

# Orvosi Biofizika II

- Röntgensugárzás előállítása és tulajdonságai
- Röntgendiagnosztikai alapok
- Az elektromosság orvosi alkalmazásai
- Termodinamika - egyensúly, változás, főtételek
- Diffúzió, Brown-mozgás, Ozmózis
- Folyadékok és gázok áramlása. A véráramlás biofizikája
- Bioelektromos jelenségek
- Hang, ultrahang
- Érzékszervek biofizikája, látás, hallás
- Az élő anyag építőkövei: víz, makromolekulák, szupramolekuláris rendszerek
- A biológiai mozgás molekuláris mechanizmusai. Biomechanika, biomolekuláris és szöveti rugalmasság
- A biomolekuláris szerkezetet és dinamika vizsgálómódszerei. Az MRI alapjai
- A biomolekuláris szerkezetet és dinamika vizsgálómódszerei. Rtg diffrakció, spektroszkópiák.
- A légzés és a szívműködés biofizikája. Fizikális vizsgálat

# Röntgen- sugárzás

Előállítás, tulajdonságok



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

Sitzungs-Berichte  
Physikalisch-medicinischen Gesellschaft  
WÜRZBURG.

Jahrgang  
1895.

Der Abonnementpreis pro Jahrgang beträgt M 4.-.  
Die Nummern werden einzeln nicht abgegeben.  
Ermäßigte Beiträge erscheinen in Sonderdrucken.

No. 9

Von Dr. Stadelmann u. Dr. v. Sauerbrey in Würzburg.

Inhalt. Konrad Röntgen: Demonstration des sogenannten „Vogelkollimator“  
Eduard Jahn: Ein Beitrag zu den Eigenschaften der Röntgenstrahlen, pag. 175. —  
H. C. Röntgen: Ueber eine neue Art von Strahlen, pag. 182. —  
W. Röntgen: Ueber die Eigenschaften der physikalisch-medicinischen  
Gesellschaft zu Würzburg, pag. 183. — Mitglieder-Verzeichnis, pag. 184.

Am 28. Dezember wurde als Beitrag eingereicht:  
W. C. Röntgen: Ueber eine neue Art von Strahlen.  
(Vorläufige Mittheilung.)

1. Lässt man durch eine Hühnerhaut Vacuumröhre, oder  
einen genügend evacuirten Leuchtrohr, Crookesrohr oder ähn-  
lichen Apparat die Entladungen eines grösseren Ruhmkorff's gehen  
und bedeckt die Röhre mit einem ziemlich eng anliegenden Mantel  
aus dicken, schwarzen Carten, so sieht man in dem vollständig  
verdunkelten Zimmer eines in die Nähe des Apparates gebrachten,  
mit Bariumplatinocyanid angestrichenen Papierschirm bei jeder  
Entladung hell aufleuchtende, barrescenten, gleichgültig ob die an-  
gestrichene oder die andere Seite des Schirmes dem Entladungs-  
apparat zugewendet ist. Die Fluorescenz ist noch in 2 m Ent-  
fernung vom Apparat bemerkbar.  
Man überzeugt sich leicht, dass die Ursache der Fluores-  
cenz vom Entladungapparat und von keiner anderen Stelle der  
Leitung ausgeht.

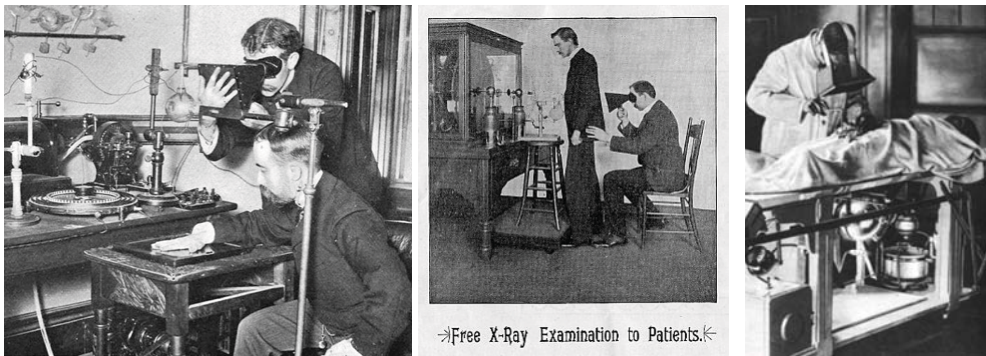
2. Das an dieser Erscheinung zunächst Auffallende ist,  
dass durch die schwarze Cartonhülle, welche keine sichtbaren  
oder ultravioletten Strahlen des Sonnen- oder des elektrischen  
Bogenlichtes durchlässt, ein Agens hindurchgeht, das im Stande  
ist, lebhaftes Fluorescenz zu erzeugen, und man wird 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: \*) hinter einem eingebun-

\*) Mit „Durchlässigkeit“ eines Körpers bezeichne ich das Verhältniss der  
Helligkeit eines Licht hinter dem Körper gehaltenen Fluorescenzstrahlen zu der  
jetzigen Helligkeit des Schirmes, welcher dieser unter denselben Verhältnissen aber  
ohne Zwischenhaltung des Körpers ausgesetzt.



Hand mit Ringen ("Kéz gyűrűvel"):  
Wilhelm Röntgen első "orvosi" röntgenfelvételle  
felesége kezéről (1895 december 22).

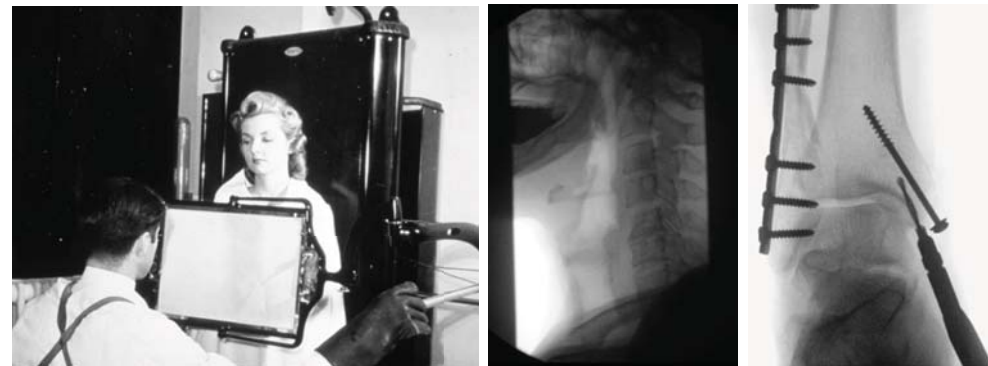
# Papírtölcsér radioszkóp



1890-es évek vége

I. világháború

# Orvosi röntgenfelvétel

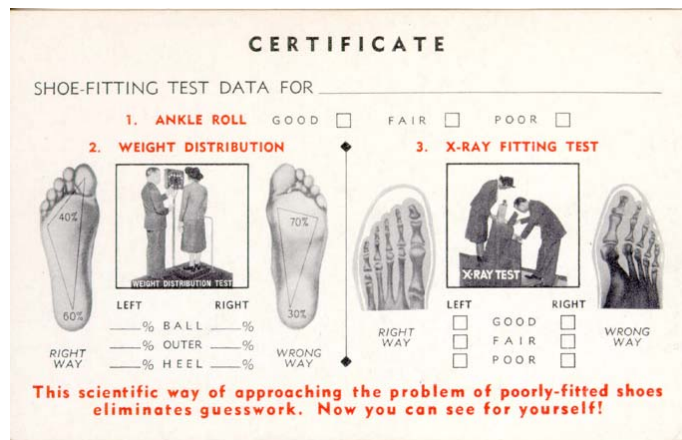


1940

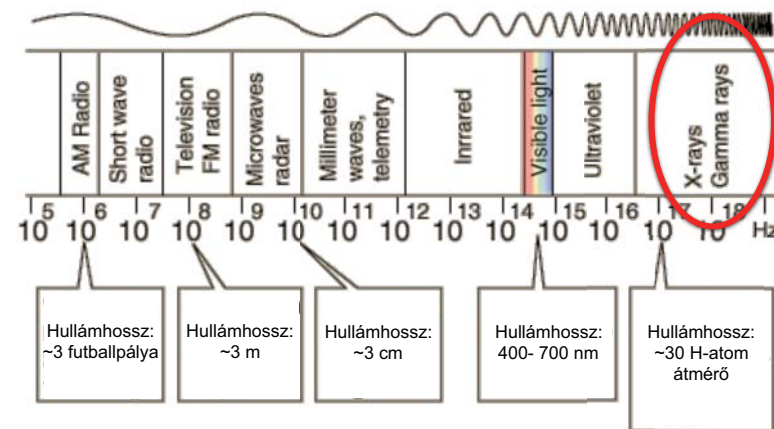
1950

ma

# Cipész fluoroszkóp (1930-50)



# A röntgensugárzás: elektromágneses sugárzás



**Hullámhossz** 10 - 0.01 nm. **Frekvencia** 30x10<sup>15</sup> - 30x10<sup>18</sup> Hz. **Energia** 120 eV - 120 keV.  
(petahertz - exahertz)

# Röntgensugárzás

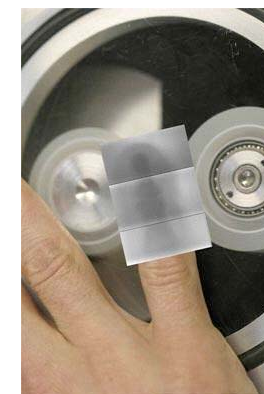
- A röntgensugárzás keltése
- Spektrális tulajdonságok
- A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal 1: diffrakció
- A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal 2: abszorpció

## A röntgensugárzás (nem szokványos) keltése

Tribolumineszcencia: dörzsöléssel kiváltott fényemisszió. Francis Bacon, 1605.

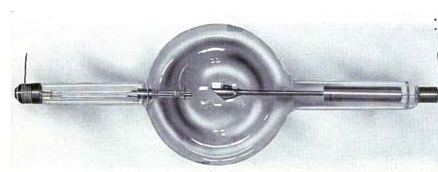
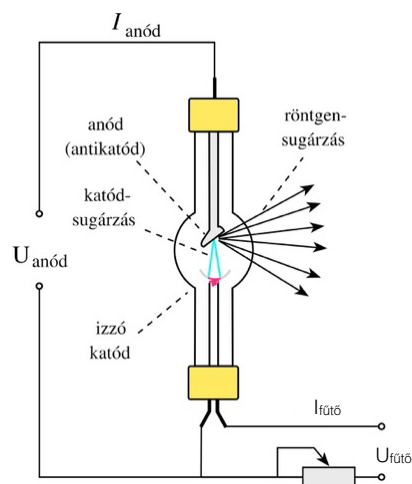


Ragasztószalag lehántásakor látható fotonok...



...és röntgenfotonok emittálódnak. (Nature News, October 2008)

## Röntgensugárzás keltése - gyakorlat



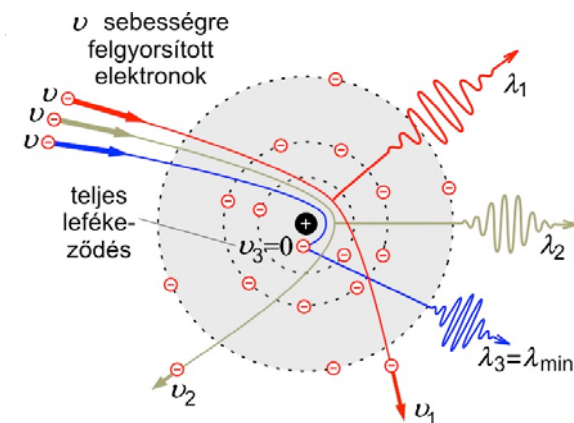
Röntgenső (Coolidge, 1900-as évek eleje).



Forgóanódos röntgenső (anód forgás hűtés végett)

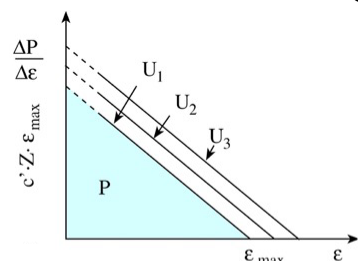
## Fékezési röntgensugárzás

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

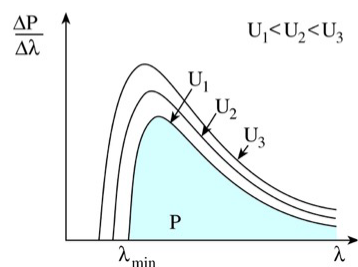


"Bremsstrahlung"

# A fékezősi röntgensugárzás spektruma



Folytonos spektrum



$$eU_{anód} = \epsilon_{max} = hf_{max}$$

Maximális fotonenergia ( $\epsilon_{max}$ )

$h$  = Planck állandó;  $c$  = fénysebesség;  $e$  = elektron töltése;  $eU_{anód}$  = gyorsítási munka

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

Határhullámhossz ( $\lambda_{min}$ )  
(Duane-Hunt-törvény)

$$\frac{\Delta P}{\Delta \epsilon} = c \cdot Z \cdot (\epsilon_{max} - \epsilon)$$

Energiaspektrum  
(teljesítmény energia-függése)

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

Összteljesítmény  
(háromszög területe alapján)

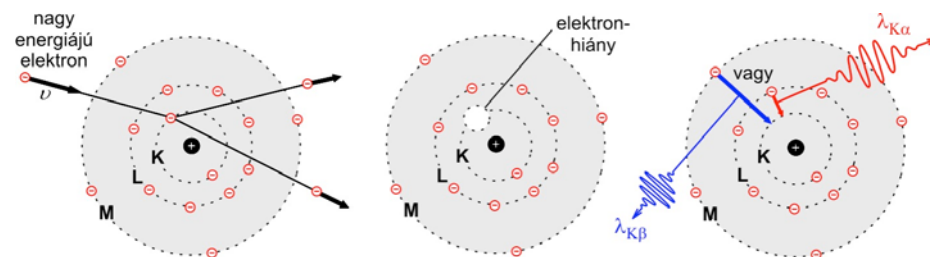
$$P_{tot} = C_{Rtg} \cdot I_{anód} \cdot U_{anód}^2 \cdot Z$$

Összteljesítmény

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

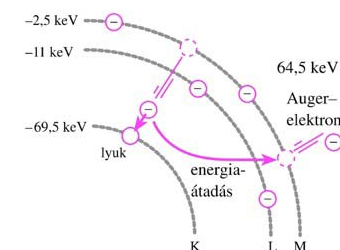
Hatékonyság <1%

# Karakterisztikus röntgensugárzás

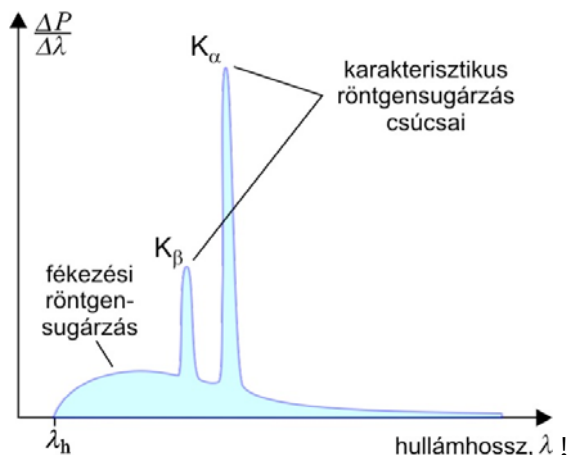


A belső pályáról kilökött elektron nagyenergiájú pályáról pótlódik

Elektronátmenet energiája külső héji elektron kiszabadulására fordítható: Auger elektron



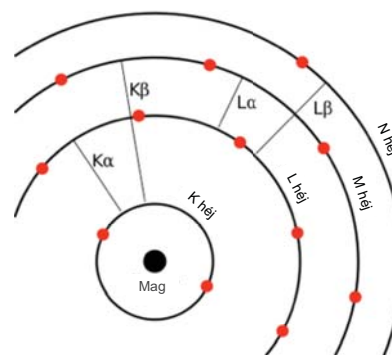
# Karakterisztikus röntgensugárzás spektruma



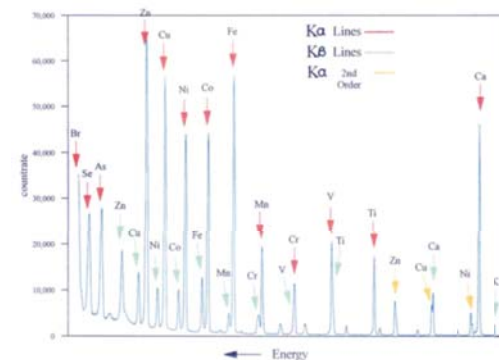
Vonalas spektrum

# 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



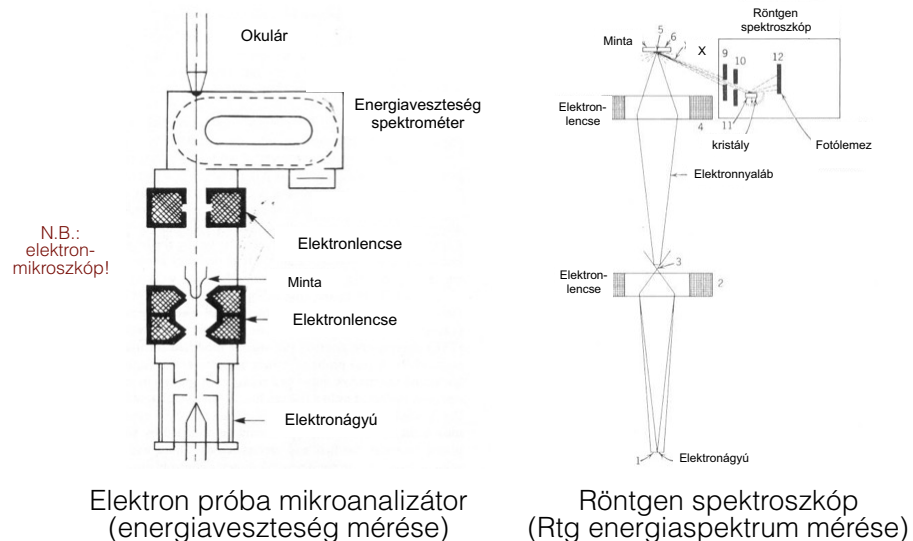
Elektron átmenetek Ca atomban



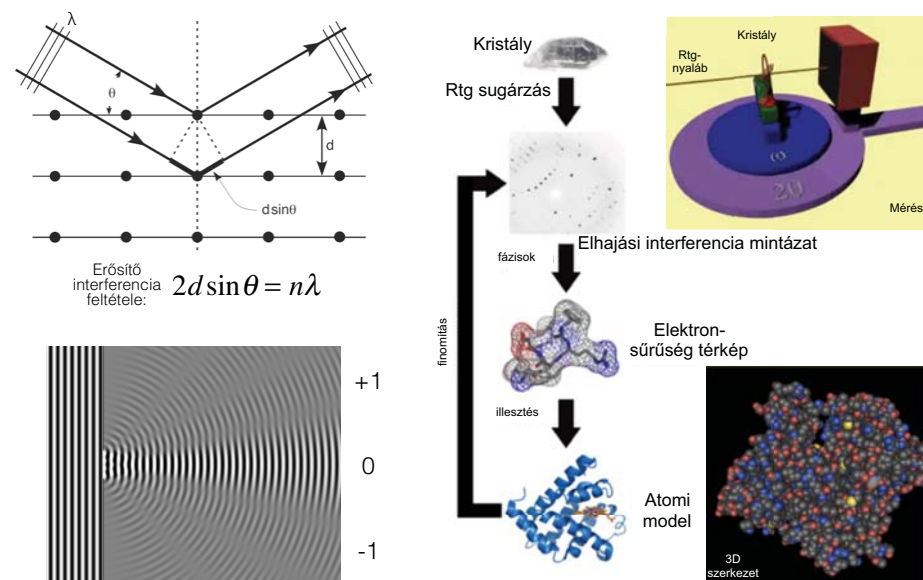
Energiadisziperzív röntgen fluoreszcencia spektrum



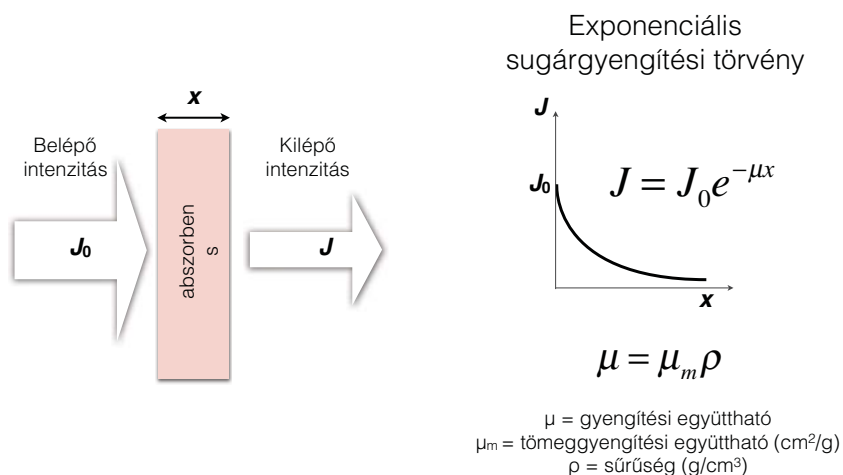
# Karakterisztikus röntgensugárzás detektálása



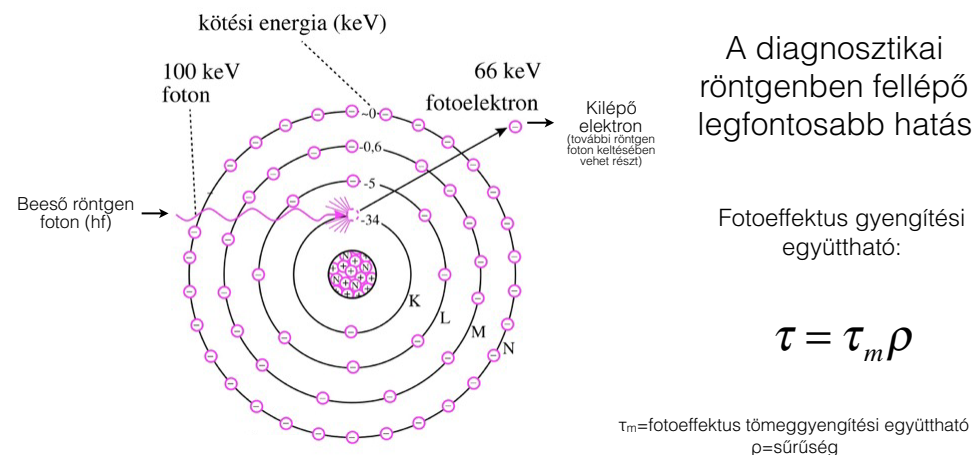
# A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal 1: Diffrakció



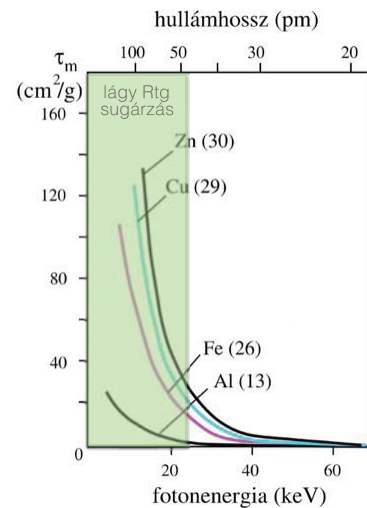
# A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal 2: Abszorpció



# Kölcsönhatás mechanizmus I: Röntgen fotoeffektus



# A fotoeffektus függ a fotonenergiától és a rendszámtól



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

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

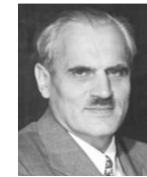
Többkomponensű rendszerben:  
"effektív rendszám" ( $Z_{\text{eff}}$ )

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

$E$ =fotonenergia  
 $Z$ =rendszám  
 $w$ =móltört  
 $n$ =komponensek száma

Közeg	$Z_{\text{eff}}$
Levegő	7.3
Víz	7.7
Lágy szövet	7.4
Csontszövet	13.8

# Kölcsönhatás mechanizmus II: Compton szórás



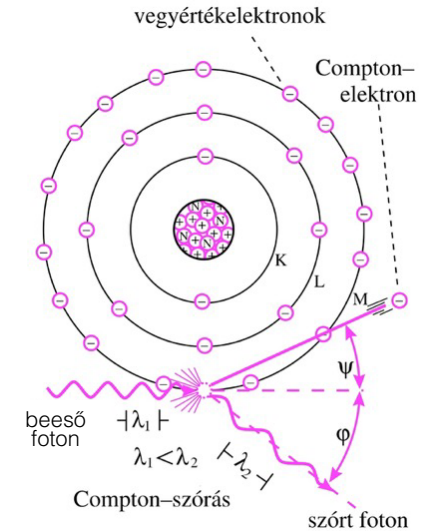
Arthur Holly Compton  
(1892-1962)

Energiamérleg:  
 $hf = A + hf_{\text{scatt}} + E_{\text{kin}}$

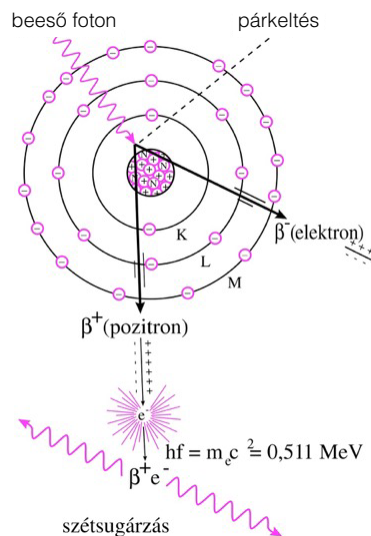
$A$ =kötési energia  
 $hf_{\text{scatt}}$ =szórt foton energiája  
 $E_{\text{kin}}$ =Compton-elektron mozgási energiája

Compton-effektus  
gyengítési együttható:

$$\sigma = \sigma_m \rho$$



# Kölcsönhatás mechanizmus III: Párkeltés



(csak a terápiás röntgensugárzás esetében  
releváns)

Energiamérleg:

$$hf = 2m_e c^2 + 2E_{\text{kin}}$$

$m_e$ =elektron tömege  
 $c$ =fénysebesség

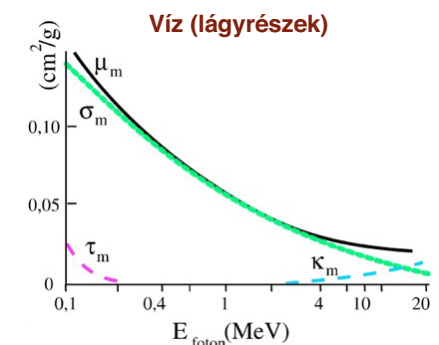
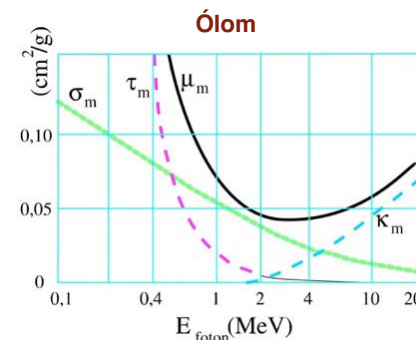
Párkeltés gyengítési  
együttható:

$$\kappa = \kappa_m \rho$$

A párkeltés a nagyenergiájú  
(terápiás) röntgensugárzás és a  
 $\gamma$ -sugárzás esetében jelentős.

# Sugárgyengítési mechanizmusok

Fotonenergia és közeg hatása



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

$\mu_m$ =tömeggyengítési együttható

$\sigma_m$ =Compton-szórás tömeggyengítési együttható

$\tau_m$ =fotoeffektus tömeggyengítési együttható

$\kappa_m$ =párkeltés tömeggyengítési együttható

# Sugárgyengítési mechanizmusok

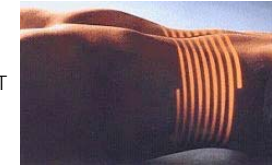
Mechanizmus	$\mu_m$ változása fotonenergiával ( $\varepsilon$ )	$\mu_m$ változása a rendszámmal (Z)	Releváns foton- energiatartomány lágyszövetben
fotoeffektus	$\sim 1 / \varepsilon^3$	$\sim Z^3$	10 - 30 keV
Compton-szórás	$\varepsilon$ növelésével lassan csökken	$\sim Z/A$ (A = tömegszám)	30 keV - 20 MeV
párkeltés	$\varepsilon$ növelésével lassan nő	$\sim Z^2$	> 20 MeV

Diagnosztikai röntgen:

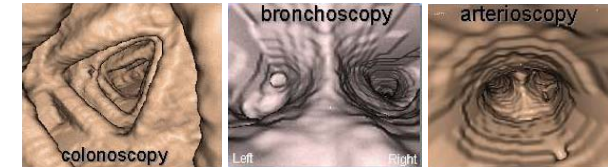
1. lágyrész-csont közötti kontrasztmechanizmus: fotoeffektus ( $\sim Z^3$ )
2. lágyrészen belüli kontrasztmechanizmus: Compton-szórás ( $\sim \rho$ )

# Rtg-sugárzás mai orvosi alkalmazásai

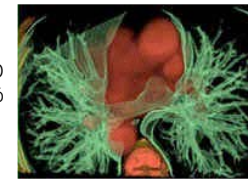
Spirális CT



Virtuális  
endoszkópia



3D  
rekonstrukció



Angiográfia

