#### JELEN TANANYAG A SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEMEN KÉSZÜLT AZ EURÓPAI UNIÓ TÁMOGATÁSÁVAL. PROJEKT AZONOSÍTÓ: EFOP-3.4.3-16-2016-00014



## Röntgensugarak felhasználása az élettudományokban

#### A röntgensugarak

- felfedezése
- előállítása
- spektrális tulajdonságai
- elhajlása
- elnyelődése

#### SZERZŐ: PROF. DR. MARÓTI PÉTER

LEKTOR: MOLNÁR DÁNIEL



**Európai Unió** Európai Szociális Alap

SZÉCHENYI 2020

**BEFEKTETÉS A JÖVŐBE** 



Magyarország Kormánya



# felfedezés

#### A röntgen-kvantum energiája

a diagnosztikában:

#### 30-200 keV

a terápiában:

5-20 MeV



Gyűrűs kéz (Hand with Rings): Wilhelm Conrad Röntgen első, "orvosi" tárgyú röntgenfelvétele felesége kezéről 20 perces expozíció után 1895. december 22-én.

## **Tanulságok az utódoknak:** példakép az alapos kutatásra és az emberi tisztességre



Rudolf von Kölliker neves anatómus kezének átvilágított képe (1896. jan 23.). Ő javasolta az X sugárzás elnevezést.  A felfedezés az innováció iskolapéldája: csupán fél év telt el az alapfelfedezéstől az első orvosi röntgenfelvételek készítéséig.

 Alapos munkát végzett: néhány hónap alatt mindent lemért: a következő alapfelfedezésekre (Laue és Moseley) másfél évtizedet kellett várni.



W.C. Routgen

- Élete végéig harcot kellett folytatnia a prioritás elismeréséért.

- Az önzetlenség mintapéldája (a szabadalom jelképes összegű eladása az emberiségnek).

## A röntgensugárzás előállítása, alapelrendezés



Az izzó katódból származó elektronok az elektromos erőtérben felgyorsítva az antikatódba (anódba) ütköznek, és onnan röntgenkvantumokat váltanak ki.

A röntgen emisszó hatásfoka csekély (~1%), azaz sokkal több elektron csapódik az antikatódba, mint amennyi röntgen kvantum onnan távozik: a (hő)terhelést csökkenteni kell (pl. forgó anód alkalmazásával).

## Klasszikus röntgencsövek



#### Ciklotron alapú gyorsító



Alapkérdés: Hogyan lehet az ionokat (elektronokat) körpályán tartani, miközben a sebességük állandóan növekszik?

Mozogjon az *m* tömegű és *e* töltésű ion a homogén *B* mágneses indukcióra merőleges síkban *R* sugarú körpályán állandó v sebességgel! A pályája stabilis, ha a ráható Lorentz-erő éppen a centripetális erőt adja: 2

$$e v B = m \frac{v^2}{R}$$

Noha a pálya sugara a sebességtől függ,

a keringési idő

$$T = \frac{2R\pi}{v} = \frac{2\pi m}{eB}$$

vagy a (ciklotron-) frekvencia 
$$f$$

NEM.

$$R = \frac{m}{eB} \mathbf{v}$$

eB

 $2\pi m$ 

Transzformátor-

szerű

A röntgensugár szögdivergenciája:

céltárgy

BETATRON

 $\alpha = m_{\rm e} \cdot c^2 / E$ 

 $m_{\rm e}$  az elektron tömege, c a fény terjedési sebessége és E a felgyorsított elektron energiája, amikor elhagyja a betatront.

A cirkuláris elektrongyorsító irányított és kemény röntgensugárzást ad.

## Az elektronpályák stabilitási feltétele betatronban





#### Céltárgy

A klasszikus röntgencsövek hátránya, hogy kis távolságon kell nagy feszültséget a csőre tenni, amely az elektromos átütés veszélyét rejti. A LINAC-kal azonban kis távolságon (asztali méretben) is lehet elektronokat nagy sebességre gyorsítani mikrohullámú gerjesztéssel. Ennek az az ára, hogy nem mindegyik elektronra, hanem az elektronoknak egy kiválasztott kisebb csoportjára valósítható meg.

Az elektronok "meglovagolják" a haladó elektromágneses hullámot. A beépített iriszblendék a nagyfrekvenciás elektromágneses hullám fázissebességét az elektron aktuális sebességéhez illesztik, ezzel az elektron együtt tud maradni a haladó hullámmal, és egyes csoportjai lokálisan gyorsíthatók.

## A röntgensugárzás spektruma



## Fékezési sugárzás: a Duane–Hunt eltolódási törvény

A Duane-Hunt törvény a röntgencső fékezési sugárzásának maximális frekvenciáját adja meg, miközben az e töltésű elektronok a V gyorsító (anód)feszültség hatására az anód anyagába ütköznek.

Amennyiben az elektron teljes energiája (veszteség nélkül) röntgenkvantummá alakul át, az ehhez tartozó frekvencia, ami egyben a  $v_{\text{max}}$  maximális frekvencia is, könnyen meghatározható:

$$v_{\rm max} = eV/h.$$

Ebből a röntgensugárzás hullámhosszának minimuma is adódik:

$$\lambda_{\min} = (hc)/(eV),$$

ahol h a Planck-állandó és c a vákuumbeli fénysebesség.

Ez a törvény az energia megmaradásának elvét fejezi ki, mert a maximális frekvenciánál (minimális hullámhossznál) az elektron E = eV energiája teljes egészében a röntgenkvantum E = hv energiájává alakul át. A folyamatot fordított (inverz) fotoelektromos effektusnak is hívják.

#### Fékezési sugárzás: teljesítmény és hatásfok



A teljes teljesítmény az anódba időegység alatt beérkező elektronok számával, azaz az anódárammal egyenes arányban növekszik:

$$P_{\text{total}} = c_{\text{Rtg}} \cdot Z I_{\text{anode}} V_{\text{anode}}^2$$

Itt Z az anód anyagának rendszáma,  $V_{anod}$  a gyorsító feszültség,  $I_{anod}$  az anódáram és  $c_{Rtg} \approx 1.1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1}$ . A teljes (emittált) teljesítmény az anódfeszültség négyzetével arányos. A röntgensugárzás keltésének hatásfoka:

$$\eta = \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{invested}}} = \frac{c_{\text{Rtg}} \cdot Z I_{\text{anode}} V_{\text{anode}}^2}{I_{\text{anode}} V_{\text{anode}}} = c_{\text{Rtg}} \cdot Z V_{\text{anode}}$$

Volfrám anódra  $V_{anod} = 100$  kV feszültségnél  $\eta \approx 0.008 < 1\%$ . Az energia főként hővé alakul.



## Karakterisztikus sugárzás: Moseley törvénye

Moseley a karakterisztikus röntgensugárzás K-sorozatának frekvenciáját mérte az anód anyagának (rendszámának) függvényében (Ca-tól Zn-ig) . A különböző elemek karakterisztikus sugárzásának hullámhosszait az elemek rendszámai szerint lehetett rendezni.



Lineáris összefüggés adódott az anód anyagának elemszáma (rendszáma) és a karakterisztikus sugárzás frekvenciájának négyzetgyöke között.

#### A röntgensugarak elhajlása (diffrakciója) HULLÁM + KRISTÁLY ↔ DIFFRAKCIÓ

Ha fényHULLÁM atomok (molekulák) szabályos térbeli elrendezésén (hálózatán), azaz KRISTÁLYon halad keresztül, akkor elhajlik, és interferencia-jelenség lép fel.

Ez meg is fordítható: ha a sugárzás kristályon áthaladva elhajlási jelenséget mutat, akkor a sugárzás hullámtulajdonságú, és nem részecskékből áll.



Max von Laue kísérlete: a röntgensugárzás sókristályon áthaladva interferencia-képet mutatott, amely egyrészt annak bizonyítéka volt, hogy a sókristály szabályos szerkezetű (ez akkor nem volt általánosan elfogadott), másrészt a röntgensugárzás nem részecskékből áll, hanem hullám.



Minden fekete pont (ún. reflexió) a kristályrács atomjain szóródó (elemi) röntgenhullámok összeadódó erősítéséből (interferenciájából) keletkezik. A megfigyelt interferencia-kép a kristály szerkezetére jellemző, ezért annak (bonyolult eljárással történő) meghatározására lehet felhasználni.

#### Bragg diffrakciós törvénye és a NaCl kristályszerkezete

A Laue-féle diffrakciós képeket a hullámnak a kristálysíkokon való (formális) visszaverődés eredményének is tekinthetjük. L. W. Bragg a platina (Pt)  $L_{\alpha}$  karakterisztikus röntgensugarainak NaCl kristályon való elhajlását tanulmányozta, és arra a következtetésre jutott, hogy a kristály rácspontjaiban Na<sup>+</sup> és Cl<sup>-</sup> ionok (és nem NaCl molekulák) ülnek. A beeső hullámot minden rácspont szórja, és a megfigyelhető interferencia-kép ezen szórt elemi hullámok szuperpozíciója. Abban az irányban kapunk erősítést, amelyre Bragg-törvénye fennáll:

$$2 d \sin \Theta = n \cdot \lambda$$
  $n = 0, 1, 2, ...$ 

ahol *d* két szomszédos kristálysík távolsága és  $\Theta$  a beeső  $\lambda$  hullámhosszúságú sugárzás iránya és a kristálysík által bezárt szög.

Erősítés csak abban az irányban lehetséges, amelyre a rétegekről szóródó hullámok közti útkülönbség a hullámhossz egész számú (*n*) többszöröse.



A felső és az alatta levő rétegről szóródó hullámok közti útkülönbség:  $2d \cdot \sin \Theta$ 



For NaCl  $AB = 2.8 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 



William Lawrence Bragg

## Röntgenkrisztallográfia

Fázis-probléma: a találkozó hullámok eredő intenzitás-viszonyait (és ebből az összetevők amplitúdóit) tudjuk közvetlenül mérni, de sajnos a hullámok közötti fázis-viszonyok rejtve maradnak. Vannak azonban módszerek, amelyekkel a fázis-információt (korlátozottan) ki tudjuk nyerni.

Elektronsűrűségi térkép

1) Fourier-transzformáció; Fourier-finomítás, 2) Többszörös izomorf (nehéz atom) helyettesítés jól meghatározott helyeken, 3) Már ismert szerkezetű fehérjékkel (biomolekulákkal) való közvetlen összehasonlítás



Diffrakciós kép



#### Goniométer



## Röntgen-krisztallográfia: milyen a DNS szerkezete atomi feloldásban?



Az 1950-s évek elején James Watson és Francis Crick (Cambridge Egyetem) javasolták a (B-)DNS kettős hélikális szerkezetét, amelyet a 20. század legnagyobb jelentőségű biológiai felfedezésének tartanak. Erre a legelső és legfontosabb bizonyítékot egy röntgendiffrakciós felvétel jelentette: a Photo 51. Csakhogy azt a 32 éves Rosalind Franklin készítette, akit azonban kihagytak a világhírt jelentő elismerésből.





Photo 51

Alapvetően fontos a gének biológiai működését (mint pl. a genetikai kifejeződést, a DNS mutációit és javító mechanizmusait) megérteni. Emellett a DNS szerkezetének megértése is lényeges: pl. egyes DNS szerkezeteket miért különösen könnyű károsítani vagy bennük mutációt létrehozni. A DNS szerkezetének megértése legalább annyira fontos, mint a génszekvencia ismerete. A humán genom program (azaz a teljes emberi genom genetikai szekvenciájának megismerése) csak az érem egyik oldala. A másik oldal a különböző típusú DNSek három dimenziós szerkezetei, amelyek ezeket a szekvenciákat (és így végül a biológiai funkciót is) meghatározzák. A szokatlan DNS struktúrák (Holliday

kapcsolódások) kulcsszerepet játszanak a roncsolódott DNS önjavító képességében, amely a biomedicinában is alkalmazásra talál.

#### A röntgensugárzás anyagbeli gyengülése (elnyelése): a Beer-törvény

A röntgensugárzás anyagba hatolva fokozatosan, a távolsággal (a behatolási mélységgel) exponenciálisan gyengül:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

ahol  $I_0$  az abszorbens felületére merőlegesen beeső sugárzás intenzitása, x a homogén réteg vastagsága, I a sugárzás intenzitása, miután áthaladt, és elhagyja a réteget, valamint  $\mu$  a gyengítési (abszorpciós) együttható, amely magában foglalja az abszorbens (pl. szövet) anyagi tulajdonságait és kölcsönhatását a sugárzással. Felezési rétegvastagság az a távolság, amelyen áthaladva a sugárzás intenzitása a beeső intenzitás felére csökken:

$$x_{\rm H} = (\ln 2)/\mu$$

Tömeggyengítési együttható:

$$\mu_{\rm m} = \mu/\rho$$

az abszorbens anyagának sűrűségre ( $\rho$ ) vonatkoztatott értéke.



Röntgen kvantum energiája	Tömeggyengítési együttható μ/ρ (cm²/g)					
E (MeV)	levegő Z = 7,78 $\rho = 0,0012$	víz Z = 7,51 $\rho$ = 0,9982	$Z = 6,46$ $\rho = 0,92$	izom Z = 7,64 $\rho = 1,04$	csont Z = 12,31 $\rho = 1,65$	
0,01	5,12	5,329	3,268	5,356	28,51	
0,1	0,1541	0,1707	0,1688	0,169	0,186	Z: átlagos rendszám ρ: sűrűség (g/cm <sup>3</sup> ) μ: gyengítési együttható (1/cm)
1	0,06358	0,07072	0,0708	0,0701	0,0657	
10	0,02045	0,02219	0,0214	0,0219	0,0231	
20	0,01705	0,01813	0,017	0,0179	0,0207	



A röntgenkvantum energiája

A röntgenkvantumok az elektronokon rugalmasan (energiaveszteség nélkül) szóródnak.

Klasszikus szóródás  

$$\xrightarrow{E}$$
 + (A) --- (A) +  $\xrightarrow{C}$ 

#### Gyengítési mechanizmusok

Külső fotoeffektus esetén az ionizáló sugárzás egy héjelektront szabadít fel.



A Compton-effektus fotonoknak (röntgen kvantumoknak) szabad vagy gyengén kötött elektronokon való szóródása.

#### Compton-szórás

Nagy *hv* >1,02 MeV energiákon a foton egy-egy, ellentett irányban mozgó elektronná és pozitronná alakulhat át az abszorbeáló anyag atommagjainak közvetlen közelében (az atommag Coulomb-terében).



#### Gyakorlati probléma.

Ugyanakkora  $I_0$  intenzitású röntgensugárzással világítunk át egy  $x_1 = 18$  cm vastagságú lágyszövetet és egy ugyanilyen vastagságú szövetet, amelyben  $x_2 = 4$  cm vastagságú csont van a lágyszöveti részben. A lágyszövet gyengítési együtthatója  $\mu_1 = 0.19$  cm<sup>-1</sup>, míg a csonté  $\mu_2 = 0.42$  cm<sup>-1</sup>. Mennyi a kilépő sugarak intenzitásainak aránya?

Mennyi a csont kontrasztja?

**Megoldás**. Az  $I_1$  és  $I_2$  intenzitások aránya:



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_1 x_1)}{I_0 \cdot \exp(-\mu_1 (x_1 - x_2) - \mu_2 x_2)} = \exp(-(\mu_1 - \mu_2) x_2) = 2.5$$

A radiológiában a háttérszövethez ill. a kérdéses anatómiai szerkezethez tartozó röntgensugárintenzitások relatív különbségét szövet-kontrasztnak nevezik:

$$C_{\rm szövet} = \frac{I_{\rm háttér} - I_{\rm szövet}}{I_{\rm háttér}}$$

ahol  $I_{szövet}$  és  $I_{háttér}$  a kérdéses szöveten ill. a (szomszédos) háttérszöveten áthaladó röntgensugárzás intenzitása. Ha a példánkban  $I_2$  -t  $I_{szövet}$ -re cseréljük, és  $I_1$ -et  $I_{háttér}$ -re, akkor a csontszövet kontrasztjára  $C_{csont} = 0,6$  adódik.

## Röntgen számítógépes tomográfia, CT

Tomográfia: rétegfelvétel; Számítógépes tomográfia: a rétegfelvételek számítógép segítségével való kiértékelése; Röntgen CT: a hagyományos Röntgen-átvilágítási technika szellemes továbbfejlesztése.

Az objektumot vékony röntgensugár-nyalábbal világítják át, és a gyengítési együtthatók nagysága és térbeli eloszlása függvényében az objektum mögött elhelyezett detektor érzékeli az átjutott röntgen nyaláb intenzitását.



Egy tojásdad alakú, kisebb áteresztőképességű maggal bíró testet világít át a röntgensugárnyaláb. A háttérben a detektor által észlelt intenzitás görbéje látható.

1979-ben Allen M. Cormack és Godfrey N. Hounsfield orvosi Nobeldíjat kaptak a komputertomográfia kifejlesztésért. A sugárnyaláb körbeforgatásával ugyanebben a síkban átvilágítják a testet, és a mért intenzitásgörbékből kibontakozik az adott síkban (szeletben) elhelyezkedő részletek rajza. A modern CT berendezések egy körülfordulás alatt egyszerre több (akár 128) szeletet térképeznek fel. A síkot ezután arrébb tolják, és újra körbeforgatják. Kép rekonstrukció: Hogyan lehet a digitális rétegfelvételekből (röntgensugáráteresztőképességekből) a vizsgált test térbeli szerkezetét megadni?

### Képrekonstrukció

Az algoritmus alapja: ugyanolyan méretű pixelek esetén az adott irányból megfigyelt eredő gyengítési együttható az egyes pixelekben megfigyelhető gyengítési együtthatók összege. Ez az (exponenciális) Beer-törvény egyszerű következménye.

 $a_{11} + a_{22} + a_{33} + a_{44} + a_{55} = 6$ 

 $a_{15} + a_{25} + a_{35} + a_{45} + a_{55} = 2$ 

Bármely sorra ill. oszlopra (ha az *n* darab, megegyező méretű pixelre van darabolva) a mérhető az eredő gyengítési együttható:



Egy 5x5-ös pixel ismert ill. ismeretlen gyengítési együtthatókkal 3 jelzett irányban mért eredő gyengítési együtthatóval.

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} \mu_i$$

A Beer-törvény exponenciális jellegéből következően a kiválasztott irányban mért teljes gyengítési együttható a sugárútba kerülő pixelek gyengítési együtthatóinak összege.

Matematikai (számítógépes) feladat: Többismeretlenes lineáris egyenletrendszer megoldása

### Röntgen CT felvétel a gyakorlatban



amely betolódik a forgó letapogató egységbe. Az "ere

Az "eredmény" Az agy keresztmetszeti képe. A számítógép az orvos által értelmezhető képekké alakítja az érzékelők által felfogott röntgensugarakat.

## KÖSZÖNÖM A HALLGATÓSÁG FIGYELMÉT ÉS MOLNÁR DÁNIEL ALAPOS LEKTORI MUNKÁJÁT!

JELEN TANANYAG A SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEMEN KÉSZÜLT AZ EURÓPAI UNIÓ TÁMOGATÁSÁVAL. PROJEKT AZONOSÍTÓ: EFOP-3.4.3-16-2016-00014

**Európai Unió** Európai Szociális

Alap

**SZÉCHENYI** 



Magyarország Kormánya

BEFEKTETÉS A JÖVŐBE