

Cathode ray project

January 2022

1 Katodisäteiden mysteeri

1.1 Johdanto

Kokeillaan vähän erilaista ryhmälaskariformaattia. Tutustutaan tässä tehtävässä historiallisesti tärkeään 1800-luvulla tehtyjen kokeiden sarjaan. Toki itse kokeet ovat tärkeitä, mutta on myös hyvä tutustua hieman tieteellisen tutkimuksen luonteeseen ja siihen miten tulkintoja on erilaisia mutta miten kokeiden avulla saavutetaan lopulta ymmärrys asioiden todellisesta tilasta. Geisslerin putkilla tehdyt kokeet ovat lisäksi aineen rakenteen kurssin kannalta tärkeät siksi, että niillä löydettiin kaiken aineen rakenteen kannalta tärkein alkeishiukkanen.

Tehtävä koostuu neljästä vaiheesta, joihin jokaiseen liittyy noin viiden minuutin pituinen video. Katsokaa videot yhdessä kaikki pienryhmät samaan aikaan assistentin ohjauksessa.

1.2 Geisslerin putket

Katsokaa seuraava videopätkä (pituus noin viisi minuuttia).

<https://aalto.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=63f01e7d-a6ef-4401-a470-ae3e00b7dd38>

Kuten videoilla mainittiin, Geisslerin putkiin perustuvat tosiaan niin kuva-putkinäytöt (joita tosin ei nykyään paljoa televisioina tai tietokonemonitoreina käytetä), loisteputkilamput kuin röntgenlaitteenkin toimintaperiaate.

Keskeistä Geisslerin putkissa oli, että sen sisällä olevan kaasun piti olla harvaa mutta ei liian harvaa. Laitteiden ja tieteen kehityksessä keskeistä olikin yhä parempien tyhjiöpumppujen rakentaminen. Selvitetään seuraavalla yksinkertaisella laskulla miksi kaasun pitää olla harvaa.

1.2.1 Toimintaperiaate

Laitteen toimintaperiaate perustuu siihen, että Geisslerin putkessa on voimakas sähkökenttä, joka virittää siellä olevia molekyyliä saaden ne lähettämään valoa. Ensinnäkin siellä siis täytyy olla edes hieman kaasua, jotta on jotakin molekyyliä jotka voivat virittyä. Vaan miten molekyylit virittyvät ensinkään?

Sähkökenttä kiihdyttää putkessa olevia varautuneita hiukkasia, jotka sitten törmäilevät putkessa oleviin molekyyliin. Nämä törmäykset virittävät molekyyliä, edellyttäen että törmäävällä hiukkasella on riittävästi liike-energiaa. Oleellista onkin niin kutsuttu *vapaa matka*, joka on keskimääräinen etäisyys jonka varattu hiukkanen voi liikkua ja siis sähkökentän vaikutuksesta kiihtyä ennen kuin se törmää johonkin molekyyliin. Putkessa olevan sähkökentän tekemä työ vapaan matkan pituudella määrää siis sen kuinka paljon energiaa molekyyli voi törmäyksessä saada ja tämän pitää olla verrattavissa molekyylin ionisaatio- tai ainakin viritysenegiaan. Nämä viritysenegiat ovat muutaman elektronivoltin suuruusluokkaa.

1.2.2 Vapaa matka

Tehdään ensiksi yksinkertainen malli kaasussa etenevän hiukkasen vapaalle matkalle (mean free path).

Oletetaan, että hiukkanen liikkuu ideaalikaasussa jonka paine on P ja lämpötila T . Keskeinen suure joka kuvaa molekyylien tiheyttä on lukumäärätiheys $n = N/V$. **Määrittäkää lukumäärätiheys paineen ja tilavuuden funktiona.**

Seuraavaksi määritetään *sirontavaikutusala* σ . Se on suure, joka kuvaa todennäköisyyttä osua yksittäiseen molekyyliin. Jos oletamme että hiukkanen vuorovaikuttaa molekyylien kanssa vain fyysisesti törmäämällä, niin sirontavaikutusala on vain joko molekyylin tai hiukkasen poikkipinta-ala tai jonkinlainen yhdistelmä niistä kahdesta. Yksinkertaisin malli saadaan kun oletetaan molekyyliä pistemäisiksi, mutta hiukkanen pallonmuotoiseksi. Oletetaan että sen säde on tyypillinen pienen molekyylin halkaisija 1 nm (lopputuloks on sama jos oletetaan että hiukkanen on pistemäinen ja kaasun molekyyliä ovat halkaisijaltaan 1 nm – voitte miettiä miten muotoilisitte laskun siinä tapauksessa!)

Nyt voidaan kuvitella, että hiukkasen liike rajaa kuvitteellisen putken, jonka poikkipinta-ala on σ ja pituus l . Tämän putken tilavuus on siis σl . Keskimäärin putken sisällä on molekyyliä lukumäärä

$$\delta N = \sigma l n, \tag{1}$$

missä n on edellä laskettu lukumäärätiheys. Vapaa matka on nyt sellainen pituus l jolla $\delta N = 1$, eli 'putken' sisällä on keskimäärin yksi molekyyli. Saadaan siis

$$l = \frac{1}{n\sigma}. \tag{2}$$

Geisslerin putkessa paine voi olla helposti 1 mbar tai sen alle. Kuinka suurta vapaata matkaa se vastaa, jos lämpötila on 300 K?

1.2.3 Kineettinen energia

Sähkökenttä kiihdyttää hiukkasta koko sen vapaan matkan ajan. Jos Geisslerin putken pituus on 30 cm ja elektrodien välillä on jännite 12 kV, niin **määrittäkää kuinka suurella kineettisellä energialla hiukkanen, jonka varaus on $q = 1.6 \cdot$**

10^{-16} C, törmää molekyyliin kuljettuaan keskimääräisen vapaan matkan verran sähkökentän suuntaan. Käyttäkää energian yksikkönä elektronivolttia.

Huomatkaa, että törmäysenergia riippuu kaasun paineesta: mitä vähemmän molekyyliä, sitä pidempi vapaa matka ja sitä suurempi energia. Jos molekyylin virittäminen tai ionisointi vaatii energian suuruusluokaltaan 2 eV, (mikä vastaa näkyvän valon fotonin energiaa!), niin tarkista että edellä mainittu 1 mbar paine on oikeassa suuruusluokassa.

Mutta toisaalta mitä pienempi paine, sitä vähemmän viritettäviä molekyyliä ja sitä vähemmän valoa. (Kuvaputkitelevisioiden katodisädeputkissa paine tyypillisesti noin 10 mPa jolloin vapaamatka on suuruusluokkaa metri).

1.3 Katodisäteet hiukkasia?

Katsokaa seuraava video (noin viisi minuuttia):

<https://aalto.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=6188fc03-c46b-4106-9a09-ae3e00b7e44a>

Crookes oli sitä mieltä, että katodisäteet olivat varattuja hiukkasia. Tarkastellaan hieman Crookesin ajatuksia hänen vuoden 1878 artikkelissaan ”On the Illumination of Lines of Molecular Pressure, and the Trajectory of Molecules”.

Crookes tarkasteli katodisäteiden synnyttävää hehkua Geisslerin putken päässä, tai kuten hän sen kirjoittaa

At very high exhaustions the dark space becomes so large that it fills the tube ... the bulb becomes beautifully illuminated with greenish-yellow phosphorescent light. ... [the light] cannot be seen in the space of the tube, but where the projected beam strikes the glass only.

Pimeällä tilalla (dark space) hän viittaa siihen, että kun Geisslerin putken tyhjiö on riittävän täydellinen (very high exhaustion), ei putken sisällä oleva kaasu enää valaise, vaan ainoa valo syntyykin lasiputken päädyistä kun itse lasi alkaa hehkua. Hän jatkaa

This greenish-yellow phosphorescence, characteristic of high exhaustions, is frequently spoken of in the paper. It must be remembered, however, that the particular colour is due to the special kind of soft German glass used. Other kinds of glass phosphoresce in a different colour. At an exhaustion of 0.4 M*, no light other than this is seen in the apparatus.

M* on yksi ilmakehän paineen miljoonasosa, eli 10^{-6} bar = 0.1 Pa.

Määrittäkää Crookesin kokeen vapaa matka ja osoittakaa, että hänen mainitsemassaan paineessa vapaa matka on tosiaankin samaa luokkaa kuin Geissler putken pituus. Crookesin tulkinta olikin, että putkessa oleva sähkökenttä kiihdyttää siellä olevia varattuja hiukkasia. Kun kaasussa ei ole molekyyliä, jotka voisivat hiukkasia hidastaa, osuvat ne putken päässä olevaan lasiin saaden sen hehkumaan.

Tämän jälkeen Crookes analysoi lasista lähtevää valoa

The spectrum of the green light is a continuous one, most of the red and the higher blue rays being absent; while the spectrum of the light observed in the tube at lower exhaustions is characteristic of the residual gas. No difference can be detected by spectrum examination in the green light, whether the residual gas be nitrogen, hydrogen, or carbonic acid.

Lasin pinnasta lähtevän valon spektri ei siis riippunut siitä millaista kaasua putken sisällä oli, mikä siis poikkesi täysin siitä valosta mitä putken sisällä oleva kaasu lähetti (mikäli sitä oli putken sisällä riittävän paljon). Kaasun molekyylien lähettämä valohan muodostaa epäjatkuvan spektrin, eli spektrissa havaitaan selkeitä 'spektriviivoja' (tähän Crookes viittasi lausahduksellaan 'characteristic of the residual gas'). Katodisädeputket mahdollistivatkin eri molekyylien lähettämän spektrin tutkimisen. Kaasumolekyylien lähettämän valon spektriä ja sen taustalla olevaa ilmiötä pidettiin kuitenkin yleisesti ottaen liian vaikeana selittää, eikä sitä pystyttykään selittämään ennen Niels Bohrin esikvanttimestaan atomimallia. Palaamme atomien ja molekyylien spektreihin kurssin loppupuolella.

Crookes tutki myös katodisäteen varjoa, kun säteen tielle putken sisälle asetettiin este.

The author next examines the phenomena of shadows cast by the green light. The best and sharpest shadows are cast by flat disks and not by narrow pointed poles; no green light whatever is seen in the shadow itself, no matter how thin, or whatever may be the substance from which it is thrown.... The shadows are not optical, but are molecular shadows, revealed only by an ordinary illuminating effect; this is proved by the sharpness of the shadow when projected from a wide pole.

Crookesin lausahdus varjon terävyydestä on mielenkiintoinen! Jos varjo olisi valonsäteen muodostama, olisi sen reunat diffraktion vuoksi epätarkat (vrt. viikon 2 laskuharjoitustehtävien Fraunhoferin diffraktio). Crookes ymmärsikin tämän ja tulkitsi sen vuoksi, että katodisäde koostuu hiukkasista (hän puhuu molekyyleistä ja niiden heittäjästä varjosta 'molecular shadow') ja että vihreä valo syntyy näiden hiukkasten ja lasin vuorovaikutuksesta. Kun valon lähteenä on Geissler-putken pinta, ei siinä luonnollisestikaan havaita Fraunhoferin diffraktion raitoja. **Ymmärrätkö miksi varjon terävyys on todiste hiukkasluonteen puolesta?**

Crookes toisti myös Plückerin kokeen magneetilla ja osoitti että katodisäde kääntyy niin kestopagneetin kuin sähkömagneetinkin vaikutuksesta. Onkin toki tärkeää toistaa myös aiempia kokeita, sillä niissä on saattanut jäädä huomioimatta jokin asia!

Crookes ei varsinaisesti ota kantaa siihen mistä katodisäteet loppujen lopuksi koostuvat. Hän viittaakin niihin nimillä "rays of molecular light" ja "emissive light". Nämä nimet viittaavat ehkä siihen, että hiukkasluonteestaan huolimatta hän ajatteli katodisäteen kuitenkin olevan eräänlaista valoa ennemmin kuin aineen, atomien tai molekyylien osia.

1.4 Katodisäteet sähkömagneettista säteilyä?

Katsokaa seuraava noin kolmen minuutin videopätkä
<https://aalto.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=c5d15db0-9100-4533-9bd6-ae3e00b7eada>

Hertzin kokeet hämmensivät soppaa, koska ne kyseenalaistivat Crookesin hiukkastulkinnan. Jos katodisäteet eivät välitä poikittaisesta sähkökentästä niin ne eivät voi olla varattuja. Mutta toisaalta magneettikentässä säde kääntyy. Erittymisesti Hertz koki että katodisäteiden kyky läpäistä ohut kultakalvo oli osoitus että ne eivät voi olla hiukkasia, koska kalvon läpäisy pitäisi tehdä siihen reikiä, jollaisia ei kuitenkaan havaittu. Hertz ja monet muut spekulivatkin, että kyseessä on jonkinlainen sähkömagneettinen aalto.

Magneetin vaikutusta säteen kulkuun ei pidetty ongelmallisena, sillä Faraday oli aikoinaan osoittanut että lasin sisällä etenevän valon polarisaatiota voidaan muuttaa magneettikentällä (niin kutsuttu Faradayn efekti, mutta se edellyttää että valo etenee jossakin sopivassa väliaineessa.) Lisäksi eetteriteoria oli edelleen vallalla, joten kenties magneetti vaikuttikin eetteriin ja siten välillisesti katodisäteiden kulkuun?

Oliko Hertzin selitys uskottava? Oliko Faradayn efekti tuttu? Entä eetteriteoria?

Hertzin koe osoittautui kuitenkin virheelliseksi. J.J. Thomson selitti vuonna 1897, että syy siihen miksi katodisäde ei reagoinut Hertzin kokeessa poikittaiseen sähkökenttään, johtui putkessa olevien ionisoituneiden molekyylien varjostuksesta.

Varjostus (screening) onkin hyvin tärkeä fysikaalinen ilmiö. Hertzin kokeessa poikittainen sähkökenttä luotiin negatiivisesti ja positiivisesti varatuilla (kondensaattori)levyillä. Ionisoituneet molekyylit kuitenkin hakeutuivat näiden levyjen ympärille: positiivisesti varatut ionit negatiivisesti varatun levyn lähelle, negatiivisesti varatut ionit positiivisesti varatun levyn lähelle. Tätä ionien siirtymistä jatkui kunnes ionien ja levyn varausten summa oli nolla, jolloin myös sähkökenttä Geisslerin putkessa katosi, eikä katodisäteiden varattuihin hiukkasiin kohdistunut sähköisiä voimia.

J.J. Thomson toisti Hertzin kokeen paremmassa tyhjiössä, jolloin sähkökenttää varjostavia molekyyliä oli vähemmän ja osoitti että sähkökenttä tosiaan vaikuttaa katodisäteiden kulkuun.

1.5 J. J. Thomsonin kokeet

Ja viimeisenä videona katsokaa seuraava noin seitsemän minuutin video
<https://aalto.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=4a5a3b2b-d988-49ea-9686-ae3e00b7f0bf>

Thomsonin keksintö katodisäteiden varattujen hiukkasten nopeuden määrittämiseksi on varmaan lukiostakin tuttu: nopeusvalitsin. Se koostuu siis (ideaalisesti) homogeenisesta magneettikentästä sekä sähkökentästä, jotka aiheuttavat etenevään hiukkaseen vastakkaisuuntaiset voimat. **Miettikää mihin suuntaan mikäkin pitää olla: hiukkasen nopeus, sähkökenttä ja magneettikenttä.**

Siinä tapauksessa kun hiukkasen rata on suora, kumoavat sähköinen $\vec{F} = q\vec{E}$ ja magneettinen voima $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ toisensa. Koska magneettinen voima on suoraan verrannollinen hiukkasen nopeuteen, kun taas sähköinen voima ei riipu nopeudesta, saadaan videolla esitetyllä tavalla määritettyä hiukkasen nopeus sähkö- ja magneettikentän vuon voimakkuuksien suhdelukuna

$$v = \frac{E}{B}. \quad (3)$$

Videolla sanottiin että Thomson havaitsi hiukkasten nopeuden olevan jopa 60000 mailia tunnissa, mutta siinä on suuruusluokkavirhe. Määrittäkää nopeus itse seuraavasti: oletetaan että hiukkasen varaus on e =alkeisvaraus= $1.6 \cdot 10^{-19}$ C ja massa elektronin massa $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg (näitähän Thomson ei toki tien-nyt!) ja oletetaan että elektroneja kiihdyttävä jännite on 10 kV. **Määrittäkää elektronien nopeus.**

Videolla luultavasti piti sanoa niiden nopeudeksi 60000 mailia sekunnissa, joka on noin kolmasosa valonnopeudesta, kuten videolla myös sanottiin.

1.6 Katodisädekokeiden seuraamuksia

Elektronin löytyminen muutti atomikuvaa, sillä atomeilla ymmärrettiin olevan hienorakennetta. Elektroni on osa jokaista atomia ja sähköiset vuorovaikutukset pitävät atomin koossa.

Thomsonin kokeet saivat jatkoa Geigerin ja Marsdenin kokeista, joiden myötä Rutherford muodosti nimeään kantavan atomimallinsa, jota olettekin analysoineet jo kurssimme viikon 1 laskuharjoitustehtävissä.

Toinen atomimallin kehittymisen kannalta tärkeä ilmiö oli itse katodisädeputkissa olevan kaasun lähettämän valon spektri. Eri kaasut lähettivät eriväristä valoa ja lisäksi kaasujen absorptiospektri oli samanlainen kuin niiden lähettämän valon spektri. Tämä oli ilmiönä tunnettu jo 1800-luvun alkupuolelta saakka Kirchoffin ja Bunsenin työn tuloksena mutta sen merkitystä ei ymmärretty.

Vasta 1900-luvun alussa Niels Bohr yhdisti Rutherfordin atomimallin ajatukset kaasujen spektroskopiakokeisiin ja loi ensimmäisen kvanttimekaanisen atomimallin. Näihin asioihin perehdytään tarkemmin kurssin viidennellä viikolla.

2 Esitehtäväkysymyksiä ja vastauksia

Jos aikaa jää, niin lukekaa Mycoursesista viikko 3-sivulta olevia ”Kysymyksiä ja vastauksia-dokumentteihin koottuja esitehtävien yhteydessä nousseita opiskelijoiden kysymyksiä ja niihin annettuja vastauksia. Poimikaa sieltä muutama, jotka olivat erityisen mielenkiintoisia, valaisevia tai joista mahdollisesti olette eri mieltä.