

Biofizika I.

11. Röntgensugárzás előállítása, spektruma, kölcsönhatása az anyaggal

Dr. Varga Andrea
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

2025.11.19.

matkovicsne.andrea@semmelweis.hu



SEMMELWEIS
EGYETEM 1769

Röntgen és kora

1895: Röntgen felfedezi az ismeretlen "X" sugárzást

1896: Becquerel felfedezi a radioaktivitást

1897: Thomson felfedezi az elektront

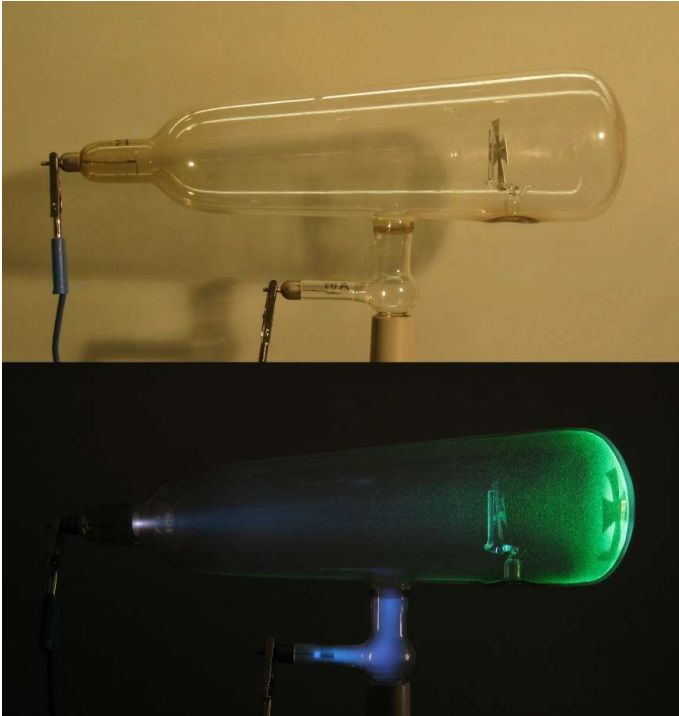
1898: Pierre és Marie Curie felfedezi a polóniumot és a rádiumot

1900: Max Planck dolgozata a hőmérsékleti sugárzásról...



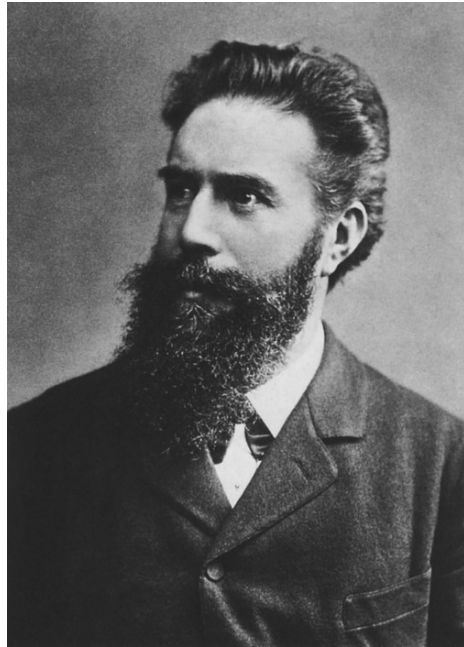
Margaret and Frances MacDonald - Art Nouveau

A felfedezés



A katódsugárcső közelébe helyezett bárium platinocianid ernyő fluoreszkál.

- Röntgen fekete kartonba tekerte a csövet és vizsgálta a fluoreszkálást. November 8-án észrevette, hogy a katódsugárcsővel 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

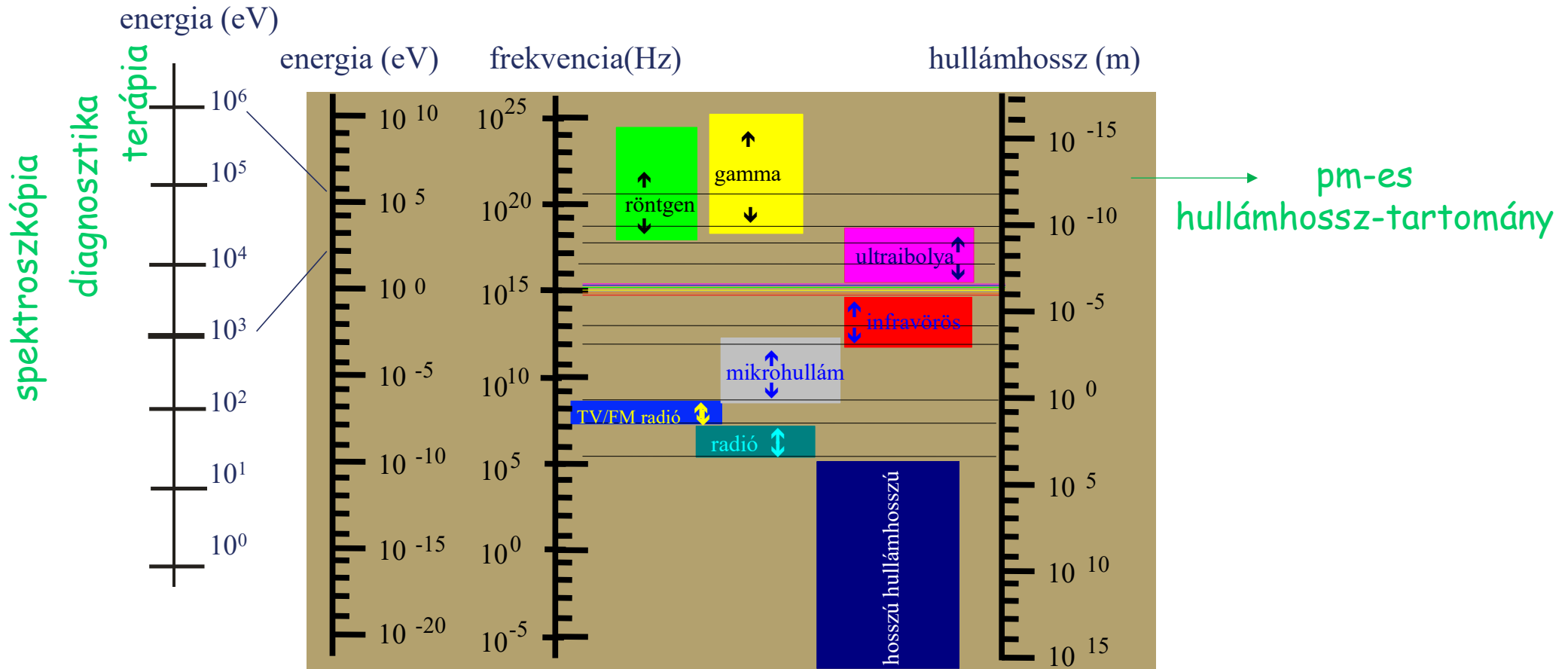
1901: Fizikai Nobel-Díj
a röntgensugárzás
felfedezéséért

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

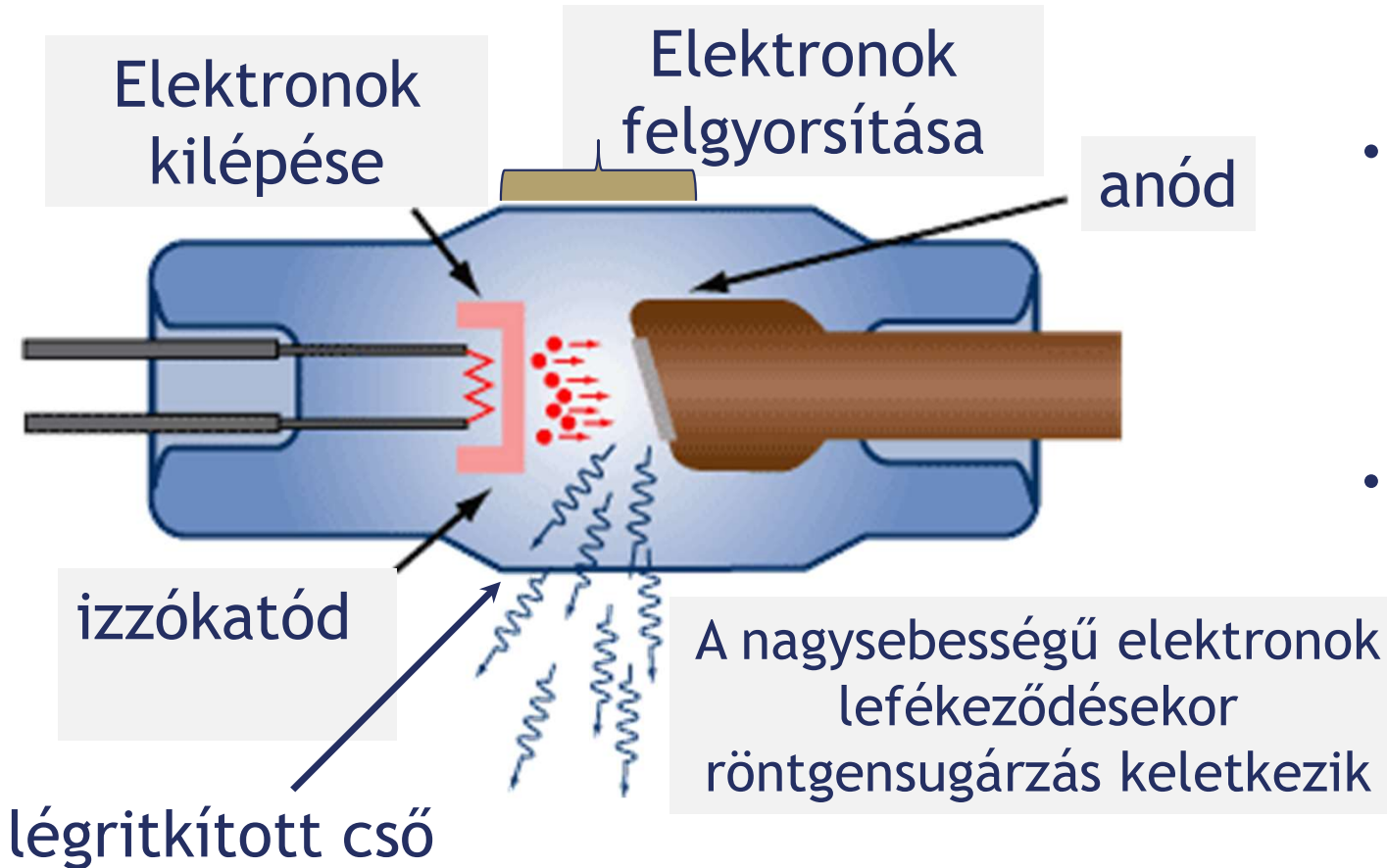


1895. december 22.: felvétel
Röntgen feleségének kezéről

A röntgensugárzás elektromágneses sugárzás



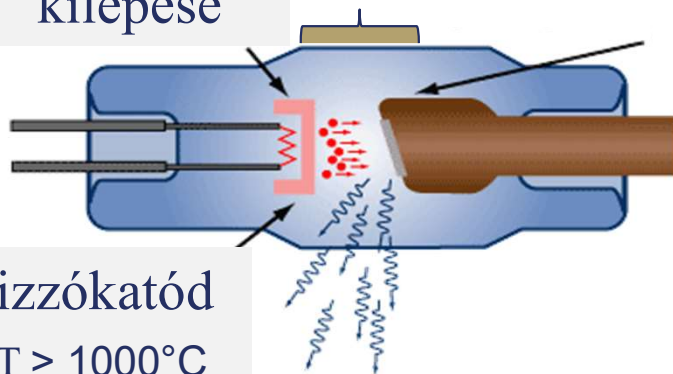
A röntgenső felépítése



- A katódot egy fűtőáramkör (változtatható fűtőfeszültség) segítségével izzítjuk.
- A katódból termikus emisszióval kilépő elektronok száma szabja meg az anódáram nagyságát.
- Elektronok a katód és anód közé kapcsolt nagyfeszültség hatására felgyorsulnak, majd az anódba csapódva lefékeződnek.

A röntgenső működése

Elektronok
kilépése



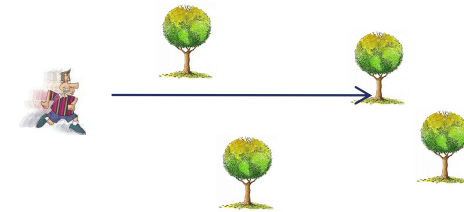
izzókatód
 $T > 1000^{\circ}\text{C}$

$$I_{\text{anód}} = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot e}{t}$$

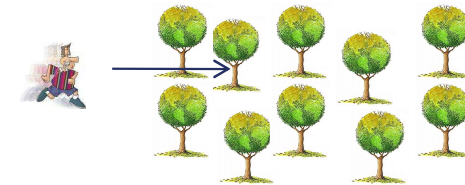
$$P_{\text{elektromos}} = U_{\text{anód}} \cdot I_{\text{anód}}$$

$U_{\text{anód}}$ Az anód és a katód közé kapcsolt nagyfeszültség.

Miért kell vákuum?



vákuum $\sim 10^{-4}$ Pa
szabad úthossz ~ 10 cm

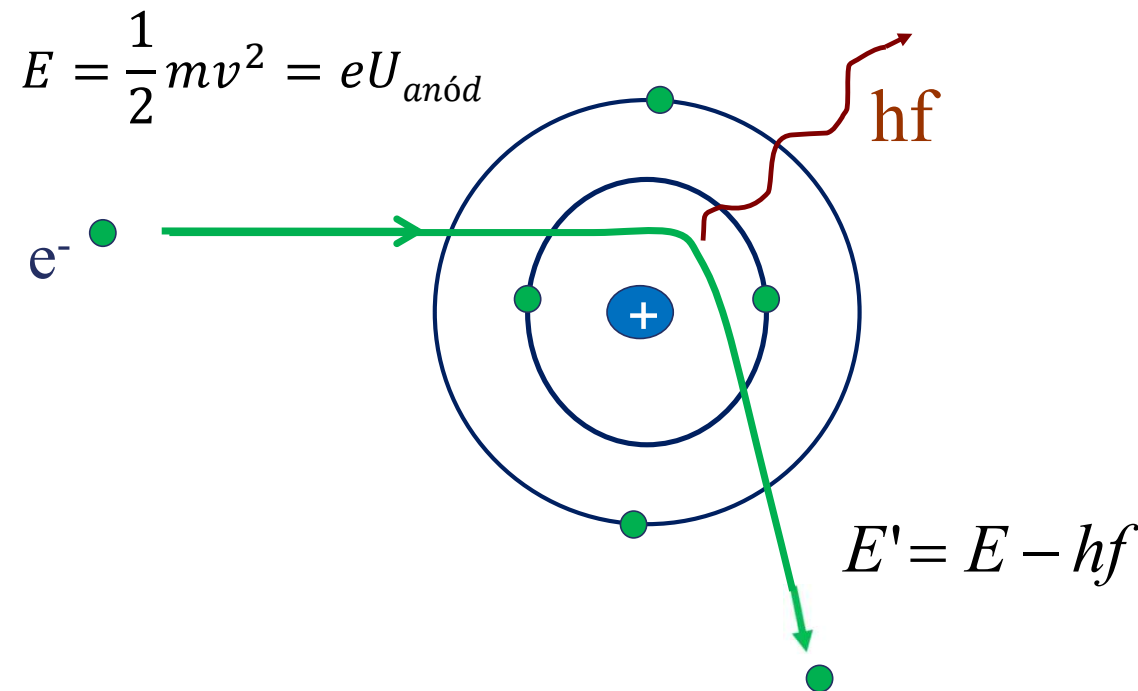


levegőben normál nyomáson
a szabad úthossz ~ 70 nm

A röntgensugárzás keletkezésének mechanizmusa

1. Fékezési sugárzás

Az elektronok lefékeződnek az anód anyagában.



Jelentős sebesség-csökkenés csak az atommagok közelében történik, amely során először a sebesség iránya változik, majd a nagysága is csökken.

A belépő elektron eltérül és lelassul a mag erőterében.

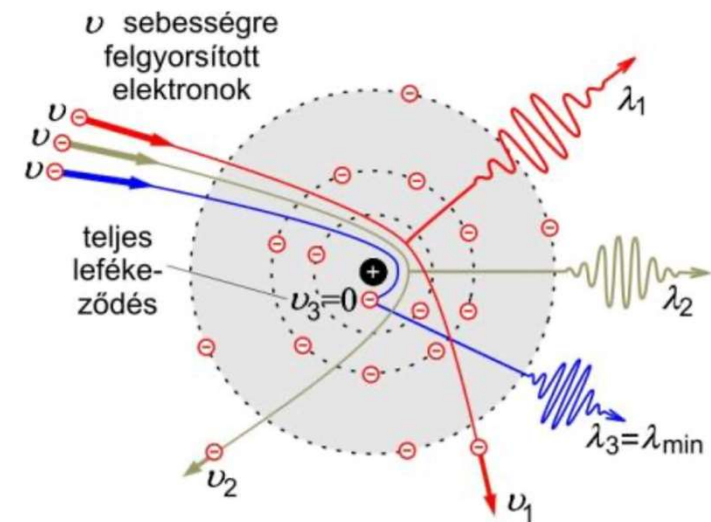
Az eltérülő elektron mozgási energiája csökken.

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



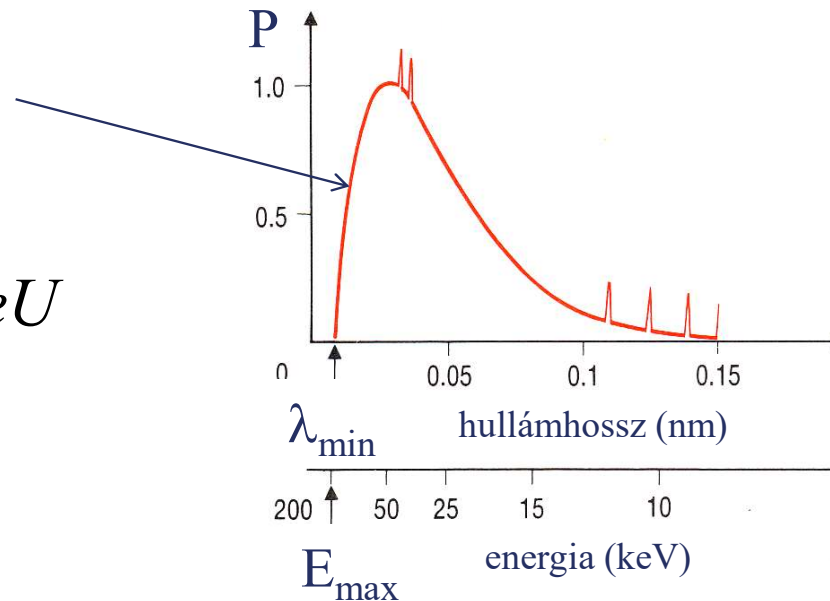
A fékezési sugárzás spektruma

folytonos
spektrum

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

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

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

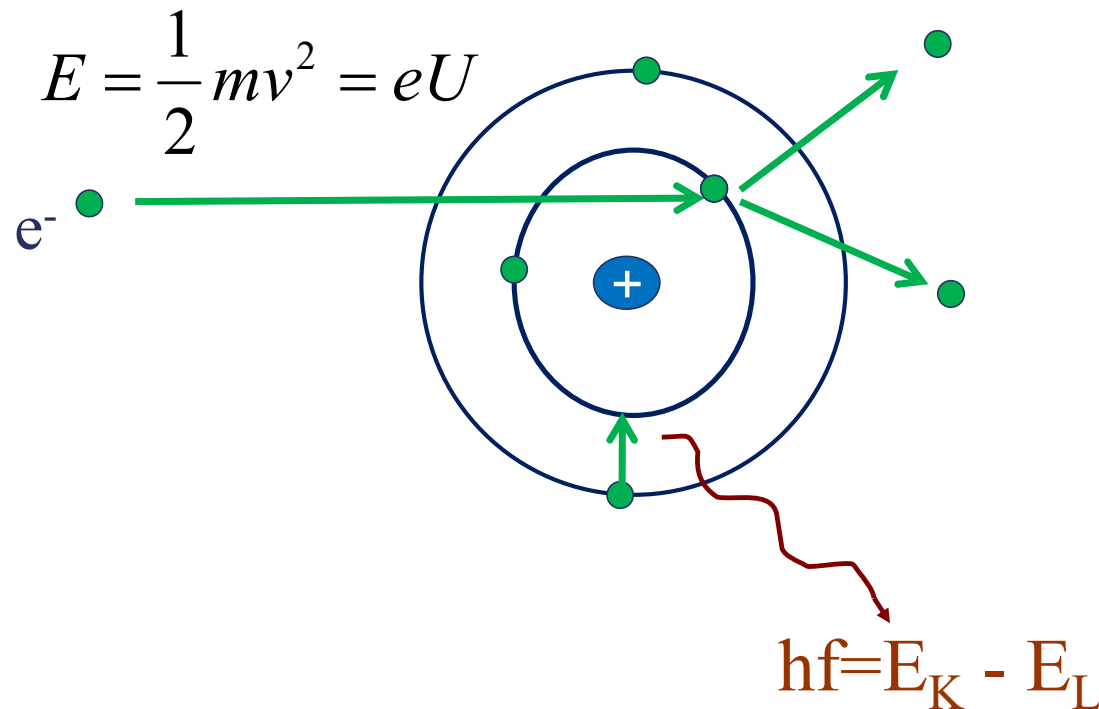


Duane-Hunt törvény

A röntgensugárzás keletkezésének mechanizmusa

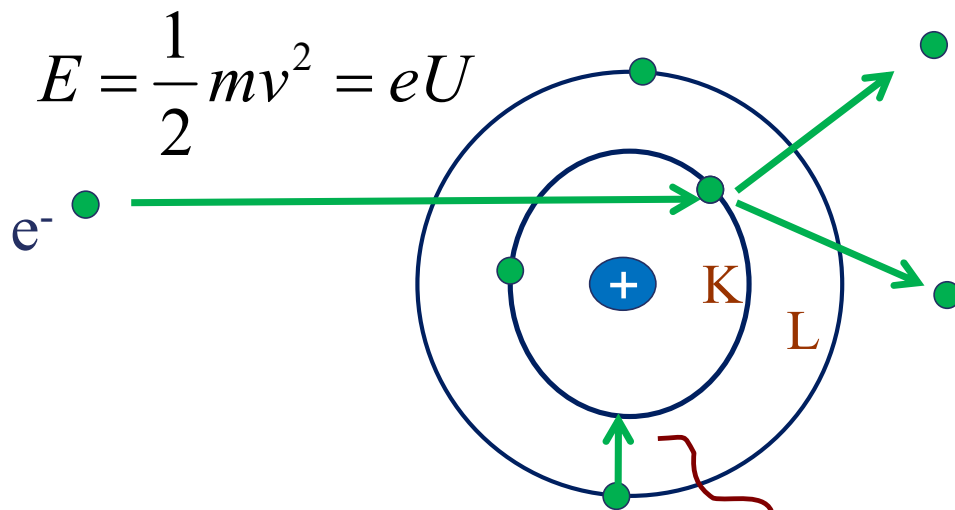
4

2. Karakterisztikus sugárzás



- Ez a jelenség csak bizonyos nagyságú gyorsítófeszültség felett jelenik meg.
- A szabad elektronok mozgási energiája összemérhető kell legyen a belső héjakon lévő elektronok kötési energiájával.

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



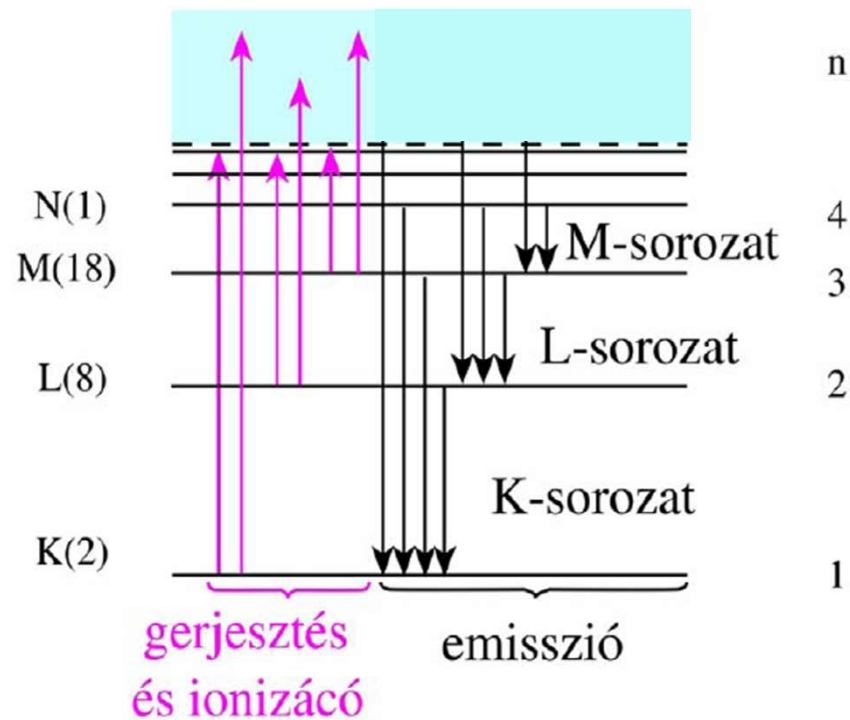
A távozó elektron helyén “lyuk” marad.

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

$$hf = E_K - E_L$$

A héjak közötti energiakülönbséggel azonos energiájú foton keletkezik.

Lehetséges energiaátmenetek



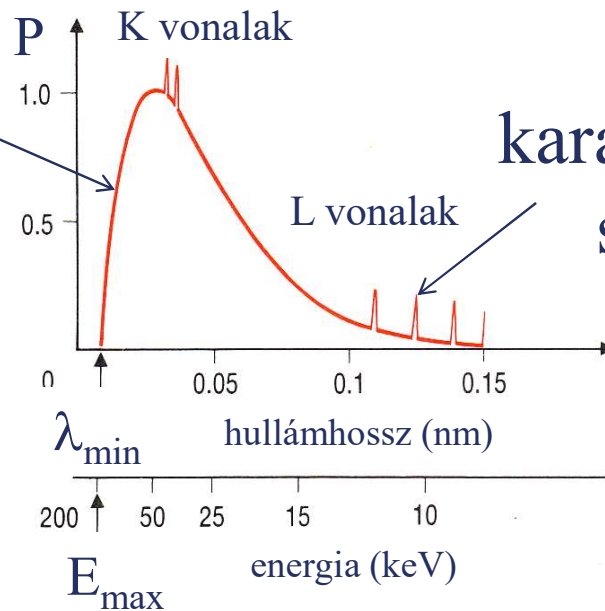
A lehetséges fotonenergiák a target (anód anyagának) elektronszerkezetétől függenek – karakterisztikus az adott anyagra

A röntgensugárzás spektruma

Folytonos
fékezési spektrum

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

Duane-Hunt szabály



Vonalas
karakterisztikus
spektrum

A röntgencső teljesítménye és hatásfoka

$$P = cIU^2Z$$

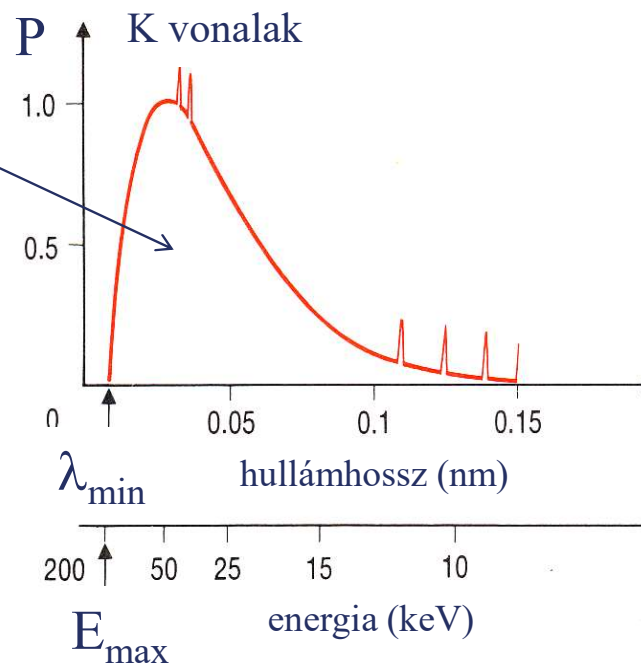
$$c = 1,1 \times 10^{-9} [1/V]$$

bemeneti teljesítmény:

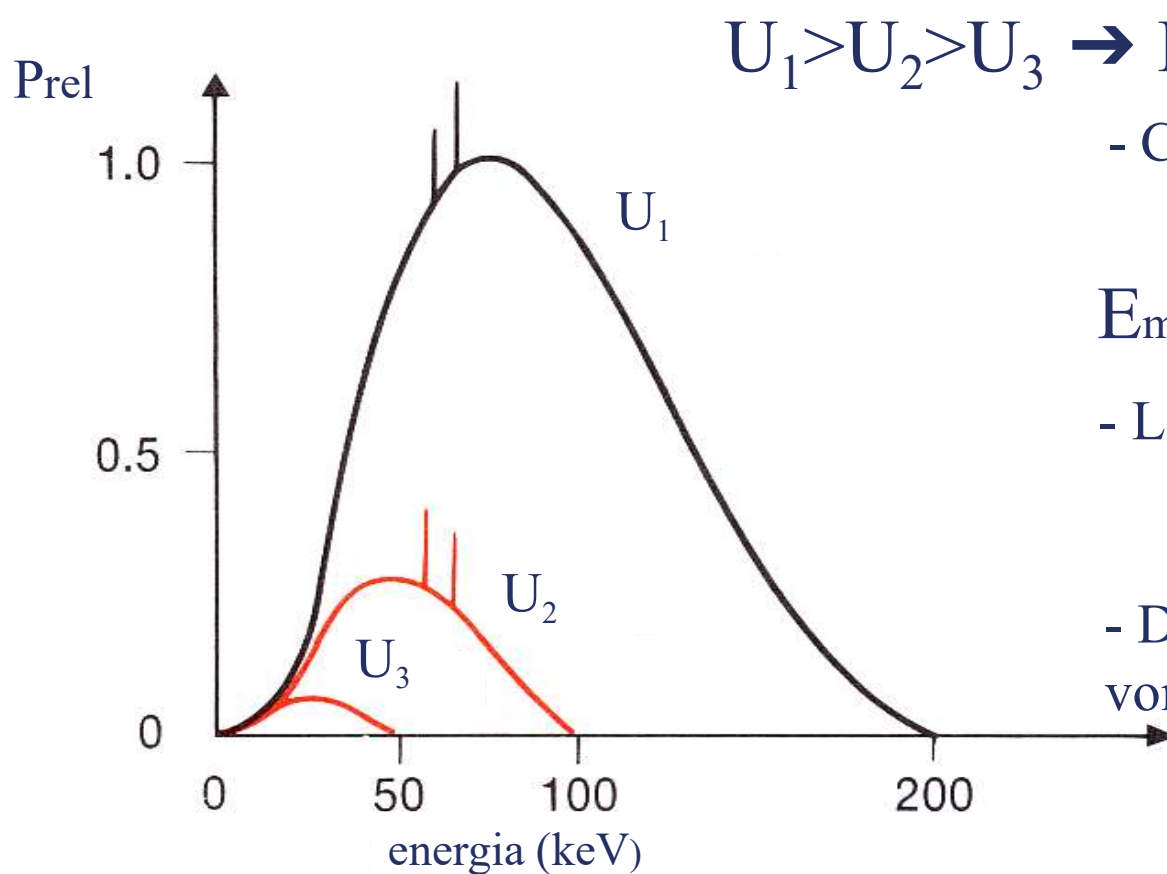
$$P' = IU$$

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

$$\eta < 1\%$$



ha csökken a gyorsítófeszültség:



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

$$P = cIU^2Z$$

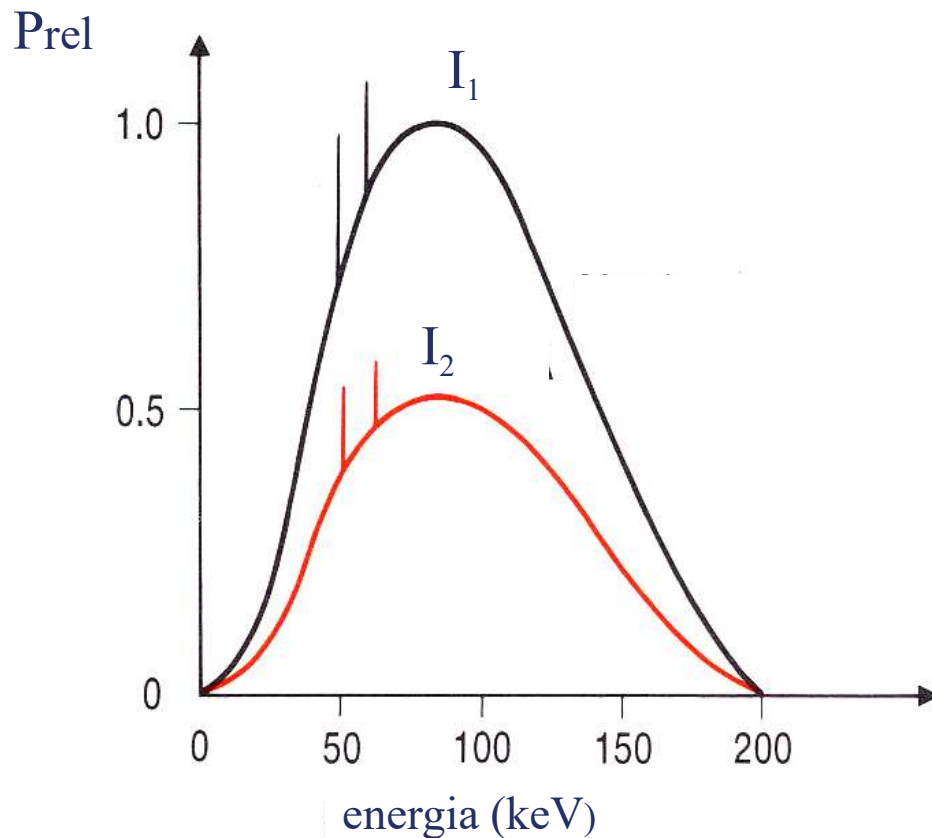
- Csökken a teljesítmény

$$E_{\max_1} > E_{\max_2} > E_{\max_3} \quad E_{\max} = eU$$

- Lágyl a fékezési sugárzás

- De NEM VÁLTOZIK a karakterisztikus vonalak helye!

ha csökken az anódáram erőssége:



$$I_1 > I_2 \rightarrow P_1 > P_2 \quad P = cIU^2Z$$

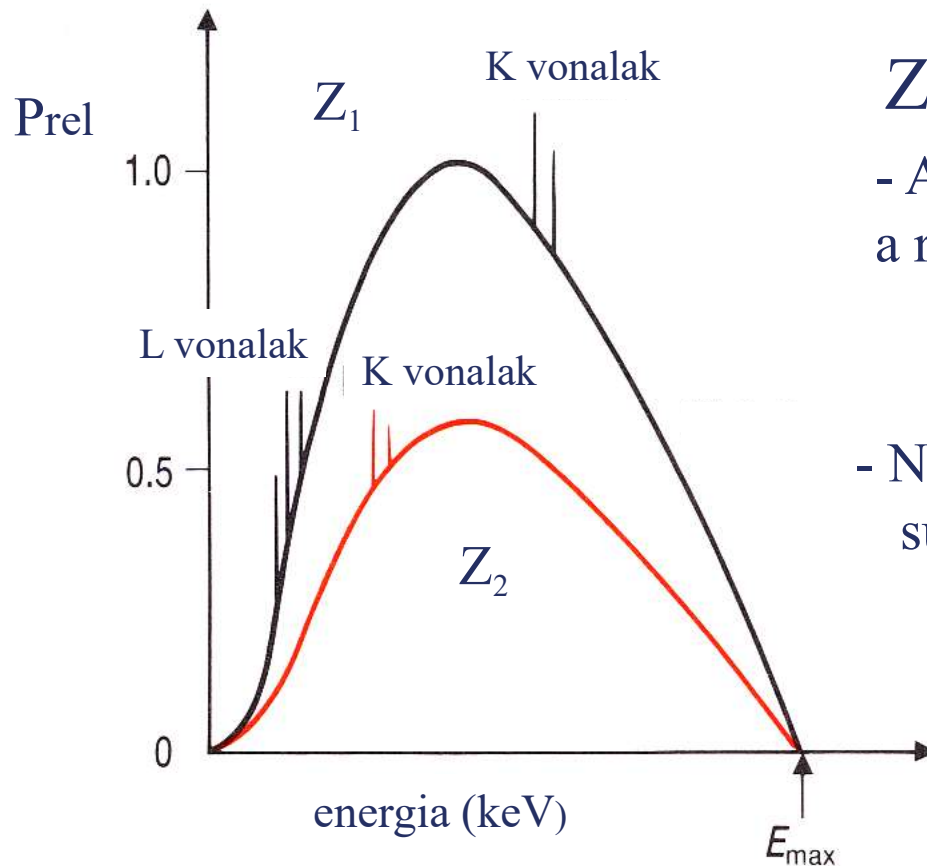
- Csökken a teljesítmény

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

- 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

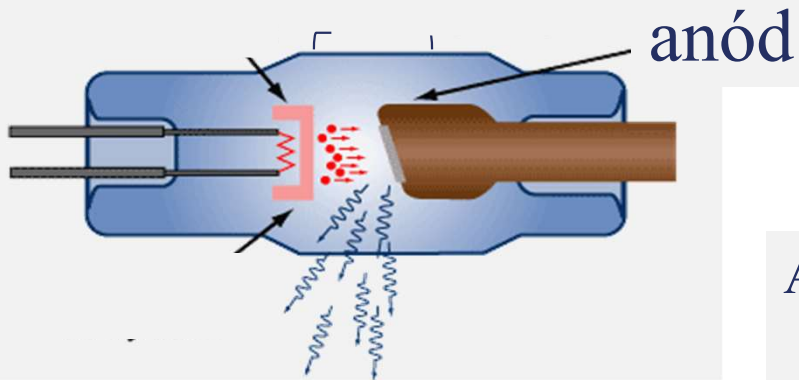
$$P = cIU^2Z$$

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

- Nem változik a fékezési sugárzás keménysége

- De változik a karakterisztikus vonalak helye!

Röntgenső az orvosi gyakorlatban



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

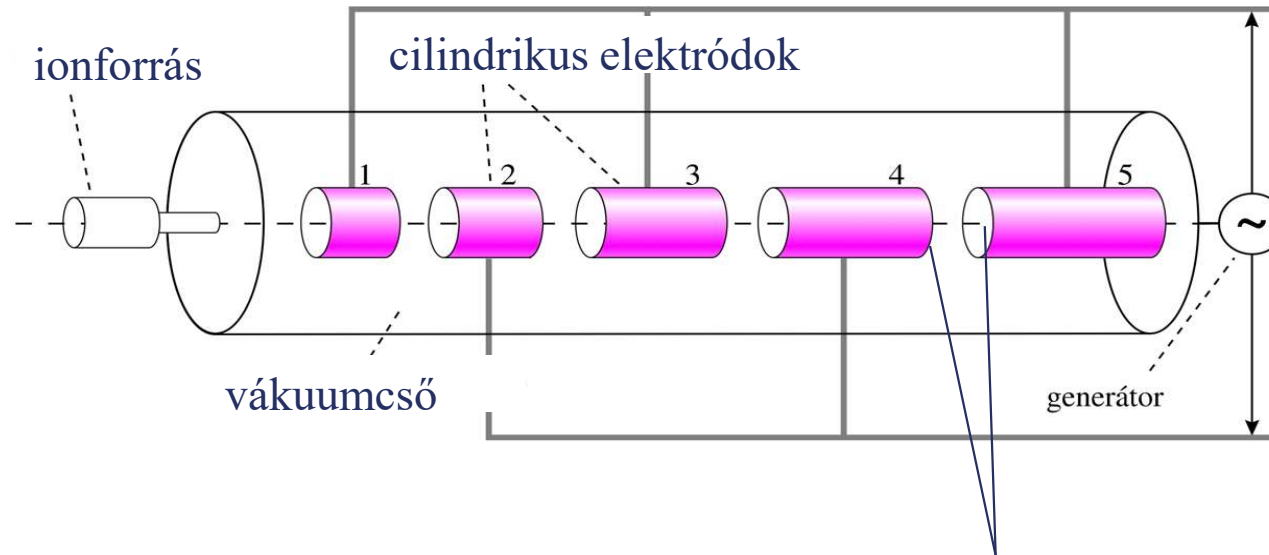
Az anód fókusza (az elektronok becsapódásának helye)
- kis fókusz → élesebb kép
- nagy fókusz → jobb hőeloszlás

Az anód helyzete: - álló - terhelhetőség: néhány W/mm^2
(fogászati gyakorlatban elég)
- forgó - egyenletesebb hőeloszlás, terhelhetőség:
 $10000 \text{ W}/\text{mm}^2$

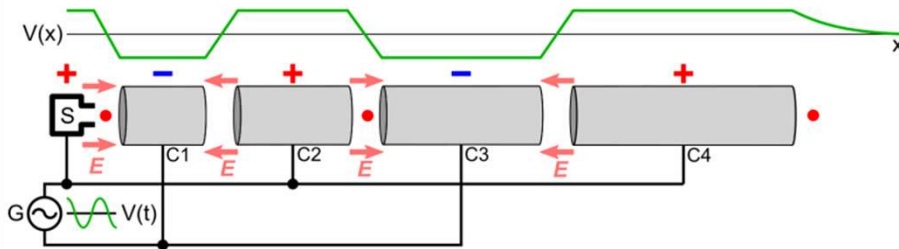
Gyorsítófeszültség: 25-200 kV, anódáram: 1-1000 mA,
anód anyaga: W (mammográfiában Mo)

A röntgensugárzás előállításának speciális módszerei: részecskegyorsítók

Lineáris gyorsítók

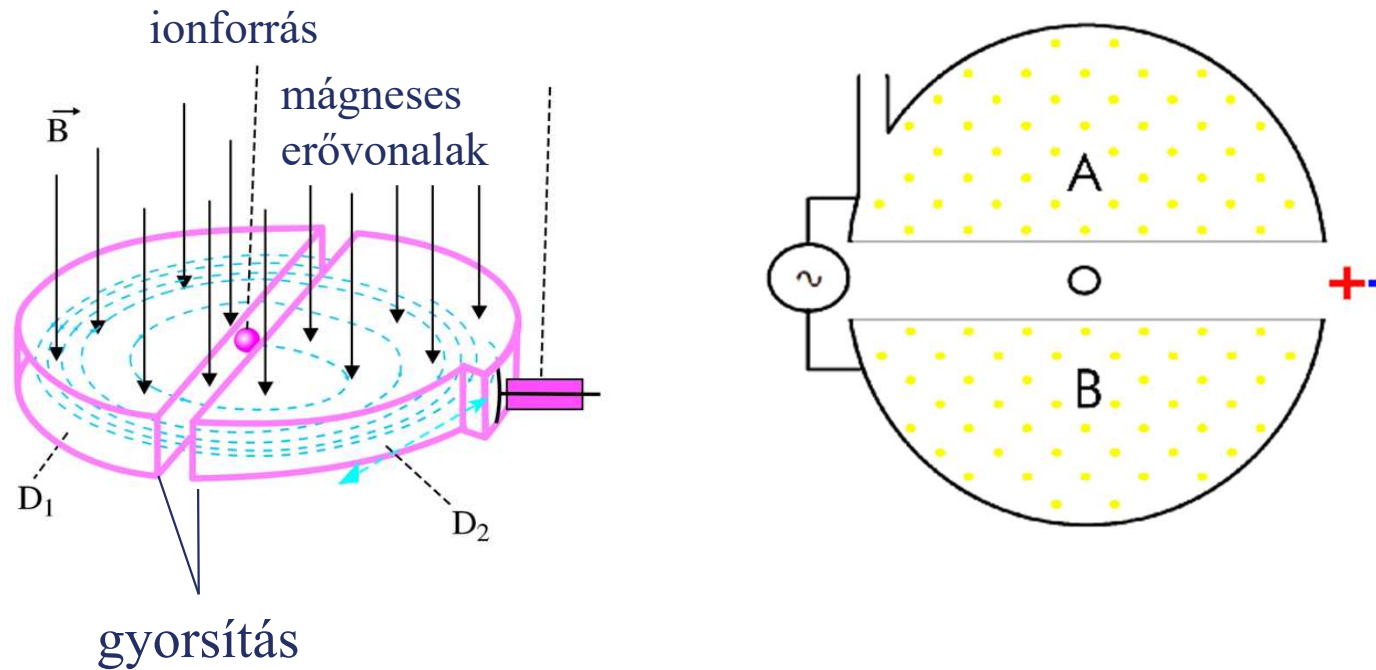


gyorsítás



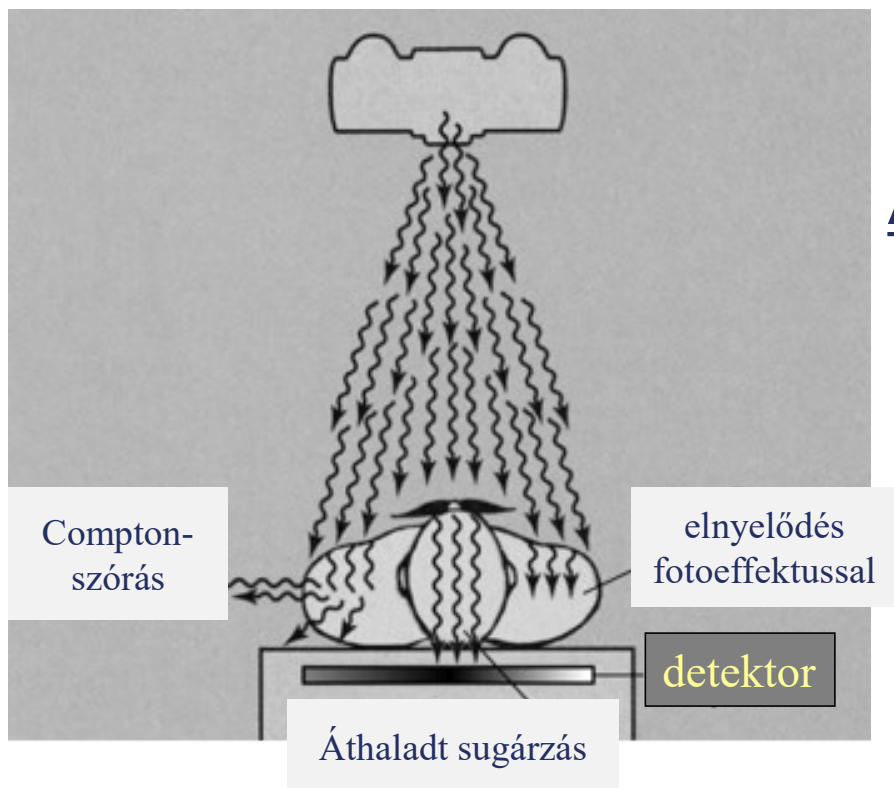
Alkalmazás:
sugárterápia
(4-25 MeV)

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



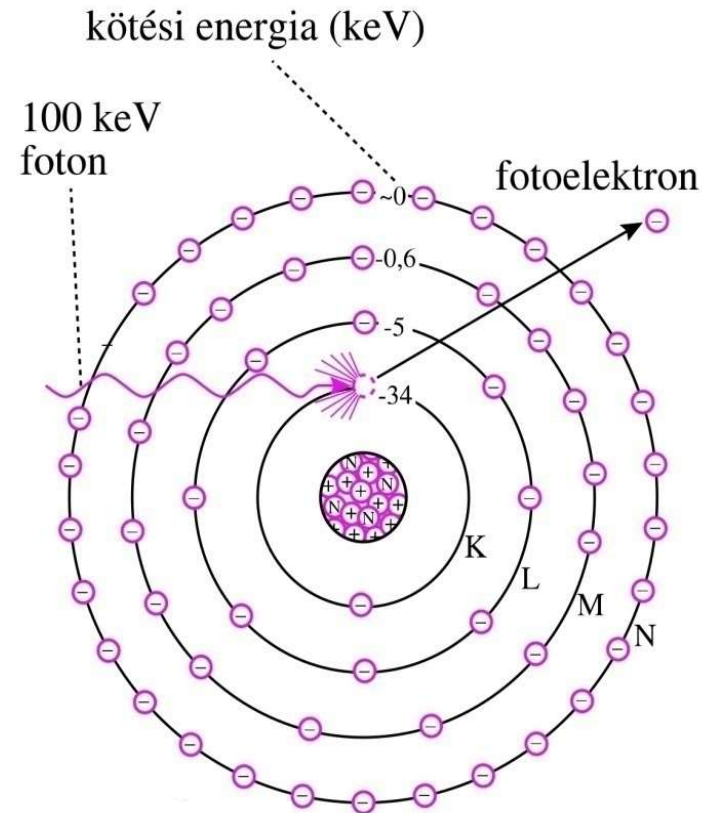
A foton kölcsönhatásának lehetőségei:

- fotoeffektus
- Compton szórás
- párkeltés
- rugalmas szórás

A kölcsönhatás mechanizmusa

Fotoeffektus

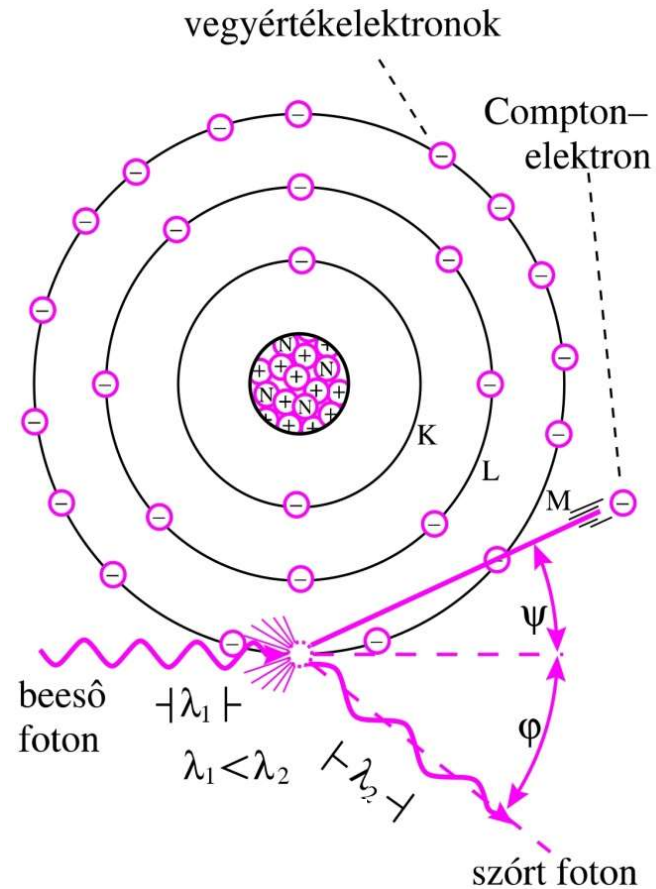
$$hf = E_{\text{köt}} + \frac{1}{2} m_e v^2$$



A kölcsönhatás mechanizmusa

Compton-szórás

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



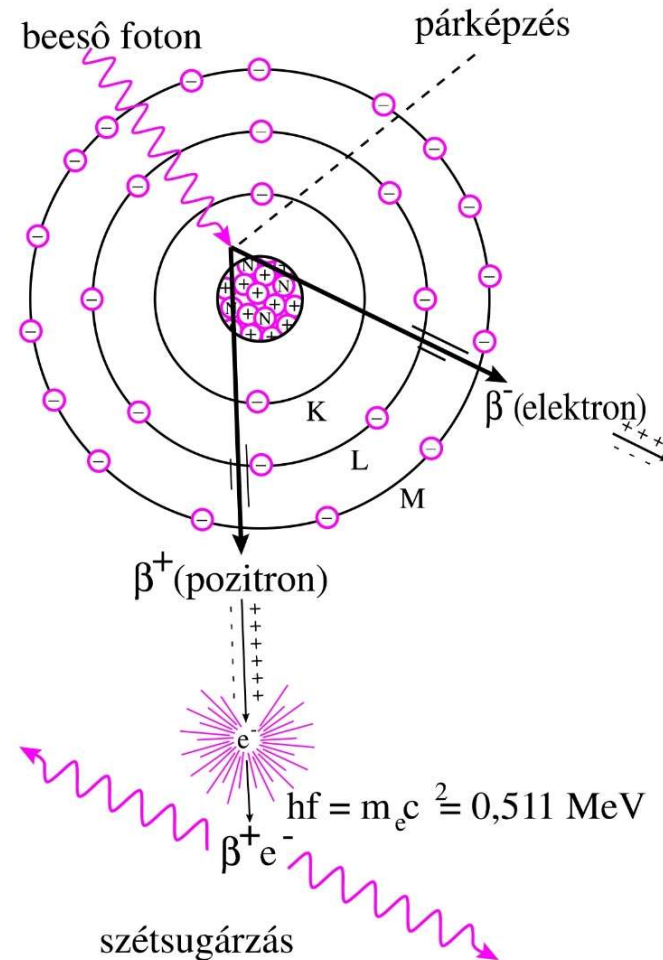
A kölcsönhatás mechanizmusa

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

$$\mu = \frac{0.693}{D}$$

$$D_m = \rho D$$

$$\mu_m = \frac{0.693}{D_m}$$

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	~ független	enyhén csökkenő

Szűrők alkalmazása

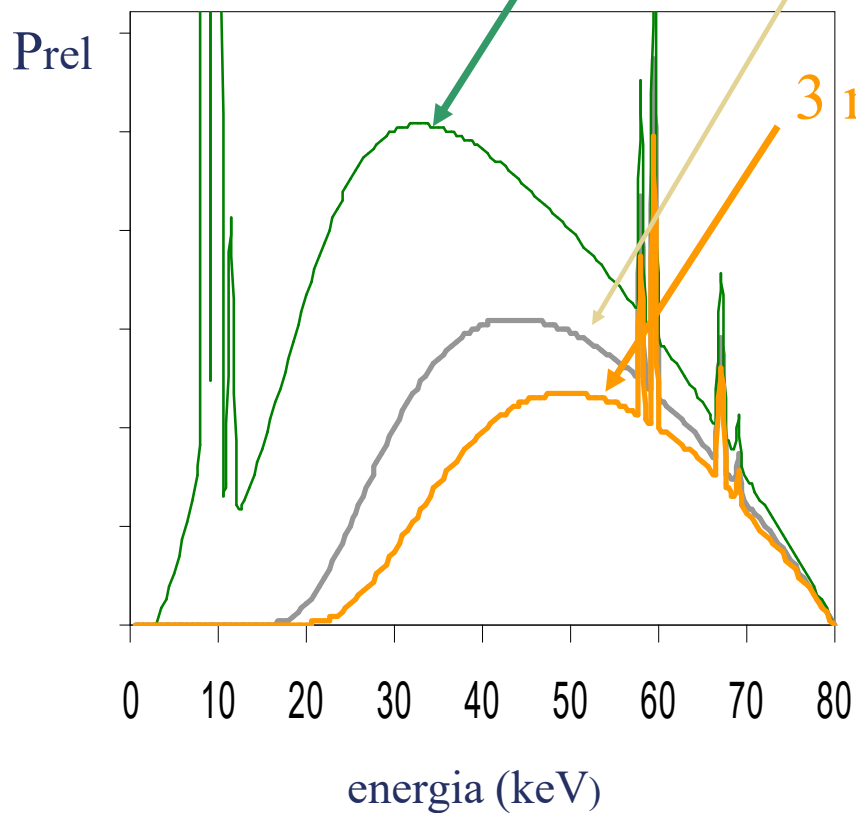
A sugárzás tulajdonságainak (spektrum, térbeli eloszlás) módosítása

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

Hátránya: csökkenti az intenzitást, növeli a felvétel idejét.

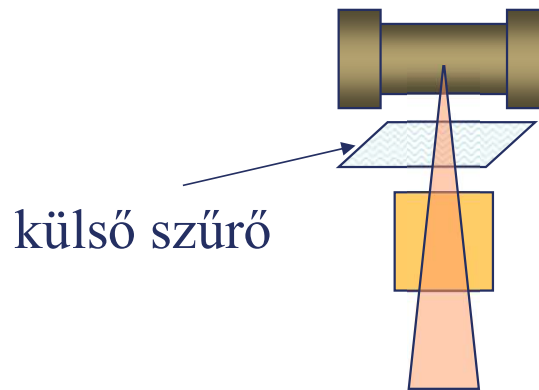
Előnye: kb 80%-kal csökkentheti a páciens sugárterhelését.

Szűrés nélküli spektrum 3 mm Al



3 mm Al

3 mm Al + 0,1 mm Cu



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

Köszönöm a
figyelmet!

