

Atomin rakenteen historiaa

Kandidaatintutkielma

Tekijä: Arttu Paavola

Helsingin yliopisto

Matemaattisluonnontieteellinen tiedekunta

Kemian laitos

Kemian opettajankoulutusyksikkö

pvm: 12. 1. 2018

Ohjaajat: Maija Aksela ja Johannes Pernaa

Sisällys

Tiivistelmä.....	1
1. JOHDANTO.....	2
2. FILOSOFINEN ATOMISMI.....	3
2.1 KREIKKALAINEN ATOMISMI.....	3
2.2 INTIALAINEN ATOMISMI.....	4
2.3 ISLAMISTINEN ATOMISMI.....	5
3. KOHTI HAVAINTOPOHJAISTA ATOMITEORIAA.....	6
3.1 DALTONIN ATOMITEORIA.....	6
3.2 BROWNIIN LIIKE.....	8
3.3 ELEKTRONIN HAVAITSEMINEN JA RUSINAPULLAMALLI.....	9
3.4 ATOMIYTIMEN HAVAITSEMINEN JA RUTHERFORDIN MALLI.....	10
3.5 ISOTOoppien havaitseminen.....	12
3.6 BOHRIN ATOMIMALLI.....	14
3.7 ELEKTRONIKUORET JA ORBITAALIT.....	14
3.8 NEUTRONIN HAVAITSEMINEN.....	15
3.9 FISSIO JA NYKYPÄIVÄ.....	15
4. BOHRIN ATOMIMALLI TARKEMMIN.....	16
4.1 BOHRIN ATOMIMALLIN TEOREETTINEN TAUSTA.....	16
4.2 BOHRIN ATOMIMALLI.....	16
4.3 BOHRIN ATOMIMALLI PUUTTEET.....	18
5. Yhteenveto: Atomimallin kehittymisen aikajana.....	19
6. POHDINTA.....	20
LÄHTEET.....	21

Tiivistelmä

Tutkielman ensimmäisenä tarkoituksena on selvittää atomimallien kehitys läpi historian eri lähteiden näkökulmasta. Tutkielman toisena tarkoituksena on rakentaa koherentti aikajana, jossa korostuvat uudet atomimallit ja niiden kehitykseen tai hylkäykseen johtaneet ongelmakohdat.

Tutkielman aineisto koostuu suurimmalta osin atomin rakenteen tutkimuksen kannalta merkittävien tutkijoiden alkuperäisistä teoksista ja artikkeleista, joissa heidän havainnot julkaistiin ensimmäisen kerran. Lisäksi aineistoon kuuluu muutamia antiikin sivilisaation luonnontieteiden historiaa kuvaavia artikkeleja ja kirjoja.

Atomin rakenteen historian merkittävimiksi käännekohtiksi osoittautuivat eri luonnonfilosofien, fyysikoiden ja kemistien atomimallit. Merkittävimpiä atomimalleja olivat muun muassa Daltonin, Rutherfordin ja Bohrin atomimallit. Aineiston pohjalta muodostettiin aikajana.

1. JOHDANTO

Atomi eli jakautumaton käsitettiin pitkään olevan universumin pienin rakennuskappale. Kemiassa atomi on käsitteenä yksi keskeisimmistä, sillä sen syväallinen hallinta on vaatimuksena monen muun kemiallisen ilmiön tai ominaisuuden selittämiseksi. Esimerkiksi aineen rakennetta ja kemiallisia sidoksia on liki mahdotonta selittää ilman, että ensiksi tiedetään mitä atomit ovat ja mistä ne koostuvat. Aineen luonne ja siten myös atomien olemassaolo, on jo antiikin ajoista lähtien kiinnostanut ihmiskuntaa.¹ Aihetta tutkitaan aktiivisesti edelleenkin, vaikkakin fokus on siirtynyt atomitasoa syvemmälle tutkimaan subatomisia hiukkasia. Merkittävimpiä nykytutkimuksen kohteista on muun muassa painovoiman välittäjä hiukkaseksi ehdotettu gravitoni, joiden tutkimiseksi NASA:lla on käynnissä LISA-niminen hanke.³⁴

Kemian historia ja kemian filosofia ovat olleet viime vuosikymmenien ajan myös yksi kemian opetuksen tutkimuksen kohteena.³⁵

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää, miten atomimallit ovat kehittyneet läpi historian. Kehitystä tarkastellaan erilaisten atomimallien kautta. Atomin historiaa käsittelevän kirjallisuuskatsauksen avulla pyritään rakentamaan atomiymmärryksen kehittymisestä koherentti aikajana, jossa korostuvat uudet atomimallit ja niiden kehitykseen tai hylkäykseen johtaneet ongelmakohdat. Uusin kvanttimekaaninen malli on rajattu tutkielmasta pois, koska tutkielma keskittyy tarkastelemaan menneisyyden atomimalleja.

Tutkielmassa analysoidaan ihmiskunnan käsityksen kehittymistä atomin rakenteesta läpi historian aina antiikin kulttuurien filosofisesta atomismista (luku 2) moderniin kvanttifysiiseen malliin saakka (luku 3). Kirjallisuuskatsauksen lopussa tarkastellaan yksityiskohtaisesti Bohrin atomimallia, sillä sitä käytetään kouluissa atomin perusasioiden opetteluun ennen kuin siirrytään tarkempiin ja monimutkaisempiin malleihin (luku 4).

Siirrytään seuraavaksi tarkastelemaan, miten atomi-käsite syntyi antiikin Kreikassa.

2. FILOSOFINEN ATOMISMI

Tässä luvussa esitetään atomi-käsitteen syntyhistoria ja tarkastellaan, millaisia näkökulmia erilaiset filosofiset suuntaukset ovat atomimalliin esittäneet. Tarkasteluun on sisällytetty kreikkalaisen, intialaisen ja islamistisen filosofian näkemykset atomin rakenteesta.

2.1 KREIKKALAINEN ATOMISMI

Kreikkalainen atomismi sai alkunsa n. 500 eaa. Kreikkalaista atomismia tutkineen A. G. Melsenin mukaan aihetta on pohtinut ensimmäisenä kreikkalainen filosofi Parmenides, joka esitti ontologisen argumenttinsa tyhjiön olemassaoloa vastaan. Parmenideksen pohdinta johti hänet siihen tulokseen, että muutos on mahdotonta ja kaikki näennäinen muutos on vain illuusiota. Lisäksi Parmenides päätyi siihen tulokseen, että myös kaikki todellisuuden monimuotoisuus on illuusiota ja oleminen on pohjimmiltaan yhtenäistä, yksittäistä, jakautumatonta ja muuttumatonta.¹

Atomiajattelun syntymistä on dokumentoinut myös filosofi Aristotele. Aristotele totesi teoksessa *Fysiikka*, että Parmenideksen ontologinen argumentti johti Democrituksen ja muut luonnonfilosofit muodostamaan omat teoriansa,² jotka nykypäivänä tunnetaan ensimmäisinä atomiteorioina. Democrituksen atomiteorian ensimmäisenä tehtävänä oli osoittaa, että muutos on mahdollista, sillä samalla kun Parmenideksen argumentti kielsi muutoksen mahdollisuuden, hän vei myös pohjan luonnontieteiltä. Luonnonfilosofien tekemät päätelmät todellisuuden luonteesta nojasivat pitkälti kokonaan heidän tekemiin havaintoihin, eli niihin muutoksiin joita Parmenides kutsui illuusioiksi. Democrituksen ehdotti, että sen sijaan että todellisuus olisi yksittäistä ja jakamatonta, todellisuus muodostuisi useista kappaleista, jotka itsessään ovat jakautumattomia ja yksittäisiä. Näitä kappaleita hän nimitti nimellä atomos eli atomi.¹

Käännetty Melsenin teoksesta *From Atomos to Atom (1960)*:

”Democrituksen atomihypoteesi kuului seuraavasti:

1) Atomeja on loputon määrä ja ne eroavat toisistaan vain koossaan. Kaikki asioiden välillä havaittavat erot johtuvat atomien koosta ja sijainnista. Muutokset johtuvat atomien liikkumisesta.

2) Atomit ovat ikuisessa liikkeessä ja tätä liikettä voi muuttaa paineella tai iskulla.”¹

Democrituksen hypoteesi oli yllättävän lähellä nykyistä käsitettä ottaen huomioon, että hänellä ei ollut kokeellisia menetelmiä, joilla hän olisi voinut todentaa atomien olemassa oloa. Democrituksen atomiteoria ei kuitenkaan saanut yhtä laajaa hyväksyntää luonnonfilosofien joukossa, kuin sen ajan tieteellisen auktoriteetin, Aristoteleen, esittämä viiden elementin teoria. Aristoteles argumentoi, että kaikki aines muodostuu viidestä eri jatkuvasta elementistä, jotka olivat: maa, vesi, ilma, tuli ja eetteri.² Aristoteles kritisoi Democrituksen atomiteoriaa muun muassa osoittamalla, että Democritus ei pystynyt selittämään miksi atomit liikkuvat tai miksi atomia ei pystytä näkemään, vaikka ne ovat jakautumattomia.³ Siirtyminen Aristoteleen viiden elementin teoriaan pysäytti atomiteorian kehittymisen vuosisadoiksi.

Antiikin kreikan luonnonfilosofian tutkijan ja tietokirjailija Berrymanin mukaan Atomismi nousi hetkeksi pinnalle hellenistisellä aikakaudella (noin 300 eaa.), kun filosofi Epicurus perusti atomismin koulukunnan Ateenaan. Epicurus teki merkittäviä muutoksia Democrituksen atomiteoriaan muun muassa väittämällä, että atomit eivät ole täysin yhtenäisiä, vaan että niillä on konseptuaalisia osia. Konseptuaalisilla osilla Epicurus tarkoitti, että vaikka atomit ovat jakautumattomia ne myös muodostuvat toisistaan erilaisista osista, joiden määrä on rajattu. Epicurus myös väitti, että atomien liike on alaspäin suuntautuvaa ja että atomit välillä poikkeavat suorasta liikkeestä ja törmäävät toisiinsa.³

2.2 INTIALAINEN ATOMISMI

Intialaisen atomismin sai alkunsa, kun intialainen filosofi Kanada perusti Vaisesika filosofian koulukunnan.⁴ Varmaa tietoa siitä milloin Kanada eli ei ole mutta historialliset tietolähteet asettavat hänen elinaikansa vuosien 600–300 eaa. välille.⁵

Kanadan mukaan aineen jaettavuudella oli raja, josta hän käytti nimeä *anu*. Hän myös väitti, että atomit voisivat yhdistyä toisiinsa muodostaakseen uutta ainesta.⁴ Kanadan ja Democrituksen teorioiden keskipisteenä oli äärimmäisen pieni jakautumaton kappale, eli atomi.

Intialaista atomismia on tutkinut mm. Ramasesha. Hänen arvion mukaan intialainen atomismi ei ole edennyt Kanadan filosofiaa pidemmälle sen vuoksi, että hindu tiedeyhteisön kiinnostus siirtyi aineen luonteesta ja sitä ympäröivästä tieteestä hengellisyyteen.⁴

2.3 ISLAMISTINEN ATOMISMI

Islamistinen atomismi, jota kutsuttiin nimellä *Kalam*, kehittyi aikaisen islamistisen filosofian aikakaudella (900–1100 jaa.). Atomismi sai alkunsa, kun teologit pohtivat äärettömyyttä. He tulivat siihen tulokseen, että aine ei voi olla jatkuvaa vaan sen täytyy muodostua diskreeteistä osista, jotka ovat jakautumattomia. Jos aines olisi jatkuvaa sen täytyisi olla loppumattomasti jaettavista ja täten koostua äärettömän monesta osasta, minkä teologit kokivat absurdina ajatuksena.⁶ Historioitsija M. E. Marmuran mukaan islamistinen atomismi sai paljon vaikutteita kreikkalaisten filosofien atomismista ja ehkä myös intialaisesta atomismista.⁷

Seuraavaksi siirrytään tarkastelemaan ensimmäisiä havaintopohjaisia atomiteorioita.

3. KOHTI HAVAINTOPOHJAISTA ATOMITEORIAA

Tässä luvussa siirrytään tarkastelemaan havaintopohjaisten atomimallien kehitystä. Tarkastelu aloitetaan Daltonin atomiteoriasta kronologisessa järjestyksessä edeten kohti modernia käsitystä atomien rakenteesta. Luvussa käsitellään myös muutamia atomin rakenteen ymmärtämiseksi tärkeitä havaintoja kuten Brownin liikettä.

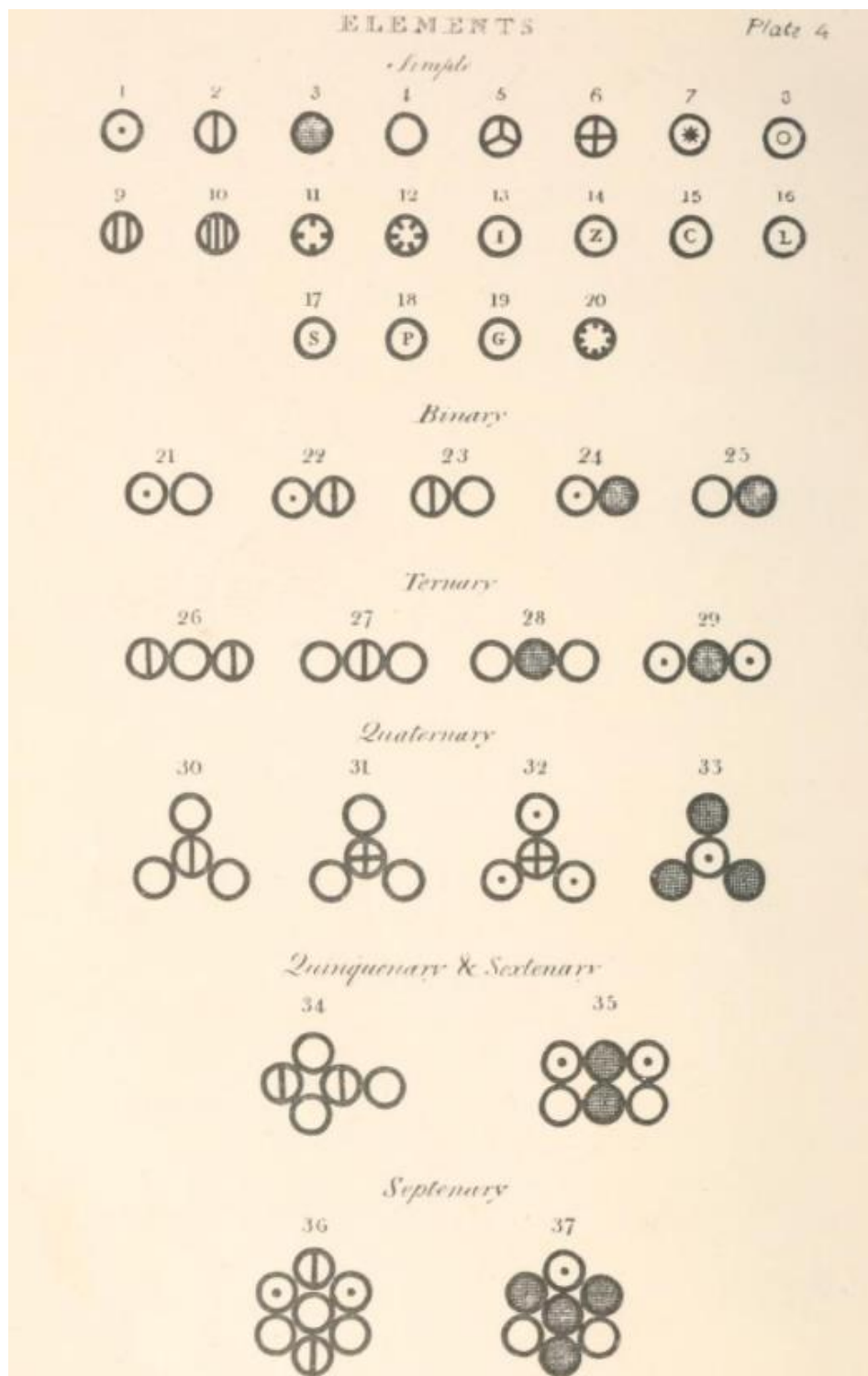
3.1 DALTONIN ATOMITEORIA

Ensimmäinen havaintoihin ja dataan perustuvan atomiteorian esitteli englantilainen kemisti John Dalton 1800-luvun alussa. Dalton havaitsi, että tietyt aineet reagoivat toistensa kanssa tietyissä suhteissa. Hän havaitsi muun muassa, että vety ja happi reagoivat keskenään massasuhteessa 1:8.¹ Tätä havaintoa kutsutaan nimellä: ”Dalton’s law of multiple proportions” eli Daltonin monien suhteiden laki.

Atomiteoriaan Dalton päätyi, kun hän havaitsi että 100 grammaa tinaa reagoi aina joko 13,5 tai 27 gramman happimäärän kanssa. Dalton päätteli havainnoistaan, että ensimmäisessä tapauksessa yksi tina-atomi reagoi yhden happiatomin kanssa ja toisessa tapauksessa yksi tina-atomi reagoi kahden happiatomin kanssa.⁸

Kirjassaan *A New System of Chemical Philosophy* Dalton esitteli ehdotuksiaan siitä miltä, yksiatomiset, kaksiatomiset ja suurempilukuiset yhdisteet voisivat näyttää (kuva 1).⁹

Havaintojensa pohjalta Dalton muodosti uuden atomiteorian, jonka mukaan: kaikki aines muodostuu atomeista, saman alkuaineen atomeilla on sama koko ja massa, atomeja ei voi luoda eikä tuhota, kaikki kemialliset reaktiot ovat atomien yhdistymistä, irtoamista tai uudelleen järjestymistä ja atomit yhdistyvät toisiinsa tietyissä suhteissa näin muodostaen kemiallisia yhdisteitä.⁸



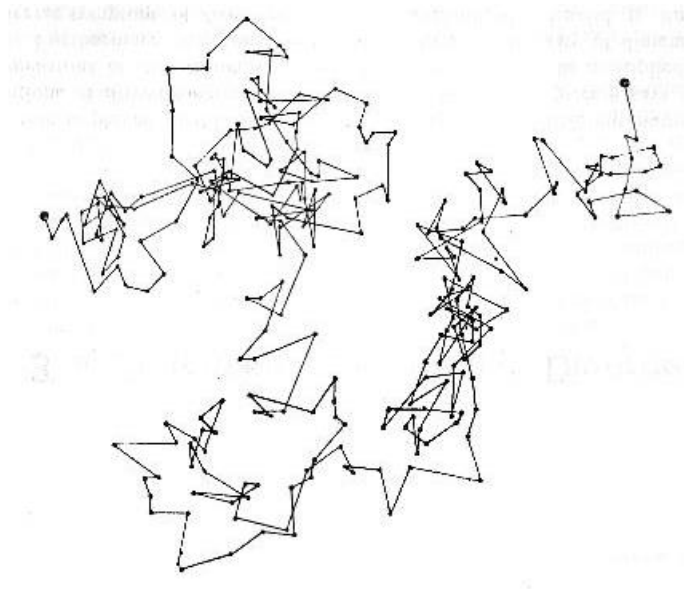
Kuva 1: Luonnoksia atomeista Daltonin kirjasta A new system of chemical philosophy⁹.

Vaikka Daltonin atomiteoria oli yksi aikansa suurimmista tieteellisistä läpimurroista, sen alkuperää ja aikaisempaa teoreettista pohjaa ei tunneta tarkasti.¹⁰ Teoria sisälsi myös useita virhekäsityksiä. Myöhemmin esimerkiksi osoittautuisi, että atomit eivät ole jakautumattomia vaan ne muodostuivat protoneista, elektroneista ja neutroneista. Saman alkuaineen atomien massa ei myöskään isotooppien olemassa olon takia ollut vakio.^{20,23}

3.2 BROWNIN LIIKE

Vuonna 1827 skotlantilainen kasvitieteilijä Robert Brown tutkiessaan erään kasvilajin hedelmöittymisprosessia havaitsi, että kyseisen kasvin siitepölyhiukkaset liikkuvat oudosti veden pinnalla. Liike muistutti satunnaista oskillaatiota (kuva 2). Brown ensin luuli liikkeen olevan ominaista kyseisillä siitepölyhiukkasille, mutta myöhemmin havaitsi, että myös epäorgaaninen aine käyttäytyi samalla tavalla veden pinnalla. Liikettä yritettiin ensin selittää lämpökonvektiovirtojen avulla mutta selitys hylättiin, kun vuonna 1865 suoritettussa kokeessa suspensio seos lasitettiin vuodeksi, ja Brownin liike oli havaittavissa silti.¹¹

Vuonna 1905 Albert Einstein todisti, että Brownin liike johtui vesimolekyylien törmäyksistä hiukkasiin veden päällä, hyödyntämällä statistista mekaniikkaa.¹¹ Samalla Einstein myös todisti, että atomeja todellakin on olemassa.

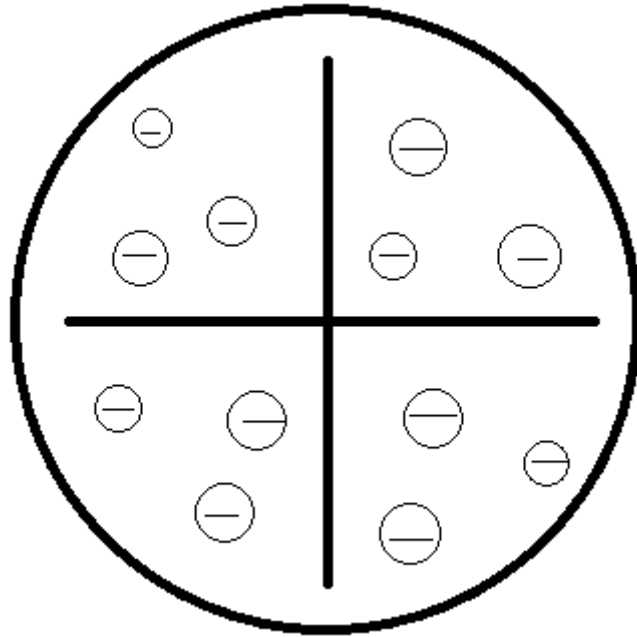


Kuva 2: Esimerkki yhden hiukkasen Brownin liikkeestä¹².

3.3 ELEKTRONIN HAVAITSEMINEN JA RUSINAPULLAMALLI

Vuonna 1897 englantilainen fyysikko Joseph John Thomson mittasi katodisäteiden painoa ja havaitsi että negatiivista varausta kantavien hiukkasten paino oli noin tuhannesosa siitä, mikä niiden painon tulisi olla, jos varauksen kantaja olisi vetyatomi. Thomson havaitsi myös, että toisin kuin negatiivisten hiukkasten kohdalla, positiivisten varaustenkantajien massa oli aina samaa suuruusluokkaa, kuin kaasu josta positiivinen varauksenkantaja tuotettiin. Näiden kahden havainnon pohjalta Thomson päätteli, että negatiivisten hiukkasten, joita nykypäivänä kutsutaan elektroneiksi, on pakko olla osa kaasuatomien ja -molekyyliden rakennetta ja todennäköisesti myös kiinteiden ja nestemäisten aineiden atomien ja molekyyliden. Vuonna 1901 Thomson julkisti havaintonsa atomia pienemmästä hiukkasesta eli elektronista, josta hän käytti nimeä corpusculum.¹³

Vuonna 1904 Thomson esitteli atomimallin, joka nykypäivänä tunnetaan nimellä rusinapulla- tai rusinakakkumallina. Rusinapullamallissa (kuva 3) atomin negatiivisesti varautuneet elektronit ovat kuin satunnaisesti aseteltuja rusinoita niitä ympäröivässä positiivisesti varautuneessa pullataikinassa.¹⁴



Kuva 3: Esimerkki rusinapullamallin atomista.

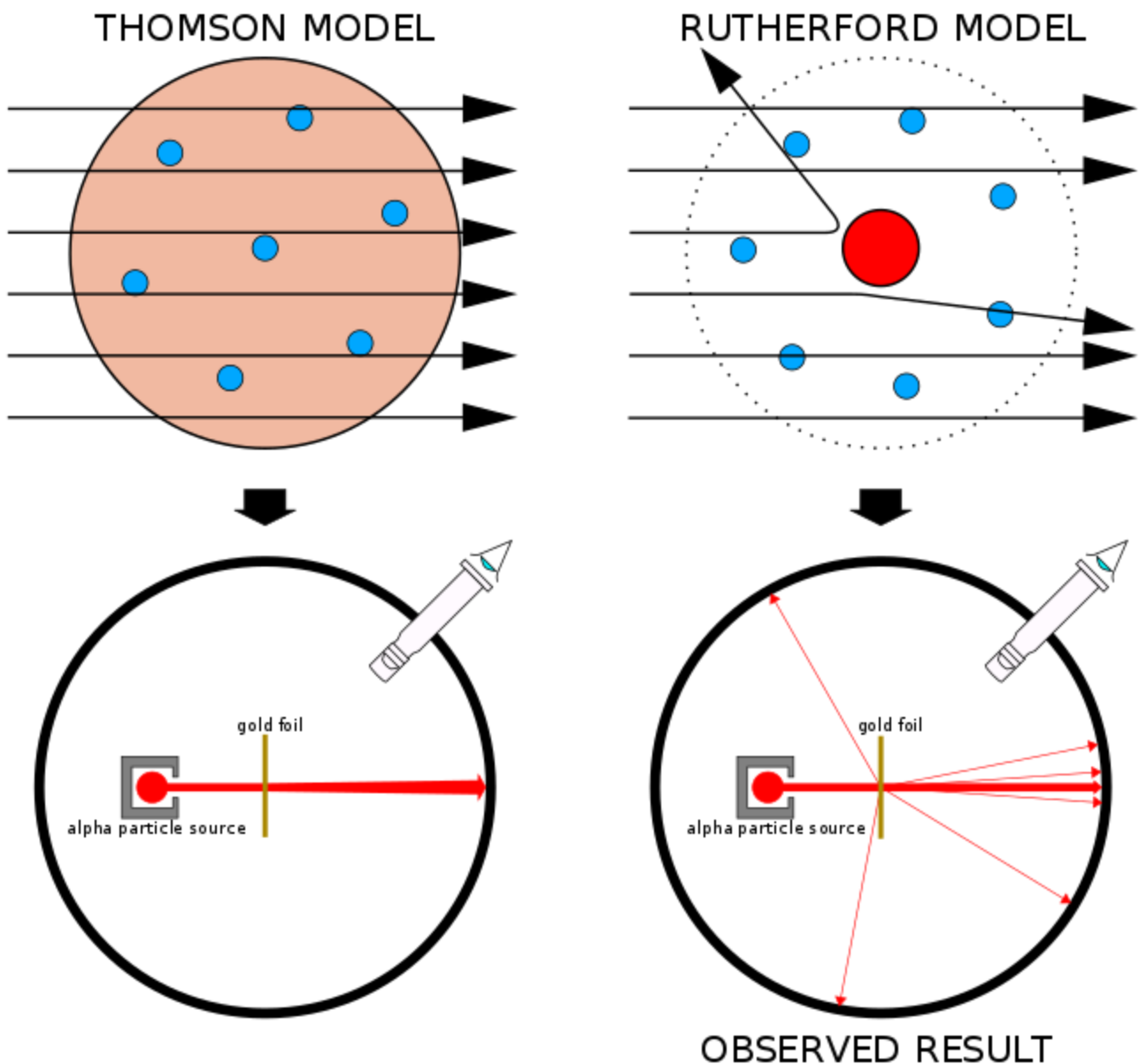
3.4 ATOMIYTIMEN HAVAITSEMINEN JA RUTHERFORDIN MALLI

Thompsonin rusinapulla malli oli ensimmäinen atomimalli, joka käsitti elektronit osana atomin rakennetta. Koska vuonna 1904 atomiydintä ei vielä oltu havaittu, atomimallissa oli ongelma. Kokeellisen datan pohjalta tiedettiin, että atomit ovat neutraaleja, joten atomeissa piti olla jokin positiivinen osa negatiivisten elektronien lisäksi.

Vuonna 1909 brittiffyysikko Ernest Rutherfordin ohjeistuksesta fyysikot Hans Geiger ja Ernest Marsden pommittivat ohutta metallikalvoa alfahiukkasilla. Koska Thompsonin rusinapullamalli oli vallitseva teoria, Geiger ja Marsden olettivat, että metallikalvon läpäisyllä ei olisi merkittävää vaikutusta alfahiukkasten liikeratoihin. Geiger ja Marsden kuitenkin havaitsivat, että alfahiukkasten liikerata muuttui ajoittain merkittävästi (kuva 4). Välillä alfahiukkas kulkivat metallikalvon lävitse ilman merkittävää muutosta liikeratoihin, kun taas toisinaan alfahiukkasten heijastuskulmat olivat yli 90 astetta. Geiger ja Marsden havaitsivat myös, että mitä korkeampi metallikalvon atomien atomimassa oli, sitä useammin alfahiukkasten liikeradoissa havaittiin merkittävää taittumista.¹⁵

Vuonna 1911 Geigerin ja Marsdenin havaintoihin pohjautuen Rutherford esitteli oman teoriansa atomin rakenteesta. Rutherford yritti selittää metallikalvokokeessa havaittua suuresti vaihtelevaa heijastuskulmaa sillä, että toisin kuin rusinapullamallissa, atomit olisivat suurimmaksi osaksi tyhjää tilaa ja varaus, joka luultiin jakautuneen tasaisesti läpi atomin tilavuuden, on keskittynyt atomin keskelle. Rutherford ei kuitenkaan ollut varma oliko kyseinen varaus positiivinen vai negatiivinen.¹⁶

Geigerin, Marsdenin ja Rutherfordin havainnot siirsivät Thompsonin rusinapullamallin syrjään ja uuden atomimalli, jossa positiivinen varaus on keskittynyt atomin keskustaan ja negatiivinen varaus sen ympärille, nousi yleisesti hyväksytyksi teoriaksi. Atomimalli nimettiin Rutherfordin atomimalliksi.



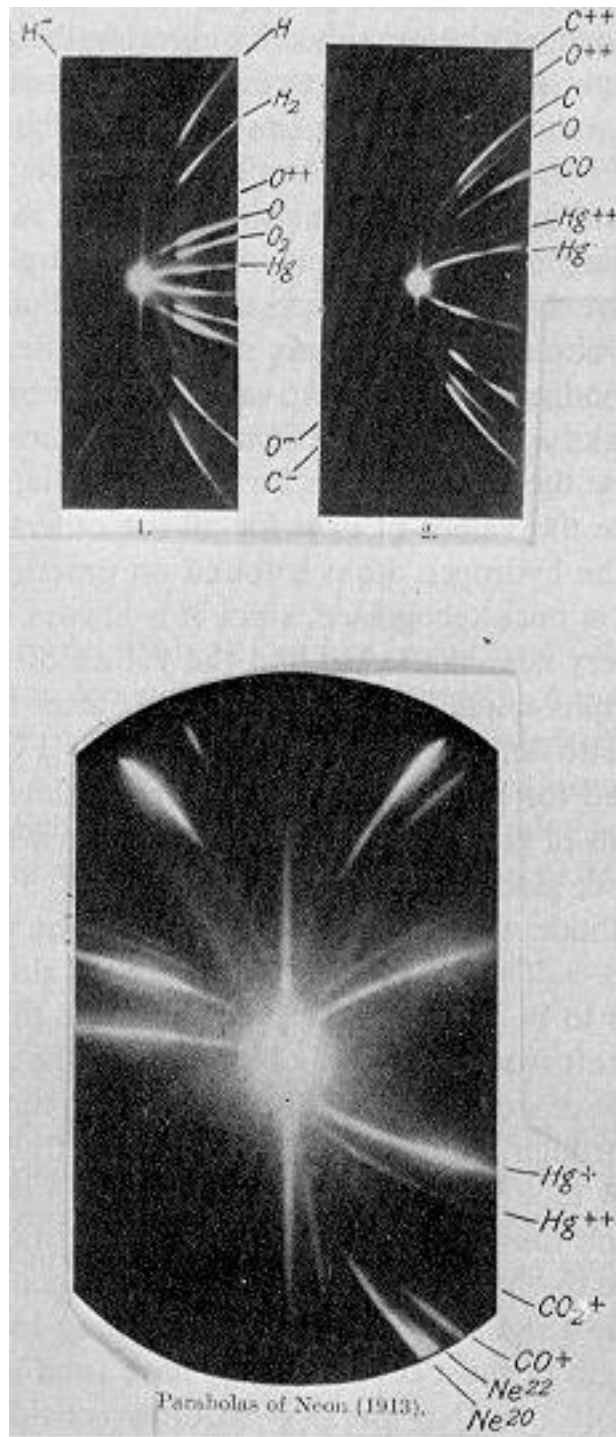
Kuva 4: Geigerin ja Marsdenin hypoteesi ja havainnot (yllä) ja karkea koejärjestely (alla)¹⁷.

Rutherfordin atomimallin hyödyntämisessä selittämään atomien ominaisuuksia oli ongelmia. Kiihtyvät negatiiviset varaukset emittoivat jatkuvasti sähkömagneettista säteilyä, ja energiansäilymlain mukaan elektronien täytyisi siis menettää koko ajan energiaa liikkeessaan. Energian menettäminen johtaisi nopeasti siihen, että elektronit hidastuisivat ja lopulta törmäisivät atomin ytimeen sähkömagneettisen vetovoiman takia.¹⁸ Rutherfordin atomimalli ei myöskään pystynyt selittämään miksi atomit emittoivat ja absorboivat sähkömagneettista säteilyä tietyillä diskreeteillä aallonpituuksilla.³¹

3.5 ISOTOoppiEN HAVAITSEMINEN

Vuoteen 1910 mennessä kemistit olivat havainneet, että vaikka uraanin ja lyijyn välissä oli jaksollisessa järjestelmässä tilaa vain 11 eri alkuaineelle. Kemistit olivat kuitenkin pystyneet tunnistamaan 40 erilaista atomia, joiden ominaisuudet asettaisivat ne uraanin ja lyijyn välille jaksollisessa järjestelmässä. Kemistejä askarrutti myös se, että usein näiden atomien erottaminen toisistaan oli mahdotonta kemiallisilla menetelmillä. Vuonna 1913 englantilainen kemisti Frederick Soddy esitti ratkaisun ongelmaan. Hän havaitsi, että kun aine alfahajoaa, eli emittoi alfahiukkasen, jäljelle jäävän atomin ominaisuudet ovat samat kuin atomilla, joka on lähtöatomista kaksi askelta vasemmalle jaksollisessa järjestelmässä. Soddy ehdotti, että radioaktiivisia alkuaineita joilla on sama kemiallinen identiteetti, kutsuttaisiin nimellä isotooppi.¹⁹

Myöhemmin vuonna 1913 Thompson todisti isotooppien olemassa olon. Thompson suihkutti positiivisesti varautuneita kaasuioneja sähkökentän läpi, joka muutti ionien liikerataa riippuen niiden massasta ja sähkövarauksesta. Thompson johdatti suihkun lasinegatiiville, josta hän pystyi tarkkailemaan ionien suhteellista määrää vertailemalla lasinegatiivilla tapahtuvaa tummenemista, joka johtui ionien osumisesta lasinegatiiviin (kuva 5). Hän havaitsi, että neon kaasu, jonka aikaisemmin luultiin koostuvan täysin samanlaisista atomeista, koostui kahdesta eri massaisesta atomista eri isotoopista. Thompson määrittä näiden kahden isotoopin massaluvuiksi 20 ja 22 ja niiden lukumääräsuhteeksi 9:1.²⁰



Kuva 5: Lasinegatiiveja Thompsonin kokeista²¹.

3.6 BOHRIN ATOMIMALLI

Vuonna 1913 tanskalainen fyysikko Niels Bohr esitti korjauksia Rutherfordin atomimallin ongelmiin. Tämä uusi atomimalli, jossa elektronit ovat sijoittuneet stabiileille radoille ja pystyvät siirtymään radalta toiselle kvanttihyppyn avulla, tultiin tuntemaan Bohrin atomimallina.³³

3.7 ELEKTRONIKUORET JA ORBITAALIT

Vuonna 1918 amerikkalainen kemisti Irwing Langmuir, yritti selittää, miksi jaksollisessa järjestelmässä samojen ryhmien atomeilla on samankaltaiset kemialliset ominaisuudet. Langmuir ehdotti, että atomien elektronit ovat sitoutuneet pallomaisiin, eli planetaariisiin, kuoriin atomin ympärille, jotka jakautuvat vielä 1-2 elektronia omaaviin soluihin. Kuorissa olevien solujen määrä kasvaa mitä kauempana kyseinen kuori on atomin ytimeistä. Kuoret täyttyvät systemaattisesti ydintä lähimmästä kuoresta ulospäin.²²

Elektronikuorien planetaarisista radoista siirryttiin orbitaaliratoihin, kun Heisenbergin epätarkkuusperiaatteeseen nojautuva kvanttimekaaninen atomimalli pystyi paremmin selittämään atomien elektronien liikettä. Mallissa elektronit asettuivat todennäköisyysjakauman mukaisille orbitaaleille, joiden muodon määrittää elektronin energia, pyörimismäärä ja magneettinen kvanttiluku.

3.8 NEUTRONIN HAVAITSEMINEN

Vuonna 1931 Walter Bothe ja Herbert Becker havaitsivat, että kun poloniumin alfasäteilyllä pommitettiin muun muassa litiumia, tuloksena syntyi säteilyä, jonka liikeratoihin ei pystytty vaikuttamaan sähkökentillä, ja jonka aineenläpäisykyky oli merkittävä. Seuraavan vuonna Irène Joliot-Curie ja Frédéric Joliot johtivat Bothen ja Beckerin havaitsemaa säteilyä parafiiniin ja huomasivat, että säteilyn törmätessä parafiiniin parafiinistä irtosi vety-ytimiä, eli protoneja. Perustuen Walter Bothen, Herbert Beckerin, Irène Joliot-Curien ja Frédéric Joliotin kokeisiin englantilainen fyysikko James Chadwick, esitti selityksen isotooppien olemassa oloon. Chadwick ehdotti, että atomit sisältäisivät elektronin ja protonin lisäksi vielä kolmannen hiukkasen. Chadwickin mukaan hiukkanen oli massaltaan sama, kuin protoni, koska se pystyi irrottamaan vety-ytimiä parafiinista, ja varaukseton, koska sen liikerataa ei pystytty muuttamaan sähkömagneettisilla kentillä. Nämä hiukkaset nimettiin neutroneiksi.²³

3.9 FISSIO JA NYKYPÄIVÄ

Joulukuussa vuonna 1938 saksalainen radiokemisti Otto Hahn pommitti uraaniytimiä neutronisäteilyllä, siinä toivossa, että koe tuottaisi urania raskaampia alkuaineita. Hahn kuitenkin havaitsi, että tuotteena syntyikin bariumia, eli atomi ydin jonka massa oli noin puolet alkuperäisen uraaniytimen massasta.²⁴ Pian Hahnin kokeiden jälkeen helmikuussa vuonna 1939 Lisa Meitner ja Otto Frisch varmistivat Hahnin tulokset ensimmäisenä kirjattuna todisteena atomin fissiona.²⁵

4. BOHRIN ATOMIMALLI TARKEMMIN

Tässä luvussa tarkastellaan Bohrin atomimallia tarkemmin. Tarkastelu keskittyy mallin teoriaan, teoreettiseen taustaan ja mallin puutteisiin.

4.1 BOHRIN ATOMIMALLIN TEOREETTINEN TAUSTA

Vuonna 1913 Rutherfordin atomimalli oli hallitseva teoria selittämään atomin rakennetta. Rutherfordin atomimallissa atomin varaus on keskittynyt atomin keskelle ja elektronit pyörivät ympäri atomia. Suurin osa atomin tilavuudesta oli tyhjää tilaa elektronien ja ytimen välissä.¹⁸ Rutherfordin atomimallin suurin ongelma oli se, että sen mukaan mikään atomi ei olisi stabiili. Larmor-yhtälön mukaan, mikä tahansa kiihtyvä tai hidastuva varaus emittoi sähkömagneettista säteilyä. Täten Rutherfordin atomimallin elektronien täytyisi jatkuvasti emittoida sähkömagneettista säteilyä, joka johtaisi niiden jatkuvaan hidastumiseen ja lopulta törmäämiseen ytimen kanssa.²⁷

4.2 BOHRIN ATOMIMALLI

Vuonna 1913 tanskalainen kemisti Niels Bohr esitti ehdotuksensa Rutherfordin atomimallin ongelmien ratkaisuun. Bohrin ensimmäisen postulaatin mukaan elektronit kiertävät atomin ydintä tietyillä radoilla, joita hän kutsui ”stationaarisiksi tiloiksi”. Elektronit pystyvät sijaitsemaan vain näillä tietyillä radoilla ja jokainen muutos tarkoittaisi täydellistä siirtymistä tilalta toiselle, tätä siirtymistä kutsuttiin nimellä: ”kvanttihyppy”. Bohrin toisen postulaatin mukaan samalla kun elektroni siirtyy stationaariselta tilalta toiselle se, joko absorboi tai emittoi sähkömagneettista säteilyä, jonka energia vastaa kahden tilan energia eroa.²⁸ Emittoidun tai absorboidun sähkömagneettisen säteilyn taajuus vastaa yhtälöä:

$$hf = E' - E''$$

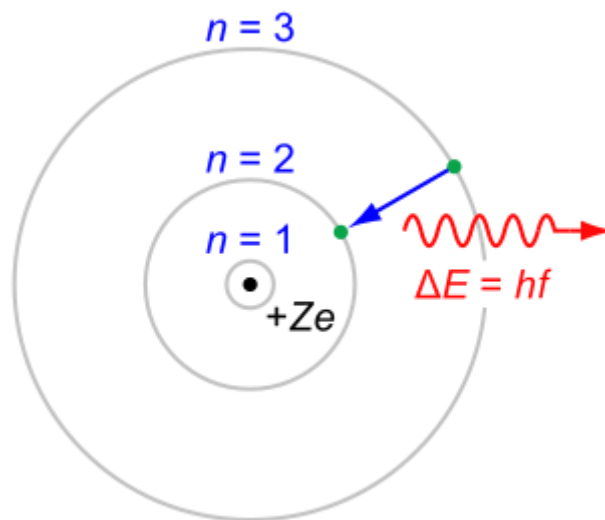
Jossa f on taajuus, h Planckin vakio ja E tilan energia.

Bohrin mukaan kulmaliikemäärä on kvantittunut ja totelee yhtälöä:

$$L = n \frac{h}{2\pi}$$

Jossa L on kulmaliikemäärä, n on elektronin pääkvanttiluku ja h Planckin vakio. Yhtälön avulla pystyttiin laskemaan elektronin pienin mahdollinen kiertorata vety-ytimen ympäri, jota kutsutaan Bohrin säteeksi. Bohrin säde on 0,0529 nm.

Bohrin mukaan ensimmäinen postulaatti piti silmällä atomin stabiiliutta, kun taas toinen postulaatin tarkoitus oli selittää atomeille tyypillisten emissio- ja absorptiospektrien olemassa oloa.²⁸ Bohrin postulaattien mukaista atomimallia alettiin myöhemmin kutsua Bohrin atomimalliksi (Kuva 6)



Kuva 6: Esimerkki Bohrin atomimallista ja mahdollisesta emissiosta kolmannelta kuorelta toiselle²⁹

Vuonna 1923 Bohr ehdotti, että atomien jaksollisen järjestelmässä esiintyvää atomien ominaisuuksien jaksollisuutta voitaisiin selittää atomin elektronirakenteen avulla. Bohr mukaan jokaiselle elektroniradalle mahtuu vain tietty määrä elektroneja, jonka täytyttyä elektronit alkavat täyttää seuraavaa ytimeistä kauempana sijaitsevaa rataa. Tämä aiheuttaisi atomeille kuorimaisen rakenteen.

4.3 BOHRIN ATOMIMALLI PUUTTEET

Bohrin atomimalli sisälsi useita puutteita. Koska malli pohjautui laajalti vetyatomin rakenteeseen, sen avulla ei pystytty tekemään johtopäätöksiä raskaampien atomien emissiospektristä, koska malli ei ottanut huomioon useampien kuin yhden elektronin läsnäoloa. Malli ei ottanut huomioon sitä, että alemmilla energiatasoilla sijaitsevat elektronit varjostavat korkeampien elektronitasojen elektroneja näin vähentäen korkeammilla energiatasoilla sijaitsevien elektronien kokemaa positiivista varausta. Malli ei myöskään pystynyt selittämään emissio spektreissä esiintyviä dupletteja ja tripletejä.³²

Bohrin atomimallin mukaiset planetaariset elektroniradat olivat myös ongelmallisia. Bohr ehdotti, että elektronit voisivat kiertää ydintä vain tietyillä stabiileilla radoilla, eli radoilla joilla elektroni ei säteilisi sähkömagneettista säteilyä. Bohr ei pystynyt selittämään miksi elektronit eivät säteilisi näillä radoilla. Planetaariset radat olivat myös Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen vastaisia, sillä radat olisivat antaneet elektroneille tarkan paikan ajassa.³⁰

5. Yhteenveto: Atomimallin kehittymisen aikajana

Tässä luvussa esitetään yhteenveto kirjallisuuskatsauksen keskeisimmistä havainnoista. Havaintojen avulla on laadittu atomimallin kehittymisestä koherentti aikajana (taulukko 1), jossa on korostettuna jokainen uusi atomimalli ja sen hylkäykseen tai kehitykseen johtanut ongelmakohta.

Taulukko 1: Atomimallin kehittymisen aikana.

Aikakausi /vuosi	Uusi atomimalli/kehitysvaihe/havainto	Mallin rajoitukset
500 eaa.	Uusi atomimalli: Kreikkalainen atomismi saa alkunsa Democrituksen vastauksesta Parmenideksen ontologiseen argumenttiin, joka kielsi tyhjiöt ja muutoksen mahdollisuuden	Democrituksen atomismia ei pystytä todistamaan havainnoilla
600–300 eaa.	intialainen atomismi saa alkunsa Kanadan perustamassa vaisesika koulukunnassa	
300 eaa.	kreikkalainen atomismi väistyy Aristoteleen elementti teorian tieltä.	
900–1100	Atomismia käsitellään islamistisessa maailmassa.	
1805	Uusi atomimalli: Dalton esittelee ensimmäisen havaintopohjaisen atomiteorian.	Daltonin havainnot ovat pohjimmiltaan matemaattisia ja eivät suoraan todista atomeja.
1827	Brown havaitsee siitepöly hiukkasissa satunnaista liikettä. Liike nimetään Brownin liikkeeksi.	
1865	Brownin liike havaitaan suspensiossa seoksessa.	
1901	Thompson havaitsee elektronin	
1904	Uusi atomimalli: Thompson esittelee atomin rusinapullamallin.	Atomit ovat ulkoisesti neutraaleja, mutta atomien tiedetään sisältävän vain negatiivisia elektroneja.
1905	Einstein todistaa Brownin liikkeen johtuvan atomien ja molekyylien törmäyksistä.	
1909	Gieger ja Marsden pommittavat metalli foliota alfaytimillä. Ensimmäiset todisteet atomytimestä.	
1911	Uusi atomimalli: Rutherford esittelee Giegerin ja Marsdenin koetuloksiin pohjautuvan Rutherfordin atomimallin.	Kiihtyvä varaus säteilee energiaa jatkuvasti. Täten Rutherfordin atomimalli on epästabiili.
1913	Soddy ja Thompson todistavat isotooppien olemassaolon.	
1913	Uusi atomimalli: Bohr esittelee ensimmäisen yleisesti hyväksytyyn kvanttimekaanisen atomimallin, jossa elektronien liike-energia on kvantittunut. Malli nimetään Bohrin atomimalliksi.	Elektronien energian kvantittumiselle ei tiedetä syytä. Ja malli toimii tarkasti vain vetyatomilla.
1926	Uusi atomimalli: Bohrin atomimallia korjataan Heisenbergin epätarkkuusperiaatteella ja uusi malli kykenee paremmin selittämään monielektronisten atomien ominaisuuksia ja vuorovaikutuksia.	
1931	Bothe ja Becker havaitsevat neutronin.	
1939	Hahn, Meitner ja Frisch todistavat fission.	

6. POHDINTA

Atomin rakenteen historia on esimerkki tieteellisen menetelmän toimivuudesta käytännössä. Kun tarkastellaan ihmiskunnan ymmärryksen historiallista kehittymistä atomien olemassaolosta ja niiden rakenteesta huomataan, että se on täynnä uusiin teorioihin johtavia havaintoja. Uudet teoriat sisälsivät aina jonkin ongelmakohdan, jonka ratkaiseminen johti uusiin havaintoihin ja vastavuoroisesti uuteen teoriaan. Esimerkiksi Thompsonin atomiollin puute, eli positiivisen varauksenkantajan puuttuminen, johti Giegerin ja Marsdenin metallifoliokokeeseen, jonka pohjalta Rutherford pystyi esittelemään uuden atomimallin, joka sisälsi puuttuvan varauksenkantajan.^{13,16}

Tutkielman tavoitteena oli selvittää atomin rakenteen historian suurimmat käännekohdat ja muodostaa koherentti aikajana. Tavoitteet täyttyivät koska muodostunut aikajana antaa helposti ymmärrettävän kuvan atomin rakenteen kehityksestä.

On syytä olettaa, että tutkimus ei ole saavuttanut atomin ymmärryksessä päätepistettä. Nykyinen kvanttimekaaninen atomimalli nojaa vahvasti matematiikkaan, joten on hyvinkin mahdollista, että atomien todellinen rakenne vastaa matemaattista ymmärrystä, mutta atomien rakenteesta voi vielä paljastua vuorovaikutuksia ja ominaisuuksia, joita ei ole tähän mennessä kyetty havaitsemaan.

Kemian opetuksen näkökulmasta tutkielma on hyödyllinen, sillä se kerää yhteen atomimallien kanssa myös atomimalleihin liittyvää kemian filosofiaa, kuten democrituksen argumentit atomien puolesta ja islamististen teologiien muurahainen sandaalilla ajattelukokeen.

LÄHTEET

1. A. G. Melsen, *From Atomos to Atom*, p.15–20, Harper & Row, New York, 1960
2. Aristotle, Physics, <http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.html>, 16.7.2017
3. Ancient atomism, Stanford encyclopedia of philosophy
<https://plato.stanford.edu/entries/atomism-ancient/> 16.7.2017
4. S. Ramasesha, *Resonance*, **15** (2010) 905.
5. D. Riepe, *The Naturalistic Tradition of Indian Thought*, p.227-228, University of Washington press, Seattle, 1961
6. Arabic and Islamic Natural Philosophy and Natural Science, Stanford Encyclopedia
<https://plato.stanford.edu/entries/arabic-islamic-natural/> 17.7.2017
7. M. E. Marmura, teoksessa *Introduction to Islamic Civilizations*, toim. R. M. Savory, Cambridge University Press, Cambridge, 1976 p.47–50
8. Viite 1, p.135–140
9. J. Dalton, *A New System of Chemical Philosophy part II*, R. Bickestaff, Lontoo, 1810, Laatta 4
10. A. W. Thackray, *Isis* **57** (1966) p.35
11. Brownian motion, Encyclopedia Britannica, <https://www.britannica.com/science/Brownian-motion> 18.7.2017
12. Y. K. Lee, K. Hoon, Brownian motion
http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_95/journal/vol4/ykl/report.html 18.7.2017
13. J. J. Thompson, *Popular science monthly* **59** (1901) p.323–330
14. J. J. Thomspson *Cambridge Philosophical magazine series 6 7* (1904) p.237–265
15. H. Geiger, E. Marsden *Proc. R. Soc. A* **82** (1909), p.495–500
16. E. Rhutherford *Phil. Mag. Ser.6* **21** (1911) p.669–688

17. kuvan lähde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geiger-Marsden_experiment_expectation_and_result.svg
18. Viite 1. p.167–168
19. G. Choppin, J. Liljenzin, J. Rydberg, C. Ekberg, *Radiochemistry and Nuclear Chemistry 4th edition*, Academic Press, Massachusetts,2013 p.4–5
20. Viite 19 p.6
21. J. J. Thompson *Proc. R. Soc. A* **89** (1913) p.1–20
22. I. Langmuir, *J. Am. Chem. Soc.* **41** (1919) p.868–934
23. J. Chadwick, *The neutron and its properties*, Nobel lecture, 1935
24. S. Ruth, *Phys. Persp* **14** (2012) p.59–94
25. L. Meiner, O. R. Frisch, *Nature* **143** (1939) p.239–240
26. Lehdistöiedote: *The 1990 Nobel Prize in Physics*, Nobel Media AB, 2014
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1990/press.html 28.7.2017
27. J. D. Olsen, K. T. McDonald, *The Classical Lifetime of a Bohr Atom*, Princeton University, Princeton, 2005 <http://www.physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/orbitdecay.pdf>
12.8.2017
28. N. Bohr, *The structure of the atom*, Nobel lecture, 1922
29. kuvan lähde: JabberWok Wikipedia commons
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bohr-atom-PAR.svg>
30. S. Brian, “*Quantum ideas week 2*” lecture notes, University of oxford, p.17
31. S. Pople, *Complete Physics*, Oxford University Press, p.279
32. L. M. Motz, J. H. Weaver *The story of Astronomy*, Springer US, p.227–228
33. N. Bohr, *Philos. Mag.* **26**, (1913) p.476
34. NASA, <https://lisa.nasa.gov/>
35. S. Erduran, *Science & Education* **10**, (2001) p.581–593