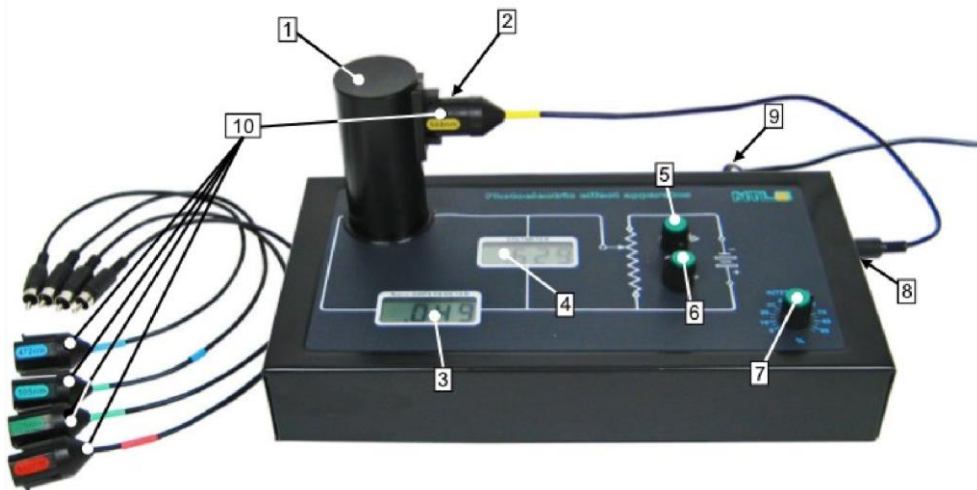


Valosähköinen ilmiö

Vuonna 1887 saksalainen fyysikko Heinrich Hertz havaitsi sähkövarauksen purkautuvan metallikappaleen pinnalta, kun siihen kohdistui valoa. Tarkemmissa tutkimuksissa todettiin, että sähkömagneettinen säteily kykenee irrottamaan metallin pinnalta elektroneja, tätä ilmiötä kutsutaan *valosähköiseksi ilmiöksi*. Ilmiö tapahtuu ainoastaan, jos säteilyn taajuus ylittää kullekin metallille ominaisen rajataajuuden. Valosähköistä ilmiötä ei kyetä selittämään klassisen fysiikan valon aaltomallin avulla.

Valosähköisen ilmiön koelaitteisto



- 1) Valokennon suojakupu
- 2) LED-lampun paikka
- 3) Nanoampeerimittari
- 4) Jännitemittari
- 5) Jännitteen karkea säätö
- 6) Jännitteen hienosäätö
- 7) Valon kirkkauden (intensiteetin) säätö
- 8) Lampun pistoke
- 9) Virtalähteen pistoke
- 10) LEDit

Käykää läpi laitteen säätimet ja mittarien näytöt – mitä mikäkin osa tekee? Mitä säädetään ja mitä mitataan? Huomatkaa myös, että nanoampeerimittari näyttää negatiivista virtaa, jos piirissä todella kulkee virtaa. Mittari näyttää nolaa jos virtaa ei kulje, ja positiivista lukua jos rajatapauksesta (nolla) ollaan kaukana, jolloin virtaa ei myöskään kulje.

- Kytke punaisen valon lähde kiinni laitteistoon. Pyörittele jännitteen karkea- ja hienosäädintä. Mitä havaitset? (Varmista, että intensiteetti ei ole nollassa ja LEDistä tulee valoa.)

Mistä sähkövirran ylläpitämiseen vaadittava energia on peräisin?

Laitteen pääosa on valokenno, jonka valolle altistuva elektrodi (metallilevy) on cesiumia. Tämän elektrodin pinnasta siis irtoaa elektroneja siihen osuvan valon vaikutuksesta.

Valosähköisessä ilmiössä metallilta irtoavia elektroneja kutsutaan *fotoelektroneiksi*. Elektrodia valaistaan erivärisillä led-lampuilla, jolloin havaitaan että valokennon läpi kulkee heikko sähkövirta. Kutsutaan sitä *fotovirraksi*. Havainto voidaan tulkita siten, että valo irrottaa levyn metallista elektroneja, jotka kulkeutuvat toiselle levyllä. Virta vastaa aikayksikössä siirtyneen varauksen määrää, eli

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1)$$

Sähkövirran ylläpito vaatii energiaa, joten energiaa täytyy siirtyä valosta elektroneille, niiden liike-energiaksi

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

- *Muuta ohjausjännitettä myötäsuntaan ja vastasuuntaan. Mitä havaitset? (Myötäsunta ja vastasuunta tarkoittavat jännitteitä, joiden aiheuttamat kentät joko edesauttavat tai vastustavat fotoelektronien kulkua levyltä toiselle.)*

- *Mitkä seikat vaikuttavat virran suuruuteen? Kokeile kaikkia säätimiä.*

- *Mitä virran suuruus kertoo fotoelektroneista levyjen välissä?*

- *Mitä fotoelektroneille tapahtuu silloin, kun lampun kirkkaus on täysillä mutta virtaa ei kulje?*

- *Mihin irtoavien elektronien liike-energia kuluu?*

- *Miksi virran suuruus pienenee vähitellen vastajännitteen kasvaessa?*

Valokennon elektrodien välille tuodaan ulkoinen jännite, jota vaihdellaan. Havaitaan että se vaikuttaa fotovirran suuruuteen. Jos jännite on myötäsuuntainen, fotovirta kulkee. Jarruttavalla jännitteellä fotovirta pienenee, ja tietyllä jännitteen arvolla fotovirta loppuu kokonaan.

Piirin sähkövirran suuruutta (eli fotoelektronien liikettä tyhjiöputkessa) voidaan siis säädellä ohjausjännitteellä. Vastajännitettä U kasvatettaessa piirin sähkövirta I pienenee.

Elektronin varaus on negatiivinen, joten se tarvitsee liike-energiaa voidakseen kulkea sähkökentän suuntaisesti (sähkökentän suunta on positiivisesta levystä negatiiviseen). Liikkuessaan piirin sähkökenttää vastaan fotoelektroni tekee työn W . Työn W suuruus on sama kuin hiukkasen potentiaalienergia E_p .

$$W = E_p = q U = e U , \quad (3)$$

missä q on hiukkasen varaus ja U kuljettua matkaa vastaava sähköisen potentiaaliero. Koko levyjen väliselle matkalle U on levyjen välinen jännite.

Pohdittavaa: voit verrata tätä homogeenisessa gravitaatiokentässä tehtyyn työhön, jolle pätee $W = E_p = mgh$.

Sähkökentässä tehty työ taas on $W = E_p = qU = qE\Delta x$. Tässä E on sähkökentän suuruus ja Δx kuljettu matka.

Molemmissa on termi, joka kuvaa kappaleen herkkyyttä kentälle (m tai q) ja termi, joka kuvaa pisteiden välistä potentiaalieroa kentässä (gh tai $E\Delta x$ eli U).

- Etsi jännitettä muuntamalla arvo, jolla virran suuruus on nolla. Mitä tiedämme fotoelektronien liikkeestä kyseisessä tilanteessa? Miten tämä auttaa meitä mittaamaan käytetyn valon fotonien ominaisuuksia?

Säädettäessä jännitettä siten että piirin sähkövirta lakkaa, voimme päätellä että tällöin kaikkein nopeimmatkin fotoelektronit on saatu pysäytettyä. Tällöin siis elektronien liike-energia E_k on kulunut sähkökenttää vastaan tehdyksi työksi Ue . Työperiaatteen mukaan:

$$W = -Ue = E_{k2} - E_{k1} \quad (4)$$

$$W = -Ue = 0 - E_{k1} = -E_{k1} \quad (5)$$

$$E_k = Ue \quad (6)$$

missä W on fotoelektronin tekemä työ, U ohjausjännitteen suuruus, e alkeisvaraus, E_{k2} on fotoelektronin liike-energia lopussa ja E_{k1} fotoelektronin liike-energia alussa.

Jännitettä, jolla virta saadaan pysäytettyä, kutsutaan *pysäytysjännitteeksi* U_0 . Pysäytysjännitettä mittaamalla voimme nyt selvittää fotoelektronien suurimman liike-energian E_{kmax} . Pysäytysjännitteen ja fotoelektronin suurimman liike-energian välillä on yhteys

$$E_{k \max} = U_0 e \quad (7)$$

Tulkitaan havainto niin, että levyyn osuva valo antaa elektroneille liike-energiaa, joka riittää viemään elektronin välin yli vain mikäli liike-energia on suurempi kuin elektronin kenttää vastaan tekemä työ. Pysäytysjännitteellä irtoavan elektronin suurin mahdollinen liike-energia on yhtä suuri kuin elektronin kenttää vastaan tekemä työ.

Sähkövirran suuruuden ollessa nolla ei toiselle elektrodille enää saavu elektroneja. Muuntamalla käytetyn valon intensiteettiä havaitsemme, että sähkövirran suuruus vaihtelee mutta jännite, jolla kaikki elektronit saadaan pysäytettyä, pysyy samana. Intensiteetti ei vaikuta elektronien energiaan.

- *Pohdi mitä tekemäsi havainnot kertovat valosta ja sen vuorovaikutuksesta metallilevyn kanssa.*

- *Toista tekemäsi mittaukset muille valonlähteille ja kirjaa saamasi tulokset ylös. Valon taajuus ja liike-energia voidaan myöhemmin laskea tietokoneella taajuuden ja pysäytysjännitteen avulla – taajuudelle $f = c/\lambda$, liike-energialle ks. kaava (7).*
- *Sijoita mittauksista saamasi tulokset ($f, E_{k\ max}$)-koordinaatistoon.*

Valon aallonpituus (nm)	Valon taajuus ($\cdot 10^{14}$ Hz) (täydennä myöhemmin)	Pysäytysjännite (V)	Elektronien liike-energia ($\cdot 10^{-19}$ J) (täydennä myöhemmin)

- *Mikä vaikuttaa pysäytysjännitteisiin?*

- *Mitä tämä kertoo fotoelektronien energiasta? Mistä tämä on energia on peräisin? Mitä voit päätellä siitä, miten valon energia käyttäytyy?*

Varioimalla valon väriä (säteilyn taajuutta) saamme muutoin samankaltaisia tuloksia kuin edellisellä taajuudella, paitsi pysäytysjännitteen arvo on eri kuin muilla taajuuksilla – pysäytysjännitteen arvo riippuu katodille osuvan valon taajuudesta ja siten myös elektronien saama suurin liike-energia riippuu metallille osuvan valon taajuudesta. Ilmeisesti myös valon energia on verrannollinen valon taajuuteen.

- *Sijoita mittauksista saamasi tulokset (f , eU_0)-koordinaatistoon. Tässä kaavan (7) mukaisesti eU_0 vastaa elektronien suurinta liike-energiaa. Minkä muotoiselta funktio näyttää?*

- *Miltä näyttäisi kuvaaja, jossa x -akselina olisi valon intensiteetti? Miksi tämä on yllättävää?*

- *Sovita mittauspisteille suora. Mikä on sovitetun suoran kulmakertoimen arvo ja yksikkö?*

- *Mikä fysikaalinen merkitys on suoran ja vaak-akselin leikkauskohdalla?*

Kuvaajan ja taajuusakselin leikkauskohta voidaan tulkita rajataajuudeksi, jota pienempitaajuuksinen säteily ei sisällä riittävästi* energiaa irrottaakseen elektronin metallista. Niinpä esimerkiksi kymmenen taskulampun valo ei kykene purkamaan sähköisesti varatun limsatölkin varausta, mutta yksi ultraviolettilamppu voi.

Energia-akselin ja kuvaajan leikkauskohta voidaan tulkita energiamääräksi, joka elektronin on saatava päästäkseen juuri ja juuri irtoamaan metallisidoksen elektronimerestä.

*: Tarkemmin sanottuna: säteilyn sisältämä energia riippuu sekä valon intensiteetistä että sen taajuudesta. Energia on kuitenkin pakattuna yksittäisiin fotoneihin, joiden energia riippuu vain valon taajuudesta.

- Vertaa saamaasi kulmakertoimen arvoa tunnettuihin luonnonvakioihin. Minkä luonnonvakion arvon olet saanut selvitettyä?

Ilmiön selittääkseen Albert Einstein esitti valolle uudenlaisen *fotonimallin*, jonka mukaan:

- Säteily koostuu erillisistä kvanteista, fotoneista.
- Fotonit absorboituvat ja emittoituvat joko kokonaan tai eivät ollenkaan.
- Absorboituessaan metalliin fotonin energia siirtyy kokonaisuudessaan yhdelle elektronille.
- Fotonien nopeus on valonnopeus c .
- Jokaisen fotonin energialle pätee $E = hf$, missä f on valon taajuus.

Kerratkaa vielä fotonimallin keskeiset ideat. Kiinnittäkää huomiota siihen, miten yksityiskohtaisen kuvan malli antaa valon ja aineen vuorovaikutuksesta ja energian siirtymisestä aineesta valoon tai valosta aineeseen. Tämä vaatii kuitenkin ajatuksen siitä, että fotoni on jonkinlainen valon alkeishiukkanen, jota ei voi jakaa. Miten tällainen ajattelutapa eroaa mallista, jossa valo on sähkömagneettisen kentän aaltoilua?

Einsteinin mallin mukaan valosähköisessä ilmiössä yksittäinen fotoni osuu yksittäiseen elektroniin ja siirtää tälle koko taajuudesta riippuvan energiansa hf . Osa fotonin energiasta kuluu elektronin irrottamiseen metallista, merkitään tätä työtä symbolilla W ja kutsutaan nimellä irrotustyö, ja loput muuttuvat elektronin liike-energiaksi E_k . **Valon sisältämää energiaa voidaan siis kuvata yhtälöllä $E = hf$.** Osaamme nyt laskea, minkä verran energiaa yhdellä fotonilla on. **Olemme myös määrittäneet valosähköistä ilmiötä kuvaavan yhtälön:**

$$E_{k \max} = hf - W$$