

Atomistisen ajattelun vastustamaton viehätys

Yrjö Haila

Onko atomistisen selittämisen pätevyysalue ylitetty soveltamalla atomistista ajattelutapaa sellaiseen mihin se ei sovellu? Onko atomismia sovellettu niin ponnekkaasti, että on perusteltua puhua harharetkestä?

Atomistinen ajattelu ei ole olemuksellinen kategoria. Se ei siis ole asia, joka meidän tulisi "hylätä" tai "hyväksyä". Atomistisen ajattelun lähtökohdaksi on se nykyisin itsestään selvä seikka, että aine on jaettavissa atomaarisiin perusosiin ja että erilaisten aineiden ominaisuudet määräytyvät erilaisten perusosien erilaisina yhdistelminä. Atomistinen ajattelu ei kuitenkaan pelkisty tähän lähtökohdaansa. Ymmärrän sen selittämisen yleiseksi tavaksi eli heuristiikaksi.

Olenainen kysymys on, millaisen heuristiikan atomismi muodostaa. Tätäkin kysymystä on kuitenkin syytä tarkentaa. En laisinkaan aio väittää, että atomistinen selittäminen "sinänsä" olisi hyvästä taikka pahasta. Aion jäljempänä sen sijaan selvittää atomistisen selittämisen erilaisia perinteitä ja niiden pätevyysalueita [1].

Teemaan "tutkimuksen harharetket" atomistisen ajattelun kytkee seuraava kysymys: Onko atomistisen selittämisen pätevyysalue ylitetty soveltamalla atomistista ajattelutapaa sellaiseen mihin se ei sovellu? Onko atomismia sovellettu niin ponnekkaasti, että on perusteltua puhua harharetkestä?

Atomismin kerrostumia

Jotta saisimme käsityksen siitä, miten atomismi on toiminut ajattelun ja selittämisen heuristiikkana, esitän kolme esimerkkiä eri aikakausilta.

Demokritoksen "atomioppi"

Diogenes Laertios kuvaa Demokritoksen "atomioppia" seuraavasti [2]:

"Hänen näkemyksensä ovat seuraavat. Kaikkeuden perustoja ovat atomit ja tyhjä tila, ja kaikki muu on olemassa vain ihmisten uskomuksissa. Maailmoja on rajattomasti, ja ne ovat syntyviä ja häviäviä. Mikään ei synny siitä, mitä ei ole, eikä häviä siihen, mitä ei ole. Atomeja on kooltaan ja lukumäärältään äärettömästi, ja ne kulkeutuvat kaikkeudessa pyörteenä ja synnyttävät siten kaikki yhdistelmät, tulen, veden, ilman ja maan. Nämäkin ovat nimittäin tiettyjen atomien järjestymiä. ..."

"Kaikki tapahtuu välttämättömyyden mukaisesti. Pyörre on kaikkien asioiden syntymisen syy, ja sitä hän kutsuu välttämättömyydeksi. ... Kvaliteetit ovat olemassa tavan mukaan, mutta luonnon mukaan olemassa ovat vain atomit ja tyhjä tila. Tässä olivat hänen näkemyksensä."

Kuten usein on todettu, Demokritoksen atomismilla ei ollut kreikkalaiseen filosofiaan juuri vaikutusta, mutta hänet on myöhemmin aikoina otettu toistuvasti esiin materialistisen ajattelun edelläkävijänä. "Atomismi" on niin ollen Demokritoksen kohdalla käypä termi vaikka sen soveltaminen on tarkkaan ottaen anakronismi. Demokritoksen atomismi on ajattelumuoto. Hänellä ei voinut olla vähäisintäkään aavistusta siitä, millainen aineen fysikaalinen rakenne on. Sen sijaan hän esitti uskaliaan arvauksen, että erilaisten aineiden toisistaan poikkeavat ominaisuudet on luontevinta ymmärtää olettamalla aineen olevan jaettavissa perusosiin, jotka voivat muodostaa erilaisia yhdistelmiä.

Klassisen fysiikan "atomistiikka"

K. V. Laurikainen esittää teoksessaan *Atomistiikan aatemaailma* [3] erinomaisen yhteenvedon klassisen mekaniikan atomismista. Laurikaisen mukaan atomistiikan perustana on Newtonin liikeyhtälö, joka "antaa kappaleen kiihtyvyyden, kun kappaleeseen vaikuttavat voimat tunnetaan. ... Newtonin liikeyhtälö on kappaleen liikettä koskeva differentiaaliyhtälö, joka tekee mahdolliseksi kappaleen liikkeen ennustamisen,

jos vain kappaleeseen vaikuttavat voimat ja kappaleen alkuperäinen liiketila tunnetaan” (s. 39).

Newtonin mekaniikan metodi loi pohjan mekaaniselle maailmankuvalle, jota Laurikainen täsmentää seuraavasti: Newtonin liikeyhtälön soveltaminen todellisia fysikaalisia systeemejä koskeviin laskutoimituksiin edellyttää yksinkertaistavia oletuksia. Tärkein on oletus, että yhtälöiden kuvaamat kappaleet ovat pistemäisiä. Massapisteen paikka voidaan esittää täsmällisesti kolmen koordinaatin tai vastaavasti paikkavektorin avulla. ”Klassisen mekaniikan järjestelmä alkaa massapisteen mekaniikalla. Nesteiden, kaasujen ja kiinteiden kappaleiden mekaniikka rakennetaan massapistemekaniikan pohjalle ajattelemaan tarkasteltu ainemäärä jaetuksi niin pieniin osiin, että kutakin osaa voidaan käsitellä massapisteenä” (s. 41). Paikan rinnalla liikkeen käsittelyssä tarvitaan ajan käsitettä. ”Käsitteet paikka ja aika ovat liikkeiden kuvailun ja siis mekaniikan perustana” (s. 42).

Mekaaninen maailmankuva sai olennaisesti lisää kantavuutta 1800-luvun kuluessa kun Newtonin liikeyhtälöitä kyettiin soveltamaan myös jatkuvasti jakautuneeseen aineeseen ja energiikka kyettiin yhdistämään samaan asetelmaan molekyylien lämpöliikkeenä. Tätä Laurikainen luonnehtii seuraavasti:

”Yleensä ... aineen olottuvuuksia ei voi jättää huomiotta. Tällöin puhutaan jatkuvasti jakautuneesta aineesta. Aineen tiheys ilmoittaa, millä tavalla massa on jakautunut tarkastellulle alueelle. ... Ainemäärän kokonaisliikkeet voidaan hallita massapistemekaniikan pohjalta ottamalla huomioon tiettyjä lisäehtoja, joiden avulla kuvataan aineen sisäistä rakennetta. ... Varsin yleiseksi muodostui ajatus, että lämpö oli näiden perushiukkasten (= atomien ja molekyylien) liikettä. 1800-luvun kuluessa tämä ajatus kehittyi askel askelelta täsmälliseksi tieteelliseksi oppirakennelmaksi, josta käytetään nimitystä *mekaaninen lämpöteoria*. Siitä muodostui mekaanisen luonnonkuvailun kaunein kruunu.” (s. 47-49).

Klassisen fysiikan atomismi on ajattelumuotona rinnasteinen Demokritoksen atomismiin, josta Laurikainen toteaa seuraavaa: ”Hänen oppiansa perusajatukset ovat yllättävän moderneja – tai ainakin viitisenkymmentä vuotta sitten fyysikkojen ajattelu kulki hämmästyttävässä määrin samoja latuja kuin Demokritoksen.” (s. 15). Rinnakkaisuus syntyy siitä, että newtonilainen massapistemekaniikka ei ollut sidoksissa mihinkään teoriaan aineen hienorakenteesta. Olennainen ero on tietenkin siinä, että mekaniikalla oli tukenaan eksaktit laskentamenetelmät. Matemaatiikan välityksellä mekaanisissa systeemeissä pä-

tevä materiaallinen kausaalisuus sai täsmällisen hahmon; eli kuten Laurikainen toteaa: ”Galilein ja Newtonin luomassa mekaniikan järjestelmässä ... on luotu ensimmäinen empiirisen todennettavuuden vaatimukset tyydyttävä teoria, jossa samalla vallitsee *kausalisuus* – ehdoton syy–vaikutus-suhde. *Differentiaaliyhtälö on tämän kausaliteetin tiivistymä*” (s. 40, korostukset alkutextissä).

Klassisessa mekaniikassa atomismista tuli *selittämisen periaate*. Atomismi sai 1800-luvun kuluessa tuekseen empiirisesti yhä vakuuttavammin todennetun näkemyksen, että aine rakentuu pienistä perusyksiköistä. Rakenneyksiköiden luokittelu sai systemaattisen perustan alkuaineiden jaksollisesta järjestelmästä. Atomien rakenteen selviäminen teki mahdolliseksi ymmärtää mekaniisesti eri alkuaineiden ominaisuuksien eroja. Vasta suhteellisuusteoria ja kvanttimekaniikka murensivat klassisen mekaanisen maailmankatsomuksen perustan.

Biologisten populaatioiden dynamiikka

1900-luvun alussa syntynyt populaatiodynamiikka tarjoaa esimerkin atomistisessa ajattelussa tapahtuneesta murroksesta. Populaatiodynamiikka on kytköksissä klassiseen mekaniikkaan sikäli, että tilastollinen mekaniikka oli sen keskeinen innoittaja. Mekaniikan vaikutus toteutui kuitenkin analogiapäätelyn välityksellä epäsuorasti. Populaatiodynamiikkaan sovellettuna atomistisen ajattelun heuristiikka muuttui. Käytän seuraavassa muutoksen luonnehtimiseksi hyväkseni Alfred Lotkan teosta *Elements of Physical Biology* [4].

Lotkan varsinainen ala oli fysikaalinen kemia. Hän pyrki esittämään teoksessaan kattavan yhteenvedon elollisten prosessien kemiallisesta dynamiikasta molekyylien tasolta fysiologiaan, ekologiin vuorovaikutuksiin ja biosfäärin rakenteeseen. Teos on metodologisesti tavattoman mielenkiintoinen osoittaessaan yksityiskohtaisesti, miten 1800-luvun tilastollisen mekaniikan homogeenisia systeemejä kuvaavia malleja voidaan muuntaa kuvaamaan rakenteellisesti erilaistuneita elollisia systeemejä.

Ensiksi rakenteistuneen systeemin luonnehdinta:

”Systeemi voi olla sellainen, että tietty aine tai aineiden kompleksi kantaa mukanaan omaa välitöntä ympäristöään. (s. 14) ... Sellaisen systeemin kemiallinen dynamiikka, toisin sanoen lait jotka määräävät aineen jakautumisen sen lukuisten komponenttien kesken, voi ilmeisesti olla luonteeltaan perustavasti erilaista kuin

tavanomaisen rakenteettoman systeemin dynamiikka. ... Erityisen edullisessa asemassa ovat ne rakenteet, jotka ovat sopeutuneet kanavoimaan tarjolla olevan vapaan energian siten, että niiden kasvun edellyttämän ympäristön jatkuvuus tulee turvatuksi.” (s. 15).

Tämän perustalta Lotka esittää seuraavan biologisen evoluution luonnetta koskevan oletuksen:

”Edellä kuvatun kaltaisen rakenteistuneen systeemin kemiallisen dynamiikan lait ovat juuri ne lait, tai vähintäänkin tärkeä osa niistä laeista, jotka hallitsevat elävistä organismeista muodostuneen systeemin evoluutiota. (s. 16)... Evoluutio on peruuttamattoman muutoksen alaisen systeemin historia. ... Evoluution laki on tässä mielessä termodynamiikan toinen pääsääntö.” (s. 26).

Lotka oli kuitenkin hyvin perillä siitä, että termodynamiikan lait ovat negatiivisia periaatteita: ”Ne kertovat meille mitä me emme voi tehdä; ne eivät anna mitään takeita siitä, mitä me *voimme* tehdä energiankäytön tehokkuusehdot huomioiden ottaen.” (s. 327). Toisin sanoen, joskin toisesta pääsäännöstä voidaan johtaa dissipatiivisten prosessien palautumattomuus (esimerkiksi entropian lisääntyminen, diffuusio, sekä aineiden homogenisoituminen), niistä ei voida johtaa elämän organisoitumisen periaatteita. Elämän organisoitumisen ymmärtämiseksi on kyettävä kuvittelemaan rakennetta tuottavia termodynaamisia prosesseja.

Lotka sivuutti tämän ongelman toteamalla, että ”tarkastelun kohteena olevat systeemit ovat aivan liian monimutkaisia, jotta niihin voisi hedelmällisesti soveltaa termodynaamista päättelyä” (s. 39) [5]. Sen sijaan hän siirtyi tarkastelemaan organismien keskinäisten vuorovaikutusten tuottamaa dynamiikkaa soveltaen niihin analogian välityksellä tilastollista mekaniikkaa. Analogiansa ydinkohdan hän esitti seuraavasti:

”Vaikuttaa siis siltä, että tarvitaan täysin uudenlainen instrumentti, sellainen joka tarkastelee biologisen populaation yksiköitä samoin kuin vakiintunut tilastollinen mekaniikka tarkastelee molekyyliä, atomeja ja elektroneja; joka käsittelee sellaisia keskimääräisiä ominaisuuksia kuten populaation tiheys, populaatiopaine ja niin edelleen noudattaen samaa menetelmää, jolla termodynamiikka käsittelee kaasun tiheyden, kaasun paineen jne. keskimääräisiä vaikutuksia.” (s. 39-40) [6].

Tämän analogian perustalta Lotka kehitti populaatioiden vuorovaikutuksia kuvaavat yhtälöt, jotka nykyisin tunnetaan nimityksellä Lotka-Vol-

terra-mallit [7]. Lotka esitti mallit luvussa, jonka otsikko on ”Kinetiikan perusyhtälöt”. Hän lähti liikkeelle yhden populaation kasvun laista eli ns. logistisesta yhtälöstä, joka oli tunnettu 1800-luvun alkupuolelta lähtien ja jota oli sovellettu demografiaan jo usean vuosikymmenen ajan. Yhtälön avulla tutkittiin kvantitatiivisesti myös yksittäisten organismien kasvua sekä autokatalyyttisten kemiallisten prosessien kinetiikkaa. Logistiseen yhtälöön Lotka liitti erilaisten populaatioiden vuorovaikutussuhteet: peto-saalisuhteen sekä lajien välisen kilpailun, jolloin niihin tuli mukaan eksplisiittisesti toisen asteen termejä kuvaamaan lajien (siis mallien muuttujien) keskinäisiä vuorovaikutuksia. Mallit ovat näin ollen epälineaarisia.

Koska Lotka-Volterra-mallit perustuivat analogiaan, ne eivät ilman muuta siirtäneet mukanaan uudelle sovellusalueelle klassisen mekaniikan kausaalisuusolettamusta. Mallien olennainen piirre on, että ne kuvaavat populaatioiden runsausvaihteluja yksilöiden välisten vuorovaikutusten tuottamina keskiarvoina. Sekä Lotka että Volterra johtivat malleista dynaamisesti olennaisen kiinnostavia tuloksia kuten sen, että tietyillä ennakoehdoilla peto-saalis malli voi tuottaa vakaan populaatiosyklin.

Lotka-Volterra-mallien olennainen rakenteellinen ero tilastolliseen mekaniikkaan verrattuna on siinä, että populaatiodynamiikan tapahtumisen ”tila” on eksplisiittisesti niihin sisällytettyinä ympäristön kantokykyä kuvaavan parametrin välityksellä. Tämä vastaa sitä biologisten systeemien ominaisuutta, että tila ei ole absoluuttinen taustakäsite kuten klassisessa mekaniikassa.

Sama pätee aikaan. Kun tila ja aika liitetään parametreinä malleihin, niiden arvoja voidaan varioida. Parametrisointi voidaan toteuttaa hyvin monella eri tavalla; tämä on ollut populaatiodynamiikan teoreettisen tutkimuksen keskeinen kehityssuunta 1960-luvulta lähtien. Interaktiivisissa systeemeissä parametrit voivat jossakin systeemin vaihevaruuden osassa muuntua muuttujiksi. On esimerkiksi täysin luontevaa selvittää sitä, miten peto-saalis-interaktiot muuttuvat ”ajan funktiona” [8].

Atomismi on Lotka-Volterra-populaatiodynamiikassa *laskennan väline*. Populaatioiden vuorovaikutusten luonnetta spesifioimalla Lotka ja Volterra saivat homogeenisen tilan ikään kuin kietoutumaan itsensä ympärille. Mallien myöhempi kehitys on osoittanut ne dynaamisesti tavattoman rikkaiksi. Sen jälkeen kun automaattisen laskentatehon kasvu on tehnyt mahdolliseksi tutkia epälineaaristen systeemien

dynamiikkaa, Lotka–Volterra-malleista on tullut kaaos- ja kompleksisuustutkimuksen keskeisiä esimerkkitaupauksia.

Heuristiikka ja pätevyysalueen ongelma

Atomismi on ollut tieteellisessä ajattelussa merkittävä historiallinen saavutus, siitä ei voi vallita vähäisintäkään epäilystä. Ajatteluperiaatteena demokritolaisessa mielessä se merkitsi oivallusta, että erilaisten aineiden erot ovat selitettävissä mekanistisin perustein, selittämiseen ei tarvita olemuksellisia erotteluita.

Klassisen mekaniikan keskeinen abstraktio, massapiste, todelliseen maailmaan nähden kärkeä yksinkertaistus, teki mahdolliseksi laskea täsmällisesti kiinteiden kappaleiden kuten planeettojen ja tykinkuulien liikeratoja. Olennaisia uusia edistysaskeleita kyettiin ottamaan sitä mukaan kun aineen atomistisesta rakenteesta päästiin yksityiskohtaisesti perille.

Klassisen mekaniikan valtaisa menestyksellisyys johti kuitenkin siihen, että atomistisuus tulkittiin kaikkien ilmiöiden yleiseksi ominaispiirteeksi. (Mekaniikan menestyksellisyys ei tosin ollut ainoa syy, mutta palaan tähän kysymykseen kirjoituksen viimeisessä jaksossa). Atomismin yleistämisen voi pelkistää seuraaviksi olettamuksiksi:

- (1) Aineet, ilmiöt ja tapahtumakulut koostuvat atomaarisista perusyksiköistä, jotka voidaan luokitella keskenään identtisten yksiköiden muodostamiin luokkiin kuten eri alkuaineidien atomit.
- (2) Kausaalisuus toteutuu atomististen perusyksiköiden välityksellä. Se, mistä perusyksiköt saavat kausaalisen voimansa, ei tarvitse erityistä selitystä [9].
- (3) Yksilöjoukkojen ominaisuudet ovat hallittavissa keskiarvojen ja tilamuuttujien (kuten paine ja lämpötila) välityksellä.

Näiden väittämien kokonaisuutta kutsun atomistisen selittämisen heuristiikaksi. Selittämisen heuristiikka muodostuu niistä aineksista, joita pidetään itsestään selvästi a priori tieteellisen selittämisen edellytyksinä. Se käsittää oikean päättelyn säännöt mutta niiden lisäksi se käsittää olettamuksia, joiden perusteella selittämisen kohteena oleva ilmiö ylimalkaan voidaan selittää. Tällaisia olettamuksia on välttämätöntä tehdä, mutta ne jäävät usein artikuloimattomiksi [10].

Heuristiikka ja pätevyysalue liittyvät toisiinsa siksi, että ajattelulla on aina kohde; ”puhdasta” ajattelua esiintyy ainoastaan filosofien mielikuvituksessa. Heuristiikka kuljettaa mukanaan selittämisen perustaa koskevia ennako-olettamuksia ilmiöalueelta toiselle.

Tieteellisessä ajattelussa heuristiikka on tavallaan näkymätöntä siksi, että tutkimuskohdetta koskevat substantiiviset ennako-olettamukset muuntuvat metodologisiksi periaatteiksi. Tällaista klassisen mekaniikan kohdalla tapahtunutta muunnosprosessia ilmentää yllä siteeraamani K. V. Laurikaisen toteamus, että differentiaaliyhtälö on ”kausalisuuden tiivistymä”. Sen johdatukseksi hän erittelee differentiaali- ja integraalilaskennan roolia klassisessa mekaniikassa seuraavasti:

”Jotta mekaniikan järjestelmä soveltuisi mielivaltaisten liikkeiden kuvailuun, on sen perustaksi asetettava differentiaalilaki: on esitettävä yleinen laki siitä, miten kappaleen liike muuttuu ”äärettömän lyhyenä” aikavälinä, jolloin tämä laki antaa, uudistuvasti sovelletuna, liikkeen täydellisesti” (s. 39).

Kun differentiaaliyhtälö tulkitaan kausaalisuuden tiivistymäksi, yhtälö riittää kausaalisuuden tulkinnaksi. Kausaalisuuden mekanismia ja vaikutussuuntaa ei tarvitse tehdä ymmärrettäväksi: kausaalisuus vaikuttaa siinä muodossa, mihin yhtälö sen pukee [11].

Paradoksin taustalla on erikoislaatuinen hermeneuttinen kehä, joka syntyy kun systeemin kuvaamiseen ja selittämiseen käytetään samaa matemaattista formalismia. Tällöin formalismi sinänsä muuttuu selittämisen periaatteeksi.

Differentiaalilaskenta ei tietenkään ole ”olemuksellisesti” atomistinen, mutta ajatus liikkeen jakautumisesta äärettömän lyhyisiin aikaväleihin, joista voidaan uudistuvasti sovelletuna hahmottaa koko liike, on atomistinen.

Atomistisen selittämisen heuristiikka on pätevää vain, mikäli sitä sovelletaan ilmiöihin joiden suhteen sen ennako-olettamukset ovat mielekkäitä. Koska ennako-olettamukset perustuvat abstraktioihin (kuten Newtonin mekaniikan massapiste), ”todenmukaisuus” ei ole tässä yhteydessä mielekäs kriteeri. Olennaista on, että heuristiikan ennako-olettamusten mielekkyys kyetään perustelevaan itse selityksestä riippumattomalla tavalla. Esimerkiksi se, että planeetat on mielekästä redusoida mekaniikassa massapisteiksi, voidaan perustella gravitaatiolain nojalla.

Esitin edellä, että Lotka–Volterra-populaatiodynamiikka johti atomistisen heuristiikan muun-

tumiseen. Olennaista tässä on, että aika ja tila onnistuttiin kytkemään parametreinä populaatiodynamiikan kausaalisuus ei pelkisty populaatioiden yksilöihin, vaan ympäristö vaikuttaa populaatioiden yksilöihin ja niiden välisiin vuorovaikutuksiin. Malleissa ilmenevä kausaalisuus ei ole piilotettuna primitiivitermien alla, vaan sen mekanistista perustaa voidaan selvittää [12].

Atomistisen heuristiikan kolmas ominaispiirre, pitäytyminen populaatiotasoihin keskiarvoihin, on sen sijaan tuottanut Lotka–Volterra-populaatiodynamiikalle ongelmia. Kysymys on siitä, kuinka pienessä mittakaavassa ja millä tavoin tilan (ja vastaavasti ajan) strukturoituneisuus tulisi ottaa huomioon populaatiodynamiikan teoriassa. Ongelma on nykyisin hyvin intensiivisen tutkimuksen kohteena [13].

Harharetket?

Harharetkille ajaututaan, mikäli selittämisen heuristiikka sisältää sellaisia tutkimusaihetta määrittäviä ennako-oletuksia, jotka eivät ole päteviä. Atomistisen heuristiikan kohdalla tämä voi tarkoittaa seuraavaa:

- (1) Ilmiöt oletetaan atomaarisiksi, mutta ne eivät ole, sekä tämän korollaarina: kausaalisuuden oletetaan toteutuvan perusyksiköistä käsin, mutta se syntyy vuorovaikutuksista.
- (2) Makrotason ilmiöt tulkitaan populaatiotasojen keskiarvojen nojalla, mutta keskiarvot peittävät alleen merkityksellistä vaihtelua.

Keskeinen alue, jolla selittämisen atomistinen heuristiikka on johtanut suuriin vaikeuksiin, on atomistiseen geenikäsitteeseen perustuva näkemys biologisesta evoluutiosta. Tarina on pitkä ja mutkitteleva, sen yksityiskohtainen esittely on tässä yhteydessä täysin mahdotonta. Seuraavaa tiivis jäsennys [14]:

- (1) 'Geeni' omaksuttiin ominaisuuksien partikulaarista periytymistä kantavien yksiköiden nimitykseksi 1900-luvun alkuvuosina. Vähitellen vakiintui näkemys, että periytymistä hallitsee vastaavuus "yksi geeni – yksi ominaisuus"; 1940-luvulla tämä muuntui muotoon "yksi geeni – yksi proteiini". Evoluutiobiologian arvovaltaiset oppikirjat toistivat näkemystä 1980-luvulle asti. 'Geeni' on tämän näkemyksen mukaan ehdottomasti

kausalisesti primaari organismien ominaisuuksien suhteen.

- (2) Populaatiogenetiikan laskennalliset mallit kehittyivät yksi geeni – yksi ominaisuus -oletuksen perustalta 1920-luvulta lähtien. Mallit esittävät teoreettisia ennusteita siitä, miten populaatioiden geneettinen koostumus muuttuu luonnonvalinnan seurauksena sukupolvesta toiseen. Tilastollinen mekaniikka oli mallien keskeinen innoittaja [15].
- (3) Geenien biokemia saatiin selvitettyksi 1950-luvulla: DNA osoittautui periytyvyyttä välittäväksi makromolekyyliseksi, ja DNA:n rakenne ja kahdentumismekanismi kuvattiin ("kaksoiskierre"). DNA:n rakenteen selvittämiseen osallistunut Francis Crick muotoili molekyyliogenetiikan "keskeisdogmin", jonka mukaan informaatio välittyy DNA:sta proteiineihin mutta ei päinvastoin.
- (4) Geenistöön ryhdyttiin soveltamaan metaforisia nimityksiä, jotka rinnastavat sen rakennekaavioon (*blueprint*), lineaariseen ohjeistoon (*book of life*) tai tietokoneohjelmaan. Rinnastusten perustana on atomistinen näkemys informaation luonteesta [16]. Tällaisten metaforien välityksellä yleistyi näkemys, että kun tietyn organismin kuten ihmisyyksilön geenit tunnetaan, organismin ominaispiirteet voidaan täydellisesti ennustaa.
- (5) Yksilökehitys tulkittiin geenien mekaanisesti määräämäksi tapahtumakulukuksi, ja se hävisi epäkiinnostavana evoluutioteorian näköpiiristä.

Tämän atomistisen genetiikan on murentanut uudenlainen mekanistisen ymmärrys kolmesta periytyvyyden ja evoluution kannalta keskeisestä ilmiöstä.

Ensiksi, geenien ilmeneminen eli 'ekspresso' on osoittautunut monimutkaiseksi ja vuorovaikutteiseksi tapahtumakulukuksi, jossa geenien määrittämät ja geenien välittömän ympäristön määrittämät vaikutukset vuorottelevat. Perustavanlaatuisen tärkeä on se huomio, että organismien perimässä on tunnistettavia geenejä huomattavasti vähemmän kuin organismeissa on niiden elintoimintoja määrittäviä proteiineja – toisin sanoen, "sama" geeni tuottaa useita erilaisia proteiineja tilanteesta riippuen. Geenit ovat aktiivisia tai inaktiivisia eri tavoin organismin eri soluissa. Geenien aktivoitumisen mekanismien selvittämiseksi yksilökehityksen tutkimus on avainasemassa.

Toiseksi, on tullut ilmeiseksi, että geenien periytyminen ei ole ainoa mekanismi välittää informaatiota sukupolvesta toiseen (Jablonka & Lamb esittävät tästä erityisen selkeän yhteenvedon). Kromosomeissa olevan DNA:n lisäksi informaatiota välittävät erityisesti munasolun mutta myös siittiön rakenteelliset osat kuten keskeiset proteiinit sekä soluelimet ja niissä oleva DNA ja RNA. Myös geeniekspressioon vaikuttavat 'epigeneettiset' mekanismit voivat periytyä jälkeläisille. Edelleen informaatiota välittävät organismien muuttamat ympäristön rakenteet sekä oppiminen; ihmisen kohdalla erityisen merkityksellisiä ovat fyysiset rakenteet ja symboliset järjestelmät eli ns. toinen luonto.

Kolmanneksi, yksilökehityksen mekanismit mahdollistavat sen, että aikuistuneiden organismien ilmiäisissä huomattavasti yksilökohtaisista vaihteluista, josta käytetään teknistä nimitystä 'plastisuus' (West-Eberhardin teoksen keskeinen aihepiiri). Samaan lajiin kuuluvat yksilöt voivat erilaistua ilmiäisultaan ympäristössä ilmenevää vaihtelua systemaattisesti noudattaen vaikka ne olisivat geneettisesti samanlaisia. Populaatiossa valmiiksi olevan geneettisen muuntelun avulla ilmiäisun erot voivat assimiloitua geneettisesti eroiksi ikään kuin jälkikäteen. West-Eberhard toteaa, että sopeuttava evoluutio toteutuu ympäristöperäisen erilaistumisen assimilaation kautta paljon todennäköisemmin kuin satunnaisten mutaatioiden tuloksena.

On itse asiassa kyseenalaista, onko geenejä selvärajaisina yksikköinä ylimalkaan olemassa [17]. Tämä terminologinen kysymys ei kuitenkaan ole erityisen kiinnostava. Olennaisempaa on, että ymmärryksemme periytyksen mekanismeista sekä biologisen evoluution dynamiikasta on olennaisesti parantunut. Pelkistän tämän mekanistisen ymmärryksen vielä seuraavasti:

(1) Geenien ilmeneminen (ekspressio) toteutuu monimutkaisten vuorovaikutusten tuloksena, ja geenien ympäristö on näissä vuorovaikutuksissa osallisena olennaisena kausaalisenä tekijänä. Geenien ympäristö on hierarkkisesti rakentunut. Sen tasoja ovat: (a) kromosomin DNA-juosteeseen sitoutuneet proteiinit; (b) tuman proteiinit; (c) solun sisäinen ympäristö tuman ulkopuolella, missä proteiinisynteesi tapahtuu; (d) kudokset, jossa solu sijaitsee; (e) koko organismin sisäinen ympäristö, erityisesti hormonit; ja (f) organismin ulkoinen ympäristö. Geeniekspressiolla eri vaiheissa mitä moninaisimmat tekijät ovat kausaalisesti primaareja, ja mikä erityi-

sen tärkeää, geenit ja ympäristötekijät voivat vaikuttaa kausaalisesti saman molekyylibiologisen mekanismin välityksellä (West-Eberhard esittää tästä erittäin vakuuttavaan empiriseen aineistoon perustuvan yhteenvedon).

- (2) Geneettisten vaikutusten pleiotrooppisuus: geenit vaikuttavat useaan eri ominaisuuteen, ja organismien ominaisuudet ovat useiden geenien vaikutuksen alaisia. Geeniekspressiolla kompleksisuus on pleiotropian mekanistinen perusta.
- (3) Monisoluisten organismien ilmiäisuiset ominaisuudet (anatomia ja fysiologia) ovat modulaarisesti rakentuneita. Fysiologian ja anatomian "moduulit" integroituvat tietenkin yhteen koko organismin mittakaavassa, mutta modulaarisuus tekee anatomian nopean muuttumisen mahdolliseksi. Eri koirarotujen erilaistuminen on tästä hyvä osoitus.

Atomistinen, geenien kausaaliseen voimaan luotettava heuristiikka on evoluutioajattelussa toisinaan sanoen taakse jäänyttä aikaa. Tämän seikan innoittamina voisimme kysyä: Ajautuiko atomistiseen geenikäsitteeseen perustuva genetiikka aikoinaan harharetkelle? Mikäli se ajautui, milloin harharetki alkoi?

Tällaiset kysymykset ovat kuitenkin aivan liian yleisluonteisia vastattaviksi. Menneiden vuosikymmenten geneetikot toimivat omissa ympäristöissään omilla historiallisilla ehdoillaan. Päätelmät ja erityisesti päättelyn heuristiikat, jotka nykypäivän näkökulmasta ovat ilmiäisvään virheellisiä, ovat hyvinkin voineet olla aikanaan täysin perusteltuja.

Harharetkistä puhuminen on selvästi oikeutettua niissä tapauksissa, missä tutkimusta ovat ohjanneet poliittis-ideologiset vaikuttimet. Natsi-Saksan rotuoppi ja Neuvostoliiton lisenkolainen genetiikka ovat esimerkkejä. Tieteen "sisäisten" argumenttien ja poliittis-ideologisten "ulkoisten" tavoitteiden raja on kuitenkin erinomaisen häilyvä. Kutakuinkin kaikki populaatiogenetiikan perustajat esimerkiksi uskoivat eugeniikkaan, ihmisen geneettiseen jalostamiseen, vaikkakin erilaisilta ideologis-poliittisilta perustoilta: J.B.S. Haldane oli kommunisti, Ronald Fisher taas äärikonservatiivi. Tutkimustulosten soveltamisen mahdolliset alat ovat osa selittämisen perustaan vaikuttavia tekijöitä.

Nykyhetken voimme kuitenkin soveltaa tiukempia kriteerejä. Kun atomistisen geenikäsitteksen empirinen perusta on murentunut, siihen nojautuva teoretisointi täyttää harharetken

tunnusmerkit. Asetelma on sikäli paradoksaalinen, että atomistinen genetiikka on saavuttanut kannatusta yhteiskuntatieteilijöiden ja psykologien keskuudessa juuri sillä hetkellä, kun sen mekanistinen perusta on todettu virheelliseksi.

Voimme kuitenkin varovasti soveltaa samantapaisia kriteerejä myös menneisyyteen päin. Voisimme ehkä arvioida, että atomistiseen heuristiikkaan turvautuneet tutkijat ovat ajautuneet harharetkille sellaisissa tilanteissa, joissa heille olisi ollut mahdollista ajatella toisin. Esimerkiksi tilanteissa, joissa olemassa olevia empiirisiä tuloksia on jätetty huomiotta. Evoluutioajattelun historiasta löytyy toisinajattelijoita, jotka oivalsivat eri syistä atomistisen genetiikan ongelmallisuuden. West-Eberhard osoittaa lukuisin esimerkein, että atomistiseen heuristiikkaan tukeutuneet teoretikot ovat leimanneet toisinajattelijoiden ajatukset epäpäteviksi, usein vastoin parempaa tietoaan.

Tieteellinen selittäminen ja ajattelun rutiinit

Selittämisen heuristiikan merkityksellä on oma mekanistinen perustansa siinä, että ajattelu on työtä. Kuten kaikki työntekeä, ajattelu edellyttää työvälineitä. Ja kuten kaikki työvälineet, myös ajattelun työvälineet johtavat rutinoitumiseen ja urautumiseen. Rutinoitumisen ja urautumisen vuoksi uudella tavoin ajattelemisen on vaikeaa. Erityisesti rutinoituminen vaikuttaa metodologiseen ajatteluun, jonka perustana on pitkän harjaantumisen tuloksena syntynyt tutkimusmetodien käytännöllinen hallinta. Kun yksi osa tutkimuskäytännössä muuttuu, muidenkin on muututtava.

Lotka–Volterra-populaatiodynamiikan kehitys on erityisen mielenkiintoinen esimerkki muun muassa siksi, että se osoittaa selittämisen heuristiikan uudistumisen pitkän aikajänteen. Empiria, mallit ja teoria ovat kehittyneet läheisessä keskinäisessä vuorovaikutuksessa.

Lotka–Volterra-esimerkin perusteella uskaltaudun esittämään seuraavanlaisen oletuksen: ehkä atomistisen heuristiikan rajoitteet on onnistuttu välttämään sellaisilla tutkimusaloilla, joilla sen perusteet on onnistuttu mekanistisesti tulkitsemaan uudelleen. Mekanistisella ymmärtämisellä tarkoitan tässä sitä, että atomistisen heuristiikan taustaolettamuksia on pyritty ymmärtämään selitysmallista riippumattomalla perusteella.

Populaatiodynamiikassa taustaolettamusten mekanistinen uudelleentulkinta on onnistunut, koska organismien ja niiden elinympäristön keskeisten piirteiden (muut organismit mukaan luettuina) vuorovaikutuksista on mahdollista kerätä havaintoja. Tätähän naturalistit ovat tehneet kautta aikojen. Populaatiogenetiikassa atomististen taustaolettamusten uudelleentulkinta on sen sijaan vasta alullaan. Luonteva selitys on, että geeniekspression mekanismien tutkimus on tullut mahdolliseksi vasta molekyyli-genetiikan viime vuosikymmeninä tapahtuneen edistymisen myötä.

Onko atomistisella ajattelulla ollut erityistä viehätysvoimaa? Kaikesta päättäen on ollut. Klassisen mekaniikan menestykset tekivät luontevaksi uskoa, että sen ajattelumalleja voi mielekkäästi soveltaa mille tahansa tutkimusaluelle [18]. Tämä pätee erityisesti siihen ajanjaksoon, jolloin klassinen mekaniikka oli vallitsevana fysiikassa, siis suunnilleen 1700–1800-lukuihin.

Viehätysvoimalla on kuitenkin myös yhteiskunnallinen taustansa. Sitä ei voi rajata erilleen tieteellisen ajattelun dynamiikasta, mutta olen sen jättänyt tässä kirjoituksessa sivuun kahdesta syystä: Ensiksi, koska aihe on liian laaja. Toiseksi, koska on olennaista korostaa, että tieteellisen selittämisen heuristiikat eivät redusoidu yhteiskunnallisiin tekijöihin kuten ideologiaan, politiikkaan tai sosiologiaan vaan ideologiset, poliittiset ja sosiologiset tekijät ovat vaikuttaneet eri tavoin eri aloihin eri aikakausina. Tämän kompleksin analyysi on mielekkäintä kohdennettujen tapaustutkimusten välityksellä. Darwinismi on hyvä kohde (ks. viite 15).

VIITTEET

- [1] Teorian pätevyysalue (engl. *domain*) viittaa siihen todellisuuden osa-alueeseen, johon kyseisen teorian voi olettaa soveltuvan. Pätevyysaluetta rajaavat ne ennako-oletukset, joiden perusteella tutkimuksen kohteena olevan ilmiön olennaiset piirteet on määritelty.
- [2] Diogenes Laertios: *Merkittävien filosofien elämät ja opit* (Summa, 2002).
- [3] WSOY, 1973.
- [4] Alkuteos 1924; julkaistu uudelleen otsikolla *Elements of Mathematical Biology* (Dover, 1956).
- [5] Lotka oli tässä tietenkin oikeassa; nykyisin tiedämme, että vasta Ilya Prigoginen käynnistämä dissipatiivisten systeemien termodynamiikan tutkimus on luonut edellytyksiä Lotkan mainitsemman ongelman selvittämiseksi.
- [6] Aivan kuten tilastollinen mekaniikka ei kysy, mistä atomit ja molekyylit ovat peräisin, Lotka sivuutti analogiansa avulla kysymyksen, mistä

erilaisiin populaatioihin lukeutuvat organismit ovat peräisin.

- [7] Italialainen monipuolinen matemaatikkonero Vito Volterra kehitti rakenteellisesti samanlaisia populaatioiden vuorovaikutuksia kuvaavia malleja samanaikaisesti. Myös Volterra käytti tilastollista mekaniikkaa analogiana malleja konstruoidessaan.
- [8] Klassisen mekaniikan jälkeisessä fysiikassa aika ja tila ovat problematisoituneet samassa mielessä, mutta suoranaiset vuorovaikutukset ovat olleet vähäisiä. Aihe on kuitenkin liian laaja tässä käsiteltäväksi.
- [9] Klassisen mekaniikan alkukaudella alkuperän ongelman ratkaisi tietysti usko Jumalan olemassaoloon. Newtonilaisen mekaniikan systematiikassa kappaleiden liikevoiman alkuperän ongelma oli piilotettuna systeemin primitiivitermiin, jota ei määritelty (vaihtoehtoisia primitiivejä olivat 'voima', 'massa' ja 'momentti'; ks. Max Jammer, *Concepts of Force*, Dover, 1999).
- [10] Samanlaisen "liberaalin" tulkinnan heuristiikasta esittää Chuck Dyke, *The Evolutionary Dynamics of Complex Systems* (Oxford UP, 1988).
- [11] Tähän liittyy se Thomas Kuhnin huomautus, että klassisen fysiikan matemaattisiin yhtälöihin perustuva selittäminen vastaa Aristoteleen "muodollisen syyn" käsitettä (*The Essential Tension*, U. Chicago Press, 1977).

- [12] Edellä esittämissäni lainauksissa Lotka korostaa ympäristön merkitystä rakenteistuneiden biologisten systeemien kemiallisessa dynamiikassa. Ne ilmentävät fysikaalisen kemistin intuitiota siitä, että elämän kemialliset prosessit toteutuvat strukturoituneessa ympäristössä, jota prosessit itse ylläpitävät.
- [13] Richard Solé & Jordi Bascompte, *Self-Organization in Complex Ecosystems* (Princeton UP, 2006).
- [14] Keskeisinä lähteinä olen käyttänyt kahta tuoretta atomistisen genetiikan kritiikkiä: Mary Jane West-Eberhard, *Developmental Plasticity and Evolution* (Oxford UP, 2003) ja Eva Jablonka & Marion Lamb, *Evolution in Four Dimensions* (MIT Press, 2005).
- [15] Darwinistisen evoluutioajattelun perusteellisen aatehistorian esittää David Depew & Bruce Weber, *Darwinism Evolving. Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection* (MIT Press, 1995).
- [16] Ks. Lily Kay, *Who Wrote the Book of Life. A History of the Genetic Code* (Stanford UP, 2000).
- [17] Helen Pearson, "What is a Gene?", *Nature* 441, 399-401 (2006).
- [18] Kuten Alexander Koyré huomauttaa (*Newtonian Studies*, Harvard UP, 1965), Newtonia ei voi syyttää siitä, mitä hänen seuraajansa tekivät hänen teorioilleen.

Kirjoittaja on ympäristöpolitiikan professori Tampereen yliopistossa.