

## Röntgensugárzás

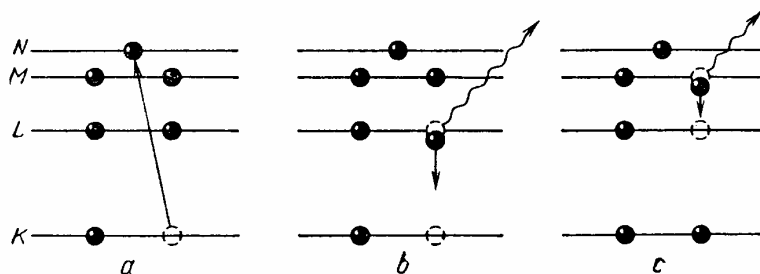
Tudjuk, hogy a különböző körülmények között létrejövő, gyakorlati szempontból fontos elektromágneses hullámok (elektromágneses sugárzás) hullámhosszai egy igen széles – mintegy 18 nagyságrendet felölelő – tartományba esnek. Ez az ún. elektromágneses spektrum, amelynek különböző sávjai jól ismert neveket viselnek: rádióhullám, infravörös-, látható-, ultraibolya fény stb. Az elektromágneses spektrumnak az ultraibolya sugárzás és a gammasugárzás közé, nagyjából a  $10^{-8}$ - $10^{-11}$  m hullámhossz-tartományba eső részét felfedezőjéről Röntgenről *röntgensugárzásnak* nevezik. A röntgensugárzás fotonjainak energiája mintegy  $10^2$ - $10^4$ -szerese az optikai fotonok energiájának.

Ilyen sugárzás többféle mechanizmussal létrejöhet: keletkezhet töltött részecskék gyorsulásakor, továbbá az elektronhéjban- illetve az atommagban végbemenő átalakulások során. Röntgensugárzásnak azonban elsősorban az első két mechanizmussal keletkezett sugárzást nevezik, az atommag-átalakulásnál létrejövő, ilyen hullámhosszú sugárzást rendszerint (lágý) gamma sugárzásnak nevezik. Az alábbiakban az első két mechanizmussal foglalkozunk.

### Karakterisztikus röntgensugárzás

Az elektronhéjban végbemenő folyamatok során nagyon különböző energiaváltozások következhetnek be. Ez az oka annak, hogy az atomok elektronhéja által kisugárzott elektromágneses hullámok hullámhossza igen eltérő, durván a  $10^{-6}$ - $10^{-11}$  m tartományba esik. Ennek hosszuhullámú része az infravörös sugárzás, ennél rövidebb hullámhosszú, keskeny hullámhosszsávot alkot a látható fény, ezt követi a rövidebb hullámhosszak felé az ultraibolya sugárzás. Az elektronhéj azonban ennél rövidebb hullámhosszú sugárzást, vagyis röntgensugárzást is kibocsáthat. Mivel ilyenkor a sugárzás az adott atomra jellemző energiaszintek közötti átmenetektől származik (hasonlóan a fénykibocsátáshoz), a röntgensugárzás jellemző az illető elemre, ezért ezt *karakterisztikus röntgensugárzásnak* nevezik.

Karakterisztikus röntgensugárzás úgy hozható létre, hogy valamilyen energiaforrással (pl. nagysebességű elektron, foton) egy elektront (pl. gerjesztéssel) eltávolítunk az atom belső (alacsony energiájú) héjainak egyikéről, és a keletkezett "üres helyre" a magasabb szintek egyikéről egy elektron megy át. Ekkor az elektron felesleges energiáját röntgenfoton formájában adja le (azt hogy egy átmenetnél milyen energiájú



foton keletkezik, az átmenet energiakülönbsége szabja meg, de a belső héjakra való átmenetnél általában röntgenfoton keletkezik. A folyamat sémája az ábrán látható (az energiaszintek jelölésére itt nem az  $n$  főkvantumszám értékét adják meg, hanem az  $n=1, 2, 3, 4, \dots$  értékek helyett rendre a  $K, L, M, N, \dots$  betűjelöléseket alkalmazzák). Az a) ábra a gerjesztést, a b) és c) ábra két egymás utáni fotonkibocsátást mutat.

Megállapodás szerint azt a röntgensugárzást ami az elektronnak a  $K, L, M$  héjra történő átmenetéből származik, *K-, L-, M-sugárzásnak* nevezik. Ezen belül további

felosztást is alkalmaznak: így például az  $L \Rightarrow K$  átmenetből származó sugárzás a  $K_\alpha$ -sugárzás, az  $M \Rightarrow K$  átmenetből származó sugárzás a  $K_\beta$ -sugárzás.

Mivel a röntgensugárzás az elektronnak egy belső héjra történő átmeneténél keletkezik, a sugárzást a külső elektronok jelenléte nem nagyon befolyásolja, hanem elsősorban a mag töltése, vagyis a rendszám. A mag töltését leárnyékolják a kérdéses héjon és azon belül lévő, vagy elektronok, amit egy ún. leárnyékolási tényezővel lehet figyelembe venni.

Részletesebb számítások szerint, az  $n$ -edik energiaszinten lévő elektron energiáját közelítőleg az

$$E_n = -A(Z - \sigma_n)^2 \frac{1}{n^2}$$

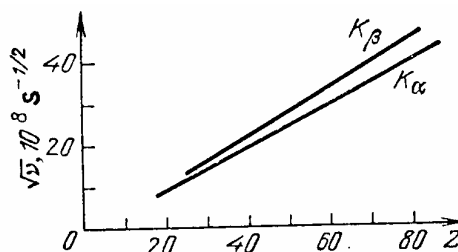
kifejezés adja meg, ahol  $Z$  a vizsgált atom rendszáma,  $A$  egy fizikai állandókat tartalmazó állandó,  $\sigma_n$  a leárnyékolási tényező, ami  $K$ -héjra  $\sigma_n = 1$ ,  $L$ -héjra  $\sigma_n = 8$ . Egy átmenetnél keletkező foton energiája eszerint

$$h\nu = A(Z - \sigma_1)^2 \frac{1}{n_1^2} - A(Z - \sigma_2)^2 \frac{1}{n_2^2}.$$

A tapasztalat szerint ez a kifejezés az átmenetre bevezetett  $\sigma$  leárnyékolási tényező segítségével az alábbi módon közelíthető:

$$h\nu = A(Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Vagyis adott atomban keletkező röntgenfoton energiája - nem túl kis rendszám esetén - közelítőleg arányos a rendszám négyzetével. Ez azt jelenti, hogy különböző atomoknak ugyanolyan átmenetéből (pl.  $K_\alpha$ ) keletkező röntgensugárzás frekvenciájának gyöke arányos a rendszámmal; *l* ábra). Ez az ún. Moseley-törvény, amelyet Moseley még az atom szerkezetének megismerése előtt kísérletileg állapított meg. A lineáris függést megadó görbe segítségével ismert sugárzási frekvencia alapján meg lehet állapítani az atom rendszámát. Ezt felhasználva állapították meg pl. egyes atomok pontos helyét a periódusos rendszerben, mivel akkor még az atommagról és annak töltéséről semmit sem lehetett tudni.



#### ***A fékezési sugárzás, a röntgenső működése***

Elektromágneses sugárzás nem csak atomi átmenetek segítségével hozható létre, hanem töltés gyorsításával is, hiszen minden gyorsuló töltés sugároz (egy rádióadó antennájában a rezgő töltések keltik a sugárzást). Ha a gyorsulás elég nagy, akkor a röntgentartományba eső sugárzás is létrehozható.

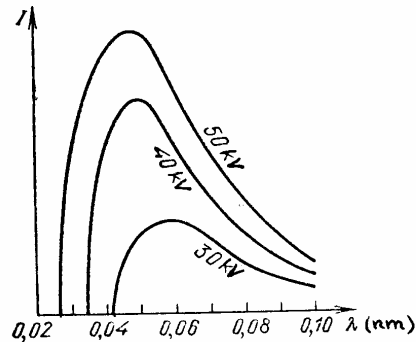
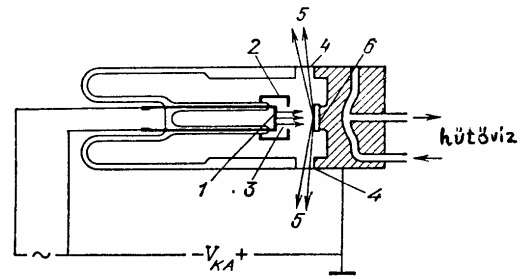
Ezen az elven működnek a szokásos röntgenforrások, az ún. *röntgensövek*. Ezekben felgyorsított elektronokat egy fémtömbbe való ütközéssel lefékezik (így érhető el igen nagy gyorsulás), és közben az elektronok sugároznak. Az így létrejött sugárzást *fékezési sugárzásnak* nevezik.

A röntgenső lényegében egy vákuumedény ( $10^{-5}$ - $10^{-7}$  torr) amelynek vázlatja az ábrán látható. Itt a jelölések a következők: 1- az elektronokat előállító izzó katód, 2- fókuszáló elektród, 3- gyorsított elektronnyaláb, 4- a röntgensugárzás kibocsátására szolgáló ablak, 5- röntgensugárzás, 6- az elektronokat lefékező fémtömb, ami egyben az anód is.  $V_{KA}$  a gyorsító feszültség. A fékezés során leadott energiának csak egy

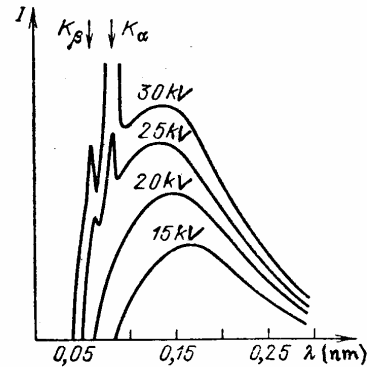
töredéke alakul át röntgensugárzássá, az energia zöme az anódot felmelegíti, ezért a rendszert állandóan hűteni kell.

A fékezési sugárzás intenzitásának frekvencia szerinti eloszlása (a röntgenspektrum) folytonos, amit az alábbi ábra *a*) része mutat (wolfram anód) különböző gyorsító feszültségek esetén.

Látható, hogy adott gyorsító feszültség (elektron-energia) estén van egy minimális hullámhossz, ami alatt nincs sugárzás. Ez a fotonkép alapján érthető meg: a fékezés



a



b

korán kibocsátott foton energiája maximum az elektron mozgási energiájával lehet egyenlő (amit viszont a gyorsító feszültség határoz meg), vagyis

$$h\nu \leq eV_{KA}$$

$$\lambda \geq \frac{hc}{eV_{KA}},$$

ahol  $e$  az elemi töltés.

Az elektronnyaláb természetesen képes elektronokat gerjeszteni a fékező fématomok belső héjairól, így a fékezési sugárzás mellett általában a fékező fémre jellemző karakterisztikus röntgensugárzás is megjelenik. A *b*) ábra egy ilyen összetett röntgenspektrumot mutat, ahol a csúcsok az anód (itt molibdén) karakterisztikus sugárzásának felelnek meg.

### **Röntgensugárzás és anyag kölcsönhatása, röntgensugárzás detektálása**

A kölcsönhatás fő típusai:

- Fotoeffektus (a röntgensugárzás fotonjai elektront ütnek ki az anyag atomjaiból, és így a bombázott anyagra jellemző röntgensugárzás jön létre). Ennek a esete, hogy a keletkező röntgen foton is kiüt egy elektront (ez az Auger-effektus). A fotoeffektus eredménye tehát: elektronkilépés (ionizáció) és röntgensugárzás (Auger-effektusnál két elektron kilépése és kétszeres ionizáció).
- Compton-effektus (a röntgensugárzás az atom elektronját meglöki, energiát veszít, és nagyobb hullámhosszú sugárzásként halad tovább).
- Koherens szórás (nincs energiaváltozás).

A kölcsönhatás során a sugárzás részben elnyelődik (fotoeffektus) részben szóródik, tehát adott irányú nyaláb intenzitása mindkét esetben csökken. Az intenzitáscsökkenésre érvényes, hogy igen vékony,  $dx$  vastagságú anyagon való áthaladás közben a  $dI$  intenzitáscsökkenés arányos a beérkező intenzitással és a rétegvastagsággal:

$$dI = -\mu I dx,$$

ahol  $\mu$  a sugárzástól és az anyagtól függő *sugárgyengítési tényező*. Ebből következik (integrálás), hogy a sugárzás intenzitása az anyagréteg vastagságával exponenciálisan csökken:

$$I(x) = I_0 \exp\{-\mu x\}$$

( $I_0$  az  $x=0$ -hoz tartozó, belépő intenzitás).

A  $\mu$  tényező az elnyelés és szórás hatását együttesen jellemzi (az összetevőket külön lehet választani, de ezzel nem foglalkozunk), ennek megfelelően meglehetősen bonyolult mennyiség, amely függ például az elnyelő anyag sűrűségétől. Szerencsére ez a függés gyakran lineáris, ezért érdemes bevezetni a  $\mu_t = \mu / \rho$  ún. tömeggyengítési tényezőt, amivel a fenti törvény az alábbi alakot ölti:

$$I(x) = I_0 \exp\{-\mu_t \rho x\} = I_0 \exp\{-\mu_t x_t\},$$

ahol  $x_t = \rho x$ , a  $\text{kg/m}^2$ -ben mért "vastagság".

A röntgensugárzás detektálása illetve intenzitásának mérése az anyaggal való kölcsönhatásai alapján történik. A gyakorlatban ilyen célra az ionizáló hatást hasznosítják. Ennek alapján a sugárzás intenzitása ionizációs kamrával mérhető (egy edényben elektródok között elhelyezett gázon átfolyó áram az ionizáció mértékétől, így a röntgensugárzás intenzitásától függ). Ugyanezen a hatáson alapul a Geiger-Müller-számlálóval történő mérés (itt a beérkező röntgenfotont egy speciális gáztartályban ütközési ionizációval létrejött impulzus jelzi). Ionizáción alapul a speciális fotoemulzióban létrehozott feketedés is, ami szintén alkalmas a sugárzás detektálására.

Az intenzitásmérés mellett gyakran felmerül az az igény is, hogy a röntgensugárzás hullámhosszát határozzuk meg, illetve adott hullámhosszú összetevőt kiválasszunk. Mindkét feladat a hullámoknak rácson történő elhajlása alapján oldható meg. Rácsként ebben az esetben egy jó minőségű egykristály kristályrácsa szolgál. Ha a röntgensugárzás egy kristályrácsra esik, akkor a rácscsíkokról a sugárzás visszaverődik, és a párhuzamos síkokról visszavert hullámok között útkülönbség jön létre (ábra). A hullámok akkor erősítik egymást, ha a  $\Delta s$  útkülönbségükre fennáll, hogy  $\Delta s = n\lambda$  ( $n$  egész szám). Az ábra alapján látható, hogy erősítés olyan  $\vartheta$  irányokban jön létre, amelyre

$$2d \sin \vartheta = n\lambda,$$

( $d$  a párhuzamos rácscsíkok távolsága). Ez a Bragg-egyenlet.

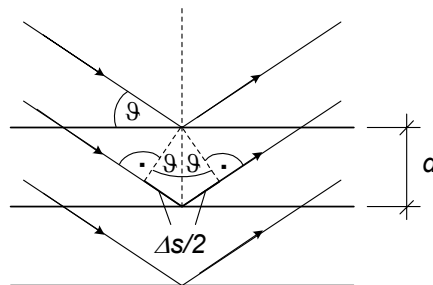
Ismerve a síktávolságot és lemérve a maximális intenzitásokhoz tartozó szöveget a sugárzás hullámhossza meg-határozható. Így módunk van ismeretlen sugárzás spektrumának felvételére is (röntgenspektrométer).

Folytonos sugárzásból ugyanezen összefüggés segítségével kiválasztható adott hullámhosszú sugárnyaláb: ismerve a hullámhosszt és a rácstávolságot a kívánt sugárzás iránya ( $\vartheta$ ) meghatározható.

### **Alkalmazási lehetőségek**

A röntgensugárzást a gyakorlatban széles körben alkalmazzák:

- A röntgensugárzás diffrakciójának vizsgálata lehetőséget ad ismeretlen kristályszerkezet vizsgálatára. Ha a kristályra ismert hullámhosszú röntgensugárzást bocsátunk, és megmérjük a maximális intenzitások irányát, akkor a rácscsíkok  $d$  távolsága meghatározható (Bragg-egyenlet). A rácsszerkezet pontos



meghatározása persze nem egyszerű (többféle rácshibák-távolság), de számos praktikus és számítógéppel támogatott eljárást dolgoztak ki erre a célra. A diffrakció segítségével vizsgálhatók szennyezések vagy egyéb rácshibák által okozott rácstorzulások is.

- A különböző anyagok eltérő elnyelése alapján átvilágítással árnyékképek is készíthetők (pl. anyagvizsgálat, orvosi röntgenfelvétel).
- A röntgensugárzás elnyelése függ az adott atom elektronátmeneteinek megfelelő energiáktól: az átmenetnek megfelelő energiáknál az elnyelés ugrásszerűen megnő, így az elnyelt intenzitást a frekvencia függvényében mérve, éles csúcsok jelennek meg. Ezekből az elnyelő atom energiaszintjeire következtethetünk.
- Mivel egy atom által kisugárzott karakterisztikus röntgensugárzás frekvenciái, vagyis az atom röntgenspektruma a vizsgált atom rendszámától függ (Moseley-törvény), egy anyagban jelenlévő ismeretlen elem (pl. szennyezés) a benne (pl. elektronnyalábbal történő besugárzással) létrehozott karakterisztikus röntgensugárzás frekvenciájának vizsgálatával meghatározható. Ez az alapelve az ún. röntgen-fluoreszcenciának, amelynek segítségével a szennyező anyagi minősége mellett annak mennyisége is meghatározható.