

Chuck Dyke

Hämmentävä ekspressio: biodiversiteetin edellytykset pitkällä aikavälillä

Biodiversiteetin säilyminen on yleinen huolenaihe. Ympäristöaktivistien asialistalla se on kärkipäässä. Hyvin usein biodiversiteetin säilyttäminen mielletään – tai se pelkistyy – lajien suojeluksi. Yhteys pitää kuitenkin kutinsa vain hyvin lyhyellä tähtämellä. Darwinilaisen teorian ja evolutionaarisen dynamiikan muiden ulottuvuuksien tutkimuksen uudet synteetit auttavat meitä ymmärtämään, miten tuo yhteys hajoaa pitkällä tähtämellä. Tällä oivalluksella on ympäristöpolitiikalle vakavia seurauksia, jotka varmasti ahdistavat joitain ihmisiä. Mutta jos yritykset turvata jatkuvan elämän mahdollisuus maapallolla eivät perustu bioekologisten ilmiöiden tuntemukseen, voimme (jälleen kerran?) tietämättömydessämme vaarantaa koko biosfäärin.

Mikäli haluamme ottaa ympäristöajattelun tosissamme, meidän on ymmärrettävä biologisia prosesseja itsessään niiden perinteisten ideologisten karikatyyrien sijasta. Meidän on aloitettava luonnostelemalla evoluution perustekijät niin hyvin kuin pystymme. Niille, jotka eivät ole seuranneet viime vuosien edistysaskeleita, voi luonnos vaikuttaa oudolta. Se on kuitenkin parasta, mikä nykyisellä tieteellä on tarjolla. Tehokkuuden nimissä voimme ottaa lähtökohdaksi evolutionaarisen ajattelun uusimman virstanpylvään, Mary Jane West-Eberhardin teoksen *Developmental Plasticity and Evolution*.

Muuntelu ja diversiteetti

Voimme selkeyttää asiaa pohtimalla aluksi seuraavaa oletusta: jos kaikki muuntelu (*variation*) tapahtuisi vakiintuneiden biologisten *lajien* välillä, voisimme varmasti

turvata biodiversiteetin säilyttämällä lajeja – mutta vain, jos oletus pätee. Perinteisille suurille luonnonsuojelujärjestöille rahaa lahjoittavat kansalaiset eittämättä uskovat, että lajit ovat vakaita (ja saavat vaivanpalkaksi nätin hatun tai sateenvarjon). Eivät he välttämättä kiellä evoluutiota, mutta he uskovat, että lajit ovat muuntelun perusta. Me huomaamme kuitenkin, että tämä ei perustavalla tasolla pidä paikkansa. Tilanne on paljon monimutkaisempi.

Diversiteetti edellyttää muuntelua. West-Eberhard tuo esiin ja selittää valtaisan määrän todistusaineistoa sille, että muuntelua esiintyy pääasiassa ”lajien” sisällä, ei niiden välillä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että meidän tulisi ajatella asiaa ensisijaisesti vakiintuneiden lajien (*fixed species*) näkökulmasta. Päinvastoin: mikäli lajien sisäinen muuntelu ei aktiivisesti muuntaisi lajeja ja muuttaisi lajien pysyvyyden ehtoja, sillä ei olisi mitään merkitystä evolutiivissa muutoksissa. Jotta siis muuntelulla

olisi merkitystä diversiteetin kannalta – muuttuvissa ympäristöissä – on sen alati työnnettävä lajeja pois pysyvyydestä kohti uudelleenlajiutumisen (*respeciatio*) labiilia maastoa. Lajit ovat vaihtelun lähteitä vain siinä mielessä kuin ne eivät ole lajeja.²

Äskettäin valmistunut simpanssin geneettisen perimän karttaluonnos³ sekä simpanssin ja ihmisen perimän väliset vertailut korostavat ”lajien sisäisen” muuntelun tärkeyttä. Ne myös alleviivaavat sitä elintärkeää oivallusta, että muuntelussa ei ole niinkään kyse vaihtelusta siinä, mitä geenejä organismissa on, kuin siinä, mitkä geenit organismissa ilmenevät. Tämänkin simpanssit osoittavat. Muistetaan vaikka, että ”viime aikojen tutkimusten perusteella ihmisen aivojen evoluutio näyttäisi liittyvän muutoksiin geenien ilmentymisessä juuri aivoissa verrattuna toisiin kudoksiin kuten maksaan. Jotkut tutkimukset viittaavat siihen, että aivoissa tapahtuva geenien ilmentyminen on muuttunut ihmisen kehityslinjassa paljon nopeammin kuin simpanssien kehityslinjassa.”⁴ Ihmisen ja simpanssin genotyyppien välillä on toki vaihtelua, mutta sen rajat (1,23% ero nukleotidikoostumuksessa) puhuvat näkemyksemme puolesta. Painopisteen muutos geenien *omaamisesta* (*possession*) geenien *ilmentymiseen* (*expression*) on tärkeä käännekohta.

Geenien ilmentyminen

Seuraavaksi on ymmärrettävä, että geenien ilmentyminen toteutuu vuorostaan kokonaisten organismien ja niiden asuttaman ympäristön vaikutuksesta: se ei todellakaan seuraa yksinkertaisesti geenistön koostumuksesta. Koska ympäristöt koostuvat suurelta osin toisista organismeista, on tietyn populaation piirissä tapahtuva muuntelu lukuisten muiden organismien populaatioissa olevan muuntelun määrittämää. Hiukkasan hämmentävä esimerkki on simpanssin perimän kaksi DNA-pätkää, jotka ovat muinaisten virusinfektioiden jäänteitä. Ne ovat vaikiintuneet osaksi simpanssin geeniperimää ja välittyneet sukupolvilta toisille. Ei tiedetä, ilmentyvätkö nämä geneettiset pätkät mitenkään tai onko niillä merkittävä arkitheoninen rooli simpanssin perimässä, mutta ne ovat aktiivisia alueita.⁵ (Vielä olennaisempaa on, että me ihmiset hallitsemme simpanssin ympäristöä kuten käytännössä minkä tahansa muun organismin ympäristöä. Perinteistä erottelua luonnollisen ja keinotekoisin valinnan välillä täytyy arvioida uudelleen.)

Geenien ilmentymisen korostaminen siirtää näkökulman *prosesseihin* sen sijaan, että ikonisoisimme ”geenejä” ja ”ominaisuuksia”, evolutiivisen kirjanpidon tavanomaisia laskentayksiköitä. Muuntelu täytyy siis ymmärtää ensisijaisesti organismin ja ympäristön monimutkaisten vuorovaikutussuhteiden potentiaalisten seurausten joukkona, se ei toteudu pelkkinä geeniyhdistelmiä. Se ei ole päässä laskua. ”Brittenin-Davidsonin” malli on yhä hyödyllinen jäsentäessämme tähän liittyviä prosesseja:

1. Vaikka erilaistuneilla soluilla on sama perimä tumassaan, niiden ominaisuuslunne riippuu erilaistuvasta geenien *ilmen-*

tymisestä. Tätä tukivat todisteet siitä, että suuri osa ylempien solutyyppien perimästä ei ole aktiivista, ja eri solutyypeissä syntetisoidaan erilaista RNA:ta. Siten geenien toiminnan säätely selvästikin edeltää solujen erilaistumista.

2. Erilaistumista ja geenien ilmentymistä eivät säätelä (kuten esitumallisilla organismeilla) yksinkertaiset ”säätelygeenit” (nk. operonit) vaan lukuisat ulkoiset signaalit (kuten hormonit, sikiökehitystä ohjaavat signaalit ja muut vaikutukset), jotka voivat perustua useisiin tekijöihin tai geeneihin.

3. Erilaistumisen tila jopa alimmilla (solujen) organisaation tasoilla riippuu suuresta joukosta geenejä: solun fenotyyppiin omaleimaisuus on monien geenien seurausta.

4. Yhtaikaisesti ilmenevien, säädelyjen ”tuottavien” tai rakentavien geenien arsenaalin ei tarvitse olla yhtenäinen tai edes samassa kromosomissa...⁶

Näin syntyy kuva laajasta ja kiinteästä vuorovaikutuksesta atomistisen itsenäisyyden sijaan. Juuri tätä taustaa vasten meidän on arvioitava muuntelua ja lopulta diversiteettiä. Epälineaarisuus synnyttää muutoksen mahdollisuuden. Lajiutuminen taas on yksi linearisoitumisen lajeista. Se vähentää biosysteemin mahdollisuuksia etsiä uudenlaisia tiloja karsimalla vuorovaikutusten määrää. Juuri tätä lisääntymisisolaatio (*reproductive isolation*) loppujen lopuksi tarkoittaa, ja lajit on määritelty yleensä lisääntymisisolaation perusteella.

Ituradan eriytyminen

Ituradan eristyminen somaattisesta solulinjasta tuottaa myös lineaarisuutta. Siitä johtuva eristäytyminen vähentää geeniperimän yhdistelymahdollisuuksia rankasti, ja ilmiö kehittyikin aika varmasti toteuttamaan tätä tehtävää. Onhan luotettavalla lisääntymiskyvyllä eittämättömät hyötynsä, vaikka keskittyisimmekin muuntelun tarkasteluun. Useimmissa kehityslinjoissa lajiutuminen ja ituradan eristyminen syntyvät synergistisesti kytkeytyneinä. *Ituradan eristyminen* (*germ line sequestration*) ei ole erityisen vaikea käsite, mutta se on hyvin tärkeä. Se oli evoluutioajattelussa läpi 1900-luvun vallinneen ’uusdarwinilaisen’ synteisin ortodoksian kulmakiviä⁷. Perusideana oli, että vanhemmilta jälkeläisille luontaisesti välittynyt geneettinen aines eristyy kehon (somaattisten) solujen geneettisestä aineksesta. Somaattinen aines taas käy läpi moninaisia muutoksia ja järjestyy uudelleen täyskasvuisten organismien jatkuvassa ”rakentamisen” prosessissa. Näin organismille syntyy radikaalisti erilaisuneita ja erikoistuneita solulinjoja: iho, luut, elimet ja niin edelleen. Oletettiin, että ituradan solut (*germ cells*)⁸ suojautuivat näiltä muutoksilta eristyneinä niin sanotun ”Weissmannin muurin” (*Weissmann Barrier*) taakse.

On tärkeää ymmärtää, millä logiikalla ituradan eristymisen idea omaksuttiin (käytännössä dogmiksi) 1900-luvun synteisissä, sillä se havainnollistaa selkeästi eroa lineaarisuuden ja epälineaarisuuden välillä ja siten yk-

sinkertaisuuden ja kompleksisuuden välillä. Taustalla oli vanha positivistinen näkemys selittämisestä, humelaisen kausaation ja loogisen johtamisen yhdistelmä. Teoria asetti tiukat yksitulkintaisuuden ja toistuvuuden ehdot. Käytännössä tämä tarkoitti, että organismit tuli voida johtaa pääpremisistä eli geeneistä ja sivupremisseistä eli kulloisestakin ympäristöstä. Geenien ja ympäristön täytyi olla toisistaan riippumattomia, eikä niiden kohtaamisella voinut olla muuta seurausta kuin selviytymisen erot: sekoittumisen ja keskinäisen vastaavuuden yhdistelmäoppi (kombinatoristiiikka). Mitkä tahansa muut vuorovaihtuuden muodot haiskahtivat ”sisäisiltä suhteilta” eli näiden tekijöiden keskinäiseltä riippuvuudelta. Atomistisen reduktion koko voima täytyi kerätä tätä johtopäätöksistä pelottavinta vastaan.

Eristyminen on kuitenkin asteittaista eri kehityslinjoissa. Jos sitä pidettäisiin ehdottomana, olisi geenien saaminen ja menettäminen nähtävä täysin satunnaisena suhteessa valintapaineeseen (*selection pressure*). Weismannin muurin vahvassa muotoilussa sitoudutaankin tähän ajatukseen. Muuri kuitenkin heikkenee aina, kun ominaisuudet altistuvat valintapaineille. Kehitysprosessin monet kytkeytyneet alijärjestelmät toimivat juuri tällä ta-

valla. Tarinan opetus ei ole sen enempää lamarckilainen kuin lysenkolainenkaan, mitä esimerkiksi uusdarwinilaiset tuntuvat pelkäävän: ei sinne päinkään. Prosessien tuominen evolutiivisen näkemyksen etualalle kirjanpidon sijaan itse asiassa estää lamarckilaiset tulkintayritykset. Ja kuten West-Eberhard toteaa: ”Geneettisesti akkomodoitujen fenotyyppisten uutuuksien syntyminen uusien ulkoisten vaikutteiden ja yksilönkehityksen plastisuuden myötä on yksinkertainen darwinilainen selitys adaptiiviselle suunnittelulle, eikä se riipu satunnaisesta mutaatiosta tai raamatullisista ihmeistä.”⁹ Voisi lisätä: ”eikä liioin dialektisista ihmeistä.”

Dynaamisesta näkökulmasta lajien ja ituratojen eristymisen ideoissa on siis kyse epälineaaristen systeemien lineaarisista approksimaatioista. Eikä tuo approksimaatio ole lainkaan huono silloin, kun ”hyvä laji” ja ituradan eristymisen ovat tosiaankin kehittyneet. Isoja eläimiä voi aina käyttää esimerkkinä, vaikka esimerkiksi hevosen sukuiset ovatkin pikkaisen hankalia. Vastaavasti isojen eläinten yksilönkehitysprosessit ohjautuvat paljon tiukemmin kuin valtaosalla muista organismeista, joten muuntelun rajat ovat nekin tiukat ja fenotyyppien liikkumavara pienempi. Juuri siksi tämä lineaarinen approksimaatio on kelvol-

linen. Tästä huolimatta viime vuosina kasvanut ymmärryksemme äidin tai emän tarjoaman kehitysympäristön vaikutuksista, niin tsygootin sisäisistä kuin ulkoisistakin, (kuten geenien muu kuin satunnainen poiskytkentä¹⁰), muistuttaa ettei lineaarinen approksimaatio kerro kaikkea. Monia muita eliöluokkia tarkastellessa on paljon helpompi vastustaa houkutus sivuuttaa ulkoiset vaikutukset iturataan. Esimerkiksi hyönteisten kastijärjestelmät perustuvat tällaisiin vaikutuksiin ja vaativat siten hyvin hienotuneita ituradan eristymisen vaihtoehtostrategioita.

Asian ymmärtää paremmin, kun muistaa, että iturata on lopulta osa fyysistä maailmaa eikä kirjanpidon tavasten valtakuntaa. Jos se eristyy, on olemassa eristymisen *prosessi*¹¹. Niinpä meidän on kysyttävä, miten prosessi etenee: mikä eristyy ja mikä ei (ja missä elämänsyklin vaiheessa), ja mille ulkoisille vaikutteille iturata altistuu? Yleinen analogia geeniperimän ja kielen välillä, joka on kenties puettu 'informaation' asuun, kohtaa kaiken tämän myötä kahdenlaisia merkittäviä uhkia. Jos kieli mielletään ontologisesti eristyneenä jatkuvien prosessien maailmasta, analogia hajoaa välittömästi, sillä perimä ei ole tuolla tavoin eristynyt. Jos sen sijaan ajatellaan, kuten minä ajattelen, että kieli on osa tuon maailman melskeitä, on analogialla ehkä sijansa. Silloin kuitenkin monet perinteiset teoriat kielestä jäävät matkan varrelle. Weismannin

muuri on perustuksiaan myöten kantilainen, ituradan eristymisen prosessit eivät ole. Tosin epä kielikään lepää minkäänlaisen Weismannin muurin takana.

Lineaarisuuden tuolla puolen

Weismannin muurin dogmaattiseen muotoiluun keskittyminen voi vaikuttaa kömpelöltä strategialta, mutta koska muuri on yksi uusdarwinilaisen synteessin järkkähtämättömmistä dogmeista, vie sen kyseenalaistaminen meidät juuri niiden ydinasioiden äärelle, joita tulee pohtia biodiversiteetin uudelleenarvioinnissa. *A priori* sitoutuminen Weismannin muuriin sen sijaan että tutkitaisiin ituradan eristymisen erilaisia muunnelmia tukahduttaa monien ympäristön ja geneettisen perimän vuorovaikutussuhteiden tutkimusta. Juuri niiden tutkimus on keskeistä arvioitaessa muuntelun mahdollisuuksia. Kuten jo totesin, keskittyminen lajeihin vaikuttaa ajatteluun samalla tavalla. Tästä näkökulmasta vakiintuneet lineaariset approksimaatiot ovat täysin riittämättömiä.

Toisenlainen lineaarisen approksimaation rajoitus nousee esiin, kun tarkastellaan uutuuksia. Darwinismin lineaarisissa muotoiluissa uutuutta käsitellään useimmiten "mutaatioiden" satunnaisena ilmestymisenä. Tästä on seurannut paljon hupsuja väittelyitä ja tilastotieteel-

listä akrobatiaa: kuinka muutos voi järjestyä ja suuntautua tarpeeksi nopeasti tuottaakseen havaitsemamme evolutionaariset kuviot? ”Satunnaisten” mutaatioiden roolia ei voi jättää laskuista, kunhan suostumme pitämään lukua niistä stereokemiallisista rajoitteista, jotka rajaavat ”sattuman” käsitettä. Kemiallisten yhdistelmien mahdollisuuksien avaruudella on lopulta rajansa niin atomi- kuin molekyyliatasolla.

Se kuva, joka nousee esiin valtavasta määrästä tutkimustuloksia, ei muistuta uhkapelikasinoa, vaan se esittää moduulien ja pois- tai päällekytkennän vuoropelin synnyttämää kompleksista ja vuorovaikutteista sovitumista ympäristöön. Nämä sovitukset paljastuvat kierrätetyiksi ikivihreiksi, kunhan vain jaksamme kärsivällisesti tehdä selväksi niiden ilmestymisen mekanismit. *Heterokronia* (*heterochrony*) eli geenien ilmentymisen aktivoinnin tai deaktivoinnin ajalliset muutokset, ja *kyynysrajan muuttuminen* (*threshold change*) eli kohonnut tai laskenut herkkyys ympäristöperäisille tai somaattisille virikkeille, ovat yleisimpiä vanhojen teemojen muunnelmien tuottajia. Eivät ne ole juuri koskaan vain geneettisiä teemoja, vaan ympäristön, yksilönkehityksen ja geneettisen rakenteen konserttoja. Tärkeimmät prosessin koostumisen ohjeet löytyvät edellä esittämästäni Britten-Davidsonin mallin lyhennelmästä.

Uutuutta kumpuaa yhä uudelleen tällä tavalla. Ortodoksian tutkapeiton alla polyfenia, muotojen mahdollisuuksien moneus, on yleistä lajissa toisensa jälkeen. Kunhan tämän osoittavat tutkimustulokset kerätään, on todistusaineisto ylivoimaista.

Mutaation tuolla puolen

Organismien geneettinen ilmentyminen siis vaihtelee riippumatta mutaatioista. Saman lajin yksilöiden morfologia ja käyttäytyminen erilaistuvat, kun ne yrittävät pärjätä erilaisissa ympäristöissä. Geneettisesti *sallituista* eroista voi tulla *de facto* pakollisia, kun erilaiset ympäristöt virittävät kelpoisuuden mahdollisuuksia. Kahden geneettisesti identtisen populaation löytämät fenotyyppisten mahdollisuuksien avaruudet voivat poiketa toisistaan melkoisesti – jopa samassa habitaatissa – mikäli vaikkapa mieluisimmat resurssit niukentuvat. Kahden ilmiön dynaaminen tasapaino (*bimodal stability*) tekee sen mahdolliseksi. Kumpikin alapopulaatio *voisi* vaihtaa pääresurssiaan; on kontingenttia kumpi niin tekee ja kumpi ei. Näyttämö on valmis rajulle erilaistumiselle.

Traditionaalissa kerronnassa voisimme olettaa molempien populaatioiden lajiutuvan, kun ne omiin resurssihinsa sitoutuneina etäännyvät yhä enemmän kunnes lajiutumisololaatio syntyy. Tämänsuuntaisesta lajiutumisesta onkin esimerkkejä. Ilmeisesti useimmissa tapauksissa geneettistä assilaatiota ja pakollista lisääntymisololaatiota ei kuitenkaan synny, vaan alapopulaatiot elävät rinnakkain. Mukautumiskyvyn säilyttäminen ja mahdollisuus siirtyä eestaas elämäntavasta toiseen onkin hyvin edullista muuttuvissa ympäristöolosuhteissa.¹² Ne, jotka kiinnittävät kaiken huomion lajeihin, pitävät lajiutu-

mista tietysti paljon kiinnostavampana mahdollisuutena, mutta lajiston kannalta se ei välttämättä ole edullisinta – kunhan mukautuva muuntelu pysyy yllä.

Toisaalta lajiutumisen mahdollisuus ilman merkittävää geneettisen perimän muutosta voi sekin olla niin kiintoisaa kuin hyödyllistä. Modulaarisuus ja pois- tai päällekytkentä (*switching*) ovat olennaisimpia plastisuutta ja lajiutumista mahdollistavia ilmiöitä, ja molemmat ovat *Evo-Devon* keskeisiä teemoja¹³. Meille riittää selkeä esimerkki Jablonkan ja Lambin teoksesta *Evolution in Four Dimensions*¹⁴. On tehokkainta esittää se pitkänä lainauksena. Pääsemme asian ytimeen jaksossa, jossa Jablonka ja Lamb ovat kuvanneet suhteellisen yksinkertaista geenien aktivoitumiseen ja/tai deaktivoitumiseen liittyvää takaisinkytkentäkehää.

”Tästä takaisinkytkennän järjestelmästä johtuen samoissa muutosta indusoimattomissa olosuhteissa voi esiintyä kaksi geneettisesti identtistä solutyyppeä, joista toisessa geeni on aktiivinen ja toisessa inaktiivinen. Niiden väliset erot juontavat niiden edeltäjien erilaisista elämäntarinoista – saivatko ne sen alkuperäisen virikkeen, joka kytki geenin päälle. Virike on voinut olla ulkoisen ympäristön muutos tai sisäinen kehitykseen liittyvä tai säätelevä tekijä. Joissain tapauksissa edeltäneen solun tila on voinut muuttua ”melusta” johtuen – satunnaiset vaihtelut solu-ympäristössä ovat kytkeneet tuon geenin päälle tai pois päältä. Mikä tahansa päällekytkennän syy olikaan, se säilyy aktiivisena solujakautumisen jälkeen, kunhan sen proteiinituotanto ei laske liikaa. Aktiivisen tai inaktiivisen tilan periytyminen on vain enemmän tai vähemmän symmetrisen solujakautumisen automaattinen seuraus.

Useimmat itseään ylläpitävät kehät ovat kuvaamaamme paljon kompleksisempia. Niihin liittyy useita geenejä, useita säätelyalueita ja useita proteiineja. Joka tapauksessa periaate on pitkälti sama. Yksinkertaisten ja kompleksisten kehien tärkein ero on, että jälkimmäiset voivat olla hyvin vakaita, kun taas yksinkertainen kehä katkeaa helposti muuttuvissa olosuhteissa.

Jos miellämme itseään ylläpitävän kehän informaatiojärjestelmäksi, mitä voimme todeta siirrettävän informaation luonteesta? Jopa yksinkertaisella kehällä on rakenneosansa (geenin koodaussekvenssi, sen säätelyalue ja sen tuottama proteiini), mutta sen funktionaalinen tila (aktiivinen vai inaktiivinen) riippuu osasten välisestä vuorovaikutuksesta. Siksi kehän olotila välittyy sukupolvelta toiselle kokonaisuutena, ja se muuntelee kokonaisuutena. Niinpä juuri kehä on muuntelun periytyksen yksikkö. Maynard Smithin ja Szathmaryn tavoin me kutumme tällaista purkamattomalla tavalla järjestäytyneitä informaatiota *holistiseksi*. Se poikkeaa paljon modulaarisissa¹⁵ järjestelmissä kuten DNA-järjestelmässä olevasta informaatiosta, joissa rakenneosasia (nukleotideja A, C, T ja G) voidaan vaihtaa tuhoamatta kokonaisuutta.

Itseään ylläpitävän kehän funktionaalinen tila on periytyvä, mutta kuinka paljon evoluutiota sellaisessa järjestelmässä voi tapahtua? Kehän holistisesta luonteesta johtuen sillä voi olla vain harvoja funktionaalisia tiloja. Yksinkertai-

sella kehällä niitä on yleensä kaksi – aktiivinen tai inaktiivinen – joten muunnelmia on vain kaksi. Kahden muunnelman kanssa ei luonnonvalinta pääse pitkälle, se voi vain vaihtaa niiden välillä olosuhteiden mukaan. Evoluutiivisesta näkökulmasta tämä ei ole kovinkaan kiinnostavaa. Jokaisella solulla voi olla kuitenkin useita erilaisia itseään ylläpitäviä kehii, jotka voivat olla itsenäisiä. Jos solulla on vain kaksikymmentä autonomista itseään ylläpitävää kehää ja niillä kaksi mahdollista olotilaa, saadaan yli miljoona solun mahdollista funktionaalista muunnelmia. Tässä on selvästi evoluutiivista potentiaalia, ja luonnonvalinta voi johtaa kiinnostaviin sopeutumisiin. Mutta saadaksemme tällaisen määrän muuntelukykyä jokaista takaisinkytkentäkehää käsiteltävä kehien kokoelman rakenneosasena, ja erilaisten aktiivisten/inaktiivisten kehien yhdistelmiä on tarkasteltava koko solussa. Sukupolvesta toiseen siirtyvä osa solun fenotyyppiä – geenien aktiivisuuden säännönmukaisuuksien joukko.”¹⁶

Modulaarisuus

Jos terminologiset ongelmat unohdetaan, edellinen sitaatti oli pätevä yleisluontoinen kuvaus modulaarisuudesta ja pois- tai päällekytkennästä. Ne kuvattiin niin selkeästi ja yksinkertaisesti kuin mahdollista. Moduulit peritään kokonaisuuksina, ja ne ilmentyvät myös niin joutuakseen sitten valintapaineiden alle yhtenäisesti. Lisäksi koska tarjolla on niin monia aktiivisia ja inaktiivisia tiloja – vaikka kytkentä olisikin binäärinen – moduuleja voidaan rekrytoida uudensuuntauksiin tehtäviin. Homeoboksimoduulit tarjoavat selkeimpiä esimerkkejä. Tämä laaja joukko geenikimppuja esiintyy ja vaikuttaa aktiivisesti mitä erilaisimmissa kehityslinjoissa kautta biologisen maailman. Tyypillisesti ne kytkeytyvät päälle varhaisessa yksilönkehityksessä, jolloin ne ovat keskeisessä roolissa ruumiin perusrakenteen muodostumisessa. Siten vaikkapa hyönteisillä ne ohjaavat ruumiin jakautumista päähän, keskiruumiiseen ja takaruumiiseen sekä määrittävät, millaisia raajoja mihinkin jaokkeeseen kasvaa. Niiden huomataan kuitenkin palvelevan samankaltaista tehtävää esimerkiksi ihmisen selkärangan rakentumisessa. Myöhemmässä kehityksessä niiden ensimmäiset tehtävät on täytetty ja ne kytkeytyvät pois päältä, ja vapautuneina tehtävistään ne voidaan aktivoida uudelleen tietyissä soluissa toisenlaisiin ”lineaarisen segmentoitumisen” tehtäviin kuten raajojen tai sormien ja varpaiden luuston kehitykseen.

Ymmärtääkseen modulaarisen rekrytoinnin koko rikkauten ja nerokkuuden tarvitsee ajatella vain organismeja, jotka ovat silmiinpistävästi monimuotoisia elämänsä aikana varrella: perhostoukkia ja perhosia esimerkiksi. Ajallinen polymorfisuus on yleistä myös kasvikunnassa, sammakkoeläimissä, monenlaisissa merenelävissä – lyhyesti sanottuna melkein kaikilla muilla paitsi nisäkkäillä. Hyönteisten varhaiset muodot paitsi eroavat vahvasti aikuisista, mutta niillä voi olla myös vaihtoehtoisia varhaisia muotoja, jotka syntyvät tietynlaisten ympäristövaihteluiden mukaan. Ja sosiaalisten pistiäisten (*hymenoptera* – ampiaiset, muurahaiset ja mesipistiäiset)

sukupuolenvaihdokset tapahtuvat elinkaaren aikana tietyissä olosuhteissa. Suurin osa näistä muodonmuutoksista riippuu kytkimien uudelleenjärjestelystä sekä modulaaristen systeemien aktivaatiosta ja deaktivaatiosta, käytöstä ja uudelleenkäytöstä. Ylipäätään tarjolla olevan muuntelun kirjo on täysin hämmästyttävä, kunhan tutkimustieto on käsillä – etenkin jos on ollut tapana keskittyä yhdenmuotoisuuteen. Vain pieni osa tästä muuntelusta liittyy ”geneettiseen mutaatioon”. Kuten olen jo sanonut, evoluutiolle merkityksellisiä eivät ole geenit vaan geenien ilmentyminen.

Modulaarisuus on tänä päivänä ”kuuma” käsite monilla aloilla¹⁷. West-Eberhardille on ominaista, että hän muotoilee modulaarisuudesta hyödyllisen työkalun torjumaan steriiliä redusoitumista paljaiden geenien kausalliteettiin. Hän myös selkeyttää ymmärrystämme niistä integroituneista muuntelun ”järjestelmistä”, jotka ovat käytettävissä yhä uusiin tarkoituksiin ympäristön vaikutuksen myötä. Kokemattomissa käsissä modulaarinen ajattelu on kuitenkin vaarassa pelkistyä omanlaisekseen reduktioksi. Saatatkin alkaa nähdä moduulit rakennuspalikoina, joita voidaan liittää yhteen tai erotella kuin legoilla leikkiessä. Tällöin olet väärässä. Muistetaan aluksi, mitä Britten-Davidsonin mallin kohta 4 opettaa: ”Yhtaikaisesti ilmenevien, säädelyjen ’tuottavien’ tai rakentavien geenien arsenaalin ei tarvitse olla yhtenäinen tai edes samassa kromosomissa...” Meitä kiinnostavat moduulit eivät siis ole rakenteellisesti yhtenäisiä palasia, joita voi liikutella sinne tänne, vaan *funktionaalisia* kokonaisuuksia. Lisäksi, ja tämä on tärkeintä, moduulien väliset funktionaaliset suhteet eivät ole additiivisia. Moduulit ovat (joskus tiukasti, joskus löyhästi) kytkeytyneitä epälineaarissa vuorovaikutussuhteissa. Kahden moduulin vuorovaikutuksen odotettu tulos ei todennäköisesti ole sama kuin näiden moduulien oman toiminnan odotettujen tulosten summa. Kytkeytyneiden vakaiden aktiivisten tilojen lukumäärä ei voi päätellä rakennesosten vakaiden aktiivisten tilojen määrän perusteella. Järjestelmää ymmärtämään pyrkiville tämä on potentiaalisesti kammottava tilanne, mutta se on potentiaalisesti ihana tilanne organismien etsiä evoluutiivisten mahdollisuuksien merkityksellisiä vaihevarauksia – uudet säätelyn ja kytkennän mallit kumpuavat vuorovaikutuksen epälinearisesta kombinatoristiikasta.

Diversiteetin arkkitehtuuri

On aika luonnehtia biodiversiteetin käsite kehityksen plastisuuden pohjalta. Osa kuvasta on voinut jo vilahtaa esiin. *Epigeneettisyys*, kehitysprosessin monimutkaisuus, käy genetiikan edelle diversiteetin synnyssä. Niinpä ensimmäinen kontrasti on määriteltävä niihin katsomuksiin nähden, jotka perinteiseen ja uskonnollisperustaiseen tapaan kiinnittyvät lajeihin, uhanalaisiin lajeihin ja niiden säilyttämiseen. Ja vasten niihin liittyviä nallekarhuluonnonsuojeluteorioita, jotka korostavat karismaattista megafaunaa. En kiistele tässä siitä, ovatko nämä luonnonsuojelukäytännöt viisaita. Haluan vain osoittaa,

että vaikka niille löytyisi hyviä perusteita, niitä ei voi perustella biodiversiteetin luomisella ja säilyttämisellä.¹⁸

Biodiversiteetti löytyy niistä olioista, jotka tutkailevat muuntelun muuntuvaa vaihevaruutta, ei niistä jotka ovat lukittuneet vakaisiin muotoihin.¹⁹ Isot eläimet pistävät silmään. Kun ne katoavat, maailma näyttää heti erilaiselta. Kuitenkin melkein kaikki mikä elää on paljaalle ihmissilmälle näkymätöntä. Kun nämä näkymättömät katoavat, näyttää maailma pienen hetken samalta, kunnes niiden katoamisen seuraukset tulevat kovin silmiinpistävässä mittakaavassa esiin. Onneksi kovin pienten otusten joukossa plastisuus on huomattavaa, joten ajan myötä niiden menetykset voivat korjaantua.

Näyttääkin siltä, että biodiversiteetin kysymykset koskettavat erilaisten aikamittakaavojen *status quota*. Kuinka pitkään esimerkiksi suurten eläinten suojeluun keskittyvän politiikan on tarkoitus toimia? ”Ikuisesti” ei ole mikään vastaus. Evoluutiivisessa aikamittakaavassa isot eläimet kuolevat sukupuuttoon melko nopeasti. Mitkä ovat niiden selviämisen mahdollisuudet nykyisessä globaaliuutuksessa, kävi sitten miten tahansa? Monet tai useimmat eivät varmaankaan selviä kovin pitkään.

Tässä tilanteessa on totta mutta myös irrelevanttia muistuttaa, että suurilla eläimillä on oma asemansa lajirikkuuden ja ekosysteemien säilyttämisessä *nykyisessä asioiden järjestyksessä*. Täytyy vain ajatella niitä lukuisia

organismeja, joiden isäntäeläimiä suuret eläimet ovat. Voimme myös pohtia, miten jotkin suuret nisäkkäät ”hoitavat” asuttamiaan savanneja säilyttääkseen niiden ominaisluonteen.²⁰

Erilaisissa aikaskaaloissa on siten monia mahdollisia suhteita lajeiksi kiinnittyneen megafaunan ja diversiteetin välillä. Perustava huomio pätee silti. Meidän niin kovin ihailemamme suuret, todella lajiutuneet olennot kehittyivät maailmassa, joka on jo kadonnut. Mitä suurimmassa määrin me ihmiset olemme purkanee sen ja korvanneet sen toisella maailmalla, johon isot eläimet ovat huonosti sopeutuneet. Juuri ne käyvät kaikkein epätodennäköisimmin läpi tervehdyttäviä evoluutiivisia muutoksia. Megafaunaan voidaan toki keskittyä suojeltaessa nykyisen näköistä maailmaa, mutta emme voi keskittyä niihin arvioidessamme tulevaisuuden biodiversiteettiä suhteessa elämän säilymiseen maapallolla. Valtaosalla niistä ei juuri ole mahdollisuuksia sopeutua tai kehittyä, kenties ei lainkaan. Mahdollisuudet ovat paljon paremmat niille lajeille, jotka eivät ole vielä asettuneet tiukasti lukkiutuneiksi lajeiksi.

Tulevaisuuden mahdollisuus

Kaikesta huolimatta kuva lajien suojelusta hallitsee biodiversiteetin kuvastoa pitkälle tulevaisuuteen. Kuvan ide-

ologinen keskus on niin syvään juurtunut, ettei muuta kannatakaan kuvitella. Olisi aivan absurdia uskotella, että jotenkin saataisiin vakiinnutettua *Homo sapiens sapiensin* ja sen tuntemusten valta-aseman murtamiseen tarvittava puolueeton etäänntyminen.

Samalla pitää muistaa, että *Homo sapiens* ovat nekin isoja eläimiä. Meillä on hillittömän iso ja haavoittuvainen populaatio, jonka pitäisi taivaltaa tulevaan merkittävien ympäristömuutosten aikaan, ja kenties sen tuolle puolen. Viime aikojen kokemukset ovat myös opettaneet meille, että vaikkeivät luonnonkatastrofit ole sen yleisempiä tai vahvempia kuin ennen, ne aiheuttavat yhä silmiinpistävämpää, kalliimpaa ja kuolettavampaa tuhoa – melkein täysin lukuisuutemme ja levittyneisyytemme vuoksi.

Voin hyvin kuvitella tilanteen, jossa maapallon elämän jatkuvuuden mahdollisuuden reunaehtoja pohditaan mitä vaikeimmissa oloissa. Silloin jonkinlaisessa maksimaalisen muuntelun periaatteessa voisi olla kovasti järkeä. Silloin ainoa viisas ratkaisu olisi lakata keskitty-

mästä lajeihin ja niiden suojeluun. Haluaisimme niin paljon luomiskykyistä geenien ilmentymistä kuin mahdollista, kehityksen tasapainon muutosta pois eliökunnan kirjon lajiutuneesta päästä, ja toivoisimme kiihtyvää evoluutiota.

Meidän pitää toki välittömästi muistaa, että mikä tahansa elävien olentojen kokoelma synnyttää ja ylläpitää elämän jatkumista mahdollistavia olosuhteita; näin tekisi myös tulevaisuuden lajisto. Silloin meidän pitäisi arvioida tulevaisuutta aivan eri tavoin kuin nyt. Tällä hetkellä kaikkea biodiversiteetin tutkimusta tehdään asetelmissa, jotka korostavat lajirikkuutta sekä nykyisten asukaslajien biomassan kasvua ja niiden tuottamaa biomassaa.²¹ Sen sijaan täytyisi esimerkiksi arvioida reunaehtoja sille, että vältetään positiivisia takaisinkytkentävyöryjä, jotka vievät planeetan kohti Marsin tai pikemminkin Venuksen kaltaista kohtaloa. Näin ahdistava projekti arkistoidaan helposti science fictionin joukkoon, mutta se on paljon todennäköisempi tulevaisuudennäkymä kuin se, johon eläinten suojelijat pyrkivät.

Jälkikirjoitus

Minusta näyttää tulleen vakituinen antroposentrisen ekologian kiintiökriitikko. Näin ei toki käynyt vahingossa, mutta ei se kovin paljon tyydytystä tuota. Sanotaan nyt kuitenkin rehellisesti, etten pidä kovin järkevänä tuhlata paljon aikaa, työtä ja ajatuksia suojellakseen maailmaa, jonka olemassaolon ehtoja me tuhoamme päätä pahkaa. Lisääntynyt ymmärryksemme evolutiivisista prosesseista tarjoaa laajemman perspektiivin, joka on edes kiinnostava: etenkin kun se ei lupaa juuri mielenrauhaa.

*Suomentanut Ville Lähde.
Kiitokset Yrjö Hailalle avusta.*

Viitteet

1. West-Eberhard 2003. Tässä kirjoituksessa esitetyt näkemykset perustuvat lähes kokonaan tuon teoksen taitavaan esitykseen – tai omaan tulkintaani siitä.
2. Olemme aiemmin yhdistäneet tämän logiikan Pierre Bourdieun ajatukseen ”rakentuneista rakentavista rakenteista” (*structured structuring structures*). Ks. Haila & Dyke 2006.
3. Ks. *Nature*, numero 437 (1 September 2005), artikkelit sivuilla 47–108.
4. Hill & Walsh 2005, 65.
5. The Chimpanzee Sequencing and Analysis Consortium 2005, 73.
6. West-Eberhard 2003, 27, 28.
7. Se oli myös luonnontieteilijöiden ja filosofien patrioottinen panos Kylmässä sodassa – eli lysenkolaisuuden refutoimisessa.
8. Sukusolua laajempi käsite: monisoluisen olennon lisääntymissolu [suom.huom.]
9. ”That genetically accommodated phenotypic novelties originate with novel inputs and developmental plasticity is a simple Darwinian explanation of adaptive design that depends neither on random mutation nor biblical miracles.” (West-Eberhard 2003). Ilmaisu *genetic accommodation* on peräisin C. H. Waddingtonilta eikä sille ole olemassa vakiintunutta käännöstä – itse asiassa ei edes vakiintunutta merkitystä muualla kuin Waddingtonin omassa tuotannossa. Termin epämääräinen käyttö kuvaa enemmänkin hankaluutta löytää mielekästä tapaa puhua geenien roolista. *Plastisuus* viittaa tässä yhteydessä mukautuvaisuuteen ja joustavuuteen kehityksessä. Lainauksen loppu liittyy viime vuosien yhdysvaltalaiseen uusreationistiseen keskusteluun. [suom.huom.]
10. *Gene silencing* on yleiskäsite tietyille geenien säätelyprosesseille. Yksinkertaistaen sanottuna, niissä geenin ilmentyminen ”kytketään pois päältä”. [suom.huom.]
11. *Meioosi* on prosessi, ja kuten kaikki muutkin kromosomitason prosessit se tapahtuu kehossa, tässä tapauksessa vanhemman kehossa. Jos keho sattuu kuulumaan mehiläiskuningattarelle, vaikuttavat sukusolun muodostumiseen sen elimistöä, hormoneista ja muualta kumpuavat tekijät. Kasvien sukusolujen muodostuminen on kytkeytynyt kompleksisesti kaikkensortisiin ympäristön virikkeisiin, jotka muuntavat jälkikasvun geenien ilmentymisen kuvastoa. Valinta on mitä ilmeisimmin määrittänyt, että ainakin joissain tapauksissa ituradan plastisuus on edullisempaa kuin täydellinen siveys.
12. Valitettavasti Warren G. Abrahamsonin ja Arthur E. Weisin teos *Evolutionary Ecology across Three Trophic Levels: Goldenrods, Gall-makers, and Natural Enemies* (Princeton University Press, Princeton 1997) ei ole osunut West-Eberhardin haaviin. Tämä tärkeä kirja perustuu yhteen tämän hetken tinkimättömimmistä ja hienostuneimmista pitkäkestoisista tutkimusohjelmista. Se kuvaa *Eurosta*

- suvun hyönteisten muuttuvia mieltymyksiä piiskuihin (*Solidago*). [Hyönteiset laskevat muniaan piiskuihin – suom. huom.] Opportunismien tuomat hyödyt ovat tässä tapauksessa ilmeisiä.
13. Katso esimerkiksi Jablonka & Lamb 2005, Callebaut & Rasskin-Gutman 2005 sekä Watson 2006. [*Evo-Devo* eli *Evolutionary Developmental Biology* tai *Evolution of Development* käsittelee yksilönkehitysprosessien kehitystä. – suom. huom.]
 14. Jablonka & Lamb 2005.
 15. Useimmat kirjoittajat kutsuisivat kehää moduuleiksi eivätkä pitäisi DNA:ta modulaarisena, mutta tekisivät silti saman vastakkainasettelun. Tässä yhteydessä ero on puhtaasti terminologinen. Voidaan kuitenkin kysyä, olisivatko itse geenit modulaarisia kehien tapaan. [Dyke]
 16. Jablonka & Lamb 2005, 119–121.
 17. Katso esimerkiksi viitteen 13 lähteet.
 18. Vielä akuutimpi kysymys on se, että meillä voi olla syitä säilyttää *Homo sapiens sapiens*, vaikka tuon lajin sukupuutto olisi paras tapa säilyttää biodiversiteettiä.
 19. Biodiversiteetti seuraa Herakleitosta mieluummin kuin Parmenidesta – jos nuo nimet sattuvat merkitsemään jotain.
 20. Erään uuden tutkimuksen mukaan sademäärä on savanneja hallitseva tekijä, mutta sademäärän riittämättömyys tekee lehtien ja ruohojen syöjistä tärkeitä.
 21. Toimistostani löytää uusimman *Naturen* numeron, jos kaipaa lähteitä.

Kirjallisuus:

- Callebaut, Werner & Rasskin-Gutman, Diego (toim.), *Modularity: Understanding the Development and Evolution of Natural Complex Systems*, The MIT Press, Cambridge 2005.
- The Chimpanzee Sequencing and Analysis Consortium, ”Initial sequence of the chimpanzee genome and comparison with the human genome”, *Nature*, 437 (1 September 2005), s. 69–87
- Haila, Yrjö & Dyke, Chuck (toim). *How Nature Speaks: The Dynamics of the Human Ecological Condition*, Duke University Press, Durham and London, 2006.
- Hill, Robert Sean & Walsh, Christopher A., ”Molecular insights into human brain evolution”, *Nature*, 437 (1 September 2005), s. 64–68
- Jablonka, Eva & Lamb, Marion J., *Evolution in Four Dimensions: Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life*, The MIT Press, Cambridge 2005.
- Watson, Richard A., *Compositional Evolution: The Impact of Sex, Symbiosis, and Modularity on the Gradualist Framework of Evolution*, The MIT Press, Cambridge 2006.
- West-Eberhard, Mary Jane, *Developmental Plasticity and Evolution*, Oxford University Press, New York etc. 2003