

Röntgensugárzás

Előállítása, tulajdonságai

Orvosi Biofizika II. 2025. február 12.

Kellermayer Miklós

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet



SEMMELWEIS
EGYETEM 1769

A rejtélyes X-sugár



Wilhelm Konrad
Röntgen
(1845-1923)
Nobel-díj, 1901

Sitzungs-Berichte der Physikalisch-medicinischen Gesellschaft zu WÜRZBURG.

Jahrgang 1895.	Der Abonnementspreis pro Jahrgang beträgt M. 4.—. Die Nummern werden einzeln nicht abgegeben. Grössere Beiträge erscheinen in Sonderdrucken.	No. 9.
-------------------	--	--------

Verlag der Stahel'schen K. Hof- und Universitäts-Buch- und Kunsthandlung in Würzburg.

Inhalt. *Konrad Rieger*: Demonstration des sogenannten „Vogelkopfkneben“
Döbös Janos aus *Battonya* in *Ungarn* (Fortsetzung), pag. 129. —
W. C. Röntgen: Ueber eine neue Art von Strahlen, pag. 132. —
Wilhelm Wislicenus: 46. Jahresbericht der physikalisch-medicinischen
Gesellschaft zu Würzburg, pag. 142. — Mitglieder-Verzeichniss, pag. 146.

Am 28. Dezember wurde als Beitrag eingereicht:

W. C. Röntgen: Ueber eine neue Art von Strahlen.

(Vorläufige Mittheilung.)

1. Lässt man durch eine *Hittorf'sche* Vacuumröhre, oder einen genügend evacuirten *Lenard'schen*, *Crookes'schen* oder ähnlichen Apparat die Entladungen eines grösseren *Ruhmkorff's* gehen und bedeckt die Röhre mit einem ziemlich eng anliegenden Mantel aus dünnem, schwarzem Carton, so sieht man in dem vollständig verdunkelten Zimmer einen in die Nähe des Apparates gebrachten, mit *Bariumplatincyanür* angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluoresciren, gleichgültig ob die angestrichene oder die andere Seite des Schirmes dem Entladungsapparat zugewendet ist. Die Fluorescenz ist noch in 2 m Entfernung vom Apparat bemerkbar.

Man überzeugt sich leicht, dass die Ursache der Fluorescenz vom Entladungsapparat und von keiner anderen Stelle der Leitung ausgeht.

2. Das an dieser Erscheinung zunächst Auffallende ist, dass durch die schwarze Cartonhülle, welche keine sichtbaren oder ultravioletten Strahlen des Sonnen- oder des elektrischen Bogenlichtes durchlässt, ein Agens hindurchgeht, das im Stande ist, lebhaft Fluorescenz zu erzeugen, und man wird deshalb wohl zuerst untersuchen, ob auch andere Körper diese Eigenschaft besitzen.

Man findet bald, dass alle Körper für dasselbe durchlässig sind, aber in sehr verschiedenem Grade. Einige Beispiele führe ich an. Papier ist sehr durchlässig: ¹⁾ hinter einem eingebun-

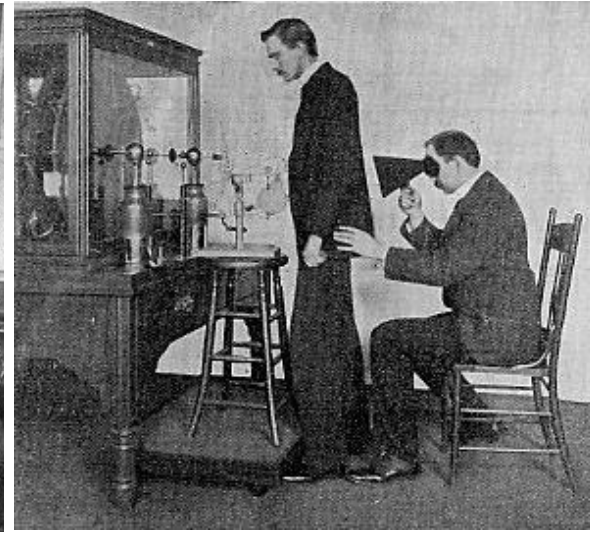
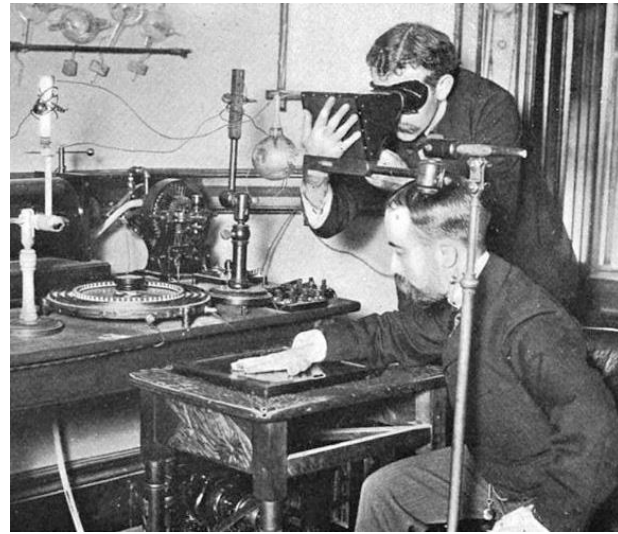
¹⁾ Mit „Durchlässigkeit“ eines Körpers bezeichne ich das Verhältniss der Helligkeit eines dicht hinter dem Körper gehaltenen Fluorescenzschirmes zu derjenigen Helligkeit des Schirmes, welcher dieser unter denselben Verhältnissen aber ohne Zwischenschaltung des Körpers zeigt.



Hand mit Ringen („Kéz gyűrűvel”):
Wilhelm Röntgen első "orvosi"
röntgenfelvétele felesége (Anna Bertha
Ludwig) kezéről (1895 december 22).

A röntgensugár diadalmenete

Átláthatóság -
papírtölcsér
radioszkóp



1890-es
évek vége

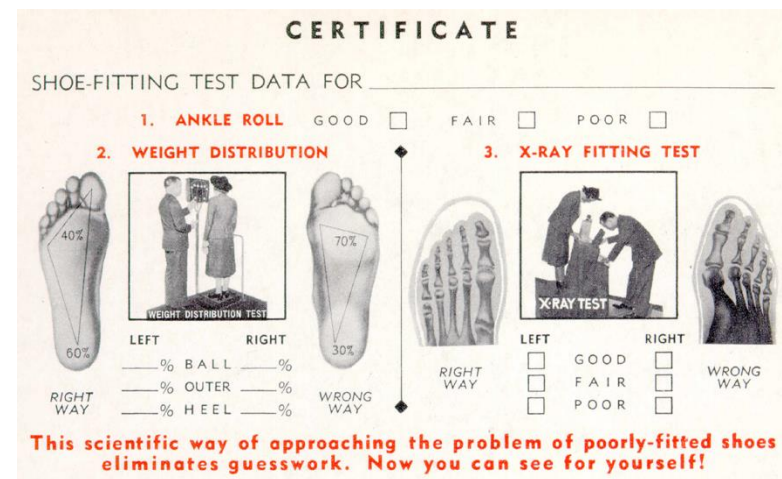


I. világ-
háború

Hétköznapi
alkalmazások



Cipész
fluoroszkóp
(1930-50)



Reptéri
biztonság



Orvosi
alkalmazások



1940



1950

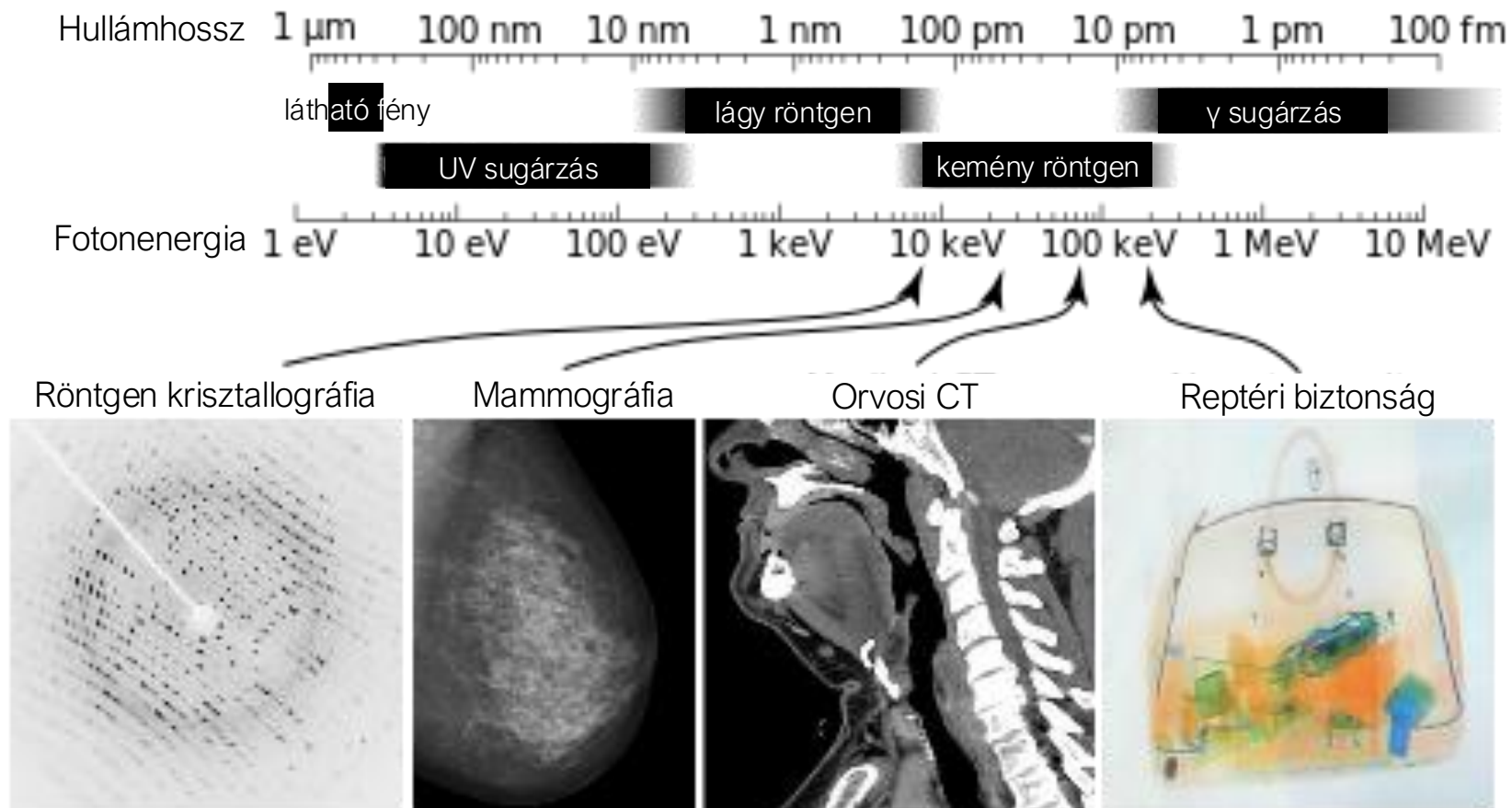


Ma



Photon-counting CT

A röntgensugárzás: elektromágneses sugárzás



Hullámhossz 10 - 0.01 nm.

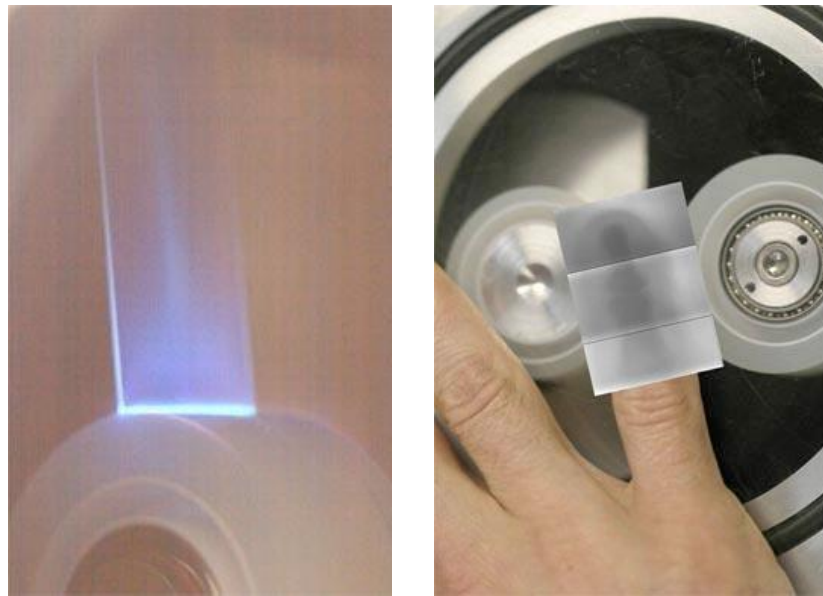
Frekvencia 30×10^{15} - 30×10^{18} Hz (petahertz - exahertz).

Energia 120 eV - 120 keV.

A röntgensugárzás keltése

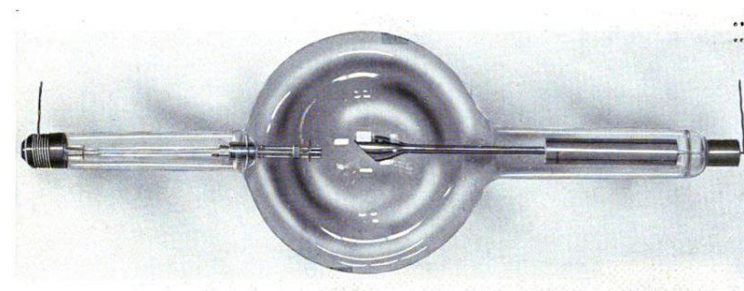
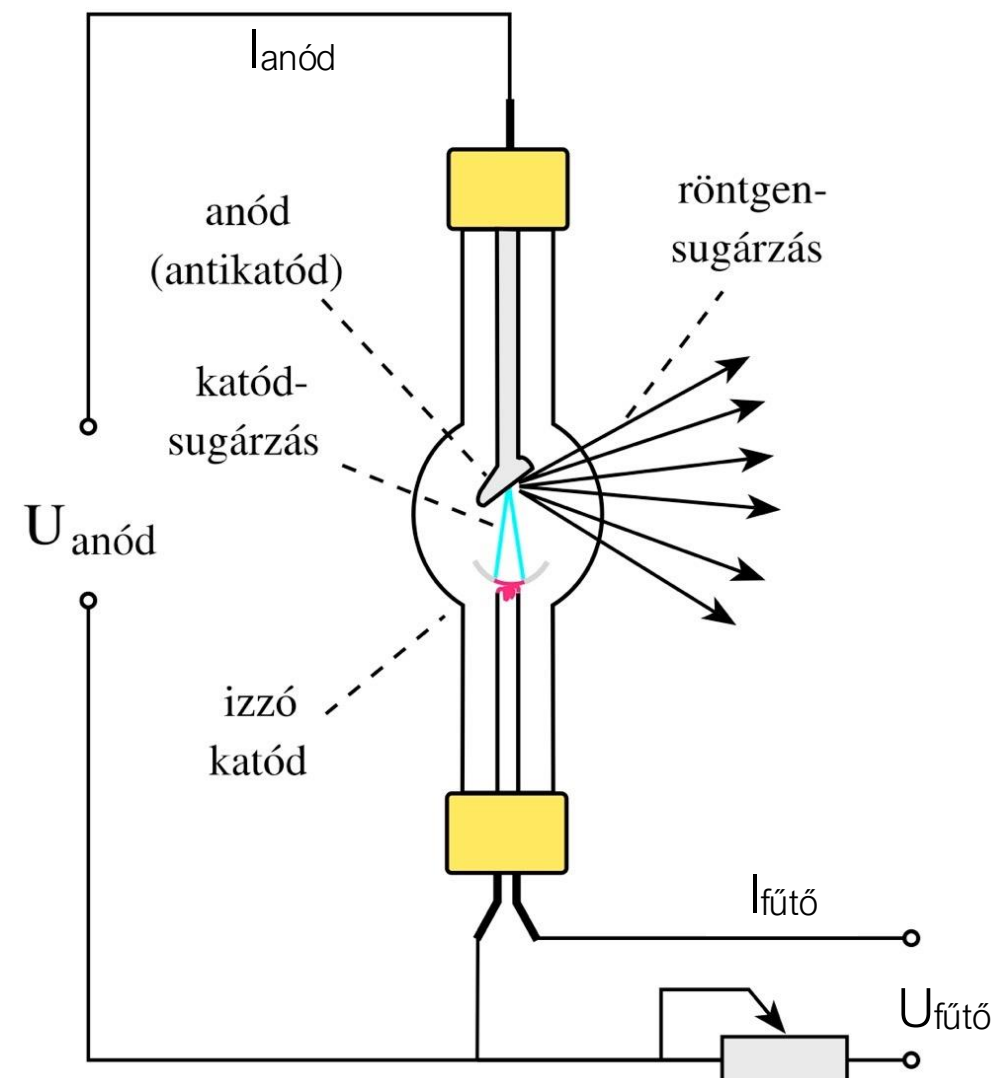
Nem szokványos
módszer

Tribolumineszcencia:
dörzsöléssel kiváltott
fényemisszió.
(Francis Bacon, 1605)



Ragasztószalag lehántásakor látható
fotonok...és röntgenfotonok
emittálódnak. (Nature News, October 2008)

Szokásos módszer: röntgencső



Röntgencső (Coolidge,
1900-as évek eleje).

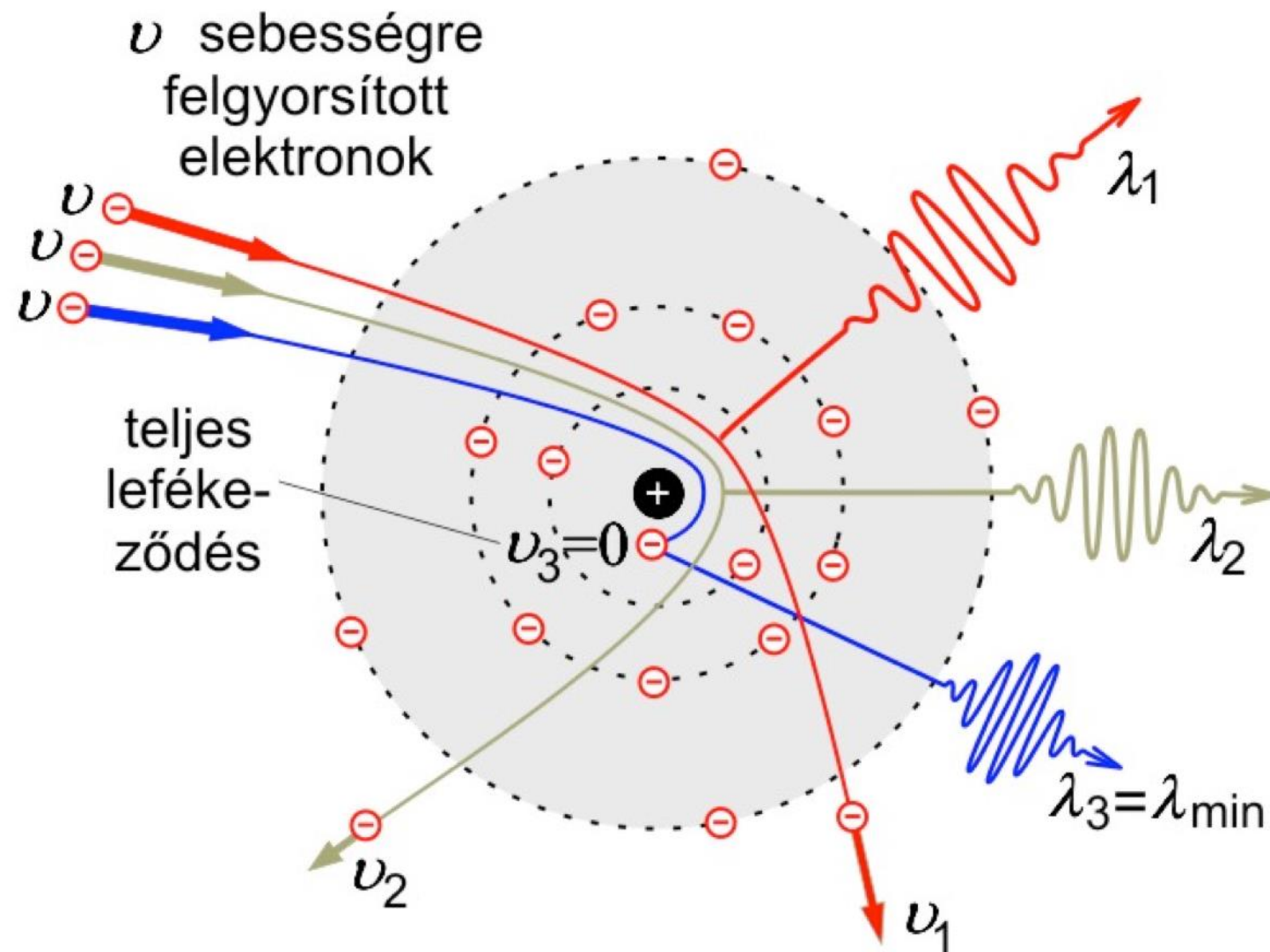


Forgóanódos röntgencső
(anód forgás hűtés végett)

Mechanizmus I.

Fékezési röntgensugárzás

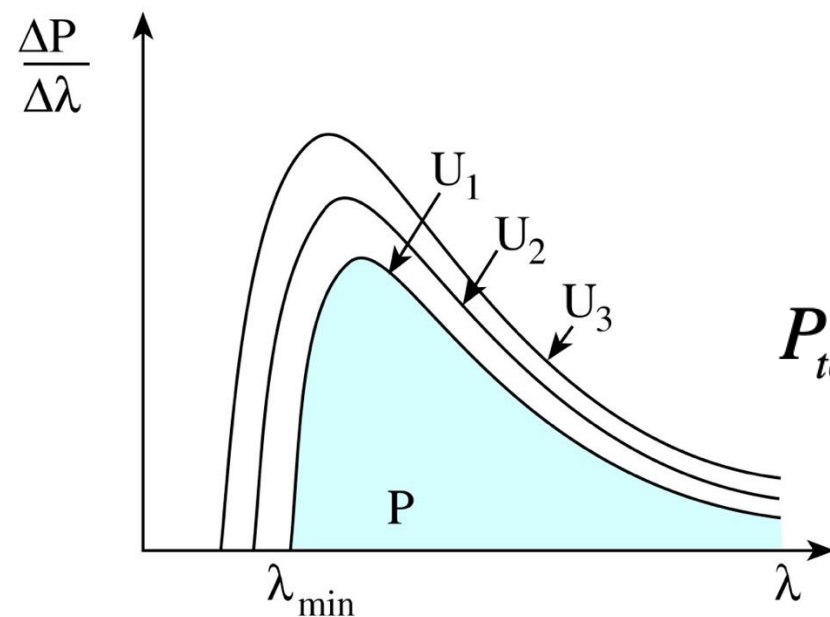
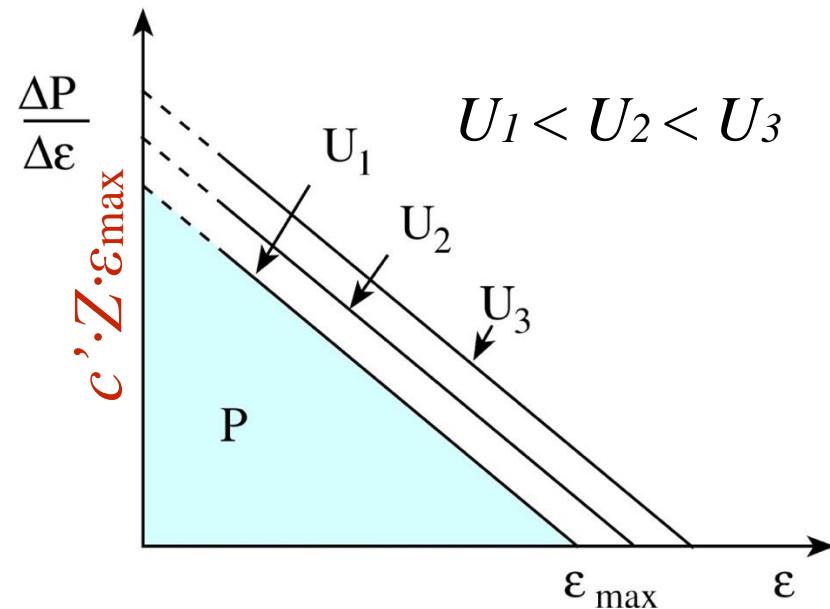
A felgyorsított elektronok lelassulnak (“lefékeződnek”) — és ezért mozgási energiát veszítenek — az anód atomjainak elektromos terében.



“Bremsstrahlung”

A fékezési röntgensugárzás spektruma:

Folytonos



$$eU_{\text{anód}} = \varepsilon_{\text{max}} = hf_{\text{max}}$$

Maximális fotonenergia (ε_{max})

N.B.: Elektron teljes mozgási energiája egy lépésben alakul át (ritka esemény).

e : elektron töltése;
 $U_{\text{anód}}$: gyorsítófeszültség;
 $eU_{\text{anód}}$: gyorsítási munka
 h : Planck állandó;
 f_{max} : határfrekvencia

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{U_{\text{anód}}}$$

Határhullámhossz (λ_{min})

(Duane-Hunt-törvény)

N.B.: A határhullámhossz a gyorsítófeszültséggel fordítottan arányos

c : fénysebesség;
 hc/e : konstans (1.2398 kV·nm)

$$\frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon} = c' \cdot Z \cdot (\varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon)$$

Energiaspektrum

(teljesítmény energia-függése)

$$P_{\text{tot}} = \frac{1}{2} c' \cdot Z \cdot \varepsilon_{\text{max}}^2 = c \cdot Z \cdot U_{\text{anód}}^2 \cdot e^2$$

$$P_{\text{tot}} = C_{\text{Rtg}} \cdot I_{\text{anód}} \cdot U_{\text{anód}}^2 \cdot Z$$

Összteljesítmény (P_{tot})

(háromszög területe alapján)

C_{Rtg} : arányossági tényező ($1.1 \times 10^{-9} \text{ V}^{-1}$);

$I_{\text{anód}}$: anódáram (időegység alatt anódba csapódó elektronok száma);

Z : anód anyagának rendszáma

$$\eta = \frac{P_{\text{tot}}}{P_{\text{in}}} = \frac{C_{\text{Rtg}} \cdot I_{\text{anód}} \cdot U_{\text{anód}}^2 \cdot Z}{I_{\text{anód}} \cdot U_{\text{anód}}} = C_{\text{Rtg}} \cdot U_{\text{anód}} \cdot Z$$

Hatásfok (η)

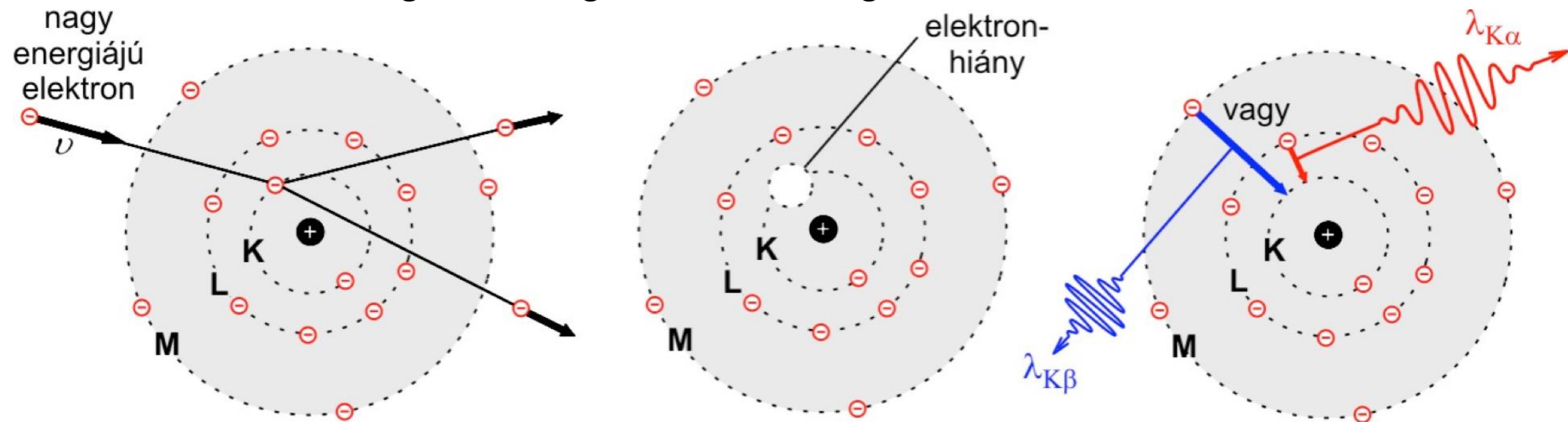
P_{in} : befektetett teljesítmény

N.B.: Típusosan $\eta < 1\%$.

Mechanizmus II.

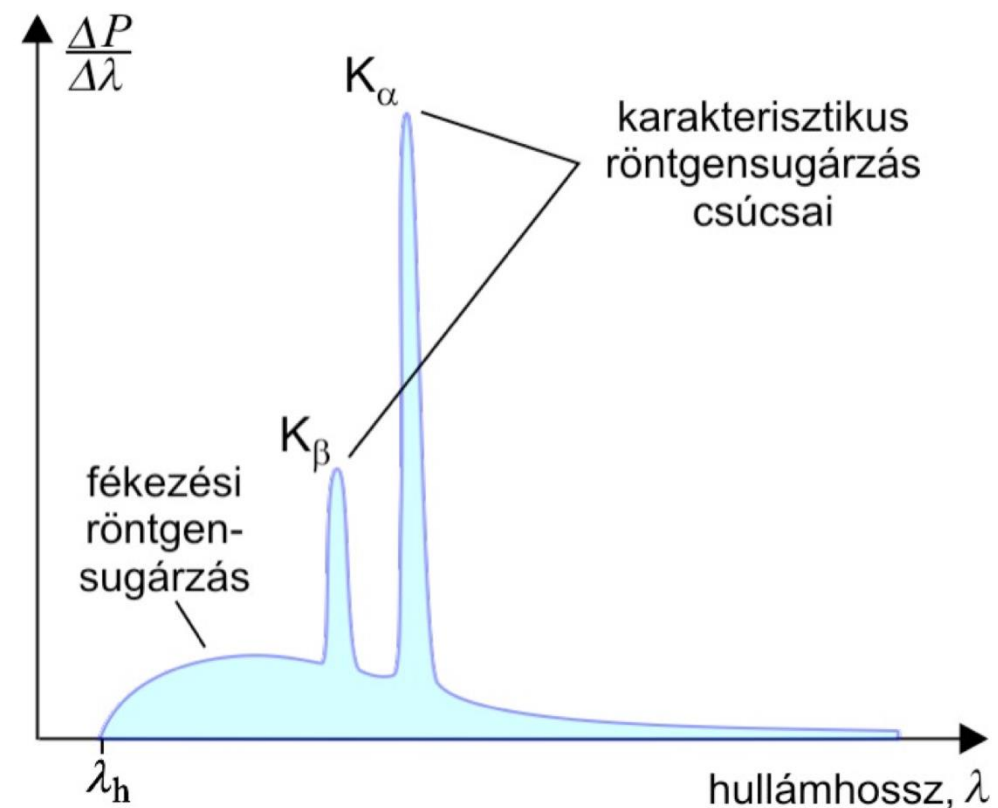
Karakterisztikus röntgensugárzás

A belső pályáról kilökött elektron nagyenergiájú pályáról pótlódik, az energiafelesleg diszkrét röntgenfotonként távozik.



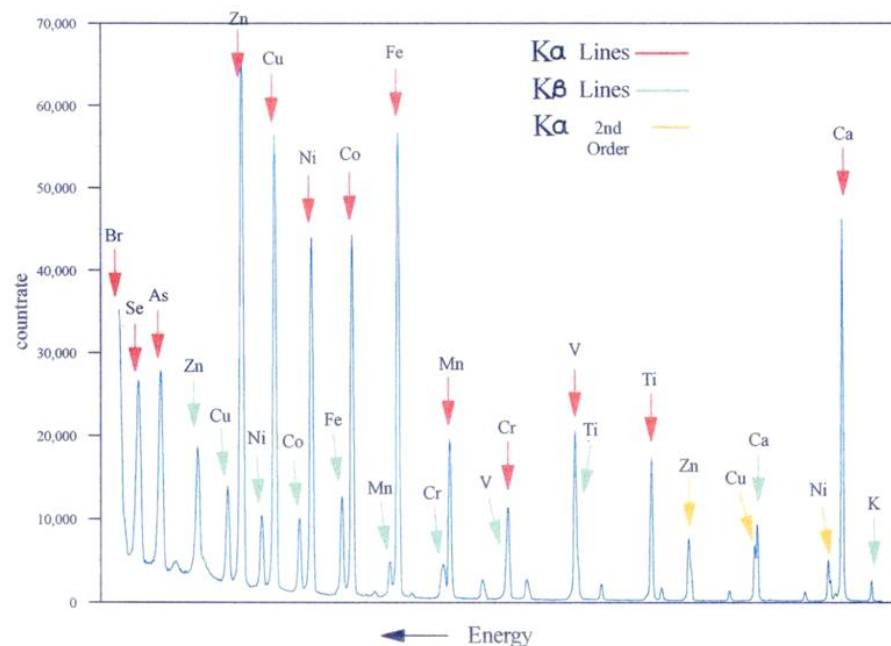
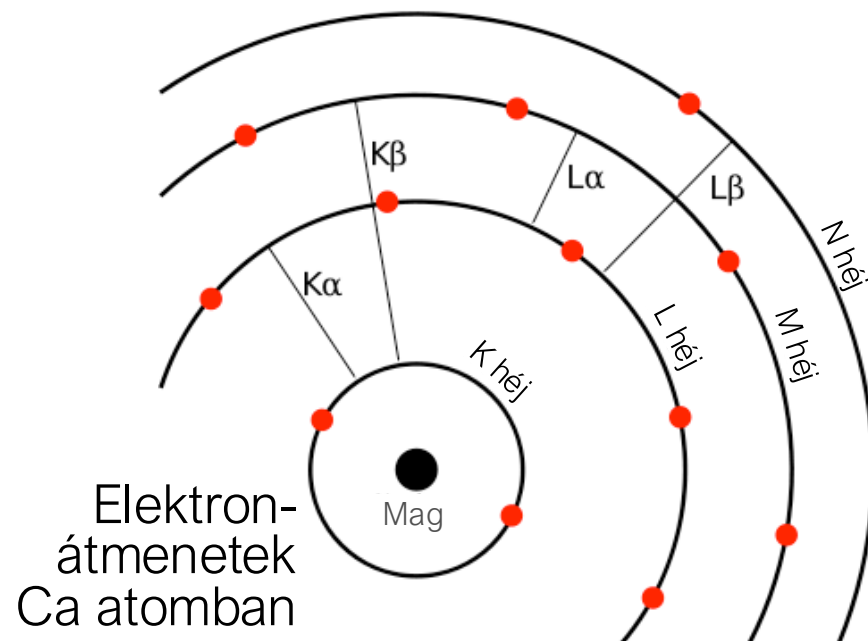
Karakterisztikus
röntgensugárzás
spektruma

Vonalas

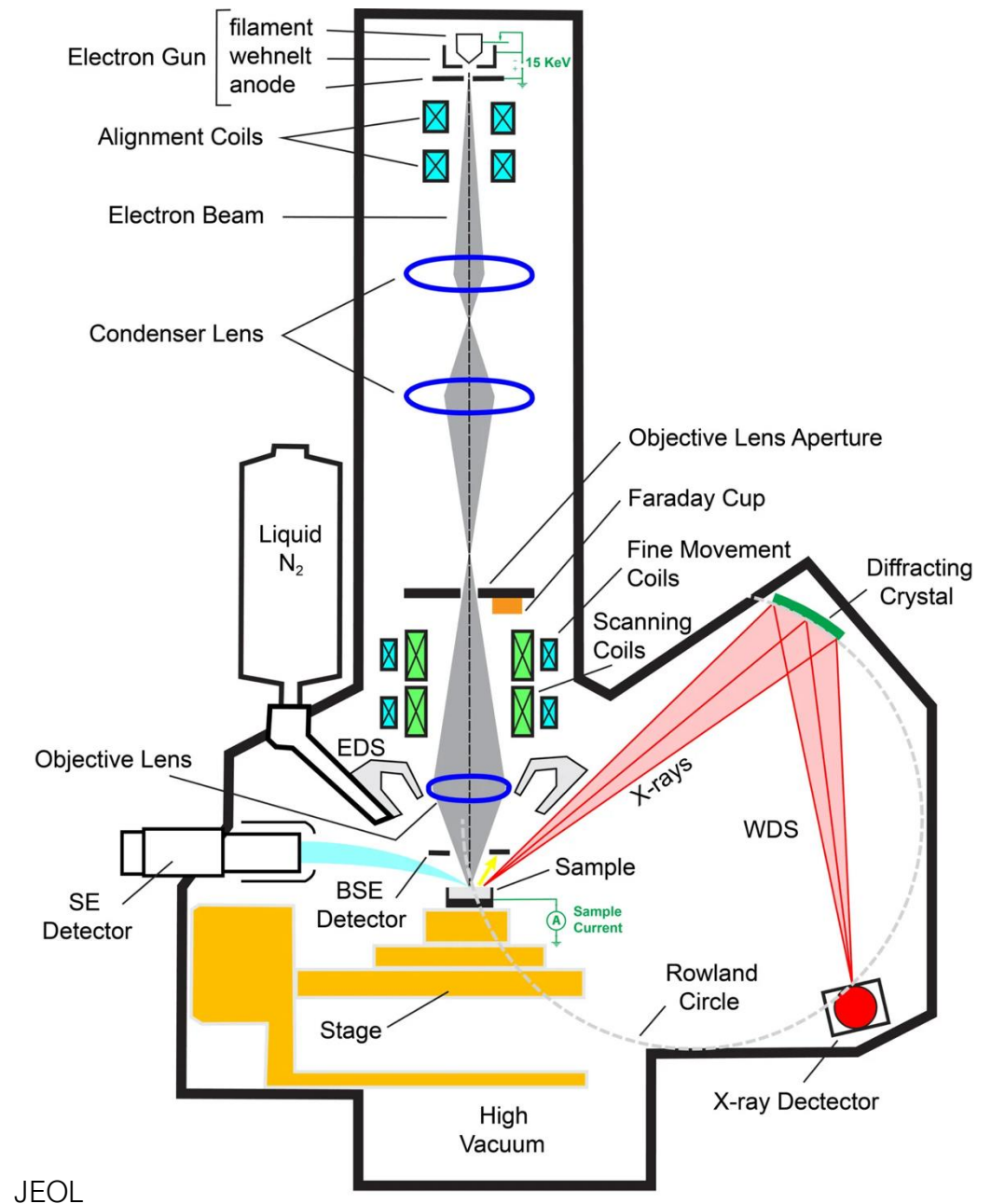


A röntgen spektrum az elemi összetételt jellemzi

Mivel a belső pálya-elektronok vesznek része a jelenség létrejöttében, a spektrum az elemi (és nem molekuláris) tulajdonságokat jellemzi



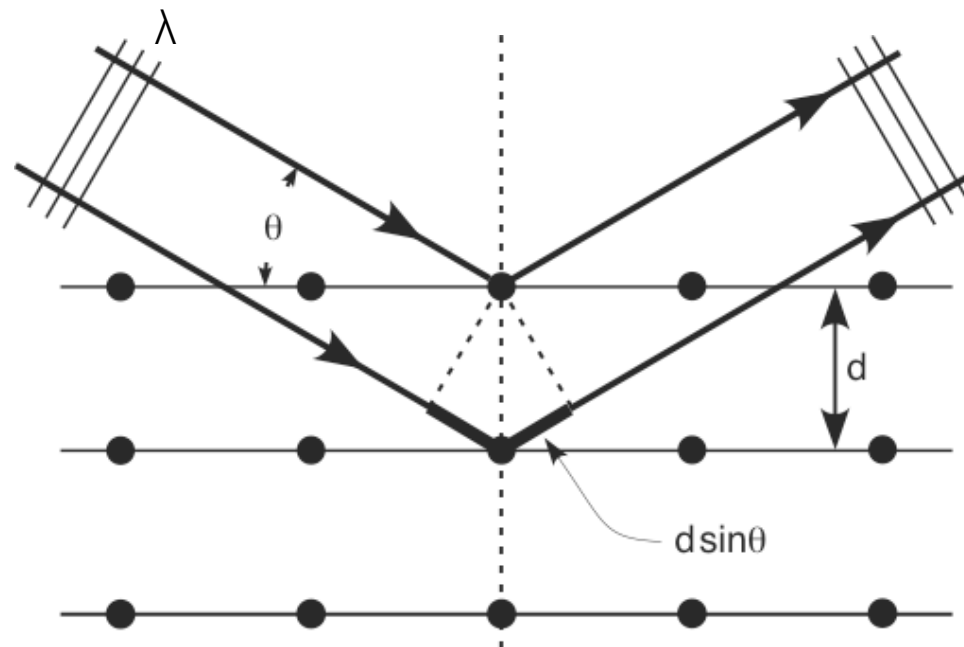
Energiadiszperzív röntgen fluoreszcencia spektrum



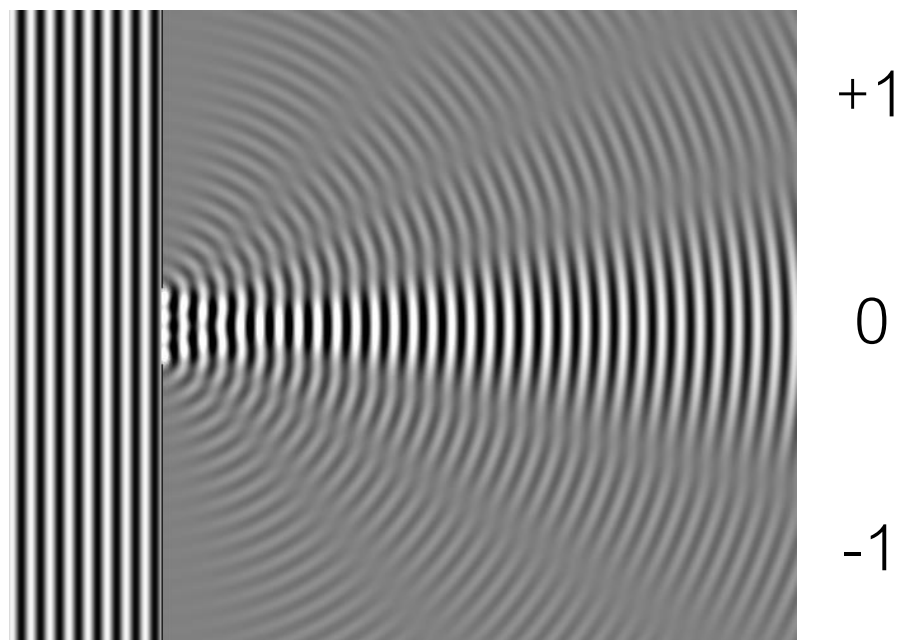
Röntgen spektroszkóp (elektronmikroszkópban!)
(Rtg energiaspektrum mérése)

Röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal

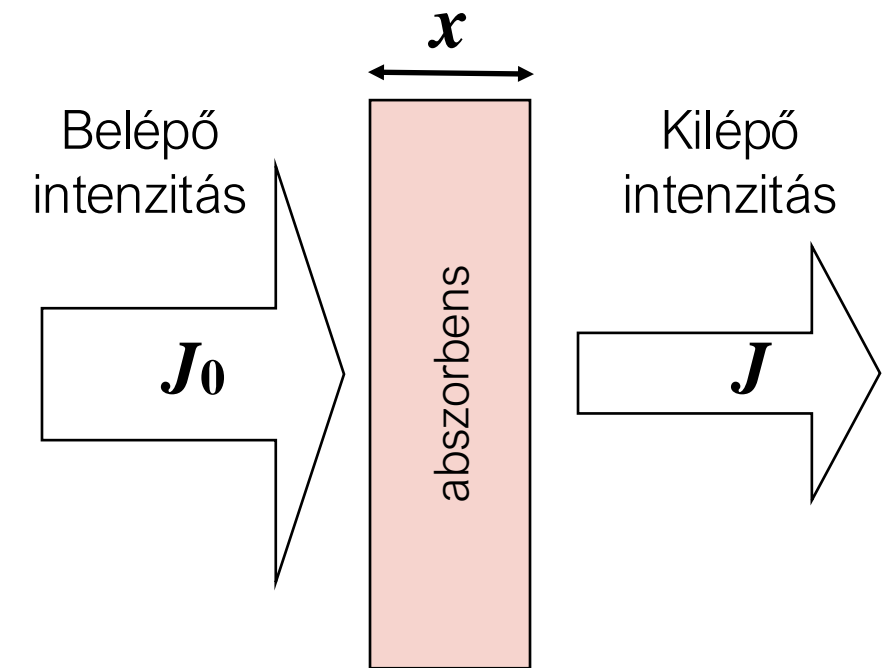
1. Diffrakció



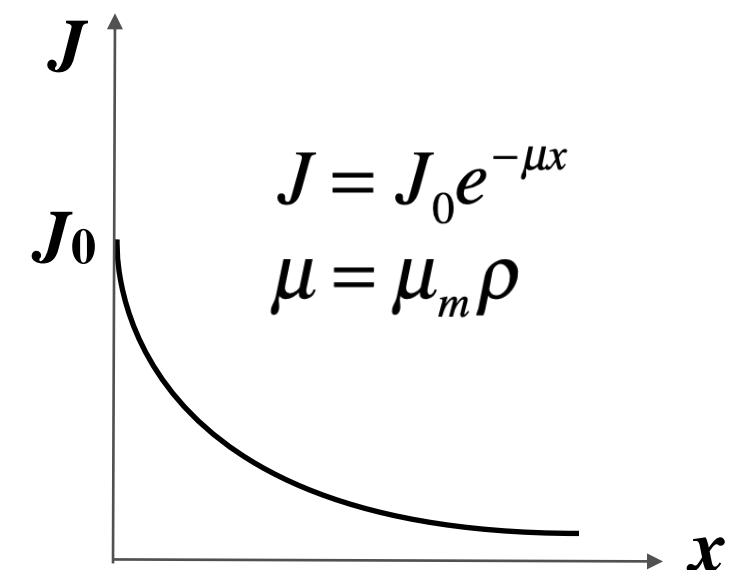
Erősítő
interferencia
feltétele: $2d \sin \theta = n\lambda$



2. Abszorpció

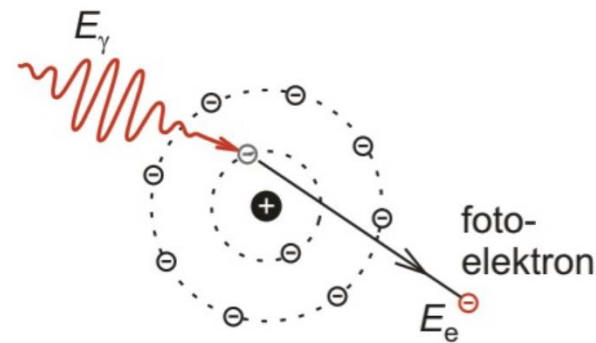


Exponenciális sugárgyengítési törvény



μ : gyengítési együttható
 μ_m : tömeggyengítési együttható (cm^2/g)
 ρ : sűrűség (g/cm^3)

A sugárgyengítés mechanizmusai

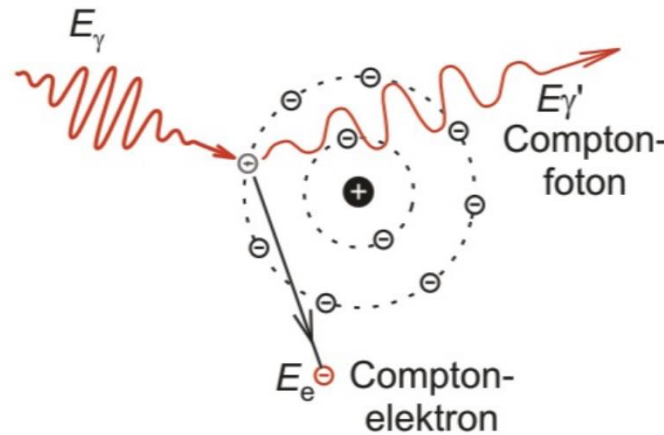


fotoeffektus

$$E_\gamma = A + E_e$$

A = kilépési munka

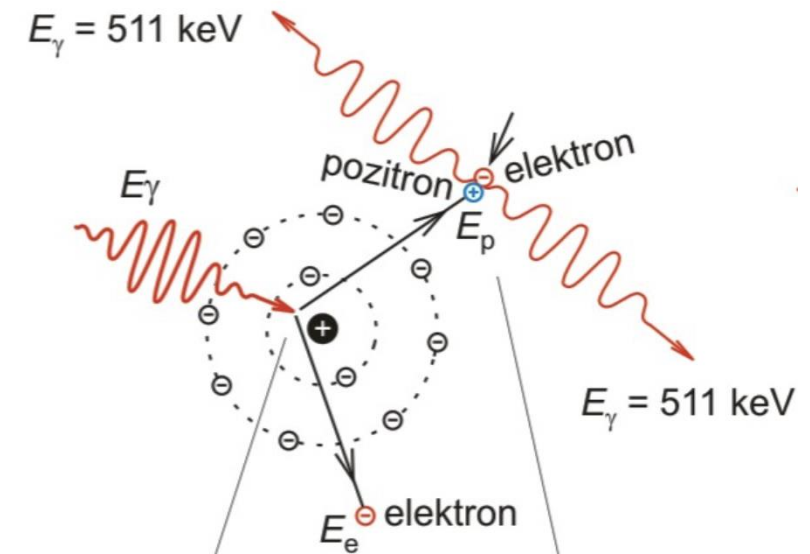
$$\tau = \tau_m \rho$$



Compton-szórás

$$E_\gamma = A + E_e + E_\gamma'$$

$$\sigma = \sigma_m \rho$$



párákeltés, annihiláció

$$E_\gamma = 2 m_e c^2 + E_e + E_p$$

(ha $E_\gamma > 1022 \text{ keV}$)

$$\kappa = \kappa_m \rho$$

τ_m , σ_m , κ_m : tömeggyengítési együtthatók, ρ : sűrűség

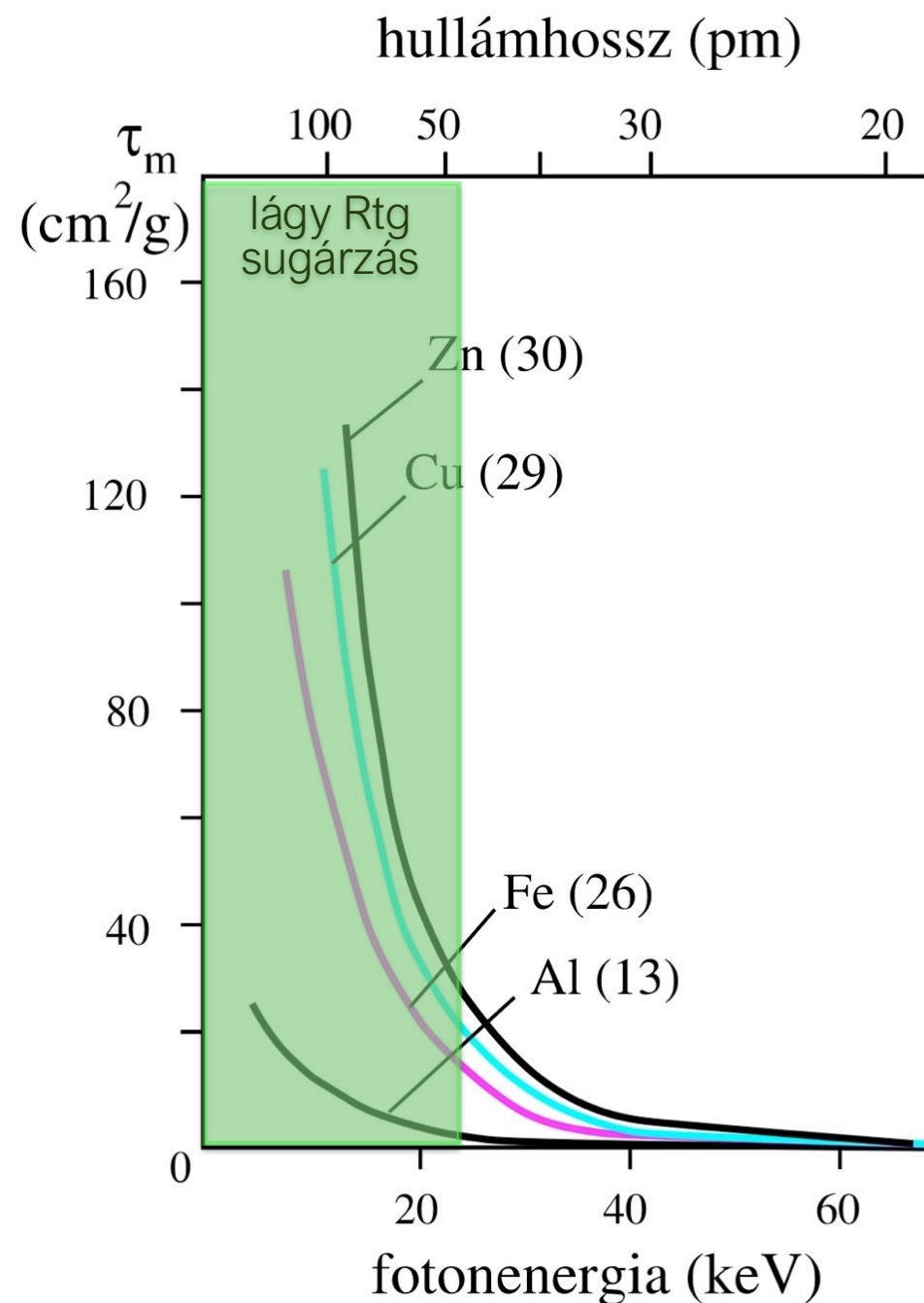
$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$$

Mechanizmus	Tömeggyengítési együttható fotonenergia (ϵ) -függése	Tömeggyengítési együttható rendszám (Z) - függése	Releváns ϵ tartomány 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
Párákeltés	ϵ növelésével lassan nő	$\sim Z^2$	$> 20 \text{ MeV}$

Diagnosztikai röntgen:

1. lágyszövet és csont közötti kontrasztmechanizmus: fotoeffektus ($\sim Z^3$)
2. lágyszöveten belüli kontrasztmechanizmus: Compton-szórás ($\sim \rho$)

A fotoeffektus függ a fotonenergiától és a rendszámtól



$$\tau_m = \text{const} \cdot \frac{Z^3}{\epsilon^3} = C \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$$

$$C = 5,5-6,5 \text{ cm}^2/\text{g nm}^3$$

Többkomponensű rendszerben:
"effektív rendszám" (Z_{eff})

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

ϵ =fotonenergia

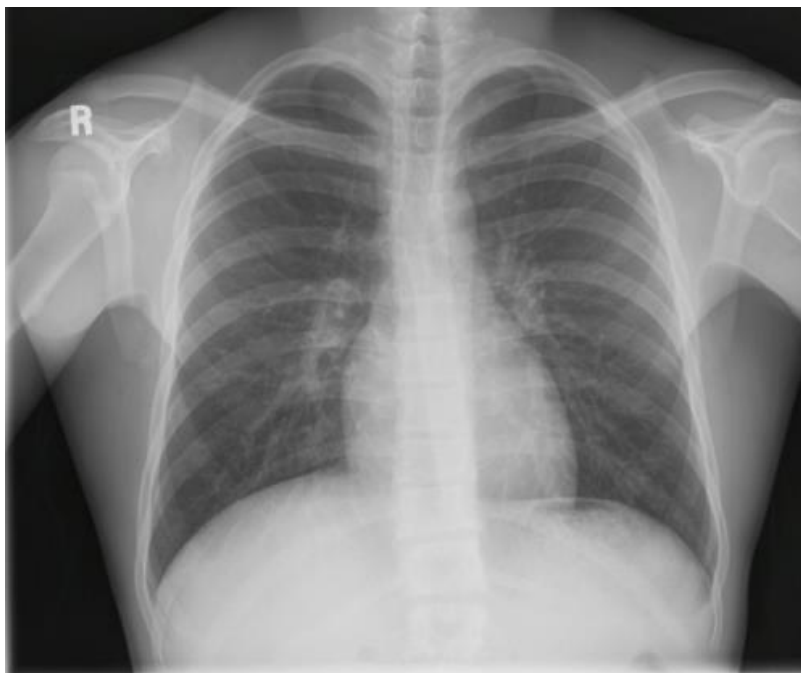
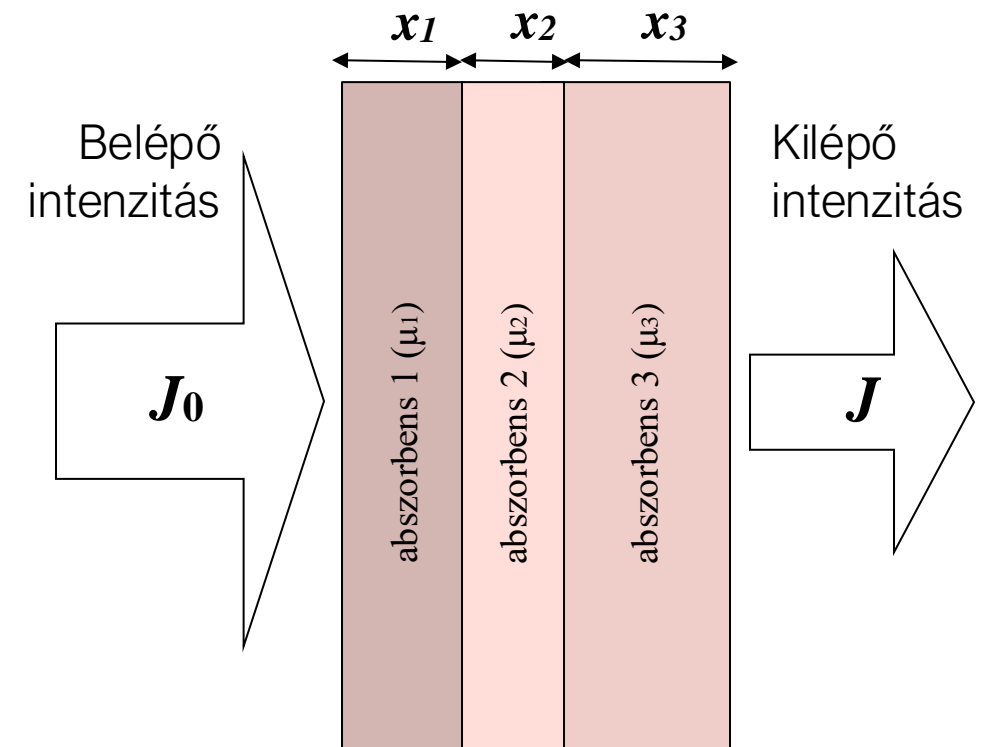
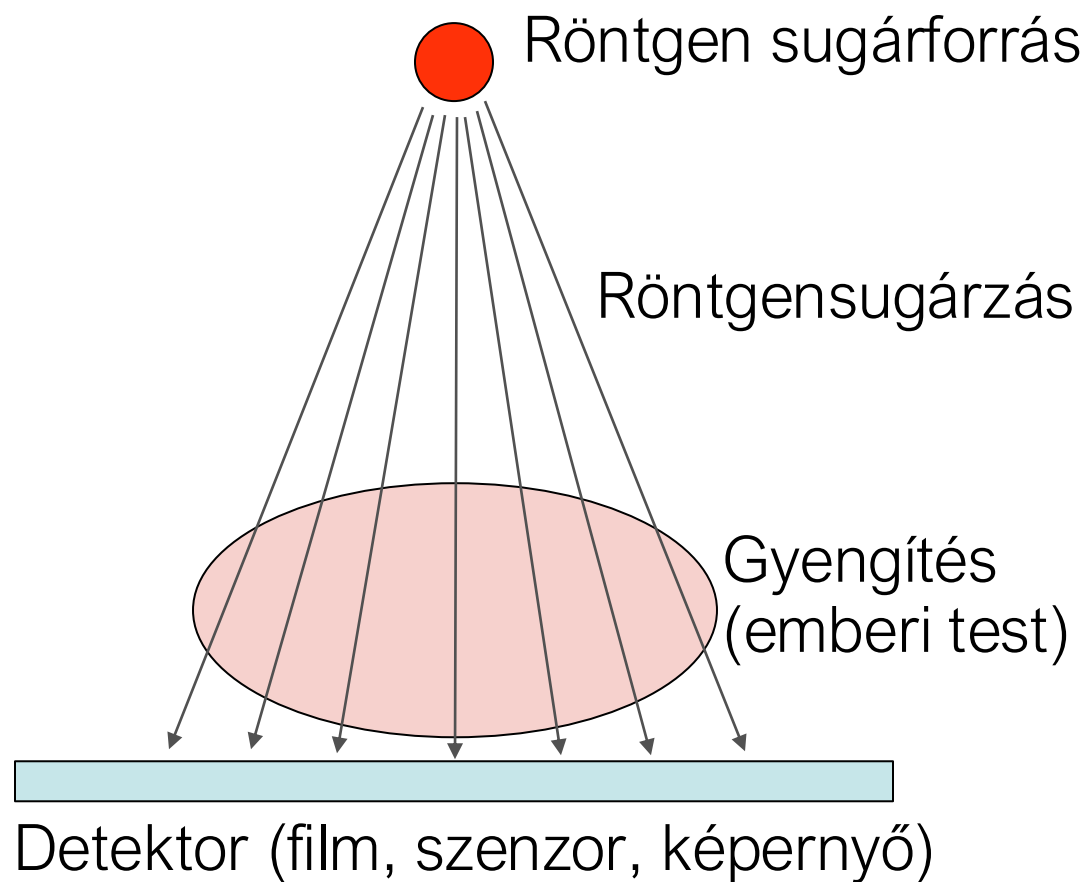
Z =rendszám

w =móltört

n =komponensek száma

Közeg	Z_{eff}
Levegő	7.3
Víz	7.7
Lágyszövet	7.4
Csontszövet	13.8

Az abszorpció az alkalmazások alapja



A röntgenkép szummációs kép. ("röntgen felvétel", "radiográfiás kép", "röntgenogram")
Kontraszt a térben különböző gyengítési együttható miatt lép fel.

$$J = J_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \dots)}$$

$$\lg \frac{J_0}{J} = (\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \dots) \cdot \lg e$$

μ_n : n-edik abszorbens gyengítési együtthatója
 x_n : n-edik abszorbens vastagsága

OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/pre-show-qr.php?type=feedback&qr=J2A5X07QT9XBEGWC>