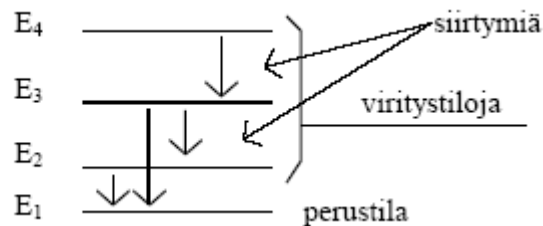


FYSA234/K2 SPEKTROMETRI, HILA JA PRISMA

1 Johdanto

Kvanttimekaniikan mukaan atomi voi olla vain tietyissä, määrätyissä energiatiloissa. Perustilassa, jossa atomi normaalisti on, energia on pienimmillään. Jos atomi on jossakin muussa (korkeammassa) energiatilassa, on se virittynyt ja pyrkii mahdollisimman nopeasti perustilaan. Tämän se tekee joko suoraan tai ko. viritystilan ja perustilan välisten tilojen kautta (kuva 1). Kun siirtymä energiatilasta toiseen tapahtuu, vapautuu energiaa alku- ja lopputilan energiaerotuksen verran. Tämän energian atomi luovuttaa yleensä sähkömagneettisen säteilyn kvanttina eli fotonina. Tästä seuraa, että ko. atomin lähettämän sähkömagneettisen säteilyn energia- ja aallonpituusspektri on diskreetti eli kullakin aineella on sille ominainen spektrinsä.



Kuva 1. Atomin energiatiloja.

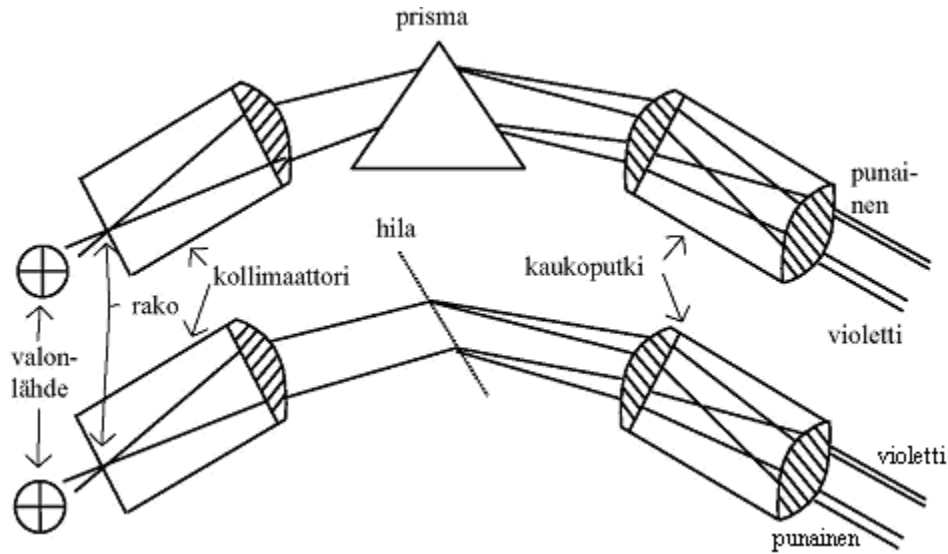
Tässä työssä tutustutaan hila- ja prismaspektrometreihin, joiden avulla tutkitaan valon taipumista hilassa ja taittumista prismassa ja samalla tutustutaan eräiden kaasujen atomien spektreihin näkyvän valon alueella.

Ennen työvuorolle tuloa on tutustuttava noniusasteikkojen käyttöön (esimerkiksi työntömitassa on noniusasteikko). Aiheeseen liittyvä kotitehtävä on tämän työohjeen lopussa.

2 Lähtökohdat

2.1 Spektrometri

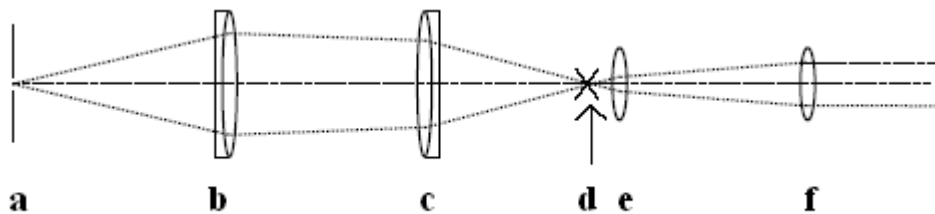
Spektrometri on laite, jonka avulla voidaan tutkia sähkömagneettisen tai hiukkassäteilyn energiaspektrejä. Kun energia ≤ 1 keV, sähkömagneettinen säteily luokitellaan yleensä aallonpituuden mukaan ($E = h\nu = hc/\lambda$). Työssä käytettävillä hila- ja prismaspektrometreillä voidaan mitata aallonpituuksia näkyvän valon alueella. Spektrometrien kaaviokuva on esitetty kuvassa 2 ja tarkemmin liitteessä 2.



Kuva 2. Kaaviokuva hila- ja prismaspektrometreistä.

Näiden spektrometrien toiminta perustuu liikuteltavan kaukoputken avulla tapahtuvaan taipumis- tai taittumiskulman mittaamiseen. Kun tunnetaan hilarakojen välimatka tai prisman taittava kulma ja prismalasin taitekerroin sekä mitataan poikkeamakulma, voidaan aallonpituus laskea. Käytännössä aallonpituuden määrittäminen tapahtuu kätevimmin tunnettujen aallonpituuksien avulla saadun kalibraatiokäyrän ($\lambda = f(\theta)$) avulla.

Spektrometrissä valonlähde asetetaan raon a (kuva 3) eteen. Kollimaattorin avulla valonsäteet yhdensuuntaistetaan. Hilan tai prisman jälkeen eri aallonpituuksia vastaavat yhdensuuntaiset säteet fokusoidaan kaukoputken objektiivin avulla okulaarin polttopisteen ja okulaarin väliin (hiusristikon kohdalle). Okulaarin (suurennuslasi) läpi voidaan tarkastella syntynyttä kuvaa ja ristikkoa lepotilassa olevalla silmällä. Lue liite 2 spektrometrin käytöstä!



Kuva 3. Työssä käytettävän linssisysteemin kaaviokuva. a = rako, b = kollimaattorin objektiivi, c = kaukoputken objektiivi, d = hiusristikko, e ja f = kaukoputken okulaarilinsit. Hila/prisma sijaitsee kuvassa objektiivien b ja c välissä.

2.2 Diffraktiohila

Kun monokromaattinen valo kulkee ohuen raon läpi, tapahtuu valon diffraktiota eli taipumista. Varjostimelle saadaan diffraktiokuvio, jonka intensiteettiminimien paikka riippuu aallonpituudesta λ ja raon leveydestä b . Jos rakoja on kaksi, syntyy interferenssikuvio, jota em. diffraktiokuvio moduloi. Jos rakojen lukumäärää lisätään, interferenssin tuloksena syntyvien päämaksimien terävyys kasvaa; tällöin rakosysteemi muodostaa hilan. Päämaksimien paikka riippuu rakojen välimatkasta a (=hilavakio) ja aallonpituudesta:

$$\sin(\theta) = \frac{m\lambda}{a} \quad (1)$$

Tässä $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ on nimeltään diffraktion kertaluku. Jos valo ei ole monokromaattista, muodostaa kukin aallonpituus oman 1., 2.,... kertaluvun maksiminsa ja näin syntyy 1., 2.,... kertaluvun spektrit. Hilan tai prisman kykyä poikkeuttaa eri aallonpituuksia kuvaa käsite dispersio, joka on hilalle

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{a \cos(\theta)} \quad (2)$$

2.3 Prisma

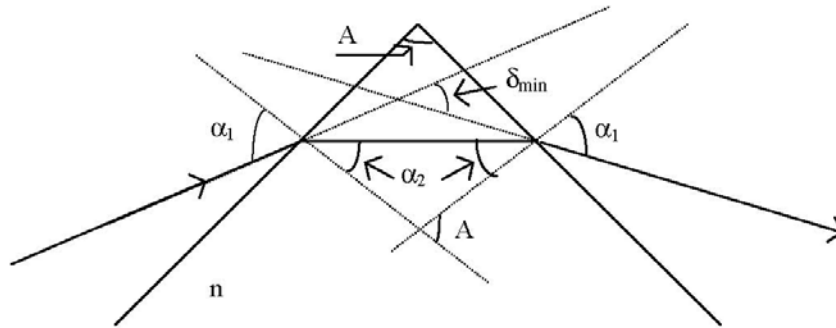
Kun monokromaattinen valo kulkee prisman läpi, tapahtuu taittumista, jolloin valonsäde poikkeaa alkuperäisestä suunnastaan kulman δ verran. Tilanteessa, jossa valonsäde kulkee prisman läpi symmetrisesti, on poikkeama pienimmillään ($\delta = \delta_{\min}$). Tällöin on voimassa yhtälö

$$n = \frac{\sin(\frac{1}{2}(\delta_{\min} + A))}{\sin(\frac{1}{2}A)}, \quad (3)$$

missä A on prisman taittava kulma ja n on prismaalasin taitekerroin, $n = c/c_n$. Tässä c ja c_n ovat valonnopeus tyhjiössä ja tutkittavassa aineessa. Koska taitekerroin n riippuu aallonpituudesta, vastaa jokaista aallonpituutta erisuuri δ_{\min} . Jos valo ei ole monokromaattista, hajoaa se prisman läpi kuljettuaan aallonpituuksien mukaan. Näin syntyy spektri, joka rakenteeltaan on kuitenkin erilainen kuin hilaspektri. Prisman dispersiolle pätee

$$D = \frac{d\delta_{\min}}{d\lambda} = \frac{2 \sin(\frac{1}{2}A)}{\cos(\frac{1}{2}(\delta_{\min} + A))} \left(\frac{-2B}{\lambda^3} \right), \quad (4)$$

missä B on vakio.



Kuva 4. Valon taittuminen prismassa minimipoikkeamaa määritettäessä.

2.4 Atomin lähettämästä säteilystä

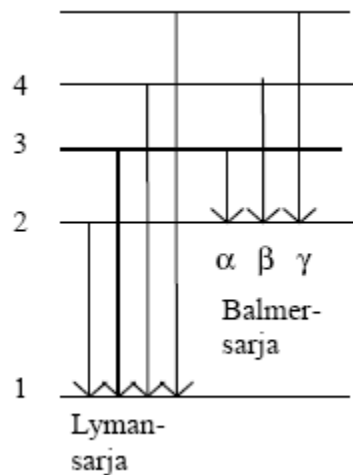
Tässä työssä tutkitaan kaasunpurkauslamppuissa virittyneiden kaasuatomien lähettämää sähkömagneettista säteilyä näkyvän valon alueella. Prisma- ja hilaspektrometreillä nähdään tällöin johdannossa mainitun teorian mukaisesti diskreetti spektri. J. Balmer havaitsi 1800-luvulla vedyn näkyvien spektriviivojen aallonpituuksien noudattavan kaavaa

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right), \quad (5)$$

missä

- R = Rydbergin vakio = $1,0974 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$
- $Z = 1$ = vedyn järjestysluku
- $n = 2$ = siirtymän lopputilan kvanttiluku
- $n' =$ siirtymän alkutilan kvanttiluku
 - = 3 vedyn α - viivalle
 - = 4 vedyn β - viivalle
 - = 5 vedyn γ - viivalle

Kaava (5) on yleisesti voimassa yksielektronisille atomeille (H , He^+ , Li^{2+}) ja se voidaan johtaa lähtemällä Bohrin yksinkertaisesta atomimallista.



Kuva 5. Osa vedyn hajoamiskaaviota.

3 Mittaukset

3.1 Spektrometrin fokusointi

Työssä käytettävän spektrometrin yksityiskohtaiset säätöohjeet on annettu liitteessä 2. Kuvassa 3 on esitetty spektrometrin linssisysteemin kaaviokuva. Kaukoputken okulaarin muodostavat linssit e ja f, joiden välimatkaa voidaan muuttaa.

Ennen mittauksia on tarkastettava spektrometrin fokusointi seuraavasti:

Linssi f säädetään siten, että hiusristikko näkyy terävänä. Jos hiusristikko on vinossa spektriviivoihin nähden, sen asentoa voi säätää fokusointirenkaasta (osa M kuvassa L1). Kollimaattorin rako a asetetaan tarkalleen pystysuoraan ja säädetään siten, että tuleva valo näkyy mahdollisimman kapeana, mutta silti kirkkaana.

3.2 Hila

Asetetaan hila (noin 600 rako/mm) prismapöydälle kohtisuoraan kollimaattorin akselia vastaan. Prismapöydän korkeus säädetään sellaiseksi, että mahdollisimman suuri osa valosta menee hilan läpi. Raon eteen asetetaan elohopeakadmium (Hg-Cd)-lamppu ja mitataan yhdeksän kirkkaimman viivan poikkeamat 1. kertaluvussa suoraan tulevan valon molemmiin puolin (θ_1 ja θ_2). Tällöin poikkeama θ saadaan, kun molemmipuolisten lukemien erotus jaetaan kahdella. Vedylle (H_2) määrätään kolmen kirkkaimman viivan poikkeamat. Jos et löydä kaikkia spektriviivoja suoraan tulevan valon molemmilta puolilta, kirjaa ylös toisen puolen spektriviivan ja suoraan tulevan valon kulmat ja laske poikkeama θ niiden avulla.

3.3 Prisma

Prismapöytää nostetaan siten, että prisma asettuu sopivasti kollimaattorin ja teleskoopin tasoon, kuvan 2 mukaiseen asentoon. Raon eteen asetetaan elohopeakadmiumlamppu. Prismapöytää ja kaukoputkea siirretään siten, että nähdään Hg-Cd:n spektri. Prismapöytää kierretään minimipointeeseen vastaavaan paikkaan, jossa kaukoputkella nähtävien viivojen liikkumissuunta muuttuu prismapöydän kiertosuuntaan nähden. Suunnan muutos tapahtuu periaatteessa eri kohdassa eri viivoille, mutta työssä saavutettavan tarkkuuden puitteissa riittää, että prismapöydän paikka määrätään esimerkiksi vihreän viivan perusteella. Eri viivoja vastaavat lukemat (θ_1) saadaan tämän jälkeen siirtämällä vain kaukoputkea (käytä hienosäätöä). Viivoja vastaavat minimipointeet saadaan lukemien ja prisman poistamisen jälkeen nähtävää suoraan tulevaa sädettä vastaavan lukeman (θ_0) erotuksina. Viivoja vastaavat aallonpituudet saadaan hilalla tehdyistä mittauksista.

4 Tulosten käsittely

4.1 Hila ja prisma

Lasketaan taipumiskulmat θ kappaleessa 3.2 esitetyllä tavalla. Elohopealle ja kadmiumille (yhtälöllä (1)) määritetyistä aallonpituuksista etsitään elohopean viivat liitteessä 1 annettujen, kirjallisuudesta saatujen, aallonpituuksien perusteella. Lisäksi piirretään käyrä $\theta(\lambda)$ elohopeakadmiumviivojen avulla.

Vedyn spektriviivoja vastaavat aallonpituudet lasketaan samalla tavalla kuin edellä elohopeakadmiumin aallonpituudet. Vedyn α -, β - ja γ -viivoille lasketaan kaavan (6) avulla teoreettiset aallonpituudet. Vertaamalla niitä hilalla tehtyjen mittausten avulla määritettyjen vedyn viivojen aallonpituuksiin määrätään α -, β - ja γ -viivojen värit.

Saaduista tuloksista piirretään minimipointeama δ_{\min} λ :n funktiona. Lisäksi lasketaan taitekerroin n kaavan (3) avulla ($A = 60^\circ$) ja piirretään n λ :n funktiona. Millainen on taitekertoimen ja aallonpituuden välinen riippuvuus?

4.2 Dispersio

Dispersioiden $D = d\theta/d\lambda$ ja $D = d\delta_{\min}/d\lambda$ määrittäminen voidaan tehdä ainakin kahdella tavalla. Käyrille $\theta(\lambda)$ ja $\delta_{\min}(\lambda)$ voidaan piirtää sopivin välein tangentteja, joiden kulmakertoimista saadaan dispersioille arvio. Pistejoukkoon voidaan sovittaa sopiva funktio, jonka derivaatta antaa dispersion. Tämän jälkeen piirretään $d\theta/d\lambda$ ja $d\delta_{\min}/d\lambda$ samaan kuvaan λ :n funktiona.

Pohdi virhelähteitä ja niiden merkitystä sekä vastaa kaikkiin työpaikalla annetun paperin kysymyksiin. Muistathan, että aste (°) ei ole SI-yksikkö!

LIITE 1. Kirjallisuudesta saatuja aallonpituuksia (nm) elohopealle ja kadmiumille:

Hg:

579,1 keltainen

577,0 keltainen

546,1 vihreä

435,8 sininen

404,7 violetti

Cd:

643,8 punainen

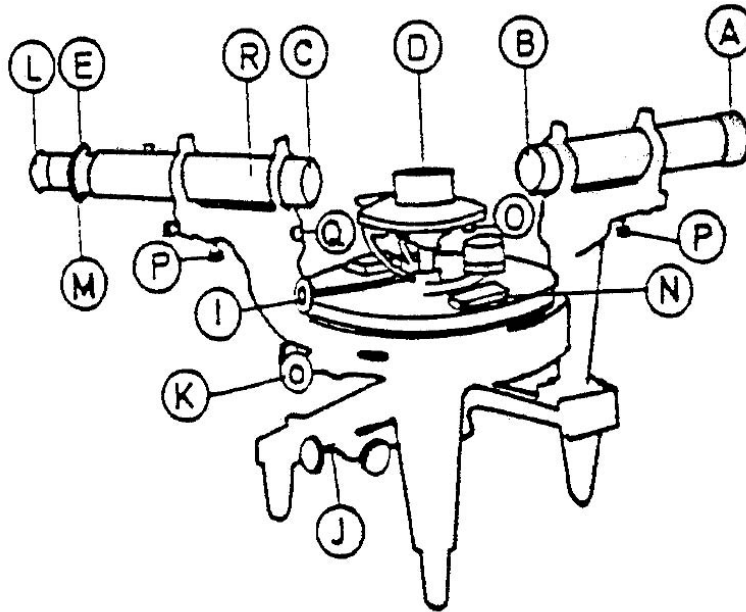
508,6 tumma vihreä

480,0 turkoosi

467,8 sininen

LIITE 2. Spencer-spektrometrin käytöstä

Spektrometri on toimintaperiaatteeltaan ja rakenteeltaan varsin yksinkertainen, mutta hyviin tuloksiin pääseminen edellyttää kuitenkin laitteen ja sen toiminnan perusteellista tuntemusta. Kuvassa L1 on esitetty Spencer-spektrometri ja sen osat.

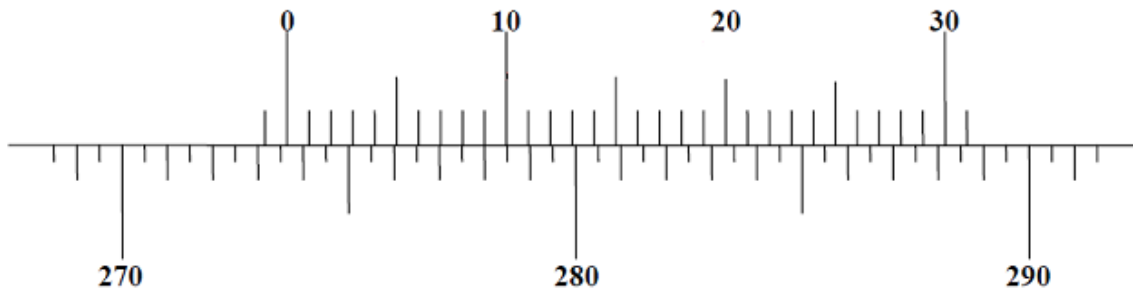


Kuva L1. Spencer-spektrometri.

- | | |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| A = rako, | M = teleskoopin fokuointirengas, |
| B = kollimaattorin objektiivi, | N = astejaotusrenkaan suojus, |
| C = teleskoopin objektiivi, | O = prismapöydän tason säätöruuvit, |
| D = prisma, | P = kollimaattorin ja teleskoopin tason säätöruuvit, |
| E = hiusristikon sijainti, | Q = teleskoopinkiinnityksen lukitusruuvi, |
| I = prismapöydän lukitusruuvi, | R = teleskoopin kiinnityksen sivuruuvit, |
| J = prismapöydän lukitus- ja säätöruuvit, | S = kollimaattorin kiinnityksen lukitusruuvi. |
| K = teleskoopin varren lukitus- ja säätöruuvit, | |
| L = okulaarirengas, | |

Teleskooppi ja prismapöytä pyörivät saman akselin ympäri, ja ne voidaan lukita ruuveilla K ja J. Prismapöydän korkeutta säädetään ruuvista I. Lukitusruuveja ei koskaan saa vääntää tarpeettoman tiukkaan. Kun lukitusruuvit K ja J ovat kiinni, voidaan teleskoopin ja prismapöydän asemaa säätää viereisistä hienosäätöruuveista. Saman kulman määrittämiseksi tarvittavien mittausten ajan joko teleskoopin tai prismapöydän (tavallisesti

prismapöydän) asema on säilytettävä muuttumattomana. Minimipoikkeamakohtaan tarkassa määrittämisessä voidaan menestyksellisesti käyttää prismapöydän hienosäätöä. Spektrometrissä on kaksi 30' noniuksella varustettua lukemalaitetta. Mittauksissa riittää, kun käytetään aina samaa lukemalaitetta. Opettele lukemaan noniusta oikein!

Kotitehtävä:

Kuva L2: Alempi asteikko on pääasteikko ilmaisten kulman 0,5 asteen jaotuksella. Ylempi asteikko on 30' noniusasteikko. Kuinka suuri on kulma?