

# ATOMFIZIKA

(vázlat)

## 1. Bevezetés

## 2. Az atomfogalom kialakulásának történeti áttekintése

## 3. Az elektron felfedezése

- a) Elektrolízis
- b) Millikan-kísérlet
- c) Hidegemisszió
- d) Richardson-hatás
- e) Izzóelektromos hatás
- f) Katódsugárzás

## 4. A kvantumfizika születése

- a) Hőmérsékleti sugárzás
- b) Fényelektromos hatás
- c) Vonalas színek és energiaszintek
- d) Franck-Hertz-kísérlet
- e) Röntgensugarak
- f) Az elektron hullámtermészete
- e) Elektronmikroszkóp

## 5. Atommodellek

- a) Thomson-modell
- b) Rutherford-modell
- c) Bohr-modell
- d) Kvantumszámok
- e) Atompályák energiasorrendje
- f) Kvantummechanikai atommodell
  - Pauli-elv
  - Hund-szabály

## 6. Fizikatörténeti vonatkozások

# Modern fizika

## Bevezetés

Ha végiggondoljuk a fizika fejlődésének történetét, észrevehetjük, hogy az három nagy korszakra bontható:

- az ókori naiv természetelméletre,
- a középkori és újkori klasszikus fizikára, valamint
- a múlt századi modern fizikára.

### De mit takar ez a kifejezés, hogy modern fizika?

A XIX. század végén, amikor az ismeretek áradata már óriási folyammmá dagadt, akadtak fizikusok, akik azt hirdették, most már "mindenre" megtaláltuk a magyarázatot, a fizikai ismeretek lenyűgöző fellegvára szilárdan áll, és a betetőzést a Newton-féle mechanika és a Maxwell-féle egyenletek jelentik.

Más fizikusok viszont bizonyosak voltak abban, hogy az ember nem képes a "mindenre" felkutatni, csak egyre többet megismerni, és tovább kutattak. Az eredmény nem maradt el: *újabb nyitott kérdéseket és ellentmondásokat tártak fel a kutatók*. Ezek egy részére a XX. században sikerült választ találni.

A múlt század elején a fizikai világgépünkben két forradalmi átalakulás is bekövetkezett.

- ♦ Az egyik teljesen megváltoztatta az anyag és a sugárzás természetéről kialakított szemléletünket, és olyan képet festett a valóságról, amelyben a részecskék hullámként, a hullámok részecskéként viselkednek. Ekkorra már a technika szakemberei is egyre tökéletesebb, finomabb és érzékenyebb eszközöket készítettek a fizikusok kísérleteihez. Így lehetővé vált az anyag belső szerkezetének egyre pontosabb megismerése.
- ♦ A másik forradalom feje tetejére állította a térről és az időről alkotott fogalmainkat. Az évek során az első forradalmat kvantumelmélet kifejezéssel illettük, a másodikat a relativitáselmélet kifejezéssel határoltuk körül.

De ne felejtsük el, amit ma modern fizikának mondunk, az holnap már klasszikussá válik, és mindig lesznek újabb és újabb megoldatlan problémák.

Ilyen volt az anyag belső szerkezetének problémája, az atom, atommag felépítése, a fény természetének magyarázata vagy a relativitáselmélet. Ezekre találta meg a választ a XX. századi fizikus társadalom.

## Az atomfogalom kialakulásának történeti áttekintése

Ma már mindenki számára természetes az **atom** létezése. De ...

- hogyan keletkezett ez a fogalom,
- mit értettek rajta az ókorban,
- hogyan fejlődött később,
- miért csak a kvantummechanika töltötte meg reális tartalommal ezt a fogalmat?

A fejezet tanulmányozása során ezekre a kérdésekre kapunk választ.

Általános felfogás, hogy az atom fogalmát **Démokritosz** alakította ki már az ókorban.

Spekulatív úton jutott el felismeréséhez. Arra gondolt, ha az anyagot daraboljuk, akkor előbb-utóbb eljutunk egy olyan részecskéhez, amely

- tovább már nem osztható,
- nem hordozza az eredeti anyag tulajdonságát.

Ezt a tovább már nem osztható részecskét nevezte el a filozófus **atom**nak.

Az atomokról még a következő elképzelése volt:

- az atomok nagyságukat és mennyiségüket tekintve megszámlálhatatlanok,
- az űrben mozognak, ütköznek, és így jönnek létre a bonyolultabb dolgok, mint például a négy őselem: tűz, víz, levegő és föld.

Démokritosz filozófiai elgondolását követően az atomelmélet 2000 éven keresztül csak egy elképzelt hipotézis volt.

Igazán hatásosan először a **kémia segítette az atomelmélet kialakulását** a XVII. és a XIX. században tett felfedezéseivel. Ezek közül a legfontosabbak:

- **Robert Boyle** javasolta először, hogy a **kémikusok feladata** az, hogy megállapítsák, hogy milyen elemi testekre bonthatók az anyagok.
- **Lavoisier** már tisztázta az **elem** fogalmát. (Az azonos atomokból álló anyagot elemnek nevezzük. Két atom akkor azonos, ha bennük a protonok száma megegyezik.)
- **Proust** kimondta az **állandó súlyviszonyok törvényét**.  
*Vegyületekben az elemek aránya állandó.*

- **Dalton** megfogalmazta a **többszörös súlyviszonyok törvényét**.  
Atomsúly táblázatot is készített.

*Ha két elem többféle arányban is képes egymással vegyülni, akkor az egyik elem azon mennyiségei, amelyek a másik elem egy adott mennyiségével vegyülnek, úgy aránylanak egymáshoz, mint a kis egész számok.*

A gázokra vonatkozó törvényeket, amely csak akkor igaz, ha feltételezzük, hogy az anyag pici, szinte pontszerű "golyókból" áll, **Boyle, Mariotte, Gay-Lussac** és **Avogadro** fogalmazták meg.

(Avogadro-törvénye: Különböző gázok azonos hőmérsékleten, nyomáson és térfogaton egyenlő számú molekulát tartalmaznak.)

1827-ben **Brown** botanikus megfigyelte a virágporszemcsék mozgását mikroszkóp alatt. A jelenség magyarázata szintén a molekulák léteire vezethető vissza.

A XIX. század hatvanas éveiben kialakuló **kinetikus gázelmélet** már tudatosan használta az atom és a molekula fogalmát. A gázokban lévő részecskék mozgására vezette vissza a gáz hőmérsékletét és nyomását.

## Az elektron felfedezése

Az atom fogalma a kémia fejlődésének köszönhetően vált elfogadottá. Ugyancsak a kémiai kísérletek tapasztalatai vezettek el oda, hogy az atom nem egy oszthatatlan részecske, hanem töltéssel rendelkező elemi részeket tartalmaz. Ezen elemi részek közül először az elektront fedezték fel. De mivel az atom elektromosan semleges, ebből következik, hogy az atomban pozitív töltésű részecskének is kell lennie.

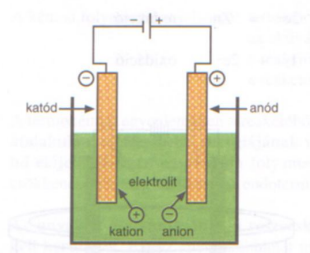
Az elektron létét bizonyítják a következő kísérletek, jelenségek:

- a) Elektrolízis
- b) Millikan-kísérlet
- c) Hidegemisszió
- d) Richardson-hatás
- e) Izzóelektromos hatás
- f) Katódsugárzás

### a) Elektrolízis

Elektrolitoknak nevezzük az ionokat tartalmazó folyadékokat.

Helyezzünk elektrolitba két elektródát és kapcsoljunk rá áramforrást. A körben



mérhető áramerősség és az idő ismeretében megkapjuk az elszállított töltés nagyságát. Az áram az ionok vándorlásának következménye: az ellentétes előjelű töltéssel rendelkező ionok különböző elektródákhoz vándorolnak, semlegesítődnek, s ott általában gáz vagy szilárd alakban kiválnak.

A katódon elektron felvétel, az anódon elektron leadás történik.

A kinyert anyagok mennyisége, és így az ionok darabszáma kémiai mérésekkel határozható meg.

Az elektrolízisre vonatkozó törvényeket Faraday fogalmazta meg:

Elektrolízis során, az elektródán kivált anyag tömege egyenesen arányos az

elektrolizáló áram erősségének és az elektrolízis idejének a szorzatával, az arányossági tényező az elektrokémiai egyenérték ( $k$ ).

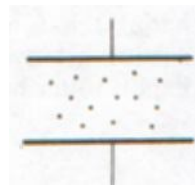
Az elektrokémiai egyenérték számértéke kifejezi, hogy 1C töltés hatására az adott anyagból mennyi válik ki elektrolízis során.

$$m = k \cdot I \cdot t$$

Egy mol anyag kiválasztásához annyiszor 96 500 C töltés szükséges, amennyi az illető anyag vegyértéke.

## b) Millikan-kísérlet

Millikan (1868-1953) angol fizikus vízszintesen elhelyezett kondenzátorlemezek közé olajcseppeket porlasztott, majd ezeket mikroszkópon keresztül figyelte meg. Egy olajcseppet kiválasztva addig változtatta az elektromos mezőt, míg a porlasztás során töltést kapott olajcsepp lebegni kezdett.



Az egyensúlyt a gravitációs erő és az elektrosztatikus erő egyenlősége okozta. Az olajcsepp mérete optikai úton meghatározható, így a következő egyenlőség írható fel:

$$m \cdot g = V \cdot \rho \cdot g = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d}$$

ahol  $m$  az olajcsepp tömege,  $V$  a térfogata,  $\rho$  a sűrűsége,  $Q$  a töltése,  $E$  a kondenzátor lemezei közötti térerősség,  $U$  a feszültség,  $d$  a távolság. Az  $U$  feszültség és a lemezek  $d$  távolsága mérhető, így megkaphatjuk az olajcsepp töltését.

Millikan azt tapasztalta, hogy minden esetben az eleminek nevezhető töltés egész számú többszörösét kapta, vagyis az elemi töltés a legkisebb töltésegység:

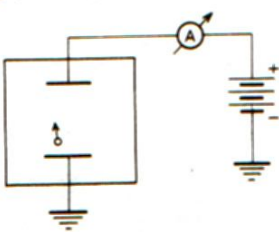
$$Q = n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

### c) Hidegemisszió

Vigyünk fémtárgyra töltést, amely — amint az elektrosztatikából tudjuk — az azonos töltések taszítása következtében a fém felületén helyezkedik el. Nagyon nagy töltés esetében akkora lehet a taszítás, hogy a töltés egy részét kinyomja a felületből, különösen a csúcsok közelében. A környező gázmolekulák zavaró hatását kiküszöbölhetjük, ha a fémtárgyat légritkított térbe helyezzük. A jelenség neve **hidegemisszió** és arra utal, hogy a töltés valamilyen töltéshordozóhoz tartozik.



### d) Richardson-hatás



Richardson (1879-1959) angol fizikus figyelte meg azt a jelenséget, hogy a fémekből minden külső hatás nélkül is kilépnek a negatív töltések. Légritkított edénybe egymással szemben két elektródát helyezünk el, az egyiket leföldeljük, a másikra gyenge pozitív feszültséget adunk. Azt

tapasztaljuk, hogy az elektródák között áram indul meg.

A jelenség magyarázata a következő: a töltés valamely töltéshordozóhoz kapcsolódik, amely a hőmozgás következtében kiléphet a felületből. A földelt elektródából spontán kilépő negatív töltéshordozó nem esik vissza az elektródára, hanem engedve a gyenge vonzó hatásnak, a másik elektródára kerül.

### e) Izzóelektromos hatás (másképpen Edison hatás)

Magas hőmérsékleten erősen megnő a Richardson-hatás, az izzó fémből már tömegesen távozik a negatív töltés. Ez az **izzóelektromos jelenség** vagy **termikus emisszió**.



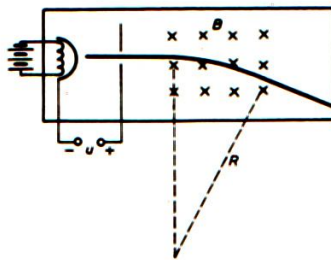
## f) Katódsugárzás

Helyezzünk erősen légritkított térbe két elektródát, s kapcsoljunk rájuk áramforrást! Nagyon kis gáznyomás esetén a katód egy láthatatlan sugárzást bocsát ki, amely abból vehető észre, hogy a katóddal szemben, ahol a sugárzás az üvegburát éri, fényjelenség jön létre, amennyiben az üveg belső felületét fluoreszcens anyaggal vonták be. Ez a sugárzás a katódsugárzás.



A katódsugárzást J. J. Thomson (1856-1940) vizsgálta először. 1897-ben végzett kísérleteiben elektromos és mágneses terek segítségével a katódsugárzásban megjelenő részecske eltérülését vizsgálta, s ennek segítségével meghatározta annak fajlagos töltését. Az elemi töltés ismeretében kiszámítható volt a részecske tömege is, ezért ezt az időpontot tekintjük az elektron felfedezésének.

Thomson által elvégzett mérés egyszerűsített változata a következő:



A katódsugárcsőben izzókatódot alkalmazunk, a katód és az anód közé ismert gyorsítófeszültséget kapcsolunk. Az anód nyílásán keskeny nyalábban áthaladó, közel azonos sebességű elektronok ismert erősségű homogén mágneses térben ugyanazon a körpályán mozognak, amelynek sugara meghatározható.

A levezetés a következő:

A körmozgásra vonatkozóan a centripetális erőt a mágneses Lorentz-erő szolgáltatja:

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = q \cdot v \cdot B \quad \text{innen} \quad v = \frac{q}{m} \cdot R \cdot B$$

ahol  $m$  az elektron tömege,  $v$  a sebessége,  $q$  a töltése,  $R$  a körpálya sugara,  $B$  a mágneses indukció.

A gyorsítási munka megadja az elektron mozgási energiáját (feltéve, hogy a gyorsítási feszültség néhány százezer V alatt marad, s így az elektron sebessége nem közelíti meg a fénysebességet):

$$q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Helyettesítsük ebbe a sebesség kifejezését:

$$q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \frac{q^2}{m^2} \cdot R^2 \cdot B^2$$

Így a fajlagos töltésre adódik:

$$\frac{q}{m} = \frac{2 \cdot U}{R^2 \cdot B^2}$$

Az elemi töltés ismeretében az elektron tömege:

$$m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

**Ezzel tehát az elektron polgárjogot nyert, mint az "oszthatatlannak" hitt atom egyik alkotórésze.**

## Kvantumfizika születése

A **kvantumfizika** a fizikának az a része, amely az elektron atomon belüli viselkedését írja le.

Sok kísérlet, kísérleten alapuló elmélet vezetett el odáig, hogy a tudósok létrehozzanak egy olyan modellt, amely segítségével az elektronok atombeli állapota jellemezhető. Ezek közül a legfontosabbak:

- a hőmérsékleti sugárzás intenzitás-hullámhossz grafikonjának matematikai leírása,
- a fényelektromos hatás magyarázata,
- színeképelemzés,
- atompálya energiaszintjének meghatározása, amelyet Franck és Hertz végzett el,
- az elektron hullámtermészetének felismerése.

Nézzük ezeket részletesebben!

### a) Hőmérsékleti sugárzás

Tapasztalati tény, hogy a **testek minden hőmérsékleten hőt sugároznak ki elektromágneses hullámok formájában. Ez a hőmérsékleti sugárzás.**

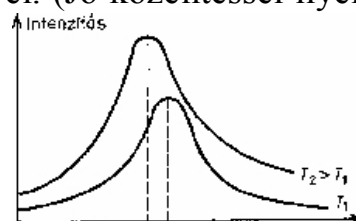
Az elektromágneses sugárzás intenzitása természetesen nő a hőmérséklet növekedésével, emellett a sugárzás hullámhossz-eloszlása is változik a hőmérséklettel.

A XIX. század végére a hősugarakkal kapcsolatban már nagyon sok megállapítás gyűlt össze. Ezek közül néhány:

- **Stefan**, **Boltzmann** megállapították, hogy egységnyi felületről egységnyi idő alatt kisugárzott energia arányos a test abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \sim T^4$$

- Megfogalmazták, hogy **abszolút fekete** test az az idealizált test, amely minden érkező sugárzást teljes egészében elnyel. (Jó közelítéssel ilyen lehet egy kicsiny nyílású üreg).
- A **Wien-féle eltolódási törvény** szerint minden hőmérséklethez tartozik egy hullámhossz, ahol a sugárzás intenzitása



λ

maximális. Ez a hullámhossz fordítva arányos a hőmérséklettel. A kísérleti tapasztalatok alapján megállapította, hogy az abszolút hőmérséklet és a hullámhosszmaximum szorzata állandó.

$$T \cdot \lambda_{\max} = 0,0029(\text{Km}) = \text{állandó}$$

Az intenzitás-hullámhossz grafikont több fizikus is megpróbálta matematikailag leírni, de ez a klasszikus fizika keretein belül nem sikerült.

Max Planck (1858-1947) vizsgálatait szintén az a cél vezérelte, hogy magyarázatot találjon az előbbi törvényekre. 1900-ban kutatásai során arra a meglepő eredményre jutott, hogy akkor kap kielégítő magyarázatot a tapasztalati eredményekre, ha feltételezi a következőket:

Egy test részecskéi (atomok, molekulák vagy ionok) nem folytonosan, hanem elkülönült adagokban (kvantumokban) sugároznak ki és nyelnek el energiát. Ez a véges energiaadag arányos a sugárzás frekvenciájával:

$$E = h \cdot f$$

Az arányossági tényező  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ , amelyet ma Planck-állandó néven emlegetünk.

Így jelenik meg először az **energiaadag**, **energiakvantum** fogalma. Ez a korabeli fizikusok számára megdöbbentő ellentmondásban volt a klasszikus szemlélettel, ami a folytonos energiaközlés lehetőségét természetesnek tartja.

Planck elmélete nemcsak a hőmérsékleti sugárzás hullámhossz szerinti eloszlását írta le sikeresen, hanem tartalmazta a Wien-féle eltolódási törvényt és a Stefan-Boltzmann-törvényt is. Ilyen sikeres elméletről azt gondolhatnánk, hogy azonnal ismertté és elfogadottá vált a fizikusok körében. Nem így történt. Hosszú évekig tartott, amíg felismerték Planck munkásságának jelentőségét, amit az is mutat, hogy csak 1918-ban kapott Nobel-díjat az energiakvantum felfedezéséért.

Önéletrajzában fanyar humorral így ír erről: „Valamely új tudományos igazság nem úgy szokott győzelemre jutni, hogy az ellenfelek meggyőzetnek, és kijelentik, hogy megtértek, hanem inkább úgy, hogy az ellenfelek lassanként kihalnak, és a felnövekvő nemzedék már eleve hozzászokik az igazsághoz...”

## b) Fényelektromos hatás

Ismert az a jelenség, hogy fény hatására a fémek felületéről elektronok léphetnek ki. Ez a **fotoeffektus**, azaz a **fényelektromos jelenség**.

A mérések azt bizonyítják, hogy csak a fény frekvenciájától függ, hogy egy fém felületéről kilép-e az elektron, de a fény intenzitásától nem.

A vörös fény általában nem, az ibolya ritkán, az ultraibolya sok fém esetén elegendő a jelenség bekövetkezéséhez.

A fény intenzitása csak a kilépő elektronok számát határozza meg, a kilépés bekövetkezését és a kilépő elektron energiáját nem.

A klasszikus szemlélet alapján ezt a tényt nem lehetett megmagyarázni. A problémát Einstein oldotta meg. Érdekesség, hogy Einstein a fotoeffektusra adott magyarázataért, és nem a relativitáselmélet megalkotásáért kapta a Nobel-díjat.

Abból indult ki, hogy a fény nemcsak hullámtermészettel, hanem részecske-természettel is rendelkezik. A fény részecskéit fotonoknak nevezte.

- A fény nem folytonosan, hanem adagokban, kvantumokban szállítja az energiát. A fénykvantum a foton. Amikor a foton ütközik az atom elektronjával, akkor átadja annak energiáját.
- Egy energiakvantum által szállított energia nagysága arányos a fény frekvenciájával.

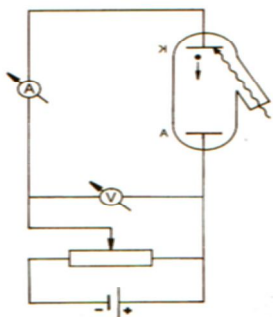
$$E = h \cdot f$$

- Az anyagban kötött elektron egyszerre mindig csak egy fotonnal találkozhat, amelynek energiája nagyobb kell, hogy legyen az elektron kötési energiájánál ahhoz, hogy az elektron kiszabaduljon.

A foton energiájának egy része tehát a kilépési munkát szolgáltatja, másik része pedig az eltávozó elektron mozgási energiáját adja. A következő összefüggés írható fel:

$$h \cdot f = W_{ki} + \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$$

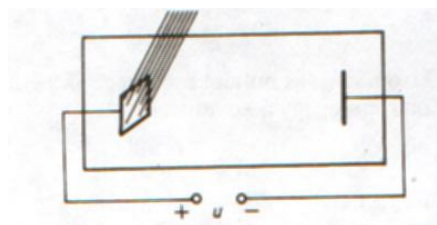
A fényelektromos jelenség gyakorlati alkalmazását látjuk a **fotocellák** működésekor.



- Egy üvegből készült kisülési csövet úgy alakítanak ki, hogy a katód felülete könnyen megvilágítható legyen.
- A katód felületét olyan fémrel vonják be, amelyben az atomok legkülső elektronjainak energiaszintje közel helyezkedik el a nulla szinthez. Erre legalkalmasabbak az alkálifémek, amelyek a periodikus rendszer I. A oszlopában helyezkednek el.
- Ha a katódot nem világítjuk meg, akkor az áramkör nyitott. A kisülési csőben a két elektróda között szakadás van.
- Ha a katódot megvilágítjuk, akkor abból elektronok lépnek ki, zárul az áramkör. Ilyenkor az áramerősség-mérő áramot jelez.

### Az elektron kilépési munkájának kísérleti meghatározása

- Egy fotocellát ellentétes polaritással kapcsolunk be az áramkörbe.
- Változtassuk úgy a feszültség nagyságát, hogy a kezdeti elektronáramlás az ellentér hatására éppen megszűnjön.
- Az így mérhető feszültséget megszorozva az elektron töltésével, megkapjuk azt a munkát, amit a tér végzett, miközben a fémlapból valamilyen sebességgel kilépő elektront lelassította. Ez tehát éppen egyenlő az elektron kezdeti mozgási energiájával.



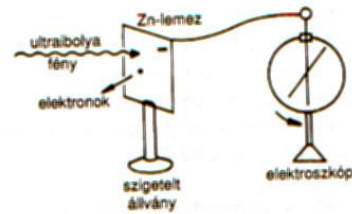
$$\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = Q_e \cdot U$$

### Kísérlet a fényelektromos hatás kimutatására

Fotocella nélkül is kimutatható a fényelektromos hatás.

Helyezzünk el szigetelő tartóállványon egy cinklemezt, melyet előzőleg dörzspapírral csiszoljunk meg. A lemezt kössük össze egy elektroszkóppal, majd töltsük fel negatív töltéssel.

Ha a teremben nem különösebben párás a levegő, akkor az elektroszkóp azt jelzi, hogy alig csökken a töltés a lemezen. Ha viszont a lemezt ultraibolya fénnel világítjuk meg (ehhez használhatunk kvarclámpát is), akkor rohamos töltéscsökkenést észlelünk.



A cink ugyanis alkáliföldfém, látható fényben nem lépnek ki belőle elektronok, ultraibolya fényben megindul a fotoeffektus, az elektronok kilépése, melyeket a cinklemez maradék negatív töltése messze taszít a lemeztől.

### c) Vonalas színek és energiaszintek

A XIX. század elején látták először a vonalas színeképet. A színeképek kísérleti tanulmányozása az egész századon át folytatódott, egyre inkább tökéletesedett. Ezt a tevékenységet **spektroszkópiának** nevezzük.

A század spektroszkópiával foglalkozó szakemberei nem is sejtették, hogy tevékenységükkel az **atomfizika legfontosabb technikáját teremtik meg**, mivel az általuk megmért színeképvonalak hullámhosszaiból az **atomi elektronok energiáit lehetett meghatározni**.

A spektroszkópiát fokozatosan kiterjesztették a látható tartományon kívül az infravörös és az ultraibolya tartományra is. Minden tartományban azt észlelték, hogy:

- az izzó gázok színeképe vonalas,



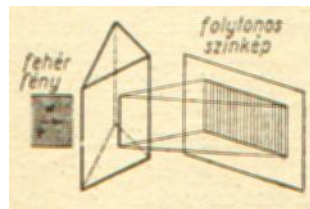
a Na vonalas színeképe

- az izzó szilárd testek és folyadékok színeképe folytonos.



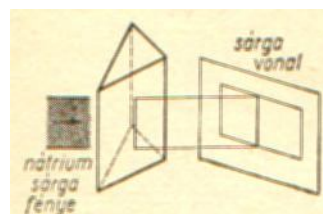
## A kibocsátási vagy emissziós színekép

A magas hőmérsékleten izzó szilárd és folyékony testekből kibocsátott fényben a fehér fény összes színárnyalata megtalálható. **Színeképük folytonos**. A folytonos színekép független a fényt kibocsátó test anyagi minőségétől.

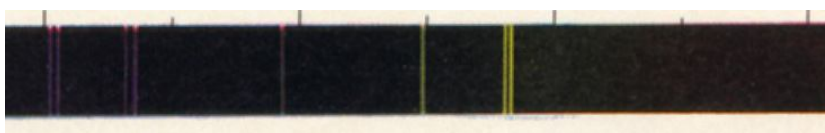


A folyadékok és szilárd anyagok atomjainak külső elektronjai egymáshoz közel vannak, a kvantumfizika törvényei szerint nem tudnak egymástól függetlenül viselkedni, esetükben nem jön létre vonalas színekép.

Az izzó gázok által kibocsátott fény is felbontható, de színeképük nem folytonos, hanem jellegzetes, színes, meghatározott hullámhosszúságú vonalakkal áll. Az izzó gázok és gázok fénye **vonalas színeképet** hoz létre. A vonalas színekép a gáz, gáz anyagi minőségére jellemző.



Az izzó gázok atomjai nagy távolságra vannak egymástól, az atomi elektronok egymástól függetlenül, egyformán viselkednek, egymással megegyező energiaszintjeik vannak. Ez eredményezi színeképükben az éles vonalakat.

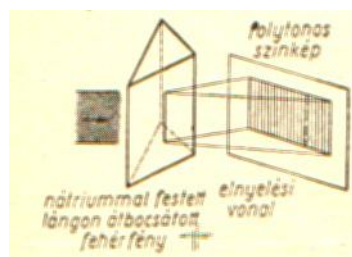


A nátrium vonalas színeképe



## Az elnyelési vagy abszorpciós színekép

Amikor az izzó gőzön (vagy gázon) fehér fényt bocsátunk keresztül, az izzó gőzök elnyelik a fehér fényből azokat a színeket, amelyeket egyébként maguk is kibocsátani képesek. Ilyenkor az emissziós színekép színes vonalainak helyén az ernyőn fekete (elnyelési) vonalakat látunk.



Az elnyelési színekép ugyanúgy jellemző az anyagi minőségre, mint az emissziós színekép.

Elnyelési színekép esetén a gázban lévő atomok elektronjai a fehér fényben lévő fotonok elnyelésével kerülnek magasabb energiájú, gerjesztett állapotba, majd nagyon rövid idővel ezután vissza is jutnak alacsonyabb energiákra. Tehát az elnyelt fotonokat ki is sugározzák. A kisugárzás azonban véletlenszerű, a tér minden irányában történhet, tehát csekély a valószínűsége, hogy a keletkező fotonok az eredeti megvilágítás irányában haladnak tovább. Ezért jöhetnek létre hiányzó, sötét vonalak az elnyelési képben.

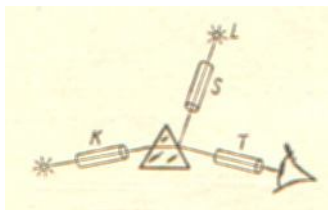


A legerősebb elnyelési vonalak a Nap színeképében

## A spektroszkóp

A színeképvonalak jellemzőek a fényt kibocsátó vagy elnyelő gázhalmazállapotú test anyagi minőségére. Ezért a vonalas színeképek vizsgálata, a színeképelemzés, az anyagvizsgálatok egyik fontos és érzékeny módszere.

A színeképelemzéshez hullámhossz-skálával ellátott spektroszkópot használnak. A spektroszkóp egyik legegyszerűbb fajtájának elrendezését az ábra mutatja.



A spektroszkóp egyik csőve (S) az L lámpával megvilágított skálát vetíti a prizmára, amely onnan visszaverődve a vizsgáló távcsőbe (T) jut. A másik cső (K) elé, rendszerint üvegcsőben (és elektromos árammal gerjesztve), a vizsgált izzó gőzt helyezik. Ennek fényét a prizma színeire bontva, ugyancsak a vizsgáló távcsőbe juttatja. A színképvonalak számából és a skálán leolvasott helyéből (hullámhosszából) a gőz anyagi minősége, összetétele meghatározható.

#### d) Franck-Hertz-kísérlet

1914-ben James Franck (1882-1964) és Gustav Hertz (1887-1975) döntő és közvetlen kísérleti bizonyítékot talált az atomi energiaszintek létezésére.

Miközben elektronok mozgását tanulmányozták higanygőzben külső elektromos mező hatására, észrevették, hogy amennyiben az elektronok mozgási energiája 4,9 eV-nál nagyobb, a higanygőz 254 nm hullámhosszúságú ultraibolya fényt sugároz ki.

Feltételezték, hogy a higanyatomnak van egy olyan energiaszintje, amely 4,9 eV-tal magasabban van az alapállapotnál (a legalacsonyabb energiájú állapotnál). Az atom úgy kerül erre az energiaszintre, hogy egy elektronnal ütközik, az elektron mozgási energiája lecsökken az atom belső energiája megnő.

Nagyon kis idővel a gerjesztés után a higanyatom elektronja újra alapállapotba kerül, miközben egy fotont (egy energiaadagot) sugároz ki. A 254 nm hullámhosszúságú foton energiáját a Planck-formula alapján számíthatjuk ki, melyben a frekvenciát a  $\lambda$  hullámhosszból a  $c$  fénysebesség segítségével fejezhetjük ki :

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}) \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{254 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 7,83 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,9 \text{ eV},$$

amely pontosan megegyezik a felgyorsított elektron kísérletileg meghatározott mozgási energiájával.

A Franck-Hertz-kísérlet tehát közvetlen bizonyítékát adja a higanyatom 4,9-eV-os energiaszintjének létezésének.

Munkájáért Franck és Hertz 1925-ben Nobel-díjat kapott.

## e) Röntgensugarak

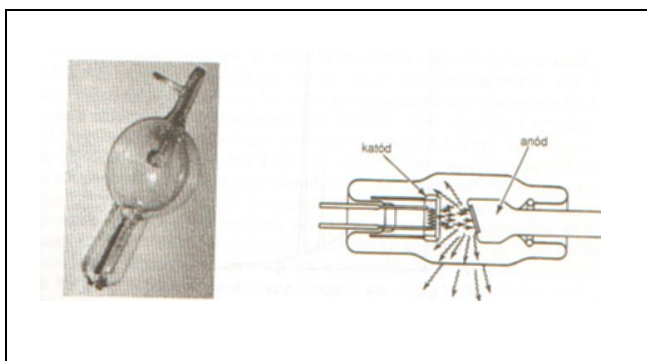
Az első fizikai Nobel-díjat 1900-ban Wilhelm Röntgen (1845-1921) kapta a róla elnevezett sugárzás felfedezéséért. A felfedezés 1895-ben, véletlenül történt, amikor Röntgen nagyfeszültségű kisülési csövekkel kísérletezett. Nem tudta megfejtetni, milyen sugárzást fedezett fel (X-sugárzásnak, vagyis ismeretlennek nevezte el, ami az angol nyelvben a mai napig megmaradt – X rays), de számos tulajdonságát, legfőképpen rendkívüli áthatoló képességét a felfedezés után néhány héten belül megállapította.

A felfedezést követő hatodik héten már megtörténtek az első orvosdiagnosztikai alkalmazások is, a fizikai felfedezések közül ennél gyorsabb gyakorlati alkalmazásra valószínűleg soha nem került még sor. Azóta nemcsak az orvostudományokban, hanem rendkívül sok más területen is széles körben alkalmazzák a röntgensugarakat. Sajnálatos, hogy az alkalmazások első néhány évtizedében még nem ismerték fel a röntgensugaraknak az emberi szervezetre gyakorolt káros hatását, hosszú ideje azonban már minimálisra csökkentették az egészségkárosítás kockázatát.

*A röntgensugarak keletkezését és tulajdonságait csak a Planck-Einstein-féle fotonképpel és a Bohr által bevezetett atomi energiaszintekkel lehetett megmagyarázni, ezzel újabb példát mutathatunk be az elektromágneses sugárzás kvantumos természetére. A röntgensugarak keletkezését a fényelektromos hatás megfordításának is tekinthetjük.*

- **A fényelektromos jelenség úgy jön létre**, hogy egy fém felületét fénnel megvilágítjuk, ennek hatására elektronok szabadulnak ki a fém felületéből.
- **A röntgensugarakat viszont úgy keltik**, hogy fémfelületeket elektronokkal bombáznak, ennek következtében a fémből elektromágneses sugarak, röntgensugarak lépnek ki.

A röntgensugarakról teljes biztonsággal csak az 1910-es években mutatták ki, hogy nagyfrekvenciájú elektromágneses hullámok, vagyis nagyenergiájú fotonok.

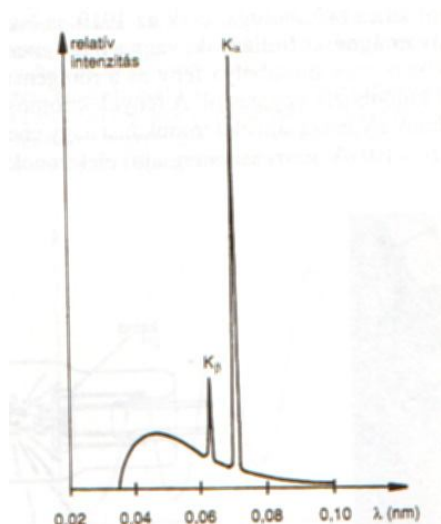


Az ábrán egy régi típusú és egy mai röntgensövet láthatunk, mindkettő belsejében vákuum van. A mai eszközökben az elektronok izzókatódból lépnek ki, majd az általában néhány száz tízezer voltos pozitív feszültségre kötött anódra csapódnak.

Megjegyzés: A korszerű

röntgensövekben az elektronok becsapódása olyan heves, hogy az üreges szerkezetű anódot erős vízszugárral hűteni kell, máskülönben nagyon rövid idő alatt szétolvadna.

Az anódba csapódó elektronok különböző hullámhosszú röntgensugarakat keltenek.



Az ábrán egy tipikus hullámhossz szerinti intenzitás-eloszlást láthatunk. Az intenzitásgörbén megfigyelhetünk:

- A **folytonos röntgensugárzást** fékezési sugárzásnak is hívjuk, mert ez az anódba csapódó elektronok lefékeződése miatt keletkezik. A lefékeződő elektronok nagy negatív gyorsulással állnak meg, és a gyorsuló töltések elektromágneses hullámokat sugároznak ki: ezek a folytonos tartomány röntgenfotonjai.
- Az **intenzitás-csúcsok** akkor keletkeznek, amikor az anód anyagába becsapódó elektronok olyan nagy mozgási energiával rendelkeznek, hogy képesek a legerősebben kötött, az atommaghoz legközelebbi, legbelső pályákon lévő elektronokat is kilökní. Ezek az úgynevezett 1s pályán lévő elektronok, melyeket régebbi szóhasználat szerint a K héjon lévő elektronoknak hívunk.  
Ha az anódba csapódó elektron kilök egy K elektront, tehát a K héjon egy betöltetlen, mélyen fekvő energiaszint marad, akkor kevesebb, mint egy nanoszekundumon belül egy magasabb energiaszinten lévő elektron ugrik erre a szintre (az energiaminimumra törekvés elve szerint). Legvalószínűbb, hogy eggyel vagy kettővel magasabban lévő héjról, tehát az L vagy az M héjról ugrik elektron a K héj betöltetlen állapotába. Ezzel az elektron alacsonyabb energiájú állapotba kerül, ami a két energiaszint közötti energiakülönbségnek megfelelő foton kisugárzásával jár. A mélyen kötött állapotokban ez az energiakülönbség olyan nagy, hogy nagy energiájú röntgen-foton keletkezik a folyamatban.

## f) Az elektron hullámtermészete

Az atomok szerkezetének megismerése szempontjából egy fontos lépcső volt **Louis de Broglie** 1924-ben tett feltevése. Abból a szimmetriából indult ki, hogy a korábban hullámnak hitt fénynek is van részecsketermészete, akkor a részecskéknak is kell, hogy legyen hullámtermészete. Tehát *az elektronok vagy a protonok bizonyos helyzetekben hullámként is viselkedhetnek.*

Ha az elektron lehet hullám is, akkor kell, hogy legyen frekvenciája és hullámhossza.

De Broglie úgy gondolta, hogy a szabadon mozgó elektronok hullámhosszát és frekvenciáját a fotonéhoz hasonló összefüggések határozzák meg.

**A foton energiájának, tömegének és impulzusának meghatározása:**

Atomfizikában az impulzus szokásos jele:  $p$

A foton energiája:

$$E = h \cdot f = m \cdot c^2$$

A foton mozgási tömege:

$$m = \frac{h \cdot f}{c^2}$$

A foton lendülete:

$$p = m \cdot c = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

De Broglie érvelése szerint ugyanezeknek az összefüggéseknek érvényesnek kell lenni az elektronokra is.

Tehát, ha egy  $m$  tömegű elektron  $v$  sebességgel mozog és  $p$  a lendülete, akkor:

Az elektron lendülete:

$$p = m_e \cdot v_e$$

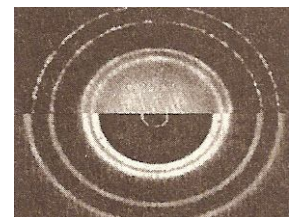
Az elektron hullámhossza (de Broglie hossz):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \cdot v_e}$$

Az elektron frekvenciája:

$$f = \frac{E}{h}$$

De Broglie elméleti feltevését három év múlva két amerikai kutató **Devisson** és **Germer** igazolták kísérlettel. Alumínium kristályon röntgensugár és elektronnyaláb elhajlási képét vizsgálták. A két elhajlási kép hasonló volt abban az esetben, amikor az elektronhullám hullámhossza közel azonos volt a röntgensugár hullámhosszával.



## **g) Elektronmikroszkóp**

Egy mikroszkóp **felbontóképessége**, azaz nagyításának határa attól függ, hogy mekkora a leképezésre használt hullám hullámhossza.

Látható fénnel működő mikroszkóp felbontóképessége néhány száz nanométer (kb.  $10^{-5}$  m). Ez néhány ezer atom együttes átmérőjének felel meg.

Röntgensugárzással sokkal nagyobb felbontóképességet lehetne elérni. De itt az a probléma merül fel, hogy nem található olyan anyag, amelyből olyan lencsét lehetne készíteni, hogy a röntgensugárzást fókuszálni lehessen.

Amikor bizonyítottá vált, hogy az elektron rendelkezik hullámtulajdonsággal és hullámhossza összemérhető a röntgensugárzás hullámhosszával, kézenfekvő volt, hogy elektronnyalábbal működő mikroszkópot készítsenek.

Az első elektronmikroszkóp 1931-ben készült el. Az elektronok egy izzó katódból lépnek ki és 10 kV - 100 kV gyorsító feszültséggel gyorsítják azokat. Az elektronnyalábot mágneses és elektromos lencsék segítségével fókuszálják.



# Atommodellek

## a) Thomson-modell (puding-modell)

A XX. század elejére világossá vált, hogy az atomban található elektronok ugyanazok, mint a katódsugárzás részecskéi.

Magyarázatra várt azonban, hogy

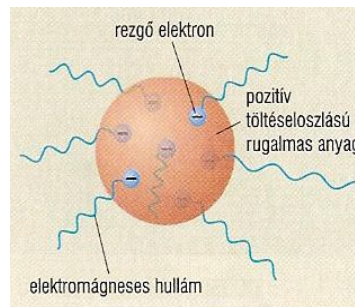
- mi tartja össze az atomot,
- milyen szerkezetű és
- hogyan magyarázható a kívülről tapasztalt semlegesség.

J. J. Thomson talált először érveket amellet, hogy az atomban található elektronok száma nem túl nagy és az atom tömegének nagy részét a pozitív töltésű rész adja.

Elképzelése szerint az atom egész térfogatát kitölti a folytonosan elosztott pozitív rész, s ebben vannak beágyazva az igen kis méretű elektronok. Ezek vagy nyugalomban vannak az atom középpontjában, vagy meghatározott sugarú pályákon körben keringenek.

A modell — bár nem sokáig volt elfogadható — igen pozitív szerepet játszott a kutatásokban, mivel

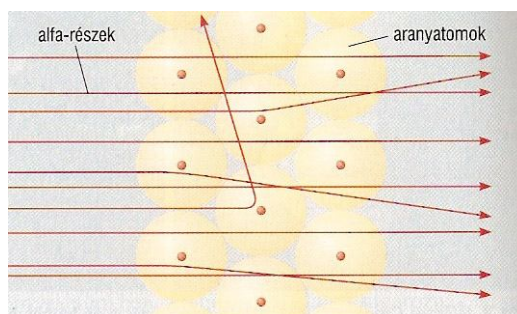
- teljes egészében figyelembe vette a klasszikus elektrodinamika törvényeit (pl. hogy a gyorsuló töltés sugároz),
- és itt vetődött fel először az elektronburok héjszerkezete.



A modell azért nem maradt sokáig érvényben, mert hamar kiderült, hogy az atomban viszonylag sok hely van, és így nem lehet folytonos kitöltésű.

## b) Rutherford-modell (Naprendszer-modell)

Rutherford (1871-1937) munkatársaival kísérleteket végzett az atom szerkezetének vizsgálatára. Nagy energiájú héliumatommagok vékony fémfólián való



áthaladásának vizsgálata során a tapasztalat szerint a pozitív töltésű héliumatommagok nagy számban áthaladtak a vékony anyagraétegen.

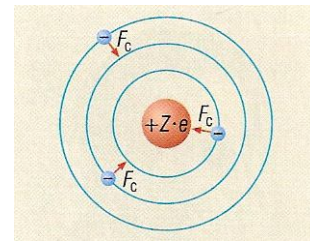
Ez azt mutatja, hogy

- az atom igen "szellős" szerkezetű, tömegének nagy része igen kis helyre koncentrálódik,
- néhány részecske jelentősen, nagy szögben elkanyarodott, szóródott, ami csak nagy pozitív töltésű centrumokkal való ütközéssel magyarázható.

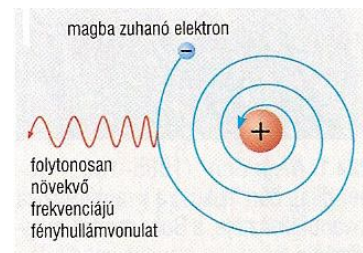
**Ez volt a híres szórási kísérlet.**

A konkrét kísérleti eredmények értelmezésével született meg 1911-ben az újabb atommodell. Eszerint

- az atom középpontja az atom méreténél három nagyságrenddel kisebb pozitív mag,
- a mag körül, mint bolygók a Nap körül, keringenek az elektronok,
- az elektronokat az elektrosztatikus vonzóerő tartja körpályán.



A körpályán keringő elektron azonban, mivel gyorsul, ezért sugároz, és így fokozatosan elveszti energiáját; az atom tehát nem lehetne stabil. A modell ezen hibája hamar nyilvánvalóvá vált.



### c) Bohr-modell

Niels Bohr (1885-1962), Rutherford tanítványa a hidrogénatomra vonatkozóan új modellt alkotott. Hogy mestere, Rutherford modelljének hiányosságait megoldja, önkényes feltevéseket vezetett be. Ezek a Bohr-féle *kvantumfeltételek*.

- Az atom elektronjai csak meghatározott pályákon keringhetnek a mag körül.
- Az ilyen pályán keringő elektron – a klasszikus fizika törvényeivel ellentétben – nem sugároz.
- Az atom csak akkor sugároz, ha az elektron az egyik pályáról a másikra ugrik. Ilyenkor a két pálya közötti energiakülönbséget az elektron egyetlen foton formájában kisugározza, amelynek így az energiája:

$$h \cdot f = E_2 - E_1$$



A modellből levezethető:

- A hidrogénatomban lévő elektron körpályáinak sugara:  $r_n = r_1 \cdot n^2$
- Az n-dik pályán keringő elektron teljes energiája:  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$

A modell előnye:

- Hidrogénatom és egy elektront tartalmazó ionok esetén a számított és a mért színeképvonalak megegyeztek. Ez bizonyítja az atomok energiafelvételének kvantumosságát.
- magyarázatot adott a diszkrét energiaszint létezésére.

A modell hátránya:

- Több elektronos atomok esetén nem adott jó értéket.
- A modell alapján a kémiai kötések nem lehetett értelmezni.

A modellt később **Sommerfeld** (1868-1951) fejlesztette tovább, kiegészítve a körpályákat ellipszispályákkal.

**A Bohr-modellt a kvantumszámok bevezetésével fejlesztették tovább.**

#### **d) Kvantumszámok**

A kötött elektron 4 kvantumszámmal jellemezhető:

- **Főkvantumszám**

Az atommag és az elektronfelhő átlagos távolságára ad felvilágosítást.

Jele: n

Értéke: 1, 2, 3...(pozitív egész számok)

- **Mellék-kvantumszám**

Az elektronfelhő alakjára ad felvilágosítást.

Jele: l

Értékei: 0, 1, 2...(n-1)

l	állapot
0	s
1	p
2	d
3	f

- Mágneses-kvantumszám**

Az azonos alakú, tehát azonos mellék-kvantumszámú pályák irányára ad felvilágosítást.

Jele:  $m$

Értékei:  $-l, (-l+1) \dots 0 \dots +l$

Pl.:

$n$	$l$	$m$	Atompályák száma
3	0	0	9
	1	-1, 0, +1	
	2	-2, -1, 0, 1, 2	

- Spinkvantumszám**

Az elektronfelhő impulzusmomentumára, és ebből adódóan mágneses tulajdonságára ad felvilágosítást.

Jele:  $m_s$

Értéke:  $+1/2$  vagy  $-1/2$

### e) **Atompályák energiasorrendje**

Az atompályák energiája attól függ, hogy az adott atompályá

- milyen távol helyezkedik el az atommagtól,
- milyen az alakja.

Ez alapján az atompályák energia szerinti sorrendje az atommagtól távolodva:

$$E_{1s} < E_{2s} < E_{2p} < E_{3s} < E_{3p} < E_{4s} < E_{3d} < E_{4p} < E_{5s} < E_{4d} < E_{5p} < E_{6s} <$$

$$E_{4f} < E_{5d} < E_{6p} < E_{7s}$$

### f) **Kvantummechanikai atommodell**

*1925-27 között **Schrödinger** (osztrák) és **Heisenberg** (német) fizikusok a mikrorészecskék mozgását leíró mechanikát dolgoztak ki.*

- Schrödinger a mikrorészecskék viselkedésének fizikai leírásánál azok **hullámtulajdonságát** használta ki.

- Heisenberg a mikrorészecskék viselkedésének fizikai leírásánál a kvantumosságot helyezte előtérbe.

A későbbiek során kiderült, hogy a két elmélet megfelel egymásnak, beigazolva az anyag kettős természetét.

Heisenberg leírásában szerepel a mikrorészecskékre vonatkozó **határozatlansági reláció**. E szerint:

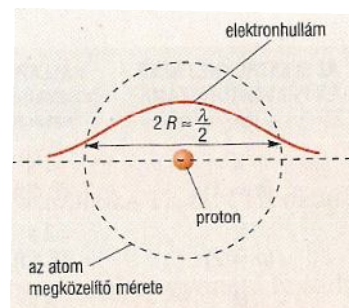
Egy részecske helyét és impulzusát egyidejűleg nem lehet tetszőleges pontossággal megadni. Elméletileg levezethető, hogy a két mennyiség bizonytalanságának szorzata legjobb esetben is a Planck-állandó nagyságrendjébe esik.

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx h$$

Ezt az összefüggést nevezzük a **Heisenberg-féle határozatlansági relációnak**.

A kvantummechanikai atommodell szerint

- Az elektron nem pontszerű részecske, amely az atommag körül kering.
- A modell az elektront állóhullámokkal jellemzi, amelyet az atommag elektromos tere tart fogva.
- Az atomba zárt elektron csak meghatározott alakú és térbeli kiterjedésű állóhullámot alkothat.
- Minden hullámalakhoz meghatározott energiaérték tartozik.
- Az atomok által kibocsátott vagy elnyelt fotonok energiája az állóhullámokhoz tartozó energiaértékek különbségével egyenlő.



$$h \cdot f = E_2 - E_1$$

A modellt a Pauli-elv és a Hund-szabály tette teljessé.

**Pauli-elv:** Egy atomban nem lehet két olyan elektron, amelynek mind a négy kvantumszáma megegyezik.

**Hund-szabály:** Az azonos energiájú atompályákra az elektronok először azonos spinkvantumszámmal épülnek be, majd ha már így feltöltődtek, akkor épülnek be az ellentétes spinkvantumszámú elektronok.

## Történeti áttekintés

ATOMFOGALOM KIALAKULÁSA		
Kb.Kr. e. 400	Démokritosz	Spekulatív úton eljutott az atom fogalmához.
XVII. sz.	Boyle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Célként jelölte meg az anyag belső szerkezetének megismerését.</li> <li>Gázokra vonatkozó törvényekkel foglalkozott.</li> </ul>
XVIII. sz.	Lavoisier	Definiálta az elem fogalmát.
XIX. sz.	Proust	Állandó súlyviszonyok törvénye
	Dalton	<ul style="list-style-type: none"> <li>Többszörös súlyviszonyok törvénye</li> <li>Atomsúly-táblázat készítése</li> </ul>
	Gay-Lussac	Gáztörvény
	Avogadro	Gáztörvény
ELEKTRONFOGALOM KIALAKULÁSA		
XIX. sz.	Faraday	Elektrolízisre vonatkozó törvények
XX. sz.	Milliken (1909)	Elemi töltés meghatározása.
	Richardson	Fémekből elektronok lépnek ki.
	Edison hatás	Izzó fémekből az elektronkilépés intenzívebb.
	Thomson	<ul style="list-style-type: none"> <li>Katódsugárzás vizsgálata</li> <li>Az elektron fajlagos töltésének meghatározása</li> <li>Atommodell</li> </ul>
	Planck (1900)	Kvantáltság fogalma
	Einstein (1905)	Fotoeffektus
	Röntgen (1901)	Röntgensugarak
	Franck-Hertz (1914)	Atomi energiaszintek létezésének bizonyítása
	De Broglie (1924)	Elektron kettős természete
	Devisson és Germer (1927)	Az elektron hullámtermészetének kísérleti bizonyítása
ATOMMODELLEK		
	Rutherford (1911)	Naprendszer-modell
	Bohr (1913)	Bohr-modell
	Schrödinger és Heisenberg (1925-27)	Kvantummechanikai atommodell

## Néhány fizikusról részletesebben

### **RUTHERFORD, SIR ERNEST (1871-1937)**

**Angol fizikus**



Az egyetemes fizikatörténet egyik legnagyobb kísérleti fizikusa. Munkássága meghatározó az atomszerkezet megismerésében.

A radioaktivitás jelenségét kutatva 1897-ben felfedezte az alfa- és a béta-sugárzást, majd 1908-ban kimutatta, hogy az alfa-részecskék valójában héliumatommagok.

1911-ben alkotta meg az atommagból és a körülötte keringő elektronokból álló atommodelljét. Létrehozta az első mesterséges magátalakulást.

1908-ban Nobel-díjat kapott a kémia területén elért munkásságáért.

### **BOHR, NIELS HENRIK DAVID (1885-1962)**

**Dán fizikus**



Koppenhágában tanult, majd rövid ideig Thomson mellett dolgozott, később pedig Rutherfordnál Manchesterben.

1910-ben a fémek elektronelméletéről szóló munkájával megszerezte a doktori címét. A róla elnevezet atommodell gondolatát 1913-ban dolgozta ki.

A harmincas évek második felétől magfizikai kutatásokkal foglalkozott.

1922-ben fizikai Nobel-díjat kapott az atomok szerkezetének és az azokból eredő sugárzásoknak vizsgálatáért.

### **RÖNTGEN, WILHELM CONRAD (1845-1923)**

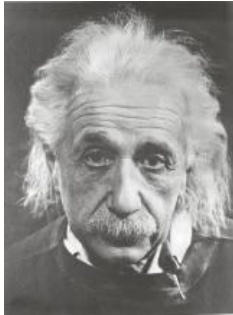
**Német fizikus**



1895-ben felfedezte és vizsgálta az általa X-sugaraknak, később róla elnevezett, az orvosi diagnosztikában szinte azonnal alkalmazásra kerülő sugárzást. Ezenkívül foglalkozott kristályfizikával, és tanulmányozta a gázok fajhőjét, továbbá a folyadékok fizikai sajátosságait magas nyomáson. 1901-ben Nobel-díjat kapott.

## EINSTEIN, ALBERT (1879-1955)

Német elméleti fizikus



Sokan a legnagyobb 20. századi tudósnak tartják. Ő fejlesztette ki a relativitáselméletet és nagymértékben hozzájárult a kvantummechanika, a statisztikus mechanika és a kozmológia fejlődéséhez. Az 1921-es fizikai Nobel-díjjal jutalmazták "az elméleti fizika területén szerzett érdemeiért, különös tekintettel a fényelektromos jelenség törvényszerűségeinek felismerésére".

A hétköznapi emberek körében Einstein vált a legmagasabb fokú zsenialitás szinonimájává, arcképe az egyike a legismertebbeknek a világon. 1999-ben Einsteint az "évszázad emberének" nevezte a Time Magazine.

## SCHRÖDINGER, ERWIN (1887-1961)

Oszták fizikus



A kvantummechanika egyik megalkotója, egy híressé vált gondolkísérlettel szemléltette a mikrovilágban uralkodó törvényeknek a hétköznapi szemlélet számára meghökkentő idegenszerűségét, azt, hogy a részecskék egyidejűleg több helyen, különféle állapotokban lehetnek. Ezt a "kevert" állapotot a fizikusok kvantumszuperpozíciónak nevezik: a részecske addig marad ebben, amíg valamilyen módon meg nem állapítjuk, hogy valójában hol és milyen állapotban van. Mérés hatására viszont a szuperpozíció "összeroppan": a részecske egyértelműen a lehetséges állapotok egyikébe kerül. Kérdés, hol húzódik az a mikro- és a makrovilág közti határmezsgye, ahol ez mindenképpen megtörténik.

## HEISENBERG, WERNER KARL (1901-1976)

Német fizikus



Jelentős szerepe van a kvantumelmélet kidolgozásában.

- Felállította a határozatlansági elvet (relációt)
- Paulival kidolgozta a hullámterek kvantumelméletét
- Foglalkozott még magfizikával és a kozmikus sugárzással.

1932-ben fizikai Nobel-díjat kapott.