

YHDENTYMISKEHITYS JA VUOROVAIKUTUKSET

Kaarle Kurki-Suonio
Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos

Yhdentävät oivallukset

"Ihmiskunnan henkisen sivistyksen suurimmat keksinnöt ovat kieli, logiikka ja tiede. Kielen alkuperä kätkeytyy esihistorian hämärään. Logiikka on luonnontieteen edelläkävijä, sitä noin 2000 vuotta varhaisempi. Nykyaikainen kokeellinen luonnontiede alkaa Galileo Galileista 1600-luvun alussa.

Nämä saavutukset ovat kuin rakennuksen kolme kerrosta. Tiedettä ei voi olla ilman logiikkaa eikä logiikkaa ilman kieltä. Rakennuksen kolmas kerros ulottuu korkealle mutta on rakennettu kahden alemman varaan. Kuitenkin suurimmalle osalle ihmiskuntaa sivistys merkitsee lähes pelkästään kielen sivistystä. Musiikki, runous ja maalaustaide ovatkin kiehtovia esimerkkejä ulottuvuuksista, joihin ilmaisun varaan rakentuva sivistys voi yltää.

Tavallista ihmistä luonnontiede koskettaa vain teknisten sovellustensa välityksellä. Nykyaikainen tekniikka on antanut hänelle pesukoneen, television, laskimen, suihkukoneen ja paljon muuta. Se on alistanut luonnonvoimat ihmisen palvelukseen mutta ei ole lisännyt hänen tieteellistä sivistystään.

Tekniikka on luonnontieteen ulkokuori, jonka alla kätkössä on varsinainen sisus, tieteellinen tieto. Harva television katselija tietää, että sähkö, magnetismi ja valo ovat hyvin läheisesti yhteen kytkeytyviä ilmiöitä. Ne kaikki yhdessä häviäisivät, jos elektronin varaus "lakkaisi vaikuttamasta".

Sivistyksemme luonnontieteelliset aarteet voivat olla yhtä ihastuttavia kuin Bachin, Michelangelon ja Shakespearen mestariteokset. Taiteen saavutukset ovat kaikkien ulottuvilla, mutta tieteen tulokset ovat jääneet harvojen ihailtaviksi.¹

Tämä on ytimekäs sivistyshistorian tiivistelmä fysiikan näkökulmasta. Siitä ilmenee fysiikan suhde muihin kulttuurin osa-alueisiin ja sen nykyinen asema. Se osuu myös suoraan tieteen ytimeen: Tieteen saavutukset ovat yhdentäviä oivalluksia. Tieteen kehityshistoriaan punoo katkeamattoman punaisen langan yhdentymiskehitys [3 luvut 2.3.2, 5.3], joka lisää ymmärrystämme ja syventää maailmankuvaamme sitä mukaa kuin ympäristömme detaljit hahmottuvat yhä yleisempien perusilmiöiden ja peruslakien erilaisiksi ilmenemismuodoiksi. Sähkön, magnetismin ja valon yhteys on erinomainen esimerkki. Se on tieteen pysyvä, koskaan vanhenematon tulos, maailmankuvan rakennuskivi.

Zichichin esimerkki osoittaa samalla, miten keskeinen asema vuorovaikutuksilla on tässä kehityksessä. Ne ovat kehityksen pääteema. Sähkömagneettinen vuorovaikutus on esimerkin yhdistävä peruselementti. Uudet opetus suunnitelmien perusteet eivät turhaan korosta vuorovaikutusta yhtenä keskeisimpiä peruskäsitteitä.

Vuorovaikutus kehityksen pääteemana

Fysiikan koko kehityshistoriaa Newtonista hiukkasfysiikan uusimpiin utopioihin saakka voidaan tarkastella vuorovaikutuksen käsitteen kehityksenä. Yhdentymiskehitystä esittävien kaavioiden 1 ja 2 haarat edustavat eri vuorovaikutusten eri ilmenemismuotoja ja niiden jokainen yhtymäkohta merkitsee vuorovaikutuksen käsitteeseen liittyvää uutta oivallusta.

Tämä on oikeastaan vain toinen tapa ilmaista se peruseikka, että fysiikan yhdentymiskehitys palauttaa viime kädessä kaiken mekaniikkaan. Vuorovaikutukset ovat kaikkien mekaniikan ilmiöiden *primus motor*. Ne hallitsevat

¹ Näillä ajatuksilla Euroopan fyysikkoseuran puheenjohtaja, professori Antonino Zichichi, avasi seuran julkaisusarjan European Journal of Physics sen ensimmäisessä numerossa kesäkuussa 1980.

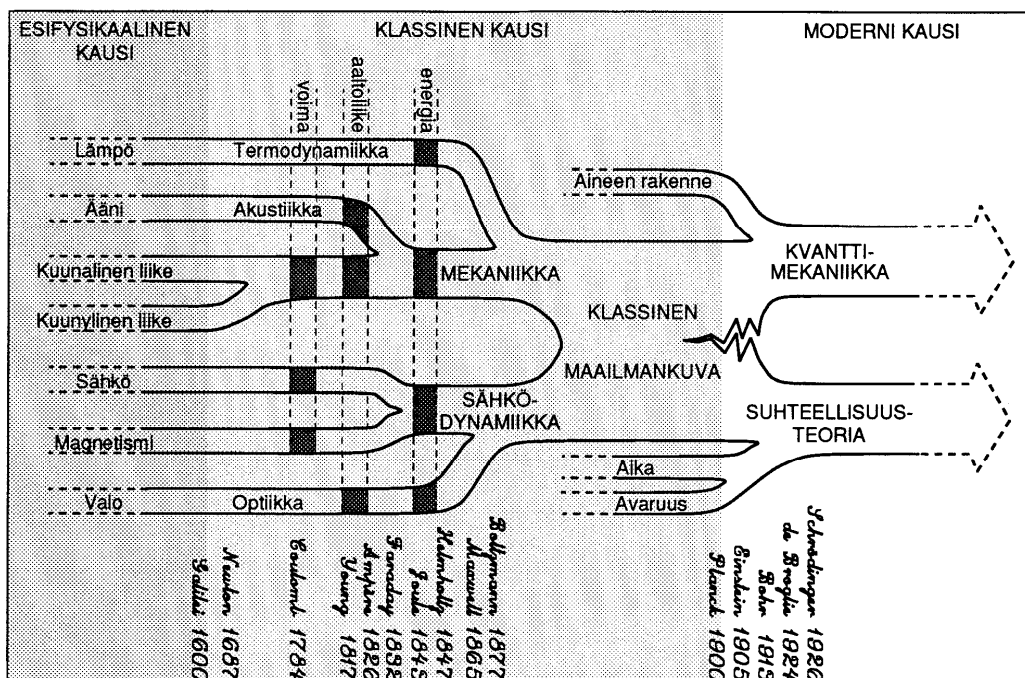
maailmankuvassamme sekä kaikkia aineellisia **rakenteita** että niiden **dynamiikkaa**. Kaikki ilmiöt selittyvät, kukin vuorollaan, olioiden liikeilmiöiksi, joita vuorovaikutukset hallitsevat. Ilmiöiden jakautuminen luokkiin palautuu kysymykseen vuorovaikutuksen lajeista. **Ilmiöiden yhdentyminen** on samalla **vuorovaikutusten yhdentymistä** yhä yleisemmiksi perusvuorovaikutuksiksi.

Vuorovaikutusten lajeissa on kysymys vuorovaikutuksen mekanismeista. Tässä hahmottuu kaksi eri tekijää. Oliolla on oltava ominaisuus, joka on sen kykyä vuorovaikutukseen. Toisaalta tarvitaan jokin välittymistapa. Vuorovaikutuksen laki on näiden tekijöiden kvantitatiivinen esitys. Se edellyttää sekä kappaleille ominaisia "kykyisyyksiä" että välitysmekanismeille ominaista voimakkuussuuretta ja tämän riippuvuutta tilanteesta. Nämä kysymykset kytkeytyvät kysymykseen olioiden omasta perusluonteesta. Vuorovaikutusten käsitehistoriaa ei sen tähden voi erottaa luonnon olioiden ja liikkeen luonnetta koskevien käsitysten kehityksestä. Lopulta myös oliot itse osoittautuvat vuorovaikutusten ilmenemismuodoiksi. Vuorovaikutusten yhdentyminen merkitsee myös **olioiden yhdentymiskehitystä**.

Newtonin vallankumous

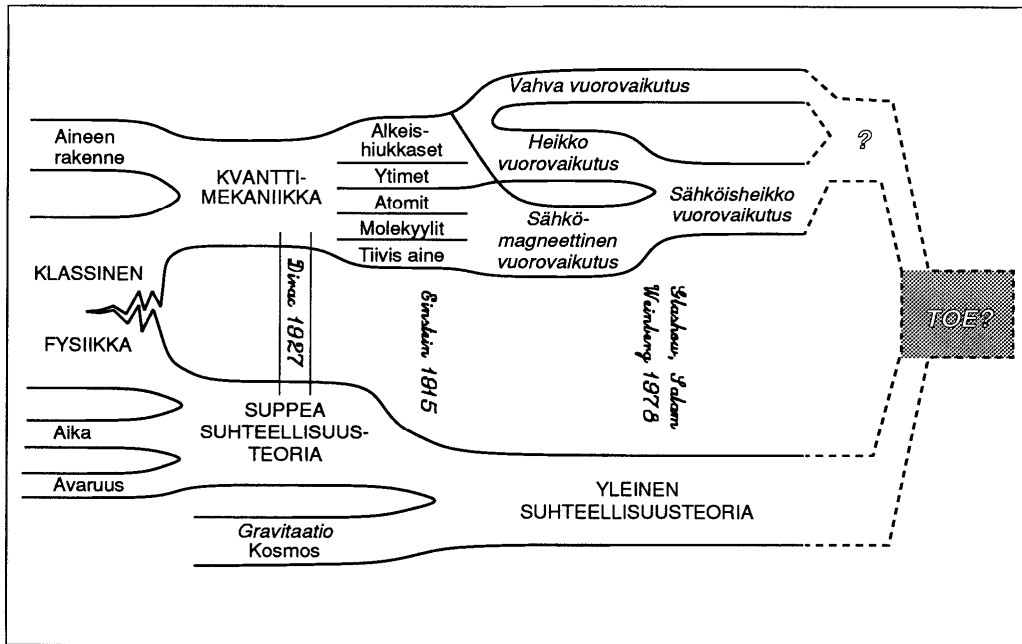
Newtonista se alkoi. Vuorovaikutus fysiikan peruskäsitteenä syntyi Newtonin vallankumouksessa, jota esittää kaaviossa 1 mekaniikan haaran ensimmäinen yhtymäkohta. Newtonin lait ovat ovi liikeilmiöiden hallintaan. Oven avain on vuorovaikutusten lakien ongelma. Jos vuorovaikutusten lait tunnetaan, dynamiikan peruslaista tulee liikeyhtälö, jonka avulla kappaleiden käyttäytyminen voidaan ennustaa.

Tämän avaimen etsinnästä tuli fysiikan tutkimuksen pääongelma - ja se on sitä yhä. Newton itse antoi ensimmäisen avaimen, gravitaatiolain, joka yhdisti taivaankappaleiden liikkeitä ja maanpäällisen heitto liikkeen. Tämän ohella hän avasi tien kosketusvuorovaikutusten erilaisten mekanismien tutkimukseen ja luokitteluun maanpäällisen mekaniikan perusongelmana.

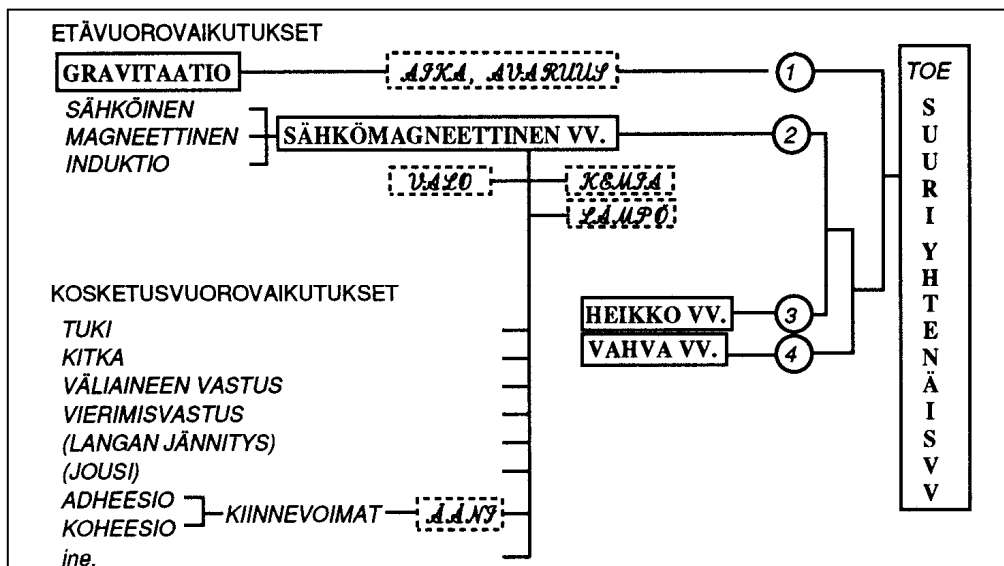


Kuva 1: Klassinen yhdentymiskehitys [3 (s. 147)]

Fysiikan eturintamatutkimus kantaa Newtonin perintöä raivatessaan tietä kohti hiukkasfysiikoiden utopiaa, kaiken teoriaa (TOE = Theory of Everything), kaavion 2 päätepistettä. Suuren yhtenäisvuorovaikutuksen lain tuntemisen kautta kaikki luonnon rakenteet ja ilmiöt yhdistyisivät yhden ainoan perusilmion erilaisiksi ilmenemismuodoiksi.



Kuva 2: Kohti kaiken teoriaa [3 (5.3.3)]



Kuva 3: Yhdentymisen vuorovaikutusten näkökulmasta

Vuorovaikutuksen idea on Newtonin vallankumouksen ydin. Aristoteleen impetus on kappaleen omaa voimaa, sen kykyä jatkaa liikettään, pyrkiä päämäärään ja raivata esteitä tieltään. Se on siten liikemäärän ja liike-energian edeltäjä, Newtonin voima on vuorovaikutuksen voima, kappaleiden välinen, erillinen ulkopuolinen vaikuttaja. Aristoteelisessa mekaniikassa oli kaksi osapuolta, kappale itse subjektina ja liike sen "predikaattina". Newton ratkaisi liikkeen ongelman liittämällä kolmanneksi osapuoleksi vuorovaikutuksen, syyliön, joka hallitsee sekä subjektia että predikaattia. Vuorovaikutukset ovat perusselitys, jonka kautta liikeilmiöt tulevat ymmärrettäviksi ja hallittaviksi. Liikeilmiöiden alku ei olekaan *primum mobile*, kappaleen oma perimmäinen tarkoitus, "ensimmäinen liikkuja", vaan *primus motor*, ulkopuolinen alkuunpanija, "ensimmäinen liikuttaja".

Newtonin kolmikanta [3 luku 3.3.3, 4]:

1. *Kappaleet* ovat olioita, niitä, jotka liikkuvat keskinäisten vuorovaikutustensa alaisina.
2. *Liike* on seurausilmiö, jonka kautta kappaleiden väliset vuorovaikutukset ilmenevät.
3. *Vuorovaikutus* on syy-ilmiö, *primus motor*, joka aiheuttaa kappaleiden liiketilän muutokset.

Aristoteleen perintö koulussa

Käsitteiden historiallinen kehitys heijastaa ihmisen luontaisen hahmotuskyvyn mukaista mielikuvien rakentumista. Siksi on täysin luonnollista ja oikeutettua ajatella, että lasten spontaanit mielikuvat kappaleista ja niiden liikkumisesta suuntautuvat ensin aristoteelisille poluille. Yleiset voiman käsitettä koskevat harhamielikuvat liittävätkin voiman kappaleeseen itseensä ja sen liikkeeseen. Ne ovat järjestään kappaleesta itsestään, sen hitaudesta, massasta, nopeudesta, kiihtyvyydestä, energiasta, kimmoisuudesta jne. aiheutuvaa kappaleen voimaa samalla tavalla kuin sentrifugaalivoimakin.

Newton suisti aristoteelisen ajattelun valtaistuimelta tieteen tasolla. Mutta jokaisen on kuitenkin itse luotava oma tietonsa henkilökohtaisella tasolla. Jokaisen on omassa ajattelussaan itse eletävä myös Newtonin vallankumous. Opetus voi vain opastaa valaisemalla sitä polkua, jonka Newton löysi. Fysiikan opiskelijoiden mielikuvia koskevien tutkimusten mukaan se ei ole onnistunut tässä kovin hyvin.

Kun vallankumouksen perusidea on selvinnyt, on helppo havaita fysiikan opetuksessa piirteitä, jotka ohjaavat pois Newtonin polulta. Perinteisesti lähtökohtana on kuitenkin yhden kappaleen liike, tilanne, josta vuorovaikutus on leikattu pois. Jos tarkasteltavassa perustilanteessa ei ole mitään, minkä ominaisuutta kuvaamaan voiman käsitettä tarvittaisiin, voima on jo lähtökohdan takia tuomittu kodittomaksi, mitään esittämättömäksi mystiseksi käsitteeksi. Kun opettaja sitten hätäpäissään turvautuu havainnollistuksissaan lihasvoimaan, auton moottorin voimaan yms., hän vain jonttaa Aristoteleen impetusta yhä syvemmälle oppilaan tajuntaan ja torjuu yhä varmemmin Newtonin vallankumouksen mahdollisuudenkin. Kaikki opetus, jossa voima esitetään suoraan tai epäsuorasti kappaleen omana ominaisuutena pitää yllä Aristoteleen perintöä. Mekaniikan opetus ei voi onnistua, ellei vuorovaikutus ole mukana siinä perustilanteessa, jonka tarkasteluun käsitteiden opettaminen nojautuu. Tarvitaan kaksi kappaletta ja yksi vuorovaikutus, yksi kappale ei riitä.

Fysiikan opetuksen taannoinen muotivirtaus, nk. empiiris-induktiivinen lähestymistapa, on eräissä korostuksissaan toiminut positivismin perillisenä koulussa. Sen nimissä on julistettu syvällä rintäänellä: "Voima on *pelkästään* kappaleen liiketilaa koskevan empiirisen datan struktuuri." Toisin sanoen voima on *sama kuin* massan ja kiihtyvyyden tulo, eikä mitään muuta. Mielikuvat, joihin ymmärtäminen perustuu kielletään mystifiointina. Näin esimerkiksi newtonisen ajattelun perussanonta "voima vaikuttaa" on kielletty mystifioivana ja muka käsitteiden empiirisen luonteen ymmärtämistä haittaavana puheenpartena.

Käsitteiden empiirisestä perustasta on positivistisen ylikorostuksen avulla kyhätty perustelu, jolla aristoteelisen mielikuvan vahvistaminen on saatu näyttämään oikeutetulta. Koska m on kappaleen massa ja a kappaleen kiihtyvyys, voima, joka "ei ole mitään muuta kuin" näiden tulo ma , on myös liikkuvan kappaleen oma ominaisuus. Näin oppikirjojen perusväittämästä " ma on voiman määritelmä" tulee aristoteelisen fysiikan kulmakivi ja Newtonin mekaniikan ymmärtämisen este.

Tällainen ajattelu samastaa ilmiön voimakkuutta esittävän suureen suureeseen, joka mittaa ilmiön vaikutuksia, ja suureen määrittelyn kokeeseen, jossa ilmiön voimakkuus kvantifioituu suureeksi mitattavien vaikutustensa kautta. Ellei voima ole muuta kuin tulo ma , ei lämpötilakaan ole muuta kuin elohopeapatsaan pituutta eikä sähkövirta muuta kuin käämin kiertymää, ja peruskoulun oppikirjasta tuttu neronleimauskin: "Kitka on voima, joka saa kappaleen liukumaan toisen pinnalla" on varma ja tosi, sillä muutenhan syyllystymme mystifiointiin!

Mielikuvien kieltäminen tekee kokeellisuudesta *naiivia empirismiä* [3(4.1.2)]. Mielikuvat ovat aina intuitiivisia ja siksi positivismin moitteiden alaisia, mutta käsitteenmuodostukseen ei ole tietä niiden ohi. Ymmärtäminen perustuu mielikuvuihin, jotka rakentuvat erottamattomassa vuorovaikutuksessa havaintojen kanssa [1, 3(2.3.1, 2.3.3)]. Mielikuva on empiirinen hahmo, merkitys, joka syntyy ensin ja synnyttää käsitteistämisen tarpeen. Kaikkien käsitteiden, suureiden, lakien, ja teorioiden olemus on niiden merkityksessä, niissä mielikuvissa, ominaisuuksien ja riippuvuuksien hahmoissa ja niille rakentuvissa mentaalisisissä malleissa, joiden kvantifioituja esityksiä ne ovat.

Ymmärrys asuu merkityksissä, ei kaavoissa, jotka ovat vain merkitysten algebrallisia esityksiä. Kaavoja saa rauhassa "sulatella" vaikka lopun ikänsä, mutta ymmärrys ei niistä herää.

Gravitaatio vuorovaikutuksena

Newtonin vallankumous oli fysiikan kehityksen ensimmäinen suuri yhdentymisaskel. Newtonin lait antoivat **maanpäällisille ja taivaallisille liikkeille** yhteisen selityksiperustan, jonka sinettinä oli gravitaatiolaki ja sen menestykselliset ennusteet.

Ei ole helppoa ymmärtää, miten kaiken perustana oleva vuorovaikutuksen idea on voinut valjeta Newtonille. Newtonin III laki on valmis timantti, joka ei paljasta löytymisensä ja hiomisensa vaivoja. Pelkistetyssä kauneudessaan se on niin yksinkertainen, ettei se edes havahduta fysiikan opettajia ja oppilaita ihmettelemään kätkemäänsä neroutta. Ja niin avain mekaniikan ymmärtämiseen jää huomaamatta.

Sen vielä tajuaa, että Auringon voi oivaltaa planeettoja sitovan voiman aiheuttajaksi. Merkitsihän Keplerin II laki planeettojen kiihtyvyyksien suuntautumista kohti Aurinkoa. Ei sen huomaamiseen tarvita muuta kuin differentiaallaskentaa, jonka Newton kehitti käsityönään siinä sivussa. Mutta Aurinko on Jupiteriakin hirveän paljon suurempi, samoin kuin Maa Kuuta. Niiden oivaltaminen tasavertaisiksi on tuskin paljon helpompaa kuin Maan rinnastaminen omenaan. Kuitenkin Newton oivalsi kaikki kolme paria rinnasteisiksi tasavertaisiksi vuorovaikutuspareiksi. Oivallukseksi ei riitä ajatus, että Kuu ja planeetta ovat Maata ja Aurinkoa kohti putoavia omenia, vaan piti nähdä myös Maan putoaminen omenaan ja Kuuta kohti sekä Auringon putoaminen kohti planeettaa.

Nykyinen tähtitiede tarjoaa paljon suotuisimmat lähtökohdat painovoiman oivaltamiselle vuorovaikutukseksi. Kaksoistähdien komponentit kiertävät toisiaan kuin toisistaan kiinni pitävät luistelijat, ja viimeaikaiset kaksoispikkuplaneettojen valokuvat tarjoavat herkullisia mielikuvia peninkulmaisten kivenjätkäleiden juhlallisen verkkaisesta gravitaatiotanssista.

Heittoliikkeen samastuminen taivaankappaleiden liikkeisiin oli kuitenkin vain osa Newtonin suurta yhdentymisaskelta. Maanpäällisessä mekaniikassa painovoima oli yksi vuorovaikutus monien muiden rinnalla. Vaikka gravitaation rooli muodostui ratkaisevaksi Newtonin lakien menestykselle, askelen ytimenä oli itse vuorovaikutuksen idea, jossa kaikki kappaleiden liiketilaan vaikuttavat tekijät samastuvat.

Etä- ja kosketusvuorovaikutukset

Välittymistavan mukaan erottui kaksi pääluokkaa, etä- ja kosketusvuorovaikutukset.

Etävuorovaikutuksia olivat gravitaation ohella vain varattujen kappaleiden välinen **sähköstaattinen** ja magneettien välinen **magnetostaattinen** vuorovaikutus. Örstedtin havainto täydensi kuvaa osoittamalla virtajohdinten kyvyn magneettiseen vuorovaikutukseen. Formaaliselta kannalta ne olivat "helppoja tapauksia". Niiden yksinkertaiset lait (Newton, Coulomb, Ampère) tekivät niistä Newtonin mekaniikan hallittuja elementtejä, löydettyjä avaimia liikeilmiöiden hallinnan oveen. Mekanismsinsa puolesta ne olivat ongelmallisia. Newtonkin piti käsittämättömänä, miten kappaleet voivat vaikuttaa toisiinsa matkan päästä koskettamatta toisiaan.

Kosketusvuorovaikutusten luonne oli tässä suhteessa ilmeinen. Niiden ongelmana olivat lait. Kosketusvuorovaikutuksia on kappaleiden välillä, kappaleen ja väliaineen välillä ja kappaleen tai aineen osien välillä. Niillä voidaan erottaa kappaleiden ja aineen luonteesta riippuen monia erilaisia mekanismeja, joiden rajat ovat tulkinnanvaraisia. Vastaavasti niiden mallintaminen onnistuu vain äärimmilleen yksinkertaistetuissa ideaalitalanteissa, ja niiden empiiristen lakien pätevyysalueet ovat suppeita.

Vuorovaikutuksen kolme vaikutustapaa

Newtonin mekaniikan rakennetta dominoivat sen kolme suurta dynaamista periaatetta vastaavine säilymlakeineen. Impulssi-, impulssimomentti- ja energiaperiaate vastaavat vuorovaikutusten kolmea erityyppistä vaikutustapaa, jotka liittyvät erilaisiin muutoksiin vuorovaikuttavien kappaleiden liiketiloihin. Jokaisen kvantifionti johtaa vastaavasti vuorovaikutuksen voimakkuutta ja liiketilän muutoksen suuruutta esittäviin suureisiin oheisen taulukon mukaisesti.

VUOROVAIKUTUSTEN KOLME PERUSASPEKTIA			
Vaikutustapa luonne	Vuorovaikutuksen voimakkuussuure	Ilmeneminen liikkeessä	Kappaleen liikesuure
Työntö/veto polaarinen (vektori)	impulssi, voima	eteneminen	liikemäärä
Vääntö aksiaalinen (tensori)	momentin impulssi momentti	pyöriminen	liikemäärämomentti
Energia määrällinen (skalaari)	työ potentiaalienergia sidosenergia	kaikki liike	liike-energia

Vuorovaikutusten tarkastelun lähtökohtana on idea, jonka mukaan vuorovaikutukset muuttavat osapuolten liiketiloija. Vuorovaikutuksilla on (polaari-)vektorinen työntö- tai vetovaikutus, joka kohdistuu osapuolten etenemisliikkeisiin ja muuttaa niiden *liikemääriä* yhtä paljon vastakkaisiin suuntiin. Tämän muutoksen suuruus ja nopeus ilmaisevat samalla vuorovaikutuksen vektorisen voimakkuuden suureiden impulssi ja voima avulla.

Vuorovaikutusten (akksiaali-)vektorinen, oikeammin tensorinen, vääntövaikutus kohdistuu osapuolten pyörimisliikkeisiin ja muuttaa niiden *pyörimismääriä* yhtä paljon vastakkaisiin suuntiin. Momentti on vuorovaikutuksen tensorisen voimakkuuden mitta, joka perustuu tämän muutoksen nopeuteen.

Vuorovaikutusten skalaarinen vaikutus muuttaa osapuolten *liike-energioita*. Kokonaisliike-energian muutos on vuorovaikutuksen tekemä tai sitä vastaan tehty *työ*, riippuen siitä onko muutos positiivinen vai negatiivinen. Se on vuorovaikutuksen voimakkuuden skalaarinen mitta.

Vuorovaikutuksen vektori- ja tensorivaikutukset osapuoliin ovat yhtä suuret ja vastakkaisuuntaiset. Juuri tämä oikeuttaa newtonisen mielikuvan vuorovaikutuksista itsenäisinä vaikuttajina, joihin voidaan liittää niille ominaiset voimakkuussuureet ja lait. Toisaalta tämä merkitsee, etteivät systeemin sisäiset vuorovaikutukset muuta sen paremmin systeemin kokonaisliikemäärää kuin sen kokonaispyörimismäärää. Vuorovaikutuksen idea johtaa suoraan vapaan systeemin kahteen suureen säilymislakiin.

Skalaarivaikutus on erilainen. Liike-energioiden muutoksilla ei ole vastaavia rajoituksia. Vapaan systeemin kokonaisliike-energia ei säily. Se muuttuu vuorovaikutusten tekemän työn määrällä. Tähän liittyy kuitenkin toinen näkökulma, joka erottaa skalaarivaikutuksen vielä voimakkaammin kahdesta muusta. Erityisesti gravitaatiolla ja sähköstaattisella vuorovaikutuksella on kyky tallettaa niitä vastaan tehty työ potentiaalienergiakseen. Tätä kykyä esiintyy myös aineen sisäisillä vuorovaikutuksilla, jolloin puhutaan aineen tai kappaleen kimmoisuudesta.

Skalaarinen aspekti jakaa vuorovaikutukset jyrkästi kahteen luokkaan, *konservatiivisiin* ja *epäkonservatiivisiin*, sen mukaan voidaanko niihin liittää työn asemesta potentiaalienergian käsite vai eikö voida. Konservatiivinen vuorovaikutus voi sitoa liike-energiaa potentiaalienergiakseen ja jälleen vapauttaa sitä liike-energiaksi. Tämä on ehkä vielä kummallisempaa kuin vaikutus matkan päästä, mutta juuri sen tähden se viitoittaa tietä eteenpäin. Syntyy vapaan systeemin kokonaisenergian säilymislaki, joka koskee vain konservatiivisia sisäisiä vuorovaikutuksia. Yleensä *vapaan systeemin mekaaninen energia ei säily*² Vasta energian käsitteen yleistäminen muiden ilmiöalueiden energialajeihin johtaa yleisempään säilymislakiin.

Aaltoliike vuorovaikutusilmiönä

Säilymislakien kautta vuorovaikutuksiin avautuu uusi näkökulma. Kun vuorovaikutus muuttaa osapuolten liikemääriä ja pyörimismääriä, toinen saa, minkä toinen luovuttaa. Vuorovaikutus siirtää liikemäärää ja pyörimismäärää.

² Tätä on syytä korostaa, koska eräässä uudessa lukion oppikirjassa väitetään päinvastaista oikein kehyksin korostaen. Samalla on huomautettava, että "eristetty systeemi" on lämpöopin käsite, joka ei mekaniikassa merkitse mitään.

Energian osalta tilanne on siinä suhteessa monimutkaisempi, että epäkonservatiiviset vuorovaikutukset voivat sitä synnyttää tai hävittää. On siten mahdollista, että molemmat saavat tai molemmat menettävät. Lisäksi konservatiiviset vuorovaikutukset toimivat itse kolmansina vastaanottavina ja luovuttavina osapuolina.

Erityisasemassa ovat tässä suhteessa *rajoittavat kosketusvuorovaikutukset*, joissa kappaleiden kosketuskohdat eivät liiku toistensa suhteen (koulumekaniikassa erityisesti tukivuorovaikutus ja lepokitka). Tällöin voiman ja vastavoiman vaikutuspisteet liikkuvat aina yhdessä. Vastavoiman tekemä työ on aina yhtä suuri kuin voiman tekemä mutta vastakkaismerkkinen. Toisen kappaleen energia kasvaa, toisen pienenee yhtä paljon. Energiaa siis vain siirtyy kappaleesta toiseen.

Erityisesti kimmoisan aineen kiinnevoimat ovat tällaisia. Paikallinen venymä, vääntymä tai puristuma yhden ainealkion kohdassa synnyttää "viereisten" ainealkioiden kanssa vuorovaikutuksen, joka siirtää energiaa pois päin tästä kohdasta. Kaikki aineessa etenevät **aaltoliikkeet**, kuten **ääni**, ovat osoittautuvat vuorovaikutusilmiöiksi. Ne ovat aineen sisäisten kimmoisten vuorovaikutusten välityksellä alkioista toiseen siirtyvää ja etenevää energiaa. Etenemisen nopeus voidaan ennustaa aineen kimmoisten ominaisuuksien perusteella, jotka ovat sen sisäisten vuorovaikutusten lakien empiirisesti määritettäviä parametreja.

Kenttä vuorovaikutuksen välittäjänä

Yhdentymiskehityksen seuraavaa suurta askelta valmistelee **induktiovuorovaikutuksen** löytyminen (Arago). Se on uusi etävuorovaikutus, joka esiintyy liikkuvien tai muuttuvien magneettisten olioiden välillä ja joka ei selity magneettisen vuorovaikutuksen tunnetun lain perusteella. Sen lakien tutkimus (Faraday, Henry, Lenz) johtaa vuorovaikutusten tulkintaan kentän avulla ja siten uuteen käsitykseen etävuorovaikutusten mekanismista. Kun kentät astuvat kuvaan uutena fysikaalisten olioiden luokkana, etämekanismin mystiikka häviää. Siitä tulee kentän ja kentässä olevan hiukkasen kosketusvuorovaikutusta.

Ratkaisevan askelen ottaa Maxwell, jonka lait yhdistävät kaikki tunnetut sähköiset ja magneettiset ilmiöt samojen lakien alaiseksi sähkömagneettisten ilmiöiden luokaksi. Sähköiset ja magneettiset vuorovaikutukset yhdentyvät yhdeksi *sähkömagneettiseksi vuorovaikutukseksi*, josta tulee gravitaation rinnalle klassisen fysiikan toinen perusvuorovaikutus.

Myös **valo** tulee samalla julistetuksi sähkömagneettiseksi ilmiöksi. Diffraktoilmiöt vahvistavat sen luonteen aaltoliikkeenä. Hertz todentaa tulosten oikeellisuuden kokeellisesti tuottamalla sähkömagneettisin keinoin aaltoliikettä, jolla on samat perusominaisuudet kuin valolla.

Valo rinnastuu automaattisesti aineessa eteneviin aaltoliikkeisiin. Se on ilmeisesti vastaavanlainen vuorovaikutusilmiö. Se kuljettaa kiistatta sekä energiaa, liikemäärää että pyörimismäärää, siirtää niitä lähteestä kohteeseen. Mutta mitä ovat ne "väliaineen sisäiset vuorovaikutukset", jotka siirtävät niitä kentässä alkioista toiseen. Syntyy luonnollinen tarve puhua sähkömagneettisen aaltoliikkeen väliaineesta, eetteristä. Sähkö- ja magneettivakio ovat sen sisäisten kimmoisten vuorovaikutusten lakien parametreja, jotka määräävät valon nopeuden. Kosketusvuorovaikutus kentän ja kappaleen välillä toimii etävuorovaikutuksen selityksenä, mutta kentän aineettomien alkioiden välistä kosketusvuorovaikutusta on vaikea mieltää.

Suhteellisuusteorian tuomio eetterille ei selventänyt tätä ongelmaa, mutta energian ja massan samuuden todentaminen tekee sen ehkä helpommin nieltäväksi, koska vuorovaikutuksen potentiaalienergian massa on kenttään jakautunutta massaa, olkoonkin aineetonta.

Aineen kvantittuminen, atomi

Käsitys aineen kvanttirakenteesta, atomeista, eli vahvana ja perusteltuna aina Daltonista alkaen. Faradayn elektrolyysilait antoivat ensimmäiset konkreettiset viitteet aineen rakenneosasten sähköisestä luonteesta. Jo siitä alkaen voimistui vähitellen käsitys aineen kaikkien ominaisuuksien sähköisestä luonteesta.

Aineen atomirakenteesta tuli fysiikan suuri yhdentäjä. Se osoitti aineen olennaisesti sähkömagneettisen vuorovaikutuksen hallitsemaksi systeemiksi. Kaikki aineen aistein havaittavat ominaisuudet ovat pohjimmiltaan sähkömagneettisia. Sekä **kemialliset** että **lämpöilmiöt** palautuvat sähkömagneettisen vuorovaikutuksen ilmiöiksi. Samalla kaikki tunnetut energian lajit osoittautuvat pohjimmiltaan mekaaniseksi energiaksi.

Kuitenkin vasta kvanttimekaniikka paljasti ne lait, joiden mukaisesti sähkömagneettinen vuorovaikutus rakentaa ytimistä ja elektroneista atomeja, atomeista molekyylejä ja suurempia rakenteellisia kokonaisuuksia. Samalla se itse neutraloituu asteittain ja jättää luomilleen rakenteille kyvyn heikompiin ulkoisiin jäännösvuorovaikutuksiin, joita erityisesti kaikki kosketusvuorovaikutukset ovat.

Vuorovaikutusten kvantittuminen, dualismi

Ajatus vuorovaikutusten kvantittumisesta on tämän vuosisadan lapsi. Se syntyi ensin fotonina valon "hiukkasluonteen" peruskokeiden tulkinnoissa (Planck, Einstein, Compton). Se johti sitten ideaan luonnon kaikkien perusolioiden tasavertaisesta kaksinaisuusluonteesta (de Broglie) ja toimi tärkeänä välineenä hiukkassysteemien kvanttimekaniikan kehittämisessä. Mutta vasta kenttien kvantiteoriassa se sai varsinaisen teoreettisen ilmiön.

Dualismi poisti etävuorovaikutuksen mystiikan tulkitsemalla vuorovaikutukset kantajahiukkasten välittäviksi ja palauttamalla näin kunniaan ajatuksen kosketuksesta ainoana mahdollisena vuorovaikutuksen mekanismina. Samalla dualismi kuitenkin järkytti perusteellisesti mekaniikan koko kolmijakoista perusasetelmaa. Se asetti *hiukkaset* (alunperin kappaleet, oliot) ja *vuorovaikutukset* (syyilmiöt) luonteeltaan tasavertaisiksi. Se riisti hiukkasilta yksilöllisyyden ja jatkuvan eksistenssin ja asetti siten kyseenalaiseksi *liikkeen* käsitteen. Se, mikä näytti liikkuvalla hiukkasella esimerkiksi kuplakammossa, onkin vain ketju paikallisia ja hetkellisiä vuorovaikutuksen kvanttitapahtumia, joita yhdistävät tapahtumiin liittyvät hiukkaslajien tunnusominaisuudet ja suuret säilymisilmit, nekin vuorovaikutusten idean synnyttämät [3(5.2.2)].

Kappaleiden ja vuorovaikutusten roolijaosta jäi kuitenkin jäljelle jotakin. Duaaliset perusoliot jakautuivat näitä vastaaviin kahteen luokkaan, fermioneihin, jotka ovat aineen perushiukkasia, ja bosoneihin, jotka ovat vuorovaikutusten välittäjähiukkasia. Kappaleiden yksilöllisyys korvautuu fermionien lukumäärän säilymisilmit ja Paulin kieltoäännöllä, jotka säilyttävät eräitä yksilöllisyyteen viittaavia piirteitä. Niiden perusteella esimerkiksi Z elektronin systeemiä tarkasteltaessa havaitaan aina täsmälleen Z elektronia Z eri tilassa. Kentässä etenevältä aaltoliikkeeltä näytävä ilmiö taas seuraa bosonien kyvystä kasautua joukoittain samaan kvanttitilaan, jolloin tilalle ominaista käyttäytymistä hallitsevan aaltofunktion muoto realisoituu suuren bosonijoukon tilastollisena jakaumana.

Perusvuorovaikutusten ongelma

Klassiselta fysiikalta jäi perinnöksi vain kaksi vuorovaikutusta, gravitaatio ja sähkömagneettinen vuorovaikutus. Ydin- ja hiukkasfysiikka avasivat tien uuteen ilmiömaailmaan, joissa hyvin lyhytkantamaiset vahva ja heikko vuorovaikutus toimivat. Näin syntyi vuorovaikutusten tutkimuksen uusimman kehitysvaiheen alkuasetelma, neljä perusvuorovaikutusta.

Aineellisen maailman rakenne hahmottuu eriasteisten rakenteiden hierarkkiseksi järjestelmäksi, jonka jokaisessa kerroksessa oliot koostuvat alemman kerroksen rakenneseosista ja toimivat itse ylemmän kerroksen rakenneseosina. Rakenneseosien tai rakenteiden hierarkian tekee mahdolliseksi vuorovaikutusten hierarkia. Jokaisen olion sisäisten vuorovaikutusten on oltava olennaisesti voimakkaampia kuin sen ulkoiset vuorovaikutukset. Siten eteneminen kohti alkeellisempia rakenneseosia johtaa väistämättä yhä voimakkaampien vuorovaikutusten kohtaamiseen.

Tässä ketjussa nukleonien välinen ydinvuorovaikutus osoittautuu varsinaisen vahvan eli väri vuorovaikutuksen neutraloitumisen kautta syntyneeksi jäännösvuorovaikutukseksi samoin kuin makroskooppiset kosketusvoimat ja kemialliset sidokset jo aikaisemmin osoittautuivat varsinaisen sähkömagneettisen vuorovaikutuksen jäänteiksi. Nämä esimerkit tarjoavat mallin vuorovaikutusten palautumisesta yhteiseen voimakkaampaan vuorovaikutukseen. Samalla rakenneseosien ja vuorovaikutusten ketjut herättävät luonnollisen kysymyksen ketjun mahdollisesta päättymisestä tai päättymättömyydestä [2(8.5.3), 5(s. 47 - 49), 6(3.1-2)].

Vuorovaikutusten yhdentyminen on nykyisen hiukkasfysiikan perusongelma. Sähkömagneettisen ja heikon vuorovaikutuksen yhteinen alkuperä on ratkaistu. Sähköisheikon ja vahvan yhdistämisestä on useampia mahdolliselta näyttäviä teorioita. Gravitaation yhdistäminen näihin näyttää vaikealta ongelma, joka on lopullisen, suuren yhtenäisvuorovaikutuksen löytymisen tiellä.

Gravitaatio on kulkenut fysiikan kehityksessä omaa tietään. Yleinen suhteellisuusteoria yhdisti sen *ajan* ja *avaruuden* geometriseen rakenteeseen. Voidaan siis täydellä syyllä sanoa, että yhdyntymiskehitys on

palauttanut kaiken, mitä fysiikka ylimalkaan voi tutkia, ajan, avaruuden, kaikki havaittavat oliot ja ilmiöt vuorovaikutuksen käsitteeseen. Suuren yhtenäisvuorovaikutuksen laki, jos sellainen joskus löydettäisiin, olisi siten todella sanan täydessä merkityksessä kaiken fyysikaalisen olevaisen yhteinen perusselitys, kaiken teoria, TOE.

Viitteet

[1] Kurki-Suonio, K. *Perceptonal Approach in Physics Education*.

Ahtee M., Lavonen J. ja Meisalo V. (toim.)

Proceedings of the Finnish-Russian symposium on Information Technology in Modern Physics Classroom. Department of Teacher Education. Research report 123. University of Helsinki 1994.

[2] Kurki-Suonio, K. ja R. *Vuorovaikuttavat kappaleet - mekaniikan perusteet*. Limes ry., Helsinki, 3. painos 1992

[3] Kurki-Suonio, K. ja R. *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry. Helsinki. 1994

[4] Kurki-Suonio, K. ja R. *The Concept of Force in the Perceptonal Approach*. Silfverberg, H. ja Seinelä, K. (toim.) Ainedidaktiikan teorian ja käytännön kohtaaminen. Matematiikan ja luonnontieteiden opetuksen tutkimuspäivät 24. - 25.09.93.

Reports from the Department of Teacher Education in Tampere.

University of Tampere 1994. A18/1994, 321 - 334.

[5] Kurki-Suonio, K., Kervinen, M. ja Korpela, R. *KVANTTI 3b*. WEILIN+GÖÖS, 1985.

[6] Lavonen, J. Kurki-Suonio, K. ja Hakulinen, H. *Galilei 1. Fysiikka luonnontieteenä*. Weilin+Göös. 1994.