

# A kvantumelmélet alapvető kísérletei

A TételWiki wikiből

## Tartalomjegyzék

- 1 Hőmérsékleti sugárzás és a Planck-törvény
- 2 Fotoeffektus
- 3 Compton-effektus
- 4 A Frank-Herz-kísérlet
- 5 A Rutherford-kísérlet
- 6 Atommodellek
- 7 A de Broglie hipotézis és a Davisson-Germer-kísérlet
- 8 A Stern-Gerlach-kísérlet
- 9 Az Einstein-de Haas-kísérlet
- 10 A Zeeman-effektus
- 11 Az elektron adatainak mérése
  - 11.1 Az elektron fajlagos töltésének mérése: a Thompson-kísérlet
  - 11.2 Az elektron töltésének és tömegének mérése: A Millikan-kísérlet

## Hőmérsékleti sugárzás és a Planck-törvény

A felmelegített testek sugároznak, mégpedig minél nagyobb hőmérsékletűek, annál jobban. Az már sejthető volt a XIX. század végén is, hogy a hőszugárzás is az elektromágneses sugárzás egy formája, ezáltal rá is a Maxwell-egyenletek érvényesek. Ez alapján próbálta meg Rayleigh és Jeans levezetni a sugárzás energiasűrűségének frekvencia szerinti eloszlását. Ehhez egy zárt dobozban elhelyezett test által kisugárzott elektromágneses állóhullámok egyenleteit írták fel, és kihasználták az ekvipartíció tételét is, mint a különböző frekvenciáknak megfelelő oszcillátorokra jutó energiát leíró formulát. Az eredmények azonban nem voltak fényesek. A mérésekkel csak kis frekvencián egyeztek, továbbá a kapott eloszlás a nagy frekvenciák felé divergált, nem volt normálható. Ez az úgynevezett ultraibolya-katasztrófa.

Max Planck-nak volt azaz ötlete, hogy az oszcillátor energia esetleg nem folytonosan vehet fel értéket, hanem csak diszkrét csomagokban, ezáltal hibás az ekvipartíció kihasználása. A Planck által levezetett frekvenciaeloszlás:

$$u(\nu) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{\beta h\nu} - 1}$$

Ez jól írja le a kísérleti eredményeket, továbbá normálható, és kihozható belőle másik két fontos összefüggés a Stefan-Boltzmann-törvény, amely a teljes kisugárzott teljesítményt írja le:

$$u = \frac{\sigma T^4}{8\pi^5 k^4}$$

$$\sigma = \frac{15h^3 c^3}{15h^3 c^3}$$

Továbbá kihozható belőle a sugárzási görbe maximumának hőmérséklet növekedés hatására bekövetkező eltolódása a nagyobb frekvenciák felé, ez a Wien-törvény:

$$\nu_{max} = \frac{kT}{h} x_{max}$$

## Fotoeffektus

Többek között Lénárd Fülöp is vizsgálta azt a jelenséget, amelyben egyes fémek UV fényel történő megvilágításának hatására elektronok lépnek ki a fémből. A következő megállapításokat sikerült tenni:

- A kirepülő elektronok sebessége nem az intenzitástól, hanem a frekvenciától függ.
- A kirepülő elektronok száma az intenzitástól függ.
- Bizonyos küszöb frekvencia alatt semmilyen effektus nem mutatkozik.

A korabeli klasszikus elmélet szerint a fémben behatoló fény energiáját szedi össze az elektron és ezáltal tud kilépni. Ennek utánaszámolva teljesen használhatatlan eredményeket kapunk. A jelenséget csak úgy sikerült megmagyarázni, ha a fény kvantumokban éri el a fémeket, és az által hordozott energiát egyben elnyeli az elektron, és az így nyert energia többlete fedezi a kilépésmunkát és a visszamaradó kinetikus energiát, ha azonban nem tudja fedezni a kilépésmunkát, akkor semmi nem történik. A jelenség energiámérlege:

$$h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2$$

A jelenséget Einstein magyarázta meg.

## Compton-effektus

Nagyfrekvenciájú elektromágneses sugárzások anyaggal való kölcsönhatását vizsgálva Compton arra a megfigyelésre jutott, hogy a sugárzás frekvenciája megváltozik az anyagon való áthaladásakor. A tárgyalt sugárzások energiája olyan nagy, hogy azok a kötési energiát messze felülmúlják, ezért a folyamat szabad elektronon való szóródásként tárgyalható, teljesen klasszikus részecske szemléletben is. Felírva az energia és az impulzusmegmaradást, kiszámolható a hullámhosszváltozás:

$$\Delta\lambda = 2\lambda_0\sin^2\frac{\Delta\phi}{2}$$

Ahol  $\Delta\phi$  a foton eltérülésszöge,  $\lambda_0 = \frac{h}{mc}$  a foton Compton-hullámhossza, amely annak a fotonnak a hullámhossza, amelynek energiája megegyezik az elektron nyugalmi energiájával. A fenti formula a kísérletekkel jó egyezést mutat, és ezzel a fény korpuszkuláris természetét támasztja alá.

## A Frank-Herz-kísérlet

Ebben a kísérletben gyorsított elektronokat ütköztettek ritka gázzal. Az ütközés térmentes környezetben történt, az elektronokat repülésük végén galvanométerrel mérték, azaz gyakorlatilag a beérkezett elektronok számát határozták meg. A kísérletben a gyorsító tér nagyságának függvényében vették fel a mért áramerősséget. Az eredmények szerint bizonyos helyeken az áramerősség maximumokat, majd erős visszaeséseket mutatott, és ezek a maximumok szabályos közönként követték egymást. A jelenséget így lehetett magyarázni, ha feltesszük, hogy az energiaátadás csak bizonyos energiáknál történik meg az atomok és az elektronok között. Ha nincs energia átadás, az ütközés rugalmas, ha van akkor rugalmatlan. Ebből az a következtetés vonható le, hogy az atomok elektronjai nem lehetnek tetszőleges energiájú állapotokban, azaz nem nyelhetnek el tetszőleges energiát, tehát a megengedett energiaszintjeik diszkrétnek.

## A Rutherford-kísérlet

Ebben a Rutherford által vezetett kísérletben arany fóliát bombáztak alfarészecskével és vizsgálták azok eltérülését kezdeti irányuktól. Egyszer a vizsgálatokat az alfarészecskék érkezésének irányából is megvizsgálták, és arra a meglepő eredményre jutottak, hogy ugyan ritkán, de előfordul, hogy az alfarészecskék visszapattannak a fóliáról. Ismert volt hogy az atom kívülről elektromosan semleges, ugyanakkor tartalmaz elektronokat, amiből az következik, hogy valamilyen pozitív töltésnek is jelen kell lennie a magban, hogy milyen formában, az még vitatott volt. Rutherford eredményei alapján azt lehetett kiszámolni, hogy ez a pozitív töltés az atom méretéhez képest kis helyen, és nagyon sűrűn koncentrálódik az atomban. Egyszerű Coulomb-téren (sztatikus elektromos téren) való szóródási számolásokból értelmezni lehetett a jelenséget.

## Atommodellek

Rutherford kísérlete alapján maga is kidolgozott atommodellt az általa leírt szerkezettel összhangban. A Naprendszer analógiáját használta, úgy képzelte el, hogy az elektronok a pozitív mag körül keringenek, és gravitációs helyett az elektromos erő tartja őket pályán. Ez a feltevés azonban igen rövidéletű volt, hiszen a klasszikus értelmezésben az elektron körpályán haladva sugároz, aminek következtében energiát veszít, és egy idő után beleesik a magba, továbbá az így kisugárzott spektrum folytonos kéne legyen, a valóságban azonban vonalas spektrumokat figyeltek meg.

Ezen vonalas spektrumok leírására tapasztalati törvényt sikerült felírni:

$$\nu = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Ezeket a vonalakat nem sikerült megnyugtatóan megmagyarázni, azonban Niels Bohr-nak sikerült ezeket összhangba hoznia a Rutherford-kísérlet eredményeivel és egy atommodellbe egyesítenie a jelenségeket. Feltette a következő posztulátumokat:

- Az atomban mozgó elektronok csak diszkrét pályákon mozoghatnak, a pályákhoz tartozó impulzusmomentum csak diszkrét értékeket vehet fel.
- Ezeken a pályákon tartózkodó elektronok nem sugároznak, sugárzás csak két fentebb definiált pálya közötti átmenetkor történik.
- Az átmenetkor kisugárzott foton energiája a két pálya energiájának különbsége.

Ezeknek a feltételezéseknek Bohr nem tudott hátteret biztosítani, azonban számos jelenséget meg tudott velük magyarázni annak ellenére, hogy a klasszikus gondolkodástól teljesen idegennek hatottak. A vázolt elmélet azonban a Hidrogén, és az ahhoz hasonló alkálifémek spektrumait igen jól leírta. Értelemzini lehetett vele a Frank-Hertz-kísérlet eredményeit is. Azonban az elméletnek igen jelentős korlátai voltak: gyakorlatilag kvantitatíve csak a hidrogénre adott jó leírást a többi atomra nem, és a spektrumvonalak intenzitása sem jött ki. Továbbá a spektrum finomszerkezetét sem magyarázta meg, és az impulzusmomentum függését a kvantumszámoktól is rosszul adja meg. Ennek elelnére alapvető jelentősége volt a mikrovilág kutatásának fellendülésében.

## A de Broglie hipotézis és a Davisson-Germer-kísérlet

Planck foton hipotézise alapján de Broglie arra az elméleti feltevésre jutott, hogy nemcsak a fény, de az anyagi alkotók is hullámtulajdonsággal rendelkezhetnek, és a hozzájuk rendelhető hullámhossz:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Ezt az elméleti ötletet támasztotta alá Davisson és Germer kísérlete, amelyen a kristályos anyagok vizsgálatánál jól bevált Bragg-féle diffrakciós képletet tudták igazolni elektronokra is:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

A feltétel alapján  $n$  egész értékeire erősítést kell látni az interferenciaképekben. A kísérleteket Nikkel kristályon végezték, amelynek simert volt a  $d$  rácsállandója, és de Broglie hullámhossz képletét felhasználva ismert energiájú elektronokra valóban jó egyezés mutatkozott. Ez a kísérlet alapvető fontosságú az anyag hullámtermészetének igazolásában.

## A Stern-Gerlach-kísérlet

Ismert volt klasszikus elektrodinamikából, hogy a töltöt részecskék eltérülnek mágneses térben. Ismert volt az is, hogy a áramokhoz mágneses momentum rendelhető, így azok is kölcsönhatnak a mágneses térrel. Stern és Gerlach tulajdonképpen a Bohr-elméletet kívánta tesztelni, ugyanis a jóslat értelmében az elektron pályáihoz tartozó impulzusmomentum csak diszkrét értékeket vehet fel, amiből az is következik, hogy ehez diszkrét mágneses momentum tartozik. A kísérletben ezüst atomokat inhomogén mágneses térben térítették el. Eredményül azt kapták, hogy az atomok a klasszikus folytonos eltérülés helyett diszkrét sávokba rendeződtek, ami a Bohr-féle kvantáltságot

támasztotta alá.

A későbbiekben megvizsgálták a kísérletben, hogy mitörténik ha elektromokkal (vagy hidrogén atomokkal) végzik el a kísérletet. Ekkor is kvantáltság jelentkezett az elhajlási képben, ami arra vezetett, hogy a részecskéknak van valamilyen saját mágneses momentumként viselkedő jellemzője is. Ez vezetett a spin fogalmánka kialakulásához. A későbbiekben megmutatták, hogy az atommagnak is van kvantált mágneses momentuma, ami a magspinből származik.

## Az Einstein-de Haas-kísérlet

Ebben a kísérletben egy felfüggesztett ferromágneses hengert vizsgáltak, amely egy tekercsben helyezkedett el, és torziós forgásra volt képes a felfüggesztés körül. Ha a tekercsre elektromos impulzust adtak, a ferromágnes elfordult. Azonban az impulzusmomentum megmaradásának értelmében valaminek el kellett vinnie az impulzusmomentum ellentétes irányú részét. Az eredményeket csak úgy tudták megmagyarázni, ha feltételezték, hogy az elektronok spinje ugyanolyan természetű, mint a klasszikus impulzusmomentum, és a mágneses hatása is van. A kvantitatív elemzésekből kiderült, hogy egy kettes faktor különbség van a klasszikus köráram értelmezés és a mérési eredmények között. Ez egy újabb érv volt a kvantummechanikai tárgyalás sikeressége mellett.

## A Zeeman-effektus

A spektrumvonalakat mágnesestérben vizsgálva Zeeman arra a megfigyelésre jutott, hogy azok különböző számú vonalakra hasadnak fel, a térmélküül látható egyes vonalából. A jelenséget úgy magyarázták meg, hogy alapesetben a vonalak azonos energiájú elektron konfigurációknak felelnek meg, amelyek ezért nem különböztethetőek meg egymástól. Mágneses térbe helyezve azonban ez a degeneráció (egybeesés) megszűnik, hiszen minden kvantumszámban különbözniük kell az elektronoknak, és a vonalak felhasadnak (általában páratlan számú alvonalra).

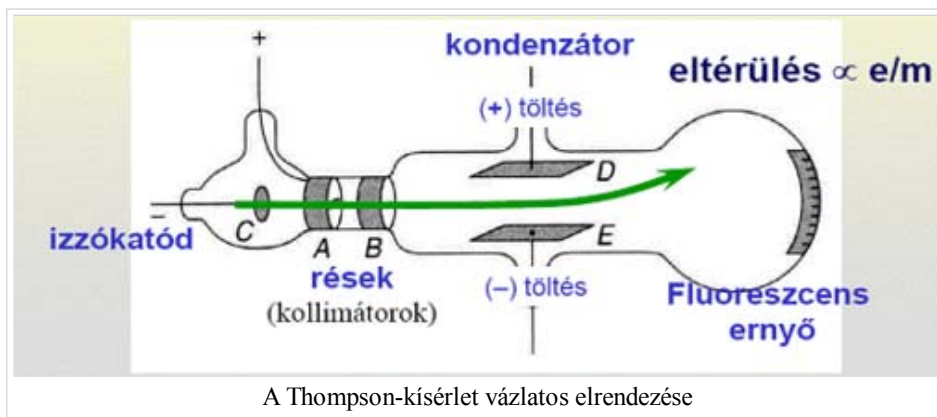
Ha a párosítatlan spinű elektronok átmeneteit vizsgálták, akkor azonban még az előző módszerrel sem lehetett értelmezni a jelenséget, hiszen a kísérletek idején még nem volt ismert a spin, ezért ez utóbbi, páros felhasadásokkla járó effektust anomális-Zeeman effektusnak neveztél el.

## Az elektron adatainak mérése

### Az elektron fajlagos töltésének mérése: a Thompson-kísérlet

Tegyük fel, hogy a  $\mathbf{v}_0$  kezdősebességű fajlagos töltésű részecske úton a  $\mathbf{v}_0$  sebességre merőleges  $\mathbf{B}$  indukcióvektorral jellemzett mágneses térben mozog és az eltérülés kicsi. Ekkor a gyorsulás közelítőleg állandó,

merőleges a  $\mathbf{v}_0$ -ra és nagysága:  $\mathbf{a} = \frac{q\mathbf{v}_0\mathbf{B}}{m}$

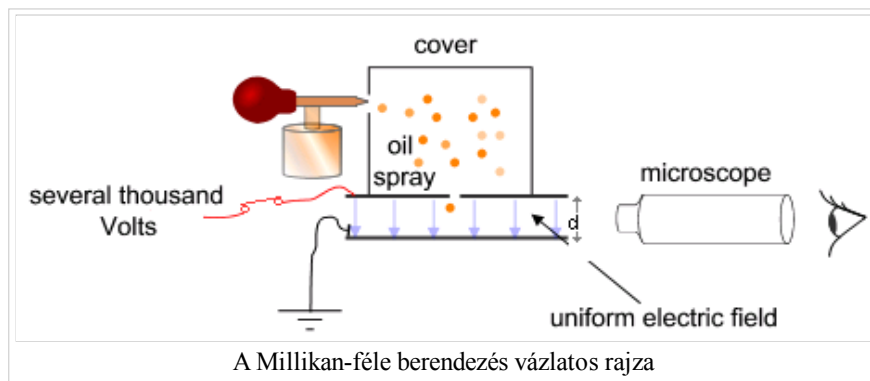


A részecske közelítőleg úgy mozog, mint egy:  $\mathbf{E} = \mathbf{v}_0 \times \mathbf{B}$  elektromos térben: Thomson 1897-ben úgy határozta meg az elektron fajlagos töltését, hogy megmérte egy adott sebességű elektronnyaláb eltérülését a sebességre

merőleges elektromos térben:  $y = \left(\frac{q}{m}\right) \frac{E l_1}{v_0^2} \left(\frac{1}{2} l_1 + l_2\right)$  majd  $< math > v_0$ -ra és  $\mathbf{E}$ -re merőleges  $\mathbf{B}$

indukciójú térrel visszaállította a nyalábot eredeti helyzetébe. Ekkor a kereszttezett tér sebességszűrőként működik, csak a:  $v_0 = \frac{E}{B}$  sebességű részecskék „jutnak át” (pontos  $v_0$  mérés  $\rightarrow$  pontos  $e/m$  mérés).

## Az elektron töltésének és tömegének mérése: A Millikan-kísérlet



Cél: az elektromos tér változtatásával és a nehézségi erő kimérésével meghatározni az elektron töltését. Millikan ehhez két fémlemez közé juttatott olajcseppeket (az olajcseppek porlasztáskor töltéshez jutnak). A lemezek közötti feszültség változtatásával a töltött cseppek töltését a következőképpen mérte meg:

A folyamat kezdetén – mivel ekkor még nem aktiváljuk az elektromos mezőt – az olajcseppek szabadon esnek a lemezek között. A cseppek rövid idő alatt eléri a végsebességüket a kamrában lévő levegőrészecskékkel való ütközés következtében létrejövő súrlódás miatt. Ekkor aktiváljuk az elektromos mezőt, és ha az megfelelően nagy, néhány részecske (a töltéssel rendelkezők) emelkedni kezdenek (mivel a rájuk ható  $F_E$  elektromos mező által az olajcseppre kifejtett, "felfelé" ható erő nagyobb lesz, mint a "lefelé" ható  $G$  nehézségi erő). Egy megfelelően tűnő olajcsepp kiválasztása és a mikroszkóp látómezejének közepére mozgatása után a feszültség kikapcsolásával elérjük, hogy a kiválasztott cseppen kívül minden más csepp leessen. A kísérlet további részében tehát már csak ezzel az egy cseppel dolgozunk.

A kiválasztott cseppet hagyjuk, hogy szabadon essen. Kis tömegéből kifolyólag gyorsan eléri a végsebességét, amikor más nem hat rá erő, vagyis a gravitációs erő kiegyenlítődik a közegellenállással, ami meghatározható a Stokes-törvényből:

$$F_K = 6\pi r \eta v_1$$

ahol  $v_1$  a csepp végsebessége,  $\eta$  a levegő viszkozitása,  $r$  pedig a csepp sugara. A súlyát a következő képletből számoljuk (beleszámítva a felhajtóerőt):

$$F_G = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_{\text{levegő}})$$

Ezt a két erőt kiegyenlítve a csepp sugarára a következőt kapjuk:

$$r^2 = \frac{9\eta v_1}{2g(\rho - \rho_{\text{levegő}})}$$

Most bekapcsoljuk az elektromos teret, és olyan erőre állítjuk, hogy a csepp egy új  $v_2$  sebességgel emelkedjen. A rá ható erők: gravitáció, a Stokes-erő és az elektromos erő:

$$F_E = qE = q\frac{V}{d}$$

ahol a  $V$  a feszültség, a  $d$  pedig a két lemez közötti távolság. A három erő kiegyenlíti egymást:

$$F_E = F_G + F_K$$

ha behelyettesítjük az előző mérés eredményét, akkor megkapjuk a csepp töltését:

$$q = \frac{6\pi r r \eta}{E} (v_1 + v_2)$$

Millikan azt tapasztalta, hogy a kapott  $q$  értékek egy bizonyos érték többszöröse, ez pedig az elektron töltése:

$$q = 1.602 \cdot 10^{-19} C$$

### ***Záróvizsga tematika***

#### **Tételek**

A klasszikus mechanika alapjai | A klasszikus mechanika elméleti tárgyalása | A relativitás elmélet alapjai  
| Egzaktnál megoldható fizika problémák | Folytonos közegek mechanikája | Fenomenologikus  
termodinamika | Elektro- és magnetosztatika, áramkörök | Elektrodinamika | Hullámegyenlet és  
hullámoptika | Geometriai optika és alkalmazásai | **A kvantumelmélet alapvető kísérletei** | A  
kvantummechanika elméleti háttere | Atom- és molekulaszervezet | A magfizika alapjai | A termodinamika  
statisztikus alapozása | Kvantumstatisztikák | Kölcsonható rendszerek, mágneses anyagok | Kristályos  
anyagok fizikája | Nemegyensúlyi folyamatok leírása | Az asztrofizika alapjai

A lap eredeti címe: „[http://mafihe.hu/~wiki/wiki/index.php/A\\_kvantumelm%C3%A9let\\_alapvet%C5%91\\_k%C3%ADs%C3%A9rletei](http://mafihe.hu/~wiki/wiki/index.php/A_kvantumelm%C3%A9let_alapvet%C5%91_k%C3%ADs%C3%A9rletei)”

---

- A lap utolsó módosítása: 2009. augusztus 19., 20:27