



Účinky ionizujícího záření a radiační ochrana

Karel Katovský

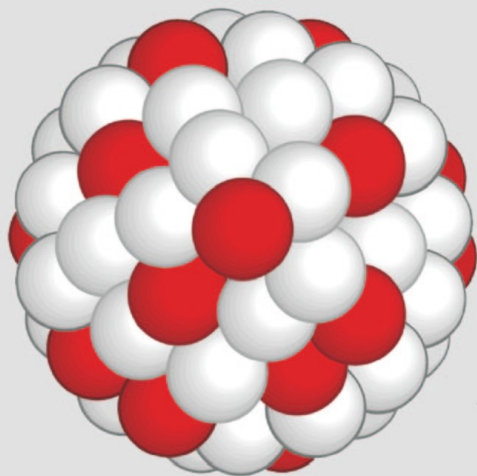
*Ústav elektroenergetiky
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně*

PŘEDNÁŠKA

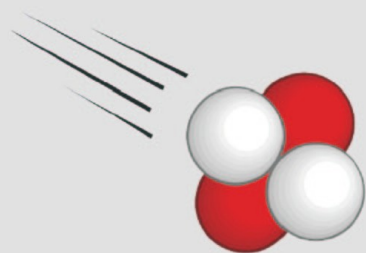
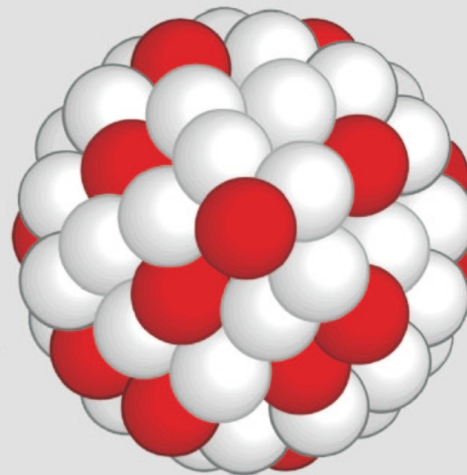
- Motivace
- Interakce ionizujícího záření s látkou
- Jednotky a veličiny
- Účinky záření na materiál
- Účinky záření na živé organizmy
- Stínění a ochrana před zářením

ALFA

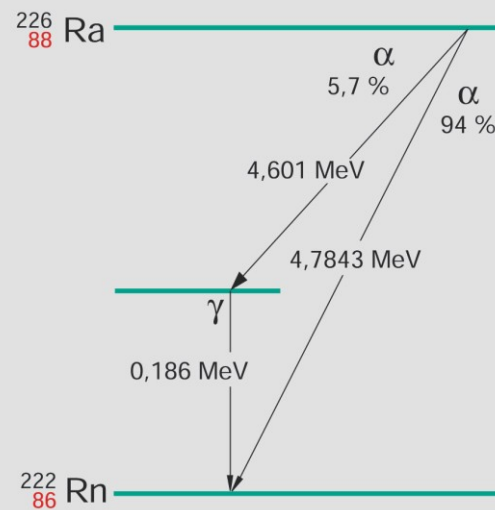
$^{226}_{88}\text{Ra}$



$^{222}_{86}\text{Rn}$



^4_2He



VLASTNOSTI ZÁŘENÍ ALFA

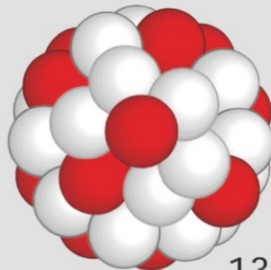
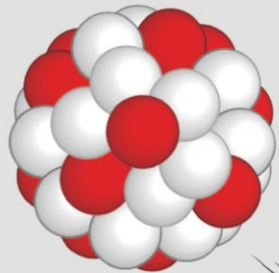
- silně ionizující záření
- těžké nabitě částice (náboj $+2e$, hmotnost $4u$)
- krátký dolet závisující na energii
- alfa částice z rozpadu cca 5 MeV
- dolet
 - jednotky cm ve vzduchu
 - desetiny mm v pevných látkách
- „Podobně“ se chovají všechny těžké nabitě částice i protony
 - Braggova křivka

STÍNĚNÍ ZÁŘENÍ ALFA

- Jakýkoliv materiál, kovy, voda apod.
- podobně lze stínit i těžší ionty
- Protony nutno stínit větší vrstvou materiálu
- Nutno dosáhnout brzděné záření (zejména u p^+) a buzené roentgenovské záření (u větších toků)
- U lidí - rukavice, rouška

BETA

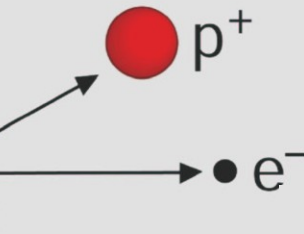
$^{137}_{55}\text{Cs}$



$^{137}_{56}\text{Ba}$

e^-

Beta⁻-Teilchen
(Elektron)



Quelle: Informationskreis KernEnergie

$^{60}_{27}\text{Co}$

0,15%

99,85%

β_2^-

1,5 MeV

β_1^-

0,3 MeV

γ_1

1,173 MeV

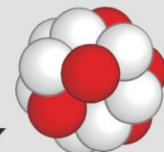
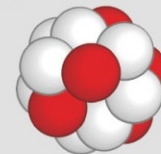
γ_2

1,332 MeV

$^{60}_{28}\text{Ni}$

Quelle: Informationskreis KernEnergie

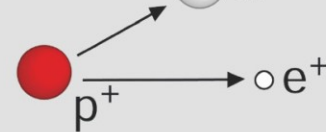
$^{22}_{11}\text{Na}$



$^{22}_{10}\text{Ne}$

e^+

Beta⁺-Teilchen
(Positron)



Quelle: Informationskreis KernEnergie

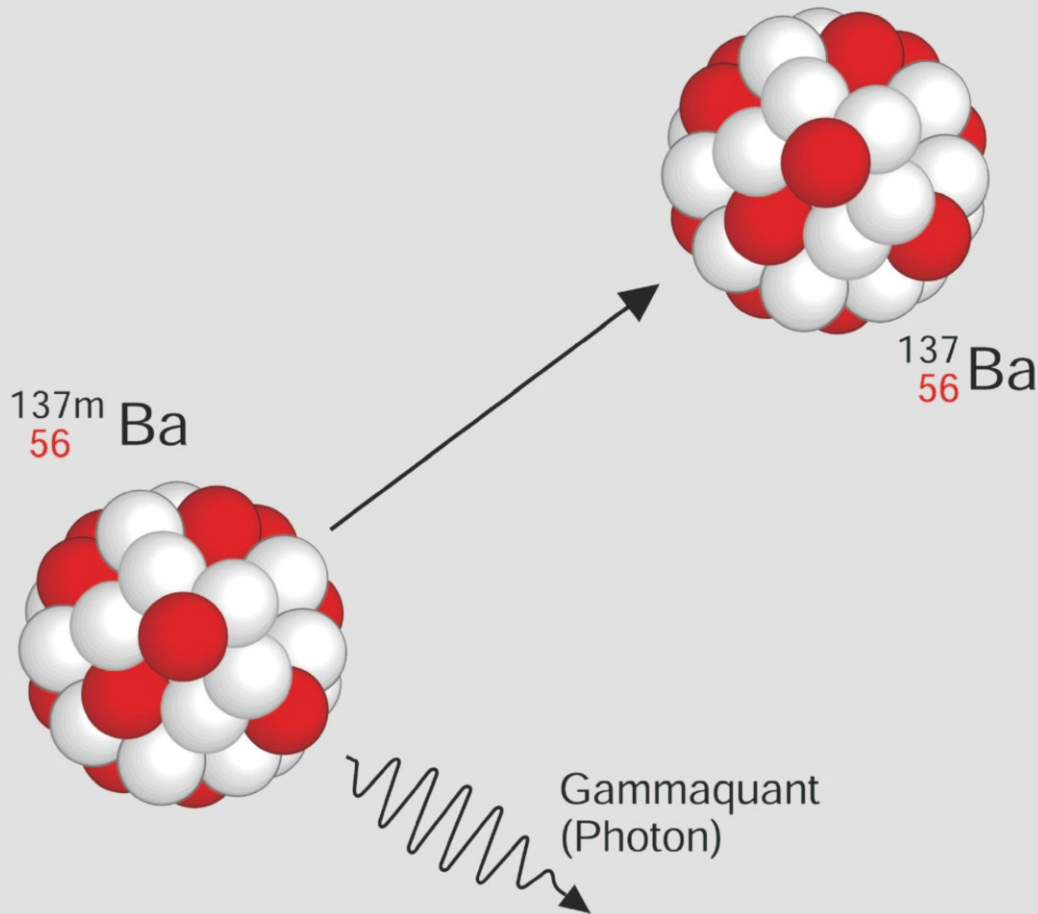
VLASTNOSTI ZÁŘENÍ BETA

- lehká nabitá částice (náboj $1e$, hmotnost $1/2000 u$)
- většinou spojité spektrum (různé energie)
- v rozpadech stovky keV, urychlovače $>MeV$
- „cik-cak“ zákon
- v blízkosti jádra intenzivní **brzdné záření** (nabitá částice v el.-mag. poli) a charakteristické zář. X
- dolet závisí na čísle Z a hustotě materiálu
 - až desítky cm ve vzduchu
 - desetiny až jednotky mm v materiálech
- Beta mínus vs. Beta plus – pozitrony anihilují

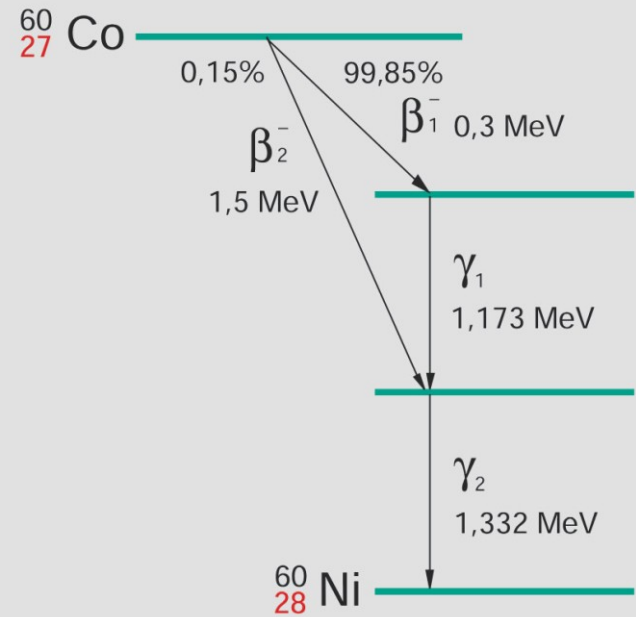
STÍNĚNÍ ZÁŘENÍ BETA

- Vhodné jsou kovy – hliník, měď nebo tvrzené plasty
- čím těžší, tím lépe stíní beta, ale tím více se emituje brzdné záření (nevýhoda olova)
- Ideálně tedy materiály s vysokou hustotou, ale s malým Z
- Nutné je odstínit brzdné záření a charakteristické roentg. záření
- U lidí - rukavice, **brýle**, rouška
- „Nedívej se tak zblízka“ – starší TV mohly emitovat elektrony

GAMA



Quelle: 
Informationskreis
KernEnergie



Quelle: 
Informationskreis
KernEnergie

VLASTNOSTI ZÁŘENÍ GAMA A X

- silně pronikavé, elektricky neutrální záření
- pronikavost závisí na energii
- a velmi silně na **Z** materiálu – čím větší, tím lepší

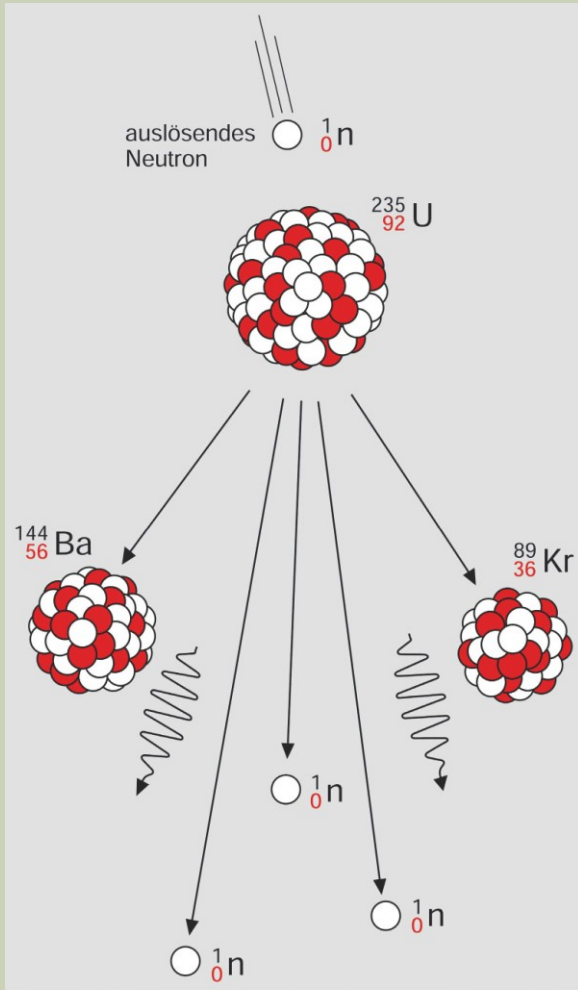
$$\varphi(x) = \varphi_0(x) \cdot e^{-\mu x}$$

- koeficient zeslabení (attenuation factor)

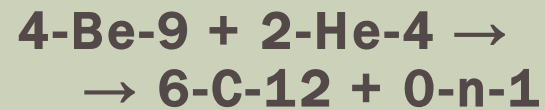
STÍNĚNÍ ZÁŘENÍ GAMA A X

- co „nejtěžší“ materiály – olovo, bismut, wolfram (vysoká hustota, vysoké Z), uran (vlastní měkké záření)
- Nutno dostítnit char. roentgenovské X a anihilační píky; nutno přidat další vrstvy z lehčích kovů – sendvičové stínění (olovo, kadmium, měď, hliník, plast, dřevo, beton...)
- U lidí – vzdálenost, čas, stínění – dálkové manipulátory, olověné zábrany, boxy, horké komory s manipulátory apod., rouška, rukavice (gama je většinou doprovodné k alfa, beta)

NEUTRONOVÉ „ZÁŘENÍ“



Quelle: 
Informationskreis
KernEnergie



Reakce
(alfa,n)
(gama,n)
(p,n)
(n,štěpení)
d+t – fúze

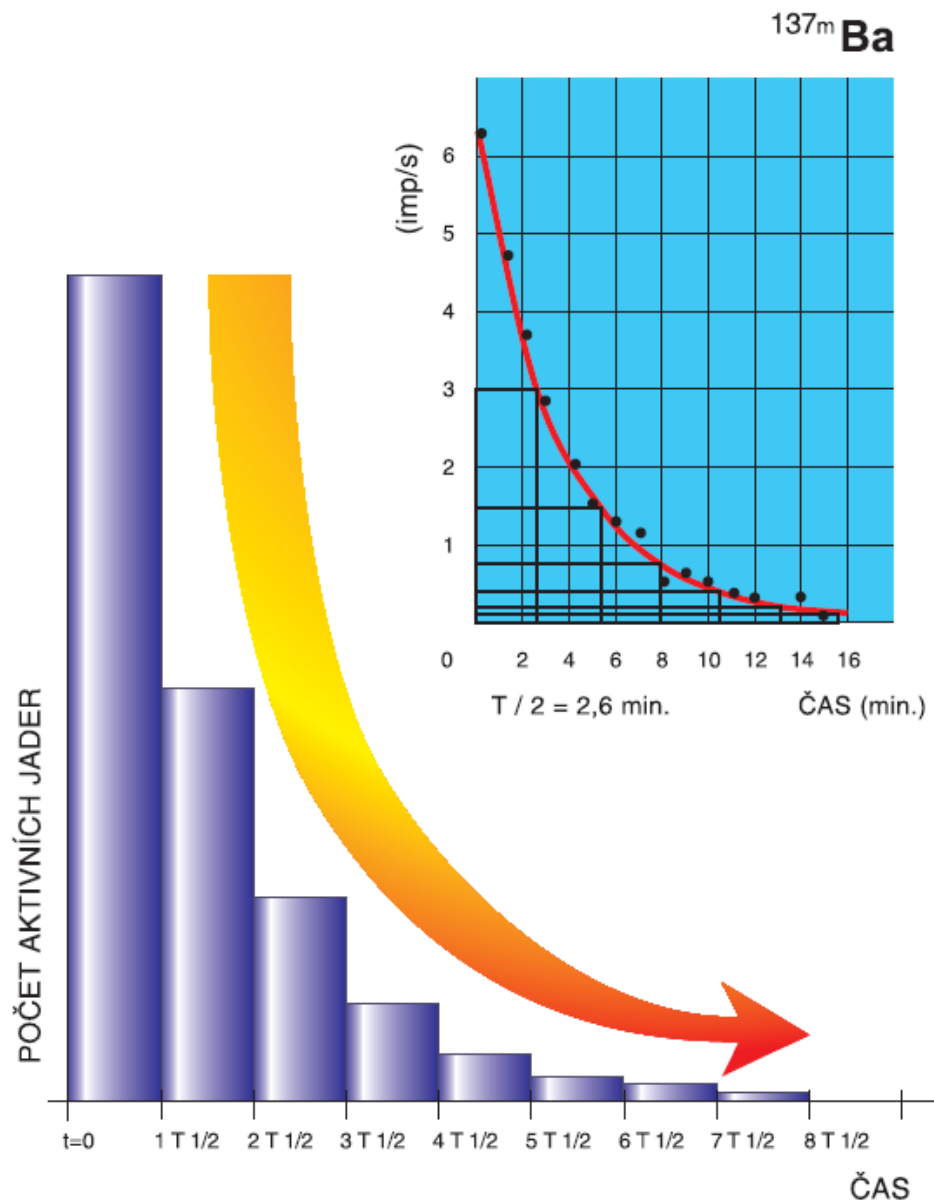
VLASTNOSTI NEUTRONOVÉHO ZÁŘENÍ

- neutrony nemají elektrický náboj (hmotnost $1u$)
- nepřímo ionizující záření – ionizuje až produkt reakce s neutronem, ne sám neutron
- reaguje rozptylem nebo absorpcí
- ve vodě až desítky rozptylů před absorpcí – při každém rozptylu může předávat energii
- pronikavost závisí na energii, materiálu a hustotě
 - složitá závislost, liší se materiál od materiálu – většinou desítky cm (i metry a desítky m)

STÍNĚNÍ NEUTRONŮ

- Obecně:
 - zpomalit
 - absorbovat
- Zpomalují nejlépe lehké prvky – H, C, Be
- Zachycují speciální materiály – B, Cd (ale i H)
- voda, polyethylen (dopovaný bórem – C3)
- olovo je pro neutrony jako máslo pro nůž
- dostínit záchytové píky gama záření (Pb)
- U lidí – vzdálenost, čas, stínění (voda...)

POLOČAS PŘEMĚNY (ROZPADU)



RADIAČNÍ OCHRANA

- Atomový zákon 18/97 Sb. v.z.p.p. a prováděcí vyhlášky SÚJB (zejm. 307/02)
- Princip ALARA

- **Vzdálenost**
- **Stínění**
- **Čas**

- Princip zdůvodnění
- Princip optimalizace
- Dozor a regulace

DEFINICE VELIČIN A JEDNOTEK

- Aktivita (veličina, radioaktivita je jev!)
(obecná, plošná, objemová, měrná, nasycená)
- Kerma (+příkon)
- Expozice (ozáření) (+příkon)
- Absorbovaná dávka
- **Dávkový příkon**
- Lineární přenos energie
- Dávkový ekvivalent (ekv. dávka) (+příkon)
- Efektivní dávka (+příkon)
- Dávkový úvazek (radiotoxicita)
- Poločas rozpadu, střední doba života, biologický poločas
- Kolektivní dávka

JEDNOTKY

■ Bequerel	(1/s)	přesně
■ Curie	(1/s)	1 Ci = 3.7E10 Bq
■ Gray	(J/kg)	přesně
■ rad	(J/kg)	1 rad = 0.01 Gy
■ Sievert	(J/kg)	rad.váh. faktory
■ Roentgen C/kg	(C/kg)	1 R = 0.000258 ... 8.69 mGy
■ rem	(J/kg)	1 rem = 0.01 Sv

LIMITY A DÁVKY

- Obyvatelstvo 1mSv/rok
- Pracovníci 100mSv/5 let, 50mSv/rok
- Studenti a učni
- Těhotné ženy

- Přírodní radiační pozadí/rok ... 3 mSv
(0.1-0.4 μ Sv/h)
- RTG střev ... 4 mSv
- RTG žaludku ... 2.4 mSv
- RTG kyčlí ... 1.7 mSv
- Pracovník JE Dukovany/rok ... 0.4 mSv
- 3 lety nadzvuk. letadlem Praha - USA ...
0.38 mSv
- Obyvatelstvo v okolí JE Dukovany/rok ...
0.005 mSv

ÚČINKY ZÁŘENÍ

- prvek (monoatomární)
- molekula, chemická látka
- biologická živá tkáň

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
Kůže	0,01
Ostatní orgány a tkáně	0,05

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 fagmenty	20

ÚČINKY ZÁŘENÍ NA MATERIÁL

- zejména gama záření a neutrony
- omezeně beta
- alfa se zachytí na povrchu materiálu
- Nejhorší je směsné pole n-g (reaktor), zejména rychlé neutrony
- Horší pro krystalické látky
 - železo, grafit
- Atestační plus svědečný program (zejména TN)

ÚČINKY ZÁŘENÍ NA MATERIÁL

- Gama
 - zejména radiační ohřev
- Neutrony
 - poruchy krystalické mřížky
 - změny v chemické struktuře mřížky (záchyt n) – Mn, Co, Ni
 - změna pružnosti – zvyšuje se pevnost a křehkost
 - creeping, swelling
 - možnost spontánní rekrytalizace nebo křehkého lomu

BIOLOGICKÉ ÚČINKY ZÁŘENÍ

- Vnější ozáření (gama, neutrony)
- Vnitřní ozáření (alfa, beta)
- Kritická cesta radionuklidu, kritický orgán

- Ozáření buňky
 - Fyzikální stádium
 - Fyzikálně-chemické stádium
 - Chemické stádium
 - Biologické stádium
 - Reparační stádium

FYZIKÁLNÍ STÁDIUM

- absorpce energie v buňce - excitace a ionizace atomů a molekul
- interakce, které nevedou přímo k ionizacím a excitacím (tvorba párů, jaderné reakce) produkuje částice, které také excitují a ionizují atomy a molekuly
- Vzniká tzv. stopa částice (závisí na LET)
 - Tento primární proces trvá cca 10^{-16} – 10^{-14} s

FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ STÁDIUM

- Při interakci iontů s molekulami dochází k disociaci molekul a vzniků radikálů
- Z vody vznikají např. kationty H^+ , hydroxylové anionty OH^- a další nestabilní produkty H_2O_2 , HO_2
- Tento proces trvá cca 10^{-14} – 10^{-10} s

CHEMICKÉ STÁDIUM

- Ionty, radikály a excitované atomy interagují s molekulami buňky
- Vznikají jednoduché a dvojité zlomy DNA a RNA
- Tento proces trvá cca 10^{-3} – 10 s

BIOLOGICKÉ STÁDIUM

- Buňky se dále dělí
- Změny na DNA a dalších částech buňky mohou způsobit změny na jednotlivých orgánech a organismu jako celku
- By-standers effect – poškození neozářených
- Biologické stádium trvá od stovek sekund (při akutním poškození) až roky

REPARAČNÍ STÁDIUM

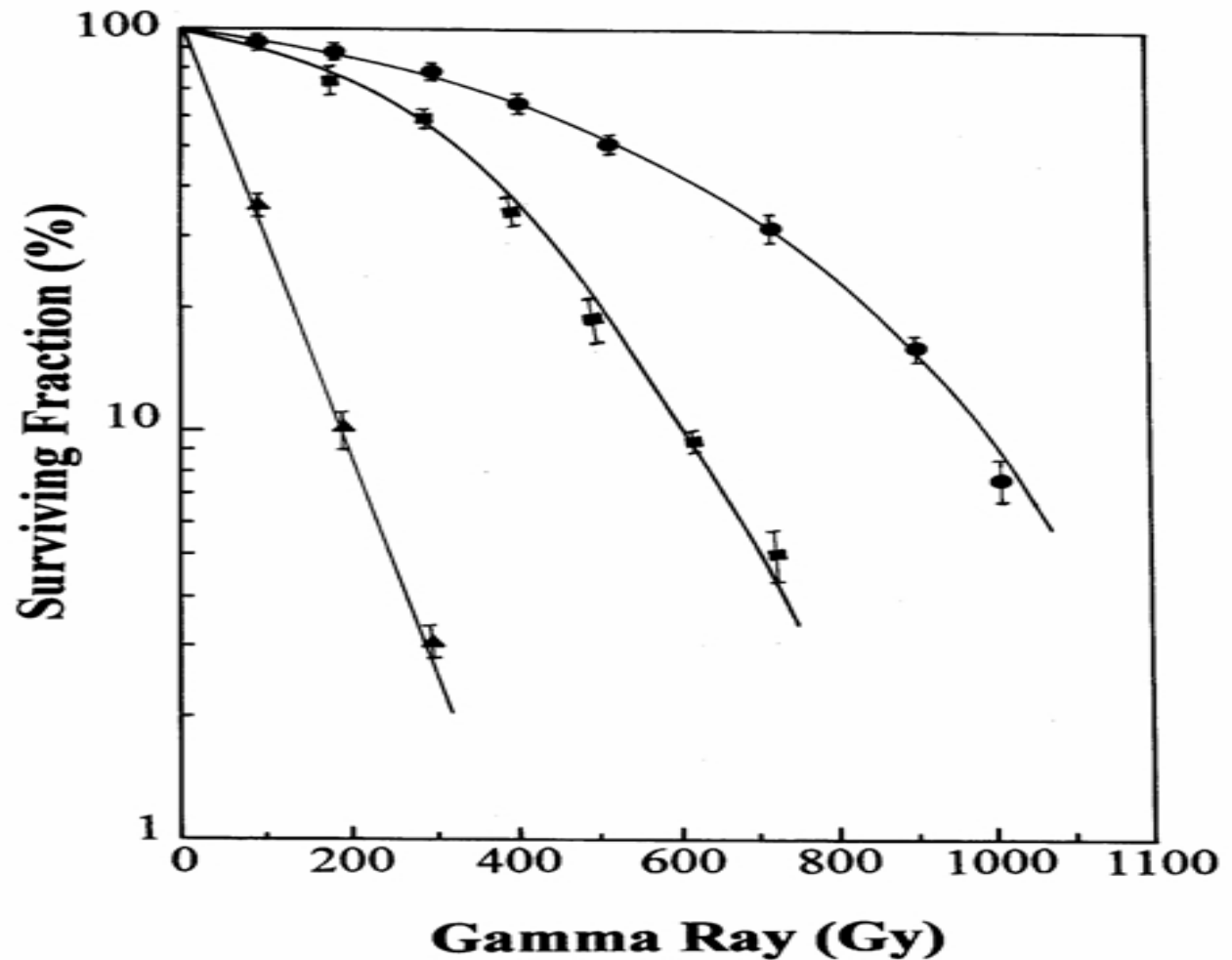
- působí antioxidanty
- dochází k enzymatickým procesům, jimiž jsou napravovány poškozené struktury DNA
- buňka může během několika hodin od ozáření obnovit svou schopnost dělení
- může dojít k chybné reparaci a vzniku mutací
- apoptóza – řízený zánik buňky (gen p53)
(mrtvá buňka – dobrá buňka)

KŘIVKA PŘEŽITÍ MIKROBŮ

Haloferax
volcanii (●)

Halobacterium
salinarium (■)

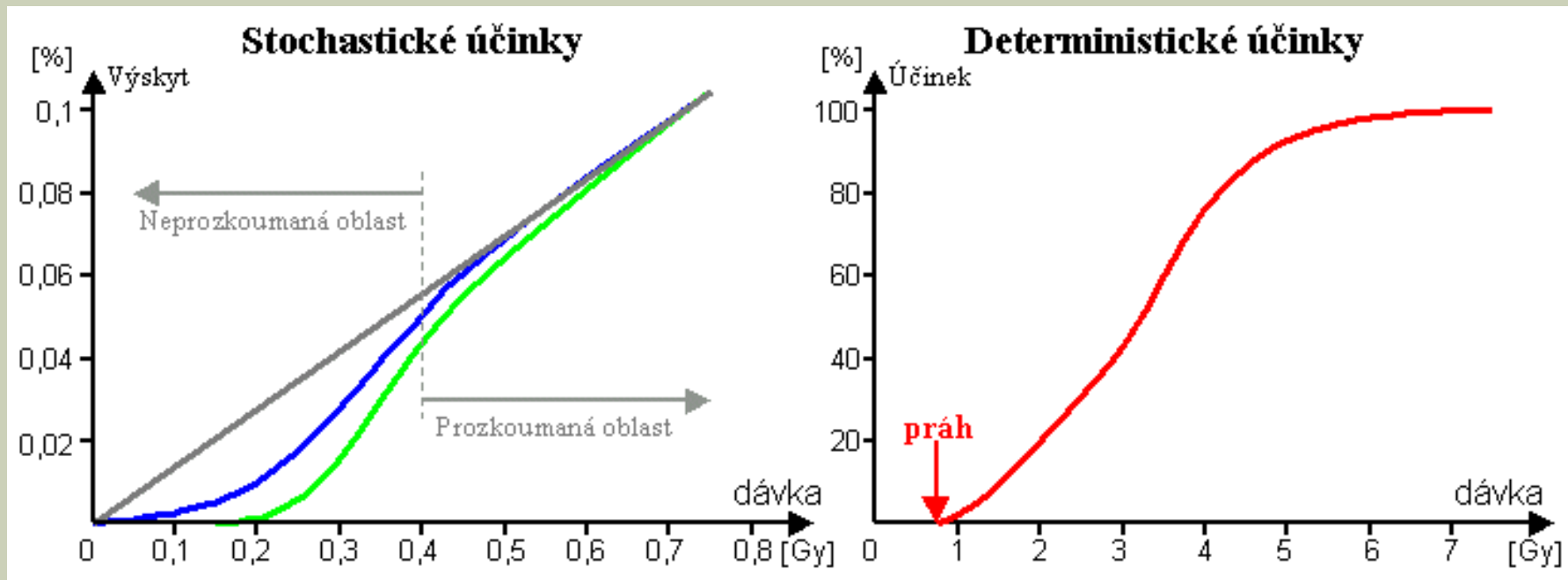
Escherichia
coli (▲)



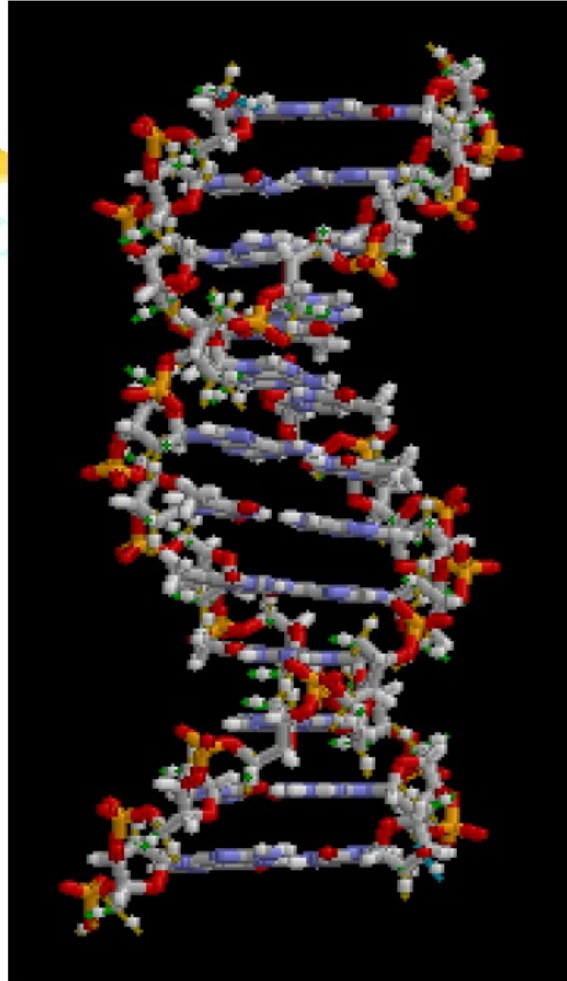
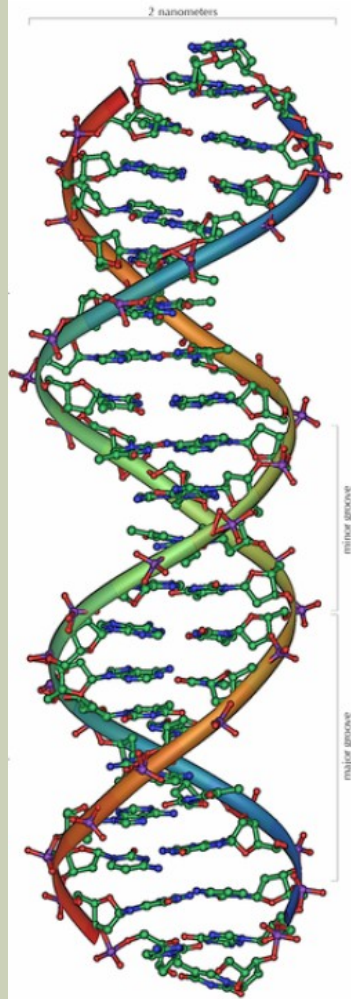
VLIVY ZÁŘENÍ NA ORGANIZMUS

- Deterministické účinky
- Stochastické účinky

- časné účinky
- pozdní účinky



ÚČINKY ZÁŘENÍ NA DNA



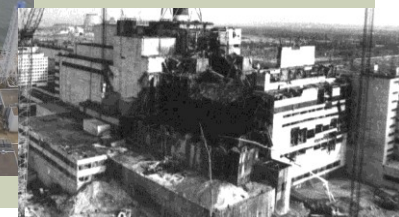
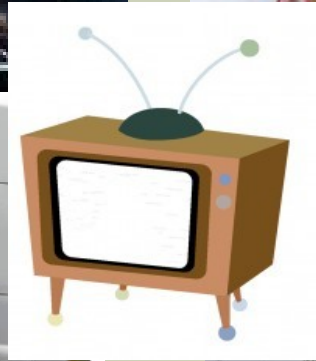
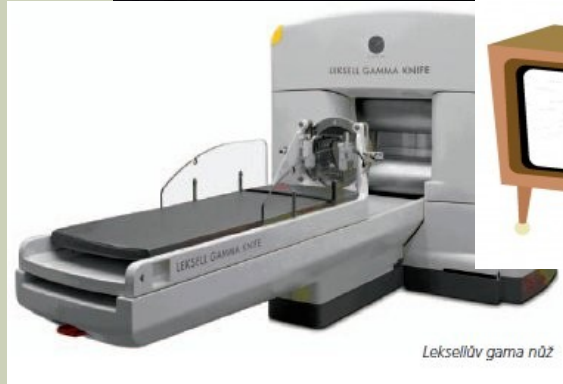
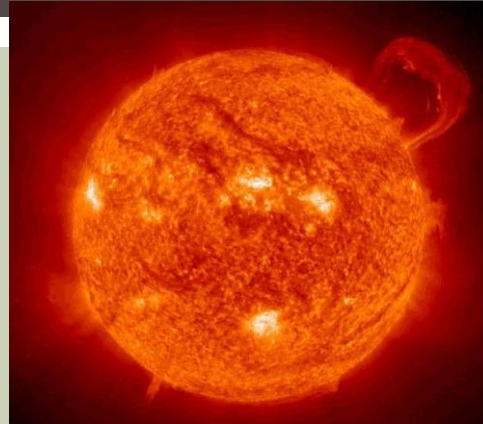
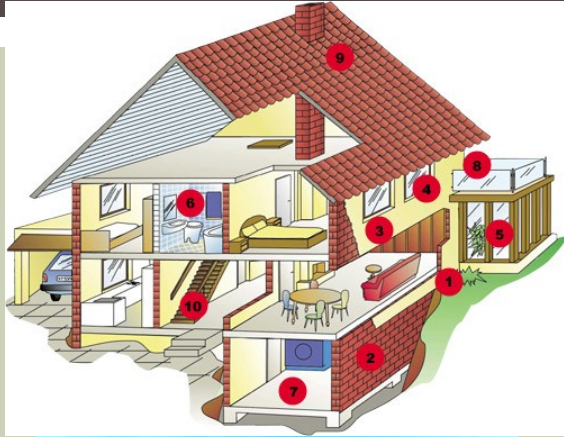
ZDRAVOTNÍ ÚČINKY ZÁŘENÍ

- detekovatelné individuálně od 500 mSv
- Dávky > 2 Sv
 - kostní dřeň
 - žaludek, tlusté střevo
 - kůže
 - dočasná sterilita u mužů (roky)
 - poškození plodu (od desítek mSv)
 - nádorová onemocnění
 - kostní dřeň, žaludek, tlusté střevo, štítná a mléčná žláza

JEVY OVLIVŇUJÍCÍ ÚČINKY ZÁŘENÍ

- Teplota
- Předchozí ozáření
- Přítomnost kyslíku v tkáni
- Radioprotektika
- Stáří jedince
- Nejasný vliv malých dávek - hormese

RADIOAKTIVITA PŘIROZENÁ A UMĚLÁ



POROVNÁNÍ RADIOAKTIVITY V PROSTŘEDÍ ČR

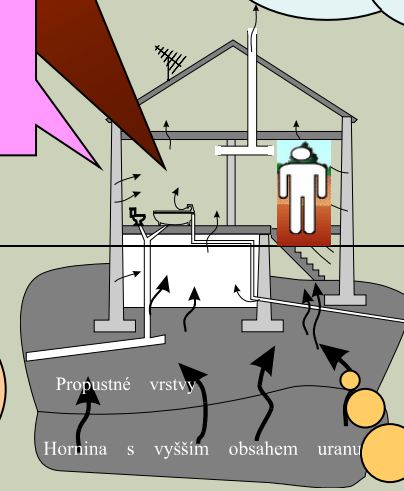
Černobyl
10-100 Bq/m³

Radon v budově
10 -1000 Bq/m³

Radon v atmosféře 5 - 10 Bq/m³

Stavební materiál
10 000-1000 000 Bq/m³
²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K

¹³⁷Cs...5 000 Bq/m²



V těle ⁴⁰K
~ 4000 Bq

Hornina/půda :
10 000-1000 000 Bq/m³
²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K



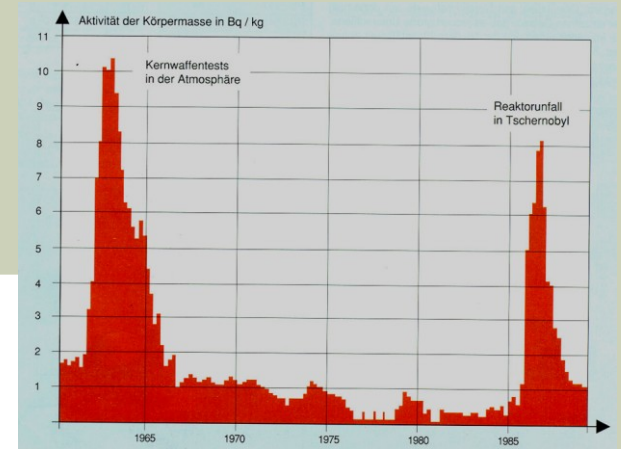
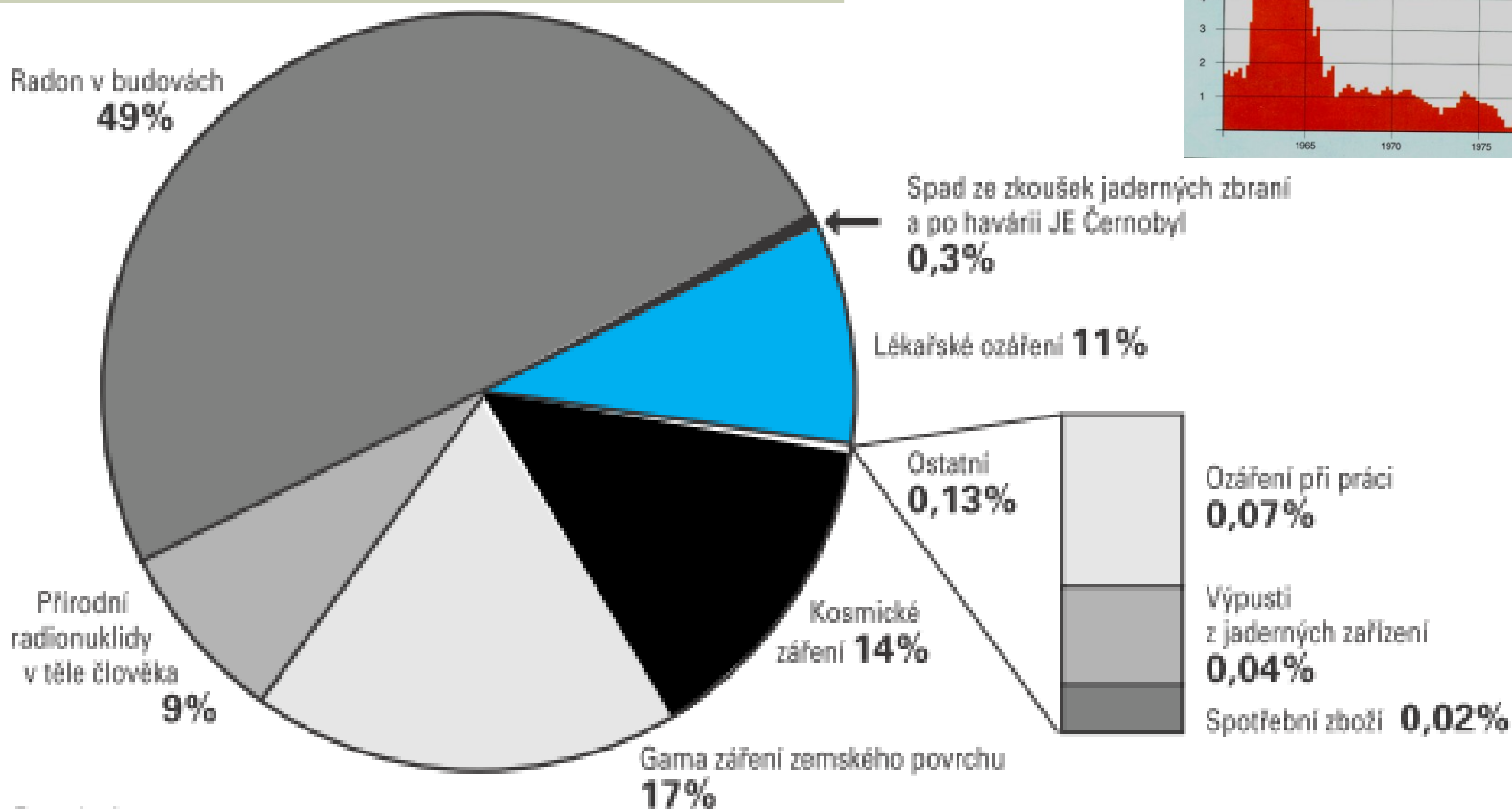
Radon ve výšce
1m: 10 000 –
100 000 Bq/m³
(ale i >1 000 000
Bq/m³)

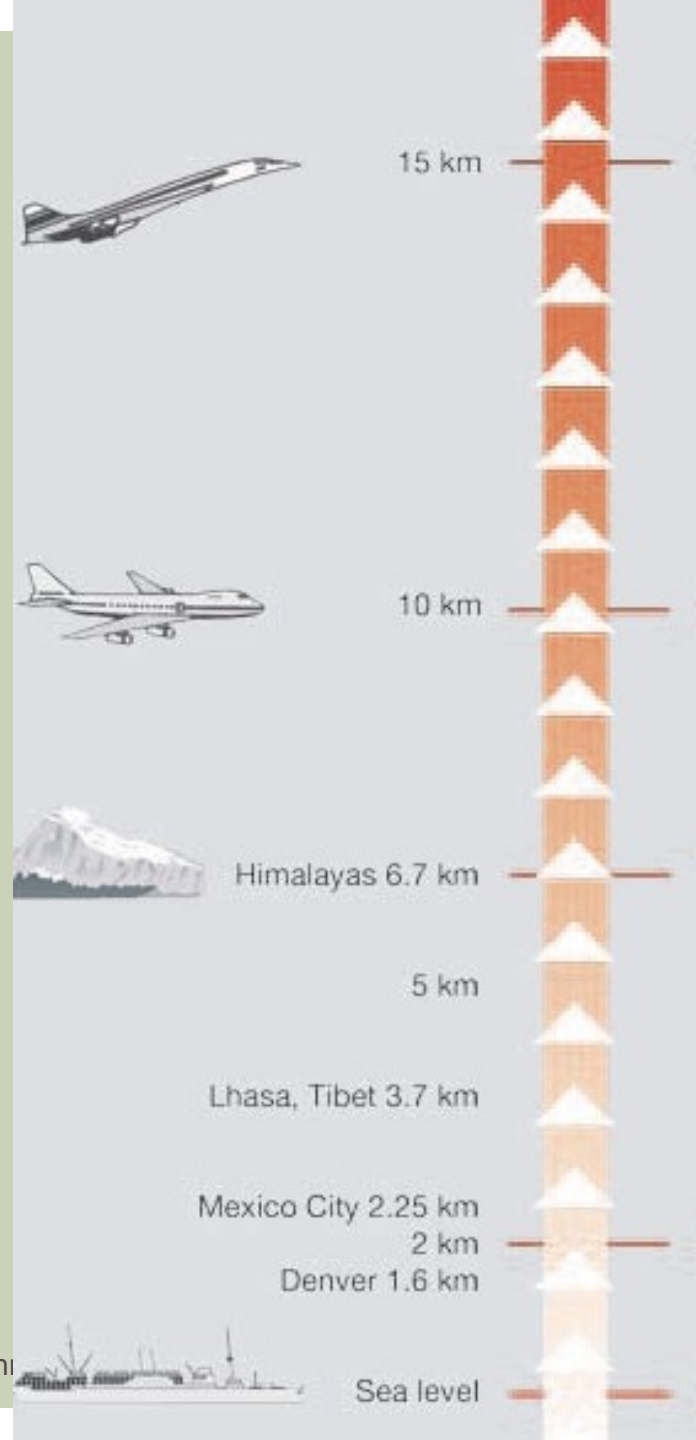
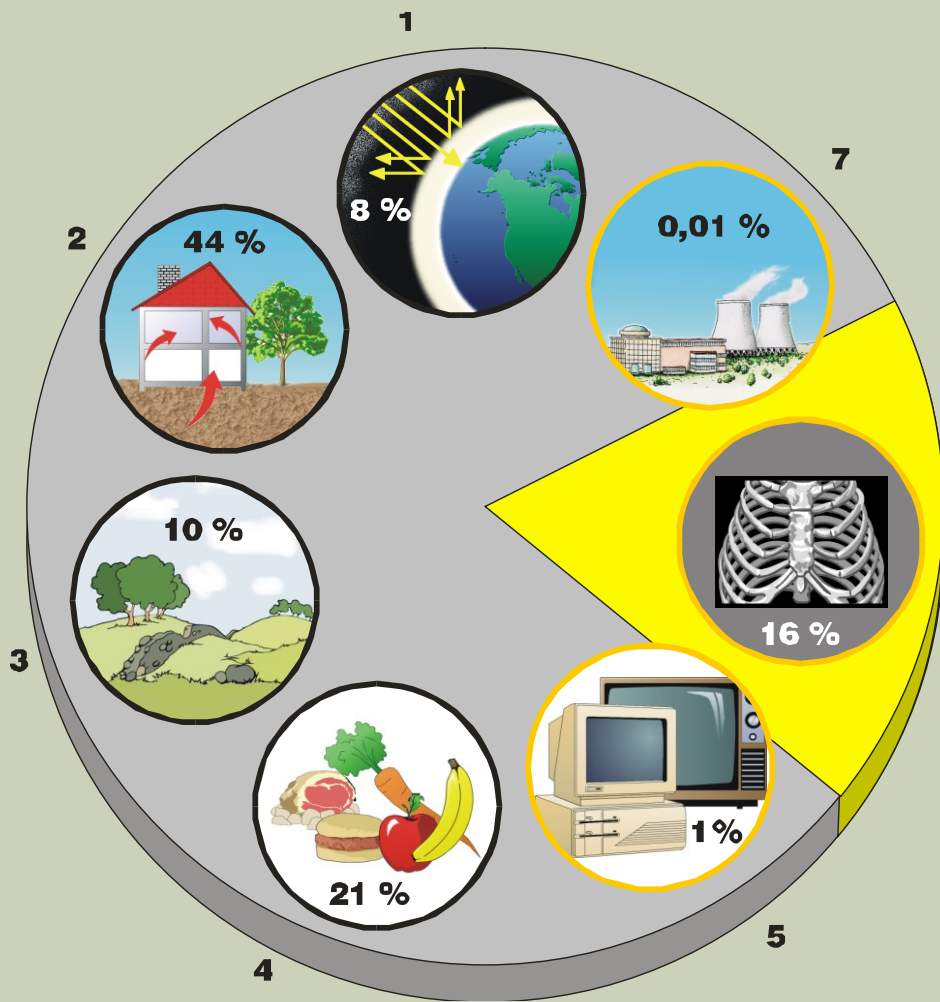
přírodní ozáření v ČR
~ 3 mSv/ročně
(max 1000 mSv/ročně)

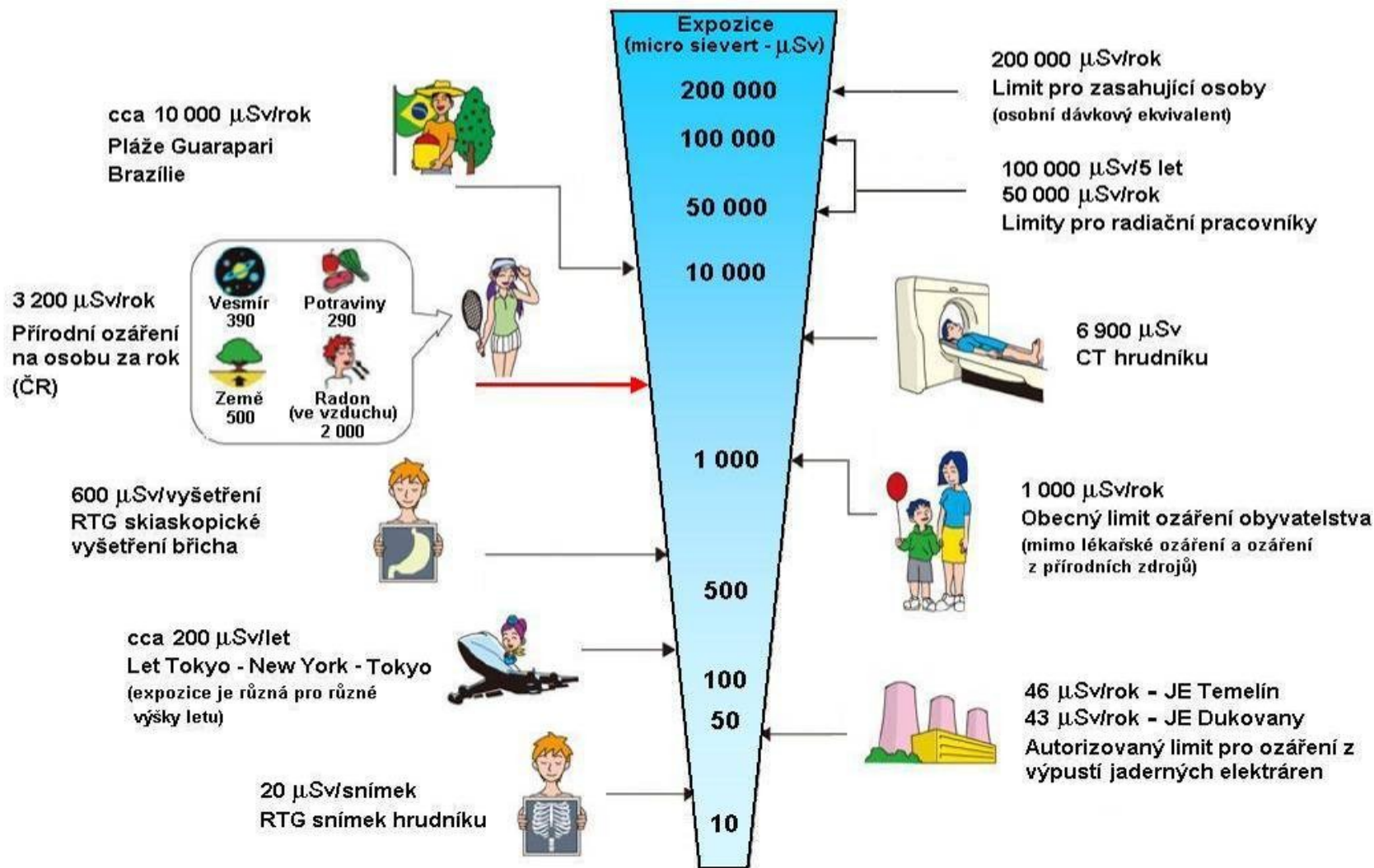
Lékařské ozáření
Diagnostika (nucl. medicína)
1 000 000 - 100 000 000 Bq

Terapie štítné žlázy
10 000 000 000 Bq (¹³¹I)

ROZDĚLENÍ ZDROJŮ OZÁŘENÍ







Průměrný dávkový příkon z přírodního pozadí v ČR: $0,14 \mu\text{Sv}/h = 1226,4 \mu\text{Sv}/rok$

AKTIVITA - PŘÍKLADY

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 millionů Bq
Radioisotopový zářič pro lékařskou terapii (příklad)	100 000 000 millionů Bq (100 TBq)
1 kg vitrifikovaných vysokoaktivních odpadů po 50 letech	10 000 000 millionů Bq (10 TBq)
1 luminiscenční světelné znamení „Exit“ (obsahuje tritium)	1 000 000 millionů Bq (1 TBq)
1 kg uranu	25 millionů Bq
1 kg uranové rudy (naleziště Kanada, 15 %)	25 millionů Bq
1 kg uranové rudy (naleziště Austrálie, 0.3 %)	500 000 Bq
1 kg nízkoaktivních jaderných odpadů (příklad)	1 millionů Bq
1 kg uhelného popílku	2000 Bq
1 kg granitu (žuly)	1000 Bq

Spaní vedle druhé osoby	0,05 mikro Sv
Bydlení jeden rok 75 km od jaderné elektrárny	0,09 mikro Sv
Snědení jednoho banánu	0,1 mikro Sv
Bydlení jeden rok 75 km od uhelné elektrárny	0,3 mikro Sv
Rentgen ruky	1 mikro Sv
Roční používání starého monitoru (CRT)	1 mikro Sv
Rentgen zubu	5 mikro Sv
Průměrná denní dávka z přírodního pozadí	10 mikro Sv
Rentgen hrudníku	20 mikro Sv
Let z NY do LA	40 mikro Sv
Bydlení jeden rok v domě z kamene nebo betonu	70 mikro Sv
Celková střední dávka od havárie Three Mile Island pro obyvatele bydlícího 15 km od elektrárny	80 mikro Sv
Roční dávka od draslíku (biogenní prvek obsahující izotop ^{40}K) obsaženého v lidském těle	390 mikro Sv
Povolený roční limit pro ozáření jednotlivce z veřejnosti nad dávku z přírodního pozadí	1 000 mikro Sv = 1 mSv

Povolený roční limit pro ozáření jednotlivce z veřejnosti nad dávku z přírodního pozadí	1 000 mikro Sv = 1 mSv
Mammogram	3 mSv
Normální celoroční průměrné ozáření průměrného jednotlivce. Cca 85 % z toho je od přírodních zdrojů, zbytek většinou z medicínských aplikací.	3,5 mSv
CT scan hrudníku	5,8 mSv
Celodenní dávka z pobytu v černobylské elektrárně v r. 2010	6 mSv
Průměrná roční dávka pro pilota na pravidelné lince NY – Tokyo	9 mSv
Povolená roční dávka pro profesionálního pracovníka se zářením	50 mSv
Dávkový limit pro pracovníky ve Fukušimě při likvidaci následků tsunami	250 mSv
Dávka, od které se projeví lékařsky zjistitelné změny po ozáření	500 mSv
Smrtelné ozáření jednorázovou dávkou	8 000 m Sv = 8 Sv

SMRTELNÉ (LETÁLNÍ) DÁVKY

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

PŘÍRODNÍ ANOMÁLIE



**Přírodní pozadí 175 mSv/rok –
Guaraparí, Brazílie**

**Přírodní pozadí 400 mSv/rok –
Ramsar, Irán**



VNÍMÁNÍ RIZIKA

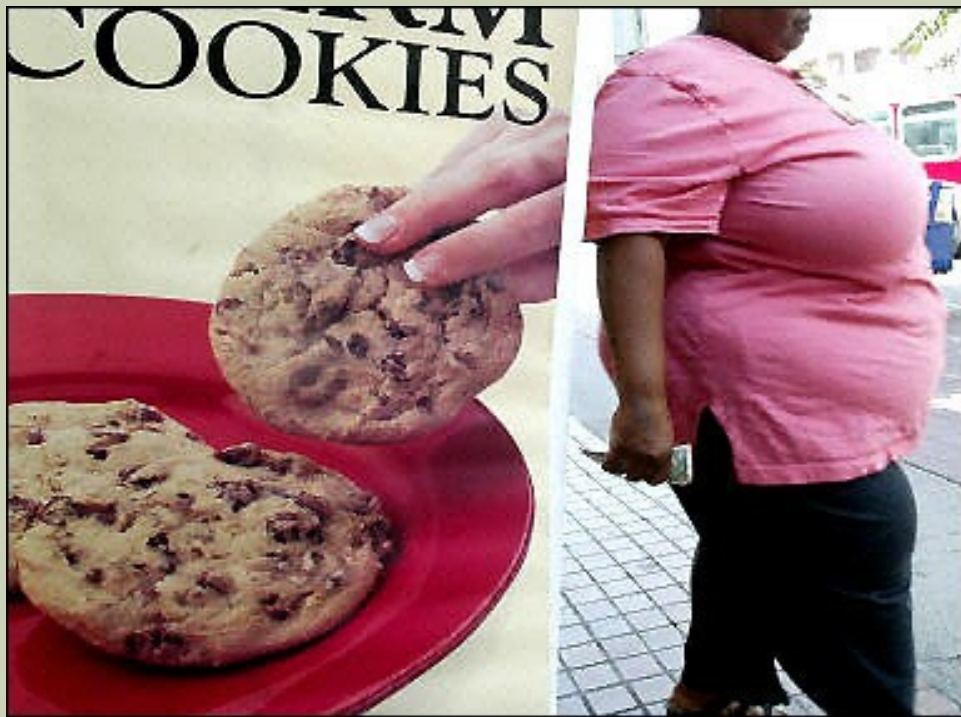


Karel Katovský, Vysoké učení technické v Brně

VNÍMÁNÍ RIZIKA VS. STATISTIKA

Energetický zdroj	Počet úmrtí na TWh
Uhlí (světový průměr)	161
Uhlí (Čína)	278
Uhlí (USA)	15
ropa	36
plyn	4
Biopalivo, biomasa	12
rašelina	12
FV panely na střeše	0.44
vítr	0.15
voda	1.4
jádro	0.04

<http://nextbigfuture.com/2011/03/deaths-per-twh-by-energy-source.html>



- Ozáření 1 mSv
- Vykouření 30 cigaret
- Ujetí 5000 km autem v běžném provozu



QUIZ

Představte si, že pracujete se zdroji ionizujícího záření. Máte před sebou na stole zdroj **alfa záření**, **beta záření**, čistý **gama** zdroj a **neutronový** zdroj. Najednou na dveře klepe paní Drábová, neohlášená kontrola z SÚJB. Máte čas tak akorát na to, abyste jeden ze zdrojů zahodili, druhý schovali před sebe na policičku za pohlednici od kamaráda, třetí strčili do kapsy a čtvrtý spolkli. Jaký postup vyberete, abyste minimalizovali efektivní dávku na svůj organizmus?

1. Vojtěch Ullmann: Jaderná fyzika a ion. záření
2. Tomáš Čechák: Biologické účinky záření
3. Josef Hógel: Základy radiační bezpečnosti
4. Antonín Kolros: Dozimetrie
5. Marie Dufková: Radioaktivita
6. Dana Drábová: Stres v jádře, jádro ve stresu
7. UNSCEAR, NEA, IAEA, IEA, WNA, WNN, Paulo's Corner, SÚRO, NRC

DĚKUJI ZA POZORNOST

