



Käyttäytyminen: Sisäisten ja ulkoisten tekijöiden erottaminen mielivaltaista

Yrjö Haila



Ymmärrän geenien ja ympäristön keskinäistä suhdetta koskevan ongelman seuraavasti: Miten yksilön elämänkaarta, eli hedelmöityneen munasolun kehitystä aikuiseksi yksilöksi määrittävät syy–seuraus-suhteet tulisi ymmärtää? Mikä on hedelmällinen tapa kuvata tätä kehityskulkua kausaalisesti määräytyneenä prosessina?



Ongelman pohdintaa hallitsee yleensä kiista jompaa kumpaa yksipuolisesti korostavien näkemysten kesken: ratkaiseva syy on joko organismin sisällä oleva geenistö tai organismin ulkopuolinen ympäristö. En ole kuitenkaan kiinnostunut tästä asetelmasta, koska molemmat äärikannat ovat ilmiselvästi puutteellisia. Tämä johtuu siitä, että sisäisten ja ulkoisten tekijöiden tiukka erottaminen toisistaan biologisissa systeemeissä on mielivaltaista. Nämä ovat avoimia sekä energian että materian suhteen, eli olennainen osa systeemien olemassaoloa selittävästä seikoista on aina niiden ulkopuolella, energian ja materian lähteillä. Systeemin rajauksessa nämä suljetaan ymmärrettävistä syistä ulkopuolelle. Esimerkiksi biosfääriä ylläpitää auringosta tuleva säteilyenergia, mutta ei ole järkevää sisällyttää aurinkoa biosfääriin osaksi. – Onko siis auringon säteily biosfääriin "viimekätinen syy"? Tällainen päätelmä voi vaikuttaa houkuttelevalta, mutta kannattaa olla varovainen: täsmälleen sama termodynaaminen asetelma kuin maapallolla pätee myös muilla planeetoilla, mutta niillä ei ole biosfääriä. Jos siis aurinko on biosfääriin "syy", niin miksi sama "syy" ei ole tuottanut biosfääriä muille planeetoille?



Edellinen asetelma osoittaa, että maapallon biosfääriin kehityshistorian kaltaisessa prosessissa syy–seuraus-suhteet eivät jäsenny selkeiden "riittävä syy"/ "välttämätön syy" - kategorioiden mukaan. Auringon tuottama voimakas ja kohtuullisen vakaa energiagradientti on tietenkin elämän kehityksen välttämätön reunaehto. Sen sijaan "riittäviä syitä" on mahdoton täsmentää ikään kuin ennalta annettuina, koska monet ratkaisevat tekijät ovat itsensä biosfääriin historian tuottamia (esimerkiksi ilmakehän happi). "Synn" käsitteen monimutkaistuminen onkin itse asiassa kaikkien oman historiansa kuluessa organisoituvien prosessien perustava piirre (Dyke 1988).



Asetelma antaa hyvän lähtökohdan biologisten organismien elämänkaaren tarkastelulle. Mutta ensiksi biologisen organismin elämänkaari on kyettävä täsmentämään tutkimuskohteeksi niin selkeästi, että tiedämme mistä puhumme ja voimme vertailun avulla tunnistaa eri kehityskaarien samankaltaisuudet ja eroavuudet. Miten yksilön elämänkaari voidaan määritellä "tieteellisenä lajina" (*scientific kind*, Ian Hacking 1991)?



Otan lähtökohdakseni 1900-luvun keskivaiheilla työskennelleen kehitysbiologi–evoluutiobiologi C. H. Waddingtonin käsitteen "kreodi" (*creode*). Termi kattaa organismin aikuistumiseen johtavan kehityskulun kaikkine siihen vaikuttavine geeni–toiminta systeemeineen sekä geenivaikutusten intensiivisyyttä muuntavine, toisiinsa kytkeytyvine kontrollijärjestelmineen (Waddington 1962, 45). Waddingtonin kreodia on usein havainnollistettu kuvalla pallosta, joka pyörii haarautuvien laaksojen halkomassa vuoristomaisemassa rinnettä alas. Vähäiset geenitoiminnan erot tai ympäristöstä tulevat häiriöt – siis satunnaiset tekijät – voivat ratkaista, kumman laakson kreodi "valitsee" kussakin risteyskohdassa, mutta valinnan tapahtuttua se jatkaa valituksi tullutta reittiä edelleen.



Kreodi -käsitteen merkittävä etu on, että se korostaa yksilönkehityksen kokonaisuutta, koko organismia, yksittäisten ominaisuuksien sijasta. Joskin "ominaisuus" on kohtuullisen selkeä käsite sovelletuna anatomisiin piirteisiin kuten nenän muotoon tai karvoituksen määrään, biologisesti kiinnostavampia esimerkiksi fysiologiaan ja käyttäytymiseen liittyviä piirteitä on vaikeaa tai jopa mahdotonta jäsentää toisistaan erottuviksi "ominaisuuksiksi".



Waddingtonin näkemys yksilönkehityksestä kreodina voidaan kiinnostavalla tavalla rinnastaa Aristoteleen käsitykseen yksilönkehityksestä potentiaalin toteutumisenä – tai pikemminkin toteutumisketjuna, jossa aiemmat toteutumat luovat uuden potentiaalin, joka taas toteutuu, jne.



Samankaltaisuus ei toki ole satunnainen: kuten mm. Marjorie Grene (1963) – yksi hienoimmista biologian filosofiista 1900-luvulla – on korostanut, Aristoteleen filosofiset näkemykset perustuivat monilta osin hänen biologisiin tutkimuksiinsa, ja toisaalta Aristoteles on antanut tärkeitä virikkeitä 1900-luvun teoreettiselle biologialle.

Mikä on kehityksen "ympäristö"?

Oletettavasti geenit ovat kreodin sisällä. Mutta mitä sisältyy geenin ympäristöön?

Tämä on huomattavasti monimutkaisempi kysymys kuin miltä se kuulostaa mm. siksi, että geeni ja sen ympäristö kuuluvat toiminnallisesti yhteen: ilman ympärillään olevaa elävää solua geeni ei saa aikaan mitään. DNA, josta geenit koostuvat, on kemiallisesti poikkeuksellisen inaktiivinen yhdiste – mihin geneettisen informaation pysyvyys juuri perustuu. Vuorovaikutusten mekanismien nojalla geenistön ympäristöä voi jäsentää seuraavanlaisiksi kerrostumiksi (keskeinen lähde on *Wallace & Falkinham 1997*).

1. Geenistön välitön kemiallinen ympäristö kromosomeissa. DNA-juosteet sijaitsevat tunnetusti kromosomeissa, mutta nämä koostuvat valtaosaksi muista yhdisteistä, mm. geenien toimintaa ja kopioitumista säätelevistä entsyymeistä. Jo elektronimikroskopian keinoin todettiin, että kromosomit näyttävät aktivoituneiden geenien ympärillä pullistuneilta, eli geenien aktiivisuus mobilisoi kromosomien muita molekyylejä. Molekyylibiologisin keinoin on todettu, että kromosomeissa sijaitsevilla proteiineilla, mm. histoneilla, on suoranainen vaikutus geenien toimintaan. Histoniin toimintaa hallitsee ilmeisesti oma koodinsa, joka siirtyy solunjakautumisen myötä jälkeläissoluihin (*Strahl and Allis 2000*).

On myös vahvaa osoitusta, että kromosomeissa olevien yhdisteiden vaikutus geenien toimintaan voi periytyä hankittuna ominaisuutena sukupolvesta toiseen ns. epigeneettisen periyntymisjärjestelmän välityksellä (*Jablonka and Lamb 1995*), mutta tämä "lamarckilainen" ajatus on luonnollisesti kiistanalainen (keskustelukoosteita ovat julkaisseet mm. *Biology & Philosophy 1/1998, Journal of Evolutionary Biology 2/1998*).

2. Määrättyjen mutanttigeenien sijoittuminen toisiinsa nähden – joko samaan kromosomiin tai vastinkromosomeihin – voi vaikuttaa niiden ilmenemiseen (position effect). Tämä osoitettiin risteytyskokein 1940-luvulla. Geenikoostumukseltaan identtisten yksilöiden ilmiäisy voi siis erota, mikäli geenien keskinäinen sijainti kromosomistossa eroaa.

3. Kehittyvän elimen aihion ympärillä olevan solukon geneettinen koostumus vaikuttaa elimen lopulliseen muotoon; tämä osoitettiin 1930-luvulla siirtämällä banaanikärpäsen silmän aihioita eri mutanttimuotojen takaruumiin. Yleisemmin ottaen kyse on mosaiikkivaikutuksesta: solukon sijainti koko kehittyvään organismiin nähden vaikuttaa siihen, millainen lopullinen kudus siitä muodostuu. C. H. Waddingtonin laboratoriossa alettiin jo 50-luvulla kehittää tätä kuvaavia matemaattisia malleja sekä teoreettisia käsitteitä.

4. Tärkeä on tietenkin myös organismin ulkopuolinen ympäristö; jaan sen kolmeen eri osaan:

- Kontingentit ulkoiset tekijät. Näitä ovat organismien toimeentuloon vaikuttavat satunnaiset tekijät kuten esimerkiksi säätilan vaihtelut vuodesta toiseen tai hetkellisiä tuhoja aiheuttavat raesateet, myrskyt ja salamaukset.
- Säännöllisesti vaihtelevat ulkoiset tekijät. Tätä edustavat vuodenaikaisuuden perusrhythmi sekä monet tietyllä keskimääräisellä taajuudella toistuvat vaikkakin yksittäin ottaen satunnaiset ympäristön häiriöt kuten tulvat, maanvyörymät tai metsäpalot. Ilmiöihin, jotka toistuvat säännöllisesti (vaikkakin tilastollisessa mielessä), organismit voivat sopeutua. Organismien ulkopuolen piirteet tulevat sopeutumisen seurauksena tavallaan "sisäistetyiksi" (*Haila & Levins 1992*), joten sisäpuolen ja ulkopuolen erottelu on harhaanjohtavaa. Havainnollisen esimerkin tarjoavat kasvit, joiden siemenet vaativat itääkseen metsäpalon.
- Organismin kontrolloimat ja luomat ulkoiset tekijät. Tähän kuuluu kulttuuri laajassa mielessä. Kulttuurisesti määräytyneisiin ja periytyviin, organismien sisäistämiin käyttäytymisen piirteisiin sisäpuolen ja ulkopuolen erottelua ei voi lainkaan soveltaa.

Kaiken kaikkiaan, lähempi tarkastelu osoittaa geenistön "ympäristön" monikerroksiseksi ja vaikeasti kiinnitettäväksi käsitteeksi. Ympäristön eri kerrostumat muuttavat

keskinäisessä vuorovaikutuksessa geenien toimintaa.



Kausaalisuus potentiaalina

Palatkaamme Waddingtonin kreodiin ja potentiaalin käsitteeseen. Asetelman voi tulkita seuraavasti: hedelmöittyneen munasolun potentiaalin määrää tietty geenistö tietyssä ympäristössä, niitä ei voi erottaa toisistaan. Ympäristön ja geenien määrätynlainen yhdistelmä johtaa tiettyyn kehityskuluun.



Alkion kehityspotentiaali kehkeytyy esiin sen kehityksen myötä; tästä Aristoteleen luonnehdinnat ovat edelleen osuvia. Potentiaalin luonnetta voidaan kuitenkin analysoida täsmällisemmin: määrättyjä potentiaaleja liittyy määrättyihin geeneihin sekä määrättyihin ympäristötekijöihin. Äärimmäisissä tapauksissa suhde voidaan kuvata yksikäsitteisen kausaalisena. Yhden geenin tuottamat aineenvaihduntahäiriöt voivat täysin hallita yksilön kohtaloa, mutta vastaava pätee ympäristöön, esimerkiksi äidin tarjoaman fysiologisen ympäristön häiriöt voivat johtaa sangen hyvin ennustettaviin seurauksiin (vihurirokko- tai thalidomidilapset).



Äärevät ympäristöolosuhteet tuottavat täysin ennakoitavan seurauksen. Mikäli esimerkiksi lämpötila laskee tai nousee sietorajojen ohi, ympäristö ottaa yksilönkehityksessä kausaalisen yllätteen. – Esimerkki ei suinkaan ole triviaali, sillä rajatapauksissa ilmenee kiinnostavaa vuorovaikutusta ja vaihtelua. Tämän nojalla ympäristöä on paljon käytetty periytymisen tutkimusvälineenä. "Fenokopio" on tekninen nimitys muunnoksille, joita saadaan altistamalla identtisen geenistön omaavia organismeja erilaisille ympäristöoloille. Esimerkiksi banaanikarpäsalkion kokeman lämpöshokin tuottamat fenokopiot voivat muistuttaa tiettyjen mutaatioiden tuottamia mutanttityksilöitä. Geenivirheen ja ympäristövirheen lopputulos voi siis ilmetä organismin ilmiössä samanlaisena.



Käyttämäni aristotelisen käsitteen "potentiaali" voi saattaa yhteyteen modernin tieteenfilosofian kanssa rinnastamalla sen Nancy Cartwrightin (1989) termiin "kapasiteetti".



Usein geneettiseen koodiin sovelletaan metaforaa "ohjelma". Ohjelma ei kuitenkaan sovellu kausaaliseksi käsitteeksi, koska ohjelma ei yksinään suorita mitään – aivan kuten ruokaohje ei tee yksinään yhtään mitään. (Tästä on helppo tehdä koe: jättäkäämme pöydälle ruokaresepti yön ajaksi ja palatkaamme aamulla katsomaan, mitä se on saanut aikaan.)



Millaiseen metafysiikkaan tukeudut?



Sisäisen ja ulkoisen tiukka erottelu perustuu metafysisen olettamukseen todellisuuden todellisesta olemuksesta; tästä lopuksi muutama huomio. Termi metafysiikka viittaa sellaisiin tieteellisten väittämien taustalla oleviin, todellisuuden luonnetta koskeviin ennako-olettamuksiin (*presuppositions*), jotka tekevät tieteelliset väittämät mahdollisiksi. Tiede siis edellyttää metafysiikkaa. Tämä on analogista sille, että lauseet perustuvat taustaolettamuksiin, joiden hyväksyminen on niiden ymmärrettävyyden edellytys (*Collingwood* 1998).




Geneettinen kausaalisuus olettaa, että jokaisella yksittäisellä ilmiöllä on yksikäsitteinen syy, eli taustalla on atomistinen metafysiikka. Tämä on kuitenkin kokemuseräisten seikkojen nojalla ongelmallinen ajatus. Kuten edellä todettiin, geenien toiminnasta kertyvä molekyylibiologinen tutkimustieto todistaa vuorovaikutussuhteiden monimutkaisuutta ja rikkautta. Mutta asetelma on muullakin tavoin ongelmallinen. Jotta geneettinen determinismi voisi toteutua, maailman tulisi olla ennalta määrätty, säännönmukainen ja täysin ennustettavissa. Tällaiselle uskolle ei kuitenkaan ole perusteita. Geenit eivät voi täsmälleen tietää ennakkolta, millaiseen maailmaan niitä kantava organismi kehittyi.



Ajatus yksilön kehityskaaresta potentiaalin kehkeytymisenä, jota määrää geneettisen informaation ja monitasoisten ympäristötekijöiden vuoropuhelu, nojautuu toisenlaisiin ennako-olettamuksiin. Näitä ovat epälineaaristen systeemien itseorganisointuminen, vuorovaikutuksen rikkaus, herkkyyden alkuarvoille, sekä sattuman merkitys kehityskuluissa. Organismien kehitys on rajoitteiden ehdollistamaa, mutta yksityiskohdissa esiintyy aina satunnaista vaihtelua. Äärimuunnokset karsiutuvat yksilönkehityksen kuluessa, olipa niiden syy geenivirhe tai ennakoimaton ympäristön häiriö, ja





siksi elämänmuodot uusiutuvat jokseenkin samankaltaisina – eivät kuitenkaan koskaan täysin samankaltaisina.

Toisin sanoen, täsmälleen rajatuissa tilanteissa joko tietyt geenit tai tietyt ympäristötekijät voivat vaikuttaa yksikäsitteisen määräävästi yksilön kehitykseen. Tällaista tekijää muuttamalla saadaan aikaan ennakoitu vaikutus, olipa kyse geenistä tai ympäristöstä. Yksilönkehityksen kuluessa toteutuvien potentiaalien monikerroksisuus luo tälle perustan. Mutta yleisesti ottaen: Geenit vai ympäristö? – Molemmat yhdessä.

KIRJALLISUUTTA

Cartwright, N. (1989): *Nature's Capacities and Their Measurement*. Oxford University Press, Oxford.

Collingwood, R. G. (1998): *An Essay on Metaphysics*. Revised ed. (alkuperäinen julkaisu vuosi 1940). Oxford University Press, Oxford.

Dyke, C. (1988): *The Evolutionary Dynamics of Complex Systems. A Study in Biosocial Complexity*. Oxford University Press, Oxford.

Grene, M. (1963): *A Portrait of Aristotle*. University of Chicago Press, Chicago.

Hacking, I. (1991): A tradition of natural kinds. *Philosophical Studies* 61: 109-126.

Haila, Y. & Levins, R. (1992): *Ekologian ulottuvuudet*. Vastapaino, Tampere.

Jablonka, E. & Lamb, M. J. (1995): *Epigenetic Inheritance and Evolution. The Lamarckian Dimension*. Oxford University Press, Oxford.

Strahl, B. D. & Allis, D. (2000): "The language of covalent histone modifications." *Nature* 403: 41-45.

Waddington, C. H. (1962): *New Patterns in Genetics and Development*. Columbia University Press, New York.

Wallace, B. & Falkinham, J. O. (1997): *The Study of Gene Action*. Columbia University Press, New York.

Kirjoittaja on ympäristöpolitiikan professori Tampereen yliopistossa.