

Mikrofysiikka

eli Johdatus kvanttimekaniikkaan ja hiukkasfysiikkaan

Tapio Hansson

1. syyskuuta 2024

Sisällys

1	Atomikokoluokan katsaus atomin historiaan	5
1.1	Antiikin Kreikan atomit	5
1.2	Kemistin atomi	6
1.3	Thomsonin kokeet ja rusinapullamalli	8
1.4	Rutherfordin koe	10
2	Kohti kvanttimekaniikkaa	13
2.1	Klassisen fysiikan näkemys valosta	13
2.2	Mustan kappaleen säteily	15
2.3	Ultraviolettikatastrofi	16
2.4	Planckin kvanttihypoteesi	17
2.5	Valosähköinen ilmiö	18
2.6	Hiukkasten aaltoluonne	20
3	Kvanttimekaniikkaa	24
3.1	Kaksoisrakokoe	24
3.1.1	Luodit	24
3.1.2	Aallot	25
3.1.3	Elektronit	25
3.1.4	Elektronivahdissa	29
3.2	Epätarkkuusperiaate	31
3.3	Aalto vai hiukkanen?	32
4	Kvanttimekaaninen atomi	34
4.1	Bohrin malli	34
4.1.1	Kuuman kaasun säteily	36
4.1.2	Kohti jaksollista järjestelmää	40
5	Ydin	44
5.1	Ytimien luokittelu	46
5.2	Atomien massat	47

<i>SISÄLLYS</i>	2
5.3 Ytimen rakenne	48
6 Vuorovaikutukset ja hiukkasfysiikan standardimalli	51
6.1 Standardimallin sisältö	52
6.1.1 Kvarkit	52
7 Hiukkastutkimus	55
7.1 Sähkö- ja magneettikentät	55
7.2 Lineaarinen hiukkaskiihdytin	57
7.3 Syklotroni	59
7.4 Synkrotroni	60
7.5 Hiukkasilmaisimet	63
7.5.1 Sumu- ja kuplakammiot	63
7.5.2 Geigermittari	66
A Yksiköt kvantti- ja hiukkasfysiikassa	68

Kuvat

1.1	Dalton, public domain	7
1.2	Brownin liike, Andi schmitt, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons	8
1.3	Katodisädeputki, J. J. Thomson, public domain	8
1.4	Crooksin putki, D-Kuru/ Wikimedia Commons , CC-BY-SA-3.0-AT	9
1.5	Rutherfordin koe, public domain	11
1.6	Atomimallit, public domain	12
2.1	Sähkömagneettinen aalto, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	14
2.2	Aurinko, public domain NASA	15
2.3	Mustan kappaleen spektri, public domain, Wikimedia Commons	17
2.4	Valosähköinen ilmiö, Tapio Hansson, public domain	19
2.5	Davissonin ja Germerin koe	22
2.6	Fyysikot, public domain	23
3.1	Kaksoisrako, Lacatosias/ Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0	26
3.2	Kaksoisrakokoe elektroneilla, Tonomura, Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0	27
3.3	Kaksoisrakokoe elektroneilla, Alexandre Gondran, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons	28
3.4	Kaksoisrako valolähteellä, public domain	30
3.5	Heisenberg, Bundesarchiv, Bild 183-R57262, CC-BY-SA 3.0	31
3.6	Elektronidiffraktio, Wellcome Library, London, CC BY 4.0	33
4.1	Niels Bohr, public domain	35
4.2	Bohrin atomi,JabberWok, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	36
4.3	Vedyn spektri, Jan Homann, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	36
4.4	Vedyn energiatilat, Glosser.ca, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	39

4.5	Atomiorbitaalit, public domain	42
4.6	Vedyn orbitaalit, public domain	43
5.1	James Chadwick, public domain	44
5.2	Irene ja Marie Curie, Wellcome Collection, CC BY 4.0	45
5.3	Vahva vuorovaikutus, Bdushaw, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons	49
6.1	Standardimalli, MissMJ, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	53
6.2	Protoni ja neutroni	54
7.1	Sähködipoli, Geek3, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	56
7.2	Hiukkaset magneettikentässä, Qniemiec, vector by Adam Rędzikowski, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons	57
7.3	Lineaarinen kiihdytin, Sgbeer, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	58
7.4	ILC, ILC Comms, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	59
7.5	Syklotroni Ernest Lawrencen patentissa, public domain	60
7.6	SOLEIL-kiihdytin, By EPSIM 3D/JF Santarelli, Wikimedia Commons	61
7.7	LHC:n tunneli, By Maximilien Brice, CERN - CERN Document Server, CC BY-SA 3.0	62
7.8	Sumukammio, Nuledo s.r.o. - https://www.nuledo.com/en/ , CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons	64
7.9	Valokuva kuplakammioista, National Archives at College Park, public domain	65
7.10	Geiger-ilmaisim, Dirk Hünninger derivative work: Nevdka, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons	66

Johdanto

Tämä oppimateriaali on tarkoitettu lukion koulukohtaisen syventävän opintojakson materiaaliksi. Tässä käsitellään pienen mittakaavan fysiikkaa, eli niin sanottua mikrofysiikkaa. Aloitamme lyhyestä historiakatsauksesta atomin historiaan, jonka jälkeen paneudumme kvanttimekaniikkaan, standardimalliin ja nykyisiin teorioihin aineen ja valon olomuodosta. Erityisesti historiallinen osa on koostettu useista eri lähteistä (Wikipedia mukaan lukien), joten sen oikeellisuudesta ja täsmällisyydestä ei ole täydellisiä takeita. Kvanttimekaniikan suhteen tekstissä on käytetty lähteenä paljon Arthur Beiserin mainiota Concepts of Modern Physics kirjaa, sekä Richard Feynmanin luentosarjan kolmatta osaa Feynman Lectures on Physics Vol. 3.

Luku 1

Atomikokoluokan katsaus atomin historiaan

Aineen rakenteen selvittäminen on ollut tieteen historiassa merkittävässä roolissa. Epäilemättä ihmiskunta on pohtinut aineen rakennetta aina, mutta vanhimmat säilyneet teoriat juontavat juurensa antiikin Kreikkaan sekä Kiinaan.

1.1 Antiikin Kreikan atomit

Jo antiikin kreikkalaiset pohtivat asiaa hyvinkin paljon. Atomin käsite onkin peräisin jo antiikista ja muinaiskreikaksi *atomos* tarkoittaakin jakamatonta. Atomin käsitteen toivat ensimmäisenä esille filosofit Demokritos ja Leukippos, jotka päättelivät, että äärettömän pienistä yksiköistä ei voi rakentaa äärellisen kokoisia asioita. Näin ollen täytyy olla jokin pienin mahdollinen murunen, jota ei voi enää jakaa osiin. Demokritos oli muutenkin varsin edistyksellinen filosofi. Hän kirjoitti kirjoja matematiikasta ja esitti myös, että näkyvän taivaan valo on peräisin kaukana olevista tähdistä ja että maailma-kaikkeudessa on monia maailmoja, joista jotkut ovat asuttuja.

Eräs toinen kreikkalainen, nimeltään Empedokles, on saanut kunnian alkuaineista. Hänen mukaansa maailma koostuu neljästä alkuaineesta: maasta, vedestä, ilmasta ja tulesta. Kaikki aine koostuu jollain tavalla näistä neljästä elementistä. Antiikin suurimpiin auktoriteetteihin kuulunut filosofi Aristoteles lisäsi listaan vielä eetterin, jonka hän katsoi täyttävän kuunylisen avaruuden. Kuunalinen maailma oli varsin epätäydellinen ja karkea paikka, joten kuunyliseen jumalten maailmaan tarvittiin tietysti myös jumalainen elementti. Myöhemmin 1700- ja 1800-luvulla eetteri teki paluun fysiikkaan, ja sen ajateltiin olevan kaikkeuden täyttävä väliaine, joka mahdollistaa esimerkik-

si valon kulkemisen läpi näennäisesti tyhjän avaruuden. Newton itseasiassa arveli myös gravitaation kulkevan eetterin kautta. Itäisissä maissa käsitys alkuaineista oli varsin samanlainen. Siellä alkuaineiden määrä on hieman vaihdellut ja elementtien joukkoon on luettu lisäksi mm. puu ja metalli.

Aristoteleen käsitykset pysyivät vallalla varsin pitkään. Pimeän keskiajan Euroopassa ei juuri tieteellisiä läpimurtoja tehty, eikä Aristoteleen maailmankuvalle tapahtunut paljonkaan edes renesanssin aikana. Vasta Kopernikuksen Aurinkokeskeinen aurinkokuntamalli muutti merkittävästi näkemyksiä maailman rakenteesta. Käsitys atomista pysyi näinäkin aikoina varsin epämääräisenä. Atomi on niin pieni, että sen tutkimiseen tarvitaan tarkkoja mittauksia joiden suorittamiseen ei noina aikoina ollut vielä osaamista tai riittävän laadukkaita välineitä.

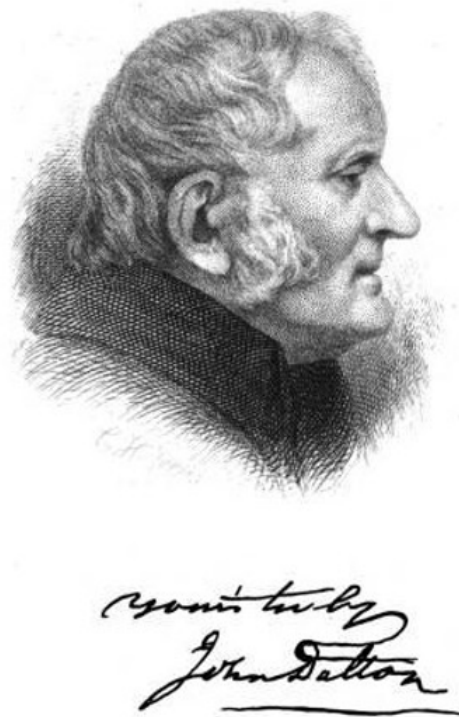
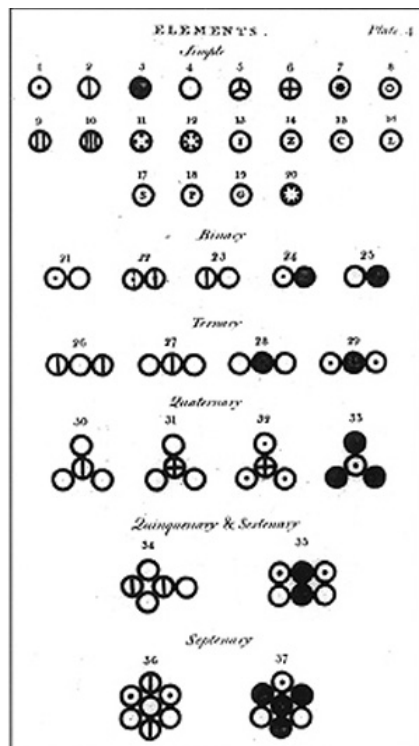
1.2 Kemistin atomi

Filosofien atomimallit saivat väistyä vasta 1800-luvun alussa, kun kemisti John Daltonin tutkimukset toivat uutta valoa atomin luonteeseen. Dalton tutki mm. kaasujen liukenemista veteen ja tuli lopulta johtopäätökseen, joka itseasiassa selittää paljon nykyaikaisestakin kemiasta. Daltonin teorian pääkohdat ovat:

1. Alkuaineet koostuvat äärimmäisen pienistä hiukkasista, atomeista.
2. Jokaisen alkuaineen kaikki atomit ovat samanlaisia, mutta erilaisia kuin muiden alkuaineiden atomit.
3. Atomeja ei voi jakaa, tuhota tai luoda.
4. Kemiaalliset yhdisteet muodostuvat atomeista joissain kokonaislukusuhteissa.
5. Kemiaallisissa reaktioissa atomit vaihtavat paikkaa, liittyvät toisiinsa ja irtaantuvat toisistaan.

Daltonin teoriassa merkittävää on, että hän perusti näkemyksensä empiiriselle tutkimukselle, joten kyseessä oli ensimmäinen tieteellinen julkaisu atomista. Daltonin välineet olivat varsin epätarkkoja ja hänen teoriaansa jäikin hieman virheitä. Hän esimerkiksi oletti vesimolekyylin koostuvan yhdestä happiatomista ja yhdestä vetyatomista ja hänen mittaamansa atomipainot olivat varsin epätarkkoja. Amedeo Avogadro julkaisi muutamia vuosia myöhemmin tutkimustaan kaasuista. Avogadron lain mukaan litra kaasua vakio-paineessa ja -lämpötilassa sisältää aina yhtä monta molekyyliä. Tämän avul-

LUKU 1. ATOMIKOKOLUOKAN KATSAUS ATOMIN HISTORIAAN 7

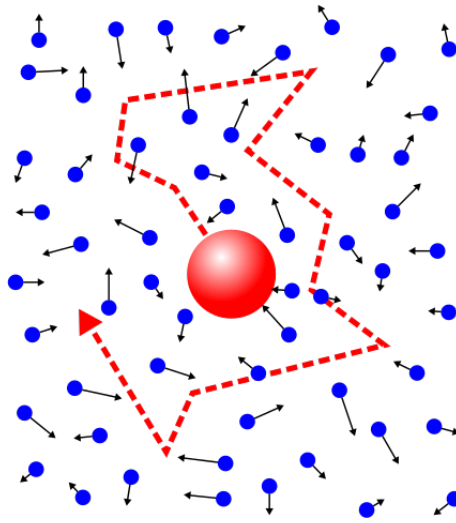


Kuva 1.1: Daltonin koostama järjestelmä sisältää atomit ja monenlaisia molekyyliä, jotka muistuttavat hyvin paljon nykyaikaisia malleja.

la hän onnistui selvittämään, että vesimolekyyli vaatii kaksi vetyatomia yhtä happiatomia kohti.

Daltonin atomi pysyi pitkään fysiikan peruselementtinä. Kasvitieteilijä Robert Brown huomasi vuonna 1827, että vedessä kelluvat pienet siitepölyhiukkaset liikkuvat nykien satunnaisesti, sen sijaan, että kelluisivat rauhassa paikoillaan. Ilmiö sai selityksen vasta vuonna 1905 Albert Einsteinin toimesta. Hän esitti, että liike johtuu vesimolekyylien satunnaisliikkeestä. Joskus siitepölyhiukkasen toiseen reunaan törmää useampi molekyyli kuin toiseen ja törmäysten aiheuttama voima siirtää hiukkasta hiukan. Ranskalaisfyysikko Jean Perrin teki pian tarkentavia tutkimuksia ja vahvisti teorian. Brownin liike onkin ensimmäinen selkeä kokeellinen havainto joka viittaa aineen hiukkasluonteeseen myös nestemäisessä olomuodossa.

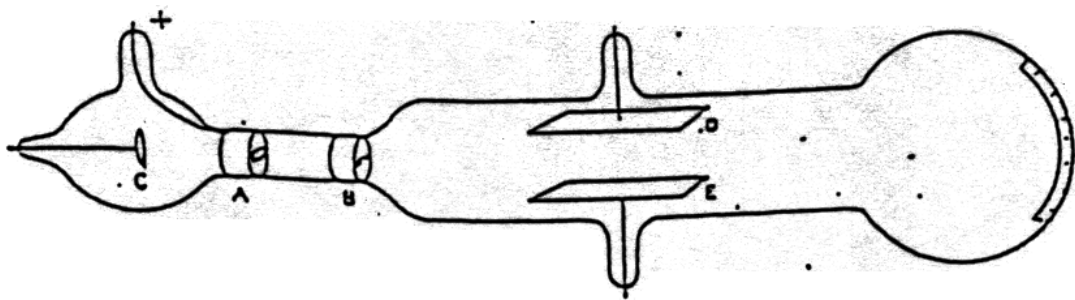
Muutos atomiteoriaan oli edessä vasta vuonna 1897, jolloin englantilainen fyysikko J. J. Thomson julkaisi tutkimuksensa koskien atomin sisäistä rakennetta.



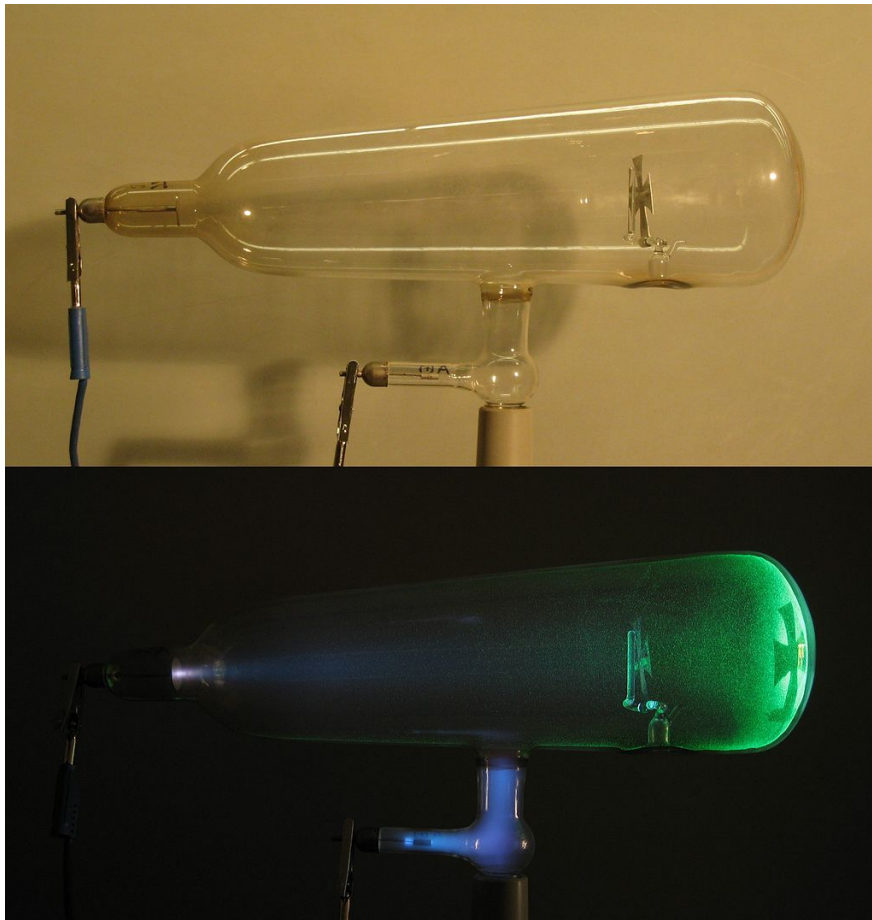
Kuva 1.2: Riittävän pieni vedessä kelluva hiukkanen liikkuu satunnaisesti vesimolekyylien törmäillessä siihen.

1.3 Thomsonin kokeet ja rusinapullamalli

Thomson tutki katodisäteitä. Katodisäteet ovat tyhjiöputkeen muodostettuja elektronisuihkuja, jotka lähtevät liikkelle, kun putkeen kytketään jännite. Katodilta lähtevät elektronit kulkevat tyhjiöputkessa, ja törmätessään lasiputken päähän ne fluoresoivat lasin, joka hehkuu vihreänä. Jo aiemmin tunnettiin magneettikentän vaikutus katodisäteisiin, mutta Thomson oivalsi tutkimustensa kautta, että myös ulkoinen sähkökenttä muuttaa niiden suuntaa.



Kuva 1.3: Kaaviokuva Thomsonin koejärjestelystä. Katodilta C irtoavat elektronit ohjataan rakojen A ja B läpi, jolloin suihkusta tulee kapea. Levyjen D ja E välille kytketään korkea jännite, jonka vuoksi suihkun suunta taittuu matkalla putken päähän.



Kuva 1.4: Crooksin putkessa katodisäteet kulkevat normaalisti suoraan. Osa elektroneista lentää ohi anodista ja fluoresoi lasin hehkumaan vihreänä.

Katodisäteiden luonne oli aiemmin epäselvä, mutta koska sekä sähkö- että magneettikenttä kääntää säteiden rataa, ei valo tule kysymykseen. Thomson päätteli, että kyseessä täytyy olla pieni negatiivisesti varattu hiukkanen. Thomson kutsui hiukkasta korpuskeliksi, mutta tiedemaailma yhteisesti totesi, että elektroni lienee parempi termi.

Thomson tuli tunnetuksi myös massaspektrometrian kehittämisestä. Hän tutki katodisäteiden massaa mittaamalla lämpö määrää jota säteily kuljetti ja vertasi sitä säteiden taipumiseen magneettikentässä. Hän havaitsi säteilyn hiukkasten olevan noin tuhat kertaa vetyatomia kevyempiä, mikä osoitti, että vety ei ole pienin tunnettu massan yksikkö. Lisäksi hän sai selville, että katodisäteet ovat täysin samanlaisia riippumatta siitä, mistä alkuaineesta ne ovat peräisin, joten alkoi vaikuttaa väistämättömältä, että atomin sisällä on jotain hyvin pientä ja negatiivisesti varattua, joka on samanlainen kaikilla

atomeilla.

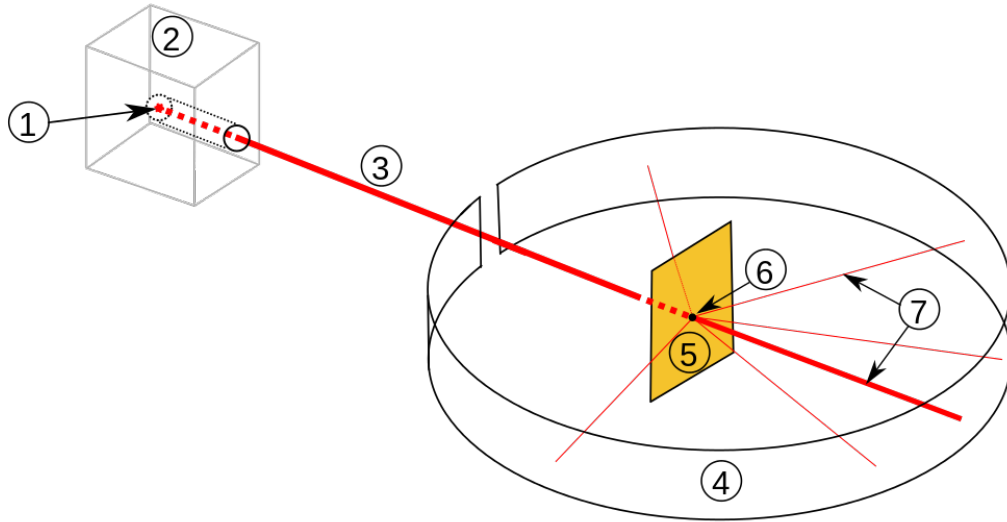
Ytimen olemassaolosta ei ollut vielä tietoa, joten elektronit aiheuttivat ongelman atomimalliin. Aine on sähköisesti neutraalia, joten se ei voi koostua ainoastaan negatiivisesti varatuista elektroneista. Toisaalta atomista ei saatu irrotettua positiivisia osia, joten Thomson kehitti löytöjensä perusteella niin sanotun rusinapullamallin (eng. *plum pudding model*, englantilaiset ja heidän vanukkaansa...) atomille. Mallissa atomi koostuu tasaisesta positiivisesti varatusta massasta, jonka sisällä on pienen pieniä elektroneja ikään kuin rusinoina pullassa. Malli kykeni kutakuinkin selittämään miksi aineesta saataisiin elektroneja irti, mutta positiivisia hiukkasia ei. Mallissa oli kuitenkin merkittäviä ongelmia, eikä sitä otettu tiedeyhteisössä aivan varauksetta vastaan. Paremman mallin puutteessa rusinapulla oli hetken ajan kuitenkin vallitseva atomimalli, kunnes Thomsonin opiskelija Ernest Rutherford suunnitteli kuuluisan kokeensa ja tutki atomin rakennetta tarkemmin.

1.4 Rutherfordin koe

Ernest Rutherford sai kemian Nobel-palkinnon työstään radioaktiivisten aineiden erotusmenetelmien kehittämisen parissa. Hänen merkittävimmät saavutuksensa tulivat kuitenkin Nobel-palkinnon jälkeen. Tarkemmin ottaen kokeen suorittivat Rutherfordin alaisuudessa työskennelleet Hans Geiger ja Ernst Marsden. Koetta kutsutaankin toisinaan Geiger-Marsdenin kokeeksi. Itseasiassa, kuten tieteessä monesti, kyseessä oli varsin pitkä sarja mittauksia alfa-säteilyllä, jonka lopuksi Rutherford kumppaneineen mutoili uuden atomimallin.

Kokeet suoritettiin vuosina 1908-1913, ja niissä kaikissa oli ideana seurata alfa-hiukkasten sirontaa niiden osuessa metalliliuskaan. Viimeisissä kokeissa koejärjestely oli seuraavan kaltainen. Tyhjiöön asetettuun kultakalvoon kohdistettiin alfa-säteilyä radium-isotoopista. Koko kultakalvoa ympäröi fluoresoiva valokuvauslevy, jossa näkyy pieni valonvälähdys aina alfa-hiukkasen osuessa siihen. Valitettavasti välähdys on niin heikko, että paljaalla silmällä sitä ei erota, joten Geiger ja Marsden viettivät useita tunteja pimennetyssä huoneessa määrittäessään mikroskoopin kanssa alfahiukkasten sirontakulmia.

Kulta valittiin kohtiomateriaaliksi, sillä pehmeänä metallina sitä oli helppo työstää ja osattiin valmistaa erittäin ohuita kalvoja. Kokeessa havaittiinkin, että suurin osa alfa-hiukkasista kulkee ohuesta kalvosta suoraan läpi siroamatta juuri lainkaan. Osan hiukkasista havaittiin kuitenkin siroavan varsin merkittäviin kulmiin, ja mikä merkittävintä, osa kimposi jopa takaisin tulosuuntaansa. Rutherford innostui huomattavasti kuultuaan Geigerin raportin suurista sirontakulmista. Tulos oli rusinapullamallin valossa yllätys ja

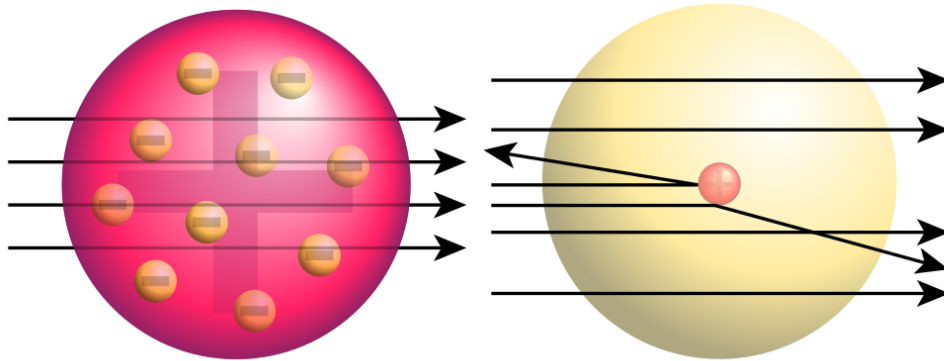


Kuva 1.5: Rutherfordin kokeessa havaittiin alfa-säteilyn sirontaa fluoresoivan materiaalin avulla.

Rutherford sanoikin havainnon olevan hieman kuin ampuisi tykillä nenäliinaan, ja ammus kimpoaisi takaisin. Jos atomit olisivat rusinapullan kaltaisia, aine olisi varsin tasakoosteista, eikä yksittäisiä takaisin siroavia alfahiukkasia voitaisi havaita. Rutherford mallinsi sirontaa matemaattisesti, ja yhdessä he kehittivät atomimallin, jossa elektronit ovat pienen mutta hyvin tiiviin positiivisesti varatun ytimen ympärillä. Myöhemmissä kokeissa Rutherford vielä vahvisti ydinten todella olevan positiivisesti varattuja.

Hyvin pieni mutta tiivis ydin selittää, miksi siroamista tapahtuu harvoin. Ydin on niin pieni, että ohuessa kalvossa ytimiä sattuu alfahiukkasen reitille vain harvakseltaan. Ytimen läheltä kulkevien alfahiukkasten reitti kääntyy hieman ytimen hylkivän sähköisen voiman vuoksi. Takaisinpäin alfahiukkanen kääntyy, kun se törmää ytimeen keskeisesti.

Rutherfordin malli ratkaisi Thomsonin malliin liittyneitä ongelmia. Monet fyysikot olivat sitä mieltä, että erimerkkiset varaukset eivät voi olla toistensa sisällä, joten rusinapullamallissa on jotain vialla. Rutherfordin malli ratkaisi tämän asettamalla ytimen keskelle ja elektronit sen ympärille. Tämäkään malli ei ollut fysikaalisesti tyydyttävä, sillä positiivisen ytimen pitäisi vetää negatiivisia elektroneja puoleensa, joten atomien ei pitäisi pysyä kasassa. Ja jos elektronit esimerkiksi kiertävät ydintä planeettojen tapaan, pitäisi



Kuva 1.6: Thomsonin mallin mukaan alfa-hiukkasten pitäisi kulkea tasaisen aineen läpi aina kutakuinkin samalla tavalla. Voimakkaasti varatunut ja tiheä ydin selittää, miksi osa hiukkasista siroaa voimakkaasti takaisinpäin.

niiden kiihtyvässä liikkeessä näin ollessaan klassisen sähkömagnetismin teorian mukaan säteillä sähkömagneettista säteilyä. Säteilynä poistuva energia pienentää hiukkasten energiaa ja niiden pitäisi pudota spiraalirataa ytimeen. Rutherford ei osannut antaa tähän ratkaisua, mutta paria vuotta myöhemmin mallia kehitti tanskalainen teoreettinen fyysikko Niels Bohr, jonka semi-klassinen atomimalli lähestyy jo moderin fysiikan aikaa ja kvanttimekaniikan kehitystä.

Luku 2

Kohti kvanttimekaniikkaa

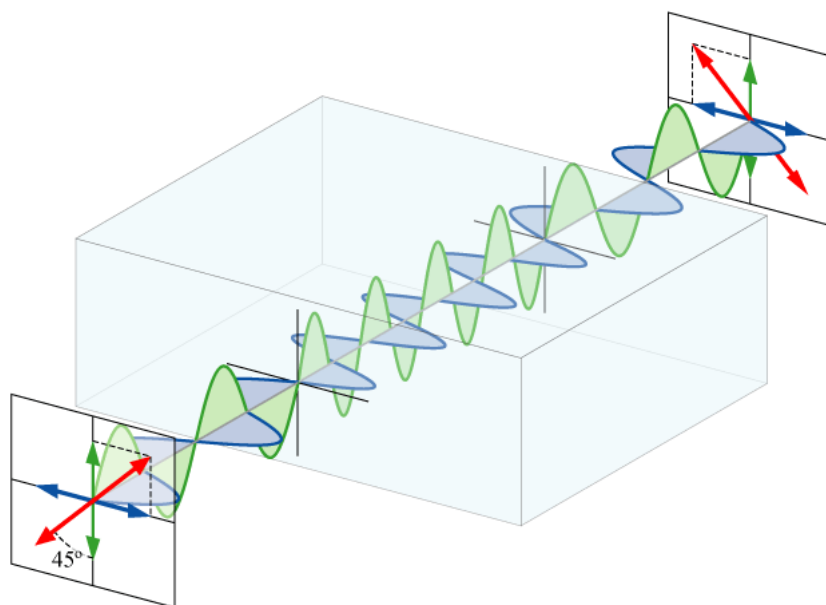
1800-luvun lopulla fyysikot olivat hyvin vahvasti sitä mieltä, että fysiikka on nyt täydellistä. Newtonin mekaniikka muodosti kaiken perustan, joka kauniisti täydentyi Maxwellin yhtälöiden selittäessä sähkömagneettiset ilmiöt ja statistisen fysiikan selittäessä kaasujen ja nesteiden käyttäytymistä. Arveltiin, että jos fysiikkaan vielä jotain muutoksia tulee, ovat ne vain pieniä tarkennuksia tai yksityiskohtia, eivät niinkään merkittäviä uudistuksia. Toisin kuitenkin kävi, sillä jo ennen vuosisadan loppua kävi selväksi, että klassisen fysiikan teorioissa on jotain perustavanlaatuisesti vialla.

2.1 Klassisen fysiikan näkemys valosta

Valon luonteesta on kiistelty pitkin ihmiskunnan historian. On helppoa nähdä, että valo lähtee esimerkiksi kynttilän liekistä, mutta onko sen nopeus ääretön vai äärellinen. Koostuuko valo hiukkasista, vai kenties aalloista, ja jos koostuu, mistä aineesta valo on tehty tai mikä väliaine aaltoilee? Galileo Galilei yritti mitata valonnopeutta lyhtyjen avulla, mutta valonnopeuden ollessa hyvin paljon ihmisaistien käsityskykyä nopeampi, ei hän saanut oleellisesti mitään järkeviä tuloksia. Tanskalainen tähtitieteilijä Ole Rømer mittasi valonnopeuden Jupiterin kuiden avulla vuonna 1676, ja vaikka hänenkin mittauksessaan oli vielä varsin suuri virhe, oli suuruusluokka tämän jälkeen selvillä, ja tiedettiin, ettei valo kulje äärettömän nopeasti.

Aalto-opin suurmies hollantilainen Christiaan Huygens, ja Isaac Newton kävivät varsin kärkestä keskustelua valon luonteesta 1600-luvulla. Huygensin mukaan valo oli ehdottomasti aaltoliikettä, kun taas Newton väitti kokeidensa avulla osoittaneensa valon koostuvan hiukkasista. 1700- ja 1800-luvun vaihteessa Thomas Youngin ja Augustin-Jean Fresnelin kokeet antoivat luotamuslauseen aaltoteorialle, minkä jälkeen valoa pidettiin yleisesti aaltona.

Kysymykseen, mikä sitten aaltoilee, saatiin vastaus brittifiysikko James Clerk Maxwellin ehdottaessa vuonna 1864, että kiihtyvässä liikkeessä oleva varattu hiukkanen saa aikaan toisiinsa kytkeytyneen häiriön magneetti- ja sähkökentissä. Häiriö voi kaiken lisäksi kulkea tyhjiössä äärettömän pitkän matkan. Jaksollisesti värähtelevä varaus saisi siis aikaan aaltoliikkeen, jossa sähkö- ja magneettikenttä värähtelevät kohtisuorassa toisiaan vastaan.



Kuva 2.1: Sähkömagneettisessa aallossa sähkökenttä (vihreä aalto) ja magneettikenttä (sininen aalto) värähtelevät poikittaisesti ja kohtisuorasti toisiinsa vastaan.

Michael Faraday osoitti jo aiemmin, että muuttuva magneettikenttä indusoi johdinsilmukkaan virran. Maxwell ehdotti symmetrian nojalla, että muuttuva sähkökenttä saisi aikaan magneettikentän muutoksen. Heikkoja magneettikenttiä oli etenkin hänen aikansa välineillä hankala havaita, joten ehdotus perustui enemmänkin symmetriaan kuin kokeellisiin tuloksiin. Usein terävä päättely johtaa kuitenkin vahvoihin tuloksiin, ja Maxwell onnistui johtamaan nopeuden sähkömagneettiselle aaltoliikkeelle sähkövakion ϵ_0 ja magneettivakion μ_0 avulla.

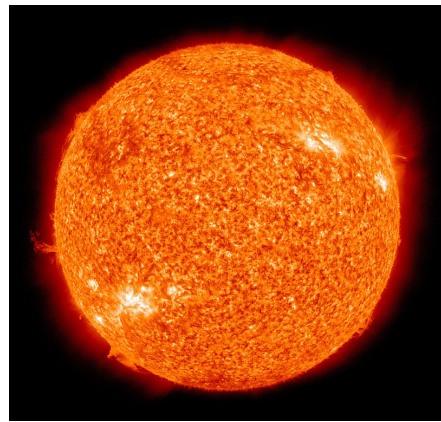
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

Arvo vastasi silloin tunnettua valonnopeuden arvoa niin hyvin, että kyseessä tuskin saattoi olla sattuma, joten Maxwell päätteli valon olevan sähkö-

magneettista aaltoliikettä. Kokeellinen vahvistus teorialle saatiin vasta Maxwellin kuoleman jälkeen kun saksalainen Heinrich Hertz osoitti vuonna 1888, smaaltojen olevan paitsi olemassa, myös käyttäytyvän juuri niin kuin Maxwell oli ennustanut. Varmuus valon luonteesta kesti kuitenkin vain kymmenkunta vuotta.

2.2 Mustan kappaleen säteily

Valon luonteeseen oltiin hetken aikaa varsin tyytyväisiä, mutta tieteessä on tapana jatkaa tutkimuksia, ja niin vuosisadan vaihteessa myös tehtiin. Heräsi kysymys siitä, miten säteily itseasiassa syntyy kappaleissa. Koska aineen atomit, ja erityisesti ytimien ympärillä olevat elektronit, värähtelevät jaksollisesti lämpöliikkeen johdosta, lähettävät ne myös sähkömagneettista säteilyä ympäristöönsä. Huoneen lämpötilassa säteily on tyypillisesti infrapuna-alueella, mutta kuumilla kappaleilla, kuten kiukaan vastuksilla tai hehkulampun hehkulangassa, lämpötila nousee niin korkeaksi, että lämpösäteily on näkyvän valon alueella.



Kuva 2.2: Aurinkoa mallinnetaan usein mustana kappaleena.

Atomimalli oli 1800-luvun lopulla vielä hieman vaiheessa, joten asiaa lähestyttiin lämpötasapainon kannalta. Lämpötasapainossa ympäristön kanssa oleva kappale pysyy samassa lämpötilassa, joten sen täytyy vastaanottaa ympäristöstä yhtä paljon energiaa, kuin se ympäristöön lähettää. Pieni yksinkertaistus helpottaa tilanteen tarkastelua. Oletetaan, että kappale *absorboi* kaiken siihen kohdistuneen säteilyn. Tällaisen lämpötasapainossa olevan kappaleen lähettämän säteilyn intensiteetti on täsmälleen yhtä suuri kuin sen vastaanottaman säteilyn, koska sen täytyy lämpötasapainossa luovuttaa ja vastaanottaa yhtä paljon energiaa. Tällaista kappaletta kutsutaan *mustaksi kappaleeksi*. Esimerkiksi Aurinko toteuttaa tämän mallin hyvin, sillä se ei juuri lainkaan heijasta valoa, joka siihen osuu, mutta tuottaa itse säteilyä. Mustan kappaleen ei siis tarvitse olla väriltään musta. Nimi on kuitenkin seurausta siitä, että väriltään mustat kappaleet absorboivat näkyvää valoa hyvin.

Musta kappale on siis malli, joka kuvaa säteilijöitä (säteilijä on mikä tahansa kappale, jolla on absoluuttista nollapistettä suurempi lämpötila). Ideaalisen säteilijän tarkasteleminen helpottaa tilannetta, sillä olemme nyt eri-

tyisesti kiinnostuneita säteilyn luonteesta, emmekä niinkään siitä, mistä se on peräisin. Kokeellinen tutkimus osoittaa mustan kappaleen säteilevän hyvin arkikokemuksen mukaisesti. Mitä kuumempi kappale on, sitä enemmän se säteilee, ja erityisesti säteilyn aallonpituus pienenee lämpötilan kasvaessa. Hyvin kuumaksi kuumennettu rautakappale esimerkiksi säteilee hyvin valkoista kirkasta valoa, kun taas matalammissa lämpötiloissa se hehkuu vain vaimeasti punaisena.

2.3 Ultraviolettikatastrofi

Mustan kappaleen säteilyn spektri riippuu vahvasti kappaleen lämpötilasta. Säteilyn korkeimman intensiteetin aallonpituuden voi laskea Wienin siirtymälain avulla. Sen mukaan säteilijän korkeimman intensiteetin aallonpituus on

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (2.2)$$

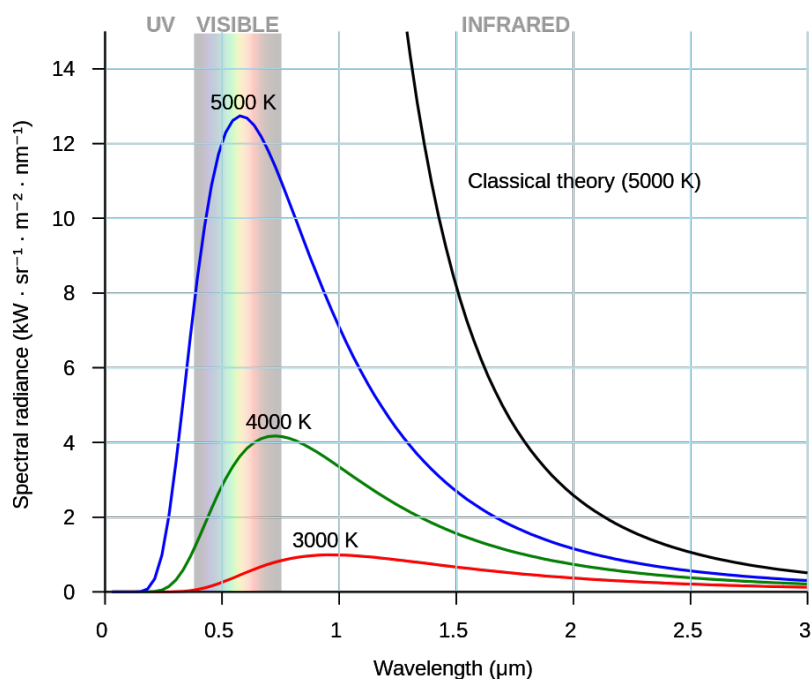
missä $b = 2,897\,772 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ on Wienin siirtymävakio ja T on lämpötila kelvineinä. Korkeimman intensiteetin lisäksi lämpösäteilyä emittoituu monella muullakin aallonpituudella, ja spektristä muodostuu loiva jakauma, kuten kuvassa 2.3 havaitaan. Esimerkiksi Auringon pintalämpötila on noin 5000 kelviniä, joten kuvan sininen käyrä vastaa varsin hyvin Auringon spektriä.

Brittifyysikot Lordi Rayleigh ja Sir James Jeans paneutuivat säteilijöiden luonteeseen. He johtivat Maxwellin yhtälöiden ja aaltoliikkeen ominaisuuksien perusteella ns. Rayleigh-Jeansin lain, jonka mukaan säteilijän lähettämä energia on kääntäen verrannollinen aallonpituuden neljänteen potenssiin

$$B(\lambda) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}, \quad (2.3)$$

missä B on säteilijän irradianssi, c valonnopeus, k_B Boltzmannin vakio, T säteilijän lämpötila kelvineinä, ja λ säteilyn aallonpituus.

Rayleigh-Jeansin lain mukaan kappaleen säteilemän energian tulisi siis kasvaa huomattavan nopeasti aallonpituuden pienentyessä. Kuvan 2.3 musta kuvaaja kuvaakin klassisen teorian ennustetta 5000 kelvinin säteilijälle. Energian kasvu aallonpituuden pienentyessä on kuitenkin energian säilymislain vastaista, sillä klassisen teorian mukaan kappaleiden tulisi säteillä ääretömän paljon energiaa äärimmäisen pienillä aallonpituuksilla. Tämä tarkoittaisi käytännössä, että kaikkien kappaleiden pitäisi säteillä hyvin runsaasti voimakasta gammasäteilyä, mikä ei tietenkään käy järkeen. Fyysikoille oli



Kuva 2.3: Mustan kappaleen säteilyn spektri muutamassa lämpötilassa. Klassisen teorian mukainen säteilijä karkaa kauas äärettömyyksiin.

ilmiselvää, että Rayleigh-Jeansin laissa on jokin vika, mutta vaikka ongelmaa kuinka tarkasteltiin, tultiin klassisen sähkömagnetismin pohjalta aina vain samaan tulokseen. Ongelma tunnetaan tieteen historiassa *ultraviolettikatastrofina*, sillä useimmilla kappaleilla teoreettisen säteilijän spektri eroaa havaitusta merkittävästi vasta ultraviolettisäteilyn alueella.

2.4 Planckin kvanttihypoteesi

Saksalaisfyysikko Max Planck julkaisi vuonna 1900 ratkaisun ultraviolettikatastrofiin. Planck kuvasi kaavaansa onnekaaksi arvaukseksi, sillä varsinaisia fysikaalisia perusteita sille ei vielä ollut. Kaava onnistui ennustamaan mustan kappaleen säteilyn äärimmäisen tarkasti. Planckin vastine Rayleigh-Jeansin laille oli

$$B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}. \quad (2.4)$$

Oleellinen ero kaavassa on Planckin vakio h , jonka arvo SI-yksiköissä on $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js. Eksponenttitermin muoto muuttaa lain käyttäytymistä pienillä aallonpituuksilla. Vaikka irradianssi on edelleen kääntäen verrannol-

linen aallonpituuden korkeaan potenssiin, on se nyt kääntäen verrannollinen myös aallonpituuden eksponenttifunktioon. Aallonpituuden pienentyessä saavutetaan piste, jossa eksponenttitermi alkaa vaikuttaa potenssitermiä enemmän, mikä vie lausekkeen arvon nollaan aallonpituuden lähestyessä nollaa, kuten säteilijöiden spektrissä on havaittu käyvän. Näin ultraviolettikatastrofista vältytään.

Planckin haasteena oli vielä perustella kaava fysikaalisesti. Usean viikon pohdinnan jälkeen hän keksi perustelun, joka avasi oven ulos klassisen fysiikan maailmasta. Ratkaisu liittyy energian vaihtoon säteilyn ja säteilijän välillä. Planck päätyi kaavaansa olettamalla, että energia voi siirtyä vain tietyn kokoisina paketteina, eikä säteilyn energia siten saa mielivaltaisia arvoja. Kaavaan esiintynyt Planckin vakio h määrittää energiapaketin koon. Taajuudella f emittoituva tai absorboituva säteily koostuu paketeista, jonka koko on

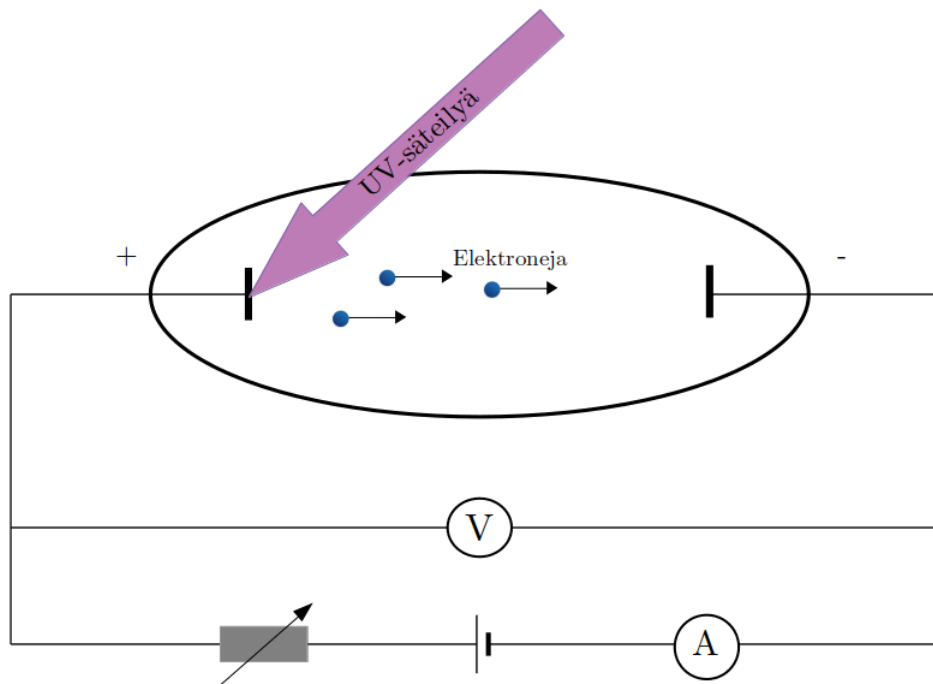
$$E = hf. \quad (2.5)$$

Sanotaan, että energianvaihto aineen ja säteilyn välillä on *kvantittunut*, eli se koostuu pienistä yksiköistä. Jo aiemmin Thomsonin töiden kautta löydettiin alkeisvaraus, ja varaus olikin ensimmäinen kvantittunut suure. Säteilyn kvantittuminen sen sijaan ei sopinut klassisen fysiikan teorioihin lainkaan, minkä vuoksi myös Planck itse epäili hypoteesinsa fysikaalisuutta varsin pitkään. Hän yritti pitkään yhdistää energiakvanttiaan klassiseen teoriaan, mutta epäonnistui. Myöhemmin hän totesikin, että kvantin merkitys olikin huomattavasti suurempi, kuin hän alunperin oli arvellut. Seuraava havainto kvantittumisen puolesta oli onneksi jo lähellä.

2.5 Valosähköinen ilmiö

Hertz löysi sähkömagneettiset aaltonsa tutkimalla metallikuulien välille syntyvää kipinää. Hän huomasi ohimennen, että kipinä syntyy helpommin, jos metallia valaisee ultraviolettisäteilyllä. Alkuperäinen koe, joka osoitti valon sähkömagneettisen aaltoluonteen, antoi siis myös ensimmäisiä vihjeitä siitä, että se ei välttämättä ole koko totuus. Vaikka Hertz ei itse paneutunut asiaan tarkemmin, muut jatkoivat kokeita.

Koejärjestelyssä (kuva 2.4) käytettiin tyhjiöputkea, jossa olevien metallilevyjen välille kytkettiin säädettävä jännite. Anodia valaistetaan ultraviolettivalolla, jolloin säteily irrottaa metallilevyn pinnasta elektroneja. Anodilta irronneet *fotoelektronit* matkaavat kohti katodia, ja aiheuttavat virran, joka voidaan mitata. Kun ulkoista jännitettä nostetaan, virta pienenee, ja lopulta saavutetaan raja, jonka kohdalla elektronien virta loppuu kokonaan. Tämä



Kuva 2.4: Valosähköisen ilmiön koejärjestely.

jännite vastaa suurinta kineettistä energiaa, jonka fotoelektroni voi saada lähtiessään anodilta.

Fotoelektronit eivät itsessään ole kovin yllättävä löydös. Siirteleväthän veden aallotkin kiviä rannalla, joten sähkömagneettinen aalto voisi hyvinkin irrottaa elektroneja metallista. Ilmiöön liittyen tehtiin kuitenkin havaintoja, jotka osoittivat, ettei aaltoliike tarjoakaan täydellistä selitystä valolle. Tarkemmin ottaen kolme seikkaa osoittavat, että valo ei voi olla aaltoliikettä.

1. Fotoelektroneja havaitaan välittömästi. Aaltoliikkeen energia jakautuu aaltorintamalle, joten pitäisi kulua jonkin verran aikaa, ennen kuin elektronille on kulkeutunut tarpeeksi energiaa, jotta se voi irrota metallista. Itseasiassa tarkempi lasku osoittaa että aikaa pitäisi kulua kirkkaankin valon tapauksessa päiviä.
2. Kirkkaalla valolla havaitaan enemmän fotoelektroneja, mutta fotoelektronien saama kineettinen energia ei kasva. Aaltoteoria ennustaa, että kirkkaampi valo johtaa energisempiin fotoelektroneihin.
3. Lyhyempi aallonpituus johtaa suurempaan liike-energiaan. Jokaiselle metallille voidaan määrittää raja-aallonpituus, jota suuremmilla aal-

lonpituuksilla (tai pienemmillä taajuuksilla) elektroneja ei irtoa. Tätäkään ei aaltoteoria mahdollista.

Valosähköiselle ilmiölle saatiin teoreettinen perustelu vuonna 1905, kun Albert Einstein selitti kokeen sillä, että aaltorintaman sijaan valo koostuu pienistä paketeista, *fotoneista*, kuten Einstein niitä kutsui. Einsteinin idea oli vielä Planckin ideaa villimpi. Planck päätteli että energian vaihdon aineen kanssa täytyi olla kvantittunut, mutta Einstein meni niin pitkälle, että oletti valon itsessään koostuvan pienistä paketeista.

Jokaiselle metallille voidaan määrittää rajataajuus, jota pienemmällä taajuudella (suuremmalla aallonpituudella) metallista ei irtoa elektroneja. Valokvantin energia, kuten aiemmin todettiin on $E = hf$, joten raja-taajuudella f_0 voidaan määrittää energia, jolla elektroni juuri ja juuri irtoaa atomista.

$$W_0 = hf_0$$

Tätä kutsutaan metallin irrotustyöksi (joskus myös työfunktiksi, mutta se on varsin epäonnistunut käännös englannin kielisestä termistä work function). Mitä suurempi irrotustyö metallilla on, sitä enemmän energiaa vaaditaan elektronin irrottamiseen sen pinnasta. Einsteinin mukaan valosähköisessä ilmiössä metallin pinnalta irtoavan elektronin liike-energia on

$$E_k = hf - W_0, \quad (2.6)$$

missä W_0 on metallin irrotustyö ja f metallia valaisevan valon taajuus.

Useimmille ihmisille tulee yllätyksenä tieto, että Einsteinin Nobel-palkinto ei ole peräisin yleisestä suhteellisuusteoriasta, vaan valosähköisen ilmiön teoreettisesta selittämisestä. Einsteinia valon luonne kuitenkin vaivasi hänen elämänsä loppuun asti, sillä koetulokset puoltavat toisaalla yhtä vahvasti sähkömagneettista aaltoluonnetta, kuin taas toisaalla hiukkasluonnetta. Ongelmaa ei juuri tätä paremmin pystytä selittämään tänä päivänäkään. Valo koostuu jostakin, joka tietyissä tilanteissa käyttäytyy kuten aalto, mutta toisissa tilanteissa kuten hiukkanen. Et siis ole lainkaan huonossa seurassa, jos valon luonne aiheuttaa päänvaivaa. Sen sijaan lisää aivojumbppaa on edessä, kun huomaamme, että aineemme rakenne, jota ennen pidimme niin kiinteinä pieninä materiaalikappaleina, ei välttämättä sekään ole aivan kuten olisi voinut odottaa.

2.6 Hiukkasten aaltoluonne

Parikymmentä vuotta ehti kulua Einsteinin ja Planckin hämmäntävästä teoriasta sähkömagneettisten aaltojen hiukkasluonteelle, ennen kuin kukaan hok-

sasi pureutua kysymykseen materiahiukkasten luonteesta. Valon hiukkasluonne oli niin mullistava ajatus, että vaikka sitä tuki useampi kokeellinen tulos, kesti varsin kauan, ennen kuin se alettiin yleisesti hyväksyä. Vielä hurjempi oli Louis de Broglien väitöskirjassaan tekemä esitys siitä, että ehkäpä elektroneilla, ja siten myös muilla materiahiukkasilla, olisi sittenkin aaltoluonnetta.

De Broglien ajatus perustuu Bohrin atomimalliin, josta puuttuu selitys sille, miksi elektronit ovat juuri tietyillä radoilla. De Broglie päätteli, että elektroneilla täytyy olla jotain jaksollisia ominaisuuksia, jotka sitovat ne täsmälleen omille radoilleen. Hän ehdotti väitöskirjassaan 1924, että liikkeeseen kappaleeseen liittyy aina myös aaltoluonne. De Broglien idea sai varsin nopeasti tuulta alleen, ja vuonna 1927 De Broglien aallot vahvistettiin kokeellisesti. Tästä seurasi De Broglielle Nobel-palkinto paria vuotta myöhemmin.

Fotonin liikemäärä saadaan selville kaavasta

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Näin ollen fotonin aallonpituus saadaan vastaavasti liikemäärän avulla

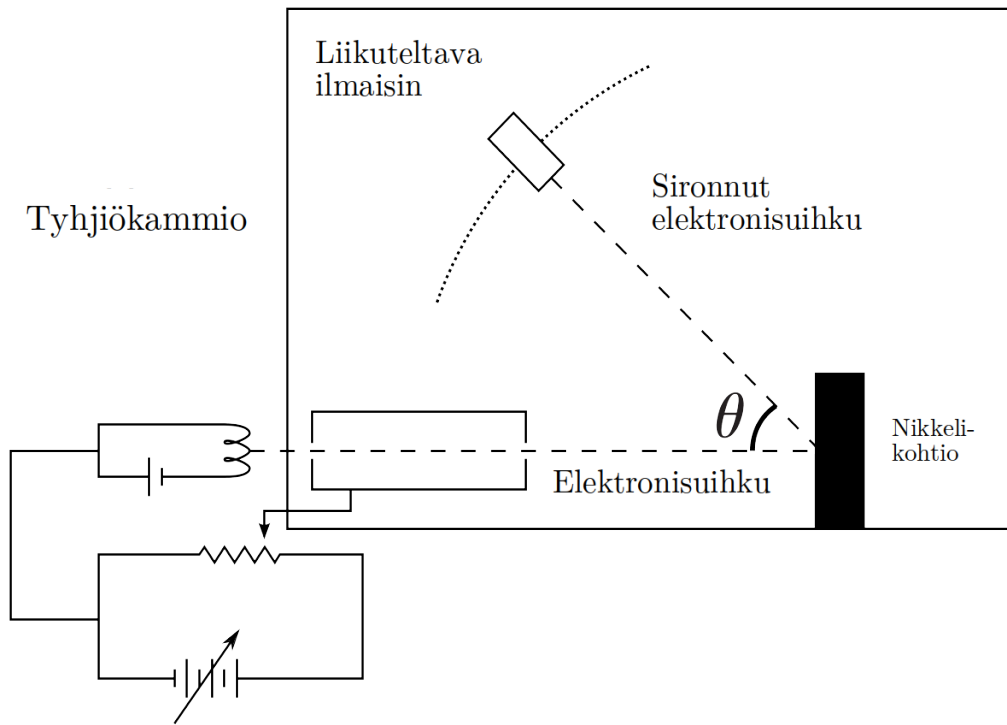
$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

De Broglien yksinkertainen yleistys oli, että sama kaava pätee myös materiahiukkasille, joille liikemäärä määritellään massan ja nopeuden tulona $p = mv$. Tällöin hiukkasen de Broglie-aallonpituus on

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \quad (2.7)$$

Aaltoluonne täydentää Bohrin mallin varsin hienosti, sillä nyt elektronin energiatilat asettuvat sellaisiksi, joilla hiukkasen rata asettuu tasan seisovaan de Broglie-aaltoon. Vuonna 1927 Clinton Davisson ja Lester Germer suorittivat tunnetun kokeen, jossa he havaitsivat kokeellisesti elektronien diffraktion kristallisesta aineesta. Elektronin aaltoluonne oli kiistämätön, mutta vielä ei ollut aivan selvää, mistä aalto oikeastaan koostuu.

Davisson ja Germer tutkivat miten elektronit siroavat kiinteään aineen pinnalta. Klassisen fysiikan perusteella elektroneja pitäisi sirota varsin tasaisesti kaikkiin suuntiin riippumatta juurikaan sirontakulmasta tai elektronien alkuperäisestä nopeudesta. Alkuun tulokset vaikuttivatkin tältä, mutta onnekaan onnettomuuden myötä tyhjiökammioon pääsi ilmaa, mikä muodosti nikkelin pinnalle oksidikerroksen. Oksidi poistettiin kuumentamalla näyte voimakkaasti, minkä jälkeen Davisson ja Germer havaitsivat huomattavasti



Kuva 2.5: Davissonin ja Germerin kokeessa elektronien diffraktio havaittiin nikkelikiteestä tapahtuneen sirontan perusteella.

voimakkaampaa sirontaa tietyillä kulmilla riippuen myös ammuselektronien energiasta.

Tämä herätti tietysti kysymykset mistä uusi havainto johtuu, ja miksi se näkyi vasta kuumentamisen jälkeen. De Broglien aaltohypoteesi selittää, miksi diffraktio on mahdollinen, ja teoria vahvistuikin, kun kuumentamisen huomattiin aiheuttavan nikkelin kiderakenteen muuttumisen. Nikkeli koostuu tavallisesti pienistä kiteistä, mutta kuumentaminen sai aikaan sen, että pienet kiteet yhdistyivät yhdeksi suureksi, jolloin diffraktioilmiö havaittiin huomattavasti selkeämmin.



Kuva 2.6: Max Planck, Louis De Broglie ja Erwin Schrödinger olivat merkittävässä roolissa kvanttifysiikan kehityksessä.

Luku 3

Kvanttimekaniikkaa

De Broglien mullistava ajatus sai tuulta alleen ja varsinkin itävaltalaisfyyssikko Erwin Schrödinger alkoi pohtia aaltoteorian seurauksia. Kvanttimekaniikkaa oli kehitetty jo 20-luvun alussa, mutta tuolloin teoria rakentui vain matemaattisten työkalujen matriisien varaan, kuten Werner Heisenberg sen muotoili. Schrödingerin työn tuloksena tullut yhtälö kuvaa kvanttimekaanista hiukkasta ja se tarjosi hieman fysikaalisemman mallin matemaattisten matriisien tilalle, vaikka sittemmin osoitettiin, että molemmat tavat esittää kvanttimekaniikka ovat yhtäpitäviä keskenään.

3.1 Kaksoisrakokoe

Siirtykäämme historiasta pohtimaan aineen luonnetta tarkemmin. Atomikokoluokan kappaleista, elektroneista, protoneista, neutroneista yms. löydettiin siis aaltoluonne. Tämä jättää koko materian luonteen varsinaiseksi sekasotkuksi. Onko se elektroni nyt aalto, vai hiukkanen? Ongelmaan on itseasiassa löydetty vain yksi ratkaisu.

Kvanttimekaanisen hiukkasen luonteeseen pääsee hyvin käsiksi kaksoisrakokokeen kautta, jonka tunnetuin versio on Richard Feynmanin luentosarjassaan esittämä. Kokeen tulosta on täysin mahdotonta selittää klassisen fysiikan lakien avulla, eikä sen käsittäminen siten ole arkijärjellä ja tutuilla käsitteillä kovin hyvin mahdollista. Parhaimmillaankin voimme vain selittää, miten hiukkaset toimivat, emme niinkään kertoa millaisia ne ovat ja miksi.

3.1.1 Luodit

Ajatuskoe koostuu kolmesta osasta. Kaksoisrakoon lähetetään kolmenlaisia asioita: klassisia hiukkasia, aaltoja ja kvanttiolioita. Klassisten hiukkasten

paikalle voi kuvitella esimerkiksi konekiväärin, joka ampuu suihkun luoteja kohtalaisen laajaan kulmaan kohti kaksoisrakoa ja sen takana olevaa seinää, johon luodit osuttuaan jäävät. Rakojen koko on lähellä ammusten kokoluokkaa, niin että luoti mahtuu niistä hyvin läpi.

Luotien käyttäytyminen kaksoisraossa on varsin yksinkertaista. Luodit eivät vaikuta toisiinsa juuri millään lailla, joten molempien rakojen takse kasaantuu läjä luoteja. Koska ase on epätarkka, luodit tulevat hieman eri suunnista ja saattavat kimpoilla raon reunoista, joten todennäköisyys löytää luoti seinältä on keskittynyt rakojen keskustojen päälle. Jos rakojen välimatka on pieni, löytyy suurin todennäköisyys keskeltä, sillä luoteja päättyy sinne molemmista raoista. Lisäksi luotien havaitaan osuvan seinään aina kokonaisina kappaleina, eli yhdestä kohdasta joko löydetään luoti, tai sitten ei.

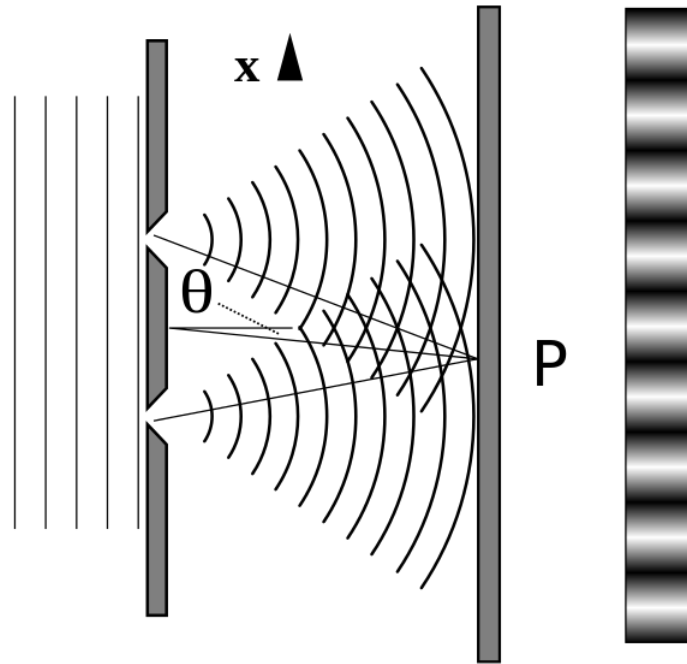
3.1.2 Aallot

Klassisten aaltojen tapauksessa kaksoisraosta tulee mielenkiintoinen. Jos rako asetetaan esimerkiksi veteen, ja suuntaamme tasoaaltoja kohti kaksoisrakoa, havaitaan taustalla interferenssikuvio. Kuvio syntyy, sillä aallot vaikuttavat toistensa kanssa. Aaltojen vuorovaikutus tapahtuu niin sanotun *superpositioperiaatteen* mukaisesti, missä aaltojen poikkeamat lasketaan yhteen. Kaksi samassa vaiheessa olevaa aaltoa vahvistavat toisiaan, ja vastakkaisissa vaiheissa olevat heikentävät toisiaan. Tasoaallon osuessa rakoihin, molemmista raoista lähtee etenemään palloaalto ja aallot vaikuttavat keskenään rakojen takana. Taustalla nähdään korkeita intensiteetin maksimeja ja minimejä. Tätä kutsutaan interferenssikuvioksi.

Erona luoteihin havaitaan lisäksi, että aallon intensiteetti voi saada mitä tahansa arvoja. Luoti joko havaitaan, tai ei havaita, mutta aallon tapauksessa voidaan yhtä hyvin mitata vähän aaltoa tai paljon aaltoa. Jos havaitsijaa siirretään hieman, havaitaan pieni muutos aallon intensiteetissä, mutta mitään selkeää yksikköä tai jaottelua, jolla arvot muuttuvat, ei voida havaita.

3.1.3 Elektronit

Kolmas kohde kaksoisrakoon ovat kvanttimekaaniset hiukkaset. Voimme käyttää tässä esimerkkinä elektronia, olkoonkin, että kaikki muutkin kvanttimekaaniset hiukkaset käyttäytyvät kaksoisraossa vastaavalla tavalla. Kaksoisrakokoe paljastaa elektronien erikoisen luonteen varsin selkeästi. Käytännössä elektronitykki, jolla elektroneja ammutaan, koostuu hehkulangasta, jota lämmitetään sähkövirralla. Tällöin langasta irtaavaa *termisiä* elektroneja, joiden lämpöliikkeen energia riittää irtautumiseen metallihilasta. Elektronit



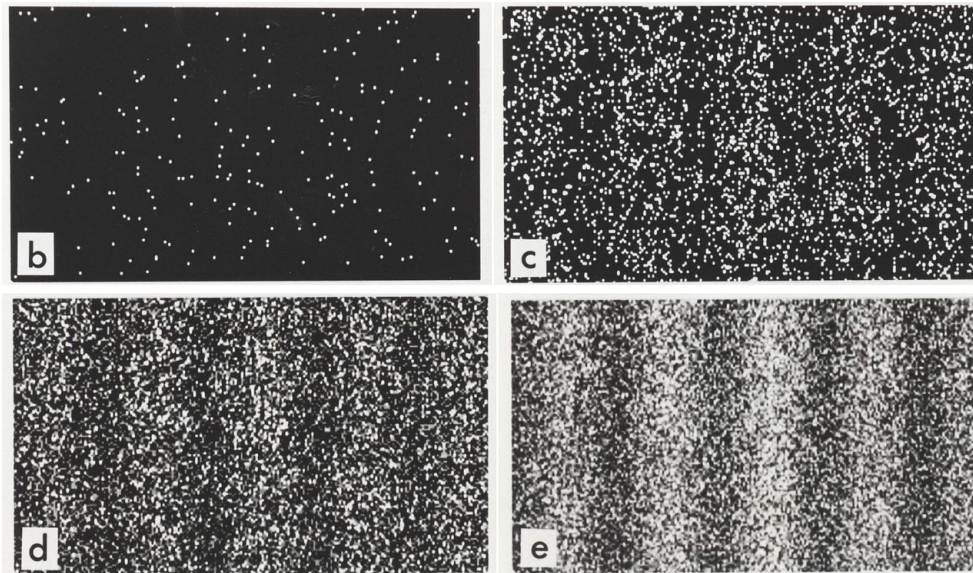
Kuva 3.1: Kaksoisrakokokeesta muodostuu interferenssikuvio aaltojen taipauksessa.

voidaan kiihdyttää sähkökentällä, jolloin ne saavat suurinpiirtein saman nopeuden kohti kaksoisrakoa.

Elektronien havainnointi voidaan tehdä esimerkiksi elektronimonistinputken avulla. Elektronin törmäminen elektronimonistimeen saa aikaan ketjureaktion, jonka sähkövirta voidaan mitata. Havainnollisuuden vuoksi sanotaan vielä, että virta ohjataan kaiuttimelle, joka tällöin päästää klik-äänen elektronin osuessa havaitsijaan.

Ensimmäinen havainto on, että elektronit saapuvat aina kokonaisina yksiköinä havaitsijalle. Kaiuttimesta kuuluu aina samankokoinen klik, eikä koskaan puolikasta tai pitkäksi venynyttä ääntä. Kun havaintolaitetta siirrellään ympäriinsä kuullaan toisissa paikoissa ääniä tiheämmin ja toisissa harvemmin, mutta jokainen ääni on aina samanlainen. Vaikka varjostimelle lisättäisiin toinen havaintolaitte, kuullaan silti vain yksittäisiä klik-ääniä jommasta kummasta havaintolaitteesta kerrallaan. Näin ollen päättelimme, että mitä ikinä saapuukaan varjostimelle, saapuu sinne yksittäisinä ”möykkyinä”, jotka ovat kaikki samanlaisia keskenään. Tässä suhteessa elektronit käyttäytyvät siis kuten luodit, mikä onkin varsin hyvin linjassa sen kanssa, mitä yleensä olemme tottuneet ajattelemaan elektroneista ja hiukkasista. Sen sijaan, kun

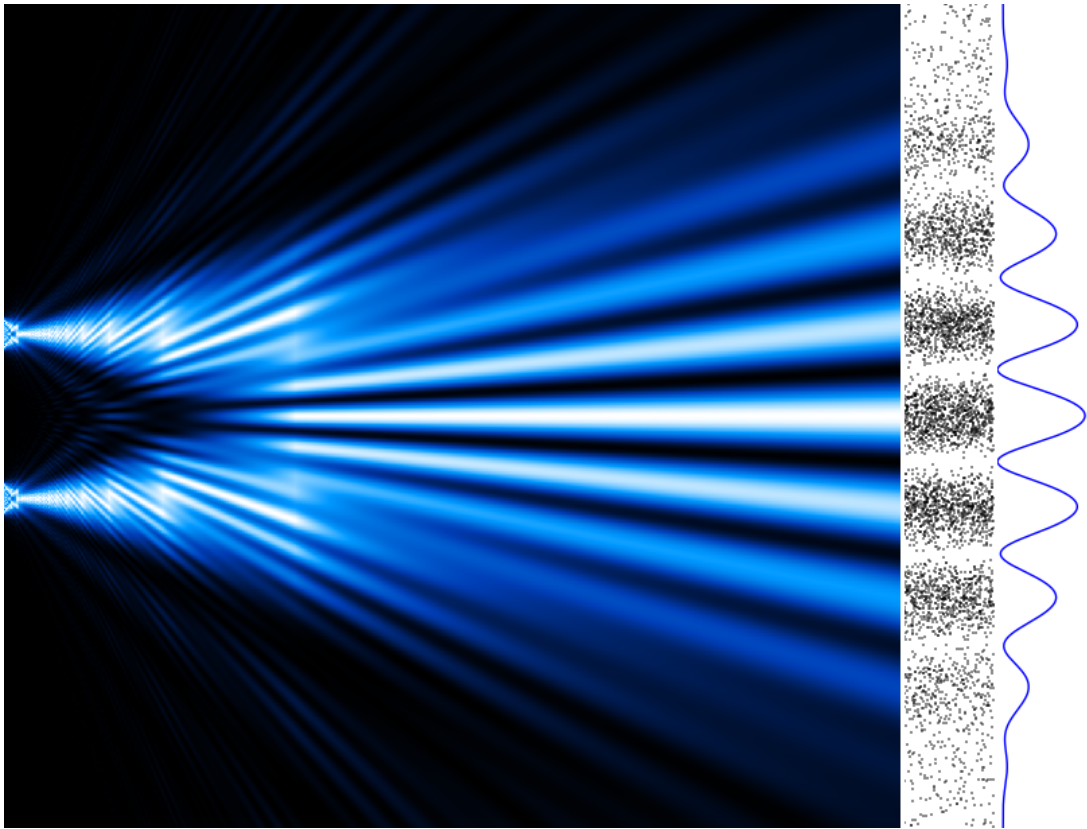
mittaamme elektronien määrää eri kohdissa varjostinta, törmäämme todelliseen yllätykseen.



Kuva 3.2: Elektronien mitattuja paikkoja Akira Tonomuran elektronien diffraktiomittauksesta. Intensiteettimaksimit muodostuvat selvästi näkyviin kun mittausta jatketaan tarpeeksi pitkään.

Kun mittausta jatketaan aikansa, havaitaan selvästi, että elektronit muodostavat varjostimelle interferenssikuvion. Varjostimelta löytyy paikkoja, joihin tulee paljon elektroneja, ja paikkoja, joihin ei tule lainkaan elektroneja, ja muoto on juuri samanlainen kuin aallon intensiteetilläkin.

Kuvassa 3.3 nähdään elektronien todennäköisyysjakauma varjostimella. Pohditaan seuraavaksi, miten kyseinen muoto saadaan aikaan. Koska elektronit saapuvat varjostimelle aina kokonaisina möykkyinä, on varsin järkevää tehdä oletus, että ne kulkevat joko raosta 1 tai raosta 2. Tämä voidaan varmistaa sulkemalla toinen raoista, ja katsomalla millainen jakauma tällöin syntyy. Tuloksena saadaan, kuten olettaa saattaisikin, kasa suoraan raon taakse, ilman mitään hienompaa muotoa. Nyt elektroneja havaitaan useassa kohdassa, jossa niitä ei kahden raon tapauksessa havaittu lainkaan, mikä tarkoittaa, että kahden raon tapauksessa muodostuva jakauma ei ole yksittäisten rakojen jakaumien summa. Tämä osoittaa elektronien vaikuttavan toisiinsa, eli interferoivan. Aluksi ajateltiin, että koska elektroneja yleensä lähtee tykistä varsin paljon, ne törmäilevät toisiinsa ja muodostavat siten interferenssikuvion. Hehkulangan jännitettä laskemalla voidaan elektroneja lopulta ampua käytännössä yksi kerrallaan, siten, että havaintolaitteesta kuuluu vain yksit-



Kuva 3.3: Kaksoisrakokoe elektroneilla. Valkoinen väri visualisoi elektronien tiheyttä ja vasemmassa reunassa nähdään todennäköisyysjakauma elektronin osumisesta varjostimelle.

täisiä ääniä silloin tällöin. Tästä huolimatta interferenssikuvio muodostuu, kun koetta jatketaan niin kauan, että varjostimelle on ammuttu merkittävä määrä elektroneja. Monenlaisia muita varsin kummallisiakin teorioita on esitetty, mutta useimmat niistä on osoitettu kokeilla mahdottomiksi. Esimerkiksi voisi ajatella, että elektroni kulkee jotain hyvin monimutkaista reittiä ja muodostaa siten interferenssikuvion, mutta tällaistenkin perustelujen esittäminen osoittautuu käytännössä mahdottomaksi.

Lopputuloksena havaittiin siis, että elektroni havaitaan aina yksittäisenä ja kokonaisena möykkynä, mutta sen sijainnin todennäköisyys jakautuu raoista kuin aallon intensiteetti. Nimenomaan tässä mielessä elektroni käyttäytyy ”joskus kuin hiukkanen ja joskus kuin aalto”. Elektroni on kuitenkin aina samanlainen, eikä joskus tarkoita tässä sitä, että maanantaisin elektronit ovat kuin hiukkaset ja tiistaisin kuin aallot. Edelleen olisi kuitenkin kiinnostavaa tietää, onko olettamuksemme nyt oikea vai väärä. Kulkeeko elektroni mo-

lemmista aukoista samaan aikaan vai vain toisesta. Jatketaan koetta hieman pidemmälle ja yritetään ottaa asiasta selvää.

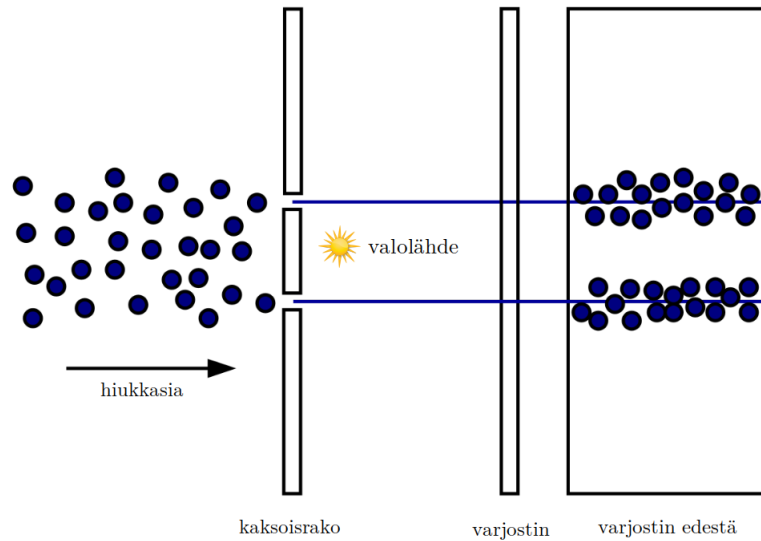
3.1.4 Elektronivahdissa

Elektronien löytämiseen voi käyttää vaikkapa valoa, sillä sähkövaraus sirottaa sitä. Niinpä lisäämme mittauslaitteistoon kirkkaan valolähteen kaksoisraon taakse, kuten kuvassa 3.4. Kummasta raosta elektroni sattuukaan kulkemaan, havaitsemme sillä puolella pienen välähdyksen elektronin sirottaessa valoa. Jos elektroni jollain tavalla jakautuisikin kahtia kulkeakseen molemmista raoista, pitäisi meidän havaita jonkinlainen välähdys molemmilla puolilla!

Tulokseksi saamme, että aina kun kuulemme klik-äänen elektronimonistinputkesta, havaitsemme myös valon välähdyksen. Ja välähdyksenkin havaitsemme vain toiselta puolelta kerrallaan, emme koskaan samaan aikaan molemmilta! Hyvä, olemme saaneet elektronin kiikkiin, tiedämme kummalta puolelta se kulkee, voimme vain kirjata ylös mikä elektroni kulki miltäkin puolelta ja saamme selville, miten kuvio muodostuu.

Kun mittauksia jatketaan, havaitaan, että ylemmästä raosta kertyy yksinään samanlainen kasa, kuin silloin kun alempi rako oli suljettu, ja vastaavasti alemmasta kertyy yksinään samanlainen kasa kuin jos ylempi rako olisi suljettu. Näyttäisi siis siltä, että elektronit eivät kulje molemmista raoista, vaan vain toisesta. Samalla tämä tarkoittaa sitä, että interferenssikuvio on menetetty. Nyt elektronit näyttävät käyttäytyvän juuri kuten luodit, ja menevät kiltisti kasaan rakojen taakse. Jos valon sammuttaa, ilmestyy interferenssikuvio jälleen takaisin.

Kokeen tulos siis riippuu siitä, katsotaanko elektroneja vai ei. Havainnoinnin täytyy siis vaikuttaa elektronien käyttäytymiseen jollain tavalla. Elektronit ovat hyvin pieniä, joten ei ole ihmeäkään, jos vuorovaikutus valon kanssa aiheuttaa muutoksen niiden liikkeessä. Kuten fysiikassa yleensäkin, mittauksen vaikutukset pitää pyrkiä minimoimaan, joten yritetään himmentää valoa ja näin vähentää sen vaikutusta elektroneihin. Ensimmäinen huomio on, että tämä ei lainkaan muuta välähdyksiä, jotka näemme. Jokainen välähdys on yhtä suuri, mutta nyt emme välttämättä aina näe välähdystä, vaikka kuulisimme klik-äänen varjostimelta. Koe osoittaa samalla ohimennen myös valon hiukkasluonteen. Jokainen vuorovaikutus on yhtä merkittävä, eli himmentäminen vain vähensi fotonien määrää, ei niiden energiaa. Tämän vuoksi osa elektroneista pääsee livahtamaan varjostimelle ilman että huomaamme välähdystä. Jatkakaamme kuitenkin koetta pitämällä edelleen kirjaa elektroneista. Kirjataan rakojen 1 ja 2 kautta tulleiden elektronien lisäksi myös ne, joita ei havaita valolla ollenkaan. Nyt havaitut elektronit muodostavat edelleen ka-



Kuva 3.4: Valon avulla voimme havaita, kummasta raosta elektroni kulki. Tämä valitettavasti poistaa samalla interferenssikuvion varjostimelta.

san raon taakse, kuten aiemminkin, mutta ne joita ei havaita, kerääntyvät interferenssikuvioon!

Kuten arvata saattoi, jos elektroni ei vuorovaikuta fotonin kanssa, sen liiketila ei muutu, mutta jos havaitaan välähdyks, fotonin vaikutti elektronin liikkeeseen. Valonvälähdyksen ollessa aina samankokoinen, on vuorovaikutuskin yhtä merkittävä aina kun se tapahtuu. Valon himmentäminen ei siis saa elektronia kiinni, mutta ehkä voisimme pienentää vuorovaikutusta käyttämällä "kevyempää" valoa. Aiemmin saimme selville, että fotonin on hiukkanen ja se kuljettaa liikemäärää joka on kääntäen verrannollinen aallonpituuteen. Käyttämällä suurempaa aallonpituutta saamme siis kevennettyä elektronin ja fotonin välistä "törmäystä". Havaintolaitteiden avulla voisimme periaatteessa käyttää vaikkapa infrapuna-aaltoa tai radioaaltoja.

Luonto on tälläkin kertaa meitä ovelampi. Valolla voi minimissään erottaa asioita, jotka ovat samaa kokoluokkaa aallonpituuden kanssa. Mitä suurempi aallonpituus on, sitä suurempi tulee siis olla kahden pisteen välimatka, jotta ne voidaan erottaa eri pisteiksi. Arvaatkin ehkä jo, mihin tämä kaikki johtaa. Kun aallonpituutta kasvatetaan, ei kokeeseen aluksi tule mitään muutosta. Kun aallonpituutta kasvatetaan lisää, käy elektronin sijainti koko ajan epätarkemmaksi ja epätarkemmaksi. Juuri kun interferenssikuvio alkaa muodostumaan varjostimelle, on aallonpituus kasvanut niin suureksi, että välähdyksestä ei pysty sanomaan, kummalta raolta elektroni tuli. Vastaavasti jos aallonpituutta pienennetään erotuskyvyn parantamiseksi, häviää interfe-

renssikuvio varjostimelta.

Valolähteen säätäminen siten, että samaan aikaan näkisimme sekä interferenssikuvion, että kummasta raosta elektroni kulkee osoittautuu mahdottomaksi. Tässä käsitteimme vain muutaman valoon perustuvan mittaussuomen, mutta sama ongelma koskee kaikkia muitakin mittalaitteita. Jos näet interferenssin, et tiedä mistä raosta elektroni kulki, ja jos tiedät sen, menetät interferenssin.

3.2 Epätarkkuusperiaate

Saksalaisfyysikko Werner Heisenberg ehdotti, että ehkä kyseessä on syvällisempikin luonnonlaki. *Heisenbergin epätarkkuusperiaate* sanoo kaksoisrakokokeen termein, että on mahdotonta suunnitella laitetta, joka mittaa kummasta raosta elektroni kulki ilman, että se samalla vaikuttaa elektroniin niin paljon että interferenssi häviää. Toisaalta, jos laite ei häiritse elektronia, ei sillä saada selvyyttä raostakaan.

Epätarkkuusperiaate on eräs kvanttifysiikan tärkeimpiä periaatteita, eikä sen ohi ole päästy, ja jos kvanttimekaniikka on oikeassa, ei koskaan tulla pääsemäänkään. Mikäli joku joskus onnistuu kiertämään epätarkkuusperiaatteen, vaikkapa kaksoisrakokokeen avulla, tarkoittaa se pohjan putoamista koko kvanttifysiikalta. Se tarkoittaisi, että kvanttimekaniikka antaa epäjohdonmukaisia tuloksia, eikä siten voisi olla hyvä teoria kuvaamaan luonnon toimintaa.

Kysymys siitä, kummasta aukosta elektroni nyt sitten kulkee, on kenties vielä hieman auki. Ainoa vastaus, jonka voimme muotoilla kiteyttääkin kvanttifysiikan vaatiman ajattelutavan. Jos katsomme, tai mittaamalla selvitämme, kummasta raosta elektroni meni, voimme sen myös sanoa. Sen sijaan, jos emme mittaa tai laitteistossa ei ole mitään mikä häiritsee elektroneja, emme voi sanoa kummasta raosta elektroni kulki. Jos yritämme mittaamatta sanoa, kummasta raosta elektroni on mennyt ja sen perusteella tehdä johtopäätöksiä, päädyimme virheellisiin päätelmiin. Jos haluamme kuvata luontoa tarkasti, on tyydyttävä tähän.



Kuva 3.5: Werner Heisenberg

Heisenberg muotoili epätarkkuusperiaatteen alunperin siten, että kappaleen paikan ja liikemäärän epätarkkuudet sitoo toisiinsa Planckin vakio. Paikan x ja liikemäärän x -komponentin p mittauksien epätarkkuuksille pätee

$$\Delta x \Delta p \geq h. \quad (3.1)$$

Toisin sanoen, jos tiedät, missä olet, et tiedä mihin olet menossa, ja jos tiedät mihin olet menossa, et tiedä missä olet! Koska Planckin vakio on hyvin pieni (SI-yksiköissä n. $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js), ongelmaa mittaustarkkuudessa ei havaita makroskooppisella tasolla. Mikään tavallinen mittalaite ei mittaa lähellekään riittävän tarkkoja arvoja.

Päivitys 2021: Aalto-yliopiston tutkimuksessa epätarkkuusperiaatetta pystyttiin kiertämään kahdella lomittuneella rumpukalvolla. Tämä periaatteessa kiertää epätarkkuusperiaatetta, mutta koska kalvojen tulee olla lomittuneessa tilassa, merkitys kvanttimekaniikan perustan vapisemiselle on vielä hieman auki. [Linkki Tiede-lehden artikkeliin.](#)

3.3 Aalto vai hiukkanen?

Kokeidemme perusteella kävi selväksi, että elektroni saapuu varjostimelle aina kokonaisena hiukkasena, ja vuorovaikuttaa valon kanssa aina saman kokoisina välähdyksinä. Tällä perusteella elektroni on ehdottomasti hiukkanen. Mutta mikä sitten aaltoilee?

Elektroni vuorovaikuttaa kokonaisena ”möykkynä”, joten sen oma rakenne ei aaltoile. Elektronin sijainnin *todennäköisyys* kulkee aaltomaisesti. Yleisemmin puhumme mittaustapahtuman todennäköisyydestä kokeessa. Kaksoisrakokeessa elektronin sijainti varjostimella on mittaustulos. Kolme seikkaa kiteyttää elektronin todennäköisyysaallon luonteen. Ensinnäkin kokeen mittaustuloksen todennäköisyyden määrää niin sanottu todennäköisyysamplitudi ψ , joka on matemaattisesti kompleksiluku. Kokeen tuloksen todennäköisyyden määrää todennäköisyysamplitudin neliö

$$P = |\psi|^2.$$

Toiseksi, jos mittaustulos voidaan saada useammalla mahdollisella tavalla, saadaan tuloksen todennäköisyys todennäköisyysamplitudien kautta

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

jolloin todennäköisyyskin lasketaan summan neliöstä, mikä tarkoittaa interferenssiä

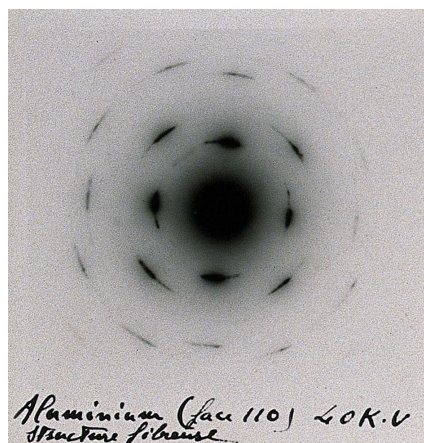
$$P = |\psi_1 + \psi_2|^2.$$

Kolmanneksi, jos koe suoritetaan siten, että saadaan selville kummalla tavalla tulokseen päästiin, interferenssi hajoaa ja tällöin

$$P = P_1 + P_2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2.$$

Jos tässä vaiheessa alkaa hiljalleen sattumaan päähän, niin ei mikään ihmekään. Albert Einsteinkaan ei varsinaisesti koskaan hyväksynyt kvanttifyysiikan todennäköisyyksiin pohjaavaa luonnetta, vaikka hänen osallisuutensa sen kehitykseen olikin hyvin merkittävä valosähköisen ilmiön kautta. Hän oli vahvasti sitä mieltä, että kvanttimekaniikan alta löytyy vielä jokin selitys, joka kiertää epätarkkuusperiaatteen ja tekee maailmasta jälleen deterministisen, eli sellaisen, että alkutilan perusteella voidaan määrittää tarkasti varma lopputulos. Kvanttimekaniikassa voimme sanoa vain lopputuloksen todennäköisyyden, emme muuta. Sellaista selitystä ei löytynyt Einsteinin elinaikana, eikä ole löytynyt sittemminkään. Jo Feynmanin luennoissa 60-luvulla todettiin että näyttää erittäin epätodennäköiseltä, että kvanttifysiikka joskus perustavanlaatuisesti kumottaisiin, eikä kuluneiden 60 vuoden aikana ole löydetty muuta kuin vahvistavia koetuloksia. Tänä päivänä moni arkipäiväinenkin sovellus, kuten puolijohteisiin perustuva elektroniikka tai aurinkopaneelit, perustuvat kvanttimekaniikan teorioihin, mikä vahvistaa teorian asemaa entisestään.

Useimmiten heräävä kysymys on, että miten se sitten toimii. Millainen koneisto aiheuttaa yllä olevat todennäköisyyslait? Kukaan ei ole löytänyt sitä koneistoa, eikä keksinyt intuitiivisesti selkeää selitystä sille, miten interferenssikuvio syntyy. Meillä ei kerta kaikkiaan ole aavistustakaan perustavampaa laatua olevasta mekanismista, jolla koetulokset syntyvät. Fyysikot ovat tavallaan luovuttaneet. Emme tiedä, miten ennustaa eksaktisti kokeen tulos, voimme ainoastaan ennustaa todennäköisyyden sille, mutta luonto vaikuttaa olevan sellainen. Kyseessä on ratkaisematon ongelma, jonka voimme kuvata, mutta emme selitä.



Kuva 3.6: Vanha mittaustulos elektronien diffraktiosta alumiinikiteestä.

Luku 4

Kvanttimekaaninen atomi

Kaksoisrakokoe kuvaa hienosti, millainen luonto on. Se on alunperin teoreettinen ajatuskoe, mutta vuosien saatossa kaksoisrakokokeen tyyppinen koejärjestely on suoritettu fotonin ja elektronin lisäksi monille suuremmillekin hiukkasille. Kvanttimekaniikka tulee kuitenkin tarpeeseen huomattavasti arkisempien asioiden äärellä. Se nimittäin selittää atomin rakenteen erinomaisesti ja sitä kautta ymmärrämme nykyisin esimerkiksi puolijohteiden toimintaa. Kvanttimekaniikka on erityisen hyvä selittämään atomien elektronirakenteen. Paul Dirac, eräs kvanttiteorian tunnetuimmista kehittäjistä, sanoikin, että kvanttimekaniikka selittää paljon fysiikasta ja kaiken kemiasta.

4.1 Bohrin malli

Niels Bohrin parannukset Rutherfordin atomimalliin olivat varsin teoreettisia, sillä mitään fysikaalista mekanismia rakenteelle Bohr ei osannut antaa. Hän onnistui kuitenkin kuvaamaan klassisen fysiikan käsitteillä millainen atomin pitäisi olla, jotta se vastaisi jotakuinkin koetuloksia. Rutherfordin mallissa elektronit ovat pienen ja tiiviin ytimen ympärillä, eikä malli osaa selittää, miten negatiiviset hiukkaset pysyvät positiivisen ympärillä vain paikoillaan. Bohr selitti elektronien pysyvän ytimen ympärillä kiertoliikkeen ansiosta, mutta hän joutui tekemään muutaman oletuksen, jotta atomi tästäkin huolimatta pysyisi koossa. Mallin oletukset, eli niin sanotut Bohrin postulaatit ovat seuraavan kaltaiset:

1. Elektronit kiertävät ydintä ympyrän muotoisilla radoilla (Arnold Sommerfeld muunsi myöhemmin radat elliptisiksi, mikä hieman paransi teoriaa).

2. Elektronin kulmaliikemäärä on kvantittunut, eli se voi saada vain tiettyjä arvoja.
3. Elektronin kiertorata määrittää elektronin energian, ja se voi asettua ainoastaan tietyille radoille. Klassisen mekaniikan lait eivät päde elektronien siirtyessä tilojen välillä.
4. Elektroni ei lähetä säteilyä ollessaan tietyllä kiertoradalla vaan ainoastaan siirtyessään ylemmältä kiertoradalta alemmalle.
5. Kun elektroni hyppää kiertoradalta toiselle, energiaero joko poistuu tai saapuu yksittäisenä valokvanttina eli fotonina, jonka taajuus riippuu suoraan kyseisten kiertoratojen välisestä energiaerosta. Kvantin energian ja säteilyn aallonpituuden välillä vallitsee sama yhteys, jonka Max Planck oli jo esittänyt mustan kappaleen säteilylle: $E = \frac{hc}{\lambda}$, missä λ on fotonin aallonpituus, E on kiertoratojen energiaero ja h on Planckin vakio.

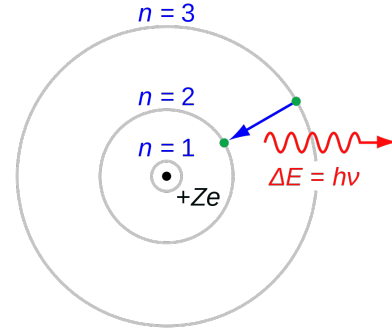


Kuva 4.1: Niels Bohr

Malli tunnetaan myös aurinkokuntamallina, sillä elektronit käyttäytyvät atomissa tällöin kuten planeetat Auringon ympärillä. Vaikka Bohrin mallilla ei voi selittää kovinkaan hyvin vetyä monimutkaisempia atomeja, on malli sen verran helposti ymmärrettävä, että suurin osa ihmisistä käsittää edelleen atomin sen kautta. Bohrin malli onnistui kuitenkin antamaan varsin tyydyttävän selityksen kuumen kaasun lähettämälle säteilylle, olkoonkin, että laskennalliset tulokset olivat tarkkoja vain vetyatomille.

4.1.1 Kuuman kaasun säteily

Jos kiinteiden kappaleiden lähettämä säteily oli tärkeässä roolissa valon hiukkasluonteen selvittämisessä, oli atomimallin kannalta tärkeää tutkia kuuman kaasun lähettämää säteilyä. Kuuman kaasun lähettämä säteily eroaa nimittäin kiinteiden kappaleiden lähettämästä hyvin merkittävällä tavalla. Kiinteästä kappaleesta lähtevä säteily saa jatkuvan jakauman, kuten huomasimme mustan kappaleen spektriä tutkiessamme. Kaasu sen sijaan lähettää *viivaspekttrin*, eli kaasun lähettämä säteily koostuu vain tietyistä, hyvin yksittäisistä aallonpituuksista.



Kuva 4.2: Bohrin mallin mukainen kuva atomista.



Kuva 4.3: Kuuman vetykaasun lähettämässä valossa on näkyvän valon aallonpituusalueella yksi punainen ja neljä sinistä viivaa.

Ilmiö huomattiin jo 1800-luvulla, mutta sille ei keksitty kovinkaan hyvää teoreettista selitystä ennen Bohrin atomimallia. Ruotsalaisfyysikko Anders Ångström tutki jo 1850-luvulla Auringon spektriä ja keksi sen koostuvan pääasiassa vedystä. Sveitsiläinen matemaatikko Johann Balmer puolestaan päätyi tutkimaan Ångströmin mittauksia, ja johti niiden perusteella empirisen kaavan, jolla vedyn spektriviivojen aallonpituudet pystyy laskemaan. Vuonna 1888 ruotsalainen Johannes Rydberg vuorostaan esitti kaavan, jolla voidaan laskea muidenkin alkuaineiden kaikki spektriviivat, kun käytetään jokaiselle alkuaineelle määritettävää vakioa. Esimerkiksi vedylle kaava on

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (4.1)$$

missä R on Rydbergin vakio vedylle ja n ja m positiivisia kokonaislukuja, siten, että $n < m$.

Valon ja aineen kvantittunut luonne huomioon ottaen ei ole välttämättä yllättävää, että atomista lähtee vain tiettyjä aallonpituuksia. Ennen Bohria

ainoa ehdotus tuli Walther Ritziltä, joka ehdotti, että elektronien magneettiset ominaisuudet saavat ne värähtelemään ytimen läheisyydessä joissain olosuhteissa, mikä lähettäisi sähkömagneettista säteilyä. Bohrin malli tuottaa Rydbergin kaavan suoraan ja ennustaa kuuman vedyn lähettämän säteilyn hyvin.

Tarkastelkaamme seuraavaksi millainen vetyatomi Bohrin mallilla rakentuu klassisen fysiikan mukaan. Elektroni kiertää ympyräradalla, joten siihen kohdistuu keskeisvoima. Keskeisvoimana toimii sähköinen vetovoima ytimen ja elektronin välillä. Sen suuruus saadaan Coulombin laista

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (4.2)$$

missä q_1 ja q_2 ovat elektronin ja ytimen varaukset ja r niiden välimatka. Vedyn tapauksessa molempien varausten suuruus on alkeisvaraus $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, joten voima saa muodon

$$F = k \frac{e^2}{r^2}$$

Kappaleeseen kohdistuva keskeiskiihtyvyys riippuu radan säteestä ja kappaleen ratanopeudesta

$$a_n = \frac{v^2}{r} \quad (4.3)$$

Newtonin toisen lain mukaan kappaleeseen kohdistama voima saa aikaan kiihtyvyyden siten, että $F = ma$, joten kun nämä yhdistetään saadaan elektronin liikeyhtälöksi

$$k \frac{e^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r}, \quad (4.4)$$

josta voimme ratkaista elektronin nopeuden radan säteen funktiona

$$v = \sqrt{\frac{ke^2}{m_e r}}. \quad (4.5)$$

Tämän avulla voidaan laskea elektronin energia, sillä klassisen fysiikan mukaan kineettinen energia on

$$E = -\frac{1}{2} m_e v^2 = -\frac{ke^2}{2r}. \quad (4.6)$$

Negatiivinen merkki johtuu merkkivalinnasta jolloin ytimen ympärille sitoutuneen elektronin energia on negatiivinen ja sen irrottamiseen tarvitaan energiaa.

Tähän asti olemme pysytelleet tiukasti klassisessa fysiikassa, mutta koska malli poikkeaa siitä jonkin verran, on seuraava hyppy kvanttimekaaninen.

Oletamme nimittäin elektronin aaltoluonteen, eli hyödynnämme de Broglien aallonpituutta. Elektronin aallonpituus riippuu sen liikemäärästä, eli massan ja nopeuden tulosta

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}.$$

Oletamme, että elektronin mahdollisia ratoja ovat sellaiset, joilla aalto asetuu seisovaksi aalloksi ytimen ympärille. Tällöin elektronin aallonpituus on radan pituuden jokin monikerta. Ympyräradan pituus on $2\pi r$, joten

$$2\pi r = n\lambda,$$

missä n on luonnollinen luku, jota tässä yhteydessä kutsutaan *kvanttiluvuksi*. Sijoittamalla de Broglien aallonpituus tähän ehtoon saadaan

$$2\pi r = n \frac{h}{m_e v} \quad (4.7)$$

johon voimme sijoittaa nopeuden yhtälöstä 4.5

$$2\pi r = \frac{nh}{m_e \sqrt{\frac{ke^2}{m_e r}}}, \quad (4.8)$$

ja josta saamme lopulta ratkaistua säteeksi r

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e e^2 k} \approx 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}. \quad (4.9)$$

Arvo tunnetaan yleisesti *Bohrin säteenä*, joka vastaa hyvin tarkkaan määritettyä vetyatomin sädettä. Vedyn energiatilat saadaan määritettyä säteen avulla, sillä kvanttiluvun n arvot antavat elektronin korkeammat energiatilat. Vetyatomin perustilan energia on siis

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \approx -13,6 \text{ eV},$$

mikä tarkoittaa siis, että jotta vetyatomista saa irroitettua elektronin, eli ionisoitua vedyn, tarvitaan 13,6 eV energiaa. Valon aallonpituus joka tähän riittää on

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 299\,792\,458 \text{ m/s}}{13,6 \text{ eV}} \approx 91 \text{ nm},$$

mikä vastaa kohtalaisen voimakasta ultraviolettisäteilyä.

Kaikki muut mahdolliset vedyn energiatilat voidaan laskea perustilan avulla. Koska energia riippuu vain säteestä kaavan 4.6 mukaan, ja säteen suuruus riippuu ainoastaan siitä, monennellako viritystilalla ollaan, eli kvanttiluvusta n (kaava 4.9), saadaan vedyn energiatilat laskettua kaavalla

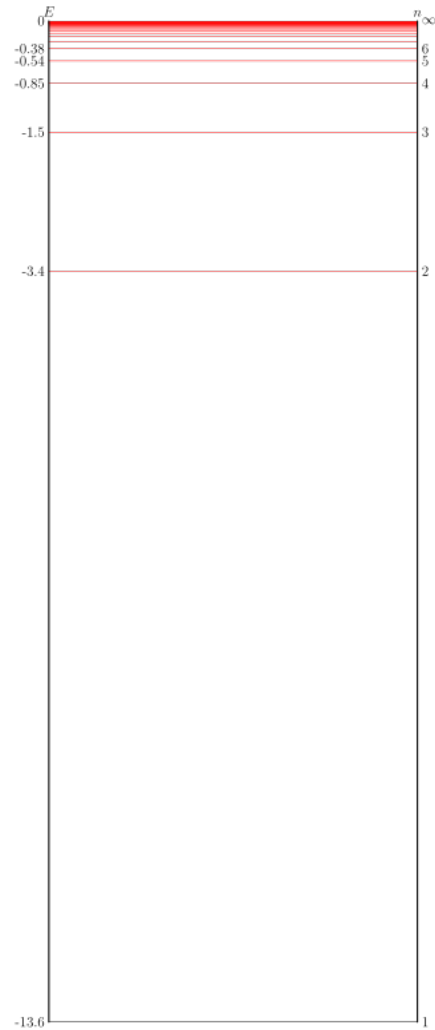
$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = \frac{-13,6 \text{ eV}}{n^2}. \quad (4.10)$$

Tästä saamme ensimmäiseksi viritystilan energiaksi n. -3,4 eV, toisen n. -1,5 eV, ja niin edelleen kohti nollaa. Mitä pienempi energian arvo on, sitä heikemmin elektroni on sitoutunut atomin ympärille ja sitä vähemmän energiaa tarvitaan sen irrottamiseen. Kaavasta voidaan siis laskea tarkalleen, mitkä ovat ainoat mahdolliset energiatilat, joilla elektroni voi olla.

Bohrin viides postulaatti sanoo, että energian vaihto tapahtuu fotonien välityksellä, eli jotta elektroni voi siirtyä perustilalta viritystilalle, täytyy sen absorboida fotoni, jonka energia vastaa juuri energieroeroa tilojen välillä. Luonto pyrkii yleensä aina energiaminimiin, minkä vuoksi korkeammassa energiatilassa oleva elektroni pyrkii palaamaan takaisin perustilalle. Tällöin atomi vuorostaan emittoi fotonin, jonka energia vastaa täsmälleen tilojen välistä erotusta.

Korkeamman viritystilan purkautuminen voi lisäksi tapahtua niin sanottujen välitilojen kautta, eli esimerkiksi kolmannella tilalla oleva elektroni saattaa ensin palata toiselle tilalle, ja sieltä ensimmäiselle, jolloin atomi emittoi kaksi fotonia. Tästä muodostuu vedyn spektri. Kuumassa kaasussa lämpöliike virittää elektroneja korkeammille tiloille, joista elektroni palaa takaisin kohti perustilaa. Tällöin emittoituu energiatilojen eroa vastaava fotoni ja havaitsemme tiettyä aallonpituutta olevaa valoa.

Itseasiassa näkyvän valon aallonpituudet, jotka ovat kuvassa 4.3, muodostuvat elektronin tipahtaessa korkeammalta tilalta toiselle energiatilalle



Kuva 4.4: Vetyatomin energiatilat.

($n = 2$). Välimatka perustilalle on niin suuri, että kaikki siirtymät tällä välillä tuottavat ultraviolettisäteilyä ja vastaavasti kolmannelta tilalta ylöspäin energiaerot ovat niin pieniä, että säteily on infrapuna-alueella.

4.1.2 Kohti jaksollista järjestelmää

Bohrin malli ennustaa vedyn spektrin oikein, mutta sen pätevyysalue rajoittuu vetyyn ja sen kaltaisiin atomeihin, kuten ionisoituun heliumiin ja kahdesti ionisoituun litiumiin. Kun elektroneja on useampia kuin yksi, spektrin rakenne muuttuu johtuen elektronien keskinäisestä vuorovaikutuksesta, eikä Bohrin yksinkertainen malli anna enää oikeita tuloksia. Vaikka elektronien keskinäisen vuorovaikutuksen yrittäisi mallintaa laskemalla niiden välisen sähköisen vuorovaikutuksen, ei tulos tule enää oikein Bohrin mallilla, sillä elektronit eivät ole kuten malli antaa ymmärtää.

Louis de Broglien teoria elektronin aaltoluonteesta herätti itävaltalaisfyysikko Erwin Schrödingerin mielenkiinnon, ja hän alkoi perehtyä asiaan. Hän piti vuonna 1925 seminaarin de Broglien teoriasta, ja eräs Arnold Sommerfeldin oppilaista ehdotti, että ehkäpä elektronia voisi kuvata aaltoyhtälöllä. Schrödinger työsti yhtälöä muutaman viikon ja esitteli tuloksensa laajamittaisena julkaisusarjana vuonna 1926. Aiemmin Heisenberg oli muotoillut kvanttimekaniikan lait epätarkkuusperiaatteen pohjalta matriisien avulla, mutta nyt teoria sai uudenlaisen esitystavan aaltoyhtälöön perustuen. Schrödingerin menetelmä on ehkä käsitteellisesti hieman helpommin ymmärrettävä, aallon ollessa jotain mitä pystymme kuvailemaan sanallisesti, minä vuoksi Schrödingerin tapa on yleisemmin käytössä etenkin kun tutustuu kvanttimekaniikkaan. Matriisit taas ovat matemaattisesti varsin käteviä, joten kvanttimekaaniset tietokoneohjelmat kirjoitetaan usein niiden pohjalta. Kolmas tapa muotoilla kvanttimekaniikka saatiin Richard Feynmanin väitöskirjassa vuonna 1948, kun hän kehitti Paul Diracin työstä täydellisen muotoilun kvanttimekaniikalle polkuintegraalien avulla.

Schrödingerin atomimalli perustuu siis elektronin aaltoluonteeseen ja rakentuu aaltoyhtälön pohjalta. Schrödingerin yhtälö korvaa kvanttimekaniikassa Newtonin II lain, eli se kertoo hiukkasen liikkeen. Yhtälö on yleisessä tapauksessa muotoa

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x,t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(x,t) + V(x) \psi(x,t) \quad (4.11)$$

Menemättä yhtälön yksityiskohtiin tarkemmin, on Schrödingerin yhtälö useamman muuttujan differentiaaliyhtälö, jonka ratkaisuna saadaan aaltofunktio ψ , joka yleisessä tapauksessa riippuu sekä ajasta, että paikasta. Aaltofunktio on täydellinen kuvaus hiukkasesta ja sisältää kaiken mahdollisen

tiedon siitä. Kuten aiemmin kaksoisrakokokeen yhteydessä totesimme, aaltofunktion neliö antaa hiukkasen sijainnin todennäköisyyden. $V(x)$ on systeemistä riippuva potentiaalitermi, mikä esimerkiksi vetyatomille tulee Coulombin potentiaalin muotoon.

Vetyatomin tapauksessa Schrödingerin yhtälö ei riipu ajasta, joten yhtälö saa muodon

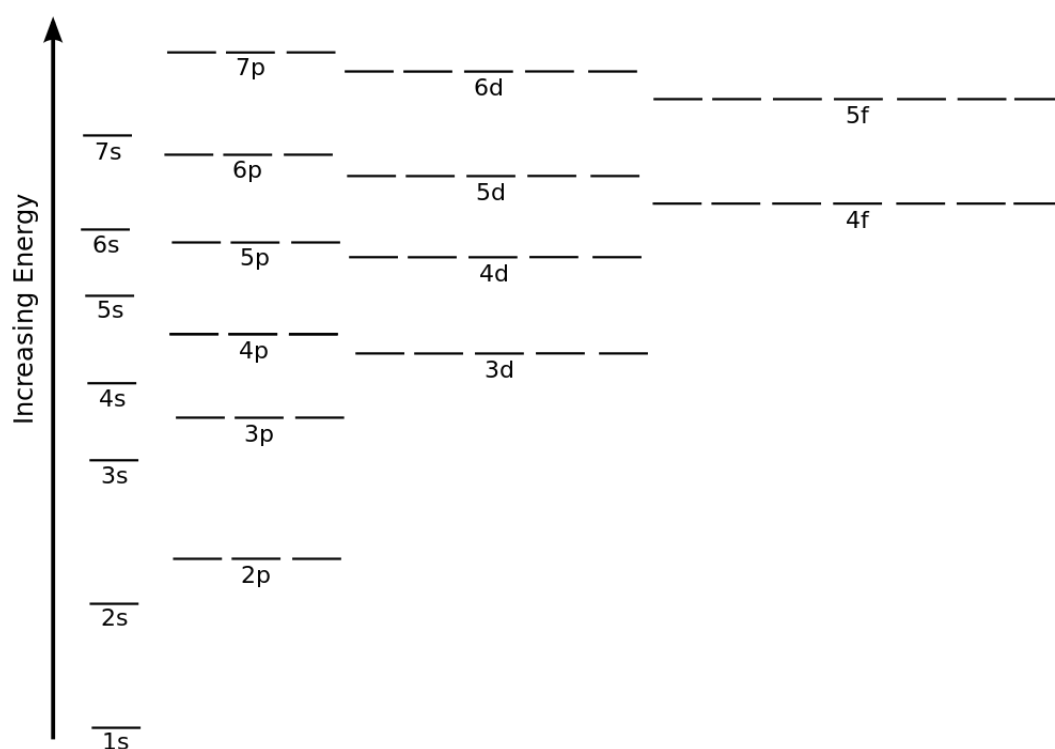
$$E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(x) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}\psi(x), \quad (4.12)$$

mistä ratkaisuna saadaan elektronien aaltofunktiot ja energiatasot E . Ratkaisusta tulee tarkempi kuin Bohrin mallissa, ja se sisältää yhteensä neljä erilaista *kvanttilukua*. Pelkän pääkvanttiluvun mukaan lasketut energiatilat vastaavat itseasiassa juuri Bohrin mallin mukaisia tiloja. Muiden kvanttilukujen myötä elektronirakenteesta tulee kuitenkin hienorakeisempi. Elektronin mahdolliset tilat jakautuvat niin sanottuihin *orbitaaleihin*, jotka asettuvat kuten kuvassa 4.5. Elektronien asettuminen orbitaaleille tapahtuu kahden periaatteen mukaisesti. Ensinnäkin elektronit pyrkivät aina matalimpaan mahdolliseen energiatilaan, minkä johdosta $1s$ -orbitaali täyttyy ensimmäisenä. Toinen sääntö, jota elektronien tulee noudattaa on ns. *Paulin kieltosääntö*, jonka mukaan kaksi elektronia ei voi olla samassa kvanttitilassa keskenään. Elektronien kvanttimekaanisen spin-ominaisuuden myötä jokaiselle orbitaalille mahtuu kaksi elektronia. Spin on puhtaasti kvanttimekaaninen suure, ja se voi elektronin tapauksessa saada arvon $\frac{1}{2}$ tai $-\frac{1}{2}$, joita kutsutaan spin-ylös ja spin-alas -tiloiksi.

Itseasiassa käy ilmi, että spin on magneettinen suure, mikä jakaa magneettikentässä energiatilat yhä pienempiin lohkoihin, niin, että kutakuinkin jokaiselle elektronille löytyy omanlaisensa energiatila. Kuvan 4.5 rakenne riittää kuitenkin jaksollisen järjestelmän rakentamiseen ja alkuaineiden elektronirakenteen määrittämiseen.

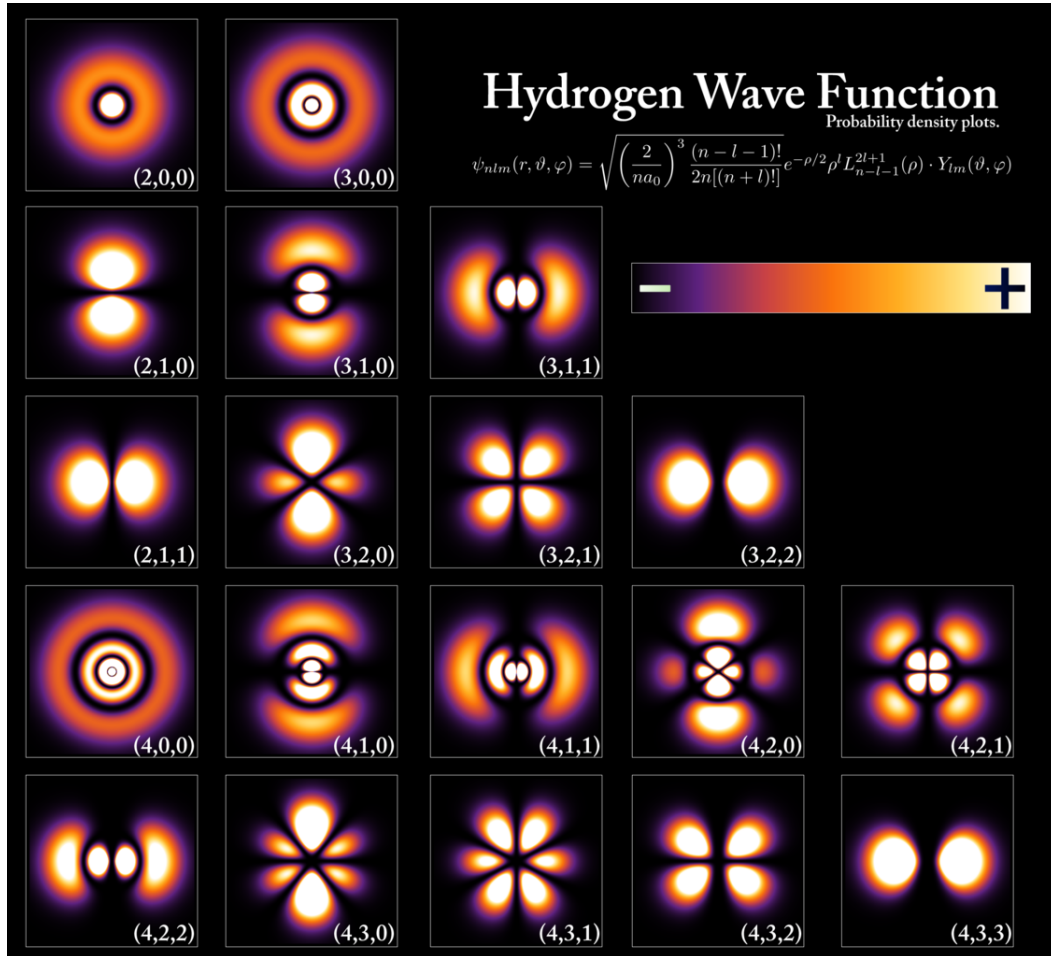
Elektronin energia on tärkeä suure kemian näkökulmasta, sillä elektronirakenne määrittää, millaisia kemiallisia sidoksia atomi muodostaa. Jonkinlainen fysikaalinen kuva atomista olisi silti mukava saada, ja tämä voidaankin selvittää kun tutkitaan elektronin sijainnin todennäköisyyttä. Koska elektronin paikasta ytimen ympärillä ei voi sanoa mitään tarkasti, on tyydyttävä tutkimaan alueita, joissa elektronin sijainti on todennäköisin. Vedyn eri orbitaaleja on useita kuvassa 4.6.

Kuvasta nähdään, että elektronin fysikaalinen sijainti voi olla hyvin erikoisen mallinen, ja toisinaan siellä saattaa olla rakoja, joissa elektronia ei voida löytää lainkaan. Usein kirjallisuudessa nähdään käytettävän termiä elektroniverho tai elektronipilvi, jotka tavallaan kuvaavat orbitaaleja. Näissä mal-leissa on käytännössä kyse orbitaaleista, ja siitä, että elektronin sijaintia ei voi paikallistaa yhteen kohtaan, kuten Bohrin mallissa vielä yritetään. Verho



Kuva 4.5: Atomin energiatasot jakautuvat orbitaaleihin.

tai pilvi onkin lähinnä runollinen kuvaus orbitaaleista, joista atomi todellisuudessa rakentuu.



Kuva 4.6: Vetyatomin elektronin orbitaalien muotoja. Mitä kirkkaampana kohta näkyy, sitä todennäköisempää elektronin on olla kyseisessä kohdassa. Yläkulmassa on pallokoordinaatistossa ratkaistu vedyn aaltofunktio.

Luku 5

Ydin

Rutherfordin kokeessa löytyi atomin ydin. Kokeen perusteella osattiin sanoa, että ydin on positiivisesti varautunut, mutta sen rakenteesta ei ollut vielä kovin tarkkaa tietoa. Rutherford muotoili mallin, jossa alkeisydin on vetyatomilla, ja muut ytimet rakentuvat vedyistä. Rutherford nimesi vety-ytimen protoniksi (kreikaksi ensimmäinen), mitattuaan että protoneja irtoaa typpi-atomeista törmäyksissä. Rutherfordin kokeen kaltaisilla mittauksilla pystyttiin hyvin pian määrittämään myös, että ytimet olivat raskaampia kuin niiden sähkövaraus antoi olettaa, joten rakenteessa piti olla muutakin. Yhteinen konsensus oli pitkään, että ytimessä on sisäisiä elektroneja, jotka tasapainottavat varausta vaikuttamatta oleellisesti massaansa.

Rutherford kuitenkin teoretisoi jo 1920 että ytimessä on toisenlainenkin hiukkanen, ja nimesi tämän myöhemmin neutroniksi.

Yhdessä James Chadwickin kanssa he aloittivat pitkälliset kokeet neutronin löytämiseksi, mutta kuten Rutherford jo ennakoikin, silloisilla laitteilla neutronin löytäminen ei ollut kovinkaan helppoa, ja niinpä tutkimukset jäivät tuloksetta 1920-luvulla. 1930-luvulla saksalaisfyysikot Walther Bothe ja Herbert Becker huomasivat, että korkeaenergisien alfasäteilyn osuessa keveisiin alkuaineisiin emittoituu erittäin läpitunkevaa säteilyä, jonka suunta ei muutu sähkökentässä. He olettivat, että kyse on gammasäteilystä. Havaittu säteily oli kuitenkin läpitunkevampaa kuin aiemmin siihen mennessä kohdattu gammasäteily, joten asia jäi vielä hieman auki.



Kuva 5.1: James Chadwick

Kaksi vuotta myöhemmin Marie Curien tytär, fyysikko niin ikään, Irène Joliot-Curie ja hänen aviomiehensä Frédéric Joliot huomasivat, että osuessaan parafiiniin tai johonkin muuhun runsaasti vetyä sisältävään aineeseen tämä tuntematon säteily saa aikaan korkeaenergisiä protoneja. Periaatteessa gammasäteily olisi voinut selittää tämänkin tuloksen, mutta tarkempi tutkimus osoitti, että irroittaakseen näin korkeaenergisia protoneja, pitäisi gammasäteilyn olla niin korkeaenergistä, ettei energian ja liikemäärän säilyminen ole mittausten valossa mahdollista.

Chadwick kuuli tuloksista, eikä hän uskonut gammasäteilyteoriaan. Hän suoritti useita kokeita ja osoitti, paitsi ettei gammasäteily tule kysymykseen, myös että säteily koostui neutraaleista hiukkasista, joiden massa on samaa luokkaa protonin kanssa. Sama massa mahdollistaa, että protoni saa korkean energian törmäyksessä ilman, että törmäävän hiukkasen tarvitsee omata jättömän suurta energiaa. Jo vuonna 1935 Chadwick sai Nobel-palkinnon neutronin löytämisestä.



Kuva 5.2: Marie Curie tyttärensä Irenen kanssa. Radioaktiivisuuden vaaroja ei tunnettu vielä, kun säteilyä tutkittiin. Sekä Marie, että hänen tyttärensä kuolivat säteilyn aiheuttamiin sairauksiin. Poikkeuksen teki Marien aviomies Pierre, joka jäi hevostörmäyksen alle.

Heisenberg rakensi, varsin nopeasti neutronin löytymisen jälkeen, ydinmallin, jossa ydin koostuu protoneista ja neutroneista. Enrico Fermi selit-

ti pian myös beta-hajoamisen johtuvan neutronin hajoamisesta protoniksi ja elektroniksi, joten malli selitti koetuloksia varsin hienosti. Teoretisoinnin jälkeen neutronisäteilyllä tehtiin varsin paljon kokeita, ja Lise Meitner, Otto Hahn ja Friz Strassmann saivatkin halkaistua vasta kehitellyn ytimen jo vuonna 1938 luoden ensimmäisen keinotekoisen fissioreaktion.

Ydinfysiikka kehittyi räjähdysmäisesti toisen maailmansodan aikana. Koska tieteiden historiassa ei ole saman katon alle kokoontunut työskentelemään niin suurta joukkoa alansa johtavia fyysikoita kuin Manhattan-projektissa, jonka tavoitteena oli ydinpommin rakentaminen. Projektissa työskenneltiin uskomattomalla teholla, mikä mahdollisti paitsi ensimmäiset energialaue tuotavat reaktorit, myös ensimmäisen ydinpommin jo vuonna 1945.

5.1 Ytimien luokittelu

Eri alkuaineet eroavat toisistaan *järjestysluvun* Z mukaan. Järjestysluku määrittää, montako protonia ytimessä on, mikä määrittää myös neutraalin atomin elektronien lukumäärän. Kaikilta alkuaineilta on kuitenkin löydetty versioita, joiden massat poikkeavat toisistaan. Ytimessä voikin siis olla hyvin vaihtelevia määriä neutroneita protonien lisäksi. Ytimen *massaluvuksi* A kutsutaan siinä olevien ydinhiukkasten, eli *nukleonien* lukumäärää. Tämä saadaan laskettua laskemalla yhteen neutroniluku N ja järjestysluku Z

$$A = N + Z \quad (5.1)$$

Ytimiä voidaan vertailla toisiinsa kolmen käsitteen avulla.

- **Isotoopit** ovat saman alkuaineen ytimiä, joilla on eri neutroniluku. Koska protonimäärä on sama, ovat isotoopit kemiallisesti täysin samanlaisia, mutta tarkoissa mittauksissa nähdään, että ne ovat hieman erimassaisia.
- **Isotonit** ovat ytimiä, joilla on sama neutroniluku, mutta eri massaluku. Isotonit ovat keskenään kaikki eri alkuainetta.
- **Isobaarit** ovat ytimiä, joilla on sama massaluku. Myös isobaarit ovat eri alkuainetta, mutta niissä on yhtä monta ydinhiukkasta, eli ne ovat likimain saman massaisia.

Eri ytimiä on tapana merkitä alkuaineen kemiallisella tunnuksella, jonka yläkulmaan merkitään massaluku ja alakulmaan järjestysluku. Esimerkiksi ^1_1H tai $^{235}_{92}\text{U}$. Toisinaan myös neutroniluku kirjoitetaan erikseen näkyviin, jolloin se laitetaan oikeaan alanurkkaan ja mikäli atomi on ionisoitunut, kirjataan varaus oikeaan ylänurkkaan. Esimerkiksi $^5_3\text{Li}^+$.

5.2 Atomien massat

Koska atomit ovat hyvin pieniä, niiden massat on tapana ilmaista käyttäen atomimassayksiköitä. Tarkoissa mittauksissa havaitaan, että vapaat protonit ja neutronit ovat itseasiassa hieman raskaampia, kuin ytimeen sitoutuneet, minkä vuoksi massalukua ei voi suoraan käyttää atomin massana. Lisäksi neutroni on hieman protonia raskaampi. Standardiksi valikoitui hiili-12-atomi, jossa on sopivasti kuusi kappaletta kumpaakin nukleonia. Näin yksi atomimassayksikkö on täsmälleen kahdestoistaosa $^{12}_6\text{C}$ -atomin massasta. Atomimassayksikön lyhenne on u, joskin myös vanha lyhenne amu esiintyy edelleen jonkin verran kirjallisuudessa.

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m(^{12}_6\text{C}) \approx 1,660\,539 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Einsteinin esitti massan ja energian ekvivalenssin kuuluisassa kaavassaan

$$E = mc^2. \quad (5.2)$$

Yhtälön mukaan massa on yksi energian muoto, jota voi muuntaa muihin energialajeihin. Tämä tulee selvästi esille atomi- ja hiukkaskokoluokassa. Atomin massa on pienempi, kuin sen rakenneosien yhteenlaskettu massa. Tämä selitetään siten, että osa atomin massasta muuntuu atomin ytimen (ja pienessä määrin myös elektronien) *sidosenergiaksi*.

Atomin ja sen rakenneosien massojen erotusta kutsutaan *massavajeeksi* Δm . Sen suuruus saadaan laskemalla

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n + Zm_e - m_{\text{atomi}}, \quad (5.3)$$

missä m_p on protonin massa, m_n neutronin massa ja m_e elektronin massa. Taulukkokirjoissa on tyypillisesti listattuna aina neutraalien atomien massa, joten elektronien massat täytyy huomioida laskussa, vaikka laskussa laske- taankin ytimien massavajetta.

Massavaje muodostaa siis atomin sidosennergian, minkä avulla voidaan päätellä kuinka tiukasti ydinhiukkaset ovat sitoutuneet ytimeen. Elektronien sidosenergia on niin pieni, että se voidaan yleensä jättää huomiotta.

Ytimen sidosenergia E_b on siis

$$E_b = \Delta mc^2. \quad (5.4)$$

Sidosenergia kuvaa hyvin vahvan vuorovaikutuksen voimakkuutta. Jos las- kemme esimerkiksi raudan isotoopin 56 sidosennergian saamme noin 492,275 MeV.

Yhden ydinhiukkasen keskimääräinen sidosenergia, jota kutsutaan *sidososuudeksi*, on raudan tapauksessa

$$b = \frac{E_b}{A} = \frac{492,275 \text{ MeV}}{56} = 8,7906 \text{ MeV}.$$

Sidososuus kuvaa likimääräisesti sitä, kuinka paljon energiaa tarvittaisiin irrottamaan yksi nukleoni ytimestä. Elektronien sidosenergiat ovat yleensä korkeintaan kymmenien elektronivolttien luokkaa, joten ydinhiukkasen sidosenergiat ovat noin miljoonakertaiset huolimatta hylkivästä sähköisestä vuorovaikutuksesta ytimen sisällä.

Massan ja energian ekvivalenssi tuo käyttöön myös toisen yksikön, joka on usein hyvin käytännöllinen atomi-, ydin- ja hiukkasfysiikassa. Koska $m = \frac{E}{c^2}$, voidaan massa ilmoittaa energian ja nopeuden yksikön suhteen. Lisäksi usein on tapana asettaa valonnopeuden arvoksi 1 ja verrata muita nopeuksia siihen, jolloin massan yksiköksi saadaan $1 \frac{\text{eV}}{c^2}$. Vaikka yksikössä on valonnopeuden neliö mukana, puhekielessä sanotaan silti usein massan yksiköksi elektronivoltti. Atomimassayksikön suuruinen massa sisältää itseasiassa jo varsin paljon energiaa, sillä

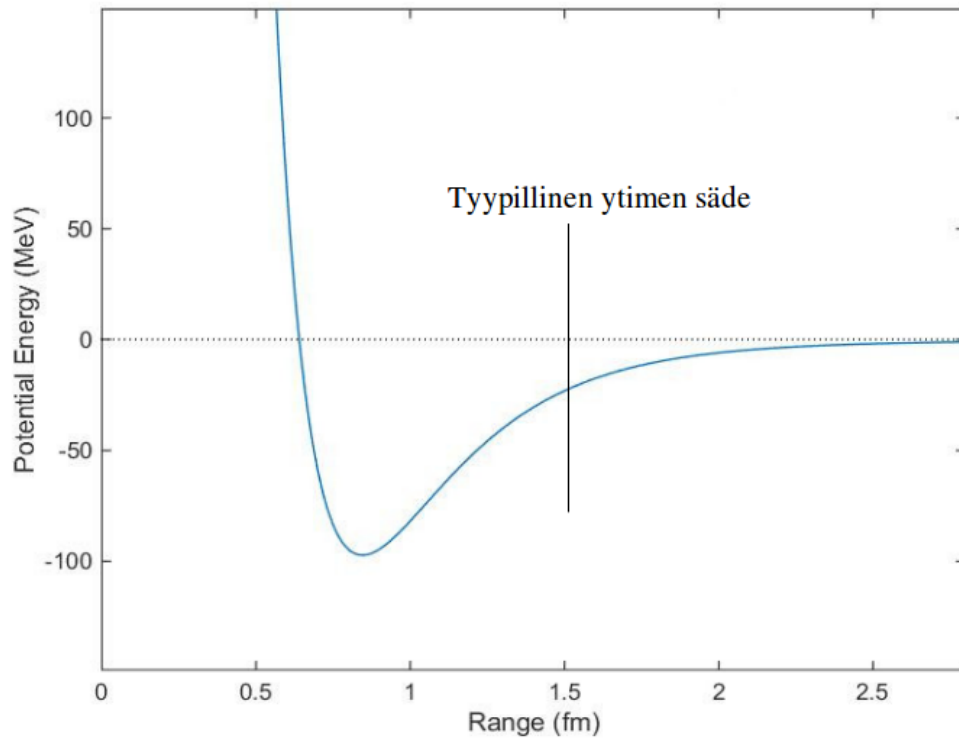
$$1 \text{ u} \approx 931,5 \text{ MeV}/c^2.$$

5.3 Ytimen rakenne

Neutronin löytyminen ei vielä selittänyt kaikkea ytimestä, vaikka sen avulla päästiinkin eroon teoreettisesti ongelmallisista ytimen sisäisistä elektroneista. Protonien välinen sähköinen hylkimisvoima nimittäin säilyy neutroneista huolimatta, joten tälle piti keksiä jokin selitys. Kvanttimekaniikan soveltumista ytimen kuvaamiseen ei pidetty niinkään ongelmana, sillä Schrödingerin yhtälö ei välitä siitä mitä se asetetaan kuvaamaan, kunhan siihen saadaan jostain oikeanlaiset voimat paikoilleen. Tunnettuja vuorovaikutuksia olivat vain sähkömagneettinen vuorovaikutus ja gravitaatio, eikä kumpikaan näistä kyennyt selittämään ongelmaa lainkaan. Niinpä seuraava oletus olikin, että ydintä pitää kasassa jokin uudenlainen vuorovaikutus.

Jo Rutherfordin kokeessa saatiin selville, että α -hiukkasten ja aineen ytimien välinen vuorovaikutus oli pelkästään sähköistä, joten mikä voima ydintä ikinä kasassa pitääkään on kantamaltaan niin lyhyt, että se rajoitettu käytännössä vain ytimen sisälle. Lisäksi ydinvoiman on oltava hyvin vahva verrattuna kahteen tunnettuun vuorovaikutukseen. Sähkömagneettinen vuorovaikutus on huomattavasti gravitaatiota voimakkaampi, ja jo hyvin vahva ytimen mittakaavan etäisyyksillä. Vahvan vuorovaikutuksen on oltava selvästi tätä

voimakkaampi, sillä käytännössä mitkään makroskooppiset ilmiöt tai atomien elektronien vuorovaikutukset eivät pysty hajottamaan ydintä, jossa protonit jo valmiiksi hylkivät toisiaan.



Kuva 5.3: Vahva vuorovaikutus muuttuu äärimmäisen lyhyillä etäisyyksillä hylkiväksi, ja laskee lähelle nollaa heti kun etäisyys kasvaa ytimen mittakaavaa suuremmaksi.

Ytimen kuvaaminen kvanttimekaniikalla tuo siihen tiettyjä yhtäläisyyksiä atomin elektronirakenteen kanssa. Kuten atomin elektronirakenteestakin, ytimestä löytyy myös perustila, jossa nukleonit ovat asettuneet pienimmille mahdollisille energiatasolle. Jos ydintä pommitetaan korkeaaenergisillä hiukkasilla, se voidaan saada elektronien tapaan virittyneeseen tilaan, ja myös ydin emittoi fotonin tämän viritystilän purkautuessa. Selkein ero on energioiden kokoluokassa, joka on ytimessä noin miljoonakertainen elektronikuoren siirtymiin verrattaessa. Ytimestä emittoituvaa fotonia kutsutaankin yleensä γ -säteilystä, joka on samalla korkeaaenergisin sähkömagneettisen säteilyn luokka. Kuten atomeille, myös ytimille voidaan mitata spektri, josta voidaan määrittää ytimen kvanttilojen energiat.

Eroavaisuuksia elektronirakenteeseenkin on. Ytimen varausjakauma on

esimerkiksi huomattavasti tasaisempi kuin atomin yleisesti. Lisäksi ydin saat-
taa toisinaan emittoida fotonin sijasta jonkin hiukkasen. Radioaktiivisen ha-
joamisen yhteydessä syntyvä α ja β -säteily ovat peräisin ytimestä. α -säteily
koostuu ${}^4_2\text{He}$ -ytimistä. Kyseisellä isotoopilla on poikkeuksellisen suuri sidoso-
suus, minkä vuoksi se irtoaa ytimestä mielellään juuri sen kokoisena kimp-
puna. β -säteily taas koostuu elektroneista, tai sen antihiukkasista, positroneista.
Myös hiukkassäteilyn spektri sopii kvanttimekaanisiin energiatiloihin.

β -säteily aiheutti itseasiassa aluksi ongelman, sillä sen havaittiin olevan
ytimestä lähtöisin olevia elektroneja, ja elektronien läsnäolo ytimessä todet-
tiin jo aiemmin hankalaksi malliksi. Lisäksi β -säteilyn energia ei sopinut mal-
leihin, sillä sen energijakauma on hyvin jatkuva, eikä viivaspektri, kuten α -
säteilyllä. Itseasiassa ongelma oli sen verran merkittävä, että Niels Bohr meni
jopa niin pitkälle, että hän ehdotti, että ehkä energia ei säily β -hajoamisessa.
Tämä on tietävästi viimeinen kerta, kun energian säilymislakia on todella
epäilty fysiikassa. Oikeaan suuntaan pääsi Wolfgang Pauli, joka oletti vuonna
1930, että energia säilyy, mutta osa energiasta poistuu ytimestä hiukkasena,
jota ei silloisella tekniikalla saatu havaittua. Hiukkasen täytyy olla sähköi-
sesti neutraali ja sellainen, että vahva vuorovaikutuskaan ei vaikuta siihen.
Enrico Fermi nimesi hiukkasen *neutriinoksi* rakentaessaan β -hajoamisen teo-
riaa Paulin päätelmien pohjalta.

Suorat kokeelliset vahvistukset neutriinolle saatiin vasta 1954, mutta teo-
ria kuvasi hajoamisen muuten niin hyvin, että sitä pidettiin jo aikaisemmin
varsin vakuuttavana. Neutriino ei koe vahvaa eikä sähköistä vuorovaikutusta
ja sitä pidettiin myöskin massattomana varsin kauan (uusissa tutkimuksis-
sa on havaittu, että sillä on äärimmäisen vähäinen massa). Sen ilmeneminen
ydinprosessissa toi siten kuvioon myös uuden vuorovaikutuksen, jota kut-
sutaan *heikoksi vuorovaikutukseksi*. Lisäksi β -hajoaminen oli ensimmäinen
prosessi, jossa oleellisesti syntyi uusia hiukkasia. Fotonien ja α -hiukkasten
emissiot pystytään selittämään täysin protonien ja neutronien uudelleen jär-
jestäytymisenä, mutta elektronin emittoituminen ytimestä tarkoittaa, että
yksi neutroni muuttuu protoniksi. Vaikka voisimme ajatella, että jokin voi-
ma sitoo protonin, elektronin ja neutriinon neutronin sisälle, ei näin kuiten-
kaan ole, vaan neutroni muuttuu protoniksi ja prosessissa vapautuva energia
emittoituu tällä kertaa hiukkasina, elektronina ja neutriinona.

Ydin on likimain pallon muotoinen, ja sen sädettä voi arvioida kaavalla

$$r = r_0 \sqrt[3]{A}, \quad (5.5)$$

missä $r_0 \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Luku 6

Vuorovaikutukset ja hiukkasfysiikan standardimalli

Tässä kohdassa historiaa tarinamme menee hieman ajallisesti sekaisin, sillä hiukkasfysiikan kehitys ja vuorovaikutuksien ymmärtäminen on tapahtunut sittemmin hieman pidemmän ja asteittaisemman kehityskulun kautta, ja siitä saa kenties paremman kuvan mikäli tarkastelemme kokonaisuutta emmekä rakenna sitä aikajärjestyksessä. Mitä uudempaan aikaan tullaan, sitä harvemmin fysiikan läpimurtoja voidaan muutenkaan enää henkilöidä yksittäiseen tutkijaan, sillä suurissa tutkimusryhmissä työskentelee kymmeniä, jopa satoja fyysikoita. Uusia hiukkasia löydettiin hiukkasfysiikan villeinä vuosina lähes päivittäin, kun tehokkaat hiukkaskiihdyttimet saatiin käyttöön. Jonkin aikaa näyttikin, että maailmankaikkeus on kaikkiaan hyvin sekava paikka. Näiden hiukkasten alta paljastui kuitenkin yhtenäisiä rakennneosia, ja standardimalliksi kutsuttu hiukkasfysiikan teoria on rakentunut näiden alkeishiukkasten tutkimuksen myötä. Standardimallin nykyinen versio valmistui kutakuinkin 1970-luvun lopulla.

Standardimalli on ns. *kvanttikenttäteoria* ja pitää sisällään alkeishiukkas-
set ja perusvuorovaikutukset ja on vieläpä mukavasti sopusoinnussa kvanttimekaniikan ja suppean suhteellisuusteorian kanssa. Kvanttikenttäteoriassa esimerkiksi sähkökenttä itsessään on kvantittunut. Fysiikka yleisesti sen sijaan on kaukana valmiista, sillä gravitaatiovuorovaikutus ei kuulu standardimalliin lainkaan. Sen lisääminen tekisi standardimallista *kaiken teorian*, mutta se on toistaiseksi osoittautunut vähintäänkin haasteelliseksi. Kvanttikenttäteorioiden kehitys alkoi jo 30-luvulla Diracin yrittäessä yhdistää erityistä suhteellisuusteoriaa kvanttimekaniikkaan. Dirac kvantisoi sähkökentän, mutta vasta 1947 Hans Bethe onnistui tekemään ensimmäisiä laskuja, jotka vastasivat vastikään tehtyjä uusia mittaustuloksia. Tämän jälkeen Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger ja Richard Feynman saivat työstettyä *kvant-*

tielektrodynamiikan (QED) teorian matemaattisesti valmiiksi ja saivatkin 15 vuotta myöhemmin yhdessä Nobel-palkinnon QED:n kehittämisestä.

QED selittää varattujen hiukkasten ja fotonien välisen vuorovaikutuksen äärimmäisen tarkasti, se on toistaiseksi ylivoimaisesti tarkimpiin mittaustuloksiin päässyt fysiikan teoria. Richard Feynman kutsuikin sitä fysiikan kruununjalokiveksi. Vastaavaa menetelmää on yritetty soveltaa myös ytimen kuvaamiseen, ja 10 vuotta QED:n valmistuttua *kvanttiväridynamiikan* (QCD, quantum chromo dynamics) kehittäminen alkoi. QCD:n on tarkoitus kuvata kvarkkien välisiä vuorovaikutuksia samaan tapaan kuin QED kuvaa valon ja aineen välistä vuorovaikutusta, mutta teoriaa ei ole saatu hiottua vieläkään aivan yhtä täydelliseksi.

6.1 Standardimallin sisältö

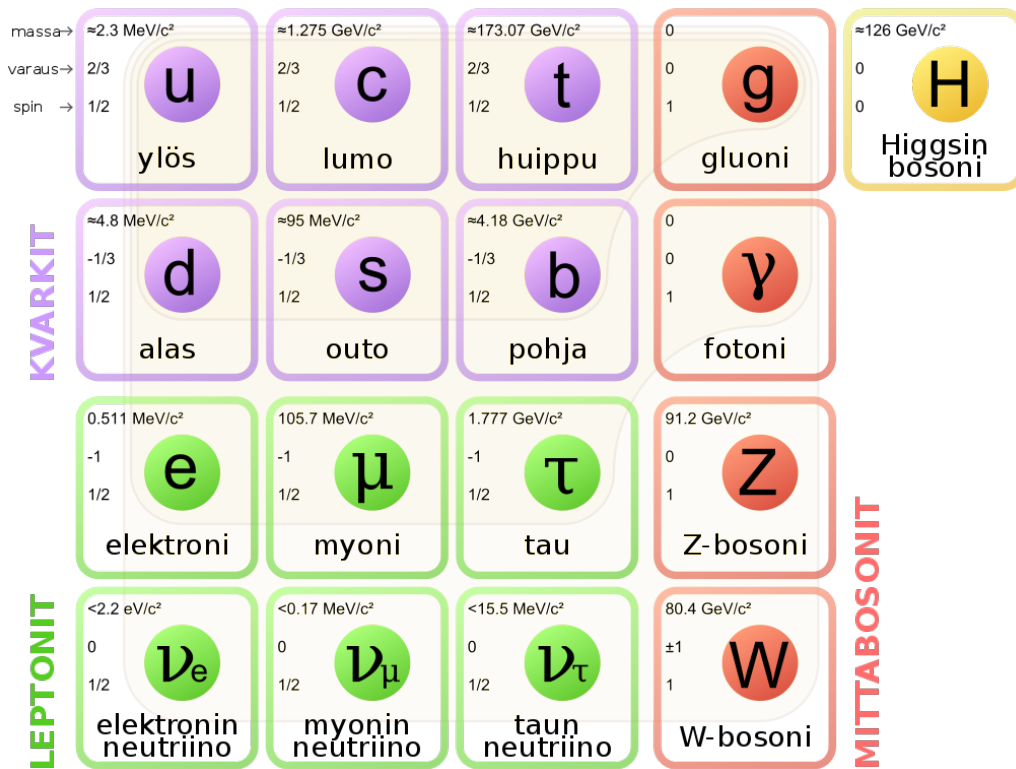
Standardimalli sisältää kaikki tällä hetkellä tunnetut alkeishiukkaset, sekä vuorovaikutuksien välittäjähiukkaset. Hiukkasissa on kuutta eri *makua* kvarkkeja sekä kuusi erilaista leptonia. Välittäjähiukkaslajeja on neljä ja niiden lisäksi on vielä Higgsin hiukkanen, kuten kuvassa 6.1 näkyy.

Välittäjähiukkasten rooli on välittää vuorovaikutuksia, joista fotonit toimii sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjänä, gluonit vahvan ja Z ja W-bosonit heikon vuorovaikutuksen välittäjänä. Varsinainen aine koostuu kvarkeista ja leptoneista. Kvarkkeja ei ainakaan toistaiseksi ole kyetty havaitsemaan yksittäisinä hiukkasina, vaan ne esiintyvät joko kolmikkona tai kvarkki-antikvarkkiparina. Leptonit, kuten elektroni, sen sijaan esiintyvät vain yksinään.

6.1.1 Kvarkit

Kvarkit ovat nykyäsityksen mukaan alkeishiukkasia, jotka muodostavat muita hiukkasia joita kutsutaan yleisesti *hadroneiksi*. Kvarkkeja tunnetaan tällä hetkellä kuutta makua: ylös (u), alas (d), outo (s), lumo (c), huippu (t) ja pohja (b). Huippu ja pohjakvarkkeja kutsutaan toisinaan myös totuudeksi ja kauneudeksi, mikä kertoo hiukkasfyysikoiden taipumuksesta runollisuuteen, kun kuvaavammat nimet alkavat loppua. Eräs standardimallin ongelmista on, että se ei oikein osaa selittää miksi kvarkkeja on juuri kolme paria (u ja d, s ja c sekä t ja b). Saattaa ollakin, että kvarkkeja löydetään vielä lisää, mikä suurempia hiukkaskeihdyttimiä vielä rakennetaan.

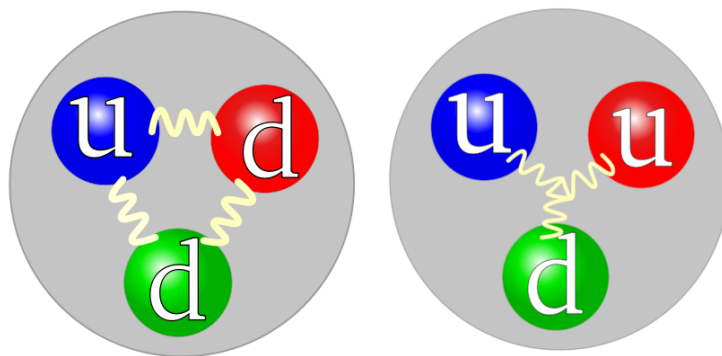
Kaikki tavallinen aine koostuu ainoastaan ylös ja alas-kvarkkeja. Ne ovat kvarkeista selvästi keveimpiä. Raskaammista kvarkeista koostuvat hiukkaset eivät ole useinkaan kovin pitkäikäisiä. Tavallisimmista hadroneista protoni



Kuva 6.1: Standardimallin mukaiset alkeishiukkaset

sisältää kaksi u-kvarkkia ja yhden d-kvarkin kun taas neutroni sisältää kaksi d-kvarkkia ja yhden u-kvarkin.

Kvarkkien sähkövaraus on hieman erikoinen, sillä vaikka alkeisvarausta pidetään piiminpänä mahdollisena varauksena, ovat kvarkkien varaukset kuitenkin murto-osia tästä. U-kvarkki on varaukseltaan $2/3$ alkeisvarauksesta ja d-kvarkki $-1/3$.



Kuva 6.2: Neutroni ja protoni koostuvat kvarkeista

Luku 7

Hiukkastutkimus

Hiukkasfysiikan tutkimus on varsin haasteellista kohteiden kokoluokan takia. Meillä ei ole toivoakaan erottaa edes yksittäistä atomia valomikroskoopilla, ja hiukkasfysiikassa tutkitaan atomin ytimen rakenneosia, joten päästäksemme tutkimaan ytimen kokoluokkaa tarvitaan hienostuneita laitteita ja korkeita energioita. De Broglien laki kertoo hiukkasen aallonpituuden, kun tunnetaan sen liikemäärä

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \quad (7.1)$$

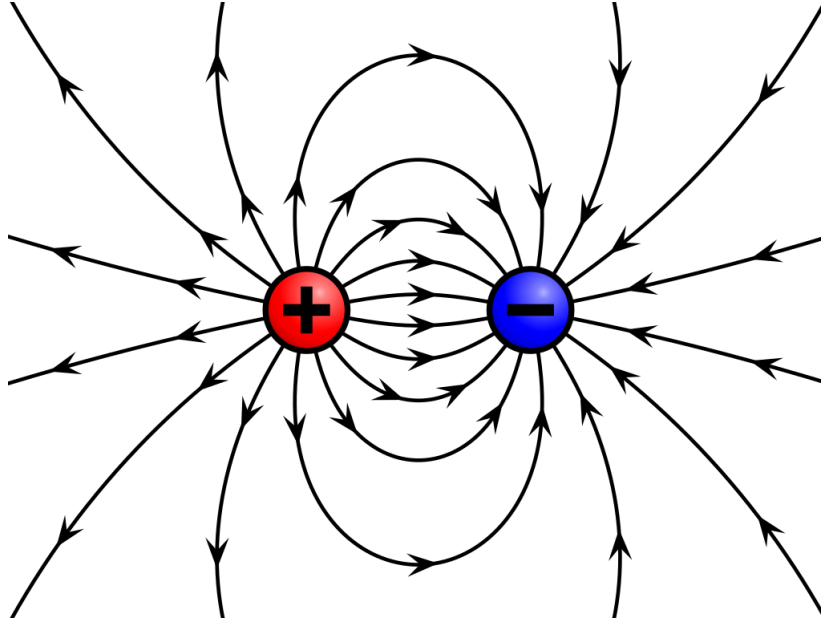
Koska aallonpituus on kääntäen verrannollinen nopeuteen, saadaan hiukkasen aallonpituus pienemmäksi kiihdyttämällä se suurempaan nopeuteen. Mitä pienempi hiukkasen aallonpituus on, sitä pienempiä kohteita sillä voidaan tutkia. Hiukkasfyysikot tarvitsevatkin aina vain suurempia hiukkaskiihdyttimiä, jotta he voivat tutkia aina vain pienempiä kohteita.

Uusien hiukkasten löytäminen on myös tärkein tapa todentaa standardimallia. Mikäli kokeissa havaitaan kokonaan uudenlaisia hiukkasia, täytyy standardimallia korjata. Suuri osa hiukkasista on kuitenkin niin massiivisia, että niitä ei havaita tavallisessa ympäristössämme, vaan tarvitsemme suurien energien törmäyksiä. Massan ja energian ekvivalenssi mahdollistaa raskaiden hiukkasten syntymisen keveistä, mikäli niillä on riittävän paljon kineettistä energiaa. Esimerkiksi vuonna 2012 löydetyn Higgsin hiukkasen aikaan saaminen ei onnistunut vielä Fermilabin Tevatron kiihdyttimellä, vaan vasta CERNin uudella LHC-kiihdyttimellä.

7.1 Sähkö- ja magneettikentät

Hiukkasten kiihdyttäminen perustuu aina sähkö- ja magneettikenttiin, sillä niiden avulla varattuun hiukkaseen saadaan kohdistettua voima. Hiukkaskiihdyttimet toimivatkin ainoastaan varattuihin hiukkasiin.

Sähkökenttä muodostuu sähkövarausten välille siten, että kenttä lähtee positiivisesta varauksesta ja menee negatiiviseen. Homogeeninen sähkökenttä saadaan muodostettua esimerkiksi varattujen levyjen välille, jolloin kenttään asetettuun hiukkaseen vaikuttaa vakiovoima.



Kuva 7.1: Positiivinen varaus toimii sähkökentän lähteenä ja negatiivinen nieluna.

Positiivisesti varattu hiukkanen liikkuu kentän suunnassa ja negatiivisesti varattu kentän suuntaa vastaan. Tämä vastaa luonnollisesti kokemustamme siitä, että saman merkiset varaukset hylkivät toisiaan, ja erimerkkiset vetävät toisiaan puoleensa. Sähkökenttiä käytetään erityisesti hiukkasten nopeuden lisäämiseen, sillä hiukkanen kulkee suoraan kentän suunnassa. Hiukkaseen, jonka varaus on q , kohdistuva voima sähkökentässä, jonka voimakkuus on $\vec{E}$ on

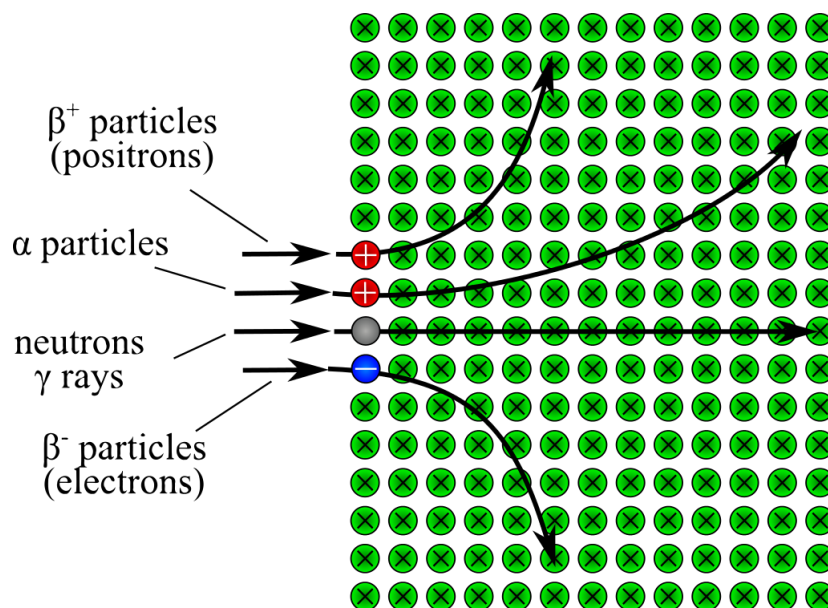
$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (7.2)$$

Magneettikenttiä käytetään puolestaan hiukkasen suunnan muuttamiseen. Magneettikentässä olevaan hiukkaseen kohdistuu voima, joka on kohtisuorassa sekä magneettikenttää, että hiukkasen liikesuuntaa vastaan, joten magneettinen voima muuttaa varatun hiukkasen liikkeen suuntaa. Magneettikenttä vaikuttaa ainoastaan liikkuvaan varattuun hiukkaseen, ja magneettisen voiman suuruus onkin

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (7.3)$$

missä $\bar{B}$ on magneettikentän voimakkuus, $\bar{v}$ hiukkasen nopeus ja $\times$ merkitsee vektoreiden *ristituloa*. Useimmiten magneettikenttä on kohtisuorassa hiukkasen nopeutta vastaan, jolloin lauseke yksinkertaistuu muotoon

$$F = qvB. \quad (7.4)$$



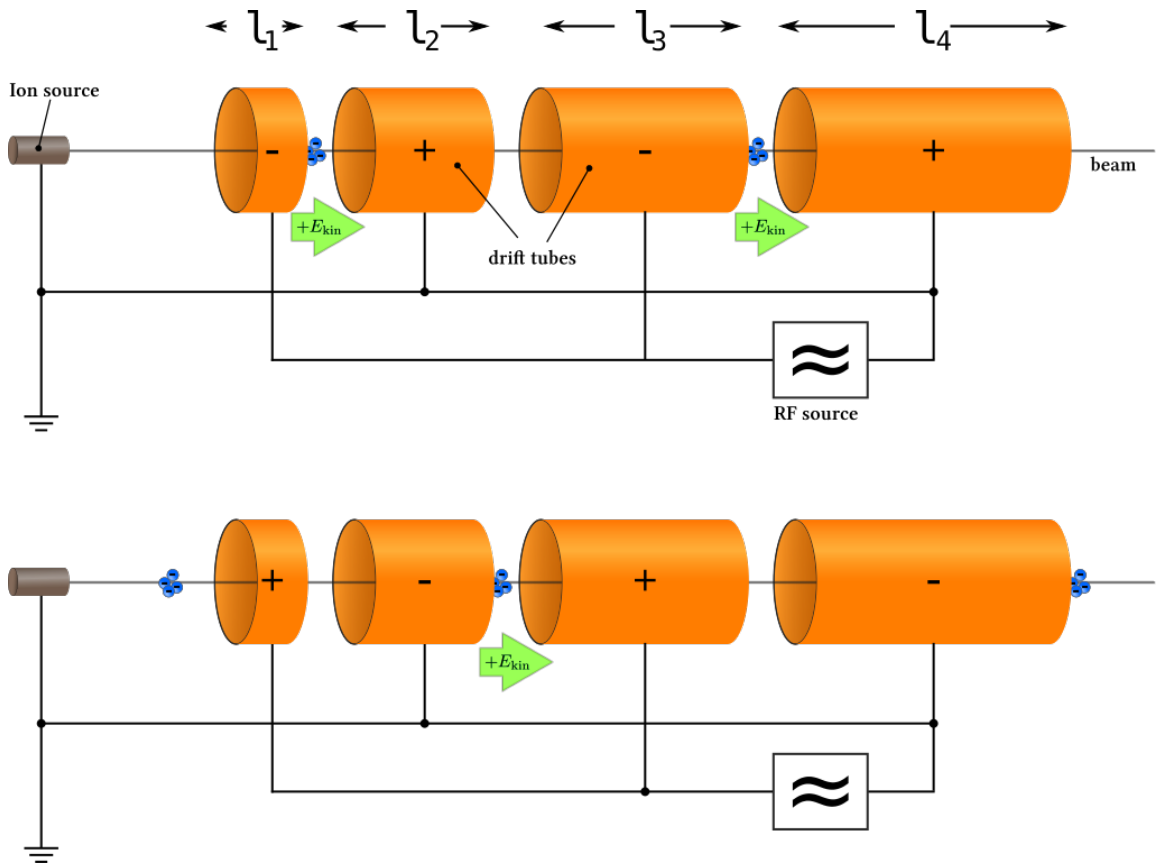
Kuva 7.2: Positiivisesti varatut hiukkaset kaartavat magneettikentässä vasemmalle, ja negatiivisesti varatut oikealle. Mitä raskaampi hiukkanen on, sitä loivempaa kaarta pitkin se kulkee. Neutraaliin hiukkaseen, kuten gamma-kvanttiin magneettikenttä ei vaikuta lainkaan.

7.2 Lineaarinen hiukkaskiihdytin

Hiukkaskiihdyttimen rakentaminen on periaatteessa varsin yksinkertaista. Tarvitaan voimakas sähkökenttä, joka kiihdyttää varattuja hiukkasia, ja jonkinlainen lähde, josta varattuja hiukkasia saadaan. Toimintaidea on periaatteessa sama kuin katodisädeputkissa, mutta suurentamalla jännitettä saadaan hiukkasille aina vain suurempia nopeuksia. Hiukkaskiihdyttimien kehitys nopeutui sotien jälkeisinä vuosina ja sen jälkeen niistä alkoi tulla arkipäiväisiä työvälineitä korkeaenergisten ilmiöiden fysiikassa.

Hiukkasen saama kineettisen energian lisäys riippuu jännitteestä. Jännitteen nostaminen ei ole kuitenkaan loputtomiin mahdollista. Hiukkasen saamaa kineettistä energiaa voidaankin lisätä käyttämällä pienempää jännitettä

useaan kertaan. Lineaarinen kiihdytin koostuu useista putkista, jotka varataan vuoronperään positiiviseksi ja negatiiviseksi siten, että putkessa kulkevat varatut hiukkaset kokevat putken varauksesta muodostuvan hylkivän tai vetävän voiman aina niin, että vastakkaismerkkinen varaus on hiukkasen edessä, ja saman merkkinen takana (kuva 7.3). Putken sisällä kenttä ei vaikuta, joten hiukkanen kulkee putken läpi vakionopeudella ja kiihtyy suurempaan nopeuteen jälleen seuraavassa välissä. Koska hiukkasen nopeus kasvaa jokaisen putken välissä, joudutaan putkia pidentämään, jotta vaihtojännite ehtii kääntyä sopivan suuntaiseksi, eikä näin jarruta hiukkasia.

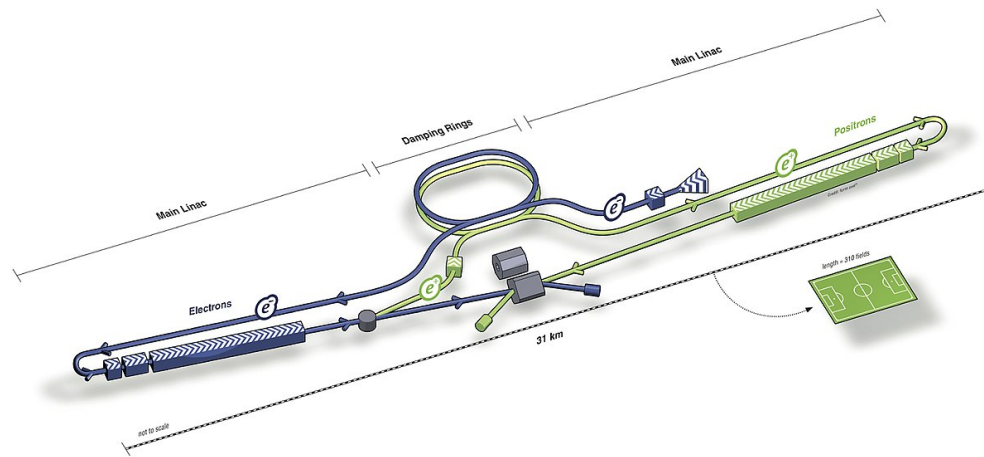


Kuva 7.3: Lineaarisen kiihdyttimen sähkökenttä muodostuu varattujen putkien väliin. Vaihtojännite varaa putket vuoroin negatiiviseksi ja vuoroin positiiviseksi.

Lineaarinen hiukkaskiihdytin ei ole erityisen monimutkainen laite, mutta suurten energioiden saavuttaminen vaatii erittäin pitkän kiihdyttimen. Tämä asettaa huomattavia haasteita kiihdyttimen sijainnille, sillä tehokkaan lineaarikiihdyttimen on oltava useita kilometrejä pitkä. Paitsi pitkä, putken

täytyy olla äärimmäisen suora, jotta pienet hiukkaset pysyvät radallaan ja pääsevät kulkemaan koko linjan läpi kohtioon. Pitkän kiihdyttimen ylläpito ja hiukkassuihkun hallinta vaativat lisäksi hienostunutta ohjauselektroniikkaa ja tietotekniikkaa.

Maailman pisin käytössä oleva lineaarikiihdytin on Yhdysvaltain Stanfordissa toimiva SLAC, jonka pituus on yli kolme kilometriä. Kansainvälinen tiedeyhteisö suunnittelee kuitenkin uutta suurta lineaarikiihdytintä, jonka rakentamista valmistellaan tällä hetkellä Japaniin. ILC:stä (International Linear Collider) on tarkoitus tulla yli 30 kilometriä pitkä. Japani on valikoitumassa rakennuspaikaksi, koska Japanin hallitus on lupautunut osallistumaan rakennuskustannuksiin merkittävällä osuudella.



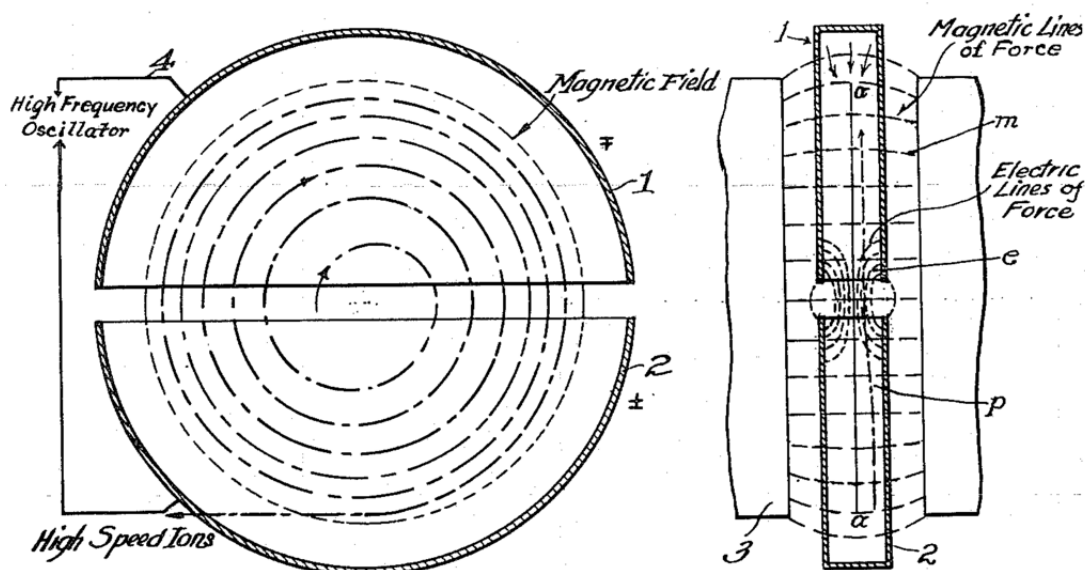
Kuva 7.4: Suunnitteilla olevassa kansainvälisessä lineaarikiihdyttimessä voidaan törmäyttää elektroneja ja positroneja, jotka kulkevat kiihdyttimessä vastakkaisiin suuntiin.

7.3 Syklotroni

Lineaarikiihdyttimen on oltava hyvin pitkä, joten sellaisen rakentaminen vie paljon tilaa ja asettaa monenlaisia haasteita. Pienempään tilaan mahtuvat syklotronit ovatkin käytössä monissa sovelluskohteissa, kuten sairaaloissa, sillä ne voidaan rakentaa tavalliseen huoneeseen. Syklotronin toimintaperiaate on peräisin jo 1930-luvulta, jolloin yhdysvaltalainen fyysikko Ernest Lawrence rakensi ja patentoi ensimmäiset versiot.

Syklotroni koostuu kahdesta suuresta puoliympyrän muotoisesta magneetista, joiden väliin muodostuu homogeeninen magneettikenttä. Magneettipareja on kaksi, jolloin hiukkasen suuntaa saadaan käännettyä ympyräradalle.

Hiukkasen kiihdyttäminen hoidetaan magneettien väliin jäävässä raossa, jossa olevan sähkökentän suunta muutetaan vaihtojännitteen avulla siten, että hiukkanen saa joka kerta lisää energiaa. Magneettien sisällä hiukkasen nopeus ei kasva, mutta suunta kääntyy. Joka kerta kun hiukkasen nopeus kasvaa, kasvaa myös radan säde magneettien sisällä, ja lopulta hiukkanen ajautuu syklotronin reunalle, jossa se ohjataan ulos laitteesta ja kohteeseensa.



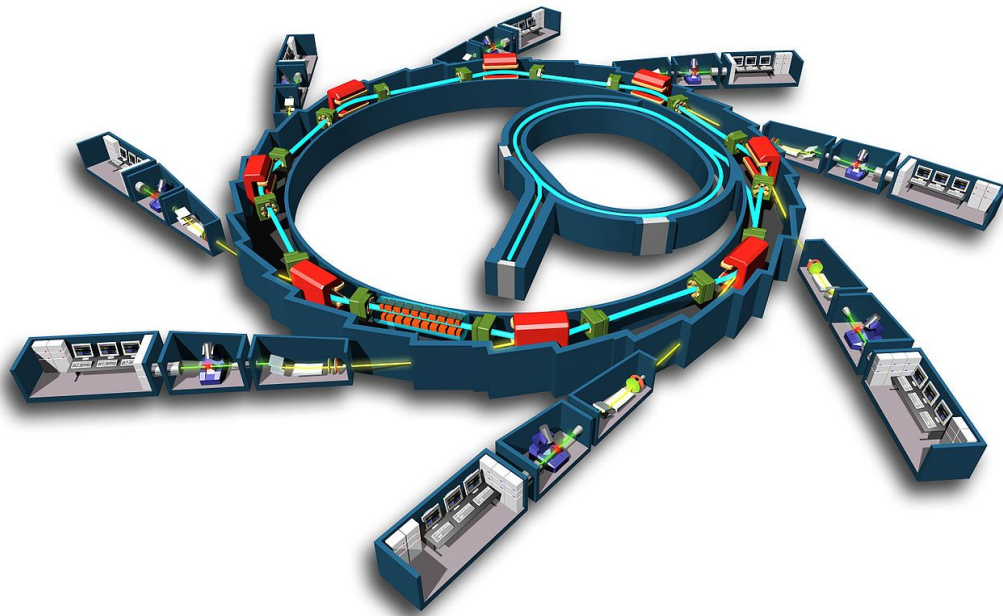
Kuva 7.5: Hiukkaset kiertävät syklotronissa spiraalirataa. Kuva Ernest Lawrencen patentista vuodelta 1934.

Mitä voimakkaampi magneettikenttä on, sitä tiukemman käynnöksen hiukkasen tekee. Suuren homogeenisen magneettikentän luominen ei kuitenkaan ole helppoa, joten kentän voimakkuus asettaa rajan hiukkasten energioille. Syklotronin sisällä pitäisi vallita lisäksi varsin voimakas tyhjiö, jotta hiukkas-suihku pääsee kulkemaan vapaasti. Syklotroneilla ei näin ollen saavutetakaan välttämättä alkeishiukkasfysiikan tarpeisiin riittäviä energioita, mutta ne ovat suhteellisen helppoja rakentaa ja ylläpitää kohtalaisen pienessä tilassa ja siksi hyvin paljon käytössä sovelluskohteissa, joissa hiukkasten energian maksimointi ei ole tärkeintä.

7.4 Synkrotroni

Hiukkasen kääntäminen 180° vaatii voimakkaan kentän ja pitkän kaaren, ja se rajoittaaakin energian kasvattamista huomattavasti. Jos hiukkas-suihku sen

sijaan kääntää vain pienen kulman kerrallaan, voidaan suihku pakottaa likimain ympyrän muotoiselle radalle, jossa energiaa voidaan kasvattaa huomattavasti enemmän. Tällaista laitetta kutsutaan *synkrotroniksi*. Synkrotronissa yhdistetään taivutusmagneeteilla lineaarikiihdyttimiä toisiinsa, jolloin suorat osuudet voivat olla lyhyempiä, eikä käänöksissä tarvitse kääntää kuin pieni kulma kerrallaan. Radan kääntämisessä käytetään silti suprajohtavia magneetteja, sillä energioiden kasvaessa pienenkin kulman kääntäminen vaatii voimakkaita magneettikenttiä. Suurimmat ja korkeaa energisimmät hiukkaskiihdyttimet ovat tänä päivänä poikkeuksetta synkrotroneja, sillä niillä voidaan saavuttaa erittäin korkeita energioita.



Kuva 7.6: Ranskalaisen SOLEIL-kiihdyttimen kaaviokuva. Hiukkassuihku käännetään punaisilla taivutusmagneeteilla suorille osuuksille, joissa hiukkasten nopeus kasvaa. Kiihdyttimessä on useita säteilylinjoja, joihin ohjataan *synkrotronisäteilyä*.

Synkrotroneja käytetään erityisesti alkeishiukkasfysiikan tutkimuksessa, mutta hiukkasen radan kääntäminen saa hiukkasen lähettämään voimakasta sähkömagneettista säteilyä, eli niin sanottua synkrotronisäteilyä. Tämän vuoksi synkrotroneja käytetään paljon myös sovelluskohteissa, sillä synkrotronisäteily on äärimmäisen kirkasta, koherenttia ja sen aallonpituutta voidaan säätää hyvin monipuolisesti.

LHC

Maailman toistaiseksi suurin hiukkaskiihdytin LHC käynnistettiin Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskuksessa CERNissä vuonna 2008. LHC on lähes 27 kilometriä pitkä synkrotroni, joka kulkee Sveitsin ja Ranskan rajalla tunnelissa noin 100 metrin syvyydessä. Samassa tunnelissa toimi vuoteen 2001 asti LEP-kiihdytin, joka törmäytti elektroneja ja positroneja. Raskaampien hiukkasten kanssa voidaan saavuttaa suurempia energioita, mikä johti LHC:n rakentamiseen.



Kuva 7.7: LHC kulkee kapeassa mutta pitkässä tunnelissa.

Raskaiden hiukkasten radan kääntämiseen tarvitaan vahvoja magneetteja, joita laitteessa on 9593 kappaletta. Magneetit ovat suprajohtavia ja alle 2 kelvinin lämpötilassa. LHC kykenee tuottamaan protonille 6,5 TeV energian, mikä tarkoittaa vastakkaisiin suuntiin kulkevien protonien törmäykseen 13 TeV energiaa.

Ylivoimaisesti merkittävin kannustin valtavan laitteen rakentamiselle oli Higgsin hiukkasen kokeellinen todentaminen. Higgsin hiukkasen havaitsemiseksi tarvitaan erittäin korkeaenergiaisia törmäyksiä, joita ei kyetty aiemmin-

la laitteilla saamaan aikaan. Yhdysvaltain Fermilabissa toimiva *Tevatron*-synkrotroni pääsi lähelle, mutta senkään energia ei aivan riittänyt Higgsin havaitsemiseen. 4.7.2012 CERN julkaisi tiedon uudesta hiukkasesta kiinnostavalla energia-alueella ja maaliskuussa 2013 vahvisti, että kyseinen hiukkanen täyttää Higgsin hiukkasen ominaisuudet.

Muita isoja kysymyksiä, joihin LHC:lla yritetään löytää vastaus ovat supersymmetriateoria, pimeän aineen ja pimeän energian luonne, materia-antimateria epätasapaino ja se miten kvarkki-gluoni-plasma tuottaa maailmankaikkeudessa havaitut hiukkaset. Näihin kysymyksiin vastauksia etsivät ringin varrelle rakennetut koeasemat, kuten CMS, ATLAS, Alice ja LHCb.

7.5 Hiukkasilmaisimet

Hiukkastutkimuksen perustana ovat tietysti hiukkasilmaisimet, joilla hiukasten ratoja voidaan tutkia. Iso osa hiukkaskiihdyttimen törmäyksissä saadusta tiedosta perustuu siihen, millaisia ratoja törmäyksessä syntyvät hiukkaset kulkevat. Radan kaareus sähkö- ja magneettikentässä kertoo hiukkasen massasta ja varauksesta. Suurin osa ilmaisimista perustuu jollain tavalla hiukasten kykyyn ionisoida väliainetta, jossa se kulkee. Yksinkertaisimmillaan hiukkasilmaisoin voi tunnistaa hiukasten tai ionisoivan sähkömagneettisen säteilyn läsnäolon. Tällainen ilmaisimien on esimerkiksi säteilysuojelussa käytetty *Geiger-laskuri*.

7.5.1 Sumu- ja kuplakammiot

Sumukammio (*cloud chamber*) oli ensimmäinen hiukkasilmaisimien, jolla pystyi erottamaan ionisoivaa säteilyä. Ensimmäinen sumukammio on rakennettu jo 1911. Sumukammio on täytetty kyllästetyllä kaasulla, johon tiivistyy pisaroita kohdissa, joissa hiukkassäteily ionisoi molekyylejä. Kaasuna voi käyttää jopa kyllästettyä vesihöyryä. Pisaravana näyttää millaista reittiä hiukkanen on kulkenut. Sumukammiossa voidaan myös arvioida hiukkasen energiaa, sillä korkea-energisempi hiukkanen aiheuttaa enemmän pisaroita, eli paksumman vanan. Esimerkiksi alfa-säteily aiheuttaa kammioon lyhyen ja paksun viivan, kun taas beeta-säteily pitkiä ohuita pisaravanoja. Jos kammio asetetaan lisäksi homogeeniseen magneettikenttään, saadaan radan kaarevuussäteen perusteella massan ja varauksen suhde. Yhdistämällä tieto energiasta voidaan hiukkasen massa saada selville.

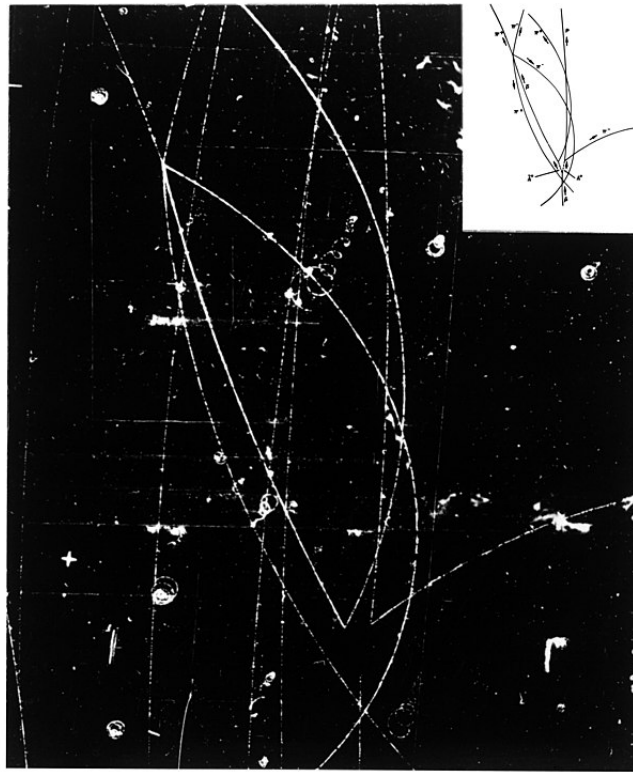
Kuplakammio näyttää varsin samalta kuin sumukammio, mutta taustalla oleva fysiikka on varsin erilainen. Kuplakammion kehittäjä Doland Glaser sai keksinnöstä fysiikan Nobelin palkinnon vuonna 1960. Kuplakammiossa on



Kuva 7.8: Hiukkasten radat erottuvat sumukammiossa. Lyhyet paksut viivat ovat raskaampia hiukkasia ja ohuet pitkät kevyitä.

sisällä nestettä, joka on hyvin lähellä kiehumispistettään. Kun hiukkasia on odotettavissa, kammion paine lasketaan äkillisesti, mikä aiheuttaa kiehumispisteen laskun vallitsevan lämpötilan alapuolelle. Puhdas kaasu ylikuumenee, ja siihen tulevat hiukkaset aiheuttavat mennessään ionisaatiota, jonka seurauksena hiukkasen radalle muodostuu helminauhamainen kuplavana.

Kuplakammioita on käytetty hiukkaskiihdyttimien kanssa 1950-luvulta alkaen, mutta nykyisin ne on korvattu muunlaisilla ilmaisimilla. Kokoluokat vaihtelevat pienestä parinkymmenen senttimetrin kammioista suuriin hiukkaskiihdyttimelle asennettuihin monta metriä halkaisijaltaan oleviin kammioiden. Koska kyseessä on puhtaasti visuaalinen ilmaisim, on mittausdata



Production and decay of neutral lambda and anti-lambda hyperons

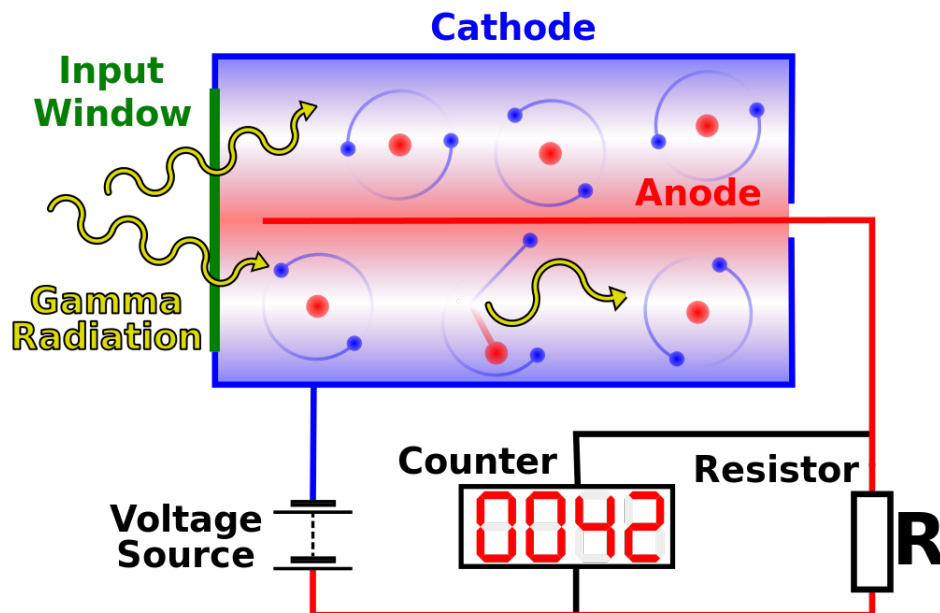
Kuva 7.9: Kuplakammioissa hiukkasten reitit erottuvat yksityiskohtaisemmin kuin sumukammiossa. Tässä vuoden 1959 valokuvassa havaitaan lambda-hiukkasen ja antilambda-hiukkasen parinmuodostus.

kerätty ottamalla kammiosta valokuvia useista eri suunnista. Yhdistelemällä useista suunnista otettuja kuvia voidaan saada kolmiulotteinen malli hiukkasen radalle.

Valokuvaaminen onkin suurin ongelma kuplakammion käytössä. Lisäksi paineen lasku täytyy ajoittaa hyvin tarkasti törmäystapahtumaan, jotta radat saadaan näkyviin. Tämä tuo lisää monimutkaisuutta mittaustapahtumaan, vaikka onkin kierrettävissä hyvällä tekniikalla. Lisäksi hyvin korkea-energiset törmäykset ovat ongelmallisia, sillä hiukkasten radat saattavat olla niin pitkiä että ne eivät mahdu rakennettavissa oleviin kuplakammioihin. Kuplakammioiden avulla löydettiin esimerkiksi heikon vuorovaikutuksen välittäjähiukkaset w ja Z -bosonit.

7.5.2 Geigermittari

Hans Geiger ja Ernst Rutherford kehittivät vuonna 1908 hiukkasilmäsimen säteilyn tutkimuksiin. Geigerputken sisällä on matalapaineista kaasua, joka ionisoituu, kun siihen osuu ionisoivaa säteilyä. Täytekaasu on usein heliumia, neonia tai argonia, johon on lisätty jotain halogeenia. Putken sisällä on voimakas sähkökenttä, jonka katodina toimii putken kuori ja anodina putken keskellä oleva metallitikku. Kun säteily ionisoi atomin, irronnut elektroni kulkee kohti anodia ja ioni kohti katodia. Kumpikin ionisoi matkallaan lisää atomeja, jolloin syntyy voimakas sähköpulsssi, joka voidaan mitata.



Kuva 7.10: Geigerilmaisimen kaaviokuva

Geigerilmaisimen huono puoli säteilysuojelussa on, että ionisaatioprosessiin kuluu jonkin verran aikaa, joten mittarilla on jokaisen havainnon jälkeen lyhyt relaksaatioaika, jonka aikana saapuvaa säteilyä se ei havaitse. Näin ollen mitattu säteilyn määrä on vain suuntaa antava, mutta riittää varsin hyvin kertomaan, milloin säteilyä on läsnä liiaksi asti. Vaikka tällainen geigermittari on varsin yksinkertainen laite, eikä sinänsä kerro esimerkiksi hiukkasen energiasta mitään, on vastaava, vaikkakin pitkälle kehitetty, tekniikka käytössä useissa moderneissa hiukkasilmäsimissä. Asettamalla useita anodeja rinnakkain saadaan lankakammio (*wire chamber*) jossa hiukkasen radasta saadaan

tarkasti tietoa.

Liite A

Yksiköt kvantti- ja hiukkasfysiikassa

SI-järjestelmän perusyksiköt, kuten metri, sekunti ja kilogramma, ovat kokoluokaltaan sellaisia, että ne sopivat hyvin meille arkisten mittakaavojen esittämiseen. Kvantti- ja hiukkasfysiikan mittakaavat ovat tätä huomattavasti pienempiä, eivätkä SI-järjestelmän perusyksiköt ole tällöin välttämättä käteviä käyttää laskuissa tai lukujen vertailussa. Pienen mittakaavan fysiikassa onkin käytössä paljon erilaisia yksiköitä helpottamaan laskujen tekemistä ja lukujen hahmottamista.

Elektronivoltti

Elektronivoltti on keskeisin energianyksikkö pienen mittakaavan fysiikassa. Yksi elektronivoltti vastaa kineettistä energiaa, jonka yhden alkeisvarauksen suuruinen hiukkanen saa, kun se kiihdytetään yhden voltin jännitteellä. Muuntokerroin elektronivolttien ja joulen välillä on yhden alkeisvarauksen suuruinen (coulombeina).

$$1 \text{ eV} = 1,602\,176 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (\text{A.1})$$

Etenkin alkeishiukkasfysiikan energiaskaalat ovat suuria, joten usein tarvitaan elektronivoltin kerrannaisia kiloelektronivolttia keV, megaelektronivolttia MeV jne. Puhekielessä puhutaankin usein "meveistä, geveistä ja teveistä."

Massa ja liikemäärä elektronivoltteina

Massa on tavallaan eräs energialaji. Einsteinin kuuluisa massan ja energian ekvivalenssin kaava

$$E = mc^2$$

kuvaa, miten massa voidaan muuntaa energiaksi. SI-yksiköissä kilogramma ja joule ovat kuitenkin selvästi eri yksiköitä, eikä massaa mitata suoraan elektronivolteissakaan. Kaavan mukaan massa voidaan esittää muodossa

$$m = \frac{E}{c^2}. \quad (\text{A.2})$$

Yksikkötarkasteluna voimme esittää sen muodossa

$$[m] = \frac{[E]}{[c^2]} = 1 \frac{\text{MeV}}{c^2}. \quad (\text{A.3})$$

Esimerkiksi elektronin massa on $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$, mikä tarkoittaa, että jos elektronin massa muuntuu johonkin muuhun energiamuotoon (esimerkiksi sähkömagneettiseksi säteilyksi), siitä vapautuu energiaa $0,511 \text{ MeV}$. Jakajassa oleva c^2 unohdetaan usein puhekielessä ja onkin tapana sanoa, että elektronin massa on $0,511 \text{ MeV}$, mutta on hyvä muistaa, että yksikköön kuuluu myös c^2 .

Vastaavalla tavalla liikemäärän yksiköksi tulee eV/c , keV/c , MeV/c , jne, mutta puhekielessä myös liikemäärästä puhutaan usein vain elektronivoltteina.

Atomimassayksikkö

Atomimassayksikkö on massan yksikkö, joka on usein käytössä varsinkin ydinfysiikassa. Atomimassayksikkö on käytännöllinen yksikkö, koska molempien nukleonien (protoni ja neutroni) massa on lähellä yhtä atomimassayksikköä. Siten atomin massaluku kertoo atomin massan likimain atomimassayksikössä.

Atomimassayksikön lyhennys on u. Yksi atomimassayksikkö on määritelmällisesti $\frac{1}{12}$ -osa $^{12}_6\text{C}$ -atomin massasta. Koska kyseisessä hiiliatomissa on kuusi protonia ja kuusi neutronia, kuvaa atomimassayksikkö hyvin keskimääräistä ytimeen sitoutunutta nukleonia. Yksi atomimassayksikkö on siis

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m(^{12}_6\text{C}) = 1,660\,539\,040 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

Kemiassa käytetty yksikkö $1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ vastaa lukuarvoltaan hyvin tarkasti yhtä atomimassayksikköä, joten jaksolliseen järjestelmään kirjatut luvut kuvaavat

paitsi montako grammaa yksi mooli kyseistä alkuainetta painaa, myös kuinka monta atomimassayksikköä yksi atomi keskimäärin painaa. Alkuaineilla esiintyy kuitenkin eri isotooppeja, joten ydinfysiikassa tietyn ytimen massa on syytä tarkastaa **isotooppitaulukosta**.

Ydinfysiikan laskuissa hyödyllinen yksikkömuunnos on atomimassayksiköstä MeVeiksi. Muuntokerroin on

$$1 \text{ u} = 931,494\,102 \frac{\text{MeV}}{c^2}.$$

Ytimien massavajeen vuoksi molemmat nukleonit ovat vapaana hiukkasena itseasiassa hieman raskaampia kuin 1 u. Nukleonien massat ovat $m_p = 1,007\,2765 \text{ u}$ ja $m_n = 1,008\,6649 \text{ u}$.

Joskus kirjallisuudessa käytetään yksikön vanhaa lyhennettä amu (atomic mass unit), mutta sitä ei suositella enää nykyisin käytettäväksi. Biokemiassa ja molekyylibiologiassa atomimassayksiköstä käytetään myös nimeä dalton (1 Da).

Harjoitustehtäviä

Harjoitustehtävät ovat alunperin quarknetistä: <https://quarknet.fnal.gov/toolkits/ati/gevanswers.html>

1. Protonin energia Fermilabin Tevatron-hiukkaskiihdyttimessä on 1 TeV. Mikä on energia jouleissa?
2. Ötökkä, jonka massa on 2,00 g liikkuu nopeudella 0,100 cm/s. Mikä on sen liikemäärä ja kineettinen energia yksikössä TeV?
3. Protonin massa on $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Muunna tämä yksiköihin GeV ja TeV.
4. Elektronin massa on 0,511 MeV. Muunna se kilogrammoiksi.
5. Jefferson labin elektronikiihdyttimen hiukkassuihkun energia on noin 5,5 GeV. Hiukkasten pienen massan vuoksi voimme sanoa, että niiden liikemäärä on myös likimain 5,5 GeV. Mitä se on yksikössä kgm/s?

Vastauksia:

1. $1,67 \cdot 10^{-7}$ J
2. $p = 3,73 \cdot 10^9$ TeV/c ja $E_k = 6,22 \cdot 10^{-3}$ TeV
3. $0,933$ GeV/c² ja $9,33 \cdot 10^{-4}$ TeV/c²
4. $9,15 \cdot 10^{-31}$ kg
5. $3,0 \cdot 10^{-18} \frac{\text{kgm}}{\text{s}}$