



EUROOPAN ZEITGEIST 100 VUOTTA SITTEEN

Zeitgeist-luentosarja oli Tieteen päivillä tammikuussa. Luennot valottivat, mitä muualla Euroopassa syntyi Suomen itsenäistymisen aikoihin. Tieteessä tapahtuu -lehdessä julkaistaan näitä pienoisluentoja kahdessa osassa. Tässä kokonaisuudessa kirjoittavat Kimmo Tuominen, Anna Kortelainen ja Paula Havaste.

KVANTTIMEKANIIKAN SYNTY

WERNER HEISENBERG

KIMMO TUOMINEN

Loppukesästä 1925 julkaistiin fysiikan aikakauslehdessä *Zeitschrift für Physik* 15-sivuinen tutkimusartikkeli, joka oli otsikoitu harmittoman kuo- loisesti: ”Kinemaattisten ja mekaanisten relatioiden kvanttiteoreettisesta tulkinnasta”. Artikkelin oli kirjoittanut Werner Heisenberg, ja työ oli kaukana harmittomasta. Siinä luotiin perusta kvanttimekaniikan vallankumoukselle, joka avasi atomin salaisuudet muutaman vuoden kuluessa artikkelin julkaisusta. Millaiseen maailmaan kvanttimekaniikka syntyi, mikä vaikutti sen syntyyn ja millainen henkilö oli Werner Heisenberg?

Esinäytös

Kesän lopulla 1911 joukko maailman tunnetuimpia aineen rakenteen ja säteilyn tutkijoita oli kokoon- tunut Metropol-hotelliin Brysseliin. Kokouksen aiheena oli säteily ja kvantit, ja kokouksen koollektus- jana toimi Ernest Solvay, teollisuusmagnaatti ja filantrooppi. Solvay oli luonut omaisuutensa kehittä- mällä ja patentoimalla teollisen menetelmän soodan valmistamiseen. Hän alkoi käyttää omaisuuttaan perustieteen tukemiseen: Brysselin yliopiston yhteyteen perustettiin fysiikan ja kemian tutkimuksen Solvay-instituutit vuosina 1912 ja 1913, mutta jo vuonna 1911 pidettiin Solvayn nimeä kantava fysiikan konferenssi. Solvayn tehtävä oli antaa kokoukselle nimensä ja rahoitus; todellisi- na kokouksen tieteellisinä koordinaattoreina toimi- vat Walther Nernst ja Hendrik Lorentz, joista erityisesti jälkimmäinen vastasi kokouksen puheiden organisoinnista ja keskustelujen puheenjohta- jana toimimisesta (Berends ja Lambert 2011). Ko- kouksessa oli läsnä silloinen fysiikan tutkijoiden

etulinja: muiden muassa Max Planck ja kokouksen nuorin osanottaja Albert Einstein, jotka oli- vat esitelleet kvantin käsitteen 1900-luvun alussa ja soveltaneet sitä menestyksekkäästi aineen ominaisuuksien selittämisessä. Yksi osanottajista oli brittiläinen fyysikko Ernest Rutherford, joka oli selvittänyt sirontakokeiden avulla, että atomit eivät olekaan tasa-aineisia kimpaleita, vaan koostu- vat tiheästä ytimestä ja sen ympärillä olevasta har- vasta elektroniverhosta.

Näiden tulosten nojalla oli perusteltua kysyä, millaiset luonnonlait ohjasivat aineen dynamiikkaa atomitasolla, ja saattaisivat selittää esimerkiksi atomien havaitut spektrit. Olihan ollut jo pitkään tunnettua, että aineet eivät emittoi ja absorboi sä- teilyä kaikilla mahdollisilla aallonpituuksilla, vaan kullekin aineelle ominaisilla diskreeteillä aallonpi- tuuksilla. Millainen aineen ja liikkeen teoria selit- täisi atomien kvantittuneet spektrit?

München

Solvayn konferenssin osanottajien joukossa oli myös professori Arnold Sommerfeld, joka pa- lasi kokouksen jälkeen Münchenin yliopistoon. Samaan aikaan, syksyllä 1911, Münchenin katu- ja asteli 9-vuotias Werner Heisenberg¹, joka oli aloittamassa opintojaan Maximilian kymnaasis- sa – perinteikkäässä opinahjossa, jonka aiempiin oppilaisiin lukeutui mm. Max Planck. Heisenberg oli syntynyt Würzburgissa vuonna 1901, ja perhe oli muuttanut Müncheniin vuonna 1910 Wernerin

¹ Heisenbergin elämäkertateoksia on useita mm. Heisenberg (1971) ja Cassidy (1993), joista erityisesti jälkimmäinen on varustettu hyvin täsmällisillä lähdeviitauksilla.

isän, August Heisenbergin, saatua kreikan filologian professuurin Münchenin yliopistossa. Augustin vahvan nousujohteisen akateemisen uran myötä Heisenbergit olivat nousseet ylempään keskiluokkaan, mikä antoi Wernerille vahvan esikuvan pyrkii menestymään opiskelussa ja sen kautta saavuttaa yhteiskunnallisesti merkittävä asema.

Heisenberg kohtaisi Arnold Sommerfeldin vasta aloittaessaan opinnot Münchenin yliopistossa vuonna 1920. Sommerfeldin oppilaana Heisenberg julkaisi neljä tutkimusartikkelia kahden ensimmäisen opiskeluvuotensa aikana ja nousi kaksikymmentävuotiaana atomifyysikan tutkimuksen etulinjaan. Tämä ei olisi ollut mahdollista, ellei hän olisi ollut lähtökohtaisesti huomasti korkeammalla tasolla kuin yliopistossa samaan aikaan aloittanut ikäluokkansa.

Syksyllä 1911 keisarikunnassa asiat vaikuttivat olevan vielä enimmäkseen hyvin. Koulut alkoivat normaalisti ja Maximilian kymnaasin rehtori Nicolaus Weihlein, Werner Heisenbergin äidin isä, johti koulua tiukan järjestelmällisellä otteellaan. Kaaoksen siemenet olivat kuitenkin itäneet poliittisessa ja yhteiskunnallisessa ilmapiirissä pitkään jo ennen ensimmäisen maailmansodan syttymistä 1914. Heisenbergin kannalta sodan vuodet edistivät hänen itseopiskeluaan ja todennäköisesti auttoivat menestymään paremmin kuin mitä normaalimuotoinen koulunkäynti olisi mahdollistanut.

Osansa Wernerin opiskelussa näytteli myös hänen isänsä, professori August Heisenberg, joka oli kovin huolissaan poikansa latinan kielen taidoista. Tietäen Wernerin kiinnostuksen matematiikkaan, hän kiikutti löytämänsä latinankieliset matematiikan tekstit Wernerille luettavaksi. Näin Werner sai tutustua mm. Leopold Kroneckerin epäonnistuneeseen yritykseen todistaa Fermat'n viimeinen lause sekä moniin muihin lukuteorian keskeisiin tuloksiin.

Heisenbergin viimeiset opiskeluvuodet kymnaasissa ajoittuivat Saksan historian turbulentiin aikaan. Kirvelevä tappio ensimmäisessä maailmansodassa, keisarikunnan romahtaminen ja valtakuntaa repivät vallankumoukset puhalsivat kumoon yhteiskunnan porvarillisen soveliaisuuden kulissit ja syöksivät koko valtion sekasortoon. Tämän kehityksen keskipisteessä olivat Baijeri ja erityisesti München, missä 17-vuotias Heisenberg kävi samaan aikaan läpi

omaa itsenäistymisen murrostaan.

Heisenberg löysi tiensä partioliikkeen pariin. Saksalainen paramilitaristinen partioliike oli ajautunut muutokseen ensimmäisen maailmansodan jälkeen: Pfadfinder-partiojärjestön perustalle syntyi muotoaan etsiviä nuorisoliikkeitä, joiden parissa omaa teini-ikänsä kasvukipuilua elänyt Heisenberg kuunteli herkillä korvalla yhteiskunnan uusien suuntaviivojen taustalla soivien säveliä. On selvää, että tämä aika jätti lähtemättömän jäljen nuorukaiseen ja vaikutti voimakkaasti hänen yhteiskunnalliseen toimintaansa vuosia myöhemmin. Heisenbergin pian alkavassa tieteellisessä toiminnassa nämä kokemukset heijastuivat niin, että vanhan sukupolven rappioituneita ja tappion kärsineitä arvoja edustavat klassisen fysiikan opinkappaleet saatettiin sysätä syrjään. Niiden sijaan itseriittoinen yksilö saattoi luoda omat suuntaviivansa ja johtotähtensä myös luonnon salaisuuksien selvittämiseen.

Heisenberg oli äärimmäisen kilpailuhenkinen ja kunnianhimoinen. Vaikka hän joutui käymään kymnaasikoulunsa hurjan kaaoksen keskellä, tilanteesta oli hänelle todennäköisesti enemmän hyötyä kuin haittaa. Aikalaiskertomusten mukaan Heisenberg oli tahtoihminen, *Willensmensch*. Hän opiskeli itsenäisesti ja oli erityisesti luonnontieteissä ikäluokkaansa paljon edellä ja huomattavasti korkeammalla tasolla kuin mitä koulun vaatimustason puolesta olisi edellytetty.

Partioliike säilyi Heisenbergin elämän oleellisena osana vuosia. Retket nuorisojärjestön joukkueensa kanssa toimivat tärkeänä vastapainona akateemisille ponnisteluille ja tutkimuksen tekemiselle. Yksi mielenkiintoinen historiallinen ympyrä sulkeutui, kun Heisenberg kävi Suomessa syksyllä 1923 partiojoukkueensa kanssa. Heidän oppinaan toimivat hyvin saksan kieltä taitaneet sotilastaustaiset henkilöt, jääkärit, jotka olivat muutamia vuosia aiemmin auttaneet Suomea irtautumaan Venäjän vallan ikeestä. Nämä henkilöt olivat puolestaan saaneet koulutuksensa Saksassa Pfadfinder-järjestön kursilla. Tämän järjestön perustalle uudet nuorisojärjestöt olivat sittemmin rakentuneet Saksassa.

Sommerfeldin instituutti

Heisenberg aloitti opintonsa Münchenin yliopistossa syksyllä 1920. Seitsemän vuotta myöhemmin hänestä tulisi 26-vuotiaana Saksan nuorin professori

Leipzigin yliopistoon. Tämä nopea urakehitys mahdollistui ennen kaikkea Heisenbergin erinomaisen ajoituksen ansiosta. Aivan kuten hän oli saapunut Münchenin kaduille vuonna 1911, hän saapui nyt yliopistolle erinomaisen otolliseen aikaan. Sommerfeldin instituutti oli muodostunut atomifysiikan tutkimuksen keskuksiksi. Niels Bohr oli kehittänyt vuonna 1913 Einsteinin kvanttihypoteesin ja Rutherfordin atomin rakenteeseen liittyvien havaintojen perusteella mallin, joka kuvasi yksinkertaisimpien atomien havaitut spektrit. Sommerfeld oli yhteistyössä Bohrin kanssa kehittänyt mallia edelleen. Ensimmäisen maailmansodan jälkeen spektroskopian mittausten menetelmät olivat kehittyneet ja kokeellisia tuloksia, joiden avulla mallia saatettiin testata entistä paremmin, oli saatavilla runsaasti.

Opintojensa alusta alkaen Heisenbergin ikänsä poikkeukselliset matemaattiset taidot eivät jääneet Sommerfeldiltä huomaamatta. Ensimmäisestä opiskeluvuodestaan lähtien Heisenberg osallistui Sommerfeldin tutkimusryhmän toimintaan ja tutkimusseminaariin. Hän pääsi aitiopai-kalta seuraamaan modernin fysiikan kehitystä sekä kokeellisella että teoreettisella rintamalla. Ennen kaikkea hän pääsi itse osallistumaan ja vaikuttamaan tähän kehitykseen.

Sommerfeld lähti lukuvuodeksi 1922–23 Yhdysvaltoihin ja järjesti Heisenbergin työskentelemään Max Bornin kanssa Göttingeniin, Saksan matematiikan ja matemaattisen fysiikan historialliseen pääkaupunkiin. Born ja Sommerfeld sopivat, että Heisenberg palaisi kesän 1923 jälkeen Müncheniin viimeistelemään väitöskirjansa. Göttingenissä myös Born vakuuttui Heisenbergin taidoista ja toivoi, että tämä palaisi väitöksensä jälkeen Göttingeniin.

Vuosina 1922 ja 1923 Göttingen nousi yhdeksi kvanttimekaniikan kehityksen pääkaupungeista; kaksi muuta olivat München ja Kööpenhamina. Heisenberg jatkoi omaa nousuaan atomifysiikan etulinjaan. Kesään 1923 mennessä Bornin ja Heisenbergin johdolla tutkimusryhmät olivat osoittaneet, että atomifysiikan ymmärryksessä oli jotakin perusteellisesti pielessä. Magneettikentän vaikutusta atomin spektriin ei lainkaan ymmärretty. Heisenberg tosin oli kehittänyt Bohrin mallin tapaisen fenomenologisen mallin, joka onnistui selittämään spektrin käytöksen myös magneettikentässä jakamalla ovelasti atomin elektronin

energiatiloja karakterisoivan kvanttiluvun valenssielektronin ja ytimen välillä. Born kuitenkin julisti kaikki atomifysiikan silloiset mallit toimimattomiksi jopa kaikkein yksinkertaisimpien atomien kuvaamisessa ja totesi ajan olevan nyt kypsä täysin uuden teoreettisen viitekehyksen etsimiselle. Kvanttimekaniikka odotti löytäjänsä. Myöhemmin kehittynyt atomin elektronin spin-vapausasteen kvanttifysikaalinen kuvailu osoitti, että Heisenbergin ajatus valenssielektronien roolista oli täsmälleen oikein, kuten hänen ajatuksensa kvanttilukujen puolittamisesta.

Göttingenin kautta Kööpenhaminaan

Heisenbergin väitöskirjan puolustustilaisuus loppukesästä 1923 oli dramaattinen. Hänen väitöskirjansa ei käsitellyt atomifysiikkaa vaan turbulentin virtauksen matemaattista mallintamista. Vaikka Heisenbergin matemaattinen analyysi perustuikin erilaisiin approksimaatioihin ja oli osin epätäydellinen, työn teoreettista merkitystä pidettiin kiistattomana aiheen haastavuuden perusteella. Heisenbergille myönnettiin lupa osallistua suulliseen tenttiin, jossa hänen tohtorintutkintonsa arvosana määritettäisiin. Sommerfeld, teoreettisen fysiikan oppituolin haltijana, esitti Heisenbergille korkeinta mahdollista arvosanaa 1. Münchenin yliopiston käytänteiden mukaan työ piti hyväksyttää myös kokeellisen fysiikan professorilla, ja tätä oppituo- lia piti hallussaan Wilhelm Wien.

Wien aloitti väitöstilaisuudessa yksinkertaisilla spektrometriä koskevilla kysymyksillä, joihin Heisenberg välittömästi kompastui. Jatkokysymykset ajoivat Heisenbergin yhä syvemmälle vaikeuksiin: nuoruudessaan sähköisten kojeiden näppäränä rakentelijana tunnettu Heisenberg ei pystynyt vastaamaan edes akun toimintaperiaatetta koskevaan kysymykseen, ja Wien esitti koko väitöskirjan hylkäämistä eli alhaisinta arvosanaa 5. Näiden keskiarvona Heisenberg hyväksyttiin, mutta heikolla arvosanalla 3. Muiden jäädessä juhlimaan pettynyt Heisenberg pakkasi laukkunsa ja matkusti iltajunnalla Göttingeniin, jossa kertoi professori Wienille kärsimästään tappiosta Bornille. Tämä ei pitänyt kokeellisen nippelitiedon hallintaa oleellisena ja toisaalta tunsu Heisenbergin kiistattomat teoreettiset taidot ja ansiot. Heisenberg aloitti tohtoritutkijana Bornin instituutissa Göttingenissä.

Tieteen rahoitus oli kiihtyneen inflaation seurauksena äärimmäisen tiukalla. Heisenberg sai rahallista tukea perheeltään, ja Born oli onnistunut hankkimaan lahjoituksia Saksan teollisuudelta sekä Yhdysvalloista Henry Goldmanilta. Bornin ollessa keräämässä lisää rahaa Yhdysvalloissa vuonna 1924, Niels Bohr puolestaan onnistui hankkimaan Rockefeller-säätiöltä rahoituksen, jonka turvin hän saattoi kutsua Heisenbergin Kööpenhaminaan vuodeksi. Born hyväksyi tämän, mutta vaati, että Heisenbergin tuli palata Göttingeniin kesäksi 1925 huolehtimaan opetusvelvollisuudestaan.

Bohr oli Kööpenhaminan yliopiston professori ja tunnettu yhteiskunnallinen vaikuttaja. Hän oli onnistunut vakuuttamaan Carlsbergin säätiön edustajat siitä, että hänen ahdas työhuoneensa yliopistolla kannattaisi korvata itsenäisellä kolmikerroksisella instituutilla. Rakennus nousi silloisen Kööpenhaminan keskustan laitamille, Blegdamsvejn varrelle, jossa se sijaitsee edelleen. Kööpenhaminan yliopiston teoreettisen fysiikan tutkimuslaitos oli otettu käyttöön vuonna 1921, ja Heisenberg saapui instituuttiin syksyllä 1924 luomaan uutta kvanttimekaniikan teoriaa.

Bohrin instituutti oli kvanttivallankumouksen päämaja, jossa kaikki kvanttimekaniikan kehitykseen vaikuttaneet henkilöt viettivät aikaa 1920-luvulla. Ennen Heisenbergia instituutissa vieraili Harvardin yliopiston tutkija John Slater, joka oli Bohrin ja tämän assistentin Hans Kramersin kanssa kehittänyt teoriaa aineen ja säteilyn vuorovaikutukselle. Slater oli keksinyt kuvata ainetta kokoelmana kuvitteellisia harmonisia oskillaattoreita, joiden kanssa säteily vuorovaikuttanut Einsteinin kvanttihypoteesin rajoittamana.

Heisenberg sovelsi tätä ajatusta yhdessä Kramersin kanssa. He onnistuivat selittämään säteilyn sironnan atomista käsittelemällä atomin kokoelmana kuvitteellisia oskillaattoreita. Ne kaikki kontribuoivat sironnavaikutusalaan. Nyt Heisenberg keskitti energiansa kehittämään tämän virtuaalisille oskillaattoreille perustuvan kuvailun täsmälliseksi selitykseksi atomien havaituille spektreille. Heisenberg yhdisti taidokkaan matemaattisen analyysin ja fysikaalisen intuiutionsa sekä oli välittämättä mistään ennako-odotuksista. Heisenberg eteni partiojohtajan täsmällisyydellä.

Ongelma osoittautui kuitenkin äärimmäisen

haastavaksi, mutta Heisenberg ei antanut periksi, vaan muutti lähestymistapaansa muuttamalla ongelmaa. Hän aikoi aluksi ratkaista helpomman ongelman liittyen epäharmoniseen oskillaattoriin. Tämäkin osoittautui äärimmäisen haastavaksi palapeliksi, jonka osat eivät millään tuntuneet asetuvan paikoilleen. Lisäksi työ uhkasi keskeytyä, kun Heisenberg joutui lähtemään Kööpenhaminasta takaisin Göttingenin yliopistoon.

Kvanttimekaniikan synty

Aamu sarasti kauniina Pohjanmeren rannalla Helgolandin lomasaarella eräänä kesäkuun aamuna vuonna 1925. Heisenberg, joka oli paennut Göttingenin heinäpeltojen keskeltä hoitamaan pahaksi äitynyttä allergiaansa meri-ilmaston pariin, oli jatkanut epäharmonisen oskillaattorin kvantiteorian kehittämistä. Tuona aamuna Heisenbergia pitkään vaivanneen ongelman osaset lopulta loksahtivat kohdalleen.

Heisenberg työsti tuloksensa nopeasti tieteelliseksi julkaisuksi ja palattuaan Göttingeniin näytti työtään Bornille, joka lähetti Heisenbergin artikkelin julkaistavaksi *Zeitschrift für Physik* -lehteen (Heisenberg 1925). Heisenbergin paperia pidetään yleisesti äärimmäisen vaikeaselkoisena abstraktin ja matemaattisen lähestymistavan vuoksi. Jokin Heisenbergin tavassa yhdistellä kvanttimekaanisia suureita jäi välittömästi vaivaamaan myös Bornia – aivan kuin hän olisi nähnyt vastaavanlaisia laskuja muussakin yhteydessä. Painokoneiden jo suohtaessa Heisenbergin artikkelin sisältävää lehteä, Born oivalsi, että Heisenbergin käyttämä laskenta oli tunnettua ja hyvin määriteltyä matemaatiikkaa: Heisenbergin kvanttimekaaniset objektit olivat matriiseita. Born ja hänen alaisuudessaan työskentelevä Pascual Jordan työstivät havaintonsa julkaisuksi muutamassa viikossa (Born ja Jordan 1925). Tämän jälkeen he vielä yhdessä Heisenbergin kanssa muotoilivat kvanttimekaniikan perusteet selkeästi matriisien kielelle, ja matriisimekaniikka saavutti lopullisen muotoilunsa (Born, Heisenberg ja Jordan 1925).

Heisenberg oli jo alkuperäisessä tutkimuksessaan huomannut, että kvanttimekaanisissa laskuissa suureiden järjestyksellä on merkitystä. Tämän ominaisuuden tarkempi analysointi johti Heisenbergin täydentämään teoriaa vielä vuonna

1927 löytämällään epätarkkuusperiaatteella (Heisenberg 1927). Sen mukaan klassisesti tarkat suureet ikään kuin sumenevat atomitasolla: mitä tarkemmin paikan määritämme, sitä huonommin tunnemme hiukkasen nopeuden. Tästä epätarkkuusperiaatteesta tuli kvanttimekaniikan kööpenhaminalaisen tulkinnan kulmakivi.

Vuonna 1927 kvanttimekaniikka nykyisessä muodossaan oli valmis. Heisenberg oli 26-vuotias ja hänen tieteellinen retkensä atomin salaisuuksien avaamiseen oli edennyt samanlaisella tehokkuudella kuin partioretket. Retki oli ollut Heisenbergille suuri seikkailu, mutta hän tuskin aavisti, että suurimmat seikkailut olivat vielä edessäpäin.

Kirjallisuutta

- Berends, F., Lambert, F. Einstein's witches' sabbath: the first Solvay council on physics. *Europhysics News* 42, 5 (2011), 15–17.
- Born, M., Heisenberg, W., Jordan, P. Zur Quantenmechanik. *Z. Phys* 35 (1926), 557–615.
- Born, M., Jordan, P. Zur Quantenmechanik. *Z. Phys.* 34 (1925), 858–888.
- Cassidy, D. C. *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*. W. H. Freeman (1993).
- Heisenberg, W. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. Harper and Row (1971).
- Heisenberg, W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Z. Phys.* 43 (1927), 172–198.
- Heisenberg, W. Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Z. Phys.* 33 (1925), 879–893.

Kirjoittaja on Helsingin yliopiston teoreettisen fysiikan yliopistonlehtori.