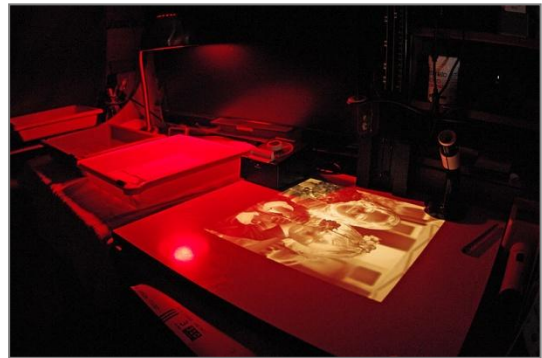


◀	Tartalom	Fogalmak	Törvények	Képletek	Lexikon	▶
---	----------	----------	-----------	----------	---------	---

A fény kettős természete. A foton

A fénytani fejezetekben láttuk, hogy *a fény terjedés közben transzverzális elektromágneses hullámként viselkedik*: A fénytörés, az interferencia, az elhajlás, a polarizáció csak a fény hullámtermészete alapján értelmezhető. A XIX. század végén azonban egyre több olyan fénnel kapcsolatos jelenséget ismertek fel, amely mindezekkel nem volt összeegyeztethető. Vizsgáljunk meg két ilyen jelenséget!

A hagyományos fotólaborokban a fényképezők vörös színű világítás mellett készítették a fekete-fehér nagyításokat, a vörös fény ugyanis nem okoz feketedést a fotópapíron. Ha a folytonos színeképet egy fekete-fehér fotópapírra vetítjük, majd a papírt előhívjuk, azt látjuk, hogy az ibolya és a kék fény



feketedést okoz, a vörös és a narancs viszont nem. Ezek szerint *a fotópapír fényérzékeny rétegében a vörös fény nem okoz kémiai változást, a kék és az ibolya viszont igen*.



Ha egy fotocellára feszültséget kapcsolunk, és megmérjük az áramerősséget, miközben a fotocellát különböző színű fénnel világítjuk meg, akkor azt tapasztaljuk, hogy a kék fény jól észlelhető fotoáramot hoz létre. Ha azonban a fotocellát vörös fény éri, akkor nem folyik áram az áramkörben. Ezek szerint *a fotokatód felületén a vörös fény nem idéz elő elektronkilépést, a kék viszont igen*.

További kísérletek és megfigyelések is azt mutatják, hogy a fény által előidézett változások létrejöttében a fény színének, illetve a színt meghatározó frekvenciának döntő szerepe van. Az ismertetett kísérletekben *mindenütt a nagyobb frekvenciájú fény váltott ki hatást* (feketedés, elektronkilépés).

Az infravörös fényvel kapcsolatban már szó volt róla, hogy vannak olyan fotocellák, amelyek az infravörös fényre is érzékenyek. A tapasztalatok szerint az ilyen fotocellákon vörös fénynél is folyik fotoáram. Mindez azt jelzi, hogy a vörös fény is rendelkezik energiával, de ez bizonyos esetekben (közönséges fotopapír, közönséges fotocella) mégsem elegendő a kölcsönhatás létrejöttéhez. Ilyenkor a megvilágítás erősségének vagy időtartamának a növelése sem vezet eredményre, noha ekkor a fény több energiát ad át.



A fenti ellentmondás azzal oldható fel, ha a fényt részecskeként modellezzük: *A fényt a fényforrás nem folyamatosan, hanem kis fényrészecskék formájában sugározza ki, és a fényelnyelés ugyanilyen fényrészecskék útján történik.* Az ilyen fényrészecske görög eredetű neve *foton*. Elméleti megfontolások szerint: *A foton energiája egyenesen arányos a fény frekvenciájával, azaz a foton energiájának és a fény frekvenciájának hányadosa állandó.* Képlettel:

$$\frac{E}{f} = \text{állandó.}$$

Ezt az állandót *Planck-állandónak* nevezzük, jele: *h*. Mérések, illetve elméleti megfontolások alapján a Planck-állandó értéke:

$$h \equiv 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js.}$$

Eszerint:

$$\frac{E}{f} = h.$$

A foton energiája az előző összefüggésből kifejezhető. Eszerint az f frekvenciájú fény egy fotonjának energiája:

$$E = h \cdot f \tag{1}$$

Az előzőekben ismertetett kísérletek tapasztalatai a fény részecskemodelljével következőképpen értelmezhetők. A fotopapír fényérzékeny rétegében ezüst-bromid van. A feketedés akkor következik be, ha a negatív bromid-ionból a fény hatására egy elektron kilép, és így az ezüst-bromid kötése felbomlik. A kilépéshez szükséges energiát az elektron a fotontól kapja. Hasonló folyamat megy végbe a fotocella katódján: a katód

egy elektronja a fotonnal való kölcsönhatás következtében kiszakad a fémrácsból. Mindkét esetben *csak akkor következhet be elektronkilépés, ha a foton által átadott energia fedezi az elektron kiszakításához szükséges W_{ki} kilépési munkát, azaz*

$$E_{\text{foton}} > W_{ki}.$$

A foton energiáját behelyettesítve:

$$h \cdot f > W_{ki}. \quad (2)$$

Ebből adódik, hogy az elektronkilépés csak akkor következik be, ha a fény frekvenciájára teljesül az

$$f > \frac{W_{ki}}{h}$$

egyenlőtlenség. Mivel a kék fény frekvenciája viszonylag nagy, a fenti feltétel teljesül. A kék fény hatására tehát a fotopapír megfeketedik, illetve a fotocellán át áram folyik. A vörös fény frekvenciája viszont lényegesen kisebb, ezért az előző egyenlőtlenség nem teljesül. A vörös fény hatására tehát nem jön létre feketedés a fotópapíron, illetve nem folyik áram a fotocellán keresztül.

A fényelektromos hatásra felírt (2) egyenlőtlenség az elektron mozgási energiájának figyelembevételével egyenlőséggé is átalakítható:

$$h \cdot f = W_{ki} + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2.$$

Ezt az összefüggést *fényelektromos egyenletnek* nevezzük.

A *foton tömege* az $E = h \cdot f$ összefüggés, illetve a foton energiája és tömege közötti kapcsolatot megadó $E = m \cdot c^2$ képlet alapján határozható meg. A két egyenlet összehasonlításával adódik, hogy

$$m \cdot c^2 = h \cdot f.$$

Ebből az f frekvenciájú fény fotonjának tömege:

$$m = \frac{h \cdot f}{c^2}. \quad (3)$$

A foton lendülete a tömegének és sebességének szorzata. Mivel a foton sebessége c , így az előző összefüggést felhasználva a foton lendülete is kiszámítható:

$$I = m \cdot c = \frac{h \cdot f}{c^2} \cdot c = \frac{h \cdot f}{c}.$$

Eszerint az f frekvenciájú fény fotonjának lendülete:

$$I = \frac{h \cdot f}{c}. \quad (4)$$

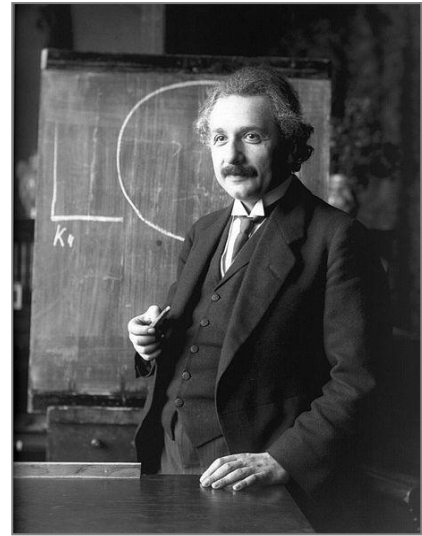
Az előzőek szerint a fotonnak tömege és lendülete is van. Ezt a megállapítást kísérletek és mérések is igazolták. (Lásd a *Kiegészítésekben!*) Eszerint a fénynek kettős természete van: bizonyos körülmények között hullámtulajdonságokat mutat, más jelenségek viszont csak akkor értelmezhetők, ha a fényt részecskék összességének tekintjük.

Tudjuk, hogy a látható színek tartományon kívül más hullámhosszúságú elektromágneses hullámok is vannak. (rádióhullámok, infravörös fény, ultraibolya fény röntgensugárzás stb.) A tapasztalatok szerint a fenti megállapítások és összefüggések nem csak a látható fényre vonatkoznak, hanem az összes elektromágneses sugárzásra: *Az elektromágneses sugárzásnak kettős természete van, bizonyos körülmények között hullámtulajdonságokat, más jelenségeknél pedig részecsketulajdonságokat mutat.*

Kiegészítések

1. A fotocellában az elektron elvileg két fotonból is vehetne fel energiát, és így a vörös fénynél is létrejöhetne elektronkilépés. Annak valószínűsége azonban, hogy két foton egyszerre lép kölcsönhatásba ugyanazzal az elektronnal, gyakorlatilag nulla. Ha viszont a két foton egymás után érkezik, akkor az első fotonból felvett energiát az elektron a második foton beérkezéséig leadja.
2. A W_{ki} kilépési munka függ a katód anyagától. Az infravörös fényre is érzékeny fotocellában a katód anyaga olyan, hogy abból az elektron kis munka árán is kiszakítható. Az elektronkilépéshez szükséges energiát így az infravörös és a vörös fény fotonjai is biztosítani tudják. Hasonló a helyzet az infravörös fényre érzékenyített filmeknél is.

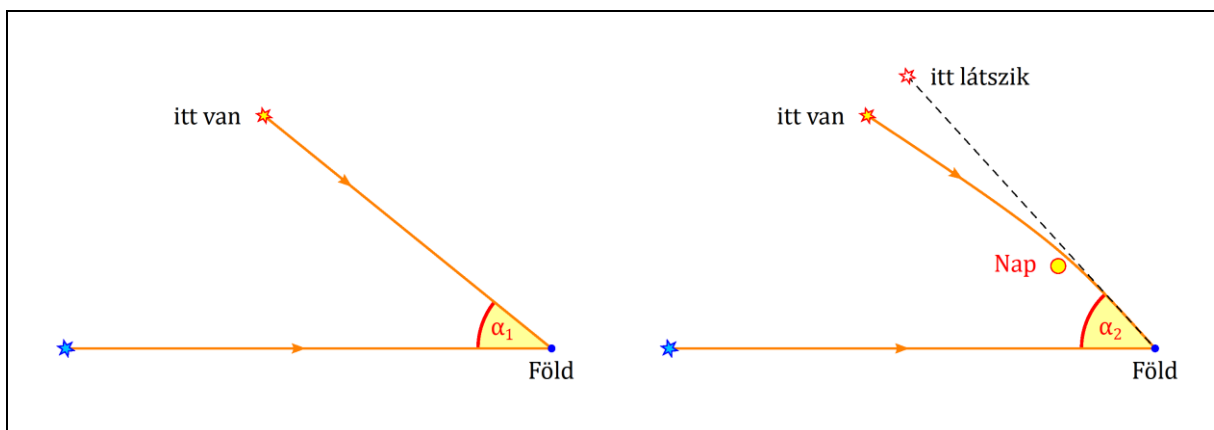
3. A fényelektromos jelenség magyarázatát Albert *Einstein* (1879–1955) német fizikus adta meg az *Annalen der Physik* című német fizikai folyóirat ugyanazon 1905-ös számában, amelyben a relativitáselmélettel foglalkozó munkája is megjelent. A cikkben szerepel a fényelektromos egyenlet is. Einsteintől származik a foton elnevezés is. Einstein ezért a munkájáért kapta meg 1921-ben a Nobel-díjat, nem pedig a relativitáselméletéért. (A képen Einstein 1921-ben, a Nobel-díj átvételének évében.)



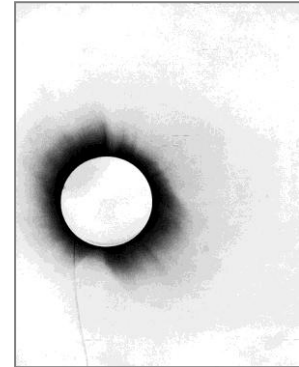
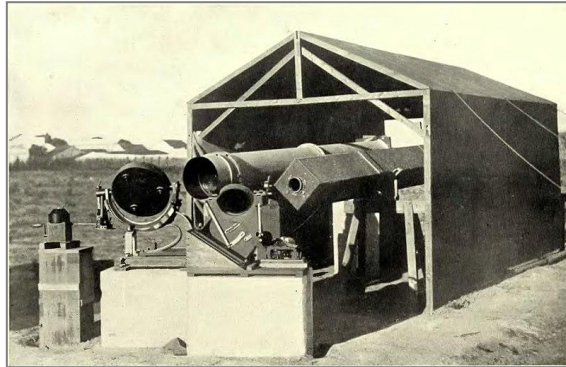
4. Azt a gondolatot, hogy a testek az elektromágneses sugárzást apró adagokban sugározzák ki, Max *Planck* (1858–1947) német fizikus már 1900-ban felvetette. Ennek alapján levezette az izzó testek által kibocsátott sugárzások törvényeit. Ezek a törvények teljes összhangban voltak a mérésekkel. Planck ezzel a munkájával alapozta meg a modern fizika másik új ágát, a kvantummechanikát. (A kvantum latin eredetű szó, jelentése mennyiség, adag.) Planck ezért a munkájáért 1918-ban Nobel-díjat kapott.



5. Tömege miatt *a fotonra is hat a gravitáció*. A Nap közelében haladó fotonok ezért görbe vonalú pályán haladnak. A Nap irányában lévő csillagok emiatt máshol látszanak, mint akkor, amikor a Nap nem a közelükben jár. Mindez közvetve a relativitáselmélet helyességének egyik bizonyítéka.

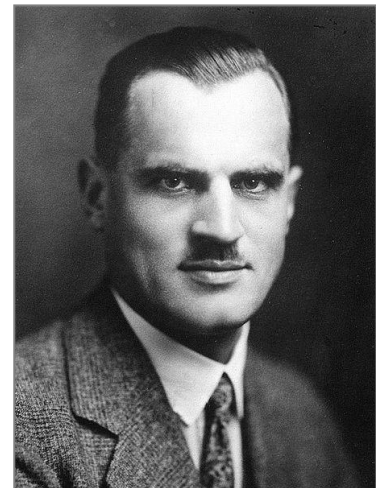


Ezt a jelenséget először Arthur *Eddington* (1882–1944) angol matematikus, csillagász figyelte meg 1919-ben egy napfogyatkozás alkalmával. A jelenség azért észlelhető csupán napfogyatkozások idején, mert máskor a Nap irányába eső csillagok a vakító fény miatt nem látszanak.



A napfogyatkozás megfigyelésére két expedíciót szerveztek, az egyiket a brazil Sobral városába, a másikat az Afrika nyugati partja mentén fekvő Príncipe szigetére. A fenti képeken a sobrali megfigyeléshez használt műszerek, illetve az ott készült egyik felvétel (negatív) látható. (A teljes méretű képen megfigyelhetők a vizsgált csillagok is.) Eddington 1932-től a Magyar Tudományos Akadémia tiszteleti tagja volt.

6. Arthur *Compton* (1892–1962) amerikai fizikus 1923-ban fedezte fel, hogy a paraffinról visszaverődött röntgensugárzás frekvenciája kisebb, mint a beeső sugárzásé. A jelenséget az okozza, hogy a röntgensugár fotonjai a paraffinban levő elektronokkal ütköznek, és eközben lendületük egy részét átadják az elektronnak. A visszaverődött fotonok lendülete, és így a (4) képlettel összhangban a frekvenciája is kisebb lesz. A mérések szerint az elektron-foton ütközésre érvényes a lendületmegmaradás tétele, így jogosan beszélhetünk a foton lendületéről is. Compton ezért a felfedezéséért 1927-ben fizikai Nobel-díjat kapott.



7. A testet érő fénysugárzás egy része elnyelődik, másik része visszaverődik róla. Az elnyelt fotonok rugalmatlan, illetve a visszavert fotonok rugalmas ütközésének következtében a fény nyomást fejt ki a testre. Ezt a nyomást *fénynyomásnak* vagy *sugárnyomásnak* nevezzük. A fénynyomás kísérletileg is kimutatható, és nagysága a

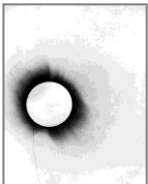

mérések szerint megegyezik a fotonok elnyelődése, illetve visszaverődése során bekövetkező lendületváltozásból kiszámítható értékkel.

8. *Az ultraibolya sugárzás* című fejezetből tudjuk, hogy az ultraibolya fény bőrrákot okozhat. A látható fénynél és az infravörös fénynél ilyen hatás nincs. Ennek az az oka, hogy *az ultraibolya fény fotonjainak energiája az $E = h \cdot f$ összefüggésnek megfelelően jóval nagyobb, mint a látható és az infravörös fény fotonjainak az energiája*. Ez pedig elég lehet ahhoz, hogy a bőrsejtekben roncsolja a DNS-t, és ezzel rákot okozó genetikai változást idézzen elő bennük. A látható és infravörös fény fotonjai azonban mindehhez már nem rendelkeznek elég energiával. A mobiltelefonok mikrohullámú sugárzásának, illetve a rádióhullámoknak a frekvenciája még kisebb, így ezek fotonjai a még kisebb energia miatt szintén nem okozhatnak ilyen problémát.

Az ultraibolya fénynél nagyobb frekvenciájú elektromágneses sugárzások fotonjainak viszont az UV-fény fotonjainál is több energiájuk van, továbbá mélyebbre is behatolhatnak. Ezért például a *röntgensugárzás még veszélyesebb az élő szervezetre*. (Szerencsére a roncsolt DNS-sel rendelkező sejtek többnyire életképtelenek, illetve osztódásképtelenek, és csak elenyésző hányadukból alakulhat ki rosszindulatú daganatsejt. A daganatsejtek egy részét pedig a szervezet immunrendszere is képes elpusztítani.)

Képek jegyzéke

	Fényképezési sötétkamra vörös fényel W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dark_room.jpg
	Zöld-kék-ibolya tartományra érzékeny fotocella W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phototube-ESR499_hg.jpg
	Infravörös tartományra is érzékeny fotocella W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phototube1_hg.jpg
	Einstein arcképe (Nobel-díjának évében, 1921-ben) W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_1921_by_F_Schmutzer.jpg
	Planck arcképe W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Max_Planck_(Nobel_1918).jpg
	Eddington mérésének elve © http://www.fizikakonyv.hu/rajzok/0677.svg
	Eddington arcképe (1900) W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prof._Arthur_S._Eddington_LCCN2014718210.jpg
	Eddington napfogyatkozáskor használt távcsöve (Sobral, Brazília, 1919) W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eclipse_instruments_at_Sobral.jpg

	<p>Napfogyatkozás képe csillagokkal (negatív kép, Sobral, Brazília, 1919) W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1919_eclipse_negative.jpg</p>
	<p>Compton arcképe W https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arthur_Compton_1927.jpg</p>

Jelmagyarázat:

- © **Jogvédett anyag**, felhasználása csak a szerző (és az egyéb jogtulajdonosok) írásos engedélyével.
- W A *Wikimedia Commons*-ból származó kép, felhasználása az eredeti kép leírásának megfelelően.