

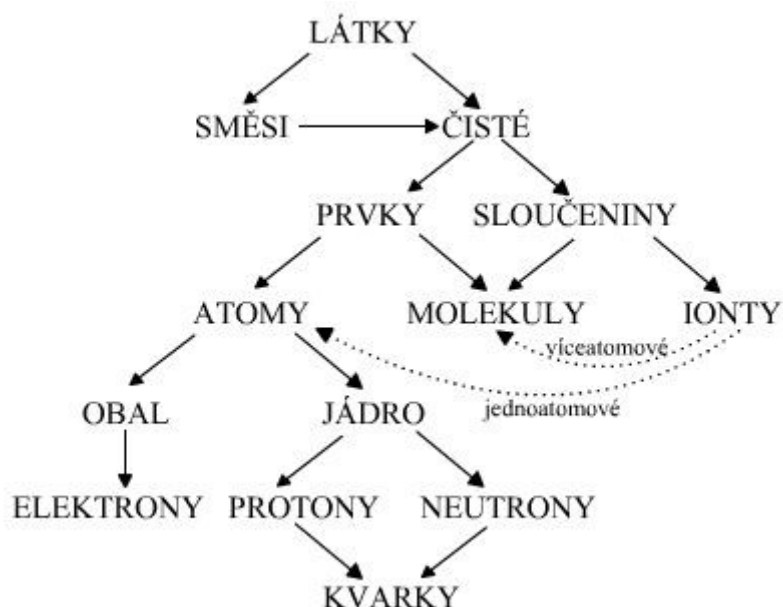
IZOTOPOVÉ METODY

1. Základní údaje

Doporučená literatura:

Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie - Jiří Hála - Konvoj 1998

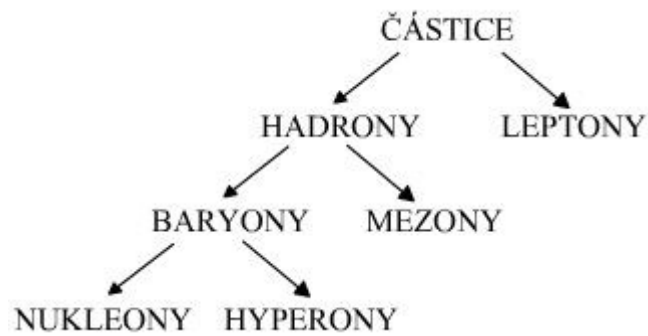
Struktura hmoty:



Rozdělení částic (hmoty):

„Elementární“ částicenes - cca 100 částic + 100 antičástic

Následující schéma naznačuje zjednodušeně členění „elementárních“ částic:



- hadrony, ovlivňuje je slabá jad., el. mag. a silná jaderná, skládají se z kvarků

- leptony, necítí silnou jadernou (e , μ , τ), jsou elementární

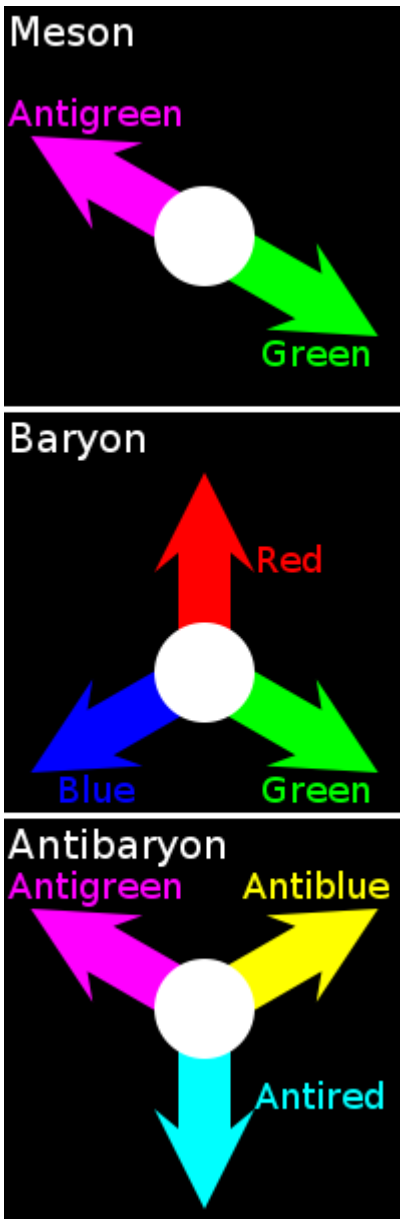
hadrony:

- baryony - polocelý spin (n , p), skládají se ze 3 kvarků (nukleony (p , n), hyperony - obsahují alespoň jeden s kvark)

- mezony - celý spin (π), skládají se ze 2 kvarků (π^+ ($u\bar{d}$), π^0 (kvantová superpozice $u\bar{u}$ a $d\bar{d}$ stavu), π^- ($d\bar{u}$))

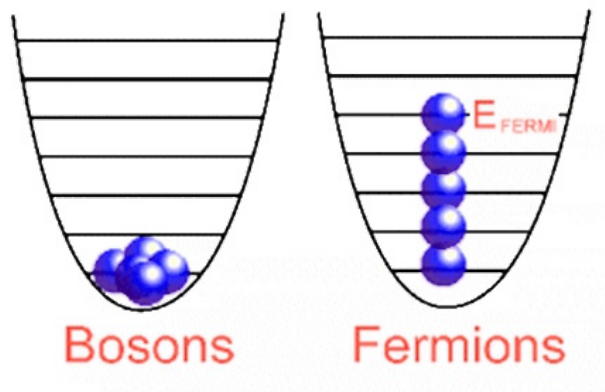
Three Generations of Matter (Fermions)

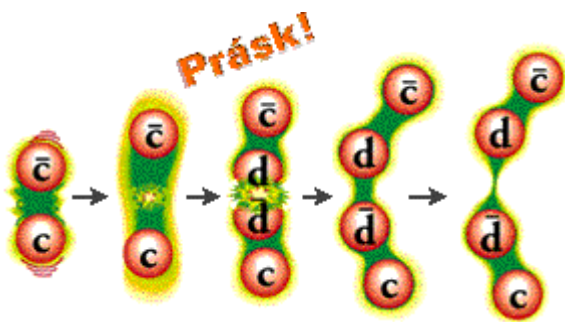
	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson



Další způsob dělení:

- bosony, **celý spin** (vnitřní moment hybnosti) (¹⁶O, γ, α)
- fermiony, **polocelý spin** (p⁺, n, e⁻)





Symbolika: ${}^A_ZX^N$ běžný zkrácený zápis: AX

A - nukleonové číslo ($A=Z+N$)

Z - protonové číslo

N - neutronové číslo

Zvláštní symbolika: **D** - deuterium - ${}^2\text{H}$

T - tritium - ${}^3\text{H}$

Pojmy: **nuklid(y)** - soubor identických atomů, jejichž jádra tedy mají identické složení, stejné A i Z

isotopy - soubor atomů, které mají stejné protonové (Z) ale různé neutronové N (tím pádem i A) číslo

isobary - nuklidy které mají stejné nukleonové (A) ale různé protonové číslo (^{40}Ar , ^{40}K , ^{40}Ca)
radio - značí, že jádro je nestabilní a samovolně se rozpadá

Hmotnost atomu:

$\text{kg} \times u$, **definice u:** $u = 1/12 m(^{12}\text{C})$, po vyčíslení: $u = 0,012 / (12 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}) = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1 u$

Energie:

$\text{J} \times \text{eV}$, **definice eV:** je to energie, kterou elektron získá při průchodu potenciálovým spádem 1V **$E = Q U$**
po vyčíslení: **$E = Q U = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$** .

Příklady: Energie fotonu viditelného záření.

$\lambda = 550 \text{ nm} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$; $c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

$E = h \nu = h c / \lambda = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 2,997 \cdot 10^8 / 5,5 \cdot 10^{-7} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,6 \cdot 10^{-19} / 1,602 \cdot 10^{-19} = 2,3 \text{ eV}$

Ekvivalentní energie 1 u:

$m = u = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

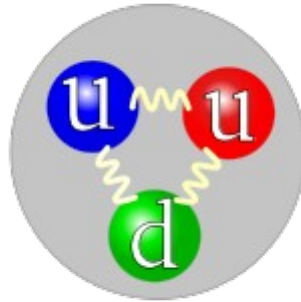
$E = m c^2 = 1,6606 \cdot 10^{-27} (2,997 \cdot 10^8)^2 = 1,492 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1,492 \cdot 10^{-10} / 1,602 \cdot 10^{-19} = 931,3 \text{ MeV}$

2. Atomové jádro

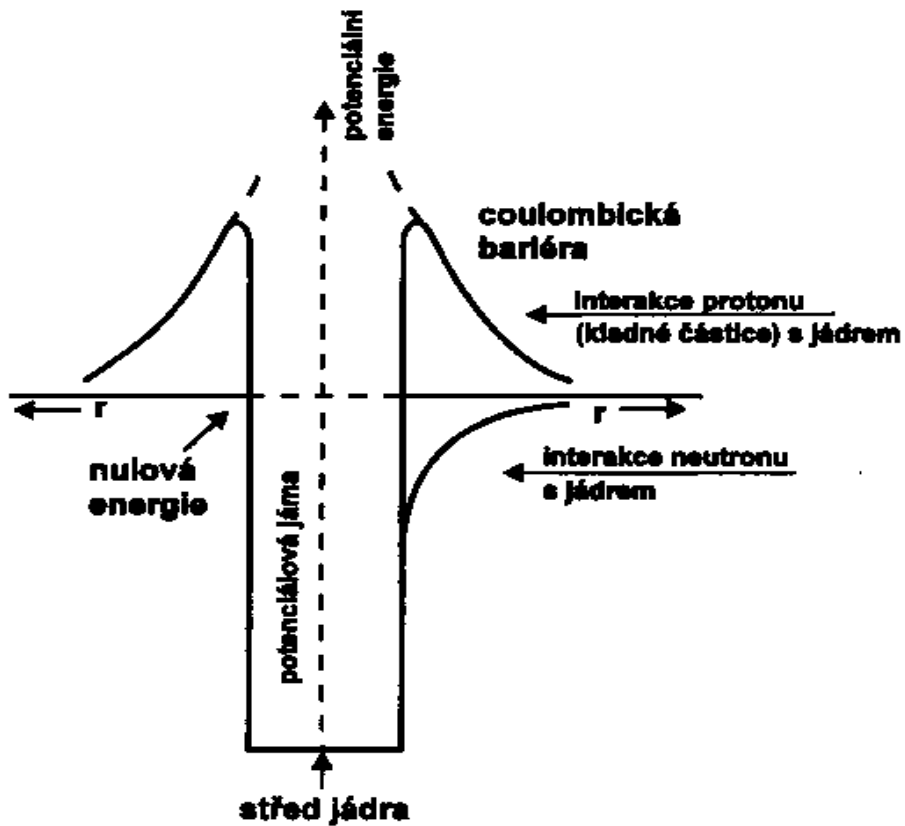
$p + n$; **centrum + náboje a hmoty**

($m_p 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg či $m_n 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg $\cong 2000 m_e$

$9,109 \cdot 10^{-31}$ kg); průměr jádra $\cong 10^{-15}$ m (atomu $\approx 10^{-10}$ m)



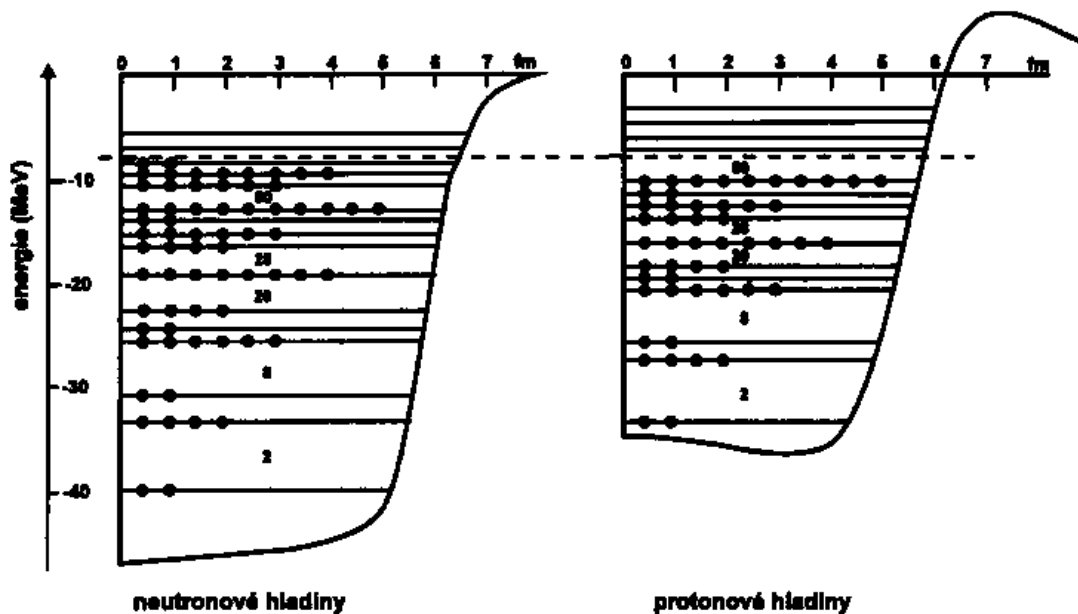
Jaderná potenciálová jáma a bariéra:



Obrázek 2: Potenciální energie při interakci jádra s nukleony.

Hladinový model jádra:

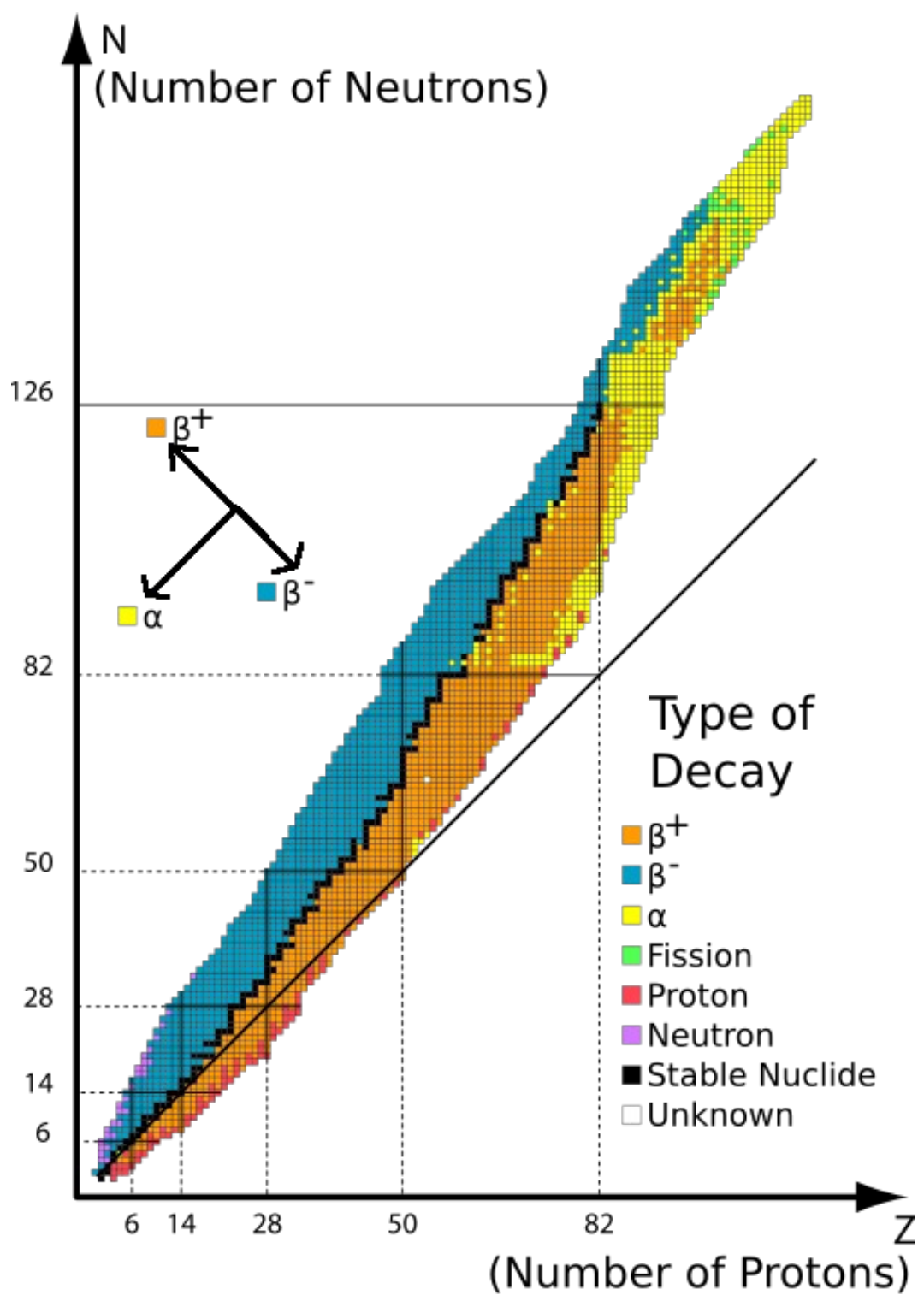
- p i n mají spin 1/2 a ve společném (ale zvláště p a n) silovém poli **platí Pauliho princip** – každá částice musí být v jiném kvantovém stavu (jako u e v obalu)
- vzniká tak soubor hladin (zvláště pro p a n)

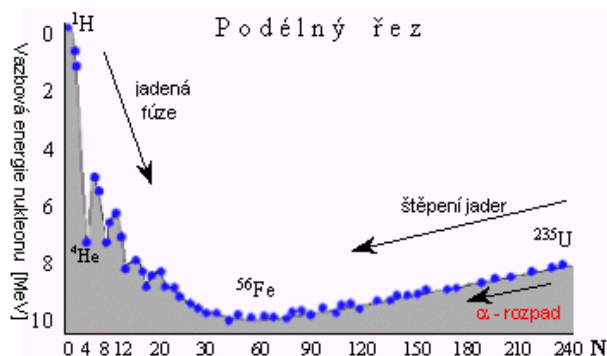
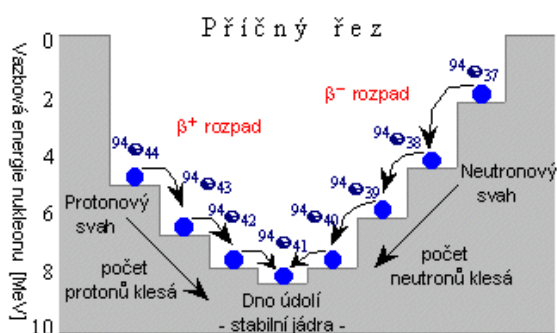


Obrázek 4: Uspořádání nukleonů v jádru $^{116}_{50}\text{Sn}$.

- u p coulombická síla způsobuje **zvýšení energie energetických hladin** v potenciálové jámě
- zaplňování slupek (en. hladin) probíhá **obdobně jako u elektronového obalu** (2, 8, 8, 18, 18, 32...), zde u p 2, 6, 12... obdoba u n, celkem pak 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 protonů a 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 neutronů, jsou to tzv. **magická čísla**
- po zaplnění těchto slupek je jádro stabilizováno, obdoba vzácných plynů (při zaplňování slupek v el. obalu)
- dvojitě magická: Z a N jsou magická čísla; Příklad: ^4He (2p, 2n), ^{16}O (8p, 8n), ^{208}Pb (82p, 126n)
- ostrůvky stability: předpokládá se vznik relativně stabilních nuklidů, ^{298}X (114p, 184n), ^{310}Y (126p, 184n)

- aby bylo jádro stabilní, musí mít též správný poměr N a Z, zpočátku $N / Z = 1$ poté roste až na 1,52 u posledního stabilního nuklidu ^{209}Bi (83p, 126n), tzv. řeka stability





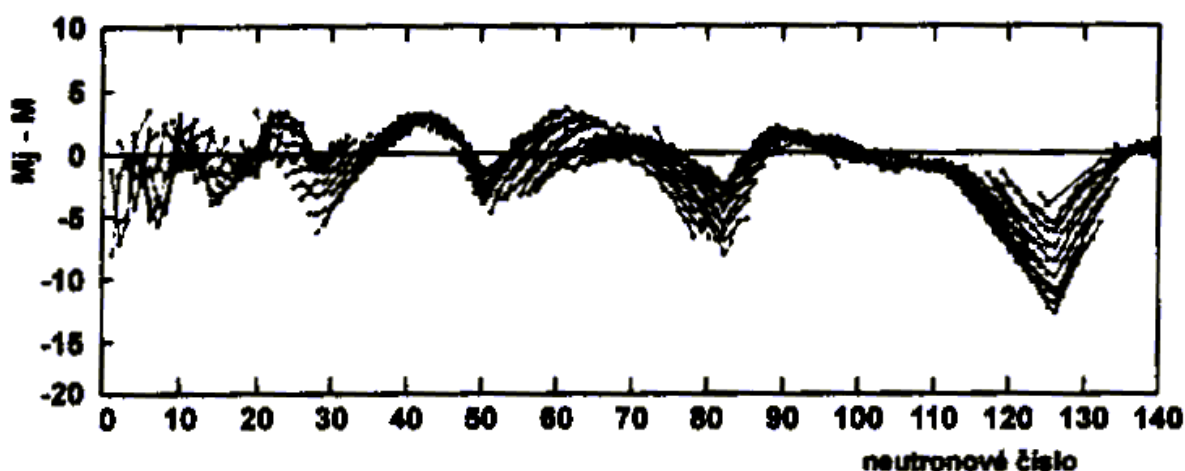
- př. ^{100}Sn (50p, 50n) $T_{1/2} = \text{cca } 1 \text{ s}$
- nejstabilnější jádra jsou sudo-sudé, pak sudo-liché či licho-sudé a jen 4 stabilní licho-liché: ^2H (1p, 1n), ^6Li (3p, 3n), ^{10}B (5p, 5n) a ^{14}N (7p, 7n)

Kapkový model jádra:

$E_v \cong k A$ - krátký dosah jaderných sil obdoba v kapce vody, působí na sebe jen sousední molekuly

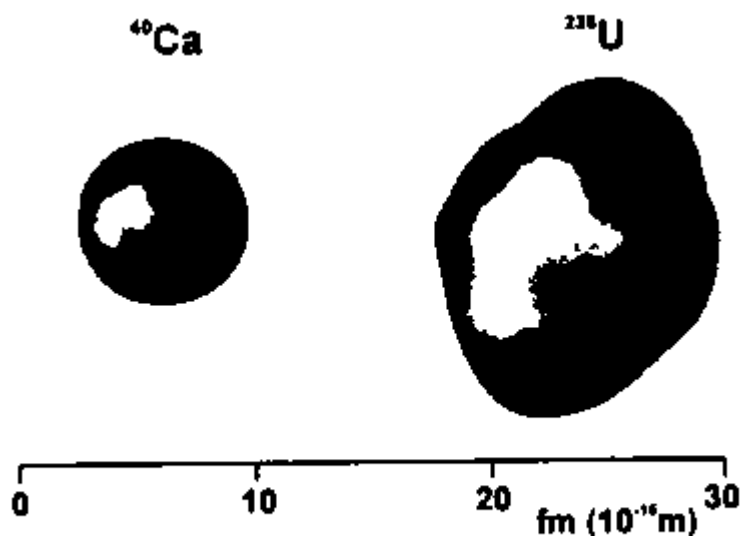
$$E_v = \underbrace{k_1 A}_{\text{objemová e.}} - \underbrace{k_2 A^{2/3}}_{\text{povrchová e.}} - \underbrace{k_3 Z^2 A^{-1/3}}_{\text{coulombické odp. protonů}}$$

objemová e. povrchová e. coulombické odp. protonů



Obrázek 6: Rozdíl skutečných a vypočtených hmotností jader v závislosti na neutronovém čísle (čarami jsou spojeny izotopy). Stabilizaci jader je zřetelně vidět v oblasti $N = 28, 50, 80$ a 126 . Převzato z [38].

tvár jádra: kulový tvar mají jen dvojitě magická jádra, ostatní jádra se stabilizují změnou tvaru



Obrázek 7: Tvar a velikost jader ^{40}Ca a ^{238}U .

Hmotnost a vazebná energie jádra:

$$m(\text{X}) < Z m_p + N m_n$$

hmotnostní úbytek: $\Delta = m(\text{X}) - (Z m_p + N m_n)$, $\Delta < 0$

$$E_v = - \Delta c^2 \quad (E_v > 0)$$

vazebná energie jádra, z definice plyne, že je kladná

$$\varepsilon = E_v / A$$

střední vazebná energie, v podstatě je to energie potřebná k uvolnění jednoho nukleonu z jádra

Excitační energie jádra je o 5 - 6 řádů větší než excitační energie el. obalu.

Příklad: ^{12}C (6 p, 6 n), $m_p = 1,672622 \cdot 10^{-27}$ kg; $m_n = 1,674927 \cdot 10^{-27}$ kg; $m_e = 9,109382 \cdot 10^{-31}$ kg; $c = 2,997924 \cdot 10^8$ m.s $^{-1}$; $u = 1,660539 \cdot 10^{-27}$ kg

$$\text{teoretická } m(^{12}\text{C}) = 6 m_p + 6 m_n + 6 m_e =$$

$$2,009076 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

$$\text{skutečná } m(^{12}\text{C}) = 12 \text{ u} = 1,992647 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

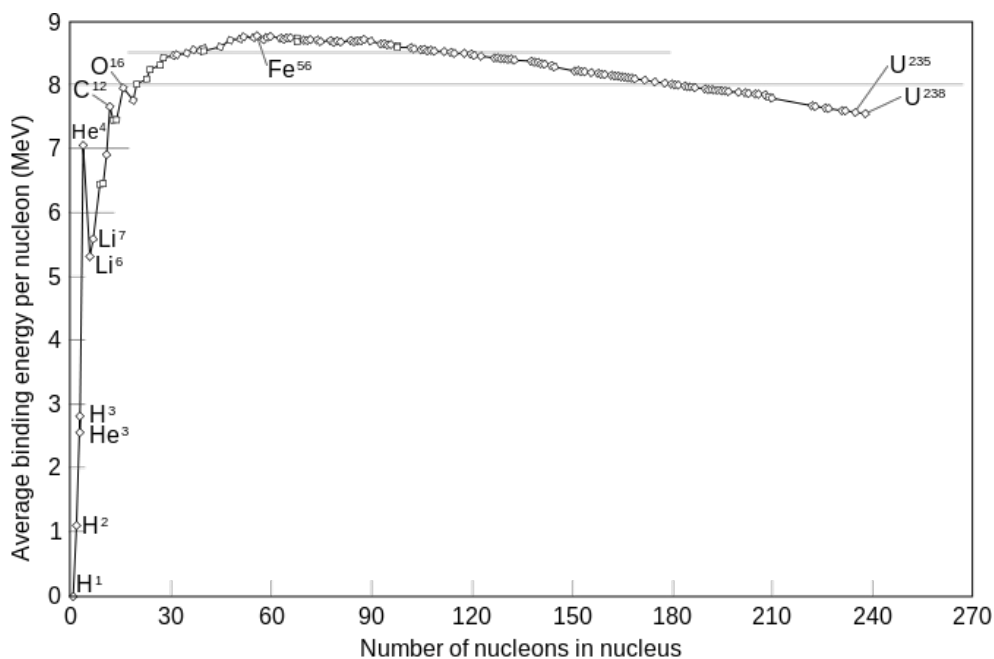
$$\Delta = 1,992647 \cdot 10^{-26} - 2,009076 \cdot 10^{-26} = -1,642916 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

$$E_v = 1,642916 \cdot 10^{-28} (2,997924 \cdot 10^8)^2 = 1,4736 \cdot 10^{-11} \text{ J} =$$

$$1,4736 \cdot 10^{-11} / 1,602 \cdot 10^{-19} = 92 \text{ MeV}$$

$$\epsilon = 9,2 \cdot 10^7 / 12 = 7,7 \text{ MeV}$$

Zajímavost: Při vzniku 12 g ^{12}C z p a n, by se uvolnilo $1,4736 \cdot 10^{-11} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} = 8,9 \text{ TJ}$, rozštěpením 12 g uranu se uvolní asi 1 TJ.



Izotopové efekty:

- $^1\text{H}_2\text{O}$, $^2\text{H}_2\text{O}$, $^3\text{H}_2\text{O}$ či $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$
- střední rychlost molekul: $v = \sqrt{(8kT/mn)}$
- frekvence vibrace (těžší iz. menší frekv.): $\sqrt{((m_1+m_2)/m_1 \cdot m_2)}$
- jiná t_t , t_v , rychlost difúze, rychlost chemické reakce

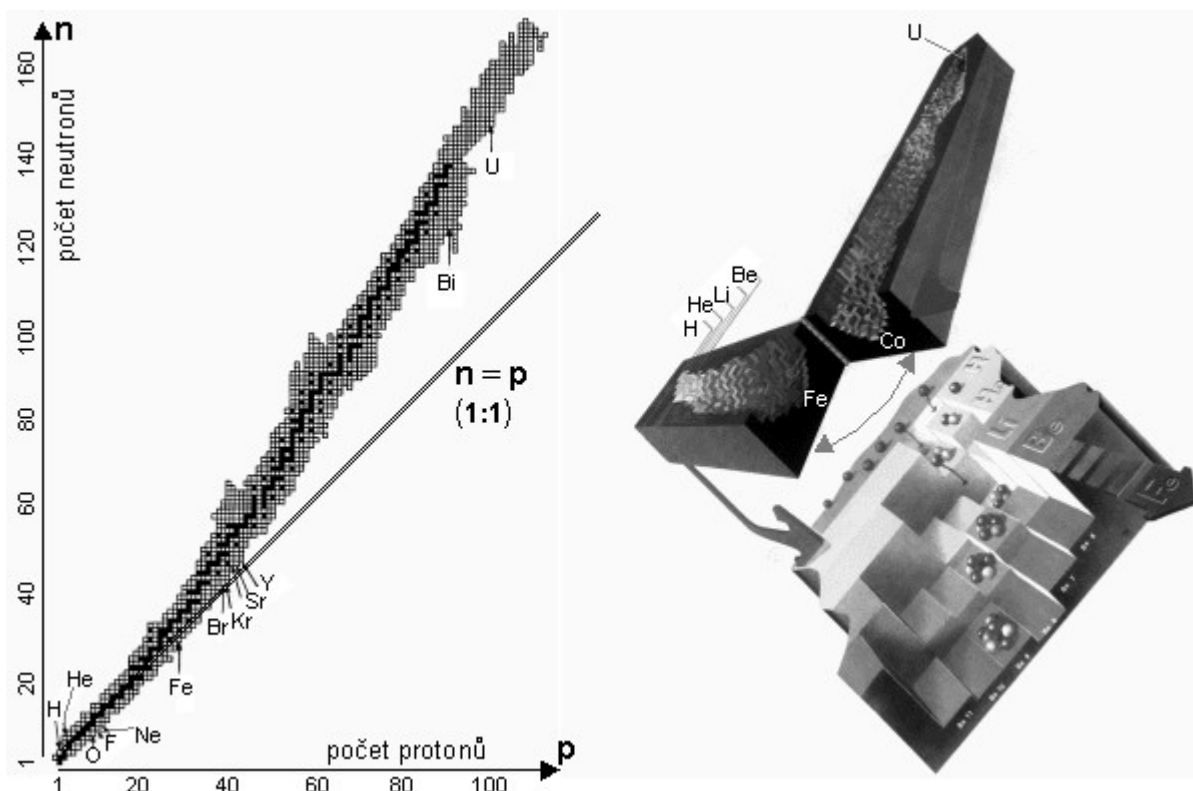
Příklad: $t_v^{2\text{H}_2\text{O}} = 101,42 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_t = 3,82 \text{ }^\circ\text{C}$

3. Radioaktivita

> 2000 nuklidů; 266 stabilních

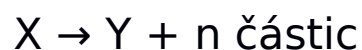
Radioaktivita – samovolná přeměna na jiný nuklid (neplatí pro deexcitaci jádra).

Pro $Z \leq 20$ je $N / Z \approx 1$, poté postupně až **1,52** pro ^{209}Bi , přebytek neutronů zmenšuje odpuzování protonů.



Vlevo: Jednoduchá dvojrozměrná mapa nuklidů. **Vpravo:** Trojrozměrná mapa včetně vazbových energií.

Při radioaktivní přeměně se **uvolňuje energie**.



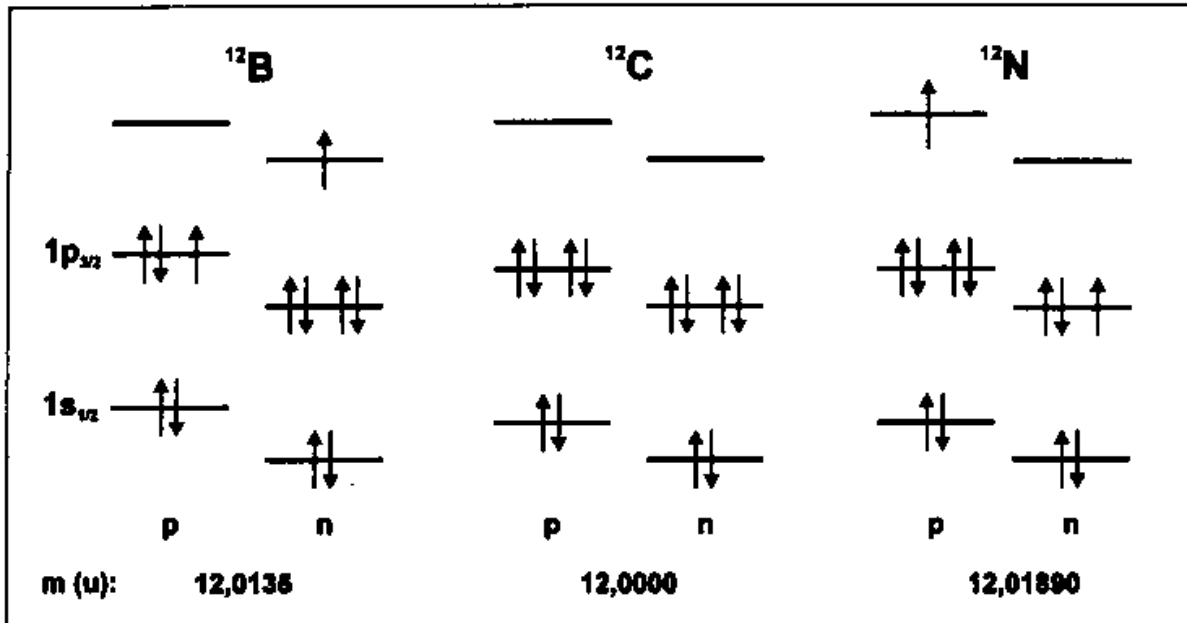
Základní hmotnostní podmínka radioaktivity:

$$M(X) > M(Y) + M(\text{ČÁSTIC})$$

Energie uvolněná při radioaktivní přeměně:

$$E_{\text{přeměny}} = E_{\text{kin}}(Y) + E_{\text{kin}}(\text{ČÁSTIC}) + E_{\gamma}$$

Stabilita atomových jader vyplývá z hladinového modelu:



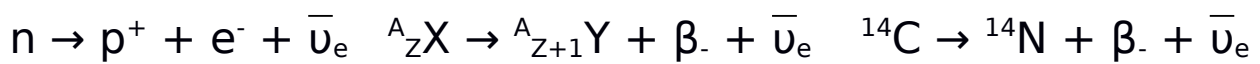
Obrázek 9: Souvislost nestability jádra vůči přeměnám β s nukleonovou konfigurací.

Skupiny radioaktivních přeměn:

1. **mění se Z** při konstantním A (β^- , β^+ , EZ)
2. **mění se Z i A** (α , emise nukleonů, emise těžších jader ¹⁴C, ²⁴Ne, SŠ)
3. **deexcitace jádra** (γ emise okamžitá či zpožděná, vnitřní konverze)

Druhy radioaktivních přeměn:

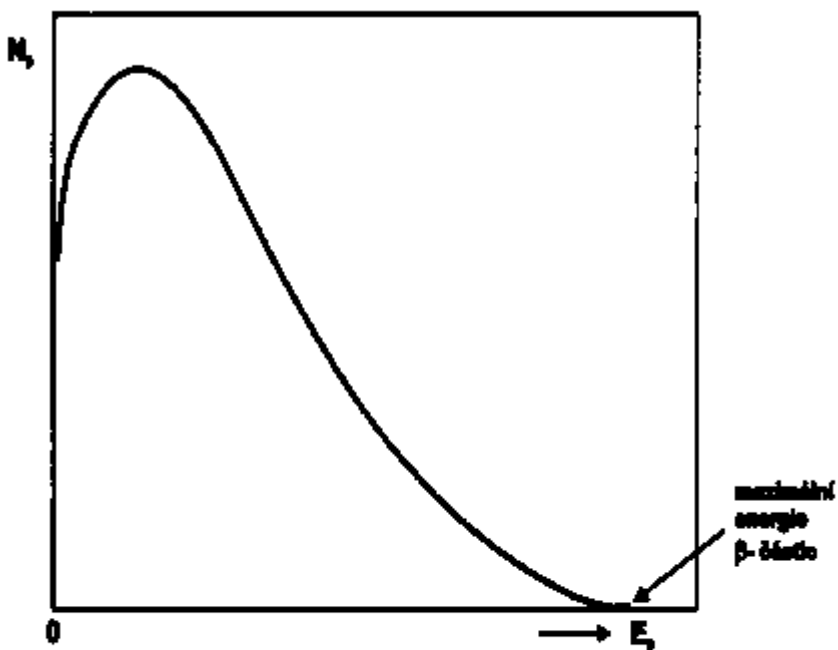
A) Přeměna β .



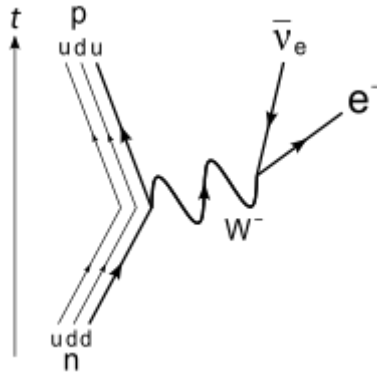
měříme



Energie se rozdělí mezi jádro (málo), elektron a ν_e náhodně, spektrum je proto spojité.



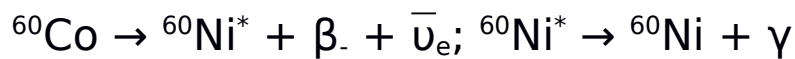
Obrázek 12: Energetické spektrum β^- částic.



Jádro Y vzniká:

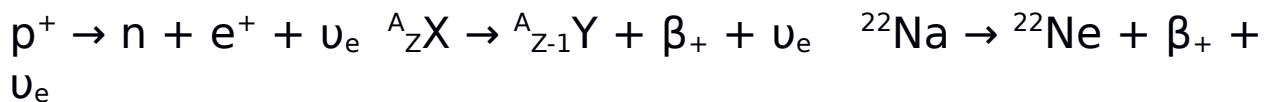
a) v základním stavu ${}^3\text{H}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$, ${}^{35}\text{S}$

b) v excitovaném stavu (poté dochází k emisi 1 či více γ)



Může vznikat i směs a) a b)

B) **Přeměna β_+**

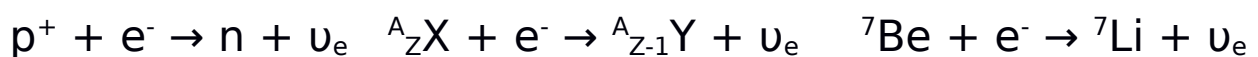


Platí stejné energetické zásady jako u β_- přeměny (spojité spektrum apod.).

Čistý β_+ rozpad je vzácný, většinou probíhá spolu s elektronovým záchytem (EZ). Měří se pomocí anihilačních fotonů a ionizačních účinků e^+ :



C) **Elektronový záchyt (EZ)**

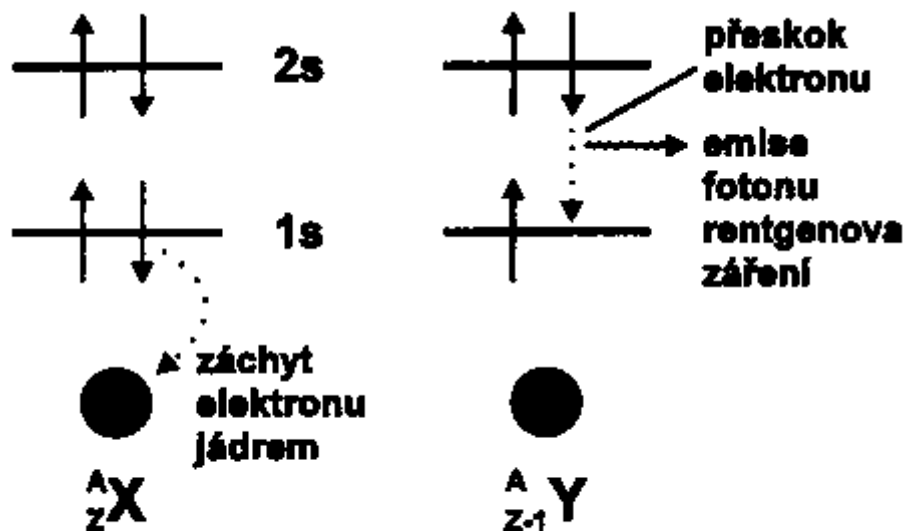


Po EZ dochází k následným dějům, pomocí kterých se tato radioaktivita měří: zaplňování vakancí ve slupkách K či L → **emise RTG fotonů** či Augerových elektronů (elektrony vyražené RTG zářením z vyšších slupek elektronového obalu, mají diskrétní energii)

$$E_{\text{aug}} = E_{\text{RTG}} - E_{\text{vaz.}}$$

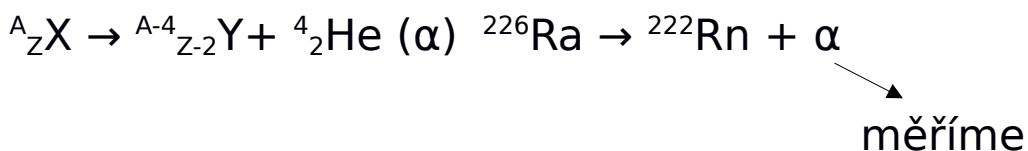
Měří se RTG fotony.

Použití v medicíně: ^{13}N , ^{15}O , ^{11}C

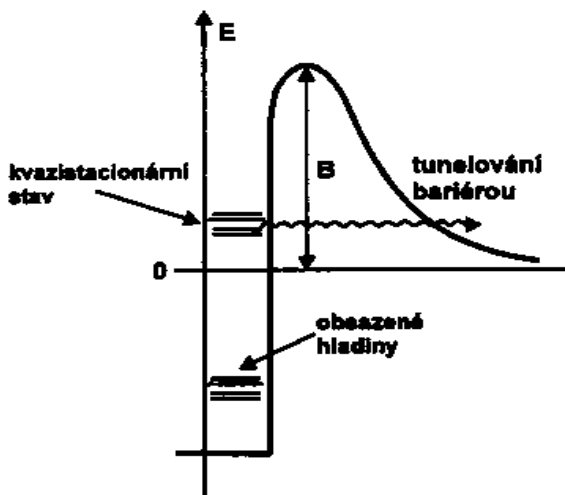


Obrázek 13: K výkladu elektronového záchytu.

D) Přeměna α



Alfa částice je velice stabilní, a proto je její emise výhodná, zvláště u těžších prvků.



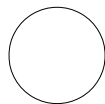
Obrázek 14: Mechanismus přeměny α .

($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $h = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$)

Na rozdíl od spektra β je spektrum α čarové ale stejně jako při β rozpadu vzniká část jader excitovaná.

Odrazová energie jádra Y:

$E_Y = Q(\alpha) m(\alpha) / (m(Y) + m(\alpha))$ kde $Q(\alpha) = 931,5 (m(X) - m(Y) - m(\alpha))$



Y



α



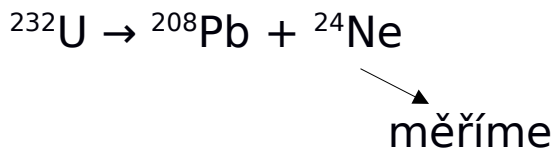
2% $Q(\alpha)$

98% $Q(\alpha)$

$E_\alpha \approx 5 \text{ MeV}$, $E_Y \approx 100 \text{ keV}$

U přeměny β a emise γ je odrazová energie mnohem menší (řádově 10^1 eV). Zde odrazová energie způsobuje ztrátu části orbitálních elektronů, vzniká ion s velkým kladným nábojem, což vede k rozrušení chemických vazeb v dané sloučenině.

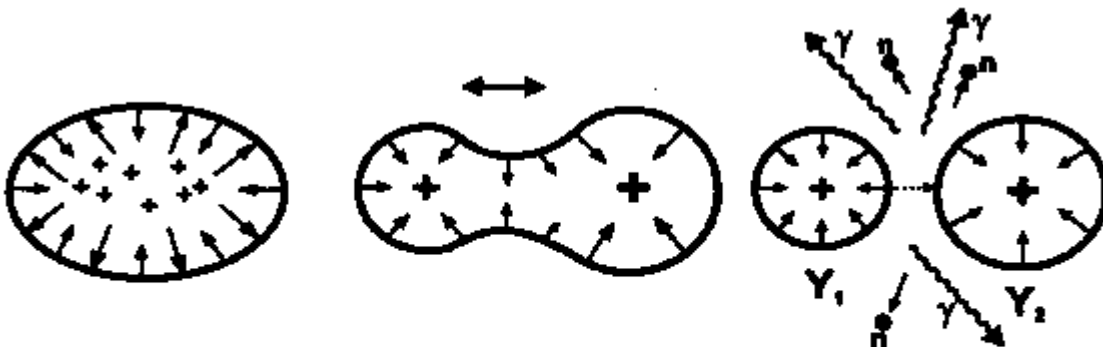
E) Emise těžších jader



Obdoba α rozpadu.

F) Samovolné štěpení (SŠ)

Je-li splněna hmotnostní podmínka, rozštěpí se jádro těžší na dvě lehká plus dva až tři neutrony. Existuje ale i bezneutronové štěpení.



Obrázek 16: Průběh samovolného štěpení jádra.

Vysvětlení: hladinový model: emise těžké částice, obdoba emise α částice
kapkový model: zvětšení povrchu, zúžení, vznik stabilních zárodků, zaškrcení, rozštěpení

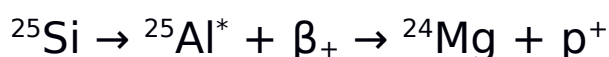
Většinou SŠ konkuruje α přeměna, která je na rozdíl od SŠ velice rychlá. V excitovaném stavu jde SŠ snadněji, protože jádro je deformovanější.

Příklad: $T_{1/2}$ SŠ **pro excitované jádro** $^{240}\text{Pu} = 8 \mu\text{s}$, pro jádro **v základním stavu** $1,2 \cdot 10^{11}$ roků.

Použití: ^{252}Cf – jako zdroj neutronů se kterými se ozařují nádory

G) Emise nukleonů

Normálně nemožná (jen na hranici existence jádra). Možná je spíše zpožděná emise nukleonů z excitovaného jádra.



H) Větvené přeměny

- 1) α / β
- 2) $\alpha / \text{SŠ}$
- 3) α / EZ
- 4) β_+ / EZ
- 5) β_- / EZ

Současně můžou probíhat i více jak 2 přeměny naráz. Každý děj probíhá vlastní rychlostí. Celkový úbytek nuklidu je řízen nejrychlejším dějem.

I) Přeměna γ a vnitřní konverze

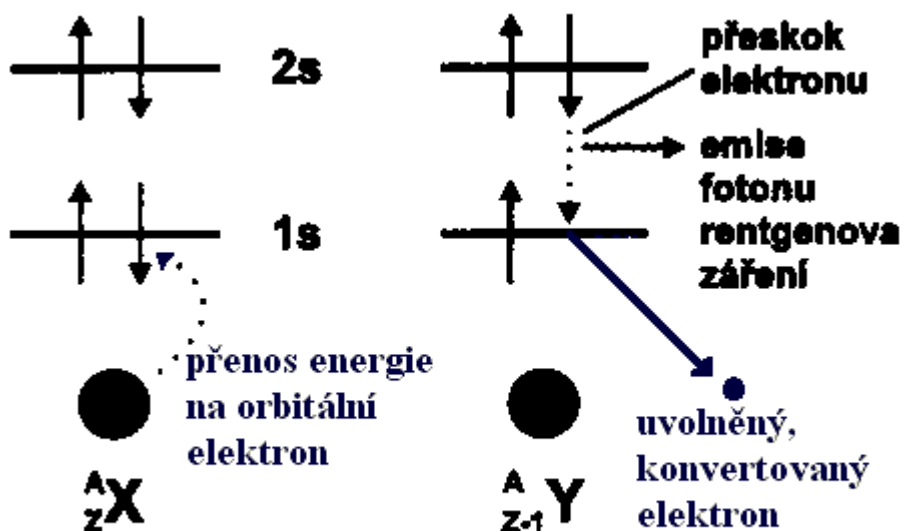
Po radioaktivní přeměně vzniká jádro většinou v excitovaném stavu. **Foton má spin $I = 1$** a proto změna spinu o 1 je nejpravděpodobnější a dochází k „okamžité emisi γ záření.“

Rychlost přeměny: $\Delta I = 1$, $T_{1/2} = 10^{-16} - 10^{-10}$ s, $\Delta I = 2$, $T_{1/2} = 10^{-11} - 10^{-4}$ s

Dále existuje „zpožděná emise γ záření“ $\Delta I > 2$ (zakázaný přechod) $T_{1/2} = 10^{-3}$ s - roky, daný nuklid se pak nazývá **jaderný izomer**.

Příklad: $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba} + \beta^- + \nu_e$; $^{137\text{m}}\text{Ba} \rightarrow ^{137}\text{Ba} + \gamma$
 $T_{1/2} = 30,1$ roků $T_{1/2} = 2,7$ minut

vnitřní konverze: Je to přímý a nezářivý přenos excitační energie jádra na orbitální elektron.



Konvertované elektrony mají diskrétní spektrum:

$$E_{\text{kon}} = E_{\text{exc}} - E_{\text{vaz. el.}}$$

Je-li $\Delta I = 0$ pak VK je jediný možný proces, protože **emise není v tomto případě možná**.

Kinetika radioaktivních přeměn:

- za dostatečně krátký časový interval se přemění vždy stálá část z přítomného počtu (N) atomů radioaktivního nuklidu (radionuklidu)

$$\frac{dN}{N} / dt = \lambda$$

λ [s^{-1}] – přeměnová konstanta

Př. $\lambda = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ – z přítomného počtu RN se přemění každou sekundu 1 / 1000 atomů



Rychlost přeměny **závisí na:**

- výchozím a konečném stavu jádra
- vlnové funkci obou jader
- na parametrech slabé, silné a elektromagnetické interakce.

nezávisí na:

- tlaku, teplotě, koncentraci, chemické formě

Výjimka: U EZ a vnitřní konverze.

$\lambda_{\text{slouč.}} < \lambda_{\text{kov}}$ př: u ${}^7\text{Be}$ $\lambda(\text{BeF}_2) < \lambda_{\text{kov}}$ o 0,1 %

Střední doba života: $\tau = 1 / \lambda$

Aktivita: rychlost přeměny radioaktivního nuklidu

$$A = dN / dt$$

$$A = \lambda N$$

- **závisí na počtu radioaktivních atomů** v radioaktivní látce
- rozměr s^{-1}
- jednotka 1 becquerel (Bq), násobné kBq, MBq, GBq apod.
- **měrná aktivita:** vztaženo na m, V, c apod.

- maximální možná molární aktivita $A = \lambda N = \lambda N_A$ [Bq . mol⁻¹]

Časová změna aktivity:

$$-dN / dt = \lambda N \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$



- aktivita RN klesá s časem exponenciálně, rychlost poklesu je dána konstantou λ .

Poločas přeměny: $A = A_0 / 2 \rightarrow$

$$A_0 / 2 = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$1 / 2 = e^{-\lambda t}$$

$$\ln(1 / 2) = -\lambda t$$

$$-\ln 2 = -\lambda t$$

$$t = \ln 2 / \lambda$$

$$\mathbf{T_{1/2} = \ln 2 / \lambda}$$

Měření poločasu rozpadu z úbytku aktivity lze jen u krátkodobě žijících radionuklidů. Jinak se poločas rozpadu počítá z aktivity radionuklidu o známé hmotnosti (měrné aktiviy).

Radionuklid o hmotnosti m obsahuje: $N = nN_A$

$$N = (mN_A) / A_r$$

$$\mathbf{A = (\lambda m N_A) / A_r}$$

Pak z λ spočítáme $T_{1/2}$, popřípadě se znalostí λ spočítáme m .

Příklad využití vztahu $A = A_0 e^{-\lambda t}$:

- uhlíková metoda ^{14}N (n, p) ^{14}C
- ^{14}C se během minut až hodin oxidují na CO_2
- rozdělení mezi rostliny, organismy, oceány
- rovnováha 15,3 přeměny za minutu v 1g C živé hmoty
- po smrti konec rovnováhy, citlivost asi do 50 000 roků ($T_{1/2} = 5,7$ tisíc roků)
- měří se dřevo, uhlíky, textil, kůže
- moderní metoda: urychlovačová hmotnostní spektrometrie, použitelná až do 100 000 roků
- stačí i 0,05 mg vzorku, ve vakuu se vzorek bombarduje ionty Cs^+ za vzniku $^{14}\text{C}^-$ (izobarický ^{14}N záporné ionty netvoří) poté se ionty $^{14}\text{C}^-$ dostávají do prostoru s Ar, vzniká $^{14}\text{C}^{3+}$ a vstupují do hmotnostního spektrometru.
- stejná metoda se používá ke stanovení obsahu př.: ^{10}Be (mořské sedimenty, polární led), ^{36}Cl a ^{129}I (podzemní vody), ^{27}Al (mořské sedimenty).

Příklad: Maximální měrná aktivita pro glycin $\text{NH}_2 - \text{CH}_2 - ^{14}\text{COOH}$

$$T_{1/2} = 5760 \text{ r} = 1,818 \cdot 10^{11} \text{ s}; N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

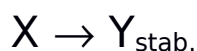
$$\lambda = \ln(2) / T_{1/2} = 3,813 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}; A \text{ (molární, maximální)} =$$

$$\lambda N_A = 3,813 \cdot 10^{-12} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} = 2,3 \cdot 10^{12} \text{ Bq} \cdot \text{mol}^{-1} = 2,3$$

$$\text{TBq} \cdot \text{mol}^{-1} = \mathbf{2,3 \text{ GBq} \cdot \text{mmol}^{-1}}$$

Z katalogu SIGMA: glycin ^{14}C 0,3 – 2,0 GBq . mmol⁻¹

Kinetika hromadění stabilního produktu radioaktivní přeměny:



$$-dN_X / dt = dN_Y / dt$$

Na počátku ($t = 0$) $N_{X,0}$ atomů X a 0 atomů Y pak v čase t platí:

$$N_{X,0} = N_X + N_Y$$

$$N_X = N_{X,0} e^{-\lambda t} = (N_X + N_Y) e^{-\lambda t}$$

Pro počet atomů N_Y vzniklých za čas t platí:

$$N_X / e^{-\lambda t} = N_X + N_Y$$

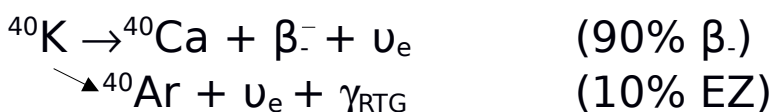
$$N_Y = N_X / e^{-\lambda t} - N_X$$

$$N_Y = N_X e^{\lambda t} - N_X$$

$$\mathbf{N_Y / N_X = e^{\lambda t} - 1}$$

Použití: Při určování stáří nerostů. Nuklid musí mít velký $T_{1/2}$ (^{40}K , ^{87}Rb , ^{238}U atd.), okamžik krystalizace $t = 0$.

Nejznámější je metoda **draslík-argonová**: roztavení materiálu a stanovení ^{40}Ar pomocí hmotnostní spetrometrie.



Kinetika hromadění radioaktivního produktu radioaktivní přeměny:



X mateřský radionuklid, Y dceřinný radionuklid
Celková změna počtu atomů Y v čase je:

$$dN_Y / dt = \lambda_X N_X - \lambda_Y N_Y$$

Pro počet atomů Y v čase t platí:

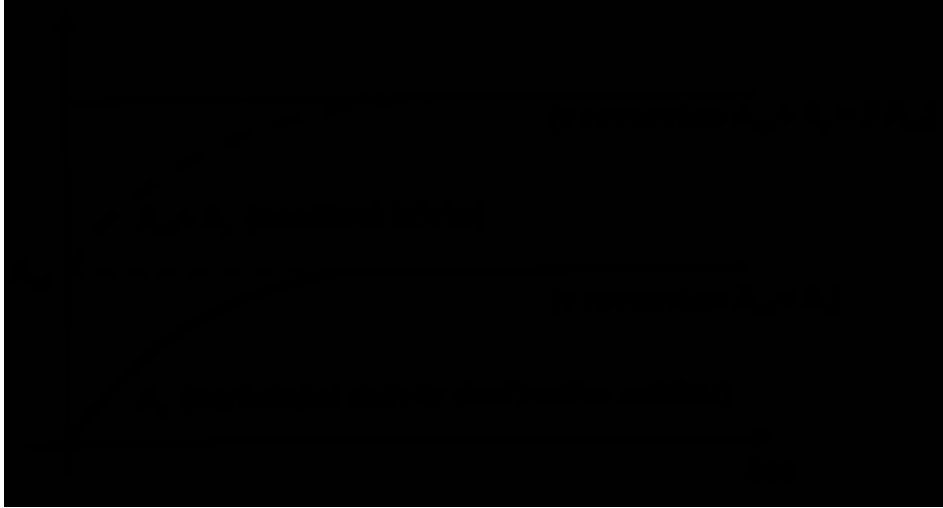
$$N_Y = N_{X,0} \lambda_X / (\lambda_Y - \lambda_X) (e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_Y t})$$

Jestli $T_{1/2}X \gg T_{1/2}Y$ ($\lambda_X \ll \lambda_Y$) pak se vztah zjednodušuje na:

$$A_Y = A_{X,0}(1 - e^{-\lambda_Y t})$$

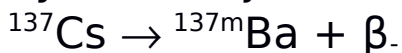
Za dostatečně dlouhou dobu (vůči $T_{1/2} Y$) pak platí:

$$A_Y = A_{X,0}$$



To znamená že po uplynutí určité doby (10ti násobek $T_{1/2} Y$) se vytvoří v původně čistém nuklidu X dceřinný nuklid Y o stejné aktivitě – tzv. **trvalá radioaktivní rovnováha**.

Významné jsou některé produkty štěpení uranu:



V přírodě najdeme trvalé radioaktivní rovnováhy v radioaktivních řadách. Existují 3 a to **uran-radiová** (${}^{238}\text{U} - {}^{206}\text{Pb}$), **thoriová** (${}^{232}\text{Th} - {}^{208}\text{Pb}$) a **uran - aktiniová** (${}^{235}\text{U} - {}^{207}\text{Pb}$).

Přechodná radioaktivní rovnováha: Mateřský nuklid má sice větší poločas rozpadu ale srovnatelný s dceřiným nuklidem ($\lambda_X < \lambda_Y$; $T_{1/2} X > T_{1/2} Y$).

$$A_Y = A_X \lambda_Y / (\lambda_Y - \lambda_X)$$
$$A_Y / A_X = \lambda_Y / (\lambda_Y - \lambda_X)$$

Poměr A_Y / A_X je konstantní, maximální aktivity je dosaženo v čase:

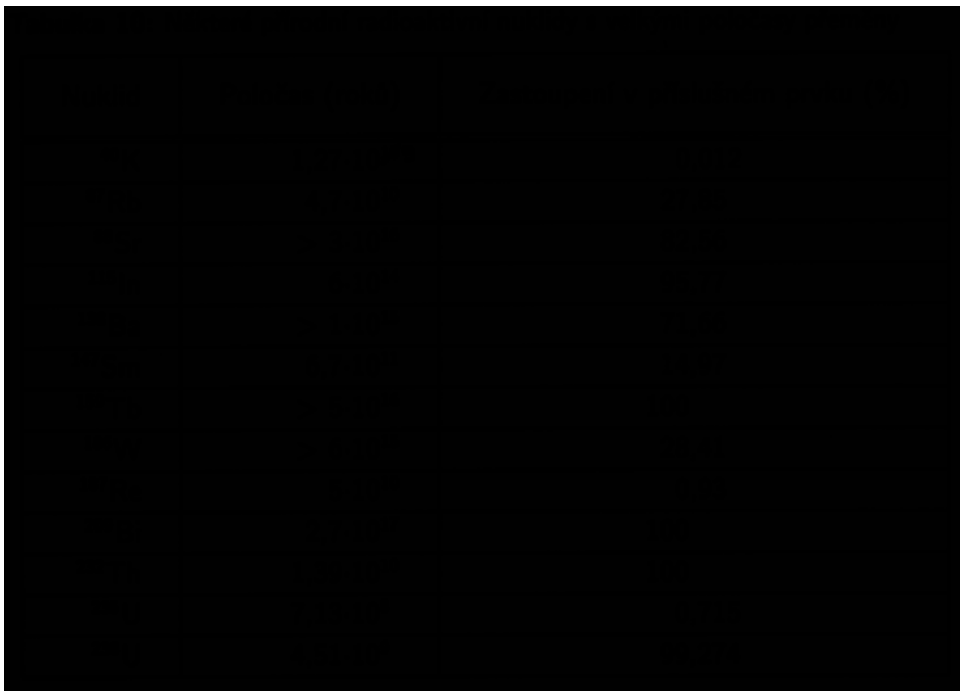
$$t = 1 / (\lambda_Y - \lambda_X) \ln (\lambda_Y / \lambda_X)$$

Generátory radioaktivních nuklidů: Kolonka sorbentu s pevně zachycenou vhodnou formou mateřského nuklidu, ve vhodné době se dceřiný nuklid s kolonky vymyje.



Přírodně se vyskytující radioaktivní prvky: přírodní X
umělé (není mezi nimi rozdíl)

1. **$T_{1/2} > 10^8$ roků**, vznikly při syntéze prvků ve vesmíru



2. **$T_{1/2} < 10^8$ roků**, vznikají jako produkty přeměny mateřských nuklidů z radioaktivních řad a jadernými reakcemi v zemské atmosféře působením kosmického záření (^3H , ^{14}C , ^{10}Be aj.)

4. Vlastnosti ionizujícího záření

Energie záření (γ , β , α apod.) keV – MeV, ionizační energie atomů a molekul < 25 eV proto **ionizující záření**.



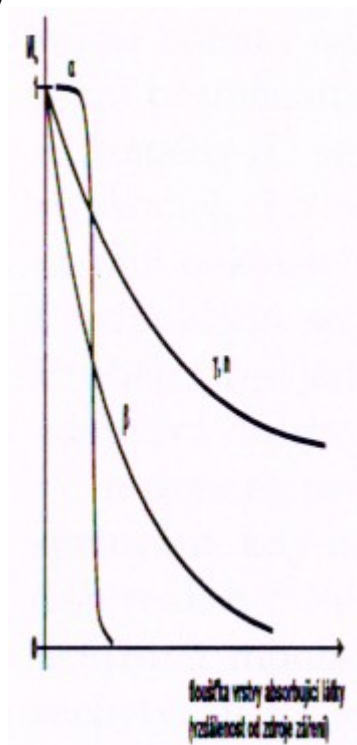
Rychlost asi $10^{-16} - 10^{-15}$ s, poměr a) a b) 1:2, elektrony způsobují další sekundární ionizaci a excitaci. **Excitace je mnohonásobná a do vysokých excitačních stavů** (na rozdíl od UV)

Pojmy a veličiny: ionizující záření, jaderné záření (pouze při radioaktivních přeměnách), radioaktivní záření (nesprávné, záření není radioaktivní {kromě n})

Absorpce záření – postupné odevzdávání energie až do stavu kdy už není schopno dále ionizovat

Dosah záření – tloušťka vrstvy, která úplně absorbuje záření

Absorpční křivky



Dávka záření – energie sdělená ionizujícím zářením (energie získaná od všech primárně i sekundárně ionizujících částic) malému objemu látky

$$D = d\varepsilon / dm$$

Rozměr je $J\ kg^{-1}$, jednotkou Gray (**Gy**), $1\ Gy =$ energie **1 J** absorbovaná v **1 kg** látky.

Rozsah dávek:

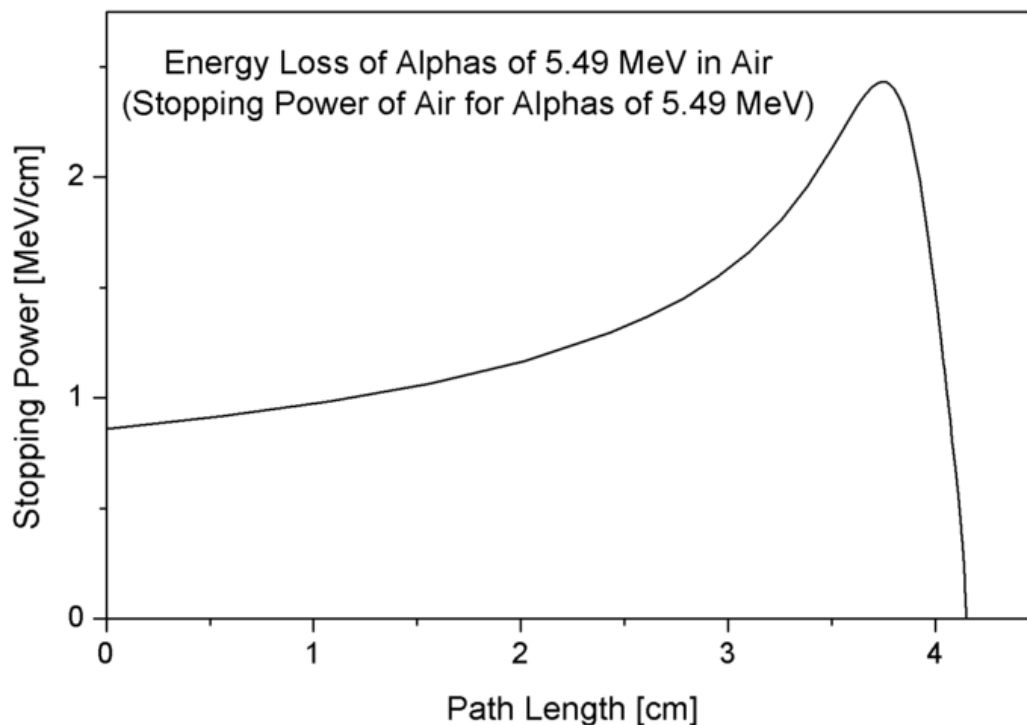
- 10^{-6} – 10^{-2} Gy při monitorování dávek v životním prostředí
- 10^{-4} – 1 Gy při monitorování dávek u profesionálních pracovníků se zářením
- 10^{-1} – 10^2 Gy v léčebném použití záření
- 10^{-1} – 10^4 Gy v radiobiologii
- 10^2 – 10^5 Gy v radiační chemii a technologii.

Dávkový příkon – rychlost s jakou je látce energie sdělována, rozměr $W\ kg^{-1}$, jednotka $Gy\ s^{-1}$

$$\bar{D} = dD / dt$$

Lineární přenos energie – používá se při posuzování biologických účinků IZ a udává **rozložení sdělené energie podél dráhy částice**, rozměr $J m^{-1}$, běžně $keV \mu m^{-1}$

$$L = dE / dx$$



(tzv Braggova křivka)

Lineární přenos energie ve vodě pro různé druhy záření

záření	keV, μm^{-1}
γ záření ^{60}Co (1,17 a 1,31 MeV)	0,22
rtg záření (200 keV)	1,7
rtg záření (50 keV)	6,3
elektrony (záření β) (1–2 MeV)	0,2
elektrony (10 keV)	0,3
elektrony (100 eV)	20
protony (10 MeV)	4,7
záření α (5 MeV)	40
jádra vzniklá jaderným štěpením (100 MeV)	1800

Mechanismus ztráty energie záření:

α : (těžké nabitě částice): krátký, ostře definovaný dosah, ionizace po většinu dráhy stejná pak ostrý pokles k 0 (zachycení elektronů a vznik He), dosah ve vzduchu několik cm, v kapalinách desítky μm , lineární ionizace je největší před koncem dráhy (viz Braggova křivka)

β : L je menší než u α , menší náboj a při stejné energii větší rychlost $v = \sqrt{2E/m}$, má proto větší pronikavost a dosah, v plynech metry, kapaliny milimetry:

Tabulka: Dosah (mm) β záření čtyř radionuklidů v různých materiálech

nuklid	E_{max} (MeV)	vzduch	voda	hliník
^3H	0,018	5,2	0,008	0,0026
^{35}S	0,167	101	0,158	0,119
^{131}I	0,81	2310	3,63	1,15
^{32}P	1,71	5860	9,18	2,91

Absorpční křivka (viz Absorpční křivky nahoře) má exponenciální průběh:

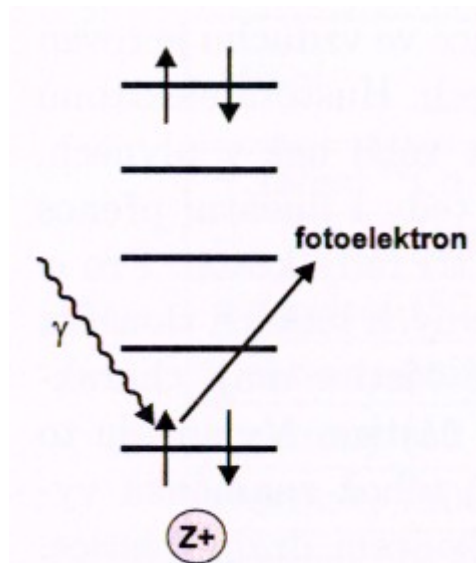
$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Kde d je tloušťka absorbující vrstvy v m a μ je lineární absorpční koeficient v m^{-1} , závisí na hustotě elektronů absorbujícího prostředí a energii β záření.

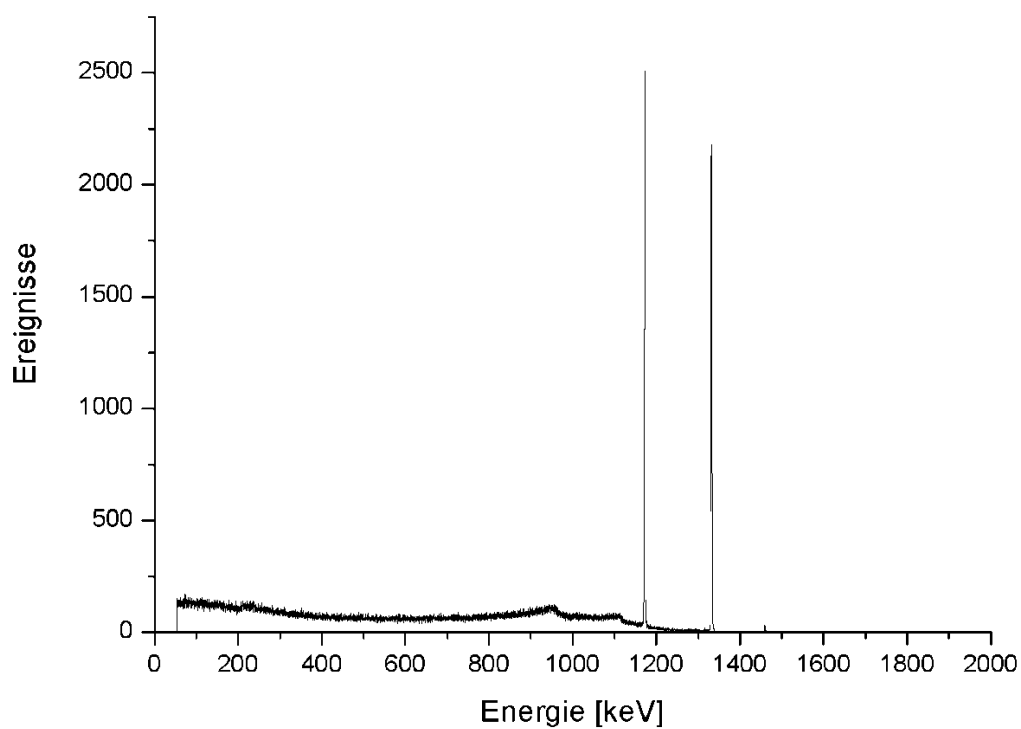
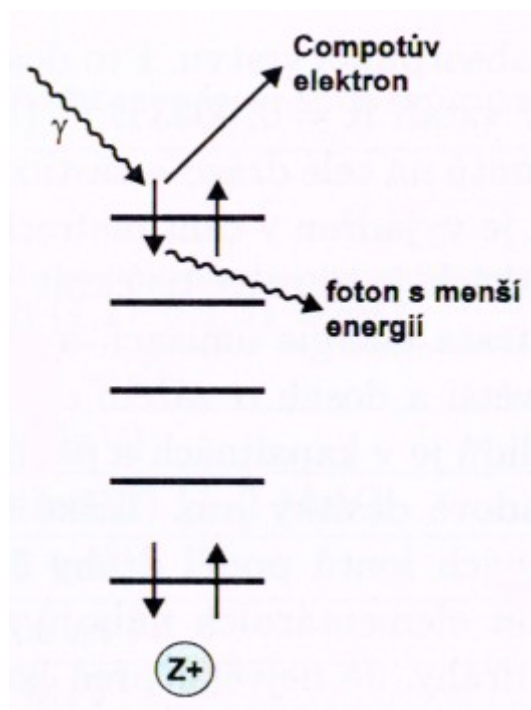
Další možnosti ztráty energie β záření - **brzdné záření** - při průniku až k jádru, dochází v elektrickém poli k vyzařování spojitého RTG záření (0,1 - 0,4 nm = 60 - 250 keV), uplatňuje se při velké energii β záření a velkém Z . **Čerenkovovo** záření vzniká je-li $v_\beta > c/n$, vzniká rázová elektromagnetická vlna - světelný záblesk. Ve vodě dochází pro $E_\beta > 0,26$ MeV.

γ : Ionizuje nepřímo účinkem sekundárních elektronů, tři děje:

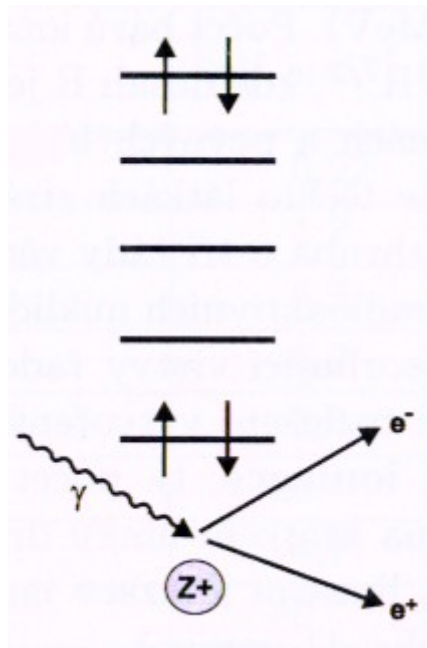
- a) **fotoefekt** - pro $E_\gamma < 0.1$ MeV, na elektron uvnitř obalu se přenese celá energie fotonu, pravděpodobnost silně závisí na Z a E_γ ($\sim Z^5 / E_\gamma^{3.5}$), doprovázen RTG emisí (zaplňování slupek)



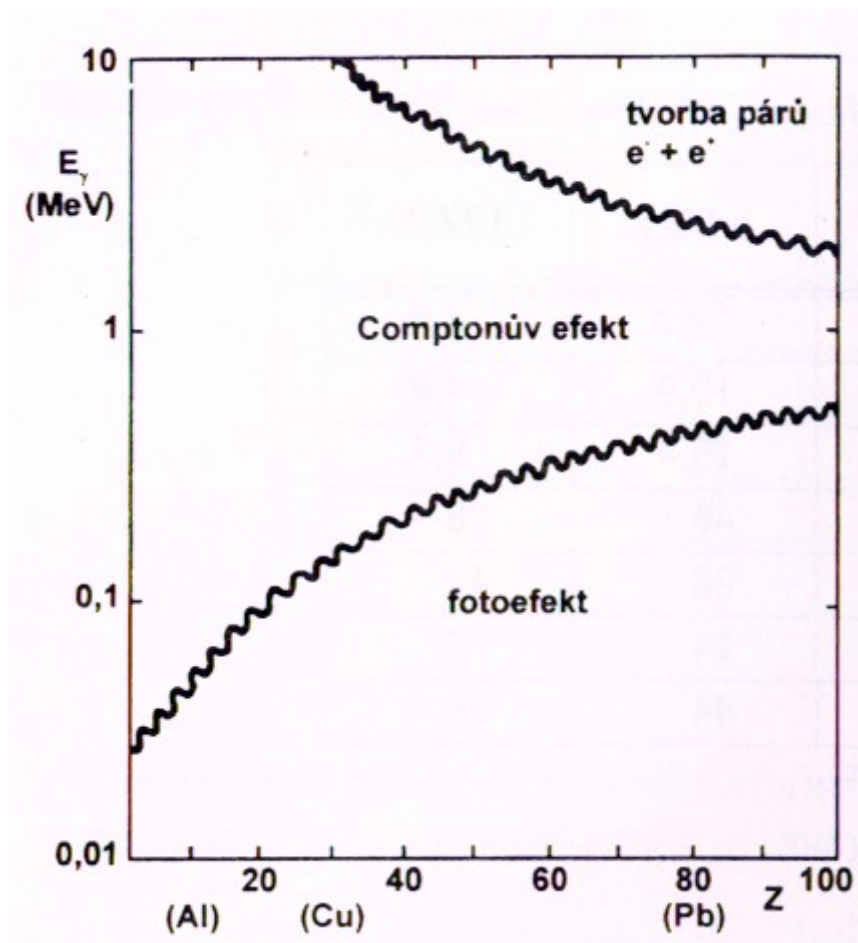
- b) **Comptonův rozptyl** - pro E_γ 0,1 - 2 MeV, interakce s orbitálními elektrony, foton předá část své energie a uvolňuje jej z atomu (Comptonův elektron), atd. (zmenšuje se E_γ a směr γ se mění, až zanikne fotoefektem), pravděpodobnost $\sim Z / E_\gamma$



- c) **tvorba párů** – v blízkosti atomového jádra a pro $E_\gamma > 1,02 \text{ MeV}$, dochází ke vzniku páru e^- a e^+ , pravděpodobnost $\sim Z^2 / E_\gamma$, pozitrony zanikají anihilací



Uplatnění těchto 3 dějů:



Lineární ionizace je malá a dosah γ proto velký, nelze jej běžně určit. Zeslabení svazku γ se řídí vztahem:

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Kde μ (lineární absorpční koeficient) zahrnuje všechny tři děje a závisí proto na Z a E_γ . Pronikavost γ se vyjadřuje pomocí **polotloušťky** - vrstva zeslabující počáteční intenzitu záření na 1/2.

$$\begin{aligned}
 I = I_0 / 2 &\rightarrow I_0/2 = I_0 e^{-\mu d} \\
 1/2 &= e^{-\mu d} \\
 \ln(1/2) &= -\mu d \\
 -\ln 2 &= -\mu d \\
 d &= \ln 2 / \mu \\
 \mathbf{d_{1/2} = \ln 2 / \mu}
 \end{aligned}$$

Tabulka: Polotloušťky (cm) pro absorpci γ záření v některých látkách

E_γ (MeV)	voda	beton	olovo
0,1	42	17	0,15
0,5	72	34	4
1,0	98	46	9,3
5,0	230	110	15

Pro vzduch pro 0,1 MeV 35 m, pro 1,0 MeV 90 m.

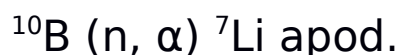
n: energii ztrácí srážkami s atomovými jádry, k účinnému zpomalení dochází při srážce s lehkými jádry (nejlépe ^1H),

$$\Delta E = E (4 m M) / (m + M)^2$$

po zpomalení na energii $\sim 10^{-2}$ eV (tepelné neutrony) zanikají jadernou reakcí, stejně jako u γ nemá n záření

definovaný dosah, μ závisí na účinném průřezu (σ rozměr m^2 , závisí na energii projektilu a druhu jaderné reakce) záchytu neutronů jádru absorbující látky.

Pronikavost n se vyjadřuje opět pomocí **polotloušťky**. Ionizační účinky jsou nepřímé a jsou způsobeny částicemi, které vznikají jadernou reakcí při záchytu neutronu.



Při srážce s H (živé organismy) $\Delta E = E$, vyražení p z H atomu se značnou E_{kin} a velkým lineárním přenosem energie, **nebezpečné pro živé organismy**.

Zdroje IZ:

- aparaturní – záření vzniká jen během provozu zařízení
- radionuklidové – emitují záření nepřetržitě

Zdroje γ a RTG záření: γ : ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir ; RTG: RTG lampy, ^{109}Cd , radionuklidy generující brzdné záření při absorpci β záření, urychlovače elektronů

Zdroje elektronů: ^{90}Sr / ^{90}Y , ^3H , ^{147}Pm ; urychlovače elektronů

Zdroje pozitronů: ^{22}Na , ^{68}Ge

Zdroje těžkých kladných částic: α : ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Am , urychlovače částic

Zdroje neutronů: radionuklidové zdroje založené na reakci (α, n) a samovolném štěpení, neutronový generátor ($^3\text{H} (d, n) ^4\text{He}$), jaderný reaktor

Ochrana před IZ:

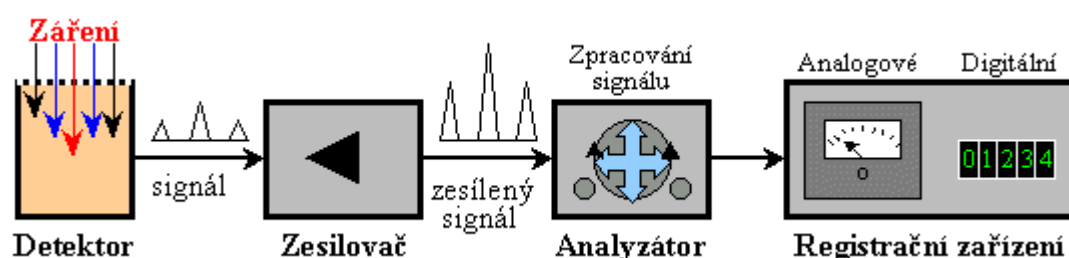
Spočívá v zeslabení dávky záření na hodnotu, při níž je riziko pro lidský organismus sníženo na zanedbatelnou hodnotu.

Metody ochrany před IZ:

- a) udržováním patřičné **vzdálenosti** od zdroje záření $\sim 1 / d^2$ (důležité u γ záření)
- b) **odstíněním** záření (všude kromě α záření, u β stačí 1 - 2 cm skla, plexiskla, u γ olovo, železobeton, beton s barytem (BaSO_4 - těživec), pozitrony se stíní jako γ , stejně se stíní γ při reakci pomalých neutronů s jádry atomů, neutrony se zpomalují př. parafínem)
- c) nejkratší **dobou** pobytu v prostoru kde záření působí

5. Metody detekce IZ

- IZ není vnímatelné lidskými smysly
- registruje se na základě dějů, které vyvolává při absorpci ve vhodné látce
- důsledky těchto dějů se elektronicky převádějí na pozorovatelné signály
- elektronický způsob detekce vyžaduje zařízení sestávající z několika částí
- část citlivá na záření se nazývá detektor záření (energie záření se mění na elektrické či optické signály a dále se zpracovávají (zesílení, integrace)
- zpracované signály se přivádějí na registrační jednotku (pulsní {zobrazují se přímo impulsy} či integrující režim {počet impulsů za čas} tzv. dozimetry - udávají dávkový příkon př. $\mu\text{Gy hod}^{-1}$)



- zařízení, které rozlišuje energii záření podle výšky impulsů - spektrometr záření
- chyba měření vzorku je tím menší, čím větší počet impulsů zaznamenané

Detektory IZ:

Měření, detekce a registrace intenzity ionizujícího záření je proces, při kterém dochází k částečné nebo úplné absorpci ionizujícího záření. K detekci ionizujícího záření se běžně užívají tyto sekundární projevy absorpce:

- fotografické účinky
- ionizace plynů
- luminiscence
- schopnost zvyšovat elektrickou vodivost některých materiálů
- změna struktury materiálu

Podle toho lze rozdělit detektory ionizujícího záření do pěti základních skupin:

1. fotografický film
2. ionizační komora, proporcionální detektory, Geiger-Müllerovy detektory
3. fluorescenční stínítka, scintilační detektory, termoluminiscenční detektory
4. polovodičové detektory
5. stopové detektory částic

Detektory obecně:

Hlavní funkcí detektoru je změna energie ionizujícího záření na elektrické pulsy, které je možno zaznamenávat. Důležitými charakteristikami všech typů detektorů jsou:

- účinnost
- linearita
- energetická proporcionalita
- rozlišení

Účinnost:

Výkonnost detektoru popisuje možnosti detektoru zaznamenávat různé druhy záření o různých energiích,

kteřá na něho dopadají. Ideální je stav, kdy počet částic dopadajících na snímač je roven počtu impulsů registrovaných detektorem. Většina detektorů neměří IZ se 100% účinností, pro četnost R platí: $R = \eta A$ (η - účinnost < 1; A - aktivita v Bq)

Linearita:

Proces konverze jednotlivých částic na elektrické pulsy je extrémně rychlý - řádově několik mikrosekund. Pokud je vysoký tok částic, může se stát, že částice přicházející do detektoru není zaznamenána, protože detektor ještě zpracovává částici předcházející. Doba potřebná pro registraci částice (přeměnu na elektrický puls) se označuje jako mrtvá doba detektoru (τ). Část částic, které mohou být náležitě zpracovány, je popsána linearitou detektoru. Jednotlivá částice s energií E, která vstoupí do detektoru, produkuje elektrický puls V, takže částice, které dopadají na detektor v počtu I částic za sekundu vyvolají vznik napěťových pulsů v počtu R pulsů za sekundu. Detektor považujeme za lineární, dokud trvá přímá úměra mezi R a I.

Jelikož je detektor po určitou dobu τ "mrtvý", bude měřené množství pulsů R_m vždy nižší než skutečné množství pulsů R_t :

$$R_t = R_m / (1 - R_m \cdot \tau)$$

Délka mrtvé doby je ovlivněna řadou faktorů a rozlišují se dva typy mrtvé doby:

- "ochromující" mrtvá doba, která zcela zablokuje detektor tak, že přestane detekovat
- "neochromující" mrtvá doba, při které dojde ke ztrátám při zaznamenávání pulsů, pokud se zvýší tok fotonů, ale nedojde do stavu, kdy je detektor zablokován

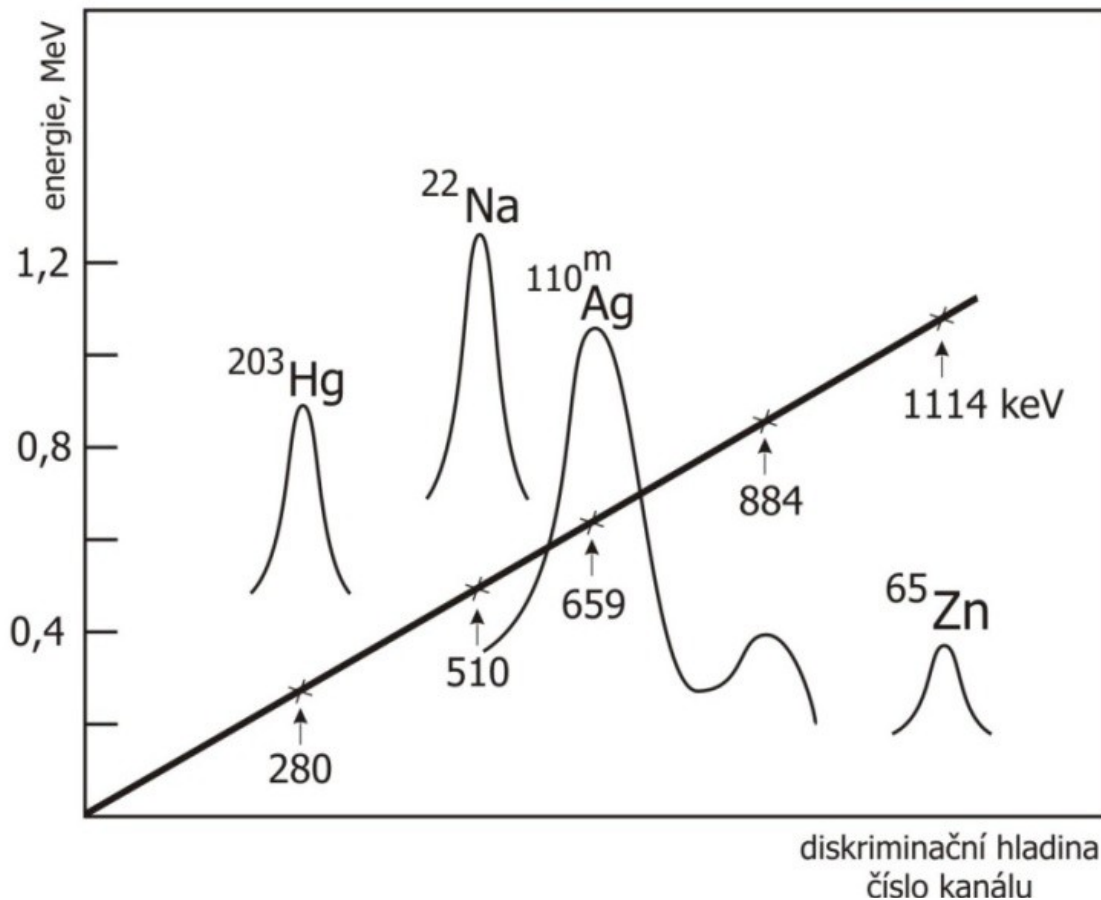
Oba typy mrtvé doby se významně uplatňují u Si(Li) detektorů. Neochromující mrtvá doba zpravidla nedělá potíže u scintilačních detektorů.

Průměrná mrtvá doba činí:

- 200 μs u Geiger-Müllerova detektoru
- 0,23 μs u scintilačního krystalu NaI (Tl)
- 0,027 μs u scintilačního krystalu YAP (Ce)
- 0,001 μs u polovodičových detektorů

Energetická proporcionalita:

Jedná se o úměrnost signálu detektoru k energii dopadající částice. Velikost výstupního signálu je závislá na proudu vzniklém v čítači a tento proud je závislý na počtu ionizačních přeměn vedoucích ke vzniku pulsu. Jestliže počet ionizačních přeměn bude úměrný energii dopadajících částic, velikost výstupního napětí bude rovněž úměrná energii dopadajících částic. Detektor bude proporcionální, pokud je velikost výstupního napětí detektoru V úměrná energii E dopadajících částic.



Rozlišení

Je to schopnost detektoru rozlišit částice různých energií.

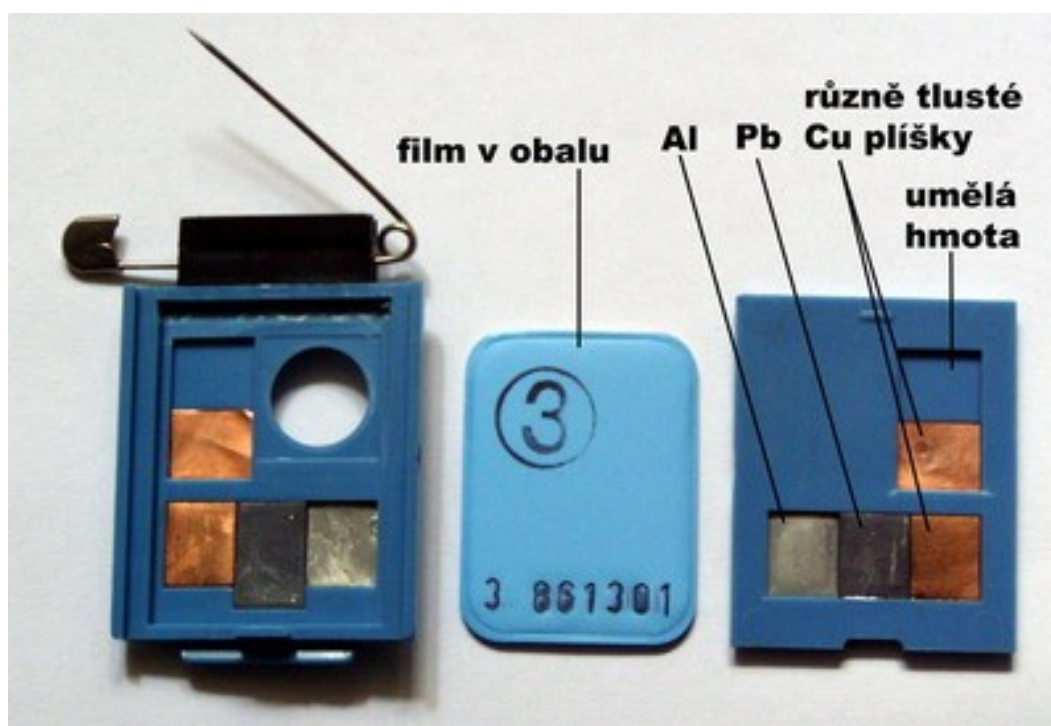
Detektory konkrétně:

Fotografický film

Fotografická detekce ionizujícího záření je založena na tom, že ionizující záření, stejně jako viditelné světlo, vyvolává ve **fotografické emulzi** (krystalky Agar v želatině) latentní obraz, který lze zviditelnit chemickým vyvoláním. Ozářená místa emulze vykazují po vyvolání zčernání, jehož intenzita je úměrná počtu částic, které na emulzi působily. Používají se k detekci RTG záření, záření γ

a neutronů. **Neutrony**, které sami na fotografickou emulzi nepůsobí, je třeba převést na detekci ionizujících částic. Například překrytím fotografické emulze **kadmiovou fólií**, v níž se pomalé neutrony zachycují reakcí $^{113}\text{Cd} (n, \gamma) ^{114}\text{Cd}$ a vzniklé fotony pak způsobují zčernání emulze.

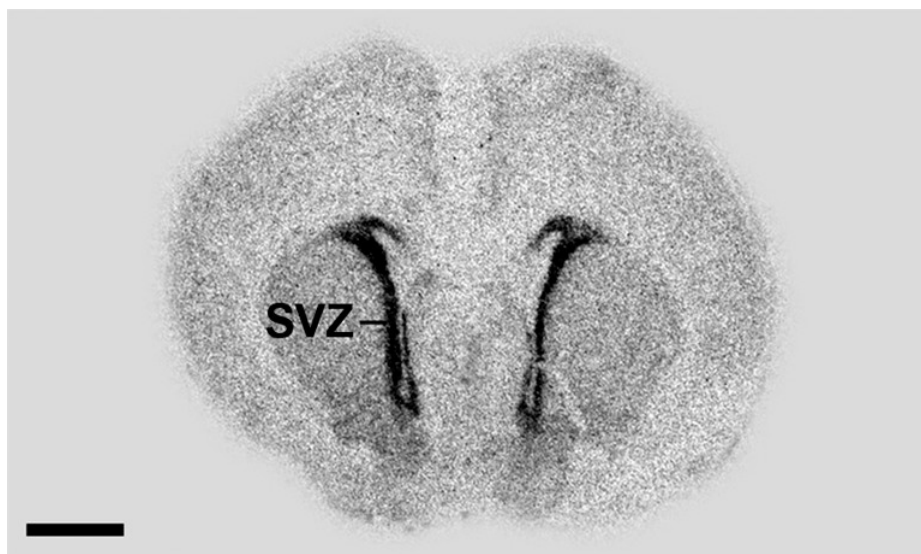
Fotografická detekce ionizujícího záření se používá v **osobní dozimetrii** pracovníků s ionizujícím zářením. A v různých **radiografických metodách**. **Osobní filmový dozimetr** obsahuje film v papírovém obalu, který je uložen v plastické kazetě. Na vnitřních stěnách kazety, jsou upevněny měděné a olověné proužky, které umožňují přibližně určit energii záření tím, že různě absorbují záření dopadající na film. Dozimetr je připevněn na pracovním oděvu a nepřetržitě registruje záření, obvykle po dobu jednoho měsíce. Po vyvolání filmu se dávka záření určí z intenzity zčernání filmu.



Osobní filmový dozimetr

Autoradiografické metody jsou významné tím, že poskytují informace o rozložení radioaktivity ve zkoumaném objektu. To je velmi užitečné v biologických studiích, kde se zjišťuje rozložení radioaktivních látek v živočišných

orgánech, částech rostlin a buněčných strukturách. Zkoumaný radioaktivní objekt se na určitou dobu přiloží na film, který se pak vyvolá.

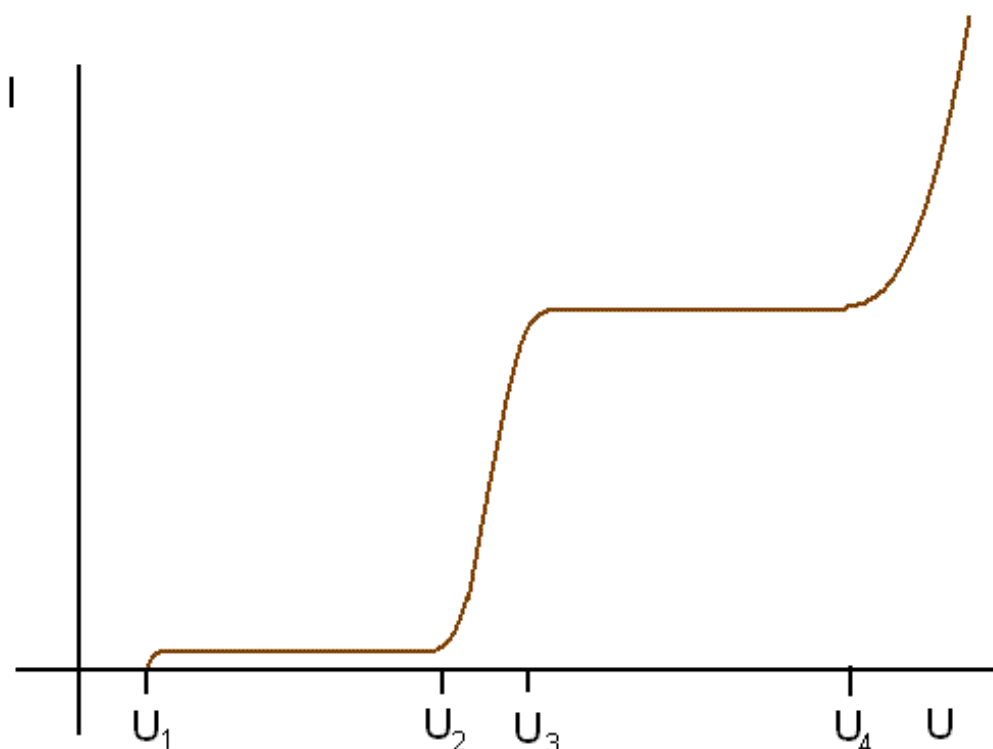


Autoradiograf mozkového řezu krysího embrya. Značeno ³⁵S-dATP, který se váže na GAD67 (glutamate decarboxylase). Vysoká koncentrace markeru (černě) je pozorována především v subventrikulární zóně (SVZ). Rozměr černé čáry je 2 mm.

Fotografická detekce ionizujícího záření se také používá v průmyslové radiografii a v lékařské rentgenové diagnostice.



Ruka ženy W. Röntgena, exponováno 22. 12. 1885



Plynové ionizační detektory

Všechny detektory mají za základ nádobu s tenkým, málo absorbujícím vstupním okénkem a dvěma elektrodami uvnitř. Detektor je plněn vzácnými plyny (argon, xenon). Po určité době budou vzniklé iontové páry rekombinovat a přejdou zpět do základního stavu. V **případě, že je na elektrody vloženo určité napětí**, budou elektrony přitahovány k anodě a ionty ke katodě a sníží se tím rozdíl potenciálů. Velikost vzniklého napěťového impulsu závisí na napětí mezi elektrodami.

Závislost počtu elektronů vzniklých v komoře působením ionizujícího záření na napětí mezi elektrodami lze vyjádřit graficky. **Je-li hodnota U menší než U_1** bude část elektronů a iontů rekombinovat ještě před zachycením na elektrodách. **V oblasti napětí U_1 - U_2** dopadnou všechny elektrony na anodu a ionty na katodu - jejich počet závisí pouze na počtu absorbovaných částic. V oblasti, kde je napětí mezi **elektrodami vyšší než U_2** , budou mít volné elektrony dostatečnou energii, aby na cestě k anodě ionizovaly další atomy plynu, a probíhá tzv. lavinová ionizace. **Koeficient plynového zesílení** (A) udává,

kolikrát více párů dopadlo na elektrody, než vzniklo účinkem ionizujícího záření (pracuje se v oblasti $U_3 - U_4$), u napětí vyšší než U_4 dochází v detektoru ke kontinuálnímu výboji – není schopen detekovat IZ.

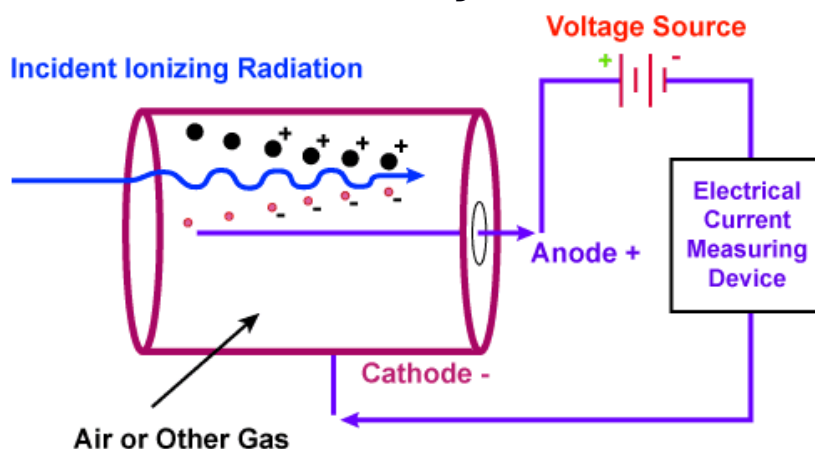
Ionizační komora:

Ionizační komora pracuje v oblasti U_1-U_2 ($A = 1$), ionizační proud je úměrný energii ionizujícího záření. Napětí nutné k dosažení nasyceného proudu závisí na intenzitě záření. Citlivost komory závisí na vlnové délce a stejně tak i absorpce záření v plynu. K plnění se používá těžkých vzácných plynů (Ar, Kr).

Proporcionální a Geiger-Müllerův detektor:

Jedná se o detektory pracující v oblasti U_3-U_4 . Počet vzniklých párů elektron-iont je úměrný energii ionizujícího záření. Pokud je koeficient plynového zesílení konstantní je elektrický napěťový impuls na výstupu úměrný absorbované energii ionizujícího záření a detektor dovoluje rozlišit ionizující záření s různými energiemi.

Vznik lavin elektronů je v proporcionálním detektoru lokální záležitostí - vznikají v té části, kde bylo ionizující záření pohlceno. Vyhasnutí lavin proběhne, aniž by se rozšířili do celého objemu. **Plynové zesílení tohoto Geiger-Müllerova detektoru je kolem 10^7 .**



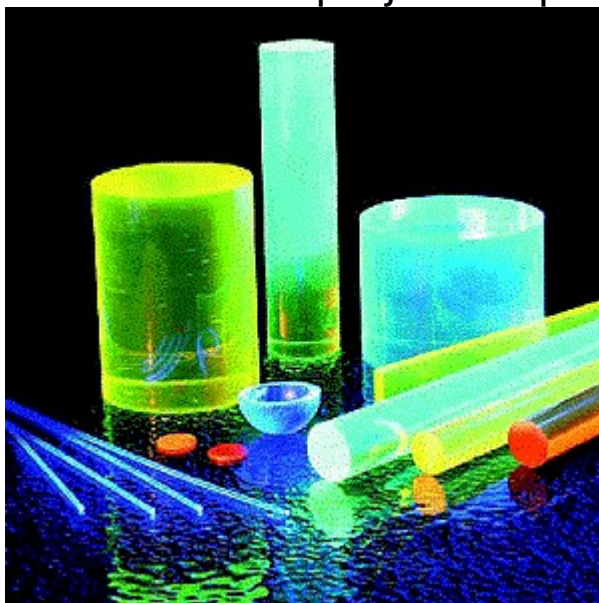


Geiger-Müllerův detektor

Luminiscenční detektory

Fluorescenční stínítka:

Při ozáření některých látek ionizujícím zářením může dojít k uvolnění elektronů z valenčního pásu a přechodu do pásu vodivostního a při zpětném přechodu může vzniknout viditelné záření. Tento jev se pak využívá k vizuální detekci ionizujícího záření. Jako fluoreskujících látek se používá **wolframan vápenatý**, křemičitan zinečnatý nebo **sulfid zinečnatý**. Ačkoliv existuje závislost mezi intenzitou fluorescence a intenzitou dopadajícího svazku, používá se fluorescenčních stínítek hlavně při justaci přístrojů.

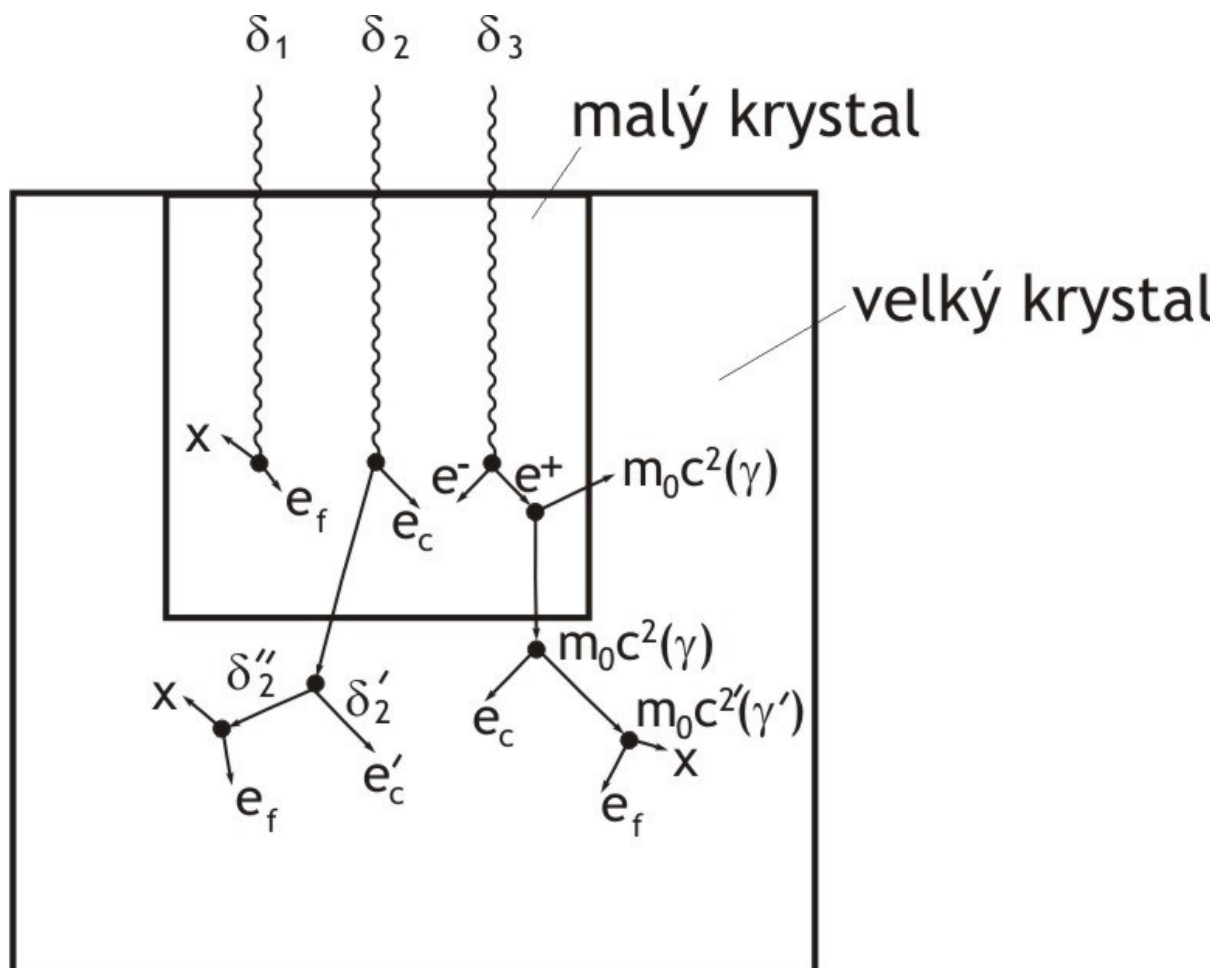


Luminiscence materiálů v UV světle.

Scintilační detektory:

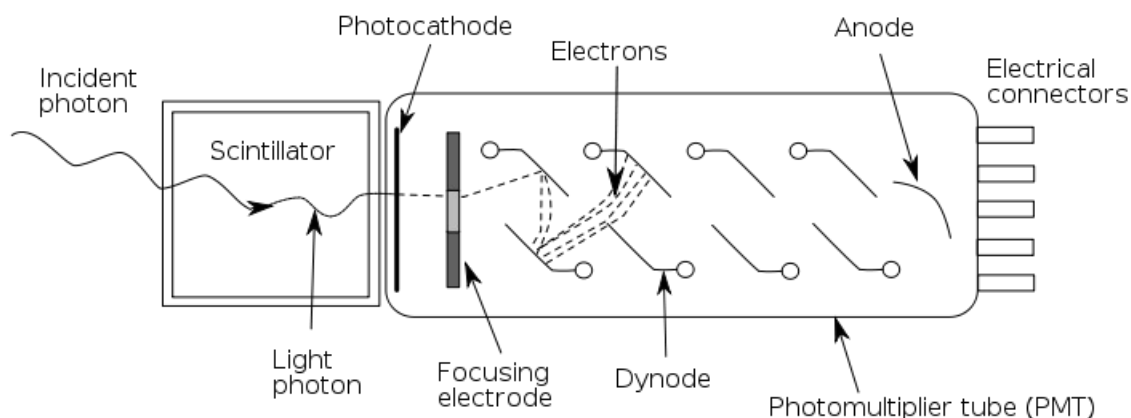
V scintilačních detektorech je převod ionizujícího záření na elektrický impuls dvojstupňový proces. Prvním krokem je vznik záblesku (emise světla) na vhodném krystalu a druhým krokem je uvolňování elektronů na fotonásobiči a jejich detekce a převod na elektrický impuls.

Ionizující záření, dopadající na uzemněný scintilační krystal detektoru, uvolní elektron, který při pohybu krystalem přivede do excitovaného stavu desítky atomů. Zpětný přechod do základního stavu je doprovázen emisí světla, jehož vlnová délka nemusí nutně ležet ve viditelné oblasti, ale musí být vhodná k uvolňování elektronů z fotokatody.



Scintilačním krystalem emitovaný foton dopadne na světlocitlivou katodu a uvolní z ní určitý počet (n)

fotoelektronů. Tyto dopadají na nejbližší dynodu (parabolická elektroda) a každý z nich vyprodukuje jistý počet R sekundárních elektronů. Na druhou dynodu dopadá již nR elektronů, na třetí nR^2 elektronů atd. Při počtu dynod m vzroste počet primárních elektronů na nR^m , kde R^m je koeficient zesílení fotonásobiče. Mezi jednotlivými dynodami je udržováno napětí 100-200 V a na výstupu z fotonásobiče je impuls napětí přímo úměrný energii absorbovaného ionizujícího záření. V běžných detektorech je počet dynod 8-15, a koeficient zesílení je 10^7 - 10^8 .



Fotonásobič

Jako scintilačního krystalu se nejčastěji používá krystal NaI aktivovaný 1 % Tl. Thalium vytváří v pásové struktuře krystalu hladinu nečistot, tzv. fluorescenční centra. Pro nízkoenergetické RTG záření (3-20 keV) není tento krystal vhodný a alternativně se používají monokrystaly YAlO_3 aktivované Ce (YAP:Ce). Tento krystal může být v tenčí destičce a je mnohem stabilnější. Podstatný je i rozdíl v délce scintilačních záblesků - u NaI je to 230 ns, u YAP je to pouze 27 ns. Maximální intenzita fluorescenčního pásu NaI je na vlnové délce 410 nm, u krystalu YAP 350 nm. Fotokatoda v scintilačních detektorech je zpravidla antimon-cesiová.



Scintilační krystal z NaI dotovaný thaliem

Kapalný scintilátor je taková látka kapalného skupenství, která při interakci s ionizujícím zářením převádí část absorbované energie na světelné záblesky (scintilace), podobně jako výše popsané scintilátory pevného skupenství.

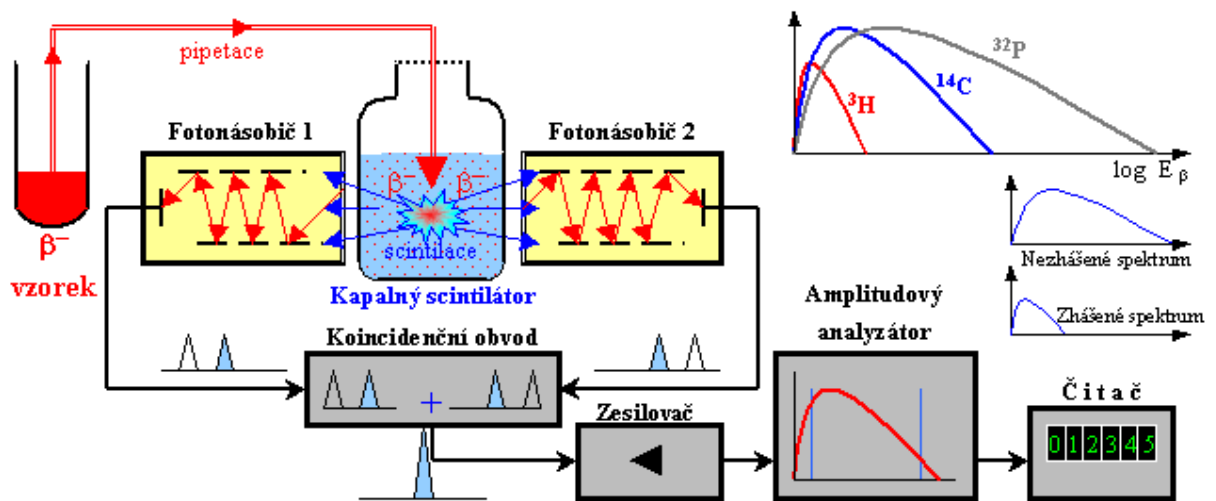
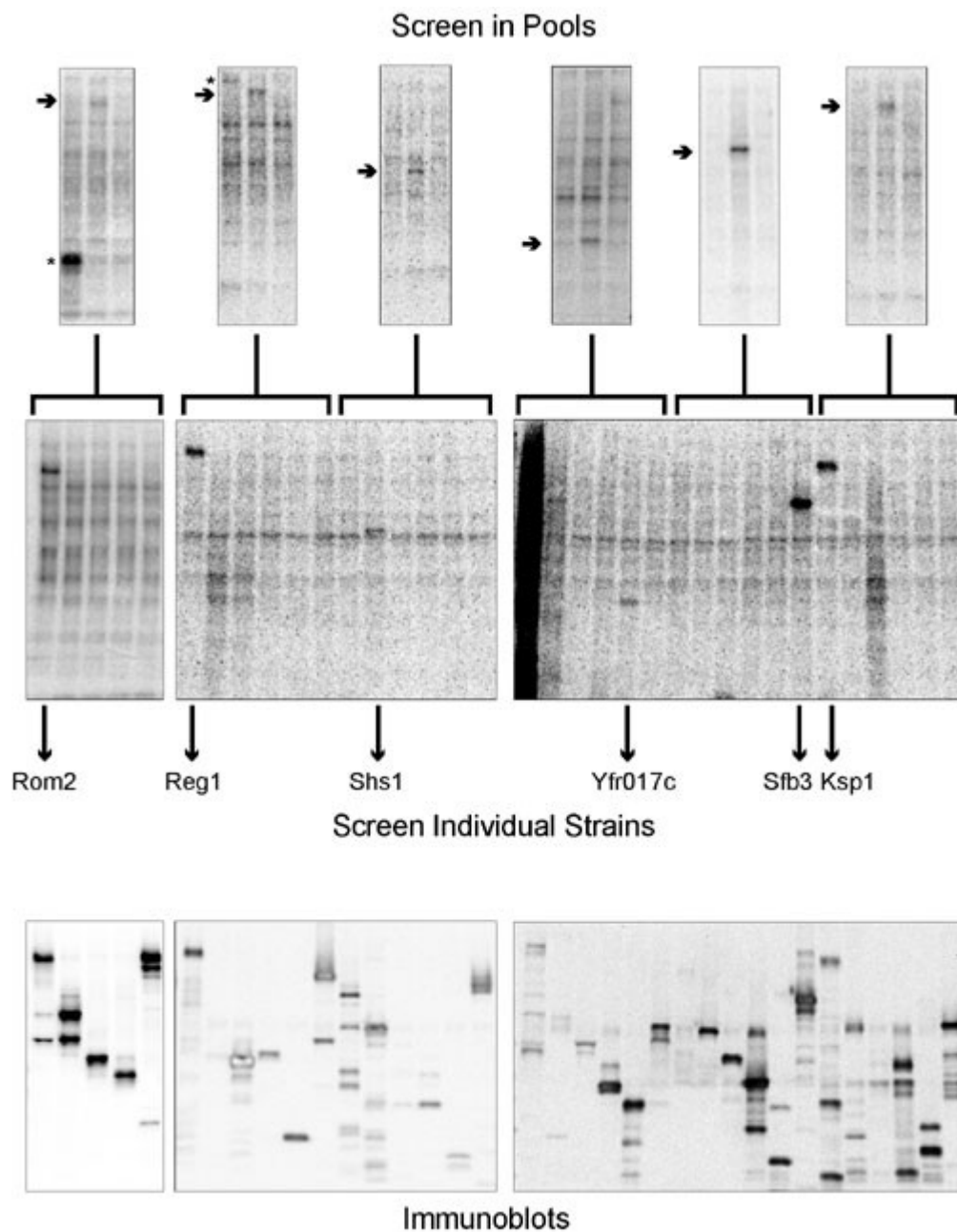


Foto- a termoluminiscenční detektory

Phosphorimager: Schopný zaznamenat 2D obrázky. Zobrazuje místa která jsou radioaktivní. Je schopen detekovat především γ , β a také RTG záření. Využívá se především k detekci proteinů, nukleových kyselin apod. po oddělení př. na gelu apod. Využívá metastabilního stavu, který vzniká vytvořením iontu Eu^{3+} interakcí Eu^{2+} s ionizující částicí v matrici. Po ozáření laserem o vlnové délce kolem 650 nm, dochází k deexcitaci stavu a vyzáření fialového světla o vlnové délce 400 nm. Rozlišení matrice je cca 5 μm .



Termoluminiscenční detektory: Po ozáření určitých typů materiálů ionizujícím zářením dojde k vytvoření relativně trvalých excitovaných stavů. Po zahřátí tohoto materiálu dojde k deexcitaci a vyzáření viditelného světla, většinou v modré oblasti spektra. Využívá se většinou v dozimetrii (prstenové termoluminiscenční dozimetrie) anebo v datování minerálů apod.

Polovodičové detektory

V těchto detektorech je jednostupňová detekce ionizujícího záření prováděna pevnou látkou, ve které dokáže dopadající kvantum generovat dvojici nábojů, a ty jsou schopny rychlého pohybu k elektrodám, kde vyvolají elektrický impuls. Tato pevná látka je umístěna mezi dvěma elektrodami pod vysokým napětím. Je to vlastně typ ionizační komory, která je místo plynem vyplněna krystalem. Použitý krystal musí mít v zásadě tyto vlastnosti:

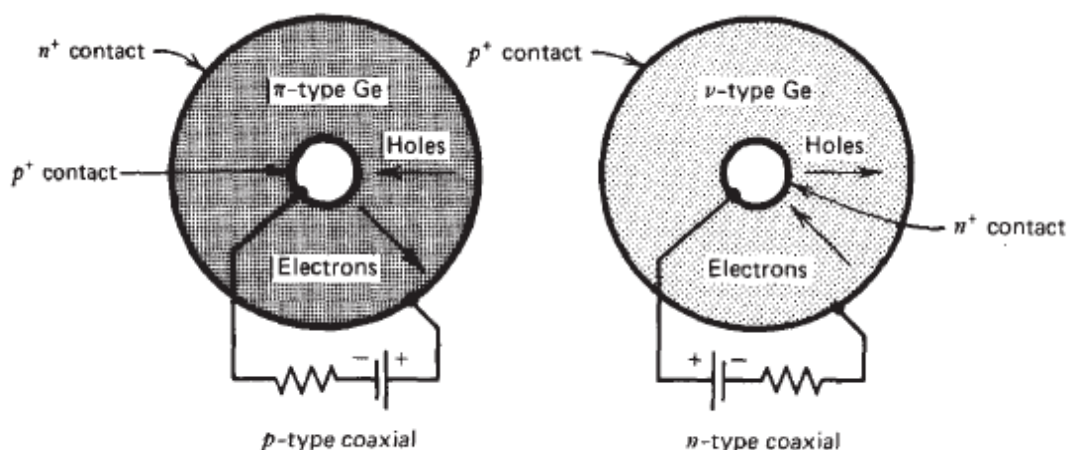
- vysoký odpor, který zajišťuje sběr nábojů polem vysokého napětí a snižuje šum ze zbytkových proudů
- dovoluje prodloužit dobu životnosti vzniklých nábojů
- umožňuje vysokou pohyblivost nábojů
- má malou šířku zakázané zóny (předpoklad dobrého energetického rozlišení)
- velkou absorpční schopnost

Těmto podmínkám vyhovují polovodičové materiály jako křemík a germanium. Tyto materiály jsou zpravidla driftované lithiem, které napomáhá k záchytu dopadajících fotonů. Jejich stabilitu je však nutno zajistit teplotami kapalného dusíku.

Si(Li) detektor je tvořen monokrystalem p-typu křemíku tloušťky několik mm, který je pod napětím 300-1000 V. Vysoká koncentrace Li atomů na jeho okrajích tvoří oblast n-typu, kdy z jedné strany je kontakt zlatý a z druhé strany je tzv. Schootkyho bariéra (p-i-n dioda). Při vstupu fotonu dojde ke vzniku mraku elektronových párů, jejichž počet je přímo úměrný energii dopadajícího kvanta. Elektrony jsou pak směrovány ven z krystalu díky rozdílu potenciálů na čítací obvod. Na rozdíl od jiných typů detektorů, neexistuje zde žádné vnitřní zesílení, takže výstupní signál je velmi slabý.

Výhodou těchto detektorů je možnost připojení na vícekanálový analyzátor, vysoká účinnost ve sběru pulsů a velké úhly při sběru dat. Nevýhodou je dlouhá mrtvá doba. Si(Li) krystaly pracují spolehlivě v oblasti asi 2-20 keV. V krátkovlnné oblasti však ztrácejí na účinnosti a jsou nahrazovány krystaly Ge (Li). Podmínkou je užití vysoce čistého germania, v opačném případě se radikálně zvyšuje mobilita Li.

Problém chlazení kapalným dusíkem lze odstranit při použití teluridu kadmia, který je schopen pracovat při pokojové teplotě, ale jeho nevýhodou je poměrně vysoký šum.



Germaniové jádro Ge(Li) detektoru

Stopové detektory částic

Jsou látky, v nichž těžká jádra či α záření vyvolávají mikroskopické poruchy v jejich struktuře. Nejčastěji se používá slída, různá skla, či organické polymery. Poruchy vznikají tím, že procházející částice vytvářejí podél své dráhy v pevné látce vysoce ionizované atomy. Tyto ionty se silně odpuzují a vzájemně vytlačují z původních poloh., čímž vzniká mikroskopická oblast s porušenou strukturou, tzv. radiační stopa (válcový kanálek o průměru 1 - 10 nm). Lze je zviditelnit chemickým leptáním, protože v místech poruch je ozářená látka náchylnější k chemické korozi. Počet stop je přímo úměrný počtu částic, které dopadly na detektor.

Stopové detektory se používají v dozimetrii α záření, zejména k měření dávek záření způsobených radonem a jeho dceřinými produkty. Lze je použít i k dozimetrii neutronů. Pro tento případ se dozimetr překrývá fólií z uranu mírně obohaceného izotopem ^{235}U , který se neutrony štěpí a štěpné fragmenty vyražené z fólie pak vyvolávají poruchy v detektoru. Pokryje-li se detektor vrstvou boru, lze **neutrony registrovat** prostřednictvím α částic vznikajících reakcí $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$.

Stopové detektory se používají také k registraci těžkých iontů v kosmickém záření a k měření dávek, kterým jsou vystaveny posádky kosmických letů.



6. Biologické účinky IZ

Základní pojmy:

Dávka D : $D = dE/dm$ [Gy]

Dávkový příkon \bar{D} : $\bar{D} = D/t$ [Gy/s]

Ekvivalentní dávka H_T : $H_T = w_R \cdot D_{TR}$ [Sv]

Druh záření	w_R
fotony a elektrony všech energií	1
neutrony 10 keV	5
neutrony 10 - 100 keV	10
neutrony 0,1 - 2 MeV	20
neutrony 2 - 20 MeV	10
záření α	20

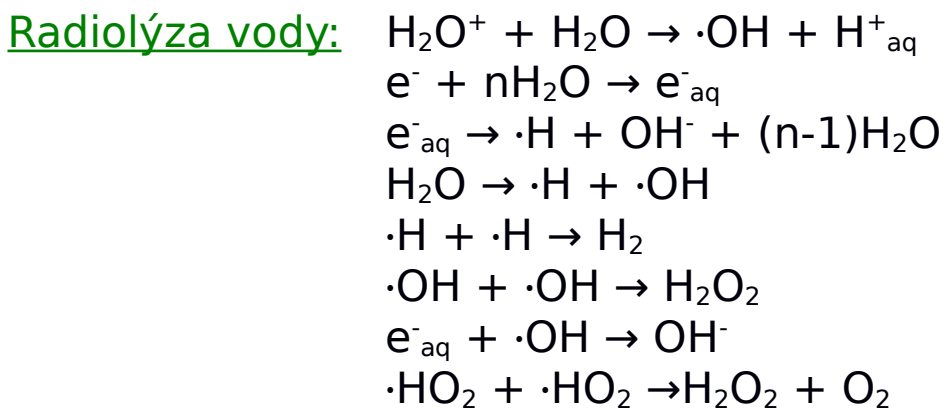
Efektivní dávka H_f : $H_f = \sum (w_T \cdot H_T)$ [Sv]

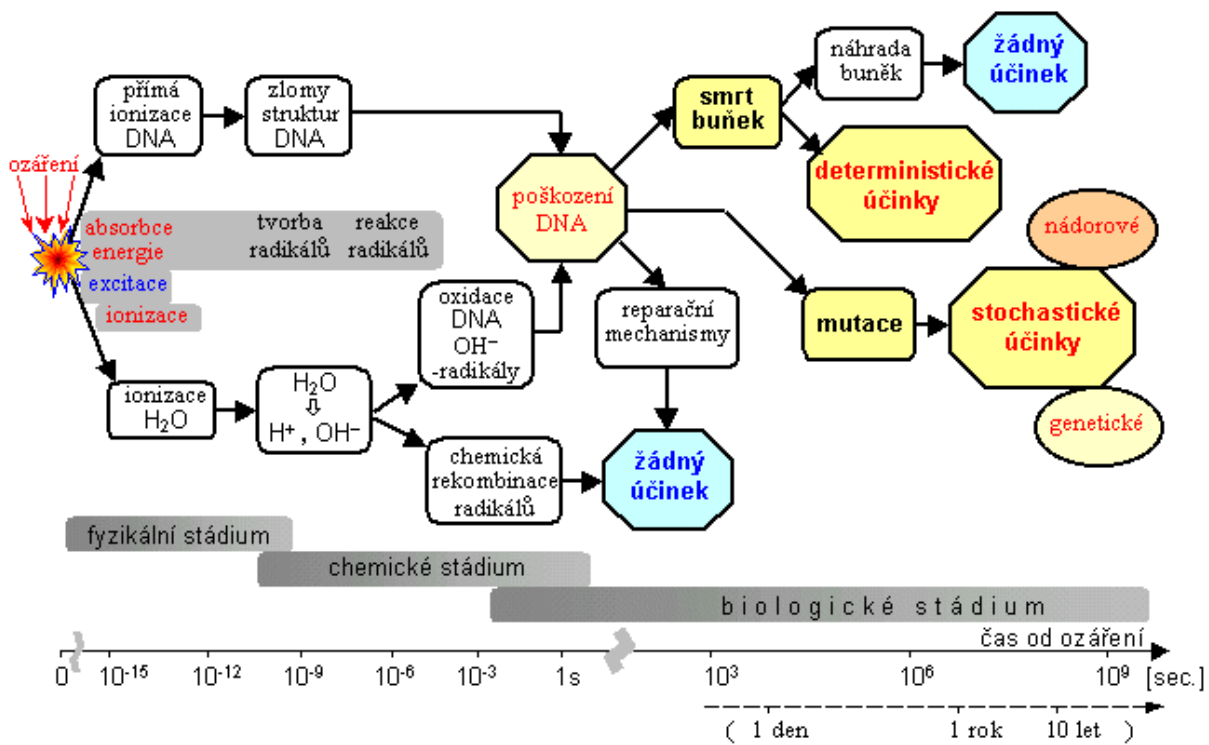
Tkáň, orgán	w_T
gonády	0,20
červená kostní dřeň	0,12
tlusté střevo	0,12
plíce	0,12
žaludek	0,12
močový měchýř	0,05
mléčná žláza	0,05
játra	0,05
jícen	0,05
štítná žláza	0,05
kůže	0,01
povrchy kostí	0,01

Účinky IZ se projevují ve větší či menší míře u všech živých organismů. Závažnost účinků závisí na dávce, dávkovém příkonu a druhu organismů.

Přímé účinky: změna **biologicky důležité makromolekuly** (nukleových kyselin) přímým zásahem částic IZ či sekundárními částicemi.

Nepřímé účinky: souvisí s **radiolýzou vody** (změny způsobené radikály, peroxidem vodíku a hydratovaným elektronem (vysušené enzymy vykazují menší poškození než roztoky enzymů).



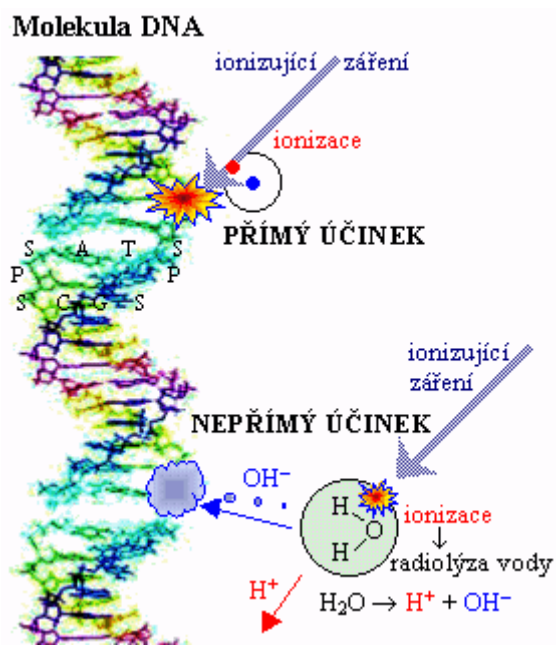
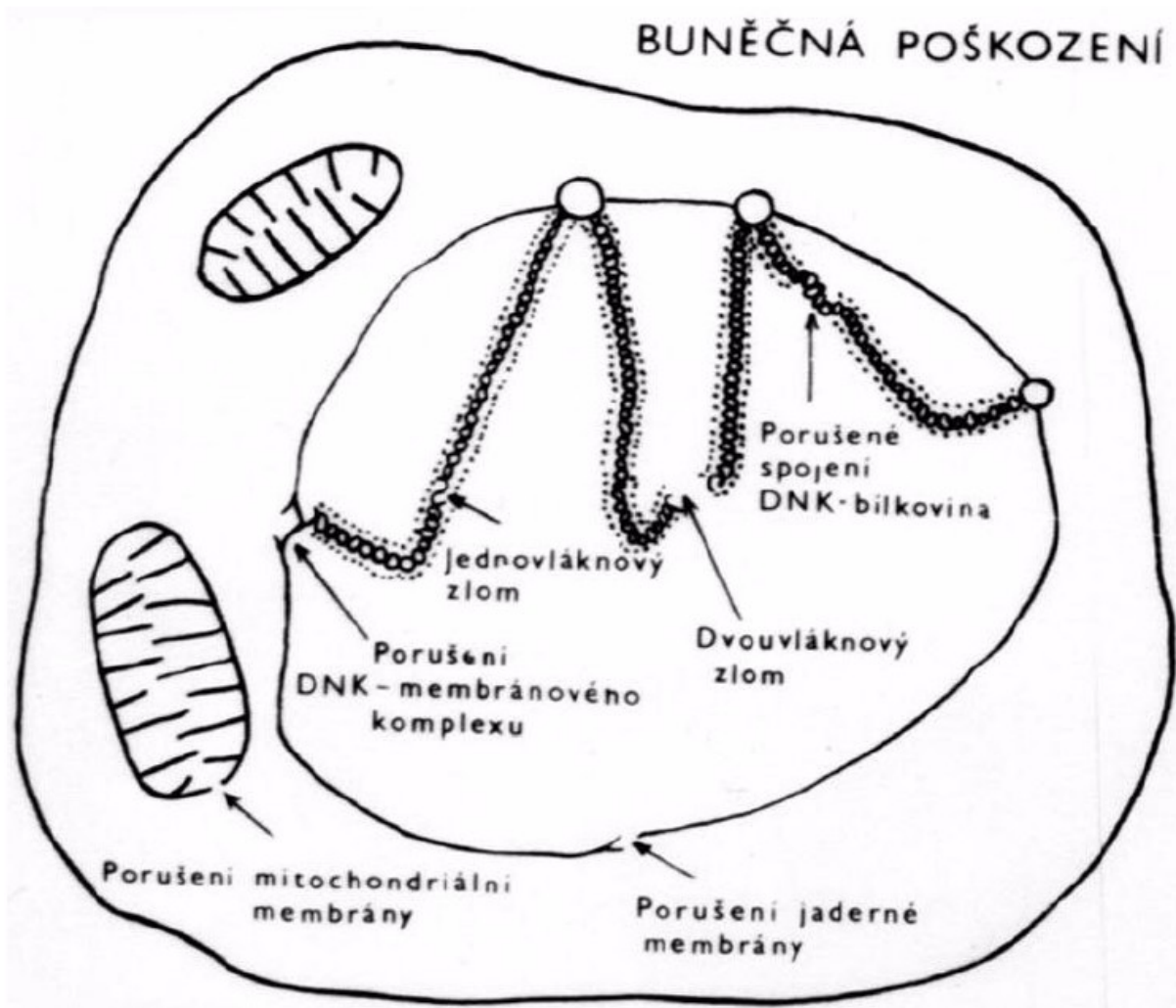


Poškození na buněčné úrovni:

- změny ve struktuře a biosyntéze DNA
- chybná syntéza enzymů
- chybně syntetizované bílkoviny (chovají se cizí a jsou toxické)
- změny v propustnosti buněčných membrán
- časem poruchy dělení, smrt buňky

Větší rozmnožovací schopnosti, malá diferencovanost = výraznější poškození.

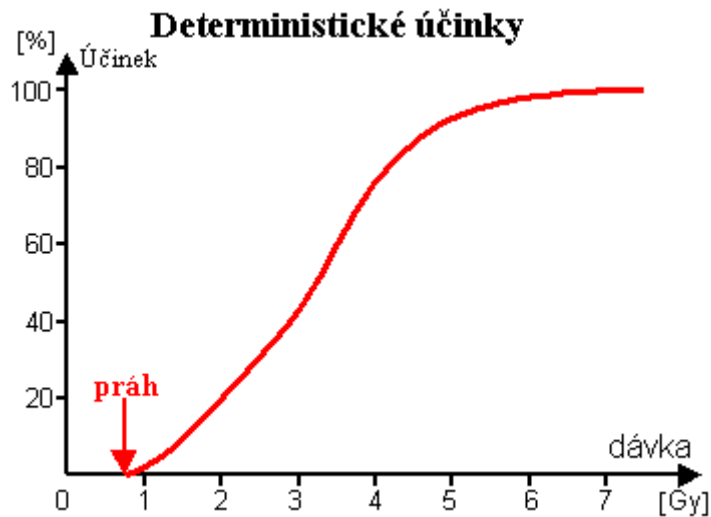
BUNĚČNÁ POŠKOZENÍ



Účinky IZ na lidský organismus

Nestochastické (deterministické):

- projeví se po ozáření IZ během krátké doby (max. týdny)
- je postiženo současně mnoho buněk
- nemohou se uplatnit všechny opravné procesy
- prahová dávka vyvolá poškození u 1 - 5% osob
- z rostoucí dávkou **roste závažnost poškození**
- **lze rozpoznat, že vznikly působením IZ**
- možnost vzniku těchto účinků popisuje ekvivalentní dávka



a) akutní nemoc z ozáření:

- jednorázové ozáření celého těla vysokými dávkami
- poškození krvevorných orgánů, trávicího ústrojí a CNS (s rostoucí dávkou)
- ekvivalentní prahová dávka 2 Sv
- projevuje se ve 3 fázích:

1) **Nevolnost, skleslost, bolesti hlavy, zvracení, změny krevního obrazu**

2) **Období latence** - přechodné ustoupení příznaků, je tím kratší čím větší byla absorbovaná dávka

3) **Intenzivní rozvinutí počátečních příznaků** + padání vlasů, vnitřní krvácení, silná vnímavost vůči infekcím - zlepšování stavu po 6 – 8 týdnech, uzdravení (neúplné)

- při ozáření ekvivalentní dávkou do **6 Sv** převládá **hematologická forma choroby** (poškození krevní dřeně, krvetvorby, krvavé průjmy, poruchy funkce střev)
- při ozáření ekvivalentní dávkou **6 - 10 Sv** se k hematologické formě přidává i **poškození trávicího ústrojí** u **10 Sv a více** **převládá nervová forma choroby** (psychická dezorientace, zmatenost, křeče, bezvědomí, smrt během hodin až dnů v důsledku oběhového kolapsu, zástavy dýchání a poruch mozku)
- **pravděpodobnost úmrtí**: 6 Sv 80%, 10 Sv 100%
- **dlouhodobé následky** (poruchy krvetvorby, poruchy funkce pohlavních orgánů, neplodnost, zvýšená vnímavost k infekcím a nádorovým onemocněním, trvalá slabost a únava)

b) lokální akutní poškození kůže:

- **radiační dermatitida** (stupeň 1 – 3, zarudnutí až špatně hojitelné vředy vedoucí k amputacím)
- prahová dávka 3 Sv (výrazně se zvyšuje frakcionací dávky – prahová dávka roste až k 15 Sv), **výjimka** – objevuje se i po letech

c) poškození plodu:

- **1. – 2. týden**: „všechno nebo nic“, plod buď přežije bez újmy, nebo dojde k potratu (prahová dávka 250 mSv)
- **3. – 8. týden**: organogeneze - vznik malformací (prahová dávka 250 mSv)
- **8. – 15. týden**: mikrocefalie (špatně vyvinutý mozek), oční defekty, rozštěp patra, celkové zaostávání (mentální retardace, zakrslost) (prahová dávka 100 mSv)
- v dalších týdnech je plod **stejně odolný jako matka**

d) poruchy plodnosti:

- **přechodná aspermie** (porucha v tvorbě spermií)
- prahová dávka 250 mSv, od 3 Sv trvalá aspermie
- u žen dávka do 1,5 Sv bez odezvy, sterilita od cca 3 Sv

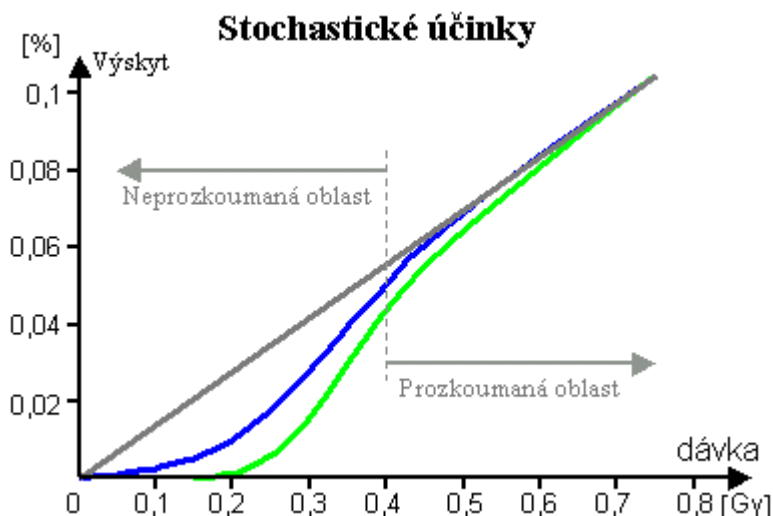
e) zákal oční čočky:

- dlouhá doba latence
- prahová dávka cca 1,5 Sv (výrazně závisí na frakcionaci dávky - posun až k 20 Sv)
- **výjimka** - objevuje se i po letech

Stochastické:

- poškození malého počtu buněk (i jediné)
- projeví se po ozáření jednou či více podprahovými dávkami
- vznik nádorových onemocnění (latentní doba 10 - 40 let), leukémie (l.d. 5 - 20 let), genetické poškození další generace
- **projeví se ve skupině náhodně**
- **s rostoucí dávkou roste pravděpodobnost vzniku poškození ne jeho závažnost**
- **nelze rozpoznat, že vznikly působením IZ**
- **lze odhalit jen sledováním velkého počtu osob**
- 6400 osob v Hirošimě ozářeno ekvivalentní dávkou 1,2 Sv, za 25 let 11 případů leukémie navíc nad přirozený výskyt ve stejně velké neozářené skupině
- jiná studie uvádí při sledování obyvatel ozářených atomovými bombami v Japonsku, kteří obdrželi dávky průměrně 1 Sv, úmrtnost na stochastické účinky $0,07 \text{ Sv}^{-1}$

- SÚJB uvádí koeficient $0,05 \text{ Sv}^{-1}$ pro obyvatelstvo, $0,04 \text{ Sv}^{-1}$ pro pracovníky se zářením



Díky opravným mechanismům je vznik poškození při malých dávkách velmi málo pravděpodobný, přesto dosud převládá tzv. **konzervativní přístup (lineární bezprahový model):**

- stochastické účinky – mutace jediné buňky
- závislost na dávce podprahová
- předpokládá sčítání dávek, ignoruje opravné procesy

Moderní přístup:

- buňka může poškození DNA opravit či poškozenou buňku odstranit (imunitní reakcí)
- při ozáření dávkami pod 0,2 Gy nelze prokázat škodlivé účinky (kromě raného vývoje plodu) (**výjimka radon**)
- u lidí ozářených při bombardování atomovými bombami dávkami **menšími než 0,2 Gy** zjištěna nižší úmrtnost na rakovinu a nebyl pozorován vyšší výskyt leukémie
- britští radiologové s **celoživotní dávkou 1 - 5 Gy, radiologičtí pracovníci 0,5 Gy**: žádný statisticky významný výskyt rakoviny navíc

- 28 000 pracovníků britských loděnic ozářeno **dávkou 5 mSv**: úmrtnost o 24% nižší
- kanadské ženy vyšetřované pomocí RTG na tuberkulózu, dávky 150 - 250 mGy: nižší úmrtnost na rakovinu
- Coloradská plošina, přirozené dávky záření 3x vyšší než USA průměr: úmrtnost na rakovinu o 15% menší

Ochranný efekt:

- leukocyty ozářeny **nejprve dávkou 0,02 Gy a pak 0,15 Gy** - poloviční výskyt chromozomových aberací než **po samostatné dávce 0,15 Gy**

Hormeze - stimulující účinky malých dávek IZ

- vyšší metabolická aktivita bakterií
- urychlení klíčení semen, vycházení, odnožování, růst, dřívější květenství, dozrávání
- prodloužení života myši (celoživotně ozařovány 8h denně 1mGy)
- **u lidí**: léčivé účinky radioaktivních koupelí (Jáchymov)
- **léčí se především**: revmatismus, degenerativní změny obratlů, inf. onemocnění nervového systému, poruchy vylučování k. močové, poruchy při vylučování žluči játry apod. - IZ stimuluje k lepšímu vylučování k. močové (vzniká až močovina), metabolismus a imunitní systém

Léčení pomocí vysokých dávek IZ:

Teleterapie - dálkové ozařování především ^{60}Co ($5 \cdot 10^{13}$ - 10^{15} Bq)

Kontaktní terapie - β . zářič na povrchu těla (^{32}P či ^{90}Sr)

Brachyterapie - tělesnými dutinami se zářič zavede k nádoru

Endoterapie – vpravení radionuklidového zářiče do postižené tkáně **metabolickým procesem** (štítná žláza Na^{131}I apod.)

Radioimunoterapie – RN je vázán na protilátku, selektivně se váže na spec. antigeny a receptory v nádorových buňkách

Velikost dávek – cca 60 Gy (frakcionace po 2 Gy)

Nevýhoda γ ozařování – ozařuje se i zdravá tkáň (různé směry ozařování)

Současné trendy:

- ozařování urychlenými protony (vysoký lin. přenos energie na konci dráhy, 180 MeV dosah 15 cm), v Japonsku $^{12}\text{C}^{6+}$
- ozařování svazkem záporných pionů (nestabilní částice (doba života $2,6 \cdot 10^{-8}$ s), vznikají při ozařování terče protony o $E > 500$ MeV), po zpomalení dojde k zachycení v jádře a uvolnění 140 MeV = roztržení jádra ($\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$; $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$)
- bórová terapie $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$

Rentgenová diagnostika

Druh vyšetření	Ef. dávka [mSv]
Snímek plic	0,05
Páteř	1,8
Břicho	3 - 8
Urografie	2,1
Mamografie	0,5
Angiografie	3 - 9
CT hlava	1,1

Radioisotopová diagnostika

Druh vyšetření	Ef. dávka [mSv]
Statická scintigrafie ledvin	1,5
Dynamická scintigrafie ledvin	2,2
Dynamická cholescintigrafie	2,3
Scintigrafie skeletu	3,4
Perfúzní scintigrafie	1,2

CT tělo		9,2
plic		
Scintigrafie štítné žlázy		2,2
Scintigrafie perfuze myokardu		7,5

Přibližná radiační zátěž pro nejčastější metody rentgenové a radioisotopové diagnostiky

Účinky IZ na hmyz:

- 100x odolnější než obratlovci, smrtelné dávky $10^3 - 10^4$ Gy
- nižšími dávkami lze hmyz **sterilizovat**
- **radiační hubení hmyzu:** potemník v obilí, při 100 Gy dochází ke sterilizaci samečka ale k přímému usmrcení je třeba 5000 Gy
- **ochrana starých dřevěných uměleckých předmětů** (výhoda proti chemické sterilizaci)
- **hubení hmyzu ve volné přírodě:** vypouštění sterilizovaných samečků (nezanáší se do přírody insekticidy)

Účinky IZ na mikroorganismy:

- jsou velmi odolné, smrtelné dávky $10^3 - 10^4$ Gy
- **radiační sterilizace:** obvazový materiál, chirurgické potřeby, injekční stříkačky, jehly, umělé srdeční chlopně, apod)
- **radiační ozáření potravin:** dávka 30 - 70 kGy, potraviny jsou vakuované a zmrazené (masné výrobky) - potlačení vzniku zapáchajících produktů radiolýzy
- jednotlivé země povolují ozařování různých druhů potravin
- nepovoluje se ozařovat čerstvé maso, ovoce a zeleninu

Účinky IZ na rostliny:

- pozorovaný účinek závisí na objemu chromozomů (objem jádra připadajícím na jeden chromozom), na rychlosti růstu rostliny, na frakcionaci dávky záření
- **jednorázové ozáření**: odolnější pomaleji rostoucí rostliny
- **chronické ozařování**: odolnější rychleji rostoucí rostliny
- **jehličnaté dřeviny**: zpomalení růstu při 0,01 - 0,1 Gy/den
- **ostatní rostliny**: zpomalení růstu při 1-100 Gy/den
- **radiační šlechtění**: ozáření semen 100 - 1000 Gy, vznik mutací, část užitečných (odrůda obilí s většími výnosy a odolnější vůči chorobám apod.)

LD50 v Gy pro RTG a γ záření:

Druh	Dávka
Ovce	1.5-2
Člověk	2.5-3.5
Pes	2.5-3
Myši různých linií	5.5-12
Ptáci, hadi	8-20
Členovci	10-1000
Kvasinky	300-500
Rostliny	10-1500
Micrococcus radiodurens	10^5 Gy/den

Ostatní účinky IZ:

- odstraňování statické elektřiny (ionizace vzduchu α zářením ^{210}Po či ^{241}Am)
- **ionizační hlásiče kouře** (^{241}Am o malé aktivitě (cca 10 kBq + ionizační detektor záření, kouř mění ionizační proud)
- **radionuklidové baterie** využívají tepelných účinků IZ (absorpce α a β záření v látce), tepelnou energii převádí na elektrickou ($^{238}\text{PuO}_2$ v kardiostimulátorech (g) či družicích (kg), poločas 86 let, použití asi 20 let, nevzniká γ : $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{234}\text{U} + \alpha$)

- **radionuklidové světelné zdroje** jsou založeny na emisi viditelného světla při absorpci IZ v některých látkách (kdysi ^{226}Ra a ZnS), dnes β zářiče ^3H , ^{85}Kr , ^{147}Pm , signalizační lampy, číselníky hodinek a měřicí přístroje apod.
- **barvení skel**: ozařování dávkami 1 kGy, vytvářejí se poruchy absorbující viditelné světlo, trvanlivost desítky let (měření dávek), zkracuje se za vyšších teplot

7. Použití radionuklidů a izotopů v biologii a lékařství

Izotopový indikátor – prvek, jehož přirozené izotopové složení bylo změněno (^{14}C byl přidán k přírodnímu C, či ^{198}Au k přírodnímu zlatu), většinou radioaktivním izotopem

Indikátorová metoda – metoda využívající izotopové indikátory ke sledování různých dějů a procesů

Izotopové indikátory:

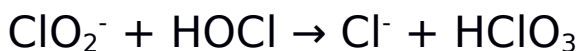
- 1) sledujeme chování určité chemické látky, izotopový indikátor **musí být ve stejné chemické formě**, jako je sledovaná látka (př. sledování biochemických dějů)
- 2) sledujeme určitou látku či objekt, přičemž **chemické vlastnosti** izotopového indikátoru **nejsou podstatné** (sledování proudění kapalin v potrubí)

Izotopicky substituované sloučeniny – sloučeniny, ve kterých je stabilní izotop nahrazen izotopem radioaktivním ve všech molekulách (2- ^{14}C)-octová kyselina)

Izotopicky značené molekuly – směs látky s přírodním izotopovým složením a látky izotopově substituované (2- ^{14}C)-octová kyselina)

Indikátory v chemii a biochemii:

Reakce chloritanu s kyselinou chlornou:

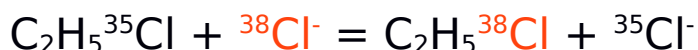
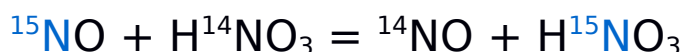


Ze stechiometrického zápisu není zřejmé, zda kyselina chlorečná vzniká oxidací chloritanu či kyseliny chlorné. Tím, že se v jednom reaktantu chlór označí, např. izotopem ^{36}Cl , lze jednoznačně původ chlóru v kyselině chlorečné zjistit.



Významným přínosem bylo použití radioaktivních indikátorů pro pochopení procesů fotosyntézy. Používá se $^{14}\text{CO}_2$ (rostliny) a $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ (řasy).

Další příklady:



Studium metabolických přeměn:

Látka, jejíž metabolismus se zkoumá (**A**), se podá organismu ve značené formě. Po určité době se izoluje látka **B** (předpokládaný metabolit látky A). **Je-li látka B radioaktivní, je metabolitem látky A.** Metabolismus složitějších látek probíhá přes řadu **mezistupňů**, které je **možné všechny identifikovat metodou radioaktivních indikátorů.**

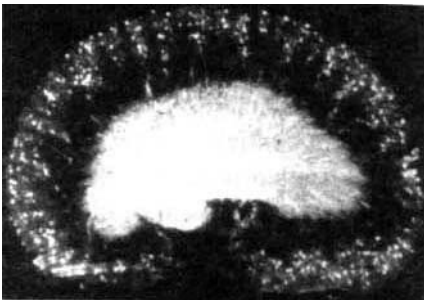
V kombinaci s **autoradiografickou** detekcí bývají izotopové metabolické studie také spojeny se zjišťováním, **ve kterém orgánu k metabolismu dochází**, případně **kde se ukládají produkty metabolismu.**



Autoradiogram zmrazeného řezu krysou pořízený 6h po injekci roztoku $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$

Receptorové studie:

Zjišťuje se, ve kterých tkáních a buňkách se nacházejí **receptory biochemicky a fyziologicky účinných látek**. Tyto látky se ve značené formě podávají organismu a jejich lokalizace ve tkáních nebo buňkách se provádí **autoradiograficky**.



Autoradiogram řezu ledvinou krysy, ukazující lokalizaci receptorů endothelinu

Studium samodifúze – sledování pohybu částic v čisté látce vlivem tepelného pohybu (např. pohyb molekul vody ve vodě, používá se $^3\text{H}_2\text{O}$)

Studium výměnných reakcí – sledování výměny identických částí mezi jednotlivými molekulami $\text{AX} + \text{BX} \rightarrow \text{AX} + \text{BX}$, kde dochází k výměně identických částic X.

Další použití izotopových indikátorů:

- stanovení **rozpuštěnosti málo rozpustných látek** (ve vodě, v jiných rozpouštědlech, kovů v roztavených solích, plynů v kapalinách apod.)

- stanovení **tenzí par**, málo těkavých látek (vysokovroucí kapaliny, roztavené kovy)
- stanovení **velikosti povrchu sorbentu** (sleduje se množství naadsorbovaného radioaktivního plynu)
- rychlost **vylučování kovů na elektrodách** a sledování následných elektrodoých dějů
- **zadržování aktivních komponent pracích prášků** na vláknech tkaniny atd.

Metoda izotopového zředování:

Radioaktivní indikátor o **známé měrné aktivitě**

$$a_0 = A_0 / m_0$$

kde **A₀** je aktivita indikátoru a **m₀** jeho hmotnost, se přidá ke vzorku, který obsahuje neznámou hmotnost **m_x** látky.

Měrná aktivita indikátoru se tím **sníží na hodnotu**

$$a_1 = A_0 / (m_0 + m_x).$$

Aktivita **A₀** přitom zůstala stejná, před zředěním pro ni platil vztah **A₀ = a₀m₀**, po přidání vzorku **A₀ = a₁ (m₀ + m_x)**. Z rovnosti těchto dvou vztahů dostáváme:

$$\begin{aligned} a_0 m_0 &= a_1 (m_0 + m_x) \\ a_0 m_0 / a_1 &= m_0 + m_x \\ a_0 m_0 / a_1 - m_0 &= m_x \end{aligned}$$

$$m_x = m_0 (a_0/a_1 - 1)$$

Při použití indikátoru **ve stejné chemické formě jako sledovaný vzorek** můžeme určit **množství konkrétní látky v systému**.

Použití:

- pro stanovení **obsahu vyměnitelného fosforu v půdě**. Vzorek půdy se třepe s roztokem $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ o známé měrné aktivitě, vyměnitelný fosfor přechází do roztoku a měrnou aktivitu indikátoru sníží
- **stanovení objemu** v případech kdy objem nezaujímá jednoduchý geometrický tvar (podzemní zásobníky plynu, složitý systém potrubí, objem krevní plasmy apod.)
- **určování velikosti hmyzí (rybí aj.) populace: část jedinců se označí (n_0)**, po promísení s neoznačenou populací se odchytí **stejný počet jedinců**, jako bylo označeno a zjistí se **kolik z nich je radioaktivní (n_1)**, poměr n_0/n_1 **udává zřetěvací faktor**, celkový počet v populaci pak činí: n_0^2/n_1

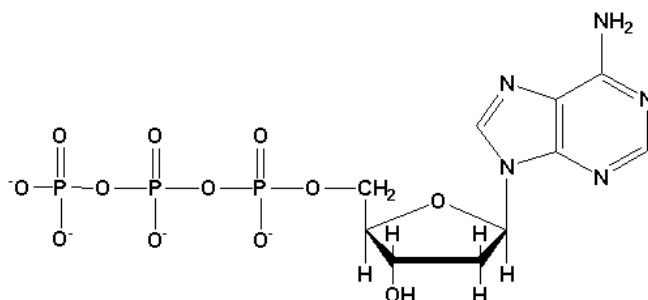
Indikátory v biologii:

- **rozsah a směr migrace drobnějších živočichů** (část jedinců se označí a po určité době se z počtu označených jedinců určuje rozsah a směr migrace)
- studium **pohybu a hromadění bakterií** v živočišném organismu
- **pohyb a přenos potravy a živin** (přenášení potravy uvnitř hmyzího společenství), u rostlin se autoradiograficky stanovuje rozložení přijatých živin v rostlinném těle
- v molekulární biologii bylo **pomocí značené DNA a RNA** prokázáno že **DNA slouží jako matrice pro vznik RNA**
- v současnosti je jednou z častých aplikací **sekvenování**

Sekvenování:

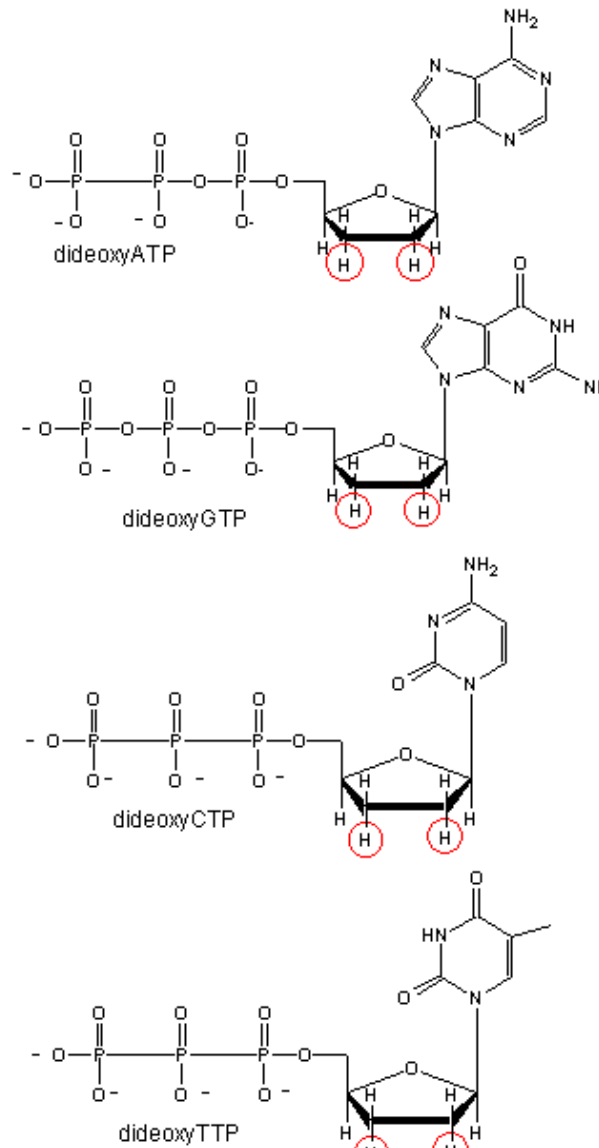
Pro určení přesné sekvence nukleotidů v úseku DNA se používají především dvě metody - **Sangerova** a **Maxam a Gilbertova**.

Sangerova:



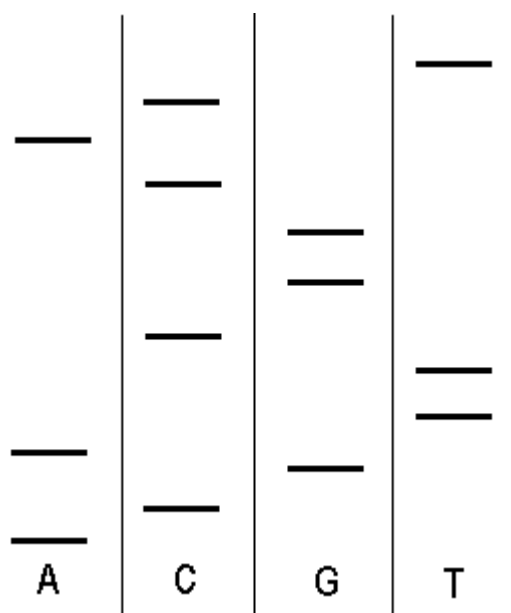
Deoxyadenosine Triphosphate (dATP)

- využívá speciální vlastnosti **speciálních nukleotidů** - 2', 3' dideoxyribonukleotidtrifosfátů



- tyto nukleotidy (ddATP, ddCTP, ddGTP a ddTTP) **nemají na 3' uhlíku ribosy OH skupinu**, na tento konec již nemůže být navázán žádný další nukleotid navázán
- v reakční směsi máme **namnoženou jednovláčkovou DNA** (jejíž sekvenci chceme znát), DNA polymerázu, příslušné primery (aby DNA polymeráza mohla začít pracovat), dostatek deoxyribonukleotidtrifosfátů (dATP, dCTP, dGTP a dTTP) pro syntézu a určité množství **jednoho typu dideoxyribonukleotidtrifosfátu - dejme tomu ddATP**

- polymeráza začne od nasednuvších primerů doplňovat sekvenci druhého vlákna, pokaždé když polymeráza doplňuje dATP do řetězce, **je určitá pravděpodobnost, že namísto dATP použije ddATP**
- pokud je zařazen ddATP, potom polymerace **na tomto místě končí**. Necháme-li tedy takovouto reakci proběhnout, získáme **velké množství různě dlouhých oligonukleotidů**, které budou **všechny končit adeninem** (dojde k zastavení polymerace u ddATP)
- pokud necháme proběhnout **stejnou reakci, tentokrát s ddCTP, ddGTP a nakonec i ddTTP**, dostaneme **4 směsi oligonukleotidů**, přičemž v každé směsi budou oligonukleotidy končit příslušnou bází
- klasická metoda vyhodnocení spočívá v provedení elektroforézy, přičemž jsou v gelu vytvořeny **4 dráhy, každá pro jinou oligonukleotidovou směs**



Sekvence - ACGATTCTCGGCACT

Maxam a Gilbertova:

- metoda se vyhodnocuje podobným způsobem (elektroforetický), ovšem reakce, při které vznikají různé dlouhé oligonukleotidy, nevyužívá polymerace podle vzorového vlákna, ale **specifického chemického štěpení DNA za určitými nukleotidy**

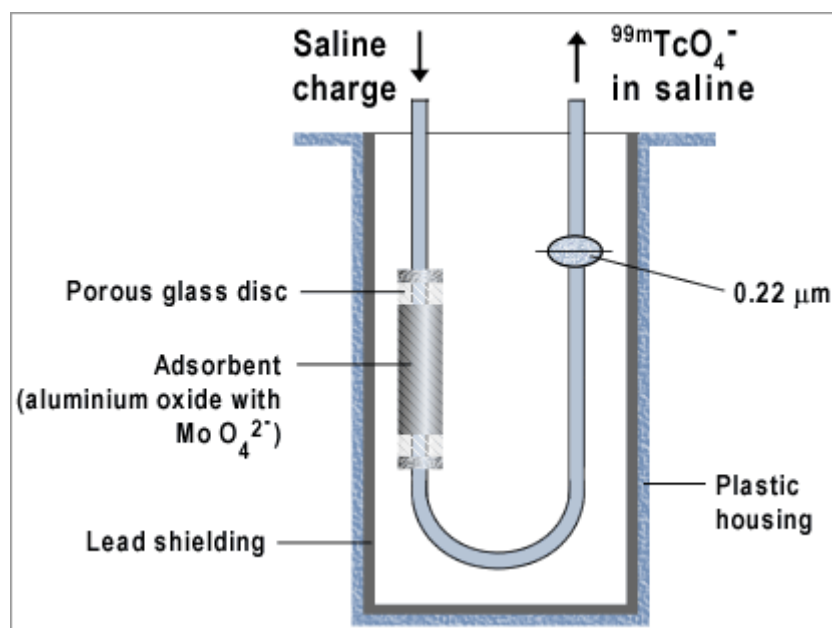
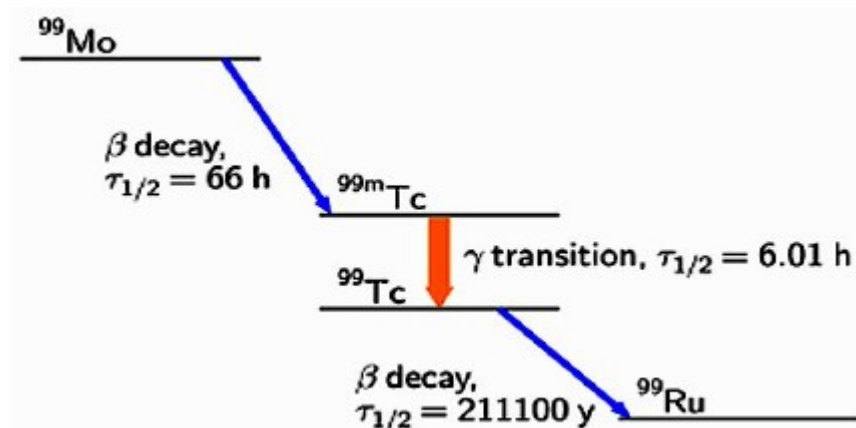
Indikátory v lékařské diagnostice:

Značené sloučeniny užívané v lékařství se nazývají **radiofarmaka**.

Radiofarmaka - diagnostická a terapeutická - jedná se o kovy v komplexech, chelátech. Pokud se hromadí v příslušné tkáni, fungují přímo jako radiofarmaka.

Mateřský nuklid	Dceřinný nuklid	Separace
⁴⁴ Ti (47 r)	⁴⁴ Sc (3,92 h)	Dowex-1/ HCl, šťav. k.
⁵² Fe (8,3 h)	^{52m} Mn (21 min)	Dowex-1/ 8 M HCl,
⁶² Zn (9,2 h)	⁶² Cu (9,8 min)	Dowex-1/ 0,1M HCl/NaCl,
⁶⁸ Ge (288 d)	⁶⁸ Ga (68 min)	Al ₂ O ₃ /roztok EDTA
⁷² Se (8,4 d)	⁷² As (26 h)	Dowex-50/H ₂ O
⁸² Sr (25 d)	⁸² Rb (1,25 min)	Al ₂ O ₃ /1,8 M NaCl
⁸¹ Rb (4,6 h)	^{81m} Kr (13 s)	profouknutí vzduchem
⁸⁷ Y (80,3 h)	⁸⁷ Sr (2,8 h)	Dowex-1/0,01M (NH ₄) ₂ CO ₃
⁹⁰ Sr (28,8 r)	⁹⁰ Y (64,1 h)	Katex/různé eluenty
⁹⁹ Mo (66 h)	^{99m} Tc (6 h)	Al ₂ O ₃ / fysiол. roztok
¹¹³ Sn (115 d)	^{113m} In (99,5 min)	Al ₂ O ₃ / fysiол. roztok
¹¹⁵ Cd (53,4 h)	^{115m} In (4,5 h)	Al ₂ O ₃ / fysiол. roztok
¹²² Xe (20,1 h)	¹²² I (3,6 min)	cirkulace Xe rozt. NaHCO ₃
¹³² Te (3,2 d)	¹³² I (2,3 h)	sublimace
¹³⁴ Ce (76 h)	¹³⁴ La (6,7 min)	anex
¹⁸⁸ W (69 d)	¹⁸⁸ Re (17 h)	Al ₂ O ₃ , pak anex
¹⁹⁴ Os (6 r)	¹⁹⁴ Ir (19,2 h)	G.Therm.Chrom
²⁰² Pb (3.10 ⁵ r)	²⁰² Tl (12,2 d)	extrakce

85% všech vyšetření se provádí pomocí ^{99m}Tc , eluuje se z kolony jako technecistan sodný.



Terapeutické použití radiofarmak:

Radioizotopová terapie – buď se roztok s radiofarmakem vstříkne k postiženému místu (př. **synovektomie**), případně se podá nitrožilně a radiofarmakum se vhodnou interakcí (**radioimunoterapie**)

nahromadí v postižené tkáni - nádoru. Vhodné poločasy rozpadu jsou desítky hodin až dnů, beta či alfa zářiče, zdravá tkáň by měla dostat maximálně 0,1 Gy.

Radioimunoterapie - na peptid (protilátku specifickou pro určitý receptor, ideálně pro nádorovou buňku) naváže komplex s radioaktivním kovem, je schopna léčit i rozptýlené nádorové buňky - metastázy. Celý komplex musí být stabilní a nevolňovat radioaktivní prvek v tkáních. **Somatostatin** a jeho analoga - peptid o 14 aminokyselinách, vhodný pro radioimunoterapie, často se váže na receptory somatostatinu v nádorových buňkách. Biologický poločas je ale jen 3 minuty (rozkládají ho peptidázy). Syntetická analoga oktreotid ($T_b = 20$ minut), [Tyr3] - oktreotid ($T_b = 90$ minut).

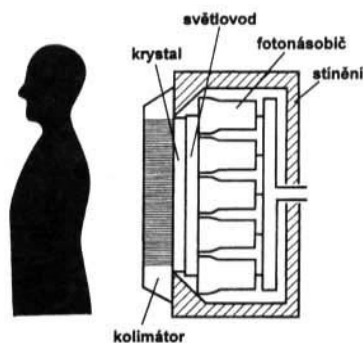
Radiační synovektomie - léčení zánětů kloubů vstříknutím radioaktivního koloidu (kvůli zabránění úniku do krevního řečiště), β . zářič, na větší klouby se volí zářič s větší energií β ., terapie je zároveň paliativní (lze snížit množství léků proti bolesti)

Diagnostické použití radiofarmak:

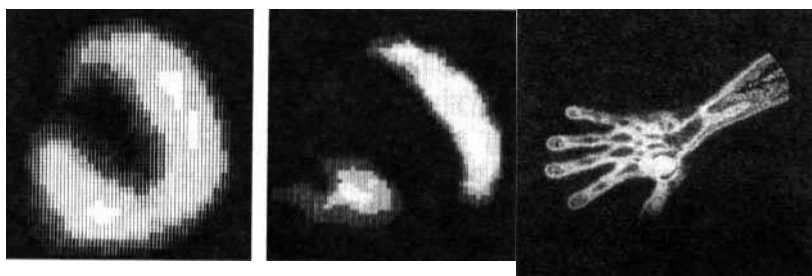
Pro diagnostické účely musí být radioaktivní nuklid přítomen v takové chemické formě, **kterou tkáň vyšetřovaného orgánu přijímá**. Vhodné jsou β . (s následnou emisí γ), β_+ (anihilační γ - **PET**), jaderné izomery a nuklidy podléhající elektronovému záchytu (RTG záření), o energiích γ kolem 100 keV a poločasech rozpadu řádově hodin až dnů.

Nejběžnější zařízení v diagnostické nukleární medicíně je **gamakamera** - scintilační krystal je buď velký plochý anebo plno malých krystalů s fotonásobiči. Vzniká scintigram, případně u rotující gamakamery vzniká 3D

scitigram – **SPECT**. Ideální energie gama záření je 100 – 250 keV.



Gamakamera



Scintigram zdravého srdce (vlevo) a srdce po infarktu myokardu (uprostřed); kontrola prokrvení ruky přiřité pacientovi po úrazu (vpravo)

Radiofarmaka značená β_+ nestabilními radionuklidy **umožňují využít principu tomografie (pozitronová emisní tomografie - PET)**. Nejčastěji se pracuje s ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O a ^{18}F (mají krátké poločasy rozpadu a kromě fluoru se jedná o biogenní prvky, **kterými lze značit řadu biologicky aktivních molekul**). Korigování na zeslabení anihilačních fotonů se provádí externím zdrojem gama umístěným na kruhovém rámu vně pacienta.

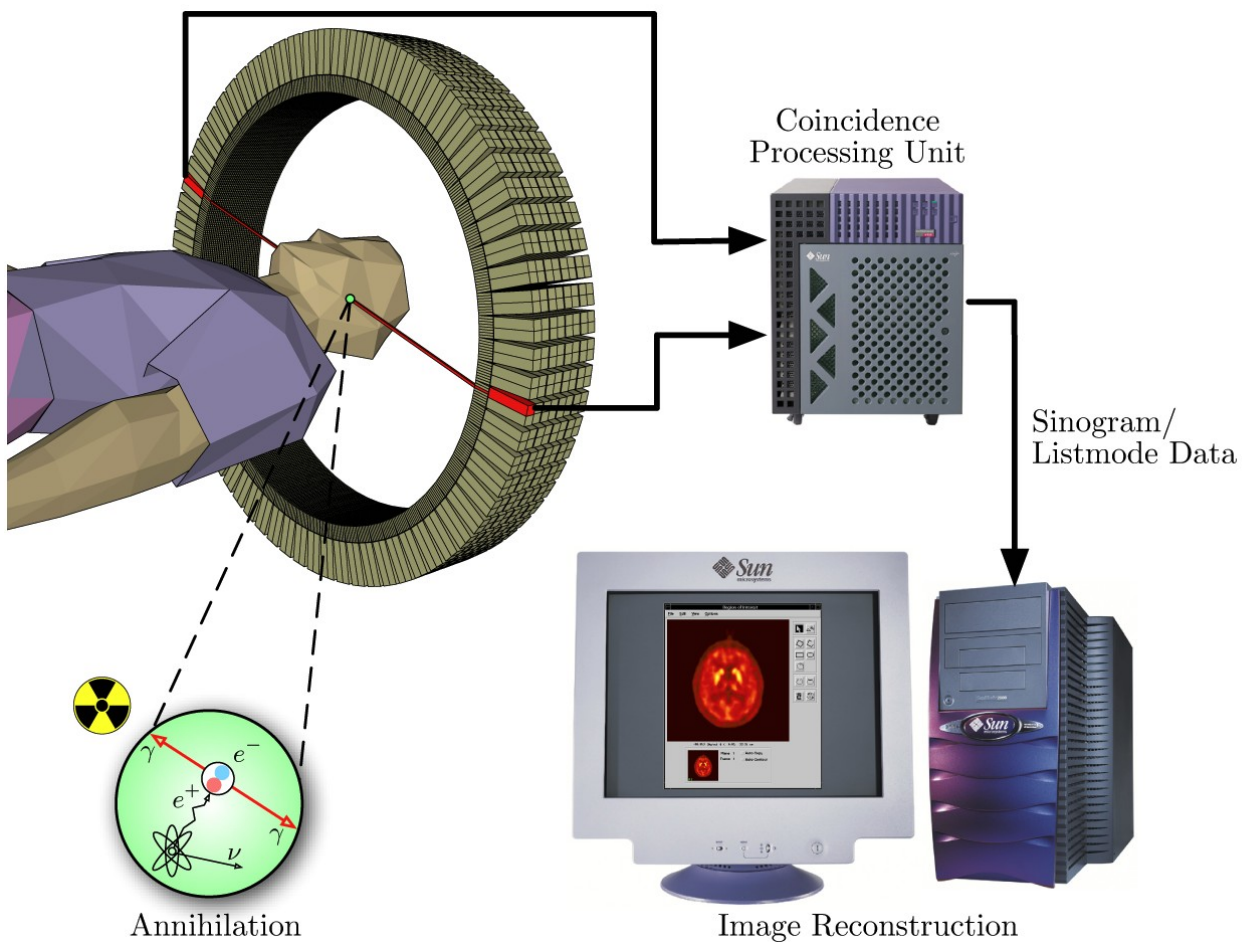


Schéma pozitronové emisní tomografie

SPECT (*Single-photon emission computed tomography*)

Principem je podání radiofarmaka vyzařujícího γ záření (nejčastěji ^{99m}Tc) a pořízení řady scintigrafických snímků pacienta z několika směrů v rovině tomografického řezu. Používá se nejčastěji jedné až několika scintilačních kamer, které se otáčí kolem vyšetřovaného po malých úhlových krocích. Kolem dlouhé osy pacienta rotují **jedna až tři gamakamery**, které tak mohou záření snímat z různých úhlů a tvořit tak transverzální, frontální i sagitální řezy tělem pacienta, a tak vytvořit **3D zobrazení** patologického ložiska.

[3D Myš](#) Zdroj: Christian Lackas, <delta@lackas.net>

Indikátory v hydrologii:

- pohyb vody **v různých přírodních systémech**
- pohyb dešťové vody a vody z tajícího sněhu **v podpovrchových vodách**
- rychlost průtoků ve **vodních tocích, pronikání vody z jezer, nádrží a kanálů**
- studium **podzemních vod** (stáří, vztah mezi povrchovými a podzemními vodami)
- **vztahy mezi vodonosnými vrstvami**

Používá se ^{58}Co , ^{60}Co , ^{51}Cr . Tritium vzniklé při nadzemních D pokusech jaderných a termionukleárních zbraní bylo pojato jako **pulsní označení hydrosféry tritiem** a bylo využito pro studium pohybu a výměny vod zejména v podzemních rezervoárech. Například nepřítomnost tritia v rozsáhlém podzemním rezervoáru pod Saharou ukázala, že **v současnosti nedochází k jeho doplňování z vnějších zdrojů.**

Indikátory v průmyslu a výzkumu:

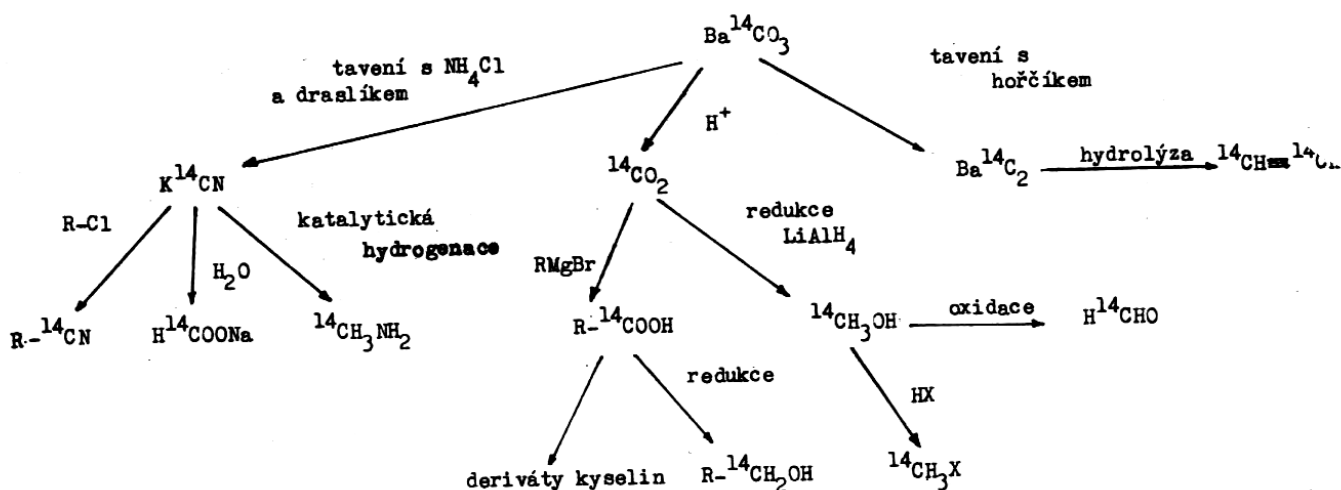
- měření **průtoku kapalin**, sledování **transportu surovin** v technologickém zařízení, průběh procesů mísení apod. (průtok a doba setrvání odpadních vod **v čistících stanicích** a odkalovacích nádržích, pohyb roztaveného železa a strusky **ve vysoké peci**, průchod **plynů vysokou pecí**, netěsnosti **v potrubí ropovodu**, netěsnosti **v potrubí plynovodu** atd.)
- **Defektoskopie** - pomocí gama záření se prozařuje materiál (sváry, potrubí, nádrže) a vhodným zobrazovacím zařízením se detekuje.
- **RTG fluorescenční analýza** - hmota se ionizuje pomocí RTG, gama či beta, dochází k vyražení elektronů z K či L slupek a při následném zaplnění orbitalů dochází k emisi charakteristického RTG. To se měří nejlépe polovodičovými detektory,

Příprava značených sloučenin:

Ozařováním v reaktoru neutrony. Vzniká tak např. $^{24}\text{NaCl}$, ^{42}KCl , $^{59}\text{FeCl}_2$, $\text{H}_3^{32}\text{PO}_4$, $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$. Dále se vyrábí další sloučeniny.

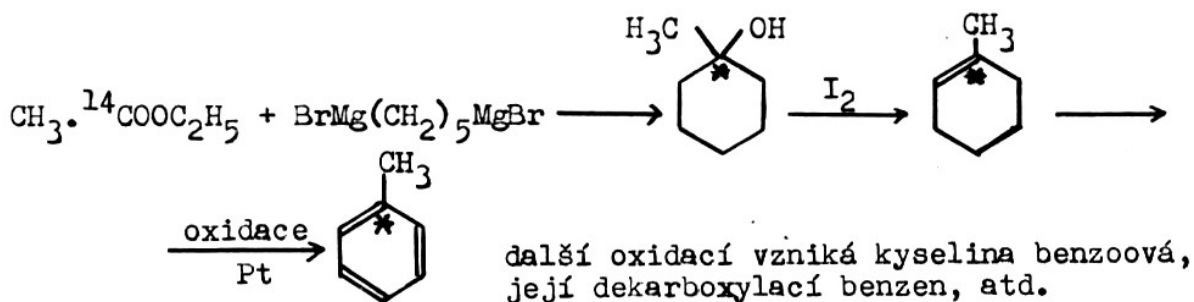
Preparativní metody:

Sloučeniny s ^{14}C

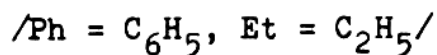
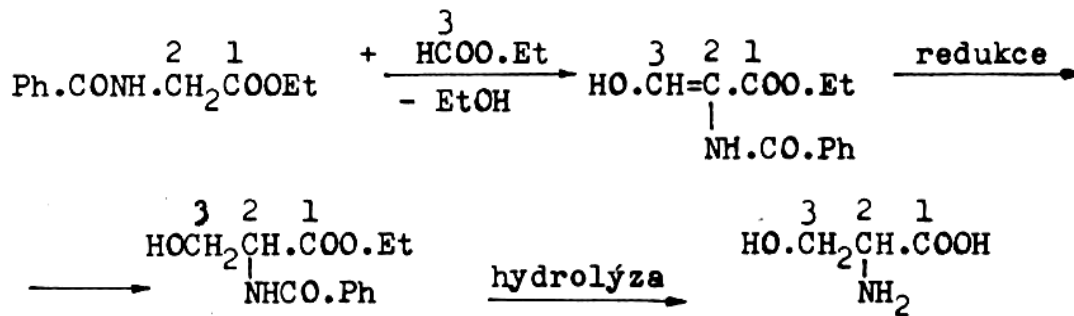


Příprava dalších sloučenin:

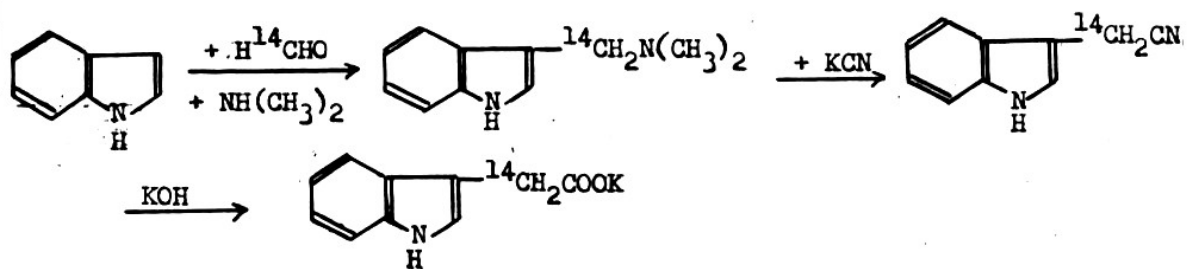
Syntéza značeného aromatického kruhu



Syntéza serinu-¹⁴C formylací N-benzoylglycinesteru

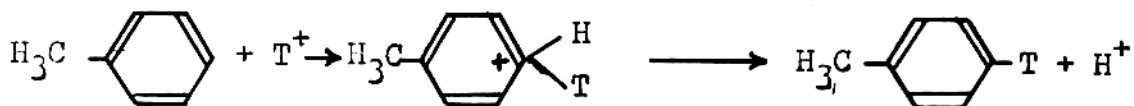


Syntéza β-indolyloctové kyseliny značené v postranním řetězci

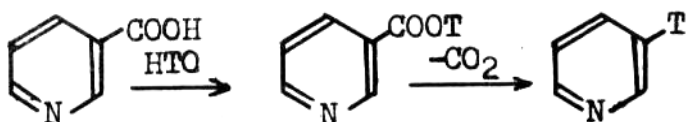


Sloučeniny s ³H

Rozpuštění sloučenin v THO (kyselá katalýza H₂SO₄, CF₃COOH atd.) či Pt čerň.



Kyselé vodíky se dají tritiovat protřepáním v THO a odpařením THO. Kombinací s následnými reakcemi lze T zavést i tam kde je vázáno kovalentně.



Sloučeniny s ^{35}S

Většinou se vychází z elementární síry ^{35}S , reakcí s P se připraví $\text{P}_2^{35}\text{S}_5$, tato látka pak slouží k zavádění síry do organických sloučenin.

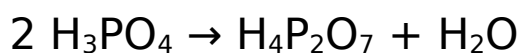


S touto látkou pak lze připravit velmi snadno další organické látky značené sírou.

Sloučeniny s ^{32}P :



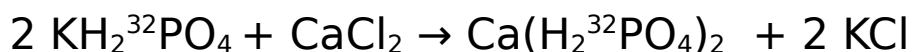
V koncentrovaných roztocích vzniká až $\text{H}_4^{32}\text{P}_2\text{O}_7$

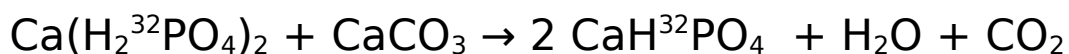


Značení pak probíhá zahříváním kyseliny difosforečné s látkou, jež chceme fosforylovat. Přebytečné fosforylační činidlo odstraníme pomocí LiOH, Li_3PO_4 je nerozpustný.

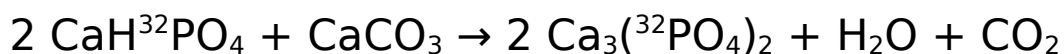
Značená hnojiva:

Přímé ozařování $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, případně se ozařuje KH_2PO_4 a vzniklý $\text{KH}_2^{32}\text{PO}_4$ slouží jako výchozí surovina pro další sloučeniny.



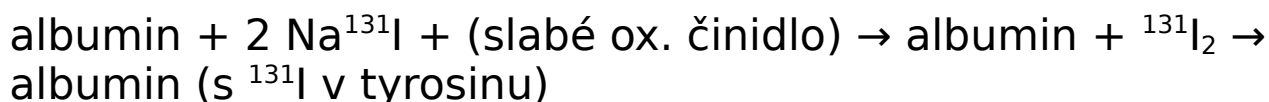


žiháním s CaCO_3 vzniká $\text{Ca}_3(^{32}\text{PO}_4)_2$



Sloučeniny s ^{131}I :

^{131}I je k dispozici většinou ve formě Na^{131}I , tato látka se pak používá buď přímo, anebo můžeme pomocí I značit např. bílkoviny.



Nezreagovaný Na^{131}I se oddělí např. na ionexu.

Biosyntetické metody:

Využívají schopností živých organismů, hlavně rostlin a mikroorganismů. Jako „krmivo“ slouží $^{14}\text{CO}_2$, HTO, $\text{H}_3^{32}\text{PO}_4$, $\text{H}_2^{35}\text{SO}_4$ ve směsi se stejnými neaktivními látkami. Tyto látky jsou začleněny do složitějších molekul.

Po nějaké době se organismus usmrtí a žádaná sloučenina se izoluje a vyčistí běžnými biochemickými postupy.

S výhodou se připravují látky, jejichž syntéza je velice obtížná, jako jsou různé **vitaminy** a **hormony**. Často také připravujeme značené **bílkoviny**, **polysacharidy** a **nukleové kyseliny**. Po rozštěpení těchto biopolymerů dostáváme značené **aminokyseliny**, **nukleotidy** a **jednoduché sacharidy**. Značení je ale většinou **nespecifické**.

Značení ^{14}C :

Využívá se fotosyntézy. Připravíme tak nespecificky značenou **glukosu, fruktosu, sacharosu a škrob**.

Listy se exponují v uzavřené a osvětlené aparatuře po dobu cca 40 hodin v atmosféře $^{14}\text{CO}_2$, který připravíme rozkladem uhličitanu kyselinou. Ten je za 40 hodin spotřebován. Rostliny se usmrtí ponořením do vroucího etanolu, rozdrtí se a extrahují se 80 % etanolem. Extrakt se poté odpaří, odparek se rozpustí ve vodě, barviva se odstraní extrakcí do etheru a ve vodném roztoku zůstávají sacharidy ^{14}C , které se dělí chromatograficky.

Před biosyntézou je žádoucí, aby byl objekt chudý na připravovanou sloučeninu. Listy se proto nechají několik dnů ve tmě, aby byl sacharid spotřebován dýcháním. Teprve poté se provádí fotosyntéza s využitím $^{14}\text{CO}_2$.

Aminokyseliny se syntetizují pomocí řas *Chlorella* vyživovaných $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$. Vznikají značené bílkoviny, které po hydrolýze poskytují jednotlivé značené **aminokyseliny**.

Tuky, nukleové kyseliny, barviva aj. se získají po promytí a vysušení řas, které se následně extrahují metanolem. DNA se pak extrahuje 10% NaCl.

Biosyntetické metody přípravy sloučenin značených **jinými radioizotopy** spočívají v **pěstování organismů v živných roztocích s vhodným prekurzorem**.

Sojové boby – tritiovaná voda – tritiované mastné kyseliny.

E. coli – ^{32}P -fosfát – DNA (^{32}P)

Penicillium chrysogenum – $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$ – benzylpenicilin (^{35}S)

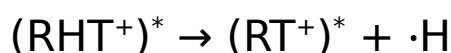
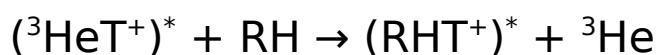
Králík – nitrožilně $\text{Na}_2\text{H}^{32}\text{PO}_4$ – ATP (^{32}P) extrakcí k. trichloroctovou

Wilzbachovo triciování (objeveno v r. 1956):

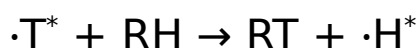
Organická látka v plynné, kapalně, nebo pevné fázi je vystavena plynnému tritiu o aktivitě stovek GBq. Mechanismus je komplikovaný a doposud ne zcela prozkoumaný.

Nejpravděpodobnější vysvětlení:

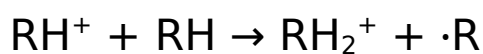
V T_2 se rozpadne jedno T za vzniku $^3\text{HeT}^+$, který je značně excitován a přímo reaguje s organickou látkou:



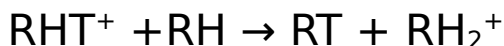
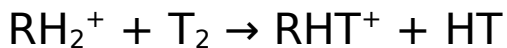
nebo přijímá elektron z okolí a se substrátem reaguje excitované T:



Případně k excitaci substrátu (a dodání tak aktivační energie) dochází vlivem β záření tritia, které působí **radiolýzu substrátu:**



Produkty radiolýzy pak reagují s T či mezi sebou:



apod.

Oba mechanismy se uplatňují **současně** a u různých substrátů jsou zastoupeny **nestejně**.

Wilzbachovo tritiování se provádí ve vakuové aparatuře, organická látka se odpaří a většinou ulpívá na stěnách nádoby, poté se do baňky vpraví tritium, buď rozlomením ampule s T_2 nebo př. rozkladem UT_3 . Na 0,2 g U připadá 185 GBq T. Tritiování probíhá několik dnů až týdnů.

Tritiování je ale **nespecifické** a **neprobíhá rovnoměrně**.

Největším problémem je **odstranění následných vedlejších aktivních produktů** (substrát se vlivem záření rozkládá na menší fragmenty, které se tritují, případně reagují s původní sloučeninou). Produkty tritiování se proto vždy **čistí**, většinou **chromatograficky**. Čištění probíhá v několika krocích, dokud nedosáhneme požadované čistoty.

8. Ochrana před IZ v ČR - legislativa

Zákon 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (**atomový zákon**), ve znění pozdějších předpisů, upravuje způsob využívání jaderné energie a ionizujícího záření a podmínky vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie a činností vedoucích k ozáření, systém ochrany osob a životního prostředí před nežádoucími účinky ionizujícího záření, povinnosti při přípravě a provádění zásahů vedoucích ke

snížení přírodního ozáření a ozáření v důsledku radiačních nehod, zvláštní požadavky pro zajištění občanskoprávní odpovědnosti za škody v případě jaderných škod, podmínky zajištění bezpečného nakládání s radioaktivními odpady, výkon státní správy a dozoru při využívání jaderné energie, při činnostech vedoucích k ozáření a nad jadernými položkami.

Vyhláška 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů, Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně, která je jedním z prováděcích předpisů atomového zákona. Prováděcí předpis je právní předpis určený k upřesnění obsahu právní normy obsažené v zákoně.

Aktuální znění obou dokumentů najdete na stránkách Státního úřadu pro jadernou bezpečnost .

V následujícím textu zmíníme některé důležité skutečnosti uvedené ve vyhlášce 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů.

§ 1 Předmět úpravy

(1) Tato vyhláška v souladu s právem Evropských společenství upravuje

- a) podrobnosti ke způsobu a rozsahu zajištění radiační ochrany při práci na pracovištích, kde se vykonávají radiační činnosti, včetně podrobností pro vymezování, označování a oznamování nebo schvalování sledovaných nebo kontrolovaných pásem na těchto pracovištích,
- d) zprošťovací úrovně, uvolňovací úrovně, limity ozáření, optimalizační meze, mezní hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a vodách a nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin,

- e) podrobnosti ke klasifikaci zdrojů ionizujícího záření a kategorizaci radiačních pracovníků a pracovišť, kde se vykonávají radiační činnosti,
- g) rozsah a způsob nakládání se zdroji ionizujícího záření, nakládání s radioaktivními odpady a uvádění radionuklidů do životního prostředí, k nimž je třeba povolení, a upravuje podrobnosti pro zajištění radiační ochrany při těchto radiačních činnostech,
- j) vymezuje veličiny, parametry a skutečnosti důležité z hlediska radiační ochrany, stanoví rozsah jejich sledování, měření, hodnocení, ověřování, zaznamenávání, evidence a způsob předávání údajů Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (dále jen "Úřad").

§ 2 Základní pojmy

Pro účely této vyhlášky se rozumí

- c) **běžným provozem** – provoz zdroje ionizujícího záření za podmínek stanovených v povolení k jeho provozu nebo k nakládání s ním a ve schválené dokumentaci,
- d) **generátorem záření** – zařízení nebo přístroj vysílající ionizující záření, jehož součásti pracují při rozdílu potenciálu vyšším než 5 kV, zejména rentgenová zařízení a urychlovače částic,
- h) **kosmickým zářením** – ionizující záření kosmického původu,
- i) **lékařským dohledem** – sledování zdravotní způsobilosti a vývoje zdravotního stavu u pracovníků kategorie A z hledisek případných vlivů ionizujícího záření na jejich zdraví
- j) **monitorováním** – cílené měření veličin charakterizujících ozáření, pole záření nebo radionuklidy a hodnocení výsledků těchto měření pro účely usměrňování ozáření,
- m) **osobními dávkami** – souhrnné označení pro veličiny charakterizující míru zevního i vnitřního ozáření jednotlivé osoby, zejména efektivní dávku, úvazek efektivní dávky a

ekvivalentní dávky v jednotlivých orgánech nebo tkáních; osobní dávky se měří osobními dozimetry,

n) **otevřeným radionuklidovým zářičem** –

radionuklidový zářič, který není uzavřeným radionuklidovým zářičem,

o) **pracovištěm s otevřenými zářiči** – pracoviště, kde je nakládáno s otevřenými radionuklidovými zářiči,

p) **pracovním místem** – část pracoviště jednoznačně charakterizovaná svými ochrannými (izolačními, ventilačními a stínicími) vlastnostmi, vymezená prostorově nebo technologicky (pracovní stůl, aplikační nebo vyšetřovací box, digestoř, hermetizovaná podtlaková skříň ap.), kde mohou být prováděny samostatné práce se zdroji ionizujícího záření; v jedné místnosti může být více pracovních míst, pokud každé tvoří z hlediska organizace práce samostatný celek,

s) **přírodním zdrojem ionizujícího záření** – zdroj ionizujícího záření pozemského nebo kosmického původu,

t) **radioaktivní kontaminací** – znečištění jakéhokoli materiálu či jeho povrchu, prostředí nebo osoby radioaktivní látkou; pokud jde o lidské tělo, zahrnuje jak zevní kontaminaci kůže, tak vnitřní kontaminaci bez ohledu na cestu příjmu,

x) **radionuklidem** – druh atomů, které mají stejný počet protonů, stejný počet neutronů, stejný energetický stav a které podléhají samovolné změně ve složení nebo stavu atomových jader,

y) **radionuklidovým zářičem** – zdroj ionizujícího záření obsahující radioaktivní látky, kde součet podílů aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní aktivit (zprošťovací úrovně jsou uvedeny v příloze vyhlášky a pro některé radionuklidy i na konci této kapitoly) pro tyto radionuklidy je větší než 1 a současně součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní hmotnostních aktivit pro tyto radionuklidy je větší než 1,

cc) **umělým zdrojem ionizujícího záření** – zdroj ionizujícího záření jiný než přírodní zdroj ionizujícího záření,

- dd) **uzavřeným radionuklidovým zářičem** – radionuklidový zářič, jehož úprava, například zapouzdrněním nebo ochranným překryvem, zabezpečuje zkouškami ověřenou těsnost a vylučuje tak, za předvídatelných podmínek použití a opotřebování, únik radionuklidů ze zářiče,
- ee) **vnitřním ozářením** – ozáření osoby ionizujícím zářením z radionuklidů vyskytujících se v těle této osoby, zpravidla jako důsledek příjmu radionuklidů požitím nebo vdechnutím,
- gg) **výpustí** – kapalná nebo plynná látka vypouštěná do životního prostředí, která obsahuje radionuklidy v množství nepřevyšujícím uvolňovací úroveň nebo vypouštěná do životního prostředí za podmínek uvedených v povolení k uvádění radionuklidů do životního prostředí,
- hh) **zevním ozářením** – ozáření osoby ionizujícím zářením ze zdrojů ionizujícího záření, které se nacházejí mimo ni,
- ii) **zneškodňováním radioaktivních odpadů** – umístění radioaktivních odpadů na úložiště nebo na určité místo bez úmyslu je znovu použít; zneškodňování zahrnuje rovněž oprávněné uvolnění radioaktivního odpadu přímo do životního prostředí a jeho následný rozptyl,
- ll) **nevyužívaným zdrojem** – zdroj ionizujícího záření, který se již k činnosti, pro niž bylo Úřadem vydáno povolení podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona, nevyužívá a jehož další využití k této činnosti se nepředpokládá.

§ 3 Veličiny radiační ochrany

Pro účely této vyhlášky se veličinami radiační ochrany rozumí

- a) **ekvivalentní dávka H_T** , což je součin radiačního váhového faktoru w_R uvedeného v tabulce č. 1 přílohy č. 5 a střední absorbované dávky D_{TR} v orgánu nebo tkáni T pro ionizující záření R, nebo součet takových součinů, jestliže pole ionizujícího záření je složeno z více druhů nebo energií,

b) **efektivní dávka E**, což je součet součinů tkáňových váhových faktorů w_T uvedených v tabulce č. 2 přílohy č. 5 a ekvivalentní dávky H_T v ozářených tkáních nebo orgánech T,

Tabulka č. 1 a č. 2 přílohy č. 5 vyhlášky 307/2002 Sb.

**Tabulka č. 1
Radiační
váhové faktory**

Radiační

**Tabulka č. 2.
Tkáňové váhové
faktory**

Typ záření a příp. energie	Radiační váhový faktor w_R		Tkáň, orgán	Tkáňový váhový faktor w_T
fotony	1		Gonády	0,20
elektrony, miony	1		Červená kostní dřeň	0,12
neutrony, méně než 10 keV	5		Tlusté střevo	0,12
neutrony, 10keV až 100 keV	10		Plíce	0,12
neutrony, 100 keV až 2 MeV	20		Žaludek	0,12
neutrony, 2 MeV až 20 MeV	10		Močový měchýř	0,05
neutrony, více než 20 MeV	5		Mléčná žláza	0,05
protony, více než 2 MeV,	5		Játra	0,05
(mimo odražené)			Jícen	0,05
částice alfa, těžká jádra,	20		Štítná žláza	0,05
štěpné fagmenty			Kůže	0,01
			Povrchy kostí	0,01
			Ostatní orgány a	0,05

- c) **kolektivní efektivní**, popř. **ekvivalentní dávka S**, což je součet efektivních, popř. ekvivalentních dávek všech jednotlivců v určité skupině,
- d) **úvazek efektivní dávky $E(\tau)$** , popř. **ekvivalentní dávky $H_T(\tau)$** , což je časový integrál příkonu efektivní dávky, popř. ekvivalentní dávky po dobu τ od příjmu radionuklidu; není-li uvedeno jinak, činí tato doba 50 roků pro příjem radionuklidů u dospělých a období do 70 let věku pro příjem radionuklidů u dětí; obdobně je definován také úvazek kolektivní efektivní, popř. ekvivalentní dávky,
- e) **dávkový ekvivalent H**, což je součin absorbované dávky v uvažovaném bodě tkáně a jakostního činitele Q uvedeného v tabulce č. 3 přílohy č. 5 vyjadřujícího rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření,

Lineární přenos energie L [keV/μm]	Jakostní činitel Q(L)
méně než 10	1
10 až 100	$0,32 \cdot L^{-2,2}$
více než 100	$300 \cdot L^{-0,5}$

- f) **osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$** , což je dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v hloubce tkáně d ,
- i) **příjem**, což je aktivita radionuklidu přijatá do lidského organismu z prostředí, obvykle požitím nebo vdechnutím,

§ 4 Kritéria pro klasifikaci zdrojů

(1) Zdroje ionizujícího záření se podle vzestupného ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením klasifikují jako **nevýznamné, drobné, jednoduché, významné a velmi významné**, a to na základě

- a) příkonu dávkového ekvivalentu,
b) technické úpravy a způsobu provedení,

- c) aktivity a hmotnostní aktivity radionuklidových zářičů, zpravidla ve vztahu ke zprošťovacím úrovním,
- d) možnosti úniku radionuklidů z radionuklidových zářičů,
- e) možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění,
- f) typického způsobu nakládání a související míry možného ozáření,
- g) potenciálního ohrožení plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu, neoprávněného použití, nebo nesprávného použití,
- h) rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.

Tabulka č. 1 přílohy č. 1

Zprošťovací úrovně aktivity a hmotnostní aktivity některých radionuklidů

Pro vybrané radionuklidy, označené značkou + v prvním sloupci této tabulky, se hodnoty zprošťovacích úrovní aktivity a hmotnostní aktivity vztahují nejen na tyto radionuklidy samotné, ale reprezentují také tyto radionuklidy v rovnováze s produkty radioaktivní přeměny.

Nuklid	Aktivita [Bq]	Hmotnostní aktivita [kBq/kg]
³ H	10 ⁹	10 ⁶
¹⁴ C	10 ⁷	10 ⁴
²² Na	10 ⁶	10
³² P	10 ⁵	10 ³
³³ P	10 ⁸	10 ⁵
³⁵ S	10 ⁸	10 ⁵
⁴⁰ K	10 ⁶	10 ²
⁶⁰ Co	10 ⁵	10

Nuklid	Aktivita [Bq]	Hmotnostní aktivita [kBq/kg]
$^{90}\text{Sr}+$	10^4	10^2
^{137}Cs	10^4	10
+		
$^{238}\text{U}+$	10^4	10
^{239}Pu	10^4	1

§ 6 Nevýznamné zdroje

Nevýznamným zdrojem ionizujícího záření je

- elektrické zařízení emitující ionizující záření, avšak neobsahující komponenty pracující s rozdílem napětí převyšujícím 5 kV,
- katodová trubice určená k zobrazování nebo jakékoli jiné elektrické zařízení pracující při rozdílu potenciálů nepřevyšujícím 30 kV, u něhož příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než $1 \mu\text{Sv/h}$,
- radioaktivní látka, u níž součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity není větší než 1 nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity není větší než 1,
- uzavřený radionuklidový zářič, u něhož součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity není větší než 10,

§ 7 Drobné zdroje

Drobným zdrojem ionizujícího záření je

- a) generátor záření, který není nevýznamným zdrojem, konstruovaný tak, že příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než 1 $\mu\text{Sv/h}$ s výjimkou míst určených za běžných pracovních podmínek k manipulaci a obsluze zařízení výhradně rukama, kde může příkon dávkového ekvivalentu dosahovat až 250 $\mu\text{Sv/h}$,
- b) uzavřený radionuklidový zářič, který není nevýznamným zdrojem, u něhož součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity je menší než 100 v případě dlouhodobých alfa zářičů, včetně alfa-neutronových zdrojů, a menší než 1000 v ostatních případech,
- d) otevřený radionuklidový zářič, který není nevýznamným zdrojem, u něhož součet podílů aktivit nebo hmotnostních aktivit jednotlivých radionuklidů a hodnot aktivit nebo hmotnostních aktivit těchto radionuklidů uvedených v tabulce č. 1 přílohy č. 1 je menší než 10,
- e) ionizační hlásiče požáru, u nichž je součet aktivit zářičů větší než desetinásobek příslušné zprošťovací úrovně aktivity, nacházející se současně v jedné budově a v držbě jedné osoby.

§ 8 Jednoduché zdroje

Jednoduchými zdroji ionizujícího záření jsou všechny zdroje ionizujícího záření, které nejsou nevýznamnými, drobnými, významnými ani velmi významnými zdroji ionizujícího záření.

§ 9 Významné zdroje

Významným zdrojem ionizujícího záření je

- a) generátor záření určený k radioterapii nebo radiodiagnostice v humánní medicíně, kromě kostních

densitometrů, kabinových rentgenových zařízení a zubních rentgenových zařízení,

c) zdroj ionizujícího záření určený k radioterapii protony, neutrony a jinými těžkými částicemi,

e) radionuklidový ozařovač pro ozařování potravin a surovin nebo jiný stacionární průmyslový ozařovač, u kterých s ohledem na obsah radionuklidů, na dávkový příkon a s ohledem na typický způsob nakládání s nimi, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo toto zařazení potvrzeno v rámci typového schvalování podle § 23 zákona nebo v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,

f) mobilní defektoskop s uzavřenými radionuklidovými zářiči.

§ 10 Velmi významné zdroje

Velmi významným zdrojem ionizujícího záření je jaderný reaktor.

§ 11 Kritéria pro kategorizaci pracovišť

(1) Pracoviště, kde se vykonávají radiační činnosti, se kromě pracovišť, kde se používají výhradně nevýznamné nebo typově schválené drobné zdroje ionizujícího záření, kategorizují vzestupně podle ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením na pracoviště I., II., III. a IV. kategorie na základě

a) klasifikace zdrojů ionizujícího záření, o nichž se předpokládá, že se s nimi bude na pracovišti nakládat,

b) očekávaného běžného provozu pracoviště a související míry možného ozáření pracovníků a obyvatelstva,

c) zaměření radiační činnosti a náročnosti na zajištění radiační ochrany a jakosti při této činnosti,

- d) vybavení a zajištění pracoviště pro bezpečnou práci se zdroji ionizujícího záření, zejména ochrannými pomůckami, izolačními a stínicími zařízeními, provedením ventilace a kanalizace,
- e) možnosti radioaktivní kontaminace pracoviště nebo jeho okolí radionuklidy,
- f) možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění,
- g) potenciálního ohrožení plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu,
- h) rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.

§ 12 Pracoviště I. kategorie

Pracovištěm I. kategorie je

- a) pracoviště s drobnými typově neschválenými zdroji ionizujícího záření,
- c) pracoviště s veterinárním, zubním nebo kabinovým rentgenovým zařízením,
- e) pracoviště s technickým rentgenovým zařízením, na němž charakter radiační činnosti nevyžaduje vymezení kontrolovaného pásma,
- f) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona.

Tabulka č. 1 přílohy č. 4

Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči	Základní požadavky na vybavení pracoviště ventilačními a izolačními zařízeními a na úroveň provedení kanalizace
	Jako běžná chemická laboratoř, tj. stěny a

I.	strop s omyvatelným a neporézním povrchem, podlaha pokryta odolnou dobře čitelnou podlahovinou (např. PVC), pracovní povrchy z lehce čitelného materiálu (např. laminát nebo nerez), celistvé a bezešvé, odpadní jímka z lehce čitelného materiálu, může být přímo napojena na kanalizaci.
II.	Jako dobře vybavená chemická laboratoř, tj. kromě požadavků na pracoviště kategorie I navíc utěsněné spoje mezi podlahou, stěnami, stropem a pracovními povrchy, digestoř, kanalizace zpravidla napojena na samostatnou zachytnou nádrž.
III.	Jako velmi dobře vybavená chemická laboratoř, tj. kromě požadavků na pracoviště kategorie II navíc vybavení podtlakovými skříněmi a kanalizací napojenou na samostatnou zachytnou nádrž.

§ 13 Pracoviště II. kategorie

Pracovištěm II. kategorie je

- a) pracoviště s jednoduchým zdrojem ionizujícího záření, které není pracovištěm I. kategorie,
- g) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,

§ 14 Pracoviště III. kategorie

Pracovištěm III. kategorie je

- b) pracoviště se zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zářič určené k radioterapii, včetně brachyterapie, klasifikovaným jako významný zdroj,
- c) uznaný sklad,
- d) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,
- e) pracoviště se stacionárním průmyslovým ozařovačem určeným k ozařování potravin a surovin, předmětů běžného užívání nebo jiných materiálů,
- f) pracoviště pro těžbu a zpracování uranové rudy zahrnující těžbu, úpravu, nakládání s koncentrátem, provoz dekontaminačních stanic, shromažďování produktů hornické činnosti na odvalech a v kalových polích.

§ 15 Pracoviště IV. kategorie

Pracovištěm IV. kategorie je

- a) jaderné zařízení ve smyslu § 2 písm. h) bod 1 zákona,
- b) úložiště radioaktivních odpadů ve smyslu § 2 písm. u) zákona,
- c) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, které s ohledem na vysoké aktivity zpracovávané současně na jednom pracovním místě, na typický způsob provozu pracoviště a související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných odchylek od běžného provozu, z nehod nebo havárií nelze zařadit do nižší kategorie,
- d) sklad vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva.

§ 16 Kategorizace radiačních pracovníků

(1) Pro účely monitorování a lékařského dohledu se radiační pracovníci podle ohrožení zdraví ionizujícím zářením zařazují do kategorie A nebo B na základě očekávaného ozáření za běžného provozu a při předvídatelných poruchách a odchylkách od běžného provozu, s výjimkou ozáření v důsledku radiační nehody nebo havárie.

(2) Pracovníky kategorie A jsou radiační pracovníci, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně nebo ekvivalentní dávku vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e); ostatní radiační pracovníci jsou pracovníky kategorie B.

§ 19 Obecné limity

(1) Obecné limity jsou

- a) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **1 mSv za kalendářní rok** nebo za podmínek stanovených v povolení k provozu pracoviště III. nebo IV. kategorie výjimečně hodnota 5 mSv za dobu 5 za sebou jdoucích kalendářních roků,
- b) pro ekvivalentní dávku **v oční čočce** hodnota **15 mSv za kalendářní rok**,
- c) pro průměrnou ekvivalentní dávku **v 1 cm² kůže** hodnota **50 mSv za kalendářní rok**.

§ 20 Limity pro radiační pracovníky

(1) Limity pro radiační pracovníky jsou

- a) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **100 mSv za 5 za sebou jdoucích kalendářních roků**,

- b) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **50 mSv za kalendářní rok**,
- c) pro ekvivalentní dávku **v oční čočce** hodnota **150 mSv za kalendářní rok**,
- d) pro průměrnou ekvivalentní dávku **v 1 cm² kůže** hodnota **500 mSv za kalendářní rok**,
- e) pro ekvivalentní dávku na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky hodnota 500 mSv za kalendářní rok.

§ 23 Omezování ozáření ve zvláštních případech

(2) Ozáření plodu u těhotných žen pracujících na pracovištích I. až IV. kategorie se neprodleně poté, co žena těhotenství oznámí zaměstnavateli, omezí úpravou podmínek práce tak, aby bylo nepravděpodobné, že součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření plodu alespoň po zbývající dobu těhotenství překročí 1 mSv.

§ 26 Informování a příprava pracovníků

(1) Osoba, která provozuje pracoviště, kde je vymezeno sledované pásmo, (dále jen "provozovatel sledovaného pásma") a držitel povolení, který provozuje pracoviště, kde je vymezeno kontrolované pásmo, (dále jen "provozovatel kontrolovaného pásma") musí prokazatelně předem informovat radiační pracovníky, kteří mají pracovat v těchto pásmech, a osoby používající v těchto pásmech zdroje ionizujícího záření po dobu jejich specializované přípravy na výkon povolání

- a) o charakteru a rozsahu možného ohrožení zdraví, o rizicích spojených s jejich prací a o případné zdravotní újmě s tím spojené,
- b) o obecných postupech radiační ochrany a opatřeních, která musí být přijata, zejména o těch, která odpovídají

provozním a pracovním podmínkám vztahujícím se jak k dané činnosti obecně, tak i k jednotlivým pracovištím a pracím, na které mohou být přiděleni,

c) o důležitosti plnit požadavky ochrany zdraví i technické a administrativní požadavky k zajištění radiační ochrany,

d) a v případě žen také o významu včasného oznámení těhotenství z důvodu rizik ozáření pro nenarozené dítě a radioaktivní kontaminace kojence v případě vnitřní kontaminace radionuklidy.

§ 27 Soustavný dohled nad radiační ochranou

(1) Soustavný dohled nad radiační ochranou podle § 18 odst. 1 písm. i) zákona musí být zajištěn v rozsahu odpovídajícím zdrojům ionizujícího záření, s nimiž se na pracovišti nakládá, způsobu nakládání s nimi, související míře možného ozáření, včetně ozáření plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu a s uvážením rizika vzniku radiační nehody nebo havárie. Soustavný dohled nad radiační ochranou se zajišťuje **osobami s přímou odpovědností za zajištění radiační ochrany a dohlížejícími osobami.**

§ 29 Sledované pásmo

(1) Sledované pásmo se vymezuje všude tam, kde se očekává, že efektivní dávka by mohla být vyšší než 1 mSv ročně nebo ekvivalentní dávka by mohla být vyšší než jedna desetina limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e).

(2) Sledované pásmo se zpravidla vymezuje na všech pracovištích I. až IV. kategorie. Sledované pásmo se nevymezuje, pokud by jeho rozsah nepřesáhl vymezení kontrolovaného pásma.

(3) Sledované pásmo se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená. Na vchodech nebo ohraničení se sledované

pásmo označuje upozorněním "Sledované pásmo se zdroji ionizujícího záření" (viz konec této kapitoly), případně i znakem radiačního nebezpečí a údaji o charakteru zdrojů a rizik s nimi spojených.



S L E D O V A N É P Á S M O
S E Z D R O J I Z

§ 30 Kontrolované pásmo

(1) Kontrolované pásmo se vymezuje všude tam, kde by efektivní dávka mohla být vyšší než 6 mSv ročně nebo kde by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e).

(2) Kontrolované pásmo se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená, a s takovým zajištěním, aby do ní nemohly vstoupit nepovolané osoby. Na vchodech nebo ohraničení se kontrolované pásmo označuje znakem radiačního nebezpečí a upozorněním "Kontrolované pásmo se zdroji ionizujícího záření, vstup nepovolaným osobám zakázán", případně i údaji o charakteru zdrojů a rizik s nimi spojených.

Výpočet maximální možné zpracovávané aktivity na pracovišti dané kategorie

Koeficienty vybavenosti pracovního místa

Vybavení pracovního místa izolujícími a ventilačními zařízeními	Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči		
	I.	II.	III.
Podtlaková hermetizovaná skříň s rukavicemi nebo manipulátory	10	10	1
Částečně hermetizovaná podtlaková skříň	10	1	0,1
Uzavřený eluční, či podobný systém	1	1	0,1
Radiochemická digestoř, skříň s laminárním prouděním	1	1	0,1
Volná plocha anebo pracovní stůl v místnosti se sestupným laminárním prouděním	0,1	0,1	0,01
Běžná chemická digestoř	0,1	0,01	0,001
Skříň bez ventilace (ochranný štít, stan ap.)	0,1	0,01	0,001
Volná plocha, pracovní stůl	0,01	0,001	0,0001

Maximální aktivity na pracovním místě

Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči	Maximální aktivita na jednom standardně vybaveném pracovním místě v závislosti na charakteristice materiálů a práci s nimi			
	normální	za mokra	těkavé kapaliny	potenciálně prašné
I.	60 Sv / h _{inh.}	3000 Sv / h _{inh.}	1 Sv / h _{inh.}	3 Sv / h _{inh.}
II.	600 Sv / h _{inh.}	30000 Sv / h _{inh.}	150 Sv / h _{inh.}	600 Sv / h _{inh.}
III.	8000 Sv / h _{inh.}	30000 Sv / h _{inh.}	1600 Sv / h _{inh.}	8000 Sv / h _{inh.}

Konverzní faktory h_{inh.} pro příjem radioaktivních aerosolů (upraveno, dle tabulky č. 4 přílohy č. 3 vyhlášky 307/2002 Sb.)

Nuklid	h _{inh.} [Sv / Bq]	Nuklid	h _{inh.} [Sv / Bq]
²² Na	1,5 x 10 ⁻⁹	⁹⁰ Sr	2,7 x 10 ⁻⁸
³² P	3,2 x 10 ⁻⁹	¹³⁷ Cs	5,5 x 10 ⁻⁹
³³ P	1,4 x 10 ⁻⁹	²³² Th	3,5 x 10 ⁻⁵
³⁵ S	1,3 x 10 ⁻⁹	²³⁸ U	5,5 x 10 ⁻⁷
⁶⁰ Co	2,0 x 10 ⁻⁸	²³⁹ Pu	4,0 x 10 ⁻⁵

Například pro nejvyšší aktivitu roztoku obsahující ¹³⁷Cs na jednom pracovním místě, který zpracováváme na běžném pracovním stole v laboratoři I. kategorie (koeficient vybavenosti 0,01) platí $0,01 \times 3000 / (5,5 \times 10^{-9}) = 5,5 \times 10^9$ Bq tedy 5,5 GBq.

Příklady maximální aktivity roztoků dalších, na pracovištích Masarykovy univerzity běžných nuklidů, které lze současně zpracovávat na jednotlivých pracovních místech v laboratoři I. kategorie jsou:

Radionuklid	Pracovní místo	Maximální aktivita	Radionuklid	Pracovní místo	Maximální aktivita
³ H	laboratorní stůl	244 GBq	³² P	laboratorní stůl	9,38 GBq
	digestoř	2,44 TBq		digestoř	93,8 GBq
¹⁴ C	laboratorní stůl	17,2 MBq	³³ P	laboratorní stůl	21,4 GBq
	digestoř	172 MBq		digestoř	214 GBq
³⁵ S	laboratorní stůl	23,1 GBq	¹³⁷ Cs	laboratorní stůl	5,5 GBq
	digestoř	231 GBq		digestoř	55 GBq

Rozdělení radionuklidů do tříd podle radiotoxicity a potenciálního ohrožení zevním ozářením

Radionuklidy jsou podle toxicity zařazeny do čtyř tříd, v závislosti na nejvyšším přípustném ročním příjmu inhalací. Rozdělení vybraných radionuklidů do tříd ukazuje tabulka (viz níže).

Pro vybrané radionuklidy, označené značkou + se hodnoty uvolňovacích úrovní vztahují nejen na tyto radionuklidy samotné, ale reprezentují také tyto radionuklidy v rovnováze s jejich produkty radioaktivní přeměny.

Třída	Radiotoxicita	Radionuklidy
1	vysoká	²² Na, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs+, ²³⁵ U+, ²³⁹ Pu, ²⁴¹ Am
2	vyšší střední	¹¹ C, ⁹⁰ Sr, ²³² Th, ²³⁸ U+
3	nižší střední	¹⁴ C, ³² P, ³⁶ Cl, ^{99m} Tc

Třída	Radiotoxicita	Radionuklidy
4	nízká	^3H , ^{33}P , ^{35}S