

F2k-LABORATORION KOKEIDEN ESITTELY 2

Kaarle Kurki-Suonio ja Ari Hämäläinen

Johdanto

Thomsonin ja Millikanin kokeet toivat fysiikkaan elektronin ja alkeisvarauksen käsitteet ja täsmensivät näin käsityksiä aineen atomirakenteesta tarjoten samalla lähtökohtia atomien rakenneosien hahmottamiselle. Aineen atomirakennetta puoltavaa *selitysnäyttöä* oli kertynyt ennen niitä jo sadan vuoden ajan. *Havaintonäytönkin* kynnyksellä oltiin, mutta näistä kokeista sitä ei vielä saatu. Nämä kokeet johtivat kuitenkin aivan uuteen tarkkuuteen atomaaristen suureiden tarkastelussa ja loivat sillä tavalla perustan aineen atomirakenteen ja atomien fysiikan kvantitatiiviselle käsittelylle. Mutta ne nojautuivat klassiseen mielikuvarakenteeseen, eivätkä niiden tulokset ja tulkinta johtaneet suoraan sen elementtien kyseenalaistukseen, jota atomifysiikan kehittyminen edellytti.

Tällä toisella F2k -laboratorion esittelyluennolla tarkasteltavat kokeet "*Mustan kappaleen säteily*", "*Valosähköinen ilmiö*" ja "*Spektrien tutkimus*" vievät paljon pitemmälle modernin fysiikan mielikuvamaailmaan. Ne ovat sen kokeellisuuden kulmakiviä, joka loi empiirisen pakon klassisen fysiikan (lähes) kaiken kattavan jatkuvuuden hylkäämiseen ja atomien ilmiömaailman epäjatkuvuuden hyväksymiseen. Ne johtavat keskelle sitä ontologista kriisiä, jota keskiviikkoamun luentoni käsittelee ja joka pakottaa rakentamaan täysin uudenlaisia mielikuvia todellisuuden kaikkien peruselementtien luonteesta.

Nämä kokeet asettavat modernin fysiikan portille tulijan *asenteellisen valmiuden* ankaraan testiin, joka tuotti suuria vaikeuksia tuon ajan fyysikoillekin.

Thomsonin ja Millikanin kokeiden perusteella ei vielä ollut syytä epäillä atomien ja elektronien luonnetta hiukkasina eikä sähkömagneettisen säteilyn luonnetta aaltoliikkeenä. Mustan kappaleen säteilyn ja valosähköisen ilmiön tutkimukset kyseenalaistivat vakavasti valon aaltoluonteen ja rakensivat perustan fotonin käsitteelle. Spektritutkimukset johtivat edelleen ongelmiin, joista ei selvitty luopumatta elektronien luonteesta hiukkasina.

Näiden kokeiden idean ymmärtäminen ja niiden tulosten tulkinta edellyttävät selvästi suurempaa *käsitteellistä valmiutta* kuin edelliset kaksi koetta. Lähtökohdaksi tarvitaan laajempaa näkemystä klassisen fysiikan mielikuvarakenteesta.

On osattava mieltää *hiukkaset* (kappaleet) ja *kentät* klassisen fysiikan olioiden kahdeksi lajiksi, joiden luonnetta tarkastellaan lähemmin seuraavassa luennossa.

On tunnettava *aaltoliikkeen* perusominaisuudet ja ymmärrettävä, miten ja miksi *interferenssiä ja diffraktiota* voidaan pitää aaltoliikkeen sitovina tunnistusilmiöinä. On ymmärrettävä aaltoliikkeen luonne *taajuuden säilyttävänä energiansiirron välineenä*. Erityisesti tarvitaan tähän liittyvää selvää mielikuvaa sähkömagneettisen aaltoliikkeen ja aineen varauksellisten rakenneosien vuorovaikutusten, *emission, absorption ja sironnan*, klassisista mekanismeista.

On tunnettava sähkömagneettisen säteilyn lajit, erityisesti myös *lämpösäteily*, ja ymmärrettävä, mitä säteilyn *spektri* tarkoittaa.

Suurten *säilymlakien* hallinta on välttämätöntä. On tunnettava niiden merkitys kaikissa luonnon ilmiöissä vallitsevina peruslakeina. Näiden kokeiden yhteydessä tarvitaan erityisesti energian säilymlakia.

Tarvitaan käsitystä *aineen termisistä ominaisuuksista* ja mielikuvaa *termisen tasapainon muodostumisen mekanismista*. *Vapausasteen* käsite ja siihen liittyvä *energian tasanjakautumisen* periaate nousevat keskeiseen asemaan uuden empirian peruskokeiden tulkinnassa ja siihen perustuvien uusien rakenteellisten hahmojen tunnistamisessa.

Arons esittää kirjansa¹ 10.9–10 erinomaisen katsauksen fotonin käsitteen syntyhistoriaan. Hän kertoo mustan kappaleen säteilyn tutkimusten merkityksestä Einsteinin fotoniväittämän lähtökohtana mutta tarkastelee ainoastaan valosähköisen ilmiön

¹ A. B. ARONS (1997). *Teaching Introductory Physics*. John Wiley & Sons, New York.

sille antamaa empiiristä perustaa. Mustan kappaleen säteilyn tarjoaman primaarisen näytön hän sivuuttaa toteamuksella: *"It is not possible to tell the story of black-body radiation in an intellectually honest and meaningful way in an introductory course, and hand-waving about it only leaves the students mystified."*

Tästä rohkenen olla eri mieltä. Mustan kappaleen säteilyn "tarinan" ymmärtäminen vaatii perustakseen vain vapausasteen käsitettä ja energian tasanjakautumisen periaatetta, joiden omaksuminen edeltävässä fysiikanopetuksessa tai sen perusteella on varmasti mahdollista. Ainoa seikka, joka siinä voi jäädä mystiseksi, on sen hämmäntävä otsikko. Mustan kappaleen yhteys tarinan ideaan vaatii koko joukon ylimääräistä hand-wavingiä, vaikka onkin lopulta mielekkäästi perusteltavissa.

Vapausasteet

Vapausasteen käsitteen sivuuttaminen on varmasti perinteisen *koulufysiikan pahin aukko* modernin fysiikan perusmielikuvien rakentamisen kannalta. Kuitenkin tämä käsite kätkeytyy fysiikan kursseihin, kunhan sen vain tiedostaa. Se ei ole yhdellä kertaa tietyn otsikon alla opittava käsite, vaan se rakentuu vähitellen. Se on mukana alusta alkaen ja on valmiina esiin vedettäväksi ja nimettäväksi jossakin sopivassa vaiheessa tekemättä siitä sen suurempaa numeroa.

Ensimmäisen kerran se esiintyy kappaleen *liikkeen luokitteluna etenemiseen ja pyörimiseen*, jotka puhtaina ilmiöinä merkitsevät kappaleen paikan ja asennon muuttumista. Jossakin vaiheessa *värähtelyt* tulevat mukaan kuvaan kappaleen muotoa vaihtelevana sisäisenä liikkeenä.

Dynamiikan eli kappaleiden liikkeen ja vuorovaikutuksen välisten yhteyksien tarkastelussa newtonilainen *kahden kappaleen ja yhden vuorovaikutuksen perusmielikuva* antaa hahmottavan lähestymisen edellyttämällä tavalla kaikille mekaniikan suureille merkityksen kappaleiden, liikkeen tai vuorovaikutuksen mitattavina ominaisuuksina. Tämä mielikuva tarjoa lähtökohdan myös systeemin ulkoisen ja sisäisen liikkeen erottamiselle, jotka täsmentyvät massakeskipisteen liikkeeksi ja liikkeeksi massakeskipisteen suhteen. Tämä luokittelu soveltuu tarvittaessa tai haluttaessa yleistettäväksi mielivaltaisten mekaanisten systeemien käsittelyyn.

Energian käsite tarjoaa täsmällisemmän merkityksen vapausasteen käsitteelle. Kappaleen liikkeen energian todetaan jakautuvan toisistaan riippumattomiin *etenemisen ja pyörimisen liike-energioihin*. Etenemisen liike-energia jakautuu luontevasti liikkeen *kohtisuorien komponenttien liike-energioiksi*. Ehkä jo tässä yhteydessä alkaa olla mahdollista puhua vapausasteista "lokeroina", joiden kesken kappaleen tai systeemin energia jakautuu.

Mekaniikan perusmielikuvan kautta, esimerkkinä vaikka kaksi jousella kytkettyä kappaletta, *vuorovaikutusten potentiaalienergiat* tulevat mukaan systeemien sisäisinä vapausasteina.

Värähtelyt mielletään luonnollisesti kappaleen tai systeemin sisäiseksi liikkeeksi. Jännitetyn kielen ja kalvon ja kimmoisten kappaleiden värähtelyjen yhteydessä kohdataan *ominaisvärähtelyt* systeemin sisäisinä vapausasteina, joiden kesken värähtelyenergia jakautuu. Niille ominaiset taajuudet, värähtelevän systeemin ominaistaajuudet, ovat näiden vapausasteiden tunnusominaisuuksia.

Mekaanista energiaa kuluttavat vuorovaikutukset, kuten kitka ja aineen sisäiset epäkonservatiiviset vuorovaikutukset lämmittävät ainetta, mikä atomirakenteen myötä ymmärretään energian siirtymisenä aineen sisäisille, rakenneosasten järjestymättömän liikkeen vapausasteille.

Kimmoisan kappaleen ominaisvärähtelyjen kautta tulee mahdolliseksi mieltää eritaajuiset sähkömagneettiset aaltoliikkeet sähkömagneettisen kentän vapausasteiksi. *Säteilyn spektri esittää energian jakautumista vapausasteiden kesken.*

Näin vapausasteen käsite kulkee punaisena lankana läpi koko fysiikanopetuksen laajeten asteittain kattamaan kaikki klassisen fysiikan piirissä tarkasteltavat systeemit. Tämän läpäisevän idean tunnistaminen ja esiin vetäminen opetuksen eri vaiheissa tähtää sen yhden olennaisen asian hahmottamiseen, että *fysikaalisella systeemillä on aina tietty joukko "energialokeroita", joiden kesken sen kokonaisenergia jakautuu*. Näitä lokeroita kutsutaan systeemin vapausasteiksi.

Systeemin sisäisissä vuorovaikutuksissa vapausasteet ovat keskinäisessä energianvaihdossa. Kun energia pääsee vapaasti siirtymään vapausasteelta toiselle, se pyrkii jakautumaan keskimäärin tasaisesti kaikkien vapausasteiden kesken. – Miksi jokin vapausaste olisi erityisasemassa? Tämä on klassisen tilastollisen fysiikan keskeinen, *energian tasanjakautumisen periaate*.

"Vapausasteiden jäätyminen"

Samalla, kun aineen atomirakennetta tukeva selitysnäyttö laajeni 1800-luvulla, kohdattiin myös suuria ongelmia, kun aineen ominaisuuksia yritettiin selittää käsittelemällä ainetta varatuista hiukkasista rakentuvana systeeminä. Tähän liittyy MAXWELLIN lausuma vuodelta 1859: *Vapausasteiden jäätyminen on ongelma, johon klassinen fysiikka kaatuu!*

Tähän toteamukseen kätkeytyy syvämpi empirinen näyttö sille, että jatkuva aine ja kenttä tilan täyttävänä jatkuvana oliona² ovat klassisen fysiikan valossa suorastaan fysikaalisia mahdottomuuksia. Tämä tulee ilmeiseksi vapausasteen käsitteen ja energian tasanjakautumisen periaatteen valossa.

Rakenneosasten lukumäärä kiinnittää systeemin vapausasteiden lukumäärän. Jos aine olisi jatkuvaa, kappaleilla olisi ääretön määrä sisäisiä vapausasteita, joista jokaisen pitäisi kyetä ottamaan vastaan energiaa samalla tavalla. Jatkuva-aineisten kappaleiden lämpökapasiteettien pitäisi siis olla äärettömiä. Jatkuva aine olisi "pohjaton energianielu". Lämpökapasiteetin ja itse asiassa koko energian käsite olisivat tällöin mahdottomat. Näin ajatellen näyttää siltä, että *energian säilymlaki sinänsä on väkevä empirinen pakko hyväksyä aineen atomirakenne*. Tähän ei liity mitään muuta indikaatiota atomien luonteesta kuin, että niitä on oltava jokaisessa kappaleessa äärellinen määrä.

1800-luvulla vakiintuneen atomikäsityksen mukaan tietyssä ainemäärässä mitä tahansa ainetta on aina sama määrä atomeja tai molekyyliä. Yhdellä moolilla ainetta pitäisi siis olla tietty kiinteä määrä vapausasteita. Tämä merkitsee, että kaikilla aineilla olisi sama lämpötilasta riippumaton moolinen lämpökapasiteetti. Se olisi eräänlainen "universaalinen ainevakio", joka vain ilmaisisi ainemoolin vapausasteiden lukumäärän. Sisäisten vuorovaikutusten potentiaalienergian tarjoamien vapausasteiden vuoksi tämä kuitenkin riippuisi olomuodosta.

HEIMO SAARIKKO tarkasteli ensimmäisessä luennossaan 1800-luvun lämpöopillisia tutkimuksia. Graafisissa kuvaajissa, jotka esittävät kaasujen ja kiinteiden aineiden moolisia lämpökapasiteetteja lämpötilan funktiona, esiintyy tietyillä lämpötila-alueilla selviä tasanteita. Näiden suureiden kokeelliset arvot näiden tasanteiden alueilla ovat (tietyissä määrin) riippumattomat aineen lajista. Nämä aineiden yhteiset vakioarvot on myös helppo selittää kvantitatiivisesti vapausasteitten lukumäärän avulla. Mooliset lämpökapasiteetit voidaan siis todellakin tulkita yhden ainemoolin sisäisten vapausasteiden lukumäärän mitaksi.

Tämän, nyt siis empirisestikin oikeutetun, tulkinnan valossa nämä kuvaajat järkyttävät klassista fysiikkaa. Ne osoittavat, että *vapausasteiden lukumäärä riippuu lämpötilasta*. Erityisesti lämpötilan laskiessa se pienenee. Kiinteillä aineilla se pienenee rajatta. Kaasuilla se päättyy arvoon $3N$, missä N on Avogadron vakio. Tämä vastaa kolmea etenemisliikkeen vapausastetta molekyyliä kohden. Tähän lämpökapasiteettien pienenemiseen lämpötilan laskiessa Maxwell viittaa termillään "vapausasteitten jäätyminen". Se osoittaa, että lämpötilan laskiessa vapausasteet asteittain kytkeytyvät irti

² Kentän olioluonteeseen palataan seuraavassa luennossa.

energianvaihdosta vastoin energian tasanjakautumisen periaatetta. Jokin klassiselle fysiikalle tuntematon ilmiö estää vapausasteiden vapaan energianvaihdon.

Lämpötasapainon muodostuminen aineessa perustuu vapausasteiden väliseen energianvaihtoon, joka toteutuu atomien tai molekyylien välisten törmäysten avulla. Lämpötilan laskiessa nämä törmäykset heikkenevät ja niissä välittyvät energiat pienenevät. Jos vapausasteella on kynnysenergia, jota pienempiä energiaeriä se ei pysty ottamaan vastaan, se ei enää voi osallistua energianvaihtoon törmäysten välityksellä, kun lämpötila laskee liian alas. Se kytkeytyy irti, jäätyy.

Vapausasteiden jäätyminen saa näin luontevan tulkinnan: *aineellisen systeemin vapausasteilla on niille ominaiset kynnysenergiat*, joiden vuoksi ne kytkeytyvät irti energianvaihdosta lämpötilan laskiessa, sitä korkeammassa lämpötiloissa, mitä suurempia nämä kynnysenergiat ovat.

Näin hahmottuva idea, *vapausasteiden energianvaihdon kvantittuminen*, on yksi modernin fysiikan tärkeimpiä perusoivalluksia. Vapausasteiden jäätyminen oli ja on yhä, sen ilmenemisen primaarinen hahmo. Sen hahmottaminen aineen termisten ominaisuuksien perusteella jää tässä yhteydessä kerrotun empirian varaan. Ensimmäinen nyt esiteltävistä F2k -kokeista, mustan kappaleen säteily, tarjoaa siihen empiirisen mahdollisuuden sähkömagneettisen kentän osalta.

Mustan kappaleen säteily

Sähkömagneettisen aaltoliikkeen taajuudet voivat saada rajoituksetta mitä tahansa arvoja. Koska jokainen taajuus edustaa omaa vapausastettaan, kentän vapausasteiden lukumäärä on ääretön. Klassisen fysiikan valossa kentän pitäisi sen tähden olla jatkuvan aineen tavoin "pohjaton energianielu", mikä tekisi energian käsitteen mahdottomaksi.

Tämän ongelman selvittämiseksi luonnolta pitää kysyä, miten termisessä tasapainossa olevan sähkömagneettisen säteilyn energia jakautuu vapausasteiden kesken ja miten tämä jakauma riippuu lämpötilasta. Vastaus kävisi ilmi tällaisen säteilyn spektristä.

On toki mahdollista määrittää tämän spektrin klassinen ennuste, joka nojautuu energian tasanjakautumiseen. Siinä vain ei ole paljon mieltä, koska se esittää jotakin, joka jo etukäteen tiedetään mahdottomaksi. Sellainen laskelma kertoo vain, minkä muotoinen olisi tuon "pohjattoman energianielun" spektri. Lämpötilasta riippumatta sen spektrin energiatiheys aallonpituuteen nähden kasvaisi rajatta aallonpituuden pienentyessä. Tätä järjetöntä ennustetta on tapana kutsua nimellä *ultraviolettikatastrofi*.

Luonnolta kysymiseen tarvittava "puhdas ilmiö", termisessä tasapainossa olevan sähkömagneettinen säteily, voidaan parhaiten toteuttaa "ontelosäteilynä" Tällä tarkoitetaan kuumennettavaan umpinaiseen tilaan, uuniin, muodostuvaa lämpösäteilyä. Sen spektriä voidaan tutkia uunin seinässä olevan aukon kautta.

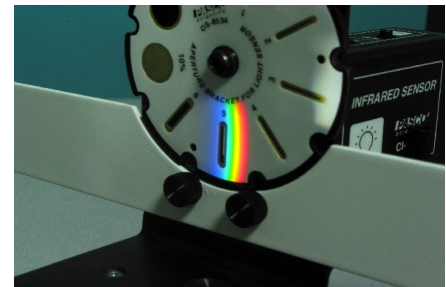
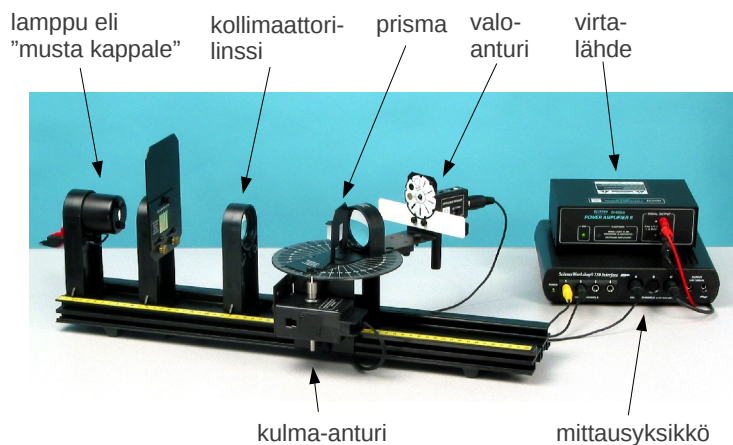
Havaituista spektreistä nähdään se olennainen seikka, että todellisuudessa *spektrin energiatiheys pienenee jyrkästi aallonpituuden pienentyessä eli taajuuden kasvaessa, sitä aikaisemmin, mitä alemmassa lämpötilassa säteilyä tarkastellaan*. Tässä toistuu aineen termisissä ominaisuuksissa hahmottunut *vapausasteiden jäätyminen*. Sähkömagneettisen säteilyn vapausasteet kytkeytyvät lämpötilan laskiessa irti energianvaihdosta sitä aikaisemmin, mitä suurempi on vapausasteelle ominainen taajuus. Energianvaihdon kynnys on siis sitä korkeampi, mitä suurempi on vapausasteen taajuus.

MAX PLANCK kokeili mahdollisimman yksinkertaista oletusta, jonka mukaan tämä kynnys, energianvaihdon kvantti, on verrannollinen taajuuteen $E = hf$. Tällä perusteella hän johti nk. *Planckin säteilylain*, jonka ainoa parametri on verrannollisuuskerroin h . Tämä Planckin vakio voitiin määrittää siten, että laki sopii yhteen havaitun spektrin kanssa. Näin päädytään *Planckin lakiin*:

Sähkömagneettisen säteilyn energianvaihto on siten kvantittunut, että kukin vapausaste voi vaihtaa energiaa vain kvanteissa $E = hf$.

Vapausasteiden välinen energianvaihto ei tapahdu suoraan säteilyn sisäisesti, sähkömagneettisen kentän sisäisten vuorovaikutusten avulla, vaan uunin seinämien välityksellä. Säteilyn sisäinen terminen tasapaino syntyy ulkoisen tasapainon kautta. Planckin lain "energianvaihto" koskee siis ensi sijassa säteilyn vuorovaikutusta aineen kanssa.

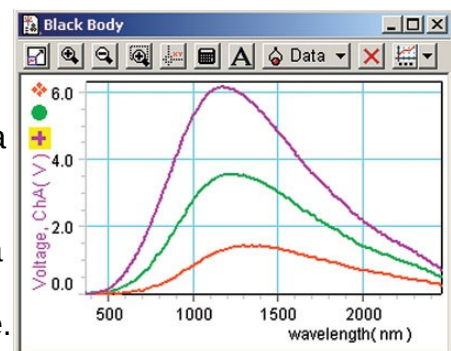
Kokeen toteutus F2k -laboratoriossa. Kokeessa mitataan hehkulampun lähettämän valon intensiteettijakaumaa aallonpituuden funktiona, kun lampun hehkulangan jännitettä ja samalla lämpötilaa varioidaan. Lampun hehkulanka on approksimaatio mustasta kappaleesta, joka voi absorboida ja emittoida sähkömagneettista säteilyä kaikilla aallonpituuksilla. Ideaalinen musta kappale olisi kuumennettava ontelo, mutta sellainen säteilylähde on teknisesti paljon hankalampi toteuttaa.



Lampun lähettämä valo ohjataan kollimaattorilinssillä prismaan, jossa tapahtuu dispersio ja valo hajaantuu spektriin. Eri aallonpituuksien suhteelliset intensiteetit mitataan valoanturilla, jota siirretään pitkin ympyräkaarta niin että vain kapea aallonpituusalue kerrallaan osuu anturiin. Anturin ja prisman välinen kulma mitataan kulma-anturilla. Mittausohjelma laskee kulmasta vastaavan aallonpituuden, ja piirtää kuvaajan valon intensiteetistä aallonpituuden funktiona. Mittausohjelma ohjaa hehkulampun virtalähdettä, ja laskee myös hehkulangan lämpötilan lampun syötetyn sähkötehon perusteella.

Kokeessa tehdään sarja mittauksia varioiden hehkulangan lämpötilaa. Tuloksiksi saadaan sarja kuvaajia säteilyn intensiteetistä aallonpituuden funktiona. Kuvaajista havaitaan:

- Kaikilla lämpötiloilla säteilyn intensiteettimaksimi on näkyvää valoa pitemmällä aallonpituudella. Tämä kertoo hehkulampun huonosta hyötysuhteesta valonlähteenä.
- Kun hehkulangan lämpötila kasvaa, intensiteettimaksimia vastaava aallonpituus lyhenee. Tällä on kvalitatiivinen yhteys hehkulampun valon värin muuttumiseen punaisesta valkoisemmaksi.
- Kun intensiteettihiipusta siirrytään kohti lyhyempiä aallonpituuksia, intensiteetti laskee. Langan ollessa kuumimmillaankin, intensiteetti laskee viimeistään UV-alueella laitteiston rekisteröintikyvyn alapuolelle. Tämä havainto on ristiriidassa klassisen teorian lyhyille aallonpituuksille antaman ennusteen kanssa.



Kokeen käsitteellinen merkitys. Modernin fysiikan rakenteellisen hahmotusprosessin ja käsitteenmuodostuksen kannalta mustan kappaleen säteilyn tutkimiseksi nimetyllä kokeella on selvä tarkoitus.

Sen tulisi tukea "vapausasteiden jäätyksen" hahmottamista ja sen kokemista empiiriseksi pakoksi hyväksyä sähkömagneettisen säteilyn vapausasteiden energianvaihdon kvantittuminen siten, että energianvaihdon kvantti on sitä suurempi, mitä suurempi on vapausasteen taajuus.

Tähän koe tarjoaa perustan ilman kvantitatiivisiakin tarkasteluita. Sen perusteella myös Planckin lain kvantitatiivinen muoto on helposti omaksuttavissa.

Kokeen toteutus F2k-laboratoriossa osuu jonkin verran sivuun tästä tarkoituksesta. Siinä tutkitaan hehkulangan emittoimaa lämpösäteilyä, joka ei kytkeydy mitenkään ilmeisellä tavalla vapausasteen käsitteeseen ja energian tasanjakautumiseen. Myöskään tutkimuksen kvantitatiivinen näkökulma, lämpösäteilyn spektrin maksimikohdan riippuvuus kappaleen lämpötilasta, ei liity kovin selvästi kokeen käsitteelliseen perustavoitteeseen, vaikka Stefanin ja Boltzmannin laki onkin sinänsä tärkeä laki.

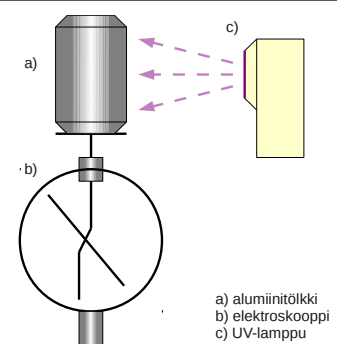
Yhteys kokeen tarkoitukseen voidaan tavoittaa vain perustelemalla, miksi mustan kappaleen (hehkulangan) emittoimaa säteilyä voidaan pitää ekvivalenttina lämpötasapainossa olevan ontelosäteilyn kanssa. Siinä on tähän kokeeseen liittyvä "hand-waving", jonka perusargumentteja ovat mustan kappaleen luonne kaiken siihen osuvan säteilyn absorbaattorina, uunin seinässä olevan reiän tulkinta tällaiseksi täydelliseksi absorbaattoriksi sekä lämpötasapainossa toteutuva emission ja absorption tasapaino.

Sähkömagneettisen säteilyn energianvaihdon kvantittuminen oli modernin fysiikan lähtölaukaus. Planckin lakia voidaan pitää modernin fysiikan ensimmäisenä peruslakina. Se tarjoaa perustan lähes kaikkien sitä seuraavien peruskokeiden tulkinnoille, sekä niiden kvalitatiiviselle mielikuvamerkityksen hahmottamiselle että niiden kvantitatiivisille selityksille. Näin esimerkiksi valosähköinen ilmiö ymmärretään sähkömagneettisen säteilyn kvantittuneeksi absorptioksi ja jarrutussäteily (jatkuvaspektrinen röntgensäteily) kvantittuneeksi emissioksi. Se on kaiken spektroskopian tulkintojen perusta. Näissä tulkinnoissa klassisesta fysiikasta peräisin olevat säilymislait saavat keskeisen merkityksen ja vahvistavat asemiaan mielikuvarakenteen peruselementteinä.

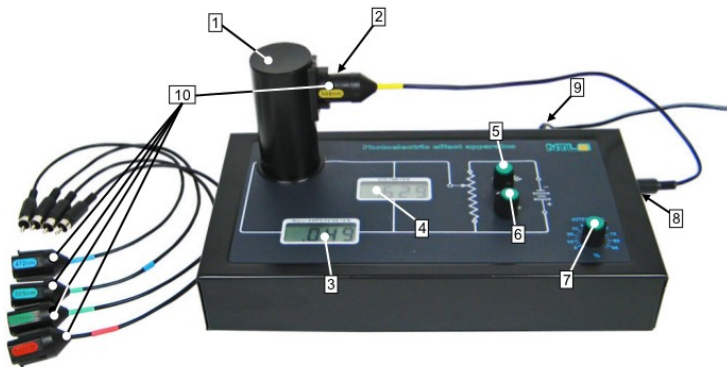
Valosähköinen ilmiö

Kokeen toteutus F2k-laboratoriossa. Valosähköistä ilmiötä tutkitaan ensin kvalitatiivisesti. Alumiinisen juomatölkin pinnasta hiotaan hiekkapaperilla oksidikerros pois. Tölkki asetetaan elektroskoopin päälle, ja tölkkiin tuodaan negatiivinen varaus. Valaistaan tölkkiä UV-lampulla, jolloin havaitaan varauksen poistuvan. Toistetaan koe tavallisen pöytälampan valolla, jolloin varaus säilyy. Positiivinen varaus säilyy sekä UV- että pöytälampan valossa. Kokeen perusteella näyttää siltä, että tarpeeksi lyhytaaltoisella valolla on kyky irrottaa alumiinista elektroneja.

Kvalitatiivinen koe tehdään erityisesti koetta varten suunnitellulla laitteistolla (katso kuva). 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.



- 1) valokennon suojakupu
- 2) valo suuntaava putki
- 3) nanoampeerimittari fotovirralle
- 4) jännitemittari pysäytysjännitteelle
- 5) vastajännitteen karkea säätö
- 6) vastajännitteen hienosäätö
- 7) valolähteen kirkkauden säätö
- 8) valolähteen pistoke
- 9) virtalähteen pistoke
- 10) valolähteinä toimivat LEDit

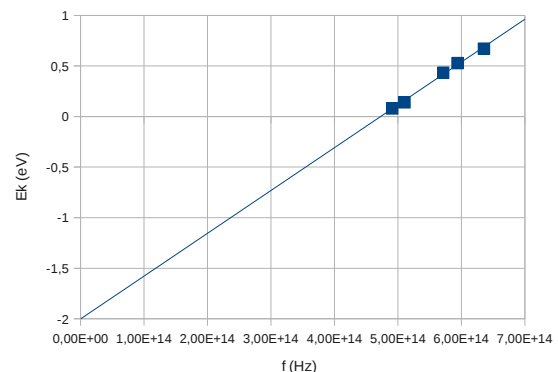
Valokennon elektrodien välille tuodaan ulkoinen jännite, jota varioidaan. Havaitaan että se vaikuttaa fotovirran suuruuteen. Jos jännite on positiivinen (katodi negatiivinen), fotovirta kulkee. Jos jännite on negatiivinen (katodi positiivinen), fotovirta pienenee, ja tietyllä jännitteen arvolla fotovirta 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 elektronin kenttää vastaan tekemä työ. Pysäytysjännitteellä irtoavan elektronin suurin mahdollinen liike-energia on yhtä suuri kuin elektronin kenttää vastaan tekemä työ.

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 nollassa³. Tulkinta: irtoavan elektronin saama maksimienergia riippuu vain valon aallonpituudesta, ei valon voimakkuudesta.

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, jonka elektronin on tehtävä päästäkseen irti metallista. Tämä irrotustyö on eri metalleilla erilainen. Elektronin valolta saama energia on $E = hf$, jossa riippuvuussuoran kulmakerroin h on kaikilla metalleilla sama.



³Koelaitteistolla tämä pitää paikkansa vain osalla ledeistä. Muiden ledien aallonpituus muuttuu hieman kirkkauden myötä, jolloin fotovirta alkaa kulkea vaikka pysäytysjännite pidetään vakiona.

Käsitteellinen merkitys. HEIMO SAARIKKO tarkasteli luennossaan yksityiskohtaisesti valosähköisen ilmiön käsitehistoriaa.

Valosähköisen ilmiön ensimmäiset tässä esitetyn kokeen kaltaiset tutkimukset teki PHILIPP LENARD (1902). Hän teki kaksi tärkeää havaintoa:

Ilmiön synnyttämän sähkövirran kyllästysarvo oli verrannolliseksi valon intensiteettiin hyvin heikoista intensiteeteistä alkaen.

Fotoelektronien pysäytysjännite oli tästä intensiteettistä riippumaton.

Kumpikin havainto oli selvässä ristiriidassa ilmiön klassisen selityksen kanssa, joka perustui sähkömagneettisen aaltoliikkeen absorptioon.

EINSTEIN esitti kuuluisassa vuoden 1905 artikkelissaan ilmiölle selityksen, joka perustui ideaan valon luonteesta fotoneina. Tosiassissa valosähköinen ilmiö ei ollut tämän artikkelin pääaihe. Lähtökohtana oli mustan kappaleen säteily. Olettamalla, että lämpösäteily muodostui fotoneista, joilla oli Planckin lain mukainen energia, hän johti uudelleen tämän säteilyn spektrin muodon.

Valosähköisen ilmiön tarkastelu oli täydentävä ylimääräinen tarkastelu. Fotoni-idea johti ennusteeseen, jonka mukaan pysäytysjännite riippui lineaarisesti valon taajuudesta. Tämän lineaarisuuden ja sitä esittävän Einsteinin yhtälön todentaminen on F2k -kokeen keskeinen tarkoitus. Se ei sisällynyt Lenardin koetuloksiin. Millikan käytti 10 vuotta sen testaamiseen ja, kuten hän itse sanoi, joutui vihdoinkin vuonna 1915 odotustensa vastaisesti myöntämään Einsteinin ennusteen oikeaksi.

Einsteinin esittämät mustan kappaleen säteilyn ja valosähköisen ilmiön selitykset olivat ristiriidassa kaikkien interferenssi- ja diffraktiokokeiden vakiintuneen tulkinnan kanssa, jonka mukaan valo "oli aaltoliikettä". Einstein käsitteli valoa fotonisuihkuna ja fotonia klassisen mielikuvan mukaisena hiukkasena palaten näin Newtonin alkuperäiseen selitysmalliin. Millikanin lausuma kuvaa hyvin sen ontologisen kriisin syvyyttä, johon nämä kaksi koetta johtivat.

Einstein meni kuitenkin tulkinnoissaan liian pitkälle. Kokeiden empiirinen pakko kohdistuu vain sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutukseen aineen kanssa. Ne eivät osoita mitään itse sähkömagneettisen säteilyn luonteesta. Niiden perusteella voidaan todeta vain se, minkä edellä esitetty Planckin lain muotoilukin sanoo:

Fotoni on sähkömagneettisen säteilyn ja aineen välisen vuorovaikutuksen kvantti.

Mustan kappaleen säteilyn ja valosähköisen ilmiön tutkimusten *kvalitatiivinen merkitys* oli vallankumouksellinen. Se keskittyi fotonin käsitteeseen, joka tuli fysiikkaan jäädäkseen. Muut kokeet, kuten jarrutus säteilyn ja Comptonin sironnan tutkimukset ja spektroskopia, täsmensivät ja täydensivät sen merkitystä. Nyt fotoni merkitsee, että sähkömagneettinen vuorovaikutus muodostuu vapausasteikohtaisista hetkellisistä ja paikallisista tapahtumista, joissa energia, liikemäärä ja pyörimismäärä välittyvät yhtäaikaan vapausasteen taajuudesta riippuvina tietynsuuruusina kvantteina. Tapahtumat muistuttavat klassisia törmäyksiä ja vahvistavat yhä yleistä harhaista mielikuvaa fotonista itsenäisenä hiukkasena, joka on kuitenkin vailla empiiristä perustaa.⁴

Planckin vakioista tuli modernin fysiikan perustaan kuuluva universaalinen luonnonvakio. Valosähköisen ilmiön *kvantitatiivinen merkitys* oli sen tarjoama uusi selvästi tarkempi menetelmä tämän vakion määrittämiseen.

⁴ Tähän palataan lähemmin ontologista kriisiä käsittelevässä luennossa.

Spektritutkimus

Kokeet F2k-laboratoriossa. Käytettävissä on käsispektroskooppeja kvalitatiivisiin tutkimuksiin, ja tietokoneeseen liitetty spektrometri kvantitatiivisiin kokeisiin.

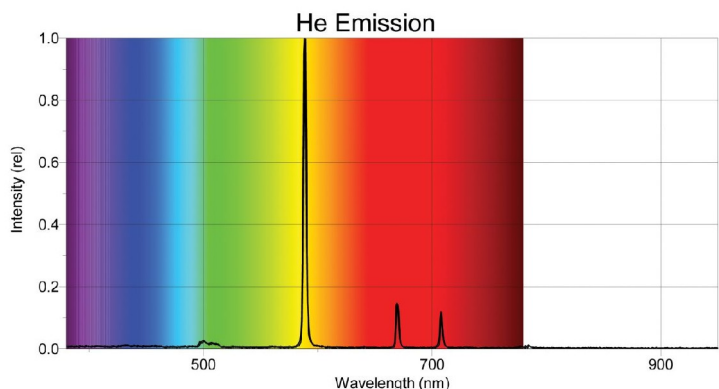
Käsispektroskoopissa on 600 viivaa/mm hila, jonka muodostama spektri nähdään laitteen objektiivista. Laitteella havaitaan selvästi eri tyyppiset spektrit:

- Hehkuvien kiinteiden kappaleiden, kuten lampun hehkulangan, lähettämän valon spektri on jatkuva, eli siinä on kaikkia näkyvän valon aallonpituuksia. Myös Auringon valon spektri on (laitteen erottelutarkkuudella) jatkuva.
- Hehkuvilla kaasuilla on viivaspektri, eli niiden säteilemä valo koostuu erillisistä aallonpituuksista, jotka näkyvät spektrissä ohuina viivoina.
- Laservalossa on vain yksi aallonpituus.
- Loisteputkilla ja ledeillä on epäjatkuva spektri, joka koostuu yksittäisistä viivoista ja leveämmistä juovista.



Tietokoneeseen kytketty spektrometri mittaa aallonpituuksien suhteelliset intensiteetit alueelta 380 nm – 950 nm. Mittausohjelma esittää kuvaajana intensiteetin aallonpituuden funktiona. Kuvaajan taustana on jatkuva värispektri, joten kuvaaja esittää hyvin havainnollisesti, mitä aallonpituuksia ja värejä tutkittava valo sisältää.

Spektrometrilla 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. Periaatteessa pitäisi olla mahdollista tutkia esimerkiksi ohuessa kalvossa tapahtuvaa interferenssiä, mutta käytännön kokeita ei ole vielä tätä kirjoitettaessa tehty.

Käsitteellinen merkitys. Spektritutkimus on siinä suhteessa eri asemassa kuin edelliset kokeet, ettei se ole mikään selvästi yksilöityvä koe, vaan atomifysiikan kokeellinen perusmenetelmä. Sellaisena se on valtava kokeellisen tiedon lähde, empiirinen avain atomin rakenteeseen, atomimalleihin, atomaarisiin ilmiöihin ja kvanttimekaniikkaan.

Spektrien tutkimus jatkaa edellisten kokeiden käynnistämää modernin fysiikan kehitystä. Viivaspektrien rakenteesta hahmottunut *Ritzin kombinaatioperiaate* on fotonin käsitteen ja Planckin lain valossa vahva empiirinen näyttö atomien energian kvantittumisesta ja atomien stationaarisista tiloista. *Franckin ja Hertzin* koe vahvistaa tämän tulkinnan.

Vetyatomin spektriä esittävä *Balmerin laki* oli Ritzin periaatteen esikuva ja erityistapaus, jolle *Bohr* perusti esittämänsä atomimallin. Hänen päättelynsä nojautui

Balmerin laista seuraavaan vetyatomien stationaaristen tilojen energian lausekkeeseen, jonka perusteella hän päätyi elektronien radat määräävään nk. Bohrin kvanttiehtoon. Usein oppikirjoissa päättelyn suunta esitetään päinvastaisena, jolloin kvanttiehto näyttää mielivaltaiselta päänäpistöltä ja mallin empiirinen perusta hämärtyy.

Vaikka Bohrin malli osoittautuikin Sommerfeldin täsmennyksen jälkeen sisäisesti ristiriitaiseksi ja vaikka se, stationaaristen tilojen energioita lukuun ottamatta, johti väärin spektroskooppisiin ennusteisiin, sillä on kiistämätön merkitys kvanttimekaniikan semiklassisena esivaiheena.

Spektroskopian kautta alkavat selvitä atomien ja molekyylien rakenteet ja dynamiikka, ja kokonainen uusi atomaaristen ilmiöiden maailma avautuu. Siinä erottuvat elektronisten tilojen, värähtelyjen ja rotaatioiden spektrit ja hahmottuvat atomien rakenteelliset perusteet, spinin käsite, elektronien luonne fermioneina, joka ilmenee Paulin kieltoääntönä ja elektroniverhon rakentumisen periaatteena, jne.

Tunkeutuminen yhä syvemmälle aineen rakenneosien hierarkiassa johtaa sarjaan eri kertalukujen spektrejä.

Ydinspektroskopia, ydinten gammaspektrit johtavat ydinten rakenteeseen. Hadronispektri, spektrien seuraava kertaluku tulee vastaan, kun hiukkasfysiikassa löydetty laajeneva hadronien eli baryonien ja mesonien joukko saa tulkinnan kvarkkisysteemeinä ja niiden viritystiloina.

Hiukkaslajien samastuminen systeemin tiloihin johtaa ajattelemaan yleisemminkin tällaisen käänteisen tulkinnan mahdollisuutta. Voidaanko myös kaikki ydinten ja atomien stationaariset tilat ymmärtää eri hiukkaslajeiksi, ja mitä tämä mahdollisuus merkitsee suurempien aineellisten systeemien kannalta? Näin joudutaan yksilö- ja laji-identiteetin ongelmaan, jolla on tärkeä merkitys modernin fysiikan maailmankuvassa.

Vuorovaikutusten "välittäjähiukkasia", kuten gluoneja hadroneissa ja pioneja ytimissä, jopa fotoneja atomeissa ja molekyyliissä voidaan tällöin ajatella rakenneosina. Jokaisen hiukkasen, systeemin tai olion laji määräytyisi tällöin yksikäsitteisesti tiettyjen rakenneosien yhdistelmänä. Tällä tavalla olemassa olevien tai mahdollisten lajien spektri laajenisi äärettömästi.

Lajien samastus stationaarisiiin tiloihin ja siihen liittyvä spektrin mielikuva vie ajatukset takaisin tämän luennon alkaneeseen vapausasteen käsitteeseen. Näin tarjoutuu maailmankuvan pohdinnan lähtökohdaksi ajatus, jonka mukaan *hiukkaslajit ovat "olemassaolon" vapausasteita*. Jos olemassaolon perustilaa sanotaan tyhjiöksi päädytään, tässä spektroskopiasta alkaneessa ajatusketjussa, olemassaolon salaisuutta kuvailevaan lopputoteamukseen, jonka mukaan

Tyhjiö on olemassaolon kaikkien vapausasteiden potentiaalisen eksistenssin kenttä – eksistenssin realisoituminen riippuu energiasta ja noudattaa säilymislakeja!

Siinä sopiva ajatus pohdittavaksi ennen seuraavia luentoja, joissa tarkastelen fysiikan ajautumista ontologiseen kriisiin.