

KÄSITTEIDEN MERKITYKSET JA NIIDEN KANTAJAT ¹

Kaarle Kurki-Suonio

Todellisuuden elementit

Avaruus, aika, oliot ja ilmiöt sekä olioiden ja ilmiöiden ominaisuudet edustavat todellisuutta sellaisena kuin se meille avautuu *primaarihahmotuksessa*, aistinvaraisessa luonnon kokemisessa. Siihen kuuluvat myös *ominaisuuksien relaatiot*, jotka hahmottuvat *riippuvuuk-sina, syysuhteina*, olioiden ja ilmiöiden keskinäisenä vaikuttamisena ja aiheuttamisena. *Näistä elementeistä rakentuu primaarinen mielikuva todellisuudesta*, ympäristöstä ja mi-nän suhteesta ympäristöön. Niiden liittäminen havaintoihin on intuitiivista tulkintaa, joka on varsinaisen empirian ulottumattomissa ja kuuluu siis *metafysiikkaan*.

Luonnollinen *kieli* perustuu primaarihahmotukseen. Tämä näkyy kielen rakenteesta. Luonnon todellisuudesta puhutaan käsitteillä, jotka esittävät ja kuvaavat "todellisuuden elementtejä". Kielen käsitteillä on, tai niillä koetaan olevan, todellisuudessa aidot olemassa olevat vastineet. *Substantiivit* edustavat olioita, *verbit* ilmiöitä, *adjektiivit ja adverbis* olioiden ja ilmiöiden ominaisuuksia. Elementit kuuluvat havaintojen kautta muodostuviin hahmoihin ja niitä esittäviin käsitteisiin *merkitysten kantajina* (*kantaja - referent*). Tämä kytkentä muodostaa *merkitysten metafysisen ytimen*, johon ymmärtämisen kokemus perustuu.

Tällainen tulkinta on *naiivia realismia*², johon kuuluu sekä *ontologinen* että *epistemolo-ginen dualismi*, kaksijakaisuus: Ajatellaan, että *on olemassa havaitisijasta riippumaton to-dellisuus, joka on havaintojemme kohde, ja että havainnot välittävät niistä "oikeata tietoa"*.

Tällainen mielikuviin perustuva ymmärtäminen on *kvalitatiivista*. Sitä esittävät kvalitatiivisen tason käsitteet. Sitä rakentaa kvalitatiivinen tutkimus, joka tunnistaa olioita ja ilmiöitä ja luo mielikuvia niiden luonteesta ja niiden välisistä suhteista. Fysiikan kvantitatiivisuutta on tapana korostaa. Samalla kuitenkin helposti sivuutetaan tutkimusten mielikuvia luova kvalitatiivinen merkitys, joka on primaarista. Luentojeni yksi keskeinen tarkoitus tällä kurs-silla on kiinnittää huomiota siihen, miten modernin fysiikan perusteitakin tarkasteltaessa juuri tutkimusten kvalitatiivinen merkitys on ollut edistymisen kannalta ratkaisevaa niin, että kokeiden kvantitatiiviset tulokset saavat merkityksensä niiden kautta.

Hyvänä esimerkkinä on FARADAYN elämäntyö, joka suurimmaksi osaksi keskittyi kvali-tatiivisiin tutkimuksiin. "Kaavojen" lähes olematon osuus hänen tuotannossaan on sil-määnpistävä. Aikanaan häntä jopa moitittiin puutteellisesta matematiikan hallinnasta. Eh-kä eniten on fysikaalista ymmärtämistä edistänyt hänen induktioilmiön tutkimuksensa, joi-den perusteella kentät tunnistettiin itsenäisiksi olioiksi.

Ominaisuuksien kvantifiointi suureiksi johtaa koko tämän kvalitatiivisen tulkinnan kvan-tifiointiin, sen esitykseen kvantitatiivisin käsittein. Siinä ominaisuuksista luodaan *suureet*, riippuvuuksista ja syysuhteista *lait*, ja kausaalimalleista *teoriat*.

Kvantifiointi ei luo uusia merkityksiä. Se vain välittää kvalitatiivisten käsitteiden merki-tykset vastaavien kvantitatiivisten käsitteiden merkityksiksi ja liittää niiden hahmotukseen suuruuksien tajun. Kuten korostin ensimmäisessä luennossani, kvantitatiiviset käsitteet kuitenkin tarjoavat perustaa edelleen hahmottuvalle kvalitatiiviselle ymmärrykselle, joka jälleen tulee kvantifioitavaksi. Tällä tavalla spiraalisesti etenevässä prosessissa kehitty-y se, mitä yleisessä kielenkäytössä tavallisesti tarkoitetaan "fysiikalla": *Kvantitatiivinen tutki-mus ja tietorakenne*, jonka kokeellisuus perustuu suureiden *mittaamiseen*.

Moderniin fysiikkaan siirryttäessä on tärkeitä tiedostaa merkitysten kantajien metafysi-kaalisuus, siis kuvitteellisuus, ja ottaa se huomioon havainnon ja tulkinnan erottamisessa. Primaarihahmotukseen sidotun ajattelun vapauttaminen hyväksymään uuden empirian luomaa muutospakkoa ei muuten onnistu.

¹ Tämä otsikko kattaa myös keskiviikkoamun luennon alkuosan.

² "Naiivi" on tässä neutraali termi, ei halventava.

Klassisen fysiikan puitteissa tähän ei välttämättä kiinnitetä huomiota, koska kaikilla käytetyillä käsitteillä on tätä kuvitteellista todellisuutta kuvaava merkitys. Käsitteet koetaan kieleksi, joka suoraan kuvaa todellisuutta. Se on naiivin realismin kieltä. Tätä voidaan suorastaan pitää klassisen fysiikan määritelmänä:

Klassinen fysiikka on se osa fysiikkaa, joka ei johda ristiriitaan primaarihahmotuksen mukaisen naiivin realismin kanssa.

Se on primaarihahmotuksen äärimmäinen ekstrapolaatio, joka toteutuu käyttämällä kehitettyjä havainto- ja tutkimusvälineitä aistien jatkeena.

Kaikkiaan ymmärryksen perustana olevat mielikuvat ovat *metafyysisiä, empiiriseen evidenssiin eli havaintonäyttöön perustumattomia tulkintoja*. Ne ovat kuitenkin samalla *klassisen fysiikan ymmärtämisen perusteita*. Ne ovat rakentuneet empirian pakosta, niin kuin hahmotus aina luo *empiirisen pakon*. Ne ovat "*valmiita hahmoja*", hahmotusprosessin välitappeja, joiden empiirisenä oikeutuksena on eri aistimusten, havaintojen ja kokeiden yhteinen, sisäisesti yhtäpitävä tuki. Tämä antaa niille pätevyyden havaintojen ja kokeiden kattamalla pätevyysalueella.

Modernin fysiikan portilla *uusille alueille ulottuva empiria* kiistää tämän oikeutuksen ja luo empiirisen pakon näiden mielikuvien intuitiivisten lähtökohtien, "taka-ajatusten" uudelleenarviointiin. Se asettaa klassisen ymmärtämisen perusteet oikaistavien *ennakkokäsitysten* asemaan.

Tämä vaatii *tiukennettua empiriaa*, huomion kiinnittämistä entistä tarkemmin havainnon ja tulkinnan erottamiseen. Vain sen kautta tulee mahdolliseksi edetä rakenteellisen hahmotuksen uuteen, hierarkkisesti korkeampaan kerrokseen, jossa luodaan *uuteen empiriaan tukeutuvat uudet mielikuvat* merkitysten kantajien luonteesta. Edellisellä luennolla tarkasteltu fotonin käsite on siitä hyvä esimerkki.

Todellisuuden elementtien konkreettiset klassisen mielikuvat ovat samalla se lähtökohhta, josta käsin moderniin fysiikkaan on edettävä. Niiden "helppous" on kuitenkin monessa suhteessa näennäistä. Niiden luonnetta on sen tähden syytä tarkastella lähemmin. Ne on saatava turvallisesti haltuun, ennen kuin voidaan ryhtyä pohtimaan, mitä niissä on muutettava ja muutettavissa empiirisen näytön perusteella.

Aika ja avaruus

Avaruuden ja ajan käsitteet ovat vähän sivussa tämän kurssin teemoista. Vain HEIMO SAARIKON torstainen luento liittyy niiden modernin merkityksen empiiriseen perustaan. Ne kuitenkin kytkeytyvät kiinteästi muiden elementtien luonteeseen, joten niitä ei voi tässä yhteydessä sivuuttaa

Primaarihahmotuksen mukaisessa mielikuvarakenteessa aika ja avaruus ovat olioiden olemisen ja ilmiöiden tapahtumisen näyttämö. *Avaruus* on siinä *jatkuva tyhjä tila*, jossa oliolla on joka hetki tietyt *paikat*. *Aika* "virtaa" avaruudesta riippumatta *jatkuvasti* kaikkialla samanaikaisesti ja samalla tavalla kaiken olemassaolon yhteisenä taustana. Ilmiöillä on tässä "ajan virrassa" tietyt tapahtumisen *aikavälit* tai *hetket*.

Ajan ja avaruuden *itsenäinen olemassaolo*, ontologinen absoluuttisuus, on kuitenkin kokonaan vailla empiiristä perustaa. Ne hahmottuvat vain olioiden ja ilmiöiden kautta. Olioiden etäisyydet ja koot sekä ilmiöiden kestot ja tapahtumien aikavälit luovat avaruuden ja ajan mielikuvat. *Avaruutta ei ole ilman olioita, eikä aikaa ilman ilmiöitä*.

Olemassa olevan avaruuden mielikuva konkretisoitiin liittämällä siihen olion luonteinen mielikuva, *eetteri*, avaruuden täyttävä painoton ja kimmoisa jatkuva kuvitteellinen aine. Se palveli erityisesti sähkömagneettisen aaltoliikkeen väliaineena, kunnes Faradayn *sähkömagneettinen kenttä* korvasi sen avaruuden täyttävänä aineettomana oliona.

Olioiden eksistenssiin kytkeytyvä kuva "tyhjän" avaruuden luonteesta täydentyy *kenttien kvanttiteorian* myötä, jossa jokaista hiukkaslajia – aineellisia perushiukkasia (fermione-

ja) yhtä hyvin kuin vuorovaikutusten kantajahiukkasia (bosoneja) – edustaa oma kenttensä. Kaikkien näiden "lajikenttien" Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen mukaiset kvanttimekaaniset *nollapistevärähtelyt* täyttävät avaruuden tyhjiön. Tästä aiheutuvaksi tulkittu "tyhjiön paine" on jopa mitattavissa. Tässä mielessä tyhjiötä voidaan hyvinkin kutsua edellisen luentoni "loppuheiton" mukaisesti kaikkien olemassaolon vapausasteiden potentiaalisen eksistenssin kentäksi. Kytkeytyminen olioihin ja ilmiöihin vie näin pohjan ajan ja avaruuden itsenäisen olemassaolon mielikuvalta mutta tarjoaa samalla modernin vastineen eetterille olemassaoloon liittyvien merkitysten kantajana.

Jo klassisen fysiikan puolella ontologinen kysymys avaruuden ja ajan olemassaolosta ja luonteesta vaihtuu epistemologiseen kysymykseen olioita ja ilmiöitä koskevien havaintojen *suhteellisuudesta ja absoluuttisuudesta* eli siitä, riippuvatko ne havaitsijan liikkeestä vai eivät. Klassisesti aikaa koskevat havainnot ymmärretään absoluuttisiksi, havaitsijasta riippumattomiksi, jolloin myös kappaleiden etäisyydet ja koot ovat absoluuttisia.

Jatkuvien ilmiöiden korvautumista hetkellisillä ja paikallisilla tapahtumilla, johon palaataan seuraavassa luennossa, myötäilee ajan ja paikan käsitteiden *kiinnityksen muutos*, joka on suhteellisuusteorian ymmärtämiseksi välttämätön. Olioiden etäisyyksien ja kokojen sekä ilmiöiden kestojen asemesta on avaruuden ja ajan geometrian tarkastelun perustaksi otettava *paikallisten ja hetkellisten tapahtumien etäisyydet ja aikavälit*.

Suppeamman suhteellisuusteorian kvantitatiivinen lähtökohta, Lorentz-muunnos, seuraa valonnopeuden absoluuttisuudesta, joka väistämättä merkitsee tapahtumien aikavälien suhteellisuutta. Se on merkitykseltään kahden toistensa suhteen liikkuvan havaitsijan havaintojen välinen relaatio, kun he määrittävät kahden tapahtuman etäisyyden ja aikavälin. Kaikki tästä relaatiosta seuraavat kummalliset ennusteet, kuten olioiden mitattavien pituuksien Lorentz-kontraktio ja ilmiöiden mitattavien kestojen "dilataatio" ja niistä johtuvat näennäiset paradoksit, ovat "ymmärrettäviä" vain tästä perusmerkityksestä käsin.

Kielenkäyttö, joka unohtaa tämän perusasian, on suhteellisuusteorian kansantajuistamisen jatkuva ongelma. Yleinen tapa puhua ajasta, joka, koordinaatistojen liikkeestä riippuen, kulkee jossakin koordinaatistossa hitaammin tai nopeammin kuin toisessa, hämärtää olennaisesti tarkastelun ymmärrettävyyttä, koska se sitoo ajan käsitteen juuri siihen primaarihahmotuksen mukaiseen virtaavan ajan mielikuvaan, josta pitäisi irrottautua.

Oliot ja ilmiöt

Oliot ovat ontologisessa mielessä "luonnon subjekteja", olioita ja toimijoita. Epistemologisessa mielessä ne ovat objekteja, havaintojen ja tutkimusten kohteita.

Ilmiöt ovat *luonnon tapahtumista*, sitä, miten oliot käyttäytyvät tai mitä niille tapahtuu ajan funktiona.

Klassisessa mielikuvarakenteessa olioiden olemassaolo on jatkuvaa. Niitä on kahta lajia, *aineelliset oliot* ja *kentät*, jotka ovat aineettomia. Oliolla on pysyviä tunnistusominaisuuksia ja ilmiöissä muuttuvia ominaisuuksia.

Klassisesti kaikki ilmiöt ovat jatkuvia. Ne tunnistetaan niissä havaittavista ominaisuuksien välisistä relaatioista, joita kvantitatiivisesti vastaavat ilmiöiden lait. Voidaan erottaa yksittäisten olioiden ilmiöt, joita ovat niiden *liike* ja niiden *ominaisuuksien muuttuminen*, sekä olioiden väliset *vuorovaikutukset* eli ilmiöt, joissa oliot vaikuttavat toisiinsa.

Ilmiö tapahtuu jossakin alueessa, ja sillä on jokin kesto. Siinä esiintyvät muutokset ovat sekä ajan että paikan suhteen jatkuvia. Hetkellisiä ja pisteittäisiä tapahtumia esiintyy klassisessa fysiikassa vain ideaalisina malleina.

Erytisesti *liikkeen* käsite on sidoksissa *ajan ja avaruuden jatkuvuuteen*, ja olion liikkeestä on mahdollista puhua vain sillä edellytyksellä, että olio on olemassa jatkuvasti ja on koko ajan tunnistettavissa samaksi oloiksi eli että sillä on *säilyvä yksilöidentiteetti*.

Aineelliset oliot

Aineellisia olioita ovat *kappaleet* tai *hiukkaset* ja *aine*, yleisemmin kaikki aineelliset systeemit.

Kappaleet ovat "makroskooppisia olioita". Ne ovat jatkuvasti olemassa olevia, tunnistettavia erillisiä yksilöitä. Niillä on *yksilöidentiteetti*. Jokaisella kappaleella on koko ajan oma paikkansa, asentonsa, kokonsa ja muotonsa. Kappaleiden liikkeessä nämä muuttuvat *jatkuvasti* niin, että jokaisella kappaleella on oma jatkuva *ratansa*³. Liikettä esittävät sen rata ja dynaamiset muuttujat liikemäärä, pyörimismäärä ja liike-energia, jotka ovat jatkuvia.

Hiukkanen merkitsee klassisessa fysiikassa useimmiten pistemäiseksi idealisoitua kappaleen mallia, jonka ainoa vapausaste on etenemisliike. Muuten hiukkaset ovat vain pieniä kappaleita.

Klassinen *aine*, josta kaikki kappaleet koostuvat, on luonteeltaan *jatkuvaa*. Aineen tunnusominaisuutena on sen (kemiallinen) laji, joka antaa sille *laji-identiteetin*.

Kappaleilla ja aineella on suunnaton määrä erilaisia *ominaisuuksia* ja vastaavasti näitä esittäviä *suureita*. Kappaleet ja aine ovat näiden suureiden merkitysten kantajia.

Kappaleiden *makro-ominaisuudet* johtuvat aineen *ominaisuuksista*, jotka ovat *jatkuvia* paikan ja ajan funktioita. Aineen pisteittäiset ja hetkelliset ominaisuudet ja niitä koskevat lait ovat mikro-ominaisuuksia ja -lakeja. Niitä käsitellään makro-ominaisuuksina ja makro-lakeina, joita sovelletaan aineen pisteisiin kuuluviin infinitesimaalisiin *ainealkioihin*. Ne saavat näin esityksen hetkellisinä ja pisteittäisinä *differentiaalisuureina ja -lakeina*, joista kääntäen integroimalla voidaan palata makrosuureisiin ja -lakeihin. Aineellisten olioiden klassisessa fysiikassa on näin *kaksi käsittelytasoa*, *makro- ja mikrotaso*, joiden välinen yhteys perustuu aineen ja sen kaikkien ominaisuuksien jatkuvuuteen.

Ainealkiot ovat "infinitesimaalisia kappaleita" myös siinä mielessä, että niillä on *yksilöidentiteetti*. *Aineen liike* klassisessa tarkastelussa koostuu näiden alkioiden liikkeistä, joilla on omat seurattavissa olevat ratansa.

Kentät

Kentät ovat *laaja-alaisia*, *alueen tai koko avaruuden täyttäviä*, *ajassa ja paikassa jatkuvia aineettomia olioita*.

Kentän käsitteen historia alkaa *etävuorovaikutuksen ongelmasta*, joka vaivasi fyysikoita kauan Newtonin jälkeen. Energian, liikemäärän ja pyörimismäärän *välittyminen ilman kosketusta* oli vakava mielikuvatason ongelma.

Newton kuittasi etävuorovaikutuksen ideaan liittyvän ongelman toteamalla, että "se toimii". Vuorovaikutuksen hahmottaminen itsenäiseksi "todellisuuden elementiksi" oli klassisen mekaniikan suuri perusidea. Mekaniikan perushahmotuksessa vuorovaikutukset luokitellaan syyilmiöiksi erottelematta niiden luonnetta.

Etävuorovaikutusten osalta tämä luokittelu ei ole ongelmaton. Ensimmäisen mielikuvaongelman aiheuttaa *potentiaalienergian* käsite. Se kiinnittyy nimenomaan vuorovaikutuksen ominaisuudeksi. Vuorovaikutus hahmottuu potentiaalienergian merkityksen kantajaksi. Tämä luo siitä mielikuvan oliona, jolla on ja joka voi vastaanottaa ja luovuttaa energiaa. Toisen ongelman aiheuttaa liikkuvien hiukkasten välinen *magneettinen vuorovaikutus*, joka rikkoo voiman ja vastavoiman lakia ja siten myös liikemäärän säilymlakia.

Kenttä systeemin sisäisten etävuorovaikutusten välittäjänä ja systeemi "rakenneseana", siihen kuuluvana oliona, ratkaisee nämä ongelmat. Etävuorovaikutus palautuu kentän ja aineellisten rakenneseosien välisiin kosketusvuorovaikutuksiin. Vuorovaikutuksen potentiaalienergia voidaan ymmärtää kentän energiaksi, ja kentän liikemäärä pelastaa liikemäärän säilymlain.

Sähkö- ja magneettikenttien tunnistaminen itsenäisesti olemassa oleviksi olioiksi onkin FARADAYN kokeellisen tutkimuksen ehkä suurin käsitteellinen merkitys.

³ Systeemin rata yleisenä käsitteenä merkitsee sen kaikkien koordinaattien aikariippuvuuksien joukkoa.

Kenttien tunnistus. Klassisessa fysiikassa 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 kussakin kentän pisteessä*. Gravitaatio-, sähkö ja magneettikentän "läsnäolo" jossakin pisteessä tunnistetaan voimista, joilla ne vaikuttavat tässä pisteessä olevaan hiukkaseen. Näiden voimien perusteella voidaan määrittää *kenttäsuureet*, jotka ilmaisevat näiden kenttien voimakkuudet kussakin pisteessä. Nykyisessä suurenimistössä nämä ovat gravitaation kenttävoimakkuus, joka on sama kuin putoamiskiiltvyys, sähkökentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys.

Mielikuvan hahmottumiseen kentästä oliona liittyy ongelmia. Yleiskielisen merkityksen (esimerkiksi pelikenttä) ohjaamana "kenttä" saatetaan samastaa itse alueeseen, eikä johonkin, joka jollakin tavalla täyttää tai kattaa alueen, kuten pitäisi. Vastaavasti *kentän muoto* voi houkuttaa ajattelemaan kentän kattaman alueen geometrista muotoa, kun se tarkoittaa pelkästään sitä, millä tavalla kenttäsuure tai sen esittämä ominaisuus riippuu paikasta.

Perinteinen kenttäviivojen demonstrointi voi kyllä palvella kenttäolion ja sen muodon havainnollistamista edellyttäen, että ymmärretään, miten kenttäviivaesitys ilmaisee kenttäsuureen suunnan lisäksi myös sen suuruuden paikan funktiona. Muuten muodon hahmottamiseen sanan geometrisessa merkityksessä voi tukeutua vain *kuvaajien* avulla, joiden käytön mahdollisuus rajoittuu, kenttien kolmiulotteisuuden ja kenttäsuureiden vektoriluonteen takia, lähinnä sellaisille suorille, joilla kenttäsuureen suunta on kiinteä.

Suurekenttä ja kenttäolio. Kentän rinnastus *jatkuvaan aineeseen* paljastaa kentän käsitteen käytön kahdessa rinnakkaisessa merkityksessä. Jatkuvan aineen ominaisuuksia tai niitä esittäviä suureita, kuten lämpötilaa, tiheyttä, painetta tai jännitystä jne., paikan ja ajan funktiona aineessa käsitellään kenttinä⁴. Ne ovat *suurekenttiä*, matemaattisia abstraktioita, pelkästään näiden suureiden esityksiä paikan ja ajan funktiona. Sähkö- magneetti- ja gravitaatiokentän kenttäsuureet paikan ja ajan funktiona ovat samalla tavalla suurekenttiä. Tässä tarkasteltavat *kentät olioina* ovat näiden suurekenttien merkitysten kantajia samalla tavalla kuin aine on aineen ominaisuuksia esittävien suureiden ja niiden muodostamien kenttien merkitysten kantaja.

Kentän käsite syntyy samanlaisesta intuitiivisesta tarpeesta kuin aikanaan eetteri. Kun valo osoittautui aaltoliikkeeksi, oli välttämätöntä kysyä, minkä aaltoliikettä se oli. Hahmotavan lähestymistavan kielelle tulkittuna: havaittavaan aaltoliikkeeseen kuuluu välttämättä jokin kenttäsuure, jonka riippuvuus ajasta ja paikasta esittää aallon muotoa. Tälle suureelle kaivattiin merkityksen kantajaoliota, aaltoliikkeen väliainetta, jonka jotakin ominaisuutta tuo suure esittäisi. Valoon liittyvää kenttää ja kenttäsuuretta ei kuitenkaan tunnistettu ennen Maxwellia. Kaivatuksi kantajaksi vain nimettiin eetteri, ja sen kimmoisuuteen liittyvä jännitys miellettiin ominaisuudeksi, jota tuon kenttäsuureen pitäisi esittää. Eetteri on siis eräänlainen klassisen fysiikan kenttäkäsitteen edeltäjä.

Sähkö-, magneetti- ja gravitaatiokenttien käsitteellisenä lähtökohtana voidaan pitää tunnettuja kenttäsuureita ja niiden muodostamia suurekenttiä, joiden kantajaoliot on nimetty samannimisiksi kentiksi. Kuten edellä todettiin, ennen näitä kenttäsuureita kuitenkin jo etävuorovaikutuksen potentiaalienergialle kaivataan kantajaoliota.

Faradayn pakottava empiirinen näyttö kenttien olemassaolosta ei kuitenkaan tullut vielä staattisten kenttien kautta vaan vasta induktioilmiön tutkimuksista. Faradaylle "kenttä" merkitsi lähinnä avaruuden yhtenäisesti täyttävää kenttäviivojen parvea, jonka aktiivinen vuorovaikutus virtapiiriin tai johdinaiseen kanssa aiheutti induktiovirrat.

Laji-identiteetti. Kentät kytkeytyvät jollakin tavalla niiden *"aiheuttajiin"*, kappaleisiin tai hiukkasiin, joiden mielletään tiettyjen ominaisuuksiensa perusteella aiheuttavan kenttiä ja tun-

⁴ Ks. kentän käsitteen tarkastelua kirjassa K. & R. Kurki-Suonio: *Aaltoliikkeestä dualismiin*. Limes ry., Helsinki, 5. painos 2005. Luku 2.1.1.

tevan niiden vaikutuksen. Varsin vakiintunut on käsitys, että aiheuttajat ovat primaarisia eli että kentät syntyvät aiheuttajiensa vaikutuksesta. Fysiikanopetuksessa tämä näkökulma korostuu – osittain laskennallisen painotuksen takia –, kun lähtökohtana ovat tietyt kenttien muotoa koskevat ideaaliset lait, pallosymmetristen systeemien kenttien gravitaatiolaki ja Coulombin laki, joilla on $1/r^2$ -muoto, sekä suoran virtajohtimen magneettikentän $1/r$ -muotoinen Biot'n ja Savartin laki tai infinitesimaalisen virta-alkion Ampèren ja Laplacen lain $1/r^2$ -muotoinen alkeislaki, joiden perusteella voidaan harjoitella ennustamaan tunnettujen aiheuttajien kenttien muodot.

Kenttiä ei kuitenkaan voi yksilöidä aiheuttajien avulla. Paikallisesti ja hetkellisesti voidaan havaita vain kenttäsuure, josta kentän laji tunnistetaan. Mutta kentän aiheuttajaa ei ole mahdollista identifioida tällaisten havaintojen perusteella. Kentän havaitseminen ja kenttäsuureen mittaaminen eivät edellytä mitään tietoa aiheuttajista. Ja vaikka aiheuttajat tunnettaisiinkin, havaittuihin kenttäsuureisiin ei liity mitään empiirisesti tunnistettavia osoitteita, joiden perusteella olisi mahdollista todeta, mikä osuus havaitusta kentästä kuuluu millekin aiheuttajalle. Kentillä ei ole mitään yksilöidentiteettiä. Niillä on vain *laji-identiteetti*.

Yksilöidentiteetin puuttuminen merkitsee, että oikeastaan *on olemassa vain yksi sähkökenttä, yksi magneettikenttä ja yksi gravitaatiokenttä*, joista jokainen kattaa koko avaruuden. Näiden kenttien muodot, joita niiden kenttäsuureet paikan funktiona esittävät, vain vaihtelevat jatkuvasti.

Tämä johtaa erilaiseen näkemykseen *kenttien ja niiden aiheuttajien välisestä suhteesta*. Kentät ovatkin olemassa kaiken kattavina olioina aiheuttajista riippumatta. Aiheuttajien rooli perustuu niiden vuorovaikutuksiin kenttien kanssa. Aiheuttajat eivät siis synnytä kenttiä vaan pelkästään muotoilevat niitä. Esimerkiksi pistevaraus aiheuttaa kentän muotoutumisen ympäristössään Coulombin lain mukaiseksi.

Suhteellisuusteorian mukainen gravitaatiokentän selittyminen aika-avaruuden kaarevuuden perusteella tukee tätä käsitystä. Sitä puoltavat myös mm. *Faradayn induktiokoheet*, joissa ilmeni, että tankomagneetin kenttä ei pyöri magneetin mukana⁵.

Suhteellisuuden ja absoluuttisuuden epistemologinen näkökulma muuttaa sähkö-, magneetti- ja gravitaatiokentän mielikuvia. Sähkökentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden riippuvuus havaitsijan liiketilasta pakottaa kytkemään sähkö- ja magneettikentän yhteen *sähkömagneettiseksi kentäksi*, jonka käsittelyyn tarvitaan suppeampaa suhteellisuusteoriaa. Tämä kytkentä koskee yhtä hyvin suurekenttiä kuin kenttäolioita. Niiden kuumuminen yhtenä yhtenä sähkömagneettisena kenttäoliona saa tietyllä tavalla vahvistuksen modernin fysiikan puolella, kun fotonit todetaan sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjäksi, joka on vastuussa sekä sähköisestä että magneettisesta vuorovaikutuksesta.

Gravitaatiokenttä puolestaan saa yleisessä suhteellisuusteoriassa esityksen aika-avaruuden kaarevuutena. Kenttäsuureen merkityksen kantajaksi ei enää voi kuvitella mitään olemassa oleva oliota, vaan kantajaksi jää matemaattinen abstraktio, neliulotteinen aika-avaruus.

Aaltoliike

Kentän liikkeen mielikuva on ongelmallinen. Kentässä ei ole yksilöityviä kenttäalkioita, joiden liikettä voitaisiin seurata. Kentästä voidaan havaita vain sen kenttäsuure, jonka riippuvuus paikasta määrittelee kentän muodon. Suureiden arvoja ja niiden muuttumista voidaan havaita, mutta *suureet eivät liiku*. Kenttäsuureen muuttuminen merkitsee kentän muodon muuttumista, mutta siihen ei liity mitään liikkeen havaintoa.

⁵ Hiljattain sähköpostikeskustelussa kiinnitettiin huomiota oppikirjoissa esiintyviin tehtäviin, joissa kysytään lentokoneen siivenkärkien taikka auton tai junan pyörän akselien päiden välille indusoituvaa jännitettä ja sen riippuvuutta ajoneuvon kulkusuunnasta. Tämän jännitteen mittaaminen on jo sinänsä ongelma. Mutta siinä yhteydessä heräsi kysymys, mitä Maan pyöriminen mahdollisesti vaikuttaa siihen, ja voidaanko tämän induktioliikkeen avulla todentaa, pyöriikö Maan magneettikenttä Maan mukana vai eikö pyöri. Faradayn tulosten perusteella sen ei pitäisi pyöriä.

Kentän muodon muuttumista kutsutaan yleisesti *aaltoliikkeeksi*. Aaltoliike ei siis ole kentän liikettä, vaan tulkinta, joka seuraa kentän muodon muuttumisen luonteesta. Erityisesti kun kentän muodon muuttuminen on saman muodon jatkuvaa siirtymistä, syntyy etenemisliikkeen mielikuva.

Aaltoliikkeen käsitteen alkuperä on konkreettisissa aineellisissa aaltoliikkeissä, erityisesti veden pinta-aalloissa. Niissä kenttäsuureena on ainealkion siirtymävektori, jonka riippuvuus paikasta konkretisoi kentän muodon käsitteen. (Tosin vesiaallon muodoksi hahmotetaan primaarisesti vain aaltoliikettä myötäilevä veden pinnan geometrinen muoto.) Kentän muodon muuttuminen taas merkitsee siirtymävektoreiden muuttumista, ja kytkee aaltoliikkeeseen ainealkioiden liikkeen.

Siirtymäaallon konkreettinen mielikuva voi havainnollistaa kentän ja aallon muodon käsitettä yleisemminkin, mutta se ei ole välttämättä pelkästään hyödyllinen. Sen mukanaan tuoma mielikuva väliaineen alkioiden liikkeestä voi synnyttää harhakäsityksiä. Paineaallon (äänen) käsitteleminen korostetusti siirtymäaaltona tarjoaa tästä varoittavan esimerkin.

Toisenlainen esimerkki suurekentän muodon muuttumisen luomasta liikkeen mielikuvasta on nk. *pyörivä magneettikenttä*, joka esiintyy yhtenä sähkömoottorin toimintaperiaatteena ja jota voidaan demonstroida kolmivaihevirran avulla.

Suhde "aiheuttajiin". Perinteinen käsitys kentistä aiheuttajiensa synnyttäminä johtaa mielikuvaan, jossa kunkin aiheuttajan kenttä kokonaisuudessaan liikkuu aiheuttajansa mukana. Kun aiheuttajan kenttä ymmärretään vain muodoksi, johon aiheuttaja pakottaa itsenäisesti olemassa olevan universaaliin lajikentän omassa lähiympäristössään, tällainen "kentän liike" osoittautuu ulkoisesti pakotetuksi eteneväksi aaltoliikkeeksi, jossa vain kentän muoto seuraa aiheuttajan liikettä. Tämä mielikuva sopii hyvin myös Faradayn induktiokokeista seuraavaan toteamukseen, ettei (sylinterisymmetrisen) sauvamagneetin kenttä pyöri magneetin mukana. On luonnollista, ettei magneetin pakottama kentän paikallinen muoto, muoto riipu magneetin pyörimisestä, jossa tilanteen ulkoinen geometria säilyy.

Yksilöidentiteetin puuttuminen. Aaltoliike kentän muodon muuttumisena on sidottu kentän laji-identiteettiin. Yksilöidentiteetin puuttuminen koskee samalla tavalla myös aaltoliikkeitä. Kentän muodon muuttuminen voidaan havaita, mutta havainto ei voi yksilöidä kenttäsuureen muuttumisia eri lähteitten aiheuttamiksi aaltoliikkeiksi. Kullakin tarkastelukerralla kaiken kattavan kentän muoto muuttuu tietyllä tavalla, joka määrittää sen aaltoliikkeen. Tämä on yksi ilmiökokonaisuus, joka ei jakaudu millään empiirisellä perusteella yksilöityviksi osaaalloiksi.

Tämä on hyvä ymmärtää interferenssi- ja diffraktiokokeiden yhteydessä. Niistä puhutaan yleisesti ikään kuin olisi kysymys kahden tai useamman yksilöidyn aaltoliikkeen yhdistymisestä. Tämä on teoreettisen selityksen näkökulma, joka perustuu siihen, että nuo yksilöidyt aaltoliikkeet ajatellaan tunnetuiksi ilman havaintoakin. Empiiriseltä kannalta, jokainen interferenssi- ja diffraktiokoe on, ainakin periaatteessa, useamman vaiheen koe, jossa toteutetaan erikseen yksittäisten lähteiden aiheuttamat aaltoliikkeet ja kaikkien lähteiden yhdessä aiheuttama aaltoliike, jota verrataan yksittäisten lähteiden aiheuttamiin.

Tämä näkökulma on tärkeä erityisesti toteutettaessa ja tulkittaessa nk. *kaksoisrakoetta*, joka kuuluu F2k -kokeiden rinnalle modernin fysiikan peruskokeisiin.

Energiankuljetus ja aaltoliikkeen dynamiikka. Vielä yksi kenttään liittyvä liikkeen mielikuva liittyy energian siirtymiseen aaltoliikkeen välityksellä. Aaltoliike "kuljettaa" energiaa (liikemäärää ja pyörimismäärää) tavalla, joka näyttää *energian jatkuvalta etenemiseltä kentässä*. Tämä rinnastuu kimmoaaltojen (äänen) energian etenemiseen aineessa.

Tässä, kuten edellä kentän liikkumista pohdittaessa, on huomattava, että energia on suure eivätkä suureet liiku. Liikkeen mielikuva on osa sitä aineenkaltaisuutta, joka seuraa energian vahvoista säilymisominaisuuksista ja joka ilmenee yleisessä fysiikankin kielen-

käytössä – energiasta puhutaan ikään kuin se olisi jatkuvan aineen kaltainen olio. Aineen kaltaisuus voi olla hyödyllinen mielikuva säilymlakien tarkastelussa, koska aineen ominaisuudet konkretisoivat invarianssin merkityksen. Siitä seuraa kuitenkin helposti myös harhakäsityksiä, jotka on osattava torjua.

Energian "etenemisen" merkitys palautuu kysymykseen vuorovaikutuksista. Aineen kimmoisassa aaltoliikkeessä ilmiön luonne on selvä. Ideaalisessa kimmoisassa aineessa energian säilyy kahden ainealkion kosketusvuorovaikutuksessa. Tästä käytetään energian olioivaa kielikuvaa, jonka mukaan energia siirtyy alkioilta toiselle. Toisiaan koskettavien alkoiden jatkuva peräkkäisyys luo siitä jatkuvan liikkeen mielikuvan.

Eetteri siirsi tämän mielikuvan sellaisenaan sähkömagneettiseen aaltoliikkeeseen. Kun eetteri hylättiin, "eetterialkoiden" väliset kimmoiset vuorovaikutukset vaihtuivat yhteen kytkeytyviksi induktioksi ja käänteisinduktioksi, jotka voidaan tulkita kentän sisäiseksi, sähköisen ja magneettisen komponentin väliseksi konservatiiviseksi (energian säilyttäväksi) vuorovaikutukseksi.

Aaltoliikkeeseen kuuluu näin väistämättä mielikuva kentälle ominaisesta "*sisäisestä dynamiikasta*", johon energian, liikemäärän ja liikemäärämomentin välitys perustuu. Aineessa sen määräävät aineen hitaus- ja kimmoisuusominaisuudet (sisäiset vuorovaikutukset eli kiinnevoimat), jotka riippuvat myös mm. aineen termodynaamisesta tilasta. Tämä dynamiikka kytkee yhteen aallon muodon ja sen muuttumisen.

Kentän *vapausasteet*⁶ selventävät aallon muodon ja dynamiikan välisen yhteyden tarkastelua. Aallon muodon puolesta ne edustavat nk. perusmuotoisia aaltoja, joilla on tietty aallonpituus λ ja taajuus f ja siten tasaisella nopeudella $f\lambda$ etenevä sinimuoto⁷. Mielivaltaisen aallonmuodon matemaattinen (Fourier-) esitys sinimuotoisten aaltojen avulla merkitsee siten samalla kentän energian jakoa vapausasteiden kesken spektriiksi.

Sähkömagneettisessa kentässä tämä sinimuodon etenemisnopeus on sama kaikilla vapausasteilla eli taajuudesta riippumaton⁸. Näin on ilmeisesti myös gravitaatiokentässä, vaikka suoraa empiiristä näyttöä gravitaatioaaltojen nopeudesta ei olekaan. Sama koskee ääntä paineaaltona nesteissä ja kaasussa ja yleisemmin kimmoaaltoja kiinteässä aineessa – lukuun ottamatta hyvin suuria taajuuksia.

Tämä merkitsee, että kentällä ja aineella on sille *ominainen aallonnopeus*, valonnopeus tai äänennopeus, jolla mielivaltaisen muotoinen aalto etenee muotonsa säilyttäen. Tämä on käytännössä tärkeä ominaisuus, koska siihen perustuu sähkömagneettisesti ja akustisesti välitetyn informaation säilyminen.

Äänennopeuden yhteys aineen hitaus- ja kimmoisuusominaisuuksiin on esitetyllä tavalla kvalitatiivisesti ilmeinen. Teoreettisesti sille voidaan myös johtaa näihin perustuvia ennusteita. Vastaavasti ymmärrettiin, että eetterin ominaisuudet määräävät valonnopeuden, jolloin käänteinen päättely tarjosi mahdollisuuden muodostaa valonnopeuden perusteella mielikuvan eetterin ominaisuuksista.

VUOROVAIKUTUKSET

Kosketusvuorovaikutukset. Kahden aineellisen olion kohtaaminen, kuuluu todellisuuden elementtien luokittelussa selvästi *ilmiöihin*. Kosketuksessa oliot vaikuttavat toistensa liikkeisiin tavalla, jota voidaan esittää liikemäärän, pyörimismäärän ja energian siirtymisenä oliolta toiselle. Makroskooppisten kappaleiden törmäykset ovat jatkuvia ilmiöitä, vaikkakin lyhytaikaisia, minkä vuoksi niitä käsitellään tavallisesti idealisoituina hetkellisinä tapahtu-

⁶ Ks. *F2k-laboratorion kokeiden esittely 2*.

⁷ Tätä muodon etenemisnopeutta kentässä kutsutaan vaihenopeudeksi.

⁸ Yleisesti vaihenopeuden riippuvuutta taajuudesta sanotaan (suure)kentän *dispersiorelaatioksi*. Tavallisesti se esitetään teoreettisesti mukavammassa ekvivalentissa muodossa kulmataajuuden riippuvuutena kulmaaaltotiheydestä $\omega = \omega(k)$. Periaatteessa tämä on sama dispersiorelaatio kuin se, mistä KARI ENQVIST luenossaan puhuu. Välissä on vain kvanttimekaaninen kulmataajuuden ja kulmaaaltotiheyden kvanttimekaaninen samastus energiaan ja liikemäärään (KE:n terminologiassa impulssiin).

mina. Kappaleen liike väliaineessa tapahtuu jatkuvassa kosketuksessa. Koulufysiikassa tarkastellaan pääasiassa vain voimaa, joka siitä aiheutuu kappaleeseen ja jota kutsutaan väliaineenvastukseksi.

Etävuorovaikutukset nousivat ongelmaksi, kuten kenttien yhteydessä todettiin. Newton hahmotti gravitaatiovuorovaikutuksen itsenäiseksi *ilmiöksi*, joka vaikuttaa kahden kappaleen välillä samalla tavalla kumpaankin⁹. Idea oli kyllä alun perin Keplerin¹⁰. Kenttien tunnistaminen olioksi poisti ongelman. Ilmiöiden luokkaan jäi vain kosketusvuorovaikutuksia: aineellisten olioiden, aineen ja kenttien sekä mahdollisesti kenttien välisiä.

Itsenäisen ilmiön idean soveltaminen kaikkiin vuorovaikutuksiin johti mekaniikan menestykseen. Siitä alkaneesta vuorovaikutusten tutkimuksesta tuli koko Newtonin jälkeisen fysiikan läpäisevä teema¹¹. Vuorovaikutuksesta tuli yleinen "syntipukki", *syyilmiö*, johon kaikkien ilmiöiden selitykset palautettiin. Oli vain opittava tunnistamaan sen *lajit* ja eri lajeille ominaiset *lait*, jotka palautuivat *mielikuviin* vuorovaikutusten mekanismeista.

Aineen atomirakenteen mukana kaikki makroskooppiset kosketusvuorovaikutusten mekanismit ja lait palautuivat kenttiin. Modernissa fysiikassa *välittäjähiukkaset* korvasivat kentät vuorovaikutusten välitysmekanismien mielikuvana.

SÄTEILY

Modernin fysiikan portilla uudet säteilyn lajit, kanava-, katodi-, ja röntgensäteet sekä radioaktiivisuuden liittyvät säteilyn lajit, nousivat tärkeään osaan.

Säteily on ilmiö, joka siirtää energiaa *lähteestä kohteeseen*. Siihen kuuluu

- (1) *emissio*, säteilyn syntyminen ja energian vapautuminen lähteestä *säteilyn energiaksi*,
- (2) energian *kulkeutuminen* säteilyn mukana sen energiana ja
- (3) osuminen johonkin aineelliseen kohteeseen, jossa tapahtui *absorptio* eli säteilyn energian absorboituminen kohteen energiaksi tai *sironta*, säteilyn hajoaminen kohteesta eri suuntiin eteneväksi sironneeksi säteilyksi.

Klassinen fysiikka tarjosi säteilylle kaksi vaihtoehtoista mallia. *Hiukkassuihku* ja *aaltoliike* merkitsivät kumpikin selvää mielikuvaa siitä, miten säteily kuljettaa energiaa ja miten se emittoituu, absorboituu ja siroaa. Niinpä kaikkiin säteilyn lajeihin liitettiin kysymys, onko se hiukkassuihku vai aaltoliikettä.

Emissio, *absorptio* ja *sironta* tapahtuivat aineellisen lähteen ja kohteen *vuorovaikutuksessa* joko säteilyhiukkasten tai (sähkömagneettisen) kentän kanssa.

Klassinen hiukkassuihku koostuu yksilöinä tunnistettavista erillisistä hiukkasista. Kullakin yksittäisellä hiukkasella on oma ratansa, ja sen liikettä tätä rataa pitkin on mahdollista seurata, ainakin periaatteessa. Se syntyy (emissio) siten, että jonkin hiukkasreaktion tuloksena lähteestä vapautuu hiukkasia. Säteilyn energia on näiden hiukkasten liike-energiaa, reaktiossa vapautunutta sidosenergiaa. Hiukkasten synty, irtoaminen tai irrottaminen lähteestä, ja niiden osuminen kohteeseen (absorptio, sironta) ovat *hetkellisiä ja paikallisia tapahtumia, joissa energia, liikemäärä ja liikemäärämomentti säilyvät*. Niitä voidaan tarkastella klassisesti yhteisen nimikkeen "törmäys" alla.

Aaltoliikkeellä on vain kentän laji-identiteetti, eikä siinä ole mahdollista erottaa yksilöityviä osia, joiden liikettä voitaisiin tarkastella. Sähkömagneettiseen kenttään aaltoliikkeen

⁹ "And though the mutual actions of two planets may be distinguished and considered as two, by which each attracts the other, yet as those actions are between both, they do not make two but one operation between two terms. ... It is not one action by which the sun attracts Jupiter, and another by which Jupiter attracts the sun; but it is one action by which the sun and Jupiter mutually endeavor to approach each other. Cajori F., ed., trans.. (1934. 1962). *Newton's "Principia," Motte's translation revised*. Los Angeles: University of California Press.

¹⁰ Teoksessa *Astronomia Nova* (1609) Kepler sanoo: "Gravity is a mutual affection between parent bodies which tends to unite them and join them together."

¹¹ Ks. K. Kurki-Suonio: *Yhdentymiskehitys ja vuorovaikutukset*. Fysiikan täydennyskoulutuskurssi 1994. Fysiikan historia. Kurssimoniste. toim. Heimo Saarikko. Fysiikan laitos. Helsingin yliopisto. 1994. ss. 81–87.

synnyttää (emissio) värähtelevä (yleisesti kiihtyvässä liikkeessä oleva) varauksellisen systeemi. Säteilyn energia on tämän aaltoliikkeen sähkömagneettista energiaa. Säteilyn osuessa kohteeseen, jolla on sähköinen rakenne, aaltoliikkeen värähtelevä kenttä aiheuttaa pakkovärähtelyn. Tällöin energiaa voi siirtyä kohteen energiaksi (absorptio), kohteen värähtelyn aiheuttaman sekundaarisen säteilyn energiaksi (sironna). Olennaista on, että nämä ovat *jatkuvia ilmiöitä* ja *säilymlakien alaisia* ja että ne ovat *taajuuden säilyttäviä* ilmiöitä (lukuun ottamatta lähteen ja kohteen liikkeestä aiheutuvia Dopplerin ilmiöitä).

Nämä ovat tärkeitä mielikuvaperustan elementtejä, sillä monet modernin fysiikan ratkaisevista kokeista koskevat juuri aineen ja sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutuksia. Empiirinen pakko klassisten mielikuvien muuttamiseen kertyy siitä, että näiden mukaiset selitysmallit antavat täysin väärä ennusteita, kun samalla, erityisesti edellisillä luennoilla käsiteltyjen kokeiden näytön osoittama, *vuorovaikutusten kvantittuminen*, tarjosi lähtökohdan uudelle hahmotukselle, jossa oli empirian pakosta luovuttava niin hyvin hiukkasen kuin kentän ja aaltoliikkeen klassisista mielikuvista.