

MODERNIN FYSIIKAN ONTOLOGINEN KRIISI

Kaarle Kurki-Suonio

JÄÄHYVÄISET KLASSISILLE TODELLISUUDEN ELEMENTEILLE

Siirtyminen moderniin fysiikkaan ei ole vallankumous siinä mielessä, että siinä vanhat rakenteet tuhottaisiin. Klassinen mielikuvarakenne on rakenteellisen hahmotuksen välietappi, joukko "valmiita hahmoja", joilla on empiirisen pakon luoma oikeutus omalla pätevyysalueellaan. Primaariset mielikuvamme todellisuuden luonteesta ulottuvat kyllä paljon pitemmälle kuin aistimme kantavat. Erilaiset havaintovälineet ja koelaitteet aistiemme jatkona auttavat rakenteelliseen hahmotukseen, joka ekstrapoloi ne asteittain koko klassisen fysiikan ilmiömaailmaan. Mutta modernin fysiikan portilla tässä prosessissa kohdataan raja, jota ne eivät enää pääse ylittämään.

Muutosten edellyttämä *käsitteellinen valmius* merkitsee *klassisten mielikuvien sisällymistä* "mielen rakenteeseen" etenevän prosessin perusmateriaalina, johon liittyy myös kvantifioinnin luoma *suuruuksien taju*. Mielikuvia ei voi muuttaa, ellei tunne muutettavia mielikuvia. Tarvitaan rakenteellisen hahmotuksen uutta, hierarkkisesti korkeampaa kerrosta, jossa syntyvät uuteen empiriaan tukeutuvat uudet mielikuvat ajan, avaruuden, olioiden ja ilmiöiden luonteesta. Vallankumouksellista on se, että vanhojen rakenteiden toimivuus ei yllä uusille alueille ja että siellä mielikuvien muutosvaatimukset ovat rajuja. *Ontologinen kriisi* tulee siitä, että *uusi kuva todellisuudesta* sellaisena kuin se pitäisi pystyä hahmottamaan empiirisen pakon edessä, *on kokonaan toisenlainen kuin se makromaailman todellisuus*, joka meille on avautunut primaarihahmotuksessa.

Asenteellinen valmius, valmius suostua *empiiriseen pakoon*, joutuu tässä koetukselle. Edellisellä luennolla esitellyt klassiset mielikuvat "todellisuuden elementtien" luonteesta on tiedostettava ennakkokäsityksiksi, joita on muutettava, aivan niin kuin oppilaiden paljon tutkittuja ennakkokäsityksiä on muokattava heidän ensimmäisillä askelmillaan kohti fysiikan käsitteellistä ymmärtämistä.

Kokeellisessa tutkimuksessa kertyi vähitellen aineistoa, joka johti vakaviin ristiriitoihin klassisen fysiikan perusmielikuvien kanssa. Vuoden 1920 tienoilla mielikuvien perusteet olivat empirian pakosta jo pahasti järkkyneet, ja niihin perustuva ymmärrys oli kriisissä. Tämä *kriisi jatkuu tänäkin päivänä fysiikan opiskelussa*. Kutsun sitä *ontologiseksi kriisiksi*, koska se koskee syvällisesti kaikkea sitä, mitä edellä on kuvattu "todellisuuden elementteinä", mielikuviamme ajasta ja avaruudesta, olioista ja ilmiöistä.

Tässä kohdataan kaikille yhteinen *kielen ongelma*, joka korostuu *opetuksessa* ja jatkuvissa turhissa yrityksissä *kansantajuistaa* modernia fysiikkaa. Kieli on sidottu primaarihahmotuksessa rakentuvaan klassiseen mielikuvarakenteeseen. Opetukseen ja kansantajuistamiseen ei ole käytettävissä parempaa kieltä, jolla voitaisiin puhua mieleemme vakiintuneiden "todellisuuden elementtien" luonteen rikkovista uusista mielikuvista. Sen tähden, *yrittäessämme kuvata mielikuvien muuttamista tällä kielellä*, me tämän sidonnaisuuden vuoksi samalla tiedostamattomasti *vahvistamme niitä mielikuvia, joita yritämme muuttaa*. Pitäisikö siis totella WITTGENSTEINIA, joka sanoo: "Mistä ei voi puhua, siitä on vaiettava", ja lopettaa yritykset opettaa modernia fysiikkaa?

AIKA JA AVARUUS

Valonnopeuden absoluuttisuus empiirisenä tosiasiana pakottaa luopumaan ajan, etäisyyksien ja kokojen absoluuttisuuden mielikuvista. Se johtaa joukkoon ennusteita, jotka ovat täysin "älyttömiä" primaarihahmotukseen sitoutuneen mielen rakenteen kannalta mutta osoittautuvat kuitenkin oikeiksi empiirisessä testauksessa.

Tämä empiirinen pakko vaatii sopeutumaan siihen, että *suppeamman suhteellisuusteorian* mukainen *neliulotteinen aika-avaruus* vastaa todellisuutta aidommin kuin välittömäsi kokemamme kolmiulotteinen avaruus, jossa virtaa absoluuttinen aika. Kappaleiden koot ja etäisyydet, olioiden elinajat ja ilmiöiden kestot eivät enää kelpaa edustamaan todellisuutta,

koska ne riippuvat havaitsijasta. Niiden sijaan astuvat havaitsijasta riippumattomat nelivektorit, joita ei enää voi hallita konkreettisten mielikuvien avulla.

Yleisen suhteellisuusteorian mukainen käsitys *gravitaatiosta aika-avaruuden kaarevuutena* asettaa, jos mahdollista, hahmotuskykymme vielä kovemmalle koetukselle. Tätä valaisee keskustelu, joka virisi viime kuussa dfcl-listalla¹.

Keskustelun aloitti opettajan viesti: *"Minulta kysyttiin tänään koulun käytävällä kysymys, että mihin suhteellisuusteoriassa kuvattu avaruuden kaareutuminen tapahtuu. Opiskelijat olivat keskenään miettineet, että kaareutuuko avaruus johonkin uuteen ulottuvuuteen vai mitä tapahtuu. Kysymys on siis siitä, että gravitaatiokenttä taivuttaa valon kulkusuuntaa meidän mielestämme ja kirjoissa asia kuvataan niin, että valo kulkee suoraan (minkä suhteen?) ja meidän havaitsemamme kulkusuunnan muutos johtuu avaruuden kaareutumisesta. En oikein tiennyt, mitä tähän pitäisi vastata."*

Poimintoja vastauspuheenvuoroista:

Vastaaaja 1: *"... Kaarevuudella tarkoitetaan sitä, että aika-avaruuden geometria on erilainen kuin sellaisen aika-avaruuden, joka ei ole kaareva. ... ei ole olemassa mitään viidettä ulottuvuutta, johon se kaareutuisi, ainakaan suhteellisuusteorian mukaan; kaarevuus on vain sen sisäinen geometrinen ominaisuus."*

Vastaaaja 2: *"...Pintaolio, joka tajuaa vain kaksi ulottuvuutta, voi havaita maailmassaan geometrisia ominaisuuksia, kuten kolmion kulmien summan poikkeamisen 180° :sta tai ympyrän pinta-alan poikkeamisen siitä, mitä sen tasossa pitäisi olla. Me kolmine ulottuvuuksinemme tulkitsemme tällaisten ominaisuuksien aiheutuvan pinnan kaareutumisesta kolmanteen ulottuvuuteen, joko pallonpinnan tai satulapinnan tyypillisesti riippuen siitä, onko kulmien summa suurempi vai pienempi kuin 180° tai ympyrän pinta-ala suurempi vai pienempi kuin πr^2 . Geometrinen tulkinta kaarevuudeksi on kaksiulotteisen olion konkreettisen hahmotuskyvyn tavoittamattomissa, mutta jos hän on matemaattisesti kyllin etevä, hän voi silti kutsua tällaisia maailmansa matemaattisia ominaisuuksia "kaarevuudeksi" abstraktissa mielessä. ... Aika neljäntenä ulottuvuutena on vielä erilainen asia siksi, ettei tuo neliulotteinen avaruus ole kaareutumattomanakaan Euklidinen, jollaiseksi (perus)hahmotamme oman kolmiulotteisen avaruutemme. Niin, että tuo matemaattinen kaarevuuden käsite tuntuu vielä kertalukua abstraktimmalta."*

Vastaaaja 3: *Ei se mihinkään kaareudu, vaan kyseessä on puhetapa, joka johtuu siitä, että miellämme elävämme euklidisessa avaruudessa. Valonsäde kulkee lyhintä (nopeinta) tietä ja meidän tapamme hahmottaa avaruutta saa radan näyttämään kaarevalta. Kyse on samanlaisesta ilmiöstä kuin lyhimmän lentoreitin esittämisestä kartalla. Jos piirrämme tasokartalle suoran viivan Helsingin ja New Yorkin välille, niin se kulkee jotakuinkin Englannin ja Skotlannin rajaa pitkin ja Pohjois-Irlannin kautta. Alkeisgeometrian mielikuviamme perusteella saatamme kuvitella että suora olisi lyhin reitti. Niin ei kuitenkaan ole, vaan lyhin reitti on isoympyräreitti, joka sipaisee Islantia ja Grönlannin eteläkärkeä."*

Kysyjä: *"... Näissä fysiikan kysymyksissä joutuu usein tähän avuttomuuteen. Ensin klassista fysiikkaa opettaessaan korostaa sitä perushahmottavaa lähestymistä, että kaikki on ymmärrettävä alusta pitäen, koska muunlaista kunnollista ymmärtämistä ei ole. Ja sitten tulee vastaan näitä asioita, joihin ei ole tavallisessa kielessä käsitteitä eikä päässä edes voi olla todellisia, oikeita mielikuvia. Asioita voi kuvata vain matematiikan kielellä ja sitäkin kieltä ei osaa edes opettaja riittävästi. Tähän törmää usein, kun ensin onnistuu saamaan opiskelijat kyselemään ja kyseenalaistamaan asioita. ..."*

¹ Tämä sähköpostilista perustettiin vuonna 1996 alkaneen fysiikanopettajien kaksivuotisen täydennyskoulutuskurssin tiedotusta ja keskusteluja varten. Kurssin tunnus oli dfcl (didaktisen fysiikan cum laude), sillä opetushallituksen alkuperäisen toimeksiannon mukaan sen piti tarjota fysiikan approbaturin pohjalta cum laude. Kolmen peräkkäisen dfcl-kurssin jälkeen lista on toiminut keskustelulistana, jolle listalaiset ovat lähettäneet omia ja oppilaittensa esittämiä kysymyksiä pohdittavaksi. Se elää yhä ja fysiikanopettajat pääsevät mukaan listalle ilmoittamalla halukkuutensa Ari Hämäläiselle.

EPÄJATKUVUUDEN VOITTOKULKU

Klassiset mielikuvat ajan, avaruuden, olioiden ja ilmiöiden luonteesta olivat leimallisesti jatkuvia. Modernin fysiikan kehityksen yhtenä suurena päälinjana on "todellisuuden elementtien" asteittainen kvantittuminen, jatkuvuuden korvautuminen epäjatkuvuudella..

Aine. Kvantittuminen alkaa aineesta. Jatkuvan aineen sijaan astuu epäjatkuva *kvantittunut aine*, joka koostuu atomeista.

Aineen atomirakenteella on pitkä historia; jonka pääpiirteet HEIMO SAARIKKO hahmotteli ensimmäisessä luennossaan tällä kurssilla. Sen tieteellisenkin näytön historialla on nyt ikää yli 200 vuotta. *Selitysnäyttöä* eli teoreettista evidenssiä oli tällä kurssilla tarkastelujen kokeiden aikaan ehtinyt kertyä jo kokonaisen vuosisadan ajan.

JOHN DALTON ennusti (1803) atomihypoteesin perusteella kemiallisen kerrannaisten painosuhteiden lain ja vahvasti ennusteen kokeellisesti päätyen ensimmäiseen suhteellisten atomimassojen luetteloon. LOUIS-JOSEPH GAY-LUSSAC totesi (1809) vastaavan reagoivien kaasujen tilavuussuhteita koskevan lain, jonka AMADEO AVOGADRO selitti (1811) molekyylihypoteesillaan.

JAMES CLERK MAXWELLIN ja LUDWIG BOLTZMANNIN 1860- ja 1870-luvuilla kehittämä tilastollinen mekaniikka yhdisti aineen termodynaamiset tilasuureet atomien tai molekyylien liikkeeseen. Se juontaa juurensa vielä kauempaa. Sen esivaiheen, kineettisen kaasuteorian voidaan katsoa alkaneen jo DANIEL BERNOULLIN selityksestä (1738), jonka mukaan kaasun paine aiheutuu atomien törmäyksistä seinämään. Kvantitatiivisen asun tämä selitys sai 1840-luvulla, kun osoitettiin, että vuorovaikutuksettomista molekyyleistä koostuva kaasu noudattaa Boylen lakia. Samalla lämpötilan käsite palautui molekyylien keskimääräiseen liike-energiaan.

LUDWIG SIEBER esitti (1824) kiteiden olevan atomien järjestyneitä rakennelmia. Lordi KELVIN selitti (1894) tällä tavoin kiinteän aineen kiderakenteet, ja AUGUSTE BRAVAIS täsmensi (1895) tämän selityksen hänen nimellään tunnetuiksi hilarakenteiksi.

Kaikki tämä selitysnäyttö keskittyi aineen rakenteellisiin ominaisuuksiin. Se oli kokonaisuutena niin vakuuttava, että se koettiin vuosisadan vaihteessa pakottavaksi ilman suoraa *havaintonäyttöäkin* eli empiiristä evidenssiä: *Aine rakentuu atomeista!*

Atomirakenteesta tuli näin jatkuvan aineen makro- ja mikrotason jälkeen *kolmas aineen ominaisuuksien tarkastelun taso*: aine atomien (ja elektronien) muodostamana hiukkassysteeminä. Aineen ominaisuuksien ja niitä koskevien empiiristen lakien selittämisessä atomien ja niiden välisten vuorovaikutusten avulla klassisen fysiikan perusteista käsin kohdattiin kuitenkin ylipääsemättömiä vaikeuksia. Näin saadut teoreettiset ennusteet olivat väärää suuruusluokkaa ja jopa kvalitatiivisesti "älyttömiä". Ensimmäinen selvä viittaus tulossa olevaan kriisiin oli Maxwellin toteamus (1859) vapausasteiden jäätymisestä².

Ensimmäinen empiirinen näyttö atomien olemassaolosta ja aineen atomirakenteesta saatiin vasta isä WILLIAM HENRY BRAGGIN ja poika WILLIAM LAWRENCE BRAGGIN röntgen-diffraktiotutkimuksista (n. 1915). Sitä ennen atomin rakenteenkin tutkimus oli kuitenkin jo päässyt vauhtiin. F2k -kokeista *Thomsonin* (1897) ja *Millikanin* (1911) kokeet ovat tärkeitä portaita siihen johtaneessa kehityksessä. Rutherfordin koe (1906 ... 1911) ja Bohrin malli (1913) olivat sen varsinaisia virstanpylväitä.

Viimeistään tässä vaiheessa aineen atomirakenne paljastuu "*käenpojaksi klassisen fysiikan pesässä*"³. Se oli ensimmäinen kvantittuneisuuden edustaja, jonka esimerkkiä muut todellisuuden elementit seurasivat yksi toisensa jälkeen.

Energianvaihto. Ensimmäiseksi pesästä heitettiin sähkömagneettisen aaltoliikkeen vuorovaikutukset aineen kanssa, *emissio, absorptio ja sironta*. Klassisen mielikuvan mukaan niiden olisi pitänyt olla luonteeltaan jatkuvia prosesseja. Nyt osoittautui, että ne koostuivat

² Ks. *F2k-laboratorion kokeiden esittely 2*.

³ K. KURKI-SUONIO: *Modernin fysiikan perushahmojen synty*. Dimensio 64, 2/2000, 32-36 ja 3/2000, 36-41.

hetkellisistä ja paikallisista tapahtumista. Ne muistuttivat klassisia ideaalisia törmäyksiä myös siinä suhteessa, että niissä energia, liikemäärä ja pyörimismäärä säilyivät.

Kokeissa, joita F2k -laboratorion esittelyssä tarkasteltiin, tämä ilmenee vain vähän epäselvästi siinä Millikanin kokeen sivuhuomiossa, että öljypisaroiden varautuminen röntgensäteilyn vaikutuksesta tapahtuu hyppäyksittäin. (Kokeen Fk2 -versiossa tosin käytetään alfa-säteilyä). Ilmaisintekniikan kehittyessä tämä kävi kuitenkin kävi täysin ilmeiseksi. Jatkuva fluoresenssi osoittautui tuikahduksiksi (skintillaatio), ja filmin mustuminen pisteiden kertymiseksi. Epäjatkuvuuden empiirinen pakko on ilmeinen.

Energianvaihdon kvantittuminen näissä vuorovaikutuksissa osoittaa vuorovaikutusten hetkellisyyden ja paikallisuuden epäsuoremmin. *Mustan kappaleen säteily ja valosähköinen ilmiö* ovat olennainen osa empiiristä pakkoa hyväksyä *fotoni Planckin lain mukaiseksi SM-säteilyn ja aineen välisen energianvaihdon kvantiksi*. Mielikuvaa vahvistaa muiden ilmiöiden selittyminen tältä pohjalta. *Jarrutussäteily* selittyi kvantittuneeksi emissioksi ja *Comptonin sironta* kvantittuneen absorptioon ja emission yhdistelmäksi.

Samanlainen energianvaihdon kvantittuneisuus toteutuu myös *hiukkasten välisissä vuorovaikutuksissa*. Kiinteiden aineen ominaislämpökapasiteeteissa havaittu *vapausasteiden jäätyminen* oli sen ensimmäinen osoitus. Samalla tavalla kuin Planckin kvanttihypoteesi selitti mustan kappaleen säteilyn spektrin, ominaislämpökapasiteettien pieneneminen matalissa lämpötiloissa voitiin selittää kvantitatiivisesti olettamalla, että kiinteän aineen hilavärähtelyjen vapausasteet pystyvät vaihtamaan energiaa vain värähtelyjen taajuuteen f verrannollisina kvantteina hf , *fononeina*.

Suureet. Tavallisesti kvantittumisella tarkoitetaan suureiden kvantittuneisuutta. Suure on kvantittunut, jos se voi saada vain tiettyjä erillisiä arvoja. Klassisessakin fysiikassa esiintyy kvantittuneita suureita. Luonnollisestikin *lukumäärä* on sellainen. Luonnolliset luvut ovat sen mahdollisia arvoja. Toinen, modernin fysiikan peruskokeiden selitysyhteyksien kannalta tärkeä suure on *värähtelevän systeemin taajuus*.

Modernissa fysiikassa on pakko tunnustaa empiirisen pakon edessä, että monet klassisessa fysiikassa jatkuvat suureet ovatkin kvantittuneita.

Aineen atomirakenne merkitsi samalla *massan* kvantittumista. *Millikanin koe* osoitti *varauksen* kvantittumisen.

Energia, liikemäärä ja pyörimismäärä olivat kvantittuneita energianvaihtotapahtumissa. Mutta varsinaisesti *energian* kvantittumisesta puhuttaessa ajatellaan atomin ja yleisemmin atomaarisen systeemin kokonaisenergiaa. Empiirinen pakko sen kvantittuneisuuden hyväksymiseen on peräisin viivaspektrien tutkimuksesta.

Optiset viivaspektrit⁴ osoittautuivat atomin ja molekyylin lajeille ominaisiksi, joten niiden spektriviivojen taajuuksille oli tarjolla selitys värähtelevän systeemin taajuuden kvantittuneisuudessa. Viivaspektrien taajuuksien systematiikka oli kuitenkin kokonaan erilainen, eikä tältä pohjalta ollut mahdollista löytää atomin rakenteeseen perustuvaa selitystä. Myös emissio- ja absorptiotapahtumien hetkellisyys soti tätä ajatusta vastaan. Viivaspektrien taajuuksien noudattama *Ritzin periaate*, josta *Balmerin* vetyatomien spektriä koskeva laki oli esimerkki, tarjosi empiirisen perustan. Sen tulkinta Planckin lain perusteella oli vahva näyttö atomien stationaarisista tiloista ja niille ominaisista energioista. Kun vielä *Franckin ja Hertzin koe* tarjosi riippumattoman vahvistuksen, oli empiirinen pakko valmis.

OLEMASSAOLON EPÄJATKUVUUS JA YKSILÖIDENTITEETIN MENETYS

Tämän otsikon alle kuuluu joukko vaikeasti omaksuttavia mielikuvia, jotka vaativat rankkoja muutoksia klassisiin mielikuviiin todellisuuden elementeistä. Niissä ontologinen kriisi huijpentuu.

⁴ Ks. *F2k-laboratorion kokeiden esittely 2*.

Aaltohiukkasdualismi. Kriisin empiirisenä peruslähtökohtana on *kaksoisrakokoe*. Tätä koetta ei ole F2k -laboratorion repertuaarissa. Se on kuitenkin kaikille osanottajille periaatteessa tuttu. F2k -kokeet liittyvät kiinteästi samaan empiiriseen kokonaisuuteen. *Spektrien* tulkinna atomin rakenteen empiiriseksi perustaksi jo "ratsastaa" siihen perustuvilla uusilla mielikuvilla. Muuten F2k- kokeet ovat ensimmäisiä askelia näihin mielikuviin pakottavan näytön kehityksessä. Erityisesti niillä oli ratkaiseva merkitys elektronin ja fotonin tuomisessa uusiksi tutkimuksen kohteeksi. Kaksoisrakokoe johtaa kummankin osalta jyrkkiin ristiriitoihin klassisista mielikuvien kanssa. Hiukkasen ja aaltoliikkeen klassisten mielikuvien on pakko väistyä ja tilalle on rakennettava kokonaan uusi käsitys perusolioiden ja -ilmiöiden luonteesta.

Thomsonin ja Millikanin kokeet johtivat mielikuvaan elektronista aineen subatomaarisena rakenneosana. Ne eivät kuitenkaan vielä mitenkään viittaa siihen, että elektroni olisi muuta kuin klassisen mielikuvan mukainen hiukkanen.

Mustan kappaleen säteily osoitti energianvaihdon kvantittumisen sähkömagneettisen säteilyn ja aineen vuorovaikutuksessa. *Valosähköinen ilmiö* sai Einsteinin ottamaan käyttöön fotonin käsitteen. Hän käsitteli ftonia klassisena hiukkasena ja valoa Newtonin tapaan fotonisuihkuna. Einsteinin onnistuminen ja klassisen aaltomallin täydellinen epäonnistuminen valosähköisen ilmiön selittämisessä johtivat valon luonteen tulkinnassa pahaan sisäiseen ristiriitaan, sillä diffraktion katsottiin osoittavan sitovasti, että valo on aaltoliikettä. Newtonkin oli taipunut tämän "empiirisen pakon" edessä.

Vasta kaksoisrakokoe, jota vielä nykyisinkin toistetaan yhä uudenvlaisilla hiukkasilla, tarjosi mahdollisuuden tämän ongelman selvittämiseen. Siinä säteilyn hiukkas- ja aaltominaisuudet ilmenevät yhtäaika samassa kokeessa riippumatta siitä mitä säteilyä siinä tutkitaan. Aaltoluonteen "sitovasti" osoittava *diffraktiokuvio havaitaan*, mutta se *kertyy hiukkasille ominaisista yksittäisistä "osumista"*, jopa niin heikkoa säteilyä käytettäessä, että "osumat" tulevat yksi kerrallaan. Tätä empiiristä havaintoa sanotaan aaltohiukkasdualismiksi.

Einstein oli tulkinnassaan "ylittänyt valtuutensa". Valosähköisen ilmiön luoma empiirinen näyttö koskee pelkästään energianvaihdon kvantittumista Planckin lain mukaisesti. Se ei tarjoa mitään empiiristä perustetta puheelle fotonista irrallaan energianvaihtotapahtumasta.

Mutta sama koskee myös mitä tahansa diffraktion havaintoa. Kaksoisrakokokeen perusteella on ilmeistä, että mikä tahansa diffraktiokuvio koostuu "osumista", vaikka siihen ei valon luonnetta tarkasteltaessa ollut aikaisemmin kiinnitetty huomiota, eikä historiallisesti ratkaisevien diffraktiokokeiden aikaan sen toteamiseen ollut mahdollisuksiakaan. Ei siis ole empiirisesti oikeutettua puhua valosta aaltoliikkeenäkään irrallaan havaitusta diffraktiokuviosta.

Epäjatkua olemassaolo. Aaltohiukkasdualismiin ei siis liity mitään empiirisesti perusteltavaa sisäistä ristiriitaa. Ristiriita on vain kahden tulkinnan välillä. *Hiukkassuihku ja aaltoliike* ovat vain *kaksi klassista mielikuvaa, mallia*, joiden avulla yritetään selittää, mitä varjostimella tai ilmaisimessa havaitaan. Kysymyksessä "*Ovatko elektroni ja ftoni hiukkasia vai aaltoliikettä?*", on yhtä vähän järkeä kuin ehdotuksessa: "*Elektroni ja ftoni ovat toisinaan hiukkasia toisinaan aaltoja sen mukaan, millaisen kokeen avulla niitä havaitaan.*" Kaksoisrakokokeessa kummankin luonteen tuntomerkit esiintyvät yhtäaika samassa kokeessa, eikä sen perusteella kumpikaan mielikuva enää kelpaa esittämään todellisuutta. Mutta mitä tilalle?

LOUIS DE BROGLIEN (1924) esittämät kaksi lakia ilmaisevat täsmällisesti relaation, joka näiden mallien välille syntyy siitä, että niillä esitetään samaa ilmiötä. Ne tarjoavat myös lähtökohdan *aaltofunktion* käsitteen täsmentämiselle *Schrödingerin kvanttimekaniikan* mukaisesti ja uuden mielikuvan rakentamiselle.

Kaksoisrakokoe asettaa fotonin ja elektronin samalle lähtöviivalle! Ja niiden rinnalle tulevat saman tien kaikki muutkin luonnon perusoliot. Jotta niiden luonteesta voisi sanoa jotakin enemmän, on ensin todettava, ettei kaksoisrakokokeesta alkava modernin fysiikan empiirinen pakko salli olemassaolon peruselementeiksi muuta kuin *hetkellisiä ja paikallisia tapahtumia*. Kaikki, mitä niiden ulkopuolelta sanotaan, on tulkintaa, jota on empiirisen pakon edessä muutettava. Tämä merkitsee, ettei empiirisin perustein ole *jatkuvia ilmiöitä, ei edes jatkuvaa olemassaoloa*. Ellei ole jatkuvaa eksistenssiä, ei voi olla olemassa klassisen mielikuvan mukaisia hiukkasia sen paremmin kuin aaltoliikettäkään. Samalla putoaa pohja *deterministiseltä kausaliteetilta*, joka hallitsee klassisen fysiikan mielikuvarakenteita, niin hyvin hiukkasia kuin aaltojakin. Kaksoisrakokokeen tulkinta aaltofunktion käsitteen avulla tarjoaa idean hetkellisten ja paikallisten tapahtumien esiintymisen todennäköisyyksien käsittelemiseksi.

Hiukkasten identiteettikriisi. Kun tämän jälkeen kaikkia perusolioita kuitenkin kutsutaan yhteisellä nimellä "hiukkasiksi", on ymmärrettävä, että sanalle on annettu uusi moderni merkitys, joka poikkeaa ratkaisevasti klassisesta hiukkasen mielikuvasta (vrt. edellinen luento). Hiukkaset "realisoituvat", ilmaantuvat "todellisuuteen", vain hetkellisissä ja paikallisissa tapahtumissa, jotka näyttävät niiden osumilta tai törmäyksiltä.

Tästä seuraa *hiukkasten identiteettikriisi*. Olemassaolon hetkellisyys poistaa yksilöidentiteetin mahdollisuudenkin. Ilman yksilöidentiteettiä ei voi edes kysyä "*Olenko sama yksilö kuin viimeksi*", koska "Minä" ja "sama" jo sisältävät yksilöidentiteetin idean. Kysymyksessä "*Onko tämä sama hiukkanen kuin äsken?*" ei ole mitään mieltä.

Kaikille olioille jää vain *laji-identiteetti*. Lajilla on tuntomerkit, joiden perusteella on mahdollista tunnistaa, minkä lajin hiukkanen on kysymyksessä, elektroni, protoni, foton, pioni Yksilöidentiteetin puuttuminen merkitsee, että kaikki saman lajin oliot ovat keskenään *identtisiä*.⁵ Tämä on hankala mielikuva, sillä identtisyys on samuutta paljon syvemässä merkityksessä kuin esimerkiksi identtisten kaksosten samanlaisuus. Atomin elektroniverhossa on kyllä Z elektronia, mutta niitä ei ole mahdollista yksilöidä. Ne ovat "sama elektroni Z kertaa", vai miten sen voisi ilmaista. Tästä ei selvitä eteenpäin ilman ajatusta kenttien kvantittumisesta.

Kenttien kvantittuminen. Kenttien kvantittuminen tai mieluumminkin kvantittuneisuus tarkoittaa sitä asiointilaa, että kentätkään oliona eivät ole jatkuvia vaan kvantittuneita. Siitä teoreettisesta askelesta, joka tehdään, kun siirrytään klassisesta jatkuvan kentän mallista kvantittuneeseen kenttään, käytetään myös nimitystä "*second quantization*", toinen kvantitus. Tämä sanonta liittyy siihen, että siirtyminen klassisesta mekaniikasta Schrödingerin kvanttimekaniikkaan oli vain puolittainen, "ensimmäinen kvantitus". Siinä hiukkassysteemin dynamiikkaa esittävät suureet tulivat kvantitetuiksi, mutta kenttiä kuvattiin yhä jatkuvina oliona klassisen potentiaalifunktion avulla. Näin saatu malli kuitenkin selitti mm. atomaarisen systeemin stationaaristen tilojen kvantittuneet energiat ja liikemäärämomentit, ja sen avulla päästiin hyvinkin pitkälle atomien ja molekyylien fysiikassa.

Kokonaisuutena tilanne selkenee vasta, kun myös kentät "kvantitetaan". Tämä "toimenpide" ei ole pelkkä klassisten kenttien kvantitus, vaan se koskee samalla tavalla tasaveroisesti kaikkia "hiukkasia".

Lähtökohdaksi voidaan ottaa mielikuva, jossa kutakin oliolajia, elektronia yhtä hyvin kuin ftonia, vastaa oma *lajikenttensä*, jonka kvantit ilmenevät tämän lajin hiukkasina samalla tavalla kuin ftoni on sähkömagneettisen kentän "hiukkanen". Kukin lajikenttä on ikään kuin oman lajinsa hiukkasten "potentiaalisen eksistenssin kenttä", joka täyttää avaruuden ja ajan. Hiukkasten realisoituminen ilmenee vain paikallisina ja hetkellisinä tapahtumina. Näin on taas palattu F2k-laboratorion kokeiden toisen esittelyluennon loppukaaneettiin.

⁵ Huomaa käsitteiden "identiteetti" ja "identtisyys" merkitysten olennainen ero.

Kenttänsä kvantteina saman lajin hiukkaset ovat identtisiä, niillä on kaikilla sama kentän laji-identiteetti. Kenttää tavallaan tarkastellaan monen identtisen hiukkasen systeeminä, jossa kuitenkin "hiukkasten" lukumäärä on "*a priori*" mielivaltainen. Kun tällaista systeemiä kuvataan aaltofunktiolla, identtisyys merkitsee, että minkä tahansa kahden hiukkasen "koordinaattien" vaihtaminen jättää aaltofunktion havaittavan merkityksen muuttumattomaksi. Tähän sisältyy periaatteessa kaksi mahdollisuutta. Aaltofunktio voi säilyä sellaisenaan tai se voi vaihtaa etumerkkiä, eli se on joko symmetrinen tai antisymmetrinen kaikkien hiukkasvaihtojen suhteen.

Fermionit ja bosonit. Symmetria ja antisymmetria johtavat täysin erilaisiin kentän tai monen hiukkasen systeemin ominaisuuksiin. Erityisesti antisymmetria merkitsee, ettei tietyssä, missä tahansa, "yhden hiukkasen tilassa" voi olla enempää kuin yksi hiukkanen kerrallaan. Symmetria taas ei aiheuta tässä suhteessa mitään rajoituksia, vaan samassa yhden hiukkasen tilassa voi olla samanaikaisesti miten paljon hiukkasia tahansa.

Kumpikin vaihtoehto toteutuu luonnossa. Tämä on yksi ihmeellisimpiä esimerkkejä matemaattisen esityksen merkityksestä fysiikassa. Kaikki hiukkaset jakautuvat kahteen luokkaan, *fermioneihin* ja *bosoneihin*. *Aineen rakenteen perushiukkaset*, elektronit ja nukleonit (yleisemmin leptonit ja baryonit) ovat *fermioneja*. Fotonit ja muut *vuorovaikutusten välittäjähiukkaset* ovat *bosoneja*.

Tämän jaon empiirisenä perustana on ennen muuta antisymmetriasta ja symmetriasta seuraavien ennusteiden todentuminen. Sillä on luonnossa valtavat mittasuhteet. Fermionien edustama antisymmetria ilmenee erityisesti *Paulin kieltosääntönä*, joka on vastuussa aineen olemassaolosta ja kemiallisten aineiden koko runsaudesta. Bosonien symmetria ilmenee mm. nk. *Bosen kondensaatioissa*, suuren hiukkasluvun sijoittumisessa samaan yhden hiukkasen tilaan. Myös valon ilmeneminen aaltoliikkeenä voidaan ymmärtää osoitukseksi fotonien luonteesta bosoneina. Fotonin tilaa esittävä aaltofunktio, tai oikeammin sen edustama fotonien esiintymisen todennäköisyysjakauma, "realisoituu", kun samassa tilassa on suunnaton määrä fotoneja. Elektronin tilaa esittävän aaltofunktion vastaava "realisoiminen" ei ole mahdollista. Se voi onnistua vain pakottamalla yksi elektroni kerrallaan tuohon tarkasteltavaan tilaan ja toistamalla koe hyvin monta kertaa.

Kenttien kvantituksessa hiukkasten lukumäärästä tulee systeemin yksi dynaaminen muuttuja muiden muuttujien rinnalle. Luonnolliset luvut ovat sen mahdollisia arvoja (ominaisarvoja). Antisymmetriasta ja symmetriasta seuraa, että fermionisysteemissä kokonaisenergian ominaistilat ovat samalla hiukkasluvun ominaistiloja mutta bosonisysteemissä ne eivät ole. Toisin sanoen eristetyissä systeemissä fermionien lukumäärä säilyy mutta bosonien lukumäärä ei säily. Siis erityisesti fotonien "lukumäärä" kentässä vaihtelee. Niitä syntyy ja häviää koko ajan. Niiden lukumäärällä on vain tietty kokonaisenergiasta riippuva todennäköisyysjakauma.

Hiukkasten lukumäärän mieltäminen dynaamiseksi muuttujaksi tarjoaa ehkä jotakin apua siihen kielelliseen ongelmaan, joka kohdataan yritettäessä puhua esimerkiksi atomin Z identtisestä elektronista. On niitä siellä Z kappaletta, koska niiden pysyväksi lukumääräksi voidaan empiirisesti vahvistaa Z . Mutta atomin yksittäisistä elektroneista puhumiselle ei löydy empiiristä perustaa.

Tällä tavalla klassisten mielikuvien, hiukkasten ja kenttien tai hiukkassuihkujen ja aaltoliikkeiden, empiiriset lähtökohdat selittyvät fermioni- ja bosonisysteemien ominaisuuksilla. Fermionit ovat hiukkasten, bosonit kenttien perillisiä.

EPÄJATKUVAN EKSISTENSSIN ONTOLOGIA – POHDISKELUA

Ilmiöiden jatkuvuuden korvautuminen hetkellisillä ja paikallisilla tapahtumilla, ja sen mukana olioiden eksistenssin rajoittuminen näihin tapahtumiin, on modernin fysiikan vaikeimmin mielletäviä mielikuvia. Yritykset kuvailla näin muotoutuvaa mielikuvaa "tuikkivasta todellisuudesta" valottavat mielenkiintoisella tavalla modernista fysiikasta puhumisen kielellisiä

ongelmia. Miten puhua hiukkasista, joiden olemassaolo realisoituu vain hetkellisissä paikallisissa tapahtumissa?

Klassisiin mielikuviimme nojautuen pystymme kyllä kuvittelemaan tapahtumat olioiden hetkellisiksi esiintymisiksi vuorovaikutuksissa toistensa kanssa tavalla, jotka muistuttavat törmäyksiä (tai muita hetkellisiä hiukkasprosesseja). Tämä mielikuva antaa meille mahdollisuuden luokitella näitä tapahtumia ikään kuin ne olisivat hiukkasyksilöiden törmäyksiä, synty- ja häviämistapahtumia. Tapahtumien yhteydessä *mitattavat suureet* antavat postulaatin asemaan nousevien *säilymislakien* perusteella mahdollisuuden tulkintaan hiukkaslaajien avulla, joita luonnehtivat tietyt hiukkasominaisuudet.

Sumu-, kupla- tai kipinäkammiossa havaitut "hiukkasten radat" luovat kyllä hyvin oikeutetulta tuntuvan mielikuvan jatkuvasti olemassa olevan hiukkasen jatkuvasta liikkeestä, joka noudattaa tuntemiamme fysiikan lakeja. Mutta "radat" koostuvat peräkkäisistä tapahtumista, ja voidaan varsin helposti todeta, miten tapahtumia yhdistävät säilymislait ovat vastuussa tästä ratojen yhtenäisyydestä.

"Törmäyksistä", "synnystä" ja "häviämisestä" puhuminen kuvattaessa hetkellisiä tapahtumia, on makromaailman jatkuvaan eksistenssiin sidottua kieltä. Törmäyksessä kaksi jatkuvasti olemassa olevaa oliota kohtaa ja jälleen erkanee. Synty alkaa jonkin jatkuvan olemassaolon ja häviäminen lopettaa sen. Mutta miten puhua näistä tapahtumista muuten.

Kun ei ole jatkuvaa olemassaoloa, ei ole yksilöitä. Tulkinta tarjoaa mahdollisuuden puhua vain lajeista. Kussakin tapahtumassa kaksi (tai useampia) lajeja putkahtaa esiin samanaikaisesti siksi tapahtuman häviäväksi hetkeksi. Me kutsumme niitä vuorovaikutustapahtumiksi. Mutta myös "vuorovaikutus", "tapahtuma" ja "samanaikaisuus" ovat sanoja, joiden merkityksiin kätkeytyy makromaailmasta hahmottamamme jatkuva aika ja jatkuva olemassaolo. Vuorovaikutus on kahden jatkuvasti olevan olion vuorovaikutusta. Tapahtumalla on hetki, joka on jokin jatkuvasti virtaavan ajan kohta. Siihen sisältyy mielikuva sekä edeltävästä että seuraavasta ajan kulusta.

Sama ongelma liittyy kansantajuistelemaan puheeseen alkuräjähdyksen pisteestä. Piste sisältää väistämättä mielikuvan ympäristöstä, jonka suhteen pisteellä on jokin paikka ja pistemäinen koko. Mutta mitä mieltä on "pisteessä", joka on koko olemassa oleva universumi ilman mitään ympäristöä. Samoin, mitä mieltä on "hetkessä" joka ei ole jatkuvan ajanvirran kohta, tai samanaikaisuudessa, ellei ole myös eriaikaisuutta, joka taas merkitsee tuon ajan virran kahta eri kohtaa.

Näin ajatellen puhe hiukkasista ja vuorovaikutuksista ja niiden lajeista on (vain) malli jolla tulkitsemme tapahtumia. Jälleen meillä on vain metafyyssinen tulkinta, jolla on vain mielikuvan arvo ilman empiirisen pakon luomaa evidenssiä. Ja tämä tulkinta perustuu olennaisesti jatkuvan eksistenssin ideaan, eli ideaan, joka on mallilla kuvattavan todellisuuden vastainen.

Tosin, samalla tavalla kuin klassisella mielikuvarakenteella, tällä mielikuvalla on valtava merkitys näiden ilmiöiden yhtenäisenä esityksenä. Sitä voidaan kutsua "standardimalliksi" tai joksikin muuksi malliksi, jossa noita kuvitteellisia, mielikuvissamme jatkuvasti eksistoivia olioita voidaan luokitella. Mutta jatkuvasti olemassa olevaksi jää vain kunkin hiukkaslajin olemassaolon tai esiintymisen mahdollisuus, jota edustaa sen lajikenttä.

LIITE: OPISKELIJAN KYSYMYKSIÄ

Kysymykset, joita olen tässä luennossa pohdiskellut, ovat kaukana virallisten fysiikan oppimäärien ulkopuolella. Mutta opettaja ei voi välttää niitä. Esimerkkinä liitän tähän osan yhdestä oppilaan kysymysviestistä, joka tuli hiljattain dfcl-listalle, sekä siihen liittyvät pääkohdat omasta vastausviestistäni. (Olin varautunut esittämään tämän luennollani, mutta aika ei riittänyt.) Vastaus sisältää myös täydennyksiä luennolla esitettyihin näkökohtiin.

Opiskelija:

"Miten fotonit välittää sähköisen ja magneettisen vuorovaikutuksen? ... Miten magneetti lähettää fotoneja, ja miten veto- ja poistovoiman välittävät fotonit eroavat ja miksi sähköisen ja magneettisen vuorovaikutuksen fotonit eivät mene sekaisin? Opettaja kertoi, että ehkä fotonien spinillä on jotain tekemistä tämän kanssa. Mitä spin oikeastaan kuvaa? Feynmanin polkuintegraali ja Heisenbergin epätarkkuusperiaate ovat ajatuksena tuttuja ja niilläkin on varmaan tekemistä tämän kanssa."

Vastauksen pääkohdat:

"Vuorovaikutuksen kenttämallin ja kantajamallin yhteismitallinen kuvaaminen ei ole ihan helppoa näin yksityiskohtaisesti. Kysymyksesi vievät syvälle modernin fysiikan outoihin mielikuviiin, kun empiiriset tulokset pakottavat luopumaan klassisen fysiikan turvallisista konkreettisista mielikuvista, kuten hiukkasten yksilöllisyydestä ja jatkuvasta olemassaolosta..., jolloin Ilmiöiden jatkuva kulku surkastuu hetkellisiksi ja paikallisiksi tapahtumiksi. ---"

"Fotonit "realisoituvat" vain sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutustapahtumissa aineen, varauksellisten ... hiukkasten kanssa. Fotonit eivät ole ... jatkuvasti olemassa olevia yksilöitä, vaan hetkellisissä ja paikallisissa tapahtumissa (emissio, absorptio) välittyviä energian, liikemäärän ja pyörimismäärän kvantteja Nämä tapahtumat herättävät kyllä voimakkaan ja määrällisestikin hyvin selvän mielikuvan kuvitteellisten fotonihukkasten syntymisestä tai törmäyksistä ja absorboitumisesta. Tähän mielikuvaan kuuluu, että fotonilla on energia hf , liikemäärä hf/c ja eteen tai taakse suuntautuva spin 1. ... Tällaisina erinä siirtyvät suureet ovat ainoa havaittava todellisuus, eivät itse fotonihukkaset, joita tarvitaan kuvitteellisina selitysmalleina. Liikemäärä on tässä se elementti, jonka voimme ymmärtää edustavan sähköistä vuorovaikutusta, spin se, joka edustaa magneettista vuorovaikutusta. Kaikki vuorovaikutuksen luonteen erilaiset mahdollisuudet seuraavat näistä. Ei ole mitään erilaisia veto- ja poistofotoneja eikä sähkö- ja magneettifotoneja."

"... Varaus ja magneetti sellaisenaan eivät lähete "fotoneja". Niiden staattiset kentät voidaan ymmärtää "virtuaalisten fotonien" esiintymisen (todennäköisyys)jakaumiksi. Fotonien voidaan ajatella olevan näiden kenttien vapausasteita. Virtuaaliset fotonit ovat näiden vapausasteiden eräänlaisia "nollapistevärähtelyitä" Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen asettaman havaittavuuden rajan alapuolella. Mutta kuitenkin nämä virtuaaliset, syntyvät ja saman tien häviävät, "fotonit" vaikuttavat niiden syntymisen ja häviämisen kohdassa oleviin kohdehiukkasiin tavalla, joka ilmenee magneettisina ja sähköisinä voimina."

"Spin on eräänlainen "pyörimiskvantti", johon ei kuitenkaan liity mitään kulmamuuttujan avulla kuvattavissa olevaa pyörimisliikettä. Se ilmenee vain pyörimismääränä, joka kokonaisuutena säilyy hiukkasten vuorovaikutuksissa. Pyörimistä se muistuttaa sikäläkin, että siihen liittyy magneettimomentti silloin, kun hiukkasella on varaus. ..."

"Feynmanin "polkuintegraalit" (itse sanoisin mieluummin "reitti-integraali") ovat (kvanttikenttäteoreettinen) tapa esittää hiukkasten vuorovaikutustapahtumia kaikkien mahdollisten vuorovaikutusreittien yhteistuloksena. Niillä voi esittää myös fotonin vuorovaikutusta ainehiukkasen kanssa, mutta ei niistä nähdäkseni irtoa mitään lisäselvyyttä kysymykseen sm-vuorovaikutuksen erottelusta sähköiseen ja magneettiseen osuuteen. Äskeiseen selitykseeni ne liittyvät lähinnä siten, että jokaisella Feynmanin reitillä esiintyvät prosessin "välivaiheet" ovat "virtuaalisia hiukkasia".