

## F2k-LABORATORION ESITTELY 1

Kaarle Kurki-Suonio ja Ari Hämäläinen

### Uusi empiria uuden hahmotuksen perustana

F2k -laboratorion kokeet ovat osa sitä *uutta empiriaa*, joka kohdataan modernin fysiikan portilla. *Klassisilla perusmielikuvilla* on tässä *kahtalainen rooli*:

Ne ovat niitä *mielen rakenteen elementtejä*, joiden perusteella havaintojen ja koetulosten merkityksiä hahmotetaan. Ne edustavat sitä *käsitteellistä valmiutta*, jota tarvitaan tieteen ja oppimisen prosessien jatkamiseksi, "jättiläisen hartioita", joille on noustava, jotta voisi kiivetä ylemmäksi.

Mutta samalla ne ovat *ennakkokäsityksiä*, joiden muuttamiseen uusien tulosten luoma empiirinen pakko kohdistuu. Tämän hyväksyminen on sitä *asenteellista valmiutta*, jota ilman ei modernin fysiikan portti avaudu.<sup>1</sup> Se merkitsee valmiutta antautua empiirisen pakon edessä ja muuttaa käsityksiä silloin, kun havainnot osittavat sen välttämättömäksi. Tämä valmius on tieteellisyyden perusta. Siihen voidaan kasvaa fysiikan opinnoissa vähitellen pohtimalla kaiken kokeellisuuden yhteydessä, miten *tulkinta* erotetaan *havainnosta*.

### Jokaisen kokeen yhteydessä tehtäviä kysymyksiä

Jotta uusi empiria voisi toimia *uuden rakenteellisen hahmotuksen* perustana ja opastaa sisään modernin fysiikan portista, on kutakin koetta tarkasteltava rakenteellisen hahmotuksen kannalta. On selvitettävä, *miten koe liittyy käsitteiden kehittymiseen tieteen historiassa ja opiskelijan oppimisprosessissa*. Tähän kuuluvat kaikki ne elementit, joita olen esitellyt *ymmärtämisen portaksi kutsumassani jäsentelykaaviossa*.<sup>2</sup>

Tämä merkitsee, että kokeita on syytä pohtia monelta eri kannalta. Sitä varten olen koonnut joukon kysymyksiä, joita olisi hyvä ajatella jokaisen F2k -kokeen yhteydessä erikseen. Kysymyksiä voidaan myös soveltaa pitkälti kaikkeen opetuksen kokeellisuuteen. Luettelon päätarkoitus onkin tarjota apuväline, jonka avulla jokaiselle kokeelle voidaan antaa sille kuuluva *"käsitteellinen merkitys"* ja tarkoituksenmukainen asema opetuksen etenevässä prosessissa. Kysymykset sinänsä ovat enimmäkseen vaativia ja osittain päällekkäisiä, eikä niihin voi odottaa yksinkertaisia vastauksia suoralta kädeltä. Ne edellyttävät pitkää pohdintaa ja turvautumista erilaisiin tietolähteisiin. Tämä kurssi tarjoaa tähän joitakin lähtökohtia.

#### A: Jättiläisen hartiat. Käsitteellinen valmius.

- \* Millaisiin käsityksiin ja millaiseen "tieteelliseen mielikuvarakenteeseen" kokeen idea, suunnittelu ja toteutus perustuivat tieteen historiassa? Vrt. ARONSIN: "Story line"<sup>3</sup>.
- \* Mitä aikanaan tiedettiin kokeeseen liittyvistä asioista?
- \* Millaisia käsityksiä oppilaalla on kokeeseen liittyvistä asioista, ja millaista mielikuvarakennetta hän tarvitsisi uuden rakenteellisen hahmotuksen lähtökohdaksi kokeen perusteella?
- \* Mitä oppilas tietää tai mitä hänen pitäisi tietää koetta tarkasteltaessa?

#### B: Kokeen toteutus.

- \* Millainen on kokeessa toteutettava ideaalinen "puhdas ilmiö"?
- \* Millaisen kysymyksen luonnolle koe esittää?
- \* Voisiko oppilaassa herättää tämän kysymyksen kokeen idean pohjaksi?

<sup>1</sup> K. KURKI-SUONIO, H. HAKULINEN & J.LAVONEN (2002). *Galilei 8. Opettajan opas*. WSOY. Johdanto.

<sup>2</sup> K. KURKI-SUONIO (2011). *Principles Supporting the Perceptual Teaching of Physics*:

A "Practical Teaching Philosophy" *Science & Education*, 20: 211–243. Luku 6.2–3.

K. & R. KURKI-SUONIO (1994). *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry., Helsinki. Luku 4.4.1.

<sup>3</sup> A. B. ARONS (1997). *Teaching Introductory Physics*. John Wiley & Sons, New York luku 10.1

- \* Miten *luonto pakotetaan vastaamaan?* (Ilmiön puhtautta häiritsevät tekijät ja niiden eliminointi - koejärjestely.)
- \* Miten nykyinen koelaitteisto poikkeaa alkuperäisestä?
- \* Mitä kokeessa "nähdään"? Mitä opettaja näkee ja mitä oppilaat näkevät? Voidaanko siitä päästä yksimielisyyteen?
- \* Millaiset kokeen *vakioidinnit* ja *varioinnit* voivat tukea hahmotusta?

### C: Käsitteellinen merkitys.

- \* Mitä luonto vastaa?
- \* Millaisia rakenteellisia hahmoja vastauksen perusteella muodostuu, eli millaisia mielikuvia koe luo kvalitatiivisen ymmärtämisen tasolla?
- \* Miten vastaus vaikuttaa klassisiin käsityksiin? Miten koe muuttaa, laajentaa tai täsmentää käsitteitä tai vaatii muodostamaan uusia?
- \* Millainen on kokeen luoma empiirinen pakko klassisten käsitysten muuttamiseen?
- \* Millainen on kokeen asema suhteessa muihin modernin fysiikan peruskokeisiin?
- \* Mitä kvantitatiivisia tietoja kokeesta saadaan?
- \* Millaiseen käsiterakenteen kehitykseen kokeen tuottama kvalitatiivinen ymmärrys ja kvantitatiiviset tiedot johtivat tieteen historiassa?
- \* Millaiseen edistymiseen niiden tulisi johtaa oppilaan oppimisprosessissa?

### Kokeen asema osana fysiikan opetusta

Tällaisten kysymysten avulla voidaan harkita sitä prosessuaalista asemaa ja proseduraalista merkitystä, joka kullekin kokeelle annetaan tai voidaan antaa fysiikan opetuksessa. Molemmat riippuvat opetuksen lähestymistavasta ja opettajan opetuskäytännöistä.

*Prosessuaalinen asema* tarkoittaa kokeen ja sen yhteydessä tarkasteltavan asian roolia fysiikan oppimisen hahmotus- ja käsitteenmuodostusprosessissa. Kysymys on kokeen niveltämisestä opetuksen kokonaisrakenteeseen, siihen, mitä ja millä tavalla on opetettu aikaisemmin ja miten opetuksen on tarkoitus edetä myöhemmin.

*Proseduraalinen merkitys* tarkoittaa kokeen ajateltua tehtävää opetettavaan asiaan liittyvässä käsitteenmuodostuksessa. Opettajan *proseduraalisen tiedon* eli opetuksen menetelmällisten toimenpiteiden tuntemuksen ja hallinnan tueksi tarvitaan *proseduraalista ymmärrystä*, jonka perusteella voidaan nähdä ja arvioida kokeen erilaisia mahdollisuuksia hahmotuksen tukemisessa. Tähän kuuluvat erityisesti kysymykset siitä, onko tarkoituksenmukaista esittää koe hahmottavana vai testaavana, kvalitatiivisena vai kvantitatiivisena, tukeudutaanko pelkästään "kerrottuun empiriaan" vai tehdäänkö koe aidosti, joko demonstraationa tai laboratoriotyönä joko koulussa tai esimerkiksi vierailulla F2k-laboratoriossa.

### Käsitteellinen valmius

Thomsonin ja Millikanin kokeiden, niiden taustalla olevien käsitysten ja ideoiden sekä niiden tulkintojen esittelyssä olen käyttänyt tärkeänä lähteenä ARONSIN kirjan<sup>4</sup> lukujen 10: 2–7 esitystä.

*Edeltävät mielikuvat atomeista ja elektroneista.* Kuten HEIMO SAARIKKO kertoi maanantain ensimmäisellä luennollaan, Thomsonin kokeen (1896–97) ja Millikanin kokeen (1909–1913) aikaan ajatus *aineen atomirakenteesta* oli fysiikassa varsin yleisesti hyväksytty. Hypoteesina atomi, aineen jakamaton perusosanen, oli ikivanha, mutta varsinaista tieteellistä näyttöä niiden olemassaolosta ja luonteesta saatiin vasta 1800-luvun alusta alkaen. Noin sadan vuoden aikana aineen atomirakenteen tueksi kertyi hyvin laaja ja vahva *selitysnäyttö*, mutta suoraa *havaintonäyttöä* saatiin ensimmäisen kerran vasta isä ja

<sup>4</sup> A. B. ARONS (1997). *Teaching Introductory Physics*. John Wiley & Sons, New York.

poika BRAGGIN osoitettua (1915), miten röntgendiffraktio antaa mahdollisuuden "nähdä" ja tunnistaa kiderakenteen atomit. Myös *atomaaristen suureiden* suuruusluokat tunnettiin jo verrattain hyvin 1800-luvun lopulla.

Fysiikoilla oli myös selvä käsitys siitä, että aineella, ilmeisesti sen atomeilla, oli *varauksellisia rakenneosia*. Tähän viittasivat erityisesti FARADAYN elektrolyysilait (1834), joiden perusteella tunnettiin *ionien ominaisvaraus* (varauksen ja massan suhde,  $q/m$ ) ja sen kvantittuneisuus. Sen erilaiset arvot selittyivät suhteellisten atomimassojen ja ionisoitumisasteen perusteella. Jälkimmäinen ymmärrettiin samalla osoitukseksi siitä, että myös *sähkövaraus oli kvantittunut*. Sähkövirtaa kaasussa koskevat tutkimukset, ja kaasujen ionisoituminen, muuttuminen sähköä johtaviksi säteilyn vaikutuksesta olivat 1880- ja 1890-luvun uusia osoituksia siitä, että aineilla laajasta riippumatta oli sähköisiä rakenneosia. Thomsonin kokeen aikaan oli juuri löydetty röntgensäteily (1895) ja radioaktiivisuus (1896) ja Thomson oli hyvin perillä väliaineikaasun ionisoitumisesta. omassa kokeessaan.

*Klassisen fysiikan peruskäsitteet lähtökohtana.* Thomsonin ja Millikanin kokeiden idean ymmärtäminen sekä niissä tehtyjen havaintojen ja saatujen tulosten tulkinta edellyttävät varsin laajaa klassisen fysiikan peruskäsitteiden tuntemusta. Erityisesti on hallittava *Newtonin mekaniikan perusteet, dynamiikan peruslaki* ja tietyt *voimien lait* ja ymmärrettävä niiden käyttö hiukkasen *radan määrittämiseen*. On myös tunnettava *sähkö- ja magneettikenttä* sekä niiden synnyttämisen periaatteet kondensaattorien ja käämien avulla. Tarvitaan siis ainakin *liikesuureet, massan, varauksen ja voiman* käsitteet sekä sähkömagnetismin perussuureet, *sähkövaraus ja sähkövirta* ja niiden välinen yhteys sekä *sähkökentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys* sekä *sähkökentän potentiaali* ja sen yhteys *energiaperiaatteeseen*.

Koejärjestelyjen ja kokeisiin liittyvien tulkintojen ymmärtämiseksi pitäisi myös tuntea ilmiöinä mm. aaltoliike energian kuljettajana (T), elektrolyysi (T), fluoresenssi (T), ionisoituminen (T, M) ja säteilyn ionisoiva vaikutus (T, M).

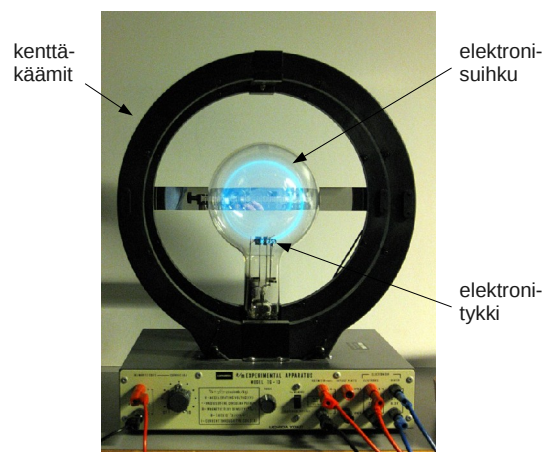
### Thomsonin koe, havaintoja ja tulkintoja.

*F2k-koe.* Laitteistossa on heliumtäytteen putki, jonka sisällä on elektronitykki. Sen katodin ja anodin välille on kytketty säädettävä 100-300 V tasajännite. Katodia kuumennetaan sähkövirralla, jolloin sen metallista irtoaa elektroneja.

Sähkökenttä kiihdyttää niitä 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.

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.

F2k-kokeen tärkeimmät erot Thomsonin alkuperäiseen kokeeseen ovat:



- Elektronitykissä on hehkukatodi (T: kylmäkatodi)
- Putkessa on kaasutäyte (T: tyhjiö)
- Havainnoidaan hiukkasten rataa täytekaasun fluoresenssin 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.

*Tutkittava ilmiö.* SIR JOSEPH JOHN THOMSON tutki katodisäteiden luonnetta kokeellaan, jonka tulosten perusteella on tapana sanoa, että hän "löysi elektronin". Hänellä oli tarjolla klassisen fysiikan kaksi vaihtoehtoista säteilyn mallia: hiukkassuihku ja aaltoliike, jonka ajateltiin olevan "eetterissä" etenevää värähtelyä. Itse säteilystä nähtiin vain sen osumakohta fluoresoivalla varjostimella. Ennen Thomsonia oli havaittu, että osumakohta siirtyi magneettikentän vaikutuksesta.

Oli myös todettu, että elektrometri varautui säteilyn vaikutuksesta negatiivisesti. Thomson varmisti, että varautuminen johtui nimenomaan säteilyn osumisesta sijoittamalla elektrometrin sivuun alkuperäisestä osumakohdasta siten, että vain poikkeuttaminen magneettikentällä sai säteilyn osumaan siihen.

Thomsonilla oli siten vahva ennako-odotus, jonka mukaan katodisäteet olivat negatiivisesti varautuneiden hiukkasten suihku. Magneettisten ja sähköisten voimien lait tunnettiin. Homogeenisten kenttien synnyttäminen levykondensaattoreilla ja Helmholtzin käämeillä ja kenttien voimakkuuksien säätely kondensaattorin jännitteen ja käämien sähkövirran avulla hallittiin, joten tällaisten hiukkasten käyttäytyminen oli periaatteessa helppo ennustaa dynamiikan peruslaista saatujen liikeyhtälöiden avulla..

Tässä kohden matkaan tuli mutka, sillä sähkökentän vaikutusta ei ensin saatu näkyviin. Thomson tunsu hyvin katodisäteiden ionisoivan vaikutuksen ja osasi epäillä, että täytekaasun muuttuminen sähköä johtavaksi häiritsi koetta hävittämällä sähkökentän. Käyttämällä hyväksi vastikään kehitettyä tyhjiötekniikkaa hän onnistuikin osoittamaan, että riittävän hyvässä tyhjiössä sähkökenttäkin poikkeutti säteilyä odotetulla tavalla.

Näin oli saatu tutkittavaksi "puhdas ilmiö" ja kenttien aiheuttamat säteilyn poikkeamat osoittautuivat klassisten ennusteiden mukaisiksi.

*Vertailua F2k-kokeeseen.* Thomson tutki fluoresoivan varjostimen avulla säteilyn osumakohdan poikkeamista kenttien voimakkuuksien (nykyisiä suurenimiä käyttäen sähkökentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden) funktiona. F2k-kokeessa on vain säädettävä magneettikenttä, mutta siinä saadaan suihkun rataympyrä näkyviin fluoresoivan täytekaasun avulla, ja ympyrän säteen riippuvuus kiihdytysjännitteestä (elektronien nopeudesta) ja magneettivuon tiheydestä nähdään havainnollisesti.

F2k-kokeessa katodisäteet ovat hehkukatodista termisesti irtautuvia elektroneja. Hehkukatodi tuli käyttöön jo varhaisessa elektroniikassa, mutta Thomsonilla ei sitä ollut. Tämä on kokeen tulkinnan ja tulosten kannalta sivuseikka, mutta on mielenkiintoista huomata, etteivät Thomsonin kiihdytysjännitteet voineet riittää elektronien kenttäemissioon, joten hänen elektroninsa ilmeisesti irtosivat katodia pommittavien positiivisten ionien vaikutuksesta.

**Käsitteellinen merkitys.** Thomsonin kokeessa ei ole mitään, mikä suoraan osoittaisi säteilyn koostuvan yksittäisistä hiukkasista. Säteilyn osamakohdan säilyminen terävänä (T) ja sen pysyminen koossa yhtenäisenä säteenä (F2k) on kuitenkin tältä kannalta tärkeä havainto. Se osoittaa, että, jos kyseessä on hiukkassuihku, sen hiukkasilla on tarkalleen sama ominaisvaraus, joka voitiin määrittää koetuloksista oppikirjoissa esitetyllä tavalla.

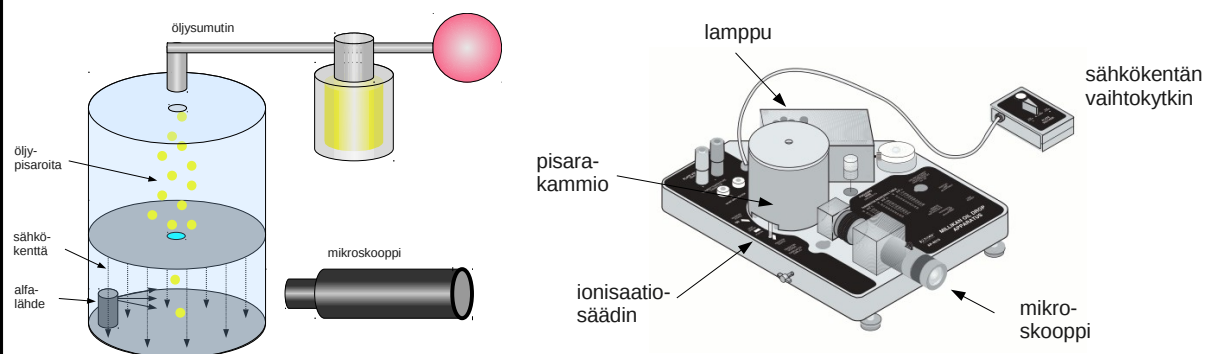
Riippumatta siitä tehdäänkö koe Thomsonin tavalla vai F2k -kokeena, katodisäteiden taipuminen kenttien vaikutuksesta noudattaa klassisia ennusteita, ja niiden perusteella on mahdollista määrittää katodisäteilylle ominainen ominaisvaraus. Thomson ei kuitenkaan tähännyt ominaisvarauksen suureen tarkkuuteen. Häntä kiinnosti sen suurusluokka verrattuna elektrolyysin perusteella tunnettuihin ionien ominaisvarauksiin. Suhdeluvut olivat tuhansien luokkaa ja antoivat aiheen päätellä, että oletetut katodisädehiukkaset olivat näin paljon pienempiä kuin ionit. Tätä johtopäätöstä tuki myös katodisäteiden havaittu parin senttimetrin kantomatka ilmassa. Hiukkasten vapaata matkaa koskevien laskelmien mukaan atomien kokoluokkaa olevien hiukkasten kantama olisi ollut aivan liian lyhyt edes havaittavaksi.

Näin Thomsonin koe loi ensimmäistä kertaa mielikuvaa atomia paljon pienemmistä varauksellisista rakennehiukkasista ja viittasi siten eteenpäin atomien rakenteeseen. Aineen sähköisen neutraalisuuden perusteella voitiin edelleen päätellä, että aineessa esiintyvät positiiviset ja negatiiviset varaukset ovat välttämättä täsmälleen yhtä suuria.

Vaikka Thomson ei voinutkaan varsinaisesti havaita elektroneja, hän on täysin ansainnut kunnioituksensa elektronin löytäjänä. Thomsonin koe edustaa niin vahvaa selitysnäyttöä katodisäteiden luonteesta elektronisuihkuna, että sitä voidaan pitää empiirisenä pakkona. Tämä tulos ja sen viitoittama polku eteenpäin kohti aineen subatomaarisen rakenteen tutkimusta antavat Thomsonin kokeelle niin tärkeän aseman aineen rakennetta koskevan *kvalitatiivisen ymmärryksen* perustana, että panostaminen elektronin ominaisvarauksen tarkkaan mittaamiseen antaa helposti harhaanjohtavan mielikuvan sen merkityksestä.

## Millikanin koe, havaintoja ja tulkintoja.

**F2k-koe.** Kokeessa havaitaan varauksen kvantittuminen kvalitatiivisesti. Laitteistolla on mahdollista määrittää alkeisvarauksen suuruus.



Tutkitaan varattujen öljypisaroiden liikettä sähkökentässä kuvien mukaisella laitteistolla. Pisarat tuotetaan sumuttimella ylempään kammioon. Pisarat kulkeutuvat pienestä aukosta alempaan kammioon, jossa niitä varataan alfasäteilyllä. Pisarat voivat varautua positiivisesti tai negatiivisesti. Alempaan kammioon voidaan tuottaa pystysuuntainen homogeeninen sähkökenttä.

Tärkeimmät erot Millikanin alkuperäiseen kokeeseen:

- Pisarat ionisoidaan alfasäteilyllä (Millikan käytti röntgensäteilyä)
- Pisaroiden liikettä tarkastellaan ja analysoidaan tietokoneeseen kytketyn videokameran ja videoanalyysin avulla. Tämä on F2k-laboratoriossa kehitetty

parannus, peruslaitteisto on suunniteltu alkuperäisen kokeen kaltaista suoraa näköhavainnointia varten.

Öljypisaroiden havaitaan putoavan tasaisella nopeudella alaspäin, kun sähkökenttää ei ole. Kun kenttä kytketään päälle, osa pisaroista lähtee ylöspäin, toisten liike alaspäin kiihtyy, ja joidenkin putoamiseen kentän kytkeminen ei vaikuta lainkaan. Kaikissa tapauksissa pisaroiden liike on tasaista, eli niihin vaikuttavat voimat (paino, sähköinen voima ja ilmanvastus) kumoavat toisensa. Tietylle pisaralle paino on vakio, sähköinen voima riippuu pisaran varauksesta ja ilmanvastus pisaran nopeudesta. Mikäli siis pisaran nopeuden havaitaan muuttuvan vaikka sähkökenttä pysyy vakiona, niin pisaran varauksen on täytynyt muuttua.

Ionisoituneisiin pisaroihin vaikuttavan sähkökentän voimakkuutta ja suuntaa voi varioida. Kentän voimakkuuden muuttamisella etsitään sopiva suuruusluokka pisaroiden nopeudelle. Pisaroiden koko ja sen myötä massa vaihtelevat, samoin niiden varaus ja varauksen merkki. Pisaran kokoa ei pysty suoraan havaitsemaan, joten sen merkitys kvalitatiivisessa hahmotuksessa on vähäinen. Varautuneet pisarat pystyy helposti erottamaan varautumattomista, kuten myös varauksen merkin, tarkkailemalla miten sähkökentän päälle kytkeminen ja suunnan vaihtaminen vaikuttaa pisaran liikkeeseen.

Oleellinen havainto on, että kun sähkökenttä ja ionisoiva säteily ovat "päällä", pisaran nopeus ja siis myös varaus muuttuu aina hyppäyksittäin, ei koskaan edes näennäisen jatkuvasti. Varaus on siis kvantittunut. Kun tarkkaillaan samaa pisaraa niin kauan, että sen varaus ehtii muuttua useita kertoja, ja määritetään vastaavat nopeudet, on mahdollista osoittaa että varauksen muutos on aina tietyn pienimmän mahdollisen varauksen monikerta, ja määrittää tämän alkeisvarauksen suuruus. Tällainen mittaussarja on sangen aikaa vievä ja vaativa. Alkeisvarauksen arvoa määritettäessä tarvitaan avuksi pallomaisten kappaleiden väliaineen vastusta kuvaava Stokesin laki. Öljyn tiheys täytyy tuntea; tarkkaan tulokseen pyrittäessä täytyy huomioida myös kammion lämpötila ja vallitseva ilmanpaine, koska ne vaikuttavat ilman tiheyteen ja siten sen viskositeettiin.

*Tutkittava ilmiö.* ROBERT MILLIKAN tutki varauksellisen öljypisaran liikettä pystysuorassa homogeenisessä sähkökentässä. Pisaraan vaikuttavat pisaran paino ja sähköinen voima, jotka ovat vakioita, sekä ilman vastus, jonka vaikutuksesta pisara saavuttaa hyvin äkkiä tietyn rajanopeuden, jossa ilmanvastus kumoaa muut voimat.

Pisaran liike on hyvin hallittu mekaniikan probleema. Kun voimien lait tunnetaan ja pisaran nopeus mitataan, voidaan, oppikirjoissa ja työohjeessa esitetyllä tavalla, määrittää pisaran varaus. Kokeen ymmärtämiseksi ei tarvita kvantitatiivisia tarkasteluja. Lähtökohdaksi tarvitaan lähinnä selvää mielikuva väliaineessa putoavan kappaleen liikkeen luonteesta, joka on helppo yleistää kokeen tilanteeseen.

Tätä mielikuvaa voi tukea väliaineenvastuksen tarkastelun yhteyteen sopiva keskustelu siitä, mitä laskuvarjohyppääjälle tapahtuu varjon auetessa. Tässäkin voi ilmaantua yllättäviä ongelmia: Erään täydennyskoulutuskurssin osanottaja kertoi luokkansa oppilaiden päätyneen täyteen yksimielisyyteen siitä, että laskuvarjon auetessa hyppääjä lähtee äkisti ylöspäin. Hänellä oli ollut suuria vaikeuksia vakuuttaa heidät siitä, että reaali maailman havainnot osittavat aivan päinvastaista kuin heidän TV-havaintonsa.

Kokeessa nähdään varaamattomien pisaroiden liikkuvan pystysuunnassa vakionopeudella, joka riippuu säädeltävästä sähkökentän voimakkuudesta (kondensaattorin jännitteestä). Kun ionisoiva säteily kohdistetaan pisaroihin, nähdään joidenkin pisaroiden nopeuden muuttuvan äkinäisesti osoituksena siihen vaikuttavan sähköisen voiman muutoksesta, ts. pisaran varautumisesta. "Luonnon vastausta" kokeella tehtyyn kysymykseen hahmottaa ehkä vielä selvemmin kärsivällisen katsojan havainto, jossa saman pisaran nähdään muuttuvan nopeuttaan portaittain.

Mitattujen nopeuksien perusteella määritetyt pisaroiden varaukset osoittautuvat saman yksikön, alkeisvarauksen monikerroiksi.

*Vertailua F2k-kokeeseen.* Röntgensäteily oli löydetty v. 1897 ja sen ionisoiva vaikutus oli tunnettu jo kauan. Millikan käytti sitä ilmassa leijuvien öljypisaroiden varaamiseen. F2k -kokeessa tähän käytetään alfasäteilyä. Kokeen periaatteeseen tämä ei vaikuta.

Nykyaikainen tietotekniikka tarjoaa F2k -laboratoriossa pisaroiden liikkeen seuraamiseen, nopeuksien mittaamiseen ja mittaustulosten rekisteröintiin mahdollisuuksia, joista Millikan ei osannut edes uneksia.

*Käsitteellinen merkitys.* Usein sanotaan, että Millikan "mittasi elektronin varauksen". Tämä sanonta on vähän harhaanjohtava. Millikanin kokeessa ei esiinny yksittäisiä elektroneja vaan pisaroita, joiden varaus vain yksittäisissä poikkeustapauksissa saattoi olla yhden elektronin varaus.

Varauksen kvantittuminen sinänsä ei myöskään ollut fyysikoille uusi asia, koska se oli voitu päätellä jo Faradayn elektrolyysilakien perusteella.

Koska Avogadron vakiokin tunnettiin karkeasti, tiedettiin Faradayn vakion perusteella myös alkeisvarauksen suuruus samalla tarkkuudella. Millikanin kokeen varsinainen merkitys on siten sen tuottama hyvin tarkka alkeisvarauksen mittauservo. Siitä oli siten perustellusti kutsua *ensimmäinen kirkas ikkuna atomimaailmaan*, joka yhdellä kertaa täsmänsi siihenastiset epätarkat tiedot atomimaailman suureiden arvoista.

Tuloksen tarkkuus tuli mahdolliseksi äärimmäisen huolellisen työn ansiosta. Millikan toisti kokeen n. 2000 kertaa.

Toisen ikkunan avasi vasta röntgendiffraktio n. vuodesta 1915 alkaen. Röntgensäteily oli keksitty v. 1897. Diffraktio heijastushilassa osoitti sen aaltoliikkeeksi. Poikittainen polarisaatio todettiin v. 1905. Diffraktio teki mahdolliseksi röntgenspektriviivojen aallonpituuden mittaamisen. Ja röntgendiffraktio kiteistä mittasi tämän jälkeen hilavakioita, siis atomien välimatkoja kiteessä, tunnetun aallonpituuden avulla. Tämä "ikkuna" oli yhtä tarkka mutta siitä "nähdyt" atomisuureiden arvot poikkesivat Millikan-arvoista n. 0,5 %. Parinkymmenen vuoden ajan atomaarisille vakioille kirjattiin erikseen Millikan- ja röntgenarvoja, kunnes eron syyksi paljastui virhe Millikanin käyttämässä ilman viskositeetin arvossa.

Atomaaristen suureiden, alkeisvarauksen, elektronin ja atomien massojen, atomien ja molekyylien geometrinen mittojen. Boltzmannin vakion jne., tuntemisella oli atomifysiikan kannalta valtava merkitys erityisesti viivaspektrien ja niiden hienorakenteiden tulkinnoissa, jotka johtivat atomien rakenteen ja siihen vaikuttavien ilmiöiden yksityiskohtaiseen ymmärtämiseen ja kvanttimekaniikan eri kehitysvaiheiden syntyyn.

Millikanin kokeeseen liittyy vielä pieni sivuhavainto, jonka merkitykseen ei kirjallisuudessa ole kiinnitetty huomiota. Röntgensäteilyn, jota Millikan käytti kokeessaan, tiedettiin olevan aaltoliikettä. Sen aiheuttamien ionisaatioiden havaittiin olevan hetkellisiä tapahtumia. Olkoonkin, että havainto on luonteeltaan makroskooppinen, sillä on saattanut olla merkitystä tukemassa, muutamia vuosia aikaisemmin itänyttä, mielikuvaa sähkömagneettisen säteilyn ja aineen vuorovaikutusten kvantittuneisuudesta osana sitä empiirisen näytön kokonaisuutta, jonka ytimessä kaksi seuraavaa F2k-koetta ovat. Tätä näkökulmaa ei liity kokeen F2k -versioon, jossa käytetään alfasäteilyä.