

# Elektromagnetické záření, zdroje záření, měření ionizujícího záření (denzitometrie), ochrana před ionizujícím zářením

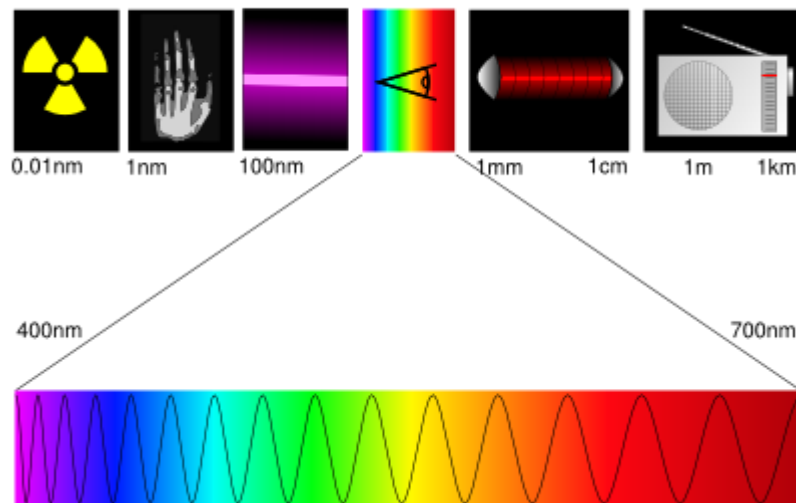
Biofyzika

Doc. Ing. Jana Kolářová, PhD.

Ing. Vratislav Harabiš, (PhD.)

Ústav biomedicínského inženýrství,  
VUT v Brně

# Elektromagnetické spektrum



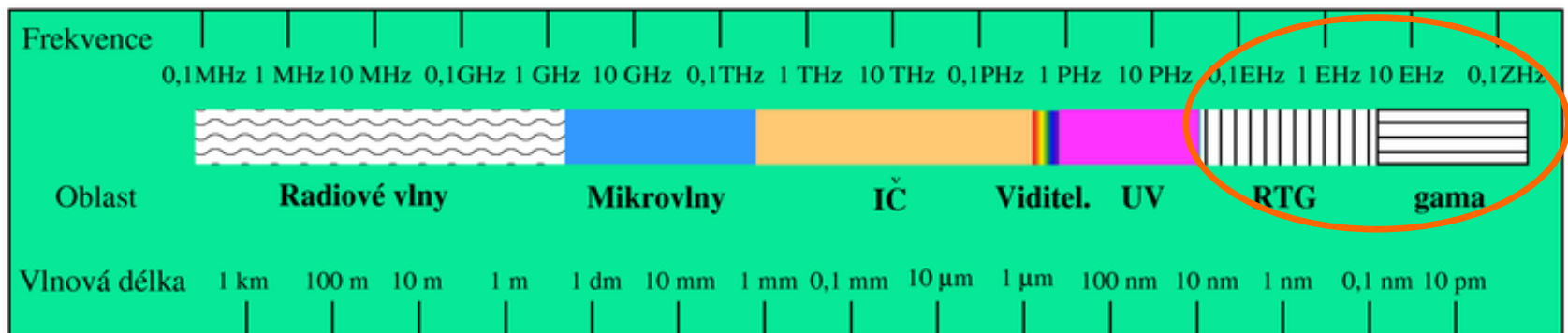
Elektromagnetické záření o vlnové délce  $\lambda$  (ve vakuu) má frekvenci  $f$  a jemu připisovaný foton má energii  $E$ . Vztah mezi nimi vyjadřují následující rovnice:

$$\lambda = c/f$$

a

$$E = h \cdot f,$$

kde  $c$  je rychlost světla ( $3 \times 10^8$  m/s),  
 $h = 6.65 \times 10^{-34}$  J·s = 4.1  $\mu$ eV/GHz  
 Planckova konstanta.



# Elektromagnetické pole

řazeno sestupně podle  $\lambda$ :

- gama záření
- rentgenové záření o vlnových délkách 10 - 0,1 nm,
- ultrafialové záření o vlnových délkách 400 - 10 nm,
- viditelné světlo o vlnových délkách 400 - 800 nm,
- infračervené záření 300 GHz - 400 THz,
- rádiové vlny
  - centimetrové vlny a kratší, (mikrovlnné záření), 3 – 300 GHz,
  - ultra krátké vlny UKV (UHF), 0,3 - 3 GHz,
  - velmi krátké vlny VKV (VHF), 30 - 300 MHz,
  - krátké vlny - KV (HF) 3 - 30 MHz,
  - střední vlny - SV (MW,AM) 0,3 - 3 MHz,
  - dlouhé vlny – DV (LF) < 500 kHz,
  - velmi dlouhé vlny (VLF), 3 - 30 kHz,
  - extrémně dlouhé vlny (ELF), 3 – 3000 Hz.

ionizující ↑

neionizující ↑

# Ionizující záření

- nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat.

emise ionizujícího záření může být vyvolána:

- vzájemným působením mezi elementárními částicemi nebo fotony s atomovými jádry
- spontánním rozpadem atomových jader přírodních nebo uměle vytvořených radionuklidů
- energie potřebná ke vzniku iontů je zpravidla  $0,1 \div 10 \text{ MeV}$

# Ionizující záření

- **přímo ionizující**
  - kvanta nesou elektrický náboj a proto přímo vyražejí či vytrhávají Coulombickými elektrickými silami elektrony z atomů,
  - $\alpha$ ,  $\beta^-$  a  $\beta^+$ , protonové záření  $p^+$  atd.
- **nepřímo ionizující**
  - kvanta nejsou elektricky nabitá;
  - svou kinetickou energii předávají v látce nejprve nabitým částicím (většinou elektronům) a ty teprve přímými účinky na atomy látku ionizují.
  - záření **rentgenové** a záření  $\gamma$ , záření **neutronové**.

# Ionizující záření

- z hlediska fyzikálních, chemických a zvláště **biologických účinků** ionizujícího záření na ozařovanou látku se záření někdy ještě dělí podle hustoty ionizace, kterou v látce při svém průchodu vyvolává:
  - **řídce ionizující** - záření  $X$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ .
  - **hustě ionizující** - záření  $\alpha$ , neutronové záření, protonové záření.

biologické účinky záření

## **jakostní faktor Q**

- udává, kolikrát je dané záření biologicky účinnější než záření fotonové ( $X$  nebo  $g$ ).

typ záření	Q
$X$ , $\gamma$ , $\beta$	1
pomalé neutrony	2-3
rychlé neutrony, protony s vysokou energií	10
$\alpha$ , částice s násobným nábojem, částice z rozpadu a těžké částice s neznámým nábojem	20

# Záření vlnové, korpuskulární

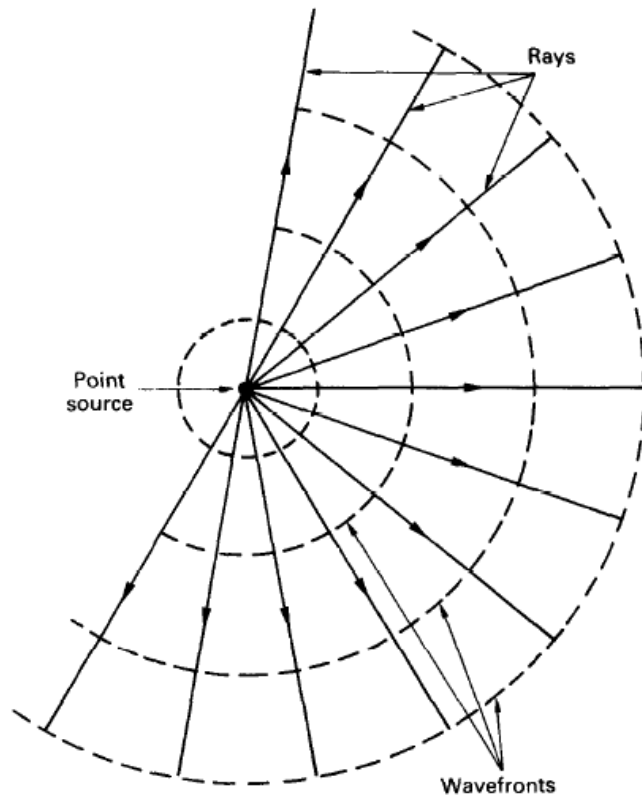
- vlnění se může chovat jako proud částic a částice naopak mají vlnové vlastnosti.
  - **záření vlnové** -  $m_0 = 0$ : kvanta tohoto záření nemají klidovou hmotnost, jsou to kvanta vlnění, pohybující se rychlostí světla; pokud je zabrzdíme, odevzdají veškerou svou energii a zaniknou, (elektromagnetické záření jehož kvanta jsou fotony, RTG,  $\gamma$ , brzdné záření),
  - **záření korpuskulární** -  $m_0 > 0$ : kvanta tohoto záření mají nenulovou klidovou hmotnost, jedná se o proud hmotných částic pohybujících se rychlostí menší než rychlost světla, které si zachovávají svou existenci i po zastavení pohybu. Patří sem záření  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , protonové záření  $p^+$ , neutronové záření  $n^0$ , neutrinové záření  $n$  a řada dalších druhů záření vznikajícího při vysokoenergetických srážkách elementárních částic.
- $m_0$  je hmotnost částice měřená v inerciální vztažné soustavě v níž je částice v klidu.

# Pole záření, intenzita záření

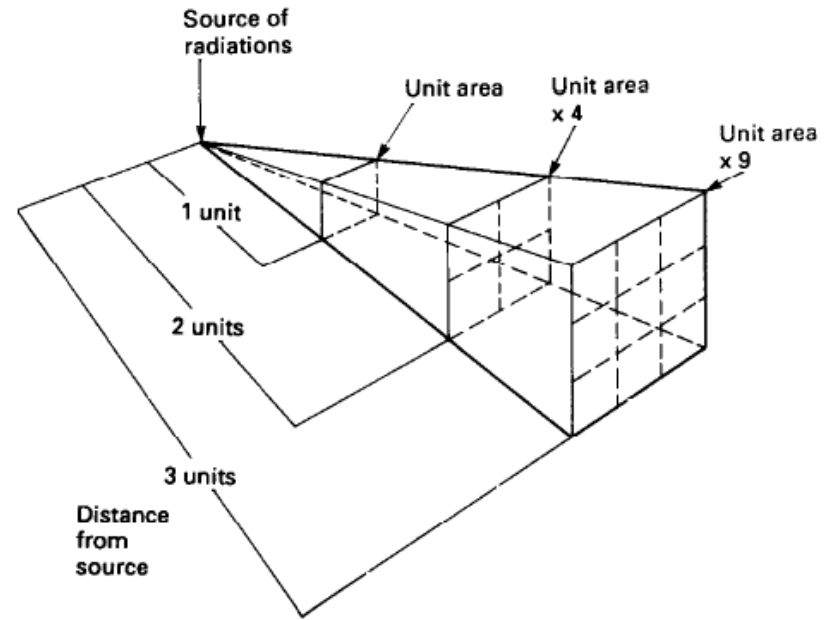
- pole záření - kvanta záření, šířící se v prostoru,
- svazek záření - kvanta záření se pohybují v daném místě prostoru převážně jedním určitým směrem.
- intenzita záření – základní charakteristika pole záření - rozhoduje o míře účinků záření na hmotu v daném místě.
  - **fluence částic** (tok částic, resp. hustota toku částic) je definována jako počet kvant záření procházejících za 1 sekundu jednotkovou plochou postavenou v daném místě kolmo ke směru šíření kvant.  
Vyjadřuje se jako (počet částic)/m<sup>2</sup>.  
(zjednodušeně platí pro rovnoběžný svazek záření)
  - **fluence energie** (tok energie, resp. hustota toku energie) je definována analogicky, avšak místo počtu kvant se bere jejich energie.  
Jednotkou je W/m<sup>2</sup>.



# Šíření záření od bodového zdroje



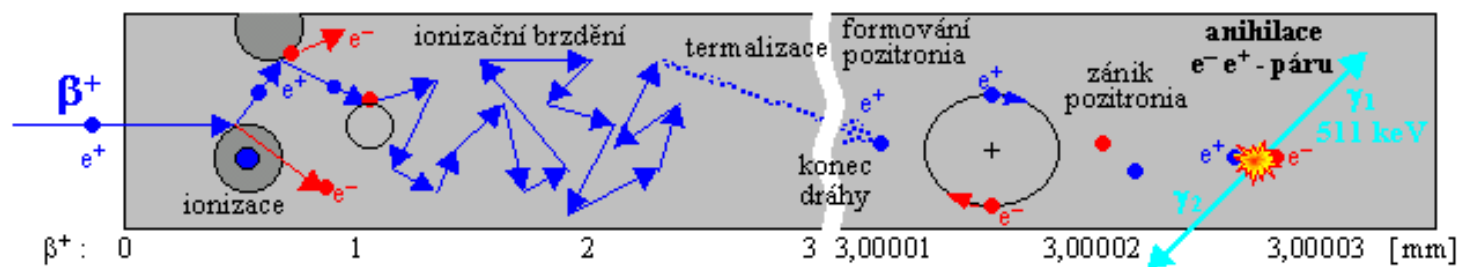
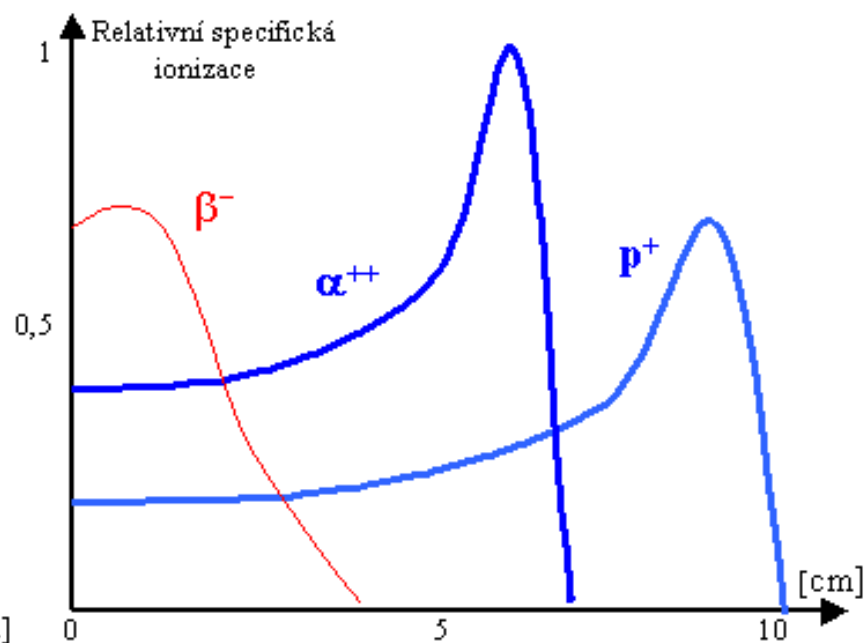
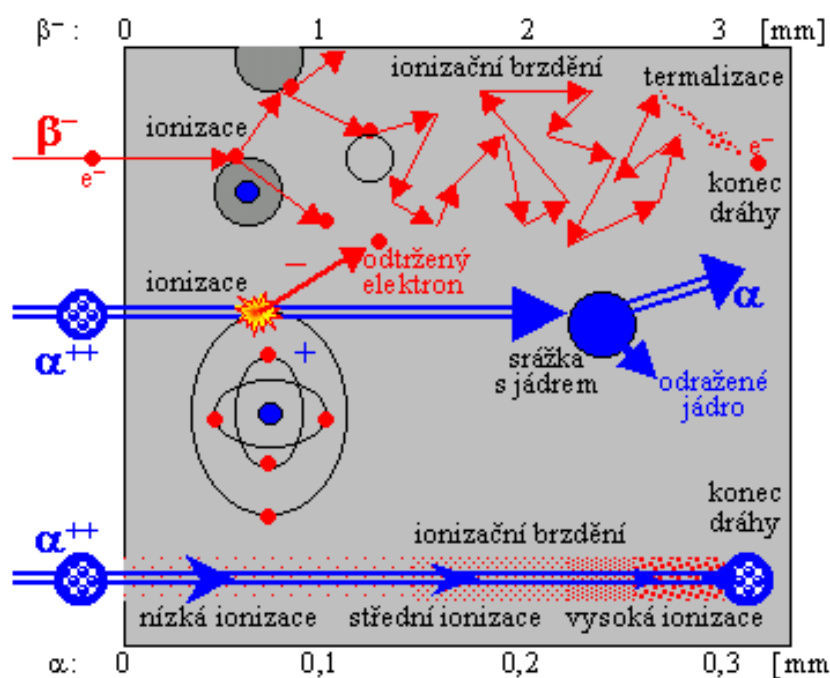
**Fig. 8.3** To illustrate electromagnetic radiations travelling away from a point source by rays and wavefronts which are perpendicular to one another.



**Fig. 8.4** The inverse square law. The intensity of radiation from a point source is inversely proportional to the square of the distance from the source.

$$\text{Intenzita záření} \sim 1/d^2$$

# Průchod částic látkou



# Interakce záření při průchodu hmotou

- **elektromagnetické interakce** u nabitých částic způsobují
  - Coulombovský rozptyl,
  - pochody ionizace a excitace atomů i jader,
  - radiační procesy jako je brzdné záření,
  - Čerenkovovo záření.
- elektromagnetické interakce jsou nejčastějšími a nejdůležitějšími procesy při průchodu většiny druhů záření v praxi,
- využívají se nejčastěji při detekci ionizujícího záření.

# Interakce záření při průchodu hmotou - průlet kvant

- částice **ztrácejí energii**, jsou tedy brzděny a nakonec i zastaveny (je-li látkové prostředí dostatečně velké)
- záření má v látce **omezený dolet** či **dosah**,
  - maximální dolet  $R_{max}$ ,
  - efektivní dolet  $R_{90}$ , což je vzdálenost, v níž se absorbuje 90% původní emitované energie částic,
- ionizační stopa z volných záporných elektronů a kladných iontů,
  - část těchto iontů a elektronů opět vzájemně rekombinuje, avšak část jich může vyvolat nové chemické vazby a reakce v okolní látce
- tepelné účinky

# Interakce nabitých částic

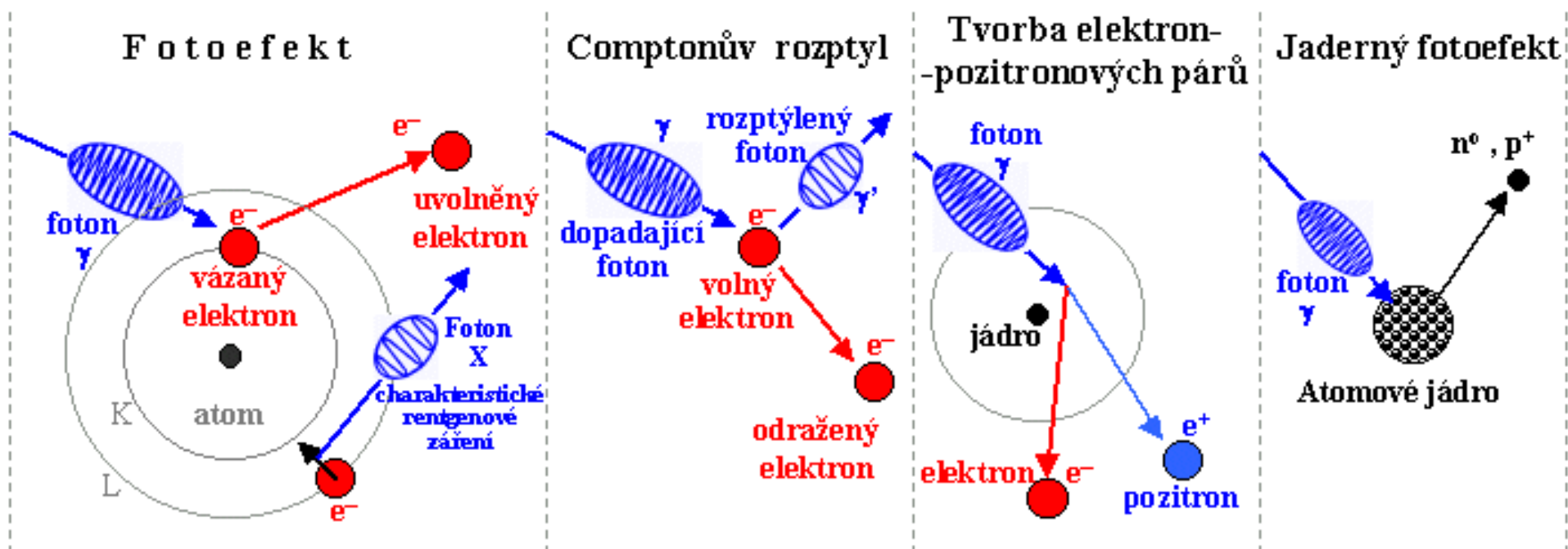
- excitace atomu – energie – "vyzdvižení" elektronu na vyšší energetickou hladinu – **nestabilní stav**
- deexcitace – návrat elektronu + vyzáření fotonu elmg. záření
  - při excitaci elektronů na vnějších slupkách je emitováno **viditelné světlo**,
  - při excitaci na vnitřních slupkách pak fotony charakteristického **rentgenového záření**,
- ionizace atomu – energie dostatečná k uvolnění elektronu z mateřského atomu
  - primární
  - sekundární

# Interakce nabitých částic - nepřímo ionizující záření

- fotony záření  $\gamma$
- nemají elektrický náboj,
- ionizace atomů není způsobena elektrickými silami
- foton je kvantem rychle kmitajícího **elektrického** a **magnetického** pole, takže když se do "těsné blízkosti" tohoto kmitajícího pole dostane elektron, může obdržet elektromagnetickou energii a být fotonem urychlen.
- interakce záření  $\gamma$  s látkou může probíhat
  - fotoefekt
  - Comptonův rozptyl
  - tvorba elektron-pozitronových párů
  - jaderný fotoefekt
  - jaderná absorpce

# Interakce nabitých částic - nepřímo ionizující záření

## interakce záření $\gamma$



# Interakce nabitých částic - nepřímo ionizující záření

## neutronové záření

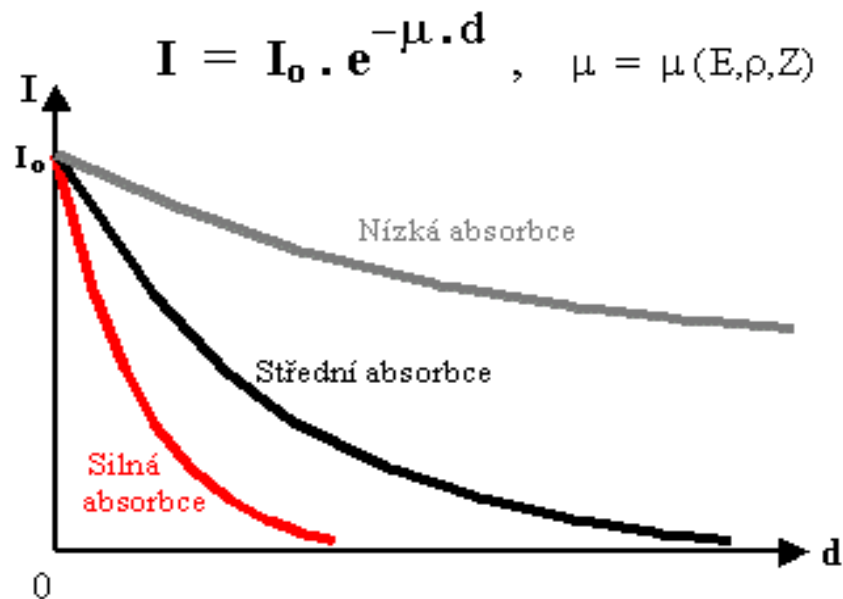
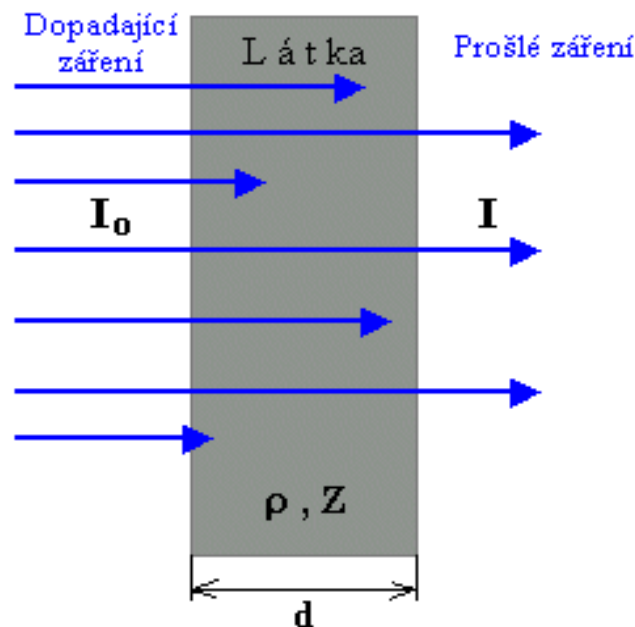
- nemají elektrický náboj,
- ionizace atomů není způsobena elektrickými silami, ionizace je způsobena až sekundárními částicemi
- ve vakuu se neutrony pohybují sice volně a bez odporu, avšak jejich "dolet jakožto neutronů" není neomezený,
- volné neutrony se spontánně rozpadají radioaktivitou  $\beta^-$  s poločasem asi 12 minut na protony, elektrony a (anti)neutrino,
- neutrony po vstupu do látky reagují téměř výhradně s atomovými jádry



# Absorbce záření v látkách

všechny mechanismy interakce záření s hmotou způsobují, že aspoň část kvant ionizujícího záření se při průchodu látkou absorbuje.

- málo pronikavého záření - pohltí se všechno,
- pronikavého záření - část kvant se pohltí a část projde.



# Absorbce záření v látkách

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

kde absorpční koeficient  $\mu$  se nazývá **lineární součinitel zeslabení**.

- jeho hodnota závisí na hustotě a protonovém čísle absorpčního materiálu a výrazně též na energii záření  $E_g$ :

$$\mu = \mu(\rho, Z, E_g).$$

-

- lineární součinitel zeslabení  $\mu$

$\mu \uparrow$  -  $\rho \uparrow$  a protonové číslo  $Z$  dané látky  $\uparrow$ ,

$\mu \downarrow$  - energie záření  $E \uparrow$ .

# Stínění

**záření  $\alpha$**  heliová jádra (2 protony a 2 neutrony)

- malá pronikavost,
- lze odstínit velmi snadno, např. tenká vrstva (milimetrová) lehkého materiálu, př. plastu,
- pokud je zářič smíšený  $\alpha+\gamma$ , stínění proti  $\gamma$  automaticky dokonale odstíní i záření  $\alpha$ .

**záření  $\beta^-$**

stačí lehké materiály (jako je plexisklo nebo hliník) 5-10mm, nejlépe v kombinaci s následnou tenkou vrstvou olova k odstínění brzdného elektromagnetického záření vzniklého zabrzděním elektronů  $\beta$  v lehkém stínícím materiálu.

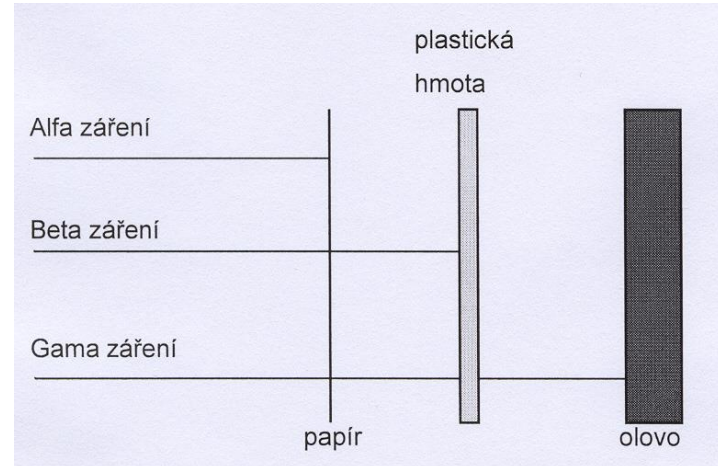
**záření  $\beta^+$**

vrstva lehkého materiálu + poměrně silná vrstva olova (nejméně cca 3 cm), abychom odstínili tvrdé záření  $\gamma$  o energii 511keV, vznikající při anihilaci pozitronů  $\beta^+$  s elektrony  $e^-$ .

pro **záření  $\gamma$**  a **X** jsou nejvhodnějšími stínícími materiály látky s velkou měrnou hmotností (hustotou) – především olovo, wolfram, uran, olovnaté sklo, (záření  $\gamma$  o energii cca 100keV stačí vrstva olova tloušťky 2mm)

**neutronové záření** obecně složitější

1. krok - zpomalení rychlých neutronů,
2. krok - absorpce zpomalených neutronů, absorpce neutronů v jádrech kadmia nebo boru je doprovázena emisí záření  $\gamma$ ,
3. krok - stínění  $\gamma$ , stínění proti neutronům tedy obecně musí sestávat ze tří vrstev: vrstva lehkého materiálu bohatého na vodík (např. polyetylen), vrstva kadmia nebo bóru, a nakonec vrstva olova



# Radioterapie

- **Teleterapie** – zevní radioterapie

zdroj záření je umístěn vně těla a ozařuje se cíl skrz kůži,

- **Brachyterapie** - vnitřní radioterapie

zářiče jsou umístěny v cílovém objektu nebo v jeho bezprostřední blízkosti, zdroje otevřené (roztoky či suspenze), zdroje uzavřené (pevné)

# Využití ionizujícího záření v terapii - RADIOTERAPIE

- ionizující záření (přírodní x umělé)
  - záření radionuklidů,
  - svazky elektronů,
  - brzdné RTG záření,
- aplikace
  - radikální
  - paliativní
  
  - vnější ozařování
  - vnitřní ozařování

# Zdroje ionizujícího záření

- radionuklidy
- speciální zařízení – urychlovače částic
- zdroje záření rozdělujeme na:
  - radionuklidové (více jak 1 000)
    - přírodní radionuklidy (atomy prvků s atomovým číslem větším než 83),
    - uměle připravené radionuklidy (bombardováním stabilních izotopů urychlenými částicemi).
  - nenuklidové (všechny urychlovače nabitých částic)
    - svazky elektronů,
    - brzdné záření (konvertor Pb, W, Ta, U, Au).

# Radionuklidy

## ■ Přírodní

např.  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{238}\text{U}$

## Radioaktivita neboli radioaktivní rozpad

- je samovolná přeměna jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, při níž vzniká radioaktivní záření, což je ionizující záření vznikající při radioaktivním rozpadu.
- změní-li se počet protonů v jádře, dojde ke změně prvku.
  
- radioaktivitu objevil v roce 1896 Henri Becquerel u solí uranu.
- k objasnění podstaty radioaktivity zásadním způsobem přispěli francouzští fyzikové Pierre Curie a Marie Curie.

# Charakteristika zdroje:

- emitovaný druh záření,
- energetické spektrum
- vydatnost - rychlost a směrová charakteristika emise.
  - vydatnost radioizotopového zdroje záření je dána jeho aktivitou [Bq],
  - emise záření tohoto zdroje je do všech směrů izotropní,
  - vlivem spontánního rozpadu klesá jeho aktivita s časem podle *exponenciálního zákona*:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

**A ... aktivita**

**$\lambda$ ... rozpadová konstanta související s poločasem rozpadu nuklidu**

**$t_{1/2}$  ... poločas rozpadu**

obě veličiny jsou pro radionuklid charakteristické.

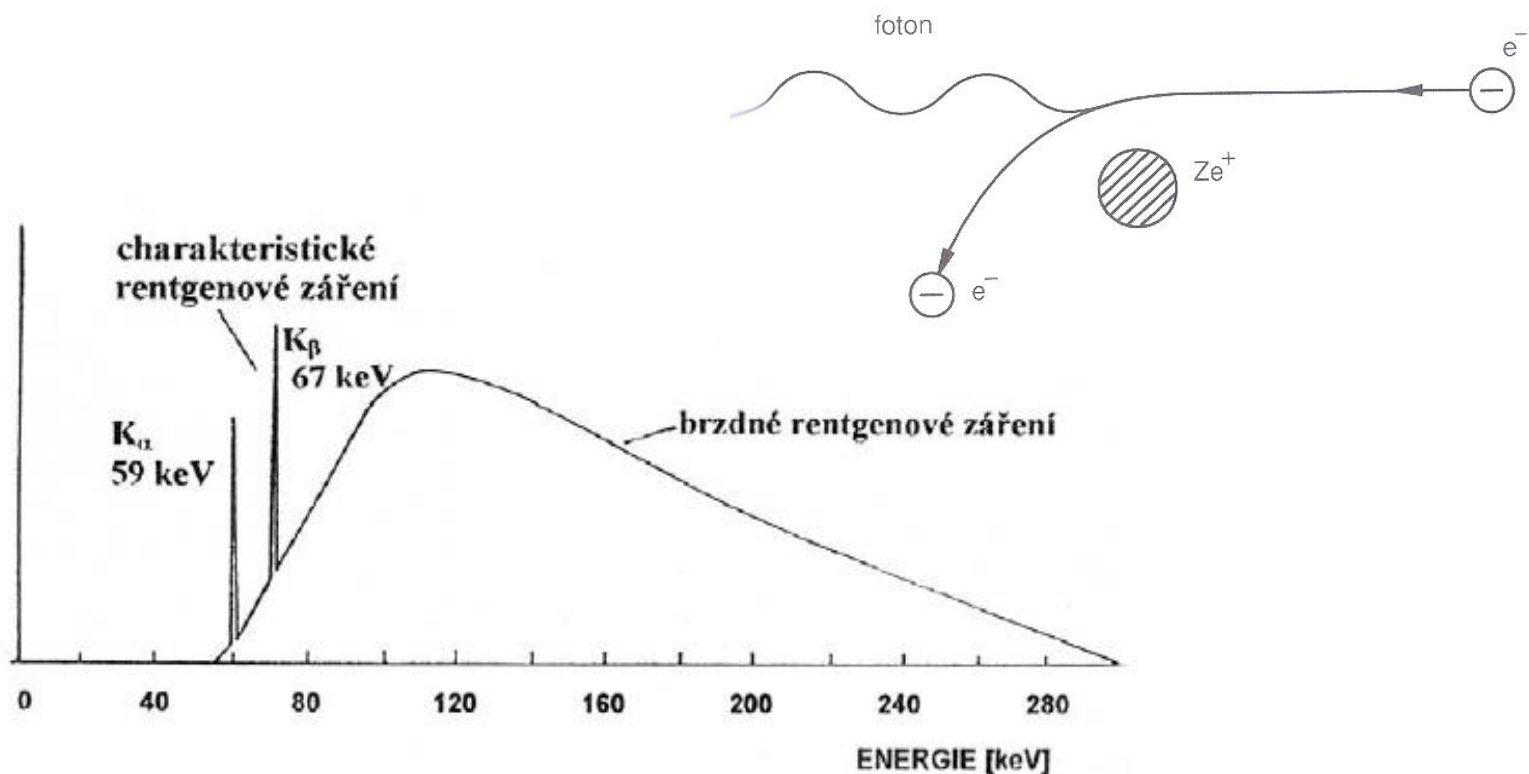
- v certifikátech zářičů se uvádí i jejich expoziční vydatnost, což je *expoziční rychlost* (příkon), kterou zářič dává v definované vzdálenosti (1m).
- vydatnost urychlovače, jako zdroje nabitých částic, se vyjadřuje proudem těchto nabitých částic - nejčastěji elektronů [A].



# Rentgenovo záření

- **Rentgenka**  
elektrony jsou emitovány z katody urychlovány k terčíku na anodě, v němž je dopadem elektronů buzeno elektromagnetické záření nazývané rentgenové.
- **Brzdné rentgenové záření** vzniká při změně rychlosti pohybu elektronu v elektromagnetickém poli atomů anody. Spektrum brzdného záření je spojité.
- V lékařských rentgenkách je energie elektronů dopadajících na anodu od několika desítek keV až do 500 keV při proudu 50 mA až 1 A

# Brzdné rentgenovo záření



Obr. Spektrum rentgenového spojitého a charakteristického záření (napětí na rentgence 300 kV, wolframový terčik, filtrace 2 mm Al a 3,5 mm Cu). Na svislé ose grafu je vynesena počet fotonů rentgenového záření vztažený na jednotkový interval energie.

# Účinky záření na tkáně

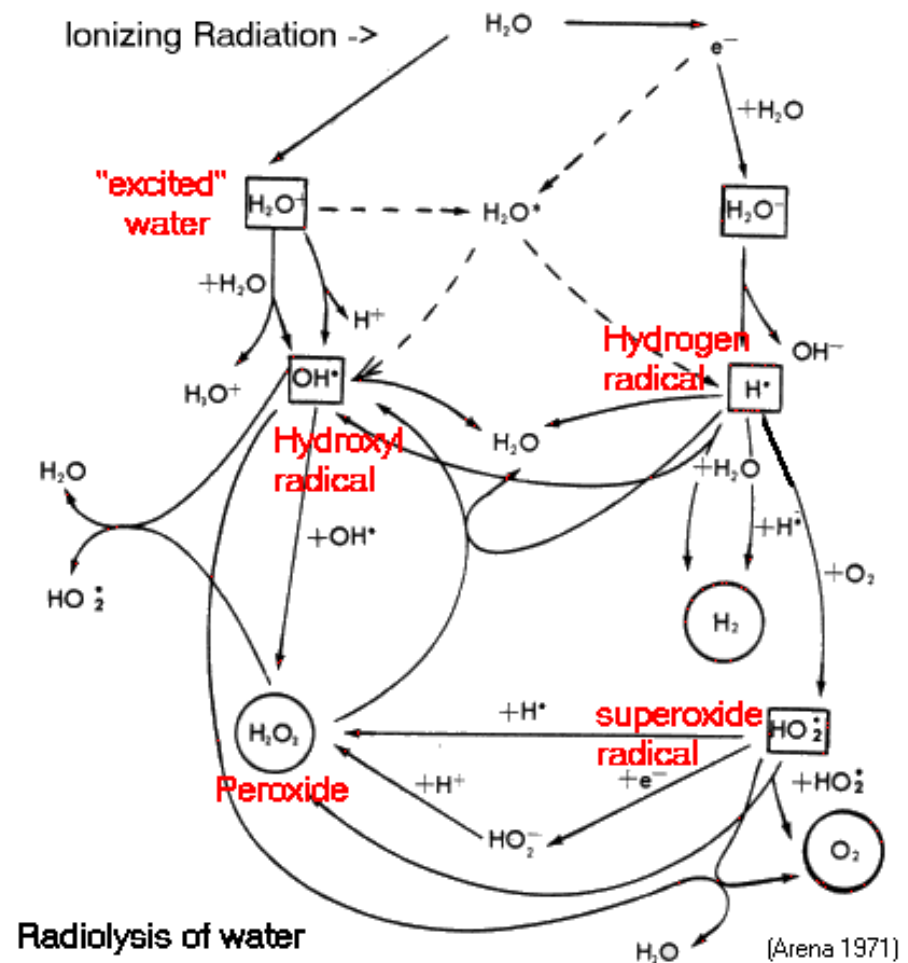
- změny chemických, fyzikálních vlastností látek:
  - excitace atomů a molekul,
  - ionizace atomů a molekul,
  - generování sekundárních elektronů, vznik volných radikálů H, OH, HO<sub>2</sub> (hydroperoxylový) a tím vyvolané změny v buňkách.
  - postradiační stavy závisí od druhu ionizujícího záření
- účinky záření na živé tkáně jsou vysvětlovány několika koncepcemi:
  - - teorií nepřímého účinku (radikálová teorie),
  - - teorií citlivého objemu buňky (přímého účinku),
  - - teorií dvojného radiačního účinku,
  - - molekulárně biologickou teorií.

# Účinky záření na tkáně

- radikálová teorie

ionizující záření způsobuje fyzikální i chemické změny jak v buňce, tak jejím okolí spojené s radiolýzou substrátů, zvláště pak vody, produktem těchto reakcí jsou různé radikály vedoucí i ke vzniku peroxidu vodíku  $H_2O_2$ , koncentrace i charakter těchto radikálů závisí na přítomnosti kyslíku v ozařované atmosféře - *kyslíkový efekt*, kyslík stimuluje vznik radikálů a brzdí reparační procesy, dochází tak ke změnám pH (ve stopě záření klesá, v okolí se zvyšuje), změně hustoty - viskozity uvnitř cytoplasmy, změně potenciálu buněčných membrán, změně osmotického tlaku v buňkách, prostřednictvím těchto změn může dojít k poškození až usmrcení buněk.

# Radiolýza vody



## Radiolysis of water ( $\text{H}_2\text{O}$ )

Exposure of cells to **ionizing radiation** induces high-energy **radiolysis** of  $\text{H}_2\text{O}$  water molecules into  $\text{H}^\bullet$  and  $\text{OH}^\bullet$  radicals, which are themselves chemically reactive. These in turn recombine to produce a variety of highly reactive radicals such as **superoxide** ( $\text{HO}_2^\bullet$ ) and **peroxide** ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), which produce oxidative damage within the cell.

# Celkový účinek záření na organismus

- se vyjadřuje **letální dávkou LD50**
  - dávka, při které polovina ozářených organismů zmírá, pro člověka je  $LD_{50} = 5 \text{ Gy}$ ,
- nejvýraznějším specifickým účinkem ionizujícího záření na živé organismy je jeho vliv na genetický aparát buněk (přímá interakce záření s molekulami DNK (deoxyribonukleové kyseliny) v chromozomech),
- genetické poruchy - mutace genů se přenášejí do dalších generací a mohou být vyvolány i velmi malými dávkami záření,
- kumulativní charakter účinku i malých dávek
- na úrovni tkání a orgánů klesá *radiosenzitivita* (citlivost vůči záření) zhruba v tomto sledu:  
kostní dřeň, lymfoidní orgány, pohlavní žlázy, střeva, kůže, epiteliální výstelky, tenké cévy, chrupavka, kost, dýchací ústrojí, žlázy zažívacího traktu, endokrinní žlázy, svaly a centrální nervový systém.

# Účinky ionizujícího záření na lidský organismus

- časné a pozdní,
  - časné
    - akutní lokální změny (kůže)
    - poškození plodu,
    - **akutní nemoc z ozáření** - nejzávažnější, akutní lokální změny rozvíjí se po **celotělové expozici** vyšší dávkou, podle velikosti dávky se v klinickém obraze objevují fáze:
      - hematologická - dávka 3 ÷ 6 Gy,  
projevy: nevolnost, zvracení, krvácení, průjemy,
      - gastrointestinální - dávka vyšší než 10 Gy,  
projevy: proucha hospodaření s tekutinami, zánik střevní výstelky, střevní zástava, úmrtí - kolaps krevního obrazu.
      - nervová - dávka kolem 50 Gy, kdy po psychické dezorientaci, poruše koordinace pohybů, křečích a hlubokém bezvědomí nastává smrt, selhává kardiovaskulární a respirační systém, nastává edém (otok) mozku.
  - pozdní
    - lokální změny (oko, kůže),
    - zhoubné nádory,
    - genetické změny

# Účinky ionizujícího záření na lidský organismus

- somatické (jedinec) a genetické (potomstvo),
  - stochastické a nestochastické.
    - stochastické účinky záření se s jistou pravděpodobností objevují po každé expozici - hovoříme o *poškození bez prahu* (pozdní účinky),
    - nestochastické účinky záření se objevují až po expozici definované velikostí - *poškození s prahem* (časné účinky),
    - - proti těmto velice negativním účinkům ionizujícího záření na lidský organismus působí reparační procesy samotného organismu.
- látky, které obsahují sulfhydrylovou skupinu (SH) reagující s radiačně produkovanými radikály, mají radioprotektivní (ochranný) účinek,  
- při každé aplikaci ionizujícího záření na organismus je třeba zvážit radiační riziko.



# Principy radioterapie

využití radiačních účinků ionizujícího záření

- **léčení maligních** (zhoubných) **nádorů**, nádorová tkáň vykazuje vyšší citlivost vůči záření, (zhruba 60% všech rakovinných onemocnění vyžaduje radioterapeutickou léčbu, kombinace s chirurgickým výkonem a chemoterapií), **aplikace** jen na tumory **radiosenzitivní**, (existují však i radiorezistentní tumory jako: osteosarkom (nádor kosti), fibrosarkom (nádor vazivové tkáně), melanom (nádor z pigmentových buněk))

# Radioterapie nádorových onemocnění

- postupy (ohled na aktuální stav pacienta):
  - **radikální radioterapie** - úplné zničení nádorových buněk, vyléčení nádoru, postup vyžaduje intenzivní ozařování, celková dávka 40 ÷ 60 Gy, 5x týdně po 2 Gy,
  - **paliativní radioterapie** - dočasné zlepšení stavu pacienta (tišení bolesti), celková dávka 20 ÷ 40 Gy (po 2 Gy).
- ionizující záření
  - léčení zhoubných nádorů
  - i některá nezhoubná onemocnění: degenerativní procesy kostí a kloubů, některé dermatózy (kožní choroby), celková dávka 1÷3Gy, 2÷3x týdně 0,2÷1Gy.

# Přípustné dávky pro zdravotnický personál

- aplikované terapeutické dávky
- vyhláška č. 184/1997 Sb. SÚJB o požadavcích na zajištění radiační ochrany
  - kategorie pracovníků v oboru ionizujícího záření,
  - přípustné limity ozáření,
  - technické a organizační požadavky na zabezpečení rozumně dosažitelných úrovní radiační ochrany
    - zevní a vnitřní ozáření:  
dávka 100mSv/5let (po sobě),  
max. dávka 50mSv/rok,
    - dávka na 1 cm<sup>2</sup> kůže (ruce, nohy): 500 mSv/rok,
    - vnitřní ozáření radionuklidy při vdechnutí: 20mSv s konverzním faktorem pro příjem odpovídajícího radionuklidu za rok.

# Technické a organizační podmínky radiační ochrany personálu

bývají vymezeny

- automatickým zabezpečovacím zařízením a provozním řádem ozařovny.
- labyrintový systém vstupu do ozařovny,
- systém dozimetrické kontroly,
- sledování koncentrace radiolytických produktů v ovzduší ozařovny - ozonu a oxidů dusíku,
  - nejvyšší přípustné koncentrace dle ČSN:  
ozon:  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  
oxidy dusíku:  $5 \text{mg}/\text{m}^3$ .
- výkonné odvětrávací zařízení (s podtlakovou hermetizací).

# Vnější ozařování

**zdroje:** radionuklidové zdroje záření gama  $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$ , nenuklidové zdroje s RTG svazky, urychlené elektrony, brzdné záření.

**volba zdroje:** dle požadovaného dosahu a rozsahem aplikace, možnosti:

- na krátké vzdálenosti - *povrchová terapie*, kdy se záření aplikuje na nádory uložené do 5 cm pod povrchem.

využívá se:

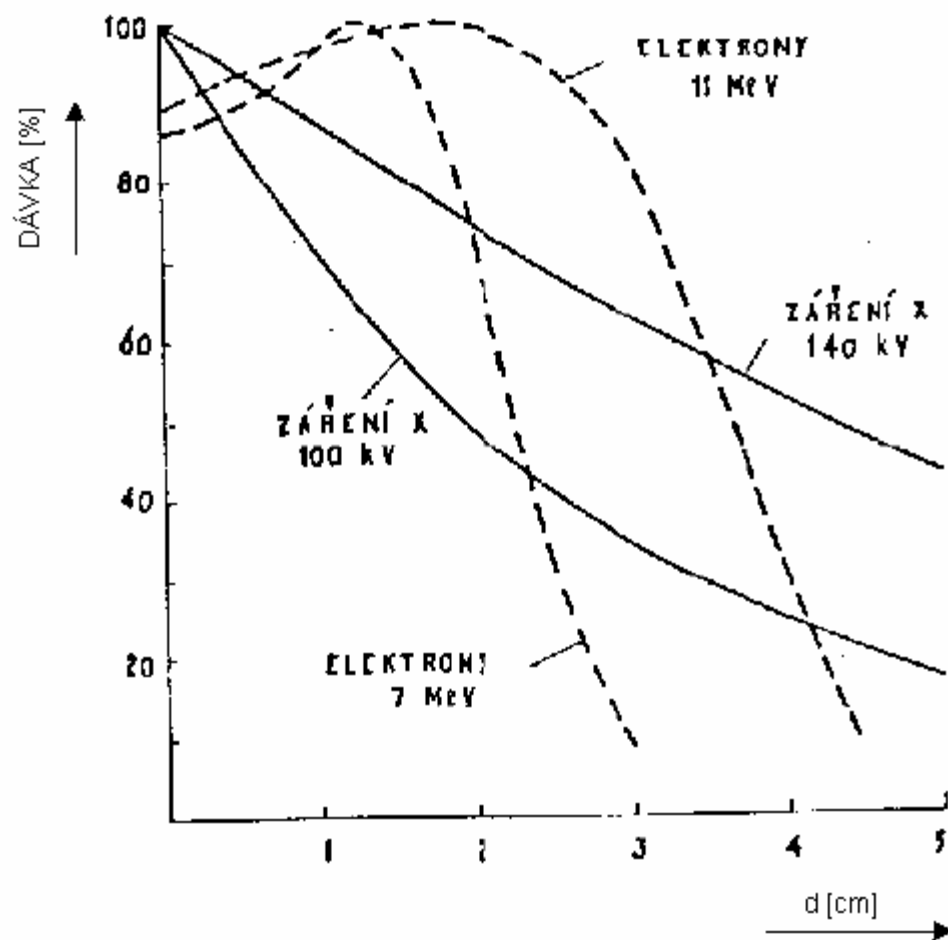
- radionuklidových zářičů  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,
- RTG záření při napětí do 140 kV,
- urychlených elektronů s energií  $7 \div 10$  MeV,

- teleterapii (cca 1 m) - *hloubková terapie*, kdy se požaduje větší dosah,

využívá se:

- velkých radionuklidových zářičů,
- RTG záření při napětí 200 kV a více,
- urychlených elektronů s energií  $> 15$  MeV,
- brzdné záření betatronů.

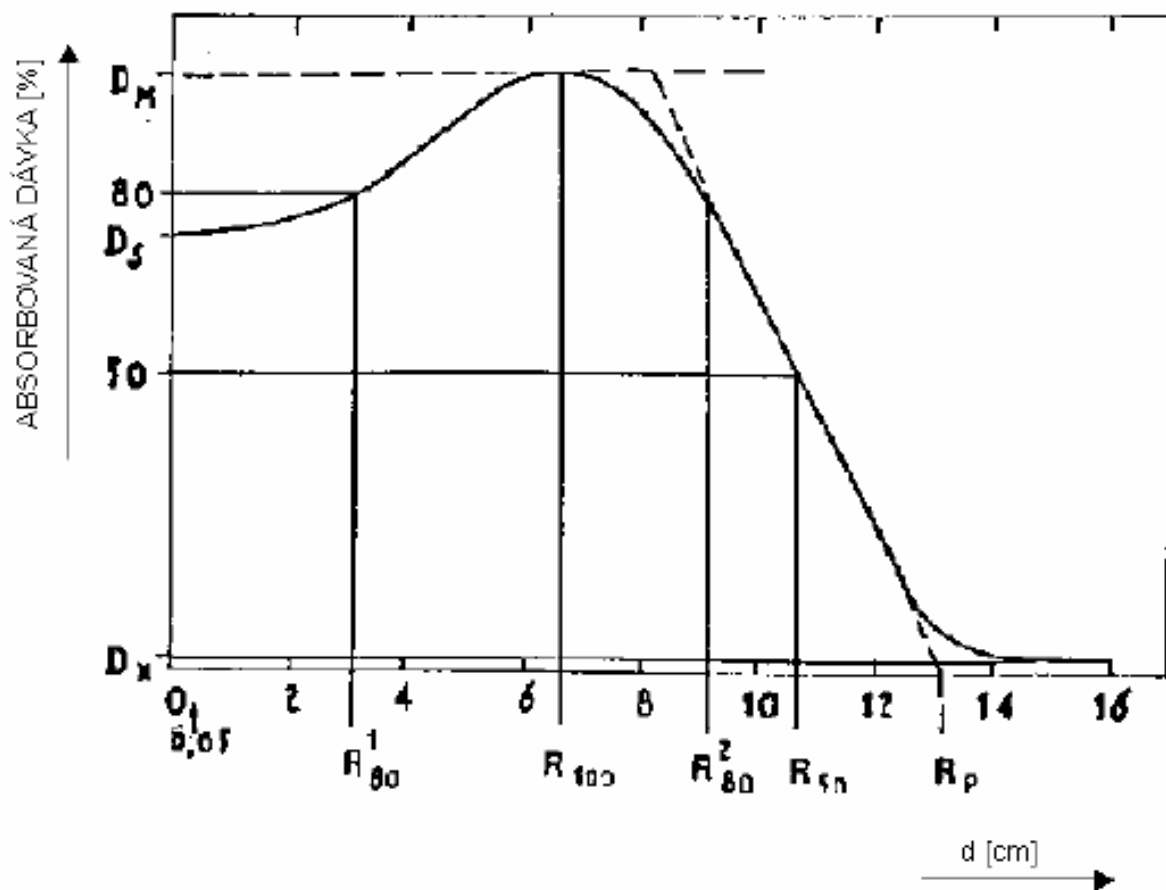
# Srovnání svazků záření



# Vnější ozařování

- **povrchová terapie**  
aplikace: nízkoenergetická záření, která jsou absorbována v povrchových vrstvách ozařovaných tkání,
- **hloubková terapie**  
aplikace: záření vyšších energií pro zajištění požadovaného dosahu,
- energie všech užívaných radionuklidových zdrojů jsou tabelovány,
- rentgenové záření  
*efektivní energie* - energie monoenergetického záření se stejným penetračním účinkem jako má užití spojitě záření,
- energie urychlených elektronů je charakterizována nejpravděpodobnější energií před výstupem z urychlovače a nejpravděpodobnější energií na povrchu ozařovaného objektu (bývá až o 10% menší).

# Dávka x hloubka

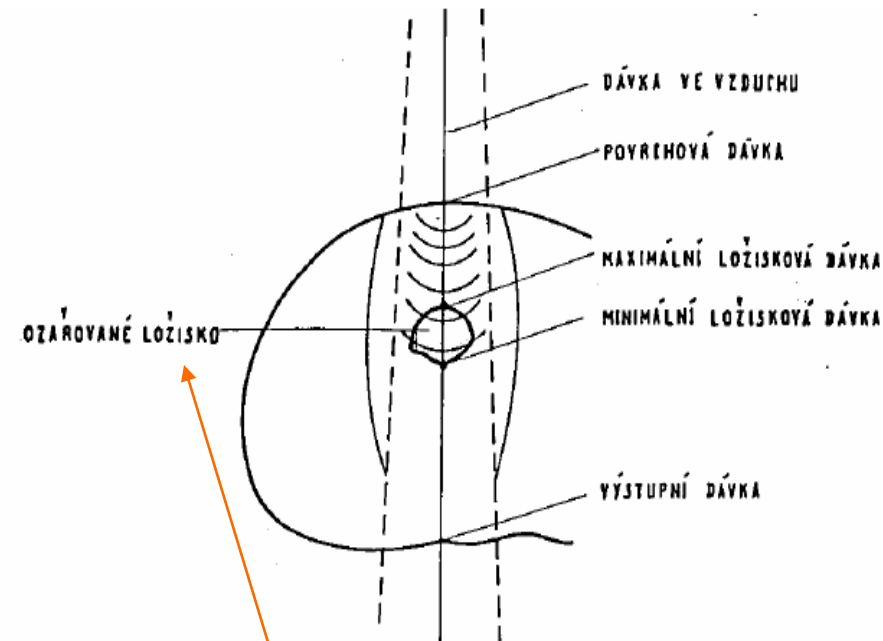


- $R_p$  ... praktický dosah,
- $R_{50}$  ... poloviční dosah,
- $R_{80}$  ... terapeutický dosah,
- $R_{100}$  ... dosah při maximální dávce.



# Popis svazku při hloubkovém ozařování

- povrchová dávka je dávkou na kůži - dávka ve vzduchu těsně nad kůží zvětšenou o dávku ze záření rozptýleného ve tkáni,
- maximální a minimální ložiskové dávky jsou dávky při vstupu a výstupu záření z ložiska nádoru,
- rozdíl obou těchto dávek by měl být co nejmenší, protože požadujeme co největší homogenitu ozáření ložiska,
- spád velikosti dávky z ložiska do okolních tkání by měl být co největší,
- maximální dávka v ložisku by měla co nejvíce sledovat tvar ložiska nádoru,



- **výstupní dávka je dávkou při výstupu záření z tkání organismu.**
- **!!! Cílový objekt**

# Statická terapie

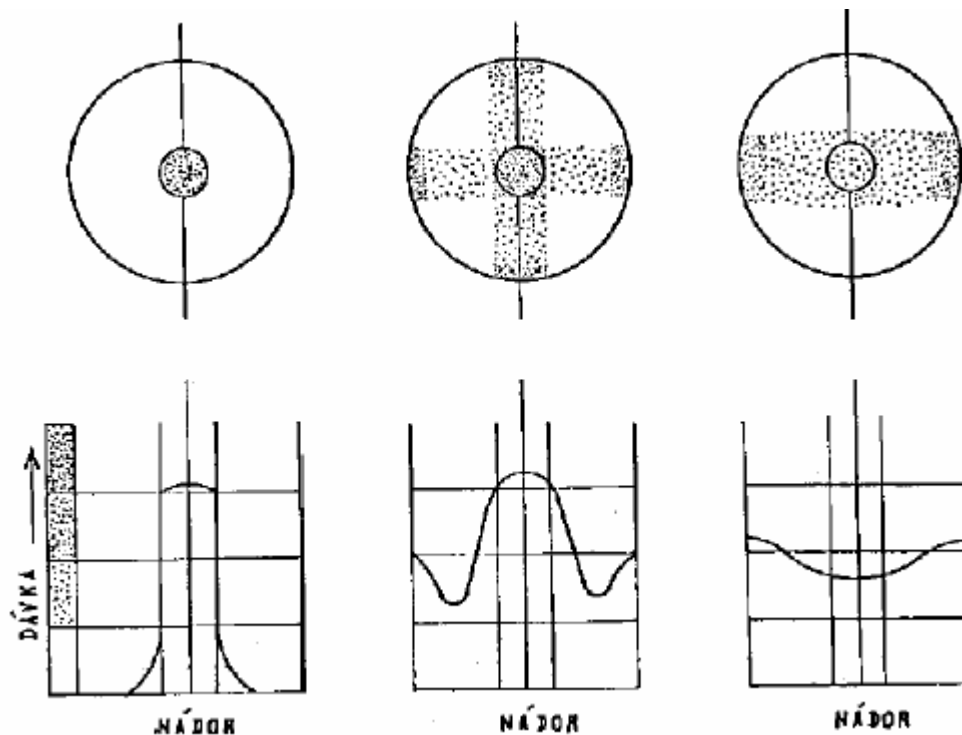
- jeden zdroj záření
  - statické nastavení zářiče i pacienta,
- více zdrojů záření z různých směrů,
  - rozložení ozáření povrchu tkáně na větší plochu,
    - 2 zdroje:
      - kontralaterální ozařování dvěma protilehlými zdroji,  
konvergentními (sbíhavými),  
tangenciálními (tečnými) poli.
    - 3 zdroje: Y technika, T technika,
    - 4 zdroje: technika křížového ohně (pole na sebe kolmé)
- k jemnějšímu nastavení dávek záření v hloubce se vkládají do svazků kovové vložky, klíny.

# Pohybová terapie

- pohyb zdroje záření nebo pohyb pacienta
- rotační terapie,
- kyvadlová terapie,



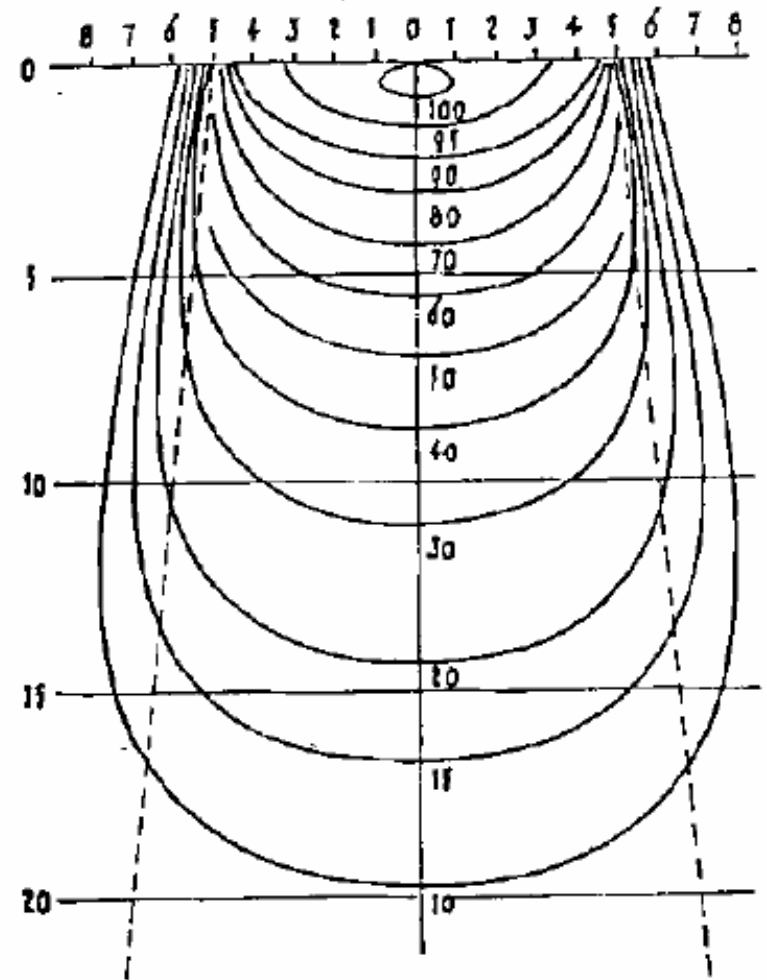
vysoká dávka v ložisku nádoru,  
její prudký spád v okolí,  
minimální radiační zátěž kůže.



srovnání distribuce dávky různými technikami ozařování

# Stanovení dávky

- modelová měření - fantomy naplněné látkami blízkými svými absorpčními vlastnostmi tkáním lidského těla (voda, parafin),
- aplikace ozáření tkáně realizováno za podmínek příslušných dané mapě  
→ odečtení dávek z grafu,
- znalost izodozních křivek plánování radioterapie (dávky: nádor, mimo něj)



izodozní křivky RTG záření  
(200 keV), filtrované vrstvou  
1 mm Cu a 1 mm Al se vzdáleností  
ohnisko-kůže OK = 50 cm

# Urychlovače elektronů

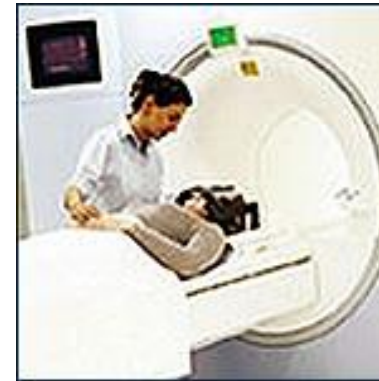
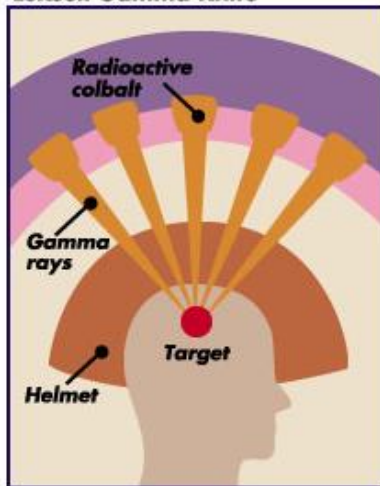
- podle dráhy urychlovaných částic
- kruhové
  - **betatron**, v němž se elektrony urychlují po kruhové dráze uvnitř vyčerpané trubice prstencového tvaru.
  - **cyklotron**, který slouží k získávání svazků nabitých částic o vysoké energii
- Lineární:
  - **lineární urychlovač** - elektrony jsou v něm urychlovány elektromagnetickou vlnou po přímkové dráze.
- Urychlovače elektronů mohou sloužit i jako zdroj intenzivního brzdného rentgenového záření s energií podstatně vyšší než mohou poskytnout rentgenky; brzdné záření se získává dopadem svazku urychlených elektronů na kovovou fólii. V praxi se běžně setkáváme s lékařskými urychlovači v oblasti energií do desítek MeV. Kromě elektronových urychlovačů jsou na některých zahraničních pracovištích využívány pro léčbu nádorových onemocnění i urychlovače protonů a těžkých iontů.

# urychlovač elektronů VARIAN



# Leksellův Gamma nůž

Leksell Gamma Knife



kolimátory



201 gamma zářičů - paprsek záření je přesně směřován do centra záření pomocí kolimátorů  
=> pole s vysokou intenzitou gamma záření  
v oblasti přesně definovaných rozměrů

# Stopovací diagnostika pomocí radionuklidů

Měření je možno provádět:

- na odebraných vzorcích “in vitro” (“ve skle”)
- přímo na organismu “in vivo” (“v živém”)



# Stopovací diagnostika pomocí radionuklidů

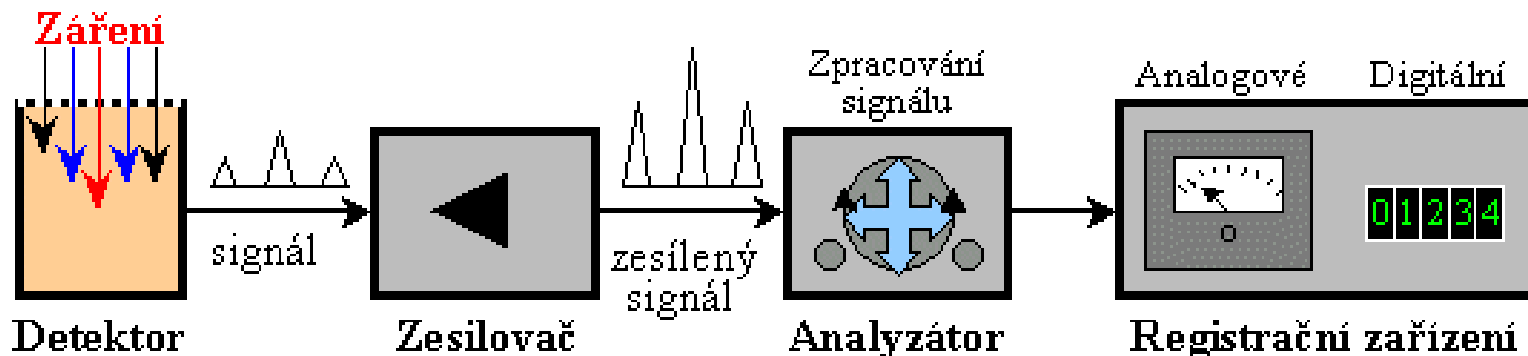
- radionuklid se zavede do těla pacienta (buďto intravenózně nebo požitím (perorálně).
  - v závislosti na chemických vlastnostech radionuklidu nebo nosiče (= látky na kterou je radionuklid pevně vázán) je zachytáván orgány, které na něj mají afinitu (např. štítná žláza a ledviny na radioiod  $^{131}\text{I}$ , který má poločas rozpadu 8 dnů,  $^{132}\text{I}$ , který má poločas rozpadu 2 až 3 hodiny).
- druh použité radioaktivní látky volíme podle toho, co a jakým způsobem má být měřeno,
  - stupeň vychytávání podaného radionuklidu v cílovém orgánu a vylučování slouží jako kritérium pro hodnocení funkce příslušných orgánů.

# Stopovací diagnostika pomocí radionuklidů

- při měření na odebraných vzorcích se vzorky obvykle umístí do zkumavky a vloží do detektoru záření.
- při měření přímo na organismu je detektor umístěn vně těla pacienta a snímá záření proniklé z určité malé oblasti těla.
  - poločas rozpadu radionuklidu - krátký. (poločas rozpadu je čas potřebný k tomu aby se počet radioaktivních částic snížil na polovinu)
  - zdroj g záření - dostačující pronikavost
  - pro tyto účely se používají radioizotopy (uměle připravené radionuklidy), které se v přírodě za normálních okolností nevyskytují.

# Detekce ionizujícího záření

- ionizující záření je neviditelné
- detekce pomocí příslušných fyzikálních metod a vhodné přístrojové techniky.
- detekci ionizujícího záření
- měření jeho energie - spektrometrii.



# Detekce ionizujícího záření

podle časového průběhu detekce rozeznáváme dvě základní skupiny detektorů:

- **kontinuální** "on-line" detektory, poskytující průběžnou informaci o okamžité intenzitě záření či počtu kvant ionizujícího záření.
  - (**pulzní režim** – zpracování každé interakce zvlášť
  - odezva (signál, výsledek měření) takového detektoru by měla být úměrná okamžité intenzitě záření.
  - přestane-li být detektor ozařován, signál na jeho výstupu poklesne na nulu či na hodnotu pozadí.
- **kumulativní** (integrální) detektory, které postupně shromažďují svou rostoucí odezvu během expozice.
  - interakce jsou detekovány dohromady
  - odezva (signál, výsledek měření) zůstává v detektoru uchována i po skončení expozice a může se vyhodnotit dodatečně.

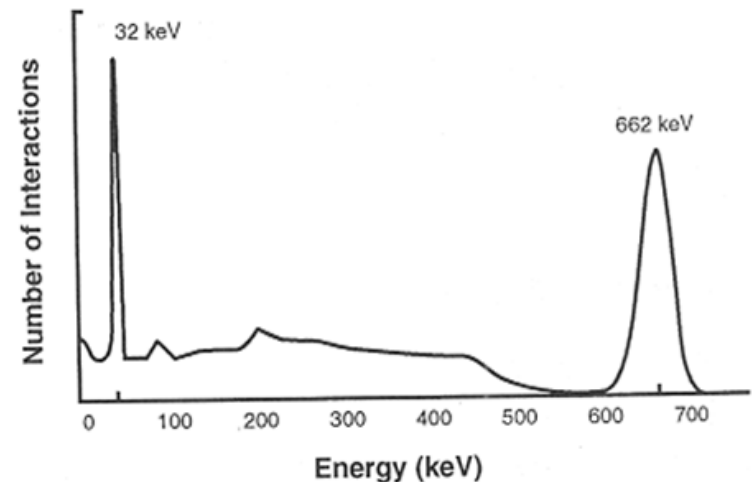
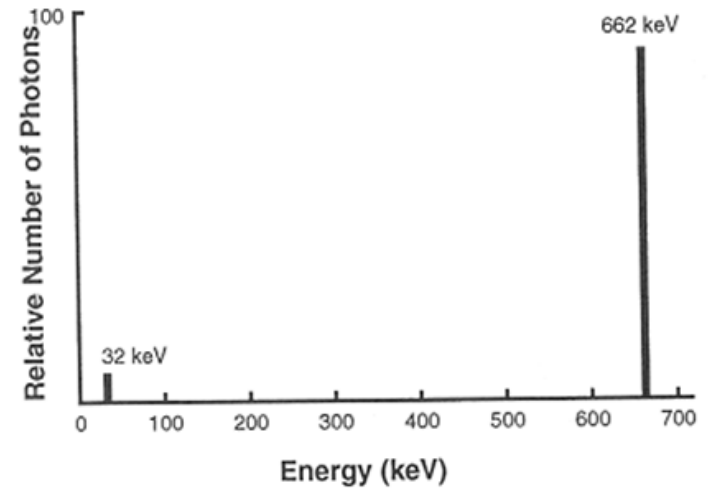
# Detekce ionizujícího záření

podle **komplexnosti** měřené informace můžeme měřící přístroje ionizujícího záření rozdělit na:

- detektory záření, udávající **pouze intenzitu** záření, resp. počet kvant záření, bez informace o druhu záření a jeho energii. Sem patří např. filmové a termoluminiscenční dozimetry, ionizační komory včetně G.-M. detektorů.
- **spektrometry ionizujícího záření**, které měří nejen intenzitu či počet kvant záření, ale i energii kvant záření a příp. jeho další charakteristiky. Do této skupiny patří především scintilační detektory, polovodičové detektory, magnetické spektrometry. - dále ->

# Spektrometry

- většinou detektory pracující v pulzním režimu
- výška každého impulsu je úměrná energii detekované částici nebo fotonu
- energie interakce není vždy rovna celkové energii dopadající částice nebo fotonu
- spektrum impulsů je obvykle zobrazeno jako graf počtu interakcí zaznamenaného pro určité množství energie ve spektrometru jako funkce energie.



# Detekce ionizujícího záření

podle **principu detekce** rozeznáváme tři skupiny:

- **fotografické**, založené na fotochemických účincích záření (filmové dozimetry, rtg filmy, jaderné emulze), nebo využívající fotografické zobrazení stop částic v určitém látkovém prostředí (mlžné a bublinové komory).
- **elektronické**, v nichž se část absorbované energie ionizačního záření převádí na elektrické proudy či impulsy, které se zesilují a vyhodnocují v elektronických aparaturách,
  - ionizační komory (včetně proporcionálních a G.-M. detektorů), scintilační detektory, polovodičové detektory, magnetické spektrometry, ....
- **materiálové**, využívající dlouhodobější změny vlastností určitých látek (barva, složení) působením ionizujícího záření. Vzhledem k nízké citlivosti jsou použitelné pouze pro vysoké intenzity záření či dlouhodobou kumulativní detekci.

# Fotografická detekce ionizujícího záření

- ionizující záření → fotografický materiál obsahující halogenidy stříbra (jako je bromid stříbrný), dochází v místech s ionizací k fotochemické reakci (uvolňování stříbra ze sloučeniny) a vzniku latentního obrazu, který je při vyvolání zviditelněn pomocí hustoty zrníček koloidního stříbra.
- hustota zčernání fotografického materiálu je úměrná hustotě ionizace v daném místě, a tedy množství energie ionizujícího záření, která byla v tomto místě pohlcena,
  - intenzita záření - makroskopický pohled  
- dozimetrie, rtg diagnostika, defektoskopie,
  - vyhodnocení dráhy nabitých částic - mikroskopický pohled



# Fotografická detekce ionizujícího záření, filmové dozimetry

- políčko fotografického filmu, světlotěsně zabalené do černého papíru (od běžného fotografického filmu se liší tím, že má tlustší emulzi s vyšším obsahem bromidu stříbra),
- plastové pouzdro - opatřené několika malými obdélníčky měděných a olověných plíšků o různých tloušťkách, které slouží jako filtry pohlcující záření  $\gamma$  v závislosti na jeho energii.

