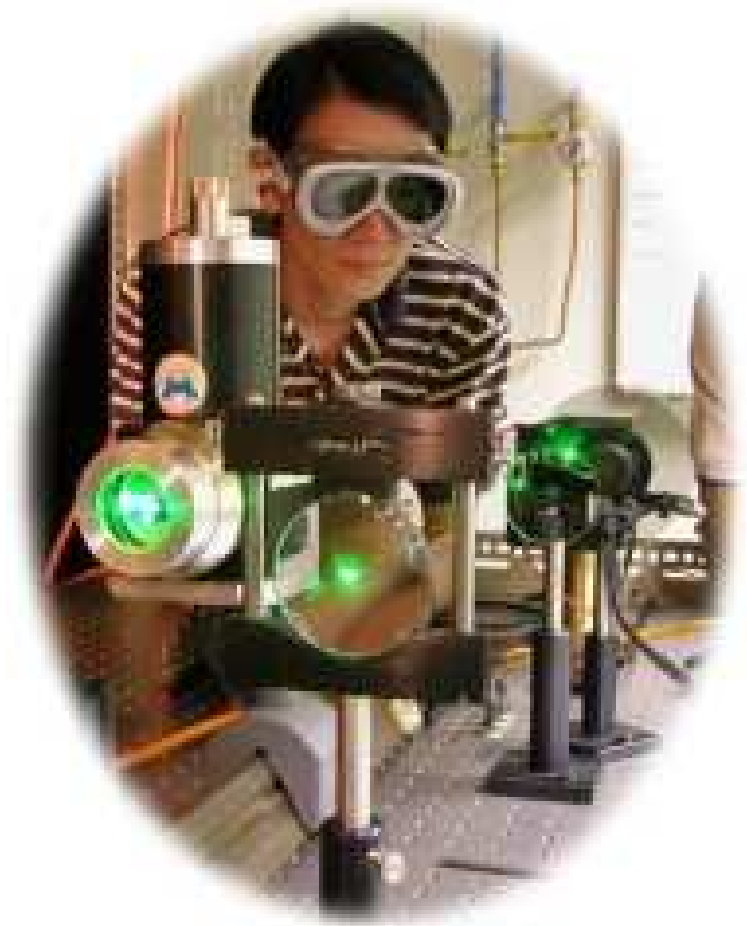


**ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ  
POZNATKY  
O IONIZUJÍCÍM  
A NEIONIZUJÍCÍM ZÁŘENÍ,  
JEHO DETEKCE  
A DOZIMETRIE**

# NEIONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ



# Rádiové vlny

- část spektra elektromagnetického záření s vlnovými délkami od 1 milimetru až po tisíce kilometrů;
- **technické vlny** (nízkofrekvenční vlny) → vznikají v různých technických zařízeních, vlnová délka dosahuje řádově několik desítek až tisícovek kilometrů;
- **rozhlasové a televizní vlny** → přenášejí rozhlasové a televizní vysílání, vznikají v tzv. oscilačních obvodech jako důsledek přeměny energie elektrického pole na energii magnetického pole, vlnová délka leží v intervalu  $10^4$  m až  $10^{-2}$  m.

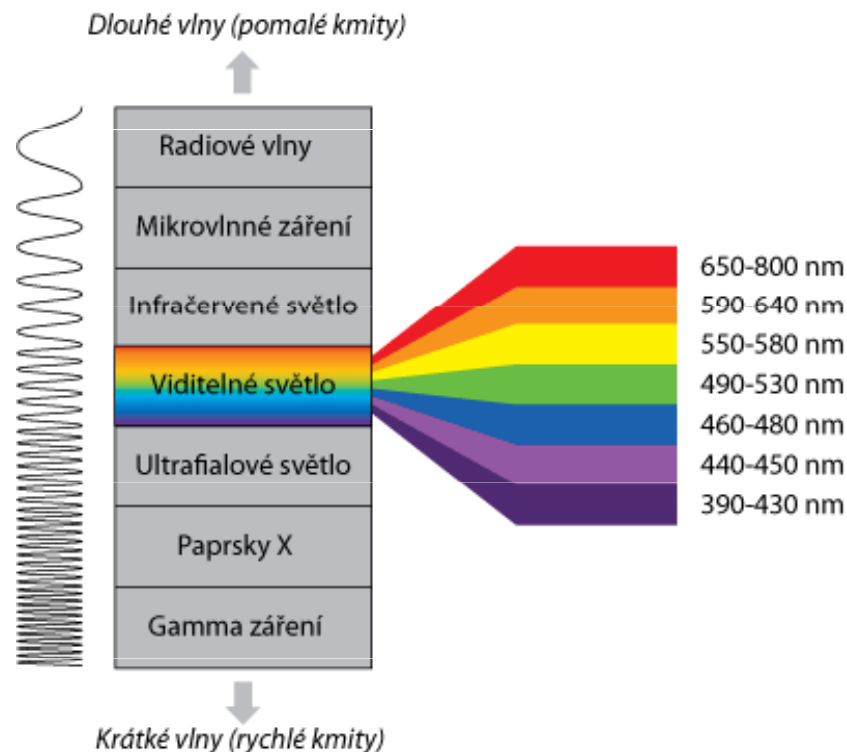
# Mikrovlny

- vlnová délka leží v rozmezí  $10^{-2}$  m až  $10^{-4}$  m;
- rozsáhlé využití v technické praxi  
→ v radarové technice ke zjišťování polohy a vzdálenosti letících těles, v komunikační technice k bezdrátovému propojení počítačů;
- působení mikrovln na molekuly vody se využívá k ohřevu pokrmů v mikrovlnné troubě.



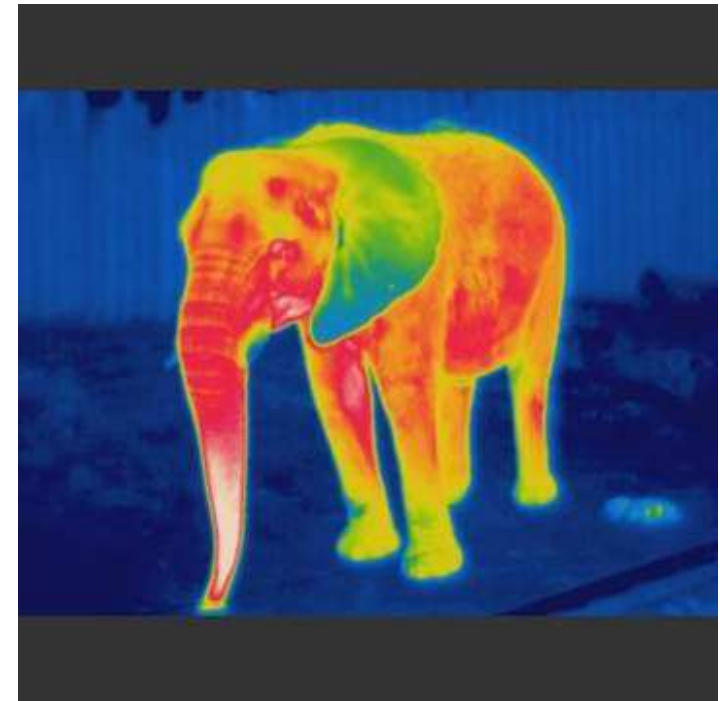
# Viditelné světlo

- elektromagnetické vlnění vnímatelné lidským okem;
- vlnové délky leží v intervalu 400 nm – 750 nm;
- každá vlnová délka představuje určitou barvu světla.



# Infračervené záření

- záření, které leží pod červenou oblastí → IR záření (z anglického infra red);
- infračervené záření vysílají prakticky všechna tělesa → využití v dalekohledech pro noční pozorování nebo v termovizi;
- prochází lépe než světlo zakalenými prostředími → uplatnění v meteorologii nebo ve vojenské technice;
- využití v elektronice → dálková ovládní.



# Viditelné světlo

- zdrojem světla nazýváme každé těleso, v němž světlo vzniká a z něhož se šíří do okolního prostoru;
- **monochromatická světla** (jednobarevná = monofrekvenční), vyzařované světlo obsahuje právě jednu vlnovou délku → laser;
- **polychromatická světla** (vícebarevná = polyfrekvenční) = světlo složené → slunce, žárovka;
- na šíření světla mají vliv také vlastnosti prostředí, kterým světlo prochází → absorpce světla (pohlcení světla; například barevná skla) nebo k rozptylu světla (matné sklo, tenký papír).

# Ultrafialové záření

- ultrafialové záření (za fialovou) → UV záření (z anglického ultra violet);
- vlnové délky leží v intervalu 400 nm – 100 nm;
- zdrojem tělesa s vysokou teplotou → slunce, další hvězdy, elektrický oblouk, speciální výbojky;
- způsobuje ionizaci vzdušného kyslíku → podílí se na tvorbě ozónu;
- chemické účinky → zčernání fotocitlivé vrstvy;
- biologické účinky → zhnědnutí pokožky, ve velkých dávkách může vyvolat rakovinu kůže.



# Ultrafialové záření

## Ultrafialové sluneční záření - UV záření



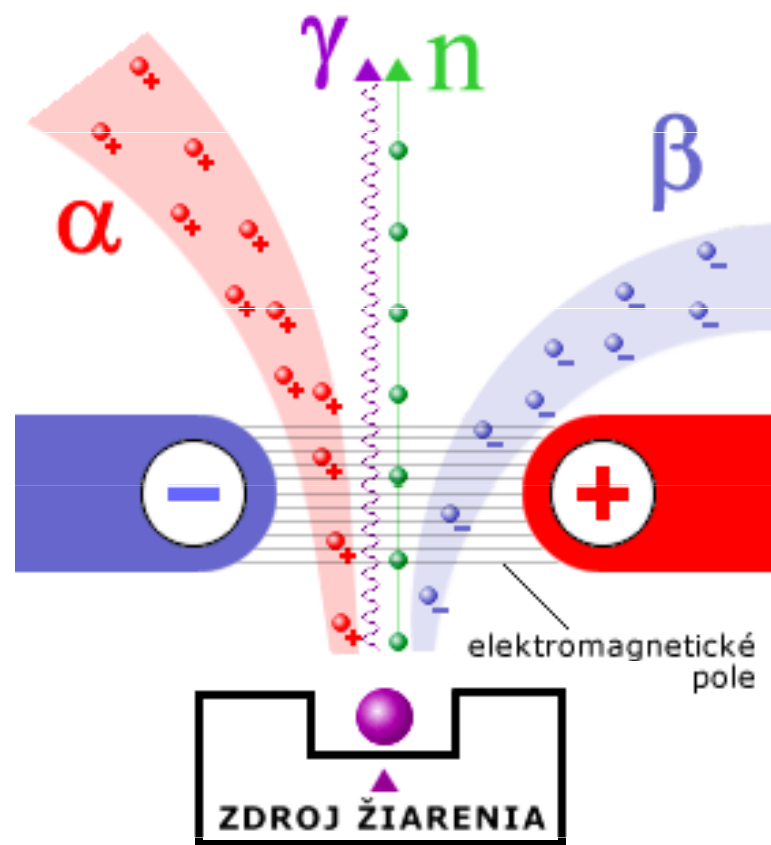
**Vysoce energetické a nebezpečné záření. Je absorbováno ozonovou vrstvou a na zemský povrch nedopadá.**

**Část záření je blokováno atmosférou. Zbytek záření je absorbováno okenními skly.**

**Toto záření není blokováno atmosférou, ani okenními skly. Pouze bezpečnostní a solární fólie obsahující UV absorbery blokují až 99 % UV-A záření.**

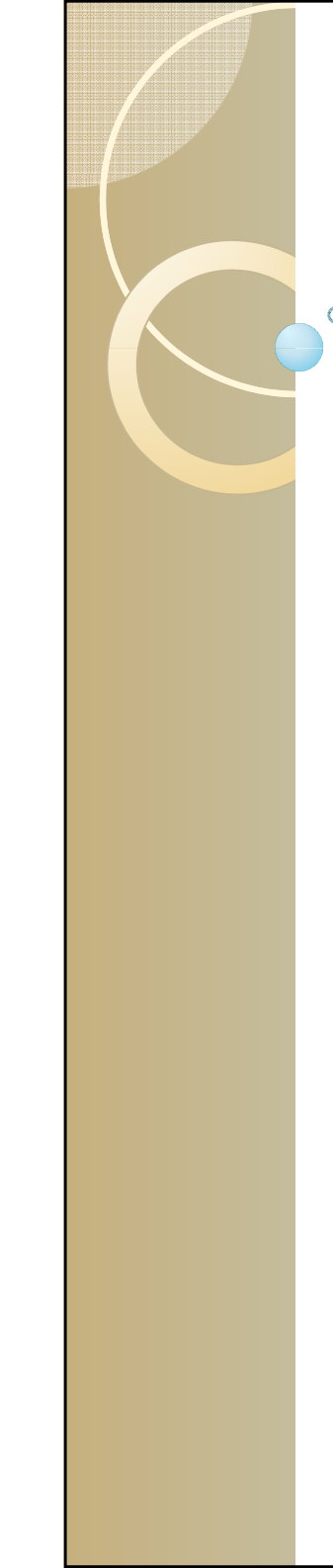
Parametr udávající kolik % UV záření okenní fólie zadrží je vztažena na pásmo vlnových délek od 240 nm do 400 nm

# IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ



# Charakteristika ionizujícího záření

- tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, které mají schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra;
- vzniká jako průvodní jev jaderných procesů (u rentgenového záření procesů v elektronovém obalu atomů);
- jádro (nebo obal) atomu se dostává do excitovaného stavu, stává se energeticky nestabilní;
- stabilní stav získá vyzářením energie ve formě částic nebo fotonů elektromagnetického záření.



**Přímo ionizující záření** → nabité částice, které mají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby mohly vyvolat ionizaci;

- elektrony, pozitrony;
- protony;
- částice  $\alpha$  a  $\beta$ .

**Nepřímo ionizující záření** → nenabitě částice, které samy prostředí neionizují, ale při interakcích s prostředím uvolňují sekundární, přímo ionizující částice;

- fotony;
- neutrony.



**Korpuskulární ionizující záření je charakterizováno:**

- elektrickým nábojem;
- klidovou hmotností;
- kinetickou energií.

Podle hmotnosti dělíme částice na:

- těžké (částice  $\alpha$ , protony, neutrony);
- středně těžké (mezony);
- lehké (elektrony, pozitrony).

**Fotonové záření** → duální charakter

- vlastnosti elektromagnetického vlnění;
- vlastnosti částic o nulové hmotnosti.

# Radioaktivita

**radioaktivní prvky** → obsahují atomy, jejichž jádra nejsou v čase stabilní a samovolně se mění na jádra jiná;

přeměna nestabilních jader obsahujících nadbytek energie je provázena:

- emisí částice;
- kvanta elektromagnetického záření;
- zachycením elektronu z elektronového obalu;

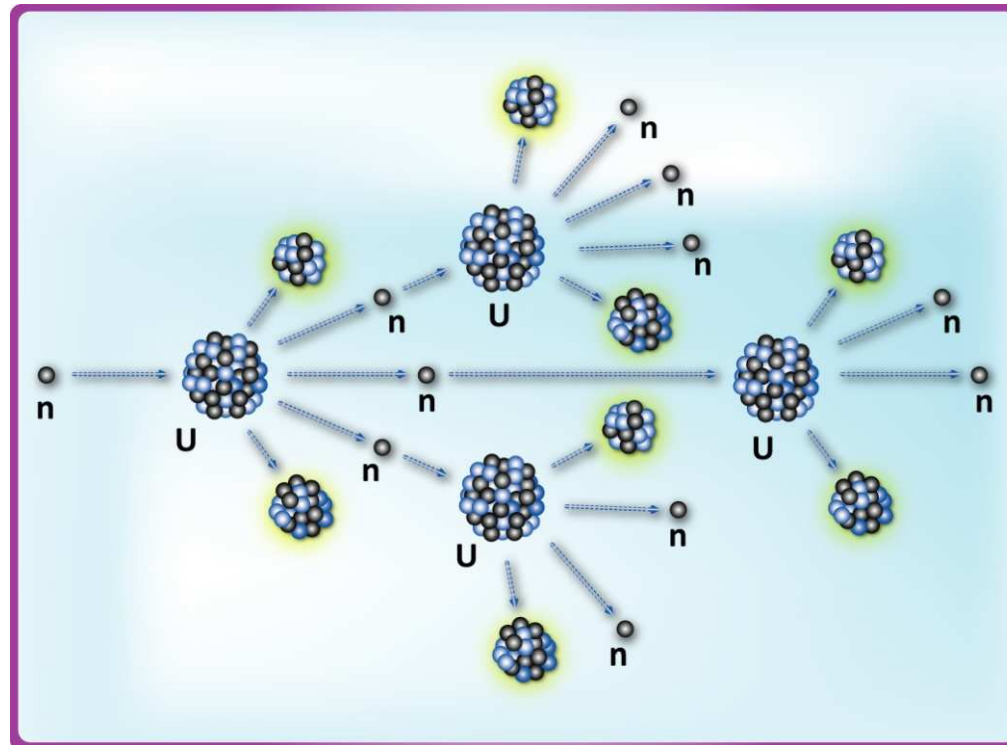
snahou radioaktivní přeměny je dosažení stability atomu.

- Protože procesy probíhají v jádře atomů, není možné rychlost přeměny jádra ovlivňovat žádným fyzikálním nebo chemickým procesem;
- hranicí schopnosti udržet jádro stabilní je izotop Vizmutu, který je nejtěžším stabilním nuklidem;
- všechna těžší jádra jsou nestabilní a samovolně se rozpadají na jádra lehčí, která jsou stabilní nebo ke stabilní konfiguraci vedou → **přírozená radioaktivita**.

1	2											13	14	15	16	17	18				
1 H 1.008																	2 He 4.003				
3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18				
11 Na 22.99	12 Mg 24.31	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95				
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80				
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 98.91	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3				
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 146.9	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 209.0	85 At 210.0	86 Rn 222.0
87 Fr 223.0	88 Ra 226.0	89 Ac 227.0	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.1	95 Am 243.1	96 Cm 247.1	97 Bk 247.1	98 Cf 251.1	99 Es 252.0	100 Fm 257.1	101 Md 258.1	102 No 259.1	113 Uut 289	114 Uuq 289	115 Uup 289	116 Uuh 289	117 Uus 289	118 Uuo 293

209  
83 *Bi*

- **Umělá radioaktivita** → nestabilita atomového jádra je vyvolána uměle (obvykle jadernou reakcí);
- řídí se stejnými zákonitostmi jako přirozená radioaktivita.





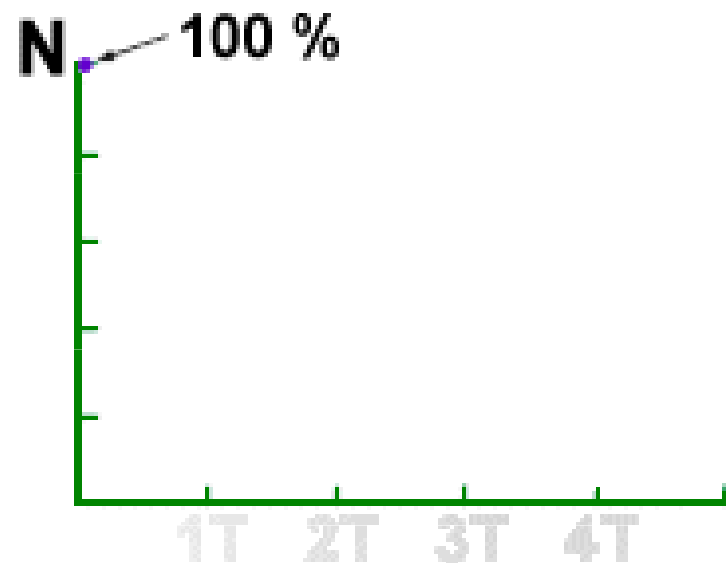
# Radioaktivní přeměna

- mění chemickou podstatu látky, přeměnou se mění složení atomového jádra;
- je nezávislá na vnějších podmínkách  
→ rychlost radioaktivní přeměny daného radionuklidu nelze nijak ovlivnit, zpomalit nebo zastavit;
- je doprovázena emisí jednoho až tří druhů záření  $\alpha$  (jádra helia),  $\beta$  (elektrony),  $\gamma$  (fotony), které působí na hmotné prostředí (ionizace, fluorescence,...).

# Radioaktivní přeměna

- při radioaktivní přeměně se počet radioaktivních atomů daného radionuklidu neustále zmenšuje;
- pro charakteristiku rychlosti radioaktivní přeměny jádra se používá pojem **fyzikální poločas přeměny**  $\rightarrow T_{1/2}$ ;
- celkový počet  $N$  dosud nepřeměněných jader v čase  $t$  určíme ze vztahu:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$



# Druhy radioaktivních přeměn

přeměna radioaktivních jader je provázena emisí:

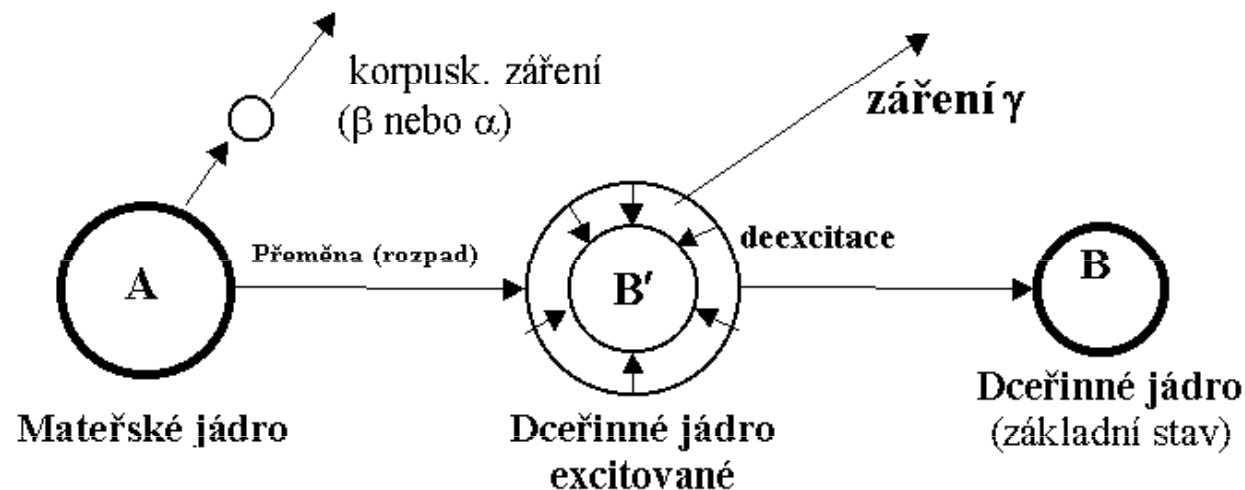
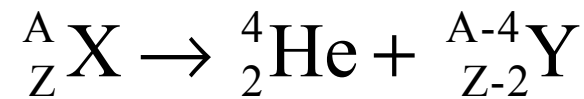
- částice;
- kvanta elektromagnetického záření  $\gamma$ ;

ve všech případech jsou zachovány:

- elektrický náboj;
- počet nukleonů;
- hybnost;
- energie.

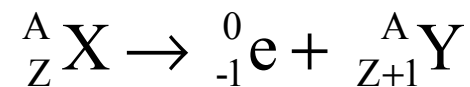
# Přeměna $\alpha$

- mateřské jádro emituje jádro hélia (částici  $\alpha$ );
- po přeměně  $\alpha$  vzniká dceřiné jádro, které se v periodickém systému prvků nachází o dvě místa vlevo od původního mateřského jádra.

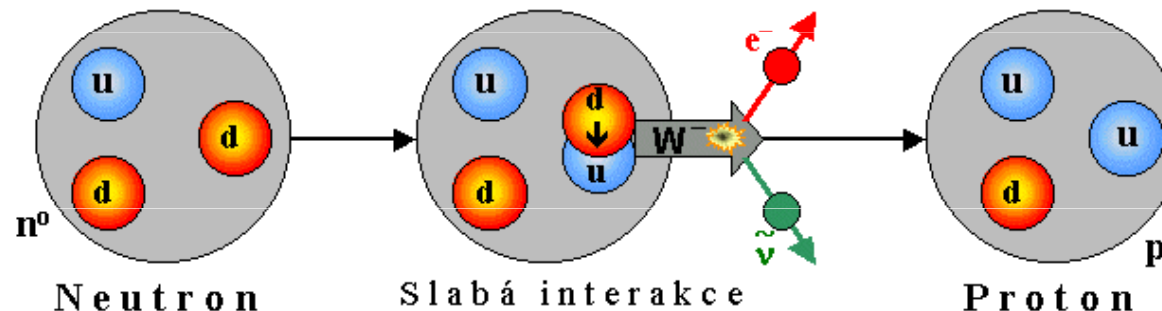


# Přeměna $\beta^-$

- jádro mateřského radionuklidu emituje elektron;
- vzhledem k tomu, že elektrony v jádře nejsou, předchází  $\beta^-$  rozpadu přeměna neutronu v jádře na proton, elektron a antineutrino;
- při přeměně  $\beta^-$  se hmotnostní číslo prvku nemění, protonové číslo se zvětší o 1, prvek se posune o jedno místo vpravo v periodické soustavě prvků.

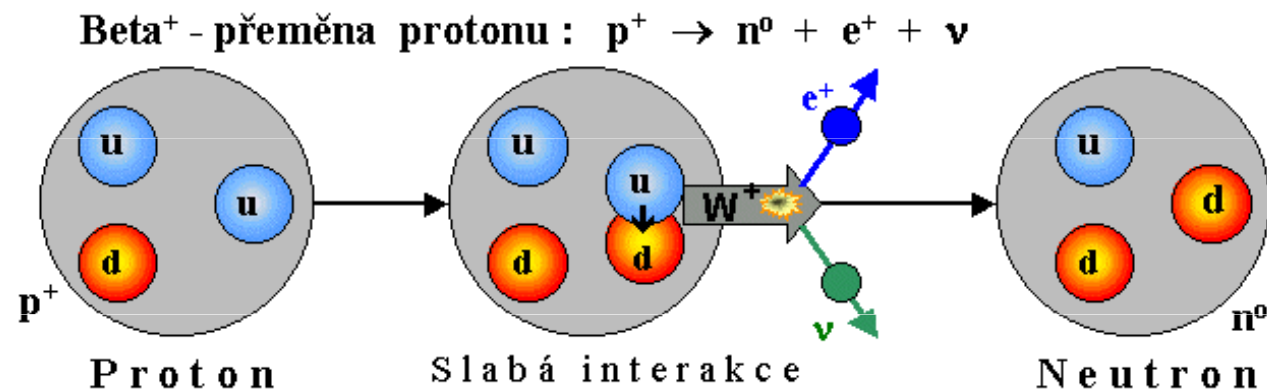
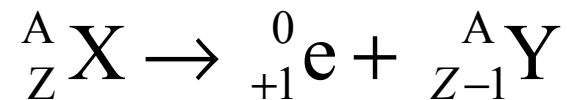


Beta<sup>-</sup> - rozpad neutronu:  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$



# Přeměna $\beta^+$

- mateřské jádro emituje pozitron, který vzniká přeměnou protonu v jádře na neutron, pozitron a neutrino;
- při přeměně  $\beta^+$  se hmotnostní číslo prvku nezmění, protonové číslo se zmenší o 1, prvek se posune o jedno místo vlevo v periodické soustavě prvků.



# Elektronový záchyt

- jedná se o záchyt elektronu z elektronového obalu (nejčastěji elektronu ze sféry K) do jádra;
- obsahuje-li jádro o jeden proton více než připouští jeho stabilita, zachytí jeden elektron z K-orbitu a absorbuje ho, proton se v jádře přemění na neutron;
- uprázdněné místo v K-orbitu se doplní elektronem z vyššího orbitu a přebytek energie se vyzáří ve formě fotonu;
- hmotnostní číslo prvku nezmění, protonové číslo se zmenší o 1, prvek se posune o jedno místo vlevo v periodické soustavě prvků.

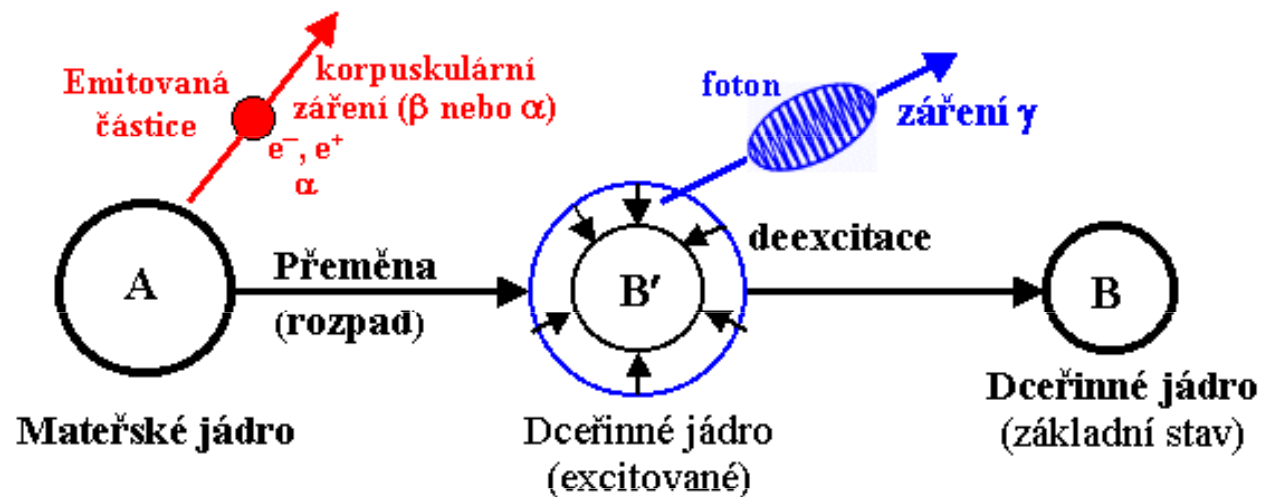
# Přeměna $\gamma$

- jadernou reakcí zpravidla nevzniká výsledné jádro ve svém základním energetickém stavu, většinou zůstává ve stavu energeticky vzbuzeném;
- nadbytečné energie se při návratu do základního stavu zbavuje kromě emise částice také emisí jednoho nebo několika fotonů záření  $\gamma$ ;
- protonové ani hmotnostní číslo prvku nemění.



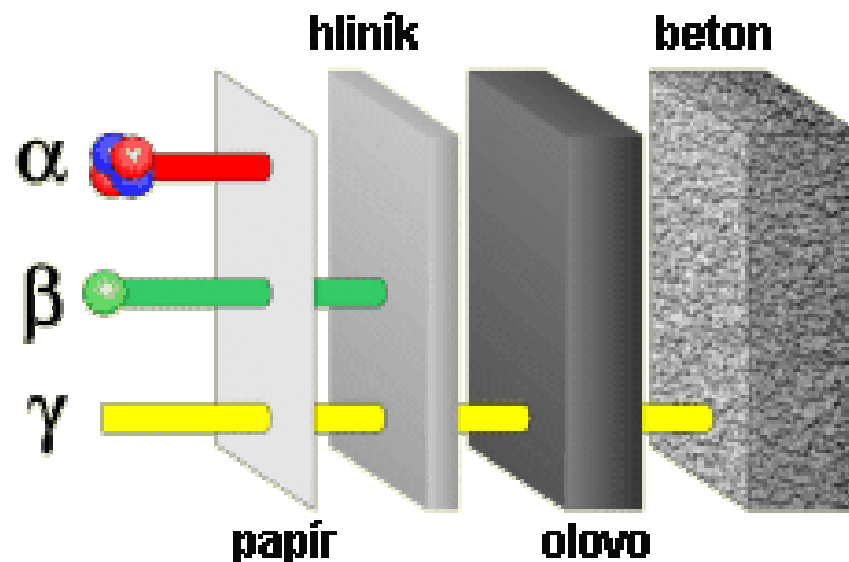
# Přeměna $\gamma$

- pokud je doba života vzbuzené formy atomu měřitelné hodnoty, pak jádro jeví svou vlastní radioaktivitu  $\gamma$  o určitém charakteristickém poločasu  $\rightarrow$  jedná se o izomerii jádra a přechod metastabilní formy v nižší nebo základní stav se nazývá **izomerický přechod**.



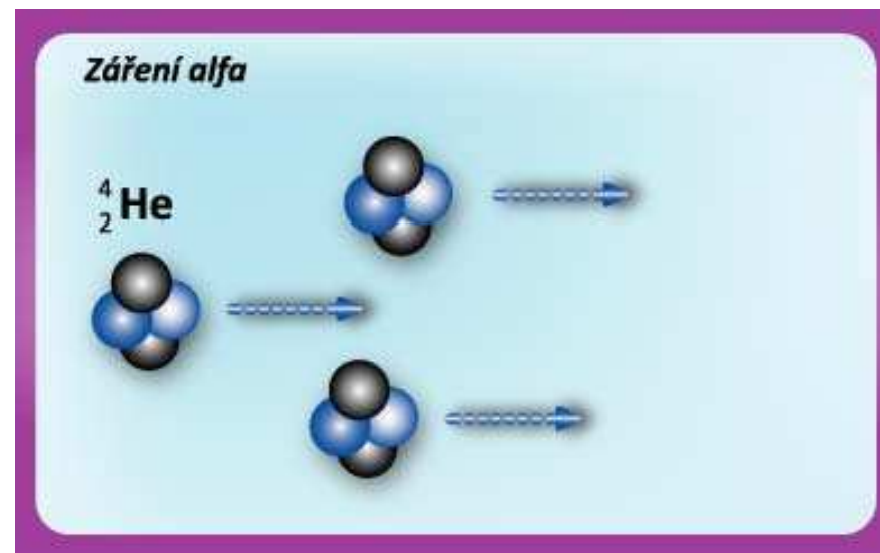
# Druhy ionizujícího záření a jeho interakce s prostředím

- ionizující záření ztrácí při průchodu absorbující látkou svou energii;
- způsob ztráty energie závisí na druhu ionizujícího záření a na fyzikálních vlastnostech absorbující látky.



# Záření $\alpha$

- skládá se ze dvou protonů a dvou neutronů  
→ jádro helia;
- nukleony mají velkou vazebnou energii, proto se chová jejich seskupení jako jedna částice.

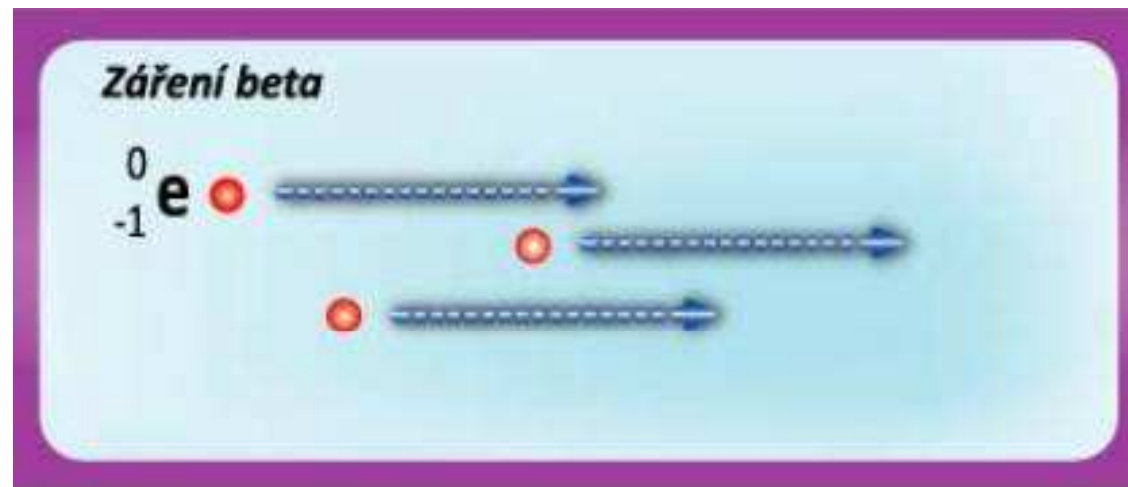


# Záření $\alpha$

- má vysokou specifickou lineární ionizaci, ionizační ztráty jsou velké → dolet částic  $\alpha$  je velmi malý;
- interakce s prostředím: ionizace, excitace atomů prostředí;
- při dopadu na kůži se absorbuje v horních vrstvách epidermis → při vnějším ozáření není nebezpečné;
- při vnitřní kontaminaci se však energie částic  $\alpha$  absorbuje v malém objemu tkáně, a proto působí biologicky negativně.

# Záření $\beta$

- je tvořeno rychlými elektrony nebo pozitrony se značným rozsahem energií;
- elektrony jsou z jádra emitovány při samovolné přeměně jaderného neutronu na proton, elektron a antineutrino.

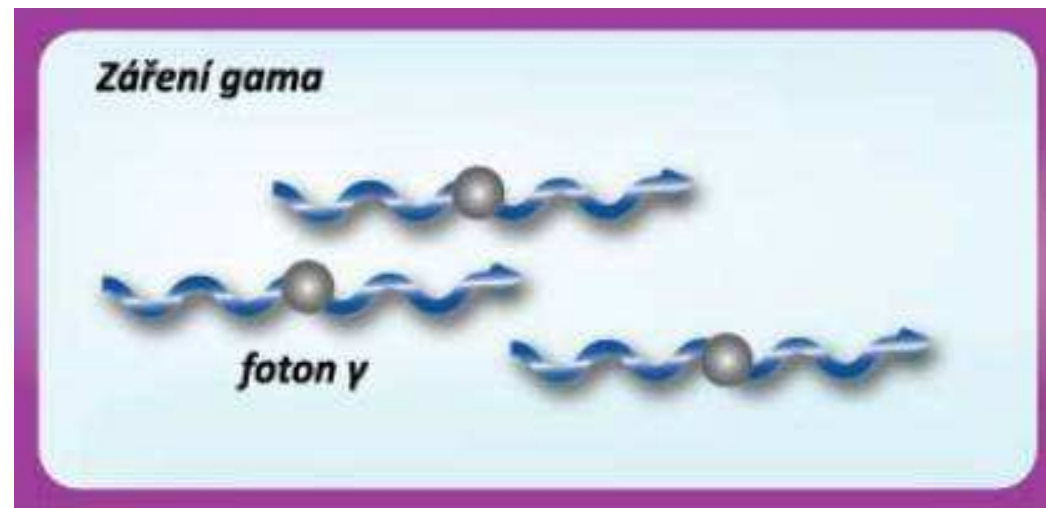


# Záření $\beta$

- má spojité energetické spektrum → obsahuje částice s energiemi od nuly až po určitou maximální energii, která je pro daný radionuklid charakteristická;
- interakce s prostředím: ionizace, excitace atomů prostředí, pružný rozptyl, tvorba brzdného záření;
- beta částice jsou relativně velmi malé a lehké, proto jsou při průchodu hmotným prostředím velmi často rozptylovány jenom s malými ztrátami energie a jejich dráha může tedy být značně klikatá.

# Záření $\gamma$

- elektromagnetické záření (fotony) s velmi krátkou vlnovou délkou řádu  $10^{-11}$  až  $10^{-13}$  m;
- vzniká při jaderných reakcích nebo radioaktivní přeměně přechodem jádra z vyššího do nižšího energetického stavu, přičemž se jádro zbavuje své excitační energie.



# Záření $\gamma$

- má čárové spektrum  $\rightarrow$  daný radionuklid emituje pouze fotony s určitými energiemi, které jsou pro jeho přeměnu charakteristické;
- energie fotonů gama záření je dána vztahem:

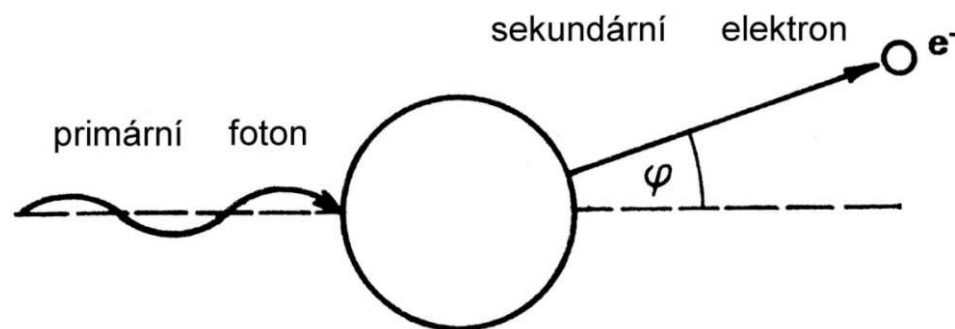
$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

- interakce s prostředím: fotoelektrický jev, Comptonův rozptyl, tvorba elektron-pozitronových párů.



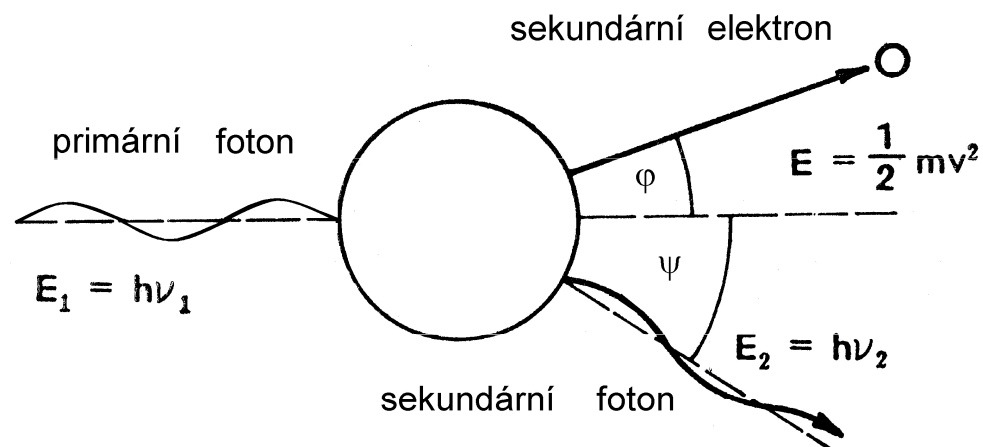
# Fotoelektrický jev

- celá energie kvanta gama záření je předána některému elektronu z obalu atomu absorbujícího materiálu;
- tento elektron se z obalu uvolní (za podmínky, že energie fotonu je vyšší než vazebná energie elektronu);
- z tohoto důvodu lze fotoefekt považovat za úplnou absorpci gama záření;
- projevuje se hlavně u fotonů nižších energií a látek s vysokým atomovým číslem.



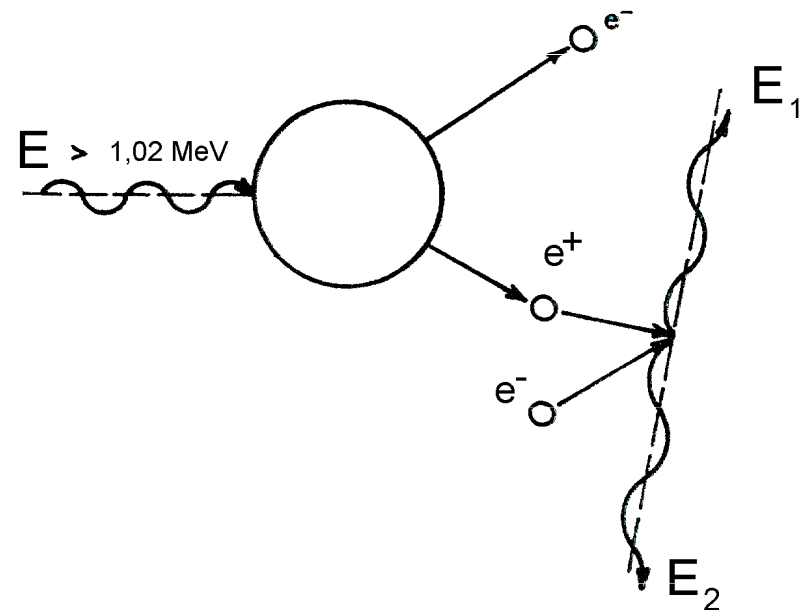
# Comptonův rozptyl

- interakce fotonů gama záření s volnými nebo jen slabě vázanými elektrony;
- foton gama záření předá část své energie volnému elektronu a uvede jej do pohybu, rozptýlený foton pak s nižší energií (větší vlnovou délkou) pokračuje v pohybu v odlišném směru;
- převládajícím typem interakce gama záření středních energií s látkami s nízkým atomovým číslem.



# Tvorba elektron-pozitronových párů

- má-li foton gama záření energii větší než 1,02 MeV (energetický ekvivalent dvou klidových hmotností elektronu) může být zcela pohlcen v elektrickém poli atomového jádra a při tom vzniká dvojice elektronů → elektron a pozitron;
- případný přebytek energie pohlceného fotonu se projeví ve formě kinetické energie vytvořeného elektronového páru.



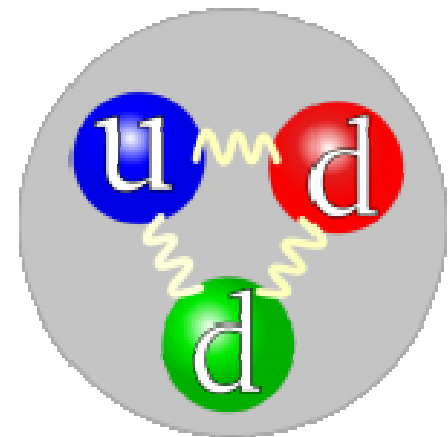
# Neutrony

- elementární částice bez elektrického náboje, které vznikají při jaderných reakcích a spontánním štěpením atomů.
- jejich chování určuje energie.

název		energie
chladné	pomalé	$< 0,002 \text{ eV}$
tepelné		$0,002 - 0,5 \text{ eV}$
rezonanční		$0,5 - 1000 \text{ eV}$
středních energií		$1 - 500 \text{ keV}$
rychlé		$0,5 - 10 \text{ MeV}$
vysokých energií		$10 - 50 \text{ MeV}$
velmi vysokých energií		$> 50 \text{ MeV}$

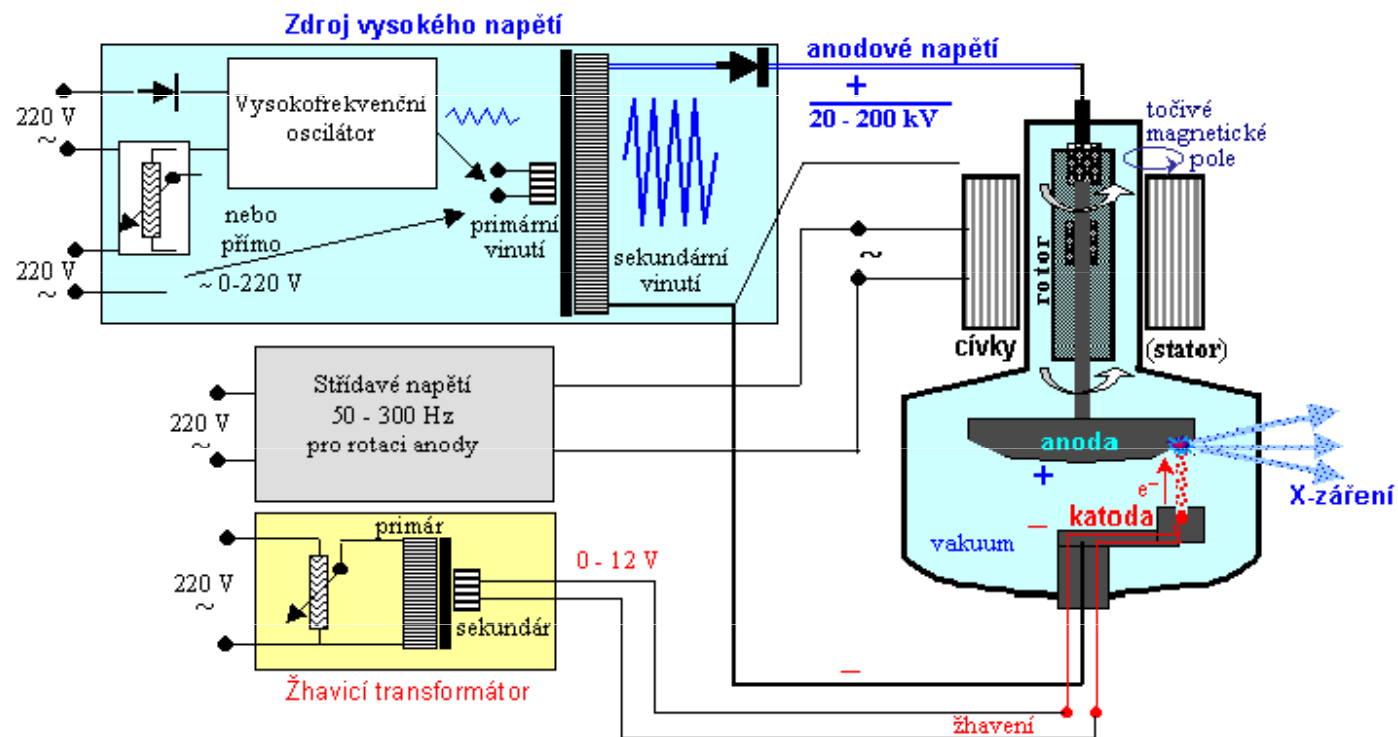
# Neutrony

- při interakcích s prostředím se uplatňují jaderné síly;
- s neutrony reagují v podstatě veškeré stabilní nuklidy, jsou to procesy ze všech jaderných reakcí nejhojnější → neutron na rozdíl od nabitých částic nemusí překonávat potenciálovou bariéru terčového jádra, takže do něho snadno proniká a vzniká tak **složené jádro**;
- interakce s prostředím:  
pružný, nepružný rozptyl,  
radiační záchyt, štěpení jader.



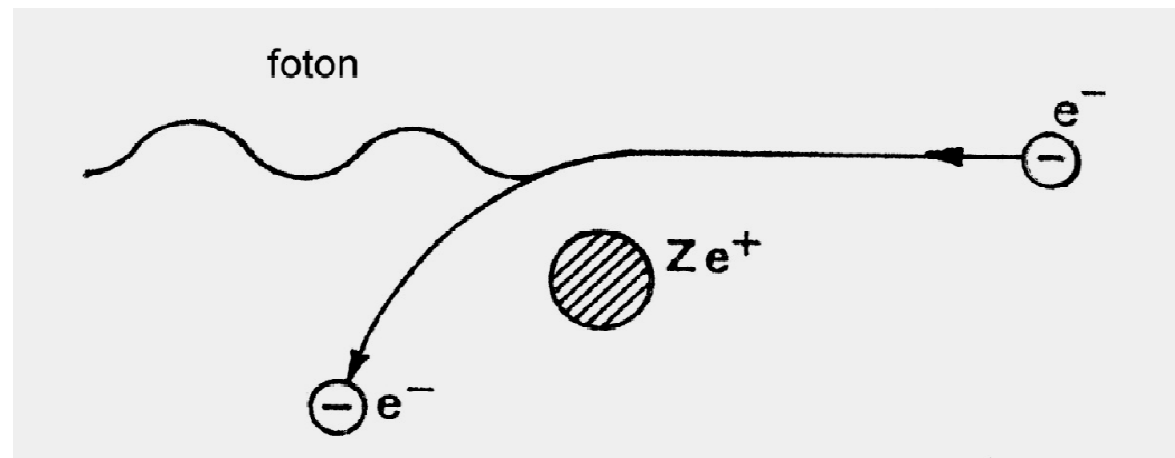
# Rentgenové záření

- elektromagnetické záření o krátkých vlnových délkách v intervalu  $10^{-9}$  -  $10^{-13}$  m;
- vzniká v rentgenkách zabrzděním rychle letících elektronů v těžkých kovech.



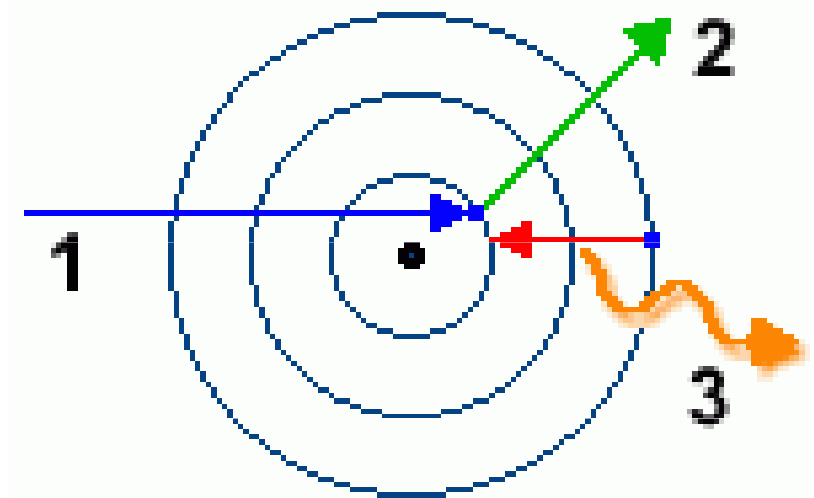
# Brzdné rentgenové záření

- vzniká zabrzděním elektronů na účet jejich kinetické energie;
- nezávisí na materiálu anody, pouze na kinetické energii elektronů (napětí mezi anodou a katodou);
- má spojité energetické spektrum.



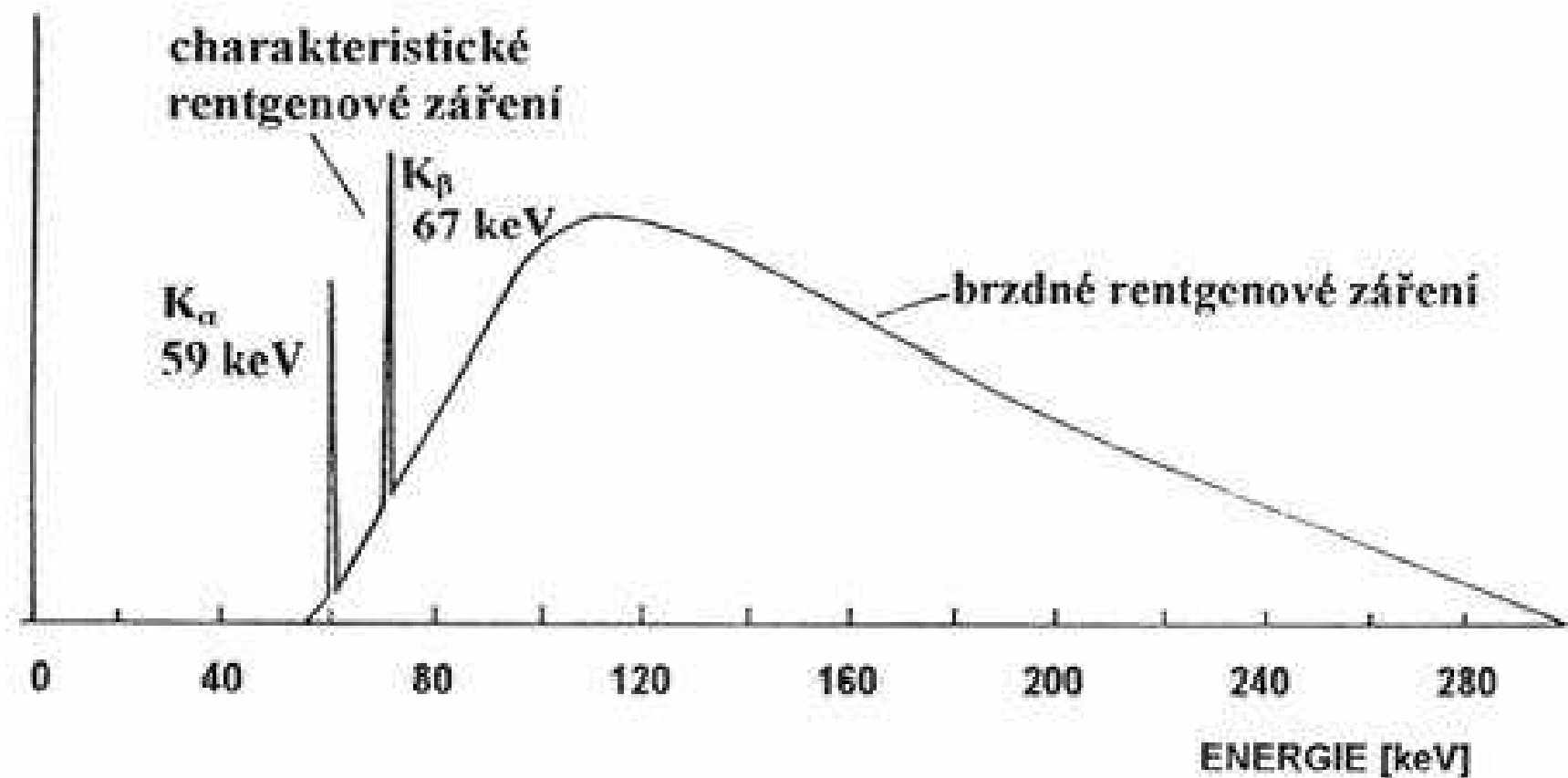
# Charakteristické rentgenové záření

- vzniká přechodem elektronů v atomovém obalu;
- elektron dopadající na anodu může vyrazit elektron z elektronové dráhy s nízkým číslem, uprázdněné místo se zaplní elektronem z vyšší dráhy a přebytek energie se vyzáří ve formě charakteristického rentgenového záření;
- má čárové spektrum a jeho energie závisí na druhu materiálu anody.

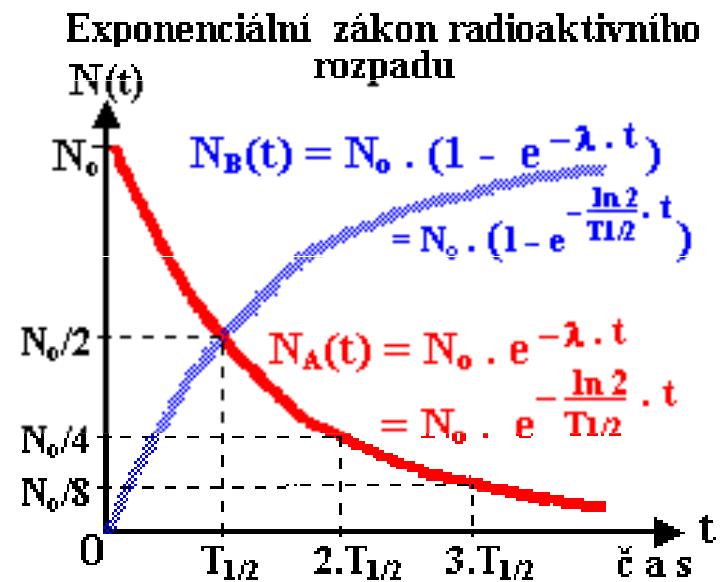
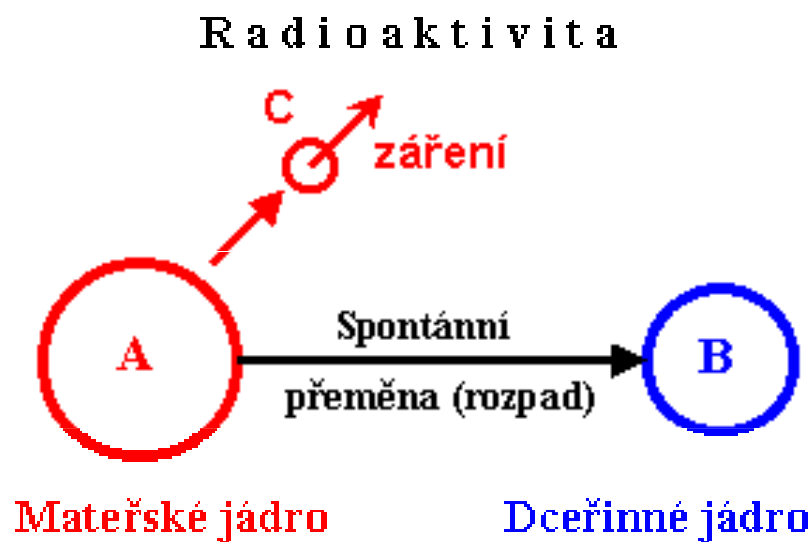




# Energetické spektrum rentgenového záření



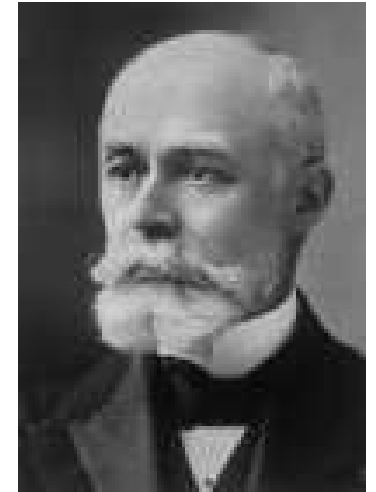
# Veličiny a jednotky v oblasti ionizujícího záření



# Veličiny pro zevní ozáření

- **charakterizující zdroje záření:**  
→ aktivita, emise zdroje;
- **charakterizující pole záření:**  
→ fluence částic, příkon fluence částic;
- **popisující interakci ionizujícího záření s látkou:**  
→ lineární přenos energie;
- **dozimetrie ionizujícího záření:**  
→ absorbovaná dávka, dávkový příkon, kerma, kermový příkon, expozice, expoziční příkon;
- **používané v radiační ochraně:**  
→ relativní biologická účinnost, dávkový ekvivalent, ekvivalentní dávka, efektivní dávka.

# Aktivita



- charakterizuje množství radioaktivní látky, je to počet radioaktivních přeměn v dané látce vztažený na jednotku času;

$$A = \frac{dN}{dt} \quad \text{jednotka: } 1 \text{ s}^{-1}, \text{ becquerel (Bq)}$$

→ hmotnostní aktivita  $a_m$  ( $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ );

→ objemová aktivita  $a_v$  ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ );

→ plošná aktivita  $a_s$  ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ );

- aktivita radionuklidu klesá s časem podle vztahu:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

# Emise zdroje

- podíl počtu částic  $dN_z$  emitovaných ze zdroje v časovém intervalu  $dt$  a tohoto časového intervalu;

$$N_z = \frac{dN_z}{D_t} \quad \text{jednotka: s}^{-1}$$

- pokud zdroj neemituje záření izotropně  
→ **úhlová emise zdroje** (emise zdroje vztažená na jednotkový prostorový úhel).

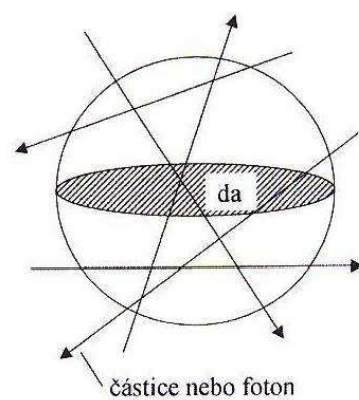
$$\text{jednotka: s}^{-1}\text{sr}^{-1}$$

# Fluence částic

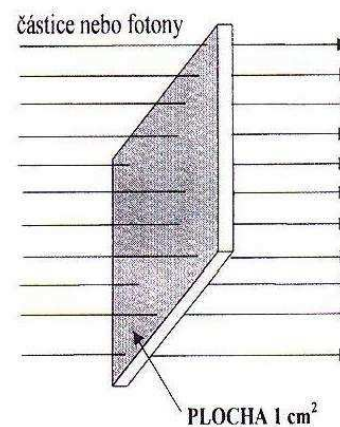
- podíl částic  $dN$ , které dopadly v daném bodě prostoru na kouli s plochou hlavního řezu  $da$ , a této plochy.

$$\phi = \frac{dN}{da}$$

jednotka:  $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$



a)



b)

# Příkon fluence částic

- popisuje rychlost růstu fluence v daném časovém okamžiku;
- fluence částic nebo fotonů (hustota toku částic nebo fotonů) za časový interval  $dt$ .

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

jednotka:  $m^{-2}$

# Lineární přenos energie

- LPE, LET (Linear Energy Transfer);
- poskytuje informace o okamžitém rozložení lokální energie přenesené na látku;
- pro nabitě částice je definován vztahem:

$$L_{\Delta} = \left( \frac{dE}{dl} \right)_{\Delta} \quad \text{jednotka: J.m}^{-1} \text{ (keV.}\mu\text{m}^{-1}\text{)}$$

- záření s vysokým LPE (hustě ionizující záření)  
→ částice  $\alpha$ , protony;
- záření s nízkým LPE (řídce ionizující záření)  
→ elektrony, záření  $\gamma$ , rtg záření.



# Dávka a dávkový příkon



- **absorbovaná dávka** → poměr střední energie  $d\varepsilon$  sdělené v objemovém elementu dávky o hmotnosti  $dm$  a hmotnosti tohoto elementu;

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

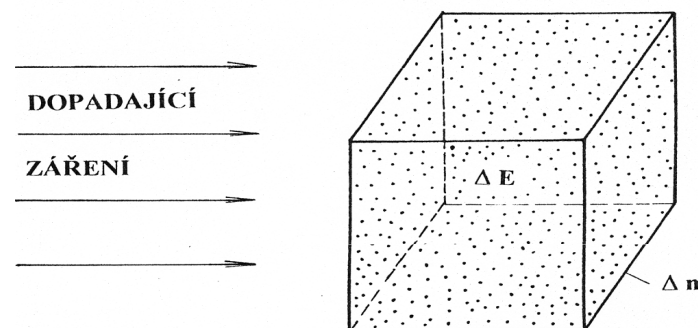
jednotka:  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , gray (Gy)

- **dávkový příkon**  
→ poměr přírůstku dávky  $dD$  za čas  $dt$ ;

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

jednotka:  $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$

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



$\Delta E$  - ENERGIE ABSORBOVANÁ V  $\Delta m$

# Kerma a kermový příkon

- **kerma** → součet počátečních kinetických energií  $dE_k$  všech nabitých částic uvolněných nenabitými ionizujícími částicemi v uvažovaném objemu látky o hmotnosti  $dm$ ;

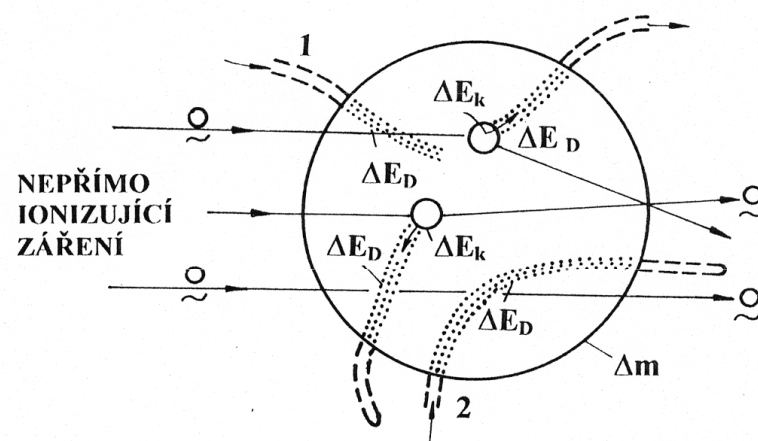
$$K = \frac{dE_K}{dm}$$

jednotka:  $J \cdot kg^{-1}$ , gray (Gy)

- **kermový příkon**  
→ přírůstek kermy  $dK$  za čas  $dt$ .

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

jednotka:  $Gy \cdot s^{-1}$



# Expozice a expoziční příkon

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

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

jednotka:  $C.kg^{-1}$

- **expoziční příkon** → přírůstek expozice  $dX$  za časový interval  $dt$ .

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

jednotka:  $C.kg^{-1}.s^{-1}$

# Relativní biologická účinnost

- biologický účinek ionizujícího záření závisí nejen na absorbované dávce, ale také na druhu ionizujícího záření;
- poměr dávek záření potřebných u dvou druhů záření k vyvolání téhož stupně biologického účinku;
- jako referenčního záření se obvykle používá rentgenového záření s energií 200 keV nebo záření  $\gamma$   $^{60}\text{Co}$  či  $^{137}\text{Cs}$ .

# Dávkový ekvivalent

- součin dávky  $D$  v uvažovaném bodě tkáně a jakostního činitele  $Q$ ;

$$H = Q \cdot D \quad \text{jednotka: sievert (Sv)}$$

- jsou na něm založeny operační veličiny pro praktické měření jak při monitorování osob, tak i prostředí;
- k monitorování osob je určen **osobní dávkový ekvivalent  $H_p(d)$**  → dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v měkké tkáni v hloubce  $d$ .

# Ekvivalentní dávka



- součin radiačního váhového faktoru  $w_R$  a střední absorbované dávky  $D_{T,R}$  v orgánu nebo tkáni T pro ionizující záření typu R.

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

jednotka: sievert (Sv)

typ záření	$w_R$
fotony	1
elektrony a mezony	1
fotony a nabité piony	2
částice alfa, štěpné fragmenty, těžké ionty	20
neutrony	spojitá závislost na energii neutronů

# Efektivní dávka

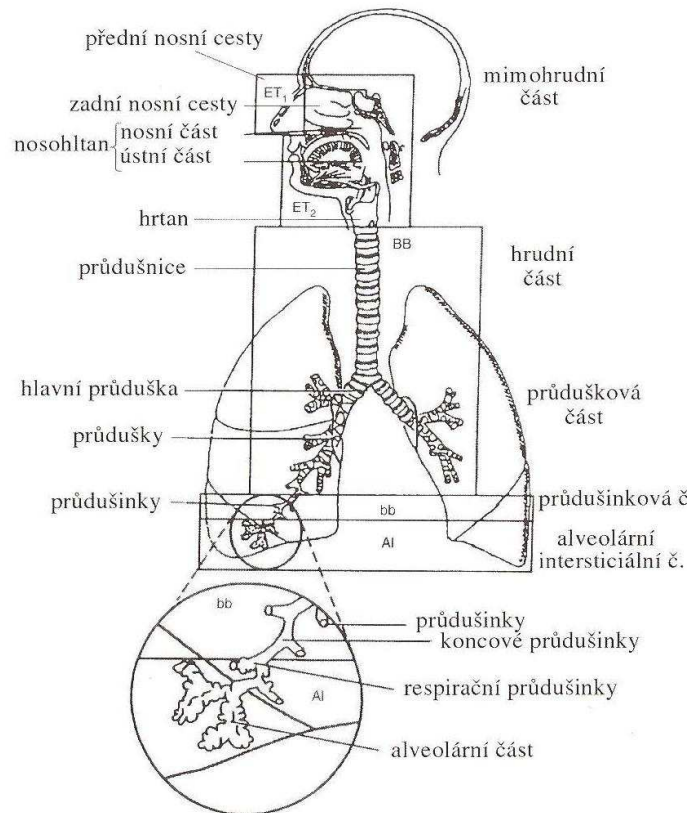
- součet ekvivalentních dávek v jednotlivých tkáních či orgánech vážených tkáňovým váhovým faktorem  $w_T$ , jež vyjadřuje rozdílnou radiosenzitivitu orgánů a tkání z hlediska pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků.

$$E = \sum_T w_T H_T \quad \text{jednotka: sievert (Sv)}$$

tkáň	$w_T$	$\Sigma w_T$
kostní dřeň (červená), tlusté střevo, plíce, žaludek, mléčná žláza, zbytek tkání	0,12	0,72
gonády	0,08	0,08
močový měchýř, jícn, játra, štítná žláza	0,04	0,16
povrch kostí, mozek, slinné žlázy, kůže	0,01	0,04
celkem		1,00

# Veličiny pro vnitřní ozáření

- příjem radioaktivní látky;
- úvazek efektivní (ekvivalentní dávky).





# Příjem radioaktivní látky

- aktivita radionuklidu přijatá do lidského organismu z vnějšího prostředí, obvykle požitím nebo vdechnutím;
- Vychází z naměřených hodnot aktivity radionuklidu v těle, v orgánu nebo ve vzorku exkret.

$$I = \frac{A}{m(t)}$$

jednotka: becquerel (Bq)

# Úvazek efektivní dávky

- časové integrály efektivní dávky (ekvivalentní dávky) odpovídající době  $\tau$  od příjmu radionuklidu;
- není-li uvedeno jinak, činí doba  $\tau$  pro dospělé 50 roků a pro děti 70 roků;
- úvazky se pak vztahují k příjmu za dané období → podle typu ozáření a z toho vycházející metody monitorování vnitřní kontaminace;
- pomocí konverzních faktorů  $h_{ing}$  a  $h_{inh}$  je pak stanoven úvazek efektivní dávky  $E(50)$ .

$$E(50) = I \cdot h_{inh}(50)$$

jednotka: sievert (Sv)

$$E(50) = I \cdot h_{ing}(50)$$

# ZÁKLADY DETEKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ



# Detekce ionizujícího záření

- založena na změnách fyzikálních, chemických či jiných látky tvořící detektor v důsledku interakcí ionizujícího záření s touto látkou;
- z naměřených změn pak lze podle typu detektoru kvalitativně, ale i kvantitativně posuzovat vlastnosti zdroje záření, pole záření a míru působení ionizujícího záření na prostředí, objekty, na něž dopadá;
- dozimetr nebo detekční systém se v principu skládají z čidla – detektoru záření, aparatury, zařízení, které odezvu zpracují a převedou do formy použitelné k registraci a interpretaci a registračního zařízení.

# Dělení detektorů

- **kontinuální** → podávají průběžnou informaci o okamžité hodnotě detekovaného záření, po ukončení ozařování detektoru klesne výstupní signál na nulovou hodnotu;
- **integrální** → hodnota signálu se zvětšuje s dobou, po kterou je detektor ozařován (tj. úměrně dávce, expozici), po ukončení ozařování zůstává informace v detektoru uchována za celou dobu, po kterou byl detektor vystaven, uplatňují se hlavně v osobní dozimetrii, dozimetrii pracovního a životního prostředí.

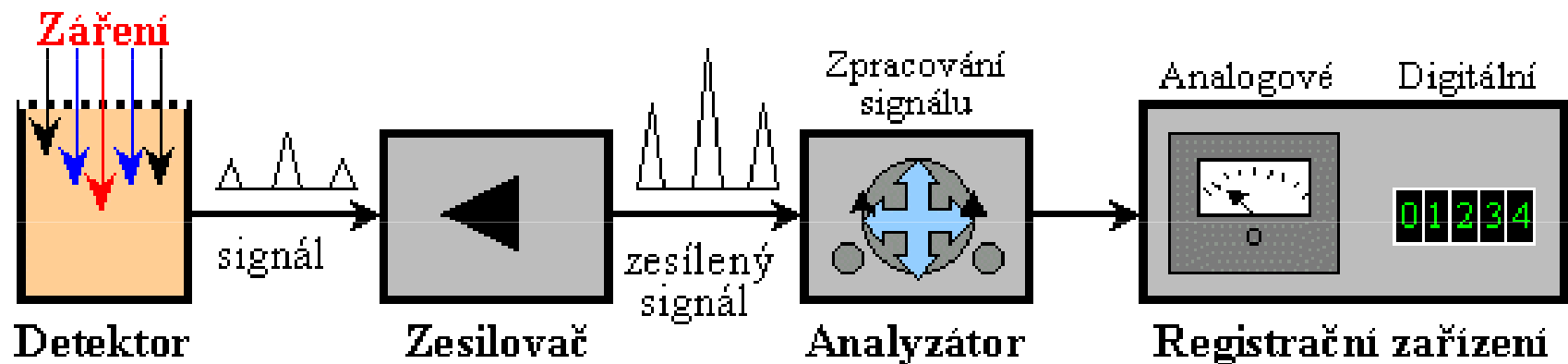
# Dělení detektorů

Podle účelu lze detekční systémy rozdělit na:

- **radiometry** → slouží k odhadu dávkových příkonů, dávky, povrchové kontaminace v daném místě, prostoru (zpravidla bez informace o energetické distribuci pole záření);
- **spektrometry** → měří energetickou distribuci dané veličiny (aktivitu, fluenci) ionizujícího záření;
- **radiometrická zařízení** → jsou určena k nejrůznějším, zpravidla k průmyslovým aplikacím radionuklidů, zařízení obsahuje vhodný zdroj záření a detekční (měřicí) aparaturu (vlhkoměry, popeloměry, tloušťkoměry, ...).

# Elektrické detektory

- založeny na látkách, které působením ionizujícího záření mění některé své elektrické vlastnosti;
- různě upravené válcové nebo deskové kondenzátory, připojíme-li k elektrodám kondenzátoru elektrický zdroj, pak tímto obvodem, který je přerušen objemem vzduchu mezi elektrodami, začne procházet měřitelný proud.



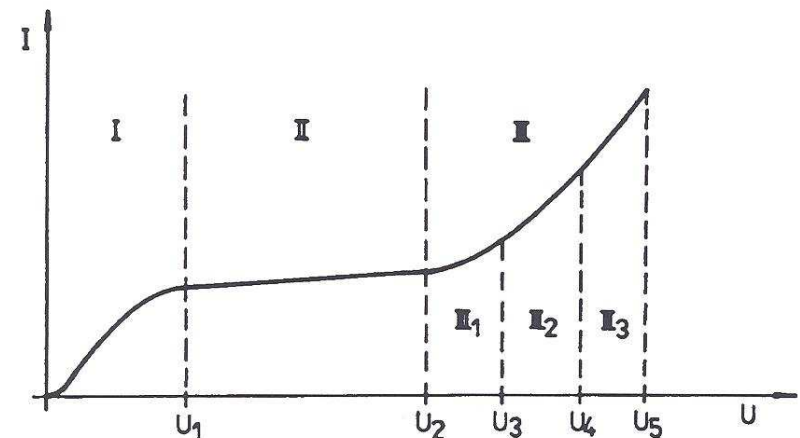
Vložíme-li mezi elektrody zdroj ionizujícího záření, mezi deskami kondenzátoru mohou probíhat:

- **ionizace** → ionty, které vytvoří ionizující záření, se pohybují k opačně nabitým elektrodám, v obvodu vzniká ionizační proud;
- **rekombinace** → při setkání kladného a záporného iontu může vzniknout opět neutrální atom nebo molekula, pravděpodobnost rekombinace klesá s rostoucí rychlostí iontů, to znamená s rostoucím napětím na deskách kondenzátoru;
- **přídavná (sekundární) ionizace** → primární ionty mohou být urychleny na větší energii, než je ionizační energie plynu mezi deskami kondenzátoru a mohou v tomto prostoru vytvářet nárazovou ionizací další ionty.



Při stálé hustotě částic můžeme ionizační účinky ionizujícího záření v plynu rozdělit do následujících oblastí:

- **oblast Ohmova zákona (I)** → k detekci ionizujícího záření se neužívá;
- **oblast nasyceného proudu (II)** → v této oblasti pracují ionizační komory;
- **oblast přídavné ionizace (III)**
  - **oblast úplné proporcionality (III1)** → v této oblasti pracují proporcionální detektory;
  - **oblast částečné proporcionality (III2)** →; nebývá pro detektory využívána;
  - **oblast Geiger-Müllerova (III3)** → v této oblasti pracují Geiger-Müllerovy počítače.

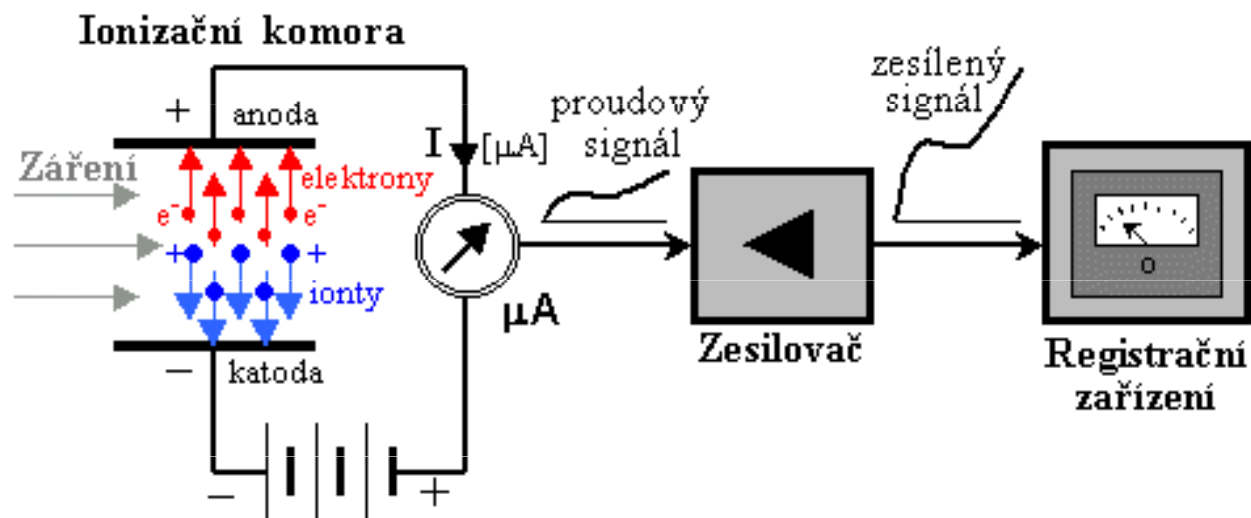


# Ionizační komory

- tvořeny dvěma elektrodami (anodou a katodou), umístěnými v plynném prostředí;
- provozní napětí se volí tak, aby ionizační komora pracovala v oboru nasyceného proudu (150 až 200 V);
- vnikne-li do prostoru mezi elektrodami ionizující záření, vyráží z původně neutrálních atomů plynu elektrony a mění je na kladné ionty, záporné elektrony putují v elektrickém poli ke kladné anodě, kladné ionty se dají do pohybu k záporné katodě → obvodem začne protékat slabý elektrický proud způsobený iontovou vodivostí ionizovaného plynu mezi elektrodami, který je přímo úměrný intenzitě ionizujícího záření.

# Ionizační komory

- mají nízkou citlivost (účinnost), proto se nehodí pro detekci slabých zářičů, výhodou je však lineární závislost proudu i v oblasti velkých intenzit ionizujícího záření;
- využití → v dozimetrii při stanovení dávky, expozice a kermy ve vzduchu, v provozech s vysokými teplotami (válcovny, hutě).



# Geiger-Müllerovy počítáče

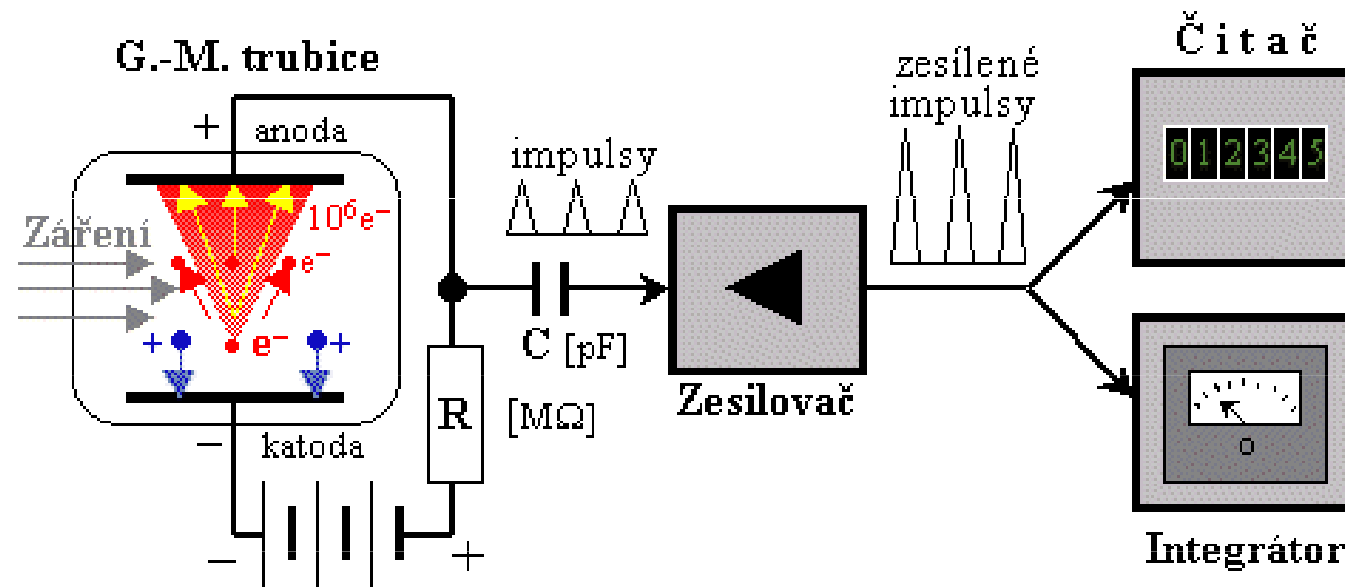
- jsou tvořeny válcovou katodou, v jejíž ose je uložena tenká anoda, celý systém elektrod je uzavřen v baňce s inertní plynovou náplní (argon, neon);
- pracují v režimu, kdy elektrony vzniklé primární částicí v počítáči se mezi dvěma srážkami urychlí elektrickým polem natolik, že jsou schopny ionizovat další neutrální atomy, vzniklé sekundární elektrony ionizují další atomy, takže na anodu dopadne celá lavina elektronů;
- tím vzniká tzv. zesílení v plynu, náboj na elektrodách pak nezávisí na primární ionizaci, ale je dán pouze vlastnostmi počítáče.

# Geiger-Müllerovy počítáče

- průchod každé částice je doprovázen samovolným výbojem v celém objemu počítáče, který vyvolá na připojeném zatěžovacím odporu napěťový impuls, ten se zpracovává v dalších částech radiometrické aparatury;
- výboj, který vznikne v počítáči je nutné co nejdříve přerušit, neboť po dobu výboje neregistruje počítáč další částice, přerušení výboje se nejsnáze dosahuje vhodnou plynovou náplní počítáče;
- časový interval, za který se obnoví pracovní napětí na počítáči (obnoví se schopnost registrovat další částice), se nazývá mrtvá doba (bývá řádově v milisekundách).

# Geiger-Müllerovy počítače

- konstrukce Geiger-Müllerových počítačů závisí na typu a energii částic, které má počítač detekovat.



# Proporcionální detektory

- pracují v oblasti úplné proporcionality a využívají sekundární ionizaci;
- zapojení, konstrukční provedení a charakteristiky jsou podobné jako u Geiger-Müllerových počítáčů;
- výstupní napěťové impulsy jsou úměrné energii, proto můžeme tyto počítače využít ve spektrometrech.



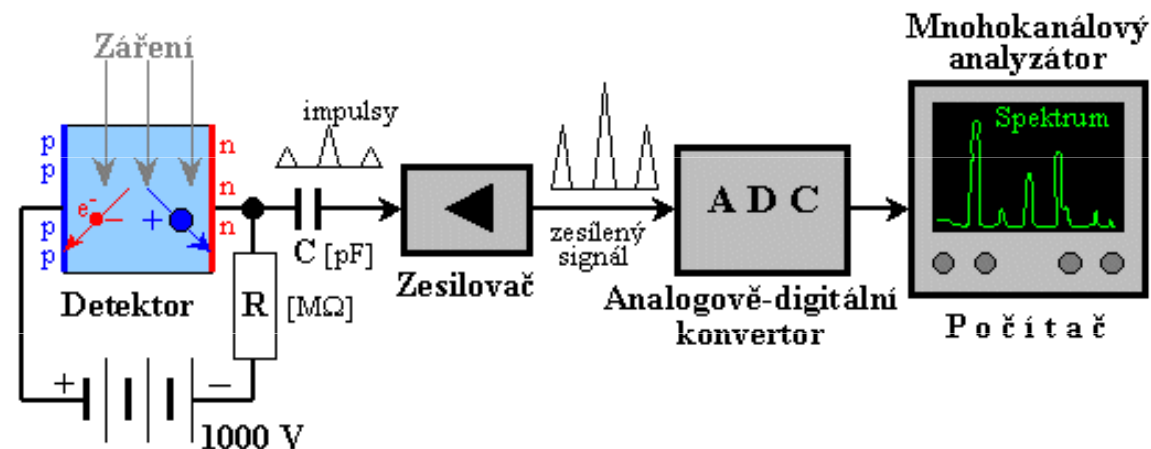
# Polovodičové detektory

- založeny na ionizačních účincích v pevných látkách;
- vnikne-li ionizující částice do polovodiče, vytváří v něm ionizační páry elektron – díra, přičemž většina primárních elektronů má tak velkou energii, že způsobuje další ionizaci prostředí;
- dochází k lavinovitému uvolňování elektronů do vodivostního pásu a tvorbě děr ve valenčním páse, počet uvolněných nosičů náboje závisí na energii primární částice;
- přiložíme-li na polovodič napětí, pak vlivem elektrického pole se volné nosiče nábojů dají do pohybu v příslušném směru a v připojeném obvodu vznikne proudový impuls, jehož velikost závisí na energii dopadající částice ionizujícího záření.



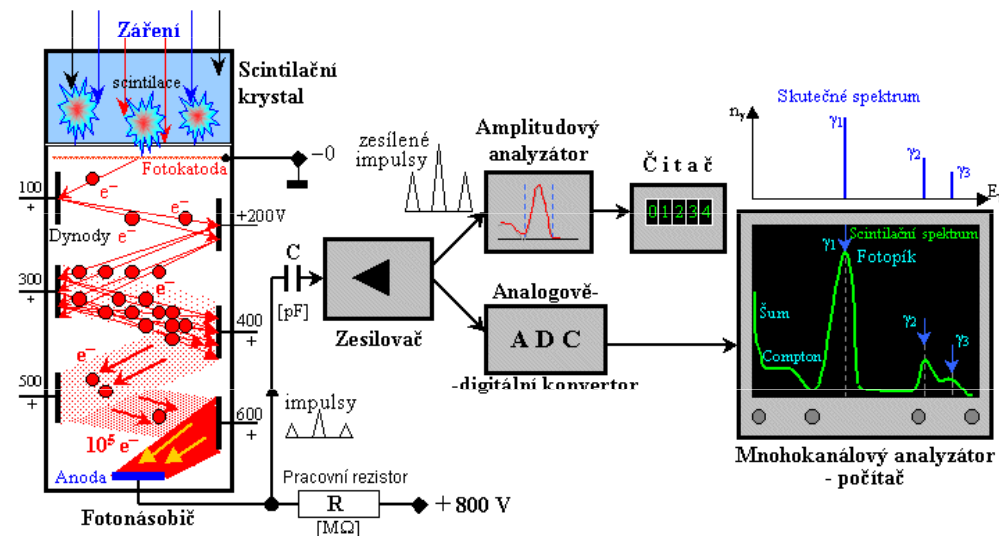
# Polovodičové detektory

- využití pro detekci ionizujícího záření, pro spektrometrická měření;
- energetická rozlišovací schopnost je lepší než rozlišovací schopnost detektorů plynových a scintilačních;
- nevýhodou je nutnost nepřetržité udržování nízké teploty (kapalný dusík), omezení dosažitelných rozměrů a tedy i menší geometrická účinnost.



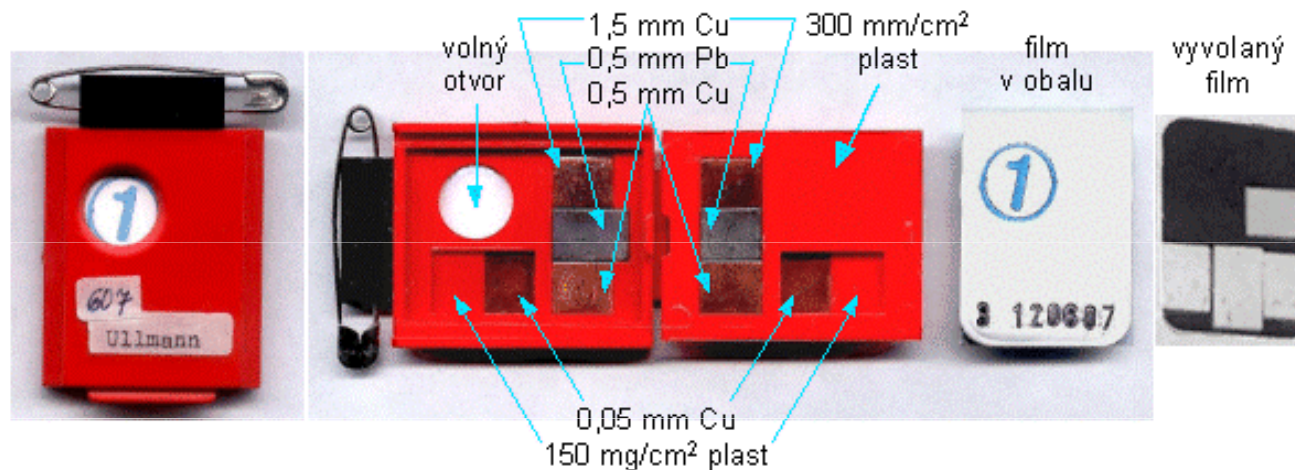
# Scintilační detektory

- převádějí absorbovanou energii ionizujícího záření na energii fotonů náležejících zpravidla do viditelné krátkovlnné nebo blízké ultrafialové oblasti spektra;
- dobré spektrometrické vlastnosti, poměrně velká detekční účinnost;
- uplatnění → při zpracování velkých četností, pokud je třeba získat informace o časových relacích emise částic, popř. jejich interakcí s hmotou.



# Filmová dozimetrie

- působením ionizujícího záření na film vzniká latentní obraz, který lze vyvolávacím procesem zviditelnit a vzniklé zčernání (optická hustota) je závislé na míře ozáření filmu;
- na základě vyhodnocení zčernání filmu pod nestíněnou plochou a pod jednotlivými filtry je možné stanovit požadovanou dozimetrickou veličinu.



# Filmová dozimetrie

- poskytuje informaci o osobním dávkovém ekvivalentu od fotonového záření a elektronů, druhu a energii záření, směru a časovém rozložení a o případné kontaminaci;
- dozimetry používané na jaderných elektrárnách umožňují také odhadnout dávku od neutronů;
- trvalý záznam údaje o ozáření s možností opětovné analýzy vyvolaného filmu;
- nevýhodou je citlivost na světlo, vysokou vlhkost, teplotu a některé chemikálie.

# Termoluminiscenční dozimetrie

- vhodné látky, v nichž ionizující záření vyvolává excitace elektronů z valenčního do vodivostního pásu s následným záchytem v záchytných centrech;
- zahřátím získají elektrony dostatečnou energii k opuštění záchytného centra a k rekombinaci při současné emisi ultrafialového záření nebo viditelného světla;
- celková vyzářená energie je úměrná energii ionizujícího záření pohlceného v látce;

# Termoluminiscenční dozimetrie

- vysoká citlivost, možnost přesného měření odezvy, široká oblast lineární závislosti mezi dávkou a odezvou dozimetru, možnost opakovaného použití dozimetru a také možnost použití látek s vlastnostmi blízkými lidské tkáni;
- nevýhodou je citlivost na světlo;
- pro hodnocení ekvivalentní dávky na končetinách pracovníků se používají termoluminiscenční dozimetry ve tvaru náramku případně prstýnku.



# Radiofotoluminiscenční dozimetrie

- podstatou je fotoluminiscence, která je založena na principu tvorby luminiscenčních center indukovaných ionizujícím zářením v určitých látkách;
- luminiscence je vybuzena osvětlením ozářeného detektoru ultrafialovým světlem, vyzářené světlo je úměrné dávce ionizujícího záření absorbované v detektoru;
- dlouhodobá stabilita odezvy, konstantní a vysoká citlivost a nízká energetická závislost;
- nevýhodou je citlivost detektorů na světlo.

# Elektronická dozimetrie

- zpravidla pracují na bázi Geiger-Müllerových detektorů, polovodičových Si-detektorů nebo ionizační komory;
- je možné používat autonomně nebo ve spojení s vyhodnocovacím zařízením;
- nevýhodou je možné ovlivnění elektromagnetickým zářením v souvislosti s použitím mobilních telefonů, aplikací čteček magnetických karet nebo například při svařování.





# Elektronická dozimetrie

- vysoká citlivost;
- získání okamžité informace o dávce, dávkovém příkonu a dávkovém profilu;
- možnosti nastavení akustického a vizuálního alarmu pro kumulovanou dávku nebo dávkový příkon při překročení nastavené úrovně;
- optimalizace radiační zátěže prostřednictvím průběžného sledování aktuálního čerpání dávek jednotlivými osobami;
- umožnění praktické implementace principu ALARA zadáním dávkových cílů a průběžným sledováním jejich plnění.

# Neutronová dozimetrie

- **stopové detektory** → využívají se jako detektory rychlých neutronů, pracují na bázi odražených protonů se používají látky bohaté na vodík (polykarbonáty, nitráty celulosy);
- **albedo-dozimetry** → založeny na detekci neutronů rozptýlených a zpětně odražených v lidském těle a vstupujících ze zadního poloprostoru do detektoru umístěného na těle;
- **bublíkové dozimetry** → založeny na principu interakce neutronů s průhledným, elastickým polymerem, který je smíšen s kapkami přehřáté kapaliny (např. freonem).

# Metody stanovení vnitřní kontaminace

- při vnitřní kontaminaci jsou nejvíce nebezpečné částice  $\alpha$  a  $\beta$ , které mají o několik řádů větší ionizační schopnost než fotony a neutrony;
- kromě aktivity se stanovuje také typ radionuklidů přijatého do organismu a chemická i fyzikální forma jeho molekul nebo adsorbentů;
- podle toho také radionuklidy procházejí dýchacím nebo zažívacím traktem a usazují se v některém orgánu či tkáni;
- aktivity získané měřením se pak převádějí na úvazky efektivní dávky nebo úvazky ekvivalentní dávky pomocí modelů.

# Přímé metody

- stanovení aktivity radionuklidu měřením in vivo celého těla nebo orgánu či tkáně celotělovým počítačem nebo obdobným zařízením;
- **Celotělové počítače** → většinou spektrometry záření gama se scintilačními nebo polovodičovými detektory, jimiž se měří záření gama nebo charakteristické rentgenové záření, které emitují radionuklidy, přítomné v těle, aby bylo dosaženo stejné detekční účinnosti pro všechna místa těla, používá se několika detektorů rozmístěných kolem těla pacienta.



# Přímé metody

- **celotělové počítače shadow – shield** mají jen částečné stínění → používají se zejména jako mobilní celotělové počítače pro havarijní případy, ale i pro rutinní monitorování;
- kolimovaný **scintilační detektor** a jednokanálový nebo vícekanálového amplitudový analyzátor → měří aktivitu jen v některých orgánech či tkáních, monitorování radioizotopů jódu ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ) ve štítné žláze.



# Nepřímé metody

- vedou k odhadu úvazku efektivní dávky či úvazku ekvivalentní dávky prostřednictvím:
  - měření exkret;
  - z měření pracovního prostředí;
  - ze znalostí hmotnostních aktivit radionuklidů v potravinovém řetězci;
- používají se v případě radionuklidů, které nelze měřit přímými metodami, při monitorování speciálním nebo havarijním, kdy je třeba získat více informací o chování radionuklidu v těle, a v případě, kdy není k dispozici celotělový počítač.

# Nepřímé metody

Radionuklidy emitující záření beta, je možné měřit:

- detekčním systémem s kapalnými scintilátory;
- po chemické separaci proporcionálními detektory;
- alfa spektrometrií.

