

# Kohti uutta todellisuuskäsitystä – kvanttimekaniikka ja termodynaaminen energiavirta

■ Tarja Kallio-Tamminen

Termodynamiikan yksinkertaisia ja yleispäteviä peruseriaatteita voidaan soveltaa luonnontutkimuksessa monilla eri alueilla. Albert Einstein totesi vuonna 1949, että termodynamiikka on kattavista fysikaalisista teorioista ainoa, jota ei varmasti tulla koskaan hylkäämään. Termodynamiikan toinen pääsääntö hallitsee kaikkia palautumattomia, irreversiibeileitä, prosesseja. Tieto siitä, että lämpö ja energia ylipäätään siirtyvät aina korkeammista arvoista kohti matalampia, koskee myös mikroskooppisten hiukkassysteemien kehitystä. Tilastolliseen mekaniikkaan perustuva termodynamiikka ei kuitenkaan perinteisessä muodossaan sisällä riittäviä välineitä mikroskooppisten järjestelmien kuvaamiseen. Se pitäytyy todellisuuskuvailussaan suljettuihin hiukkassysteemeihin, kun taas hiljattain muotoiltu avointen järjestelmien tilastollinen mekaniikka tarkastelee todellisuutta energiamaisena, jonka tiheyserot pyrkivät virtausten myötä tasoittumaan.<sup>1</sup> Tämä energian ja vaikutuksen käsitteisiin perustuva kokonaisvaltainen kuvaus tarjoaa tarkastelunarvoisen kehikon, jossa entropian kasvu voidaan sovittaa yhteen evoluution ja yhä mutkikkaampien rakenteiden syntyminen kanssa. Myös monet kvanttimekaniikan keskeiset tulkintaongelmat aina mittausongelmaa myöten saavat uutta valaistusta.

Energia on perustava käsite kaikessa modernissa luonnontutkimuksessa. Se on jotakin, jota ei voida luoda eikä hävittää, vaikka se saadaankin helposti muuttamaan muotoaan. Luonnossa ilmenevä aktiivisuus edellyttää energian muu-

1 Arto Annala on kirjoittanut tilastollisen fysiikan avoimille järjestelmille, josta 2. pääsääntö ja pienimmän vaikutuksen periaate liikeyhtälömuodossaan seuraavat. Ks. tarkemmin esim. Sharma, Annala 2007 ja Kaila, Annala 2008.

toksia. Mutta onko energia jotakin itsessään olevaa, vai onko se vain niiden olioiden ominaisuus, joihin se kulloinkin liittyy? Ja jos se on ominaisuus, kuuluuko se aidosti oliolle itselleen vai riippuuko se vain sen paikasta ja asemasta kokonaisuudessa?

Kysymykset heijastavat fysiikan perusteisiin liittyviä ongelmia. Termodynamiikan peruseriaatteen mukaan energiavirtojen voidaan ajatella ilmenevän kaikkien luonnon prosessien rakentumisessa. Kaikki universaalit säännönmukaisuudet ovat ymmärrettävissä energiansiirtoreitteinä, jotka noudattavat Pierre Louis Maupertuis'n jo 1700-luvun alkupuolella hahmottelemaa pienimmän vaikutuksen periaatetta. Maupertuis'n yleinen periaate kattaa suljettujen liikkeiden lisäksi myös avoimet rakenteet ja prosessit, jotka etenevät sigmoidaalisesti aika ajoin haarautuen ja toisinaan jopa kaoottisesti käyttäytyen. Sittenkin klassisen fysiikan piirissä vaikutuskäsitteen käyttö rajoittui kuitenkin vain suljettuihin systeemeihin, joiden energia säilyy vakiona. Vaikutuksen laajempi merkitys nousi taas esiin kvanttimekaniikan myötä, kun jo varhaisissa tulkintakeskusteluissa pohdittiin Planckin vakion ja vaikutuskvantin luonnetta. Pienimmän vaikutuksen periaate nivoutui kvanttimekaniikkaan vuonna 1948, kun Richard Feynman esitti teorian polku-integraalimuodossa summana yli kaikkien mahdollisten suljettujen tai muutoin rajoitettujen ratojen. Hiukkasfysiikan energiansiirtoreittejä kuvataan yleisesti Feynmanin graafeja käyttäen.

Kvanttimekaniikasta tuli modernin fysiikan perusteoria lähinnä ennustuskykynsä ja vakuuttavien mittaustulosten myötä, vaikkei kukaan oikein tiedä, miten tuo arkipäivän kokemusmaailmasta poikkeava teoria pitäisi ymmärtää.

Kadunmiehellekin tutuksi tulleet puheet kvanttihiyyistä tai Schrödingerin kissan kummallisista piirteistä kertovat siitä, että kvanttimekaniikan tulkintakeskusteluissa törmätään perustaviin todellisuuden luonnetta koskeviin kysymyksiin. Teoria haastoi uuden ajan taitteessa muotoutuneen hiukkamekanistisen maailmankuvan uudella tilakuvailullaan, tilastollisuudellaan ja indeterminismillään, mittaongelmaa tai irreversiibeliyttä unohtamatta. Kvanttimekaniikan oikeasta tulkinnasta on keskusteltu kohta sata vuotta. Ajatus kellokoneistomaailmasta ei selvästikään enää toimi, kuinka sitten objektien ja ominaisuuksien luonne tai osan ja kokonaisuuden suhde tulisi ymmärtää? Mistä maailma loppujen lopuksi koostuu ja mikä on ihmisen asema luonnon kokonaisuudessa? Avointen järjestelmien tilastollisen mekaniikan tarjoama uusi näkökulma ei niinkään liity hiukkassysteemien tilastolliseen tarkasteluun kuin termodynamiikan peruseriaatteeseen, joka kaikessa yksinkertaisuudessaan sanoo: energiaerot tasoittuvat mahdollisimman nopeasti.

### Energiavirrat avoimessa maisemassa

Hiukkassysteemejä tarkastellaan energiatiheyksien maisemana, jonka korkeuserot pyrkivät energian virtausten myötä tasoittumaan mahdollisimman nopeasti. Systeemin tila määritellään energieettisin termein suhteessa ympäristöönsä, joka sekkin on systeemi. Kuhunkin tilaan liittyy kokonaisenergiaperiaatteen mukainen tasapainoehto  $2K = -U + Q$ , jossa liike-energia  $2K$  kuvaa maiseman paikallisen pinnan muodon<sup>2</sup>. Muoto riippuu paikassa oleviin fermioneihin liittyvästä potentiaalienergiasta  $U$  ja bosoneihin liittyvästä vuorovaikutusenergiasta, ts. säteilyn tiheydestä  $Q$ . Yleensä välittäjähiukkasiin sisältyvä energia  $Q$  on pieni verrattuna massan omaavien hiukkasten energiaan  $U$ , mutta silti säteily on systeemin kehityksen kannalta olennainen tekijä, koska juuri se välittää energiaa systeemi-

min ja sen ympäristön välillä. Tällä tavoin energian avulla määriteltynä tila-käsite tarkoittaa, että aina kun systeemin energia muuttuu, myös sen tila muuttuu. Systeemin tilan muuttuminen edellyttää vuorovaikutusta ympäristön kanssa, jolloin energiatiheyksien erosta riippuen systeemi voi joko luovuttaa tai ottaa vastaan energiaa. Avoimissa järjestelmissä energia pääsee virtaamaan, jolloin systeemi kehittyy alkutilasta kohti todennäköisintä tilaansa, jossa kaikki energiatiheyserot ovat tasoittuneet. Esimerkiksi vesi virtaa yhtenevien astioiden välillä, kunnes pinnat saavuttavat saman tason. Kehitys kulkee kohti stationaarista tilaa, jossa järjestelmä on saavuttanut ympäristössään tasapainotilan. Silloin nettovirtauksia ei enää ole, joten systeemin energia säilyy ainakin toistaiseksi. Tällainen systeemi ei kehity ajassa, vaikka se voi toistaa tiettyä sykliä.

Kvanttimekaniikan tulkintakeskusteluissa ongelmalliseksi koettu aaltofunktion  $\psi(x,t)$  käsite voidaan energiatarkestelussa tulkita systeemin tilaa määrittäväksi energiatiheydeksi, joka on ilmaistu paikan  $x$  ja ajan  $t$  koordinaatein. Se on reaalin systeemin kehitystä määrittävä tekijä, kuten myös kvanttimekaniikassa esiintyvä todennäköisyyden käsite. Tietyn tilan todennäköisyys  $P$  lasketaan aaltofunktion ja sen kompleksikonjugaatin tulosta odotusarvona, integroimalla molempien liikesuuntien yli. Tämä aaltofunktion neliö  $P = \langle \psi^* \psi \rangle$  on järjestelmän energian mitta normitettuna vuorovaikeuttavien hiukkasten keskimääräisellä energiatiheydellä  $k_B T$  (so. systeemin hiukkasten energian odotusarvo). Todennäköisyys kasvaa, kun energiaerot virtojen seurauksena tasoittuvat. Perinteisessä suljettujen järjestelmien tilastollisessa mekaniikassa todennäköisyys liittyy vain järjestelmään sidottuun energiaan, ts. paikan energiatiheyteen, jolloin siitä puuttuu kehitystä ajava vapaa energia eli ajan myötä muuttuva energiatiheys. Tämän vajavaisen määritelmän takia maksimaalista todennäköisyyttä vastaava stationaarinen tila joudutaan hakemaan matemaattisin keinoin (esim. Lagrangen kertoimien avulla) sen sijaan, että todennäköisyys kasvaisi luonnostaan, kun järjestelmä kehittyy kohti todennäköisintä tilaansa. Kun avointen järjestelmien

<sup>2</sup> Emile Chatelet (1706–49), joka ranskansi Newtonin *Principian*, esitti  $2K$  termin liittyvän pinnan kaarevuuteen. Myöhemmin liike-energia on yleisesti mielletty vain kappaleen attribuutiksi.

kuvauksessa käytetty todennäköisyyden määritelmä sisältää sekä paikkaan sidottujen fermionien potentiaalienergian  $U$  että ajan myötä muuttuvaan bosonivirtaan  $Q$  liittyvät energiatiheddet, se on yhteensopiva kvanttimekaanisen todennäköisyyden kanssa.

Todennäköisyyden muutokselle voidaan kirjoittaa sinänsä yksinkertainen liikeyhtälö eli kehitysyhtälö

$$(1) \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} \int \psi^* \psi dx = (\mathbf{v} \cdot \nabla U + \partial Q / \partial t) / (k_B T) P + d/dt \Delta \varphi$$

jossa energiaero järjestelmän ja sen ympäristön välillä muodostuu eroista massatiheyteen liittyvässä skalaaripotentialissa ( $U$ ) ja säteilytiheyteen liittyvässä vektoripotentialissa ( $Q$ ). Tätä energiaeroa kutsutaan yleisesti vapaaksi energiaksi ( $A$ ), toisinaan myös affiniteetiksi ja eksergiksi. Energian virtaus merkitsee sitä, että vapaa energia vähenee. Yhtälö (1) kuvaa hiukkassysteemien kehitystä, mutta siitä ei kuitenkaan yleensä voida ratkaista hiukkasten liikeratoja. Yhtälö ei integroidu suljettuun muotoon, koska järjestelmän energia muuttuu sen kehittyessä kohti tasapainoa ympäristönsä kanssa. Avoimessa tilanteessa hiukkasten liike (ts. energianvirta) vaikuttaa liikevoimien suuruuteen. Energiaero ajaa energiavirtaa, joka puolestaan vähentää energiaeroa, joten vallitsevat energiatihetyserot muuttuvat liikkeen myötä. Myös järjestelmien sisäisissä tilasiirtymissä systeemin energia muuttuu. Kun kehittyvässä systeemissä hiukkasten ominaisliikkeet ja niitä vastaavat ominaisarvot tyypillisesti muuttuvat, kyseisiä lukuaroja ei voida ratkaista. Yhtälöstä (1) nähdään myös, että energiavirtojen keskinäiset vaihe-erot  $\Delta \varphi$  vaikuttavat energiatihetyksien kehitykseen.

Vaihe-erot synnyttävät interferenssi-ilmiöitä, kun eripituisiin polkuihin erkaantuneet energiavirrat yhdistyvät.<sup>3</sup> Interferenssi-ilmiöt ovat ilmeisiä mikroskooppisten järjestelmien tila-

3 Energiavirroista puhuttaessa Feynmanin toteamus, ettei ole mielekästä kysyä mitä reittiä elektroni kulkee, koska se valitsee kaikki reitit, käy ymmärrettävämmäksi. Moninaisten reittien yhteisvaikutuksen myötä elektroni etenee lyhimmissä ajassa lähteestä kohteeseen.

muutoksissa, mutta makroskooppisten järjestelmien sisäiset liikkeet ovat yleensä siinä määrin satunnaisia, että vaihe-erot kumoavat toisensa. Tällaisen epäkoherentin  $\Delta \varphi = 0$  järjestelmän kehitysyhtälö (energianvirtausyhtälö) voidaan kirjoittaa muodossa

$$(2) k_B T d(\ln P) / dt = \mathbf{v} \cdot \nabla U + \partial Q / \partial t$$

jossa yhtälön molemmat puolet on kerrottu keskimääräisellä energialla  $k_B T$ . Tällöin on helppo huomata että entropia  $S = k_B \ln P$  on järjestelmän todennäköisyyden logaritminen, siis additiivinen mitta. Entropia kasvaa, kun vapaa energia vähenee, mikä on Gouyn ja Stodolan muotoilema termodynamiikan maksiimi. Liikeyhtälöstä huomataan myös, että entropian muutos  $dS/dt$  kerrottuna lämpötilalla  $T$  vastaa liike-energian  $d2K/dt$  muutosta. Kun liike-energia ajatellaan energiamaiseman pinnaksi, sen muutos merkitsee pinnan kaarevuuden muutosta. Tilasiirtymissä vapaa energia vähenee ja pinnan kaarevuus loivenee. Liikettä ajava voima pienenee, kunnes saavutetaan tasapainotila, jossa energiamaisema on tasainen eli euklidinen. Stationaarissa tilanteessa liikkeellä ei enää ole vaikutusta liikevoimaan. Järjestelmän energia ei muutu, jolloin se ei kehity ajassa, vaikka siihen kuuluvat osaset voivat liikkua paikallaan pyörien tai tasaisesti vaihdetaan kiertäen pitkin sulkeutuvia ratoja.

### Vaikutus ja irreversiibeli aikakehitys

Kvanttimekaniikka on muun fysiikan lailla perinteisesti keskittynyt tarkastelemaan lähinnä säilyviä stationaarisia systeemeitä. Niiden todennäköisyys on vakio ja käytös varmuudella ennustettavissa, kun energiatihetyys ei muutu. Tällainen vakioenergiatiloja painottava lähestymistapa ei tavoita systeemien muutosta tai evolutionaarista kehitystä, joka kuitenkin on varsinkin elollisessa luonnossa kaikkeen tapahtumiseen oleellisesti kuuluva piirre. Avoimien järjestelmien tilastollinen mekaniikka kattaa energian siirtoreittien ajatuksellaan kappaleiden perinteisen deterministisen liikkeen (dynamiikan) ja antaa samalla mahdollisuuden myös

uusien muotojen syntymiseen, kun suljetut radat ja tilat voivat dissipatiivisessa siirtymässä rikkoutua muuttuvan ympäristön ja uusien energiavirtausten myötä. Energiatilojen vaihtuminen on aidon vuorovaikutuksen ja systeemien evolutiivisen kehityksen perusta. Energian siirtymässä systeemistä ympäristöön tai päinvastoin, energiatiheydet muuttuvat ja tapahtuu palautumatonta, historian omaavaa kehitystä. Uudessa tilassa systeemin hiukkaset asettuvat uuteen sulkeutuvaan konfiguraatioon. Näin siirtymätilasta toiseen merkitsee muutosta sekä paikan että ajan koordinaateissa. Ne eivät ole mitään aineesta tai energiasta riippumattomia tekijöitä, vaan osaseen kohdistuvat voimat määrittävät sen koordinaatit. Aistimme eivät kuitenkaan voi energiatiilojen muutoksia suoraan havaita.

Siirtymässä vapautuvan tai vastaanotetun energian määrä vastaa järjestelmän alku- ja lopputilojen välistä energiaerotusta. Määrä ei voi olla minkä suuruinen tahansa, koska tiloja ei ole mielivaltaisen tiheänä jatkumona. Liiketyhtälö (1) kuvaa energiavirrat pienimmän vaikutuksen mukaisesti vaikutusvakion  $\hbar$  suhteen kvantittuina. Stationaarisessa järjestelmässä radan tai tilan sulkeutuminen edellyttää, että liike-energian  $2K$  ja jaksonajan  $t$  tulo on oltava vakio. Bohrin mallin mukaisesti suljettu rata on modulaarinen siten, että kulmaliikemäärä  $L = 2Kt = n\hbar$  on vaikutusvakion monikerta (Planckin vakio  $h = 2\pi\hbar$ ). Kun tasapainossa olevan järjestelmän energiavirta ei ajan myötä muutu, vaikutusyhtälö saa muodon  $2Kt + Ut = 0$ , ts.  $px - xdU/dx = 0$ . Näin rakenteeseen sidottu energiavirta vain toistaa liikkeessään tiettyä jaksoa, jolloin aika on sen kohdalla ikään kuin ”pysähtynyt”. Systeemi säilyy muuttumattomana. Sen sijaan, kun systeemi kehittyy askelittain emittoiden tai absorboiden vaikutuskvantteja fotoneina, energiavirralla on nettovaikutus, joka muuttaa systeemiä. Kvantittunut energiavirta siirtää systeemiä askel askelta tilasta toiseen. Vaikutusyhtälö  $2Kt + Ut = Qt$  saa kommutaatiorelaationa tunnetun muodon  $px - xp = -i\hbar$ , jossa liikemääräoperaattori  $p = -i\hbar\partial/\partial x$ . Kehityksen kuluessa vapaa energia vähenee ja viimein häviää, kun systeemi saapuu stationaariseen tilaan.

Pysyvien rakenteiden syntyminen edellyttää siis liikkeen energian ja periodin tulo sopimista tasan johonkin potentiaaliin, jolloin seisova aalto energian virtana toistaa tiettyä sykliä interferoiden itsensä kanssa konstruktiiivisesti. Tällaiset tiettyyn potentiaaliin sopivat liikkeet, joilla on sopiva taajuus (aallonpituus), ovat Schrödingerin yhtälön ratkaisuja. Suljettujen systeemien ominaisarvot saadaan selville esim. etsimällä sellainen unitaarinen muunnos, jonka tuloksena vaihenopeus on nolla, mutta ei-säilyviä systeemejä ei voi esittää unitaarisilla matriiseilla, koska niillä ei ole normia. Integroituvuus on juuri se syy, miksi Eulerin ja Lagrangen muotoilema pienimmän vaikutuksen periaate vakiintui ja Maupertuis’n yleisempi, myös avoimia järjestelmiä kuvaava muoto sai väistyä. Perinteinen suljettuja systeemeitä koskeva laskettavuus ei kuitenkaan tavoita tilanteita, joissa radat ympäristön vaikutuksesta avautuvat ja energiaa virtaa minimiperiaatteen mukaisesti ympäristöön tai ympäristöstä rakenteeseen.

Siirtymä, jossa järjestelmästä vapautuu tai siihen sitoutuu energiaa, on termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti edellytys sille, että yksi järjestelmän tila voidaan erottaa toisesta tilasta. Tällaista siirtymää on tapana kuvata ei-kommutoivan algebran avulla, ts. suuntaa ilmaisevin laskusäännöin. Kun energian virtausuunta ilmenee joko vaikutusvakion suuruisena absorptiona tai emissiona, tulo  $px$  ei ole yhtä suuri kuin  $xp$ . Tämä energiavirtauksia tarkasteltaessa luonnollinen ajatus paikan ja liikemäärän, tai vastaavasti ajan ja energian, ei-kommutoisesta liittyy kvanttimekaniikassa Heisenbergin epätarkkuusperiaatteeseen ja Bohrin komplementaarisuuteen toimien perusteluna syväisille pohdinnoille objektien luonteesta ja eri ominaisuuksien yhtäaikaisesta olemassaolosta. Vaikka asiaa voi ajatella yksinkertaisesti esimerkiksi ylämäkeen tai alamäkeen kulkevana energiavirtoina, perinteisessä hiukkasmekaniikassa todellisuuskuvassa syntyy käsitteellisiä ongelmia, koska siinä ei tunnusteta kappaleiden sisäisiä tilasiirtymiä tai mitään laadullista muutosta.

Tilasiirtymien lisäksi energiavirtauskuvailu selvittää kvanttimekaanisten korrelaatioiden

luonnetta. Korrelaatiot eivät liity energiatilan muutoksiin, todennäköisyyteen tai entropiaan, vaan ne koskevat stationaarisia järjestelmiä, joiden energiasisältö on vakio. Korrelaatio, jota kuvataan vaiheella, heijastaa suljetun systeemin (tunnistamatonta) sisäistä seisovien aaltojen dynamiikkaa. Jaksonajan kuluessa järjestelmä liikkuu tasaisesti vakiovaihenopeudella  $d\varphi/dt = \omega$  konfiguraatiosta toiseen. Keskinäisistä vaihe-eroista syntyy interferenssiä, muttei tilamuutoksia, koska seisovien aaltojen energiasisältö säilyy.

### Havainto energianvirtaustapahtumana

Kvanttimekaniikassa havaintoon liittyy käsitteellisiä ongelmia. Pohjimmiltaan ne aiheutunevat siitä, että teoria rajoittuu kuvaamaan stationaarisia systeemejä, kun taas havainto on kehitystapahtuma siis tilamuutos, jossa energia virtaa kohteen ja havainnoitsijan välillä. Sen seurauksena molempien tilat muuttuvat. Esimerkiksi paljon keskustelua herättäneessä EPR-tilanteessa kahden hajoamistapahtumassa syntyneen hiukkasen keskinäinen korrelaatio säilyy, kun systeemiä ei häiritä. Havainnon myötä toisen fotonin polarisaatio eli vaihe määritetään suhteessa mittalaitteeseen, jolloin säilymlakien nojalla saadaan selville myös hajoamistapahtumassa syntyneen toisen, vielä havaitsemattoman fotonin vaihe. Tähän ei liity mitään mystistä ”kaukovaikutusta”, koska fotonien välillä ei tapahdu energian siirtoa. Näennäinen ongelma seuraa siitä, että jo vaiheen (joka usein erheellisesti sekoitetaan tilaan) määrittäminen edellyttää verrokin, joko mittalaitteen tai toisen fotonin. Kun havainnoitsija on sidottu kokeuksiinsa, joita hän saa vuorovaikutuksistaan ympäristönsä kanssa, hän ei esimerkiksi voi erottaa sellaista tilaa, jossa hajoamista ei ole vielä tapahtunut, siitä tilasta, jossa hajoamistuotteet etenevät vastakkaisiin suuntiin vastakkaisin polarisaation, mutta kumpaakaan ei vielä havaittu. On siis mahdotonta sanoa mitään selaisesta, minkä kanssa ei mitenkään vuorovaikuteta. Ja toisaalta vuorovaikutussuhde väistämättä muuttaa myös kohdettaan.

Mittausongelmaa on pidetty ehkä vaikeimpana kvanttimekaniikkaan liittyvistä ongelmista. Jos systeemillä on tietty todennäköisyys tulla havaituksi tilassa  $\psi(1)$  ja tietty todennäköisyys tulla havaituksi toisessa tilassa  $\psi(2)$ , sanotaan yleensä, että systeemi on ennen mitausta ns. superpositiotilassa. Silloin ajatellaan, että molemmat vaihtoehdot ovat tietyllä tavalla sekoittuneena yhtä aikaa olemassa, kunnes tuo superpositiotila mittauksen tuloksena romahtaa tai redusoituu jompaankumpaan reaalisesti havaittavissa olevista tiloista. Avoimien järjestelmien tilastollinen mekaniikka ei tarvitse abstraktia superpositiotilan käsitettä. Energialtaan vakioinen järjestelmä on kullakin hetkellä yhdessä ja vain yhdessä tilassa, ja mittauksen tuloksena se päättyy uuteen tilaan. Tutkittavan järjestelmän energiatilaa ja vaihetta, jossa systeemin osaset tilan sisällä ovat, ei luonnollisesti yleistä tunneta. Havainnoitsija ei voi sanoa kohteen energiasta tai liikkeistä mitään, ennen kuin on vuorovaikuttanut sen kanssa. Vuorovaikutus poikkeuttaa paitsi kohteen myös havainnoitsijan itsensä tilasta toiseen. Se mihin tilaan havainto johtaa, riippuu kohteen ja mittalaitteen tilojen energiaeroista sekä myös niiden liikkeiden keskinäisestä vaihe-erosta  $\Delta\varphi$  yhtälön 1 mukaisesti. Jos tuo vaihe-ero on satunnainen, saadaan satunnainen jakauma. Suuri järjestelmä ei havainnosta juuri hievahda, mutta pienessä systeemissä tilan muutos voi olla hypäyksenomainen, kun energiaa siirtyy sistemistä toiseen. Pieni systeemi voi myös havainnoinnin seurauksena tuhoutua täysin, kuten käy mittalaitteeseen absorboituvalle fotonille.

Havainto energiansiirtoprosessina ei siis pelkästään paljasta maailmassa objektiivisesti olevaa tilannetta riippumattomalle ulkopuoliselle havaittajalle, kuten klassisesti on ajateltu, vaan se myös muuttaa tilannetta suuntaamalla energiovirtoja uudella tavalla. Niels Bohrin sanoin: ihminen ei ole pelkästään katselija vaan myös näyttelijä elämän näyttämöllä. Toisin kuin klassisen fysiikan pohjalta yleensä oletettiin, luonnonlait eivät edellytä, että kaikki tapahtumat ihmisen toimintaa myöten olisivat ennalta määrättyä. Kun järjestelmät eivät ole suljettuja, maa-

ilmassa on tilaa systeemien väliselle vuorovaikutukselle ja kehitykselle. Vaikka todellisuus on lainalainen, pienimpiä muotojaan myöten organisoituvaa energeettinen kokonaisuus, sen muotoutuminen ei noudata varmuudella ennustettavaa determinististä kaavaa. Vaikka täysin suljettujen systeemien käytös olisi laskettavissa, ihminen ei voi tietää niistä mitään. Tuntemamme todelliset systeemit kehittyvät yhteydessä ympäristöönsä, ja vuorovaikutuksen myötä ne enemmän tai vähemmän jakavat samaa energiaa. Epälineaariset ja jopa kaoottiset radat voivat johtaa uusiin järjestelmiin, joissa voi toteutua uudenlaisia tiloja. Emergenssistä puhuttaessa ympäristön vaikutusta, siis sieltä absorboituvaa energiaa, ei yleensä ole riittävästi huomioitu.

### Kohti uutta maailmankuvaa

Luonnontieteen pioneirit osoittivat uuden ajan alussa, että suljettujen systeemien liike on ennakoitavaa. Hiukkaset voidaan tietyllä hetkellä löytää tietyistä paikasta. Kellokoneistosta tuli maailman metafora ja kaikki tutkittavat ilmiöt on pitkään pyritty redusoimaan lainalaisesti käyttäytyviin, säilyviin perusosasiin, vaikka atomistinen, mekanistinen tarkastelutapa ei voikaan tavoittaa muutosta, organismien kehitystä tai ihmisen tietoista toimintaa, kuten jo Platon ja Aristoteles antiikin atomisteja arvostellessa totesivat. Fysiikassa hiukkasmekanistisen todellisuuskäsityksen rajoihin törmättiin kvanttimekaniikan myötä, kun esim. aaltohiukkasdualismia, epälokaalisuutta tai mittaamiseen liittyvää tilan muuttumista ei voitu perusolettamusten pohjalta luontevasti selittää.

Kun todellisuus ymmärretään termodynamiikan toista pääsääntöä soveltaen erilaisten energiatiheyksien ja tilojen muodostamaksi kehittyväksi maisemaksi, monet peruskäsitteet valottuvat uudella tavalla. Energiasta tulee reaalin tekijä, joka sitoo kaikki todellisuuden osatekijät yhteen. Todellisuus on perimmältään yksi kehittyvä kokonaisuus, joka voi ehtojensa puitteissa toteuttaa monia toisistaan poikkeavia teitä. Virratessaan tilasta toiseen energia voi matkallaan kohti minimiä eriytyä

erilaisiin polkuihin ja tasapainotiloihin, joissa myös pysyvämmät, ihmiselle havaittavat suljetut rakenteet toteutuvat. Ratojen avautuminen mahdollistaa myös kompleksisten, epälineaaristen systeemien kehittymisen, kun energiavirratt luonnollisesti ”valitsevat” nopeimmat mahdolliset reitit löytääkseen (suhteellisen) tasapaino-aseman. Luonto on tarkasti säännönmukainen, mutta edes Laplacen demoni ei voisi ennakoita siihen sisältyviä lukemattomia polkuja ja kehitysmahdollisuuksia. Muutos ja sisäkkäisten yhä mutkikkaammaksi eriytyvien rakenteiden synty kuuluvat lähtökohtaisesti todellisuuteen.

Kvanttimekaniikan tulkintakeskustelujen suurin kompastuskivi on ollut uuden tilakäsitteen ja aaltofunktion luonteen ymmärtäminen, kun systeemien tilaa ei enää voida ajatella pelkästään hiukkasten paikkana aika-avaruudessa. Energia-tarkastelussa aaltofunktio saa selkeän tulkinnan ja merkityksen, kun se liitetään energiatiheyteen, joka kertoo myös tilan todennäköisyyden. Systemi ei ole mikään ympäristöstään riippumaton tekijä, vaan perimmältään kokonaisuuden kehitys määrittää niin kappaleiden rakenteen kuin niiden koordinaatit. Myös tilan ja vaiheen käsitteet selkiytyvät, kun jokainen stationaarinen järjestelmä ymmärretään säilyväksi rakenteeksi, joka koostuu osastensa isoenergisistä konfiguraatioista vaihe-eroineen. Stationaariset systeemit on luontevaa tulkita erilliseksi entiteetiksi, vaikka vuorovaikutustilanteissa varsinkin pienten kohteiden tarkka rajaaminen voi olla ongelmallista. Rajaamisen vaikeus liittyy uuteen erotteluun kahdenlaisen liikkeen välillä: on olemassa sekä energian säilyttävää, tietyssä stationaarisessa tilassa toistuvaa liikettä että energialtaan muuttavaa, tilasta toiseen tapahtuvaa kehitystä. Ensimmäinen liike on ennustettavaa ja determinististä, jälkimmäinen on ei-determinististä, mutta tilastollisesti ennakoitavaa, kun energiaerot pyrkivät tasoittumaan mahdollisimman nopeasti. Energian muutokseen perustuva liike mahdollistaa systeemien todellisen kehittymisen.

Energiavirtojen tarkastelu on pohjimmiltaan aaltokuvailua, vaikka myös hiukkaset kuuluvat luonnollisina rakenteina todellisuuteen. Ne voi-

daan selittää stabiileina, seisovina aaltolina, joita syntyy sopivissa tasapainotiloissa. Mitään todellista aalto–hiukkas-dualismia ei tarvitse olettaa, eikä myöskään kaukovaikutusta. Interferenssiin, superpositioon ja epälokaalisuuteen liittyvät käsitteelliset vaikeudet poistuvat, kun erotetaan toisistaan varsinainen tilanmuutos, jossa energia muuttuu, ja vaihemuutos, jossa tarkastellaan vain systeemin osasten keskinäisiä vaihe-eroja. Osa systeemien ominaisuuksista voidaan liittää niiden tiloihin, joiden muutosten kautta ne ovat havaittavissa, mutta myös vaihe-erot ovat todellisuuden piirteiden hahmottamisessa tärkeitä. Todellinen maailmassa vallitsevia asiantiloja muuttava syy–seuraus-suhde edellyttää aina energian siirtoa, mutta vaiheiden korrelaatio on eri asia. Vaiheet näyttäisivät liittyvän kullakin hetkellä vallitseviin asiantiloihin itseensä ja ne (so. tilan sisäiset epälokaalit yhteydet) säilyvät, kunhan systeemin osasia ei mitenkään häiritä. Vaihe-eroihin liittyvät ominaisuudet ovat luonteeltaan suhteellisia. Ne realisoituvat vuorovaikutussuhteessa, kuten mittauksessa, jossa siirtyvän energiavirran määrä riippuu myös siitä, missä keskinäisessä vaiheessa vastaanotin ja lähtetin kytkeytyvät toisiinsa.

Klassisen fysiikan kontekstissa havaitsijan oletettiin olevan maailmasta syrjässä. Aineen maailma noudatti omia välttämättömiä lakeja ja hengen maailma omiaan, kuten Descartes dualisminsa kiteytti. Ihmisen suhteellinen vapaus tai hänen vaikutuksensa todellisuuteen muodostui filosofiseksi ongelmaksi, joka konkretisoitui myös fysiikassa kvanttimekaniikan mittausedgelman myötä. Monet kvanttimekaniikan tulkitsijat ovat etsineet monistista ratkaisua olettaen todellisuuden perustan jollakin tavoin psykofyysiseksi. Energian perimmäinen luonne on filosofisesti vaikea kysymys, mutta joka tapauksessa se on materiaa toimivampi käsite todellisuuden perustan hahmottamiseen. Näkyviä systeemejä ja niiden tiloja määrittävänä abstraktina ”taustatekijänä” se on jotakin paljon enemmän kuin vain niiden olioiden ominaisuus, joihin se kulloinkin liittyy. Kun systeemin ja ympäristön energiatheydet määrittävät kaikkea tapahtumista, todellisuus ei ole palautetta-

vissa pelkästään yksittäisiin osasiin tai rakennettavissa niistä. Näkemys osan ja kokonaisuuden suhteesta muuttuu, kuten myös käsitys niiden erillisyydestä tai suvereenisuuden asteesta.

Ajatus systeemien osittaisesta avoimuudesta ja energeettisestä vuorovaikutuksesta antaa mahdollisuuden ymmärtää paremmin myös ihmisen asemaa ja vaikutusta kokonaisuudessa.

Ihminen kuuluu todellisuuteen yhtenä (sisäisesti äärimmäisen mutkikkaana) järjestelmänä muiden joukossa. Hän ei välittömästi tunne muita systeemejä, mutta voi vuorovaikuttaa niiden kanssa kokonaisuuden sallimissa puitteissa. Jokainen toimenpide aiheuttaa muutoksen paitsi kohteessa myös ihmisessä itsessään. Irreversibilin historian myötä ihmisen vastuu toimistaan korostuu, vaikka kokonaisuuden osatekijänä hän ei voikaan ympäristöönsä suvereenisti hallita. Kvanttimekaniikan mittaustilanteen kokonaisvaltaisuutta pohtiessaan Niels Bohr korosti, että jopa subjektin ja objektin erottaminen toisistaan on pikemminkin tilannesidonnainen tarkoituksenmukaisuuskysymys kuin ilmentää luonnon perimmäistä ontologista jakautumistapaa.<sup>4</sup> Myös kompleksisten systeemien tutkimuksessa on havaittu, että tällaisten systeemien rajoja on tyypillisesti vaikea määrittää. Viime kädessä havaitsijan on itse tehtävä haluamansa raja.

Käsitys energiasta jonkinlaisena loputtomiin virtaavana ja vuorovaikutusten kautta muotoaan muuttavana, mutta määrältään säilyvänä perustanssina, on luontevasti yhdistettävissä paitsi kvanttimekaniikkaan myös epälineaarisia, kompleksisia systeemeitä koskevaan tutkimukseen. Tämä viime vuosikymmeninä kaaosteorian ja kaukana tasapainoasemasta olevien itseorganisoiduvien systeemien tutkimuksen myötä nopeasti kehittynyt lähestymistapa voi avata paljon moniulotteisemman kuvan todellisuudesta kuin nyt jo auttamattomasti vanhentunut käsitys hiukkasmeکانisesta kellokoneistomaailmasta. Kun systeemin ja ympäristön energiavir-

4 Niels Bohr korosti myös systeemien avoimuutta sekä ihmisen aktiivista roolia ja uudenlaista osallisuutta mittaustilanteessa. Ks. Kallio-Tamminen 2006 tai 2008.

rat voivat kompleksisissa systeemeissä ”ruokkia toisiaan”, niiden kautta voidaan mallintaa myös sellaisia monisyisiä biologisia ja sosiaalisia ilmiöitä, joita fysiikan perinteisesti tutkimat yksinkertaiset suljetut systeemit eivät tavoita.

Kompleksisten systeemien kuvailussa käytettävä matematiikka ei noudata superpositioperiaatetta. Epälineaariset, enemmän tai vähemmän avoimet, varioivat monitasoiset systeemit voivat myös koostua useista kompleksisista osasysteemeistä. Osasten vuorovaikutuksen tuloksena voi tällöin ilmentyä sellaisia korkeamman tason ominaisuuksia, jotka eivät ole mitenkään ilmeisiä osasten ominaisuuksia tarkastelemalla tai niistä redusoitavissa. Kompleksit systeemit voivat myös muuttua ajan myötä, jolloin niihin tyypillisesti liittyy historia, joka vaikuttaa niin systeemin nykyiseen tilaan kuin sen kehitykseen. Myös vuorovaikutukset ovat erilaisia kuin yksinkertaisissa lineaarisissa systeemeissä, joissa vaikutus on suoraan verrannollinen syyhyn. Kompleksissa systeemissä pieni syy voi tuottaa suuren vaikutuksen tai päinvastoin. Suhteisiin voi myös sisältyä palautesilmukoita (*feedback-loop*), jolloin systeemin kehitys automaattisesti huomioi ympäristön tilan. Ilmeisesti suurin osa havaitsemistamme fysikaalisista, biologisista ja sosiaalisista systeemeistä on pikemminkin komplekseja kuin yksinkertaisia.

Tieto siitä, että maailma ei ole ennustettava kellokoneisto voi sekä kärjistää että oikein ymmärrettynä myös vähentää luonnontieteiden ja ihmistieteiden välistä perinteistä vastakkainasettelua. Ihmistieteissä on usein syystäkin kartettu kaikenkattavaa luonnontieteellistä

lähestymistapaa, joka näihin asti on yleensä tarkoittanut yksiulotteista mekanistista reduktionismia. Silti perustavista lähtöolettamuksista voidaan vapautua vain niiden falsifoinnin myötä. Ilman tarkempaa tutkimusta käsitys todellisuuden rakenteiden lähes loputtomasta rikkaudesta ja monimutkaisista riippuvuussuhteista, joita ihminen ei pysty totaalisesti hallitsemaan, olisi jäänyt uskonvaraiseksi asiaksi.

Lisääntyvä tieto lisää ymmärrystä todellisuuden luonteesta antaen mahdollisuuksia yhä uusiin sovellutuksiin. Silti on muistettava, että luonto itsessään on jotakin paljon syvempää ja todellisempaa kuin siitä tekemämme parhaimmista kuvauksista. Se on perusta, historia ja tulevaisuus, joka määrittää ihmisen kaikki mahdollisuudet – ei niinkään rajaamalla kuin avaamalla eteemme yhä uusia horisontteja. Sellaisia sisältöjä ja ajattelutapoja, joita kukin on kykenevä vastaanottamaan.

## Lähteet

- Annala Arto (2009) *Space, Time and Machines*. <http://arxiv.org/abs/0910.2629>
- Kaila V. ja Annala A. (2008) Natural selection for least action. *Proc. R. Soc. A.* 464, 3055–3070.
- Kallio-Tamminen Tarja (2006) *Kvanttilainen todellisuus*. Yliopistopaino, Helsinki.
- Kallio-Tamminen Tarja (2008) *Reality Revisited, From a Clockwork to an Evolving Quantum World*. VDM Verlag Dr Müller, Saarbrücken.
- Sharma V. ja Annala A. (2007) Natural process – Natural selection. *Biophys. Chem.* 127, 123–128.
- Tuisku P., Pernu T.K. ja Annala A. (2009) In the light of time. *Proc. R. Soc. A.* 465, 1173–1198.

**Kirjoittaja on filosofian tohtori.**