

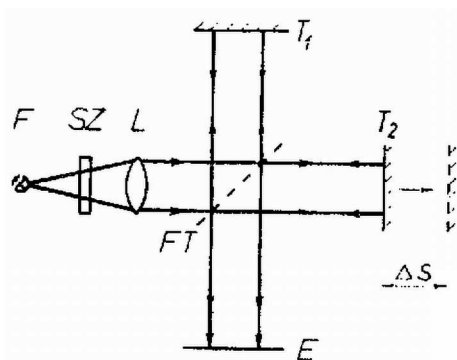
A fény kettős természete¹

A fény természetének kérdése már régóta foglalkoztatja a tudományt. Mai ismereteink szerint a fénynek hullám és részecske tulajdonságai egyaránt vannak. Ezen áttekintésünk célja, hogy megnézzünk néhány olyan jelenséget, amely tipikusan mutatja a fény hullám, illetve részecske természetét. Ismertetni fogunk a fény természetével kapcsolatban elvégzett néhány kísérletet, majd kitérünk arra, hogy a fény részecskeelmélete tulajdonképpen pontosan mit állít.

A fényt gerjesztett, azaz energiával rendelkező atomok sugározzák ki, ezekben is a rezgést végző elektronok a fény forrásai. A fényről azt szokás mondani, hogy elektromágneses hullám. Mit kell ezalatt érteni? Vegyünk egy nyugvó elektront, az e körül kialakuló térben és időben állandó elektromos teret a jól ismert Coulomb-féle törvény alapján adhatjuk meg. Ha az elektron például egy pozitív töltésű atommaghoz kötve rezgőmozgást végez, a térerősség térben és időben változni fog. Az elektron elmozdulásakor a térerősség először a közvetlen közelben változik meg, majd ez a „zavar” fénysebességgel továbbterjed a térben. Ennek eredményeként térben és időben változó elektromos teret kapunk, ami az atomból kiinduló hullámmal írható le. Az atomban mozgó elektron kis mágnesként is viselkedik, ebből következően a térben tovaterjedő mágneses térerősség hullámoknak is kiindulópontja. A fény így a térben hullámszerűen tovaterjedő elektromos és mágneses térerősség változás, amely hullámokban az elektromos és mágneses térerősség vektorok rezgési síkja egymásra merőleges. A hullámokban energia terjed, s ez az energia a szembe jutva hozza létre a látást.

A fény hullámtermészete

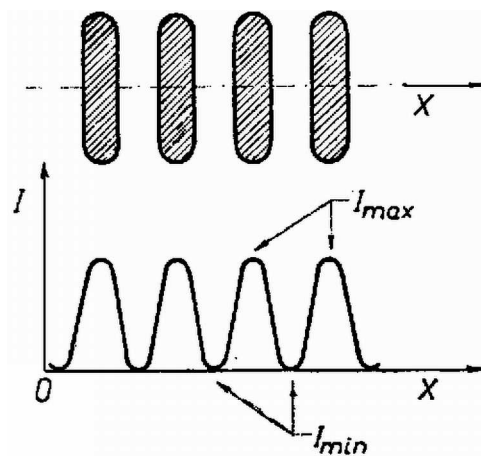
A hullámtermészet legkézenfekvőbb megnyilatkozása az interferenciajelenség. Ennek lényege az, hogy ha két azonos rezgésszámú hullám találkozik, akkor a hullámok között erősítés, illetve kioltás lép fel. Ha a hullámok közötti fáziskülönbség a félhullámhossz páros számú többszöröse, akkor hullámhegy hullámhegygel találkozik és erősítés jön létre, ha viszont a fáziskülönbség a félhullámhossz páratlan számú többszöröse, akkor hullámhegy hullámvölgygel találkozik és a hullámok kioltják egymást. Az interferenciajelenség fénnel létrehozható, így ez minden kétséget kizáróan mutatja a fény hullámtermését.



1. ábra. A Michelson interferométer elvi elrendezése. F fényforrás; SZ szűrő; FT féligáteresztő tükör; T_1 , T_2 tükör; E ernyő; ΔS úthosszkülönbség a T_2 tükör elmozdulásakor

Nézzük meg a Michelson-féle interferométer működését, amit az 1. ábrán szemléltettünk. Az F fényforrásból, amely például egy gázkisülési cső, az SZ szűrő egyetlen spektrumvonal fényét engedi át. Ezt a fénynyalábot az L lencsével párhuzamosra tesszük. Az FT féligáteresztő tükör a fénynyalábot két részre osztja, az egyik fele átmegy, a másik visszaverődik. Az így nyert két fénynyaláb a T_1 , illetve T_2 tükrökről visszaverődik, majd ismét áthaladva FT -n, illetve visszaverődve róla egyesül és az E ernyőn létrejön az interferenciakép. A két nyaláb úthosszkülönbségétől függően az interferenciakép egy világos vagy sötét folt. Ha például a T_1 tükröt kissé megdöntjük, az interferenciakép csíkokból áll, ha viszont széttartó nyalábot használunk akkor az interferenciakép koncentrikus gyűrűrendszer.

¹ Az 1988. évi Téli Ifjúsági Fizikai Ankéton elhangzott előadás.



2. ábra. Az interferenciakép és a mért I intenzitáselosztás

Egy tipikus interferenciaképet szemléltet a 2. ábra, a csíkok alatt a regisztrált fényintenzitás eloszlás látható. Az interferenciakép minőségének kvantitatív jellemzésére a láthatóság (V) kifejezést vezették be. Azonos intenzitású fénynyalábok interferenciája esetén

$$(1) \quad V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}};$$

ahol $I_{\max}$ és $I_{\min}$ a 2. ábrán látható interferenciakép maximális, illetve minimális intenzitását jelenti. Az interferencia láthatóságának szélső értékei: teljes kioltás esetén

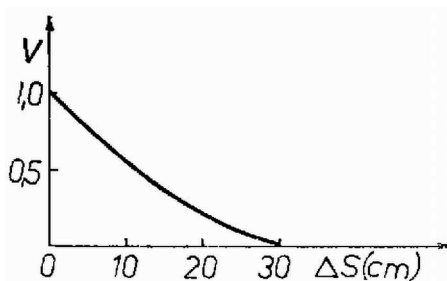
$$I_{\min} = 0, \quad V = 1,$$

ha pedig nincs interferencia

$$I_{\max} = I_{\min}, \quad V = 0.$$

Így az interferenciakép V láthatóságát 0 és 1 közötti számokkal jellemezhetjük.

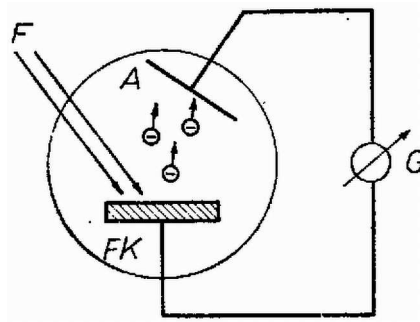
Végezzük el a következő kísérletet: a T_2 tükröt az azonos úthosszúságú helyzetből mozgassuk el úgy, hogy a fénynyalábok egyre nagyobb ΔS úthosszkülönbséggel interferáljanak (1. ábra) és vizsgáljuk az interferenciakép láthatóságának változását. Ekkor a 3. ábrán látható eredményt kapjuk, a láthatóság értéke fokozatosan csökken, és tipikusan néhány-szor 10 cm-es úthosszkülönbség esetén zérussá válik.



3. ábra. Az interferenciakép V kontrasztjának változása a ΔS úthosszkülönbség függvényében

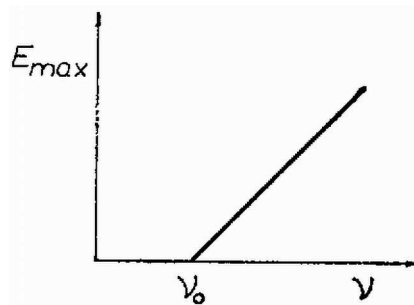
Ennek magyarázata az, hogy a fényforrásban az atomok egymástól függetlenül, kissé különböző rezgésszámú elemi hullámvonulatokat sugároznak ki, s csak ezen egyes hullámvonulatok önmagukkal való interferenciája adja az észlelt interferenciaképet. Egy ilyen hullámvonulat időtartama mintegy $10^{-8} - 10^{-9}$ s, és ha túl nagy az úthosszkülönbség, akkor a hullámvonulat két fele már nem találkozik egymással az interferométerben, az egyik rész már elhaladt az interferencia helyéről, amikor a másik odaér. Ez a kísérlet mutatja az atomok elemi hullámvonulat formájában való fénysugárzását. Az egyes atomok által kisugárzott hullámvonulatok függetlenek egymástól. A lézer fényforrásokban az atomok sugárzása egymással kötötten, szinkronban történik, a fenti kísérletben egy megfelelően választott lézer fényforrás alkalmazása esetén az interferenciakép V láthatósága nem csökken a tükrök között haladó fénynyalábok úthosszkülönbségének növelése esetén.

Az előzőekben vázolt interferenciajelenség minden kétséget kizáróan mutatja a fény hullámtermészetét. A fényelektromos jelenség, más néven a fotoeffektus azonban nem magyarázható a fény hullámtermészete alapján. A fotoeffektus lényege a következő: tekintsük a 4. ábrán lévő elrendezést, ahol a vákuumedényben lévő FK fémkatódot az F fénynyalábbal megvilágítjuk. Ekkor a katódból a fény hatására elektronok lépnek ki, amelyek elérik az A anódot és a G galvanométer áram folyását jelzi.



4. ábra. A fényelektromos jelenség;
 F fénynyaláb, FK katód; A anód,
 G galvanométer

A fotoeffektus tulajdonságait vizsgálva azt várnánk, hogy mennél nagyobb intenzitású fénnel világítjuk meg a katódot, annál nagyobb energiájú elektronok lépnek ki. A megfigyelések szerint azonban ez nem így van, ugyanis mennél nagyobb a fény intenzitása, annál több elektron lép ki, de az energiájuk csak a fény rezgésszámától, azaz a színétől függ. Vizsgálatok szerint van egy minimális ν_0 rezgésszámú fény, melynél kisebb ν rezgésszám esetén elektronok nem lépnek ki a fémből.



5. ábra. A fényelektromos jelenségnél kilépő elektronok E_{max} maximális energiájának függése a fény frekvenciájától

A kilépő elektronok maximális energiája viszont ν_0 fölött a ν rezgésszám növelésével arányosan növekszik (5. ábra). A kilépő elektronok maximális energiája (E_{max}) és a ν frekvencia közötti összefüggés formája

$$(2) \quad E_{max} = h(\nu - \nu_0),$$

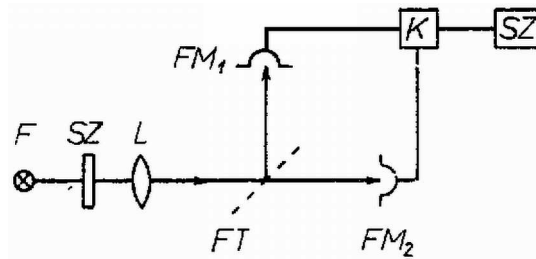
ahol h a Planck-féle állandó, értéke $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js. Einstein a következő magyarázatát adta a fotoeffektusnak: a (2) képletet az alábbi formában írta fel:

$$(3) \quad h\nu = A + E_{max}.$$

Azt mondta, hogy a fény $h\nu$ energiával rendelkező részecskékből, fotonokból áll. Egy $h\nu_0$ -nál nagyobb energiájú foton a fémkatódra esve onnan elektronokat vált ki úgy, hogy a foton energiájának egy része a fémből való A kilépési munka legyőzésére fordítódik, míg a maradék adja a kilépő elektron E_{max} kinetikus energiáját. Ha pedig $h\nu$ kisebb mint az A kilépési munka, akkor elektron kilépés nem lehetséges, mivel a foton energiája nem elegendő a kilépési munka elvégzéséhez. Ilyen módon a fotoeffektus jelensége a fény, mint részecskékből, azaz fotonokból álló sugárzás alapján nyert magyarázatot.

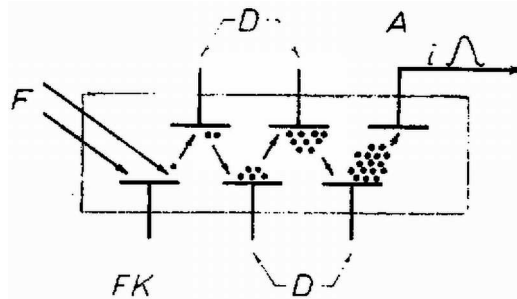
Fotonkísérletek

Az 1950-es években a Központi Fizikai Kutató Intézetben Jánossy Lajos professzor vezetésével végeztek kísérlet-sorozatot a fény természetének tisztázása céljából. A kérdés az volt, hogy feloldható-e az az ellentmondás, hogy az interferenciajelenség kétségkívül mutatja a fény hullámtermészetét, a fotoeffektus viszont csak a részecsketermészet alapján érthető. A fotonokkal mint részecskékként ugyanakkor az interferenciajelenség nehezen magyarázható.



6. ábra. A fény természetének vizsgálatára szolgáló kísérleti berendezés vázlata. F fényforrás, SZ szűrő, L lencse, FT féligáteresztő tükör, FM_1 , FM_2 fotoelektron-sokszorozó, K elektronikus koincidenciakör, SZ számláló

A kísérletekkel a következő kérdésre keresték a választ: ha egy foton egy féligáteresztő tükörre esik, akkor mi történik vele, áthalad rajta, visszaverődik róla vagy esetleg szétszakad? A kérdés vizsgálatára szolgáló kísérleti elrendezés vázlatát a 6. ábra mutatja. Az FT féligáteresztő tükör által létrehozott két nyalábbbán haladó fotonok detektálására az FM_1 , illetve FM_2 fotoelektron-sokszorozó szolgál. A fotoelektron-sokszorozó működésének elve látható a 7. ábrán. Az FK fotokatódból kilépő fotoelektront elektromos tér felgyorsítja, s ez a következő elektródából (D diódából) másodlagos elektronokat vált ki. Ezeket ismét gyorsítva több lépés után az egyetlen fotoelektronból végül is egy elektronlavina jön létre, amit a fotoelektron-sokszorozó után tett számlálóberendezés i áramimpulzusként számlál. (Az elektródák közötti gyorsító elektromos teret előállító elektromos kapcsolást nem tüntettük fel az ábrán.)



7. ábra. Fotoelektron-sokszorozó működésének elve. F fénynyaláb; FK fotokatód; D diódák; A anód; i kimenő áramimpulzus

Ilyen módon lehet a fénynyalábbokban haladó fotonokat észlelni, illetve számlálni. A 6. ábra kísérleti berendezésében a két fotoelektron-sokszorozó kimenetén megjelenő impulzusokat egy úgynevezett koincidenciakör (K) két bemenetére adjuk rá. Ez egy olyan elektronikus áramkör, amelyik akkor ad kimenőjelet, ha egy adott τ időn belül egyszerre mindkét bemenetre jel érkezik. A kimenő jel megjelenése esetén a berendezés két egyszerre beérkező impulzust, koincidenciát regisztrált, ezek számát az SZ számlálóval számláljuk.

A két nyalábbbán haladó fotonok általában véletlenszerűen váltanak ki fotoelektronokat. Előfordul azonban, hogy a két nyalábbbán haladó fotonok véletlenül egyszerre szólaltatják meg az FM_1 és FM_2 detektorokat, ezt véletlen koincidenciának nevezzük. A kérdés az, hogy a véletlen koincidenciákon felül észlelhetünk-e többlet koincidenciákat, amelyek hipotetikusán a féligáteresztő tükörön szétszakadt fotonokból származhatnának. A kísérletet először $\tau = 10^{-6}$ s felbontóképesség esetén végezték el, s azt az eredményt kapták, hogy csak véletlen koincidenciák vannak, ezeken felül többlet koincidenciákat nem észleltek, legalábbis a mérés 0,3%-os pontossága által megszabott mértékben. Ez az eredmény azt jelenti, hogy a fényforrás által kisugárzott fotonok a féligáteresztő tükörön vagy átmennek, vagy visszaverődnek, de nem szakadnak szét.

A 6. ábra kísérleti berendezését úgy módosítva, hogy a detektorok helyébe tükröket teszünk, Michelson interferométert kapunk. Felmerül a kérdés, hogy igen alacsony fényintenzitások esetén, akkor, amikor a Michelson interferométerben egyszerre csak egyetlen foton van jelen, fellép-e a fényinterferencia jelensége? Az ezen feltételnek megfelelő igen alacsony fényintenzitás esetén végzett kísérletben a fényinterferencia jelenségét észlelték és az interferenciákép intenzitáseloszlása és láthatósága nem különbözött attól, ami nagy intenzitásoknál kialakul. A kísérletet először 10 cm-es interferométer karhosszakkal végezték el, az interferencia azonban változatlanul fellépett akkor is, amikor a karhosszakat 14 m-re növelték.

A fotonkoincidencia és az alacsony intenzitású interferencia kísérlet együtt világosan mutatja a fény kettős természetét, a fénynek hullám- és részecskejellegűségei egyaránt vannak.

A fotonkoincidencia kísérletet később megismételték $\tau = 10^{-9}$ s felbontóképességgel, s ekkor mintegy 4%-os koincidencia-többletet észleltek a véletlen koincidenciák számához képest. Ezt a jelenséget azonban mind a hullám,

mind a részecske elmélet alapján meg lehet magyarázni. A hullámelmélet a fénynyalábot az egyes atomi hullámvonulatok összegzésével írja le, ahol az egyes hullámvonulatok egymással való interferenciája következtében erőteljes intenzitásingadozások lépnek fel, amelyek átlagos időtartama 10^{-9} s. Egy ilyen intenzitásmaximum idején megnő a fotoelektronok kiváltási valószínűsége, s ennek alapján elméleti számításokkal pontosan megadható az észlelt koincidenciaszám növekedés. A részecskeelmélet szerint előfordulhat, hogy az intenzitásmaximum környékén két foton van együtt a nyalábban. Egyik ezek közül visszaverődik a féligáteresztő tükörről, a másik áthalad rajta, s a két foton a két detektort egyszerre megszólaltatva hozza létre a többlet koincidenciákat.

Nemrégén kidolgozták az úgynevezett szemiklasszikus elméletet, ahol az anyagot a kvantumfizika törvényei alapján, a fényt pedig a klasszikus Maxwell-féle elektromágneses elmélet alapján tárgyalják. Ezen elmélet alapján a fotoeffektus pontos leírását sikerült megadni.

Ha megnézzük, hogy a fény kvantumelmélete pontosan hogyan épül fel, akkor azt látjuk, hogy az elmélet az elektromágneses tér összenergiáját elemi $h\nu$ nagyságú energiaadagokból építi fel, de nem állítja szigorúan, hogy ezek térben lokalizált, repülő részecskék. Az elmélet az összes fénnel kapcsolatos észlelt jelenséget, az interferenciát is helyesen írja le. A foton mint lokalizált részecske ezen elmélet szemléletes képének tekinthető, de a jelenségek helyes leírásához mindig az egzakt elméletből kell kiindulni.

A fény kettős természete a fizikának egyik, ma még nem megoldott alapvető kérdéséhez kapcsolódik, ahhoz, hogy meddig alkalmazható a szemiklasszikus elmélet, s hol kell elhatárolnunk azon jelenségek körét, amelyek csak a tiszta kvantumfizika alapján érthetők meg.

IRODALOM

Jánossy Lajos; Náray Zsolt: A fény kettős természetére vonatkozó vizsgálatok,
Fizika Szemle 8. 1. (1958).

Jánossy Lajos; Náray Zsolt: Az interferenciajelenség intenzitás-függetlenségétől,
Magyar Fizikai Folyóirat 6. 105 (1958).

Jánossy Lajos: A fény kettős természetének problémája,
Természettudományi Közöny 5. (92) 388 (1961).