

LIITE 11A: VALOSÄHKÖINEN ILMIÖ

Valosähköisellä ilmiöllä ymmärretään tässä oppikirjamaisesti sitä, että kun virtapiirissä ja tyhjiölampussa olevan anodi-katodi yhdistelmän katodia säteilytetään fotoneilla, niin syntyy sähkövirta. Virtapiiri on kytketty siten, että sähkövirran suunta ja sähkökentän suunta ovat anodilta katodille. Kun fotonit reagoivat katodimateriaalin kenttien kanssa, niin vapautuu eräänlaisia ”elektroneja”, jotka kulkevat katodilta anodille. Koska vastavirtaan liikkuvat negatiiviset ”elektronit” kulkevat katodilta anodille, niin syntyy sähkövirta = käännteiskenttien virta anodilta katodille. Jo yli 100 vuotta sitten havaittiin, että näin tapahtuu myös määrätyn ehdoin, vaikka ulkoisen sähkökentän suunta käännettäisiin katodilta anodille ja elektronit joutuisivat kulkemaan vasten tahtoaan sähkövirran suuntaan, mitä ne eivät tietenkään tehneet, vaan virta kääntyi. Vuonna 1905 antoi Einstein tälle tunnetun kineettiseen energiaan perustuvan selityksen ja kirjoitti tätä kuvaavan yhtälön muotoon

$$E_{\text{kin}} = hf - \phi \quad (11A.1)$$

missä E_{kin} = katodista lähtevien elektronien kineettinen energia $mv^2/2$ ja ϕ = irroitustyö = ”work function”. Yhtälöllä 11A.1 ja siitä saatujen elektronien kineettisellä energialla, mikä syntyi fotonikimpuista (”bundles”) = hf , perusteltiin sitä, että sähkökentän kääntämisen jälkeenkin osa elektroneista voi kulkea katodilta anodille. Tässä oli monta rohkeaa väitettä 100 vuotta sitten ja historiallisesti yhtälö 11A.1 voidaan asettaa korkealle, esiintyyhän se vieläkin oppikirjoissa.

Kuitenkin kineettisen energian käsite on tässä valosähköisen ilmiön yhteydessä yhtä väärin kuin sähkövastuksen ymmärtäminen elektronien kineettiseksi törmäilyksi tai lämpötilan ymmärtäminen molekyylien kineettiseksi liikkeeksi. Valosähköinen ilmiö syntyy yksinkertaisella tavalla käännteiskentistä ja sähkötekniikan sähkövirrasta. Tämän ymmärtämiseksi on ensin ymmärrettävä, miten syntyy sähkövirta ja tässä yhteydessä tarkastellaan konkreettisesti, mitä tapahtuu, kun Inkoon voimalaitokselta toimitetaan sähköä Ouluun.

Inkoon voimalaitoksella tuotetaan ensimmäiseksi gravitaatiokentästä magneettikenttiä ja sitten näiden kondensoitumispisteiden jakeita siepataan mekaanisesti pyöriviin johtimiin, jolloin syntyvät kentät $1/N$ ja N . Kenttä $1/N$ on tässä vaiheessa ”suuri” ja kenttä N ”pieni”, kuitenkin siten, että N -kenttä on aina vähintään 137^2 -kertaa suurempi kuin $1/N$ -kenttä. Sähkö toimitetaan metallissa olevien sekundaarielektronien muodostamien kenttien kautta. Nämä sekundaarielektronit eivät ole mitään vapaiden elektronien liikettä metallissa, vaan ne ovat tiukasti paikoillaan olevia ja muodostavat itse asiassa juuri metallimaisen sidostumisen, mikä sitten sulamispisteessä avautuu, kuten kohdassa 7A.10 on esitetty. Tässä sekundaarielektronien muodostamassa yhtenäisessä kentässä tapahtuu seuraavat virtaukset

$$\begin{array}{l}
 N - \text{kenttä} = \text{”elektronit”} \\
 \leftarrow \\
 \text{Inkoo} - \left| \begin{array}{ccccc} N & N & N & N & N \\ i & i & i & i & i \end{array} \right| - \text{Oulu} \\
 \rightarrow \\
 i - \text{kenttä} = 1/N - \text{kenttä} \\
 \rightarrow \\
 \text{sähkövirta} = I, \text{sähkökenttä} = E
 \end{array} \quad (11A.2)$$

Eräänlaiset negatiiviset elektronit muodostavat N-kentän ja kun muutoksen suunta on aina suuremmista pienempiin alkiryhmiin, niin negatiivisten elektronien voidaan sanoa kulkevan aina vastavirtaan. Oppikirjasta riippuen täksi negatiivisten elektronien siirtymisnopeudeksi vastavirtaan ilmoitetaan muutama cm/s... 10^{-2} cm/s. Jännitekentässä kummatkin kentät ovat säännöllisten hiukkasten kenttiä ja normaalilla tavalla N-kenttä on hidas ja 1/N-kenttä on nopea. Sähkövirta voidaan tietyssä mielessä määrittellä positiivisten varausten virraksi, mutta kysymyksessä on todellisuudessa tasainen kvantittunut kentän muuttuminen kumpaankin suuntaan ja mikäli tällaista muutosta ei ole, niin virta pysähtyy tähän kohtaan. Kentän 1/N muutosnopeus = ”siirtymisnopeus” on hyvin suuri ja N-kentälläkin se on monta suuruusluokkaa suurempi kuin cm/s, mikä ilmeisestikin on jonkin sivuilmion mittaustulos vastavirtaan. N-kentän perustavalaatuinen alkiryhmä on sininen fotonin $\gamma_5 = 456 \text{ nm} = 5 \cdot \gamma_0$ ja tämä tulee tutusta rakenteesta $(1+1+3+5)/2 = 5$. Tämän alkiryhmän perustavalaatuisuutta kuvaa sekin, että jännitteistä riippumatta siniset valohiukkaset ovat yleisiä sähköilmiöissä luonnon salamat mukaan luettuna. Käänteiskentän 1/N alkiryhmät ovat rakennetut b-kvarkeista, joilla on sisäinen x^x -tyyppinen b-kvarkkirakenne, minkä alkuperä on magneettikentässä, vrt. kohta 2A ja kaaviot 2A.27 ja 2A.28. Tämä sama rakenne on sitten puolestaan alkuperä niille fotoneille, joita atomien elektronit luovat jännitekentästä.

Sekundaarielektronit ja primaarielektronit muodostavat atomeissa myös yhteisen hilajärjestelmän, minkä takia esimerkiksi lämpöä voidaan muuttaa suoraan sähköksi ja päinvastoin. Sekundaarielektronien muodostama sähkökenttä muodostuu aina sidotuista hiukkasista ja anodin ja katodin välille kytketty sähkökenttä alkaa sekundaarielektronirakenteesta ja päättyy vastakkaiseen sekundaarielektronirakenteeseen, joten valosähköinen ilmiö sitoutuu tähän kenttään eikä mistään ”vapaista elektroneista” tai liike-energiasta ole kyse. Primaarielektroneista syntyvillä röntgen säteillä (sekundaarielektronit ovat myös mahdollisia) tilanne on toinen ja ne ovat 1/N-kentän alkiryhmiä, jotka lähtevät valohiukkasten tapaan suurella nopeudella itse polarisoimaansa suuntaan. Anodin ja katodin välistä jännitekenttää valosähköisessä ilmiössä on hyvä tarkastella kaavioiden 11A.3...11A.6 avulla.

$$\begin{array}{l}
 \text{Normaali} \\
 \text{jännitekenttä}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 A - \left| \begin{array}{cccc}
 N & N & N & N \\
 i & i & i & i
 \end{array} \right| - K \\
 \rightarrow \\
 \text{virta} = I
 \end{array}
 \quad (11A.3)$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Käännetty} \\
 \text{jännitekenttä}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 A - \left| \begin{array}{cccc}
 N & N & N & N \\
 i & i & i & i
 \end{array} \right| - K \\
 \leftarrow \\
 \text{virta} = I
 \end{array}
 \quad (11A.4)$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Käännetty} \\
 \text{jännitekenttä} \\
 + \\
 \text{katodin} \\
 \text{säteilytys}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 A - \left| \begin{array}{cccc}
 N & N & N & N \\
 i & i & i & i
 \end{array} \right| - K \\
 \rightarrow \\
 \text{virta} = I
 \end{array}
 \quad (11A.5)$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Käännetty} \\
 \text{jännitekenttä} \\
 + \\
 \text{tietty} \\
 \text{säteilytaajuus}
 \end{array}
 A - \left| \begin{array}{cccc}
 N & N & N & N \\
 i & i & i & i
 \end{array} \right| - K
 \quad \text{virta} = I = 0
 \quad (11A.6)$$

Monissa oppikirjoissa käytetään Einsteinin valosähköisen selityksen yhteydessä sanaa "bundles" = kimppu, ryhmä jne., eikä voida olla aivan varmoja, etteikö Einstein näin myös olisi ajatellut valokvanteista hf. Fotonikenttä on elektronin käänteiskenttä, mikä näkyy jo siinä arkipäiväisessä ilmiössä, että keittiöliettä kuumennettaessa siitä lähtevien fotonien aallonpituus lyhenee. Kun elektroni on rakennetta 1+3+5+..., niin sen kentät ovat samaa rakennetta ja yksinkertaisimmillaan elektronin $e_0 = 137 \cdot$ magnetoni $m_m = 137^2 \cdot$ fotoni γ_0 kenttä voidaan kirjoittaa

$$e_0 / 137 = m_m = 137 \cdot \gamma_0 = 11,7^2 \cdot \gamma_0 \quad (11A.7)$$

Jos tälle otetaan nyt N-kertainen koko, niin yhtälö 11A.7 joudutaan kirjoittamaan fotonin käänteisyyden takia

$$N \cdot e_0 / 137 = N^2 \cdot 11,7 \cdot (11,7 \cdot \gamma_0) / N \quad (11A.8)$$

Yhtälön 11A.8 mukaisesti fotoni γ_0 saattaa hyvin esiintyä ryhmänä N^2 sen lisäksi, että se voi aina esiintyä myös yksilönä $1/N$ ja onko fysiikalla keinoja edes osoittaa kumpana se kulloinkin esiintyy. Tällä on sikäläkin merkitystä, että yksittäisen fotonin tapauksessa energia

$$E = hf \quad (11A.9)$$

on kääntäen verrannollinen energioihin $E=mc^2$ ja $E = kT$ nähden, mutta ryhmänä

$$E = N^2 \cdot hf \quad (11A.10)$$

Planckin energia onkin taas oikein päin energioiden $E = mc^2$ ja $E = kT$ kanssa. Näiden käsitteiden sekaannus on osaltaan saattanut aiheuttaa sen, että hiukkasfysiikassa yleisesti massat ja energiat ovat ylösalaisin. Pienempi hiukkanen värähtää nopeammin kuin suuri.

Valosähköisen ilmiön yhteydessä katodille tulevan säteilyn suurempi taajuus tarkoittaa pienempää hiukkasta, jonka liike-energia on myös pienempi ja myös tässä suhteessa Einsteinin selitys on virheellinen, mutta eihän valosähköisessä ilmiössä edes ole kysymys liike-energioista. Suuremman taajuuden pienemmät kenttähiukkaset tarkoittavat puolestaan, että se elektronikenttä, mihin nämä valohiukkaset absorboituvat on suurempi. Fysiikan kokeelliset tulokset osoittavat lisäksi, että taajuudella f ja elektronikentän koolla V_0 on lineaarinen suhde (esim. Alonso: Physics, s. 822 ja Halliday: Physics, s. 1030).

Katodin ja anodin sekundaarielektronien välille kytkeytyy kuvan 11A.3 mukainen kenttä. Kun katodin sekundaarielektronien kentät sieppaavat fotoneja, niin N kasvaa ja $1/N$ pienenee, joten virta kasvaa. Mielenkiintoinen tilanne syntyy, kun jännitekenttä käännetäänkin toisin päin kuvan 11A.4 mukaisesti. Kun nyt säteilytetään katodia, niin riittävän pienillä hiukkasilla = riittävän suurilla taajuuksilla saadaankin katodin N-kenttä kasvamaan suuremmaksi, jolloin virta kulkee taas anodilta katodille (kuva 11A.5). Kysymys on pelkästään N-kentän koosta ja tämän takia ei säteilyn

intensiteetillä normaalirajoissa ole vaikutusta, mutta katodimateriaalilla on kyllä pieni vaikutus, koska eri alkuaineilla on hieman erilaiset kvantittuneet suositumuuskoot kentille. Edellä esitetystä seuraa myös se asia suoraan ja yksinkertaisesti, että suuremmilla jännitteillä tulee N-kentän katodilla edelleen kasvaa ja sen $1/N$ -alkioryhmien pienentyä eli tulevan säteilyn taajuuden kasvaa.

Jos halutaan vielä syvällisemmin ymmärtää, mitä fotonin absorptiossa ja kentissä tapahtuu, niin fysiikan kohdan 2 mukaisesti ensiksi todetaan, että fotonit on rakennettu Comptonin elektronien muodostamista alkioryhmistä ja näissä Comptonin elektronit ovat x^x -tyyppisiä b-kvarkkirakenteita, vrt. yhtälö 2.53. Kun tulevan säteilyn taajuus kasvaa, niin fotoni ja nimenomaisesti fotonin sähkökenttä pienenee, mistä taas seuraa, että Comptonin elektronien muodostamat alkioryhmät fotonissa kasvavat. Tämä johtuu siitä hiukkasfysiikassa yleisestä ilmiöstä, että kenttä jakautuu edelleen alkioryhmiksi kääntäen verrannollisena pääkenttään tai itse hiukkaseen. Jos nyt nämä reaktiiviset ryhmät ovat niitä, jotka todellisuudessa reagoivat metallin elektronien kenttien alkioryhmien kanssa, niin syntyy yksinkertaisella tavalla aivan tavanomainen sähkösiirtymä suuremmasta pienempään samalla kun syntyy yksinkertaisella tavalla yläraja elektronikenttien alkioryhmille = tulevan säteilyn Comptonin alkioryhmien koko.

Erilaisilla jännitteillä ja erilaisilla säteilyn aallonpituuksilla saadaan syntymään kuvan 11A.6 mukainen tilanne, jolloin virta pysähtyy ja tämän tilanteen rajalla olevaa jännitettä kutsutaan pysäytysjännitteeksi V_0 . Yhtä hyvin voidaan ajatella, että on olemassa pysäytystaajuus f_0 . Kun virta siis näitä pienemmällä jännitteellä tai suuremmalla säteilyn taajuudella lähtee kulkemaan, niin se tapahtuu tavanomaisen kenttien tasaantumisen takia, eivätkä itse elektronit liiku minnekään ja jos ne liikkuisivat, niin ne liikkuisivat sähkövirtaa vastaan. Elektronien irtoamista voi kyllä tapahtua, mutta se on eri asia kuin valosähköinen ilmiö, kuten edellä on esitetty.

On olemassa eräs rajataajuus f_0 , jota pienemmällä taajuuksilla ei valosähköistä ilmiötä synny. Tämä on aivan ilmeisesti alkuaineen sekundaarielektronien kentän alkioryhmien ominaiskoko. Kun tarkastellaan yhtälöä 11A.1 syvällisemmin niin virtarajalla = jänniterajalla oletetaan elektroneilla olevan katodilla kineettinen energia

$$E_{\text{kin}} = (1/2) \cdot m v_{\text{max}}^2 = q V_0 \quad (11A.11)$$

ja kun elektronit teorian mukaan juuri ja juuri saavuttavat anodin, niin anodilla

$$E_{\text{kin}} = (1/2) \cdot m v_{\text{max}}^2 = q V_0 = 0 \quad (11A.12)$$

Tässä elektronit siis kulkevat vastavirtaa niinkuin pitääkin. Ensimmäinen ongelmakohta on elektroni $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = e_{91}$. Yhdelläkään katodimateriaalilla ei ole tällaisia elektroneja ehkä natriumia lukuunottamatta ja itse elektronitkin ovat erilaisia juuri siten, kuin irroitustyö osoittaa. Toinen ongelmakohta on elektronien nopeus. Se ei suinkaan yleisessä tapauksessa ole maksimissaan katodilla ja minimissään anodilla, vaan tilanne saattaa olla täsmälleen päinvastainen, mikä selviää kuvaa 11A.5 katsomalla. Pienemmän kentän nopeus on yleisessä tapauksessa suurempi kuin suuren ja siten N-kentän nopeus kasvaa anodille päin. Kolmanneksi yhtälöiden 11A.11 ja 11A.12 elektroni ei kamppaile virtaa vastaan, vaan N-virta kuljettaa niitä aivan samalla tavalla kuin missä tahansa sähkötekniikan virtapiirissä.

Kun yhtälöstä 11A.11 ratkaistaan nopeus, niin saadaan ensiksi 1 voltin jännitteelle

$$v^2 = 2q_0 V_0 / m \quad (11A.13)$$

$$\frac{2q_0}{m} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}} = (593096,8911 \text{ m/s})^2 \quad (11A.14)$$

$$= (v_{1v})^2 \quad (11A.15)$$

Tämä tulos pitää paikkansa. Toisin sanoen tekijä $2q_0 / m = 2q_0 / e_{91}$ ei ole mitään muuta kuin yhden voltin kentän nopeuden neliö. Kun jännitehiukkaset ovat säännöllisiä hiukkasia ja jännite mitataan käänteisalkioryhmistä, niin kohdan 11 (Planck) yhtälön 11.1 mukaisesti on olemassa

$$m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2 = \text{vakio} \quad (11A.16)$$

$$v_1^2 / V_1 = v_2^2 / V_2 = \text{vakio} \quad (11A.17)$$

Pelkästään yhtälön 11A.17 ja järjestelyn $v_{1v}^2 = 2q_0 / m$ takia yhtälö 11A.13 pätee yleisenä tapauksena kaikille jännitteille. Tämän mukaisesti yhtälöt 11A.11 ja 11A.12 sekä näiden idea ei ole ollenkaan oikein, mikä taas ei mitenkään estä sitä, etteikö niillä laskemalla synny myös oikeita tuloksia. Tämä on hyvinkin tavallista fysiikassa. Kun nyt yhtälössä 11A.1 asetetaan kineettinen energia anodilla $E_{\text{kin}} = 0$, missä siis ei mikään ole oikein, niin tällä tavalla saadaan oikea yhtälö irroitustyölle

$$\phi = hf \quad (11A.18)$$

Tämä siis tulee suoraan siitä, että virtarajalla = jänniterajalla sekundaarielektronin kentän alkoryhmällä on taajuus f ja rajalla syntyy tasan tilanne 11A.6.

Irroitautumisesta ei kuitenkaan ole kysymys ja kaiken lisäksi energiat ovat tyypillisesti juuri tässä ylösalaisin. Joka tapauksessa yhtälöstä 11A.18 voidaan laskea eräs ominaiskentän koko ja se on tärkeä asia. Metalleilla tyypillisiä ominaiskenttiä ovat fotonin $\gamma_5 = 456 \text{ nm}$ lähialueet ja 3/5-osa tästä, minkä voidaan olettaa tulevan rakenteesta $3 / (1+1+3)$. Tässä pisteessä 11A.18 saattaa primaarielektronin osuus säteilyn sieppauksesta kasvaa ja kun pitkäaaltoista säteilyä on tarpeeksi, niin sekundaarielektronien N-kenttä lähtee suorastaan pienenemään. Tämän saman ilmiön alkuperää on sähkövastus ja sen kasvaminen metalleilla lämpötilan noustessa. Nämä kaikki johtuvat siitä, että atomin elektronista primaarikentän = ”termonikentän” ja sekundaarielektronien käänteiskentän alkoryhmät reagoivat keskenään ja syntyy siirtymiä suuremmasta pienempään.

Kun piirretään käyrä jännitteestä V_0 taajuuden f funktiona, niin ilman kvantittumisia tämä olisi suora viiva. Näin ei kuitenkaan aivan tarkalleen ole (vrt. Alonso: Physics, s. 822) eikä pidä ollakaan kuin erikoisvalinnoilla tai erikoistapauksissa. Kuitenkin jännitekvantittumiset ovat paljon vähäisempiä kuin valosähköisen ilmiön muuten sekundaarielektroneissa aiheuttamat kvantittumiset (vrt. Fedorov: Atomic and Free Electrons In A Strong Light Field, s. 324). Tämä on tärkeä tieto ja tarkoittaa, että jännitekenttien siirtymät tapahtuvat huomattavasti pienempinä kvantteina kuin ”normaalit kvantitasot”. Näin se on myös kokemusperäisesti ja fysiikan kokeellisten tulosten perusteella näyttää olevan.

Usein sanotaan, että suoran $V_0 = k \cdot f$ kulmakerroin on h/q . Tämä on tiettyä mielivaltaa ja tapausta h/q voidaan pitää enintään eräänä erikoistapauksena. Kullakin hiukkasella on oma h , joka on muotoa $h = mvr$ ja kullakin hiukkasella on oma varaus, mikä on muotoa $F = \Delta m \cdot v \cdot f$. Varauksen vakioisuuden käsite on mieletön jos sen takia, että varattujen hiukkasten kokoskaala on protoneista 10^{-26} kg kosmisiin elektroneihin = gravitaatiokentän elektronit = b-kvarkit 10^{-44} kg eli vähintään suuruusluokkaa 10^{18} . Sensijaan saattaa olla varauksia, jotka ovat suhteessa hiukkasen kokoon ja tämän varauksen suuruus saattaa olla yleisesti normaali 2-3 % hiukkasen massasta. Kulmakerroin k

= h/q on kokeellisen fysiikan tuloksena hyvin tärkeä sen takia, että se osoittaa tässä atomien rajatussa tapauksessa muuttuvan h :n ja muuttuvan q :n suoraa verrannollisuutta. Valosähköisestä ilmiöstä piirretyt suorat $V_0 = k \cdot f$ tulee kuitenkin ymmärtää massan ja sen käänteismassan käänteismittaluvun graafiseksi esitykseksi, mikä on suora. Fysiikka on tässä tapauksessa jokseenkin yksinkertaista, mutta tätä ei vain ole huomattu aikaisemmin. Valosähköinen ilmiö siis syntyy metallin sekundaarielektronien N-kenttien kasvusta ja niiden suorasta liittymisestä jännitekenttään. Tämä N-kenttien kasvu taas määräytyy $1/N$ -kenttään tulevien valohiukkasten koosta, minkä eräs käänteismitta on taajuus ja vähäisessä määrin itse metallin elektronirakenteesta. Liike-energiasta ei valosähköisessä ilmiössä ole ollenkaan kysymys ja itse asiassa yhtälössä 11A.1 on ainoastaan yksi kirjain oikein = säteilyn taajuus f .

22.04.2004

Martti Pitkänen