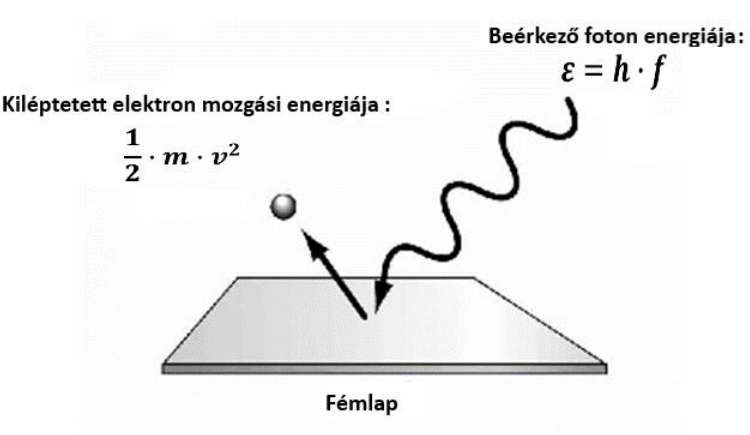
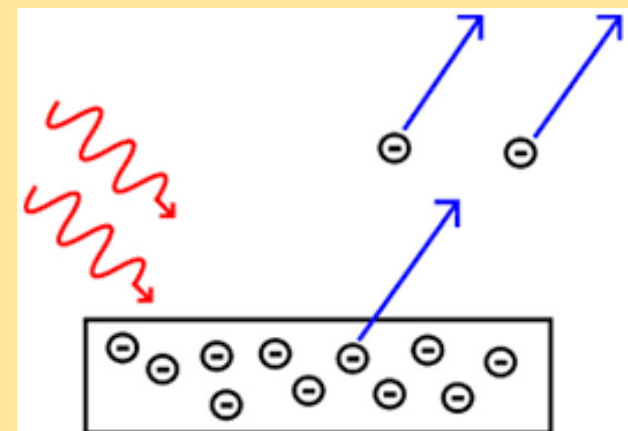
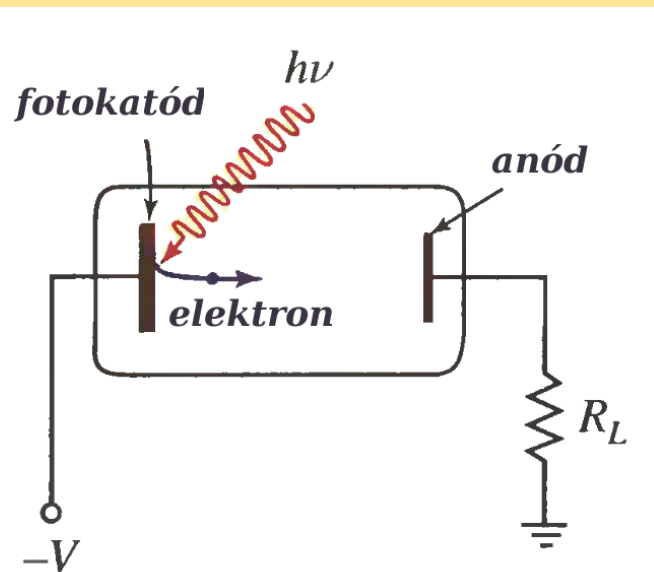


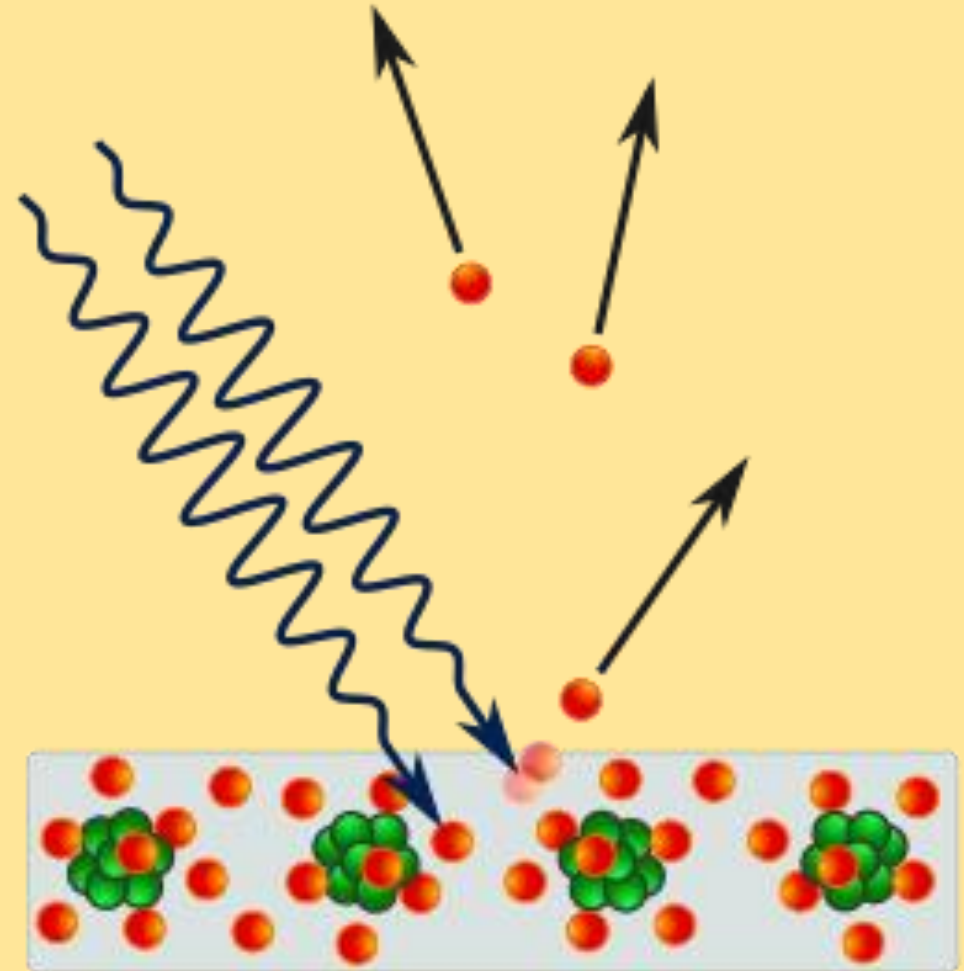
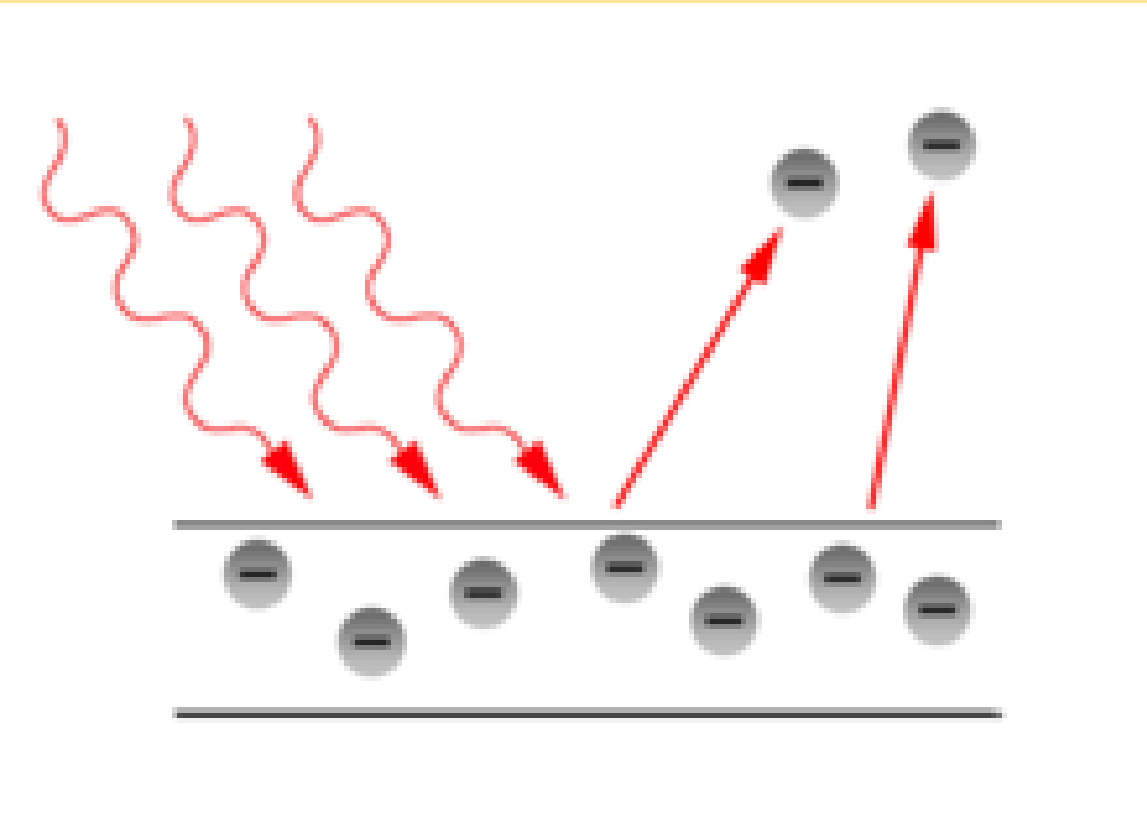


Fényelektromos hatás

Foton

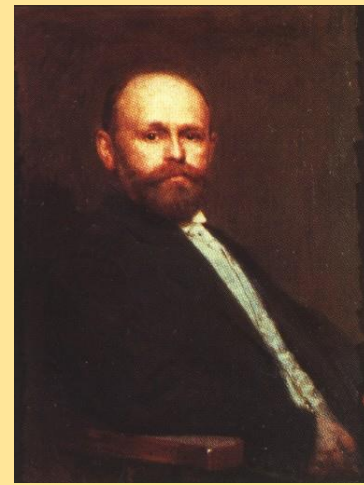


Fotoeffektus

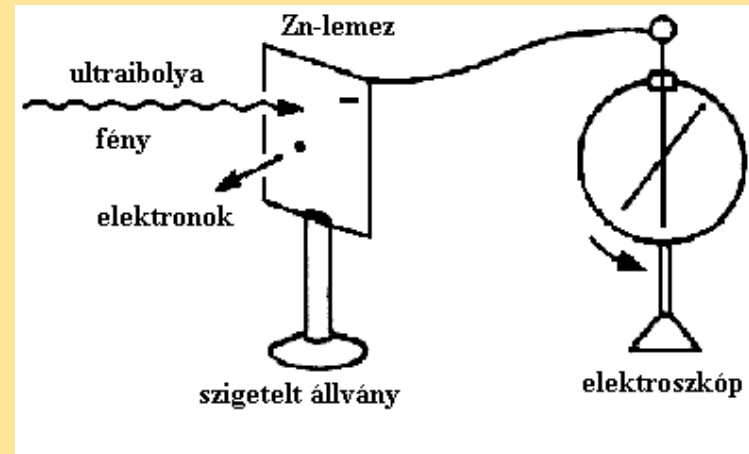


A fény hatására történő elektronkilépést fényelektromos jelenségnek vagy **fotoeffektus**nak nevezzük.

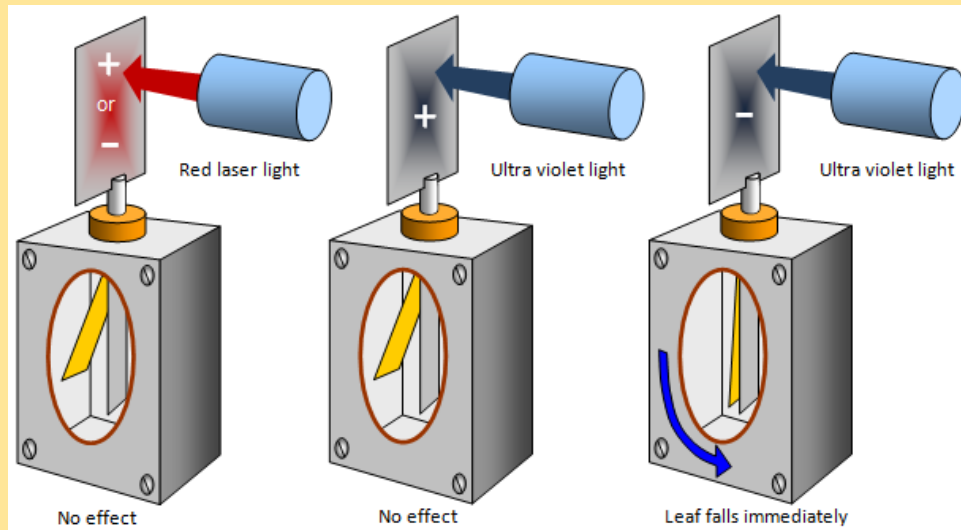
Fotoeffektus felfedezése. Hallwachs kísérlete



Wilhelm Ludwig Franz
Hallwachs (1859 –1922)
német fizikus

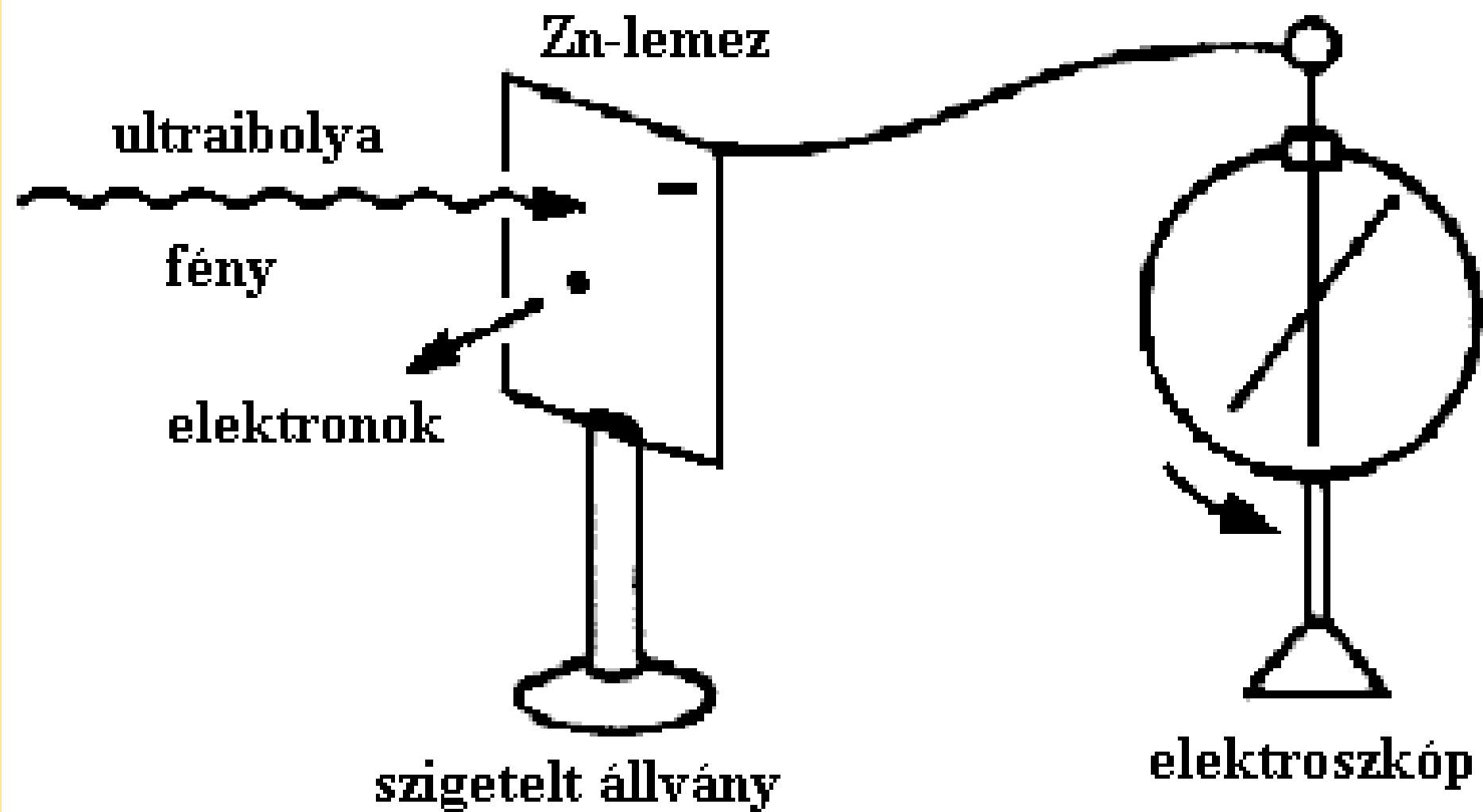


A fotoeffektus jelenségét a német Hallwachs és tőle függetlenül az orosz Sztolenov fedezte fel 1888-ban.



Hallwachs alkálifémek kvarclámpával (higanygőzlámpa) történő megvilágítása során a fémből kilépő negatív töltésű részecskéket detektált. Innen ered a fotoeffektus másik neve, a **Hallwachs-hatás**.

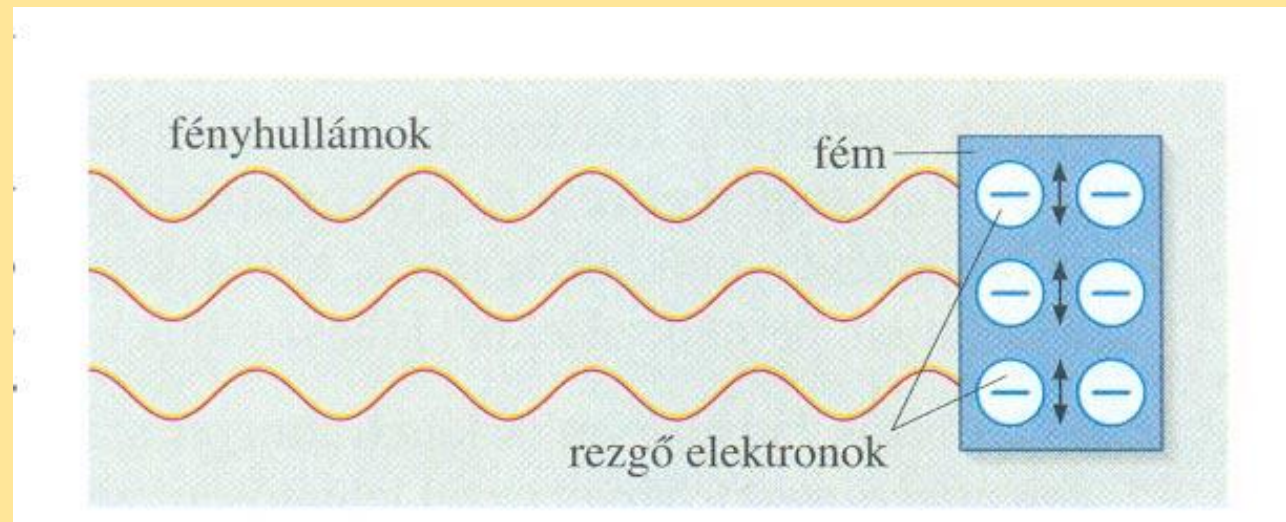
Később J. J. Thomson és Lénárd Fülöp bizonyította, hogy ezek a részecskék elektronok. A fotoeffektus mennyiségi törvényeit - a kilépő elektronok számát és sebességét a frekvencia függvényében - Lénárd Fülöp határozta meg.



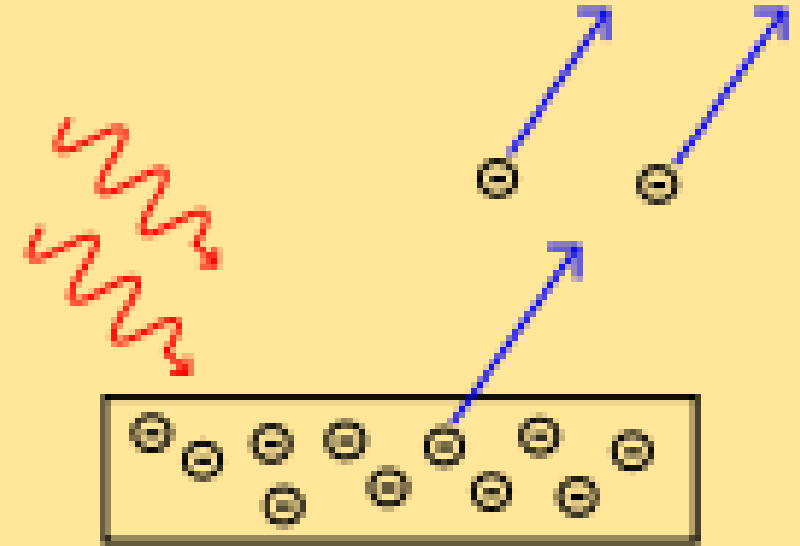
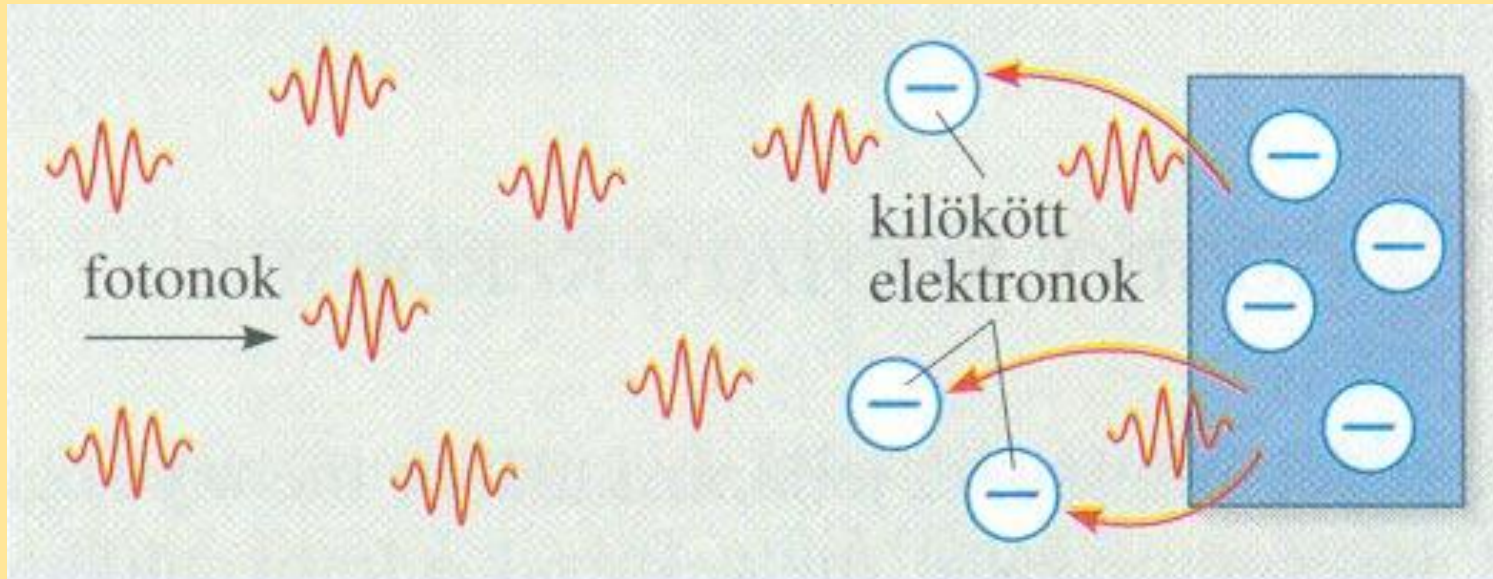
Hogyan értelmezzük a fotoeffektust ?

A hullámmodell ellentmondásai

- A nagyobb fényerősségnél nagyobb sebességgel kéne kilépni az elektronoknak
- Nem magyarázható a határfrekvencia (**csak bizonyos frekvencia fölötti fény vált ki elektronkilépést**, ami anyagonként változó)
- A számítások szerint az elektromágneses mezőben a kis méretű rezgő elektronoknak, **napokig kellene gyűjteni az energiát** ahhoz, hogy a fémből ki tudjanak lépni

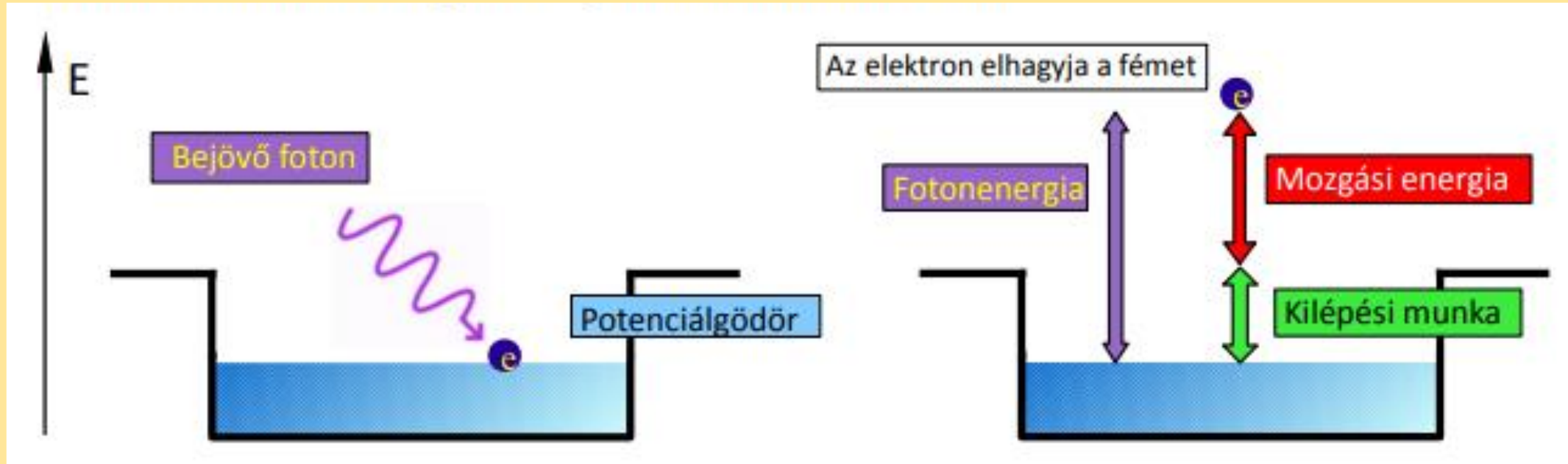


A fotoeffektus értelmezése a fotonmodell alapján



A fény hullámmmodellje és a kísérleti eredmények közötti ellentmondást **Einstein oldotta fel 1905-ben**. Elméletéhez felhasználta Planck kvantumhipotézisét. A fény beérkezésénél $\epsilon = h \cdot f$ energiájú fotonokat tételezett fel.

Mikor lépnek ki elektronok? A fotoeffektus energiamérlege



A fotoeffektus energiamérlege: A fémekben lévő elektronok egy potenciálgödörbe vannak bezárva.

Ha egy foton energiáját elnyelve nagyobb energiára tesznek szert, mint a „potenciálgödör mélysége”, akkor el tudják hagyni a gödröt (a fémet).

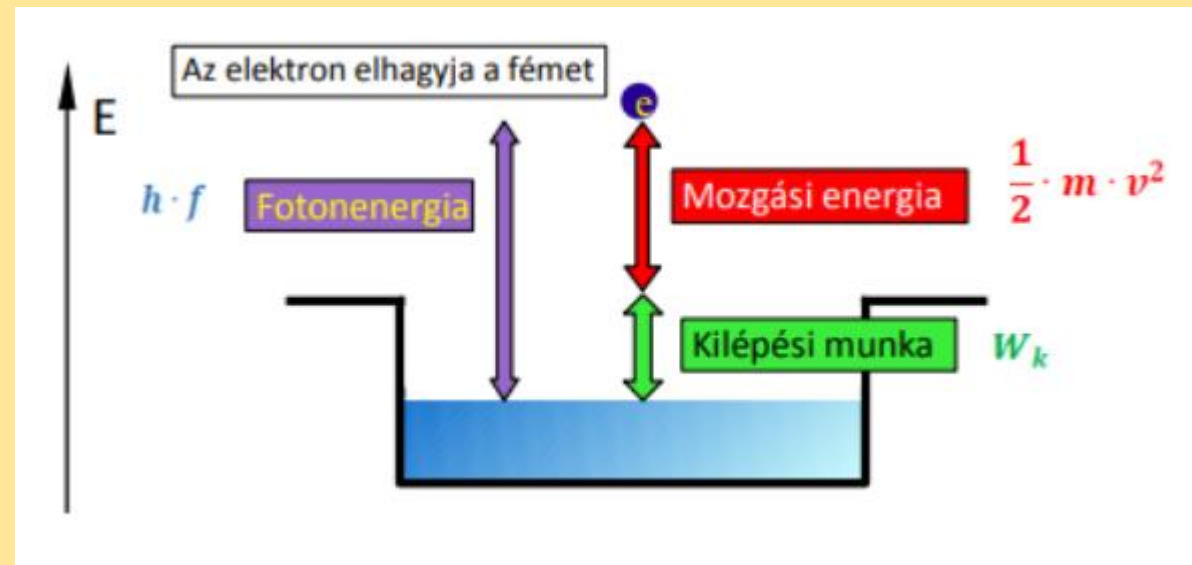
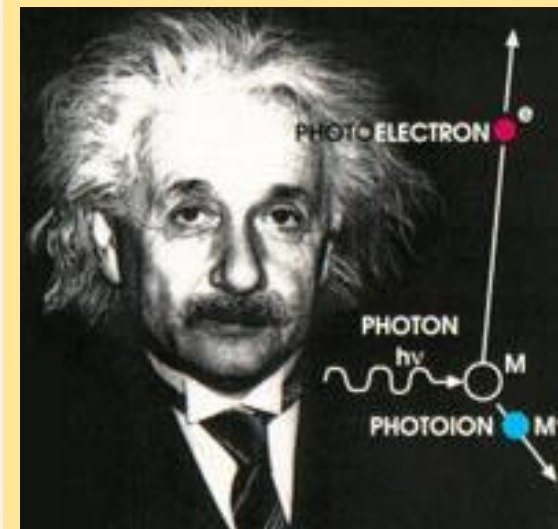
A maradék energia mozgási energiává alakul.

Fényelektromos egyenlet = Nobel díj (1922)

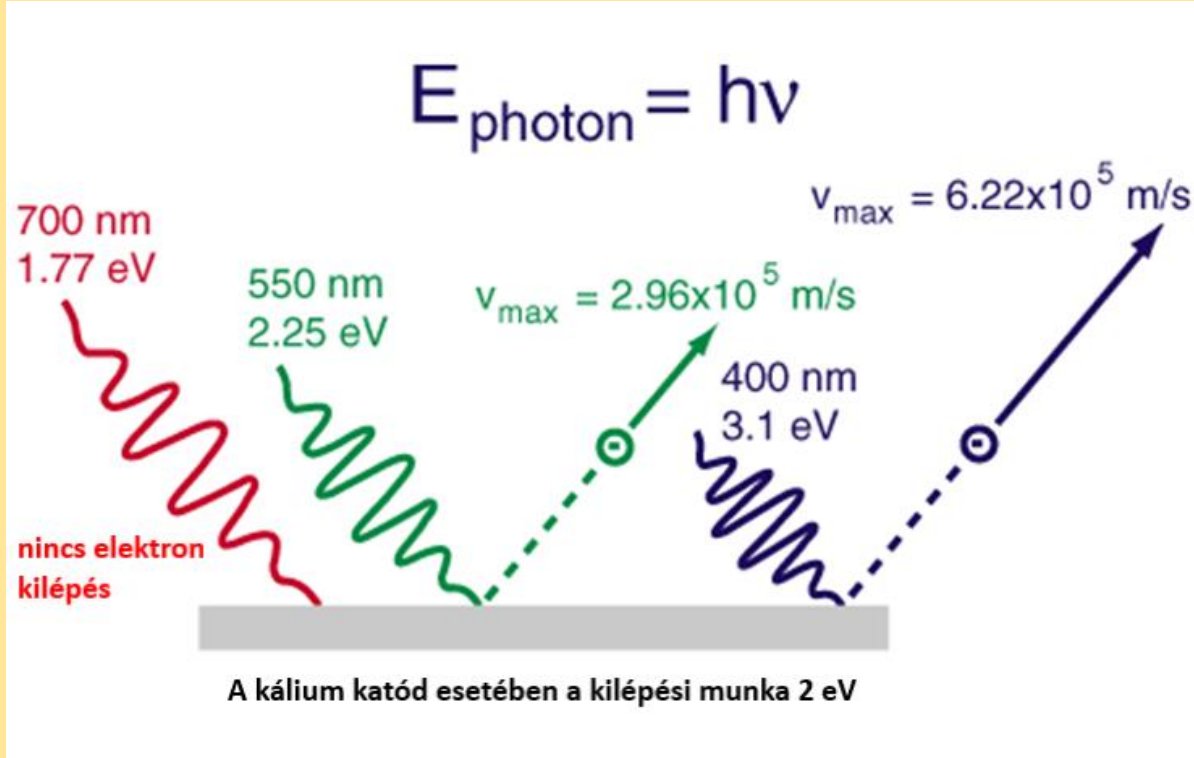
$$h \cdot f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + W_k$$

- $h \cdot f$ a katód felé érkező foton energiája
- W_k kilépési munka, ennyi munkát kell végezni egy elektron katódból való kiléptetéséhez
- $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ a katódból a beérkező foton által kiléptetett elektron energiája

A fém felületére belépő foton energiája megegyezik a kilépő elektron energiájának és a kilépési munkának az összegével.

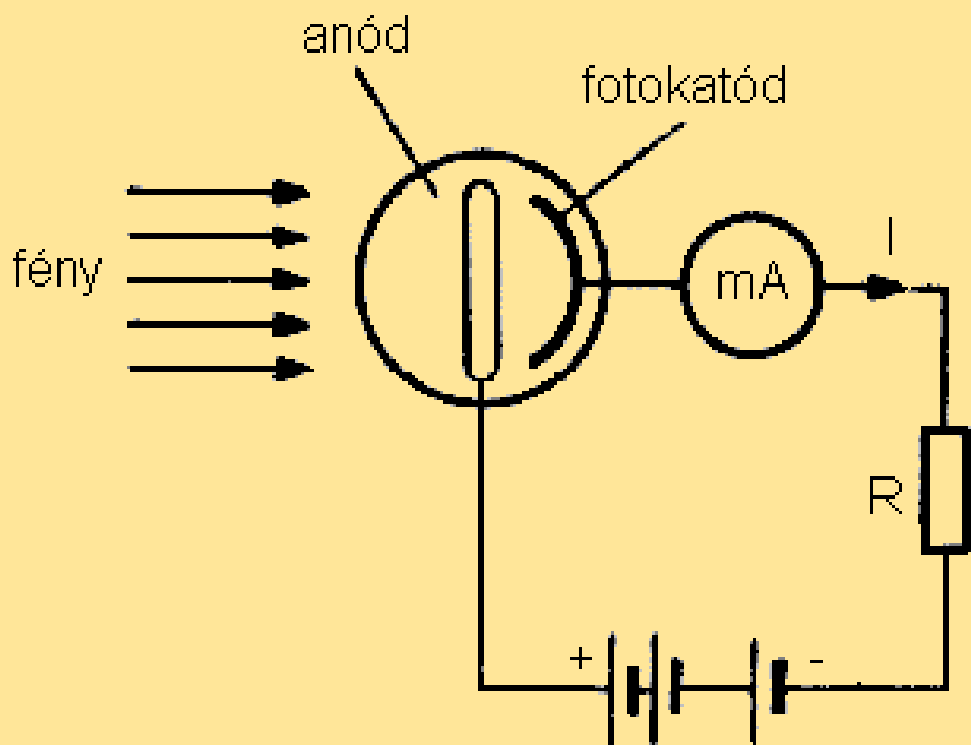


Piros, zöld és kék fotonok energiája



- Az ábrán látható, hogy a **piros foton** energiája nem elegendő egy elektron kiléptetéséhez.
- A **kék foton** energiája nagyobb, mint a zöldé, így az általa kiléptetett elektron is nagyobb mozgási energiával rendelkezik.
- Az elektron mozgási energiája egyenlő a foton energiájának és a kilépési munkának a különbségével: $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = h \cdot f - W_k$.

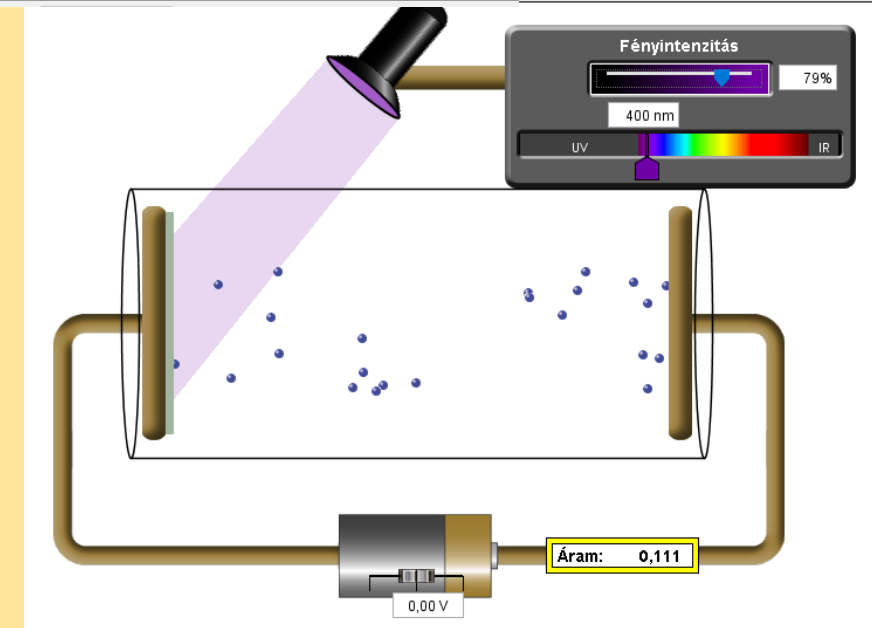
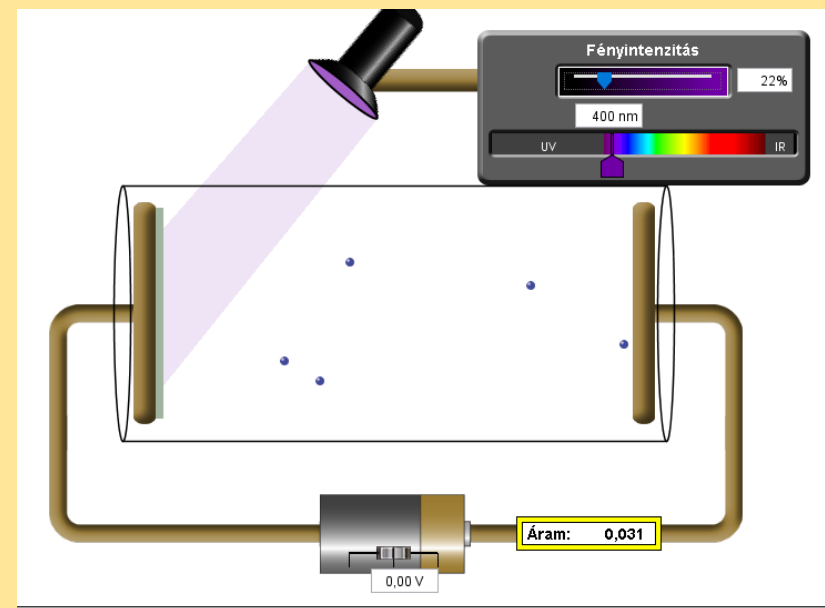
Mindennapi alkalmazás. Fotocella



- A fényelektromos jelenséget használjuk ki a fotocellánál.
- A hagyományos fotocella egy légritkított cső, amelynek **katódja valamilyen alkáli fémmel van bevonva**, amelynek **kicsi a kilépési munkája**, nagy felületű, íves kiképzésű. Az anód általában gyűrű alakú.
- Ha a cellára az ábrának megfelelően **fényt bocsátunk** akkor az érzékeny ampermérő áramot jelez.

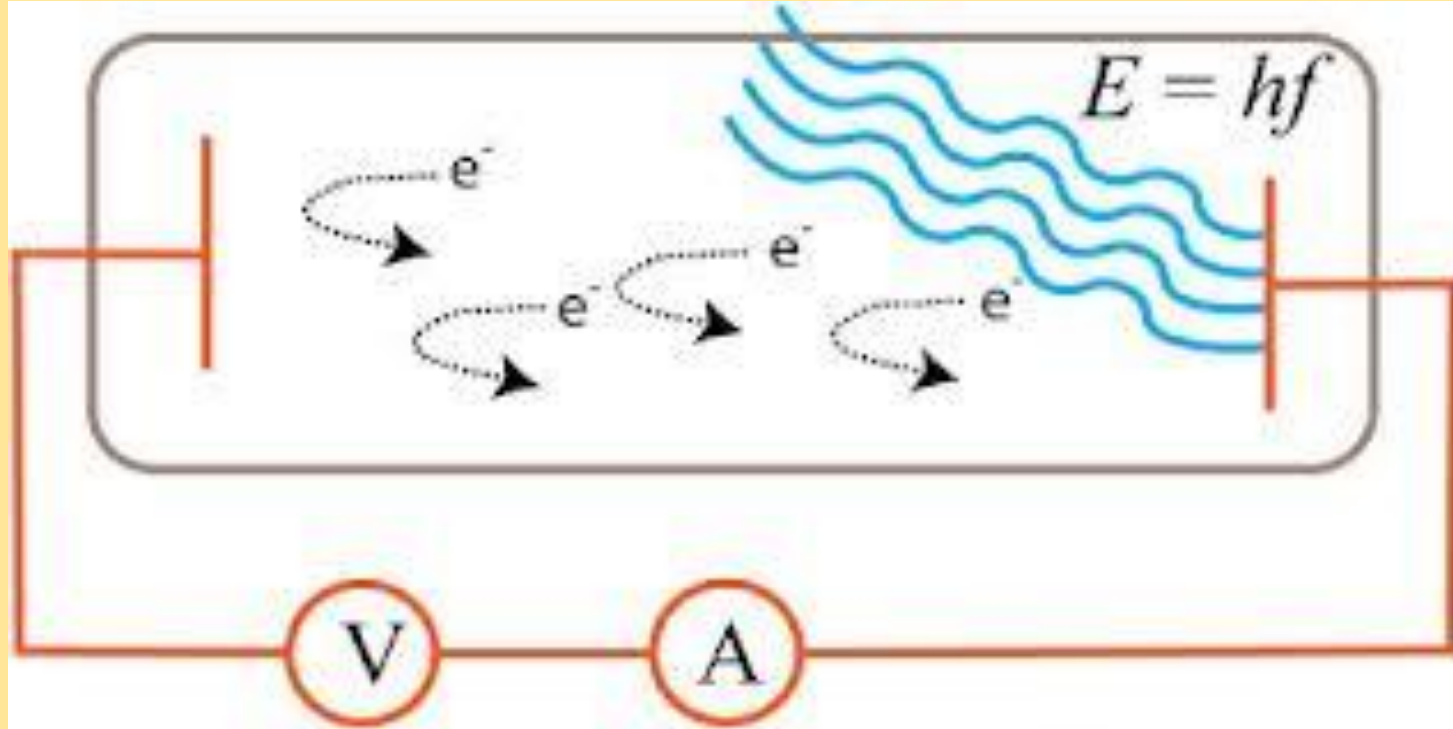
Fotocella, működése

- Az effektus csak egy bizonyos határfrekvenciánál nagyobb fény esetén lép fel.
- Erősebb megvilágításnál több elektron lép ki.
- A kilépő elektronok maximális energiáját csak a fény frekvenciája befolyásolja.
- Nagyobb frekvenciájú fény nagyobb mozgási energiájú elektronokat léptet ki.
- Az elektronkilépés a megvilágítást követően azonnal bekövetkezik.



Megjegyzés: Az elektronika fejlődésének következtében a gyakorlati alkalmazásokban a fotocellát felváltották a fotodiódák. A fotodiódáknak megvilágítás hatására megváltoznak az elektromos tulajdonságai. Fény hatására nem szabadulnak ki belőlük elektronok, hanem úgynevezett elektron-lyuk párok keletkeznek bennük, melyek erősen megnövelik a fotodióda áramát.

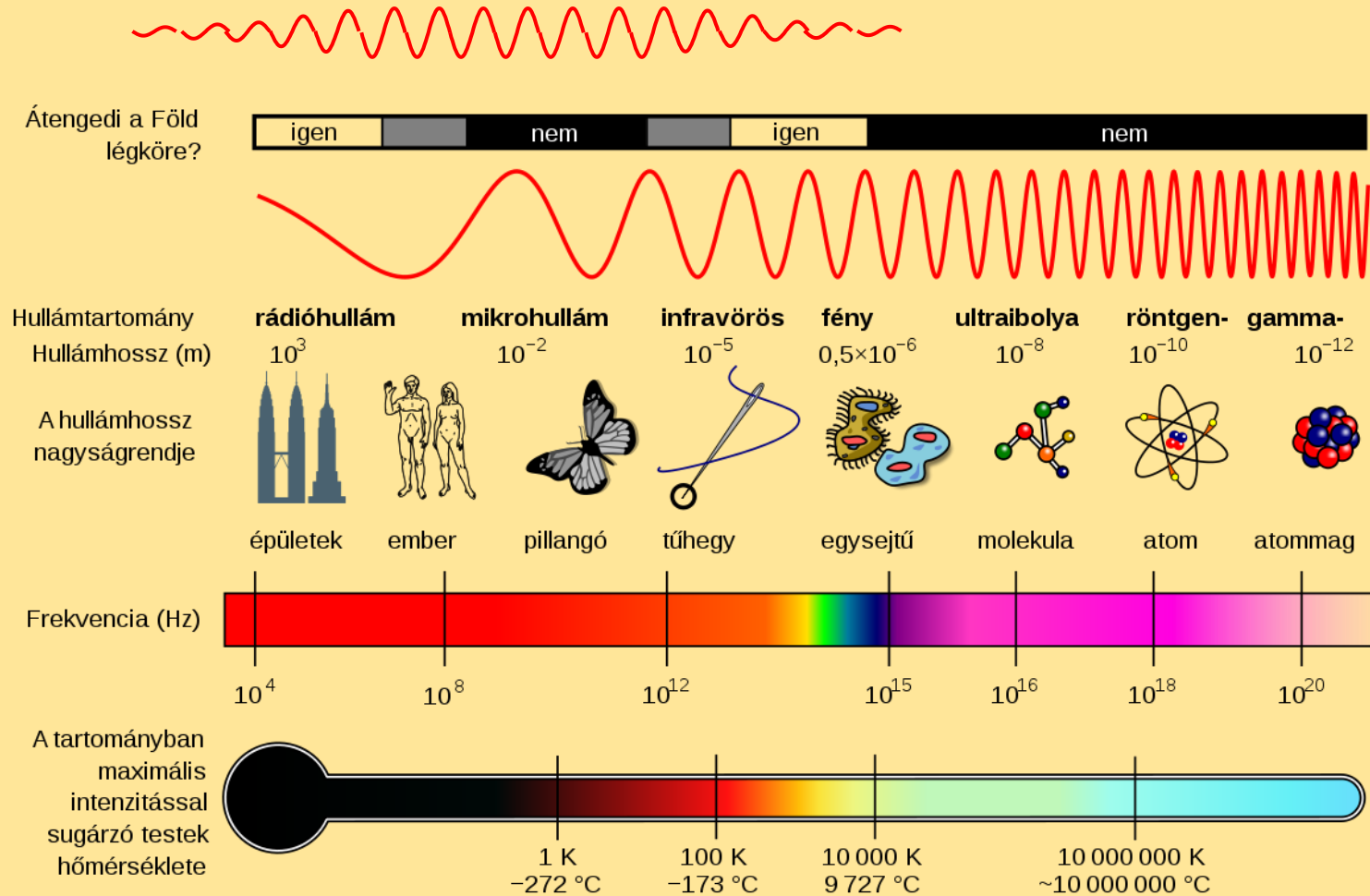
Ellentér módszer



Ellentér módszer alkalmazásakor az anódra negatív a katódra pozitív polaritást kapcsolunk. Bizonyos ellenfeszültségnél már nem lépnek ki elektronok.

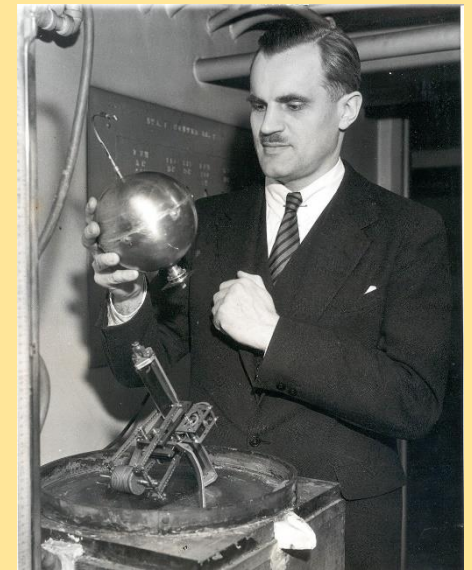
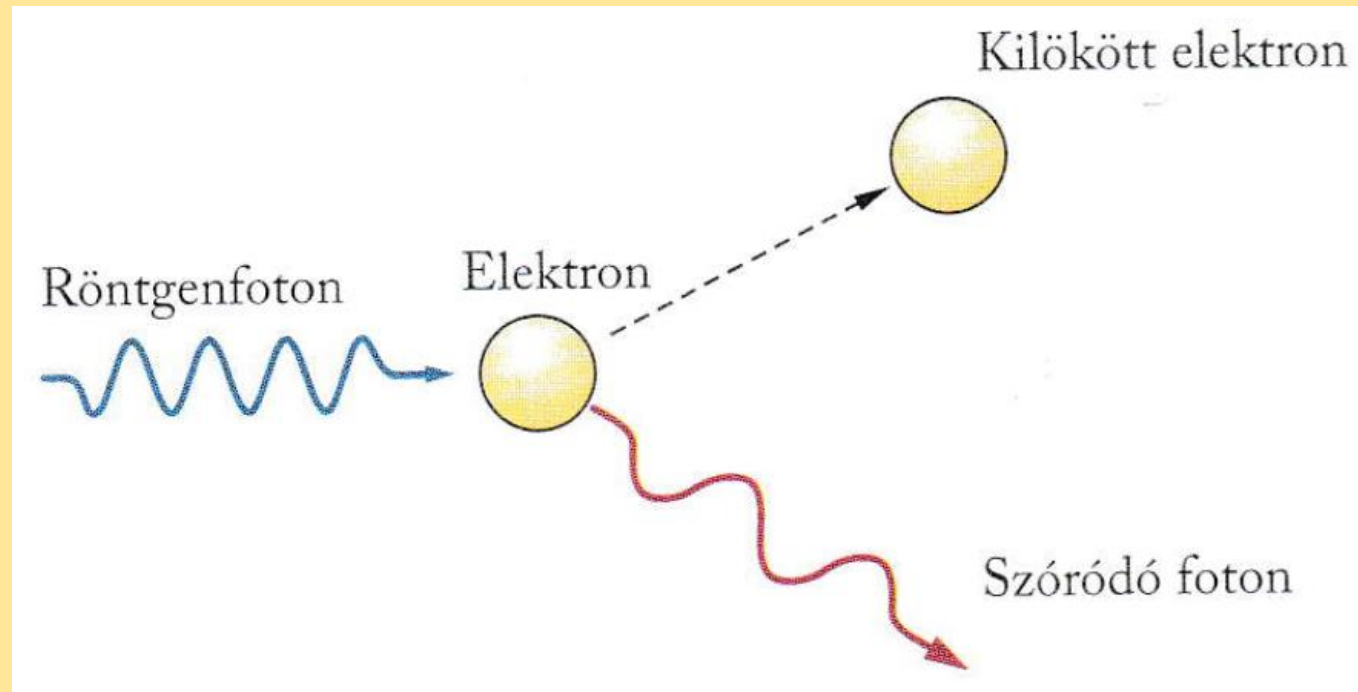
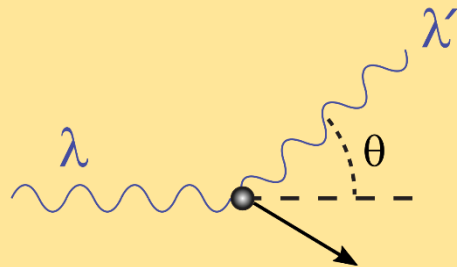
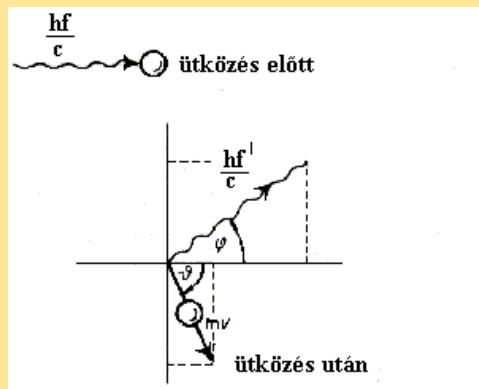
A zárófeszültség értékéből meghatározhatjuk a katódból kilépő elektronok maximális energiáját.

Elektromágneses hullámok spektruma



- A **foton az elektromágneses sugárzás elemi része** (úgy képzelhető el mint egy véges hosszúságú hullámvonulat), amely bizonyos hullámhosszal, frekvenciával és meghatározott energiaegységgel, kvantummal rendelkezik.
- A foton energiája egyenesen arányos a frekvenciájával ($\varepsilon = h \cdot f$).
- Egy röntgen foton energiája sokkal nagyobb, mint egy mikrohullámú foton energiája.

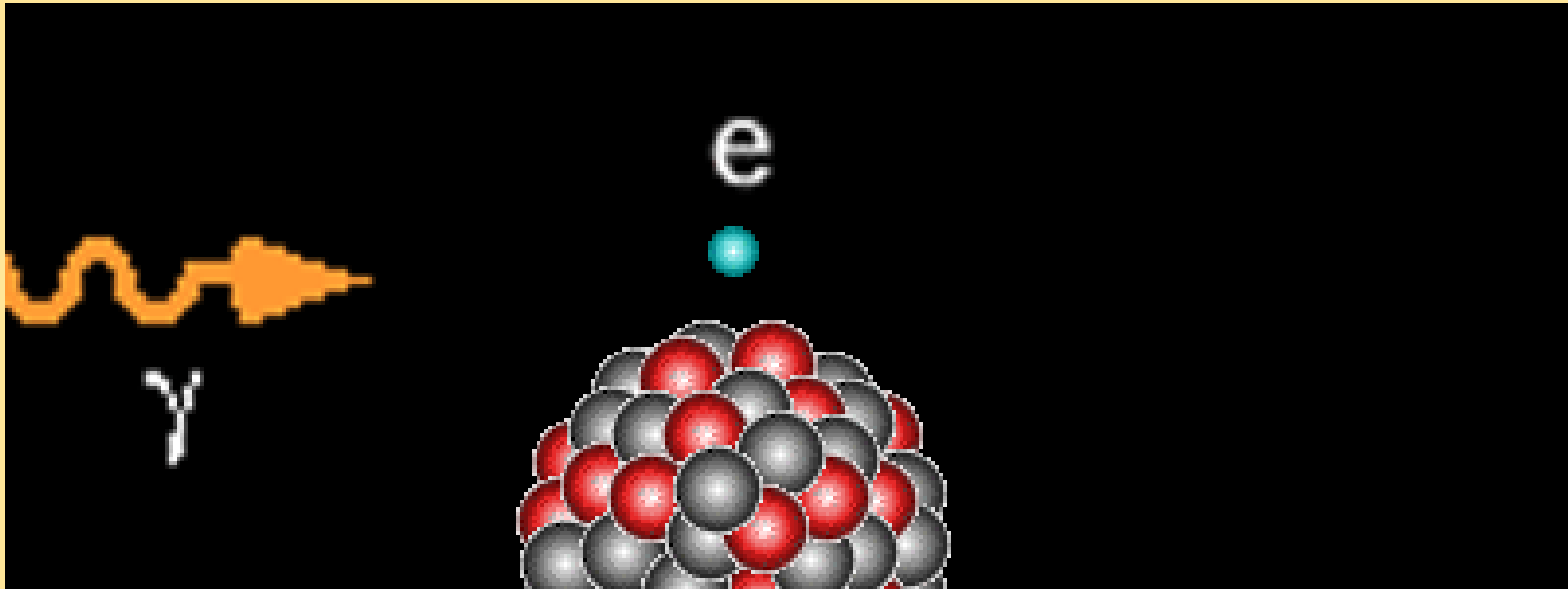
A fény részecske természetének újabb igazolása: Compton kísérlete



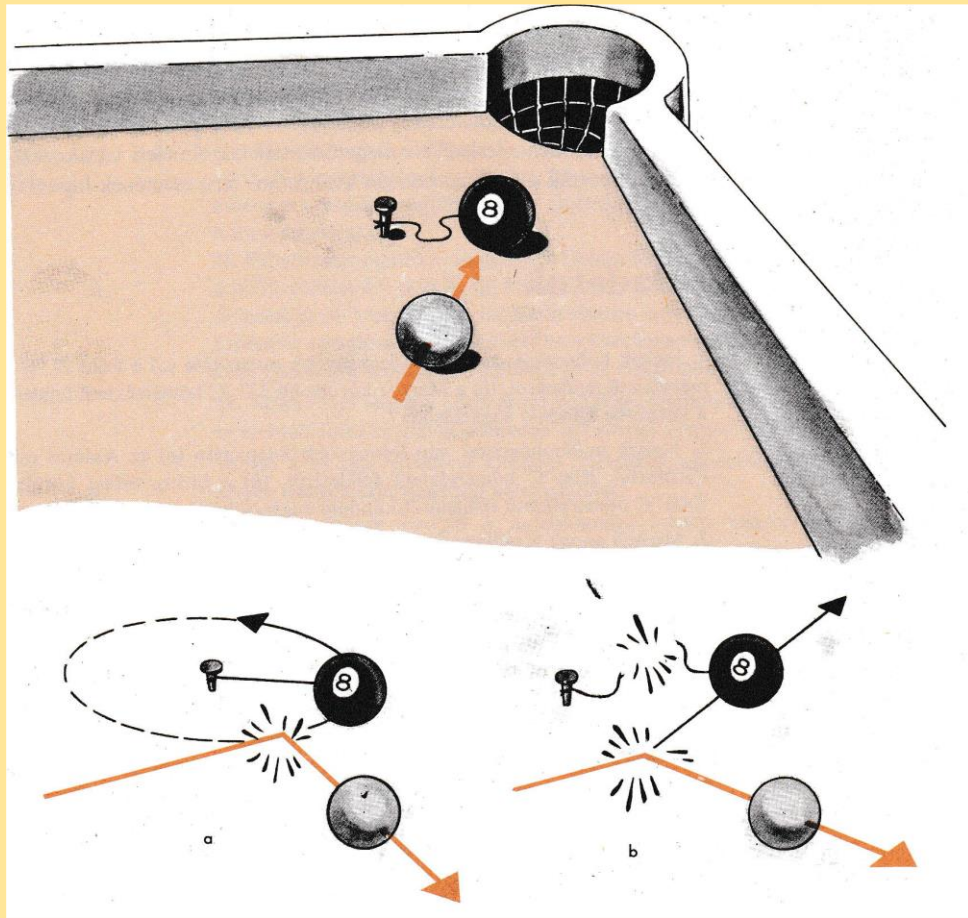
Arthur Holly Compton (1892-1962) amerikai fizikus. 1927-ben Nobel-díjban részesült a róla elnevezett Compton-szórás felfedezésének köszönhetően.

- Compton nagy energiájú röntgen fénnel világított meg grafitot. A röntgen foton ($\varepsilon_1 = h \cdot f_1$) a grafitból egy adott irányba elektront ütött ki. Emellett kilépett a belépőnél kisebb energiájú ($\varepsilon_2 = h \cdot f_2$), más irányú foton.
- A rugalmas ütközés közben a foton energiájának egy részét átadja az elektronnak, így a frekvenciája is lecsökken ($\varepsilon_2 < \varepsilon_1$), miközben másik irányba elpattan.

Foton és elektron ütközése

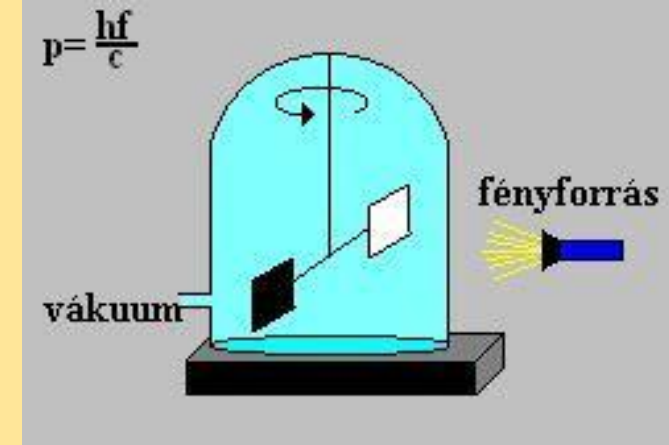


A foton-elektron effektus modellezése



- Ha a foton részecske természetű, akkor **biliárd golyókhoz hasonló** ütközéseket produkál.
- Tegyük fel, hogy a biliárdasztalon nyugvó fekete golyó (az elektron) **fonallal van hozzáerősítve egy szeghez**.
- Ha egy fekete golyót **egy szürke golyóval (foton) megütve** találjuk el, akkor, ha az **elegendő energiával rendelkezik** (nagyobb, mint a kilépési munka) elszakítva a fonalat arrébb üti a fekete golyót.

A fénynyomás



- A foton lendülettel rendelkezik. Egy fénynyaláb tehát nyomás gyakorol arra a felületre, amelyről visszaverődik, vagy amiben elnyelődik. A fénynyomás könnyen értelmezhető fotonok záporaként, de már Maxwell is tudta értelmezni az elektromágneses hullámok segítségével. **A fénynyomás tehát egyaránt értelmezhető a hullám és részecske természettel is.**
- A fénynyomást közvetlenül is ki tudta mutatni az orosz **Lebegyev 1901-ben**. Torziós szátra lapátokat helyezett el, egyik oldalukat fehérre, másikat feketére festette. Az eszközt üvegbúra alá helyezte és nagyon nagy vákuumot létesített. A lapátokat periodikusan fénnel világította meg, és a torziós szál sajátfrekvenciájára hangolva a torziós lengések rezonanciaszerű erősödését figyelte meg.
- **(Ha a vákuum nem tökéletes, akkor a forgás a rajz irányával ellentétes a felmelegedett lapátok által ellökött levegő-molekulák reakcióereje miatt. Ezen az elven Crookes sugárzásmérője működik.)**

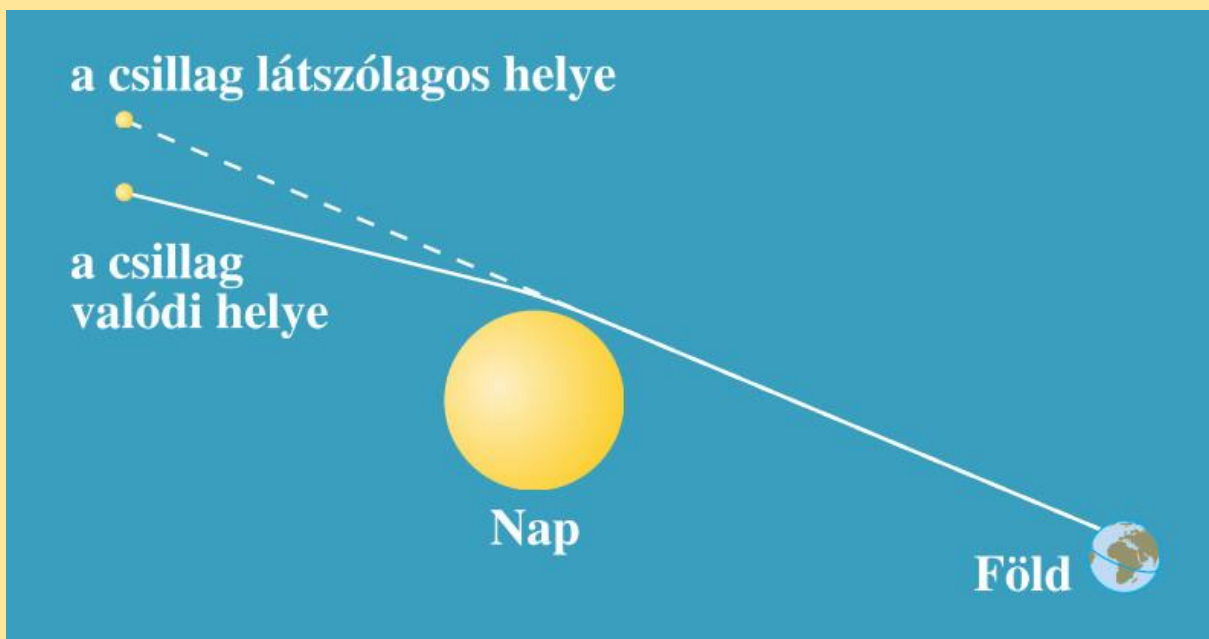
Üstökös csóvájának elhajlása



- A fénynyomás a Nap és a csillagok belsejében már olyan számottevő lehet, hogy **képes ellensúlyozni a csillagok gravitációs összehúzóását.**
- A világűrben, ahol a gáznyomás elhanyagolható a Nap közelében elhaladó üstökös apró porszemekből álló **csóvájának elhajlását a napsugárzás nyomása okozza.**

Üstökös csóvájának eltérülése a napfény hatására.

Foton és a gravitációs kölcsönhatás



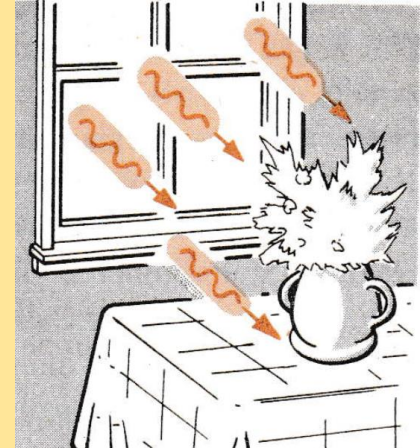
Fény elhajlása a Nap közelében

A **gravitációs vonzás** fellép az égitestek gravitációs mezője és a **tömeggel bíró fotonok között is.**

Az általános relativitáselmélet első kísérleti igazolását és az elismerést hozó sikerét az **1919. évi napfogyatkozásnál** megfigyelt fényelhajlással aratta.

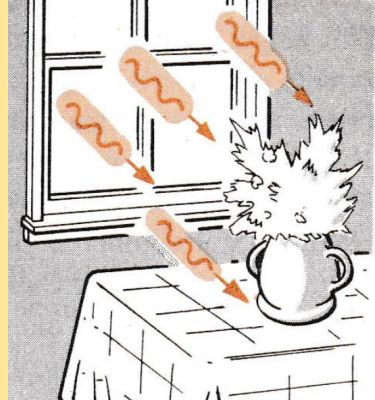
Tulajdonképpen ez a csillagászati megfigyelés járult hozzá döntő mértékben, hogy a fizikusok többsége komolyan vette **Einstein elméletét.**

Foton: összegzés



- **A foton** az elektromágneses sugárzások, többek között a **fény elemi részecskéje**, legkisebb egysége, kvantuma.
- A modern fizika területén a foton az elektromágneses jelenségekért felelős elemi részecske. Az elektromágneses kölcsönhatás közvetítője és a fény és a többi elektromágneses hullám minden formájáért ez a részecske felelős.
- **A fotonnak nulla az invariáns (nyugalmi) tömege és a c sebessége állandó, a vákuumbeli fénysebesség.**
- Anyag jelenlétében viszont lelassul, vagy el is nyelődhet a frekvenciájával arányos energiát és lendületet közvetítve. Mint minden kvantum, a fotonnak is vannak hullám- és részecsketulajdonságai; teljesül rá a **hullám-részecske kettősség**.

Foton: összegzés



Foton keletkezés, megsemmisülés:

Többféle természetes folyamat során **keletkezhet**, például ha

- **töltést gyorsítunk**, amikor
- egy atom elektronja vagy egy atommag magasabb **energiaszintről alacsonyabbra ugrik**, vagy amikor egy
- **részecske és az antirészecske találkozik** megsemmisíti egymást.

A foton megsemmisülése az előbbi folyamatok időben fordított változatában történhet: például **részecske-antirészecske párok keltésével** vagy **atomok és atommagok magasabb szintre kerülésével**.

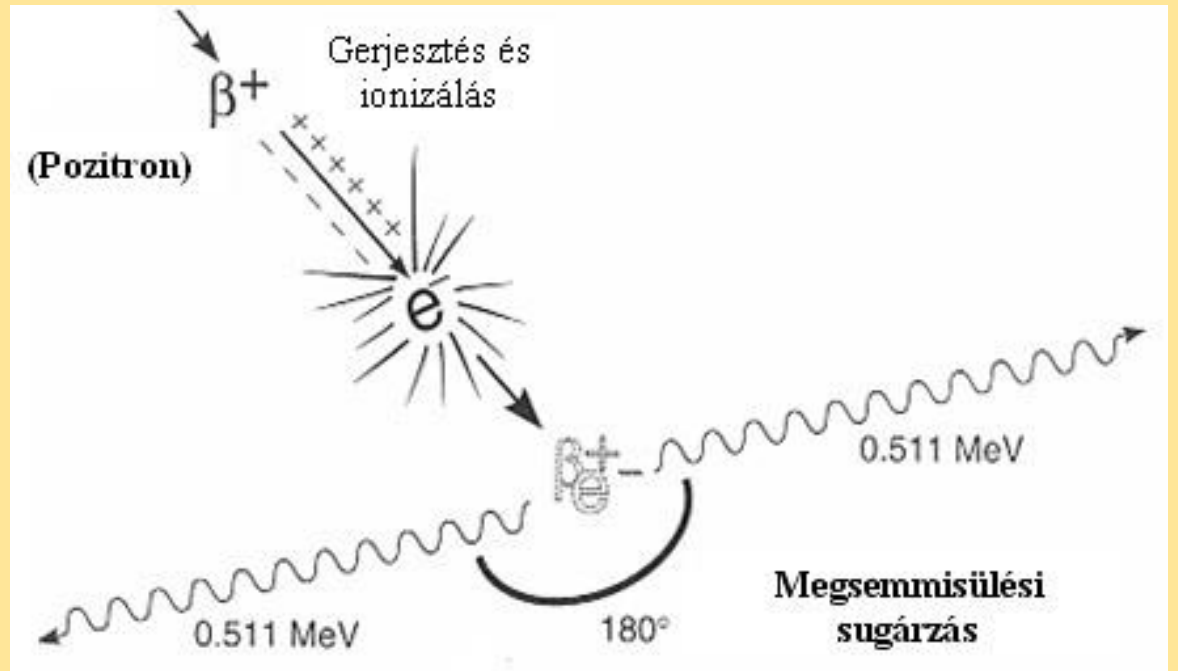
Annihiláció



A PET (Pozitronemissziós tomográfia) készülékekben **részecske (elektron)** és az **antirészecske (pozitron)** találkozáskor megsemmisíti egymást és keletkezik két 0,511 MeV-os foton.

Egy **elektronvolt**nak (eV) nevezzük azt az energiát, amelyet az elektron 1 V (megfelelő irányú) potenciálkülönbség hatására nyer.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



Foton tömege, lendülete



- A modern fizika elméletileg és kísérletileg is igazolta, hogy a **fény az anyag egyik megjelenési formája**.
- A fotont olyan fényrészecskének tekinthetjük, amely a vákuumbeli fénysebességgel mozog és **meghatározott energiával, tömeggel és lendülettel rendelkezik**. (Nyugalmi energiája nulla.)

Foton energiája: $\varepsilon = h \cdot f$

Tömeg energia ekvivalencia: $E = m \cdot c^2$

Foton tömege: $m_{foton} = \frac{h \cdot f}{c^2}$

Foton lendülete: $p = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}$



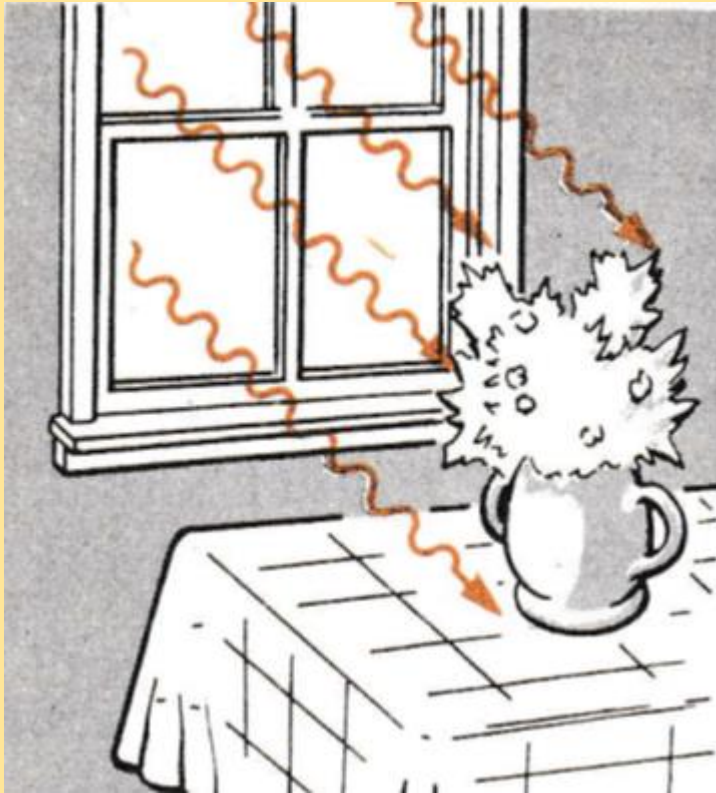
„energiában szegény”



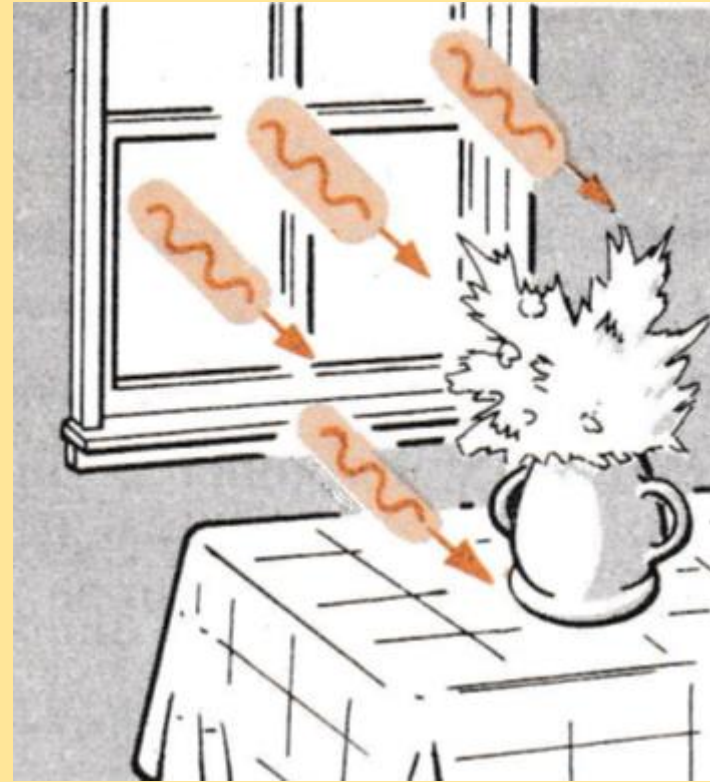
„energiában gazdag”

fénykvantum, $E = h\nu$

A fény jelensége a modern fizika szerint

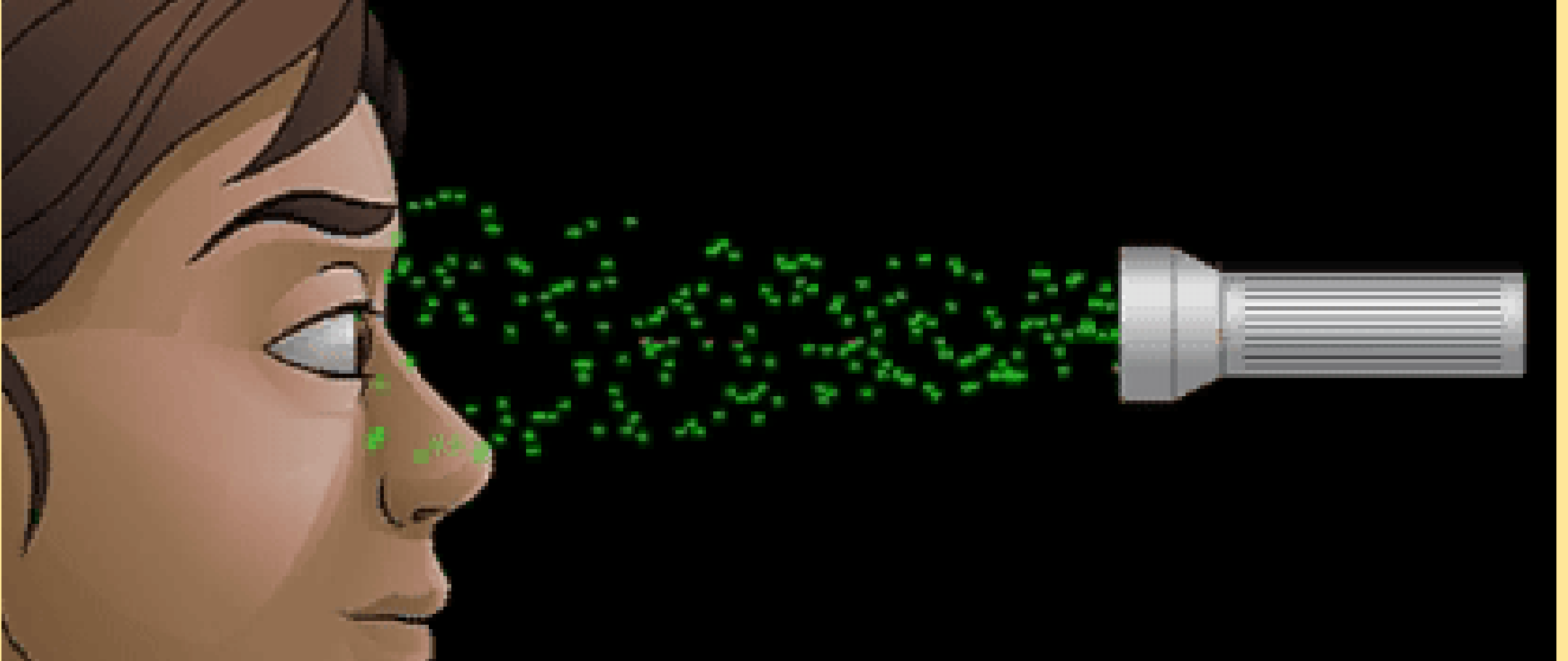


Régebbi felfogás szerint a fény folytonos hullámvonulat: növekvő amplitúdó jelenti az intenzitás növekedését (baloldali ábra).



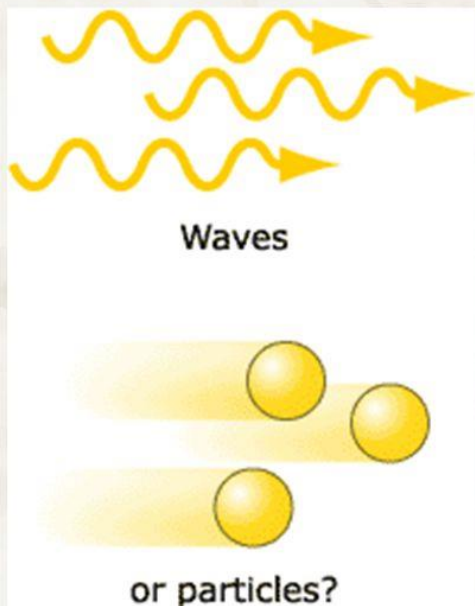
A modern fizika szerint (jobboldali ábra) a fény **fotonok** árama és minden egyes fotonnak egy bizonyos energia-kvantuma van.

Összefoglalva: A fény fotonok özöne



A fény intenzitását a másodpercenként beérkező fotonok száma szabja meg.

A FÉNY KETTŐS TERMÉSZETE



Hullámtermészetet mutat:

- törésnél
- elhajlásnál
- interferenciánál
- polarizációnál

Részecske-természetet mutat:

- fotoeffektusnál
- visszaverődésnél

A fény kettős természete

A fény az elektronhoz hasonlóan viselkedik



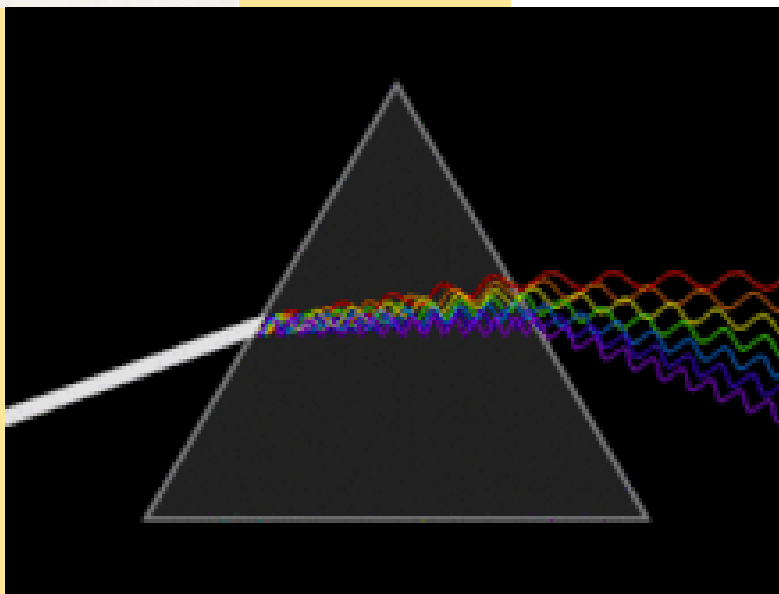
Ha a fény valamely közegben terjed

HULLÁM

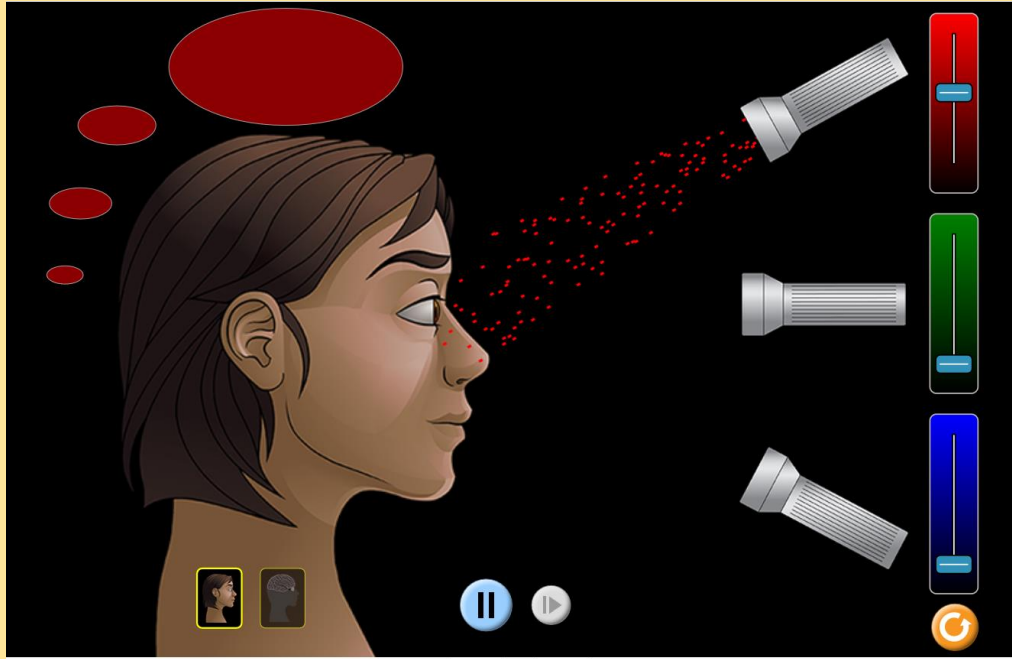


A fény kisugárzása és elnyelése

közben **RÉSZECSCKE**



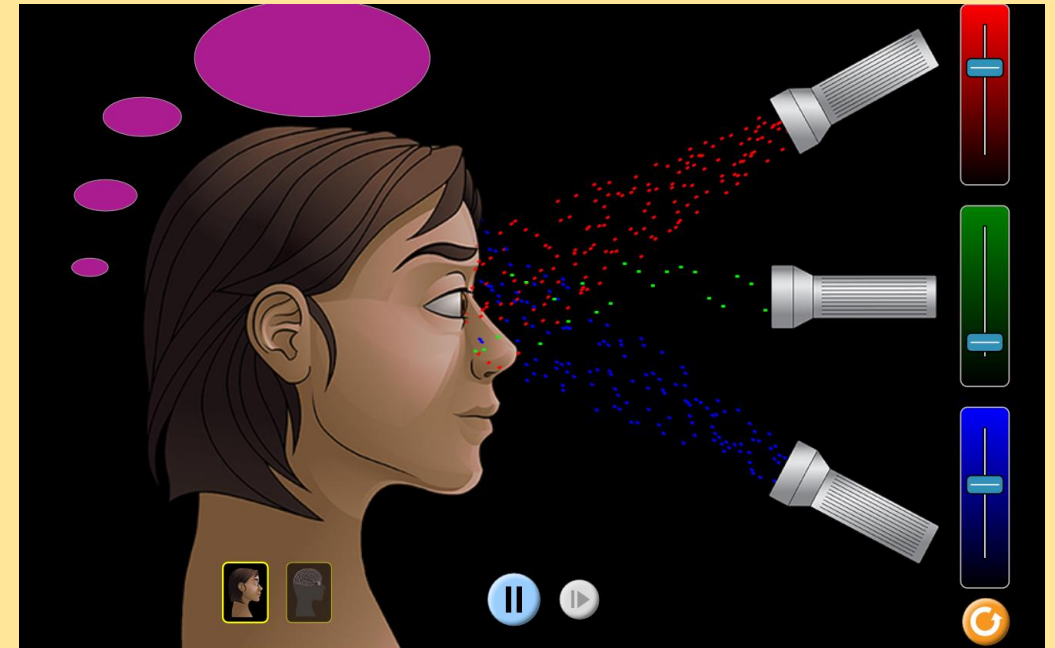
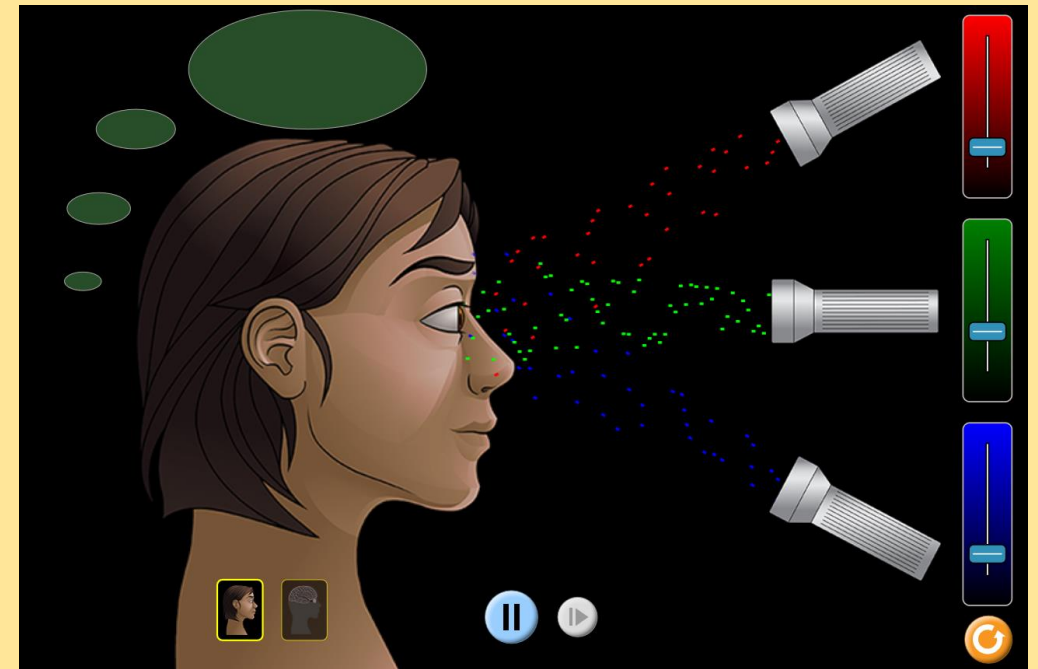
Mit látunk?



Baloldali ábra: A buborékban lévő színt látjuk, amikor csak piros fotonok érkeznek felénk.

Jobboldali ábrák: A buborékban lévő színeket látjuk, amikor piros, kék és zöld fotonok érkeznek felénk.

Meghatározó, hogy az intenzitásuk nem azonos.



Feladat



Mennyi az energiája egy 400 nm-es fotonnak?

Adatok:

$$\lambda = 400 \text{ nm} = 400 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\underline{h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}$$

$$\varepsilon = ?$$

Megoldás:

Egy foton energiája : $\varepsilon = h \cdot f$

$$f = ?$$

A fotonok fény sebességgel terjednek:

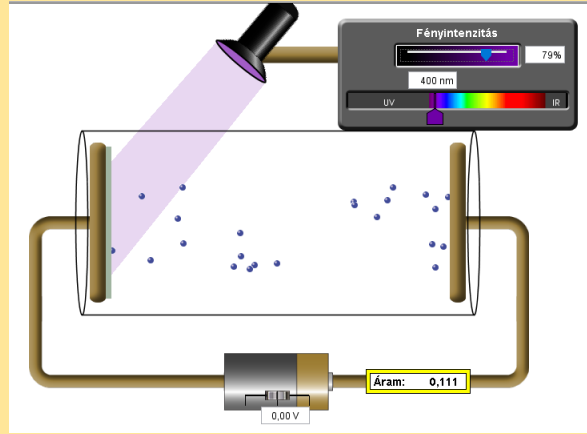
$$c = f \cdot \lambda$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{400 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\varepsilon = h \cdot f = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\varepsilon = 4,97 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Feladat



A lítium fotokatódót 400 nm-es hullámhosszúságú fénnel világítjuk meg. A kilépésimunka $3,84 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

- Mennyi lesz a kilépő elektronok energiája?
- Legfeljebb mekkora sebességgel hagyják el az elektronok a katód felületét?

Adatok:

$$\lambda = 400 \text{ nm} = 400 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$W_k = 3,84 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$E = ?$$

$$v = ?$$

Megoldás:

Fényelektromos egyenlet:

$$h \cdot f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + W_k$$

A foton energiáját az előző feladatban kiszámítottuk:
 $\varepsilon = h \cdot f = 4,97 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Az elektron mozgási energiája:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = h \cdot f - W_k$$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 4,97 \cdot 10^{-19} \text{ J} - 3,84 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Az elektron mozgási energiája:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 1,13 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Az elektron sebessége:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}} = 4,98 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$