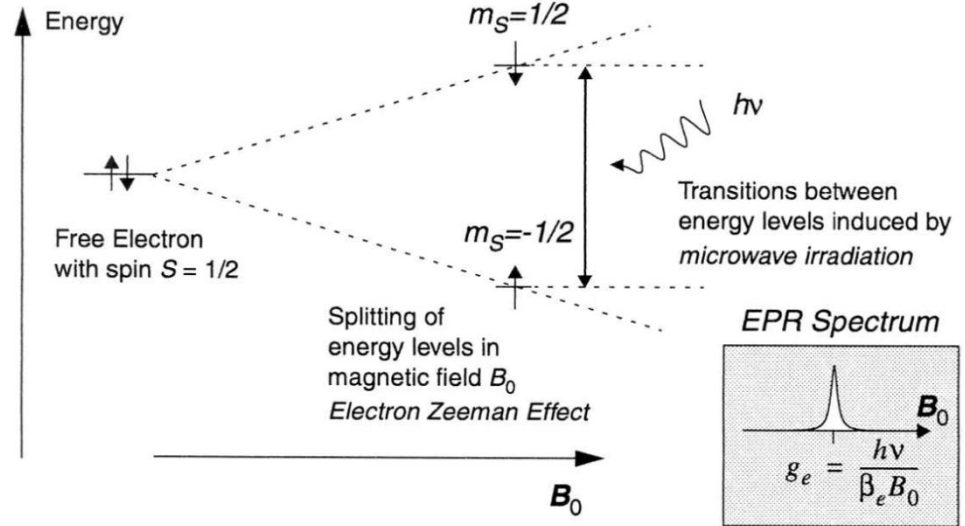
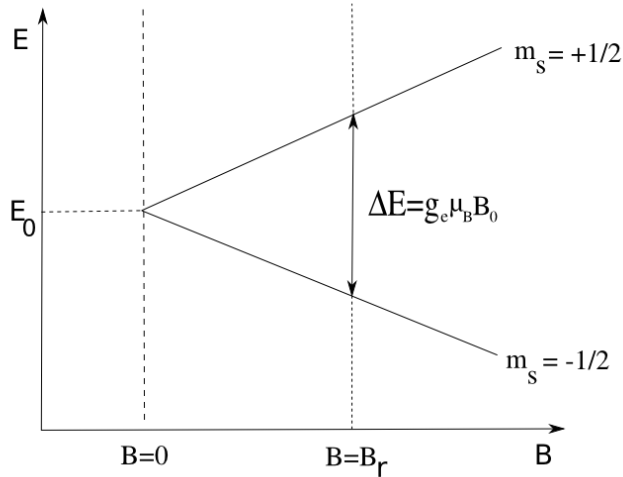


**Diagnosztikai képalkotó eljárások fizikai
alapjai GEFIT303B**

5. előadás: A röntgen sugárzás

Mágneses momentum mágneses térben

Energy Level



$$W_m = -B_z \cdot M = -B \cdot \mu_B \cdot m \quad (\text{pályaperdületre}) \quad \text{vagy} \quad -B \cdot 2\mu_B \cdot m_s = \pm B \cdot \mu_B \quad (\text{sajátperdületre})$$

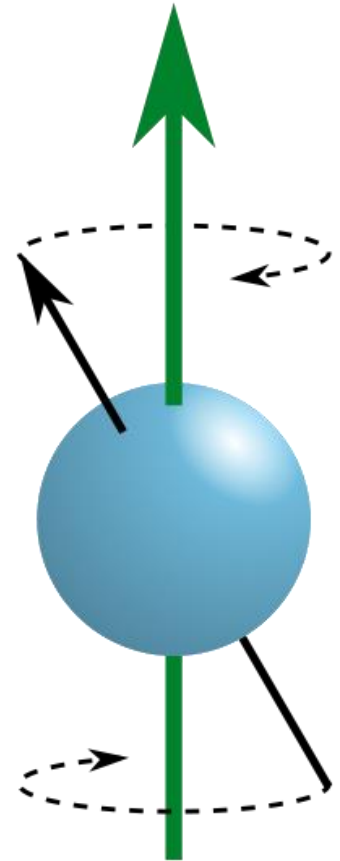
A kétféle spinálláshoz tartozó energiaszintek a mágneses tér növelésével eltávolodnak. Mivel $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$, ezért pl. 1T mágneses térben a kétféle spinálláshoz tartozó energia szintek $18,54 \cdot 10^{-24} \text{ J}$ -ra távolodnak el. Ha ilyenkor átfordul a spin, akkor a kibocsájtott/elnyelt foton frekvenciája $f = 18,54 \cdot 10^{-24} \text{ J} / h = 2,796 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$. Anyagban ez eltér ettől egy kicsit, a kibocsájtott foton frekvenciája az anyagi összetételről ad információt (EPR, ESR). A 28GHz-es mikrohullám nem tud az anyagból kijönni (de a 28MHz-es rádióhullám már igen, NMR, MRI).

Megjegyzés

- A Zeeman-effektus már a kvantummechanika születése előtt is ismert volt. Akkoriban klasszikus fizikai magyarázata volt:

A mágnes precesszál a külső mágneses térben, ennek a Larmor-precesszióknak a frekvenciája éppen egyezik az előző oldalon lévő frekvenciával.

- A kvantummechanika szerint nincs ilyen precesszió, de az orvosi könyvek szeretik ezt a képet
- Az MRI képalkotás megértéséhez a spin-echo jelenség ismerete is kellene, de ez még bonyolultabb



Ellenőrző kérdések

Válasszuk ki a hamis állítást!

- a) A spinvetület egyezik a pályaperdület vetület minimumával
- b) A spinhez tartozó mágneses momentum vetület Bohr-magneton nagyságú
- c) Mágneses mezőbe helyezett atom energiaszintjei annyifelé hasadnak, ahány mágneses kvantumszám lehetséges az adott szinten
- d) A felhasadás arányos a mágneses indukció nagyságával

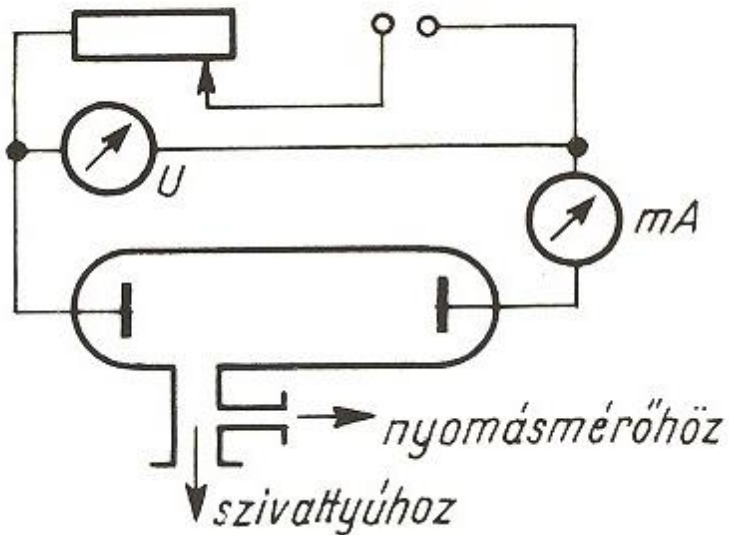
Az iránykvantálás azt jelenti hogy:

- a) Az elektron lendülete az atomban nem mutathat akármilyen irányba
- b) A tetszőlegesen felvett iránnyal a rendszer perdület vektora nem zárhat be akármilyen szöget
- c) Az atom perdületének mindig van z komponense
- d) Egy atomban két elektron nem mozoghat ugyanabba az irányba

A röntgen sugárzás felfedezése

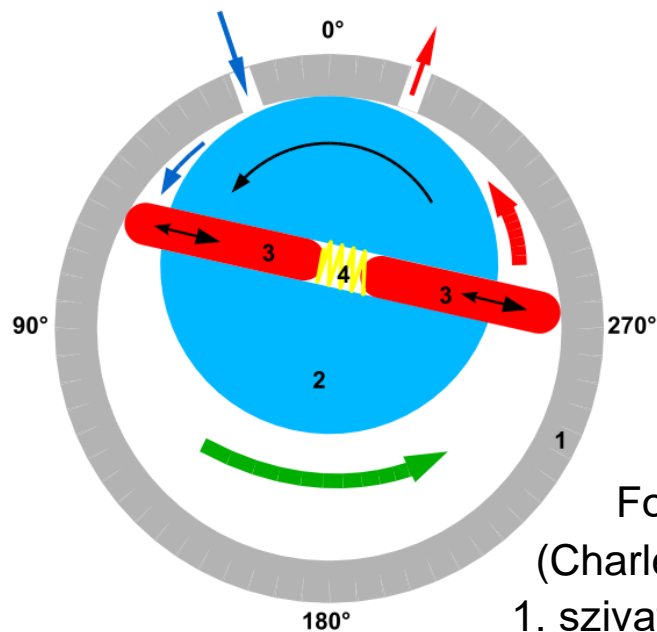
Ehhez kellett a **katódsugárcső**, amellyel a XIX. sz. második felében a katódsugarak természetét tanulmányozták. Ez közel egy fél évszázadon keresztül a fizika egyik legnagyobb rejtélye volt:

- Hullám vagy részecske?
- Van negatív töltése vagy nincs?
- Nem atomokból áll, de nem is elektromágneses sugárzás
- Minősége nem függ a katód anyagától



A röntgen sugárzás felfedezése/2

Ma már tudjuk, hogy a kulcskérdések főleg technikaiak voltak: a vákuumszivattyú és a nyomásmérő nem biztosított reprodukálható nyomást. Bizonytalan volt a nagyfeszültség is.

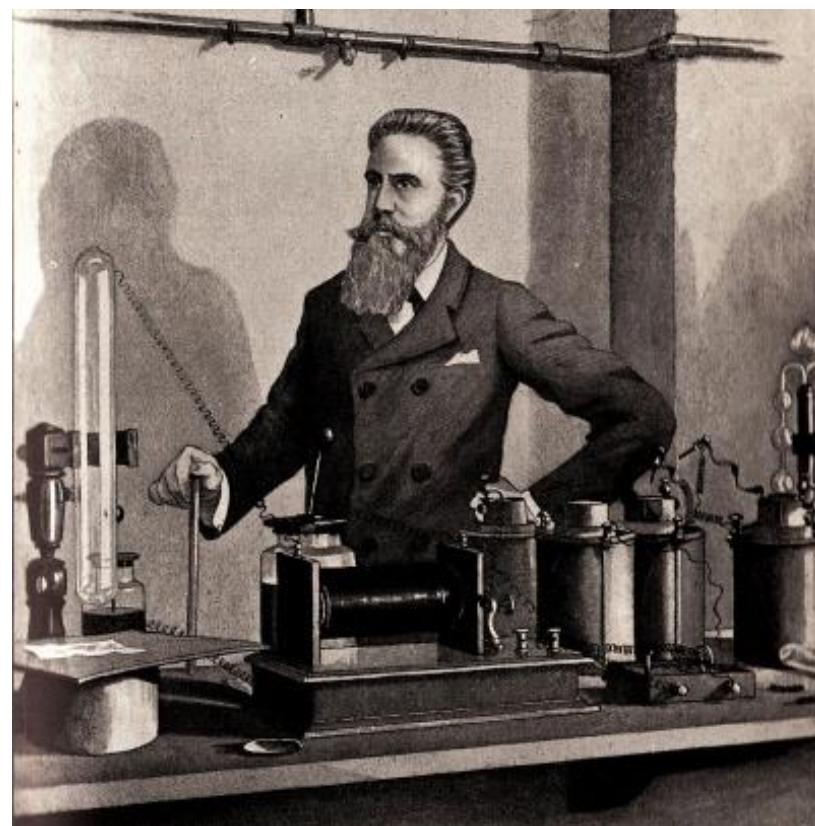


Forgólapátos szivattyú
(Charles C. Barnes, 1874.)
1. szivattyúház 2. forgórész
3. lapátok 4. rúgó

Higanyos vákuumszivattyú (Geissler, 1864)

A röntgen sugárzás felfedezése/3

Condrad Röntgen átütő eredményt ért el 125 éve (1895. november 8.). A Würzburgi Egyetem Fizikai Intézete, ahol Röntgen az X- sugarakat felfedezte



Aztán másoktól is jöttek az eredmények



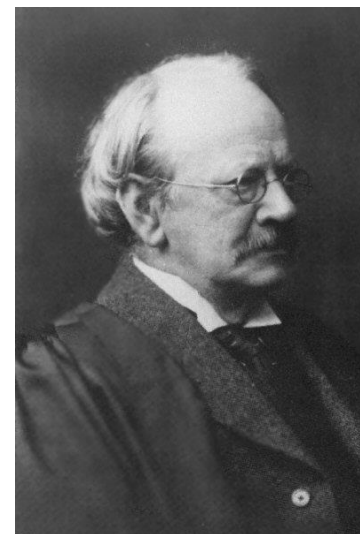
Wilhelm Conrad Röntgen (Lennep, 1845 – München, 1923)

Nobel-díj: 1901 (az X sugárzás felfedezéséért)

Joseph John („J. J.”) Thomson

(Manchester, 1856 - Cambridge, 1940)

Nobel-díj: 1906 (az elektron felfedezéséért)



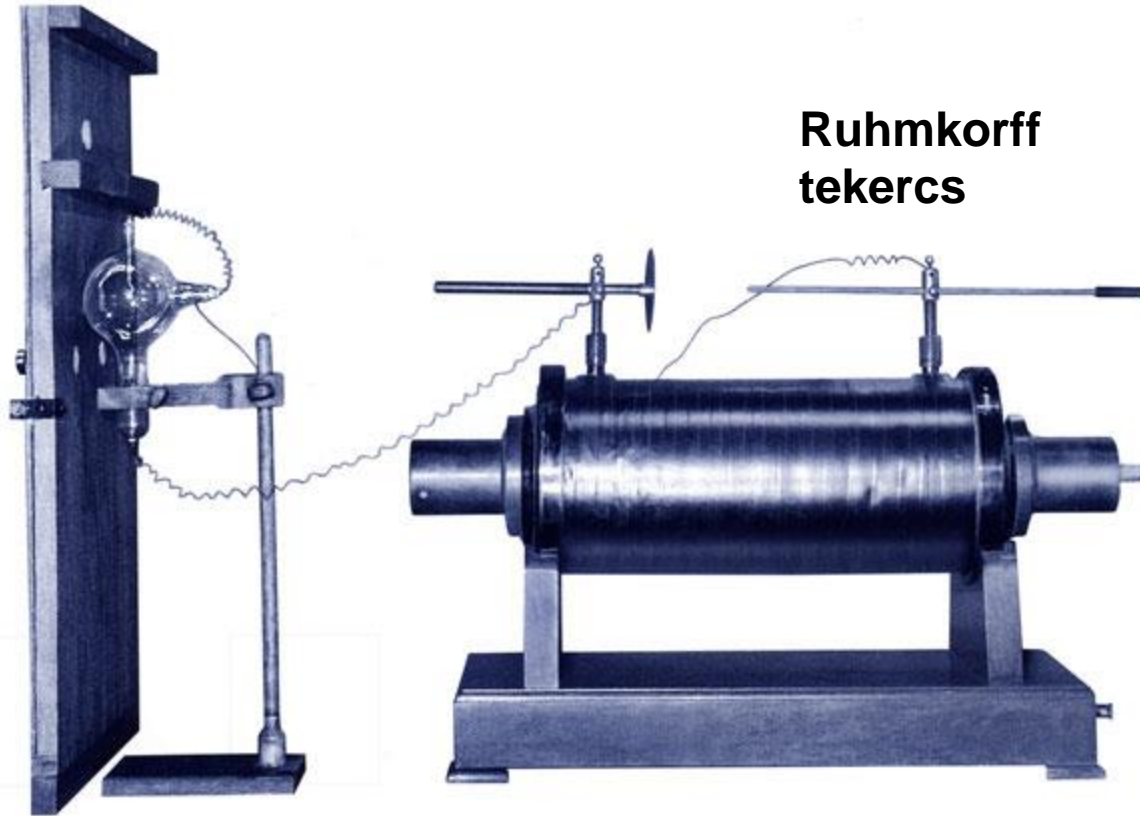
Lénárd Fülöp (németül Philipp Eduard Anton (von) Lenard) (Pozsony, 1862 – Messelhausen, 1947)

Nobel-díj: 1905 (katódsugárcső, fényelektromos jelenség)



Crookes-cső,
Hittorf-cső, ill.
Lénárd-cső

Röntgen eszközei



Az X-sugarak felfedezése

1895. november elején Röntgen figyelte arra a jelenségre, hogy azokon a **fényképezőlemezek**en, amelyek az üzemeltetett kisülési cső mellett voltak, és fekete kartonpapírba voltak csomagolva, nem megmagyarázható **feketedések** mutatkoztak az előhívás után. Ez elgondolkodtatta, és vizsgálta ennek okát.

1895. november 8-án kísérleteiben Röntgen a kisülési csőben az elektromos kisülést kísérő fényjelenségek kiszűrésére a csövet nem átlátszó fekete kartonpapírba csomagolta, így próbálta vizsgálni a katódsugár által előidézett fényt. Mikor a szikrainduktort a csőre kapcsolta, látta, hogy a sötét laboratóriumban a cső közelében lévő, bárium-platina-cianiddal bevont **ernyő fluoreszkáló fényt bocsát ki**, azaz fényforrásként viselkedik. Ezután vizsgálni kezdte a titokzatos fény forrását.

Mikor a cső a világító papírlemez közé deszkát, jegyzetfüzetet helyezett, akkor is világított, csak halványabban. Ha a kézfejét helyezte a cső és papírlemez közé, a lemezen **a kézcsontjainak árnyképe tűnt elő**. A fényforrás megszűnt, amikor a kisülési csőről a feszültséget lekapcsolta. A sugárzás miatt kb. 2m távolságból fénylett az ernyő, tehát **nem lehet katódsugárzás** (az már néhány cm levegőben elnyelődik).

Kimutatta, hogy a cső egy meghatározott részéből **egyenes vonalban** lép ki a sugárzás. A fentiekből Röntgen azt a következtetést vonta le, hogy egy új sugár – első dolgozatában **X-sugárnak** nevezte el – hatása, amely áthatol az anyagokon, eltérő mértékben nyelődik el, és a fényhez hasonlóan egyenesen áramlik, valamint **fényképfelvételeken rögzíthető**.

A következő napokban és hetekben Röntgen éjjel-nappal a laboratóriumban tartózkodott és vizsgálta az új sugár tulajdonságait. Mintegy 20 perces expozíciós idővel készítette el felvételét felesége kezéről.

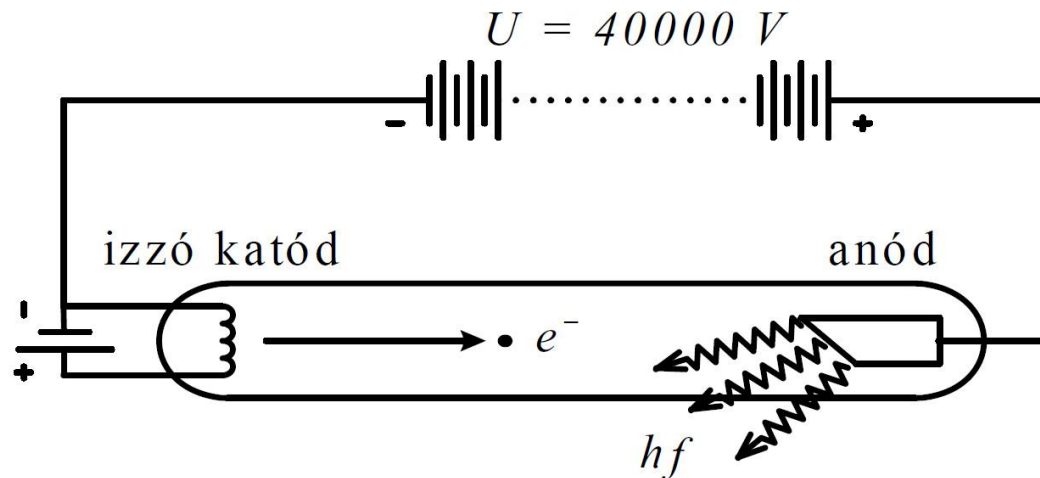
A röntgensugárzás keltése

A röntgensugárzás nagyenergiájú elektromágneses sugárzás, a hullámhossza a 10^{-11} és 10^{-8} m közötti tartományba esik.

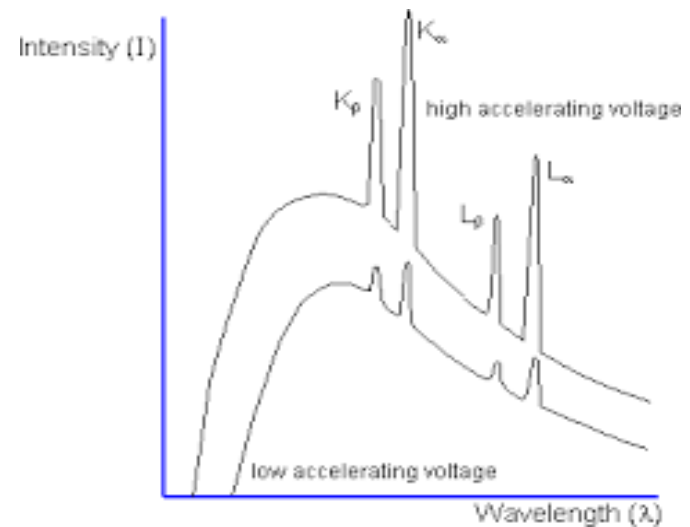
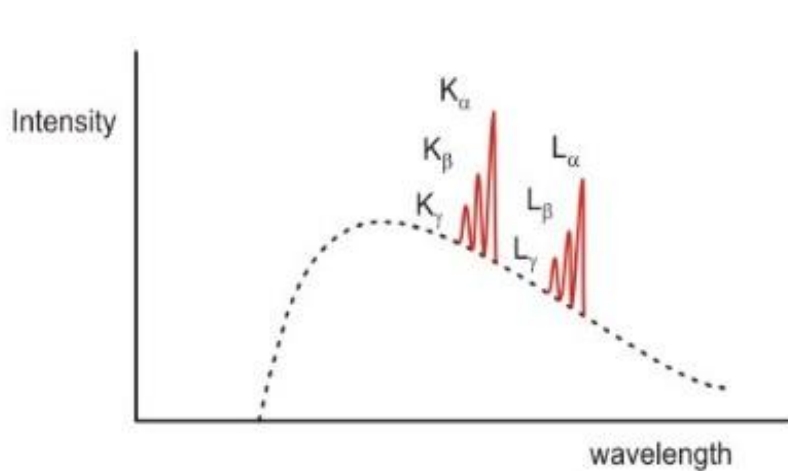
A látható sugarakkal ellentétben, ezek nagy áthatoló képességgel rendelkeznek.

Előállításuk:

- felmelegített katódból kilépő elektronokat nagyfeszültséggel gyorsítják
- az elektronok az anódba csapódnak, amely nagy rendszámú fém (pl. volfrám)
- a röntgen sugarak a becsapódás helyéről indulnak minden irányba
- Az elektronok energiájának csak $\approx 1\%$ -a lesz a röntgensugárzás energiája, a többi az anódban nyelődik el. Emiatt szükséges, hogy az anód nagy darab, nehezen olvadó fém (pl.: wolfram) legyen, lehetőleg vízzel hűtött vagy forgatott.

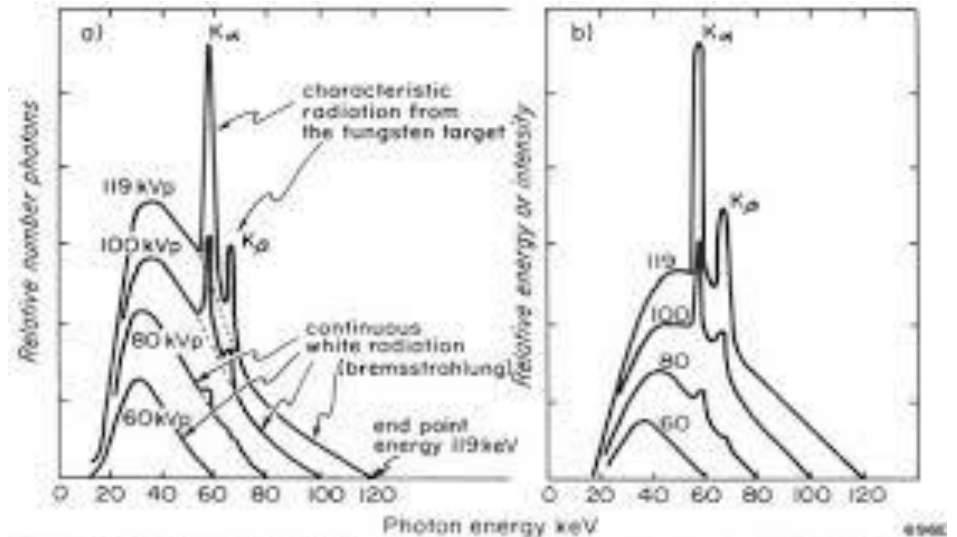


A röntgensugárzás spektruma



Spektrum két komponense:

1. folytonos spektrum : fékezési rtg. sugárzás
2. Vonalas spektrum: karakterisztikus rtg. sugárzás (K_{α} , K_{β} ,..., L_{α} , L_{β} ,...csúcsok)



A fékezési röntgensugárzás

A nehéz atommag Coulomb-terébe érkező elektron eltérül és lefékeződik.
A gyorsulást szenvedő elektron energiát veszít, és fotont sugároz ki.

$$E_{k1} - E_{k2} = E_f$$

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 = hf$$

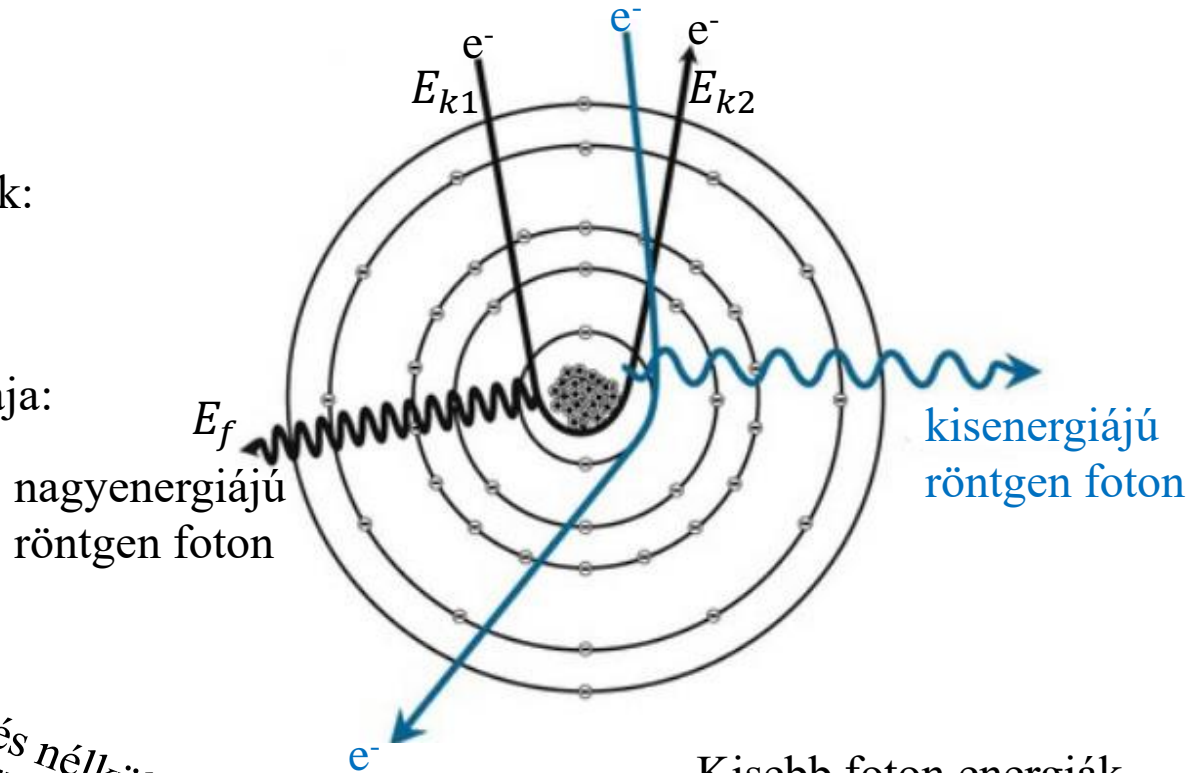
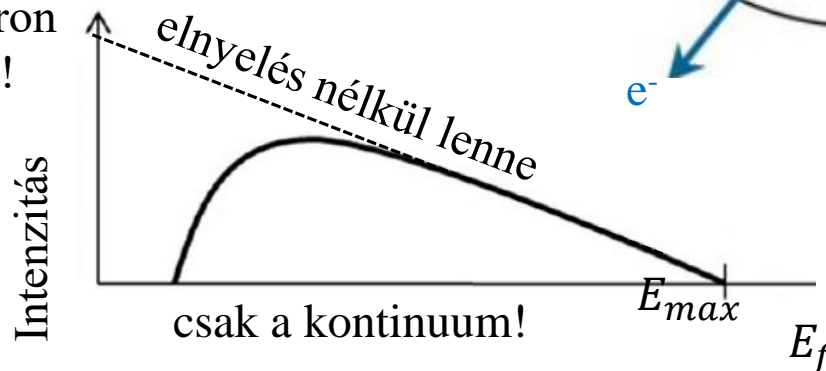
Ha az elektron teljesen lefékeződik:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = hf_{max}$$

Mivel a gyorsított elektron energiája:

$$E_k = eU$$

Így a foton maximális energiája eV egységben egyszerűen az elektron gyorsító feszültsége!

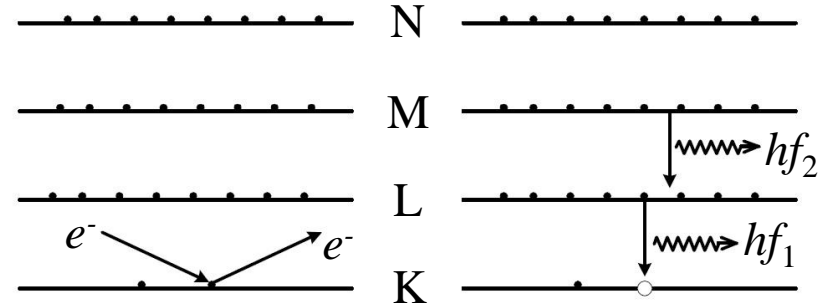
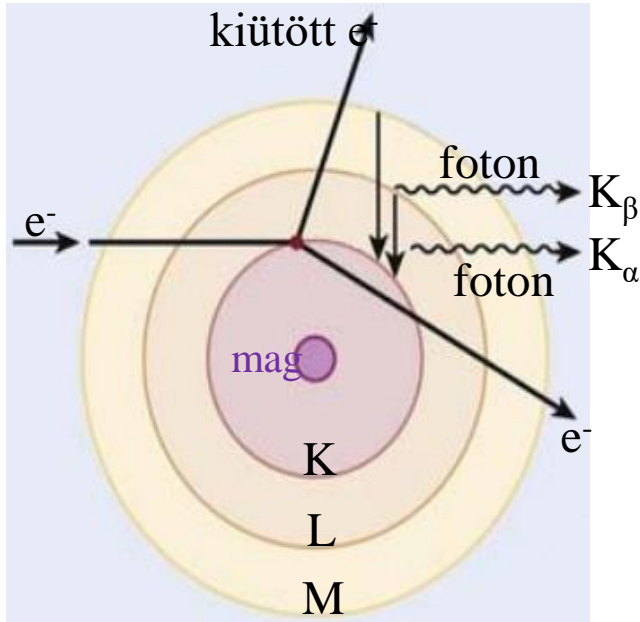


Kiseb foton energiák valószínűbbek, mert úgy az elektron többször is eltérülhet az anyagban.

Karakterisztikus sugárzás - vonalas komponens

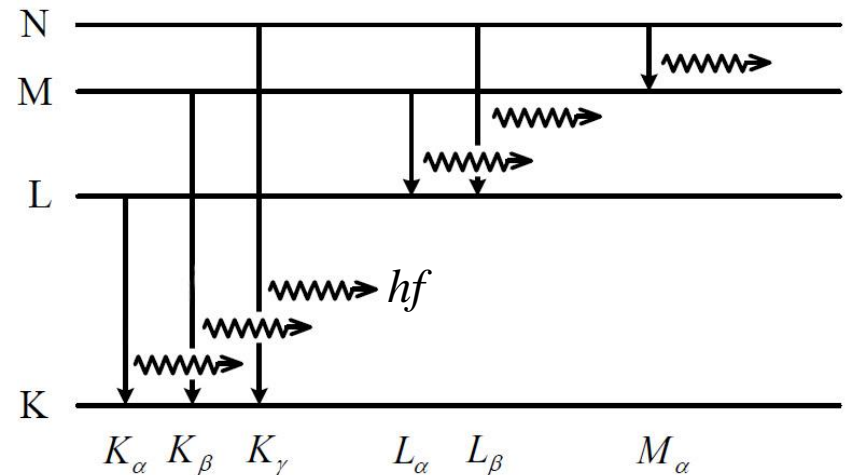
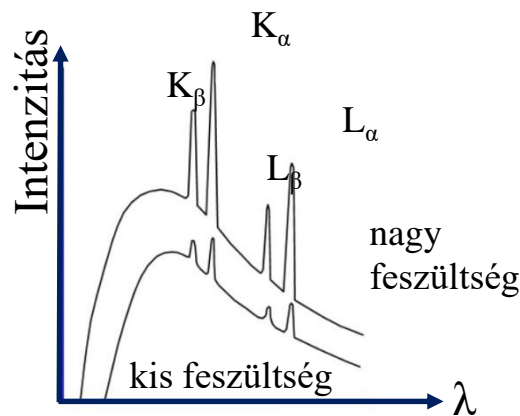
A felgyorsított elektron egy másik elektront üt ki az atom egyik belső héjáról (1. lépés: belső héj ionizáció).

Ezzel egy betöltetlen hely (vakancia) keletkezik, ami további elektronugrásokat okoz (2. lépés).



Átmenetre jellemző diszkrét energiájú fotonok:
- sorozatokba rendezhető vonalak

$$E_2 - E_1 = hf$$



Moseley-törvény



Henry Moseley (Weymouth, 1887 –
Törökország, Gallipoli, 1915)

Moseley 1913-ban megállapította, hogy a vonalas emissziós színekép jellemző az illető elemre, tehát megmérve a frekvenciákat vagy a hullámhosszakat a Z rendszám kiszámolható.

Ezért nevezik ezt a komponenst karakterisztikus sugárzásnak.

röntgen fluoreszcencia analízis (XRF)

Moseley törvénye:

$$E_f = hf = A(Z - b)^2$$

Emlék: a főkvantumszám meghatározza az energiát

$$E = -Z^2 \frac{E^*}{n^2}; n = 1, 2, \dots \quad \text{ahol } E^* = 13,6 \text{ eV}^* \\ = 2,18 \text{ aJ}$$

Az elektron átmenet során felszabadult energiát egy foton viszi el

$$E_i - E_j = hf_{ij}$$

Moseley-törvény/2

Moseley törvénye:

$$E_f = hf = A(Z - b)^2$$

- A : az adott $n \rightarrow m$ átmenetre jellemző konstans

$$A = E^* \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

K_α esetén: $A = E^* \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} E^*$

$$E^* = 2,18 \text{ aJ}$$

L_α esetén: $A = E^* \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = \frac{5}{36} E^*$

- b : korrekciós faktor, amely a Z effektív értékét (többi elektron árnyékolását) adja meg.

K_α esetén: $b = 1$

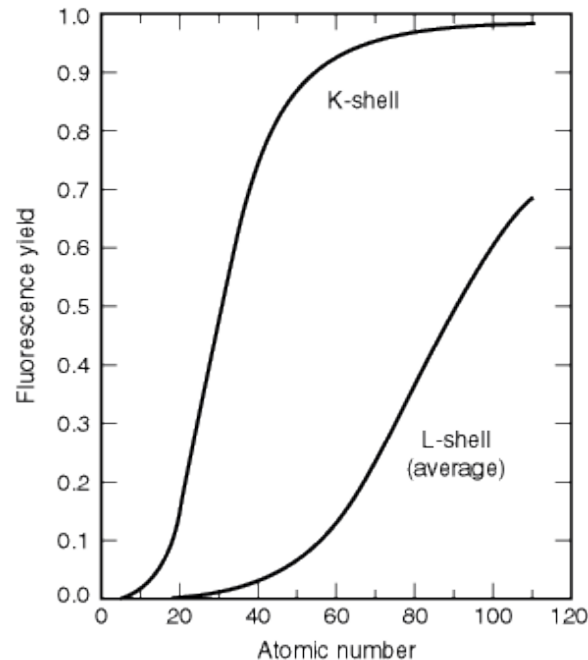
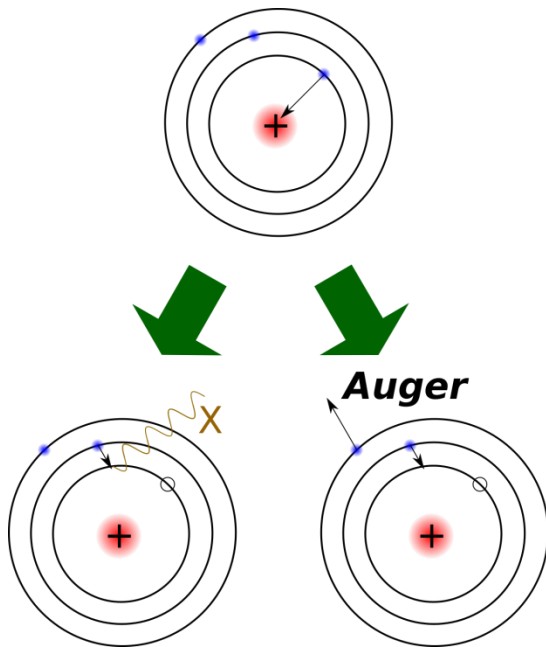
L_α esetén : $b = 7,4$

A törvényt úgy alkotta meg, hogy az egyes karakterisztikus vonalak esetében észlelt röntgenfrekvenciák gyökeit ábrázolta az elemek rendszáma szerint, majd a kapott adatokra egyenest illesztett.

A Bohr-modell alapján a törvény megmagyarázható, de a többi elektron hatását is figyelembe kell venni, így a Z helyett itt $Z_{\text{eff}} = Z - b$ szerepel. Az atom itt nem hidrogénszerű ion!

Auger-elektronok

Nem biztos, hogy a belső héj ionizáció után 2. lépésben a röntgen foton emissziója következik. Lehetséges alternatív folyamat a 2. lépésre: egy külsőbb héjon lévő elektron viszi el a felszabaduló energiát (ez az **Auger elektron**), így a végállapot 2 lyukat tartalmaz \Rightarrow kétszeres pozitív ion lesz.



A rendszámától függ, hogy a röntgen sugárzás vagy az Auger elektron lesz domináns. Ha Z értéke nagy akkor a röntgen sugár lesz a domináns, ha kicsi akkor az Auger elektron.

Ellenőrző kérdések

Válasszuk ki a hamis állítást!

- a) A K_α a legnagyobb kvantumenergiájú karakterisztikus röntgen vonal
- b) Az atommag Coulomb-terében eltérülő és lefékeződő elektronok sugárzásának a spektruma folytonos
- c) Adott atom L_α sugárzásának hullámhossza nem függ a röntgencső feszültségétől
- d) Az Auger-folyamat kis rendszámú anyagokban domináns

A Moseley-törvény kapcsolatot ad

- a) A röntgencső feszültsége és a maximális fotonenergia között
- b) A röntgencső feszültsége és a karakterisztikus vonalak frekvenciája között
- c) Az anód rendszáma és karakterisztikus vonalak frekvenciája között
- d) Az anód rendszáma és a maximális fotonenergia között