



Röntgensugárzás és kölcsönhatása az anyaggal

Bozó Tamás
SE Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet
bozo.tamas@med.semmelweis-univ.hu

Áttekintés

Témakörök:

- Mi a röntgensugárzás?
- Rtg. sugárzás előállítása
- Fékezési és karakterisztikus rtg. sugárzás
- Rtg. sugárzás és az anyag kölcsönhatása
- Diagnosztikai alapok
- Részecskegyorsítók

Tankönyvi részek: II/3.1.; II/3.2.6.

Kapcsolódó gyakorlatok: Röntgen, CT (második félévben)

Figyelmeztetés: A diasor csak illusztráció és vázlat!

Kollokviumi tételek:

21. Hogyan lehet röntgensugárzást előállítani? Hasonlítsa össze a fékezési és a karakterisztikus röntgensugárzást keletkezésük és spektrumuk alapján!

22. A röntgen és gamma sugárzás abszorpciója. Hogyan léphet kölcsönhatásba nagy fotonenergiájú sugárzás atomokkal, molekulákkal?

24. Részecskegyorsítók. Szerepük az ionizáló sugárzások keltésében és az orvostudományban.

Az X-sugarak felfedezése (1895)



Wilhelm Conrad Röntgen
1845-1923



Crookes cső



„Hand mit Ringen”
1895. dec. 22.

Mi a röntgensugárzás?

Elektromágneses hullám.

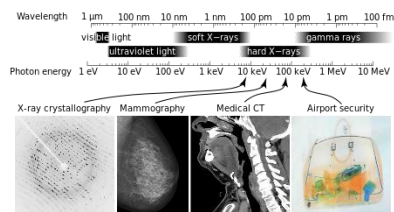
$f \approx 10^{15} - 10^{18}$ Hz (penta-exahertz)

$\lambda \approx 10 \text{ nm} - 0.01 \text{ nm}$

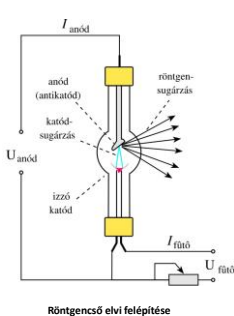
$\epsilon \approx 100 \text{ eV} - 100 \text{ keV}$ (– MeV)

diagnosztika: 200 keV-ig; terápia: kb. 10 MeV

$$\epsilon = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$



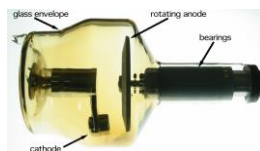
Röntgensugárzás előállítása



Röntgenső elvi felépítése

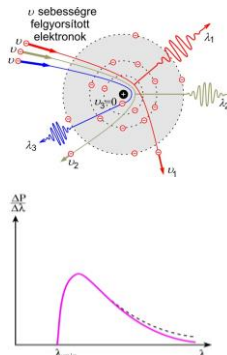


Röntgenső 1930-as évek



forgóanódos röntgenső

Bremsstrahlung: fékezési röntgensugárzás



$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{kin} &= e \cdot U_{anód} \\ \epsilon_{max} &= h \cdot \frac{c}{\lambda_{min}} \end{aligned} \right\}$$

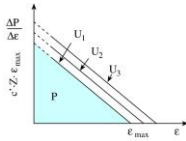
Duane-Hunt törvény:

$$\lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_{anód}}$$

$$\lambda_{min} = \frac{k}{U_{anód}}$$

$$(k = 1230 \text{ pm} \cdot \text{kV})$$

Bremsstrahlung: fékezési röntgensugárzás



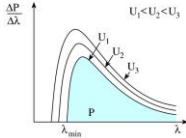
Teljesítmény:

$$P = C_{rtg} \cdot U_{anód}^2 \cdot Z \cdot I_{anód}$$

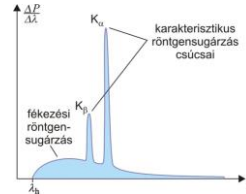
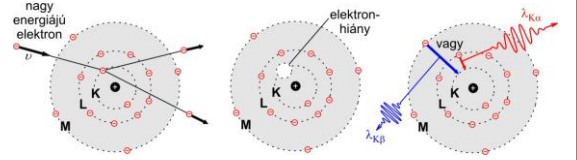
Hatásfok:

$$\eta = \frac{P_{kissugárazott}}{P_{befektetett}} = \frac{C_{rtg} \cdot U_{anód}^2 \cdot Z \cdot I_{anód}}{U_{anód} \cdot I_{anód}}$$

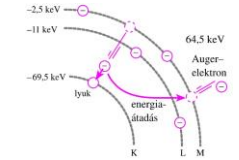
$$\eta = C_{rtg} \cdot U_{anód} \cdot Z$$



Karakterisztikus röntgensugárzás



Auger elektron keltés:

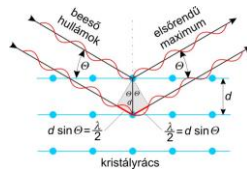


Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása I.

Röntgen diffrakció (Bragg diffrakció)



Max T.F. Laue William H. és William L. Bragg

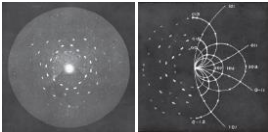


Bragg egyenlet:

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$$

Akalmazás:

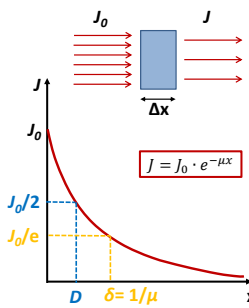
spektrumok felvétele
szerkeztvizsgálat (kristallográfia)



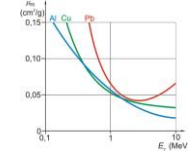
kristály röntgendiffrakciós képe, és L. Bragg számításai

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása II.

Abszorpció – általános törvényszerűségek



Erős rendszám- és energiafüggés:



Lineáris és tömeggyengítési együttható:

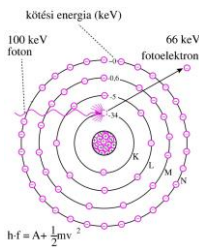
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad [cm^2 \cdot g^{-1}]$$

Mechanizmus atomi szinten:

- Fotóeffektus
- Compton szórás
- Párákció

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása II.

Fotóeffektus



Energiamérleg:

$$h \cdot f = A + \frac{1}{2}mv^2$$

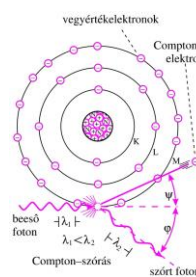
Tömeggyengítési együtthatója:

$$\tau_m = \frac{\tau}{\rho}$$

$$\tau_m = C \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$$

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása II.

Compton effektus



Energiamérleg:

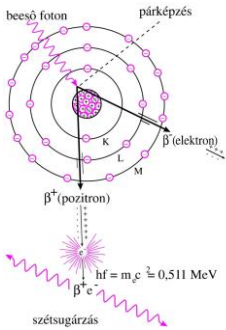
$$h \cdot f = A + \frac{1}{2}mv^2 + h \cdot f'$$

Tömeggyengítési együtthatója:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\rho}$$

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása II.

Párképződés



Energiamérleg:

$$h \cdot f = 2mc^2 + mv^2$$

Energiaküszöb: 1,02 MeV, ezért a terápiás röntgensugárzás és γ-sugarak abszorpciója esetén van csak jelentősége.

Tömeggyengítési együtthatója:

$$\kappa_m = \frac{\kappa}{\rho}$$

Röntgendiagnosztikai alapok

Az elnyelődés mechanizmusai

Mechanizmus	μ_m változása fotonenergiával (ϵ)	μ_m változása a rendszámmal (Z)	Releváns foton-energiatartomány lágyisővetben
fotoeffektus	$\sim 1/\epsilon^3$	$\sim Z^3$	10 - 30 keV
Compton-szórás	ϵ növelésével lassan csökken	$\sim Z/A$ (A ~ 2*Z)	30 keV - 20 MeV
párkeltés	ϵ növelésével lassan nő	$\sim Z^2$	> 20 MeV

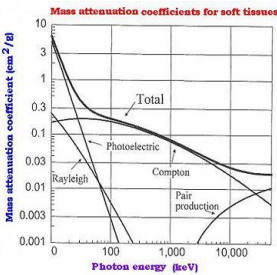
Lágyrész és csont közötti kontraszt mechanizmusa: főleg **fotoeffektus**.
Lágyrészen belüli kontrasztmechanizmus: **Compton szórás**.

Szövetek effektív rendszáma:

$$Z_{eff} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n w_i \cdot Z_i^3}$$

Röntgendiagnosztikai alapok

Az elnyelődés mechanizmusai



Röntgendiagnosztikai alapok



- A röntgen kép árnykép.
- Elnyelődésen alapul.
- Szummációs kép: 2D reprezentáció. (kivéve tomográfiás 3D rekonstrukciók)



$$J = J_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot D \cdot x}$$

tömeggyengítési eh. μ_m sűrűség

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m$$

$$\tau_m = C \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$$

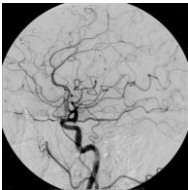
közeg	Z_m	ρ [g/cm³]
levegő	7,3	$1,3 \cdot 10^{-3}$
víz	7,7	1
lágyszövet	7,4	1
csont	13,8	1,7-2

Röntgendiagnosztikai alapok

Kontrasztanyagok, lágy és kemény sugárzás



dupla kontraszt: BaSO₄ és levegő



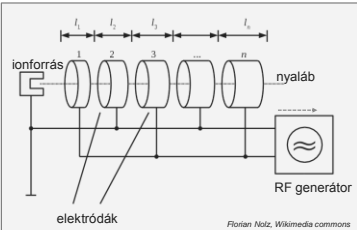
cerebrális angiográfia jódt kontrasztal



arany nanorészecskék vesében

Részecskegyorsítók

Lineáris gyorsító (Linear accelerator, Linac)



Töltött részecskék (p^+ , e^-) gyorsulnak lépcsőzetesen a váltakozó polaritású elektrodák között (de bennük nem).

Elektrodahossz fokozatosan növekszik (szinkron fenntartása miatt).

A nyalábot közvetlenül, vagy közvetetten, céltárgyba vezetve Rtg. sugárzás keltésére használhatjuk.

Néhány 10 MeV energiák érhetőek el.

elektromos térben gyorsuló elektron sebessége:

$$\left. \begin{aligned} E_{pot} &= e \cdot U \\ E_{kin} &= \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 \\ E_{kin} &= E_{pot} \end{aligned} \right\} v_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}}$$

Részecskegyorsítók

Lineáris gyorsító (Linear accelerator, Linac)

The diagram illustrates a linear accelerator (Linac). A particle path is shown as a red line with arrows moving from left to right through four accelerating stages labeled C1, C2, C3, and C4. Each stage is represented by a grey rectangular block. Above the path, a green line graph shows the potential $\varphi(x)$ as a series of steps, indicating the acceleration at each stage. Red arrows labeled 'E' represent the electric fields within each stage. A source 'S' is at the beginning, and a target 'T' is at the end. A voltage source 'G' is connected to the stages, with a phase φ_0 indicated. The path ends at a red dot.

Chetvomo, Wikimedia commons

Részecskegyorsítók

Ciklotron

The diagram shows a cyclotron with two semi-circular electrodes called dees. A particle path is shown spiraling outwards from an ion source in the center, crossing the gap between the dees multiple times. Labels include: 'elektro-mágnesek' (electromagnets) for the dees, 'ionforrás' (ion source) at the center, 'elektroda (duáns)' (electrode (dees)), 'céltárgy' (target), and 'kilépő nyiláb' (exit beam). A radio frequency generator 'RFG' is also shown. The text 'Symmetry Magazine' is at the bottom left.

részecske szögsebessége:

$$\omega = \frac{q \cdot B}{m}$$

kerületi sebessége:

$$v_k = r \cdot \omega = \frac{r \cdot q \cdot B}{m}$$

Töltött részecskék (p^+ , e^-) gyorsulnak a duások közti térben (de bennük nem).

A duások polaritása váltakozik.

A mágneses tér körpályára kényszeríti a részecskéket (Lorentz erő)

A nyilábot közvetlenül, vagy közvetetten, céltárgyba vezetve Rtg. sugárzás keltésére használhatjuk.

Néhány 10 MeV energiák érhetőek el.

Elsősorban pozitron emittáló izotópok előállítására (PET-hez).

