

Dr. Körmendi Ferenc
 EGY FELFEDEZÉS TÖRTÉNETE

1923-ban Compton angol fizikus bebizonyította, hogy egy szabad, elektromos töltéssel rendelkező elemi részecske, például egy elektron vagy proton, nem nyelhet el egy elemi elektromágneses hullámot (úgynevezett fotont), amilyen a fény-, a rádióhullám vagy a Röntgen-sugárzás. Az elméleti bizonyítás alapjában véve igen egyszerű: tételezzük, hogy az elektron kezdeti nyugvó állapotban elnyel egy kis energiájú fotont, s ekközben p impulzusa, amely m tömegének és v sebességének a szorzata, $p = mv$, és $mv^2/2$ mozgásenergiája a foton E/c impulzusának, illetve E energiájának mennyiségével növekszik, vagyis

$$\begin{aligned} mv &= E/c \\ mv^2/2 &= E, \end{aligned} \tag{1}$$

ahol c a fény (a foton) sebessége. Feltételezzük, hogy az elektron v sebessége sokkal kisebb a fény c sebességénél.

Ha az első egyenletet elosztjuk a másodikkal, egy ellentmondásos eredményt kapunk:

$$v = 2c,$$

mert az m (nullánál nagyobb) tömeggel rendelkező elemi részecske, ebben az esetben egy elektron, sohasem rendelkezhet a fény c sebességénél nagyobb sebességgel, így $v = 2c$ -vel sem, ami a foton elnyelésének lehetetlenségét bizonyítja. Az elnyeléshez az elektron v sebességének c -nél kisebb értéke szükséges. (Megjegyezzük, maga Compton más bizonyítással szolgált, melyről később még említést fogunk tenni. A fenti bizonyítást csak az egyszerűség kedvéért írtuk fel, a könnyebb megértés érdekében.)

Egy elektromágneses hullám szabad elektron által történő elnyelésének lehetetlenségét természetesen jól ismert fizikai törvények szabják meg. A természetben egy „zárt” rendszernek, amelyet egy elektron és egy foton együtt képez, az összimpulzusa, (vagyis kezdeti impulzusaik összege) és összenergiája nem változhat a részecskék kölcsönhatása folyamán, mert a semmiből nem keletkezhet sem energia, sem impulzus. Mivel egy foton meghatározott E energiája mellett annak E/c impulzusa igen kicsi a fény c sebességének nagyon magas számértéke miatt, a foton elnyelésekor az elektron energiája az elektromágneses hullám E energiájával növekszik, ami magával vonja impulzusának jelentős növekedését is, amit viszont a kis impulzusú foton nem biztosít. Így lényegében az összimpulzus megmaradása nem teljesülhet e fizikai folyamatban.

Az egyetlen lehetséges folyamat, mint ahogyan azt Compton felismerte, a foton rugalmatlan szóródása a szabad elektronon, ami azt jelenti, hogy az elektron elnyel egy bizonyos E_1 energiájú fotont, de ugyanakkor ki is bocsát egy másik, kisebb (E_2) energiájú elektromágneses hullámot, biztosítva ezzel az impulzus és energia megmaradását. Az (1) egyenletek erre az esetre a következőképpen alakulnak, hátrafelé kibocsátott fotonnal:

$$\begin{aligned}mv &= (E_1 + E_2)/c \\mv^2/2 &= E_1 - E_2\end{aligned}\tag{2}$$

Ebből

$$v = 2c (E_1 - E_2)/(E_1 + E_2)$$

adódik, ahol az elektron v sebessége c -nél kisebb, ha a kibocsátott hullám E_2 energiája megközelítőleg egyenlő az elnyelt hullám E_1 energiájával.

Comptont ezért a jelentős felfedezéséért Nobel-díjjal tüntették ki. A bizonyítás arra utalt, hogy a fénynyalábba vagy Röntgen-sugárzásba került szabad elektron vagy proton nem gyorsulhat fel jelentősebben, és nem is bocsáthat ki nagyobb mennyiségű energiát, amit az akkori, alacsony intenzitású fényforrásokkal, illetve Röntgen-sugárzással végzett kísérletek teljes egészében igazoltak.

Ez a felfogás nem is változott egészen a hatvanas évekig, a nagyon nagy intenzitású fényforrások, a lézerek feltalálásáig.

Ekkor a kutatók új kísérletekbe kezdtek lézersugár segítségével, abban a reményben, hogy sikerül bebizonyítani, Compton elmélete nem elég általános, és lézerekkel lehetséges részecskegyorsítókat készíteni, vagy esetleg úgynevezett „scatron”-típusú szabadelektron-lézer erősítőket kidolgozni, melyek gyakorlati alkalmazása igen fontos. A „scatron” angol eredetű szó, elektromágneses hullámokat szóró berendezést jelent, amelyben a fotonok elektronokon szóródnak, miközben energiájuk rendszerint jelentős mértékben megváltozik.

Az első kísérleteket erős lézerekkel egy magyar-francia kutatócsoport kezdte a Magyar Tudományos Akadémia Központi Fizikai Kutatóintézeté és a franciaországi Saclay Atomkutató Intézet együttműködésének keretein belül.¹ A kísérleti eredmények igen érdekesek voltak, ám értelmezésük, megmagyarázásuk nagy nehézségekbe ütközött, mivel senki sem tudta elméletileg bebizonyítani, hogy—Compton eredményeivel ellentétben— az elég nagy intenzitású sugárzás lehetővé teszi a szabad elektronoknak a fényhullámok elnyelését és ezáltal a gyorsulását. Ekkor a magyar—francia kutatócsoport hozzám fordult azzal a kérelemmel, hogy kapcsolódjak be a munkájukba és kísérleljem meg bebizonyítani Compton elméletének részleges természetét, valamint a fotonok szabad elektronok által történő elnyelésének gyakorlati lehetőségét, ami megmagyarázta volna az elemi részecskék gyorsulását elég erős lézersugárzásban. Az 1975 és 1980 között végzett elméleti kutatómunka nagyon szerény eredményeket hozott. Sokkal inkább intuitívan, mint matematikai módszerekkel, „ráéreztem” — ami később helyesnek bizonyult —, hogy a lézersugárzásba került szabad elemi részecske akkor nyelhet el egy fotont (elektromágneses hullámot), ha a sugárzás jelenlétével kiváltott rezgési energiája eléri egy foton energiáját. Ez a feltevés csak bizonyítatlan elképzelésként merült fel; ám mivel logikusnak tűnt, sehogyan sem tudtam szabadulni tőle.

1980-ban részt vettem Budapesten egy nemzetközi kongresszuson, amelyen e témáról volt szó, s több fizikus is sikertelen kísérletet tett e probléma megoldására. Így például az egyik orosz kutató, hogy illusztrálja számításait, felrajzolt a táblára két párhuzamos vonalat, amelyek a lézersugárzást voltak hivatva jelenteni, majd e két vonalon kívül az elemi

részecskét egy ponttal jelölte meg. Ebből a pontból a két párhuzamos vonalra egy egyenest húzott, ami a részecske mozgási pályáját adta meg, amint az belép a sugárnyaládba. Szerinte a párhuzamosokkal jelölt sugárnyalábon áthaladó, majd abból kilépő részecske a sugárzással való kölcsönhatás következtében különböző szögek alatt szóródhat, s ezt úgy jelölte meg, hogy a sugárzásból kilépő részecskét képviselő pontból több, különböző irányú egyenes vonalat húzott meg. Az orosz fizikus szavaira csak félig figyelve rátekintettem a felrajzolt képre, és azt állapítottam meg magamban, hogy valami nincs rendben a képpel, hiszen ha egy elektron lép be a fénynyaládba, csak egy is léphet ki belőle, nem pedig több, mint ahogyan az egy pontból különböző szögek alatt meghúzott egyenes vonalak mutatják. Természetesen az előadó e vonalakat nem úgy értelmezte, mint több elektron kilépését a fénynyaládból, hanem mint egyetlen elektron különböző irányokba való szóródásának lehetőségét. Én azonban képzeletben „helyére tettem” a képet úgy, hogy csak egy elektron hagyja el a fénynyalábot, de ugyanakkor egyszerre több foton (hullám) is szóródik rajta. Ezekben a pillanatokban éreklődött meg bennem az a felismerés, hogy több foton egyidejű rugalmas szóródása esetén egy elektronon mindegyikük átad annak egy bizonyos kis mennyiségű impulzust, energiaátadás nélkül, és így a „sok kicsi sokra megy” elve alapján a sok foton együttesen elég nagy mennyiségű impulzust ad át a szabad elektronnak ahhoz, hogy az összimpulzus és az összenergia megmaradásának törvénye egyszerre teljesüljön — hiszen az (1) egyenletek éppen impulzushiányt mutatnak! —, ami egyben lehetővé teszi egy vagy több foton elnyelését is az elektron által. Ezt felismerve azonnal otthagytam az előadást és lakásomra siettem, majd nekikezdtem a számításoknak. Az elemi bizonyítás valójában olyan egyszerű, hogy akár egy középiskolai diák is felállíthatja. Ez annál is érdekesebb, mivel erre az egyszerű, középiskolai szintű bizonyításra sem a Nobel-díjas Compton nem jött rá, sem utána senki, magas is előzőleg öt évig birkóztam e kérdéssel, teljesen sikertelenül. Végül — egy helyesen felrajzolt kép téves értelmezésének köszönhetően — teljesen „véletlenül” jöttem rá a megoldásra.

Az (1) képletek úgy módosulnak a bizonyításban, hogy például n számú rugalmasan visszafelé szóródó foton esetében azok $2nE/c$ impulzust adnak át az elektronnak, az egy elnyelt foton pedig E/c impulzust, vagyis (1) helyett most

$$\begin{aligned} mv &= (2n + 1) E/c \\ mv^2/2 &= E \end{aligned} \tag{3}$$

adódik, ami, elosztva az első egyenletet a másodikkal

$$v = 2c/(2n + 1)$$

eredményhez vezet. Láthatjuk, már $n=1$, azaz egyetlen rugalmasan hátrafelé szóródó hullám is biztosíthatja egy másik hullám egyidejű elnyelését, mivel $n = 1$ mellett az elektron v sebessége kisebb a fény c sebességénél, ellentétben Compton részleges esetet leíró (1) képletével. A számítási eredményeket (a fentiekől különböző és általánosabb formában) 1981-ben jelentettem meg egy nemzetközi folyóiratban,² s nagy érdeklődést váltottak ki a fizikusok körében. Röviddel cikkem megjelenése után izraeli, brazil, kanadai, majd európai fizikusok is átvették az általam vázolt több fotonos szóródási modellt, ami tulajdonképpen egy lépést jelentett előre a nem lineáris kvantumelektrodinamika fejlődésében. Kísérleti vonatkozásban ugyanakkor bátorítást adott azoknak a fizikusoknak, akik lézerek segítségével részecskegyorsítókat terveztek építeni, vagy más téren akarták alkalmazni ultra-intenzív lézereiket (csezköről később még szólni fogunk). Mindenesetre izgalmas napokat jelentett

számomra a: az idő, amíg eredményeimre visszajelzések érkeztek külföldi kutatóktól, különböző laboratóriumokból.

Ezzel természetesen az elméleti és kísérleti kutatások nem fejeződtek be, valójában csak elkezdődtek. A megjelölt eredmények ugyanis csak a szükséges, de nem az elégséges feltételeket mutatták meg ahhoz, hogy a leírt folyamat valóban kísérletileg is megfigyelhető legyen. A kvantumfizikában egy jelenség lefolyásának csak a valószínűsége állapítható meg, számítható ki. Amennyiben ez a valószínűség elég nagy, a jelenség gyakorlatilag is megfigyelhető. A kvantummechanikai számítások azonban nagyon bonyolultaknak bizonyultak, elsősorban matematikai értelemben. Teljes három évi intenzív munka következett annak kiszámítására, milyen nagy intenzitású lézersugárzás szükséges ahhoz, hogy az elektronok elkezdjenek gyorsulni a sugárnyalámban. Nagy meglepetésemre a számítási eredmények korábbi intuitív feltételezésemet igazolták, mely szerint a szabad elektronok akkor kezdik elnyelni a lézer által kibocsátott elektromágneses hullámokat (fotonokat), amikor az elektronok rezgési energiája a lézersugárzásban eléri egy foton energiáját. Az 1984-ben megjelent számítási eredmények³ szerint kisenergiájú hullámok esetében van egy küszöbintenzitás, amely alatt a jelenség lefolyásának valószínűsége gyakorlatilag nulla, felette pedig ugrásszerűen megnövekszik. Mint később kitudódott, a jellegzetesség nagy fontosságú a kozmológiában is, mivel a világtérben jelenlevő fotonok legtöbbször kis energiájú, illetve hosszú hullámú, ami rányomja bélyegét a hullámok, az úgynevezett háttéri sugárzás és az űrben mozgó töltött elemi részecskék kölcsönhatására is. Ugyanakkor nagy energiájú fotonokkal való kölcsönhatáskor ilyen éles küszöb nem jelentkezik. Az említett munka megjelenése után a tudományos világ végleg elfogadta az elektromágneses hullámok szabad, elektromos töltéssel rendelkező részecskék által való elnyelésének lehetőségét.

E felfedezés keretein belül különösen fontos az elektromágneses hullámok energiaváltozásának előidézhetősége az általam leírt folyamat és az úgynevezett Doppler=effektus segítségével. Ennek elemzését egy újabb tudományos munkában adtam közre.⁴ Ismeretes dolog, hogy olyan nagy intenzitású lézerek előállítása, melyek (az emberre veszélyes) Röntgen-sugárzást bocsátanak ki — a hadászatban sokszor emlegetett lézerágyúk —, nagy nehézségekbe ütközik. Egyedi Röntgen-hullámokat úgy lehet kapni, hogy például az elektronokat részecskegyorsítókkal nagyon felgyorsítják, majd ezeket ütköztetik kisebb energiájú elektromágneses hullámokkal, például lézertérrel, aminek folytán a gyors elektronok átadják a hullámoknak (fotonoknak) energiájuk egy részét, s ennek következtében egy foton energiája jelentősen megnövekszik, amit Doppler=effektusnak neveznek. Röntgen-lézerek készítéséhez azonban elengedhetetlen a nagyszámú foton egyidejű megjelenése. Ezt akkor érhetjük el, ha az általam megadott küszöbintenzitás feletti erősségű lézersugárzás ütközik a felgyorsított elektronokkal; ilyenkor egyidejűleg sok foton szóródik, ugyanakkor energiájuk is megnövekszik, tehát teljesülhet két feltétel a Röntgen-lézerek előállításához. Az ilyen megoldás a „scatron” típusú lézerezősítők családjába sorolható.

Amint látjuk, egy véletlen felfedezés az újabbnál újabb felismerések sorozatát indította el. Bebizonyosodott, hogy a szabad, elektromosan töltött részecskék által történő lézertér elnyelése elsődrendű fontosságú az úgynevezett lézercs fúzió megvalósításánál is. A lézercs fúzió célja az olcsó energiatermelés hidrogén atommagok egyesülésekor előálló energiafelszabadulás segítségével. Amikor ugyanis két atommag egyesül, energia szabadul fel, de — ellentétben az atommagok szétesésével, amit a mai atomvillanytelepek üzemeltetésére alkalmaznak — veszélyes sugárzások nélkül. A lézercs fúzió lényege az, hogy a hidrogén-atommagokra lézertérrel bocsátanak, amely több száz millió fokra emeli fel a hidrogén hőmérsékletét igen rövid idő alatt, aminek folytán az atommagok összeütköznek és egyesülnek, energiafelszabadulás közben. A hidrogén természetesen csak akkor hevül fel ilyen

magas hőmérsékletre, ha a lézercsőny nagymértékben és hasznosan nyelődik el. Itt mutatkozik meg egyszermind az általam felállított és részletesen elemzett fotonelnyelési modell jelentősége a lézercső fúzió elérésénél. Ezekről a több fotonos jelenségekről a lézercső fúzió esetében nemzetközi konferenciákon számoltam be.⁵

A további kutatások folyamán kiderült az is, hogy amikor elég nagy számú, egyenlő energiájú foton szóródik egyidejűleg az elemi részecskéken, ezek a fotonok arra ösztönzik egymást, hogy mind ugyanabba az irányba szóródjon, egyenlő energiával. Az ilyen fényimpulzus tulajdonképpen úgy viselkedik, mint egy szilárd test, amely ütközéskor visszapattan attól a tárgytól, amelyiknek nekiütközött, megtartva korábbi jellegzetességeit. Ha tehát alacsony intenzitású fénynyalábot képező fotonokat figyelünk meg, azok úgy viselkednek, mint egy foton-gáz, majd amikor növeljük az intenzitást, illetve az egyenlő energiájú fotonok számát, „halmazállapot-változás” lép fel, a foton-gáz „megszilárdul”; s az ilyen fényimpulzus természetesen különös fontosságú a fizikában és technikában. A szilárd fény alkalmas információk átvitelére olyan közegekben is, mint például az ionizált gáz (a plazma), amelyekben a közönséges fény szétszóródik vagy elnyelődik, aminek következtében az információ elveszik.

Látjuk, milyen messzemenő következtetésekre, eredményekre jutottunk egy figyelmenlenségből eredő tévedés szerencsés következményeként. Az elmúlt tíz év alatt ezekből a kutatási eredményekből az úgynevezett nem lineáris kvantum—elektrodinamika új területe fejlődött ki, melyről tudományos disszertációk készülnek, gyakorlati alkalmazásokkal és újabbnál újabb kutatási területek feltárásával párosulva.

Jegyzetek:

- ¹ Lompre L., Mainfray G., Manus C., Farkas Gy., Phys. Rev. Lett. 43, 1243, 1979.
- ² Körmendi F., Optica Acta, 28, 1559, 1981.
- ³ Körmendi F., Optica Acta, 31, 301, 1984.
- ⁴ Körmendi F., Laser and Particle Beams, 8, 451, 1990.
- ⁵ Körmendi F., XVI-th European Conference on Controlled Fusion, Venice, 1989.

Rezime

Compton je 1923. godine dokazao da slobodna čestica sa električnim nabojem (npr. jedan elektron ili proton) nije sposobna apsorbovati osnovni elektromagnetski talas (foton). Teoretsko dokazivanje ove teže je prilično jednostavno i držalo se sve do otkrivanja lasera. Pa i dalje . . . Jer iako se otdada smatralo da bi dovoljno jaka emisija omogućavala slobodnim elektronima apsorbovanje i ubrzanje fotona, niti pojačala tipa scattron nisu dala eksperimentalne rezultate kojima bi se mogla oboriti Comptonova davnašnja teza. Autor opisuje njegov, dobrim delom intuitivni put do otkrića da je ovaj događaj moguć u slučaju elastičnog, istovremenog delovanja više fotona čiji se impulsi zbrajaju, i sledstveno ovome vibraciona energija elektrona u laserskom zraku dostigne energiju jednog fotona. Ovo otkriće je bila značajna pretpostavka daljeg rada na laserskoj fuziji i u drugim disciplinama fizike i tehnike.

Summary

In 1923, Compton proved that free particles with electric charge (e.g. an electron or a proton) cannot absorb basic electromagnetic waves (photons). The theoretical foundations were rather simple, and they were convincing until the discovery of the laser, and even further. There was a conjecture according to which a strong emission might enable the free electrons to absorb and accelerate the photons, however, even amplifiers like scatron were unable to yield results which could reverse Compton's thesis. The author describes his — mostly intuitive — path to the discovery which enabled this reversal, relying on flexible simultaneous activity of several photons the impulses of which were added. As a result, the vibration energy of electrons in a laser beam has reached the energy of a photon. This discovery has become an important element of further research on laser fusion, and it has played an important role in other areas of physics and technic as well.