

Modernin fysiikan perusteet

Modernilla fysiikalla tarkoitetaan tässä yhteydessä luonnontieteen kehitysvaihetta, joka historiallisesti sijoittui 1800-luvun loppuun ja 1900-luvun alkuun. Tällöin siirryttiin klassisen fysiikan jatkuvan aineen ja energian sekä absoluuttisen avaruuden ja ajan käsityksistä aineen ja energian kvantittumiseen sekä ajan ja avaruuden suhteellisuuteen. Tähän johtaneesta kehityksestä pidettiin kesällä 2011 opettajien täydennyskoulutuskurssi "[Modernin fysiikan empiirinen perusta](#)", jonka materiaali on tämän aihekokonaisuuden filosofinen ja tiedollinen tausta. Kaikkien oletetaan tutustuvan kyseiseen materiaaliin.

Fysiikan laitoksella on [Fotoni-laboratorio](#), jossa vierailevat lukiolaisryhmät voivat tehdä eräitä modernin fysiikan kehitykseen oleellisesti vaikuttaneiden kokeita opetuslaboratorioversioina. Näiden kokeiden ympärille rakentuu myös tämä aihekokonaisuus.

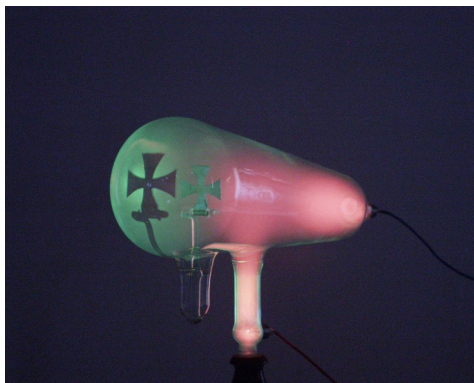
Aineen kvantittuminen; elektronin löytäminen

Atomit

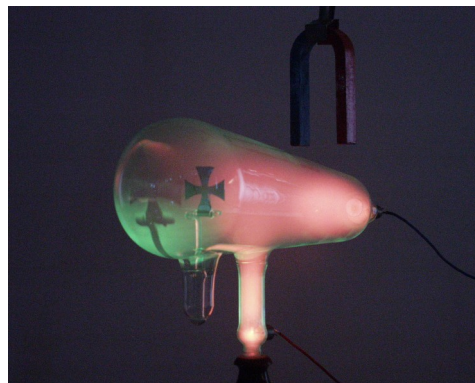
Teoria, jonka mukaan aine koostuu atomeista jotka voivat liittyä toisiinsa ja muodostaa ominaisuuksiltaan erilaisia aineita, on peräisin jo antiikin Kreikan filosofeilta. Ensimmäiset empiiriset havainnot, joiden selittämiseen atomiteoria soveltui jatkuvan aineen mallia paremmin, tehtiin 1800-luvun alussa kemiassa. Löydettiin *kerrannaisten painosuhteiden laki*: jos kaksi alkuainetta muodostaa useampia yhdisteitä keskenään, niin ne määrät yhtä alkuainetta, jotka voivat yhtyä samaan määrään toista alkuainetta, ovat yksinkertaisessa, yleensä pienillä kokonaisluvulla ilmaistavassa suhteessa toisiinsa. *Lämpöilmiöitä* selittämään kehitettiin kineettinen kaasuteoria, joka olettaa kaasujen koostuvan molekyyleistä. Sähkövirralla aikaansaadut kemialliset reaktiot eli *elektrolyysi* ja toisaalta kemiallisilla reaktioilla aikaansaatu sähkövirta eli *paristot* antoivat vahvan viitteen siitä, että aineen perusosasilla on sähköisiä ominaisuuksia ja että atomit saattaisivat koostua pienemmistä, varatuista hiukkasista. Elektrolyysin avulla pystyttiin myös määrittämään kvantitatiivisesti ionien varauksen ja massan suhteita.

Katodisäteet

Toinen empiirinen reitti aukesi, kun *harvennettujen kaasujen* havaittiin johtavan sähköä. Purkausputkissa havaittiin [valoilmiotä](#) itse kaasussa, putken seinämällä ja putkeen sijoitetussa fluoresoivassa varjostimessa. Oli ilmeistä että katodilta säteilee jotain, koska [anodista muodostuu varjokuva putken seinämään](#), ja jopa putkeen asetettu [siipipyörä lähtee pyörimään](#) niinkuin siihen osuisi katodilta lähtevä hiukkassuihku. Magneetin havaittiin vaikuttavan näihin "[katodisäteisiin](#)" kuten negatiivisesti varattuihin hiukkasiin, ja säteet varaavat elektrometrin negatiivisesti. Merkittävä oli myös havainto, että katodisäteiden ominaisuudet eivät riipu katodiaineesta; ne eivät siis ole "katodiaineen palasia" vaan jotain jota on kaikissa aineissa samanlaisena.



Katodisäteet muodostavat anodin varjon putken seinämään.

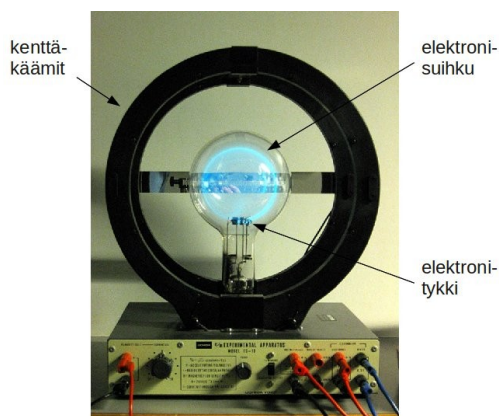


Magneetti kääntää katodisäteitä ja seinämän loiste sekä varjo siirtyvät.

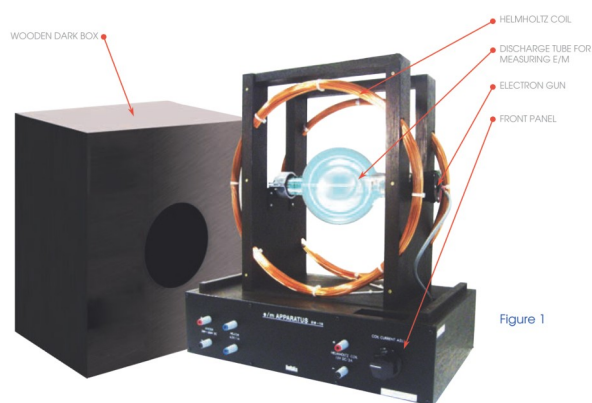
Kuvat: https://en.wikipedia.org/wiki/Crookes_tube

Thomsonin koe, elektroni

Edellä todetun perusteella Thomsonilla oli vahva oletus siitä, että katodisäteet ovat negatiivisesti varattuja hiukkasia. Thomson osoitti että myös sähkökenttä vaikuttaa katodisäteisiin. Tämä lisäksi hän havaitsi että sähkö- ja magneettikentässä säteet kaartuivat samaa rataa, mikä kertoo että säteet muodostavilla hiukkasilla on sama varauksen ja massan suhde, eli ominaisvaraus. Thomson pystyi myös määrittämään tämän suhteen¹ käyttäen hyväksi klassisen fysiikan tuntemia lakeja: dynamiikan peruslaki, normaalivoima, varattuun hiukkaseen kohdistuva voima sähkö- ja magneettikentässä, kondensaattorin sähkökentän voimakkuus ja käämin magneettivuon tiheys. Tuloksen saatu suhde oli tuhansia kertoja suurempi kuin tunnetut ionien ominaisvaraukset. Katodisäteet siis muodostuvat hiukkasista jotka ovat paljon atomia pienempiä.



Vanhempi laitteisto, sopii kvalitatiivisiin tarkasteluihin.



Uudempi laite, tällä kannattaa tehdä mittaukset.
kuva: <http://nadascientific.com/>

Fotoni-laboratorion molemmissa laitteistossa on heliumtäytteen putki, jonka sisällä on elektronytke. Sen katodin ja anodin välille on kytketty säädettävä 100-500 V tasajännite. Katodia kuumennetaan sähkövirralla, jolloin sen metallista irtoaa elektroneja. Sähkökenttä kiihdyttää niitä

¹ On hieman paradoksaalista että Thomson itse halusi katodisäteiden luonnetta selvittävien kvalitatiivisten kokeiden lisäksi määrittää vain ominaisvarauksen suuruusluokan, verratakseen sitä tunnettuihin ionien ominaisvarauksiin. Mutta nykyisissä opetuslaboratoriokokeissa tärkeintä näyttää usein olevan määrittää suhde e/m mahdollisimman tarkasti, eikä kokeen käsitteellistä merkitystä sivuta lainkaan. Tyypillinen esimerkki teoreettisen lähestymistavan kokeellisuudesta!

kohti anodia. Osa kiihdytetyistä elektroneista jatkaa matkaansa läpi anodissa olevasta reiästä, ja syntyy elektronisuihku. Suihkun elektroneja törmää putken täytekaasun atomeihin, jotka virittyvät. Viritystilojen purkautuminen näkyy vihreänä loisteena, joka ilmaisee elektronisuihkun radan. Putki on sijoitettu kenttäkäämien väliin. Niillä saadaan aikaan putken sisälle lähes homogeeninen magneettikenttä. Se kohdistaa elektroneihin voiman, joka on kohtisuorassa sekä elektronien liikettä että magneettikenttää vastaan. Kyseessä on normaalivoima, joka saa elektronien radan kaartumaan ympyräksi, mutta ei muuta niiden ratanopeutta. Elektronin kohdistuva voima riippuu hiukkasen nopeudesta, joka puolestaan riippuu kiihdytysjännitteestä. Voima on verrannollinen myös elektronin varaukseen ja magneettivuon tiheyteen.

Fotonin-laboratorion kokeen tärkeimmät erot Thomsonin alkuperäiseen kokeeseen ovat:

- Elektronitykissä on hehkukatodi (T: kylmäkatodi)
- Putkessa on kaasutäyte (T: tyhjiö)
- Havainnoidaan hiukkasten rataa täytekaasun fluoresenssin avulla, ja uudemmassa laitteessa myös fluoresoivan asteikon avulla (T havainnoi osumakohtaa fluoresoivan varjostimen avulla)
- Tutkitaan vain magneettikentän vaikutusta (T tutki myös sähkökentän vaikutusta)

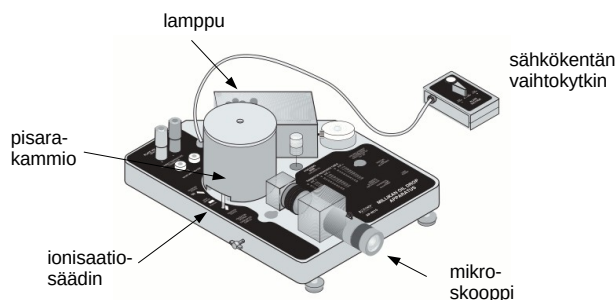
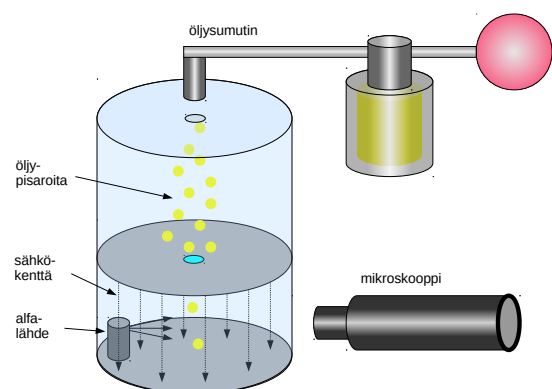
Laitteistolla voidaan varioida kiihdytysjännitettä ja kenttäkäämien virtaa, eli hiukkasten nopeutta ja magneettivuon tiheyttä. Kvalitatiivisesti havaitaan, että nopeuden lisääminen suurentaa radan sädettä, ja magneettikentän voimistuminen pienentää radan sädettä. Tärkeä havainto on hiukkassuihkun koossa pysyminen; se kertoo että kaikilla suihkun muodostavilla hiukkasilla on sama varauksen ja massan suhde.

Ominaisvarauksen määrittäminen kannattaa tehdä lukiolaisryhmille tarkoitetun [työohjeen](#) mukaan. Työohjeessa mainitut kenttäkäämien mitat ja kierrosluvut koskevat uudempaa laitteistoa.

Millikanin koe, alkeisvaraus

1800-luvun lopulla varauksen kvantittuminen oli jo elektrolyysilakien kautta tunnettu asia. Tuolloin vielä karkeasti määritetyn Avogadron vakion ja [Faradayn elektrolyysilain](#) perusteella tunnettiin myös alkeisvarauksen suuruusluokka. Millikan otti tehtäväkseen arvon tarkan määrittämisen.

Millikanin alkuperäinen koe ja sen Fotoni-versio ovat pitkälti samanlaiset.



Tarkastellaan pienten öljypisaroiden liikettä sähkökentässä. Pisarat suihkutetaan kammioon, johon voidaan tuottaa pystysuuntainen sähkökenttä. Suihkutettaessa pisarat varautuvat, osa positiivisesti ja osa negatiivisesti. Pisaroiden havaitaan liikkuvan ylös- tai alaspäin vakionopeudella, joten pisaraan kohdistuva kokonaisvoima eli painon, sähköisen voiman ja ilmanvastuksen summa on nolla. Nopeus riippuu pisan koosta ja varauksesta.

Kun pisaroihin kohdistetaan alfasäteilyä², havaitaan joidenkin pisaroiden nopeuden ja siis myös

2 Tässä on ainoa merkittävä ero alkuperäiseen kokeeseen: Millikan käytti pisaroiden varaamiseen röntgensäteilyä.

varauksen muuttuvan. Muutos tapahtuu aina hyppäyksittäin. Määrittämällä pisan nopeus kummankin suuntaisessa sähkökentässä ja ilman ilman kenttää, pystytään määrittämään pisan varaus. Havaitaan että varaukset ovat aina tietyn pienimmän yksikön, alkeisvarauksen monikertoja. Kvantitatiivisessa kokeessa havaitaan varauksen kvantittuminen, ja määritetään alkeisvarauksen arvo.

Käytännössä kvantitatiivisen kokeen suorittaminen on erittäin työlästä ja vie useita tunteja. Siksi sitä ei teetetä vierailevilla lukiolaisillakaan. Tärkeämpää on tutustua kokeen periaatteeseen, kokeilla laitteiston käyttöä, nähdä pisaroiden liike sähkökentässä ja jos tuuri käy, havaita jonkin pisan nopeuden äkillinen muutos pisan varauksen muuttuessa. Tältä pohjalta on laadittu kokeen [työohje](#).

Vaikka Millikanin kokeessa ei varsinaisesti luoda yhtään uutta fysiikan käsitettä, kokeen merkitys oli aikanaan tavattoman suuri. Kun tunnettiin alkeisvaraus ja elektronin ominaisvaraus, pystyttiin määrittämään elektronin massa, ja edelleen valosähköisen ilmiön kautta Planckin vakion tarkka arvo.

Vapausasteiden jäätyminen; mustan kappaleen säteily, säteilyn ja aineen vuorovaikutuksen kvantittuminen

Vaikka vielä 1800-luvun puolivälissä fysiikan katsottiin olevan pitkälti "valmis", oli ilmiöitä joita ei pystytty klassisten teorioiden avulla mallintamaan koetuloksia vastaavalla tavalla. Yksi tällainen oli aineen lämpökapasiteetin riippuvuus lämpötilasta; toinen oli kappaleen lämpösäteilyn spektri.

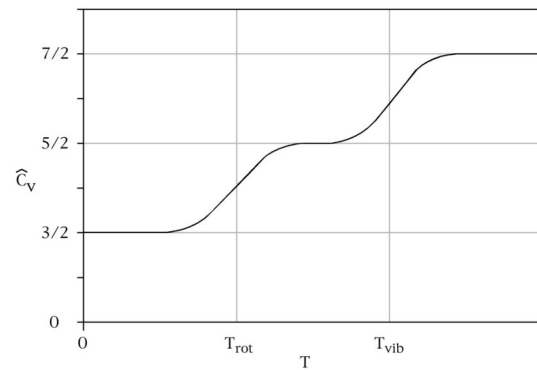
Fysikaalisen systeemin *vapausasteilla* tarkoitetaan systeemin kaikkia mahdollisia toisistaan riippumattomia etenemis-, pyörimis- ja värähdysliikkeitä. Jokaiseen vapausasteeseen liittyy energiaa. Vapausasteet voivat olla ulkoisia, kuten koko systeemin etenemisliike, tai sisäisiä kuten kappaleen ominaisvärähtelyt. Vaikka vapausasteet ovat sinänsä toisistaan riippumattomia, aineellisen systeemin sisäiset vuorovaikutukset saavat aikaan energian siirtymistä sisäisten vapausasteiden välillä. Esimerkiksi makroskooppisten ominaisvärähtelyjen energiaa muuttuu aineen sisäisen kitkan kautta lämpöenergiaksi, siis rakenneosien tason värähtelyiksi. Klassisessa fysiikassa vallitsee *energian tasanjakautumisen periaate*, jonka mukaan sisäisten vapausasteiden energia jakautuu tasan systeemin kaikkien vapausasteiden kesken.

Mekaanisen värähdysliikkeen tarkastelussa on havaittu, että mitä useammista hitautta omaavista osasista ja niiden välisistä vuorovaikutuksista systeemi koostuu, sitä enemmän ominaisvärähtelytaajuuksia systeemillä on. Jokainen ominaisvärähtely on yksi vapausaste. Jos aine olisi jatkuvaa, ts. ei koostuisi äärellisestä määrästä atomeja ja molekyyliä, kappaleen muodostavalla systeemillä olisi äärettömän monta vapausastetta. Ja kun systeemin sisäenergia näin jakautuisi äärettömän monen vapausasteen kesken, ei yhdellekään niistä jäisi mitään – kappale olisi pohjaton energianielu, jonka lämpökapasiteetti olisi ääretön ja jonka lämpötilaa ei millään keinolla saisi nousemaan 0 K yläpuolelle! Koska kappaleet ilmiselvästi eivät käyttäydy näin, niillä pitää olla äärellinen määrä vapausasteita, ja kappaleiden siis pitää koostua äärellisestä määrästä rakenneosia – jälleen uusi todiste aineen kvantittumisesta, siis atomirakenteesta.

Aineen atomirakenne sopi kyllä klassisen fysiikan maailmankuvaan, mutta termofysiikan tutkimuksissa havaittiin ilmiö jota klassinen fysiikka ei pysty selittämään: *aineen ominaislämpökapasiteetti riippuu lämpötilasta*. Jos sisäenergia jakautuisi aina tasan kaikkien vapausasteiden kesken ja vapausasteiden määrä on vakio, tällöin myös ominaislämpökapasiteetin pitäisi olla vakio. Näin ei ole, vaan lämpötilan laskiessa ominaislämpökapasiteetti pienenee. Asia on kuvattu tarkemmin täydennyskoulutuskurssin [materiaalissa](#) ja vielä yksityiskohtaisemmin Wikipedian [artikkelissa](#).

Oleellinen päätelmä on että *lämpötilan laskiessa vapausasteita kytkeytyy pois energianvaihdosta*. Jokin klassiselle fysiikalle tuntematon ilmiö estää vapausasteiden vapaan energianvaihdon. Tätä kutsutaan *vapausasteiden jäätymiseksi*.

Rakenneosien välinen energianvaihto tapahtuu törmäysten välityksellä, ja lämpötilan laskiessa törmäykset heikkenevät. Ilmeisesti vapausasteilla on niille ominaiset kynnysenergiat, joita pienempiä energia-annoksia vapausaste ei pysty ottamaan vastaan. *Vapausasteiden energianvaihto on siis kvantittunut*.

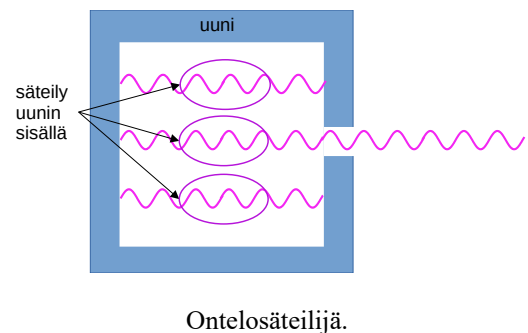


Kaksiatomisen kaasun idealisoitu dimensioton ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa. [Lähde](#)

Sähkömagneettisen aaltoliikkeen taajuudet voivat saada rajoituksetta mitä tahansa arvoja. Koska jokainen taajuus edustaa omaa vapausastettaan, sähkömagneettisen kentän vapausasteiden lukumäärä on ääretön. Klassisen fysiikan mukaan kentän pitäisi sen tähden olla jatkuvan aineen tavoin pohjaton energianielu. Tämäkään ei ilmiselvästi pidä paikkaansa, vaan "käytettävissä olevia" vapausasteita täytyy rajoittaa samantapaisen lain kuin mikä pätee aineen vapausasteille.

Sähkömagneettisen säteilyn spektri kertoo, miten säteilyn energia jakautuu eri aallonpituuksien ja siis myös vapausasteiden kesken. Spektrien tutkiminen vastaa siis sähkömagneettiselle säteilylle suunnilleen samaa kuin ominaislämpökapasiteettien tutkiminen aineille.

Sähkömagneettisella säteilyllä ei ole sisäisiä vuorovaikutusmekanismeja³. Kun halutaan tutkia termisessä tasapainossa olevaa säteilyä (jossa siis energia jakautuu tasan energianvaihdossa mukana olevien vapausasteiden kesken), energianvaihto täytyy tehdä aineen kautta. Tilanne saadaan aikaan ontelosäteilynä: kuumennettavassa umpinaisessa tilassa, "uunissa", seinämät lähettävät säteilyä joka myös absorboituu seinämiin. Tällöin seinämien ja säteilyn muodostama systeemi hakeutuu termiseen tasapainoon. Säteilyä voidaan tutkia ontelossa olevan pienen aukon kautta.



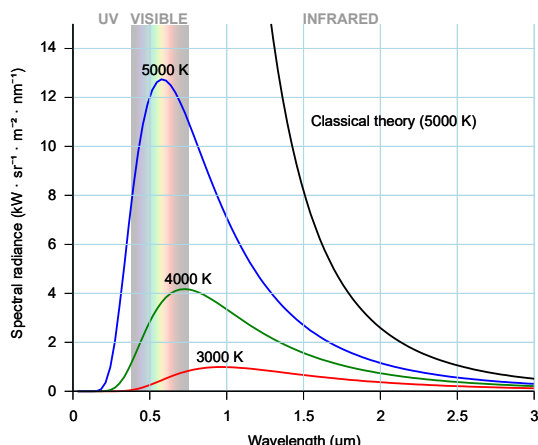
Jos tehdään klassisen fysiikan mukainen ennuste eli johdetaan [Rayleigh–Jeansin laki](#) ontelosäteilyn spektrin energiajakaumalle, saadaan tulos joka vastaa jotenkuten havaintoja pitkäaaltoisen säteilyn osalta, mutta mitä lyhytaaltoisemmasta säteilystä on kyse, sitä huonompi on yhteensopivuus havaintojen kanssa. Ja koska Rayleigh–Jeansin laki ennustaa että energiatiheys kasvaa rajatta kohti lyhyempiä aallonpituuksia, on selvää että lain perustana oleva klassinen teoria kuvaa todellisuutta tällä alueella sängen huonosti. Tätä kutsutaan yleisesti *ultraviolettikatastrofiksi*.

Ontelosäteilyn mitatuista spektreistä havaitaan, että spektrinen energiatiheys pienenee jyrkästi aallonpituuden pientyessä eli taajuuden kasvaessa. Energiatiheys alkaa pientyä sitä aikaisemmin, mitä alemmassa lämpötilassa säteilyä tarkastellaan. Tässä siis toistuu sama ilmiö kuin aineen termisissä ominaisuuksissa, vapausasteiden jäätyminen.

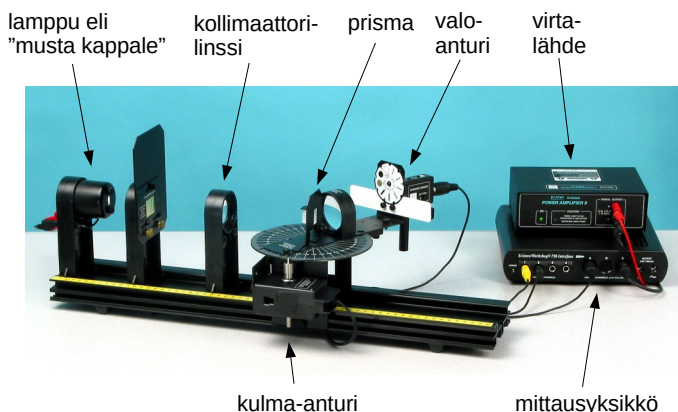
Määritettyjen spektrien pohjalta pystyttiin muodostamaan [Planckin säteilylakina](#) tunnettu malli, joka ennustaa säteilyn energiatheyden havaintojen kanssa yhteensopivasti. Malli perustuu oletukseen, että *sähkömagneettisen säteilyn energianvaihto aineen kanssa on kvantittunut* siten, että

3 Paitsi [suurienergisillä fotoneilla esiintyvä keskinäinen sironta](#).

kukin vapausaste voi vaihtaa energiaa vain kvanteissa $E = hf$. Tätä kutsutaan edelleen Planckin kvanttihypoteesiksi.



Ontelosäteilyn spektri eri lämpötiloissa, sekä klassisen teorian pohjalta johdettu ennuste. [Lähde](#)



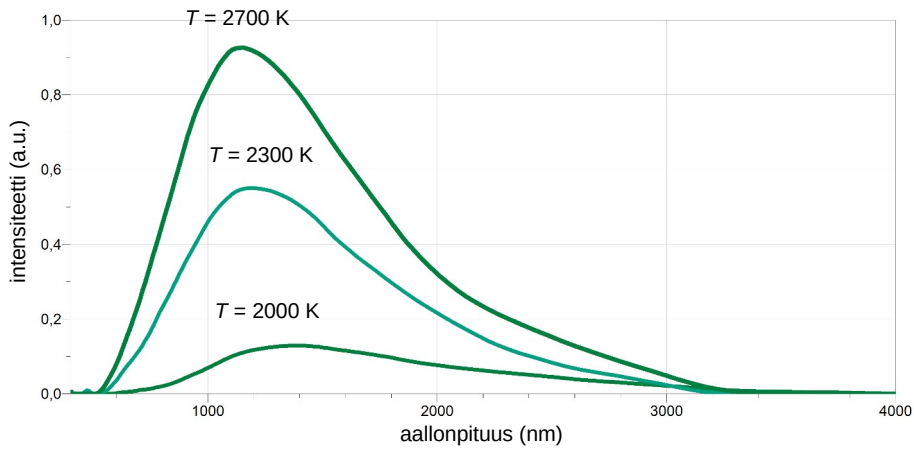
Fotoni-laboratorion laitteisto mustan kappaleen säteilyn tutkimiseen. [Lähde](#) (muokattu). Nykyisessä versiossa lampulle käytetään käsin säädettävää virtalähdettä ja mittaus tehdään LoggerPro:lla.

Fotoni-laboratorion koe poikkeaa alkuperäisistä ontelosäteilykokeista sikäli, että säteilyn lähteenä on hehkulamppu, jossa energian siirtymistä tapahtuu valtaosaltaan vain aineesta säteilyyn. Ei siis ole yhtä selvää kuin ontelosäteilyssä, että lähtevä säteily vastaa termisessä tasapainossa olevaa säteilyä. Näin kuitenkin on, sitä tarkemmin mitä enemmän lampun hehkulanka vastaa ns. ideaalista *mustaa kappaletta* joka absorboi kaiken siihen osuvan sähkömagneettisen säteilyn ja jonka lähettämän säteilyn spektri riippuu vain lämpötilasta, ei materiaalista.

Laitteistolla pystytään mittaamaan eri kirkkauksilla ja siis eri lämpötiloissa säteilevän hehkulampun spektrin energiajakaumat. Mittausten suorittamiseen on erillinen [työohje](#).

Tuloksista voidaan päätellä ainakin seuraavaa.

- Energiajakaumassa ei näy ultraviolettikatastrofia, vaan huipun jälkeen energiatiheys laskee nopeasti kohti lyhyempiä aallonpituuksia. Tämä osoittaa että suurien säteilyn taajuuksia vastaavat vapausasteet ovat jäätyneet, ne eivät pysty ottamaan vastaan energiaa hehkulangan sisäenergiasta.
- Kun lampun lämpötila kasvaa, energiatheyden huippu siirtyy kohti lyhyempiä aallonpituuksia. Tätä kuvaa Wienin siirtymälaki $\lambda_{max} = \frac{0,002898 \text{ m} \cdot \text{K}}{T}$, joka on johdettavissa Planckin säteilylaista. Siirtymä näkyy myös hehkulampun valon värin muuttumisena punertavasta keltaiseksi.
- Hehkulampun säteilemästä energiasta vain pieni osa on näkyvän valon alueella, suurin osa osuu pitempiaaltoisen säteilyn alueelle. Tästä johtuu hehkulampun huono hyötysuhde valaisimena.



Fotoni-laboratorion laitteella mitattuja hehkulampun spektrejä.

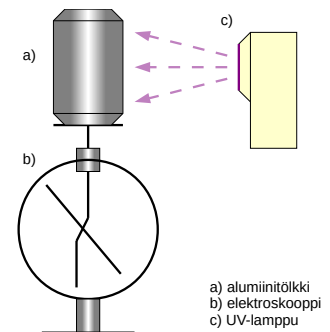
Valosähköinen ilmiö, valon aalto-hiukkasdualismi

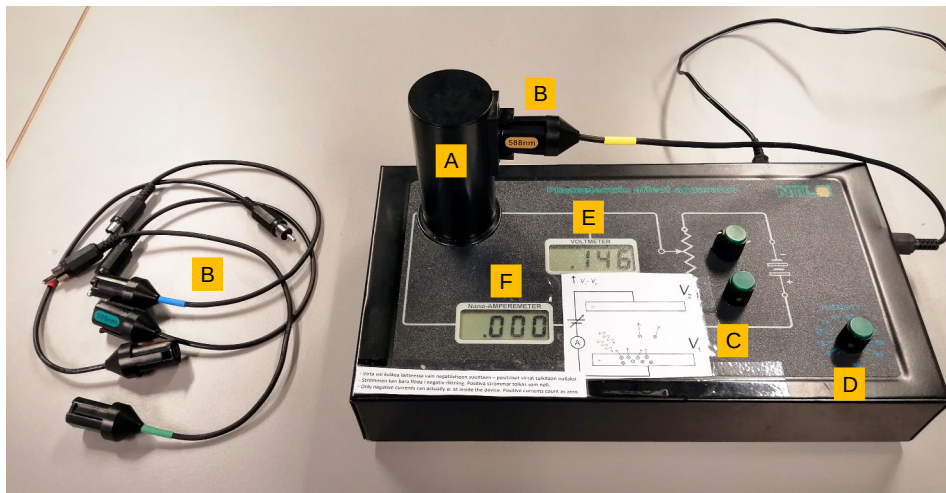
Valosähköisen ilmiö havaitsi ja dokumentoi ensimmäisenä⁴ Heinrich Hertz vuonna 1887. Hän huomasi että kipinä iskee kahden varatun metallilevyn välillä helpommin, kun levyjä valaistaan ultraviolettivalolla. Seuranneissa kvalitatiivisissa kokeissa havaittiin, että tarpeeksi lyhytaaltainen valo purkaa metallin negatiivisen sähkövarauksen ja tällöin metallista irtoavilla hiukkasilla on negatiivinen sähkövaraus. Edelleen havaittiin että irtoavilla hiukkasilla on sama varaus ja ominaisvaraus kuin elektroneilla, joten epäilemättä kyse on elektroneista.

Havaittiin myös että ilmiön syntyyn vaadittava pienin aallonpituus on eri metalleilla erilainen. Joillain harvoilla metalleilla kuten cesiumilla näkyvä valo riittää, mutta esimerkiksi sinkillä ja alumiinilla ilmiö esiintyy vasta UV-valolla.

Fotoni-laboratoriossa voidaan tehdä ensin kvalitatiivinen koe alumiinilla. Juomatölkin pinnasta hiotaan ensin hiekkapaperilla oksidikerros pois. Tölkki asetetaan elektroskoopin päälle, ja tölkkiin tuodaan negatiivinen varaus. Valaistaan tölkkiä UV-lampulla, jolloin havaitaan varauksen poistuvan. Toistetaan koe tavallisen pöytälamppun valolla, jolloin varaus säilyy. Positiivinen varaus säilyy sekä UV- että pöytälamppun valossa.

Kvalitatiivinen koe tehdään erityisesti koetta varten suunnitellulla laitteistolla. Laitteen pääosa on valokenno, jonka valolle altistuva elektrodi (katodi) on cesiumia. Sitä valaistaan erivärisillä led-lampuilla, jolloin havaitaan että valokennon läpi kulkee heikko sähkövirta. Kutsutaan sitä fotovirraksi. Tulkitaan havainto jälleen siten, että valo irrottaa katodin metallista elektroneja, jotka kulkeutuvat anodille. Huomioidaan myös että cesiumista elektroneja irtoaa näkyvän valon vaikutuksesta, kun alumiinilla ilmiön syntymiseen tarvittiin UV-valoa.





Valosähköisen ilmiön tutkimuslaite. A valokenno, B ledit, C pysäytysjännitteen säätö, D ledin kirkkauden säätö, E pysäytysjännitteen mittari, F fotovirran mittari.

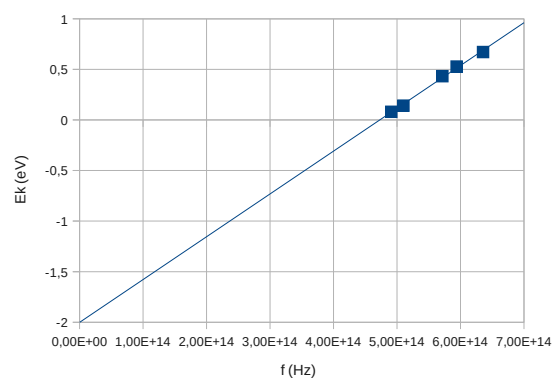
Valokennon elektrodien välille tuodaan ulkoinen jännite, jota varioidaan. Havaitaan että se vaikuttaa fotovirran suuruuteen. Jos jännite on positiivinen (katodi negatiivinen), fotovirta kulkee. Jos jännite on negatiivinen (katodi positiivinen), fotovirta pienenee, ja tietyllä jännitteen arvolla fotovirta loppuu kokonaan. Negatiivisilla jännitteillä elektrodien välillä vallitseva sähkökenttä jarruttaa elektronien liikettä katodilta anodille. Tulkitaan havainto niin, että katodiin osuva valo antaa elektroneille liike-energiaa, joka riittää viemään elektronin anodille vain mikäli liike-energia on suurempi kuin sähkökentän elektroniin kohdistaman voiman tekemän negatiivisen (eli liike-energiaa vähentävän) työn itseisarvo. Pysäytysjännitteellä irtoavan elektronin suurimman mahdollisen liike-energian ja sähköisen voiman elektroniin tekemän negatiivisen työn summa on nolla.

Lisää esikvantifioivia havaintoja:

- Niillä jännitteen arvoilla joilla fotovirta kulkee, ledin kirkkaus vaikuttaa fotovirran suuruuteen. Tulkinta: voimakkaampi valo irrottaa enemmän elektroneja.
- Jännite joilla fotovirtaa ei kulje (pysäytysjännite) on erivärisillä ledeillä erilainen: mitä lyhytaaltoisempi valo, sitä suurempi pysäytysjännite. Tulkinta: valon aallonpituus vaikuttaa irtoavan elektronin saamaan energiaan.
- Pysäytysjännitteellä ledin kirkkaus ei vaikuta fotovirtaan, vaan virta pysyy nollassa⁵. Tulkinta: irtoavan elektronin saama maksimienergia riippuu vain valon aallonpituudesta, ei valon voimakkuudesta.

Oleellinen havainto on, että valon intensiteetillä ei ole merkitystä sille, irtoaako elektroneja vai ei. Jos elektroneja irtoaa, silloin niiden määrä riippuu intensiteetistä, mutta energia ei; irronneen elektronin maksimienergia riippuu vain valon aallonpituudesta (ja katodiaineesta, mutta tätä ei pysty käytettävissä olevalla laitteella osoittamaan).

Klassisen fysiikan mukaan aineessa olevan elektronin pitäisi pystyä keräämään energiaa minkä hyvänsä taajuisesta sähkömagneettisesta säteilystä, ja suuremman intensiteetin pitäisi myös antaa irtoavalle



⁵ Tämä pitää tarkkaan ottaen paikkansa vain osalla ledeistä. Joillakin ledeillä kirkkauden säätäminen muuttaa myös hieman aallonpituutta, jolloin fotovirta alkaa kulkea kun kirkkautta muutetaan.

elektronille suurempi energia. Tämä ennuste on siis havaintojen perusteella ilmiselvästi väärä.

Tehdään kvantitatiivinen mittaussarja, jossa määritetään pysäytysjännite ja edelleen siitä laskettu elektronin suurin liike-energia valon taajuuden funktiona. Todetaan että mittauspisteet asettuvat suoralle. Mikäli koe voitaisiin tehdä toisella katodimateriaalilla, havaittaisiin että pisteet asettuvat silloinkin suoralle jolla on sama kulmakerroin, mutta suora leikkaa E_k -akselin eri kohdassa.

Tulkitaan tulos niin, että leikkauspisteen ja origon etäisyys vastaa työtä, joka tarvitaan elektronin irrottamiseksi metallista. Tämä irrotustyö on eri metalleilla erilainen.

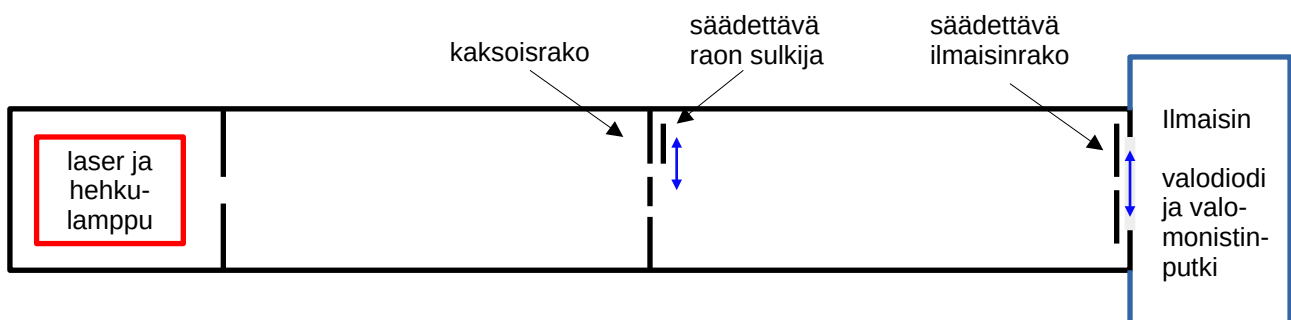
Tulokset selittävä malli saadaan, kun oletetaan että valon ja metallin elektronien välinen vuorovaikutus on kvantittunut. Elektroni saa valolta energian on $E = hf$ jossa f on valon taajuus. Kyseessä on siis sama oletus jonka pohjalta voidaan johtaa Planckin säteilylaki. Valosähköisessä ilmiössä se ilmenee selkeämmin kuin mustan kappaleen säteilyssä, koska taajuuden ja energian välinen yhteys näkyy suoraan mittaustuloksista.

Katso myös koululaisryhmille tarkoitettu [työohje](#).

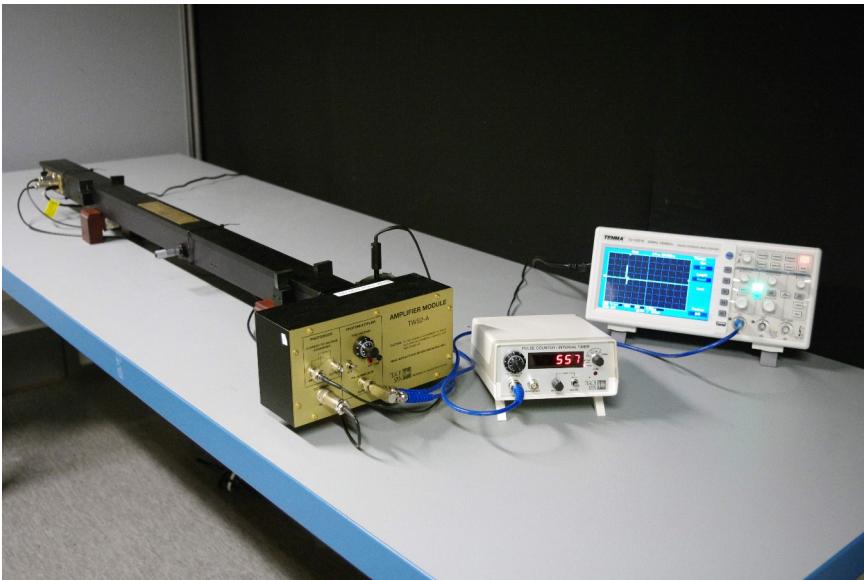
On huomattava että edellä kuvatut havainnot ja mittaustulokset antavat tietoa vain *valon ja aineen vuorovaikutuksesta*, ei itse *valosta*. Kun Einstein esitti selityksen valosähköiselle ilmiölle, hän käsitteli valoa fotonisuihkuna ja ftonia klassisen mielikuvan mukaisena hiukkasena. Vuonna 1922 löytynyt Comptonin ilmiö selittyy myös tarkastelemalla valoa fotoneina. Ei kuitenkaan ollut empiirisiä perusteita mallille, jonka mukaan valo koostuisi myös *edetessään* erillisistä valohiukkasista. Sen sijaan oli empiirisiä todisteita, että etenevä valo käyttäytyy kuten aaltoliike. Tarkkaan ottaen, *fotoneiksi* voidaan tässä vaiheessa kutsua vain *sähkömagneettisen säteilyn ja aineen välisen vuorovaikutuksen kvantteja*.

Interferenssi- ja diffraktiokokeiden perustella voidaan väittää että etenevä, siis irrallaan energianvaihtotapahtumista oleva valo on aaltoliikettä. Onko nyt sitten pääteltävä että valo etenee aaltoina, mutta muuttuu aineen kanssa vuorovaikuttaessaan hiukkasiksi? Ei, vaan pitää hyväksyä että valo pysyy samana mutta sillä on sekä aalto- että hiukkasluonne, ja meidän primaarihahmotukseen sidottu mielemme ja kieleemme on vaikeuksissa yrittäessään muodostaa tästä yksinkertaista mallia. Aiheesta enemmän Kurki-Suonion luennossa "[Modernin fysiikan ontologinen kriisi](#)".

"Yhden fotonin" diffraktio



Mittauksen periaate.



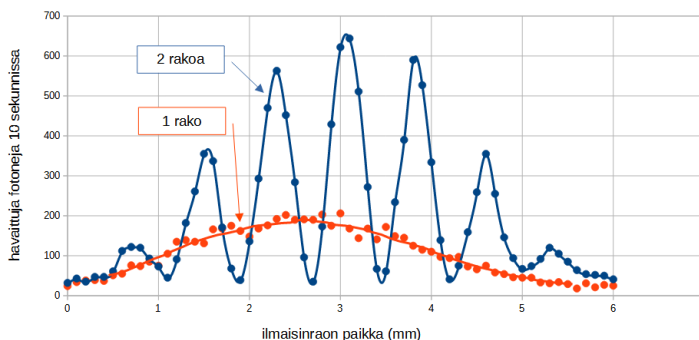
Käyttövalmis laitteisto.

Laitteistolla voidaan tutkia ensin valon diffraktiota kaksoisraossa. Havainnollistetaan laservalon näkyvä diffraktiokuvio, ja mitataan sen intensiteettivaihtelua kuvion päällä siirrettävän kapean havaintoraon ja valodiodin avulla.

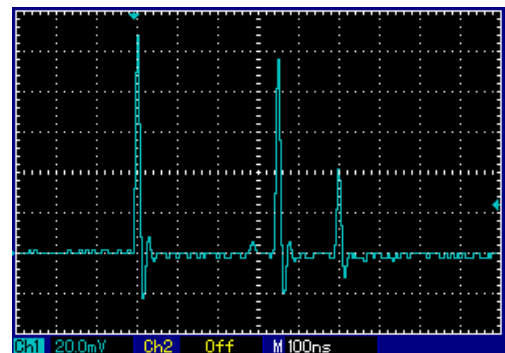
Samalla laitteistolla voidaan mitata hyvin heikon valon diffraktiota. Mittaus tehdään [valomonistinputkella](#), jonka toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Putkeen tuleva valo vuorovaikuttaa katodiaineen kanssa kvantittuneesti, eli fotoneina, jolloin katodilta irtaantuu elektroneja. Elektronien määrä moninkertaistetaan sekundaariemission avulla, jolloin saadaan aikaan mitattava sähkövirtapulssi. Havaittujen pulssien määrä on verrannollinen katodiaineen kanssa vuorovaikuttaneiden fotonien määrään. Noin 5% fotoneista tuottaa havaittavan pulssin.

Heikon valon diffraktiokuvio voidaan mitata samalla tavalla kuin laservalonkin. Intensiteetti on nyt verrannollinen aikayksikössä havaittujen pulssien lukumäärään. Laskuri tuottaa myös jokaisesta pulssista äänisignaalin. Hyvin heikolla valolla äänestä voidaan erottaa yksittäiset napsahdukset ja siis epäsuorasti todeta valon ja aineen vuorovaikutuksen kvantittumisen.

Merkittävä havainto on, että vaikka valo olisi niin heikko että havaitaan vain yksi foton kerrallaan, silti mittaus tuottaa samanlaisen diffraktiokuvion kuin valodiodilla mitattu näkyvä laservalo, tai "voimakas" heikko valo josta yksittäisten fotonien pulssit eivät erotu äänisignaalista. Samaten havaitaan että kaksoisraon diffraktion kuvion minimi häviää, jos toinen rako peitetään. Saman ilmiö voidaan havaita mikroaalloilla makroskooppisessa mittakaavassa.



Heikon valon diffraktio kaksoisraossa ja yhdessä raossa.



Valomonistinputkella saatu havainto heikon valon kolmesta fotonista.

Koe osoittaa että kokeessa havaittavat fotonit eivät ole voineet interferoida keskenään. Jos pidetään edelleen kiinni määritelmästä että *fotoni on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen kvantti*, niin silloin ei ole mielekäästä kuvata valoa fotoneilla silloin kun se kulkee rakojen läpi, koska raon läpi kulkenut valo ei ole vuorovaikuttanut aineen kanssa. Ilmiötä voidaan kuvata paremmin valon aaltominaisuuksien avulla.

Katso erinomainen video, jossa esitellään myös laitteisto: [From Waves to Particles](#).

Tätä kirjoitettaessa kokeelle ollaan vasta laatimassa työohjetta. Sen valmistuttua linkki tulee tänne.

Spektrien tutkiminen

Spektrien tutkiminen ei ole yksilöityvä koe, vaan siinä tutustutaan atomifysiikan kokeelliseen perusmenetelmään.

Käytettävissä on käsispektroskooppeja kvalitatiivisiin tutkimuksiin, ja tietokoneeseen liitetty spektrometri kvantitatiivisiin kokeisiin. Käsispektroskoopissa on 600 viivaa/mm hila, jonka muodostama spektri nähdään laitteen objektiivista. Laitteella havaitaan selvästi eri tyyppiset spektrit:

- Hehkuvien kiinteiden kappaleiden kuten lampun hehkulangan lähettämän valon spektri on jatkuva, eli siinä on kaikkia näkyvän valon aallonpituuksia. Myös Auringon valon spektri on (laitteen erotelutarkkuudella) jatkuva⁶.
- Hehkuvilla kaasuilla on viivaspektri, eli niiden säteilemä valo koostuu erillisistä aallonpituuksista, jotka näkyvät spektrissä ohuina viivoina.
- Laservalossa on vain yksi aallonpituus. HUOM! laservaloa ei saa suunnata suoraan spektroskooppiin, vaan pitää tarkastella esimerkiksi heijastusta valkoisesta paperista.
- Loisteputkilla ja ledeillä on epäjatkuva spektri, joka koostuu yksittäisistä viivoista ja leveämmistä voista.



Spektrit kertovat valon syntymekanismeista. Kiinteän kappaleen (ja nesteen) spektri on jatkuva, koska kappaleella on erittäin paljon rakenneosien vuorovaikutuksiin liittyviä sisäisiä vapausasteita. Niiden energiat ovat niin lähekkäin että spektri on käytännössä jatkuva. Se että Auringon spektri on jatkuva, kertoo että hehkuva kaasu on Auringossa niin tiheää että rakenneosien keskinäiset vuorovaikutukset ovat merkittäviä, ja aineella on näihin vuorovaikutuksiin liittyviä vapausasteita. Ja se että kynttilän liekin spektri on jatkuva, kertoo että liekissä ei valaise kaasu vaan hehkuvat kiinteät hiilihiukkaset.

Hehkuvan kaasun viivaspektri kertoo että valo on syntynyt vain muutaman energiatason muutoksen tuloksena. Nykyisin tiedämme että kyse on atomien elektronien viritystilojen purkautumisesta. Aikanaan viivaspektrien tutkiminen oli tärkeä kokeellisen tiedon lähde, joka johti uuteen tietoon atomien rakenteesta ja vaihteittain tarkentuviin atomimalleihin. Viivaspektrien rakenteesta hahmottunut [Ritzin kombinaatioperiaate](#) on fotonin käsitteen ja Planckin lain valossa vahva empiirinen näyttö atomien energian kvanttittumisesta ja atomien stationaarisista tiloista.

Laservalon yksivärisyys ilmaisee että valo on peräisin yhdestä tietyn suuruisesta energiatason muutoksesta. Optisen resonanssin ja stimuloidun emission avulla saadaan laseroivassa aineessa

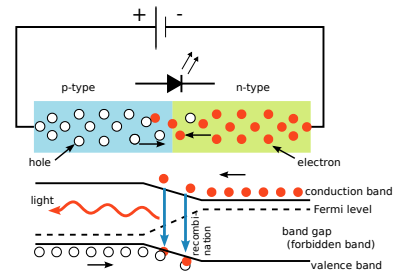
⁶ Tarkemmilla välineillä havaitaan että Auringon spektri ei ole jatkuva, vaan siinä on tummia viivoja. Ne aiheutuvat Aurinkoa ympäröivässä kaasupilvessä olevista aineista, jotka absorboivat kullekin ominaisia aallonpituuksia – samoja joita kyseiset aineet hehkuvina kaasuina säteilevät.

aikaan voimakas tietyn elektroniverhon viritystilan "tahdistettu" purkautuminen, jonka seurauksena laservalo on paitsi yksiväristä, myös koherenttia.

Loisteputkien ja ledien spektrin vyöt paljastuisivat lähemmässä tutkimuksessa useiksi lähekkäisiksi viivoiksi. Kyse on molekyylien energiatilojen muutoksista, joissa mukana ovat elektronien energiatilojen lisäksi molekyylin värähtelyyn ja pyörimiseen liittyvät energiat.

Loisteputken valo tulee putken sisäpinnalla olevasta fluoresoivasta aineesta, jonka molekyylit virittyvät putken sisällä olevan elohopeakaasun lähettämästä UV-säteilystä.

Ledin valo on peräisin puolijohdediodissa tapahtuvasta elektronien ja aukkojen yhdistymisestä. Korkeammalla energiatasolla olevat elektronit "putoavat" alemmalla tasolla oleviin aukkoihin, ja energioiden erotus muuttuu sähkömagneettiseksi säteilyksi.



Elektronien ja aukkojen yhdistyminen ledissä.

[Lähde](#)

Tietokoneeseen kytketty spektrometri mittaa aallonpituuksien suhteelliset intensiteetit alueelta 380 nm – 950 nm. LoggerPro -mittausohjelma esittää kuvaajana intensiteetin aallonpituuden funktiona. Kuvaajan taustana on jatkuva värispektri, joten kuvaaja esittää havainnollisesti, mitä aallonpituuksia ja värejä tutkittava valo sisältää. Spektrometrillä voidaan tehdä samat tutkimukset kuin käsispektroskoopillakin, mutta spektrien keskinäinen vertailu on helpompaa.

Voidaan havainnollistaa alkuaineiden tunnistamista spektrin avulla, esimerkiksi vesihöyryn spektrissä havaitaan vedylle ja hapelle tunnusomaiset aallonpituudet.

Tutkittava valo johdetaan spektrometriin valokuidun avulla. Koska valon sisäänmenoaukko kuituun on pieni, kuidun avulla voidaan tutkia pienelle alueelle osuvaa valoa, kuten osaa varjostimelle lankeavasta spektristä. Kuitu absorboi tiettyjä aallonpituuksia, joten esimerkiksi hehkulampun spektri näyttää erilaiselta kuin mustan kappaleen säteilyn tutkimuslaitteella saatu.

