

Röntgensugárzás és kölcsönhatása az anyaggal

Orosz Ádám

Semmelweis Egyetem

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

Áttekintés

Témakörök:

- A röntgensugárzás jellemzői
- Rtg. sugárzás előállítása
- Fékezési és karakterisztikus Rtg. sugárzás
- Rtg. sugárzás és az anyag kölcsönhatása
- Röntgendiffrakció
- Diagnosztikai alapok
- Részecskegyorsítók

Tankönyvi részek: II/3.1.; II/3.2.6.; X/6.

Kapcsolódó gyakorlatok: Röntgen, CT (második félévben)

Kollokviumi tételek:

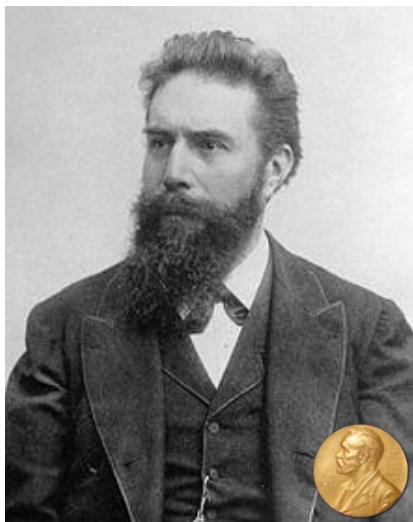
21. Hogyan lehet röntgensugárzást előállítani? Hasonlítsa össze a fékezési és a karakterisztikus röntgensugárzást keletkezésük és spektrumuk alapján!

22. A röntgen és gamma sugárzás abszorpciója. Röntgendiagnosztika, sugárvédelem, röntgendiffrakció.

23. Hogyan léphet kölcsönhatásba nagy foton-energiájú elektromágneses sugárzás atomokkal, molekulákkal?

25. 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.



A röntgensugárzás jellemzői

Elektromágneses hullám

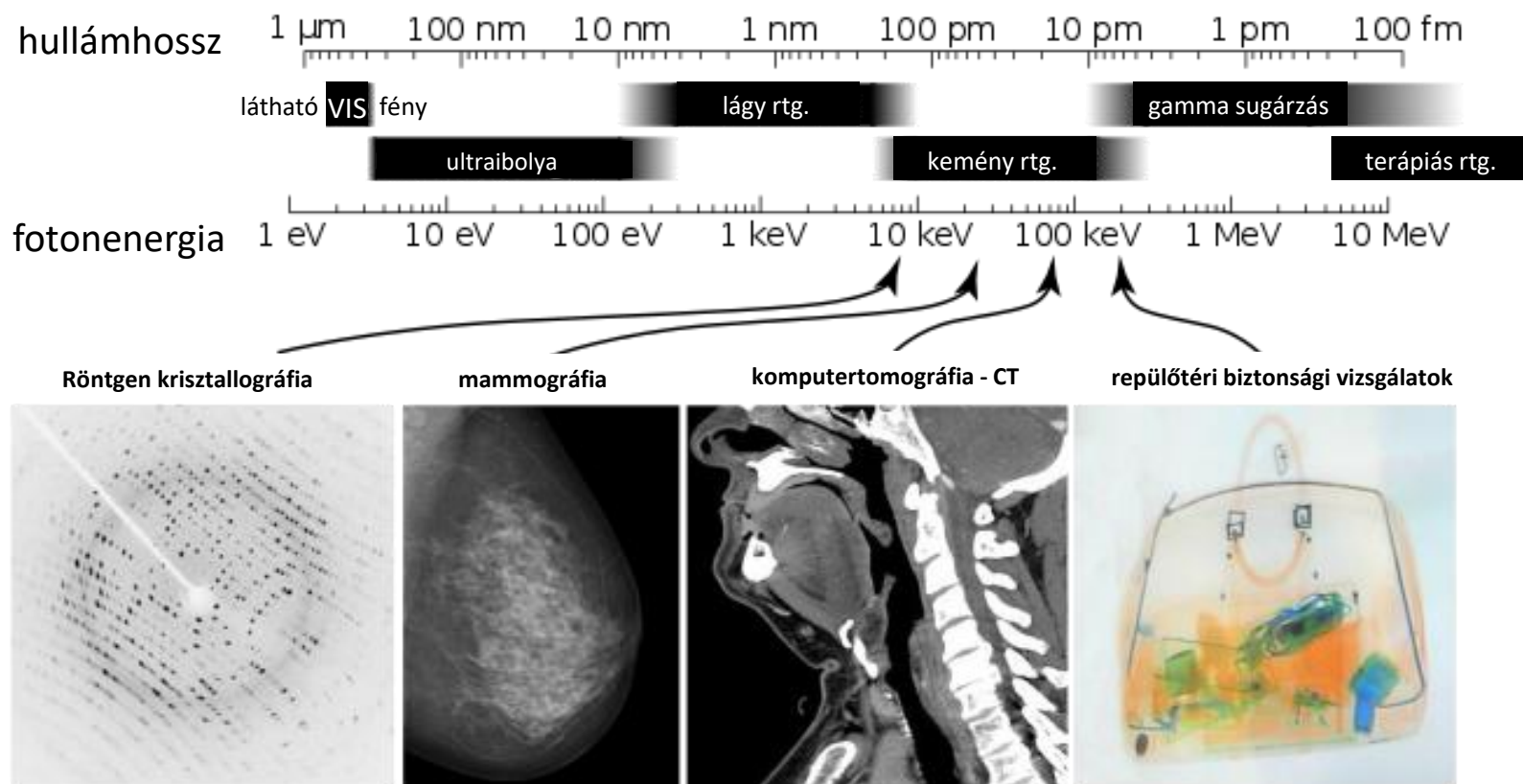
$f \approx 10^{15} - 10^{18}$ Hz (penta-exahertz)

$\lambda \approx 10$ nm - pm

$\varepsilon \approx 100$ eV- 20 MeV

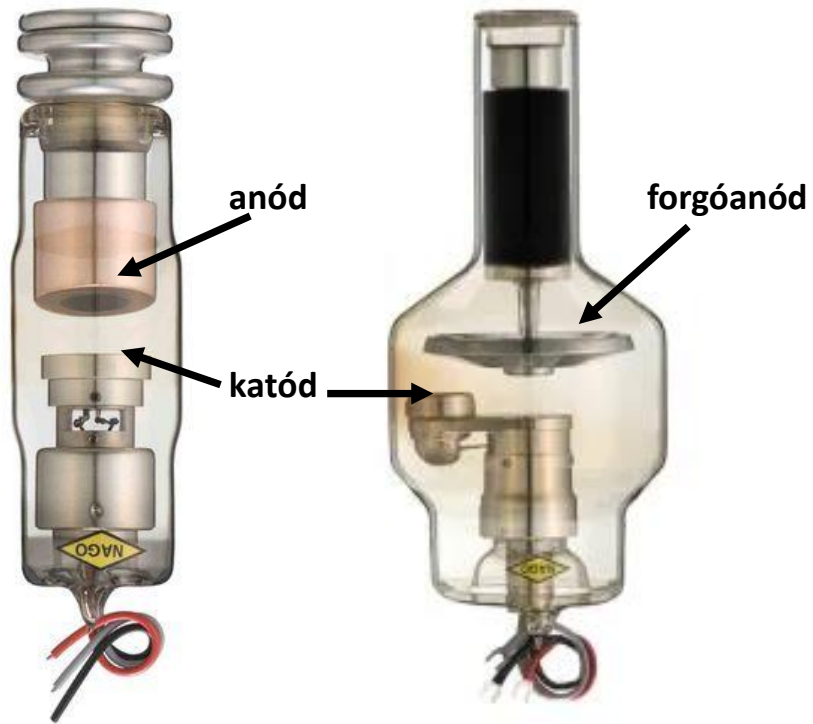
diagnosztika: 30-200 keV; terápia: 5-20 MeV

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

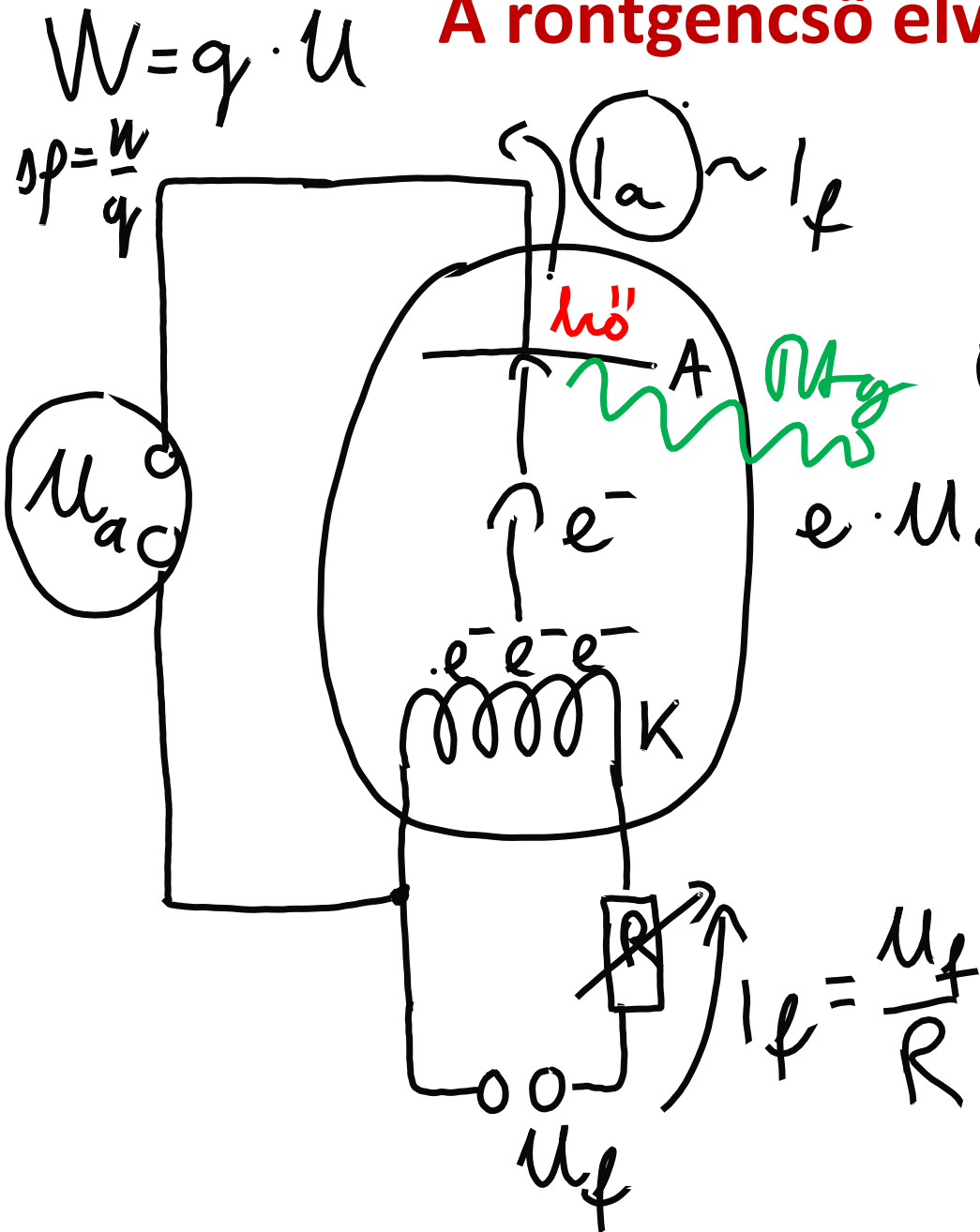


Röntgensugárzás előállítása

Röntgenső 1930-as évek



A röntgenső elvi felépítése

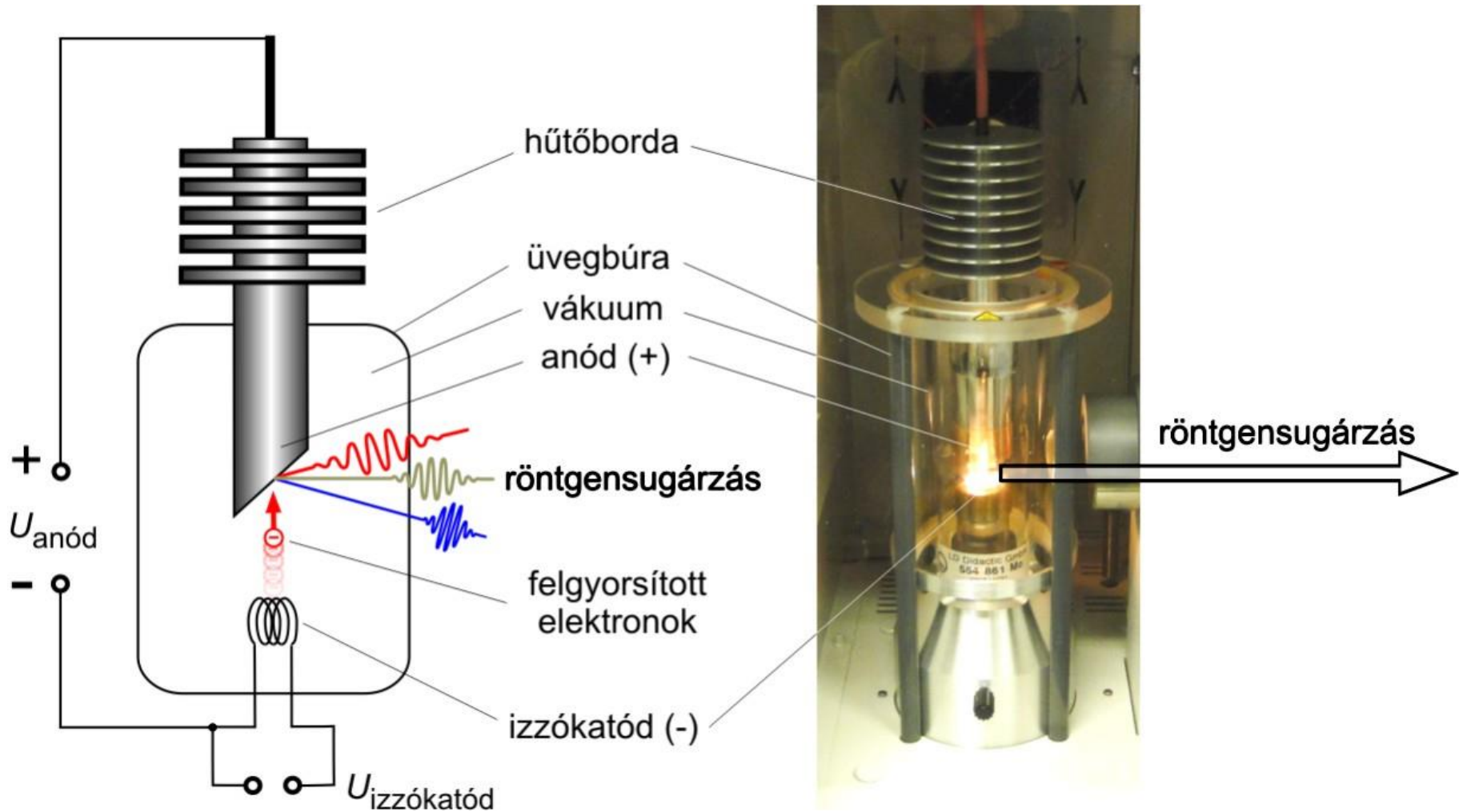


$$p = m \cdot v \rightarrow \lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$e \cdot U_a = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$$

$$\frac{n_{\uparrow}}{n_{\downarrow}} = e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

A röntgenső elvi felépítése





577 Is
35.0 kV

ADJUST

SENSOR TARGET COUPLED

ZERO

RESET

REPLAY

SCAN

ON/OFF

HV

ON/OFF

VSB

HV IN

SIGNAL OUT

ANGLE

RATE

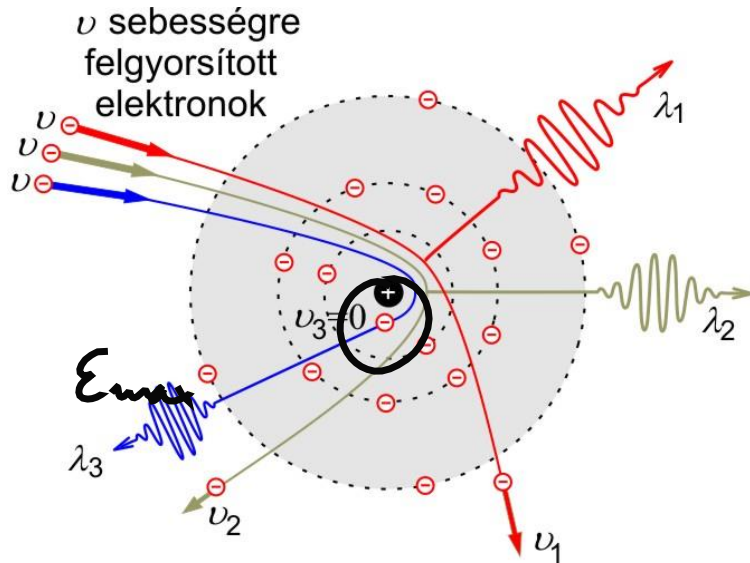


LD Electronic GmbH
554 800 Mo

Kinyitás előtt
az ionizációs kamra
feszültségét is
nullázni kell !!!

554 800
RÖNTGENERÁTOR
X-RAY APPARATUS

Fékezési röntgensugárzás (Bremsstrahlung)



$$E_{\max} = e \cdot U_a = h f_{\max} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\min}}$$

Duane-Hunt törvény:

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

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

Teljesítmény:

$$P_{\text{Rtg}} = C_{\text{Rtg}} \cdot U_a^2 \cdot I_a \cdot Z$$

volfrám $\sim 1\%$

$$U_a = \frac{h}{e \cdot \lambda_{\min}}$$

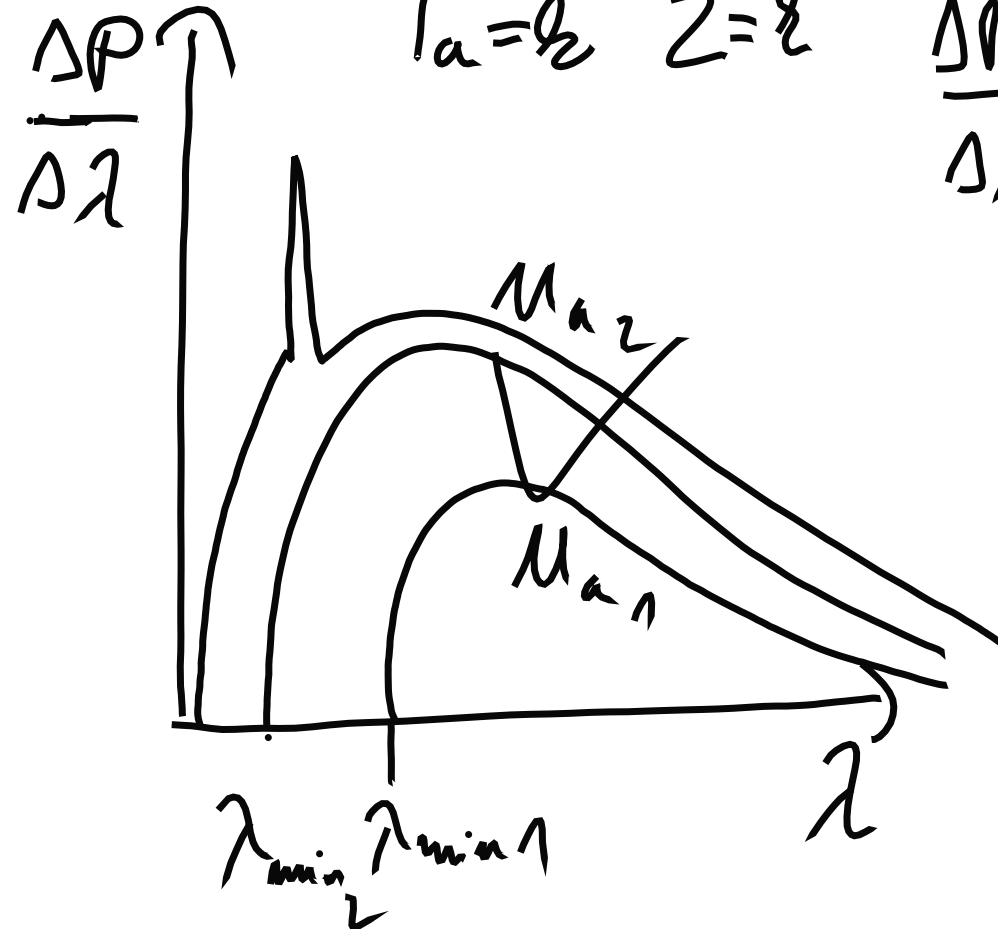
A röntgenső hatásfoka:

$$\eta = \frac{P_{\text{Rtg}}}{P_{\text{el}}} = \frac{C_{\text{Rtg}} \cdot U_a^2 \cdot I_a \cdot Z}{U_a \cdot I_a} = C_{\text{Rtg}} \cdot U_a \cdot Z$$

A fékezési röntgensugárzás spektruma

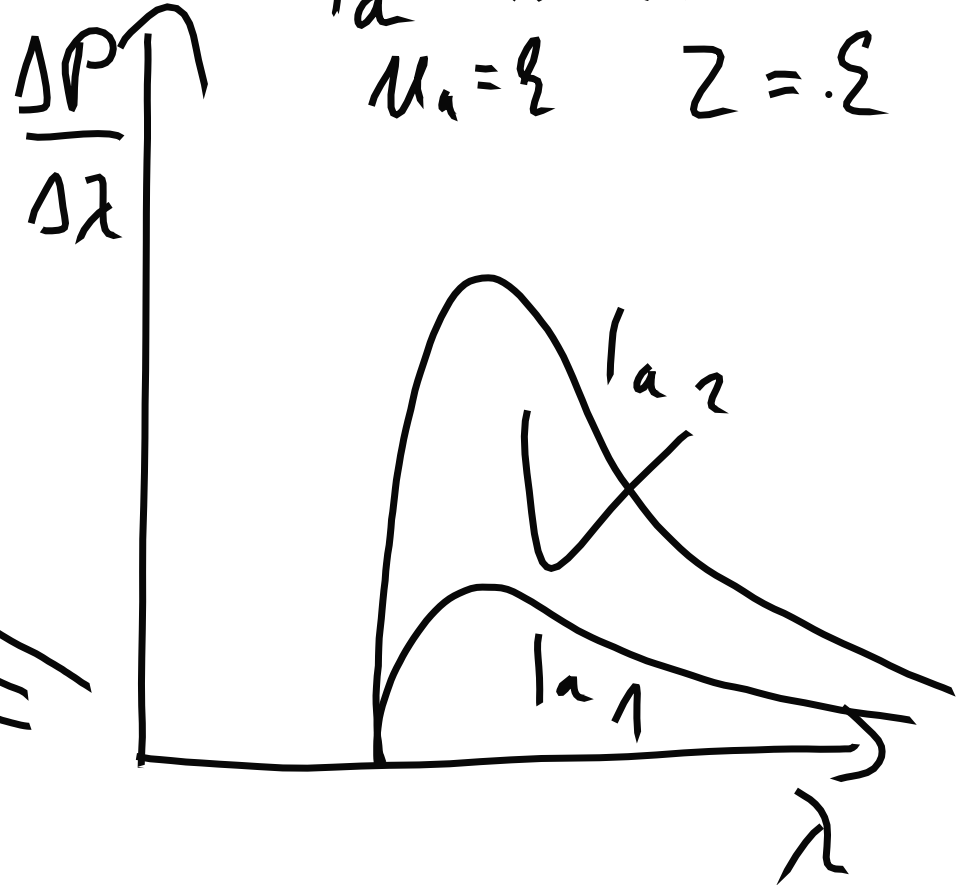
$$U_a = \text{vált.}$$

$$I_a = 0.2 \quad Z = 2$$

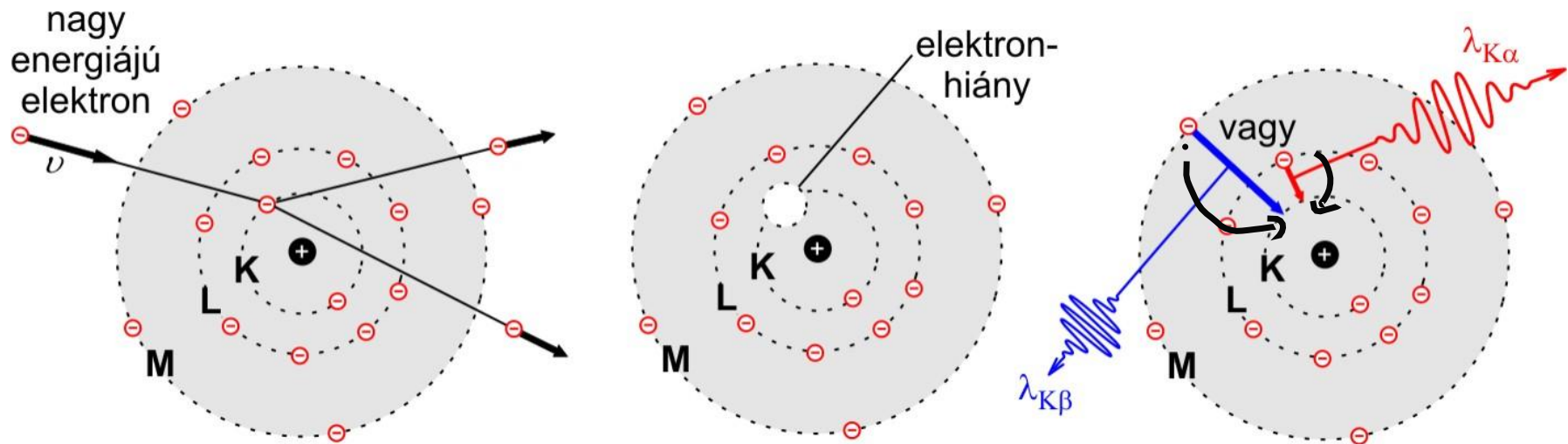


$$I_a = \text{vált.}$$

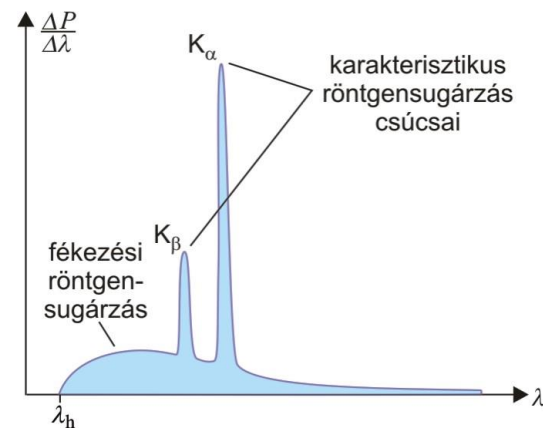
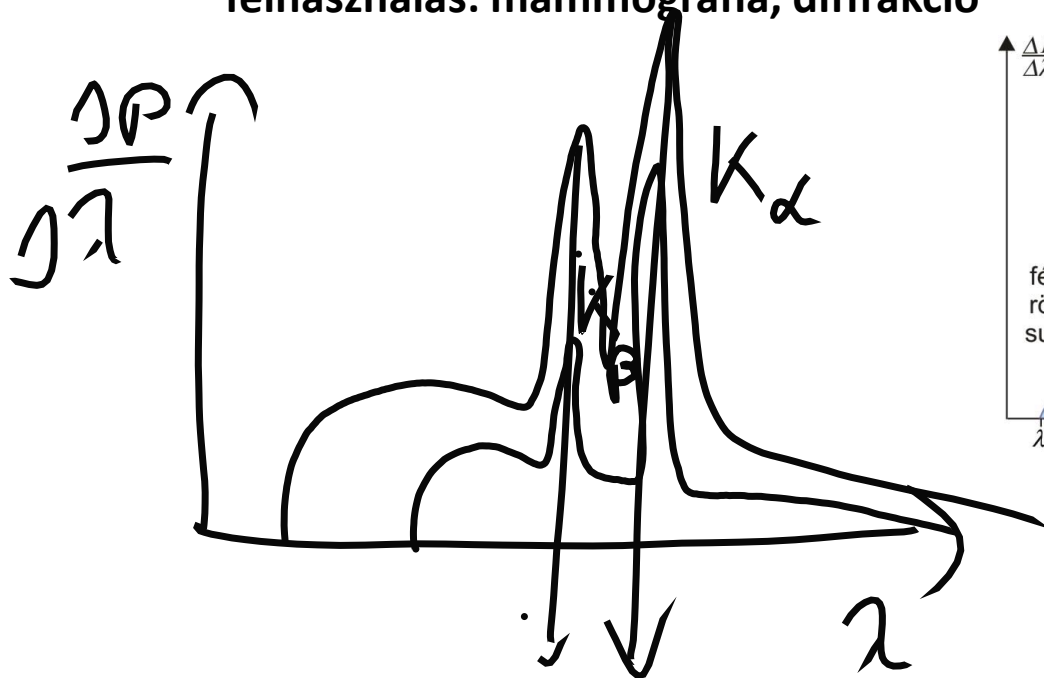
$$U_a = 2 \quad Z = 2$$



Karakterisztikus röntgensugárzás



felhasználás: mammográfia, diffrakció



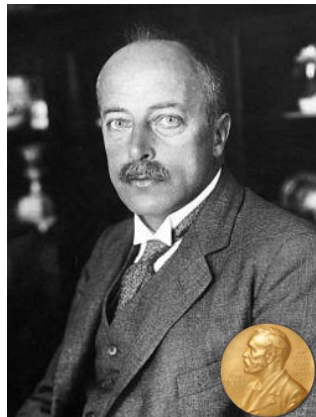
Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása

1. Diffrakció – rugalmas szóródás, vagy visszaverődés
kristályok vizsgálata

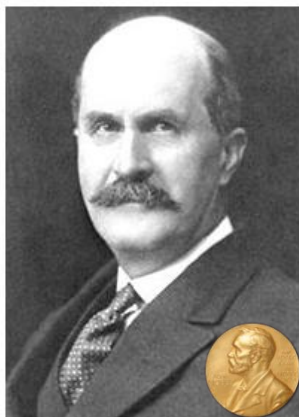
2. Abszorpció – elnyelődés
orvosi diagnosztika és terápia

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása I.

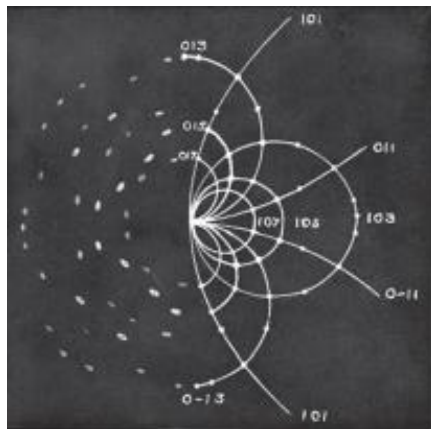
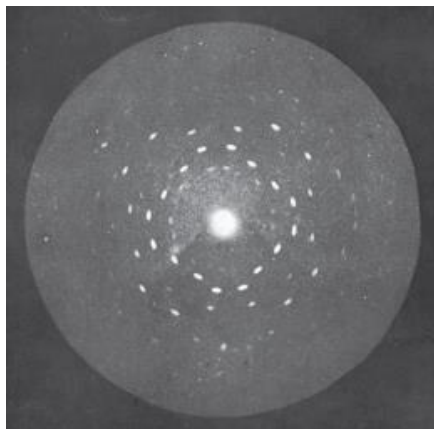
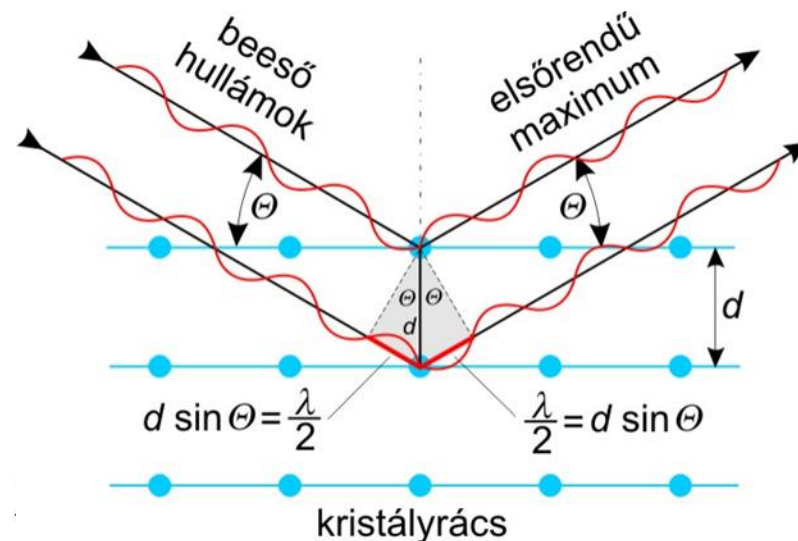
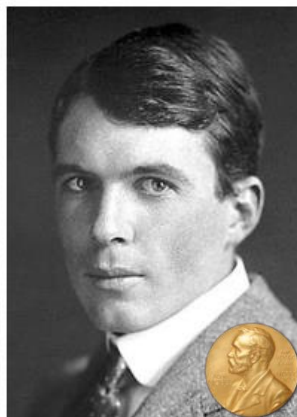
Röntgendiffrakció



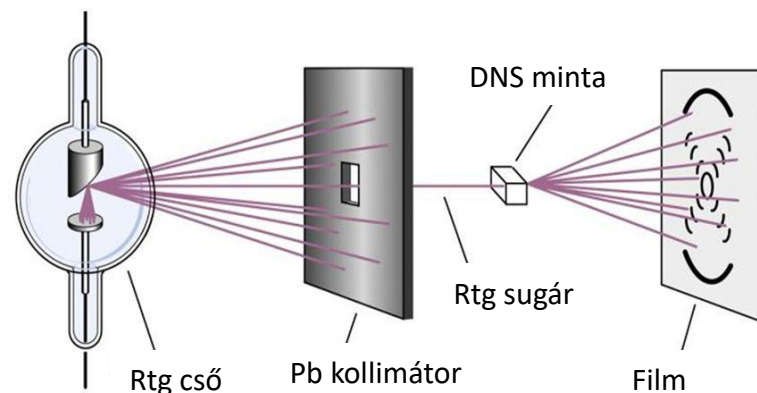
Max von Laue



William Henry és Lawrence Bragg

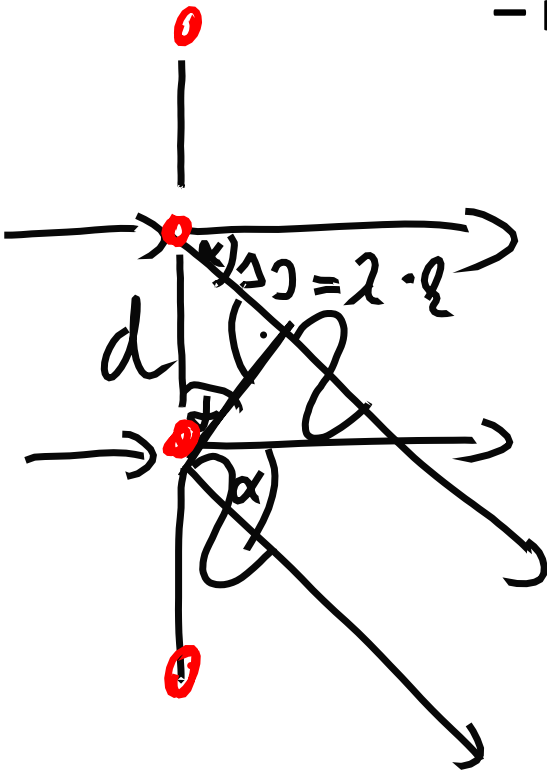


kristály röntgendiffrakciós képe, és L. Bragg számításai



Röntgendiffrakció

Röntgenfotonok kölcsönhatása elektronokkal
– rugalmas szóródás, visszaverődés



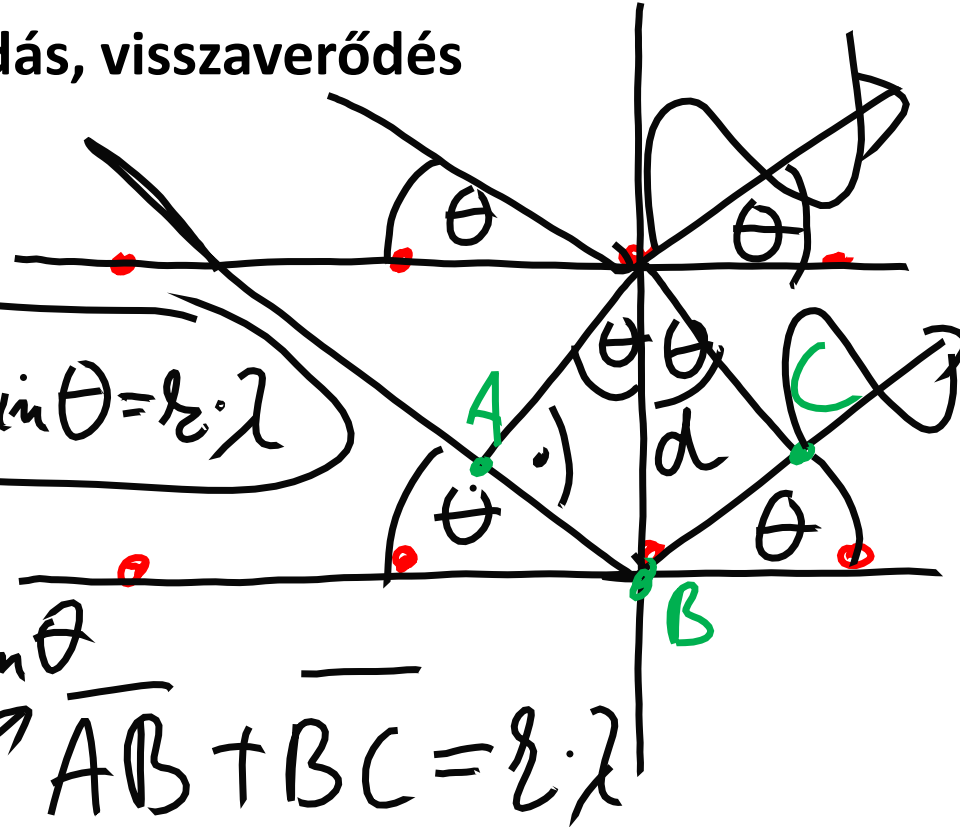
$$\sin \alpha = \frac{\Delta\sigma}{d} = \frac{k \cdot \lambda}{d}$$

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

$$\frac{k \cdot \lambda}{2d} = \sin \theta$$

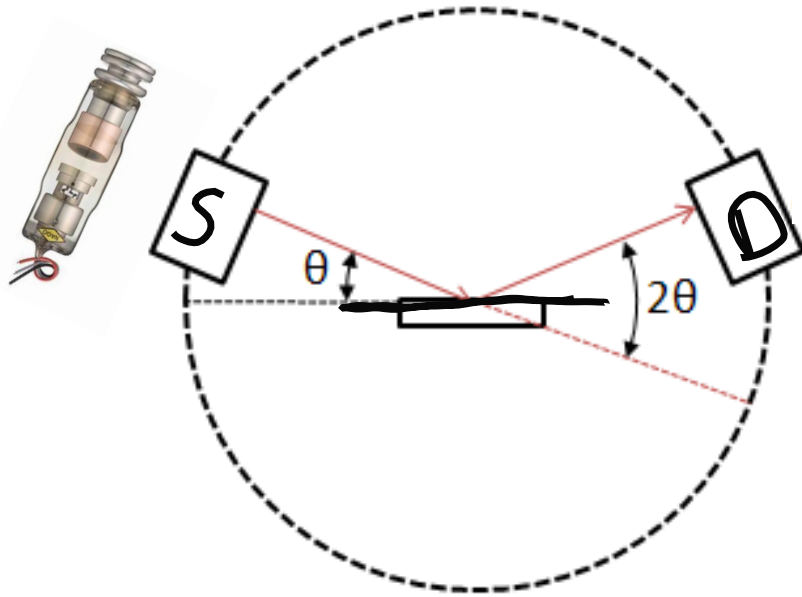
$$\overline{AB} + \overline{BC} = k \cdot \lambda$$

$$\sin \theta = \frac{\overline{AB}}{d} \Rightarrow \overline{AB} = d \cdot \sin \theta$$

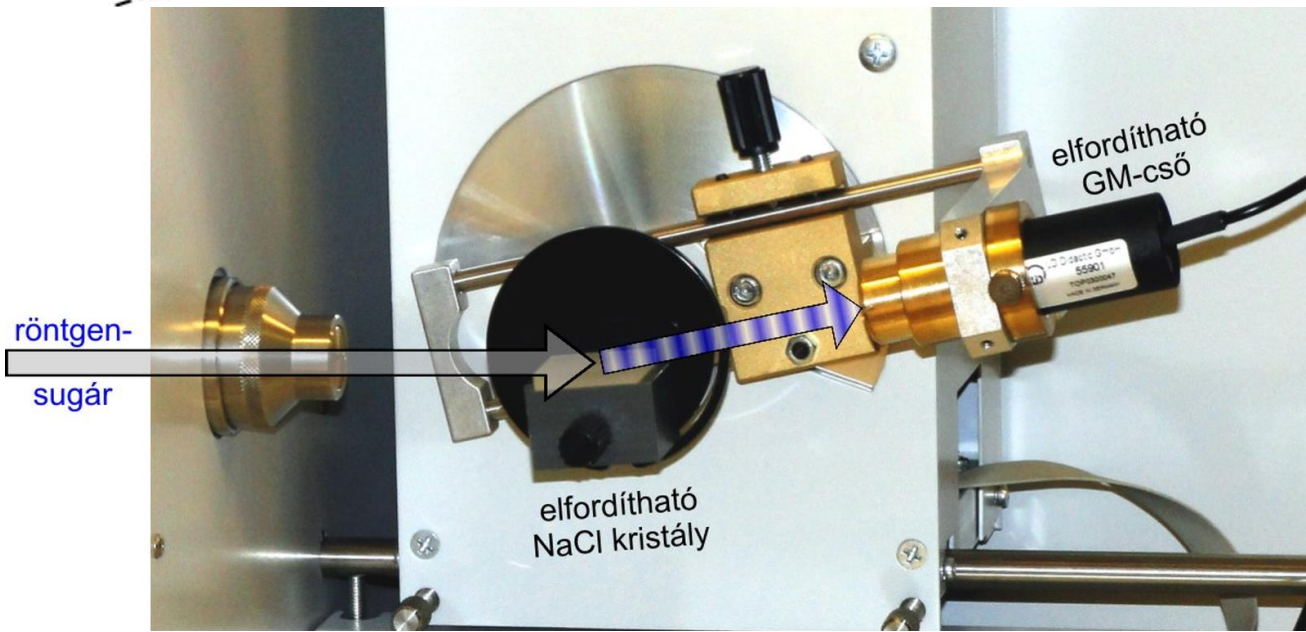
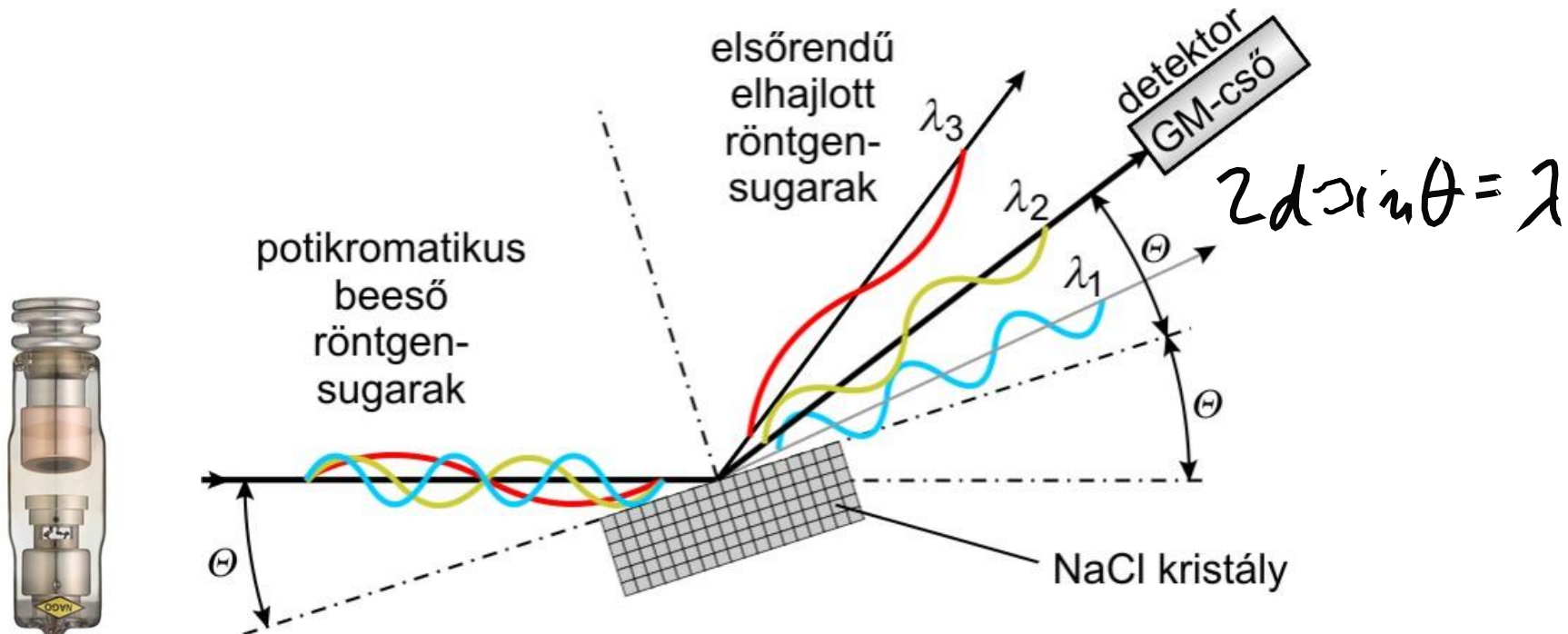


Röntgendiffraktometria - XRD

monokromatikus röntgensugárzás - karakterisztikus csúcsok használata

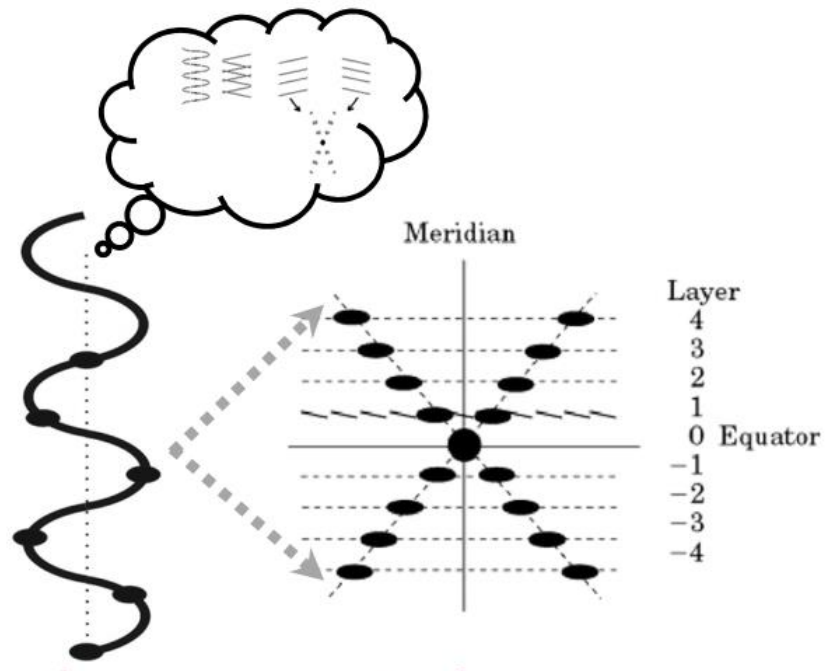


Röntgensugárzás spektrumának felvétele

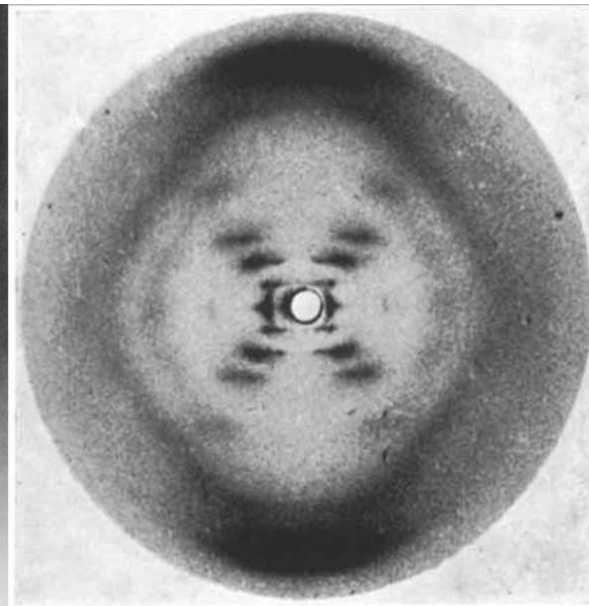




Röntgen-
sugárzás



Rosalind Franklin



51-es kép

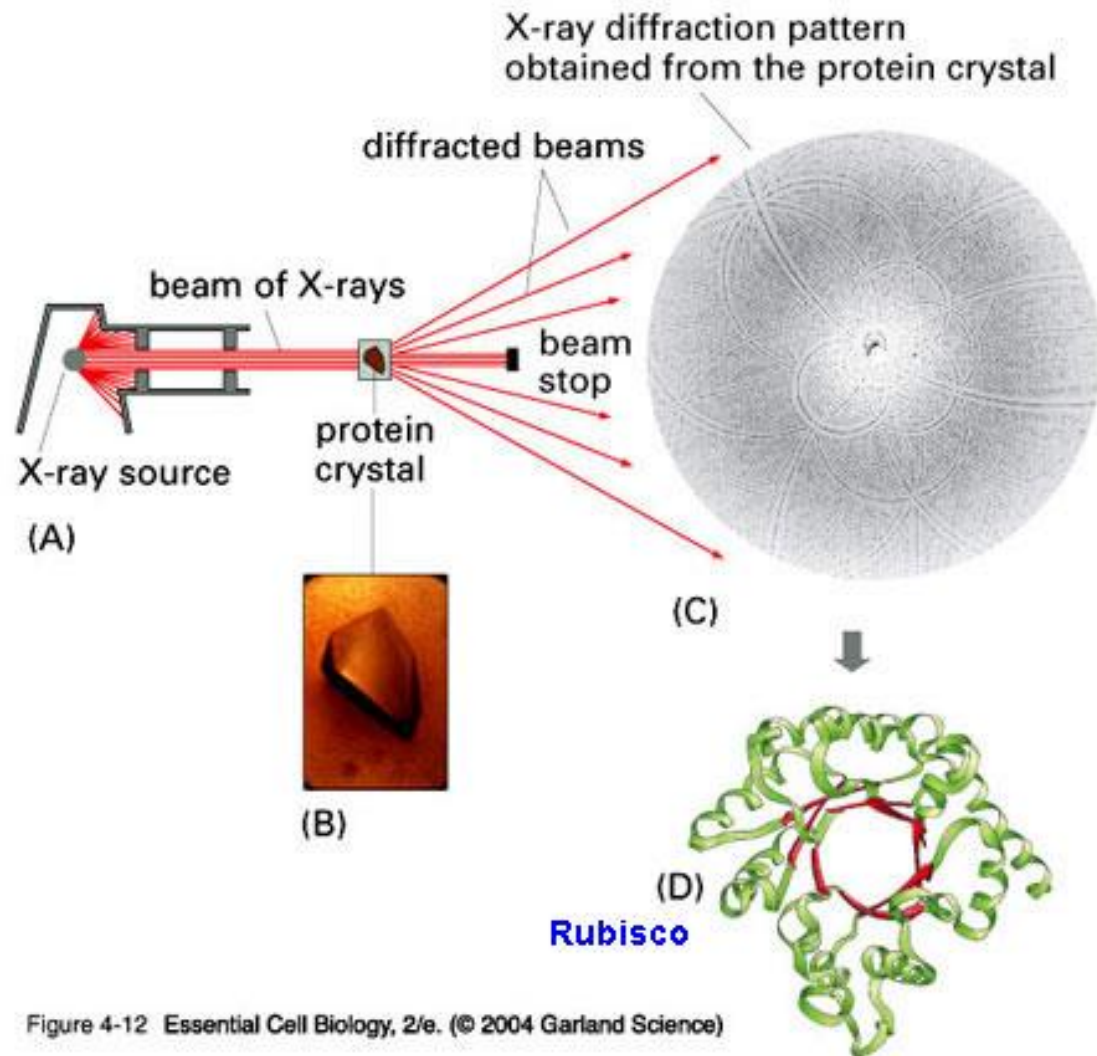
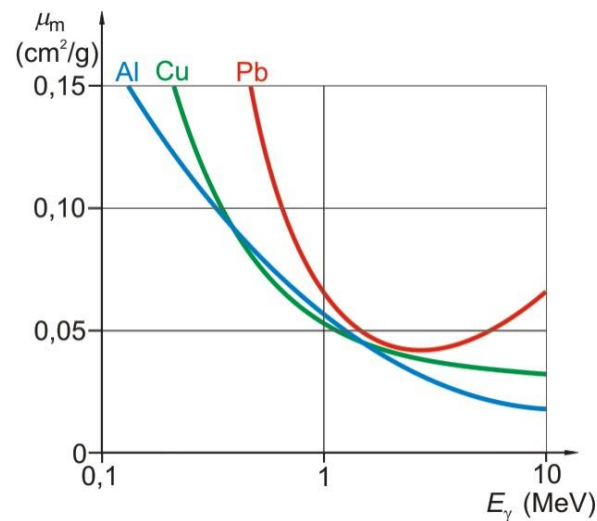
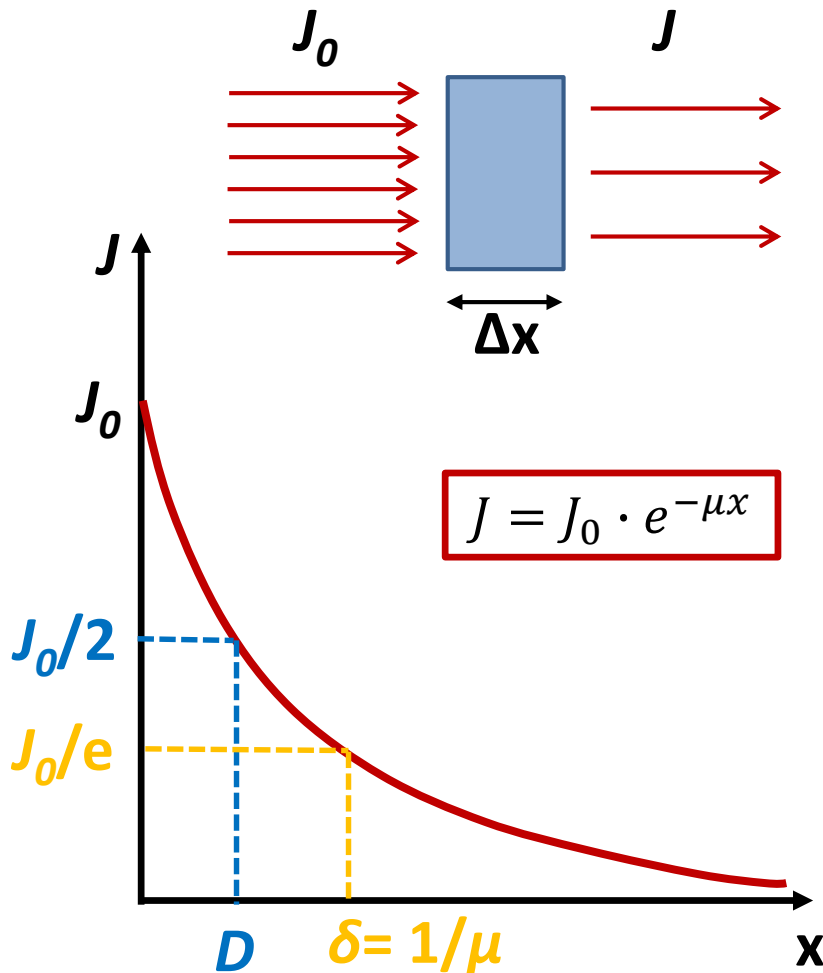


Figure 4-12 Essential Cell Biology, 2/e. (© 2004 Garland Science)

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása II.

Abszorpció – általános törvényszerűségek



Lineáris és tömeggyengítési együttható:

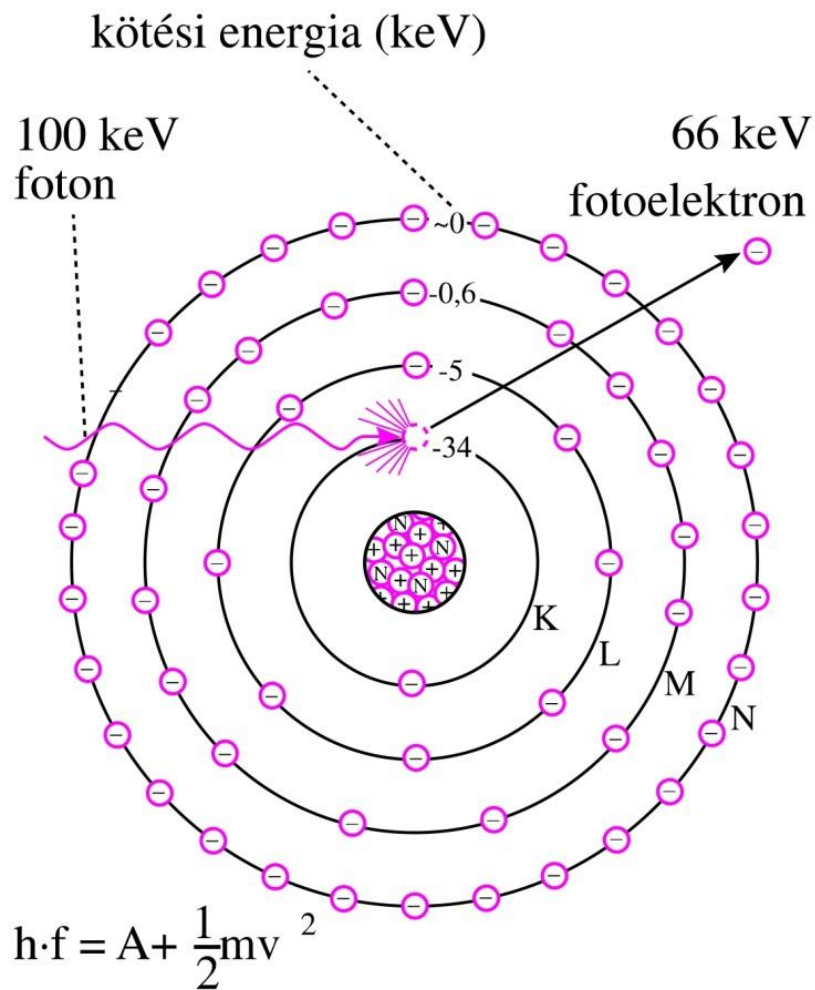
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$$

Mechanizmus atomi szinten:

- Fotoeffektus
 - Compton szórás
 - Párképződés
- $\mu = \tau + \sigma + \kappa$

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása II.

Fotoeffektus



Energiamérleg:

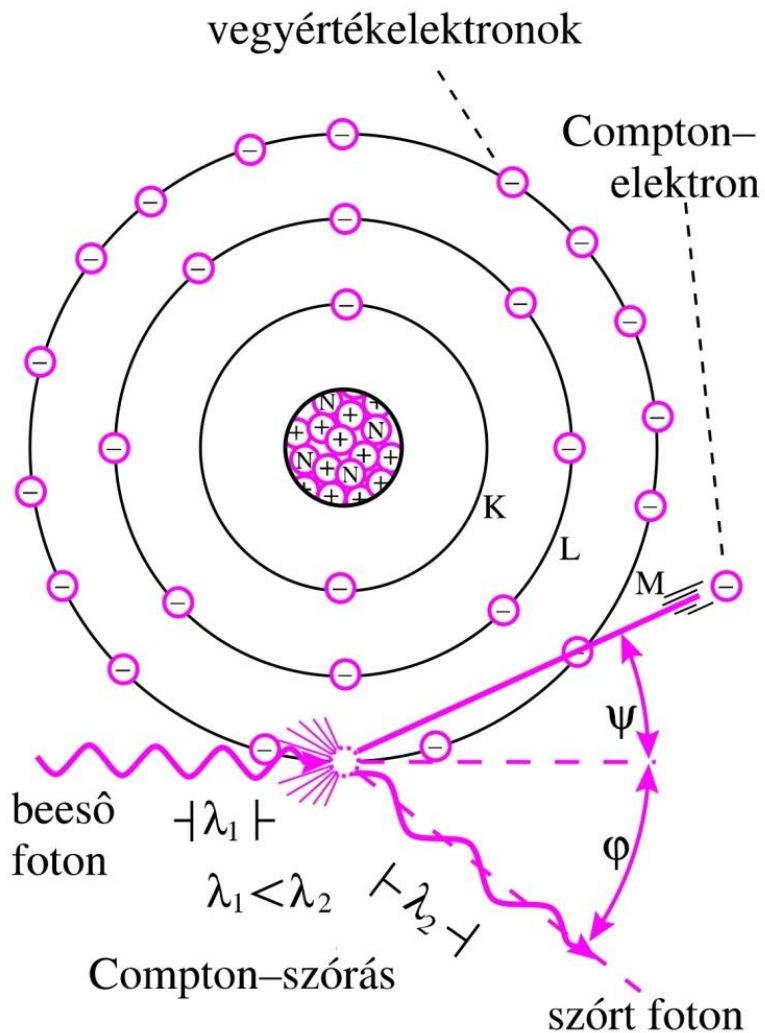
$$h \cdot f = A + \frac{1}{2}mv^2$$

Tömeggyengítési együtthatója:

$$\tau_m = \frac{\tau}{\rho}$$
$$\tau_m = C \cdot Z^3 \cdot \lambda^3$$

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása II.

Compton effektus (rugalmatlan szóródás)



Energiamérleg:

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

Tömeggyengítési együtthatója:

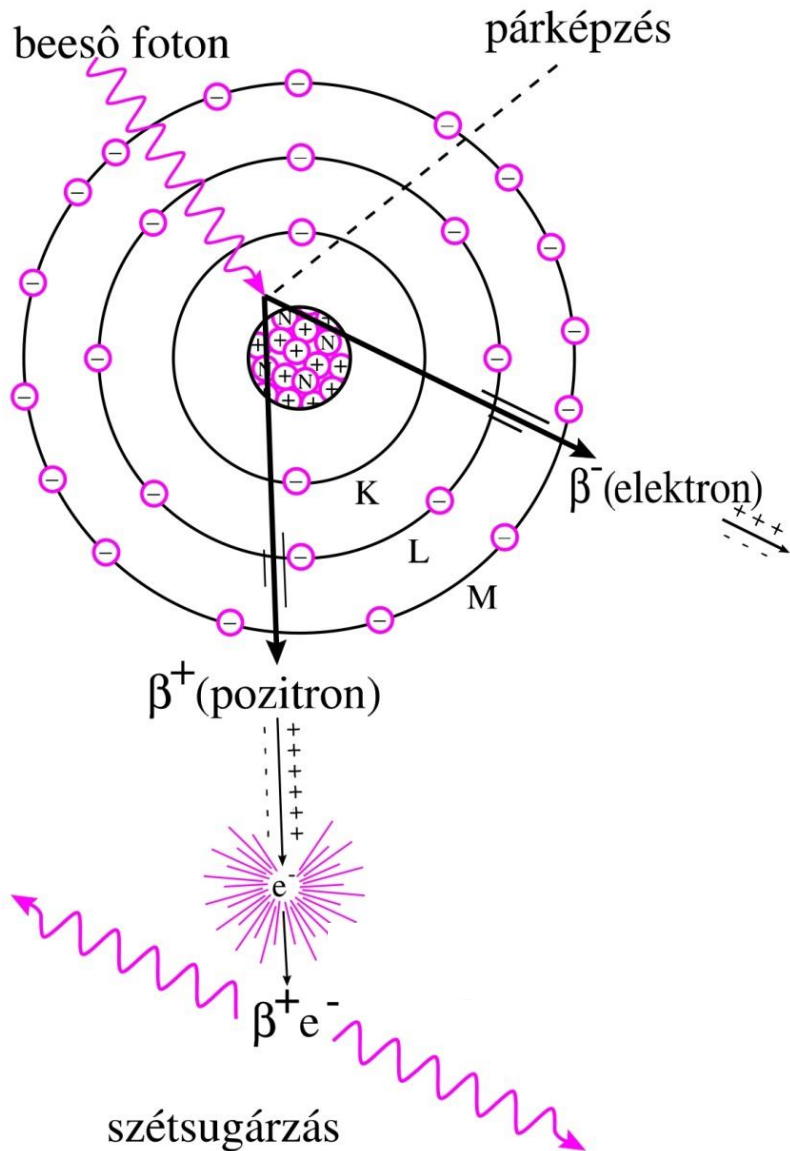
$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\rho}$$

$\sigma_m \sim \frac{Z}{A}$ gyakorlatilag független Z-től
 pl.: szén Z=6, A=12
 Z/A= 0,5

$\sigma_m \sim \sqrt{\lambda}$

Röntgensugárzás és az anyag kölcsönhatása II.

Pároképződés



Energiamérleg:

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

Energiaküszöbe: 1,022 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 lágyszövetben
fotoeffektus	$\sim 1 / \epsilon^3$	$\sim Z^3$	10 - 30 keV
Compton- szórás	ϵ növelésével lassan csökken	$\sim Z/A$ (A = tömegszám)	30 keV - 20 MeV
párokeltés	ϵ növelésével lassan nő	$\sim Z^2$	> 20 MeV

Szövetek effektív rendszáma:

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

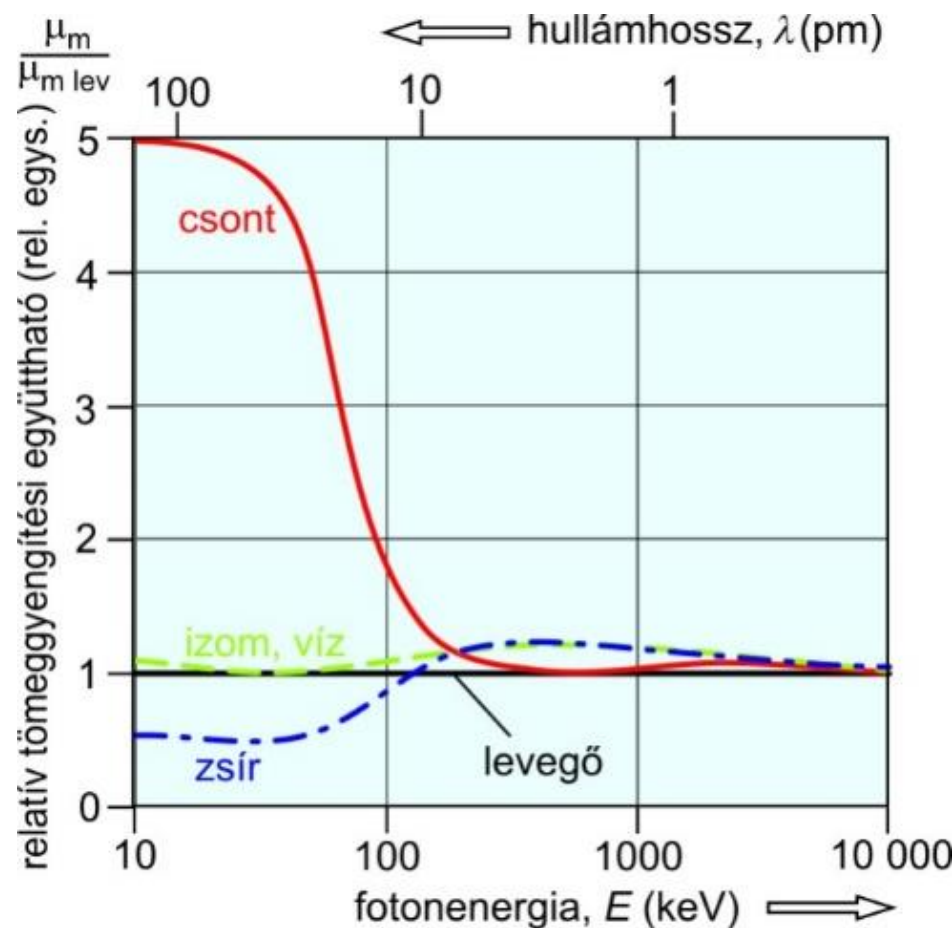
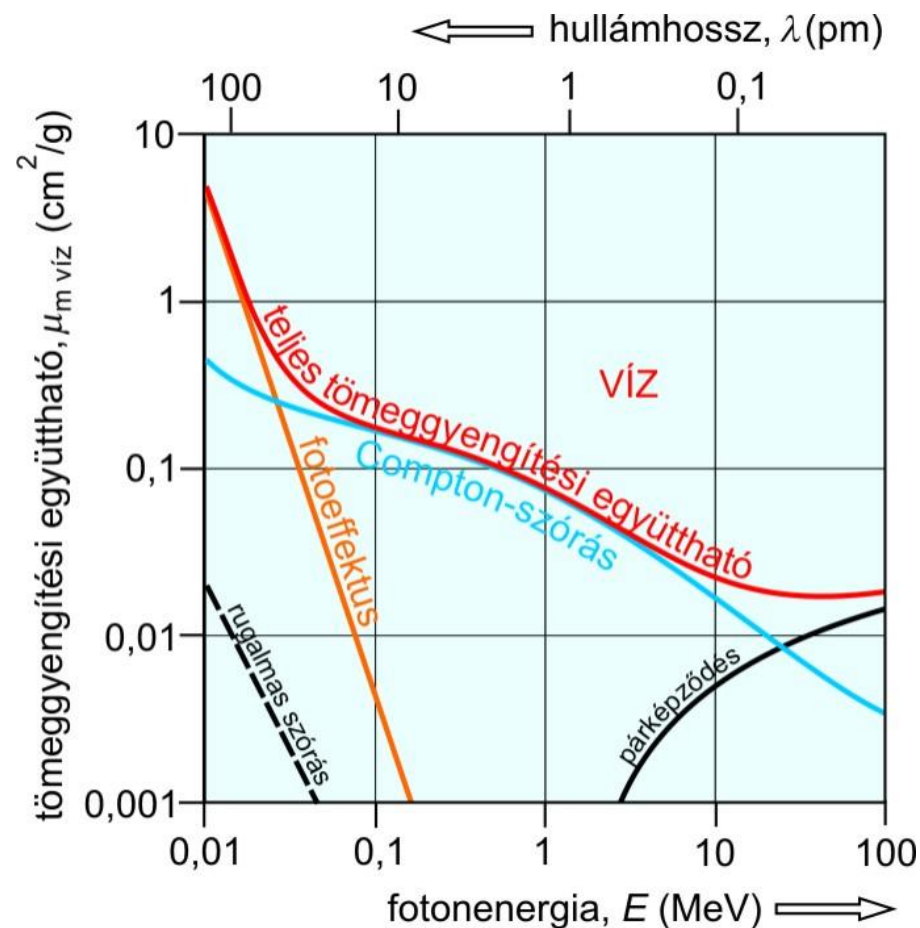
Pl.: víz H₂O 10 elektron: H - 2, O - 8

$$Z_H=1, Z_O=8, \quad w_H=0,2 \quad w_O=0,8$$

$$Z_{eff} = \sqrt[3]{0,2 \cdot 1^3 + 0,8 \cdot 8^3} = 7,4$$

Röntgendiagnosztikai alapok

Az elnyelődés mechanizmusai





Röntgendiagnosztikai alapok

- A röntgen kép árnykép.
- Elnyelődésen alapul.
- Statikus: filmfelvétel, dinamikus: fluoroszkópia
- Szummációs kép: 2D
- Tomográfia (rétegfelvétel): CT, 3D



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

tömeggyengítési eh.

sűrűség

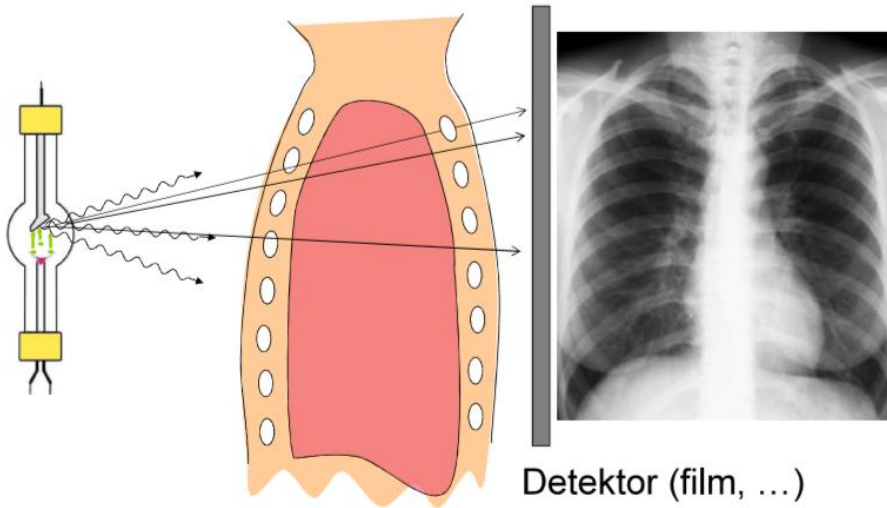
$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m$$

$$\sigma_m = C \cdot Z/A$$

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

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

Szummációs kép



$$J_1 = J_0 \cdot e^{-\mu_1 \cdot x_1}$$

$$J_2 = J_1 \cdot e^{-\mu_2 \cdot x_2}$$

$$0 = \lg \frac{J_0}{J_2}$$

$$J_2 = J_0 \cdot e^{-\mu_1 \cdot x_1} \cdot e^{-\mu_2 \cdot x_2}$$

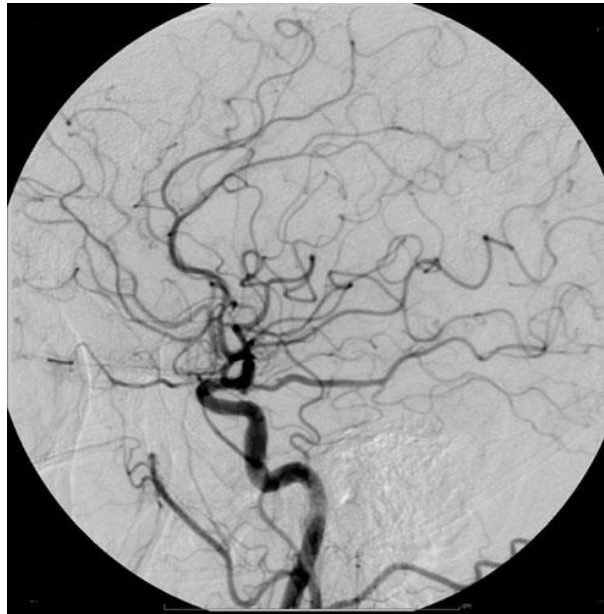
$$J_2 = J_0 \cdot e^{-(\mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2)}$$

Röntgendiagnosztikai alapok

Kontrasztanyagok, lágy és kemény sugárzás



dupla kontraszt: BaSO₄ (+) és levegő (-)



cerebrális angiográfia jód (+) kontraszttal



BaSO₄ (+) lenyelése – fluoroszkópos felvétel

Pozitív kontrasztanyag

nagyobb abszorpció

$$\mu \uparrow \quad \mu_m \uparrow \quad Z_{\text{eff}} \uparrow$$

jód (erek),
bárium (gyomor,
bél)

Negatív kontrasztanyag

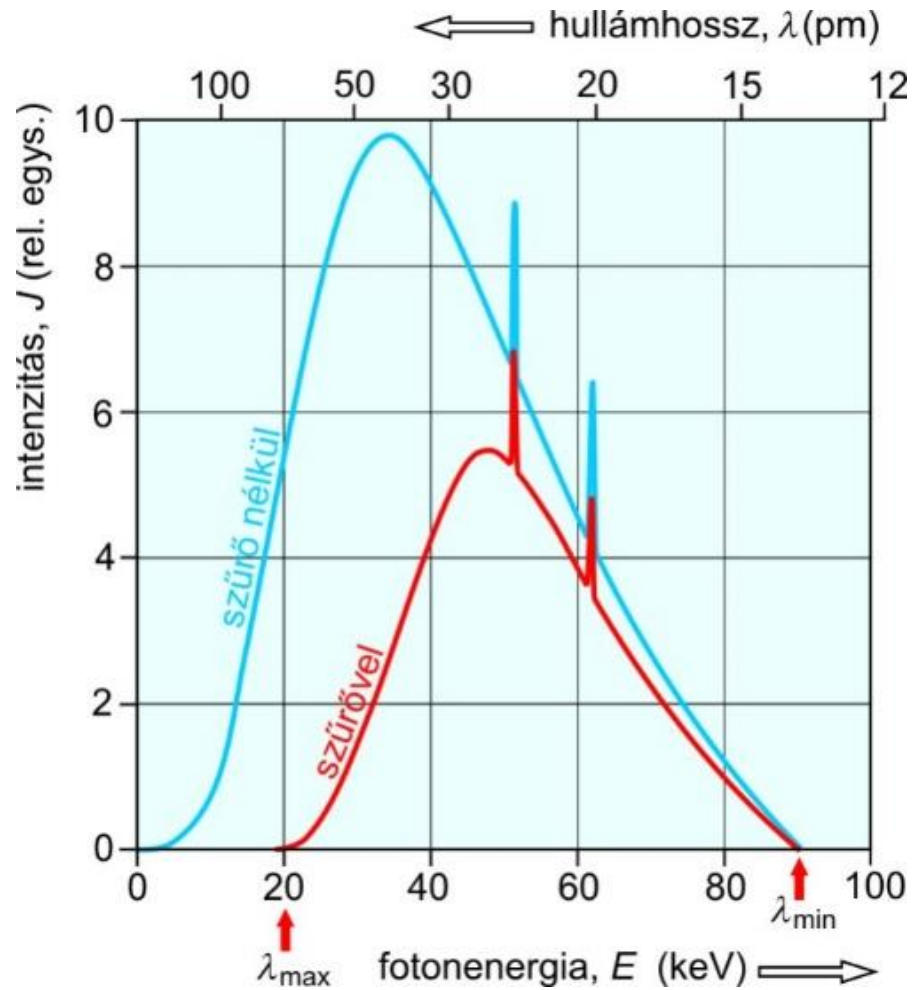
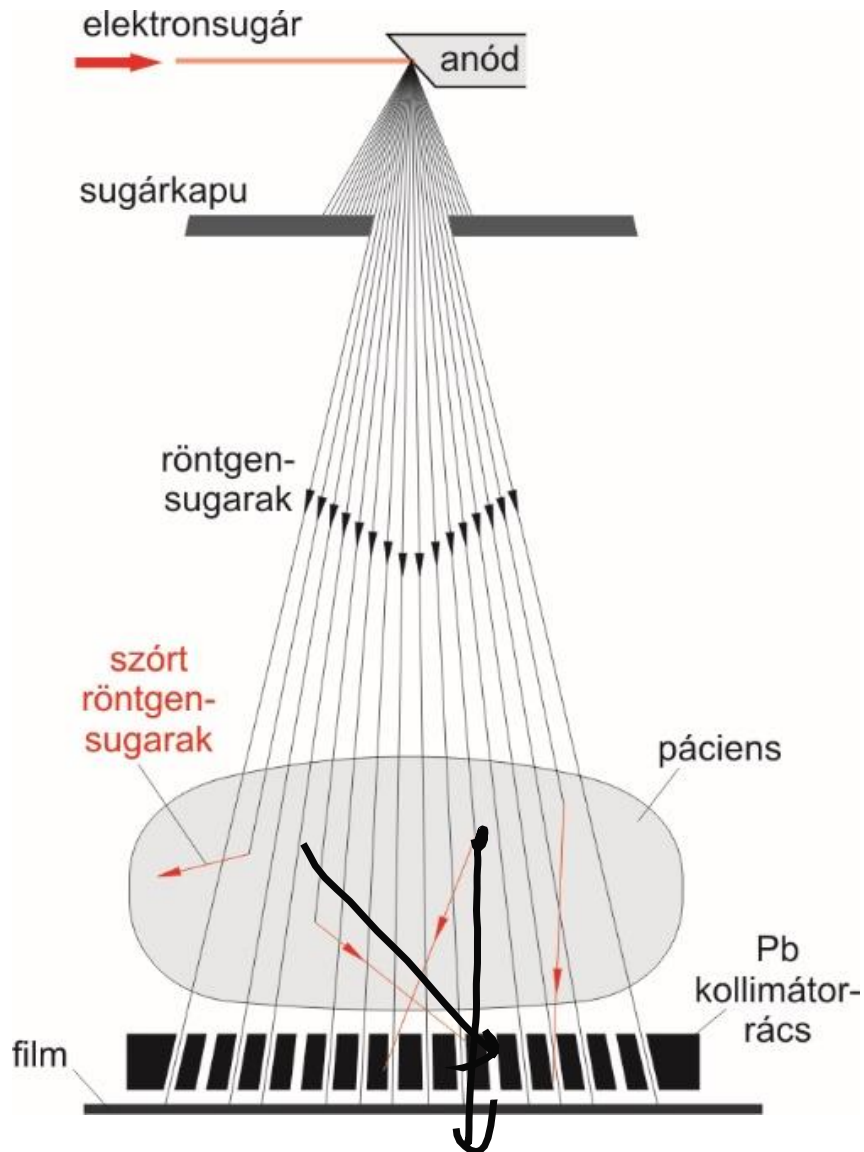
kisebb abszorpció

$$\mu \downarrow \quad \rho \downarrow \quad \mu_m - \quad Z_{\text{eff}} -$$

levegő, CO₂ (bél)

Röntgendiagnosztikai alapok

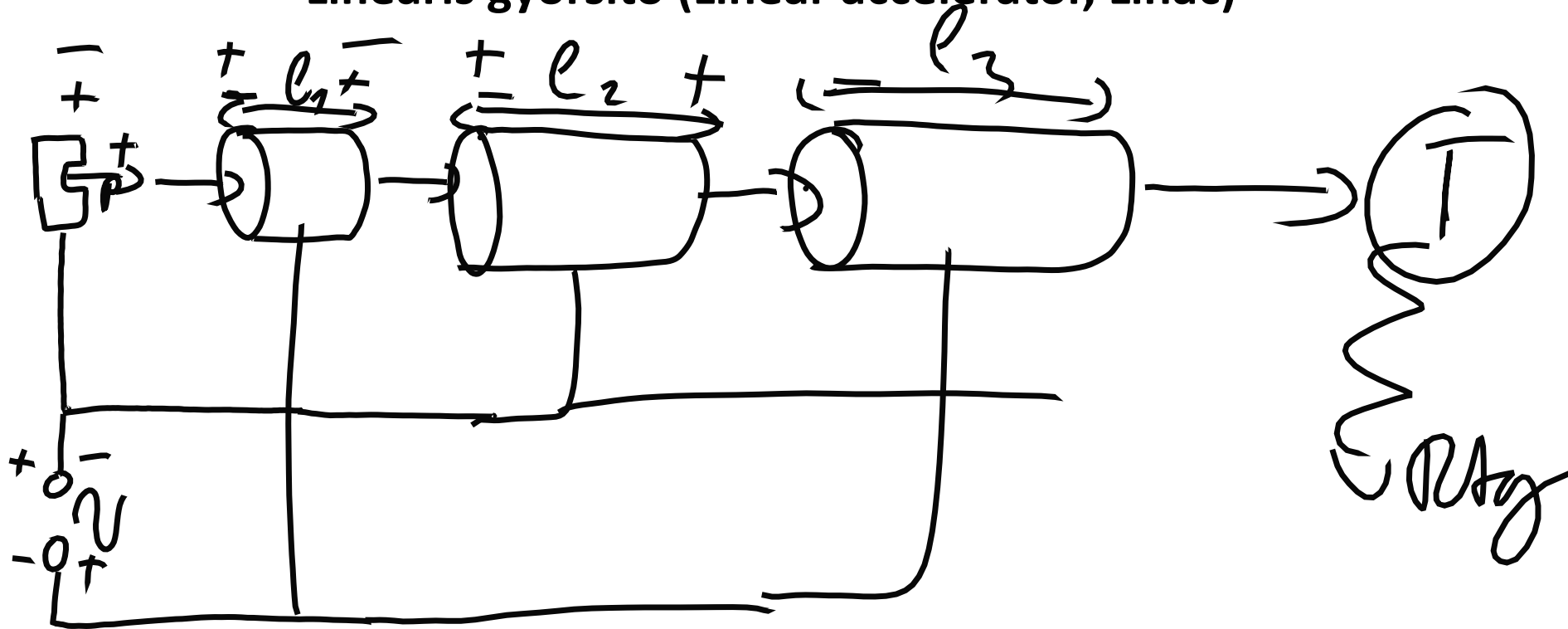
Kollimátor, szűrés



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

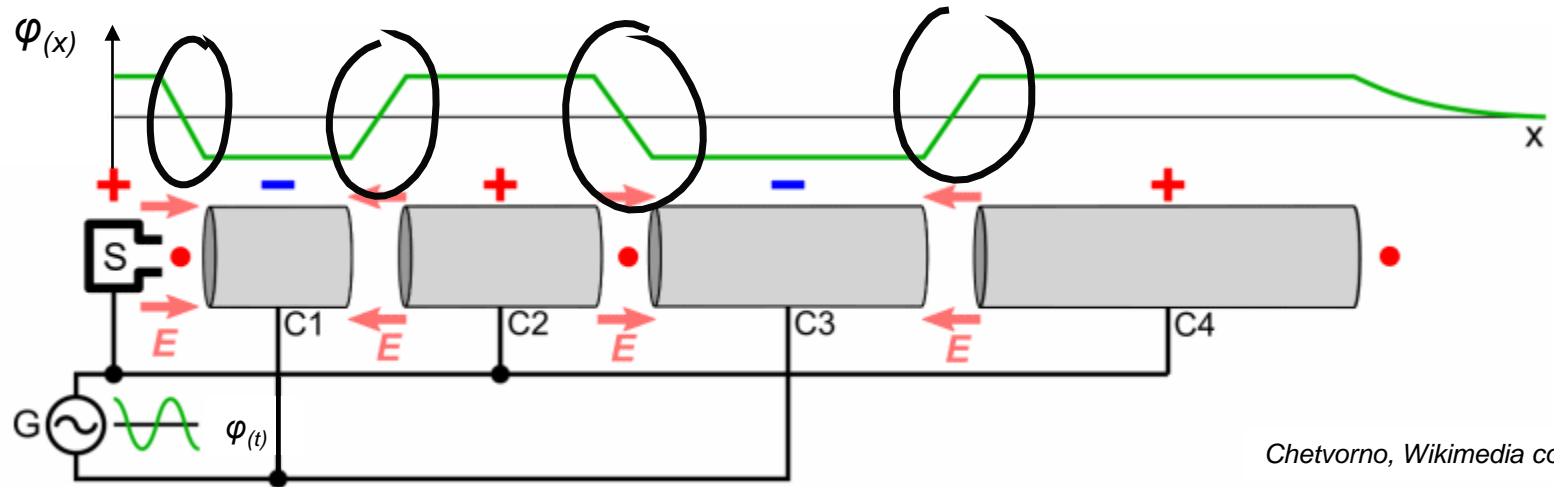
Részecskegyorsítók

Lineáris gyorsító (Linear accelerator, Linac)

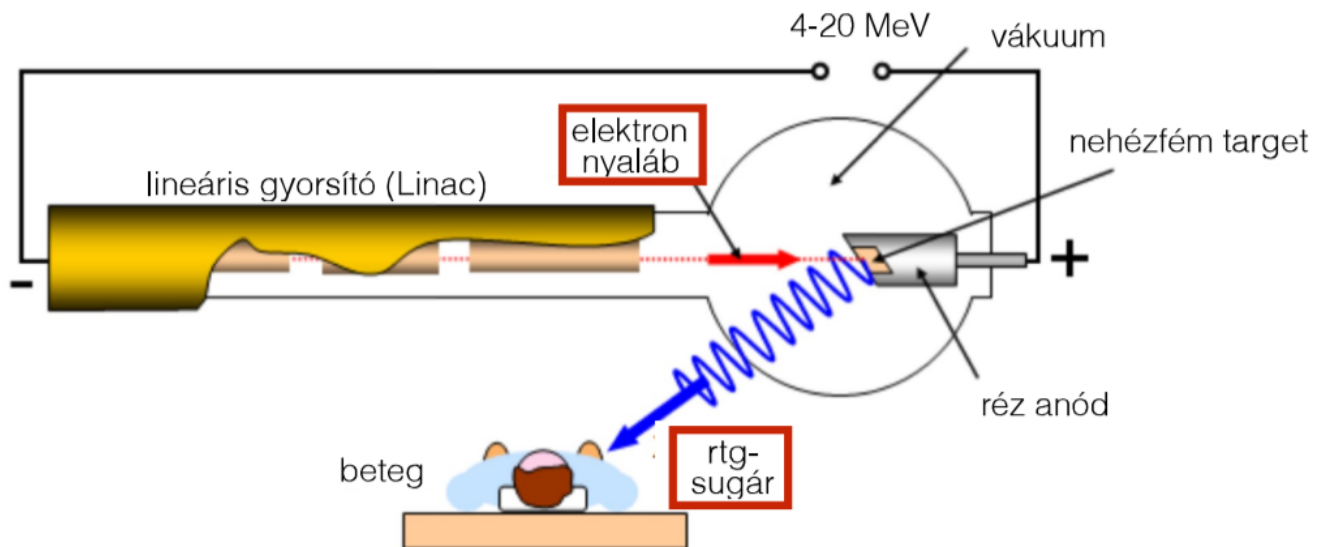


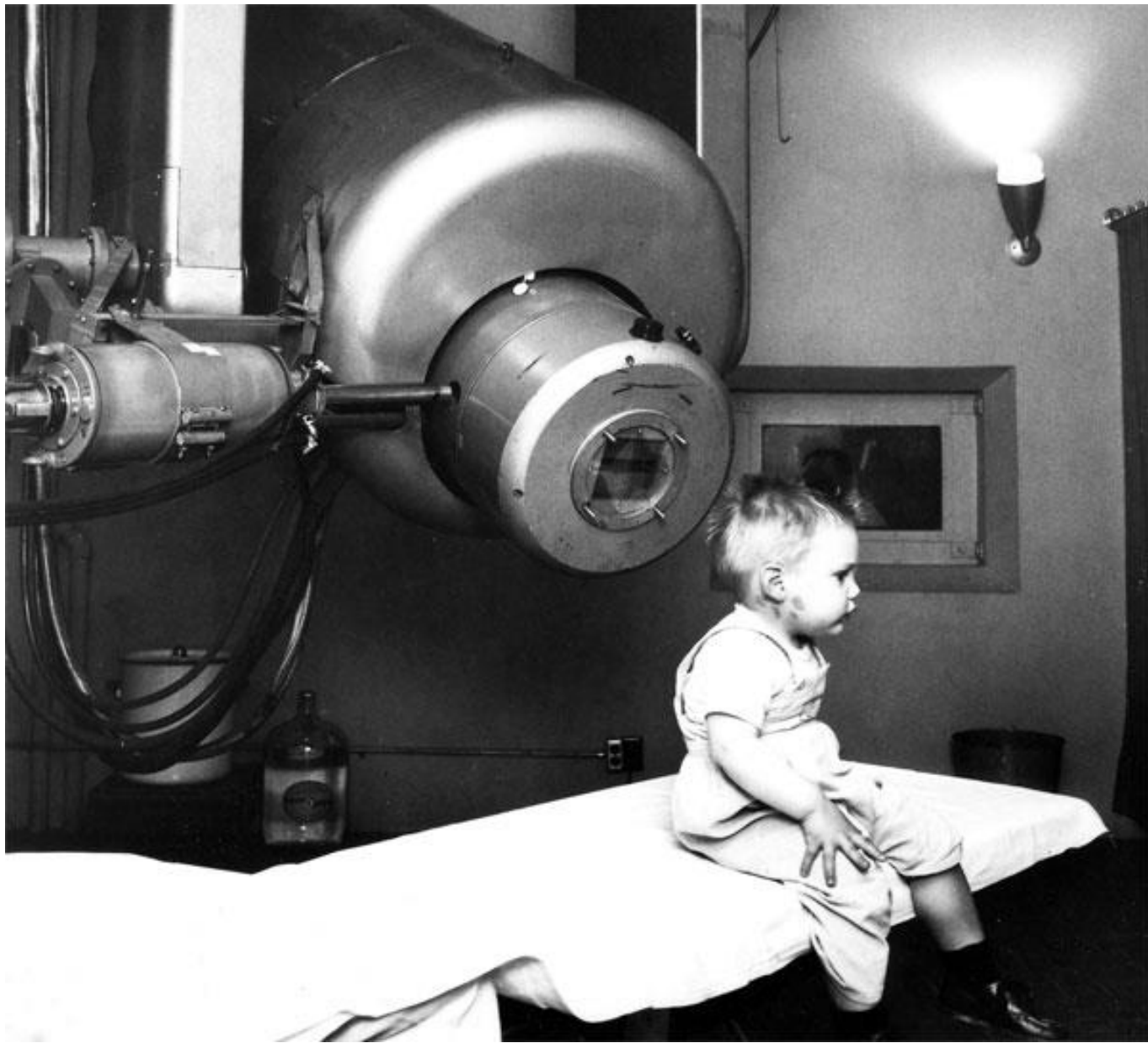
Részecskegyorsítók

Lineáris gyorsító (Linear accelerator, Linac)



Chetvorno, Wikimedia commons

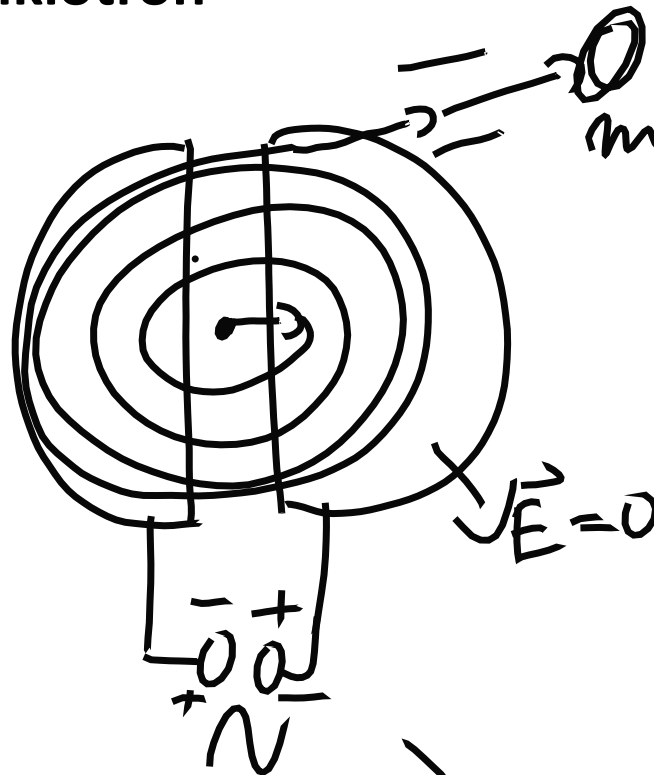
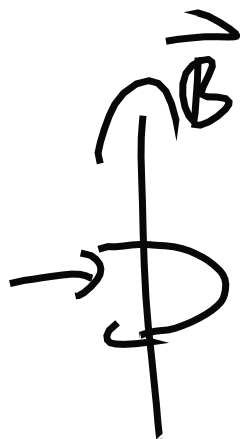
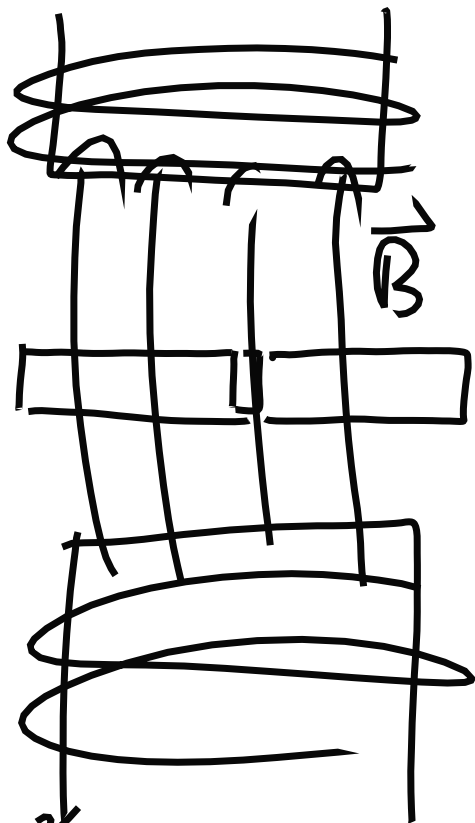






Részecskegyorsítók

Ciklotron



$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

$$m \cdot a = q \cdot \vec{E}$$

$$a = \frac{q \cdot \vec{E}}{m}$$

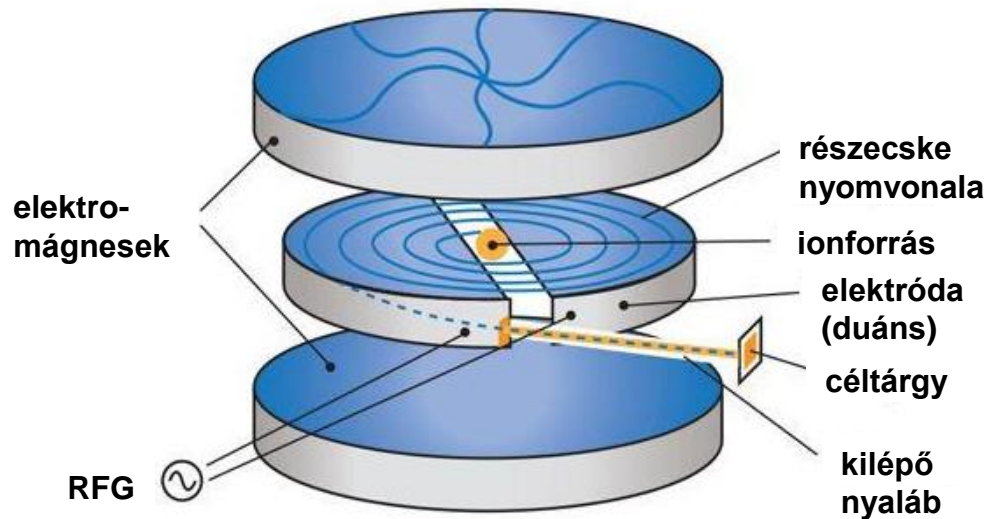
$$\frac{m \cdot v^2}{r} = F = q \cdot v \cdot B$$

$$\frac{m \cdot v}{r} = q \cdot B$$

$$\frac{r}{v} = t$$

Részecskegyorsítók

Ciklotron



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

A duánsok polaritása váltakozik.

A mágneses tér körpályára kényszeríti a részecskéket (Lorentz erő)

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

Néhány 10 MeV energiák érhetőek el.

Elsősorban pozitron emittáló izotópok előállítására (PET-hez).