

Einda og bylgju tvíeðli ljóss

Guðlaugur Jóhannesson

5. apríl 2016

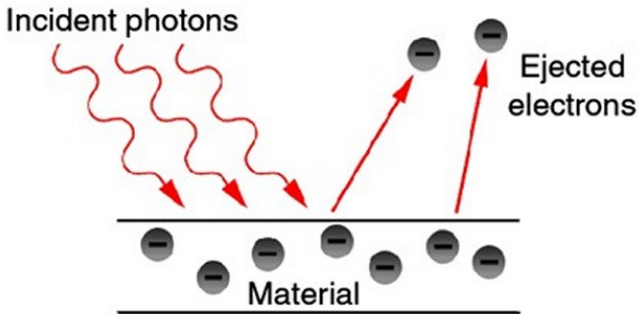
Ljós er rafsegulbylgja

- ▶ Jöfnur Maxwell's segja að ljós er rafsegulbylgja sem ferðast á ljóshraða í tómarúmi.
 - ▶ Fjöldi tilrauna sýna fram á bylgjueiginleika ljóss, margar af þeim í tilraunahluta námskeiðsins.
- ▶ Notast er við bylgjusamlagningu til að lýsa flóknari eiginleikum eins og ljóspúlsum.
- ▶ Orkuflæði ljóssins er lýst með Poynting vigr

$$\vec{S} \propto \vec{E} \times \vec{B}$$

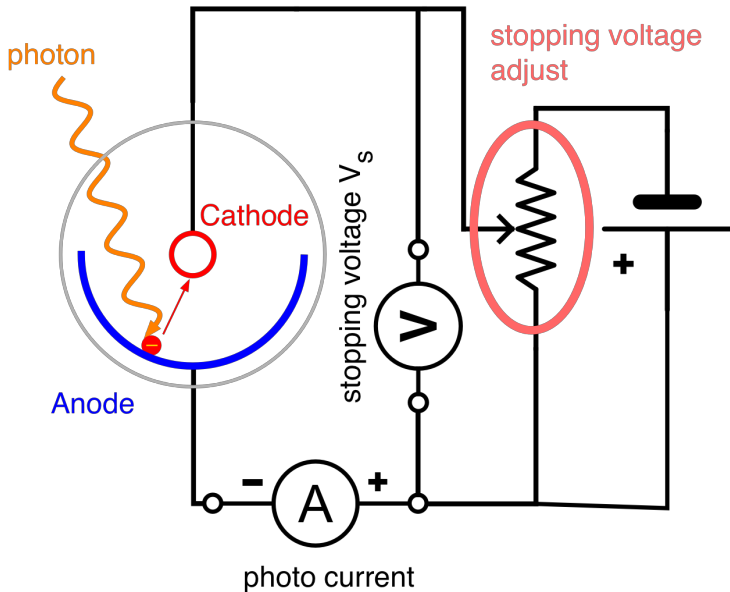
sem er eingöngu háð útslagi bylgjunnar.

Ljósrofuna (*Photoelectric Effect*)



- ▶ Þegar ljósi er lýst á málma losna rafeindir úr yfirborði vegna orkuflutnings frá ljósi til rafeinda.
 - ▶ Yfirvinna þarf mættið sem heldur rafeindunum í málminum.
- ▶ Notað til að breyta ljósi í rafmerki, t.d. í myndavélum.

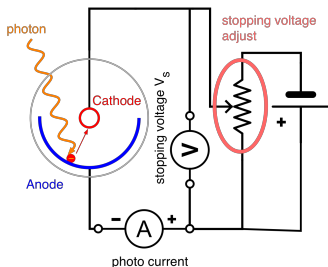
Tilraunauppsetning



Tilraunauppsetning

- ▶ Getum mælt fjölda rafeinda með því að mæla strauminn í rásinni.
- ▶ Getum metið hámarksorku rafeindanna með því að setja neikvæða spennu $-V_0$ þ.a. enginn straumur sé lengur í rásinni.
- ▶ Orkuvarðveisla gefur þá að hámarks hreyfiorka rafeindanna er

$$K_{\max} = eV_0$$

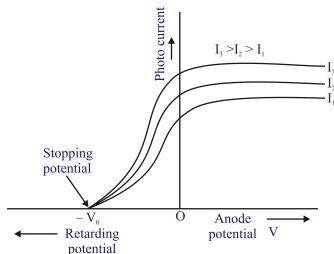


Forsögn bylgjulíkansins

- ▶ Orka ljóss er einungis háð útslagi bylgnanna og því ættu niðurstöður tilraunarinnar að vera óháðar tíðni ljóssins.
- ▶ Orku þarf til að losa rafeind úr rafmætti málmsins. Fyrir mjög dauft ljós ætti því að vera töl milli þess að kveikt er á ljósi og straumur renni.
- ▶ Spennan V_0 ætti að breytast með ljósstyrk

Niðurstöður tilraunarinnar

- ▶ V_0 er háð tíðni ljóssins. Fyrir neðan ákveðna marktíðni rennur enginn straumur í rásinni.
- ▶ Enginn töf er á milli þess að kveikt er á ljósinu og straumur byrjar að renna, alveg sama hversu dauft ljósið er.
- ▶ V_0 er óháð styrk ljóssins en straumurinn í rásinni við há gildi á V er línulega háður ljósstyrknum

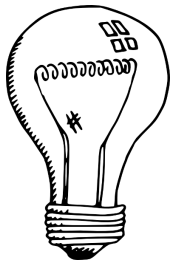


Ljóseindir

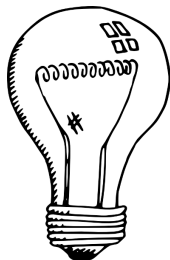
- ▶ Niðurstöður tilraunarinnar eru klárlega í ósamræmi við bylgjulíkanið.
- ▶ Einstein setti fram kenningu um að ljós sé samsett úr smáum ljóseindum (*photons*) eða skömmtum (*quanta*). Orka ljóseindanna er í réttu hlutfalli við tíðni þeirra $E = hf$ þar sem $h = 6,62606896 \times 10^{-34}$ Js.
- ▶ Þessar eindir hafa engann massa og því er skriðþungi þeirra (sjá takmörkuðu afstæðiskenninguna) $p = E/c$.
- ▶ Eindalíkanið útskýrir fullkomlega allar niðurstöður tilraunarinnar.

Sýnidæmi

Hversu mikill fjöldi ljóseinda kemur frá $P = 40 \text{ W}$ glóðarperu á hverri sekúndu?



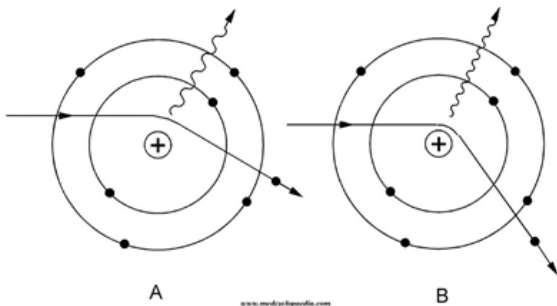
Hversu mikill fjöldi ljóseinda kemur frá $P = 40 \text{ W}$ glóðarperu á hverri sekúndu?



Lausn:

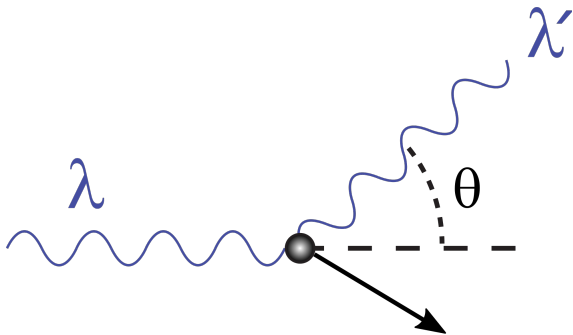
Mestur hluti ljóssins kemur í innrauðu með bylgjulengd $\lambda \approx 2000 \text{ nm}$ eða tíðni $f = c/\lambda \approx 1,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$. Meðalorka hvernar ljóseindar er því $E = hf \approx 1 \times 10^{-19} \text{ J}$. Fjöldi ljóseinda á sekúndu er því $n = P/E \approx 4 \times 10^{20}$ ljóseindir/s.

Hemlunargeislun (*Bremsstrahlung*)



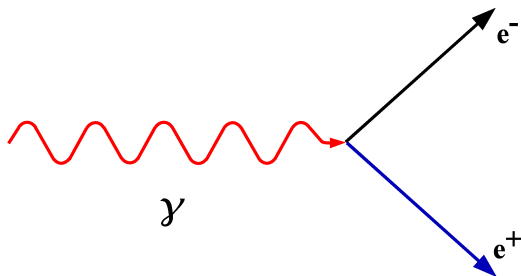
- ▶ Rafeind verður fyrir snöggri hröðun við nágreppi kjarna atóms og sendir frá sér ljós.
- ▶ Hámarktíðni ljóssins er háður hámarksorku rafeindanna og því í samræmi við eindalíkanið en ekki bylgjulíkanið.
- ▶ Eindalíkanið er því gilt bæði fyrir geislun og ísög.

Comptonstvístrun (*Compton Scattering*)



- ▶ Ljós lendir í árekstri við eind og hluti orku ljóssins endar sem hreyfiorka eindarinnar.
- ▶ Eindalíkan Einsteins passar fullkomlega við niðurstöður tilraunarinnar meðan bylgjulíkanið gengur ekki upp.

Tvenndarmyndun (*Pair Production*)



- ▶ Ljós með nægilega mikla orku getur myndað rafeinda-jáeinda par. Orka ljóssins þarf að vera meiri en orka kyrrstöðumassa parsins sem er 1,022 MeV.
- ▶ Aftur passar eindalíkanið mjög vel en bylgjulíkanið virkar ekki sem skildi.

Ljós er bæði bylgja og eind

- ▶ Höfum sýnt fram á að ljós er samsett úr straumi ljóseinda sem hver um sig ber ákveðinn skammt af orku.
- ▶ Höfum einnig sýnt fram á með mörgum tilraunum að ljós er bylgja, eindalíkanið virkar mjög illa við útskýringar á tilraunum með raufagler.
- ▶ Þetta hefur mjög áhugaverðar afleiðingar fyrir eiginleika ljóseinda.

Bylgjuframsetning á ljóseindum

- ▶ Skoðum ljóseind með vel ákvarðaða orku E . Þá er tíðnin vel ákvörðuð f og ljóseindinni á þessum tímapunkti má lýsa sem sínussveiflu

$$f(x) = A \sin(kx - \phi_0)$$

- ▶ Fasinn ϕ_0 er óþekktur og getur því tekið hvaða gildi sem er, sem jafngildir því að hann taki öll gildin.
- ▶ Bylgjan okkar verður því eitt langt strik í núlli yfir allan x ásinn.
- ▶ Staðsetning ljóseindarinnar er því með öllu óþekkt.

Bylgjuframsetning á ljóseindum

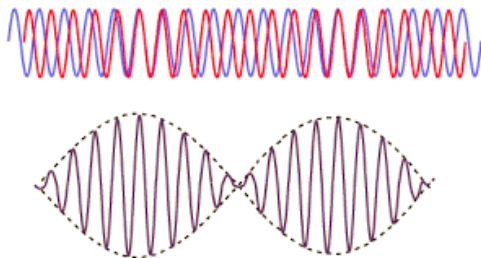
- ▶ Skoðum nú ljóseind með vel ákvarðaða staðsetningu. Til að túlka það sem bylgju notum við bylgjupakka sem er óendanlega grannur. Slíkt fall kallast deltafall og er núll í öllum punktum nema staðsetningu ljóseindarinnar þar sem fallið er óendanlega hátt.
- ▶ Slíkt fall getum við nálgast sem summu af sínusföllum yfir öll möguleg gildi á orku, þ.e.

$$f(x) = \int_0^{\infty} A(E) \sin(k(E)x - \phi(E)) dE$$

- ▶ Við höfum því enga þekkingu á orku ljóseindarinnar.

Óvissulögmál Heisenbergs

- ▶ Skoðum nú ljóseind þar sem þekkjum orku hennar ekki fullkomnlega, heldur bara með einhverri skekkju $\Delta E = E_2 - E_1$.
- ▶ Getum litið á þetta í bylgjuformi sem tvær bylgjur, aðra með $f_2 = E_2/h$, hina með $f_1 = E_1/h$.
- ▶ Slíkar bylgjur mynda svokölluð slög, bylgjumynstur sem hefur enn aðra tíðni $\Delta f = f_2 - f_1 = \Delta E/h$.



Óvissulögmál Heisenbergs

- ▶ Bylgjulengd slagsins ákvarðar með hversu góðri nákvæmni við getum ákvarðað staðsetningu ljóseindarinnar.

$$\Delta\lambda = c/\Delta f = ch/\Delta E = h/\Delta p$$

- ▶ Þetta má umrita í

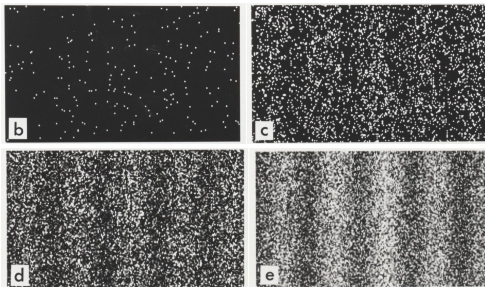
$$\Delta x \Delta p \geq h$$

og kallast óvissulögmál Heisenbergs.

- ▶ Við getum því ekki samtímis ákvarðað fullkomlega bæði staðsetningu og skriðþunga ljóseindar.
- ▶ Þetta má einnig umrita í óvissu í tíma og orku (sjá bók) sem

$$\Delta t \Delta E \geq \hbar/2$$

Túlkun bylgjueiginleikanna



- ▶ Skoðum tveggja raufa tilraunina með daufum ljósgjafa. Sjáum einstaka ljóseindir greinilega í upphafi en svo tekur myndin á sig form bylgjumynstursins.
- ▶ Lítum á bylgjumynstrið sem líkindadreifingu fyrir staðsetningu ljóseindanna.
- ▶ Saman gefa því eindalíkanið og bylgjulíkanið fullkomna lýsingu á ljósi.