

Problémák a kétrés-kísérlettel

1. Információim az elektromágneses sugárzásról

Sajnos nem hogy nem végeztem, de soha még csak látni sem láttam olyan kísérleteket, amelyet fényvel végeztek, vagy egyéb korpuszkuláris sugárzással.¹ Így **kizárólag olvasmányaimra vagyok hagyatkozva, amikor szeretném elképzelni a fényt**, aminek a látása mindennapos tapasztalatunk. Fantasztikusan nagy irodalma van a témának, és én sokat – bár nem eleget – olvastam ebben a tárgyban. A szakirodalom olvasásának azonban óriási hátránya, hogy nem interaktív, nem lehet kérdezni, nem lehet a kételyekre választ kapni. Mindig jobban szerettem könyvből tanulni, mint előadásokból, mert zavart, hogy az előadók túl-magyarázták azt, ami nekem azonnal érthető volt, vagy átsiklottak olyan részeken, ahol nekem problémáim támadtak. Olvasás közben viszont mindig a saját sebességemmel haladhattam, meg-megállva egy-egy résznél, vagy gyorsan átfutva a nyilvánvalókat. Most viszont vágyom a kétoldalú kommunikációra, mert sok-sok fogalmunkhoz hasonlóan a fény is azok közé tartozik, amivel kapcsolatban több a kérdésem, mint a tudásom.

2. Az elektromágneses sugárzás kettős természete

A fény – vagy általánosabban az elektromágneses sugárzások, sőt a részecskék is² – hol hullámként, hol részecskeként viselkednek. Természetesen ennek az állításnak a megértéséhez tudnunk kell, mit jelent a hullám-, illetve a részecske-viselkedés. Bármennyire furcsa, az un. klasszikus részecske-tulajdonságok – egyenes vonalú mozgás, visszaverődés, stb. – mind megmagyarázhatók hullámtulajdonságként is. Viszont több hullámtulajdonság – például³ interferencia – nem magyarázható részecsketulajdonságként. Szerintem az elektromágneses sugárzás kettős természetét voltaképpen csak Planck és Einstein felfedezése, a sugárzás kvantumossága hozta be a köztudatba⁴.

Az elektromágneses sugárzás nem véletlenül bonyolult jelenség, hiszen ez teszi képessé mindazon információ szállítására, amelyet az Univerzum távoli, és a mikrokozmosz

¹ Pontosabban korábban láttam egy internetről letöltött – minősíthetetlenül rosszul szervezett és kivitelezett – előadást és kísérleteket a témában:

http://www.atomcsill.elte.hu/letoltes/video/kiserletek_5_ev/ACS_kiserletek_5_02.wmv. Azóta láttam jobbkat is a Youtube-ról, például <http://www.youtube.com/watch?v=TT-uCLwKhQ&feature=topics>, de olyat nem, amely választ adott volna a kérdéseimre.

² A jelenség minden objektumra igaznak gondolt, de csak atomi méretekben kimutatható.

³ Kezdetben ide sorolták a diffrakciót is, de ez később igazolódott részecskékre is.

⁴ Lásd: Wikipédia, Hullám-részecske kettősség, http://hu.wikipedia.org/wiki/Hull%C3%A1m-r%C3%A9szecske_kett%C5%91ss%C3%A9g

Rövidítve: „A fény legkorábbi átfogó elméletét Christiaan Huygens terjesztette elő, különösképpen azt demonstrálva, hogyan interferálhatnak a hullámok. Az elméletnek azonban voltak nehézségei és hamarosan beárnyékolta Isaac Newton korpuszkuláris fényelmélete. Newton óriási intellektuális formátuma miatt elméletének több, mint egy évszázadon át nem akadt kihívója, Huygens elméleteit pedig csaknem teljesen elfelejtették. A diffrakciónak a 19. század elején történt felfedezésével a hullámelmélet újjászületett. Maxwell az 1800-as évek második felében a fényt elektromágneses hullámok terjedéseként magyarázta egyenletei felállításával. Ezeket az egyenleteket kísérletileg igazolták és Huygens elképzelése széles körben elfogadottá vált. 1905-ben Albert Einstein figyelemreméltó magyarázatát adta a fotoeffektusnak, egy addig zavarba ejtő kísérletnek, amit a fény hullámelmélete nem tudott megmagyarázni. Bevezette a foton, mint a fény sajátos tulajdonságokkal rendelkező energiakvantumát.” Később a kvantummechanika adott magyarázatot az elektromágneses sugárzás kettős természetére.

parányi világról tudunk. Ezt a hatalmas információ mennyiséget nem tudná szállítani „egyszerűbb média”.

3. Problémáim a fényvel kapcsolatban

Még mielőtt a kétrés-kísérlettel foglalkoznék, szeretném összefoglalni a fényvel kapcsolatos problémáimat. Mit jelent *egy* foton? A foton a bozonok⁵ közé tartozik, és belőlük akár mennyi lehet ugyanabban a kvantumállapotban. A fény esetében – melynek energia-quantuma a foton – tekintsük a foton spinjét: ekkor a fény polarizáltságához jutunk. **Már a polarizáltság spinértelmezésével is gondom van.** A foton spinjét azért azonosítjuk a fény polarizáltságával, mert a foton fénysebességgel mozog, és ezért a spin nem lehet egy rögzített pontra vonatkoztatni, ezért a spintengely iránya mindig a mozgás iránya.

Ha egy tökéletesen polarizált és monokromatikus fénysugarat tekintek, akkor a fény intenzitását tekintve még változhat a fénysugár hatása. **A legtöbb problémám a fény intenzitásával, amplitúdójával van.**

A szemünk a fény intenzitását érzékeli erősségnek, a frekvenciájához „szint” kapcsolunk. A fizika a frekvenciával arányosnak jellemzi a foton energia-tartalmát. A fény – vagy általában az elektromágneses hullám – megértésének elmélyítésében segíthet az atomemisszió jelensége. A kémiában egy adott anyagból kibocsátott fény frekvenciája alkalmas az adott elem azonosítására, az intenzitása pedig az atomok számával arányos.⁶ Tehát arra lehet ebből következtetni, hogy valami módon a fotonok számával arányos az intenzitás, vagyis a hullám amplitúdója⁷. És nekem épp a fotonok számával, tehát az amplitúdóval van problémám. Valóban számolható a fotonok mennyisége, vagy inkább mérhető? **Az elektromágneses sugárzás energiájában kvantált, de egy kvantum energiája független az intenzitásától. Vajon intenzitásában is kvantált az elektromágneses sugárzás?** Ebben az esetben számlálható a fotonok mennyisége. A szakirodalom beszél egy darab fotonról, így nyilván kvantálnak gondolják ebben az értelemben is. De hát a hullámok leírásában az amplitúdó egy időben szinuszosan változó „valami”⁸ maximumát jelenti, és ilyen értelemben időben folytonos függvény: $a=A \sin(t-t_0)+a_0$, ahol A az amplitúdó, t az idő, és t_0 , valamint a_0 eltolási mennyiségek. A kérdésem így az, hogy elektromágneses sugárzás esetén ez az A – azaz az elektromos és a mágneses mező változásának maximuma – számlálható-e az intenzitás változásával, azaz kvantált-e, avagy ellenkezőleg: mérhető, vagyis az intenzitás maximumának változása folytonosan⁹ változó mennyiségként írható-e le.

4. Problémáim a kétrés-kísérletekkel

A kétrés-kísérlet három, számomra lényegesen eltérő módon hajtható végre:

- **Makró-objektumokkal**, például lövedékekkel végzett kísérlet esetén nincs interferencia jelenség; a két nyitott résnél kapott hatás az egy-egy nyitott rés esetén kapott hatások összege.

⁵ Nem szabad elfelejteni, hogy ezek a „ragasztó” részecskék közé tartoznak! Később szeretnék ezzel részletesebben foglalkozni.

⁶ Más jelenségnél is hasonlólt tapasztalunk. A fémből kilépő elektronok sebessége nem függ a beeső fény intenzitásától, hanem csak a frekvenciájától. Az intenzitástól csak a kilépő elektronok száma függ.

⁷ Több helyen találkoztam azzal a megfogalmazással, hogy a fény intenzitását csökkentve biztosítják azt, hogy egyszerre csak egy foton vegyen részt a kísérletben.

⁸ Az elektromágneses sugárzásnál az elektromos és a mágneses mező változását jelenti.

⁹ A folytonosság fogalmával vigyázni kell, mert a kételemű számokon a klasszikus folytonosság-fogalmak nem alkalmazhatóak, és a fogalom általánosítása még nincs készen.

- **Makró-hullámmozgás** vizsgálata, például víz hullámokkal végzett kísérlet esetén van interferencia, és a hatások összegzése nem lineáris, azaz nem az egy-egy nyitott résnél kapott amplitúdók összege. Az összegzési szabály nagyon egyszerű, mert két nyitott résnél az amplitúdók számítása az egy-egy nyitott résnél kapott amplitúdók összegének a négyzetéből adódik. Az amplitúdókat komplex számmal is kifejezhetem, így szemléletesebb az összegzés.
- **Kvantumos méreteken** – például fénysugarakkal, vagy elektronokkal – elvégzett kísérlet esetén a fenti hullámmozgáshoz hasonlóan interferencia-képet kapunk, és a valószínűségi amplitúdók matematikai leírása is pontosan megegyezik az előbb leírttal. Egyetlen eltérés van, az előbb a komplex számmal való modellezés nélkül is boldogultam, bár az szemléletesebbé tette a leírást, itt viszont elkerülhetetlen a komplex számok használata a valószínűségek jellemzésére¹⁰.

A fentiekkel sok fenntartásom van. Az első lövedékes kísérletet **Feynman** úgy magyarázza, hogy ott is lenne interferencia, de a „golyók esetében a hullámhosszak olyan parányiak, hogy az interferenciasávok nagyon elkeskenyednek, olyannyira, hogy véges méretű detektorral lehetetlen különálló maximumokat és minimumokat megkülönböztetni. Amit láttunk, az csak bizonyos fajta átlag volt – a klasszikus görbe.”¹¹ Ezt el tudom képzelni, és logikus is, de akkor is csak egy feltevés. Problematikus, hogy a második kísérlet – szintén Feynman idézett írása szerint – **csak gondolat-kísérlet**, mert a kísérleti berendezést valószínűtlenül kicsire kellene méretezni.¹² Nos, ezzel is gondom van, hiszen a gondolat-kísérlet, az csak egy hipotézis. A fény interferencia-jelensége azonban hétköznapi is jól ismert, ezért ebben a vonatkozásban valóban van tapasztalatunk róla.

Amivel a legnagyobb gondom van az az a kísérlet, amivel azt bizonyítják, hogy **egyetlen foton önmagában is mutat interferencia-jelenséget**. Penrose¹³ szerint, ha a „fény teljes intenzitását elegendően lecsökkentve biztosíthatjuk, hogy egy időben csak egyetlen foton legyen a rések szomszédságában”, akkor a „destruktív interferencia jelensége, amikor a foton számára lehetséges két alternatív út valahogyan megsemmisíti egymást, mint lehetőséget, *egyetlen* foton esetében is megvalósul. Ha a két út közül csak az egyik van a foton előtt, akkor a foton ezen végigmehet. Ha csak a másik van nyitva, akkor azon is végigmehet. De ha *mindkettő* nyitva van, akkor a két lehetőség megsemmisíti egymást, és a foton, úgy látszik, egyikén sem képes átjutni!” Hasonló, úgynevezett *egy-fotonos* kísérletre találtam mást is, például: „Képzeld el, hogy nagyon erősen lecsökkentjük a kettős résre érkező fény intenzitását. Ilyenkor az ernyőt nem használhatjuk, mert olyan gyenge az interferenciakép, hogy nem látunk semmit. Ehelyett az ernyő helyén helyezzünk el nagyon sűrűn fényérzékítő műszereket (detektorokat), melyek azt érzékelik, hogy arra a helyre hány foton érkezik. Kezdetben csak azt vehetjük észre, hogy a detektorok hol itt, hol ott szólalnak meg, azaz fotonok véletlenszerű becsapódását észlelik. Hosszú ideig tartó méréssel végül is a foton számláló detektorok adataiból eloszlásfüggvényt készíthetünk. Azt mondhatjuk, hogy a becsapódó fotonok valószínűségi eloszlása ugyanaz, mint amit az interferencia alapján számítottunk ki. Nem tudjuk megmondani, hogy a következő foton hova csapódik be, csak annyit mondhatunk előre, hogy egy adott helyen mekkora valószínűséggel várható foton érkezése. ... Hosszú idő után a foton számláló adataiból mégis kirajzolódik az interferenciát

¹⁰ A komplex számok használata azt jelenti, hogy az így jellemzett amplitúdó nem kezelhető valószínűségként. Az egyes alternatív utaknak nincsenek külön valószínűségeik, csak amplitúdók, de az összes létező alternatíva amplitúdója összegzéseként kapott amplitúdó normált abszolút-érték négyzete már a kívánt valószínűséget adja.

¹¹ Feynman, *Mai Fizika*, 3 Optika - Anyaghullámok, 154. oldal

¹² Nincs információ arról, hogy Feynman adott írása óta a kvantumtechnika fantasztikus eredményei alapján el tudtak-e végezni hasonló kísérletet.

¹³ Penrose, *A császár új elméje – Számítógépek, gondolkodás és a fizika törvényei*, 261. oldal

mutató eloszlás. Jogosnak látszik azt feltételezni, hogy minden egyes foton vagy az egyik, vagy a másik résen haladt át (átlagosan a fotonok fele az egyiken, másik fele a másikon). Ezt az álláspontot ellenőrizhetjük, ha kétszer annyi ideig mérünk, de fele időben az egyik, fele időben a másik rést lezárjuk. Ezzel a trükkel azonban nem "cselezhetjük ki" a fotonokat, mert így csak a különálló résnek hatásának az egyszerű összegzését kaphatjuk, interferenciát nem.¹⁴ A két megközelítés tehát különböző; az egyik – Penrose esete – nem ismétli a fotonok áteresztését, a másikban pedig ismételt, időben többször egymásután eresztenek át egyetlen foton. A két megközelítés eredménye is különböző; Penrose-nál a két rés nyitva-tartása mellett az egyetlen foton egyik résen sem megy át, míg az ismételt áteresztési kísérletnél a fotonok a két rés nyitva-tartása mellett is átjutnak. Mindkét kísérlettel két gondom van: egyrészt mindkettő gondolat-kísérlet, másrészt változatlanul nem tudom elképzelni az úgynevezett *egyetlen* foton.

¹⁴ <http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/termesztudomanyok/fizika/fizika-11-efolyam/atomfizika/a-feny-hullam-reszecske-kettos-viselkedese>