

## A röntgensugárzás felfedezése és tulajdonságai

A XIX. sz. végén a fizikusok különös érdeklődéssel tanulmányozták az elektromos kisüléseket ritkított gázokban. A felfedezett katódsugarakat a légritkított kisülési csőből először Lénárd Fülöpnek sikerült a szabad levegőre hozni. A kisülési cső üvegfalát Lénárd a megfelelő helyen átfúrta, és a nyílást olyan vékony alumínium lemezzel fedte be, amelyen a nagy sebességű elektronok át tudtak hatolni.

E kor egy másik kiváló fizikusának, Wilhelm Konrad Röntgennek, a würzburgi egyetem professzorának szokása volt mások kísérleteit, amelyek érdemleges felfedezésre vezettek, megismételni. Ezért olyan kisülési csövet készíttetett, amilyent Lénárd használt. 1895. november 8-án este, sötét laboratóriumában, kísérletezés közben észrevette, hogy a fekete kartonba burkolt kisülési cső közelében levő báriumplatincianür ernyő zöldes fényt bocsát ki. Ekkor a cső és ernyő közé deszkát, majd könyvet tett. Meglepetésére a zöldes fény csak gyengült, de nem szűnt meg, amint ez katódsugárzás esetében várható lett volna.

Röntgen azonnal felfedezésének rendszeres kivizsgálásához kezdett. Megállapította, hogy a kisülési cső azon helyén, ahová a katódsugarak ütköznek, újfajta, láthatatlan sugarak keletkeznek.

Az új, még ismeretlen sugarakat Röntgen X-sugaraknak nevezte el. Az angolok, amerikaiak és franciák mai napig is X-sugaraknak (X-Rays, ill. Rayons-X), míg a németek és a többi népek a nagy felfedező után röntgensugaraknak nevezik.

Röntgen már 1896. január 23-án a würzburgi orvosi és fizikai társaság előtt nyilvánosan beszámolt az újfajta sugarakról.

Hallgatósága igen nagy meglepetésére, két röntgenfelvételt mutatott be; egyet saját kezéről és egy másikat vadászfegyverének szerkezetéről. Ezzel útnak indított két új tudományt, az orvosi röntgendiagnosztikát és az anyagvizsgálást röntgensugarakkal.

Röntgen nemcsak szerencsés felfedezője a róla elnevezett sugaraknak, amellyel a mai atom- és sugárfizika úttörője lett, hanem - mint lángeszű kutató - további kísérletei során néhány hét alatt megállapította az új sugarak főbb jellemző tulajdonságait is:

- a röntgensugarak a térben általában egyenes irányban terjednek, - a fényképezőlemezt feketítik,
- bizonyos anyagokat fluoreszkálásra gerjesztenek, - a levegőt vezetővé teszik,
- át nem látszó anyagokon, mint papír, fa, emberi testrészek, sőt fémeken is, áthatolni képes,
- sugarait sem elektromos, sem mágneses mező útjából el nem téríti, és hogy
- áthatolóképességük a sugár előállítására használatos kisülési cső légritkításának fokától is függ.

Annak ellenére, hogy Röntgen már első alapvető munkájában az újfajta sugarak főbb tulajdonságait leírja, ezek lényege még hosszú ideig ismeretlen maradt, mert ennek megállapításához még hiányoztak bizonyos ismeretbeli előfeltételek. Röntgen és számos kiváló fizikus hiába igyekeztek kifürkészni a röntgensugár mibenlétét. Feltételezték ugyan, hogy olyan sugárzás, mint a látható fény, de igazolni nem tudták, mert a fénysugár jellegzetes fénytörését nem sikerült előállítani.

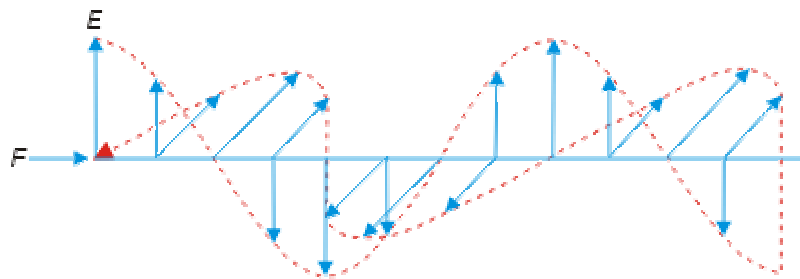
Csak 1912-ben sikerült Max von Laue kiváló fizikus megfontolásai és számításai alapján munkatársainak: Friedrichnek és Knippingnek kísérletileg igazolni, hogy a röntgensugár is fény, terjedési sebessége (c) ugyanakkora, mint a látható fényé és a polarizálási jelenségek is kimutathatók.

A röntgensugár csak annyiban különbözik a látható fénysugártól, az ultraibolya fénytől, valamint a rádiótechnika elektromágneses hullámaitól, hogy hullámhossza lényegesen rövidebb. Éppen ezért nem sikerülhetett az újfajta sugarak elhajlását és interferenciáját mindaddig kimutatni, míg megfelelő finom osztású rácsot nem alkalmaztak. Laue kiszámította az anyagokban az atomok, ill. molekulák egymástól való távolságát, és feltételezte, hogy azok a térben, különösen a kristályoknál szabályosan rendeződnek, és így mintegy szabályos térbeli rácsot képeznek, amelynek nagyságrendje a röntgensugarak hullámhosszával egyezik. Megfelelő kristályon áthaladó röntgensugárnak tehát a kristályrács szerkezetén meg kell törnie, mint azt Friedrich és Knipping kísérletei ragyogóan igazolták. Ezzel azonban nemcsak a röntgensugár hullám-, ill. fénytermészete igazolódott, hanem egyben a

hullámhosszúság mérésére és a kristályok szerkezeti felépítésének vizsgálatára találtak megbízható eljárást.

A röntgen- és gamma-sugarakat, az ultraibolya és látható fényt, az infravörös hősugarakat, a rádió, a televízió, a radar és az orvosi rövidhullámú kezelőkészülékek hullámait egységesen elektromágneses hullámoknak nevezzük. Elektromágnesesnek azért, mert két egymáshoz kapcsolt rezgő energiából képzeljük el őket, amelyek közül az egyik elektromos, a másik mágneses jellegű.

Az elektromágneses fény elmélet feltevése szerint a két transzverzális együtt haladó hullámmozgás lengési síkjai egymásra merőlegesek. Terjedési sebességük (c) az anyagmentes, ill. üres térben mindig ugyanaz, éspedig  $c=300000 \text{ km/s}$ . Ez a c tehát nemcsak egységes fázissebessége valamennyi elektromágneses hullámnak az üres térben, hanem ezen túlmenően egyáltalán a lehető legnagyobb sebesség.



**Az elektromágneses hullám együtthaladó elektromos és mágneses energiájának egymásra merőleges lengési síkjának ábrázolása**

Az elektromágneses hullámok csak hullámhosszukban, ill. rezgésszámukban (frekvenciájukban) különböznek egymástól. Mivel c konstans érték, a hullámhossz csak a rezgésszámtól függ

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = c \cdot T$$

A képletben  $\nu$  a rezgésszám másodpercenként és T egy-egy teljes hullám rezgési ideje.

A táblázatból  $\lambda$  hullámhosszuk szerint rendezve, az egész elektromágneses spektrum áttekinthető.

Az elektromágneses sugarak  $\lambda$  hullámhosszát nehézkes volna cm-ben megadni, ezért célszerűbb mértékegységeket használunk:

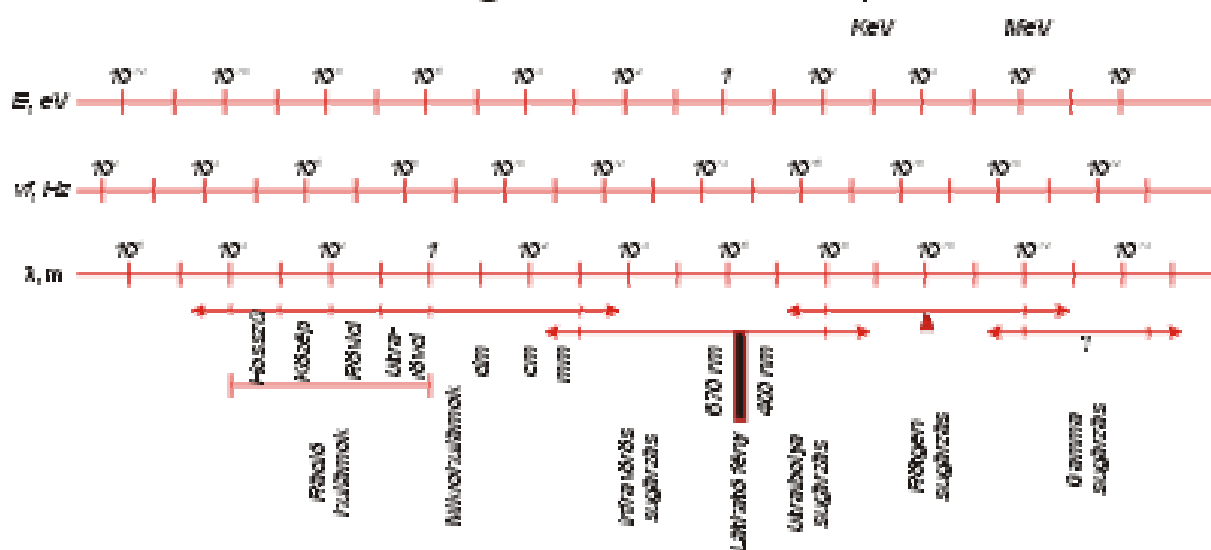
1 mikrométer =	1 $\mu\text{m}$ =	1 /1000 mm =	$10^{-3} \text{ mm} = 10^{-4} \text{ cm}$ ,
1 nanométer =	1 nm =	1/1000 $\mu\text{m}$ =	$10^{-6} \text{ mm} = 10^{-7} \text{ cm}$ ,
1 angström-egység =	1 $\text{Å}$ =	1/10 nm =	$10^{-8} \text{ cm}$ ,
1 X-egység =	1 X =	1/1000 $\text{Å} =$	$10^{-11} \text{ cm}$ .

A röntgen- és a gamma-sugarak hullámhosszát angströmökben vagy X-egységekben adják meg. A leghosszabb hullámhosszúságú röntgensugaraknak kb. 10  $\text{Å}$ , azaz 10 000 X.-E., míg a legrövidebb gamma-sugaraknak kb. 0,01 X.-E. hullámhosszuk van.

Az elektromágneses hullámok terjedési sebessége (c), hullámhossza ( $\lambda$ ), rezgésszáma ( $\nu$ ) és az együtt haladó elektromos és mágneses jellegű transzverzális hullámok fizikai eszközökkel mérhetők és kimutathatók. Fel kell tennünk még azt a kérdést, hogy miből áll tulajdonképpen az elektromágneses hullám? Ugyanis az előbbi megállapítások csak tulajdonságok és észlelhető tünetek.

6. táblázat. Elektromágneses hullámok spektruma

## Az elektromágneses hullámok spektruma



Az elektromágneses hullám a tudomány mai feltevése szerint nem más, mint a térben haladó energia. Áramlása nem folyamatos, mint régebben hitték, hanem mintegy lövedékek özöne, amely meghatározott nagyságú energiacsomókból áll. Az energiacsomókat energiakvantumoknak, rövidebben fotonoknak nevezzük.

A fotonok energiája rezgési állapotban van, ami feltehetően abból áll, hogy az energia két megjelenési formája, az elektromos és mágneses, ritmikusan változik. Mint ahogy az ingánál a helyzeti és mozgási energia nagysága ritmikusan változik ugyan, de összegük változatlan, úgy a fotonoknál az elektromos és mágneses energia szintén ritmikusan változik ugyan, de összegük egy-egy fotonnál változatlan, és pedig mindaddig, amíg valamilyen külső erőhatás meg nem változtatja, például anyagi részecskébe ütközésekor. Ilyenkor energiája részben vagy egészen másfajta energiává és bizonyos energiájú kvantumoknál, ill. felett anyaggá is átalakul.

Minden foton energiájának nagysága csak a rezgésszámától függ. Max Planck fizikus, a modern kvantumelmélet megalapítója (1900) szerint

$$E = h \cdot \nu$$

az egyenletben E a foton energiája erg egységekben van, ha a Planck-féle állandó szorzószám  $h = 6,624 \cdot 10^{-27}$  ergszekundumban van megadva;  $\nu$  a rezgésszám másodpercenként.

A foton energiája tehát annál nagyobb, minél nagyobb a rezgés száma, ill. minél rövidebb a hullámhossza. A röntgensugár fotonjainak energiája kb. 10 000...100 000-szer nagyobb, mint a látható fény fotonjainak energiája.

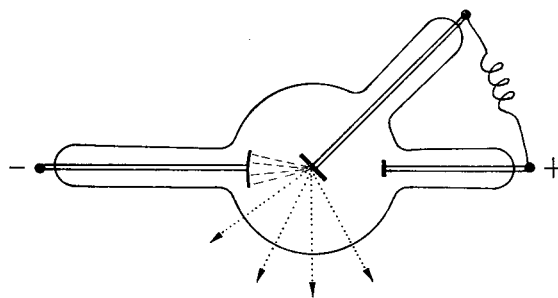
Planck kvantumelméletének fontos megállapítása, hogy a fény, ill. elektromágneses energia kibocsátása és elnyelése csak egész energiakvantumként történhet, vagyis csak  $h \cdot \nu$ , vagy ennek egész számú többszöröse,  $n \cdot h \cdot \nu$  lehet ( $h \cdot \nu$  törtrésze sohasem fordul elő!). Miként az anyagok anyagi részecskékből, un. atomokból vannak összetéve, úgy mondhatjuk, hogy az elektromágneses energia is hasonlóképpen energiárészecskékből, un. energiakvantumokból, ill. **fotonokból** áll.

Röntgen az általa felfedezett sugarak előállításához eleinte egy olyan üvegből készült légritkított kisülési csövet használt, amelyben két szemben álló fémelektroda volt beépítve. Az elektródákat egy szikrainduktorral kötötte össze, mégpedig úgy, hogy az egyik elektróda pozitív, a másik negatív legyen. A pozitív elektródát anódnak, a negatívot katódnak nevezzük. Ily módon a két elektróda között nagyfeszültségű elektromos erőteret keletkezett, amelyben a kb. 0,01 mm higanynyomású levegő, néhány, a kozmikus sugárzás által ionizált molekulái a megfelelő polaritás felé indultak. Ezek ütközben további molekulákkal ütközve, azokat is ionizálták. A lavinaszerűen szaporodó ionizációkból származó negatív töltésű részecskék, főleg a szabad elektronok, a nagyfeszültségű elektromos erőterben nagy sebességgel a pozitív irányba repültek, és részben a pozitív elektródába, nagyobb részben a kisülési cső üvegfalába ütköztek. Az anyagba ütköző nagy sebességű elektronok

lefékezésekor energiájuk túlnyomó részét hővé és kis része elektromágneses energiává, azaz röntgensugárrá alakult át.

Röntgen első kísérleti kisülési csöveinél az X-sugárzás keletkezési helyén a katóddal szembeni üvegfalon, zöldes fluoreszcens fényjelenség volt megfigyelhető. Itt az elektronbombázás következtében az üvegfal hamarosan annyira felmelegedett és ennek következtében a kisülési cső légritkítása annyira csökkent, hogy használhatatlanná vált. Ezért Röntgen kisülési csöveibe a katóddal szemben, azon a helyen, ahová az elektronok ütköznek, egy harmadik lemez alakú fémelektrodát épített be, amelyet antikatódnak nevezett el, és azt összekötötte az anóddal. Igyekezett a katódot úgy kiképezni, hogy az elektronok az antikatódon lehetőleg kis helyen, az un. fókuszban összpontosuljanak.

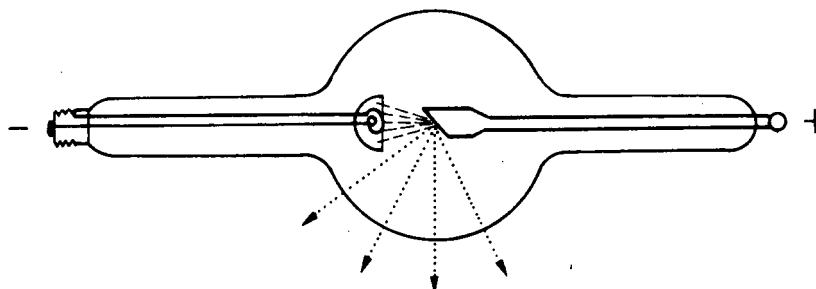
Röntgen klasszikus csöveinél a nagy sebességű elektronok száma, vagyis a csőáram erőssége (mA), az anód és katód közötti feszültségtől, az un. csőfeszültségtől (kV) és a légritkítástól függ. Ugyanannál a légritkításnál a csőáram csak a csőfeszültséggel fokozható.



Röntgen klasszikus kisülési csöve

Ugyanannál a csőfeszültségnél viszont csak a légritkítás csökkentésével növelhető a csőáram és fordítva. Ugyanis ha több levegőmolekula van a katód és anód között, úgy több az ütközés és ionizálás, de csak bizonyos légsűrűségig, mert ha már túl gyakori az ütközés, akkor az elektronok már nem tudnak a röntgensugárzás kiváltásához kellő sebességre jutni. Ilyenkor végül is az elektródák között a sűrű ionizáció folytán vezetőképessé vált levegőn (plazmán) át a nagyfeszültség ívképződéssel, csattanó fényjelenség közben átüt. Ha viszont túl nagy a légritkítás, akkor meg túl kevés az ütközési lehetőség, ennek folytán kevés az ionizálás és a csőáram.

Az előbbi esetben a klasszikus röntgensöveket túl lágyaknak, az utóbbiban túl keményeknek nevezték. A klasszikus csöveket a nem túl terhelő (túlságosan melegítő) üzemeltetés fokozatosan keményítette, mert az ionok részben a cső üvegfalára rakódnak. Ezért időközönként lágyítani kellett, pl. óvatos hevítéssel. Erre a célra voltak különböző, un. regeneráló készülékek. Ha a cső túl lágy lett, akkor alacsony csőfeszültséggel hosszabb ideig üzemeltetni, ill. keményíteni kellett. A csőáram szabályozásának ez a nehézsége arra kényszerítette a röntgenorvost, hogy egész sorozat röntgensövet tartson készenlétben. Külön csövet a tüdő- és külön a gyomorvizsgálathoz stb. **Coolidge** a csőáram (mA) szabályozásának nehézségét megszüntette. Azt a fizikai tényt használta ki, hogy az izzó anyagok (pl. izzó fémszál) elektronokat bocsátanak ki.



## Coolidge izzókatódos röntgensöve

Coolidge újfajta röntgensöveket készített (8. ábra), amelynél a katód végén egy tetszőlegesen izzítható fémszál volt beépítve, és a csövet lehetőleg tökéletesen légtelenítette. A negatív katód és pozitív anód közötti nagyfeszültségű erőterben az izzó katódból kiszabaduló elektronok a pozitív anód felé akadálytalanul repülnek, majd az anód anyagába csapódva lefékeződnek. Az izzókatódos röntgensövek óriási előnye a klasszikus csövekkel szemben az, hogy a katódizzítás egyszerű szabályozásával tetszőleges csőáram (mA-érték) állítható be. Nincs szükség körülményes lágyításra, keményítésre és a csövek cserélgetésére. Ezen túlmenően üzembiztosabbak és tartósabbak is. A mai röntgensövek mind izzókatódos kivitelűek.

A röntgensövek működésének ismertetésekor megtudtuk, hogy röntgensugárzás keletkezik mindenütt, ahol nagy sebességű elektronok anyagba ütköznek. Ütközéskor az elektronok behatolnak az anyagba, és mint a puskagolyó a homokban, lefékeződnek. Ez a lefékezés részleteiben vizsgálva bonyolult folyamat. A nagy sebességű elektronok kölcsönhatásba lépnek az anyag (röntgensöven az antikatód, ill. -anód) atomjaival. Nagyobb részük lefékeződik az atommagokat körülvevő pozitív elektromos erőterben; kisebb részük pedig kötött elektronokat lök ki energianívójából (K, L, M, N stb.). Az első esetben az ún. fékezési sugarak, az utóbbinál az ütköző anyagra (pl. volfrámra) jellemző ún. karakterisztikus sugarak keletkeznek.

A fékezési sugarak keletkezésekor közömbös az elektronok származása, annál fontosabb sebességük, ugyanis ettől függ a létrejövő sugárzás minősége, vagyis a keletkező fotonok energiája ( $E=h\cdot\nu$ ).

Abban a legkedvezőbb esetben, amikor a  $\nu$  sebességű és  $m$  tömegű elektron egész mozgási energiáját

$\left(m \cdot \frac{\nu^2}{2}\right)$  már az első ütközés alkalmával elveszíti és az teljes egészében sugárzássá, ill. fotonná alakul át, úgy az ilyen energiaátalakulásból, az adott csőfeszültségnél (kV-értéknél) eredményként a lehető legnagyobb energiájú, ill. legrövidebb hullámhosszúságú foton keletkezik. Ezt a hullámhosszat határhullámhossznak nevezzük és  $\lambda_0$ -al jelöljük. A szóban forgó kölcsönhatásnál tehát az elektron mozgási energiája

$$\frac{m \cdot \nu^2}{2} = h \cdot \nu - \text{vel}$$

a keletkező foton energiájával.

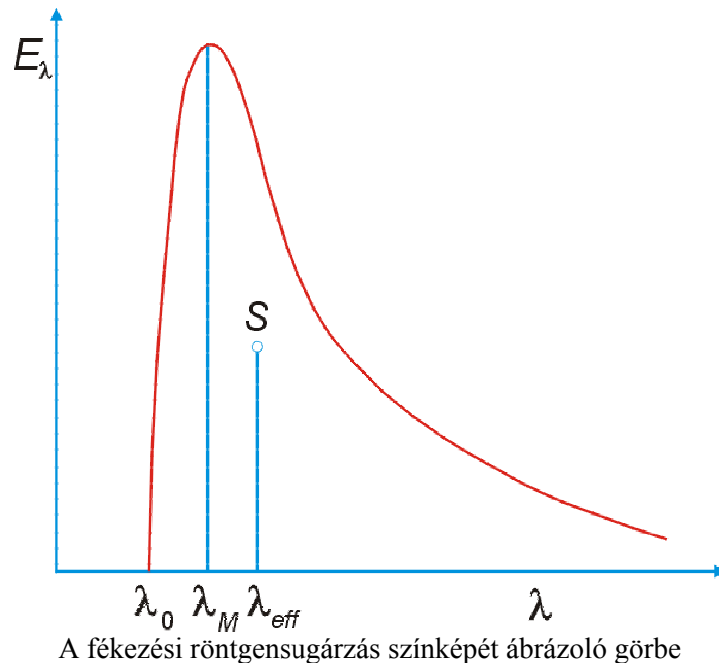
Az anyagba (pl. az anód fókuszába) ütköző nagy sebességű elektronok túlnyomó többsége azonban nem az első ütközés alkalmával adja át teljes mozgási energiáját, hanem csak több ütközés után fokozatosan fékeződik le. Ennek következtében az egyes ütközésekből csak kisebb energiaátalakulások lehetségesek, mint az előbbi legkedvezőbb határesetben. Ezért a keletkező fotonok többségének hullámhossza már csak hosszabb lehet  $\lambda_0$  határhullámhossznál. Végeredményben a fékezési sugárzás a  $\lambda_0$  határhullámhossztól folytatódóan számtalan sokféle hullámhosszúságú fotonból tevődik össze, és ezért úgy mondjuk, hogy színképe (spektruma) folytonos.

A fékezési röntgensugárzás színképét megkapjuk, ha fotonjainak energiáját ( $E_\lambda$ ) hullámhosszuk ( $\lambda$ ) szerint rendezve ábrázoljuk. A 9. ábrán az abszcissa hullámhossz és az ordináta  $E_\lambda$ , a

$\lambda$  hullámhosszúságú fotonok összenergiája.  $\lambda_0$  a határhullámhossz, amelynél az egyes fotonok energiája maximális.  $\lambda_M$  az a hullámhossz, amelynél a kibocsátott fotonok energiájának összege a legnagyobb.  $\lambda_{eff}$  pedig az a hullámhossz, amely a görbe  $S$  súlypontjához tartozik.

**Karakterisztikus** sugárzás keletkezik, amikor a nagy sebességű elektron az atommag körül valamelyik energianívón keringő kötött elektront löki ki. Az ütköző elektronok, mint a billiárdgolyók, irányukat és sebességüket változtatva, most már mindketten mint szabad elektronok haladnak tovább

és mindaddig ismét ütköznek, amíg mozgási energiájukat, azaz sebességüket el nem veszítik. Az ily módon ionizált atomok elektronpályái közötti rendeződés közben felszabaduló energiakülönbségek, az ütköző anyag atomjaira jellemző nagyságú energiakvantumok (fotonok), mint karakterisztikus sugarak hagyják el atomjaikat. A 10. ábrán a fékezési sugárzás folytonos szinképét ábrázoló görbe mentén néhány éles kiugrást látunk, ezek a karakterisztikus sugarak intenzitását ábrázolják. Ha pontosan megállapítjuk hullámhosszukat, úgy értelemszerűen következtetni tudunk arra, milyen anyagnak ütköztek az elektronok. Ezen alapul a **röntgenspektrográfia**. Így még ötvözetek összetétele is megállapítható.



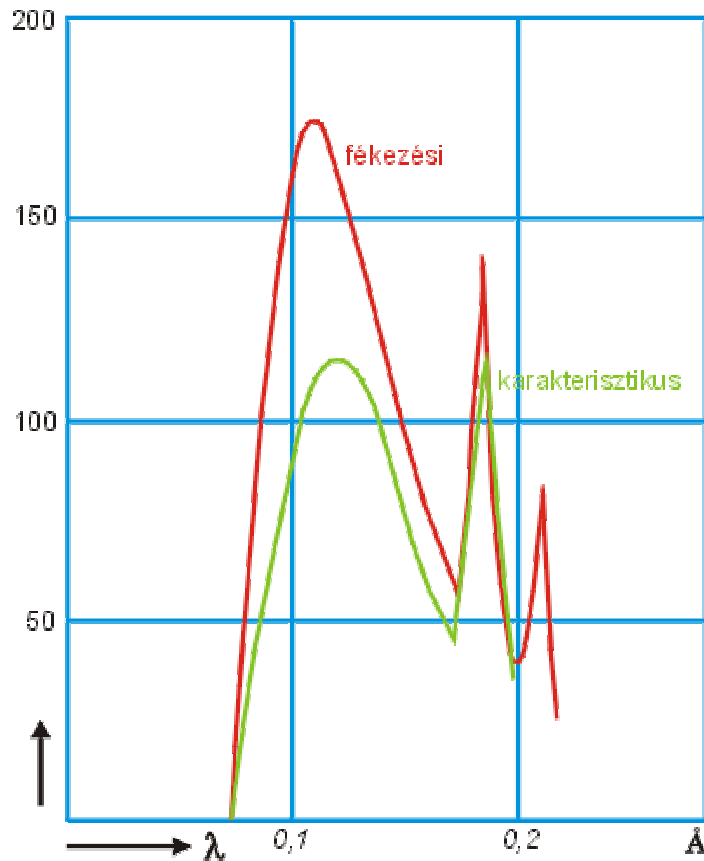
Mind a klasszikus, mind az izzókatódos röntgensöveknél a keletkező röntgensugárzás energiája, azaz áthatolóképesége az alkalmazott csőfeszültséggel (kV-értékkel) arányos, amelynek ismeretében  $\lambda_0$ , határhullámhossz könnyen kiszámítható. A katódtól elinduló elektront, amelynek töltése  $e$  és tömege  $m$ , az  $U$  csőfeszültség  $v$  sebességre gyorsítja. Az elektron elektromos energiája tehát:

$$e \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

mozgási energiává alakul át.

Ha a  $v$  sebességű elektron teljes energiája az anódba ütközésekor röntgenfotonná alakul át, úgy írhatjuk, hogy

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = h \cdot \nu$$



10. ábra. A fékezési és karakterisztikus sugárzás szinképét ábrázoló görbe

miel pedig a határhullámhossz  $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$ -vel, azaz a fénysebessége osztva a rezgésszámmal, ezért így is írhatjuk:

$$e \cdot U = h \cdot \frac{c}{\lambda_0}, \text{ ezek után } h, c \text{ és } e \text{ állandókat behelyettesítve és kiszámítva} \quad \lambda_0 = \frac{12,4}{u_{kV}} \text{ \AA}$$

A röntgensőben keletkező fékezési szinkép határhullámhosszát angström(Å) egységekben megkapjuk, ha 12,4 állandót kV-ban megadott csőfeszültséggel elosztjuk. Ez Duane és Hunt törvénye, amely kimondja, hogy a  $\lambda_0$  hullámhossz emelkedő U csőfeszültséggel csökken, tehát a hullámhossz a csőfeszültséggel fordítva arányos.

A röntgensugár keletkezéséről az eddig mondottakból téves volna arra következtetni, hogy a nagy sebességű elektronok mozgási energiája az anyaggal ütközéskor csak röntgensugárzássá alakul át. A valóságban a nagy sebességű elektronok lefékezésekor mozgási energiájuk túlnyomó többsége végül hőenergiává alakul át és csak igen kis hányada (kb. 0,5-2 %, gyorsító feszültség függő) lép ki az anyagból (a röntgensőből wolfram pogácsájából) fotonok, ill. röntgensugárzás alakjában. Ennek az a magyarázata, hogy a nagy sebességű elektronok többségének mozgási energiája az anyagban fokozatosan elaprózódik. A folyamatok eredményeként keletkező fotonok száma szaporodik ugyan, de energiájuk ( $h \cdot \nu$ ) mind kisebb lesz, mindaddig, míg már csak hőhatásukban észlelhetők. A röntgensővek hatásfoka, vagyis hogy a fókuszra ütköző elektronok energiájának hány százaléka alakul át hasznosítható röntgensugárrá, azaz  $h \cdot \nu$  energiájú fotonokká, az nagy mértékben az anód anyagának Z rendszámától és az U csőfeszültségtől függ. Erre megközelítő pontosságú képlet Compton szerint:

$$\eta = 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot Z \cdot U\%$$

pl. legyen az anód wolfrám, tehát  $Z=74$  és legyen  $U$  csőfeszültség 100 kV, akkor  $\eta=0,8\%$ , vagyis a befektetett energia 0,8%-a alakul csak át röntgensugárzássá.