

Kentän käsite fysiikassa¹

KAARLE KURKI-SUONIO, professori emeritus, fysiikan laitos, Helsingin yliopisto

Olen kantanut kauan huolta kolmen keskeisen peruskäsitteen asemasta fysiikan opetuksessa. *Vuorovaikutus*, *kenttä* ja *vapausaste* ovat niin olennaisia fysikaalisen maailmankuvamme rakenteessa ja sen kehityshistoriassa, että yhdenkin unohtaminen tai laiminlyöminen jättää siihen korvaamattoman aukon.

Esitykseni keskittyy keskeisimpään, kentän käsitteeseen. Varsinaisesti *tarkastelen* kentän mielikuvaa osana sitä mielikuvien kokonaisuutta, jolle fysikaalinen ymmärryksemme rakentuu.

Vuorovaikutuksella ja vapausasteilla on oma tärkeä osansa tässä kertomuksessa, johon sopinee *Arnold B. Aronsin*² termi ”*story line*”.

Perushahmot

Tunnuslauseeni ”*merkitykset ovat ensin*” tarkoittaa, että ensin syntyy ymmärrys, joka sitten käsitteistetään.

Ymmärtäminen on merkitysten hahmottamista. Merkitykset ovat hahmoja, havaintojen tuella luotuja mielikuvia. Käsitteet ovat tämän, jo ymmärretyn, täsmennettyjä esityksiä.

Avaruus, aika, oliot ja ilmiöt sekä olioiden ja ilmiöiden ominaisuudet ovat perushahmoja. Ne edustavat todellisuutta sellaisena kuin se meille avautuu havainnoistamme. Niihin kuuluvat myös ominaisuuksien relaatiot, jotka hahmottuvat riippuvuuksina, syysuhteina.

- *Aika ja avaruus* mielletään olioiden olemisen ja ilmiöiden tapahtumisen näyttämöksi.
- Oliot ovat ”*luonnon subjekteja*”, olijoita ja toimijoita.
- *Ilmiöt* ovat *luonnon tapahtumista*, sitä, miten oliot käyttäytyvät tai mitä niille tapahtuu, olioiden liikettä, vuorovaikutuksia ja ominaisuuksien muuttumista.

Fysiikka alkaa olioiden ja ilmiöiden tunnistamisesta ja niiden ominaisuuksien hahmottamisesta. Varsinaisesti kuitenkin vain ominaisuuksia havaitaan. Avaruus, aika, oliot, ilmiöt ja syysuhteet ovat oikeastaan vain havaintojen metafysikaalista tulkintaa. Ymmärryksemme tarvitsee niitä ominaisuuksien haltijoiksi tai kantajiksi.

Näistä elementeistä rakentuu primaarinen mielikuvamme todellisuudesta.

Ymmärryksemme perustuu siihen, että ne mielletään ”todellisuuden elementeiksi”, joksikin aidosti olemassa olevaksi.

Pidän tätä naiivin realismin mukaista ajattelua väistämättömänä oppimisen ja opetuksen lähtökohtana. Sen eri aspektien kyseenalaistaminen tulee mahdolliseksi vasta, kun on edetty sen viitoittamalla tiellä riittävän pitkälle ja kohdattu sitä vaativa empirinen pakko.

Klassinen mielikuvarakenne

Klassisen fysiikan mukaisessa maailmassa on kahdenlaisia olioita, *aineellisia* ja *aineettomia*.

Aineellisia olioita ovat *kappaleet* ja *hiukkaset*, tai *aine* yleensä. Niiden mielikuvat tuntuvat ongelmatomilta. Ne ovat yksilöinä tunnistettavia. Niillä on *yksilöidentiteetti*. Ne ovat olemassaolonsa aikana joka hetki jossakin paikassa.

Aineettomia olioita ovat *kentät*. Ne ovat *laajalaisia*. Kenttä kattaa jatkuvasti jonkin alueen tai koko avaruuden.

Klassisia kenttiä on kolme lajia, *gravitaatio-*, *sähkö- ja magneettikenttä*, taikka vain kaksi, kun sähkö- ja magneettikenttä ymmärretään *sähkömagneettisen kentän* kahdeksi komponentiksi.

Kentät tunnistetaan niiden ominaisuuksista, jotka ilmenevät erikseen kentän kattaman alueen kussakin pisteessä. Kentän ”*läsnäolo*” jossakin pisteessä tunnistetaan voimista, joilla ne vaikuttavat siinä olevaan hiukkaseen. Voimien perusteella voidaan määrittää *kenttäsuureet*, *gravitaation kenttävoimakkuus*, joka on sama kuin putoamiskiihtyvyys, *sähkökentän voimakkuus* ja *magneettivuon tiheys*. Ne ilmaisevat näiden kenttien voimakkuudet kussakin pisteessä.

Kentän mielikuvaa sanotaan vaikeaksi. Siksi kentistä ei ole haluttu puhua ainakaan vielä peruskoulussa. Yleiskielisen merkityksen ohjaamana ”kenttä” samastuu helposti alueeseen, kuten pelikenttään, sen sijaan, että se ymmärrettäisiin joksikin, joka kattaa alueen. Vastaavasti ”kentän muoto” vie ajatukset alueen geometriseen muotoon, kun se tarkoittaa vain sitä, miten kentän voimakkuus riippuu paikasta.

Nykyisin kuitenkin kaikilla on kännykät. Kännykkä tarvitsee ”kenttää” toimiakseen. Se havaitsee kentän voimakkuuden, joka ilmenee näytöltä. Paikassa, jossa kenttä on liian heikko, kännykkä ei toimi. Tällä tavalla kentän idea kuuluu nykyisin jo lasten arkisiin mielikuviiin. Ei kännykän tarjoama ”kentän”

¹ Luento MAOL ry:n syyskoulutuspäivillä 4.-5.10.2013.

² A. B. Arons (1997). *Teaching Introductory Physics*. John Wiley & Sons, New York.

mielikuva ehkä vastaa kovin tarkasti ”oikeaoppista” kentän käsitettä, mutta on se paljon parempi lähtökohta kuin pelikenttä.

Perinteinen kenttäviivojen demonstrointi auttaa kentän ja sen muodon hahmottamista. On vain ymmärrettävä, miten kenttäviivat ilmaisevat suunnan lisäksi myös kentän voimakkuuden. Graafista esitystä voidaan käyttää hyväksi, mutta sen mahdollisuuksia rajoittavat kentän kolmiulotteisuus ja voimakkuuksien vektoriluonne. Kentän voimakkuuden kuvaajat suorilla, joilla kentän suunta on symmetrian vuoksi kiinteä, tarjoavat kuitenkin hyvän lähtökohdan kvantitatiiviseenkin havainnollistukseen. Pallosymmetrisen systeemin kenttä keskipisteestä alkavalla säteellä on yksinkertainen tapaus. Mutta esimerkiksi suoran solenoidin ja sauvamagneetin kenttien magneettivuon tiheys symmetria-akselilla ja sen (keski)normaalilla ovat kiitollisia kokeellisesti lähestyttäviä tutkimuskohteita.

Kenttä astuu näyttämölle

Kentän historia alkaa *etävuorovaikutuksen* ongelmasta: Vaikuttaminen ilman kosketusta tuntui mahdottomalta. Newton kuittasi sen toteamalla, että ”idea toimii”.

Vuorovaikutuksen hahmottaminen itsenäiseksi ”todellisuuden elementiksi” oli Newtonin suuri perusoivallus. Sen ansiosta vuorovaikutuksen käsite astui fysiikkaan jäädäkseen. Se läpäisee *Newtonista* alkaen koko fysiikan kehitystä aina tieteen nykyistä eturintamaa myöten. Se otti heti paikkansa aineellisen maailman dynamiikan syyilmionä, jonka lakeja voitiin kokeellisesti tutkia. Näin *Newtonin* mekaniikasta tuli ensimmäinen maailmankuva, jonka selitysperstusta voitiin tutkia empiirisesti. Vuorovaikutuksesta tuli vähitellen kaikkien ilmiöiden ”mekanismi” tarkastelun peruslähtökohta, niiden syyilmioiden luokka.

Primaarisesti vuorovaikutukset voidaan luokitella *syyilmioiksi* luonteesta riippumatta. Etävuorovaikutusten osalta tämä kuitenkin johtaa ongelmiin.

Ensimmäisen mielikuvaongelman aiheuttaa *potentiaalienergia*, joka on selvästikin vuorovaikutuksen ominaisuus, ei kappaleen, niin kuin fysiikan kielenkäyttö helposti antaa ymmärtää. Vuorovaikutus on etävuorovaikutuksen potentiaalienergian kantaja. Tämä toteamus luo kuitenkin mielikuvan vuorovaikutuksesta oliona, jolla on energiaa ja joka voi vastaanottaa ja luovuttaa sitä.

Magneettinen vuorovaikutus on jopa suurempi ongelma. Se rikkoo voiman ja vastavoiman lakia ja siten myös suuria säilymlakeja. Tarkastelkaa vaikka, miten kahden liikkuvan elektronin väliset magneettiset voimat riippuvat hiukkasten liikesuunnista.

Kenttä systeemiin kuuluvana oliona, sen ”rakenneosana” ja sisäisten vuorovaikutusten välittäjänä ratkaisee nämä ongelmat. Potentiaalienergia voidaan ymmärtää kentän energiaksi, ja kentän liikemäärä pelastaa liikemäärän säilymlain. Samalla vapautetaan etävuorovaikutuksen kiusallisesta mielikuvasta, kun se palautuu kentän ja ainehiukkasten kosketusvuorovaikutuksiin.

Kenttien tunnistaminen itsenäisesti olemassa oleviksi olioiksi oli *Faradayn* tutkimusten ehkä suurin käsitteellinen merkitys. Se sinetöi kentän aseman klassisen maailmankuvan toisena kivijalkana, kappaleiden rinnalle asetettavana toisena olioluokkana.

Suurekenttä ja kenttäolio.

Kentän rinnastus jatkuvaan aineeseen paljastaa kentän kaksi merkitystä.

Jatkuvan aineen ominaisuuksia, lämpötilaa, tiheyttä, painetta tai jännitystä jne. voidaan käsitellä kenttinä. Ne ovat *suurekenttiä*, matemaattisia abstraktioita, pelkästään näiden suureiden esityksiä paikan ja ajan funktioina. Aine on näiden kenttäsuureiden merkitysten kantajaolio.

Sähkö-, magneetti- ja gravitaatiokentän kenttäsuureet paikan ja ajan funktioina ovat samalla tavalla suurekenttiä. Samoilla nimillä kutsutut *kenttäoliot* ovat, ainetta vastaavasti, niiden merkitysten kantajia. Kentän käsite syntyy samanlaisesta intuitiivisesta tarpeesta kuin aikanaan *eetteri*. Kun valo osoittautui aaltoliikkeeksi, oli välttämätöntä kysyä, minkä aaltoliikettä se oli.

Havaittavaan aaltoliikkeeseen kuuluu jokin mitattavissa oleva kenttäsuure, jonka riippuvuus ajasta ja paikasta esittää aallon muotoa. Valoaallon kenttäsuuretta ei kuitenkaan tunnistettu ennen *Faradaya* ja *Maxwellia*. Sen merkityksen kantajaksi vain nimettiin eetteri, kuvitteellinen väliaine, jonka kimmoisuudesta johtuva jännitystä ajateltiin kaivatun kenttäsuureen esittämäksi ominaisuudeksi.

Eetteri on siis eräänlainen klassisen kenttäkäsitteen edeltäjä.

Induktioilmiön tutkimuksistaan *Faraday* sai pakottavan empiirisen näytön kenttien olemassaolosta. Hänelle ”kenttä” merkisi lähinnä avaruuden yhtenäisesti täyttävää kenttäviivojen parvea, joiden vuorovaikutus johdeaineen kanssa aiheutti induktiovirrat.

Kenttien suhde aineellisiin olioihin

Kentät kytkeytyvät jollakin tavalla kappaleisiin tai hiukkasiin. Tavallisesti ajatellaan, että kappaleet tai hiukkaset ovat kenttien aiheuttajia, lähteitä tai pyörrekeskuksia.

Fysiikan opetuksessa tämä näkökulma korostuu – osittain laskennallisen painotuksen takia. Lähtökohtana ovat kenttien muotoa koskevat ideaaliset lait: *Newtonin gravitaatiolaki*, *Coulombin laki* sekä *Biot'n ja Savartin laki* tai *Ampèren ja Laplacen laki*. Näiden perusteella voidaan harjoitella laskemaan tunnettujen ”aiheuttajien” kenttien muotoja.

Kenttäsuure voidaan havaita. Siitä kentän laji tunnustetaan. Mutta tällaisten havaintojen perusteella ei ole mahdollista identifoida kentän aiheuttajaa. Kentän havaitseminen ja kenttäsuureen mittaaminen eivät kerro mitään aiheuttajista. Ja vaikka aiheuttajat tunnettaisiinkin, havaittuihin kenttäsuureisiin ei liity mitään empiirisesti tunnistettavia ”osoitteita”, joiden perusteella voitaisiin päätellä, mikä osuus havaitusta kentästä kuuluu millekin aiheuttajalle.

Kentillä on vain laji-identiteetti, ei yksilöidentiteettiä niin kuin kappaleilla.

Tämä merkitsee, että oikeastaan on olemassa vain yksi sähkökenttä, yksi magneettikenttä ja yksi gravitaatiokenttä. Jokainen niistä kattaa koko avaruuden. Kentän muoto vain vaihtelee jatkuvasti. Sen kertoo kenttäsuure ajan ja paikan funktiona.

Tämä johtaa erilaiseen näkemykseen kenttien ja kappaleiden tai hiukkasten suhteesta. Kentät ovatkin olemassa aineellisista olioista riippumatta, ja kappaleet ovat vuorovaikutuksessa niiden kanssa. Kappaleet tai hiukkaset eivät synnytä kenttiä vaan muotoilevat niitä. Esimerkiksi pistevaraus muotoilee sähkökentän ympäristössään *Coulombin* lain mukaiseksi.

Kenttien lakeja esittävistä lausekkeista ei ole mahdollista päätellä, kumpi näkemys kenttien ja aineellisten olioiden välisistä syysuhteista olisi oikeampi. Matemaattinen esitys ei paljasta esittämiään empiirisiä merkityksiä. Tapa, jolla kentät liittyvät ”aiheuttajiinsa”, on kuitenkin olennainen kysymys yrittäessämme ymmärtää kenttien asemaa ja merkitystä maailmankuvassamme. *Faraday* oivalsi tämän ja suunnitteli huolellisesti kokeita tämän kysymyksen selvittämiseksi. Lopulta koe, joka osoitti, ettei sauvamagneetin kenttä pyöri magneetin mukana, kun magneettia pyöritetään symmetria-akselinsa ympäri, muodostui ratkaisevaksi. Se vakuutti *Faradayn* siitä, että jälkimmäinen näkemys pätee.

Oppikirjoissa esiintyy tehtäviä, joissa kysytään lentokoneen siivenkärkien tai junan akselien päiden välille indusoituvaa jännitettä sekä sen riippuvuutta kulkuneuvon nopeudesta ja liikesuunnasta. Tämän jännitteen mittaaminen on oma ongelmansa, jota on syytä pohtia näiden tehtävien yhteydessä. Tehtävien

kylläisenä herää myös kysymys Maan pyörimisen mahdollisesta vaikutuksesta: voitaisiinko tällaisten mittausten avulla todeta, pyöriikö Maan magneettikenttä Maan mukana. *Faradayn* kokeen perusteella vastaus on kielteinen: EI PYÖRI!

Jälkimmäinen mielikuva kenttiin liittyvistä syysuhteista saattaa olla jopa tutumpi yleisen suhteellisuusteorian populaariesityksistä, joissa kerrotaan gravitaatiokentän saamasta merkityksestä aika-avaruuden kaarevuutena. Kenttäsuureen merkityksen kantajaksi jää tällöin pelkkä matemaattinen abstraktio, neliulotteinen aika-avaruus, jota ei voine mieltää olemassa olevaksi olioksi. Tässä yhteydessä tärkeätä on kuitenkin vain se näiden esitysten korostama mielikuva, että kappaleet muotoilevat aika-avaruutta eivätkä varsinaisesti ”synnytä” sitä.

Liikkuuko kenttä?

Kappaleet ja hiukkaset liikkuvat, koska niillä on paikka, joka voi muuttua. Kentän liikkeen mielikuva on sen sijaan ongelmallinen. Edes rinnastus jatkuvan aineen liikkeeseen ei toimi. Ainealkiot ovat ”infinitesimaalisia kappaleita”, joilla on yksilöidentiteetti. Klassisessa tarkastelussa aineen liike koostuu näiden alkioiden liikkeistä, joilla on omat seurattavat ratansa.

Kentässä ei ole yksilöityviä kenttäalkioita, joiden liikettä voitaisiin seurata. Suureiden arvoja ja niiden muuttumista voidaan havaita, mutta *suuret eivät liiku*. Kenttäsuureen muuttuminen merkitsee kentän muodon muuttumista, mutta siihen ei liity mitään liikkeen havaintoa. Ei ole empiirisesti oikeutettua puhua kentän liikkumisesta.

Kentän muodon muuttumista on tapana sanoa aaltoliikkeeksi. Mutta tämä ”liike” on vain kielikuva, tulkinta, joka seuraa kentän muodon muuttumisen luonteesta. Erityisesti saman muodon jatkuva siirtyminen synnyttää etenemisliikkeen mielikuvan. Tämä konkretisoituu havainnollisesti vesiaalloissa, joissa kenttäsuureena on ainealkion siirtymävektori.

Toinen tuttu esimerkki muodon muuttumisen luomasta liikkeen mielikuvasta on nk. pyörivä magneettikenttä. Se esiintyy koulufysiikassa yhtenä sähkömoottorin toimintaperiaatteena, jota demonstroidaan kolmivaihevirran avulla. Kentän muoto muuttuu pyörimiselle ominaisella tavalla, mutta itse kenttäolion pyörimisestä ei ole mielekäästä puhua.

Perinteinen käsitys aineellisten olioiden synnyttämistä kentistä johtaa väistämättä mielikuvaan, jossa kenttä liikkuu aiheuttajansa mukana. Mutta, jos ”aiheuttajan kenttä” onkin vain muoto, johon ”aiheuttaja” pakottaa itsenäisesti olemassa olevan kentän,

ei kenttä liiku. Kentän muodonmuutos vain seuraa ”aiheuttajansa” liikettä.

Tällainen tilanne on kuitenkin poikkeuksellinen, ja se voi esiintyä vain silloin kun ”aiheuttajan” etenemisliike on tasaista. Kun kentän kanssa vuorovaikutuksessa oleva aineellinen olio liikahtaa, sen aiheuttama kentän muoto muuttuu. Sen jälkeen kentän oma sisäinen dynamiikka määrää, miten tämä paikallinen vaikutus leviää kentässä. Tällä tavalla olion liikkuminen kentässä tekee siitä ”aaltoliikkeen lähteen”.

Näin syntyvä aaltoliike on kuitenkin sidottu kentän laji-identiteettiin eikä ”lähteensä” yksilöidentiteettiin. Kussakin tarkastelutilanteessa kentän havaittava muoto muuttuu tietyllä tavalla, joka määrittää sen aaltoliikkeen. Tämä on aina yksi ilmiökokonaisuus, joka ei jakaudu millään empiirisellä perusteella eri ”aiheuttajien synnyttämiksi” yksilöityviksi osa-aalloiksi.

Tämä on hyvä ymmärtää interferenssi- ja diffraktiokokeiden yhteydessä. Niistä puhutaan yleisesti ikään kuin olisi kysymys kahden tai useamman aaltoliikkeen yhdistymisestä. Tämä on teoreettisen selityksen näkökulma, joka perustuu siihen, että yksilöidyt osa-aaltoliikkeet ajatellaan kentän lakien perusteella tunnetuiksi ilman havaintoakin. Empiiriseltä kannalta jokainen diffraktiokoe on periaatteessa monivaiheinen koe, jossa verrataan useamman ”lähteen” yhdessä aiheuttamaa aaltoliikettä yksittäisten ”lähteiden” aiheuttamiin. Etsitään yhdistymislakia (superpositioperiaatetta), joka yhdistäisi nämä havainnot toisiinsa.

Kentän sisäinen dynamiikka

Energian siirtyminen kentässä luo vielä yhden mielikuvan kentän liikkeestä. Aaltoliike ”kuljettaa” energiaa tavalla, joka näyttää energian jatkuvalta etenemiseltä tai eri suuntiin leviämislähteen kentässä.

Tässäkin on huomattava, että energia on suure eivätkä suuret liiku. Liikkeen mielikuva on osa sitä aineenkaltaisuutta, joka seuraa energian vahvoista säilymisominaisuuksista. Fysiikassahan puhutaan energiasta niin kuin se olisi jatkuvan aineen kaltainen olio.

Ilmiö voidaan rinnastaa kimmoaaltojen (äänen) energian etenemiseen aineessa. Aineen kimmoisassa aaltoliikkeessä ilmiön luonne on selvä. Siinä energian ”liike” on tulkinta, joka palautuu ainealkioiden kosketusvuorovaikutuksiin. Ideaalisessa kimmoisassa aineessa nämä vuorovaikutukset ovat konservatiivisia. Energia säilyy niissä. Tämä mahdollistaa olioivan kielikuvan: Energia siirtyy alkiolta toiselle. Toisiaan koskettavien alkioiden peräkkäisyys luo siitä jatkuvan liikkeen mielikuvan.

Eetterin idea teki mahdolliseksi tämän mielikuvan siirtämisen sähkömagneettiseen aaltoliikkeeseen. Energian ajateltiin etenevän siinä vastaavalla tavalla ”eetterialkioiden” välisten kimmoisien vuorovaikutusten välityksellä. Kun eetteri vaihtui kentäksi, nämä vaihtuivat yhteen kytkeytyviksi induktioksi ja käänteisinduktioksi. Tämä kytkentä voidaan ymmärtää kentän sisäiseksi, sähköisen ja magneettisen komponentin väliseksi konservatiiviseksi vuorovaikutukseksi.

Aaltoliikkeeseen kuuluu mielikuva kentälle ominaisesta sisäisestä dynamiikasta, johon energian välitys perustuu. Tämä dynamiikka kytkee yhteen aallon muodon ja sen muuttumisen. Samalla se määrää kentälle tai aineelle ominaisen aallonnopeuden, valonnopeuden tai äänennopeuden. Aineessa dynamiikan ja äänennopeuden määräävät aineen hitaus- ja kimmoisuusominaisuudet tavalla, joka palautuu suoraan Newtonin lakeihin. Vastaavasti Maxwellin lait esittävät sähkömagneettisen kentän sisäistä dynamiikkaa ja määräävät valonnopeuden.

Jatkuvuudesta epäjatkuuteen

Aineen ja kenttien muodostama klassinen maailmankuva oli leimallisesti jatkuva. Modernin fysiikan peruskokeet, joilla tutkittiin sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutuksia hiukkasten kanssa, riistivät empiirisen oikeutuksen tältä perusmielikuvulta.

Klassisen mielikuvan mukaan emissio, absorptio ja sironta aiheutuivat aaltoliikkeen sähkömagneettisen kentän vuorovaikutuksesta aineellisten hiukkasten kanssa. Niiden olisi sen tähden pitänyt olla jatkuvia ilmiöitä. Nyt osoittautui, että ne koostuivat hetkellisistä ja paikallisista tapahtumista. Syntyi empiirinen pakko muuttaa käsityksiä sekä hiukkasten että kenttien luonteesta.

Tämä kehitysaskel perustuu olennaisesti systeemin vapausasteen käsitteeseen. Kolmesta alussa mainitsemistani käsitteestä se lienee koulufysiikalle vierain. Klassisessa fysiikassa sen merkitys fysikaalisen systeemin erilaisia käyttäytymismuotoja tarkoittavana terminä, systeemin energian ”lokeroina”, kasvaa esiin vähitellen, alkaen kappaleiden liikkeiden luokittelusta etenemiseen, pyörimiseen ja värähtelyihin. Tässä modernin fysiikan portilla se kulminoituu ja osoittautuu kvantittumisilmiöiden tulkinnan avaimeksi.

Systeemi luovuttaa ja vastaanottaa energiaa nimenomaan vapausasteisiinsa. Kentän vapausasteita ovat sen eritaajuiset perusmuotoiset aallot. Aaltoliikkeen spektri ilmaisee energian jakautumisen kentän vapausasteiden kesken.

Mustan kappaleen säteily osoitti energianvaihdon kvanttittuneisuuden sähkömagneettisen säteilyn ja aineen vuorovaikutuksessa *Planckin lain* mukaisesti eli siten, että kullakin vapausasteella on oma vapausasteen taajuuteen verrannollinen kvanttinsa.

Valosähköinen ilmiö sai *Einsteinin* ottamaan käyttöön *fotonin* käsitteen. Hän käsitteli fotonia klassisena hiukkasena ja valoa *Newtonin* tapaan fotonisuihkuna. Diffraaktion katsottiin toisaalta osoittavan sitovasti, että ”valo on aaltoliikettä”. *Newtonkin* oli taipunut tämän ”empiirisen pakon” edessä.

Aaltohiukkasdualismi

Einsteinin onnistuminen ja klassisen aaltomallin täydellinen epäonnistuminen johtivat pahaan sisäiseen ristiriitaan. Vasta *kaksoisrakokoe* tarjosi mahdollisuuden ongelman selvittämiseen. Siinä säteilyn hiukkas- ja aalto-ominaisuudet ilmenevät yhtäaikaan samassa kokeessa riippumatta tutkitun säteilyn lajista. Havaitaan aaltoluonteen ”todistava” diffraktiokuvio, mutta se kertyy hiukkasille ominaisista yksittäisistä ”osumista”. Tämä todetaan niinkin heikolla säteilyllä, että ”osumat” tulevat yksi kerrallaan. *Tätä havaintoa sanotaan aaltohiukkasdualismiksi.*

Ilmiön yhteydessä ei kuitenkaan ole mitään havaittavaa kenttäsuuretta, jolla aaltoliikettä voitaisiin kuvata. Aaltoliikkeeseen viittaava diffraktiokuvio vain hallitsee osuimien todennäköisyysjakaumaa. Tämä on *aaltofunktion* käsitteellinen alku. Konkreettisen kenttäsuureen ja sen merkitystä kantavan kentän sijaan saadaan vain diffraktioselityksen mahdollistava matemaattinen abstraktio, aaltofunktio.

Sama koskee kaikkia diffraktiohavaintoja. Diffraktiokuviot koostuvat aina ”osumista”, vaikka tähän ei valon luonnetta tarkasteltaessa ollut aikaisemmin kiinnitetty huomiota. Historiallisesti ratkaisevien diffraktiokokeiden aikaan sen toteamiseen ei toki ollut mahdollisuuksiakaan.

Einstein oli tulkinnassaan ”ylittänyt valtuutensa”. Kokeiden luoma empiirinen näyttö koskee pelkästään energianvaihdon kvanttittumista *Planckin lain* mukaisesti. Se ei tarjoa mitään empiiristä perustetta puheelle fotonista irrallaan energianvaihtotapahtumasta. Fotoni on vain energian (liikemäärän ja pyörimismäärän) vaihdon kvantti, ei klassista mielikuvaa vastaava itsenäinen hiukkanen. Toisaalta ei ole empiirisesti oikeutettua puhua valosta aaltoliikkeenäkään irrallaan havaitusta diffraktiokuvioista.

Aaltohiukkasdualismiin ei liity mitään empiirisesti ilmenevää sisäistä ristiriitaa. Ristiriita on vain kahden tulkinnan välillä. Hiukkasuihku ja aaltoliike ovat

vain kaksi klassista mielikuvaa, mallia, joiden avulla yritetään selittää, mitä varjostimella, filmillä tai muussa ilmaisimessa havaitaan. Kaksoisrakokokeen perusteella on pakko hylätä molemmat. Mutta mitä tilalle?

De Broglien kaksi lakia ilmaisevat täsmällisesti relaation, joka näiden mallien välille syntyy, kun niillä yritetään esittää samaa ilmiötä. Ne tarjoavat myös lähtökohdan *Schrödingerin* kvanttimekaniikalle ja uuden mielikuvan rakentamiselle hiukkasten ja kenttien luonteesta.

Hiukkasten identiteettikriisi

Kaksoisrakokokeesta alkava empiirinen pakko sallii olemassaolon peruselementeiksi, vain hetkellisiä ja paikallisia tapahtumia. Kaikki, mitä niiden ulkopuolelta sanotaan, on tulkintaa, jota on empiirisen pakon edessä muutettava. Tämä merkitsee, että empiirisin perustein *ei ole jatkuvia ilmiöitä, ei edes jatkuvaa olemassaoloa.*

Ellei ole jatkuvaa eksistenssiä, ei voi olla olemassa klassisen mielikuvan mukaisia hiukkasia sen paremmin kuin kenttiä ja niiden aaltoliikettä.

Samalla putoaa pohja koko deterministiseltä kausaliiteetilta, joka hallitsee klassisen fysiikan mielikuvarakenteita. Sehän vaatii jatkuvaa syy-suhteen ketjua. Aaltofunktio tarjoaa idean hetkellisten ja paikallisten tapahtumien esiintymisen todennäköisyyksien käsittelemiseksi.

Kaikkia perusolioita kuitenkin kutsutaan yhä ”hiukkasiksi”, mutta silloin sanalle on annettu uusi moderni merkitys. ”Moderni hiukkanen” poikkeaa ratkaisevasti hiukkasen klassisesta mielikuvasta. Hiukkaset ”realisoituvat”, ilmaantuvat ”todellisuuteen”, vain hetkellisissä ja paikallisissa vuorovaikutustapahtumissa, jotka näyttävät niiden osuimilta, törmäyksiltä tai hiukkasreaktioilta.

Tästä seuraa hiukkasten identiteettikriisi. Olemassaolon hetkellisyys poistaa yksilöidentiteetin mahdollisuudenkin. Kaikille olioille jää vain *laji-identiteetti*. Lajilla on tuntomerkit, joiden perusteella on mahdollista tunnistaa, minkä lajin hiukkaset osallistuvat eri vuorovaikutustapahtumiin.

Yksilöidentiteetin puuttuminen merkitsee myös, että kaikki saman lajin oliot ovat keskenään *identtisiä*. Tämä on hankala mielikuva, sillä identtisyys on samuutta paljon syvemmissä merkityksessä kuin esimerkiksi identtisten kaksosten samanlaisuus.

Atomin elektroniverhossa on kyllä Z elektronia, mutta ne ovat ”sama elektroni Z kertaa” – vai miten sen voisi ilmaista. Tästä ei selvitä eteenpäin ilman ajatusta kenttien kvanttittumisesta.

Kenttien kvantittuneisuus

Kenttien kvantittuneisuus tarkoittaa sitä asiaintilaa, etteivät kentät oliona ole jatkuvia vaan kvantittuneita. Siitä teoreettisesta askelesta, joka otetaan siirryttäessä 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 potentiaali-funktion avulla.

Tilanne selkenee vasta, kun myös kentät ”kvantitetaan”. Tämä ”toimenpide” ei ole pelkkä klassisten kenttien kvantitus, vaan se koskee samalla tavalla myös kaikkia aineellisia ”hiukkasia”. Muodostuu mielikuva, jossa kullakin oliolajilla on oma *lajikenttänsä*. Kukin lajikenttä on eräänlainen oman lajinsa hiukkasten ”virtuaalisen olemassaolon kenttä”, joka täyttää avaruuden. Hiukkasten realisoitumista tapahtumina voidaan ehkä havainnollistaa ”*tuikkivan kentän*” mielikuvalla.

Fermionit ja bosonit

Lajikenttä voidaan ajatella monen identtisen hiukkasen systeemiksi, jossa ”hiukkasten” lukumäärä on *a priori* mielivaltainen. Lukumäärä ymmärretään nyt suureeksi, joka on systeemin yksi dynaaminen muuttuja muiden ohella.

Kun tällaista systeemiä kuvataan aaltofunktiolla, hiukkasten identtisyys vaatii, että aaltofunktion empiirinen merkitys säilyy, kun siinä vaihdetaan keskenään minkä tahansa kahden hiukkasen koordinaatit. Tämä tarjoaa periaatteessa kaksi mahdollisuutta. Aaltofunktio voi säilyä sellaisenaan tai se voi vaihtaa etumerkkiä, eli se on joko *symmetrinen* tai *antisymmetrinen* kaikkien hiukkasvaihtojen suhteen.

Kumpikin vaihtoehto toteutuu luonnossa. Tämä on yksi ihmeellisimpiä esimerkkejä matemaattisen esityksen merkityksestä fysiikassa. Kaikki hiukkaset jakautuvat näiden vaihtoehtojen mukaisiin kahteen luokkaan, *fermioneihin* ja *bosoneihin*.

Aineen rakenteen perushiukkaset, elektronit ja nukleonit (yleisemmin leptonit ja baryonit) ovat fermioneja. Fotonit ja muut vuorovaikutusten välittäjähiukkaset ovat bosoneja.

Klassisen maailmankuvan olioiden jakautuminen hiukkasiin ja kenttiin vaihtuu näin jakautumiseksi

fermioneihin ja bosoneihin. Kumpienkin luonteeseen jää jotakin sekä hiukkasille että kentille ominaista.

Tämän jaon empiirisenä perustana on ennen muuta antisymmetriasta ja symmetriasta seuraavien ennusteiden todentuminen, jolla on luonnossa valtavat mittasuhteet. Fermionien ja bosonien lajikentät ovat ratkaisevasti erilaisia.

Antisymmetriasta seuraa fermioneille erityisesti *Paulin kieltoääntö*, joka ”kieltää” useamman kuin yhden hiukkasen asettumisen ”samaa tilaan”. Se ”on vastuussa” mm. atomien ja aineen olemassaolosta ja kemiallisten aineiden koko runsaudesta.

Fermionisysteemin hiukkasten lukumäärä on ”hyvä kvanttiluku” eli se on energian kanssa yhdessä säilyvä suure. Sillä on suljetussa systeemissä tietty vakioarvo. Tältä pohjalta selittyä sekin, miksi elektronit voivat näyttää klassisten hiukkasten kaltaisilta, jatkuvasti eksistoilta yksilöiltä.

Symmetriasta puolestaan seuraa bosoneille, että samassa tilassa voi olla hiukkasia miten paljon tahansa. Tämä toteutuu nk. *Bosen kondensaationa*, joka ilmenee monina kylmäfysiikassa havaittavina eksoottisina ilmiöinä, mm. monikertaisina bosonin luonteisina atomeina.

Bosonien lukumäärä ei ole ”hyvä kvanttiluku”, eli se ei ole energian kanssa yhdessä säilyvä suure. Bosonisysteemin hiukkasten lukumäärä ei ole kiinteä, sillä on vain tietty todennäköisyysjakauma.

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. Aaltoliike on ”virtuaalisten fotonien” joukkoesiintyminen.

Paulin kieltoääntöön vuoksi vastaavanlainen elektronin tilaa esittävän aaltofunktion ”realisointi” ei ole mahdollista. Se onnistuu vain pakottamalla yksi elektroni kerrallaan tarkasteltavaan tilaan ja toistamalla koe hyvin monta kertaa.

Tällä tavalla klassisten mielikuvien, hiukkasten ja kenttien tai hiukkassuihkujen ja aaltoliikkeiden, empiiriset lähtökohdat selittyvät fermioni- ja bosonisysteemien erilaisilla ominaisuuksilla.

Tarina ei pääty tähän. Mutta sen jatkamisen yritykset ovat johtaneet abstrakteihin matemaattisiin spekulatioihin, kuten parikymmenulotteisiin säieteorioihin, joita on miljoonia variantteja – ainakin toistaiseksi ilman empiirisesti testattavia ennusteita. Niihin en enää puutu. Muut, viisaammat kertokoot niistä. ■