těla.

V těch výjimečných případech, při nichž tkáň nebo jeden orgán zařazený do zbytku těla obdrží ekvivalentní dávku přesahující nejvyšší dávku v kterémkoliv z dvanácti orgánů uvedených v hlavním seznamu, měl by být pro takovou tkáň nebo orgán aplikován váhový faktor 0,025 a pro průměrnou dávku ostatního zbytku těla, tak jak byl vymezen výše, pak váhový faktor 0,025.