

A röntgensugárzás természete, forrásai és biológiai hatásai „X-rays”

Dr. Fidy Judit
egyetemi tanár
2012 Febr.29

emlékeztető

Elektromágneses sugárzások
Foton-konceptió az anyagi kölcsönhatásokban
Foton partnere az elektron
A foton-energiát gyakran eV-egységekben fejezik ki

$$E_{\text{foton}} = hf$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

emlékeztető

Elektromágneses sugárzások

Foton-konceptió az anyagi kölcsönhatásokban
Foton partnere az elektron
A foton-energiát gyakran eV-egységekben fejezik ki

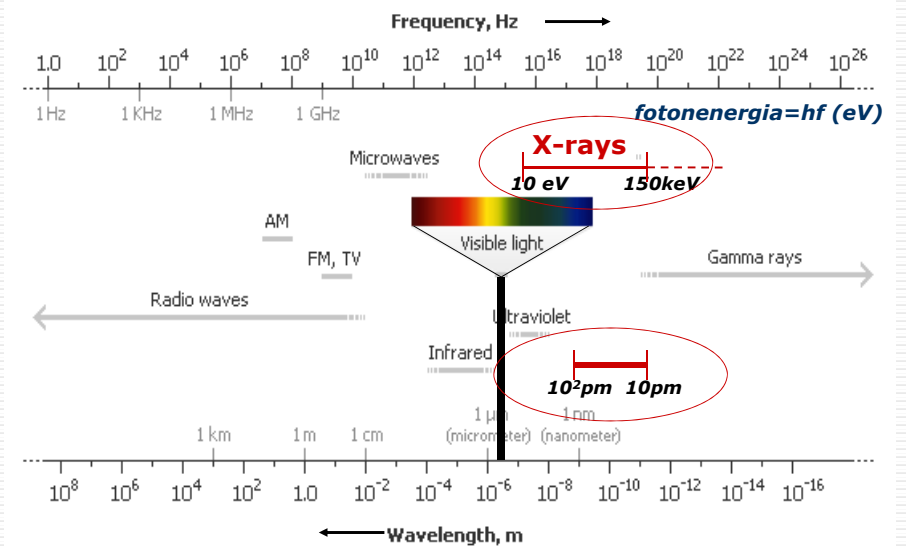
$$E_{\text{foton}} = hf$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

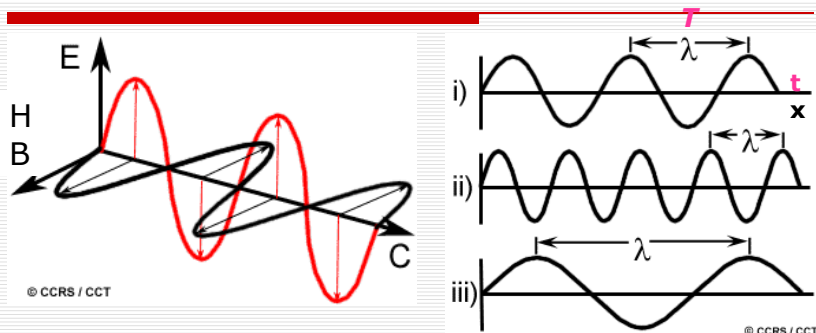
Fény – X-rays elektromágneses hullámok

Logaritmikus skála

$10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nanometer}$



EM hullámok fontos tulajdonságai



$$c = \lambda / T, \quad f = 1/T, \quad c = f\lambda (\text{m/s})$$

$$c = 299,792,458 \text{ m/s vákuumban}$$

$$c = \frac{E}{B}$$

emlékeztető

Elektromágneses sugárzások

Foton-koncepció az anyagi kölcsönhatásokban

Foton partnere az elektron

A foton-energiát gyakran eV-egységekben fejezik ki

$$E_{\text{foton}} = hf$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

emlékeztető

Elektromágneses sugárzások

Foton-koncepció az anyagi kölcsönhatásokban

Foton partnere az elektron

A foton-energiát gyakran eV-egységekben fejezik ki

$$E_{\text{foton}} = hf$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

emlékeztető

Elektromágneses sugárzások

Foton-koncepció az anyagi kölcsönhatásokban

Foton partnere az elektron

A foton-energiát gyakran eV-egységekben fejezik ki

$$E_{\text{foton}} = hf \quad h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

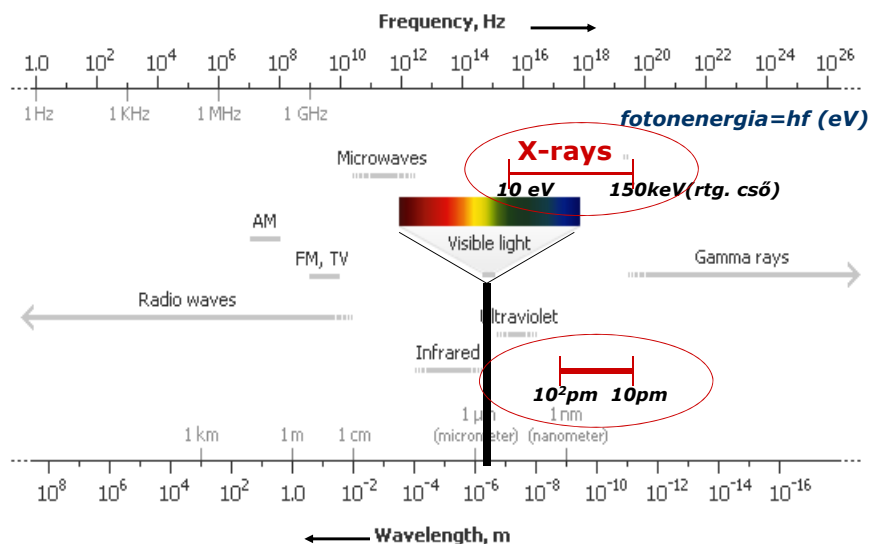
$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

fénypoton energiája: $\sim 1.5 - 3 \text{ eV}$

Fény – **X-rays** elektromágneses hullámok

Logaritmikus skála

$10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nanometer}$



Sugárzások és biológiai rendszerek ?

Ionizáló és nem-ionizáló sugárzások

Látható fény (nem ionizáló)

hatása: elektrongerjesztés

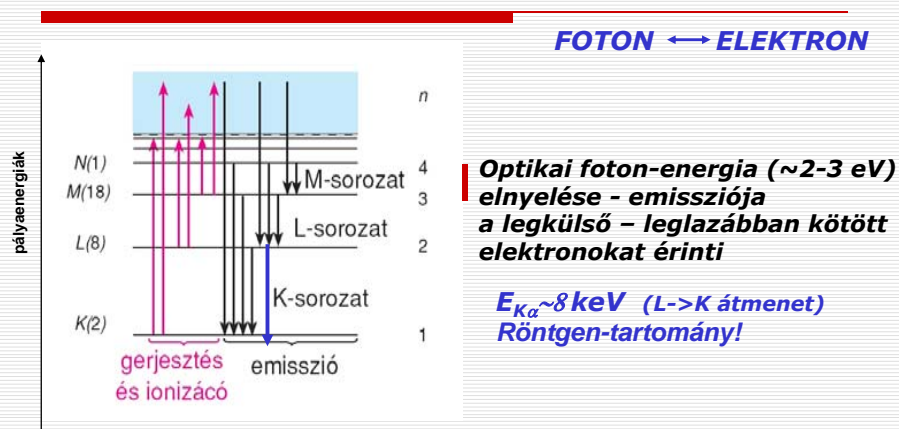
Röntgensugárzás

(Röntgen-cső, szerkezetvizsgálat, diagnosztika)

primer hatása: ionizáció

Sok-elektronos rendszerek elektron-energiái

Egyszerű példa: **Cu atom**



fény ↔ röntgensugárzás

	fény	röntgensugárzás (rtg. cső)
Fotonenergia	1.5 – 3 eV	20 – 150 keV
Primér hatás	e^- gerjesztés	e^- ionizáció
Elnyelődés valószínűsége	diszkrét fotonenergiáknál	energia folytonos (!) függvénye

Abszorpciós spektrum

1896 Jan. 23



(a)
Figure 4.10 Two radiographs taken by Röntgen. (a) The hand of Mrs. Röntgen. (The Bettmann Archive/Bettmann Newsphotos.) (b) Radiograph of a fully clothed man, showing not only the man's skeleton but also the keys in his pockets, the nails of his shoes, and the metal clasps of his garters. (Deutsches Museum, München.)



Wilhelm Konrad Röntgen
(1845-1923)



The „Golden Years” of physics

1895: X-rays – Röntgen

1896: rádioaktivitás – Becquerel

1897: elektron – J. J. Thomson

1898: Radium – Pierre and Mme Curie

Wilhelm Conrad Roentgen

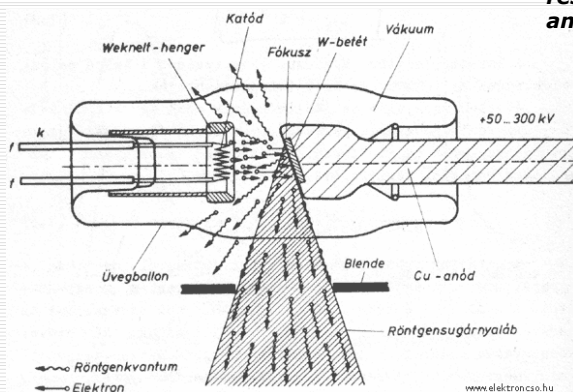
Felfedezés 1895 November -> publikáció Decemberben ->

-> 1896 Január: Orvosi alkalmazások

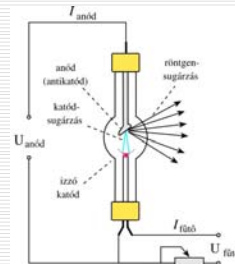
Magyarország: Műegyetemen orvosi diagnosztikai berendezés, 1896

Első fizikai Nobel-díj 1901

Röntgensugárzás keltése röntgensővel



Rtg. Sug. keletkezik,
ha nagy sebességű töltött
részecskék nagy rendszámú
anyagban lefékeződnek.



$$\eta = \frac{P_{sug}}{P_{el}} < 1 \%$$

Az anódban nagy a hőfejlődés

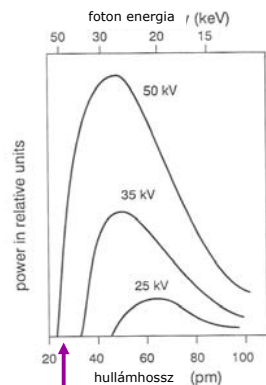
Röntgensövek - forgó anód
- hűtés



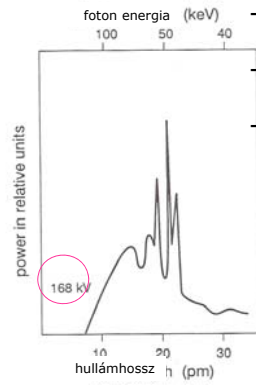
A röntgensugárzás keletkezésének mechanizmusai

Emissziós spektrumok növekvő gyorsító feszültség mellett

$$c = \lambda * f \quad E_{foton} = h * f$$



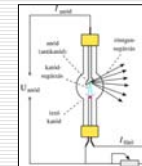
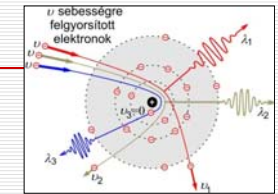
Határoló hullámhossz λ_{hat}



- Nagy feszültség (U) mellett a spektrum vonalassá válik
- Az össz-teljesítmény erősen nő a feszültséggel
- A spektrum a rövid hullámhosszú oldalon élesen végződik, λ_{hat} csökken, ha U nő

Kétféle mechanizmus 1. Fékezősi röntgensugárzás (Bremsstrahlung)

- minden (nagy) U-nál
- spektruma folytonos
- teljes kisugárzott teljesítmény:



$$P_{rtg} = konst * U^2 * I * Z$$

$$1.1 * 10^{-9} V^{-1}$$

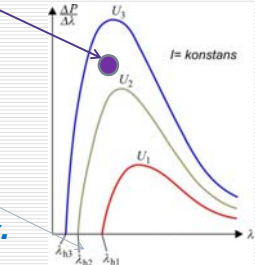
Anód anyaga

-spektruma λ -ban alulról határolt

$$q_e U = \frac{1}{2} m_e v^2 = h f_{li} = h \frac{c}{\lambda_h}$$

$$\lambda_h = \frac{h * c}{q_e U}$$

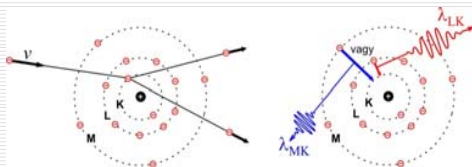
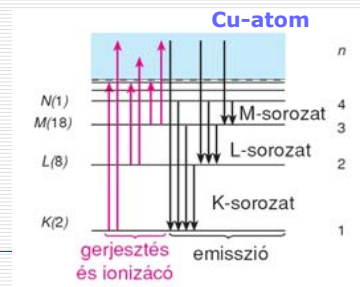
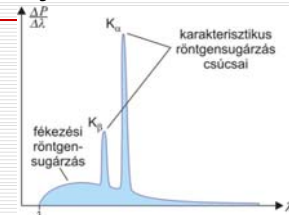
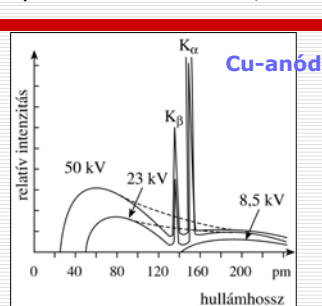
Duane-Hunt törv.



ezen alapul a röntgendiagnosztika

2. Karakterisztikus röntgensugárzás

- csak elég nagy U felett
- spektruma vonalas, az anód anyagára jellemző



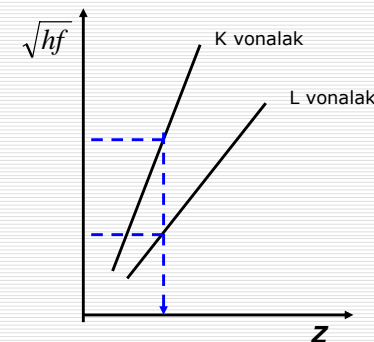
1. Ionizáció

2. üres állapot betöltése

A karakterisztikus röntgensugárzás alkalmazásai

- Igen érzékeny és pontos kémiai analízis

anód = vizsgálandó anyag
röntgenfluoreszcencia



Minőségi analízis:

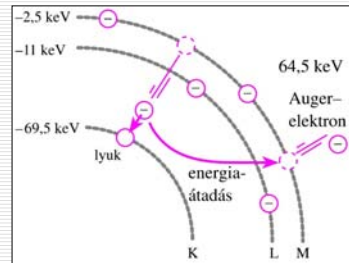
A spektrumvonalak
fotonenergiái alapján a
rendszer azonosítható

Kriminológia!

A karakterisztikus röntgensugárzás alkalmazásai

- Igen érzékeny és pontos kémiai analízis

Auger-elektron-spektroszkópia



$$E_{kin. Auger}$$

Mérésével az átmeneti energiákat lehet meghatározni →

Felületek kémiai analízise vákuumban

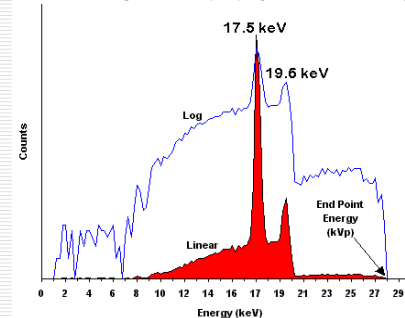
Kis rendszámú anyagoknál valószínű
Versenyez a karakterisztikus rtg sugárzással

A karakterisztikus röntgensugárzás alkalmazásai

- A teljes kisugárzott rtg. intenzitásban kis járulék
általában elhanyagolható

De: Molibdén anódos röntgenszó

Direct Molybdenum (Mo) Spectrum at 28 kVp



Lágy szövetekben igen jól elnyelődő
monokromatikus sugárzás



Mammográfia

Röntgendiagnosztikai alkalmazások (fékezési sugárzás)

A diagnosztikai alkalmazások a rtg sugárzás szöveti
elnyelődésén alapulnak

Érvényes az exponenciális abszorpció-törvény

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

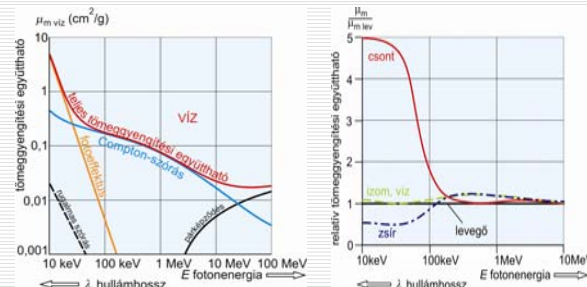
Abszorpció együttható

Tömeggyengítési együttható

MINŐSÉGI JELLEMZŐ

Abszorbens
anyaga

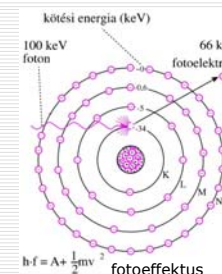
Sugárzás
fotonenergiája



diagnosztika → terápia

A diagnosztikai alkalmazások a rtg sugárzás szöveti
elnyelődésén alapulnak

Az elnyelt fotonenergia ionizáló mechanizmusai
a rtg cső energiatartományában (< 200 keV)

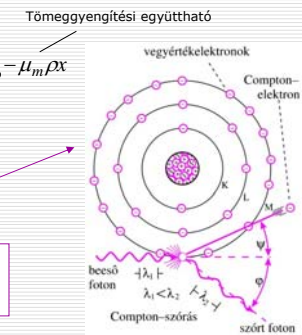


$$J = J_0 e^{-\mu x} = J_0 e^{-\mu_m \rho x}$$

$$\mu = \mu_m \rho$$

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

τ_m erősen függ Z-től
és a fotonenergiától



$$hf = A + \frac{1}{2} mv^2 + hf'$$

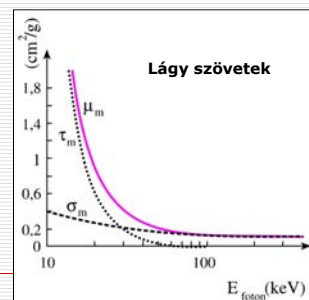
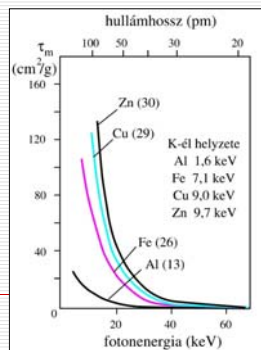
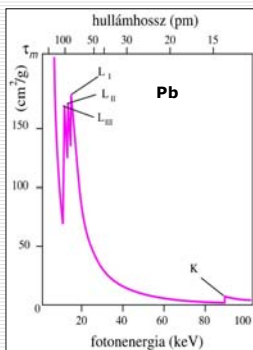
A rtg sugárzás elnyelődésének függése az energiától és az anyagi minőségtől

abszorpciós spektrumok

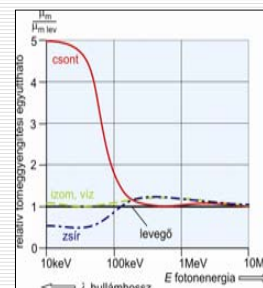
ABSORPCIÓS FOLYAMAT	μ_m függése a Z rendszámtól	μ_m függése az E fotonenergiától
rugalmas szórás	$\mu_m \sim Z^2$	$\mu_m \sim 1/E^2 \sim \lambda^2$
fotoeffektus	$\mu_m \sim Z^3$	$\mu_m \sim 1/E^3 \sim \lambda^3$
Compton-szórás	közel független	enyhén csökkenő

dominál az effektusokban

$$\mu_m(hf) \approx \tau_m(hf)$$

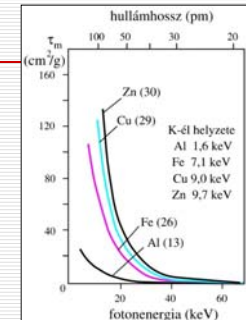


Rtg-diagnosztikai szempontok - kontrasztanyagok



$$\tau_m = konst * \lambda^3 Z^3$$

$$J = J_0 e^{-\mu x} = J_0 e^{-(\tau_m + \sigma_m) \rho * x}$$



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

móltört

közeg	Z_{eff}	ρ (g/cm³)
levegő	7,3	$1,3 \cdot 10^{-3}$
víz	7,7	1
lágyszövet	7,4	1
csontszövet	13,8	1,7-2

Rtg-kép kontrasztja függ a

- **Sűrűségkülönbségektől**
- > **negatív kontrasztanyagok**
- **rendszám-különbségektől**
- > **pozitív kontrasztanyagok**

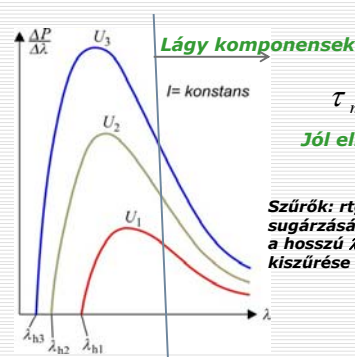
Példa kontrasztanyag használatára



Vastagbél felvétel negatív és pozitív kontrasztanyag használatával

Ablakozás

Rtg-diagnosztikai szempontok - lágyszugárzási komponensek kiszűrése



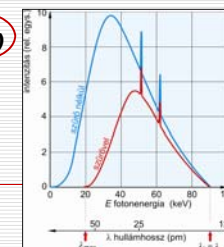
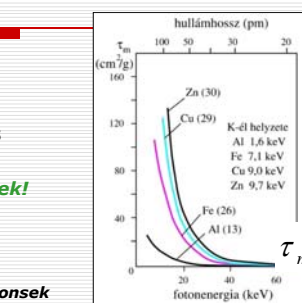
$$\tau_m \approx \lambda^3$$

Jól elnyelődnek!

Szűrők: rtg cső sugárzásából a hosszú λ komponensek kiszűrése → **Z!**

Al(13)

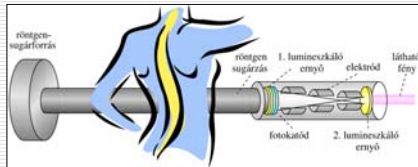
A rtg-csőből széles hullámhossztartományú (fotonenergia-tartományú) sugárzás lép ki



Rtg-diagnosztikai szempontok – a sugárterhelés csökkentése, digitalizálás

Rtg-kép erősítő

- optikai kép, de kicsinyített
- sugárterhelés csökken



Lézer-szkennер

Új lumineszkáló anyagok fejlesztése

C-karos készülék rtg.-kép erősítővel



Rtg-diagnosztikai szempontok – a sugárterhelés csökkentése, digitalizálás



Rtg-diagnosztikai szempontok – a digitalizálás jelentősége: DSA

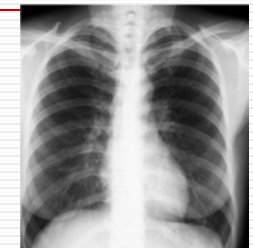
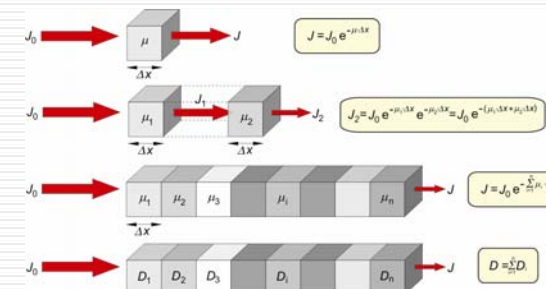
DSA: Digital Subtraction Angiography

Menete:

1. Hagyományos rtg felvétel -> digitalizálás, tárolás
2. Kontrasztanyag beadása (beteg nem mozdul)
3. Második felvétel kontrasztanyaggal -> digitalizálás, tárolás
4. Pixelenként a két kép különbsége -> megjelenítés



Rtg-diagnosztikai szempontok – az átvilágításban „szummációs” kép keletkezik



$$D = \lg \frac{J_0}{J}$$

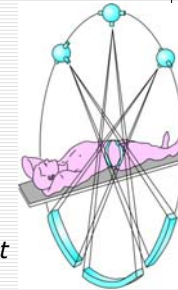
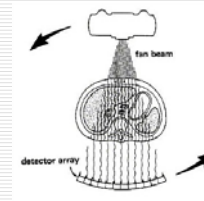
Megoldás: egy testszelet többirányú átvilágítása → minden képelem több kombinációban → **Röntgen- CT** (gyakorlaton)

Eddig hangzott el + röntgenkristallográfia röviden

Röntgen-CT

Mérési adatgyűjtés:

-jól definiált sok irány mentén, egy síkban



-minden képelem legalább két független irány mentén

-kiértékelés: számítással $\rightarrow \mu_i$ képelemenként \rightarrow vizualizálás



G.H.Hounsfield A.M.Cormack
Nobel díj 1979

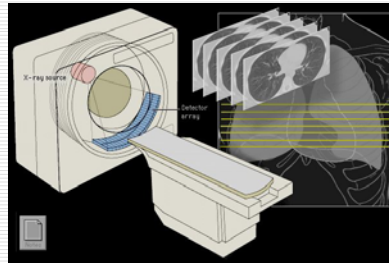
Nagy sugárterhelés
 $\sim 500x$ hagyományos

Röntgen-CT

Testtengelyre merőleges metszeti képek: μ -eloszlások

CAT-SCAN \rightarrow 3D adathalmaz

Axiális metszetek



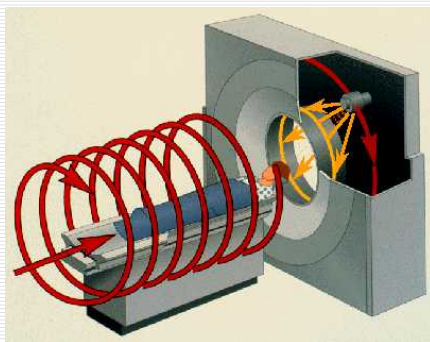
Röntgen-CT

CAT-SCAN --- a készülék



Röntgen-CT

legmodernebb adatgyűjtés: **SRIRÁL-CT**



Röntgen-CT

Hounsfield-skála - ablakozás

$$HU = \frac{\mu - \mu_{\text{víz}}}{\mu_{\text{víz}}} * 1000$$

Tömör csont	250-1000
Szivacsos csont	130-100
Máj	65
Izom	45
Vese	30
Koagulált vér	80
Vér	55
Plazma	27
Zsírszövet	-65
Tüdő	-500, -800

Ablakozás: egy adott tartomány széthúzása a teljes szürke-skálán



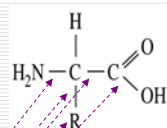
A röntgensugárzás alkalmazásai

a szerkezetkutatásban

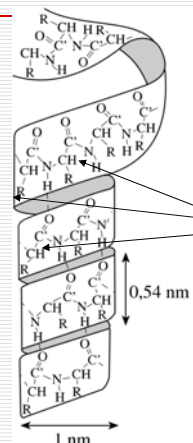
Biológiai makromolekulák „szerkezete”



Fehérje
 $d \sim 4-6 \text{ nm}$



elsődleges
kötések
 $d \sim 0.153 \text{ nm}$



H-hidak
Van der Waals
köölcsönhatások
 $d \sim 0.3 \text{ nm}$

1 nm

Szerkezeti paraméterek: $d \sim 0.1 - \text{néhány nm}$

A röntgensugárzás alkalmazásai

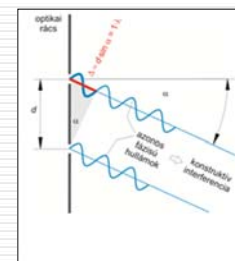
a szerkezetkutatásban

A biológiai makromolekulák **atomi felbontású szerkezetének** meghatározása **a röntgensugárzás diffrakcióján** alapul.

Diffrakció és interferencia -
az erősítés feltétele:

$$\Delta = d * \sin \alpha = k * \lambda$$

$$\begin{aligned} d &\approx \lambda \\ d &\geq \frac{\lambda}{2} \end{aligned}$$



A tárgy periodikusan ismétlődő részletének jellemző mérete, ami diffrakciót okoz

Makromolekula **kristályos állapotban**:
→ periodikusan ismétlődő szerkezeti paraméterek

$d \sim$ atomi kötéstávolságok

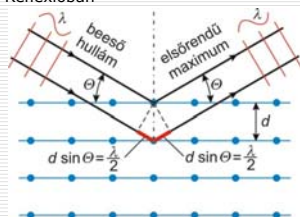
$d \sim 150 \text{ pm} \rightarrow \lambda$ **röntgentartományú**

A röntgensugárzás alkalmazásai a szerkezetkutatásban

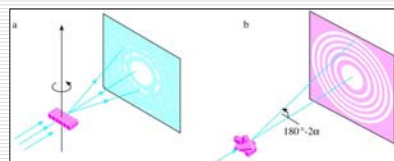
Röntgenkristallográfia

alapja: diffrakciós kép létrehozása
makromolekula-kristályokon → kiértékelés
→ elektronsűrűség-eloszlások →
atomi részletességű molekulaszerkezet

Reflexióban



Bragg-egyenletek



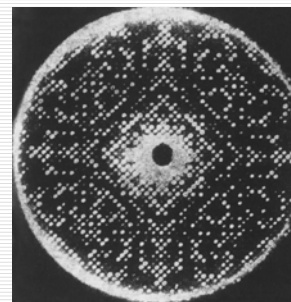
Egykristály forgatva

Mikroszkriptális porminta

Laue-egyenletek

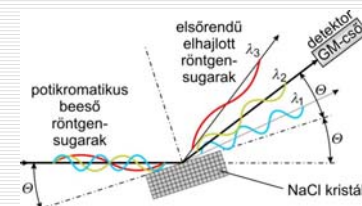
Nagyobb részletek kis szögeknél → **kis-szögű röntgen-szórás**

Röntgenkristallográfia

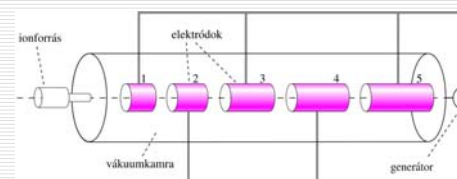


Lizozim enzim – kristály
diffrakciós képe

A diffrakció felhasználása:
monokromatikus nyalábok előállítása
spektroszkópiai célokra



Lineáris részecskegyorsító (elektron, proton, deuteron)



Gyorsítás az elektródák közötti réseken
Egyre hosszabb hengeres elektródák
AC feszültség → félperiodusonkénti gyorsítás

Nagyenergiájú röntgensugárzás terápiás célokra részecskegyorsítókkal

Röntgensugárzás keletkezik, ha nagy sebességű, elektromosan
töltött részecskék nagy rendszámú anyagban lefékeződnek.

Nagyobb kinetikus energia → nagyobb emittált rtg foton-energia

Részecskegyorsítás

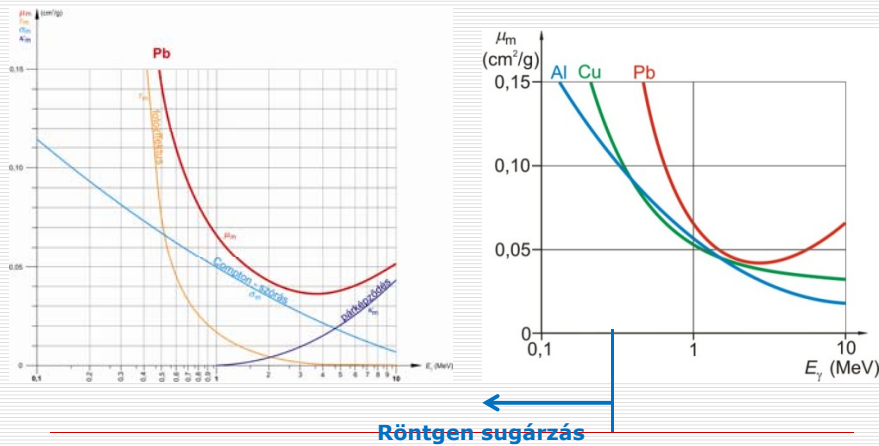
lineáris pályán → terápiás rtg sugárzás
körkörös pályán ~ 1 MeV
ciklotron (l. magsugárzások)

Megjegyzések gamma-sugárzásról

fotonenergia \sim MeV

elnyelési valószínűség: \ll rtg. sug.

- 1 MeV körül minimuma lehet



Röntgen sugárzás

A fény és a rtg. sugárzás hatásainak értelmezésénél mind a hullám- mind a foton-leírást használjuk

Kettős természet

- hullám

Huygens elv, diffrakció, *interferencia*

- részecske: **foton** (energia-kvantum)

energiaátadás anyagoknak

kvantált energiaadagokban, kölcsönhatásokban

partnere az elektron

Autóvezető szummációs röntgenképe



Vége

Köszönöm a figyelmet

