

Modernin fysiikan perushahmojen synty¹

Kaarle Kurki-Suonio

1. Johdanto

1.1. Tarkastelun näkökulma

Fyysikoiden kielenkäytössä moderni fysiikka tarkoittaa ensi sijassa fysiikan kehitysvaihetta, joka alkoi noin sata vuotta sitten suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan synnystä. Newtonin mekaniikan ja Maxwellin sähködynamiikan muodostama kokonaisuutta sanotaan klassiseksi fysiikaksi ja niiden kukoistuskautta Newtonista noin 1800-luvun loppuun fysiikan klassiseksi kaudeksi. Toisaalta yleisen kulttuurinäkemys mukaan modernin fysiikan voidaan ajatella alkavan nykyaikaisen luonnontieteen metodisen perustan syntymisestä eli koulumaisen standarditulkinnan mukaan Galileista ja Newtonista.

Tässä esityksessä nämä näkökulmat ovat ehkä vähän päällekkäin. Puhun modernista ja klassisesta fysiikasta fyysikoiden normaaliin tapaan. Modernin fysiikan perushahmojen juuret ovat kuitenkin klassisessa fysiikassa. Tarkastellessani niiden syntyä, joudun sen tähden pohdiskelemaan luonnonilmiöiden tulkinnallisten mielikuvien kehitystä aina Newtonista alkaen, antaakseni toisaalta kuvan siitä merkityksperustasta, jolle moderni fysiikka rakentaa, ja voidakseni toisaalta osoittaa näissä mielikuvissa ne ratkaisevat kohdat, jotka moderni fysiikka murtaa ja muuttaa.

Tämä ei pyri olemaan varsinainen historiallinen esitys vaan lähinnä eräänlainen fysiikan opetuskoemusten kautta tulkittu katsaus maailmankuvan kehitykseen. Esitykseni perustuu sellaiseen ajatteluun, että oppiminen on hahmottamista, mielikuvien rakentamista havaintojen ja kokeellisen tutkimuksen tuella. Luonnehdin sitä myös mielelläni sanomalla, että se on olennaisesti empiiristen merkitysten syntyä ja näitten merkitysten käsitteistämistä. Mielikuvilla on tässä keskeinen asema. Mielikuvat ovat ihmisen tapa ymmärtää luonnon rakennetta ja ilmiöitä.

1.2. Arkkityyppinen hahmottaminen ja mielikuvat

Ajattelen, että ihmisellä on lajiominainen hahmotuskyky. Tällä kyvyllä voi olla eri asteita, mutta se on sidottu mielen rakenteisiin. Nämä todentuvat myös mielikuvissa, joitten avulla rakennamme fysiikkaa. Mielen arkkityypit säätelevät ja rajoittavat hahmottamista. Ne määräävät, millaisia hahmoja ihmismielen on mahdollista oppia tunnistamaan.

Mielen arkkityypit ilmenevät ensiksi siten, että meille muodostuu aistien ja normaalin elämän kokemusten kautta eräänlaisia luonnollisia mielikuvia, jotka ovat tiukasti arkkityyppien mukaisia. Tämä *primaarihahmotus* näyttää olevan ihmisille yhteinen. Se näkyy sekä oppilaiden paljon tutkituissa ennakkokäsityksissä että tieteen historiassa ilmiöiden varhaisissa tulkinnoissa. Fysiikan oppiminen etenee pitkälti samoja reittejä kuin tieteen kehitys on aikanaan edennyt. Primaarihahmotus myös luo sen yleiskielen, jolla puhumme ympäristöstämme ja sen ilmiöistä.

¹ Esitelmä seminaarissa: *Luonnontieteen haaste filosofialle ja teologialle*. Uskonnonpedagoginen instituutti, Luonnonfilosofian seura, Kristillinen opintokeskus. Järvenpää 1.–2.11.1996
Teoksessa: "Luonnontieteen haaste filosofialle ja teologialle" Seppo Laurema ja Olli Hallamaa, toim. Helsingin yliopiston systemaattisen teologian laitoksen julkaisuja 17. Luther-Agricola-seura. Helsinki. 2001. 22-43.
Myös: *Dimensio* 64. 2/2000, 32–36 ja 3/2000, 36–41. Artikkelit eroavat vähän kahden ensimmäisen kappaleen osalta.

Empiria ei kuitenkaan ole pelkkä lähtökohta. Systemaattinen tukeutuminen empiriaan vaatii näitten mielikuvien kehittämistä. Mielikuvat luovat odotuksia, joita empiria testaa. Tämä irrottaa meidät primarihahmotuksen mukaisista mielikuvista asteittain, empirian pakosta. Tämä on empiirisen tieteen periaate. Mielikuvien tieteellinen kehittäminen edellyttää tukeutumista empiriaan, joka väistämättömästi johtaa ristiriitoihin primarihahmotuksen luonnollisten mielikuvien kanssa, näitten mielikuvien kanssa, jota meidän luonnollinen kieleemme heijastaa.

Tapaa, jolla kieli sitoo meitä primarisiin mielikuviiimme, ei nähdäkseni ole tutkittu riittävästi. Se on opetuksen kehittämisen kannalta keskeinen ongelma. On periaatteessa ilmeistä - jokunen ohjaamani pro gradu -tasoinen tutkimuskin viittaa selvästi siihen, että opetuksen kielenkäyttö ylläpitää ja vahvistaa tiedostamattomasti mielikuvia ja käsityksiä, joita opetuksessa tietoisella tasolla on tarkoitus muuttaa. Näin syntyy fysiikan opetukseen voimakas sisäinen ristiriita. Sama ongelma koskee kaikkea tieteen popularisointia. Koska popularisoinnin luonteensa mukaisesti pitää tapahtua luonnollisella kielellä, se sitoo meitä niihin mielikuviiin, joiden muuttamisen tarpeesta sen on tarkoitus kertoa.

Ajatteluamme ja mielikuviamme hallitsee ennen muuta arkkityyppinen sidonnaisuus paikkaan ja aikaan, vieläpä - edellisen luennon yhteen keskeiseen teemaan liittyen - nimenomaan *jatkuvaan paikkaan ja aikaan*. Me hahmotamme ympäristöämme paikassa ja ajassa, jotka me miellämme jatkuviksi. Tämä määrää hyvin suurelta osin koko sen mielikuvarakenteen, jonka mukaan tulkitsemme ympäröivää ilmiömaailmaa.

Tästä seuraa ensiksikin havaintojemme luonnollinen ontologinen tulkinta: todellisuus muodostuu *olioista*, jotka ovat jatkuvasti koko olemassaolonsa ajan jossakin avaruuden paikassa. *Ilmiöt* taas ovat omaksumani terminologian mukaan todellisuudessa esiintyvää tapahtumista ajassa, sitä, mitä olioille tapahtuu, mitä ne tekevät ja miten ne käyttäytyvät. Ajan jatkuvuus merkitsee ilmiöiden jatkuvuutta. Oliot ovat meille siten *jatkuvasti eksistovia* luonnon ilmiöiden subjekteja.

Olioiden ja ilmiöiden tunnistus perustuu niiden *ominaisuuksiin*. Olion mielikuvaan kuuluu, että oliolla on ominaisuuksia - edellisessäkin luennossa puhuttiin ominaisuuksista. On pysyviä tunnistusominaisuuksia, jotka tekevät olioiden *identifioinnin* mahdolliseksi, ja on ilmiöissä muuttuvia ominaisuuksia.

Ilmiöt taas tunnistetaan ominaisuuksien muuttumisen luonteen perusteella. Erilaiset olioiden muuttuvien ja pysyvien ominaisuuksien väliset korrelaatiot tulkitaan niiden riippuvuuksiksi. Riippuvuudet merkitsevät lainmukaisuutta - ilmiöt tapahtuvat omien lakiensa mukaisesti. *Ilmiöiden lait* ovat niiden tunnistusominaisuuksia.

Säilymisen ja lainmukaisuuden yhteen kytkeytyvät perushahmot ovat siten kaiken identifioitavuuden arkkityyppinen perusta. Niihin perustuu tunnistamisen ja kielellistämisen mahdollisuus. Voimme luokitella, tunnistaa ja nimetä sekä olioita että ilmiöitä niin että pystymme kuvaamaan niitä ja puhumaan niistä.

Lainmukaisuuden mielikuvaan kuuluu kiinteästi *vaikuttamisen* hahmo. Ilmiöiden lakien ymmärtään kuvastavan olioiden vaikutuksia toisiinsa. Mutta olion vaikuttamisessa toiseen on kyseessä syy-suhde, on vaikuttaja ja vaikutuksen kohde; ilmiöstä tulee vaikutustapa. Päädymme mielikuvaan ilmiöiden mekanismeista kausaaliperiaatteina, jolloin koemme ymmärtävämmä ilmiöt.

Tämäkin ajatus kytkeytyy olennaisesti jatkuvuuteen. *Causan* välittyminen ilmiössä on mahdollista vain siten, että ilmiö etenee jatkuvana tapahtumisena, sekä ajassa että paikassa jatkuvana. Katkos joko ajassa tai paikassa katkaisisi myös *causan* välittymisen. Mutta jatkuva lainmukainen syyseuraussuhde merkitsee ilmiöissä toteutuvaa determinismia. Lainmukaisuudesta tulee lainalaisuutta.

Tällä tavalla arkkityyppisestä sidonnaisuudestamme jatkuvaan aikaan ja paikkaan johtaa suora tie sekä luonnosta puhumisen kieleen että klassiseen perusmielikuvaan luonnonlaeista deterministisinä kausaalilakeina.

1.3. Kvantifiointi

Fysiikassa ilmiöiden määrällinen kuvaus on olennaista. Mielikuvat pyritään kvantifioimaan, kvaliteeteista pyritään rakentamaan kvantiteetteja. Tämä on fysiikan käsitteenmuodostuksessa kynnsprosessi. Siinä kvalitatiivisen tason mielikuvien, olioiden ja ilmiöiden, ominaisuudet kvantifioituvat *suureiksi*, joita voidaan ilmaista lukuarvoilla sovittavissa yksiköissä, ominaisuuksien väliset riippuvuudet kvantifioituvat suureitten välisiksi *laeiksi*, jotka yksinkertaisimmillaan ovat esitettävissä suureiden välisinä algebrallisina relaatioina, ja ilmiöiden kausaalimallit kvantifioituvat fysiikan *teorioiksi* ja teoreettisiksi malleiksi, joissa syysuhteita esittävät teorian peruslait. Kvantifiointi johtaa väistämättä matematisoitumiseen. Tämä on niin keskeinen tavoite fysiikan käsitteenmuodostuksessa, että opetuksessa on usein päässyt unohtumaan se matemaattisten esitysten kvalitatiivinen epämatemaattinen merkitystausta, jolle käsitteistön ymmärtäminen perustuu.

Perushahmojen arkkityyppinen jatkuvuus periytyy kvantifioinnissa klassisen fysiikan suureille, laeil- le ja teorioille. Klassisen fysiikan matematiikka on *jatkuvan matematiikkaa*. Klassiset peruslait palaut- tavat kaiken differentiaaliyhtälöiksi, jotka näyttävät pisteittäisiltä ja hetkellisiltä laeilta, mutta ovat oike- astaan makrolakeja, jotka on pelkistetty olio- ja ilmiöalkioiden laeiksi. Ne sisältävät siten - differentiaa- lilaskennan perusidean mukaisesti - elementin, jonka kautta ne toimivat jatkuvien ilmiöiden ja jatkuvien olioiden jatkuvien determinististen kausaaliperiaatteiden esityksinä.

Tällaiset ovat esitykseni lähtökohdat. Otsikon mainitsemat fysiikan perushahmot tarkoittavat havain- tojen perusteella syntyviä ja empiirisen tutkimuksen tuella kehittyviä mielikuvia luonnon olioista, ilmi- öistä ja niiden ominaisuuksista, riippuvuuksista ja keskinäisistä syysuhteista. Tämä on ennen muuta kvalitatiivinen näkökulma fysiikkaan, näkökulma, joka käsitykseni mukaan on fysiikan kaiken ymmär- ryksen perusta. Kaikki varsinainen *ymmärtäminen on luonteeltaan kvalitatiivista*. Kvantitatiivinen kä- sitteistö suureineen, lakeineen ja teorioineen on vain tämän ymmärryksen täsmennettyä esitystä. Samal- la on kuitenkin nähtävä, että kvantitatiivisen käsitteistön peilaaminen empiriaan on ollut kvalitatiivisten mielikuvien ja niihin perustuvan ymmärryksen kehittämisen välttämätön edellytys. Siksi mielikuvien kehitystä ei voi tarkastella tuomatta mukaan kvantitatiivistakin näkökulmaa.

2. Klassiset perushahmot

2.1. Newtonin vallankumous, vuorovaikutus

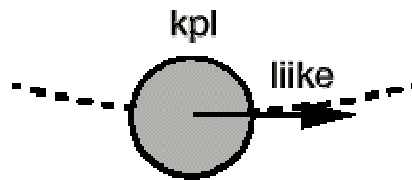
Newtonin vallankumouksen avainkäsite on *vuorovaikutus*. Siitä tuli koko fysiikan kehitystä läpäisevä ja kantava teema. Vuorovaikutusten lakien tutkimuksesta tuli klassisen mekaniikan ensimmäinen suuri perustehtävä, ja näemme sen olevan yhä edelleen modernin fysiikan eturintaman polttopisteessä, sen yhden suuren perusvuorovaikutuksen etsinnän probleemassa. Vuorovaikutuksen käsitteen ympärille punoutuu koko fysiikan läpäisevä kehittyvien mielikuvien, kvalitatiivisen ymmärtämisen ketju.

Klassisessa fysiikassa *olioita* olivat aluksi vain aineelliset *kappaleet* tai *hiukkaset*, yleisemmin *aine*. Ilmiöt jakautuivat luontevasti liikkeen, lämmön, valon, äänen, sähköön, magnetismin ja kemian ilmiöi- den empiirisesti riippumattomiin luokkiin. Klassisella kaudella nämä ilmiöalueet vähitellen yhdentyivät siten, että vuorovaikutuksesta tuli asteittain kaikkien ilmiöiden yhteinen perusilmiö. Newtonin vallan- kumous kytki näin koko fysiikan mekaniikkaan. Sen tähden fysiikan perushahmojen kehittymistä hal- litsee kysymys siitä, miten mielikuvamme olioiden, liikkeen ja vuorovaikutuksen luonteesta kehittyvät.

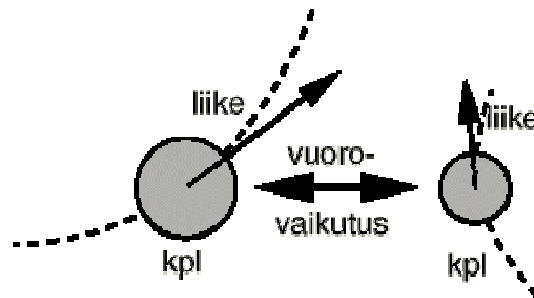
Kappaleen liikkeen luokittelu etenemiseen, pyörimiseen ja värähtelyihin johtaa tässä kehityksessä *vapausasteen* käsitteeseen, joka saa keskeisen merkityksen tarkasteltaessa klassisen fysiikan murrok- seen johtavien kokeellisten tulosten merkitystä. Vuorovaikutukset jakautuvat kahteen pääluokkaan, *kosketus- ja etävuorovaikutuksiin*. Klassisten perushahmojen kehityksen päävaiheet liittyvät erityisesti

etävuorovaikutusten ymmärtämisen ongelmaan.

Esinewtoninen mekaniikka oli kappaleiden liikkeiden tutkimusta. Sen perusmielikuvassa oli kaksi osapuolta, kappale oliona ja sen liike ilmiönä. Kappaleen käyttäytyminen liikkeessä riippui kappaleen ominaisuuksista. Kappaleella saattoi olla omaehtoinen pyrkimys alas päin tai impetus taikka jokin muu sen oma ominaisuus, joka määräsi sen liikettä. Kappaleen omia kykyjä tai pyrkimyksiä edustivat myös keskipakovoima, jolla kappale pyrki pakoon eli pois päin kiertoliikkeen keskustasta, sekä sen vastakohtaisesti poispäin keskihakuvoima, jolla kappale hakeutui kohti keskustaa.



Kuva 1. Mekaniikan esinewtoninen perusmielikuva: kappale ja liike



Kuva 2. Mekaniikan newtonilainen perusmielikuva: kaksi kappaletta, yksi vuorovaikutus

Newton liitti vuorovaikutuksen mekaniikan perusmielikuvaan kolmantena osapuolena, uutena perushahmona, jonka ominaisuuksia voidaan tarkastella riippumatta liikkeen ja kappaleen ominaisuuksista. Vuorovaikutus on erikseen tutkittava ja identifioitava *syylmiö*. Siitä tuli mekaniikan perusmielikuvan uusi ydin, *causa*. Se teki mielikuvasta kausaalimallin, jonka syy- ja seurausilmiöt, vuorovaikutus ja liike, olivat tutkittavissa empiirisesti toisistaan riippumatta. Näin tuli mahdolliseksi tutkia kokeellisesti syyn ja seurauksen välisen yhteyden, liikeilmiöiden kausaalilain muotoa. Tämä oli se ratkaiseva vallankumouksellinen elementti, joka asetti Newtonin mekaniikan laadullisesti uuteen asemaan kaikkiin aikaisempiin "teorioihin" verrattuna.

Kuten niin usein suurten oivallusten yhteydessä myös Newtonilla näkyi horjuvuutta. Hetkittäin idea on kirkas, välillä se hämärtyy ja jää vanhojen mielikuvien peittoon. Selvimmillään tämä kolmannen osapuolen idea tulee vastaan Newtonin korostaessa, ettei Jupiterin ja Auringon vuorovaikutuksessa ole kyseessä Auringon vaikutus Jupiteriin eikä Jupiterin vaikutus Aurinkoon, vaan Auringon ja Jupiterin välinen vuorovaikutus, joka vaikuttaa molempiin.

Vallankumouksen ydin on siis äärimmäisen yksinkertainen. Mekaniikan käsitteenmuodostuksen lähtökohtana oleva vanha perusmielikuva, yksi liikkuva kappale vaihtuu uudeksi, kahden kappaleen ja yhden vuorovaikutuksen tilanteeksi. Koko Newtonin jälkeistä fysiikan kehitystä voidaan tarkastella tämän mielikuvan kehittymisenä.

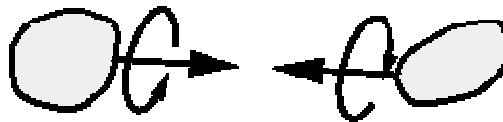
2.2. Newtonin lait

Klassisen mekaniikan koko rakenne on idullaan perusmielikuvassa, jossa on kaksi kappaletta ja niiden välinen yksi vuorovaikutus. Vuorovaikutus on kummankin kappaleen liiketilan muuttumisen yhteinen ja ainoa mahdollinen syy. Vain vuorovaikutukset voivat muuttaa kappaleiden liikettä. Näin niistä tulee kaikkien muutosten agentti, kaikkien ilmiöiden perusilmiö.

Tämä mielikuva merkitsee ensimmäiseksi sitä, ettei muutoksia ole ilman vuorovaikutuksia. Tämä on Newtonin I:n eli *jatkavuuden lain* idea. Vuorovaikutuksettomien eli vapaiden kappaleiden liiketila säilyy muuttumattomana. Liiketilan muuttumattomuus merkitsee liikkeen tasaisuutta. Jatkavuuden laki on mitä suurimmassa määrin intuitiivinen. Se voidaan todentaa empiirisesti edellyttäen, että vuorovaikutuksettomuus voidaan havaita tai toteuttaa. Se tekee etenemisliikkeen tasaisuuden absoluuttiseksi, ja asettaa näin klassiselle fysiikalle peruslähtökohdan: Kaikkia liikkeitä on verrattava vapaiden kappaleiden käyttäytymiseen eli - kuten on tapana sanoa - ilmiöitä on tarkasteltava *inertiaalikoordinaatistossa*, jossa kaikki vapaat kappaleet liikkuvat tasaisesti. Jos kappale ei liiku tasaisesti, se ei ole vapaa vaan on osallisena jossakin vuorovaikutuksessa. Myös liiketilan muutokset ovat absoluuttisesti todennettavia ja muodostavat lähtökohdan vuorovaikutusten tutkimiselle.

Vuorovaikutuksen ideaan kuuluu molemminpuolisuus. Se on osapuolten liiketilan muutosten yhteinen syy ja vaikuttaa siten samalla tavalla osapuoliin. Sen määrällisiä vaikutuksia sekä etenemiseen että pyörimiseen on sen tähden esitettävä siten, että ne ovat yhtä suuret. Syntyy tarve sellaisten liikettä koskevien käsitteitten käyttöön, jotka muuttuvat yhtä paljon vuorovaikutuksessa.

Näin syntyvät *liikemäärän* ja *pyörimismäärän* käsitteet. Nämä suureet muuttuvat jatkuvasti, koko ajan yhtä nopeasti ja jokaisena aikavälinä yhtä paljon vastakkaisesti suuntiin. Siksi niiden kokonaismäärä systeemissä säilyy. Näin liikemäärän ja pyörimismäärän säilymlait ovat piilevästi mukana jo itse vuorovaikutuksen perusideassa. Oikeastaan ne seuraavat tämän idean asettamista esityksellisistä vaatimuksista.



Kuva 3. Vuorovaikutuksen työntö- ja vääntövaikutus

Samalla näiden liikesuureiden muuttumisnopeudet ilmaisevat vuorovaikutuksen kahden ensimmäisen vaikutustavan voimakkuudet, *voiman* ja *momentin*. Näin siis vuorovaikutuksen idea sisältää myös Newtonin II eli *dynamiikan peruslain* ja Newtonin III eli *voiman ja vastavoiman lain* sekä näiden pyörimistä koskevat vastineet.

Tämän jälkeen on mahdollista mitata kappaleisiin vaikuttavia voimia ja momentteja tutkimalla kappaleiden liikettä. Lähestytään yhtä fysiikan keskeisimpiä probleemoja, kysymystä vuorovaikutusten laeista.

Newtonin kolme lakia ovat kuitenkin vasta teorian puitelait. Näiden puitteiden sisään rakentuva determinismi perustuu *vuorovaikutusten lainalaisuuden ideaan* ja niiden *vaikutusten yhdistymisen lakiin*, jotka nousevat teorian perusteina tasaveroiseen asemaan kolmen lain rinnalle. Vuorovaikutusten ajattelun olevan lainalaisia. Niiden voimakkuuksien ajatellaan riippuvan tiettyjen lakien mukaisesti osapuolten pysyvistä ominaisuuksista, niiden keskinäisestä etäisyydestä ja asennosta ja näiden muuttumisnopeuksista tavalla, joka voi myös muuttua ajan kuluessa. Vuorovaikutusten lait ovat kytketyt samalla tavalla tähän jatkuvaan aikaan ja jatkuvaan paikkaan kuin kaikki muukin. Ne ovat klassisen fysiikan determinismin perusta. Niiden tunteminen tekee liikeilmiöistä ennustettavia.

Vuorovaikutus on näin aidosti mekaniikan perusmielikuvan kolmas osapuoli, sillä on omat itsenäiset voimakkuusominaisuudet, jotka seuraavat lainmukaisesti sen vaikutustavasta. Vuorovaikutusten lait ovat lajioinaisuuksia, joihin vuorovaikutusten tunnistus ja luokittelu eri lajeiksi perustuu. Ne luovat vuorovaikutuksille laji-identiteetin, samalla ne muodostavat uuden luokitusperustan myös kappaleille

tai hiukkasille. Kyvystä erilaisiin vuorovaikutuksiin tulee erityisesti modernissa fysiikassa hiukkasten laji-identiteetin tunnusmerkki. Ja näin siis vuorovaikutuksista tulee keskeinen identifioinnin perusta, sekä vuorovaikutusten itsensä että olioiden.

2.3. Suureoliot ja etävuorovaikutuksen ongelma

Vuorovaikutuksilla on kolme vaikutustapaa, joiden kautta kaikkia ilmiöitä tulkitaan:

1. *työntö ja veto* eli vektorivaikutus, jonka voimakkuuden ilmaisee vuorovaikutuksen voima ja joka vaikuttaa osapuolten liikemääriin,
2. *vääntö eli tensorivaikutus*, jonka voimakkuuden ilmaisee vuorovaikutuksen momentti ja joka vaikuttaa osapuolten pyörimismääriin sekä
3. *energia eli skalaarivaikutus*, jonka voimakkuuden ilmaisee vuorovaikutuksen tekemä työ ja joka vaikuttaa osapuolten liike-energioihin.

Kaikki kolme vaikutusta johtavat erilaisiin *säilymisen* hahmoihin. Liikemäärä, pyörimismäärä ja energia ovat hyvin voimakkaasti säilyviä suureita niin, että me voimme puhua niiden siirtymisestä, niiden etenemisestä, kulkeutumisesta samalla tavalla kuin aineen käyttäytymisestä. Ne olioituvat. Säilymisen ansiosta niistä tulee eräänlaisia abstrakteja näennäisolioita, *suureolioita*, jotka jäävät moderniin fysiikkaan sen keskeisinä perushahmoina.

Newtonilaisessa vuorovaikutuksessa osapuolten liikemäärät ja pyörimismäärät muuttuvat samanaikaisesti yhtä paljon vastakkaisiin suuntiin. Tämä voidaan tulkita siten, että vuorovaikutus *siirtää* liikemäärää ja pyörimismäärää kappaleelta toiselle muuttamatta niiden kokonaismääriä systeemissä. Tässä on näiden suureiden olioitumisen lähtökohta. Ne mielletään tietyllä tavalla aineen kaltaisiksi olioiksi, joilla on jatkuva eksistenssi ja jotka voivat siirtyä ja levitä mutta eivät lisääntyä tai vähetä.

Tällainen jonkin siirtyminen kappaleelta toiselle kosketuksen välityksellä tuntuu luonnolliselta. Sen sijaan siirtyminen etävuorovaikutuksessa näyttää intuitiivisesti mahdottomalta. Newtonillekin tämä oli suuri ongelma - miten gravitaatiovaikutus voi välittyä pitkän tyhjän välin yli viipeettömästi. Hän kuitenkin kuittasi ongelman sanomalla tyytyvänsä siihen, että tähän ajatukseen perustuva mekaniikan teoria toimii. Etävuorovaikutuksen mystisyyttä se ei kuitenkaan hälventänyt. Liikemäärän ja pyörimismäärän epäjatkuva hyppäys kappaleelta toiselle on syvästi ristiriidassa jatkuvuuden arkkityyppisen välttämättömyyden kanssa, joka muuten toteutuu kaikissa klassisen fysiikan perusmielikuvissa.

Vuorovaikutuksen kolmannen aspektin, skalaarisen energianvaikutuksen tarkastelu tuo tähän tärkeän uuden näkökulman, joka perinteisessä fysiikan opetuksessa on sivuutettu. Energiavaikutus poikkeaa ratkaisevasti kahdesta muusta vaikutustavasta.

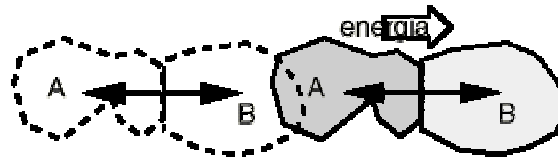
Ensinnäkin energiavaikutus liittyy tasa-arvoisesti samalla kertaa kaikkiin liikkeen muotoihin, kun kaksi muuta vaikutusta olivat nimenomaan vaikutuksia etenemiseen ja pyörimiseen. Se on täysin suuntautumaton, pelkästään määrällinen aspekti. Vuorovaikutuksen skalaarivoimakkuutta esittää suure *työ* ja sen skalaarivaikutusta osapuoliin näiden saamat energiat - riippumatta siitä mihin liikkeen vapausasteisiin nämä energiat kappaleissa sijoittuvat tai miten ne jakautuvat vapausasteiden kesken.

Toiseksi, kun työntö ja vääntö kohdistuvat yhtä voimakkaana kumpaankin osapuoleen - tähän silytyy itse vuorovaikutuksen perusideaan -, energiavaikutuksilla osapuoliin ei ole mitään lainmukaista yhteyttä toisiinsa. Kappaleet saavat vuorovaikutuksessa, yhteensä kaikkiin vapausasteisiinsa energian, joka on yhtä suuri kuin vuorovaikutuksen tekemä työ. Mutta tämä voi jakautua miten tahansa osapuolten energioiksi.

Tämän näkökulman tarkastelussa voidaan, mitään kovin olennaista menettämättä, rajoittaa tilanteeseen, jossa vain kappaleiden etenemisliikkeen vapausasteet ovat mukana, jolloin kappaleiden energiat ovat pelkästään niiden etenemisen *liike-energioita* ja vuorovaikutuksen työvaikutukset osapuoliin riippuvat siitä, miten nämä liikkuvat vuorovaikutuksen aikana.

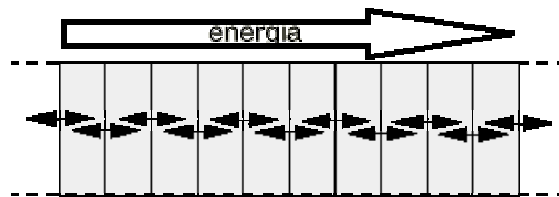
Kosketusvuorovaikutusten osalta tilanne on tässäkin suhteessa ilmeinen. Tilanteessa, jossa kappale

vain työntää tai vetää toista ilman, että kappaleet liikkuvat toistensa suhteen - niin kuin urheilija kuu-
laa tai hevonen rattaita - vuorovaikutus ei tee työtä. Sen kappaleisiin tekemät työt ovat yhtä suuret ja
vastakkaismerkkiset, joten tuloksena on vain energian siirtyminen kappaleelta toiselle vuorovaikutuk-
sen välityksellä.



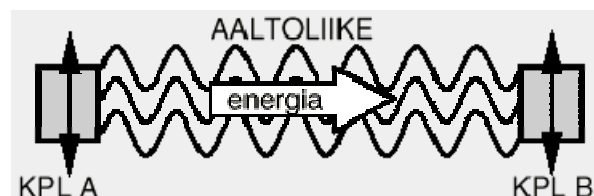
Kuva 4. Energiaa siirtyy kosketuksessa

Kun tätä energian *siirtymisen* mielikuvaa sovelletaan jatkuvassa aineessa peräkkäisiin toisiaan kos-
kettaviin ainealkioihin, siitä rakentuu energian *etenemisen* mielikuva.



Kuva 5. Energiaa etenee aineen sisäisten vuorovaikutusten välityksellä

Näin energia etenee kimmoisan *aineen aaltoliikkeessä* siirtymällä ainealkiolta toiselle jatkuvasti al-
kioitten kosketusvuorovaikutusten eli siis aineen sisäisten vuorovaikutusten välittämänä. Kosketusvuo-
rovaikutukset välittävät ja aaltoliikkeet kuljettavat toki myös liikemäärää ja pyörimismäärää, mikä on
harvemmin esillä koulussa aaltoliikkeestä puhuttaessa.



Kuva 6. Aaltoliike epäsymmetrisenä etävuorovaikutuksena

Aineen aaltoliikkeen kaavakuva muistuttaa mekaniikan perusmielikuvaa mutta on muuntunut epä-
symmetriseksi. Toisesta kappaleesta tulee aaltoliikkeen *lähde*, toisesta sen *vastaanotin*. Mutta tämä
mielikuva on täysin jatkuva sekä ajallisesti että paikallisesti. Lähde luovuttaa jatkuvasti energiaa, liike-
määrää ja pyörimismäärää väliaineeseen, jossa ne etenevät jatkuvina näiden suureolioiden jakaumina,
ja niitä absorboituu jatkuvasti tielle osuvaan vastaanottimeen.

Aaltoliike toimii lähteen ja vastaanottimen välisenä etävuorovaikutuksena, joka poikkeaa newtoni-
laisesta vuorovaikutuksesta siinä, että se on epäsymmetrinen ja että vaikutusten siirtyminen kappaleesta
toiseen vie aikaa. Vaikutukset kulkevat kappaleiden välisen matkan tietyllä väliaineelle ominaisella
nopeudella, eivätkä suinkaan välity hetkellisesti. Tämä "etävuorovaikutus" rakentuu kosketuksista,
mutta se ennakoii varsinaisten etävuorovaikutusten mielikuvan muuttumista.

2.4. Etävuorovaikutuksen potentiaalienergia

Energian yksinkertainen siirtyminen vuorovaikutuksen välityksellä kappaleelta toiselle toteutuu vain tarkastellussa perin yksinkertaisessa työnnön tai vedon tilanteessa. Etävuorovaikutuksissa kappaleet yleensä aina liikkuvat toistensa suhteen. Näin käy myös kosketusvuorovaikutuksissa, jos kappaleiden muoto muuttuu tai kosketuskohdassa esiintyy hankausta. Tällöin vuorovaikutus tekee työtä, tai kappaleet tekevät työtä sitä vastaan (vuorovaikutuksen tekemä negatiivinen työ), ja kappaleiden liike-energia joko lisääntyy tai vähenee tämän työn määrällä. Päin vastoin kuin kokonaisliikemäärä ja -pyörimismäärä, kappaleiden kokonaisliike-energia ei säily. Vuorovaikutus voi vähentää tai lisätä sitä. - On muistettava, että tarkastelu koskee yhä kuvan 2 mukaista mekaniikan perustilannetta.

Säilymisen mielikuva on kaiken eksistenssin perushahmona voimakkaimpia arkkityyppejä mielikuviamme. Siihen me tukeudumme jatkuvasti, ja sen mukaisia tulkintoja etsimme. Niinpä liike-energian lisääntyminen ja väheneminen luokin siirtymisen rinnalle uuden säilyttävän perushahmon, *energian muuntumisen* idean energian lajeista ja niiden muuntumisesta toisikseen. Liike-energian muuttuminen tulkitaankin siten, että energia vain muuntuu toisenlaiseksi energiaksi mutta sen määrä pysyy ennallaan.

Tällaista tulkintaa ei toki voi perustaa pelkkään intuitiiviseen vaatimukseen, olipa se miten arkkityypin itsestään selvä tahansa. Se on luotava ja vahvistettava kvantitatiivisen empirian kautta. Vuorovaikutusten osalta tämä merkitsee kahdenlaista kokeellisuutta.

Joulen kokeella, ja muilla vastaavilla kokeilla, vahvistetaan, että esimerkiksi hankauksessa syntyvä lämpö voidaan tulkita energian lajiksi ja hankaavissa vuorovaikutuksissa hävinnyt liike-energia löytyykin tässä uudessa asussa. Vuorovaikutus siis muuntaa liike-energiaa "lämpöenergiaksi". Energia poistuu liikeilmiöistä siirtymällä toisen ilmiöalueen erilaiseksi energiaksi.

Toiseksi todetaan, ja tämä on ehkä vielä tärkeämpää, että makromaailman kahden tunnetun etävuorovaikutuksen, gravitaation ja sähkömagneettisen, vaikutukset kappaleiden liike-energiaan ovat palautuvia. Nämä vuorovaikutukset palauttavat anastamansa liike-energian takaisin kappaleille näiden välimatkan palatessa ennalleen. Niitä sanotaan sen tähden konservatiivisiksi.

Koska etävuorovaikutus pystyy sekä ottamaan energiaa että palauttamaan ottamansa, energian on oltava sen hallussa jossakin. Tätä sen kätkemää energiaa sanotaan sen *potentiaalienergiaksi*, jota sen skaalarivaikutukset muuntavat liike-energiaksi ja päin vastoin.

Jatkuvasta muuntumisesta tulee jatkuvan siirtymisen rinnalle uusi energian käyttäytymisen perushahmo, jonka avulla energian kokonaismäärän ymmärretään säilyvän jatkuvasti ja myös olevan josakin koko ajan.

2.5. Faradayn vallankumous, kenttä

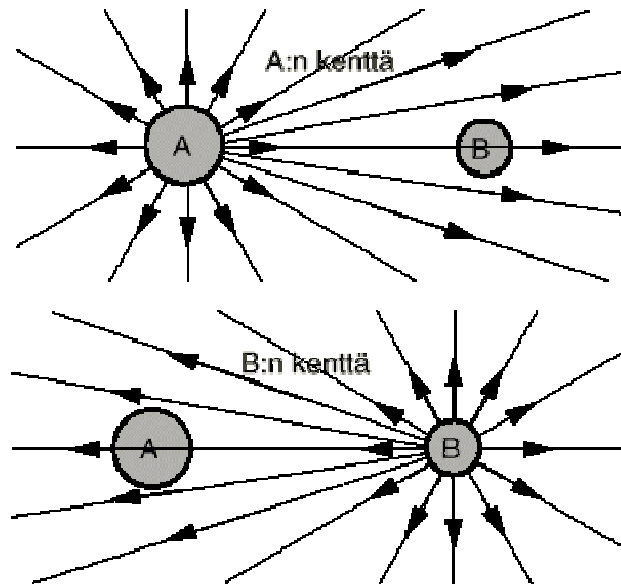
Etävuorovaikutuksen potentiaalienergia liittää vuorovaikutuksen luonteeseen aivan uuden piirteen. Newtonilaisessa perusmielikuvassa vuorovaikutus ymmärrettiin ilmiöksi. Ilmiöiden ominaisuudet ovat luonteeltaan tapahtumisen voimakkuus- tai tehokkuusominaisuuksia. Niitä ovat vuorovaikutuksen kolme vaikutustapaa esittävät voima, momentti ja työ erilaisine "sukulaissuureineen" (impulssi, paine, teho, intensiteetti), jotka kuvaavat samalla liikemäärän, pyörimismäärän ja energian siirtymistä vuorovaikutuksessa. Potentiaalienergia sen sijaan on määrällinen suure, joka esittää jotakin vuorovaikutuksen hallussa olevaa, ikään kuin vuorovaikutuksessa toimisi jokin olio, muu kuin vuorovaikutuksen osapuolina olevat kappaleet.

Näin nousee esiin kysymys vuorovaikutuksen mahdollisesta välittäjästä, joka ennakoி Faradayn sähkömagneettista vallankumousta. Sähköopin, erityisesti Faradayn tutkimuksista, syntyi empirinen pakko hyväksyä olioiksi myös *kentät*. Kentät ovat täysin uudenlaisia, aineettomia olioita. Kenttä kattaa tietyn alueen avaruudessa, ja sillä on tietyt havaittavat ominaisuudet alueen kaikissa pisteissä. Kentät kytkeytyvät kappaleisiin tai hiukkasiin, paitsi paikallisesti, myös kausaalisesti; kappaleen tietty ominaisuus synnyttää kappaleen ympärille kentän. Kappaleen massa luo gravitaatiokentän, varaus sähkömagneettisen kentän. Samalla nämä ominaisuudet toimivat kappaleen kykyä "tuntea" toisten hiukkasten

synnyttämien kenttien vaikutus.

Kenttä on nyt helppo tulkita siksi olioksi, jonka hallussa vuorovaikutuksen potentiaalienergia on. Kenttien ominaisuuksien tutkimus vahvistaakin, että kentällä on energia tietyllä tavalla jakautuneena kentän alueeseen.

Näin Faradayn vallankumous muuttaa radikaalisti mekaniikan perusmielikuvaa. Etävuorovaikutus purkautuu siinä kahteen kaksivaiheiseen osaan. 1. kappale A luo kentän, jonka kappale B tuntee, 2. kappale B luo kentän, jonka kappale A tuntee. Vaiheet ovat epäsymmetriset samaan tapaan kuin aineen aaltoliikkeen välittämä "etävuorovaikutus". Kummassakin toinen kappale on "lähde", toinen "vastaanotin".



Kuva 7. Kentän välittämä vuorovaikutus.

Puhe kappaleiden vuorovaikutuksesta oikeutuu enää vain sen kautta, että kappaleiden sama ominaisuus aiheuttaa sekä kentän syntymisen että sen tuntemisen. Näinkin ajatellen alkuperäisen vuorovaikutuskuvan symmetria horjuu. Se voi toteutua vain sillä edellytyksellä, että nämä kaksi vaihetta välittävät yhtä voimakkaat vaikutukset.

Etävuorovaikutuksen ongelma kuitenkin poistuu päiväjärjestyksestä. Siitä päästään kokonaan eroon, koska vaikutus perustuu kummankin kappaleen kosketukseen kentän kanssa. Kosketus siirtää energiaa kappaleelta kentälle ja kentältä kappaleelle.

Pian käy ilmi, juuri sähkömagneettisen kentän yhteydessä, että kentällä on myös omaa liikemäärää ja pyörimismäärää energian tavoin kenttään jakautuneena. Niittenkin välittyminen etävuorovaikutuksessa tapahtuu kentän kautta. Niitä siirtyy kappaleesta kentälle ja kentästä toiseen kappaleeseen kosketusten välityksellä. Kenttä saa näin samanlaisen tehtävän kuin jatkuva aine. Sekin toimii energian, liikemäärän ja pyörimismäärän välittäjänä lähdekappaleelta vastaanotinkappaleelle.

Tällä tavalla ajatus *kentässä etenevästä aaltoliikkeestä* tulee luonnolliseksi. Aine sai tämän roolin ainealkioiden välisten kosketusvuorovaikutusten kautta, jotka huolehtivat näiden "suureolioiden" etenemisestä aineessa. Kentässä niiden etenemisen mekanismista oli paljon vaikeampi muodostaa mielikuvaa. Jo ajatus aineellisen kappaleen ja aineettoman kentän kosketusvuorovaikutusta tuntuu utuiselta, mutta vielä vaikeampi on mieltää aineettoman kentän paikallisten alkioiden välistä vuorovaikutusta. Tässä lienee yksi keskeinen syy siihen, miksi ajatus eetteristä sähkömagneettisen aaltoliikkeen väliainena eli niin sitkeästi, vaikka Maxwell esittikin etenemisen mekanismille aineettoman selityksen toisaan ruokkivien induktio- ja käänteisinduktioilmiöiden avulla.

3. Epäjatkuvuuden voittokulku

3.1. Klassinen jatkuvuus

Jatkuvuus läpäisee nyt klassisen fysiikan koko mielikuvamaailman. Kaikki perushahmot ovat jatkuvia sekä avaruudessa että ajassa. Kun kentät ja kenttien aaltoliikkeet olivat poistaneet etävuorovaikutusten kiusallisen epäjatkuvuuden, ei klassisen fysiikan mielikuvissa ajasta, avaruudesta, olioista ja ilmiöistä ollut jäljellä oikeastaan mitään, mikä rikkoisi mieleemme arkkityyppisen rakenteen mukaisen kauniin jatkuvuuden.

Aika ja avaruus itsessään ymmärretään jatkuviksi. *Olioiden eksistenssi* oli jatkuvaa. Liike oli niiden paikan, asennon, koon tai muodon jatkuvaa muuttumista jatkuvasti vaikuttavien *vuorovaikutustensa* alaisina. Aine ja kentät ovat ajassa ja avaruudessa *jatkuvia olioita*; niiden lajiominaisuudet toteutuvat niiden kattaman alueen kaikkiin pisteisiin kuuluvissa alkioidissa.

Kaikki *ilmiöt*, liikkeet, kenttien aaltoliikkeet mukaan luettuina, vuorovaikutukset ja suureolioiden, liikemäärän, pyörimismäärän ja energian, siirtyminen ja muuntuminen, lämpö-, ääni-, sähkö-, magneetti- ja valoilmiöt jne. etenivät jatkuvina muutoksina jatkuvassa ajassa ja avaruudessa, jatkuvassa aineessa ja jatkuvissa kentissä, katkeamattomana jatkuvan *deterministisen causan* vuona.

Epäjatkuvuutta on enää yksilöiden ja lajien erillisuus. Kappaleet ja hiukkaset ovat jokainen oma erikseen tunnistettava yksilönsä. Niillä on *yksilöidentiteetti*. Aineen lajeilla, kentillä ja eri ilmiöillä on ominaisuutensa, jotka antavat niille tunnistettavan *laji-identiteetin*. Liikeilmiöt koostuvat joukosta riippumattomia vapausasteita. Vuorovaikutukset erottuvat lajeiksi erilaisten mekanismiensä ja lakiansa perusteella. Kentät perivät etävuorovaikutusten laji-identiteetin - on tärkeätä tiedostaa ettei kentillä ole hiukkasten tavoin yksilöidentiteettiä. Energialla on lajinsa jne.

Tässä esitykseni viimeisessä jaksossa tarkastelen, miten klassisen fysiikan jatkuvuuden varjossa itää epäjatkuvuuden siemen. Se murtautuu esiin tämän vuosisadan alun kokeellisten tulosten kautta. Empiirisen välttämättömyyden pakosta joudumme näkemään mielikuviamme kaikkien perushahmojen - olioiden, ilmiöiden, ominaisuuksien ja suureiden ja lakien deterministisen causan - jatkuvuuden murenevan asteittain. Jatkuvuuden mielikuva törmää omaan empiriseen mahdottomuuteensa.

3.2. Atomi, käenpoika klassisen fysiikan pesässä

Ajatus, ettei aine olekaan jatkuvaa vaan *aineen kvanteista*, atomeista koostuvaa, on hyvin vanha. Aikana, jolloin ei ollut mitään empirian keinoja ratkaista asiaa, se oli filosofinen vaihtoehto aineen jatkuvuudelle. Aineen jakaminen osiin oli joko päättymätöntä tai päättyvää. Oli luontevaa pohtia, miten aineen ominaisuudet selittyisivät kummankin mallin avulla.

Atomit merkitsivät epäjatkuvuutta jyrkässä ristiriidassa klassisen fysiikan totaalisen jatkuvuuden kanssa. Atomeja pohdittiin klassisen fysiikan kaudella paljonkin. Atomit kulkivat pitkään mukana ideaana, josta etsittiin "syvempää" selitystä aineen ominaisuuksille ja aineen ilmiöiden klassisille laeille. Atomirakenne itsessään ei kuitenkaan kuulunut klassisen fysiikan rakenteeseen millään tavalla. Atomi oli käenpoika klassisen fysiikan pesässä.

Kvantittumisen vyörytys alkoi atomista. Vuosisadan vaihteen kehityksestä näemme, miten empiria alkaa ruokkia käenpoikaa, miten käenpoika kasvaa ja ajaa meidät ristiriitaan jatkuvuuden kaikkien ilmenemismuotojen kanssa aina jatkuvaa eksistenssiä myöten, miten käenpoika kasvaessaan heittää pesästä yksitellen kaikki arkkityyppistä jatkuvuutta noudattavat mielikuvalliset perusteet, joille klassinen fysiikka rakentui.

Atomin idea on niin vanha ja olemme niin tottuneet siihen, että tämä perusasia pyrkii unohtumaan. Fysiikan oppikirjoissa on paljon sokeaa atomaaristen selitysten palvontaa. Jo ala-asteelta alkaen ne pyrkivät rakentamaan sellaista mielikuvaa, että oppilaan havaitsema makroskooppinen ilmiömaailma olisi muka ymmärrettävissä vain atomien kautta, kun siinä tosiasia ei ole nähtävissä mitään, mikä edellyttäisi selitykseen atomeja tai edes viittäisi atomeihin jatkuvaa ainetta parempana mallina.

Viitteitä aineen atomirakenteesta saadaan vain vähitellen ja vaivalloisesti perusteellisten kvantitatiivisten kokeellisten tutkimusten kautta.

Aivan 1800-luvun alussa havaittiin, että *kemiallisesti reagoivien aineiden määrasuhteita koskevat lait* oli helppo ymmärtää, jos kullakin alkuaineella oli oma sille ominainen atominsa ja kullakin yhdisteellä sille ominainen atomeista rakentuva molekyylinsä. Havainto osoitti, että kemialliset reaktiot olivat keino verrata eri aineiden määriä toisiinsa ja selvittää esimerkiksi kuinka paljon happea on (kemiallisesti) yhtä paljon kuin 1 g vetyä. Se johti aineen (kemiallista) määrää esittävään *ainemäärän* käsitteeseen. Intuitiivisesti oli helppoa ymmärtää, että yhtä suurissa ainemäärissä eri aineita oli yhtä paljon molekyyliä. Tämä johti edelleen aineiden suhteellisten atomi- ja molekyyliainemäärien määrittelyyn, joka muodosti perustan ainemäärän yksikön, *moolin* määrittelylle.

Faradayn elektrolyysilakien mukaan sähkövirran kuljettaman varauksen ja ainemäärän suhteet olivat aina samat, ikään kuin elektrolyyteissä virtaa kuljettaisivat varautuneet atomit eli ionit, joilla oli aina sama varaus tai tämän varauksen pieni monikerta.

Tällaiset tulokset olivat luonnollisesti voimakkaita intuitiivisia indikaatioita aineen atomirakenteen puolesta. Makroskooppisten ilmiöiden tulkintoina ne eivät kuitenkaan olleet pakottavia. Ne olivat pelkkää teoreettista evidenssiä, selitysnäyttöä. Vielä sittenkin, kun *Boltzmann* rakensi 1800-luvun lopulla klassiselle lämpöopin teorialle, termodynamiikalle, kvantitatiivisen atomaarisen tulkinnan, machilainen positivistinen suuntaus jopa torjui atomin idean kokonaan fysiikkaan kuulumattomana varsinaisen havaintonäytön puutteessa.

Ensimmäisenä pakottavana havaintonäyttönä pidän *Millikanin* koetta v. 1909–13, joka osoitti varauksen kvantittumisen ja johti varauksen kvantin eli alkeisvarauksen määrittelyyn. Kun elektrolyysilakien perusteella tiedettiin yhden "varausmoolin" varaus, tuli tämän kokeen ansiosta moolia vastaava lukumäärä, *Avogadron vakio*, ja samalla koko atomaarisen maailman mittakaava, kerralla selväksi.

Toisena pakottavan empirian kulmakivenä pidän isä ja poika *Braggin röntgendiffraktiotutkimuksia* (n. 1915), joissa atomit ensimmäistä kertaa saatiin näkyviin. On täysin oikeutettu pitää röntgendiffraktiokokeita atomien näkemisenä, koska niissä saaduista mittauksista voidaan pelkän suoraviivaisen matematiikan avulla muodostaa kiteisen aineen elektronien jakauman kuva, jossa nähdään elektronien keskittyminen atomeja vastaaviksi tihentymiksi. Elektronien kokonaismääräkin atomissa voidaan kuvan perusteella määrittää ja siten tunnistaa atomit. Kehittyneemmällä tekniikoilla atomien "näkemistä" on sittemmin tullut fysiikan arkipäivää.

3.3. Vapausasteiden jäätyminen

Atomien empiirisesti vahvistettu todellisuus antaa uuden merkityksen myös koko sille valtavalle määrälle tulkinnallista evidenssiä, jota oli kertynyt yli sadan vuoden aikana. Nyt oli empiiriset perusteet käsitellä ainetta atomien muodostamana systeeminä. Näin erityisesti lämpöoppi sai uuden sisällön. Mekaniikassa *vapausasteet* olivat systeemin liikkeen riippumattomia, tasa-arvoisia "ulottuvuuksia", joista jokaisella oli yhtäläinen potentiaalinen kyky vastaanottaa ja luovuttaa energiaa. Systeemin jokainen mahdollinen liike voitiin tulkita vapausasteiden yhdistelmäksi, jossa energia jakautui tietyllä tavalla vapausasteiden kesken. Vuorovaikutukset siirsivät energiaa kappaleelta toiselle ja kappaleessa vapausasteelta toiselle. Vuorovaikutuksen luonteesta riippui, miten se viritti eri vapausasteita.

Energian muuntuminen "lämmöksi" energiaa kuluttavissa vuorovaikutuksissa voitiin nyt tulkita tämän yleisen periaatteen yhdeksi tapaukseksi. Siinä vuorovaikutus siirtää energiaa aineen atomaaristen värähtelyiden vapausasteille, joita on tavaton määrä. Lämpötasapaino aineessa muodostuu siten, että atomien väliset vuorovaikutukset siirtävät energiaa atomaariselta vapausasteelta toiselle, kunnes energia jakautuu keskimäärin tasan niiden kaikkien kesken. Tämä oli keskeinen tilastollisen mekaniikan periaate, johon termodynamiikan lakien atomaarinen selitys perustui.

Lämpöopissa kappaleen kyky sitoa energiaa on sen lämpökapasiteetti. Kun kaikilla atomaarisilla vapausasteilla on yhtä suuri kyky sitoa energiaa, kappaleen lämpökapasiteetin tulisi olla verrannollinen sen vapausasteiden lukumäärään. Koska yhdessä moolissa ainetta on aina sama määrä molekyyliä,

moolisten lämpökapasiteettien tulisi ilmaista suoraan yhden molekyylin vapausasteiden lukumäärä.

Ja todellakin, kokeellinen tutkimus paljastaa *yksinkertaisia suhdelukuja*: jalokaasuilla 3, esim. vedylä, tyrellä ja hapella 5, esim. vedellä ja metaanilla 6 sekä suurella joukolla kiteisiä aineita 6. Tämä vastaa esitettyä mielikuvaa. Jalokaasun yksiatomisella molekyylillä on vain etenemisen vapausasteet, kaksiatomiset molekyylit voivat sitoa energiaa myös pyörimiseen kahden eri akselin ympäri. Tiiviillä useampiatomisilla molekyyleillä tulee mukaan pyöriminen kolmannen kohtisuoran akselin ympäri. Kiinteän aineen paikalleen sidotun atomin värähtelyihin kussakin kolmessa avaruuden suunnassa liittyy sekä liike- että potentiaalienergiaa. Vapausasteita tulee näin kuusi.

Nämä aineen termisten ominaisuuksien kauan tunnetut lait merkitsevät luonnollisesti voimakasta vahvistusta sille, että käsityksemme aineen atomirakenteesta ovat oikeansuuntaiset. Niiden suoraviivainen yksinkertaisuus on dramaattisen vakuuttava. Näiden lakien pätevyysalueen tarkastelu ja niiden merkityksen pohdinta tekee niistä modernin fysiikan kehityshistorian kulmakiviä. Koulufysiikassa niiden on kuitenkin, jostakin minulle käsittämättömästä syystä, katsottu kuuluvan ei-kovin-tärkeisiin aiheisiin.

Kun ainetta jäähdytetään riittävästi, lait rikkoutuvat. Lämpökapasiteetit alkavat pienentyä. Kaasumolekyylien suhdeluvut alenevat jalokaasujen lukuun 3, kiinteiden aineiden suhdeluku lähestyy ilmeisesti nollaa. Tämän havainnon *Maxwell* risti *vapausasteiden jäätymiseksi* ja ennusti jo v. 1859, että se on kompastuskivi, johon klassinen fysiikka kaatuu. Miksi vapausasteet vastoin klassisen fysiikan jatkuvuuden periaatteita lämpötilan laskiessa jäätyvät, eli menettävät kykynsä vaihtaa energiaa toisten vapausasteiden kanssa?

Tätä täydentää havainto, että hyvin korkeisiin lämpötiloihin kuumennettaessa kaksiatomisten kaasujen suhdeluku alkaa kasvaa ja lähenee ilmeisesti lukua 7, ikään kuin molekyylin sisäisen sidosvärähtelyn kaksi vapausastetta liittyisivät mukaan energianvaihtoleikkiin.

Ja, kun on ryhdytty kyselemään, pitää ihmetellä sitäkin, miksi juuri havaintojen osoittama määrä vapausasteita on leikissä mukana. Kun molekyyleillä, jopa atomeilla on sisäinen rakenne, niin kuin jo pitkään oli ymmärretty, mikseivät termiset ominaisuudet vastaa niiden rakenneosien lukumäärää, jonka tulisi määrätä myös vapausasteiden määrä? Miksi atomien rakenneosat eivät osallistu "lämpöliikkeeseen"?

Mielikuvatasolla näiden havaintojen indikaatio on lähes ilmeinen. *Vapausasteiden energia on kvantittunut*. Kullakin vapausasteella on sille ominainen pienin energia, jonka se voi luovuttaa tai vastaanottaa. Lämpötilan laskiessa molekyylien törmäykset heikkenevät. Jossakin vaiheessa energiaa ei enää ole tarjolla riittävästi, ja vapausaste putoaa pois pelistä. Mitä korkeampi lämpötila tarvitaan vapausasteen kytkeytymiseen, sitä suurempi ilmeisesti on sen virittymisen kynnyksenergia. Kaasuja koskevista tuloksista päätellen vain vapaan etenemisen energia on jatkuva, pyörimisen kynnyksenergia on pieni ja sidosvärähtelyjen suuri. Atomin sisäisen rakenteen virittyminen vaatisi ilmeisesti vielä paljon korkeampia lämpötiloja.

Jälkikäteen voi jopa ihmetellä, miksi oivallus viipyi niinkin kauan. Mutta katsotaanpa lähemmin, miten perusteellista luopumista arkkityyppisistä mielikuvista se merkitsi.

Ainetta oli klassisessa fysiikassa pidetty jatkuvana. Mutta jatkuvaa ainetta olevan kappaleen sisäisten vapausasteiden määrän tulisi olla ääretön. Jos kaikki vapausasteet ovat tasa-arvoisina mukana lämpötasapainon muodostumisessa, niin kuin ilmiöiden jatkuvuus vaatii, lämpötasapaino tulee mahdottomaksi. Jokaiseen kappaleeseen mahtuisi loputtomasti energiaa ja vastaavasti aineen lämpötila ei pääsisi milloinkaan kohoamaan absoluuttisesta nollasta. Aineellisen maailman lämpöilmiöiden mahdollisuus perustuu aineen kvantittuneisuuteen ja huutaa jatkuvuuden mahdottomuutta.

3.4. Vuorovaikutukset ja identiteetti

Sama koskee kenttiä. Nekin olivat jatkuvia oliota. Vaikka ne olivat aineettomia niillä oli oma energiansa, joka jakautui *kentän vapausasteiden* kesken. Kentän eri vapausasteita ovat sen kaikki *eritaajuiset aaltoliikkeet*. Kentän jatkuvuus ei aseta mitään rajoituksia aallonpituudelle, joten jatkuvassa kentässä vapausasteita on äärettömästi ja kenttien tulisi olla, jatkuva-aineisten kappaleiden tapaan, pohjattomia energianieluja.

Sähkömagneettisen säteilyn terminen tasapaino kuitenkin tunnetaan hyvin. Sitä koskevia empiirisiä perustuloksia sanotaan *mustan kappaleen säteilylaeiksi*. Ne osoittavat, millä tavalla energia jakautuu sähkömagneettisen säteilyn eri vapausasteiden kesken ja miten tämä jakautuminen riippuu lämpötilasta.

Taas nähdään vapausasteiden jäätyminen. Mitä lyhytaaltoisempi vapausaste on, sitä vähemmän se osallistuu energianjakoon. Lämpötilan noustessa yhä lyhytaaltoisemmat heräävät vähitellen mukaan leikkiin. Sähkömagneettisen säteilyn vapausasteen kynnysenergia on sitä suurempi, mitä pienempi on sen aallonpituus eli mitä suurempi on sen taajuus. *Planck* osoitti v. 1900, että mustan kappaleen säteilylait selittyvät, jos tämän kvantin suuruus oletetaan verrannolliseksi taajuuteen. Näin saatua kvantin energian lauseketta on tapana sanoa *fotonin energiaksi*.

Tämä ei sinänsä pakota luopumaan kentän jatkuvuudesta, eikä oikeuta ajattelemaan fotoneja kentässä olevina "rakenneosina". Empiirinen indikaatio koskee tässä pelkästään vuorovaikutuksia: kentän vapausasteiden energianvaihto tapahtuu fotoneina. Kentän vuorovaikutukset aineellisten olioiden kanssa, säteilyn emissio, absorptio ja sironta, olivat klassisessa fysiikassa lähteen ja vastaanottimen jatkuvaa energianvaihtoa kentän kanssa. *Energianvaihdon kvantittuminen* tekee jatkuvan vuorovaikutuksen mahdolliseksi ja tappaa näin tämänkin mielikuvan. Tämä toteamus konkretisoituu havainnoissa, joiden mukaan säteilyn emissio, absorptio ja sironta koostuvat *hetkellisistä ja paikallisista tapahtumista* ilman mitään näiden ilmiöiden jatkuvuutta.

Koska havaitseminen ylimalkaan on mahdollista vain vuorovaikutuksessa havaittavan kanssa, vuorovaikutusten hetkellisyys ja paikallisuus merkitsee, ettei ole periaatteessakaan mitään mahdollisuutta saada suoraa empiiristä perustetta (atomaaristen) olioiden jatkuvasta eksistenssistä.

Tämä epäsuora päätelmä saa dramaattisen vahvistuksen kokeissa, joissa havaitaan säteilyn hetkellisistä ja paikallisista "osumista" vähitellen rakentuva diffraktiokuvio. Kokeet tunnetaan *aaltohiukkasdualismin* peruskokeina. Useimmiten huomio kiinnitetäänkin vain niissä samanaikaisesti havaittaviin aaltojen ja hiukkasten tunnuspiirteisiin ja hämmästellään tähän kätkeytyvää näennäistä ristiriitaa, mutta jätetään toteamatta, että nämä kokeet, erityisesti nk. kaksoisrakokokeen periaatteella tehtyinä, ovat pakkava empiirinen näyttö *hiukkasten eksistenssin* jatkuvuutta vastaan.

Olemme edenneet kertomuksessa kyllin pitkälle nähdäksemme, miten kvantittuminen koskee klassisen fysiikan perushahmojen kaikkia luokkia oliota, ilmiöitä ja ominaisuuksia. Empiirinen pakko murentaa jatkuvuuden mielikuvan perusteet pala palalta. Tarinan tässä vaiheessa kentän paikallista jatkuvuutta ei varsinaisesti ole kyseenalaistettu, vaikka vuorovaikutusten kvantittumisen mukana menetetäänkin sen empiirisen toteamisen mahdollisuus. Varsinaisen *kenttien kvantittumisen* vuoro tulee väistämättä vastaan myöhemmin. Ei myöskään ole sanottu mitään itse *ajan ja avaruuden jatkuvuutta* vastaan. Mutta ymmärtäessämme, että avaruudella tai paikalla avaruudessa on empiirinen merkitys vain siellä olevien olioiden mitattavien etäisyyksien kautta ja että ajalla on vastaavasti operationaalinen merkitys vasta siinä tapahtuvien ilmiöiden kautta, näemme, että niidenkin jatkuvuudelle on haaste esitetty.

Ilmiöiden jatkuvuuden mukana menetetään olioiden *jatkuva eksistenssi*. Ei siis enää ole mahdollisuutta edes puhua liikkeestä, joka on klassisen fysiikan ensimmäinen perusilmiö. Samalla häviää yleisemminkin mahdollisuus *causan* etenemiseen jatkuvana syysuhdeketjuna, joka on klassisen fysiikan determinististen lakien edellytys. Jatkuva eksistenssi on myös *yksilöidentiteetin* perusta, joten sekin menetetään. Yksilöolioita ei enää voi olla. Hetkellisten ja paikallisten vuorovaikutustapahtumien mitattavat ominaisuudet jättävät kuitenkin jäljelle luokitteluperustan, jonka avulla näissä tapahtumissa hetkellisesti realisoituvilla "hiukkasilla" on tunnistettava *laji-identiteetti* niin kuin oli klassisen fysiikan kentillä ja ilmiöillä.

Vielä viimeinen naula: hiukkasfyysikoiden unelma, kaiken teoria, perustuu ideaan kaikkien vuorovaikutuksen ja hiukkasten lajien palautumisesta pohjimmiltaan yhteen ainoaan supervuorovaikutuk-

seen. Mitä merkitystä on enää laji-identiteetilläkään, jos on vain yksi laji.

Näin jäämme ihmettelemään, miten atomimaailman epäjatkuvuudesta ja yksilöidentiteetin mahdottomuudesta voi kuitenkin rakentua makromailma kaikkine jatkuvuuksineen. Ja miten on mahdollista, että mekin jokainen olemme tässä läsnä jatkuvasti erillisinä identifioitavina yksilöinä. Mutta tämä olisi-kin toisen tarinan aihe.