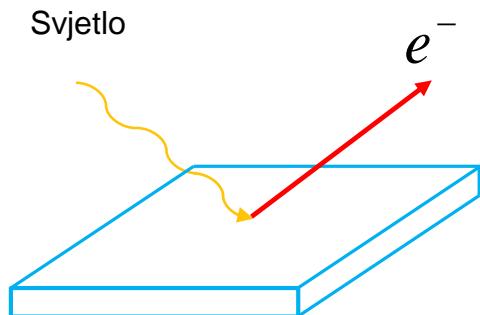
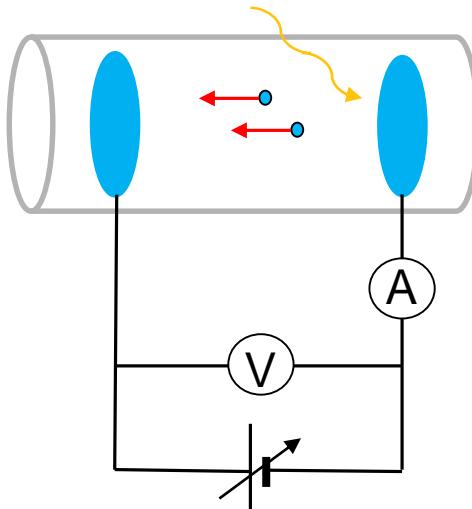


## Fotoelektrični efekt

Otkriće: Heinrich Hertz 1887. godine

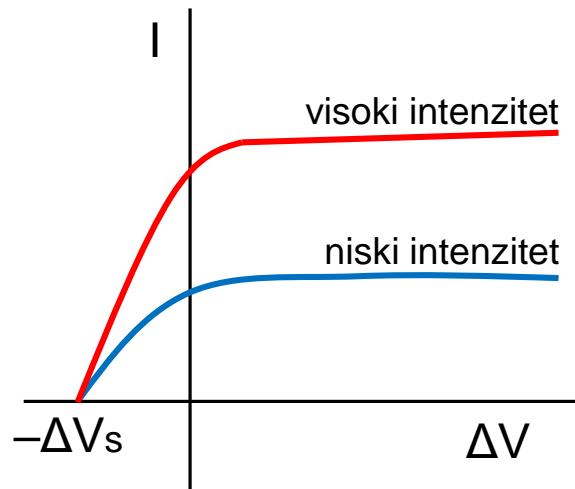
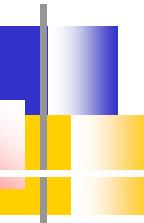
**Fotoelektrični efekt**- emisija elektrona iz materijala pod utjecajem svjetla

- Kad svjetlo pada na metalnu površinu, elektroni su emitirani s površine
- Emitirani elektroni se nazivaju *fotoelektroni*.



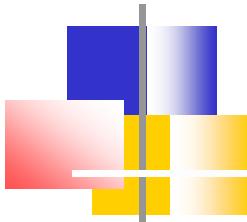
Fotoelektrični efekt se može proučavati pomoću električnog kruga prikazanog na slici:

- Padajući na katodu svjetlost izbacuje elektrone s njene površine.
- Napon između anode i katode se može namještati.



- Pri nultom naponu teče struja koja se mjeri ampermetrom. Ova struja ovisi o intenzitetu upadnog svjetla.
- Oslobodjeni elektroni se ubrzavaju poljem pri pozitivnoj vrijednosti napona između katode i anode.
- Za velike vrijednosti napona struja dostiže maksimalnu vrijednost.
- Maksimalna vrijednost struje raste s intenzitetom svjetla.
- Kad je napon negativan struja pada.
- Struja ne teče za napone ispod  $-\Delta V_s$ , *zakočni napon*
  - Zakočni napon ne ovisi o intenzitetu zračenja

Osobita važnost fotoelektričnog efekta je u tome što klasična fizika nije bila dovoljna da bi ga se objasnilo.



## ■ Lenardova opažanja

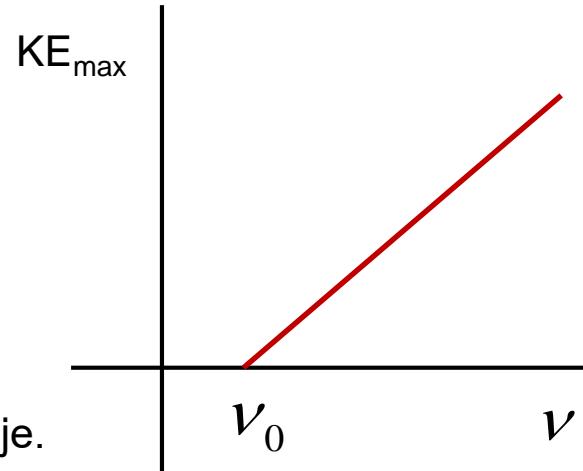
Mijenjajući napon Lenard je mogao odrediti

- kinetičku energiju čestice
- da čestica ima negativan naboј
- Intenzitet svjetla nije imao utjecaja na energiju.
- Postojala je granična frekvencija za izlazak čestica.
- Maksimalna kinetička energija rasla je s porastom frekvencije.
- Trebalo bi proći neko vrijeme da elektron apsorbira energiju.  
Nikakvo vrijeme kašnjenja nije opaženo.

Klasična fizika nije mogla ovo objasniti.

## ■ Einsteinova interpretacija

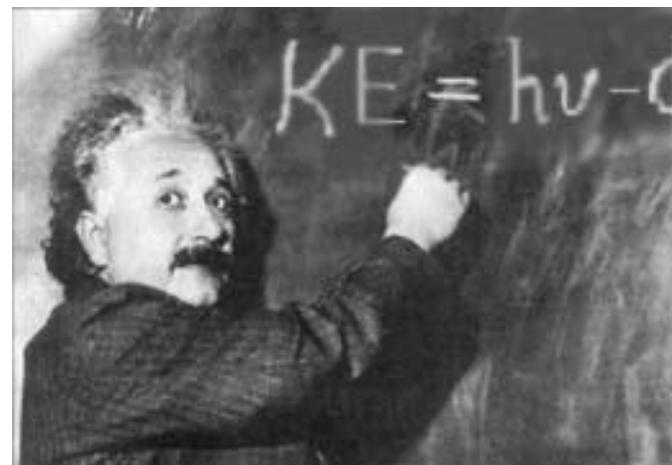
- Svjetlo se sastoji od kvanata svjetlosti, kasnije nazvanih fotonima, diskretne energije.
- Energija svakog kvanta ovisi o frekvenciji  $E = h\nu$
- Veći intenzitet svjetla odgovara većem broju fotona, a ne fotonima veće energije.



## Einsteinova fotoelektrična jednadžba

Einstein je predviđio da će graf ovisnosti maksimalne kinetičke energije o frekvenciji biti pravac dan izrazom:

$$KE_{\max} = h\nu - \Phi$$



Pri djelovanju svjetlosti na kovine kvanti svjetlosti bivaju apsorbirani, a njihovu energiju preuzimaju elektroni. Dio energije se troši na otrgnuće elektrona iz metala-izlazni rad. Energija kvanta svjetlosti mora biti jednaka zbroju kinetičke energije elektrona i rada potrebnog za otrgnuće elektrona.

## Millikanov eksperiment

Einstenovo objašnjenje fotoelektričnog efekta potvrdio je Robert Millikan 1916. godine koji napravio niz kvantitativnih istraživanja ovog fekta u namjeri da dokaže kako Einstein nije u pravu.

$KE_{\max}$  se lako može mjeriti određujući zakočni napon jer vrijedi

$$KE_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = e\Delta V_s$$

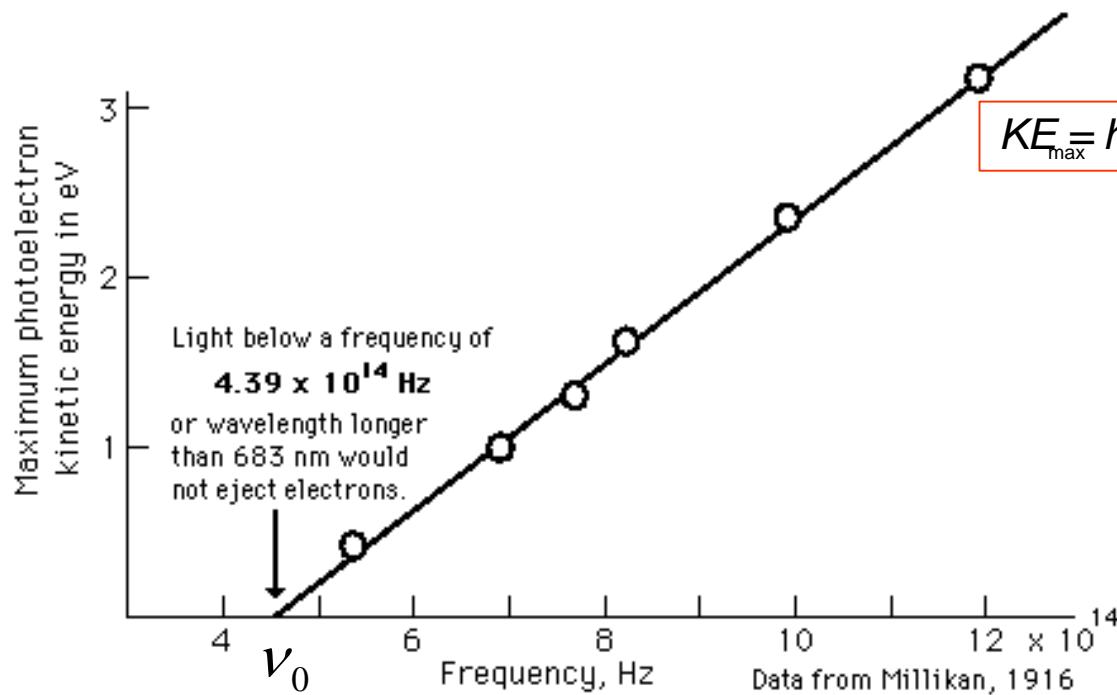
Problemi eksperimentalne izvedbe fotoelektričnog efekta bili su nedostatak jakog monokromatskog UV izvor, male fotostruje i veliki utjecaj neravnih i nečistih površina metala na  $\nu_0$  i  $KE_{\max}$ .

Millikan je nadišao ove teškoće koristeći katode alkalnih metala koje su osjetljive u vidljivom području do 600nm, te je tako mogao koristiti jake vidljive linije žive.

Millikan je vrlo točno izmjerio ovisnost zakočnog napona o frekvenciji za različite materijale.

Rezultati koje je dobio su se izvrsno kvantitativno slagali s Einsteinovim izrazom kao što je prikazano na sljedećem slide-u.

## Millikanovi podaci



$$KE_{\max} = h\nu - \Phi$$

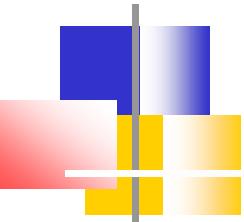
Nagib pravca je Plankova konstanta  $h$

$\Phi$  je izlazni rad

Data from Millikan, 1916

Physical Review, vol VII, p. 355 (1916)

Elektroni neće biti emitirani za frekvencije svjetlosti  $\nu < \nu_0 = \frac{\phi}{h}$



## Comptonov efekt

- Prema čestičnoj teoriji moramo česticama monokromatične svjetlosti pripisati određenu energiju

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

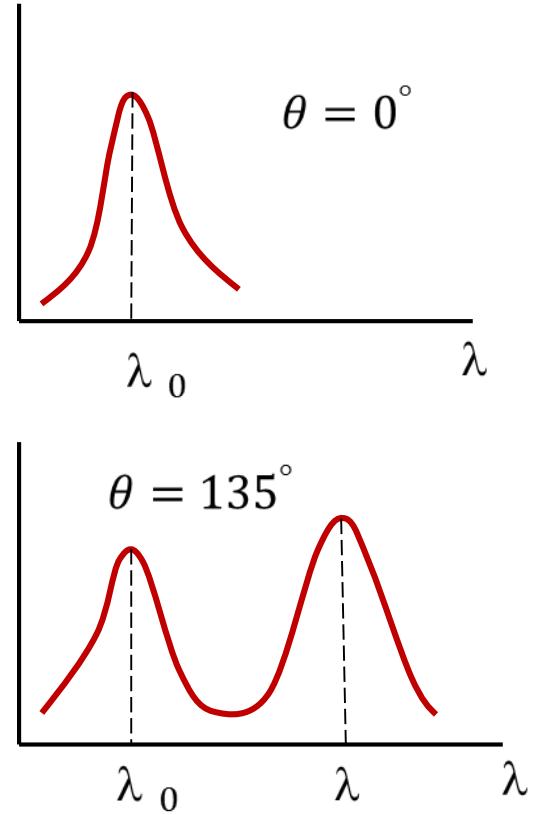
i impuls

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

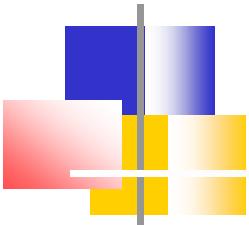
predpostavimo li da foton zadovoljava relativističku relaciju za energiju  $E = c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$  i da je masa fotona nula.

Energija i impuls kvanata svjetlosti najjasnije dolaze do izražaja u Comptonovom efektu

- Compton je usmjerio x-zrake prema bloku grafita
- Otkrio je da raspršene x-zrake imaju malo dulju valnu duljinu nego upadne x-zrake
  - To znači da imaju manju energiju
- Smanjenje energije ovisi o kutu pod kojim su x-zrake raspršene
- Pomak u valnoj duljini se naziva *Comptonov pomak*



## Nastanak kvantne mehanike



- Compton je prepostavio da se **fotoni ponašaju kao i druge čestice pri sudarima**
- Pri sudaru fotona i elektrona, foton izgubi dio svoje energije i zato mu se poveća valna duljina
- **Energija i količina gibanja su sačuvane**

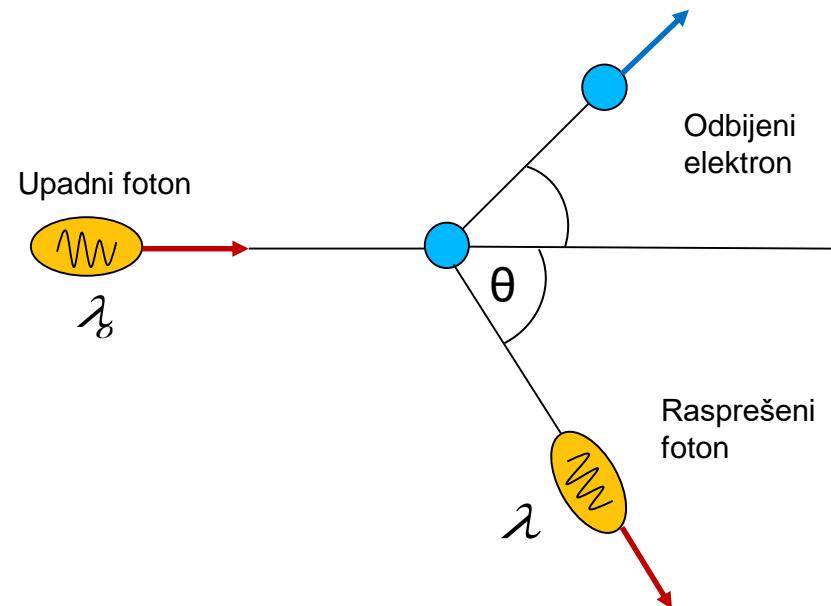
$$\hbar\omega_0 + m_e c^2 = \hbar\omega + c\sqrt{p^2 + m_e^2 c^2}$$

$$\hbar\vec{k}_0 = \vec{p} + \hbar\vec{k}$$

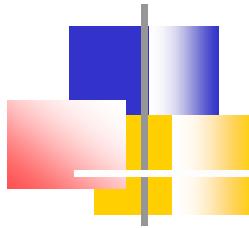
---

$$\sqrt{p^2 + m_e^2 c^2} = \hbar(k_0 - k) + m_e c, \text{ uz } k = \omega/c$$
$$p^2 = \hbar^2(\vec{k}_0 - \vec{k})^2$$

---



## Nastanak kvantne mehanike



$$p^2 = \hbar^2(k_0^2 + k^2 - 2k_0k) + 2\hbar m_e c(k_0 - k)$$

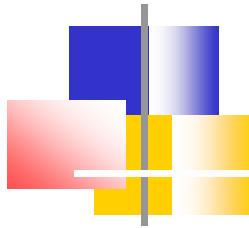
$$p^2 = \hbar^2(k_0^2 + k^2 - 2k_0k \cos \theta)$$

---

$$m_e c(k_0 - k) = \hbar k_0 k (1 - \cos \theta)$$

$$2\pi \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} \right) = \frac{2\pi\hbar}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

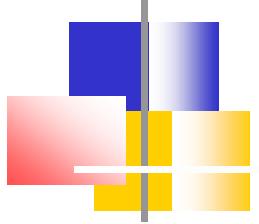


- Pomak u valnoj duljini

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_o = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Comptonova valna duljina

- Comptonova valna duljina = 0.00243 nm
- Najvažnije je u Comptonovoj formuli je da je povećanje valne duljine jednako za sve valne duljine
- Eksperimenti su potvrdili rezultate Comptonovog raspršenja i jako poduprli koncept fotona



## Dvojna priroda elektromagnetskog zračenja

- *Svjetlo ima dvojnu prirodu.. Pokazuje i valna i čestična svojstva.*
  - Vrijedi za sva elektromagnetska zračenja
- **Fotoelektrični efekt** i **Comptonovo raspršenje** daju dokaz o **čestičnoj prirodi svjetla**
  - Kad svjetlo i materija međudjeluju, svjetlo se ponaša kao da je sastavljeno od čestica
- **Interferencija** i **difrakcija** daju dokaz o **valnoj prirodi svjetla**

# Nastanak kvantne mehanike



## Dodatni materijali

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>