



Kvantumelektrodinamika és Kvantumoptika

1. ELŐADÁS Bevezetés

Benedict Mihály

SZTE TTIK Elméleti Fizikai Tanszék, Szeged, 2015



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel
összefüggő képzési és K+F feladatokra ”

TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt



Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Tartalom

- 1 Tartalom
- 2 Bevezetés
- 3 A kettős természet gondolatának kifejlődése
- 4 Problémák
- 5 Mégis a kvantumelektrodinamikai leírás a helyes
- 6 A tananyag fölépítéséről
- 7 Ellenőrző kérdések

Bevezetés

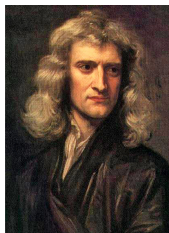
Kvantumoptikának a kvantumelektrodinamika azon részét szokták nevezni, amely az elektromágneses mező kvantumos tulajdonságait figyelembe veszi, de a vizsgált mező frekvenciája a látható tartományba, vagy ahhoz közeli tartományokba esik, tehát a megfelelő fotonenergia sokkal kisebb mint az elektron nyugalmi energiája.

Ennek következtében a töltések mozgását elegendő a nemrelativisztikus kvantummechanika segítségével leírni, nem szükséges pl. az elektronokat is egy mező kvantumainak tekinteni, azaz nem használjuk az úgynevezett másodkvantált formalizmust.

Newton, Huyghens, Young, Fresnel

Az elektromágneses mező, illetve a fény természetének problémája a fizika egyik nagyon régi kérdése.

17. században Newton és Huyghens egymással szemben álló álláspontja:



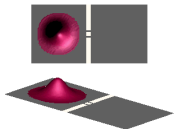
- Newtonra mint a korpuszkuláris elmélet képviselőre szokás tekinteni,
- Huyghens – akinek a nevéhez a fényelhajlás ma is érvényes legegyszerűbb magyarázata fűződik – a hullámtermészet mellett érvelt.

Newton, Huyghens, Young, Fresnel

A hullámtermészet további erős bizonyítéka volt T. Young 1807-ben publikált jól ismert kétréses interferenciakísérlete,



Animáció:



Ezen a gif animáción a Young-féle kétréses kísérletet követhetjük nyomon Gauss-alakú hullámcsomag esetén.

<http://www.embd.be/quantummechanics/movies/qmb5.gif>

Newton, Huyghens, Young, Fresnel

J. Fresnel 1818-ban a Francia Akadémia pályázatára benyújtott tanulmányában ismertetett kísérletei a hullámelméletet igazolták.

Az elhajlásra és az interferenciára vonatkozó megfigyeléseket Fresnel részletes matematikai számításokkal is alátámasztotta.

A. S. Eddington már a 20. században megjegyezte: Fresnel hullámelméleti modelljének mai szemmel egyedül az a hiányosság róható föl, hogy nem tudta megnevezni a hullámmozgás ige alanyát.



Poisson folt, Fresnel és Arago kísérletei

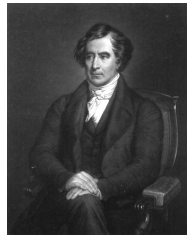
Fresnel pályázatának egyik bírálója, S. D. Poisson – a fény részecske természetének híve – arra a következtetésre jutott, hogy ha Fresnel elmélete helyes, akkor egy korong alakú átlátszatlan ernyő mögött, az árnyék közepén, az elhajlás következtében egy világos foltnak kellene látszani, amit lehetetlennek gondolt, és így a pályamunkát hibásnak ítélte.

A bizottság elnöke, F. Arago ténylegesen is elvégezte a kísérletet és megfigyelte az azóta Poisson foltnak, (néha Arago foltnak is) nevezett világos foltot.

Ennek a kísérletnek a nyomán Fresnel elnyerte a pályadíjat és végérvényesnek látszott a fény hullámtermészetének bizonyítottsága. Ugyanebből az időből származnak Fresnel és Arago kísérletei a fény polarizációjára vonatkozóan, ami szintén a fény hullámtermészetét és azon belül annak transzverzális voltát bizonyította.



S. Poisson



F. Arago

Maxwell elmélete

A 19. század második felében a hullámelméletet **J. C. Maxwell elektrodinamikája** koronázta meg.

Fölismerte hogy az elektromos mező időbeli változása is egyfajta áramként és ezáltal a mágneses mező forrásaként működik.

Maxwell tisztán matematikai eszközökkel **levezette az elektromágneses hullámok létezésének szükségességét**, és a kísérletek számszerű adataival való összehasonlításból arra következtetett, hogy a hullámok sebessége megegyezik az akkor már régóta megmért fénysebesség értékével.

Kézenfekvő volt ezután Maxwell következtetése: a fényhullám valójában az elektromágneses mező hullámozása.



James Clerk Maxwell.

Hertz kísérletei

Maxwell elméletének megerősítése: H. Hertz kísérletei

Hertz egy elektromos dipólus rezgéseivel keltett elektromágneses hullámokat és megfigyelte azoknak a Maxwell elméletéből következő tulajdonságait.

Világossá vált, hogy **a látható fény csupán frekvenciájában** (és így hullámhosszában) **különbözik a Hertz féle dipólus által keltett hullámoktól.**

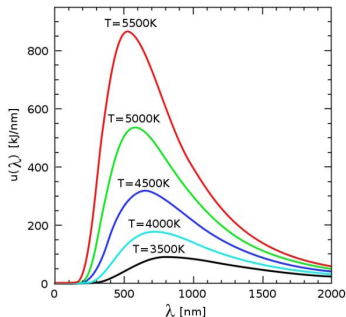
Ma már tudjuk, hogy a látható tartománybeli mezőt is rezgő dipólusok keltik, amelyek az atomban található pozitív töltésű magok, és a hozzájuk képest mozgó elektronok mozgásából származnak.



Az üregsugárzás spektrumának problémája

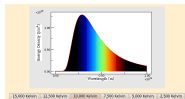
A hullámtermészet mellett szóló bizonyítékok egyértelműnek látszottak egészen a 19. század utolsó évéig.

Ekkor Berlinben két laboratóriumban is megmérték egy fölhevített fémtest belső üregéből kibocsátott sugárzás spektrumának frekvencia szerinti eloszlását, illetve ennek a hőmérséklettől való függését.



A kapott mérési görbe elméleti értelmezésére történt próbálkozások eleinte nem vezettek sikerre.

Animáció:



Ezen a java animáción a fekete test által kibocsátott sugárzás spektrumának hőmérsékletfüggését tanulmányozhatjuk.

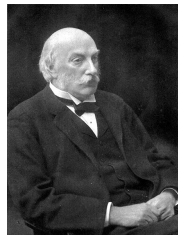
<http://webphysics.davidson.edu/Applets/BlackBody/BlackBody.html>

Az üregsugárzás spektrumának problémája

- W. Wien termodinamikai meggondolásai csak a spektrum rövidhullámú részét tudták magyarázni.
- A Lord Rayleigh és J. Jeans által levezetett képlet a hosszúhullámú részre adott a kísérletekkel egyező magyarázatot.

Rayleigh és Jeans az üregben kialakuló állóhullámokat egy-egy oszcillátornak tekintette, majd föltételezték, hogy ezek az üreg falával T hőmérsékleten termikus egyensúlyban vannak. Mint ismert – egy sok klasszikus oszcillátorból álló rendszer esetén egy oszcillátorra ekkor átlagosan $k_B T$ energia jut.

Ám az oszcillátorok száma nem korlátos, így a számított teljes energia divergálni látszott.



Lord Rayleigh



Sir James Jeans

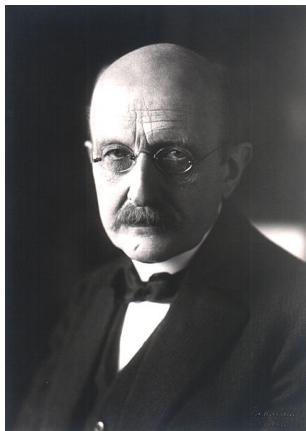
A Planck-törvény

1900-ban M. Planck előbb a Wien és a Rayleigh-Jeans-féle képletek interpolációjának próbálgatásával egy olyan formulát talált, amely **pontosan megadta** a spektrum kísérletileg mért alakját.

Ezt követően egy teljesen új elv alapján sikerült a megtalált képletet korrektül is levezetnie.

Az új elv szerint **a rezgési módusok az üreg falától az energiát csak meghatározott adagokban, kvantumokban vehetik föl** és adhatják le, ennek az energiakvantumnak a nagysága $\varepsilon = h\nu$ -nek megfelelően arányos a módus ν frekvenciájával. Az arányossági tényező a h Planck állandó, melynek értékét Planck a kísérleti görbével való összehasonlítással meg tudta határozni.

Az adagosságból az következik, hogy nagy frekvencia esetén, amikor a kvantum energiája összemérhetővé válik a $k_B T$ termikus átlaggal, a klasszikus ekvipartíció tétel érvényét veszti.



Einstein fotonhipotézise

Érdekes módon, ez nem változtatta meg Planck véleményét arról, hogy a mező szigorúan véve hullámtermészetű, és sokáig vitatta Einstein öt évvel későbbi következtetését, aki a fotoeffektus értelmezéséhez bevezette a fénykvantum fogalmát.

Einstein a ν frekvenciájú monokromatikus hullámot fénykvantumok összességének tekintette, amelyek egyenként $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$ energiát és ennek egy nulla nyugalmi tömeg esetén megfelelő $p = \hbar\omega/c = \hbar k$ nagyságú impulzust hordoznak. Ezeket a részecskéket nevezzük ma fotonnak.

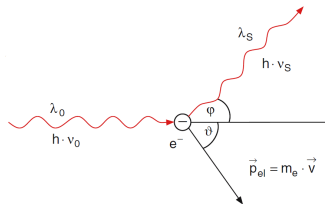
Megjegyzés: Az elnevezés jóval későbből 1926-ból származik, és a névadó G. Lewis fiziko-kémikus nem is az Einstein-féle fénykvantumot értette a foton név kapcsán.



A Compton effektus a részecske természet mellett

A mező részecske-természete melletti további erős érvnek szokás tekinteni a **Compton effektust**.

Ennél az elektronon szóródó elektromágneses hullám (röntgen-sugárzás) frekvenciaváltozását illetve annak kapcsolatát a szórási szöggel avval a föltételezéssel a legegyszerűbb magyarázni, hogy a sugárzás $\hbar\omega$ energiájú és $\hbar k$ impulzusú „golyók” sokaságaként viselkedik.



Animáció:



Tanulmányozzuk a Compton-effektust a bal oldali linken található java animációval, és válaszoljuk meg az ottani tesztkérdéseket.

http://physics.bu.edu/~duffy/semester2/c35_compton.html

A fény kettős természetének jellege

A fönti tapasztalatok nyomán az a kép vált elfogadottá a fizikusok között, hogy a fény illetve általában az elektromágneses mező a szokásos klasszikus fizikai fogalmakkal nem írható le, hanem egy sajátos entitás, amelyről ha mégis mint klasszikusan megérthető objektumról akarunk beszélni, a legegyszerűbb, ha azt mondjuk, hogy kettős természetű, a **terjedését** hullámegyenletek megoldásaival lehet leírni, az atomos anyaggal való **kölcsönhatásakor** viszont a részecske jellege lép előtérbe.

Minden anyag kettős természetű

A kettős természet gondolatát még inkább alátámasztotta a L. de Broglie által fölvetett javaslat, hogy az olyan kicsiny, de nem nulla tömegű objektumok, mint az elektron – amelynél eredetileg ilyen kettősség föl sem merült – a mozgásuk során bizonyos értelemben maguk is hullámtulajdonságokat mutat.

Minthogy ezt az elgondolást a kísérletek is bizonyították, majd a Schrödinger-féle kvantummechanika egy pontos matematikai elmélettel is alátámasztotta, az elektron kettős természetére vonatkozó elgondolás is teljesen elfogadottá vált, s ez sokak szemében eltüntette a fény kettős természetével kapcsolatos kételyeket is.



A mező kvantálásának matematikai eljárásáról

A kettős természet igazi matematikai megfogalmazása, a mezőt leíró **térmenntényiségek** „operátorosítása” sem váratott magára sokáig. P. Dirac 1927-ben fogalmazta meg a mező kvantálásának módszerét, amelyet később W. Heisenberg, W. Pauli, P. Jordan majd V. Weisskopf és Wigner Jenő munkái követtek az 1930-as évek körül.

Ezt az eljárást fogjuk követni mi is.



Kérdőjelek a mező kvantálását illetően

Kevésbé ismert, hogy a fönti meggyőzőnek látszó tények ellenére a 20. század során több neves fizikus kifejezte azt a nézetét, hogy a foton illetve a mező kvantálásának szükségessége nincs eldöntve.

Említettük már, hogy maga Planck is sokáig ellenezte Einstein fotonhipotézisét.

A mező kvantálása elleni érvek a következők:

- Az indukált és a spontán emisszió magyarázatához elegendő az atomi nívók diszkrét szerkezete.
- Amit a vákuum fluktuációnak tulajdonítunk, azt valójában az összes létező forrás töltéseloszlásának véletlen változása okozza.
- A Compton effektus a mező hullámtermészetével is magyarázható (Klein-Nishina elmélet)
- A fotoeffektus törvényei is magyarázhatók a félklasszikus elmélettel.

Az indukált emisszióhoz nem kell a mezőt kvantálni

A Planck törvényénél az üreg sugárzása az üreg falában található atomok gerjesztése nyomán keletkezik, így a kvantálás előtt meg kell vizsgálnunk magának a fénykibocsátásnak a mechanizmusát.

Ez azonban megtehető a félklasszikus elmélet segítségével is, csak annyit kell föltennünk, hogy az atomban diszkrét nívók vannak és ekkor a mező kvantálása nélkül is kiszámítható két atomi nívó között a mező hatására létrejövő átmenet, abszorpció vagy indukált emisszió időegységre eső valószínűsége az Einstein féle B együttható.

Nemdegenerált nívópárok esetén a kétfajta ráta megegyezik és értéke:

$$B = \frac{\pi}{3\varepsilon_0} \frac{|d_{21}|^2}{\hbar^2}$$

ahol a $\hbar$ kizárólag az atomi állapotokra vonatkozó Schrödinger-egyenlet következtében jelenik meg, és d_{21} az átmeneti dipólmátrixelem szintén csak az atomra jellemző adat.

Adott atom esetén a spontán emissziót a világ többi töltésének fluktuációs tere okozza

A szokásos félklasszikus elmélet nem magyarázza a vákuumban is jelentkező spontán emissziót, mert aszerint, ha nincs mező, akkor átmenet sincs.

Úgy viszont az Einstein-féle A együttható szigorúan 0 lenne, s ekkor az ismert Einstein-féle levezetés nem adná vissza a Planck-törvényt.

A kvantumoptika a spontán emissziót többek között az elektromágneses vákuum kvantumozott fluktuációival, azaz impliciten a mező kvantált jellegével magyarázza, de elképzelhető más magyarázat is.

Elgondolható, hogy amit a vákuum fluktuációnak tulajdonítunk, azt valójában az összes létező forrás töltéseloszlásának véletlen változása okozza, ez E. Jaynes elmélete.



A spontán emisszió mint súrlódásos folyamat

A spontán emissziót egyszerűen az energiának az egyetlen kitüntetett szabadsági fokról (atom) a sok szabadsági fokkal rendelkező másik objektumra (mező) való átadásából származik, ami mindennapos tapasztalat pl. a súrlódásos folyamatoknál, függetlenül attól, hogy ez a környezet diszkrét adagokban vagy folytonosan képes átvenni az energiát.

A Compton effektus tisztán a hullámelmélettel is magyarázható

A Compton effektust illetően – az elemi levezetésen túl – ismert annak az O. Klein és Y. Nishina által adott értelmezése is, amely szerint ott egy klasszikus elektromágneses hullám szóródik egy elektronon, amely gyorsulása révén egy másodlagos hullámot kelt. Ennek a hullámelméleti frekvenciaeltolódása összhangban van a "golyómodellel" kapható eredménnyel, de valójában ennél a levezetésnél nem kell föltétlenül a mező kvantumos szerkezetére hivatkozni.

A fotoeffektus tulajdonságai a félklasszikus elméletből is következnek

A fotoeffektusnál a klasszikus mezőt tartalmazó kölcsönhatási energiával számolt időfüggő perturbációszámítás eredményeképpen az átmeneti rátát (az időegységre eső átmeneti valószínűséget) a **Fermi-féle arany szabály**:

$$w_{fi} = (2\pi/\hbar) |\langle f | H_{int} | i \rangle|^2 \delta(\varepsilon_f - \varepsilon_i - \hbar\omega)$$

szolgáltatja, amely a $t \gg 1/\omega$ esetben érvényes.

Optikai terek esetében viszont, ahol $\omega = 10^{15}/s$, ez utóbbi minden gyakorlati esetben teljesül, azaz az elektron kibocsátás ezen elmélet szerint is lényegében késedelem nélkül történik.

A δ függvény argumentuma, amelyben ε_f a végső szabad elektron állapotnak a folytonos spektrumba eső energiája, míg ε_i a kötött állapoté, mutatja a fotoelektromos egyenlet érvényességét. Az átmeneti mátrixelem a mező amplitúdójával, annak négyzete pedig az intenzitással arányos.

Tehát a fotoeffektus minden lényeges tulajdonsága „kiadódik” a félklasszikus elméletből is $\Rightarrow$ nincs föltétlenül szükség a mező kvantálására.

Mégis a kvantumelektrodinamikai leírás a helyes

Az optikai frekvenciával változó mező vizsgálata mind kísérleti mind elméleti szempontból új lendületet kapott a **lézerek fölfedezésével** 1960-ban.

- Azt nem sokkal később követték R. Glaubernek az optikai koherencia kvantumelméletére vonatkozó munkái 1963-ban, amelyet 2005-ben Nobel díjjal ismertek el, és számos újabb szép kísérleti eredmény, amelyek alapján a fotonok léte ma már mégsem vonható kétségbe.
- Emellett szólnak azok a még az 1950-es években Jánossy Lajos által kezdeményezett és később mások által (Clauser, Grangier) nagyon nagy pontossággal megismételt kísérletek, amelyek a foton oszthatatlanságát mutatták egy félig áteresztő tükrön való áthaladáskor.
- Ugyancsak a mező kvantálásának a szükségességét bizonyította a megfelelő körülmények között létrejövő úgynevezett fotonritkulás jelensége

A rezonátoros kvantumelektrodinamikai kísérletek a mező diszkrét szerkezetét igazolják

Egy további nagyon szép, a foton létezését igazoló kísérleti eredmény (1996) az egymódusú üregeken áthaladó, azaz rezonáns kölcsönhatásba lépő atomok két állapotának betöltöttségében jelentkező Rabi oszcillációk frekvenciájának diszkrét volta, amiért S. Haroche érdemelte ki a Nobel díjat 2012-ben.

Éppen ez volt az egyik pont, amelynél Jaynes és munkatársa Cummings 1963-ban rámutattak a klasszikus illetve a kvantumos mező által szolgáltatott eredmények különbségére és az akkoriban teljesen elképzelhetetlennek gondolt kísérletek elvégzésének szükségességére.

Mindezek az elméleti és kísérleti eredmények tehát megerősítették a fény kettős természetének koncepcióját, amit a kvantumtérelmélet önt matematikai alakba.



A tananyag fölépítéséről

- A következőkben a mező kvantálásának egyik lehetséges útját járva először bevezetjük a foton fogalmát előbb egyetlen modell módusra majd egy tetszőleges sokmódusú mezőre.
- Áttekintjük a mező néhány fontos speciális kvantumállapotát és azok megadásának különböző módjait.
- Tárgyaljuk az interferencia jelenségének kvantumos értelmezését és a kvantumoptikában nagyon fontos eszköznek bizonyult nyalábosztóval kapcsolatos tényeket.
- Ezután áttérünk az egyetlen atom és egyetlen kvantumos módus kölcsönhatásának alapvető tulajdonságaira és az azokat bizonyító Nobel-díjjal jutalmazott kísérletek ismertetésére.
- Végezetül három kísérletileg is megfigyelt jelenséget ismertetünk, ami az elektromágneses vákuum létezésével, illetve annak az atomokra vagy akár makroszkópikus testekre kifejtett hatásával magyarázható. Ezek a spontán emisszió, a Lamb-féle eltolódás és a Casimir-effektus.

Ellenőrző kérdések

- ❶ Milyen kísérleti bizonyítékok szóltak a fény hullámtermészete mellett?
- ❷ Hogyan következett Maxwell elméletéből a fény hullámtermészete, és milyen kísérlet látszott azt ennek kapcsán bizonyítani?
- ❸ Milyen kísérleti eredmények látszottak a fény részecske-természete mellett szólni?
- ❹ Mik az elemi fotonképhez mint részecskéhez tartozó fizikai mennyiségek értékei?
- ❺ Milyen kísérletek alapozták meg a foton mint oszthatatlan objektum fogalmát?
- ❻ Fogalmazzuk meg röviden a fény kettős természetének mibenlétét.