

# MAAPALLON ELÄMÄN VAIHEET

Ainoa tuntemamme biosfääri eli ”elonkehä” on maapallolla. Biosfääri on elämän prosessien kattava osa maapallon pintakerrosta. Kaikki maapallon pintaosien kerrostumat – ilmakehä, vesikehä, maaperä, kallioperän sedimenttikivilajit – ovat maapallon elävän kokonaisuuden muokkaamia. Se, että elämän historia on luonut maapallon nykyisen geofysikaalisen ja kemiallisen hahmon on uusi oivallus, jonka nosti keskusteluun James Lovelockin (1979) esittämä Gaia-hypoteesi. Hypoteesin olettamus, että biosfääri on aktiivisesti säädellyt maapallon fyysikaalista ja kemiallista hahmoa on kiistanalainen. Yleisesti on kuitenkin hyväksytty, että biosfääri on muovannut maapallon pintakerrosten kemian nykyiselleen.

Kuinka maapallon biosfääri on syntynyt? Kuinka eloton maapallo on muuttunut elolliseksi? Elämän varhaisimmat muodot ilmaantuivat kaikesta päättären sängen pian planeettamme fyysisen hahmon vakiinnuttua. Maapallon ”ikä” on noin 4,5 miljardia vuotta. Elämän varhaisimmat merkit periytyvät vajaan neljän miljardin vuoden takaa.

Maapallon alkuvaiheet ovat suoranaisen empiirisen tietämyksen tavoittamattomissa. Analyttisten menetelmien kehittyminen on kuitenkin parin viime vuosikymmenen aikana tuonut paljon lisää empiiristä aineistoa elämän varhaisten vaiheiden selvittämiseksi. Tärkein tekijä on ollut molekyylibiologian valtava kehitys. Sekä organismien geenistön (DNA:n) koostumuksessa sekä metabolielle tärkeiden makromolekyylien rakenteissa on identifioitu evoluution tuottamaa vaihtelua, jonka avulla kehityshistorian alkuvaiheita voidaan selvittää.

Nykyisen käsityksen mukaan evoluution hahmossa korostuvat ”transitiot” eli siirtymät. *The Major Transitions in Evolution* (Maynard Smith & Szathmáry 1995) on aihepiirin mo-

derni klassikko. John Maynard Smith (1920–2004) oli yksi 1900-luvun merkittävimmistä matemaattisesti painottuneen populaatio-genetiikan kehittäjistä. Eörs Szathmáry on periytyvyyden mekanismeja tutkiva biokemisti. Kirja perustuu empiiriseen tutkimukseen, jonka tuloksia ja päätelmiä tekijät esittelevät. Teos ei ole kaikilta osin helppolukuinen, mutta lukija saa kokonaisuudesta hyvän kuvan vaikka hyppäisi teknisesti hankalien jaksojen yli.

Maynard Smith ja Szathmáry pitävät transitioiden tärkeimpänä piirteenä uusien organisaatiotasojen vakiintumista aiemmin itsenäisinä toimineiden yksiköiden kytkeydyttyä yhteen uudenaikaisiksi itsenäisiksi kokonaisuiksi. Transitioiden tulkitsemiseen liittyy ongelma: Miten voidaan ymmärtää se, että aiemmat yksiköt ovat luopuneet itsenäisyydestään uudella organisaatiotasolla vakiintuneen yksikön vakauttamiseksi? Maynard Smith ja Szathmáry asettavat ensi sijalle muutokset informaation välittymisen mekanismeissa. He tunnistavat elämän historiassa kymmenen transitiota. Jäsennän ne seuraavassa kolmeksi ryhmäksi ja käytän esittelystä tukenani aihepiiriä koskevaa muuta uutta kirjallisuutta.

## [1] ELÄMÄ VAKIINTUU

Vakiintuneen elämän varhaisimpia edustajia ovat olleet itsenäisinä elävät yksisoluiset organismit. Itsenäisen solun muodostama organismi kykenee tuottamaan itsensä kaltaisia jälkeläisiä eli ”replikoitumaan”, sillä on välittömästi ympäristöstään eristynyt itsenäinen metabolia, ja sille on muodostunut yksilöllistä muuntelua ylläpitävä perinnöllisyyden mekanismi, joka luo edellytykset menestyvyyden (kelpoisuuden) eroille ja luonnonvalinnalle. Elämän va-

kiintuminen on siis edellyttänyt ”protosolun”, joka on sulkenut sisäänsä itsenäisesti replikoituvat molekyylit ja kytkenyt ne metaboliaa ylläpitäväksi verkostoksi. (Harold 2014.)

Mutta missä on voinut muodostua riittävän vakaat olosuhteet ensimmäisten protosolujen syntymiselle? Millaisista kemiallisista lähteistä ne ovat saaneet energiansa? Millainen mekanismi on kytkenyt energianlähteet yhteen solujen metaboliaa ylläpitävän kemian kanssa? Miten protosolut ovat voineet säilyä vakaina hajoamatta ympärillä vellovien fyysikaalis-kemiallisten mullistusten pyörteisiiin?

Darwinilta on periytyneet elämän synnyn olosuhteita kuvaava metafora ”lämmin pieni lampi”. On kuitenkin ilmeistä, että varhaisten protosolujen metabolia ei olisi voinut säilyä eristyneenä ja vakaana ”pienessä lammessa”. Nykyisin pidetäänkin todennäköisenä, että protosolut vakiintuivat fyysikaalisesti eristyneissä olosuhteissa. Biokemisti Nick Lane (2009, 2015) on esittänyt käsityksestä yhteenvedon. Lyhyesti sanoen: Elämän varhaiset muodot ovat oletettavasti saaneet alkunsa läheltä valtamerten keskiselänteisiin muodostuvia purkausaukkoja, joista mineraalipitoista, vedensekaista materiaa työntyy maapallon jähmettyneen kuoren alta meriveteen. Keskiselänteet sijaitsevat useiden kilometrien syvyydessä vyöhykkeissä, missä mannerlaatat erkanevat toisistaan. Purkautumispaikkoja on kahta tyyppiä: kuumia (useita satoja asteita) ja lämpimiä (60–90 astetta). Edelliset muodostuvat sulaan magmakerrokseen asti ulottuvista purkausaukoista, mutta jälkimmäisissä olosuhteet ovat elämän vakiintumiselle suotuisimmat: Materia virtaa ylös meriveteen huokoisen aineksen läpi. Välitön ympäristö on emäksinen, ja virtaama nostaa jatkuvasti esiin varhaisten eliöiden energian ja ravinteiden tarpeita vastaavia kemikaaleja. Mikä tärkeintä, materia on jähmettyneet huokoiseksi massaksi, jossa on luonnostaan muutaman mikrometrin läpimittaisia onkaloita. Nämä ovat saattaneet tarjota protosolujen vaatiman suojaavan eristyksen. Lisäksi virtaaman synnyttämät mate-

rian kasautumat pysyvät vakaina jopa satoja tuhansia vuosia – siis prosolujen ajallisessa mittakaavassa ikuisuuksia.

Kun protosolut olivat vakiintuneet, ne levittäytyivät alkuperäisistä mikroskooppisista onkaloista meriin. On todennäköistä, että esitumallisten organismien (”prokaryoottien”) kaksi päämuotoa, aitobakteerit (eli eubakteerit, *Bacteria*) ja arkeonit (eli arkkikieliöt, *Archaea*) eriytyivät toisistaan tässä vaiheessa. Bakteerit ja arkkikieliöt hallitsivat maapallon elämää parin miljardin vuoden ajan. Niiden energetiikka, metabolia ja perinnöllisyyden mekanismi vakiintuivat muotoihin, jotka ovat pysyneet samoina kautta eliökunnan. Ne muodostavat vielä nykyisenkin biosfäärin biomassasta ehkä puolet, ja monipuolisen metaboliensa ja nopean lisääntymisensä ansiosta niillä on merkittävä vaikutus koko biosfäärin mittakaavassa (Whitman et al. 1998). Tätä seikkaa korostetaan usein Gaia-hypoteesin tueksi (Schneider et al. 2004).

Esitumallisten eliöiden evoluutio on tuottanut fysiologisia sopeutumia, joiden avulla ne tulevat toimeen hyvin moninaisissa ympäristöissä. Ne myös vaihtavat sujuvasti perintöainesta keskenään eri kehityslinjojen välillä. Esimerkiksi resistenssi antibiootteja vastaan siirtyy bakteerityypistä toiseen geenien vaihdon välityksellä. Laji on näiden organismiryhmien kohdalla kelvoton käsite, vaikka sitä yleisesti sovelletaan esimerkiksi yleisiin suolistobakteereihin (kuten *Escherichia coli*) sekä taudinaiheuttajiin (kuten koleraa aiheuttava *Vibrio cholerae*).

Darwinista lähtien on kuviteltu, että kehityshistoria muodostaa puumaisen rakenteen, jonka oksiston haarominen kuvastaa eri eliöryhmien keskinäisiä sukulaisuussuhteita. Tämä käsitys on hylätty. Elämän eri muodoilla on yhteinen historia, mutta sen alkuvaiheiden hahmo on kuin haarova pensasto, jonka haarat vaihtavat perimää keskenään. Pensastossa on kaksi keskittymää: aitobakteerit ja arkkikieliöt.

Nick Lanen näkemyksen mukaan esitumalliset organismit ovat kuitenkin valtavasta

kvantitatiivisesta merkityksestään huolimatta evolutiivinen umpikuja. Tämä johtuu siitä, että solujen energetiikka on liian tehotonta solujen sisäisen rakenteen monipuolistamiseksi ja koon kasvattamiseksi.

## [2] MONISOLUISET ELIÖT JA ELIÖKUNNAN ”SUKUPUU”

Elämän historian tärkein transitio on ollut aitotumallisten eliöiden (”eukaryootit”) synty. Ne ovat syntyneet solusisäisen symbioosin (”endosymbioosin”) tuloksena. Todennäköisesti symbioosin isäntäeliö on ollut suurikokoinen arkkieeliö. Sen sisään asettui pysyväksi vieraaksi bakteeri, jonka itsenäinen lisääntyminen isäntäeliön sisällä tuotti mitokondriot, solujen hengitystä ylläpitävät elimet. Bakteerisymbionttien geeneistä suuri osa on siirtynyt isäntäorganismien kromosomeihin, mutta mitokondrioilla on edelleen jäljellä pieni määrä isännästä riippumatonta genomia. Jossakin myöhemmässä vaiheessa endosymbioosiin liittyi syanobakteeri, josta kehittyivät viherhiukkaset.

Todennäköisesti mitokondrion syntyyn johtanut symbioosi toteutui ensin, ja sen jälkeiset aitotumalliset eliöt ovat kaikki yhtä ja samaa kehityslinjaa. Nick Lane esittää, että alkuperäisen symbioosin vakiintuminen oli hyvin epätodennäköinen tapahtuma. Aitotumallinen organismi on geneettisesti ”kimara”, eli perimään sisältyy sekä aitobakteerien että arkkieeliöiden geenejä. Mitokondrioiden ansiosta aitotumallisten eliöiden metabolia on paljon esitumallisia tehokkaampaa. Mitokondrioita on aktiivisesti toimivissa soluissa valtavia määriä. Aitotumallisten organismien maailmaan kehittyivät sellaiset ekologiset ravintoverkot, joita me tunnemme (Wilkinson 2006). Lisäksi aitotumalliset eliöt omaksuivat hapteen perustuvan hengityksen. Sen edellytys luonnollisesti on ollut, että vapaata happea on saatavilla. Ilmakehän happi on auringon säteilyenergiaan perustuvan yhteyttämisen tuote. Ilmakehän happipitoisuus on yksi tärkeimmis-

tä maapallon laajuisista biosfäärin kehityksen tuottamista mullistuksista (Lenton & Watson 2011).

Periytyvyyden mekanismi muuttui aitotumallisissa organismeissa radikaalisti: muodostui kaksi toisistaan selvästi erottuvaa sukupuolta, joiden perintöaineksen yhtyminen on lisääntymisen ehto. Seksin vakiintuminen on hämmentävää siksi, että sukupuolettomat organismit lisääntyisivät kaksinkertaisella teholla sukupuolisiin verrattuna. Seksin selittämiseksi on kehittynyt lukuisia teorioita (Maynard Smith 1978, Lane 2015); vakiintuneimpia ovat haitallisten mutaatioiden karsiminen populaatiosta, uusien geneettisten yhdistelmien turvaaminen sekä perimään kiinnittyvien loisten (virusten) eliminoiminen.

Aitotumallisista kantamuodoista kehittyivät monisoluiset organismit, joiden fysiologinen ja anatominen eriytyminen pääryhmiksi – kasvit ja levät, sienet sekä eläimet – hallitsee nykyisen biosfäärin hahmoa. Eläinkunnan pääryhmät erkanivat toisistaan runsaat 500 miljoonaa vuotta sitten, kasvikunnan pääryhmät eriytyivät hiukan myöhemmin (Beerling 2007). Monisoluiset organismit muodostavat siten eräänlaisen kolmihaaraisen sukupuun. Sen eri haaroihin kuuluvien lajien rakennetta säätelevä geenistö on hämmentävän samankaltaista. Tämä on yhteisen alkuperän ja kehityshistorian peruja. Sukupuun haarautumiseen johtaneita transitioita ovat tuottaneet geenien ilmenemisen (”ekspression”) muutokset (Carroll 2005). Geenien vaihtoa on esiintynyt olennaisesti vähemmän kuin esitumallisilla, ja sen merkitys aitotumallisten evoluutiolle on ollut todennäköisesti vähäinen.

Monisoluisista organismeista muodostunut elämä levittäytyi nopeasti monipuolistumisen jälkeen kuivalle maalle. Kasvit suoriutuivat tästä ensin, joskin kasvien varhaisen kolonisaation teki ilmeisesti mahdolliseksi molempia osapuolia hyödyttävä eli mutualistinen yhteiselo sienien kanssa. Sienet menestyivät mannerten epäorgaanisessa maaperässä. Eläimet seurasivat perässä. (Beerling 2007).

## [3] SOSIAALISUUS

Itsenäisinä elävien organismien välistä yhteiselämää on syntynyt jo varhain. Keskenään identtiset bakteerisolut esimerkiksi voivat muodostaa bakteerimattoja tai -kalvoja, joiden avulla ne voivat metaboliallaan hallita rajattuja ympäristöjä. Varhaisimmat bakteerimattojen tuottamat fossiilit periytyvät yli kolmen miljardin vuoden takaa (Margulis & Olendzenski 1994).

Monisoluiden organismien fysiologia on itsessään eräänlaista sosiaalisuutta: yksittäiset solut luopuvat itsenäisyydestään kokonaisuuden hyväksi. Syöpäsolujen hallitsematon jakaantuminen osoittaa, että solukon ”sosiaalisuus” on vajavaista. On kehittynyt säänteleviä mekanisme, jotka rajoittavat solujen itsenäistä jakaantumista. Lisäksi monisoluiden yksilöiden kehitys edellyttää, että geneettisesti identtisten solujen kehityslinjat eriytyvät: joistakin kehittyi lihassoluja, toisista hermosoluja, kolmansista epiteelisoluja, ja niin edelleen. Soluilla on ”muisti”, jonka avulla ne jakaantuessaan synnyttävät vain samanlaisia soluja jälkeläisikseen.

Eliökunnan tärkein sosiaalisuuden muoto on kuitenkin eri yksilöiden työnjakoon perustuvien kolonioiden muodostuminen. Sosiaaliset hyönteiset (muurahaiset, mehiläiset ja ampiaiset, termit) tarjoavat tunnettuja esimerkkejä, mutta sosiaalisuuden erilaisia muotoja esiintyy runsaasti koko eläinkunnassa. Edward O. Wilsonin klassikko *Sociobiology. The New Synthesis* (1975) on tämän moninaisuuden esittelyn rikas lähde. Wilsonin teos synnytti aikoinaan kiistoja siitä, päteekö hänen sangen geenikeskeinen näkemyksensä erityisesti

ihmisen sosiaalisuuden selittämiseen. Kiistat ovat kuitenkin paljolti laantuneet. Geneettisten mekanismien ohella sosiaalisissa ryhmissä toteutuvan oppimisen ja ryhmien sisäisen kommunikaation merkitys tulkitaan nykyisin yleisesti tärkeämmäksi kuin neljä vuosikymmentä sitten. Inhimillisen sosiaalisuuden perustana on symbolisia merkityksiä ilmaiseva kieli sekä artefaktit. Kielen ja ajattelukyvyn biologisesta perustasta on ylittämättömät esitykset kirjoittanut hermofysiologi, biologista antropologiaa tutkiva Terrence W. Deacon (1997, 2012).

Evoluution transitioita käsittelevä tutkimus on tuonut uusia vivahteita biologista evoluutiota koskeviin näkemyksiin. Muutamia esimerkkejä: Eva Jablonka ja Marion J. Lamb (2005) analysoivat geneettistä periytymistä täydentäviä informaation välittymisen moninaisia muotoja. Mary Jane West-Eberhard (2003) esittelee geneettistä mekanisme täydentävää yksilönkehityksen plastisuutta. John Odling-Smee, Kevin Laland ja Marcus Feldman (2003) ovat kehittäneet ekolokeron muokkaamista (”niche construction”) koskevan teorian, jonka avulla he analysoivat eliöiden tuottaman ympäristönmuutoksen vaikutusta luonnonvalinnan toteutumiseen.

Eri transitiot ovat toteutuneet toisistaan poikkeavien mekanismien tuloksina. Siten transitioiden tutkimus ei ole voinut olla vaikuttamatta myös evoluutioajattelun perusteisiin. Kuinka perusteellisesti niitä on tarpeen uudistaa, on avoin ja myös kiistanalainen kysymys. Massimo Pigliucci ja Gerd Müller (2010) ovat koonneet yhteen erinomaisia kysymystä arvioivia esseitä.

— YRJÖ HAILA

## KIRJALLISUUS

- Beerling, David 2007. *The Emerald Planet. How Plants Changed Earth's History*. Oxford University Press, Oxford.
- Carroll, Sean B. 2005. *Endless Forms Most Beautiful: The*

*New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom*. W.W Norton & Co, New York.

- Deacon, Terrence 1997. *The Symbolic Species. The Co-evolution of Language and the Brain*. W.W. Norton & Co, New York.

- Deacon, Terrence 2012. *Incomplete Nature. How Mind Emerged from Matter*. W.W. Norton & co, New York.
- Harold, Franklin M. 2014. *In Search of Cell History. The Evolution of Life's Building Blocks*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Jablonka, Eva & Marion J. Lamb 2005. *Evolution in Four Dimensions. Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Lane, Nick 2009. *The Life Ascending. The Ten Great Inventions of Evolution*. Profile Books, London.
- Lane, Nick 2015. *The Vital Question. Energy, Evolution, and the Origins of Complex Life*. W.W. Norton & Co, New York.
- Lenton, Tim & Andrew Watson 2011. *Revolutions That Made the Earth*. Oxford University Press, Oxford.
- Lovelock, James 1979. *Gaia: A New Look at the Life on Earth*. Oxford University Press, Oxford.
- Margulis, Lynn & Lorraine Olendzenski 1992. *Environmental Evolution. Effects of the Origin and Evolution of Life on Planet Earth*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Maynard Smith, John 1978. *The Evolution of Sex*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Maynard Smith, John & Eörs Szathmáry 1995. *The Major Transitions in Evolution*. Oxford University Press, Oxford.
- Odling-Smee, F. John, Kevin N. Laland & Marcus W. Feldman 2003. *Niche Construction. The Neglected Process in Evolution*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Pigliucci, Massimo & Gerd B. Müller (toim.) 2010. *Evolution. The Extended Synthesis*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Schneider, Stephen H., James R. Miller, Eileen Crist & Penelope J. Boston (toim.) 2004. *Scientists Debate Gaia. A New Century*. MIT Press, Cambridge, MA.
- West-Eberhard, Mary Jane 2003. *Developmental Plasticity in Evolution*. Oxford University Press, Oxford.
- Whitman, William B., David C. Coleman & William J. Wiebe 1998. Prokaryotes: The unseen majority. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*. 95, 6578–6583.
- Wilkinson, David 2006. *Fundamental Processes in Ecology, an Earth Systems Approach*. Oxford University Press, Oxford.
- Wilson, Edward O. 1975. *Sociobiology. The New Synthesis*. Harvard University Press, Cambridge, MA.