

Biofizika I

11. Röntgensugárzás előállítása, spektruma, kölcsönhatása az anyaggal

Liliom Károly

2023. 11. 15.

*liliom.karoly@med.semmelweis-univ.hu
karoly.liliom.mta@gmail.com*

Röntgen és kora

1895: Röntgen felfedezi az ismeretlen "X" sugárzást

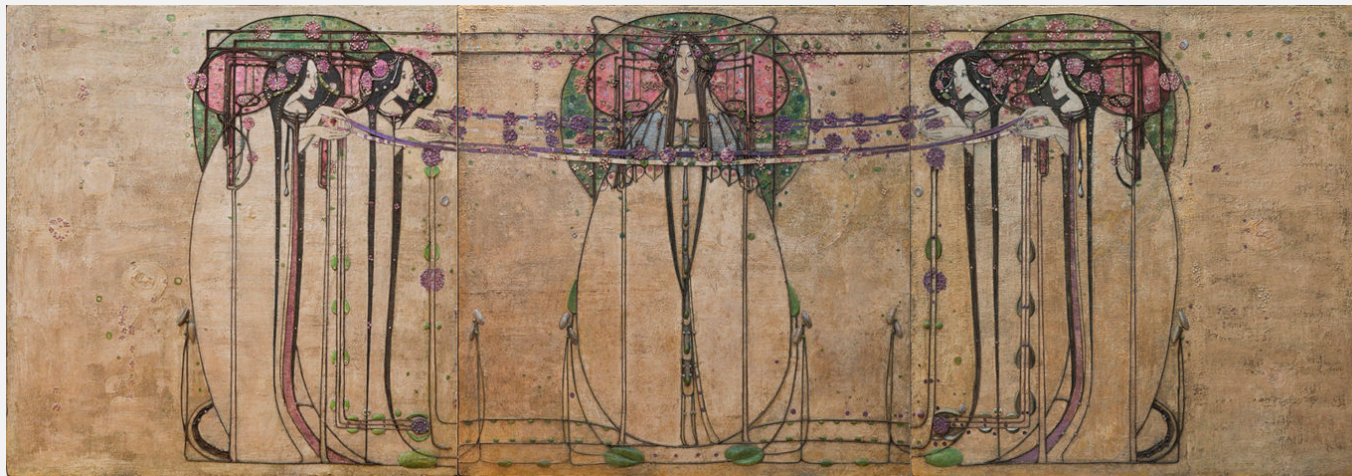
(Alfred Nobel végrendelete, mozgóképek, automobil...)

1896: Becquerel felfedezi a radioaktivitást

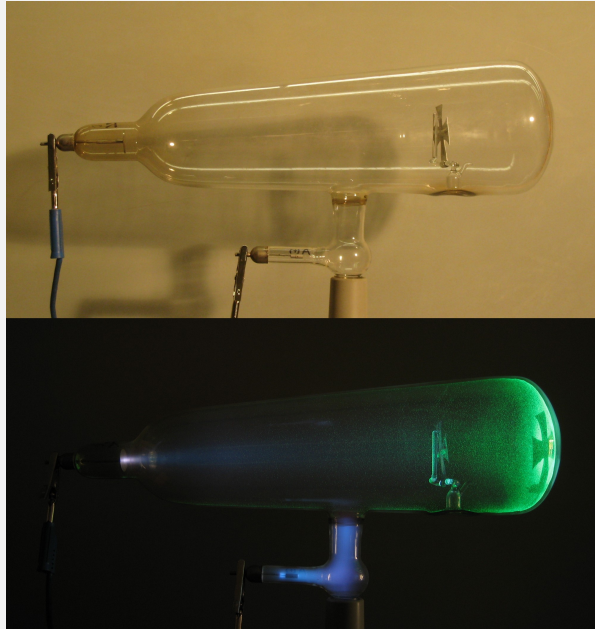
1897: Thomson felfedezi az elektront

1898: Pierre és Marie Curie felfedezi a polóniumot és a rádiumot

1900: Max Planck dolgozata a hőmérsékleti sugárzásról...



Margaret and Frances MacDonald – Art Nouveau



a felfedezés

- A Crookes-cső közelébe helyezett bárium platinocianid ernyő fluoreszkál.
- Röntgen fekete kartonba tekerte a csövet és vizsgálta a fluoreszkálást. November 8-án észrevette, hogy a Crookes-csővel egy vonalban lévő asztal alsó fiókjában a becsomagolt fotólemez megfeketedett úgy, hogy a felső fiókban lévő kulcs képét mutatta! Ezután szisztematikusan vizsgálta az ismeretlen sugárzást, megállapította, hogy a sugárzás áthatol fán, papíron, ruhán, sőt több fémen is, kivéve a nagyobb sűrűségű fémeket, pl. az ólmot.
 - 1895. december 28-án „Egy újfajta sugárzásról: előzetes közlemény” címmel eredményeit beküldte a würzburgi Fizikai-Orvosi Folyóirathoz.



Wilhelm Conrad Röntgen

1901: Fizikai Nobel-Díj
a röntgensugárzás felfedezéséért

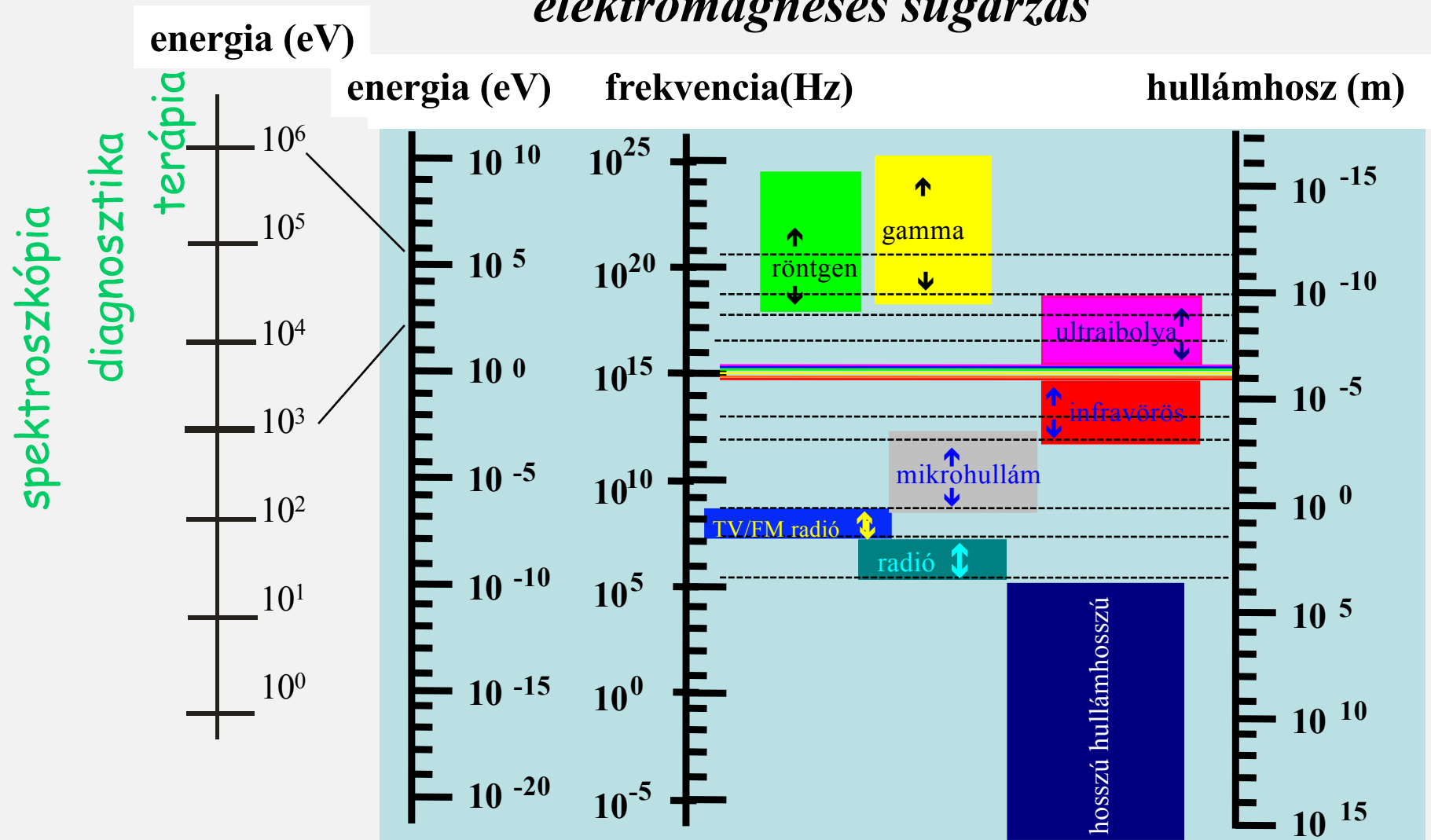
Felfedezés – 1895. november
Publikálás – 1895. december 28.
(1896-ban ezer fölötti publikáció...
Orvosi alkalmazás – 1896. január
- Edison 1896 májusra kifejleszti
a fluoroszkópot...



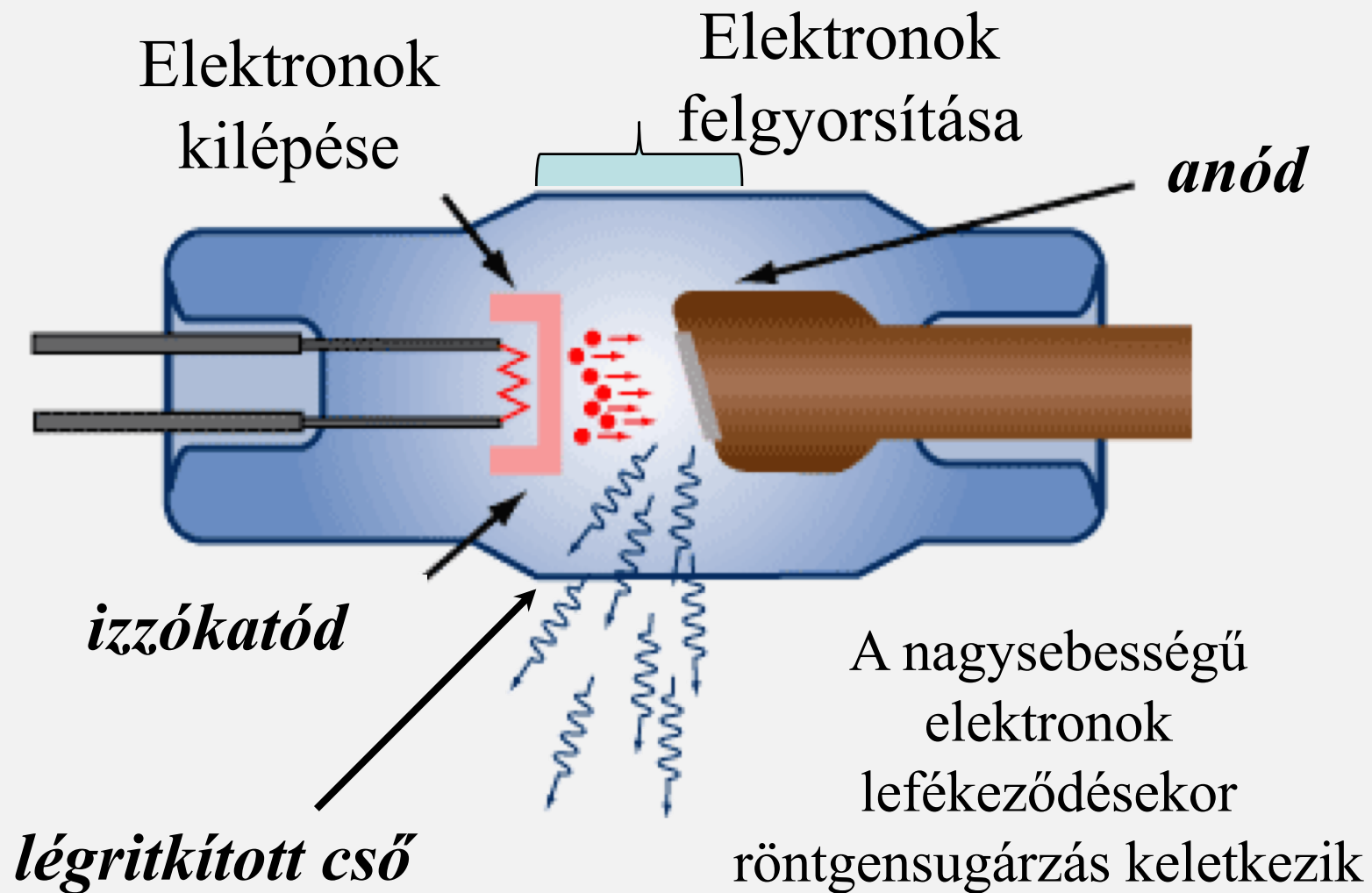
1895. december 22.: felvétel
Röntgen feleségének kezéről

A röntgensugárzás

elektromágneses sugárzás

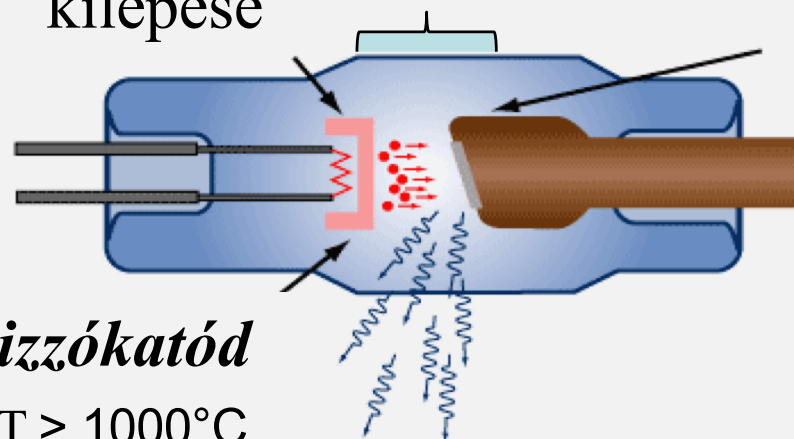


A röntgenső felépítése



A röntgencső működése

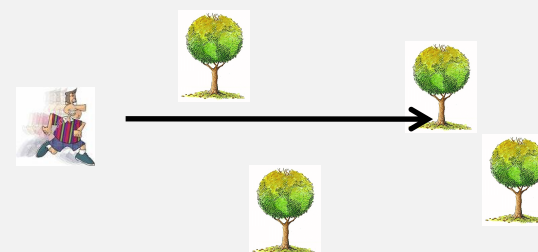
Elektronok
kilépése



izzókatód

$T > 1000^{\circ}\text{C}$

miért kell vákuum?

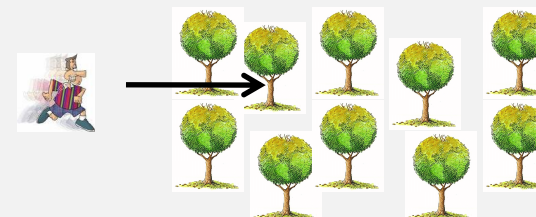


vákuum $\sim 10^{-4}$ Pa

szabad úthossz ~ 10 cm

$$I_{anod} = \frac{Q}{t} = \frac{n * e}{t}$$

$$P_{elektromos} = UI$$

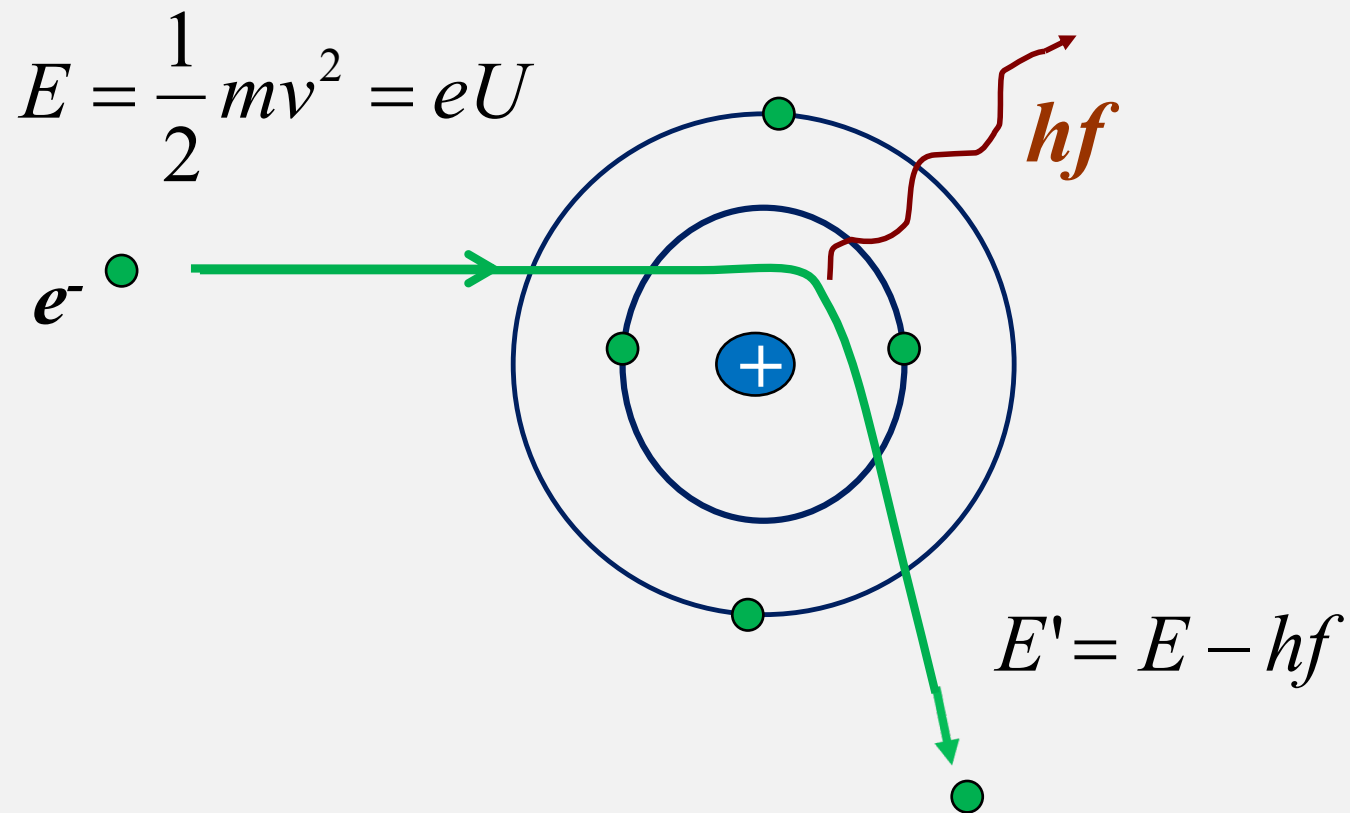


levegőben normál nyomáson
a szabad úthossz ~ 70 nm

A röntgensugárzás keletkezésének mechanizmusa



1. Fékezési sugárzás



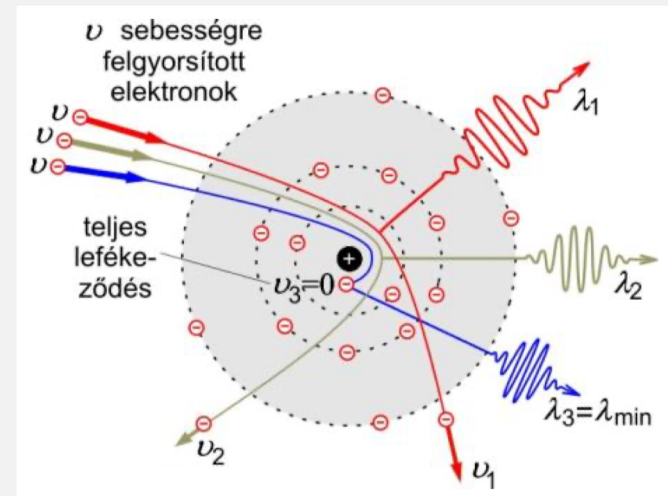
A belépő elektron eltérül és lelassul a mag erőterében.

Az eltérülő elektron mozgási energiája csökken.

Az energiakülönbséggel azonos energiájú foton keletkezik.

A foton energiája függ a

- a beérkező elektron energiájától
- az eltérülő elektron pályájától
- a target (anód) rendszámától



A maximális fotonenergia a belépő elektron mozgási energiájával egyenlő – Duane-Hunt szabály

A fékezési sugárzás spektruma

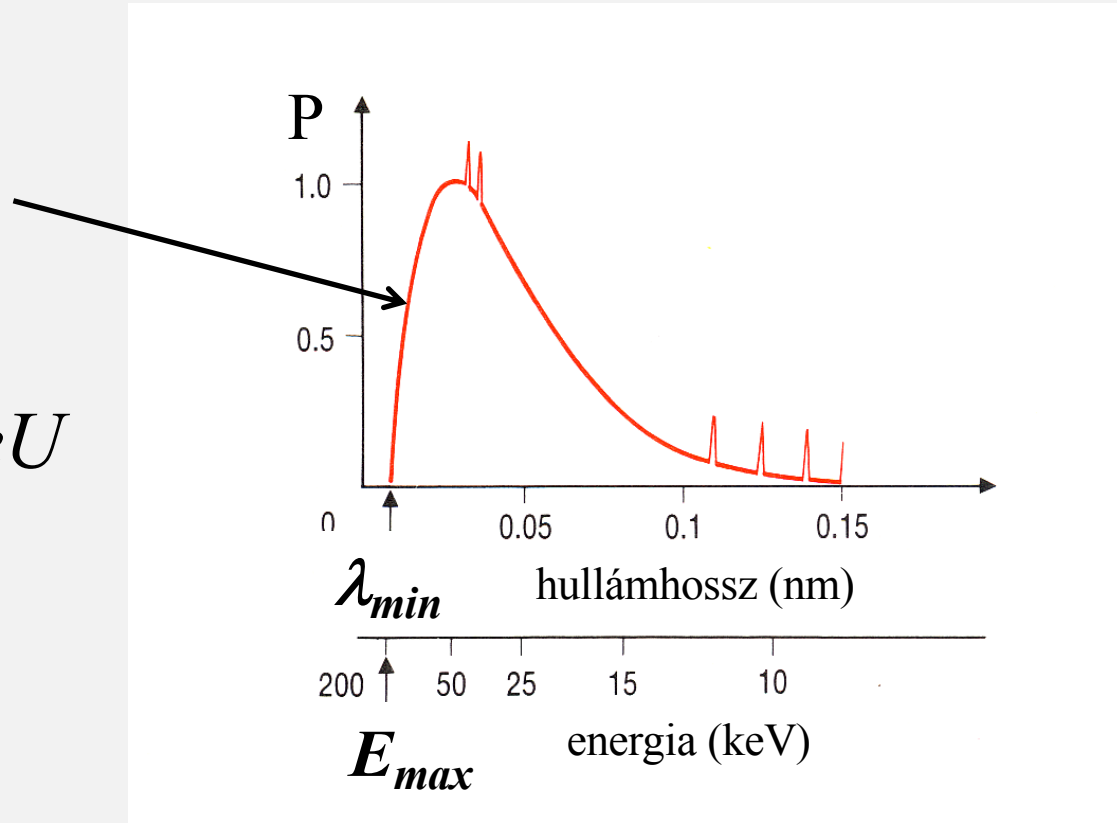
folytonos
spektrum

$$E_{\max} = \frac{1}{2}mv^2 = eU$$

$$eU = h \frac{c}{\lambda_{\min}}$$

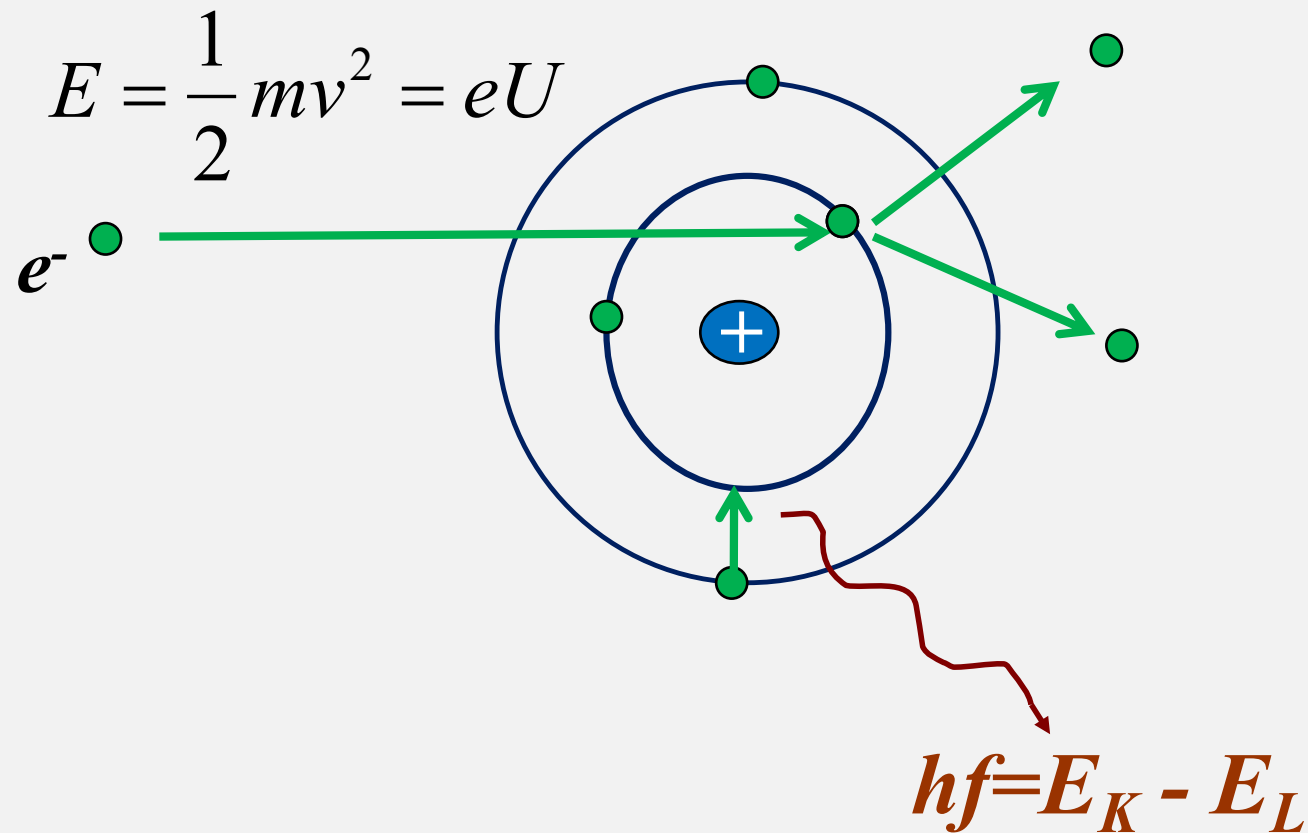
$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

Duane-Hunt szabály



A röntgensugárzás keletkezésének mechanizmusa

2. Karakterisztikus sugárzás



A belépő elektron – ha energiája elég nagy – belső héjon lévő elektront gerjeszthet/ionizálhat.

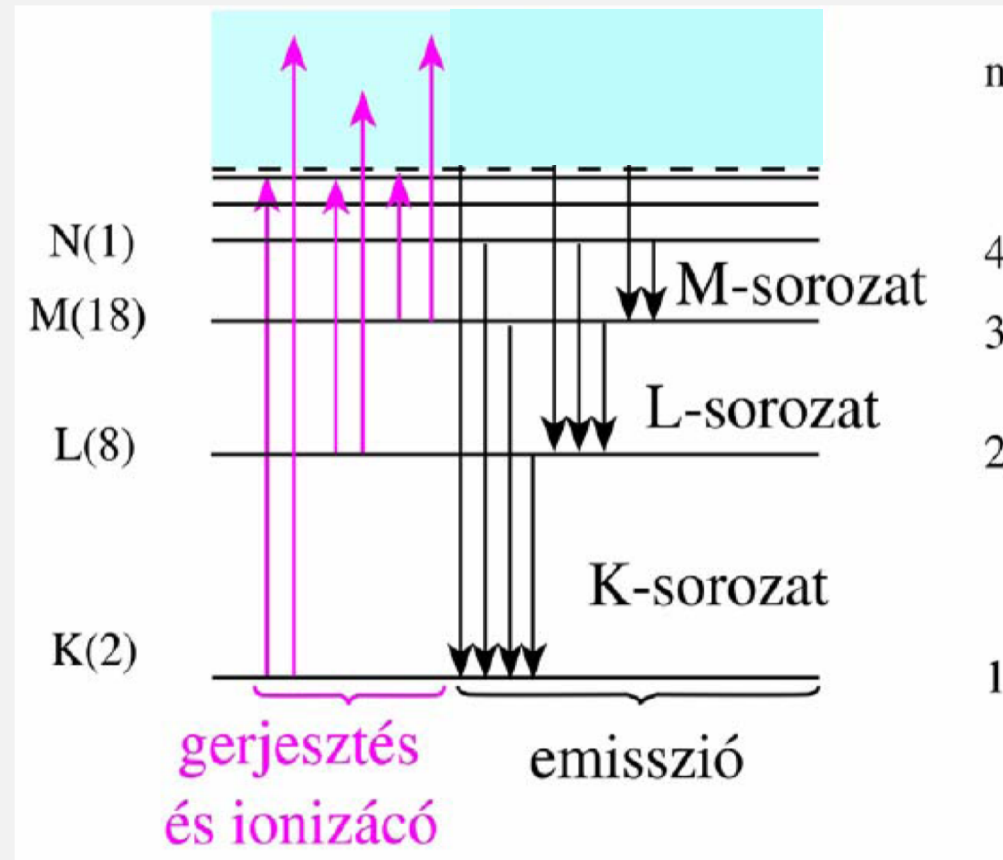
A távozó elektron helyén “lyuk” marad.

Az energia-minimum eléréséhez a betöltetlen állapotot egy magtól távolabbi elektron tölti be.



A héjak közötti energiakülönbséggel azonos energiájú foton keletkezik.

Lehetséges energiaátmenetek



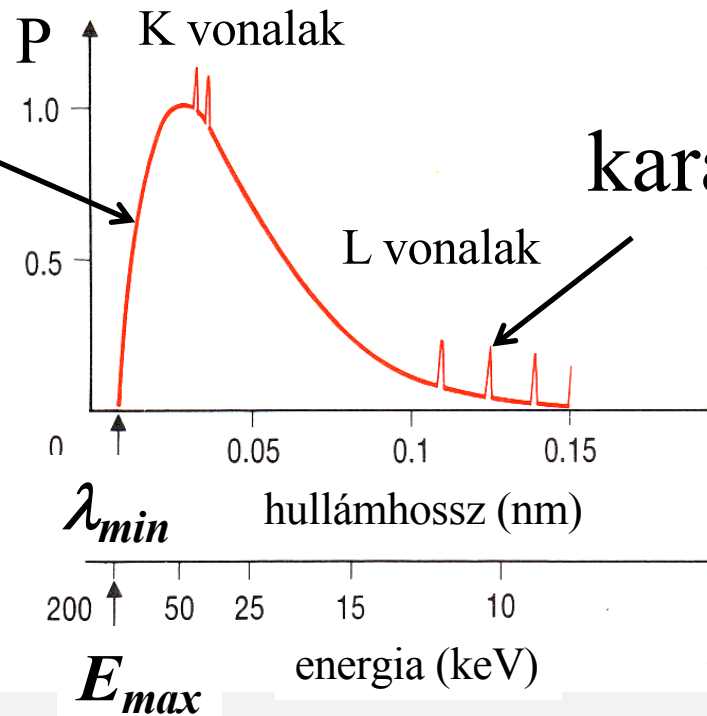
A lehetséges fotonenergiák a target elektronszerkezetétől függenek – karakterisztikus az adott anyagra

A röntgensugárzás spektruma

Folytonos
fékezési spektrum

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

Duane-Hunt szabály



Vonalas
karakterisztikus
spektrum

A röntgencső teljesítménye és hatásfoka

$$P = cIU^2Z$$

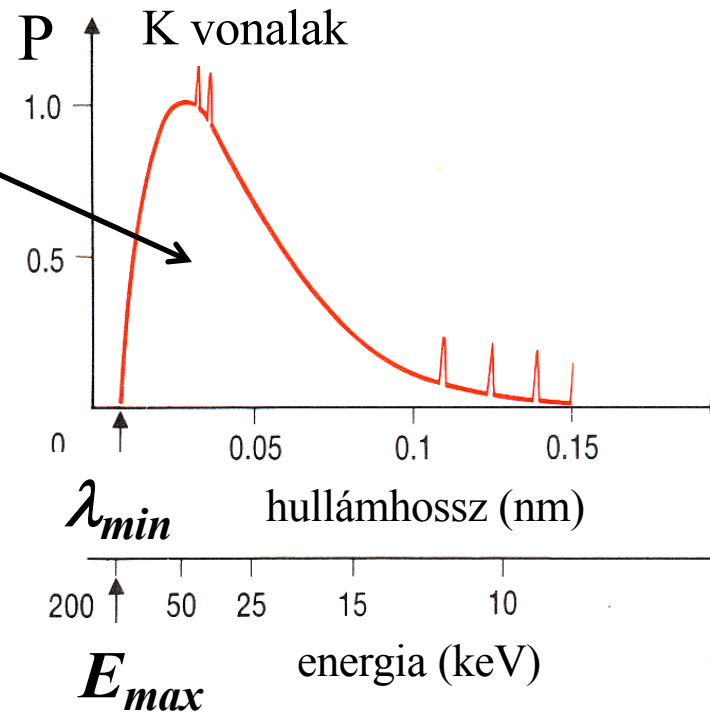
$$c = 1,1 \times 10^{-9} [1/V]$$

bemeneti teljesítmény:

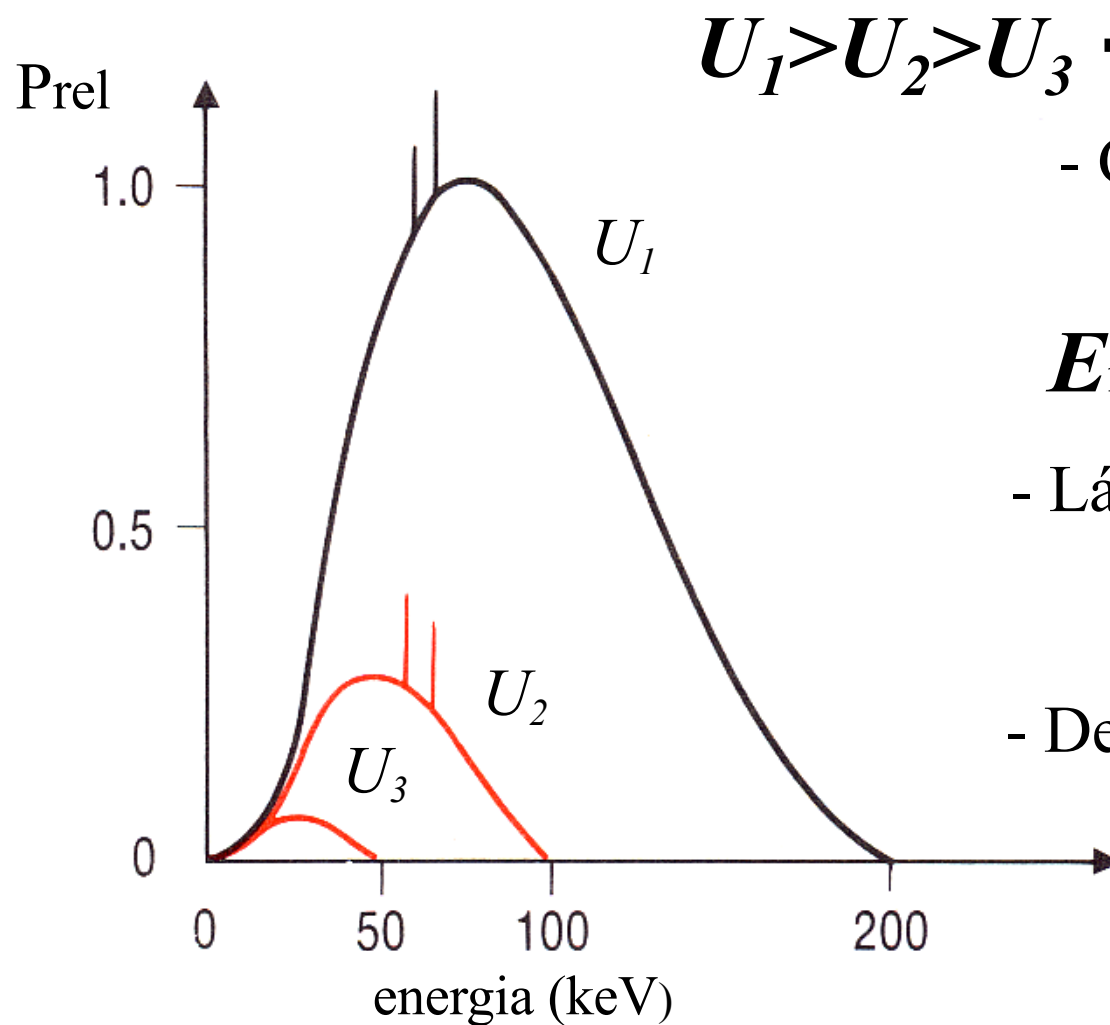
$$P' = IU$$

$$\eta = \frac{P}{P'} = cUZ$$

$$\eta < 1\%$$



ha csökken a gyorsítófeszültség



$$U_1 > U_2 > U_3 \rightarrow P_1 > P_2 > P_3$$

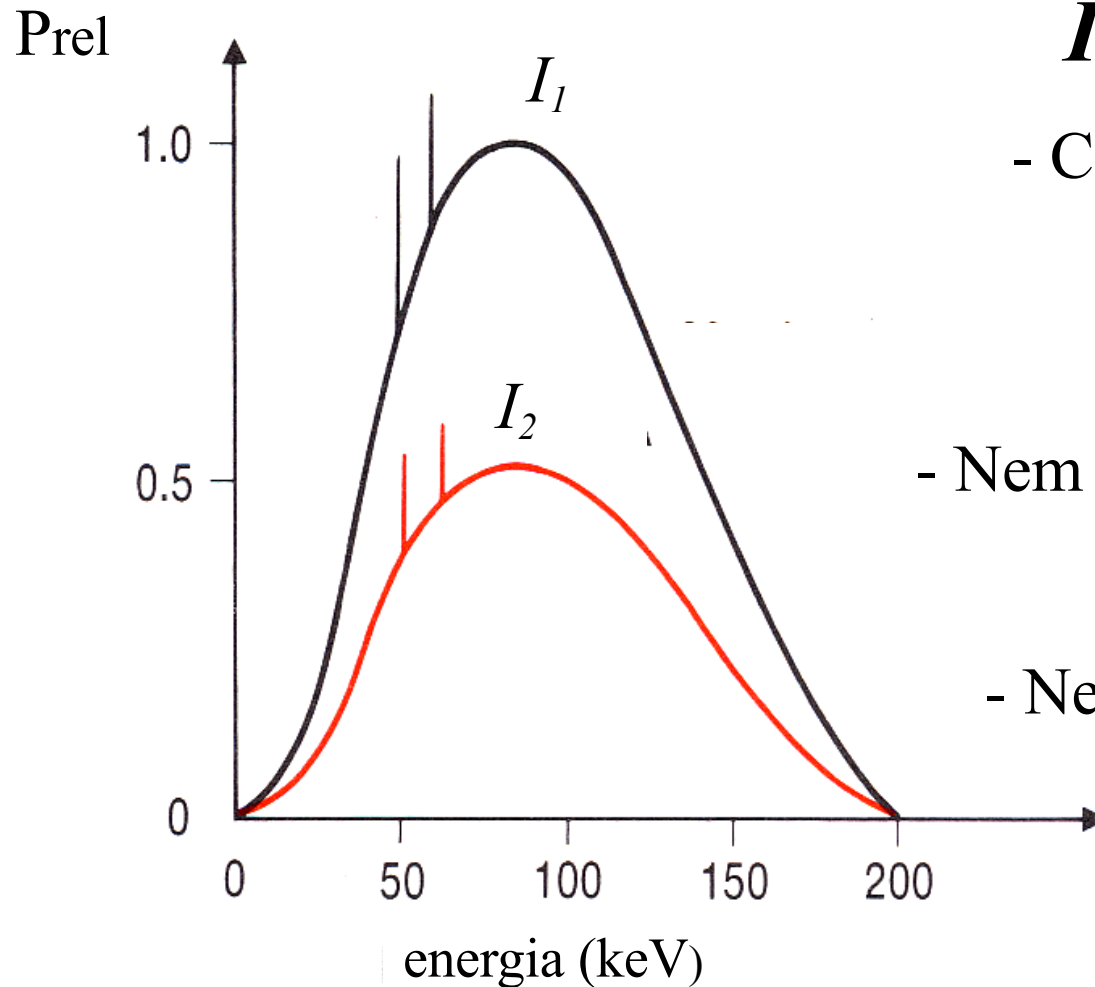
- Csökken a teljesítmény

$$E_{\max 1} > E_{\max 2} > E_{\max 3}$$

- Lágyl a fékezési sugárzás

- De nem változik a
karakterisztikus
vonalak helye!

ha csökken az anódáram erőssége



$$I_1 > I_2 \rightarrow P_1 > P_2$$

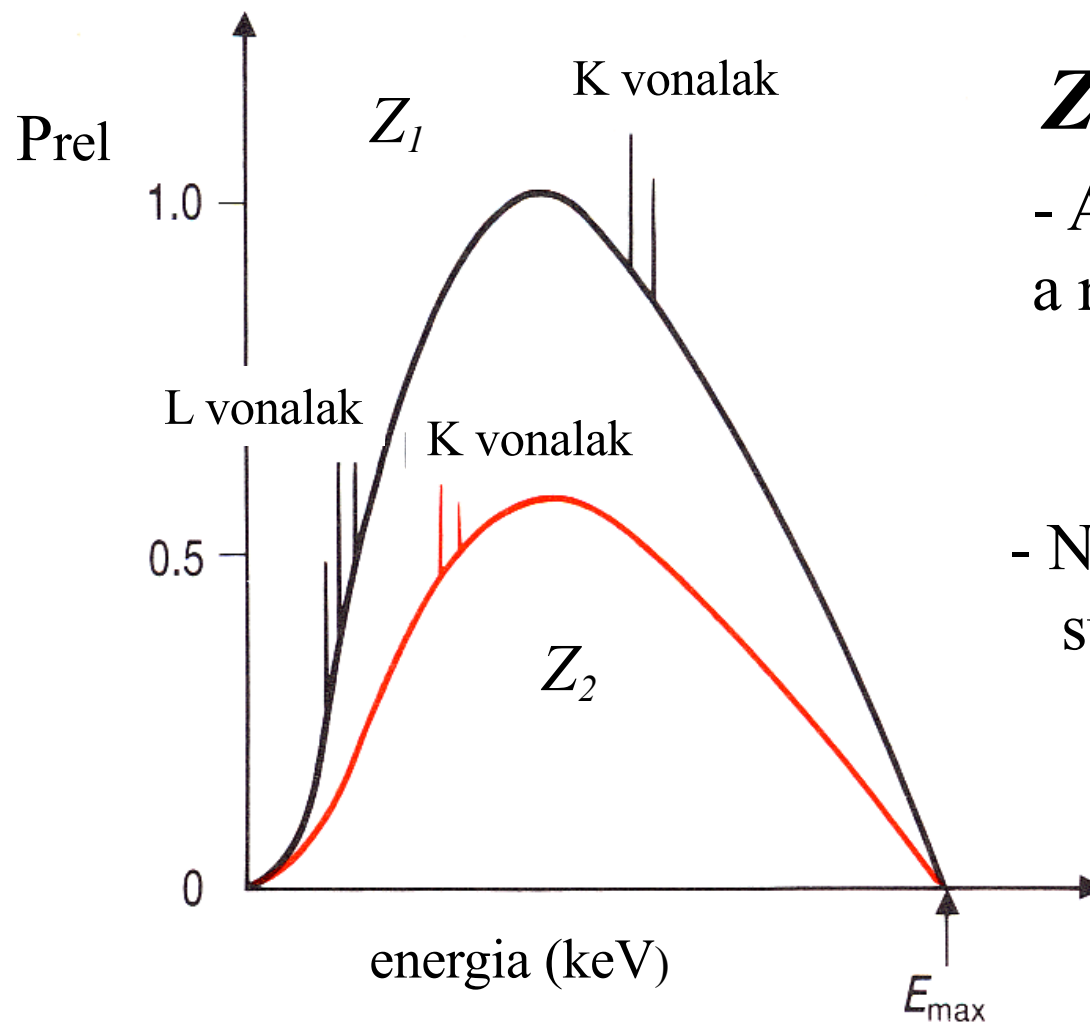
- Csökken a teljesítmény

$$E_{\max 1} = E_{\max 2}$$

- Nem lágyul a fékezési sugárzás

- Nem változik a
karakterisztikus
vonalak helye

ha változik az anód anyaga:



$$Z_1 > Z_2 \rightarrow P_1 > P_2$$

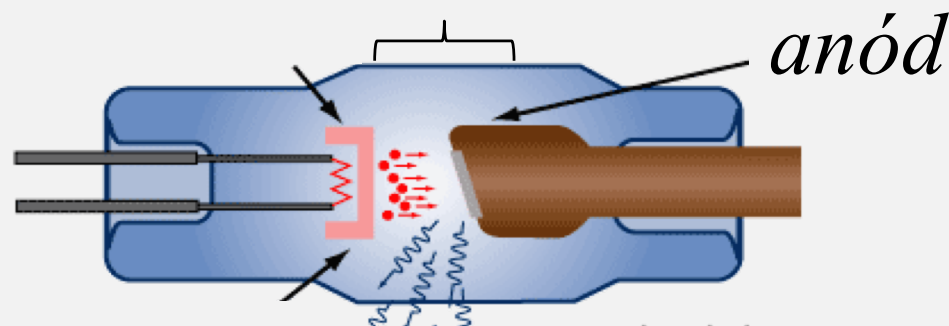
- A teljesítmény arányos a rendszámmal

$$E_{max1} = E_{max2}$$

- Nem változik a fékezési sugárzás keménysége

- De változik a karakterisztikus vonalak helye!

Röntgencső az orvosi gyakorlatban



Az anód *anyaga*: - minél nagyobb rendszám
- minél magasabb olvadáspont

Az anód *fókusza* (az elektronok becsapódásának helye)

- kis fókusz → élesebb kép
- nagy fókusz → jobb hőeloszlás

Az anód *helyzete*: - álló - terhelhetőség: néhány W/mm^2

(fogászati gyakorlatban elég)

- forgó - egyenletesebb hőeloszlás, terhelhetőség:
 10000 W/mm^2

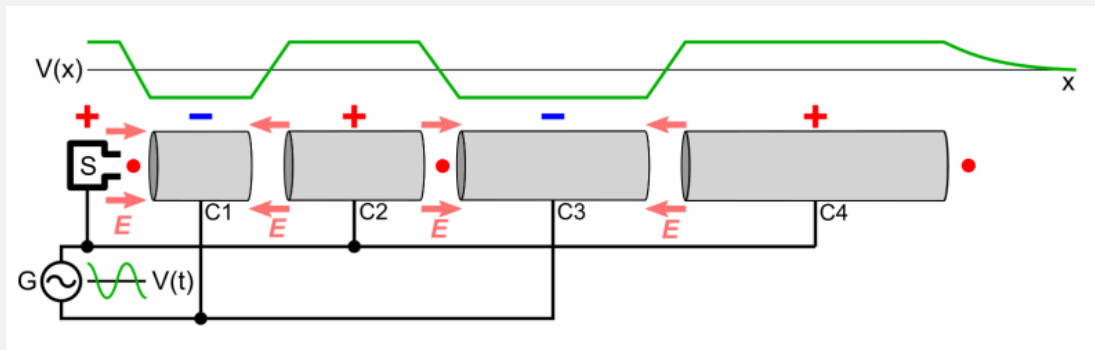
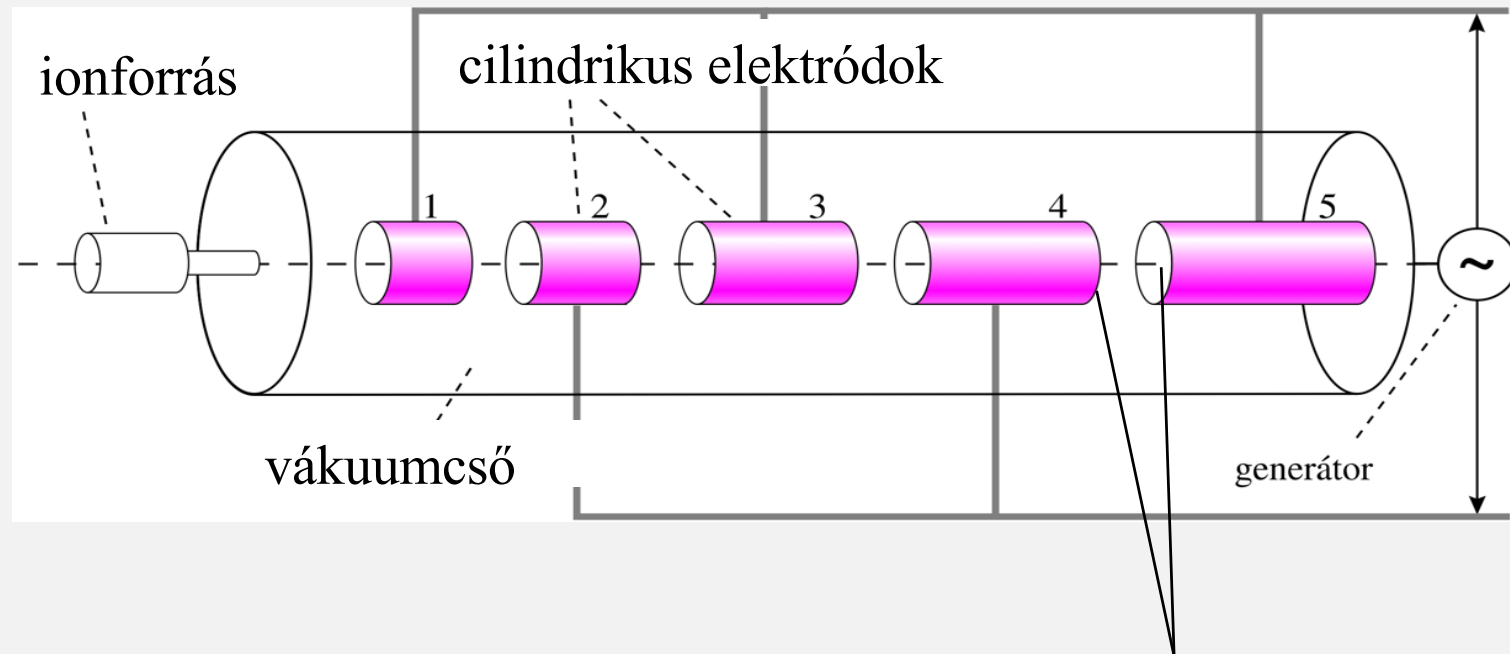
Gyorsítófeszültség: 25-200 kV, anódáram: 1-1000 mA,

anód anyaga: W (mammográfiában Mo)

A röntgensugárzás előállításának
speciális módszerei:

részecskegyorsítók

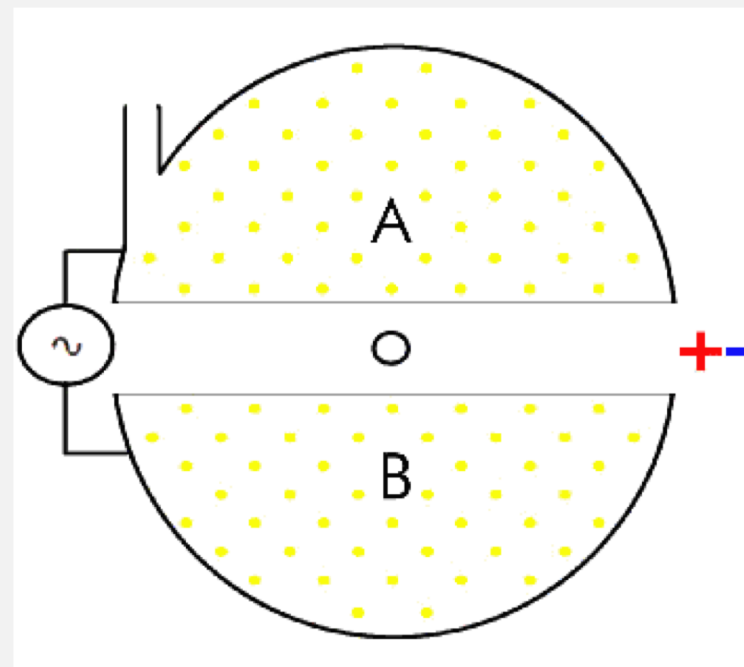
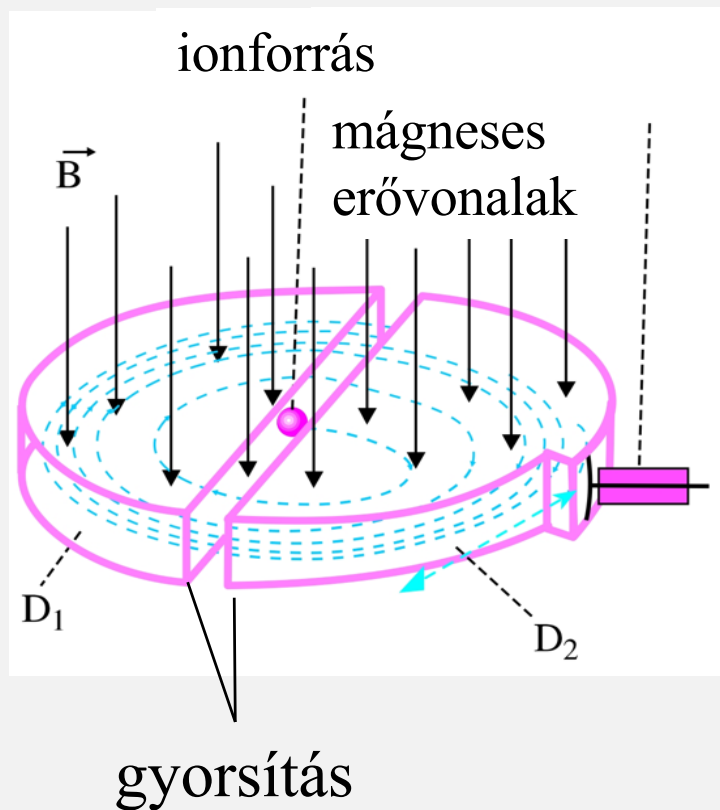
Lineáris gyorsítók



gyorsítás

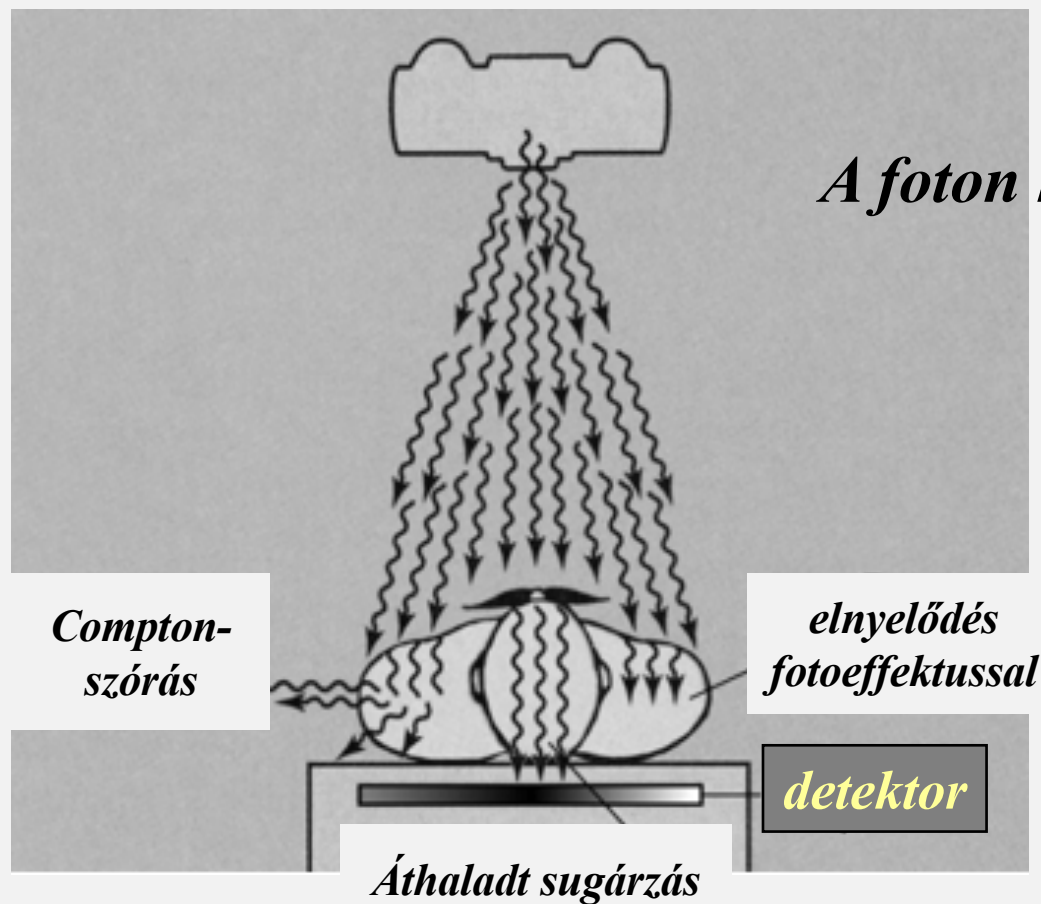
Alkalmazás:
sugárterápia
(4-25 MeV)

Ciklotron



mágneses tér (Lorenz-erő) \rightarrow körpálya
elektromos tér \rightarrow gyorsulás; pálya sugara nő
orvosi alkalmazás: elsősorban PET izotópok előállítása

A röntgendiagnosztika alapja: a sugárzás elnyelődése



A foton kölcsönhatásának lehetőségei:

fotoeffektus

Compton szórás

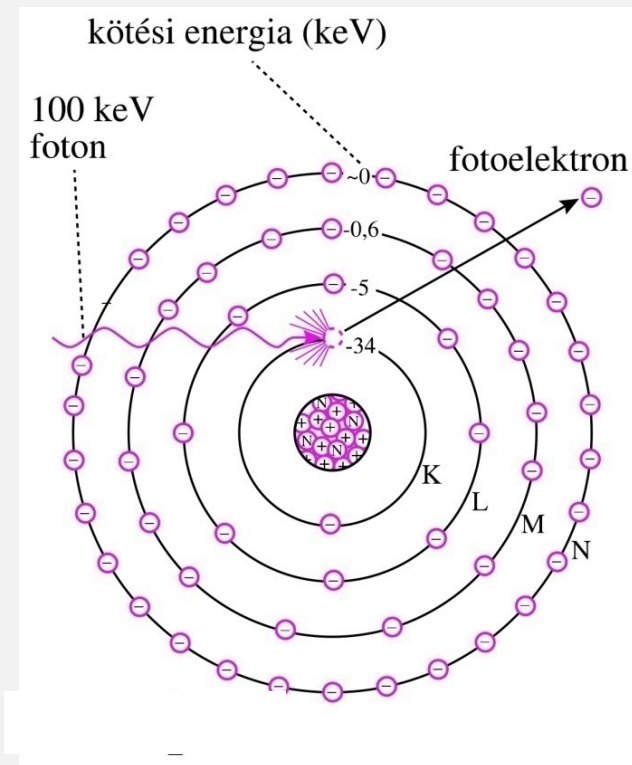
párhelyezés

rugalmas szórás
(nincs energiaváltozás)

A kölcsönhatás mechanizmusa

Fotoeffektus

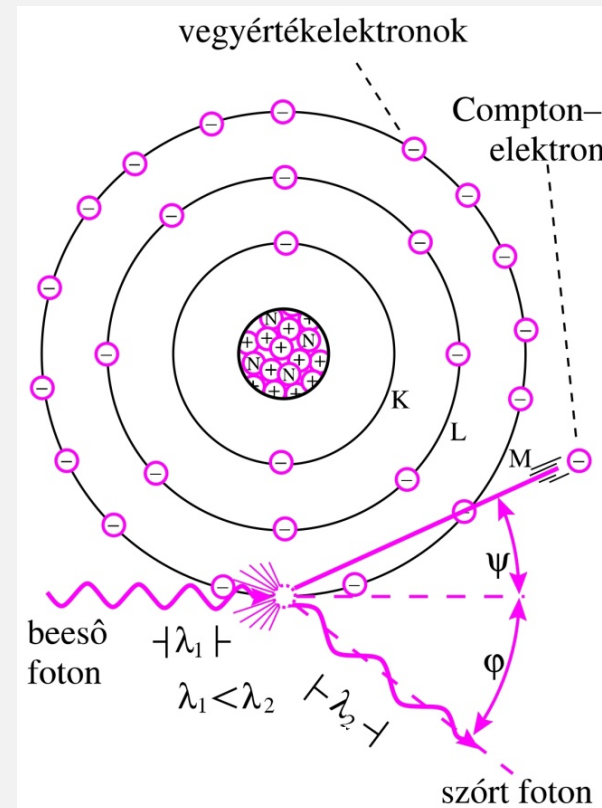
$$hf = E_{\text{köt}} + \frac{1}{2} m_e v^2$$



A kölcsönhatás mechanizmusa

Compton-szórás

$$hf = E_{\text{köt}} + \frac{1}{2}m_e v^2 + hf'$$



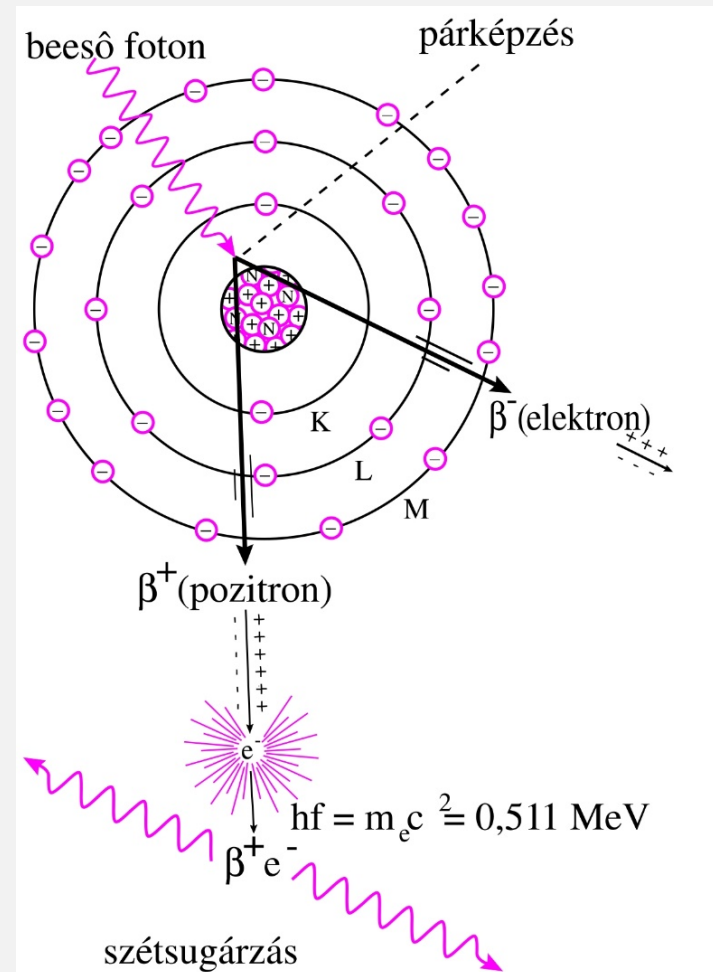
A kölcsönhatás mechanizmusa

Pároképzés

$$hf = 2m_e c^2 + 2\frac{1}{2}m_e v^2$$

$$hf \geq 2m_e c^2$$

$$hf \geq 1.02 \text{ MeV}$$



A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal

Intenzitás gyengülésének törvénye: $J = J_0 e^{-\mu x}$

μ függ az abszorbens sűrűségétől !
viszont μ és a sűrűség aránya állandó

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

μ_m [cm²/g] : tömeggyengítési állandó

Függ – a foton energiájától
– az abszorbens rendszámától

Intenzitás gyengülésének törvénye a tömeggyengítési állandóval:

$$J = J_0 e^{-\mu_m x_m}$$

$$x_m = \rho x \quad \mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

x_m [g/cm²]: felületi sűrűség

$$\left. \begin{array}{l} \mu = \frac{0.693}{D} \\ D_m = \rho D \end{array} \right\} \quad \boxed{\mu_m = \frac{0.693}{D_m}}$$

A részfolyamatok (abszolút és relatív) valószínűsége függ

- a foton energiájától
- az abszorbens rendszámától

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

fotoeffektus Compton-szórás párképzés

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

	rendszámfüggés	energiafüggés
fotoeffektus	$\tau_m \sim Z^3$	$\tau_m \sim 1/E^3$
Compton-szórás	\sim független	enyhén csökkenő

Szűrők alkalmazása

A sugárzás tulajdonságainak (spektrum, térbeli eloszlás) módosítása

A felépítésből
adódó **szerkezeti elemek** szűrő
hatása.

Pl. az anód anyaga, röntgencső
fala, sugárkapu, stb.

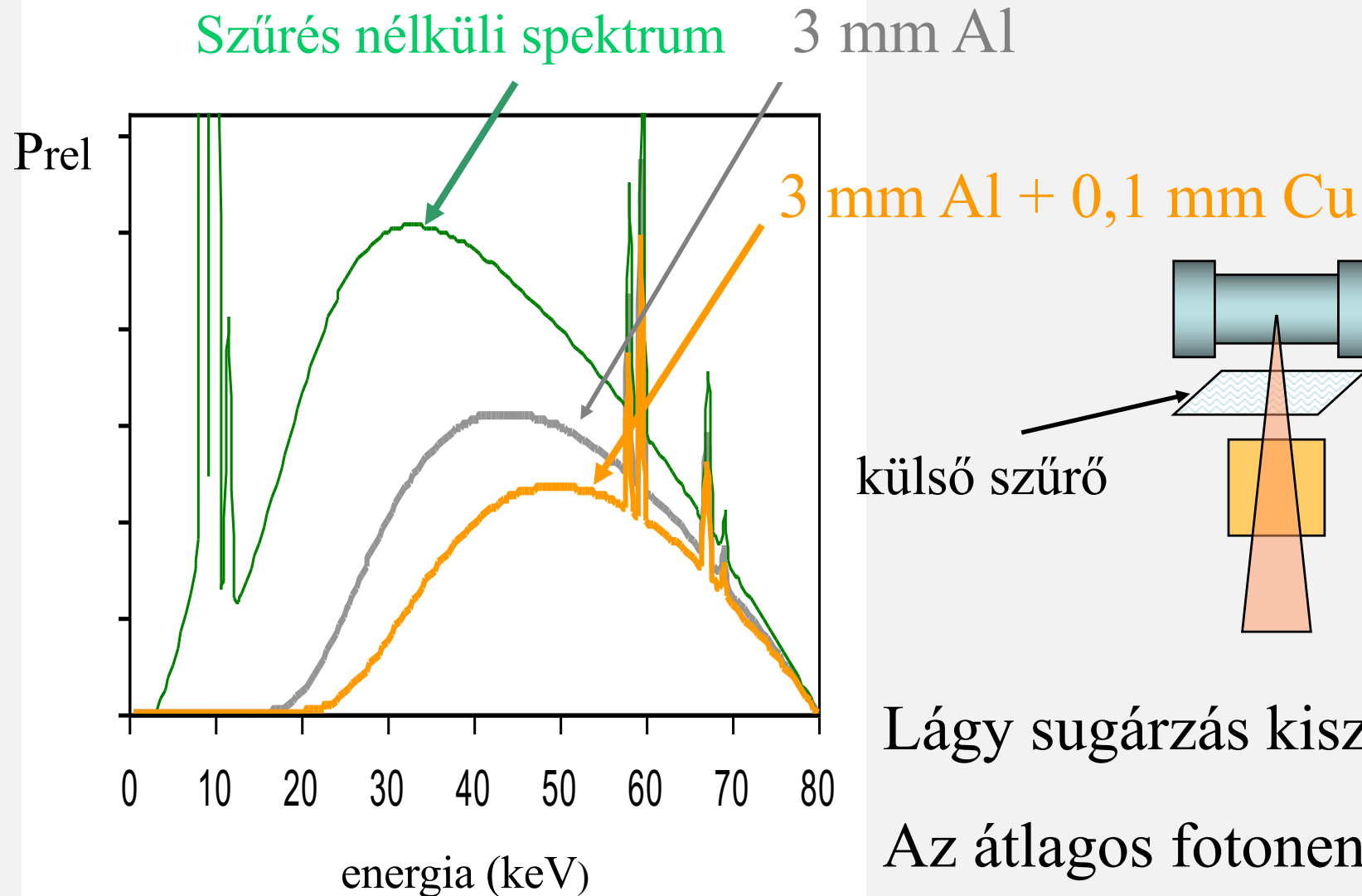
A sugár útjába helyezett
külső szűrő,
általában Al vagy Cu lemezek.

Ezek segítségével szabályozhatunk.

Hátránya: csökkenti az intenzitást
növeli a felvétel idejét

Előnye: kb 80%-kal csökkentheti a paciens sugárterhelését

Szűrők alkalmazása



Lágy sugárzás kiszűrése

Az átlagos fotonenergia
növelése

Ellenőrző kérdések

A röntgenső felépítése

A röntgenső paraméterei

A fékezési sugárzás keletkezése és spektruma

A határhullámhossz oka, kiszámítása

A karakterisztikus sugárzás keletkezése és spektruma

A röntgensugárzás spektrumát befolyásoló paraméterek

Külső szűrők használata, hatása a kilépő röntgensugárzásra

Kapcsolódó fejezetek:

Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika

II. 3.1

3.1.1

3.1.2

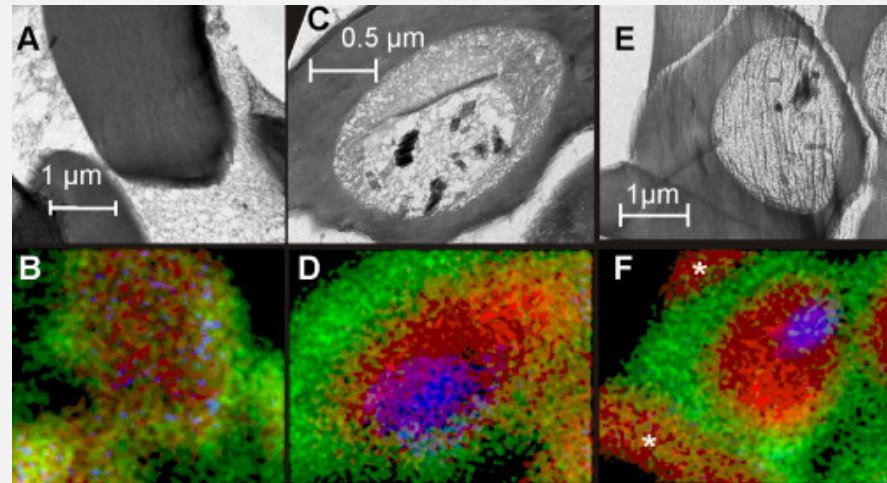
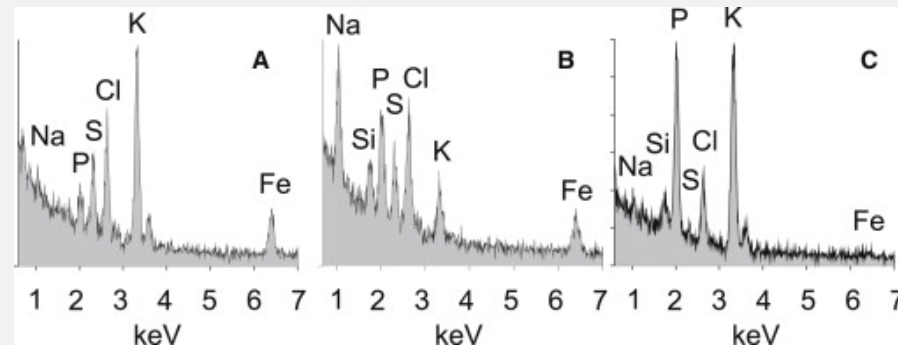
3.1.3

3.1.4

3.1.5

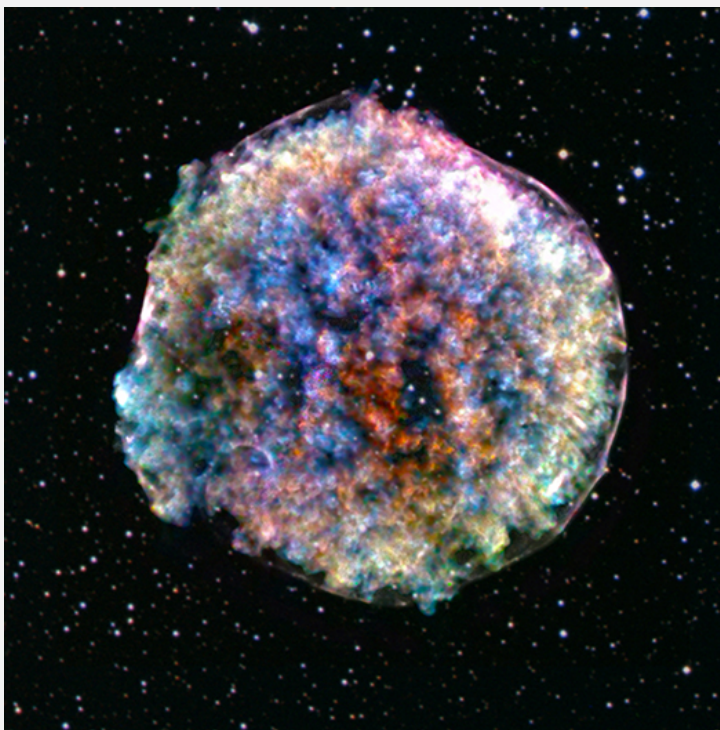
3.1.6

Elektronmikroszkóp: a karakterisztikus röntgensugárzás segítségével az atomi összetétel meghatározható



Mauritz JM, et al. (2011) X-ray microanalysis investigation of the changes in Na, K, and hemoglobin concentration in plasmodium falciparum-infected red blood cells. *Biophys J.* 100(6):1438-45

Röntgensugárzás nagyenergiájú folyamatokban keletkezik



Tycho Brahe szupernova észlelése 1572, CHANDRA űr-röntgentávcső: 2019
Red: 0.3-1.2 keV, Yellow: 1.2-1.6 keV, Cyan: 1.6-2.26 keV, Navy: 2.2-4.1 keV, Purple: 4.4-6.1 keV