

# IZMB – fotonové záření

## 4. přednáška



$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V \psi = E \psi$$

$$2 \tan \theta_B = \frac{m_2}{m_1} = m_{21}$$

$$pV = nRT$$

$$\Psi = \iint \vec{D} d\vec{S} = AD$$

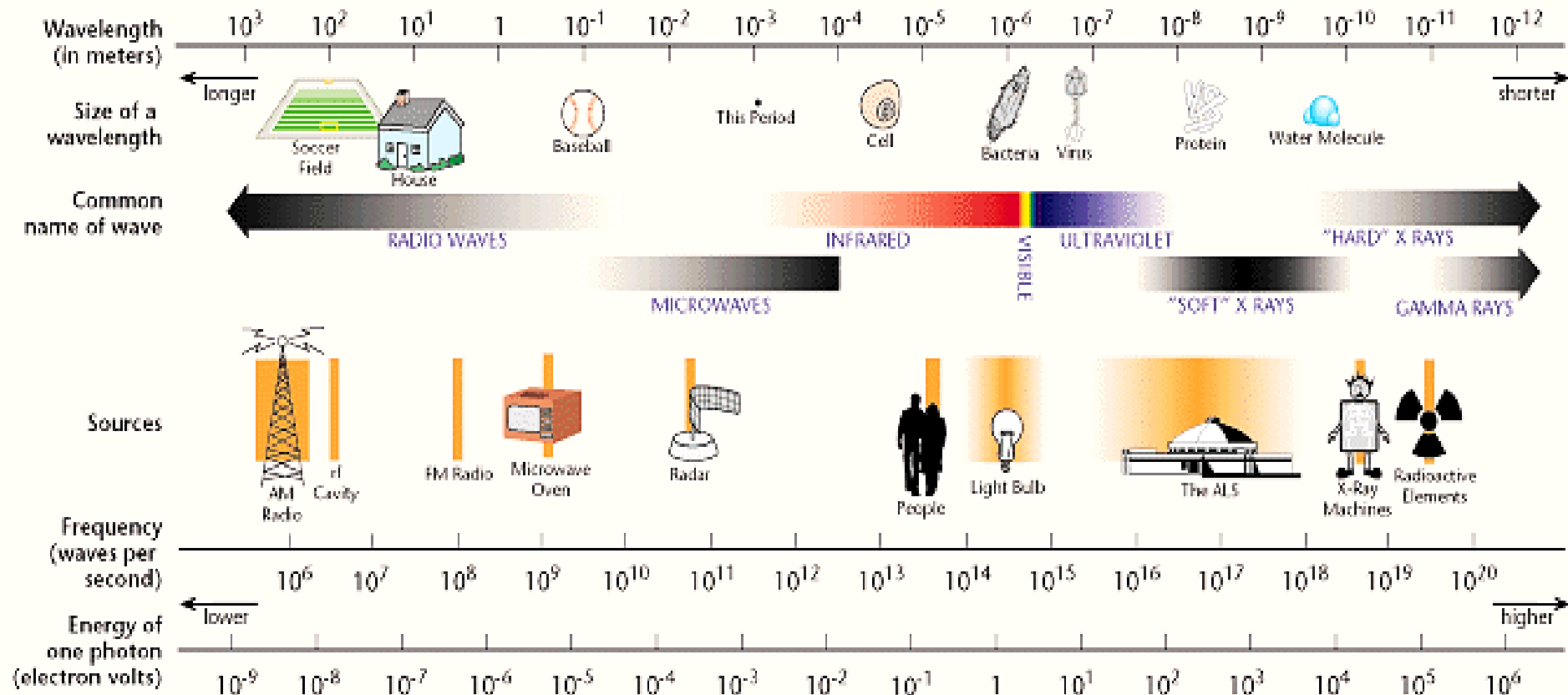
$$H_\lambda = \frac{\Delta M_e}{\Delta \lambda}$$

$$C \frac{\Delta \varphi}{2\pi} = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{x_2 - x_1}{\lambda} S_2$$

$$V = c/\lambda$$

$$\Phi = NBS$$

# THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



$$|E_0|_{\parallel} \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$S = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt}$$

$$\cos(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$R = R_0 \sqrt[3]{A}$$

$$\int \vec{E} d\vec{\ell} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

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

$$u = U_m \sin \omega(t - \tau) = U_m \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

# RTG

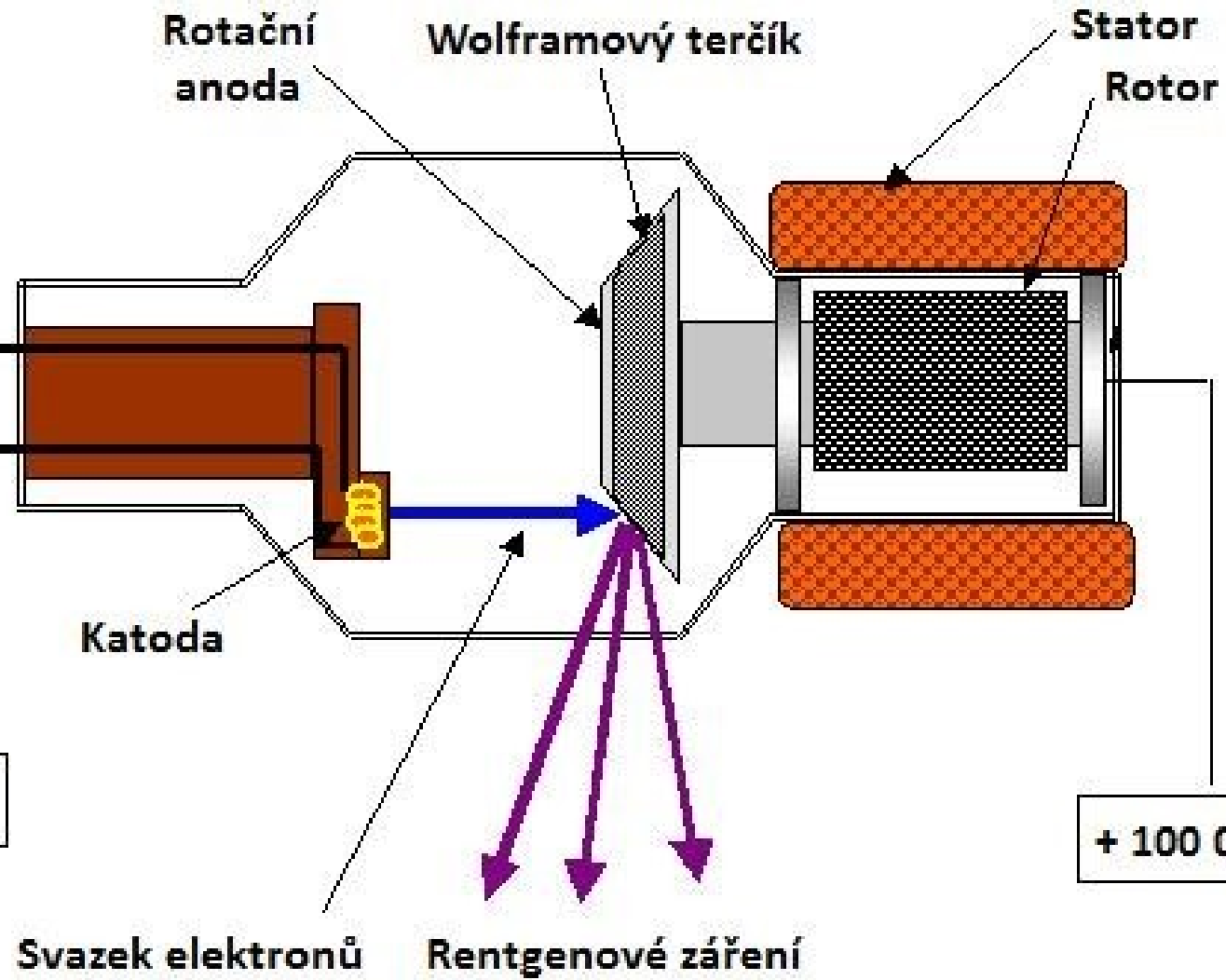
- RTG je nepostradatelné v dnešní medicíně.
- Jak ovšem vzniká?
- Jak je detekujeme?
- Jak interaguje s látkou?
- Jaké veličiny jsou s ionizujícím zářením spjaté?
- O všem bude řeč...

# RTG

- Ze zákona elektromagnetické indukce vyplývá, že při pohybu el. náboje se indukuje magnetické pole.
- Pokud je náboj prudce zpomalen, přebytečná energie se přemění v elektromagnetické záření.
- Intenzita a energetické spektrum záření je obvykle značně široké, ale má své fyzikální limity.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi = E\psi$$

# Rentgenka

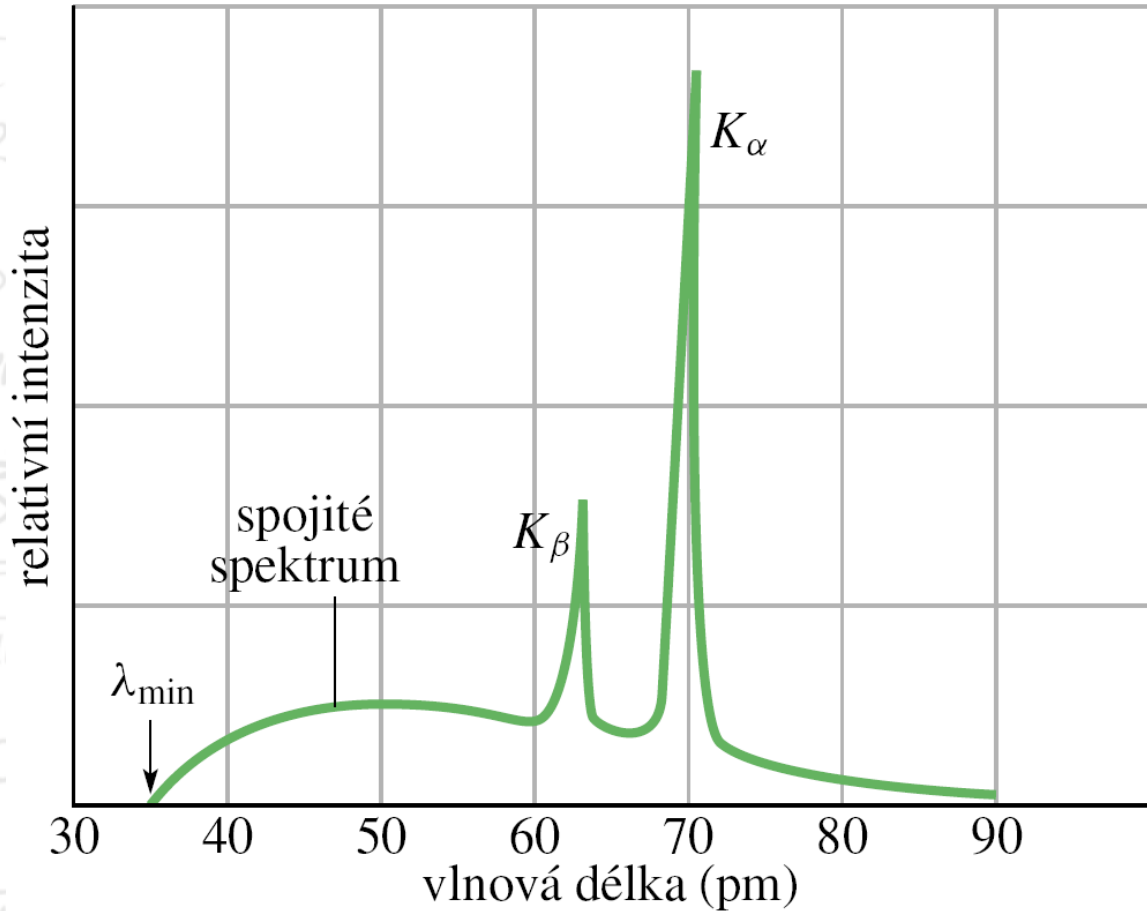


$$S = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt}$$

$$u = U_m \sin \omega(t - \tau) = U_m \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

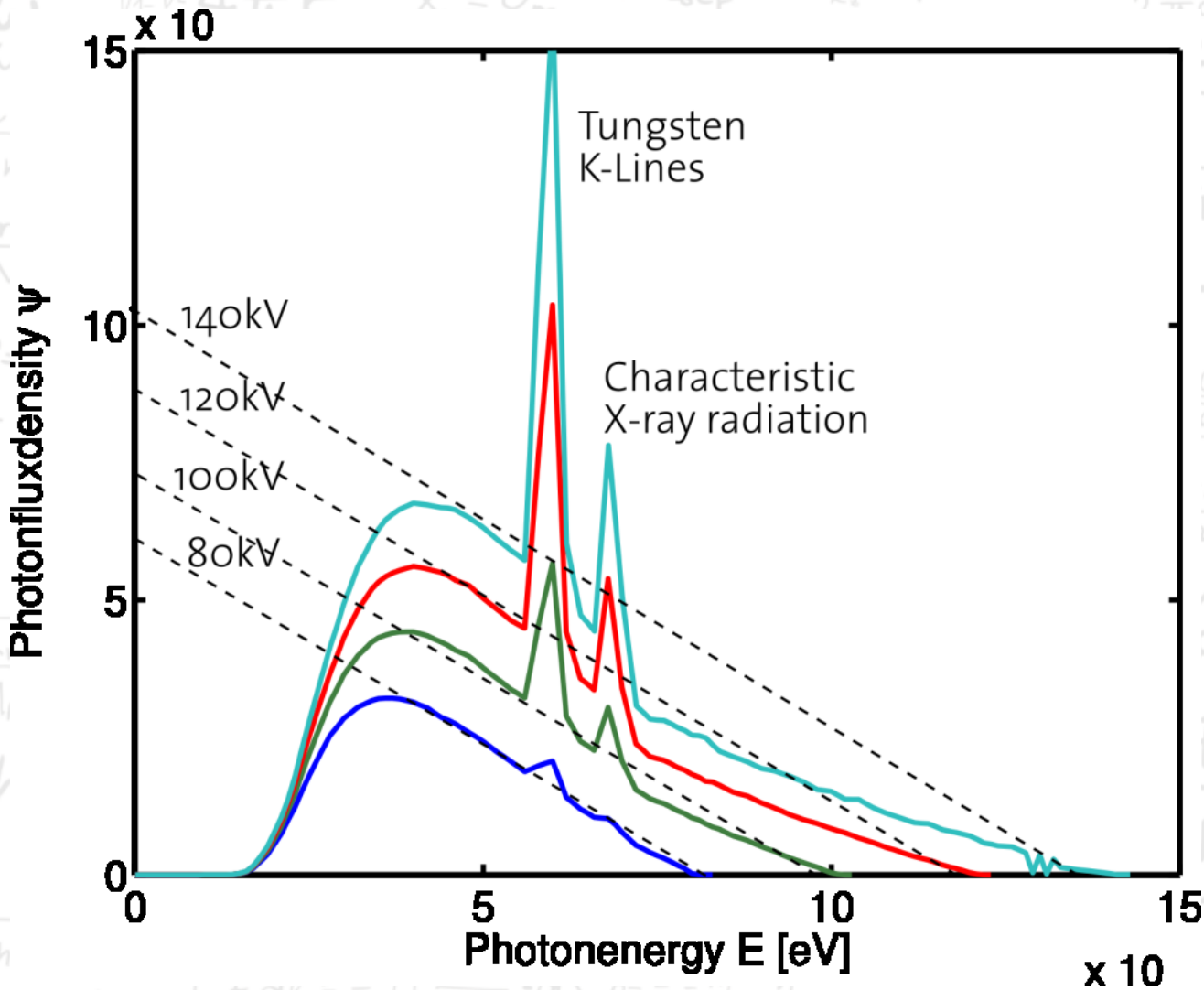


# Rentgenka



Závislost intenzity rtg záření na vlnové délce při dopadu elektronů s kinetickou energií  $E_{k,0} = 35$  keV na **molybdenový** terč (urychlovací napětí 35 kV). Na x ose vlnová délka (lambda min = energie max)

# RTG



Na ose x je tentokrát energie fotonů! Tungsten = wolfram

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi = E\psi$$

$$U_{ef} = U_n$$

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{NI\sqrt{2}}{r}$$

$$k = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda^2}$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$v = \frac{\sqrt{2e}}{m}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$C(s)$$

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

$$\left(\frac{E_\tau}{E_0}\right)_\parallel = \frac{2\cos\theta}{1 + \cos\theta}$$

$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

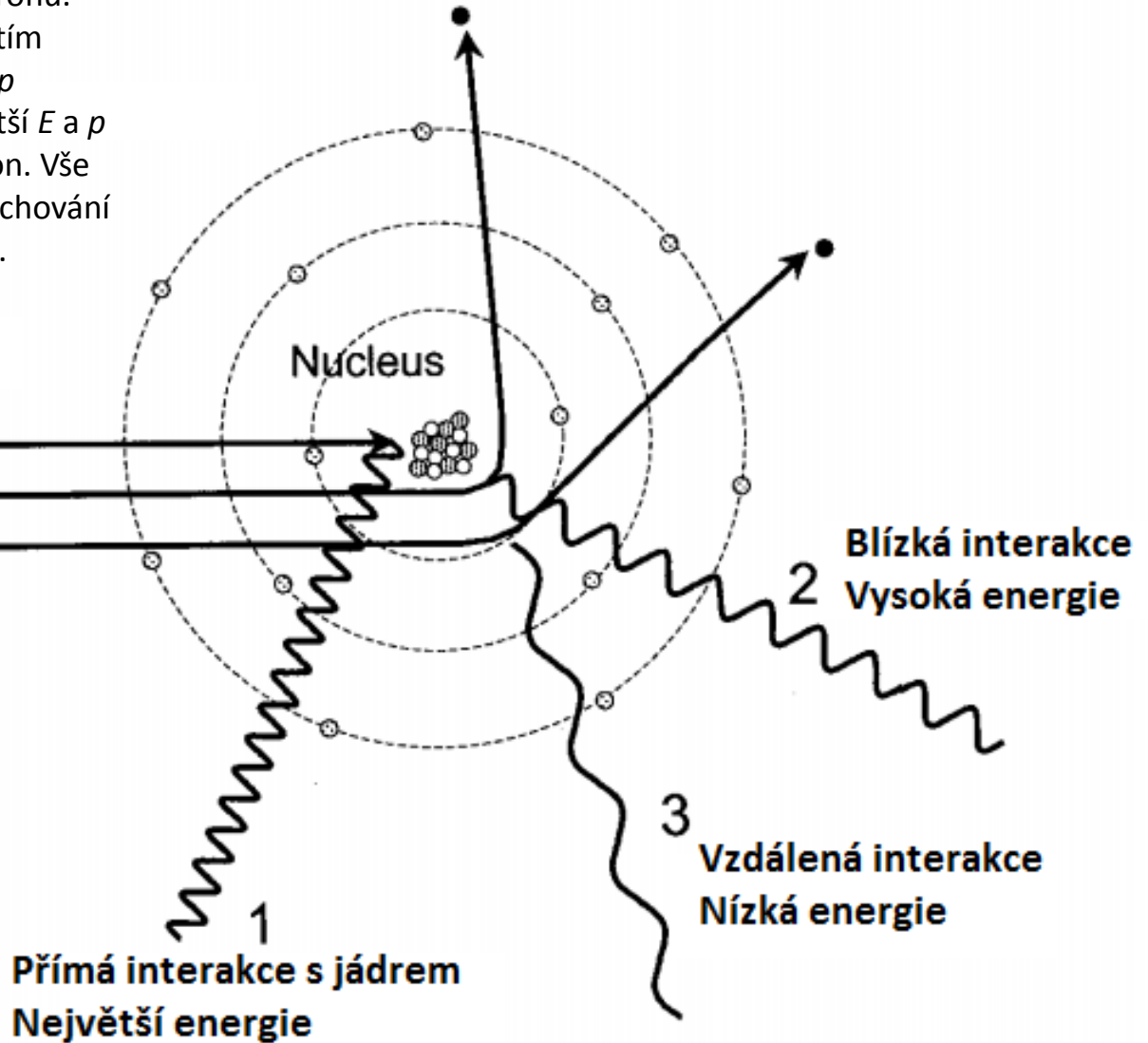
$$S = \frac{1}{A} \frac{dE}{dt}$$

Brzdné záření má spojité spektrum. Je to dáno různými směry dopadů, při kterých dochází k různým ohybům drah dopadajících elektronů. Čím větší je ohyb, tím větší je změna  $E$  a  $p$  elektronu a tím větší  $E$  a  $p$  má emitovaný foton. Vše plyne ze zákonů zachování energie a hybnosti.

# Brzdné RTG

**Dopadající elektrony**

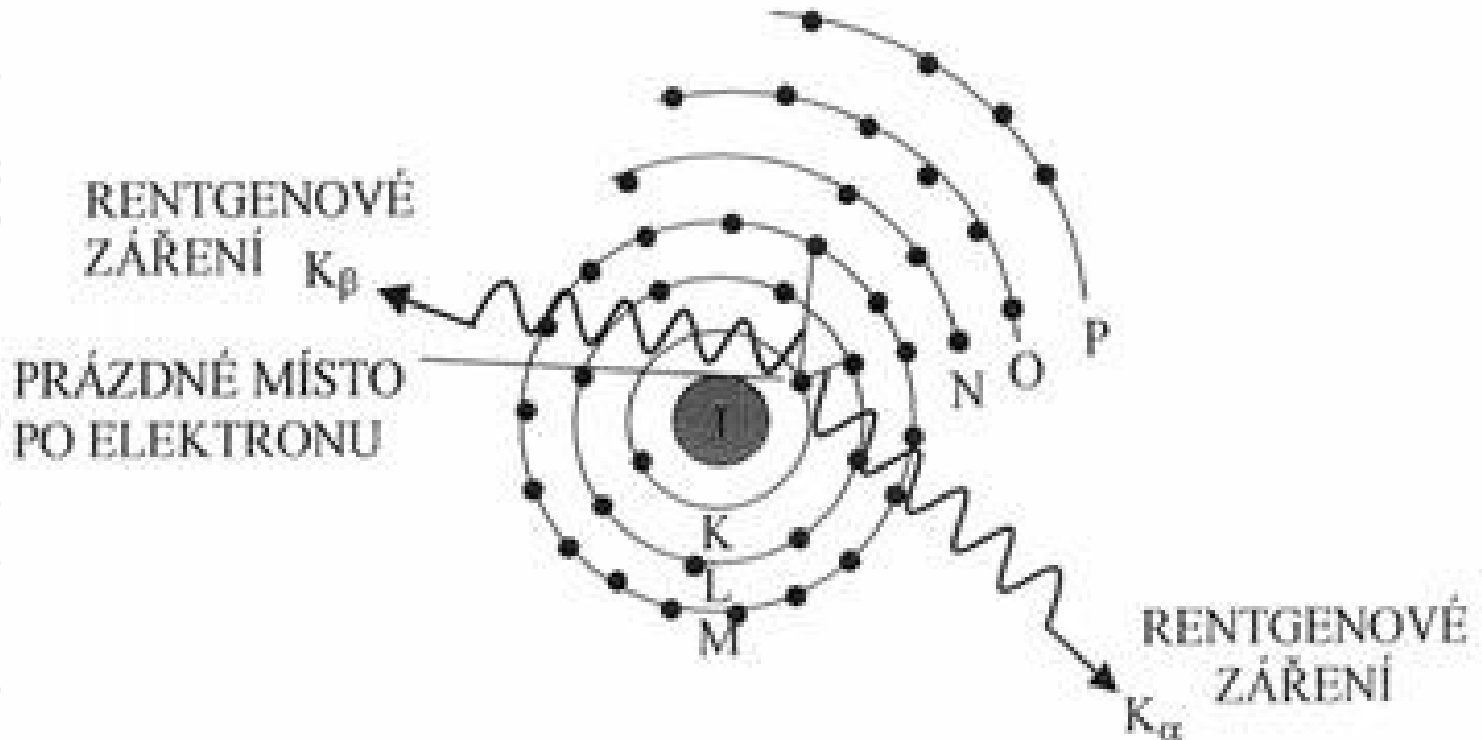
- 1 ●
- 2 ●
- 3 ●





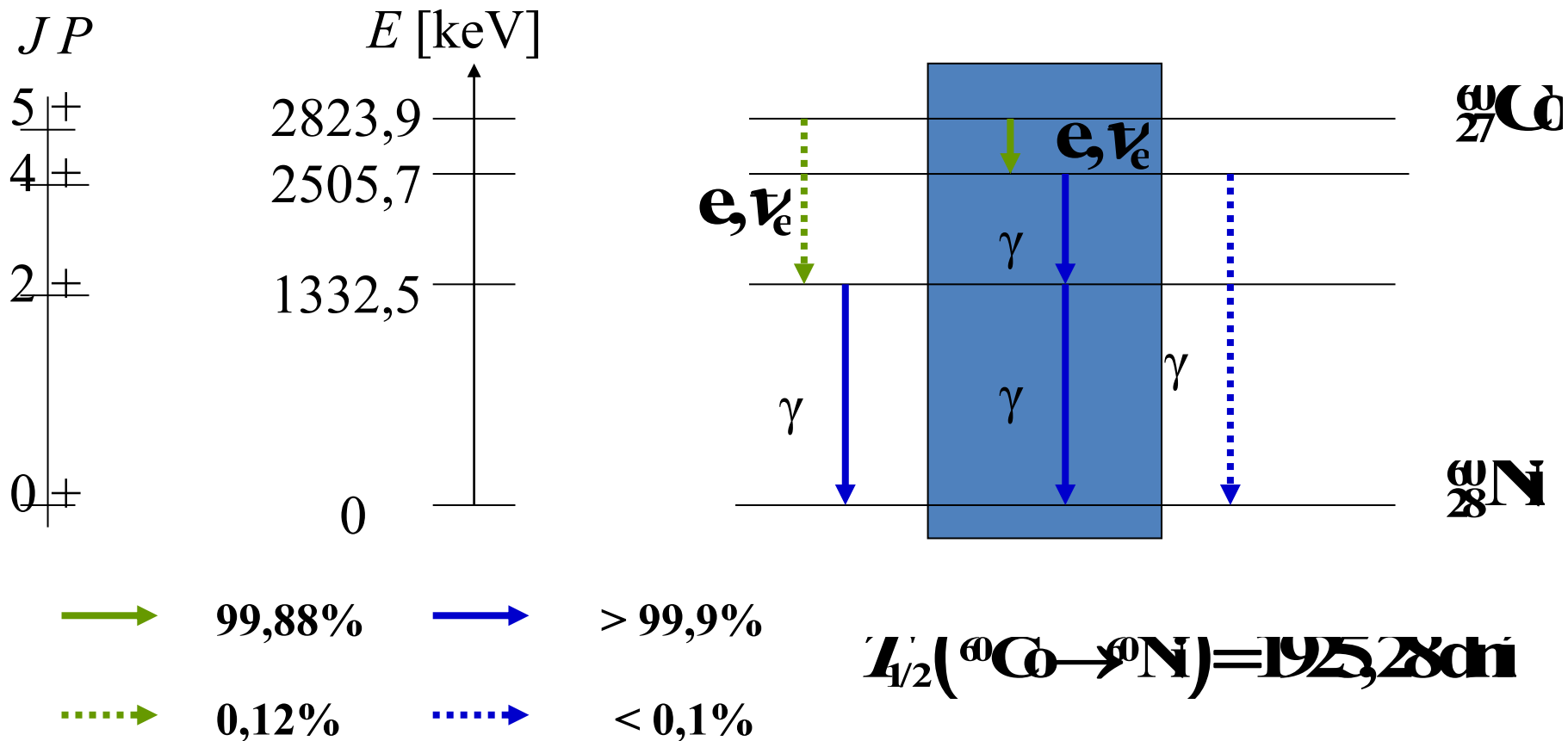
# Charakteristické RTG

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi = E\psi$$
$$U_{ef} = U_m$$
$$\vec{B} = \mu_0 \frac{NI\sqrt{2}}{r}$$
$$k = \frac{p^2}{2m} = \frac{M_p}{\lambda}$$
$$\lambda = \frac{h}{p}$$
$$v = \sqrt{2eU_m}$$
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s}$$
$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kTN}{M_m}}$$
$$\lambda = \frac{h\nu_2}{T} F_h$$
$$\left(\frac{E_t}{E_0}\right)_{\parallel} = \frac{2\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)}$$
$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$$
$$S = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt}$$



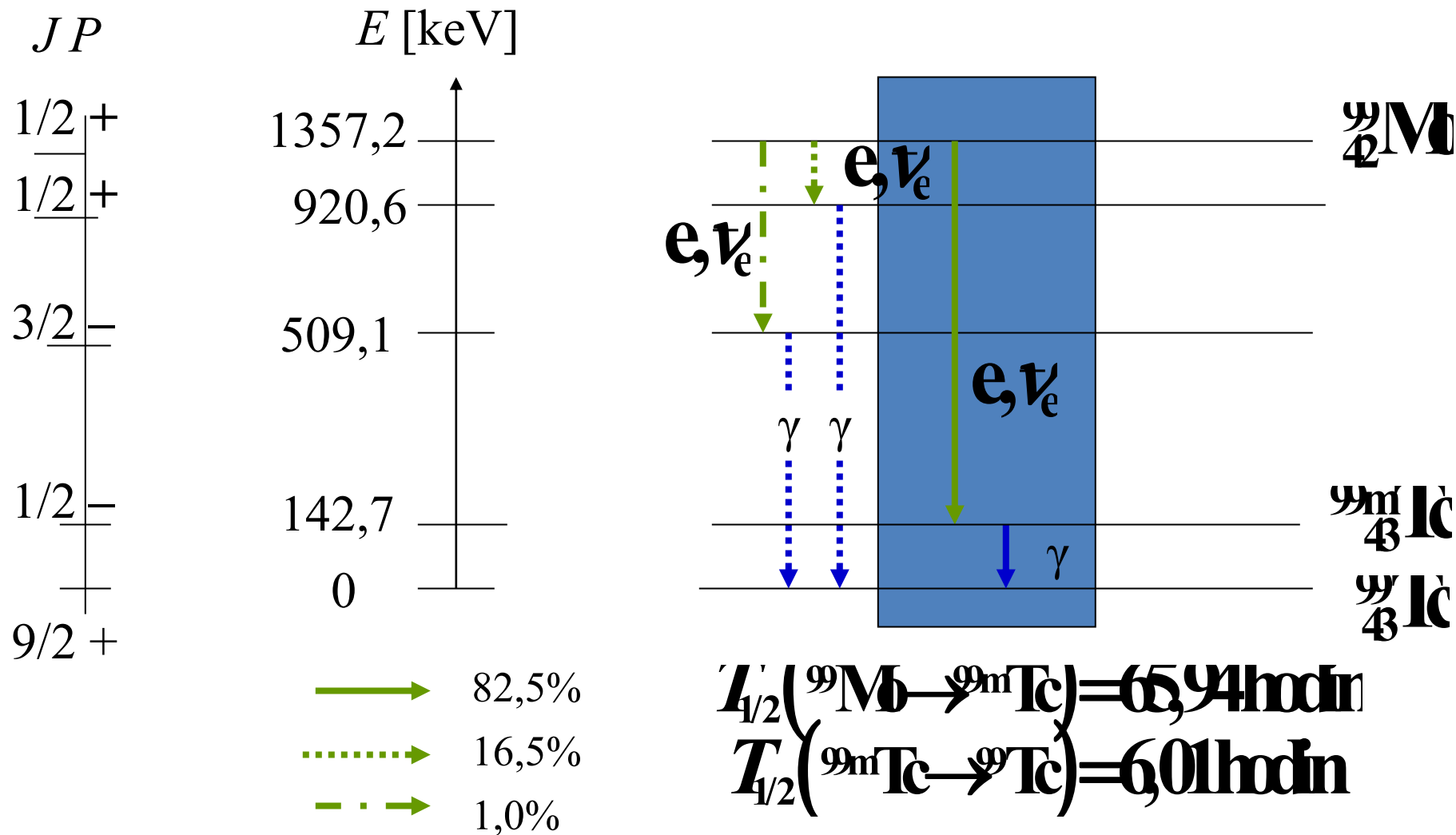
Charakteristické záření nemá spojité spektrum, protože vzniká jinak než brzdné záření. Char. RTG vzniká při deexcitaci elektronů u těžších atomů ve vrstvách blízkých jádru ( $n=1-3$ ), kdy se emituje foton o energiích RTG. Pro přeskoky mezi danými dvěma hladinami el. obalu je energie u daného prvku vždy stejná a proto i frekvence vyzářeného fotonu je stejná a výsledné spektrum je diskrétní.

# Vznik $\gamma$ záření (Co)

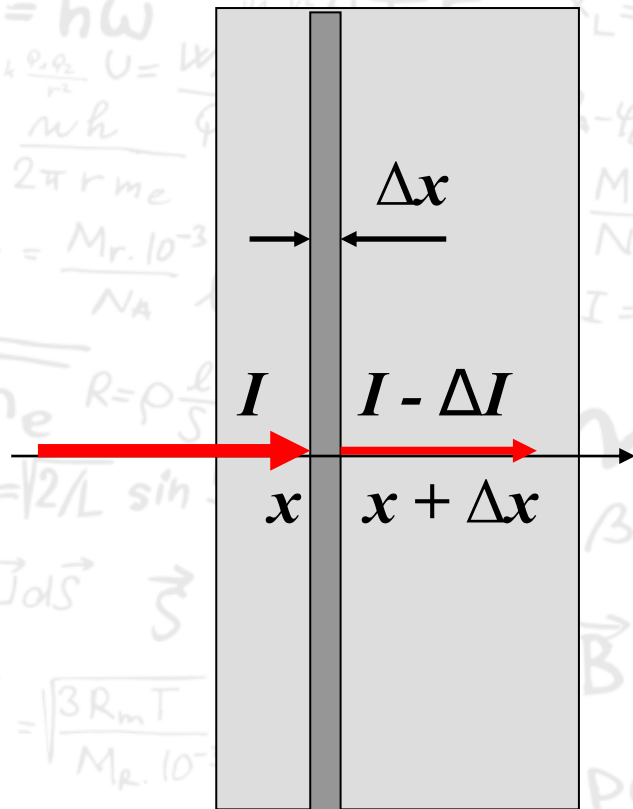


Protože jsou protony a neutrony fermiony, mohou se nacházet pouze na přesně daných energetických hladinách (podobně jako elektrony - viz Pauliho vylučovací princip), proto i energie celého jádra může nabývat pouze daných hladin. Při štěpení se energie jádra zmenšuje a přebytek energie je buď předáván nově vznikajícím částicím a nebo je vyzářen formou fotonů. Zde Co přechází beta-rozpadem na excitovaný Ni (existují 2 různé cesty), který posléze deexcituje (jeho jádro deexcituje) a vyzáří se fotony.

# Vznik $\gamma$ záření (Tc)



# Útlum záření



$$\frac{dI(x)}{dx} = -\mu I(x)$$

$$I(x) = I(0)e^{-\mu x}$$

$$I(d_{1/2}) = \frac{1}{2} I(0)$$

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\mu_a = \frac{m_{mol} \mu}{N_A \rho}$$

$D_{1/2}$  je polotloušťka a  $\mu$  je lineární koeficient útlumu. Zavádí se hmotnostní koeficient útlumu, který je nezávislý na hustotě látky a atomový koeficient útlumu, který je nezávislý jak na hustotě tak i na látkovém množství.

# Útlum záření

- Foton předává energii částicím látky.
- Energie částic je buď absorbována nebo opětovně vyzářena (rozptýlena).
- Zavádí se koeficient útlumu a koeficient absorpce.

$$\mu_{tr} = \frac{\langle E_{tr} \rangle}{\hbar\omega} \mu \qquad \mu_{ab} = \frac{\langle E_{ab} \rangle}{\hbar\omega} \mu$$

Pokud lineární koeficient **útlumu** vynásobíme poměrem střední hodnoty absorbované energie a energie původního záření ( $\hbar\omega$ ) dostáváme koeficient **absorpce**. ( $\hbar = h/2\pi$ )

Koeficienty popisují jak moc je záření utlumeno/absorbováno.



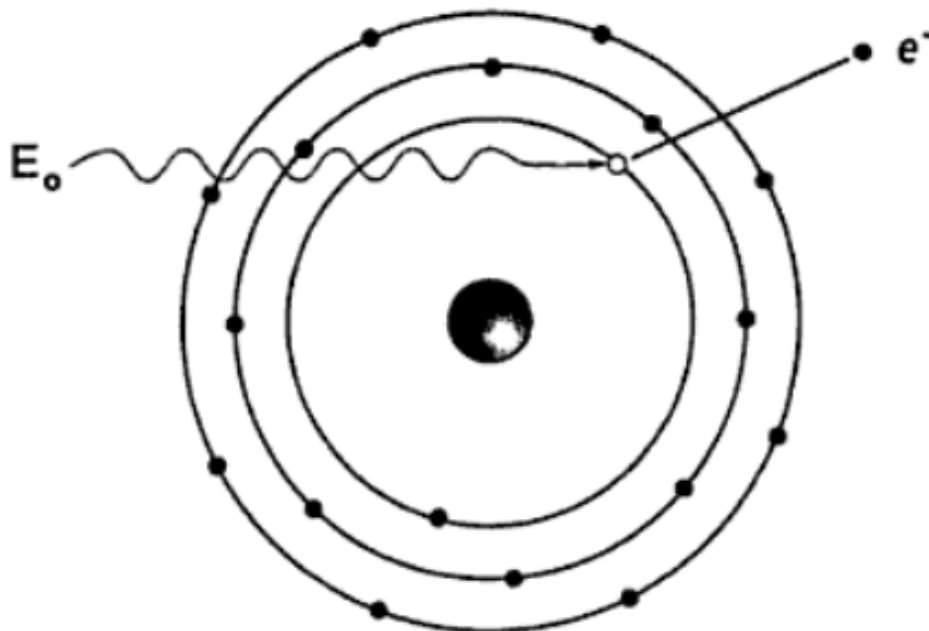
# Interakce fotonů

- Fotoelektrický jev
  - Lin. Koeficient útlumu -  $\tau$
- Rayleighův rozptyl
  - Lin. Koeficient útlumu -  $\sigma_R$
- Comptonův jev
  - Lin. Koeficient útlumu -  $\sigma_C$
- Tvorba elektron-pozitronový pár
  - Lin. Koeficient útlumu -  $\kappa$

Každý z těchto jevů má svůj vlastní lineární koeficient útlumu, který se podílí na celkovém útlumu záření!!!

# Fotoelektrický jev

- Energie fotonu je absorbována elektronem a následně je využita k jeho ionizaci.
- Energie musí být dostatečná k ionizaci.



# Fotoelektrický jev

## ➤ Vnitřní:

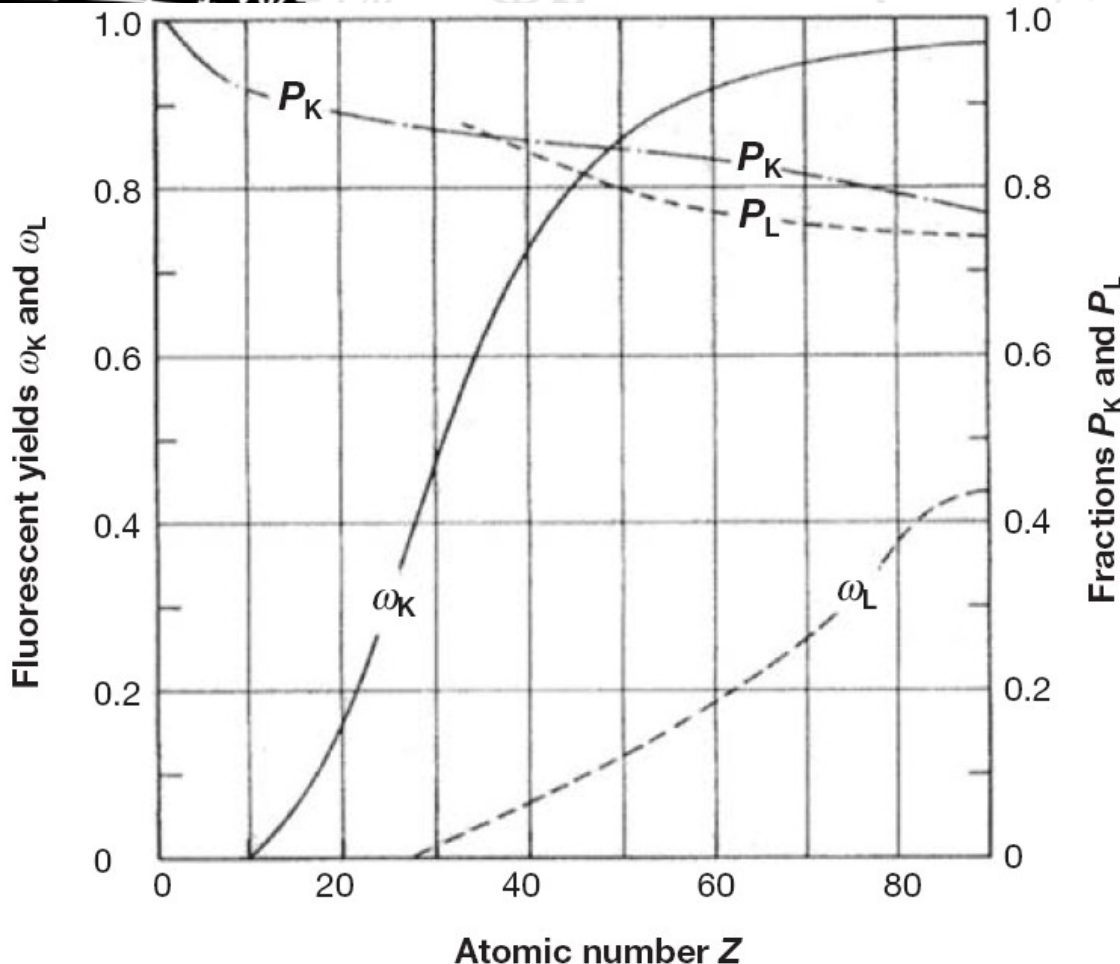
- Elektron je vytržen z elektronového obalu.
- Neopouští ovšem látku, ale není vázán na konkrétní atom.
- Stává se z něj vodivostní elektron a podílí se na lepším vedení elektrického proudu látkou, např. polovodiče.

## ➤ Vnější:

- Elektron je vytržen z el. obalu.
- Opouští látku a je zcela volným.
- Vzniklou „díru“ může zaplnit elektron z vyšší vrstvy a vyzářit foton.
- Vyzářený foton může okamžitě způsobit vnější fotoelektrický jev a vyrazit další (tzv. Augerův) elektron.



# Fotoelektrický jev



Fluorescenční výtěžek  $\omega_{K(L)}$  udává podíl pravděpodobností emise fotonu a Augerova elektronu při zaplnění dané volné hladiny (K nebo L).

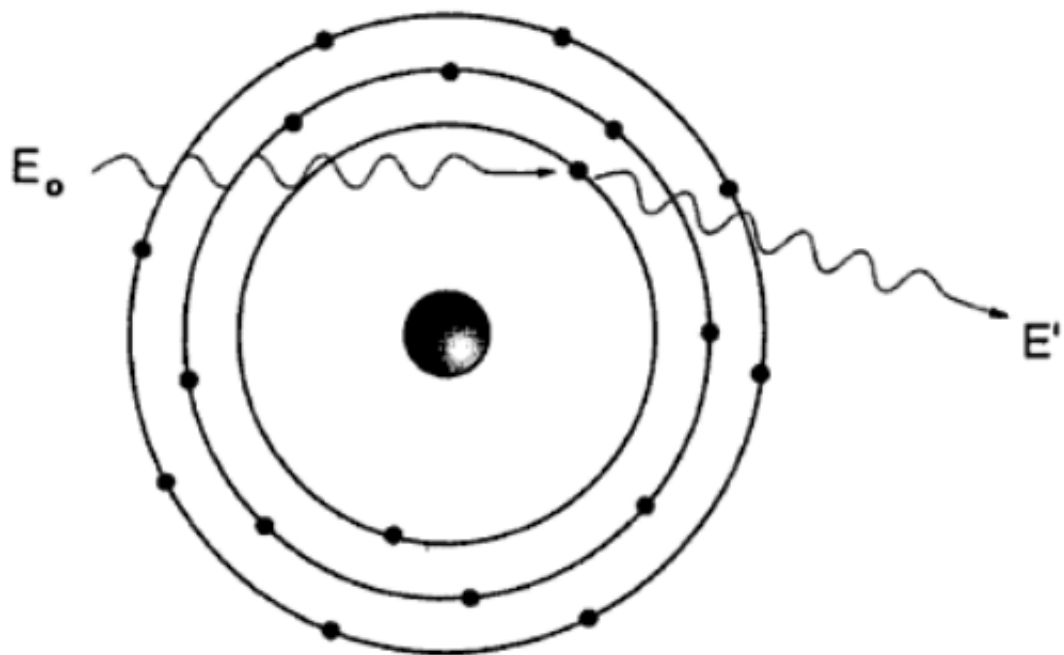
Je patrné, že Augerovy elektrony mají větší pravděpodobnost emise u lehčích atomů. U těžších převažuje fotoemise (pro vrstvu K velmi výrazně). Pro hladinu L je poměr výrazně nižší, takže při absorpci fotonu elektronem z hladiny L je větší pravděpodobnost emise Augerova elektronu než při absorpci na K hladině i pro těžší atomy.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

$$\left(\frac{E_t}{E_0}\right)_{\parallel} = \frac{2 \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2}{\cos(\vartheta_1 + \vartheta_2)}$$
$$E_y = E_0 \sin(k_x x - \omega t)$$
$$S = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt}$$

# Rayleighův rozptyl

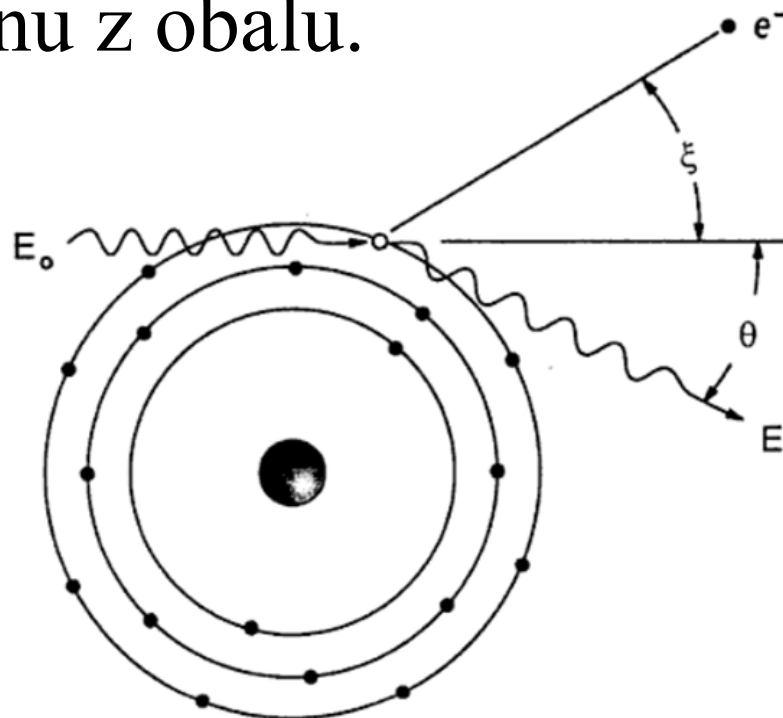
- Foton interaguje s elektronem z obalu.
- Dojde pouze k rozptylu fotonu, což nemá za následek ztrátu jeho energie.





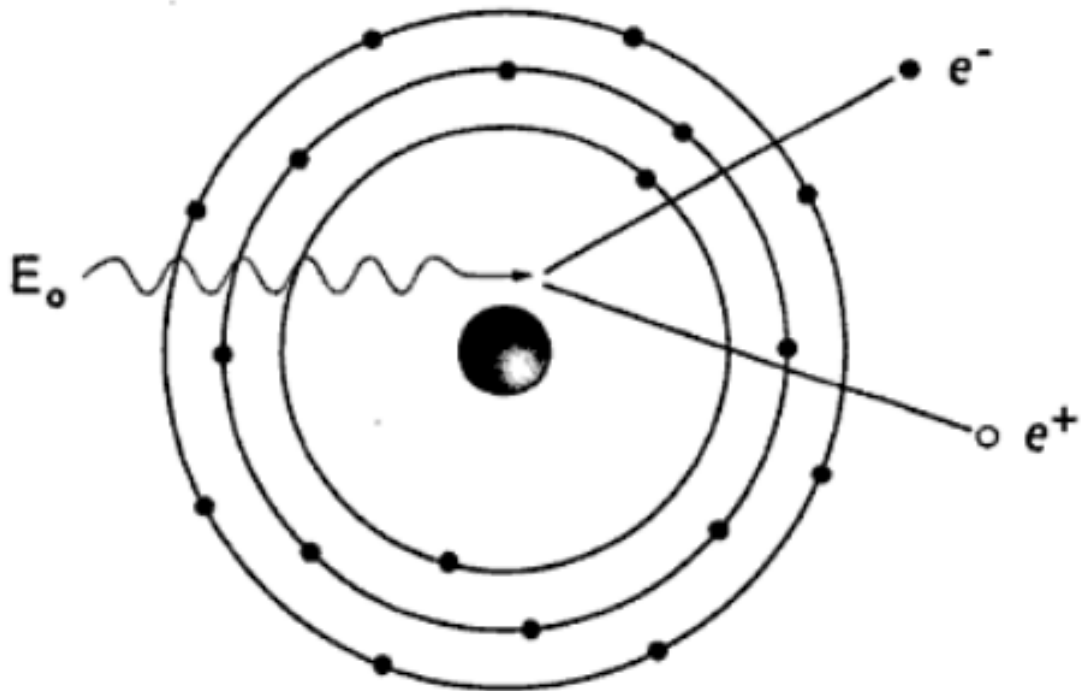
# Comptonův rozptyl

- Foton interaguje s elektronem z vyšší vrstvy obalu.
- Dojde k rozptylu fotonu i vyražení elektronu z obalu.



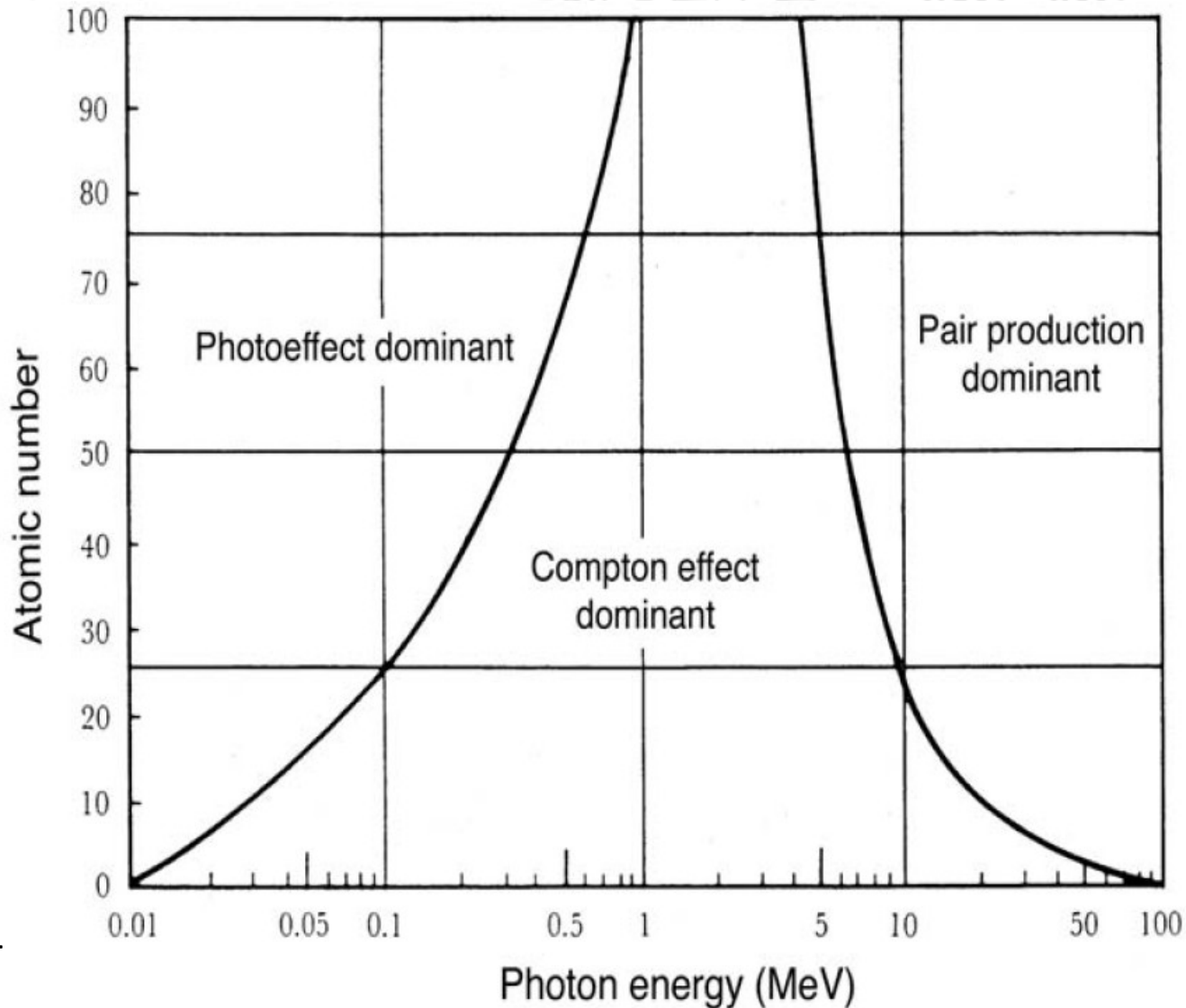
# $e^- - e^+$ pár

- V blízkosti těžkého jádra se může foton přeměnit na elektron a pozitron.
- Důkaz, že hmota a energie jedno jest.



# Dominance

Graf je rozdělen na 3 oblasti podle dominance daného jevu. Tato dominance je ovlivněna energií dopadajícího fotonu a atomovým číslem atomu na který foton dopadá.



# Lin. Koef. útlumu

- Na celkovém lineárním koeficientu útlumu záření se podílejí všechny čtyři interakce.

$$\mu = \tau + \sigma_R + \sigma_C + \kappa$$

- Zavádí se také lineární koeficient absorpce.

$$\mu_{ab} = \tau_{ab} + (\sigma_C)_{ab} + \kappa_{ab}$$

- U Rayleighova rozptylu nedochází k absorpci energie (je to rozptyl).



# Ionizující záření

- Je tok částic, které mohou ionizovat atomy či excitovat jádra.
- Rozlišujeme dva typy:
  - Přímě ionizující záření.
  - Nepřímě ionizující záření.



# Přímo ionizující z.

- Je tvořeno elektricky nabitými částicemi ( $\alpha, \beta^+, \beta^-$ -záření, protony...).
- Mohu mít dostatečnou energii k ionizaci atomů.
- Při průchodu absorbuji prostředím dochází k ionizačním ztrátám (záření předává energii okolním částicím), čímž dochází k narušení rovnováhy.

# Přímo ionizující z.

- Čím větší hmotnost nebo náboj tím větší je ionizační ztráta.
- Větší ionizační ztráta znamená předání víc energie na malé dráze letu.
- Tudíž záření má malou pronikavost, ale na malé ploše dochází k velkému počtu ionizací.
- Tento stav popisuje veličina lineární přenos energie (L).

# Přímo ionizující z.

- Lineární přenos energie (LET) je pro nabitě částice definován vztahem:

$$L = \left( \frac{dE}{dl} \right)$$

- $dE$  vyjadřuje ztrátu energie a  $dl$  na jaké dráze k této ztrátě došlo.
- Jak už bylo řečeno, těžké a nabitě částice mají  $L$  větší.
- Hustě ionizující záření (velké  $L$ ).
- Řídce ionizující záření (malé  $L$ ).

# Nepřímio ionizující z.

- Je tvořeno elektricky neutrálními částicemi jako jsou fotony a neutrony.
- Jejich průchod látkou téměř neionizuje prostředí.
- Ovšem po interakci s látkou se mohou uvolnit sekundární, přímo ionizující částice, které již mohou prostředí ionizovat (pokud mají dostatečnou energii).



# Veličiny

- Z logiky věci se dělí na čtyři skupiny.
  - Popisující zdroj ionizujícího záření.
  - Popisující ionizující záření v prostoru.
  - Popisující interakci s hmotou.
  - Popisující interakci s živou hmotou.

# Veličiny

- U radionuklidů se používá aktivita:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

- Jednotka becquerel ( $\text{Bq} = \text{s}^{-1}$ ).

- Odvozené:

➤ Hmotnostní aktivita  $a_m$  ( $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

➤ Objemová aktivita  $a_V$  ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ )

➤ Plošná aktivita  $a_S$  ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ )

# Veličiny

- Přeměnová konst. (u radionuklidů):

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad [\lambda] = s^{-1}$$

- Emise zdroje (u umělých zdrojů):

$$N_z = \frac{dN_z}{dt} \quad [N_z] = s^{-1}$$

➤ Počet emitovaných částic za 1 s.

# Veličiny

- Ionizující záření v prostoru se dá charakterizovat více veličinami:

- Fluence částic  $\Phi = \frac{dN}{da}$  [ $\text{m}^{-2}$ ]

- Příkon fluence částic  $\varphi = \frac{d\Phi}{dt}$  [ $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

- Fluence energie  $\Psi = \frac{dR}{da}$  [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

- Příkon fluence energie  $\psi = \frac{d\Phi}{dt}$  [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Fluence částic udává podíl počtu částic  $dN$ , které dopadly na plochu  $da$ .

Příkon fluence částic již uvažuje i časovou složku a dá se mluvit o „rychlosti fluence částic“

Zbylé dvě veličiny jsou obdobné, jen se nezabývají počtem částic, ale celkovou energií  $dR$ , která dopadla na plochu  $da$ .



# Veličiny

- Pravděpodobnost interakce ionizujícího záření je charakterizována účinným průřezem  $\sigma$ .
- Pokud již k interakci dojde, tak nás zajímá, kolik energie látka absorbuje, což můžeme popsat veličinami dávka (D) a kerma (K).

# Veličiny

- Dávka nám udává střední energii nabitých částic absorbovaných v látce:

$$D = \frac{d\langle E \rangle}{dm} \quad [J \cdot kg^{-1}] = [Gy]$$

- Kerma nám popisuje součet kinetických energií nabitých částic, které vznikly nepřímo ionizujícím zářením (fotony, neutrony):

$$K = \frac{dE_{se}}{dm} \quad [Gy]$$

# Veličiny

- Okamžitou situaci vystihují kermová případně dávková rychlost:

$$v_D = \frac{dD}{dt} \quad v_K = \frac{dK}{dt} \quad [Gy \cdot s^{-1}]$$

- Připomeňme lineární přenos energie (L), který představuje energii, kterou při zpomalování nabitě částice látka absorbuje.

# Veličiny

- Při interakci ionizujícího záření s živou hmotou závisí nejen na dávce, ale také na druhu záření a na tkáni, kterou ionizující záření prochází.
- Existuje několik veličin.
- Dávkový ekvivalent vyjadřuje biologický účinek záření na člověka, které je charakterizováno veličinou L (lineární přenos energie).
- Atd..... příště podrobněji



Konec

WOO  
HOO!

