

# SOSIAALISET MATERIAALINSIIRROT EVOLUUTION LEIKKIKALUNA

Mitä yhteistä on siemennesteellä, äidinmaidolla, sammakonkuttua ympäröivällä limalla ja termiittien ulosteilla? Kaikki nämä ovat biologisia materiaaleja, joilla eläimet siirtävät resursseja ja hormoneja yhden yksilön ruumiista toiseen. Tällaiset sosiaalisessa vuorovaikutuksessa siirrettävät materiaalit ja niiden molekyylikoktailit hallinnoivat meidän nisäkkäidenkin elämää vahvemmin kuin kuvittelemme.

**S**osiaalisuuden evoluutio on yksi elämän suurimmista ihmeistä. Kilpailua painottavassa nykyculttuurissamme evoluutio esitetään usein kylmänä prosessina, joka johtaa itsekäimpien ja vahvimpien väistämättömään voittoon lempeiden ja pyyteettömien kustannuksella. Tämä ei voisi olla kauempana totuudesta!

Kaikkein erakkomaisinkin eliö, jokaikinen bakteeri, metsiemme mustikkavarvikot tai meren aavalla yksin vaeltava valashai, on kehittynyt sosiaalisen evoluution tuloksena. Kaikki eliöt eivät *käyttäydy* sosiaalisesti jokapäiväisessä elämässään, siinä mielessä että ne varta vasten hakeutuisivat lajitoveriensä seuraan. Silti ne vuorovaikuttavat aina lajitoveriensä kanssa jossain vaiheessa elämäänsä. Tämä vuorovaikutus määrittää niiden selviämistä ja lisääntymistä.

Yhteistyön edut, eritoten sukulaisten kesken, ovat monissa tilanteissa huomattavasti sen kustannuksia suuremmat. Tämä on johtanut sellaisiin oleellisiin biologisiin innovaatioihin kuin monisoluisuus, vanhempainhoiva ja yhteiskuntien synty.

## SOSIAALISUUTEEN LIITTYY FYYSINEN YHTEYS

Sosiaalinen evoluutio on toki aina tasapainoteltua yhteistyön ja ristiriitojen välillä, ja mitä tiiviimmäksi vuorovaikutus muodostuu, sitä suuremmat mahdollisuudet se antaa myös itsekkyydelle ja huijaamiselle. Itsekkyuden hinta voi kuitenkin olla suuri. Evoluution kuluessa putkahtaa väistämättä esiin myös itsekkäitä ominaisuuksia, mutta yhteistyöhön nojaavissa systeemeissä ne karsiutuvat kustannustensa vuoksi usein nopeasti pois. Sukupolvien saatossa ristiriitojen kustannuk-

## Eri yksilöiden välillä vaikuttavia hormoneja on toistaiseksi tutkittu vasta muutamien materiaalinsiirtojen yhteydessä.

sia alentamaan syntyvät mekanismeja, jotka käytännössä syventävät yhteistyötä.

Usein sosiaalisuutta tutkitaan käyttäytymispiirteiden kautta, mutta se vaikuttaa kiinteästi myös eliöiden fysiologiaan. Yhteistyötä hallinnoidaan usein molekyylitason mekanismeilla.

Eliökuntaa eniten vavisuttaneena esimerkkinä tästä on monisoluisuuden evoluutio, joka alkoi yksisoluisien eliöiden yhteistyöstä. Monisoluisen eliön eri solut kommunikoivat ja hallinnoivat kokonaisuuttaan siirtämällä resursseja ja signaalimolekyylejä solusta toiseen, syvässä fyysisessä yhteydessä.

Monisoluisuuden evoluutio on tapahtunut eliökunnan historiassa yli kaksikymmentä kertaa, ja erilaisia yksi- ja monisoluisuuden välillä vaappuvia eliöitäkin on rutkasti. Monisoluisuutta hallinnoivia mekanismeja tutkitaan laajasti (Niklas 2014), mutta vähemmälle huomiolle ovat jääneet vastaavanlaiset fyysiset yhteydet monisoluisien yksilöiden välillä.

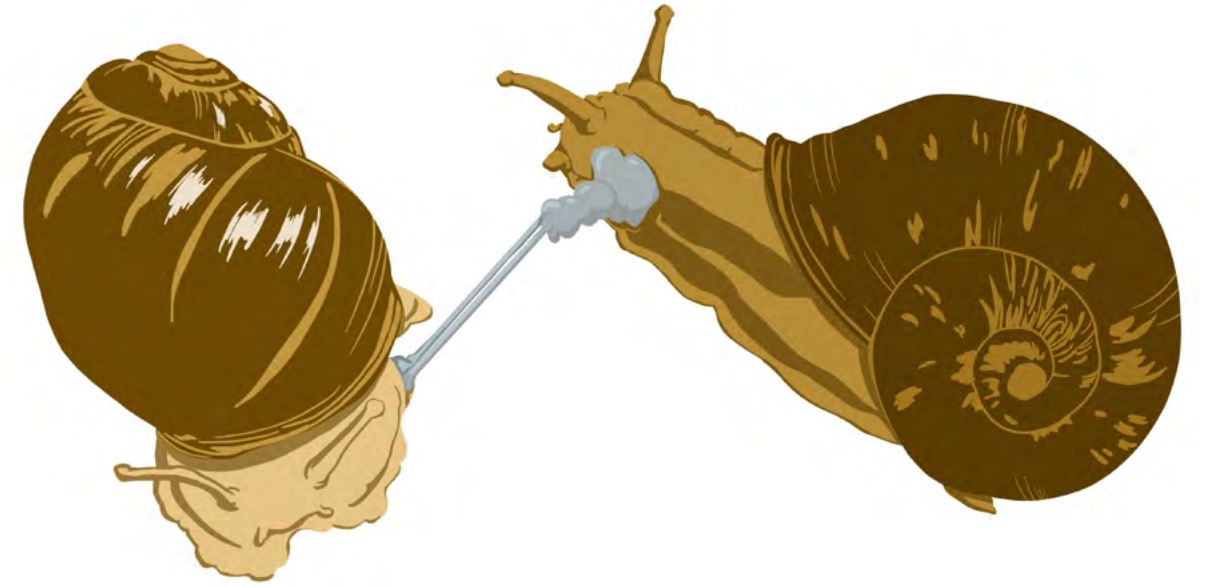
Kaikilla eläimillä on käyttäytymistä, jossa ne siirtävät erilaisia biologisia materiaaleja yhden yksilön ruumiista toisen yksilön ruumiiseen (Hakala ym. 2023). Seksuaalisesti lisääntyvät lajit siirtävät geneettistä materi-

aalia sukusolujen mukana. Vanhemmat helpottavat jälkeläistensä elämän alkuhetkiä siirtämällä niille resursseja munan mukana, tai ruokkimalla niitä mitä erilaisemmilla ruumiinnesteillä. Tarpeellisia symbiontteja, kuten ruuansulatukseen auttavia suolistobakteereja, siirretään jälkeläisille ja muille vuorovaikutuskumppaneille esimerkiksi ulosteissa ja eritteissä.

Näiden sosiaalisten materiaalinsiirtojen ympärille on tyypillisesti kehittynyt monimutkaisia käyttäytymispiirteitä ja usein myös kokonaisia elimiä, kuten peniksiä, spermarastoja, lemmennuolia, istukoita ja nännejä.

### VUOROVAIKUTUKSEN HALLINOINTIA MOLEKYYLITASOLLA

Sen lisäksi, että sosiaalisissa materiaalinsiirroissa jaetaan välttämättömiä resursseja, niissä voi siirtyä myös molekyylejä, jotka toimivat hormoneina vastaanottajan ruumiissa (Koene & Ter Maat, 2001). Näissä siirroissa siis tapahtuu samanlaista molekyylitason kommunikaatiota ja hallintaa kuin monisoluisen ruumiin sisällä. Näyttää siltä, että mitä vanhemmasta materiaalinsiirrosta on



**Monilla kotilolajeilla on parittelun aikana käytettäviä lemmennuolia, joilla ne siirtävät molekyylejä parittelukumppaninsa ruumiiseen. Näin ne voivat suoraan hallinnoida kumppaninsa fysiologiaa ja käyttäytymistä.**

kyse, sitä enemmän sen kylkeen on kehittynyt molekulaarisia hallintamekanismeja.

Eri yksilöiden välillä vaikuttavia hormoneja on toistaiseksi tutkittu vasta muutamien materiaalinsiirtojen yhteydessä – lippulaivoina siemenneste, maito ja kuningatarhyttelö, jolla tarhamehiläiset ruokkivat toukkiaan. Näissä kaikissa siirretään molekyylejä, joiden on osoitettu vaikuttavan vahvasti vastaanottajan fysiologiaan ja käyttäytymiseen.

Hedelmäkärpäsien siemennesteen tietyt molekyylit vähentävät naaraiden halukkuutta paritella uudestaan ja lisäävät välittömästi niiden munien tuotantoa, sekä muuttavat niiden ruokailu- ja leporytmejä, immuunivasteita ja aineenvaihduntaa (Hopkins &

Perry, 2022). Tarhamehiläisen kuningatarhyttelön molekyylit taas muuttavat niiden toukkien geenien ilmenemistä ja yksilönkehitystä niin, että työläisen sijaan ne kehittyvätkin suuremmiksi, pitkäikäisemmiksi ja lisääntymiskykyisiksi kuningattariksi – jotka toki aikuisina myös käyttäytyvät aivan eri tavalla kuin työläiset (Maleszka 2018).

Näiden tunnetuimpien esimerkkien lisäksi eläinkunnan eri kolkista löytyy mitä ihmeellisimpiä sosiaalisia materiaaliensiirtoja.

Parittelukumppanien väliseen molekyylitason kilpavarusteluun osallistuvat siittiöiden ja munasolujen lisäksi myös kosiolahjoina ja naaraan sukuaukon tukkivina parittelutulppina käytettävät materiaalit. Monet

etanat ja kotilot lävistävät parittelukumppaninsa kyljen erillisellä lemmenuolella, jonka mukana ei siirry sukusoluja vaan ainoastaan kumppanin fysiologiaan vaikuttavia molekyylejä.

Krottikaloilla koiras taas kiinnittyy pysyvästi naaraan ruumiiseen, ja toimii koko loppuelämänsä kuin elimenä, joka on suorassa veriyhteydessä naaraaseen. Kaikilla eläimillä siemennesteen molekyylit vaikuttavat parittelukumppanin lisäksi myös jälkeläisen geenien ilmenemiseen ja kehitykseen, ja samoin toimivat monet munasolun mukana siirtyvät molekyylit. Näin vanhempien on mahdollista hallinnoida jälkeläisten kehitystä suoraan molekyylitasolla.

Vanhempien kyky päättää jälkeläistensä kohtalosta ei lopu hedelmöitykseen, vaan usein ne panostavat vanhempainhoivaan laajemminkin. Sen tyypillisin muoto on muniin pakattu resurssipaketti, jonka jälkeläinen käyttää energiakseen kehityksensä alkumetreillä. Samalla siirrettävät molekyylit vaikuttavat jälkeläisten kehitysnopeuteen, fysiologiaan ja myöhempään menestykseen. Emot voivat jättää erilaisia materiaaleja myös munien ulkopuolelle, kuten sammakonkudussa, tai munia ylimääräisiä munia jälkeläisten syötäviksi.

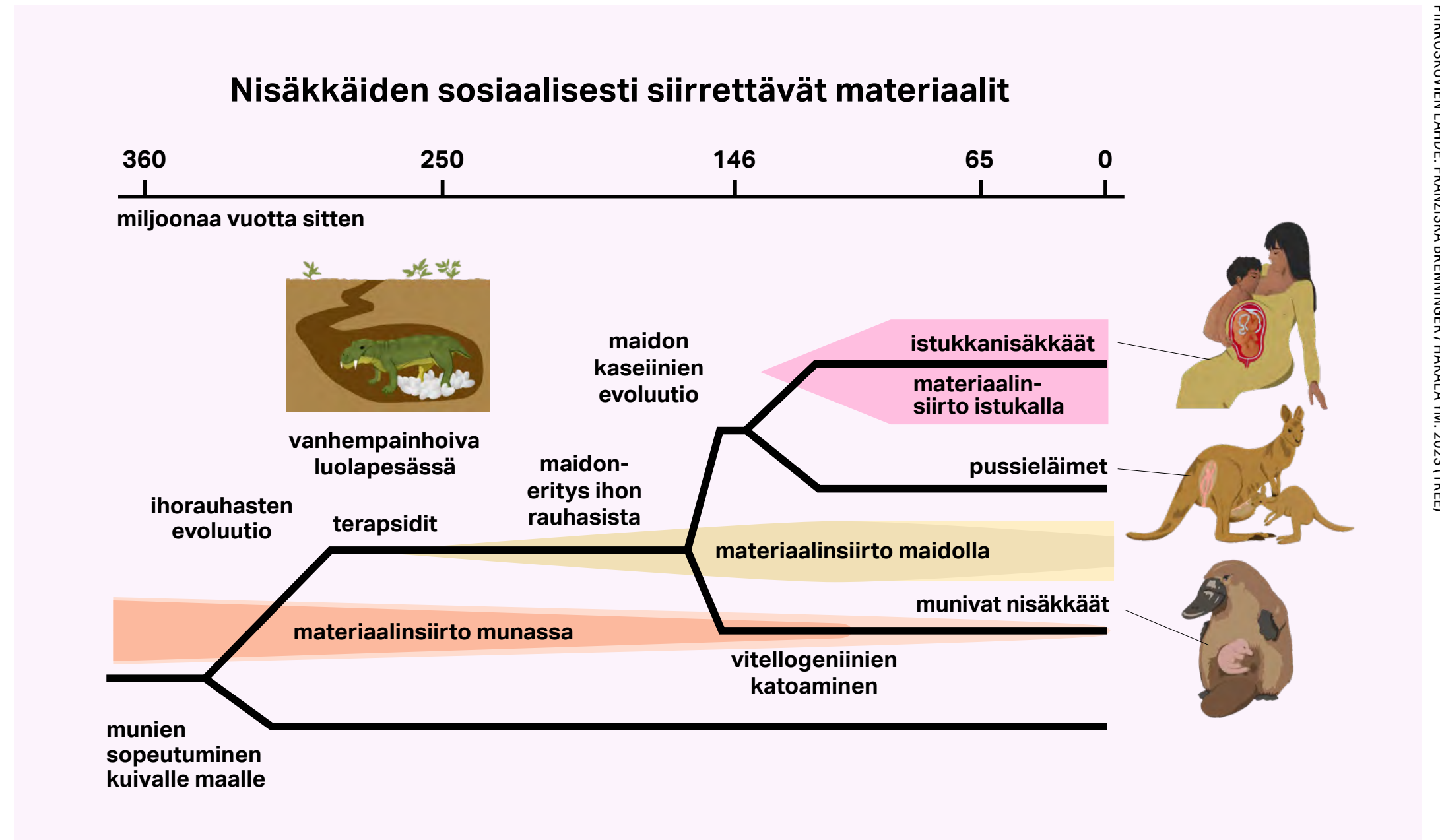
Monet eläimet kiekkokaloista puluihin ja laakamadoista hämähäkkeihin erittävät erilaisia limoja ja maitoja jälkeläisten ravinnoksi niiden elämän alkutaipaleella. Joillakin on kehittynyt jopa erillisiä ruokinta-

elimiä, kuten nisäkkäiden rintarauhaset jälkeläisten ruokkimiseen tai vampyyrimuurahaisten toukkien kylkihanat, joista pesän aikuiset käyvät juomassa. Sadoissa eri eläinkunnan haaroissa, hirvikärpäsistä kyykäärmeisiin ja ihmisiin, jälkeläiset kehittyvät

emonsa sisällä, mihin liittyy sosiaalista materiaalinssiirtoa ja hormonaalista kehityksen hallinnointia.

Yllä listatuista esimerkeistä havainnee, kuinka massiivisia evolutiivisia, fysiologisia ja käyttäytymisvaikutuksia materiaalien

mukana siirtyvillä molekyyleillä voi olla. Valtaosassa tunnetuista tapauksista siirrettäviä molekyylejä tai niiden vaikutuksia ei kuitenkaan ole vielä lainkaan tutkittu. Edes maidon tai siemennesteen kaikkia vaikutuksia ei vielä tunneta.



Jälkeläisten hoivaan liittyvät materiaalinssiirrot ovat olleet oleellisen tärkeitä nisäkkäiden evoluutiossa.

## Monet näiden materiaalien kuljetus- ja vakautusmolekyylit voinee valjastaa sekä lääketieteen että esimerkiksi tuholistorjunnan avuksi.

### NISÄKKÄIDEN EVOLUUTIO MATERIAALINSIIRTOJEN KAUTTA

Yksi nisäkkäiden määrittävimmistä ominaisuuksista on maidon kautta tapahtuva sosiaalinen materiaalin siirto emolta jälkeläiselle. Maidon mukana kulkeutuu paljon muutakin kuin ravintoa: hormoneja, kasvutekijöitä, vasta-aineita ja muita immuunipuolustukseen liittyviä molekyylejä, jopa kokonaisia soluja. Ihmisenkin maidon molekyylit on osoitettu vaikuttavan jälkeläisten terveyteen jopa aikuisuuteen asti, suojaten heitä infektioilta, liikalihavuudelta ja diabetekselta.

Maidon mukana siirtyy reilusti myös mikrobiomia tukevia ainesosia. Onkin arveltu, että maidon evoluution alkupiste liittyy kaukaisten matelijaesiäittemme munien kosteuttamiseen ja mikrobitasapainon ylläpitämiseen (Lefèvre ym., 2010). Oli miten oli, sittemmin maito kehittyi tärkeäksi nuorten nisäkkäiden ravinnoksi, ja korvasi kokonaan aiemmin munien kautta ta-

pahtuneen materiaalin siirron emolta jälkeläisille. Tämä näkyy nisäkkäiden genomissa uusien geenien kuten kaseiinien syntynä, ja vanhojen munissa tärkeiden geenien kuten vitellogeniinien katoamisena.

Istukallisilla nisäkkäillä osa maidon tehtävistä siirtyi myöhemmin taas uuden sosiaalisen materiaalin siirron vastuulle: meidän kehityshaarassamme emo siirtää ravintoa ja molekyylejä jälkeläiselle myös istukan ja napanuoran kautta.

Samalla istukallisten nisäkkäiden maito muuttui yksinkertaisemmaksi verrattuna vaikkapa kenguruihin, joiden maidon koostumus vaihtelee paljon enemmän jälkeläisen kehitysvaiheen mukaan. Istukan kautta tapahtuva materiaalin siirto avasi uusia ovia sekä fysiologiamme että genomimme muuttumiselle. Erityisen jännittävää on, että istukan toimintaa alkoivat ohjata osittain samat geenit, jotka liittyivät myös maidontuotantoon (Guernsey ym. 2017).

Nisäkkäiden evolutiiviset innovaatiot, ensin maito ja sitten materiaalin siirto istukan kautta, mahdollistivat emolle yhä tehokkaamman, nopeasti muuteltavan ja pitkäkestoisen keinon hallinnoida jälkeläisen kehitystä. Näiden piirteiden evoluutio mahdollisti myös muita jälkeläisten hoivaamiseen ja sosiaalisuuteen liittyviä käyttäytymispiirteitä, jotka ovat sittemmin tehneet meistä nisäkkäistä niin menestyksekkäitä.

### EVOLUTIIVISIA SAMANKALTAISUUKSIA JA UUTUUKSIA

Nykymetodeilla, kuten tarkoilla molekyylitason kokonaisuuksien analyyseillä, on verrattain helppoa selvittää siirrettävien materiaalien koostumus. Myös fysiologisten vaikutusten äärelle päästään koko ajan paremmin (Hakala ym. 2023.)

Sen lisäksi, että sosiaalisia materiaalin siirtoja tapahtuu kautta koko eliökunnan, niiden evoluutio näyttää myös noudattaneen hämmästyttävän samankaltaisia linjoja eliölajista ja materiaalityypistä toiseen. Kaikkien siirrettävien materiaalien molekyylit ovat osittain samantyyppisiä.

Näissä materiaaleissa on tyypillisesti esimerkiksi immuunipuolustukseen liittyviä molekyylejä kuten vasta-aineita, antioksidantteja, DNAaseja ja RNAaseja. Suoran fysiologisen kanavan avaaminen kahden yksilön välille on aikamoinen riski, ja sen minimoi-

minen siirrettävää materiaalia suojeleminen ja vastaanottajan puolustusjärjestelmää avittamalla lienee kannattavaa.

Toinen merkittävä molekyyliluokka ovat erilaiset muita molekyylejä kuljettavat ja vakauttavat molekyylit, kuten RNA:n ja lipidi- eli rasva-aineiden kuljetukseen keskittyvät proteiinit. Kaikista tähän mennessä tutkituista sosiaalisesti siirrettävistä materiaaleista on löytynyt myös tetraspaniini-kalvoproteiineja, jotka ovat tyypillisiä eksosomien tunnusmerkkejä. Eksosomit ovat lipidikalvon ympäröimiä rakkuloita, jotka kuljettavat molekyylejä elimistön sisällä solusta toiseen, ja voivat siten muuttaa vastaanottajasolun toimintaa. Tutkimusnäkökulmasta on mielenkiintoista kysyä, onko niillä samanlainen rooli materiaalin siirroissa yksilöstä toiseen.

Sosiaalisesti siirrettävissä materiaaleissa havaitaan usein jopa keskenään tismalleen samoja molekyylejä, vaikka siirron evolutiivinen alkuperä olisi täysin erillinen. Esimerkiksi hevosmuurahaisten kupumaidossa, jolla ne ruokkivat pesän muita jäseniä, on monia samoja proteiineja kuin hedelmäkärpästen siemennesteessä. Toisaalta toiset muurahaisten kupumaidon proteiineista ovat samoja kuin nisäkkäiden maidon proteiinit.

Tälle samankaltaisuudelle lienee ainakin kaksi selitystä. Ensiksikin pohjimmiltaan kaikkien näiden materiaalien evoluutiota ohjaavat samankaltaiset valintapaineet, sekä hyötyjen että fysikaalisten ja kemiallisten



KUVANLÄHDE: FRANZISKA BRENNINGER / HAKALA VM. 2023 (TREE)

**Monilla muurahaislajeilla kaikki pesän jäsenet ovat jatkuvasti yhteydessä toisiinsa suusta suuhun tapahtuvan ruokinnan kautta. Adria LeBoeuf ja Sanja Hakala tutkivat näin siirrettäviä molekyylejä.**

rajoitteiden osalta – sosiaalisesti siirrettävälle materiaalille on siis ehkä olemassa jonkinlainen toiminnallisuuden mahdollistava peruskoktail. Toiseksi on todennäköistä, että näiden materiaalien molekyylimekanismien lähtökohtana ovat toimineet ne mekanismit, jotka hallinnoivat monisoluisen ruumiin eri solujen välisiä materiaalinsiirtoja. Tällöin sosiaalisesti siirrettävät materiaalit ovat samaa sosiaalisen evoluution jatkumoa monisoluisuuden evoluution kanssa.

Nämä materiaalit ovat kuitenkin myös tietyillä tavoilla uniikkeja. Niissä havaitaan usein jopa kokonaan uusia proteiineja, joiden vaikutusta emme vielä tunne. Tämä viit-

taa siihen, että perusrajoitteista huolimatta evoluutio on myös melko vapaa muuttamaan niiden koostumusta. Sosiaaliset materiaalin-siirrot ovat siten erinomainen leikkikalu nopealle evoluutiolle! Niiden molekyylidikotailit tuntuvat myös vaihtelevan ympäristön ja tilanteen mukaan, mikä vahvistaa niiden mahdollisuutta kehittyä tehokkaaksi sosiaalisen vuorovaikutuksen hallintakeinoksi.

### **KUINKA PARANTAA TUTKIMUSYHTEISTYÖTÄ, JA MIKSI?**

Tällä hetkellä valtaosa sosiaalisten materiaalin-siirtojen tutkimuksesta tapahtuu käyt-

täytymisekologian, biokemian, lääketieteen tai maataloustieteen erillisillä tutkimusaloilla, eikä tarkastele niitä evoluutioteorian valossa. Maidon tutkijat eivät keskustele siemenesteen tutkijoiden kanssa, muurahaisasiantuntijat eivät tunne nautatutkijoita. Tämä rajoittaa kykyämme analysoida näitä materiaalin-siirtoja yhtenäisenä evoluution ilmiönä.

**Adria Leboeuf** on Cambridgen yliopiston eläintieteen laitoksen professori, joka on viime vuosina pyrkinyt tuomaan sosiaalisten materiaalin-siirtojen tutkijat yhteen erillisten alojensa siiloista. Aiheen ympärille onkin syntymässä kansainvälinen yhteistyöverkosto, joka edistää näiden materiaalien tutkimusta kaikilla tasoilla molekyyleistä fysiologiaan ja käyttäytymiseen, sekä evoluutioteoriaan ja sovelluksiin asti.

Sosiaaliset materiaalin-siirrot ovat tehokas ja eläinkunnassa yleinen keino, jolla yksi yksilö voi suoraan vaikuttaa toiseen. Ne ovat hyvin fyysinen hallintakeino yksilöiden välisen yhteistyön ja ristiriitojen tasapainolle. Siten ne tarjoavat myös tutkijoille hyvin fyysisen ja käytännöllisen tavan tutkia tätä muuten vaikeasti mitattavaa prosessia – ja mahdollisesti jatkossa horjuttaa vaikutuksia haluttuun suuntaan.

Sovellusten osalta tällä hetkellä tutuimpia ovat erilaiset lääketieteen mittarit, kuten sperman molekyyliden analysointi hedelmällisyyteen liittyen, ja äidin ja sikiön hyvinvoinnin tarkkailu lapsiveden molekyyliden avulla. Maa-

taloustieteen puolella lehmänmaidon molekyylejä analysoidaan sekä lehmien terveyden että ruuantuotannon laadun näkökulmasta.

Näiden materiaalien eri molekyylit toimivat usein myös lajirajojen yli, mikä mahdollistaa kiinnostavia sovelluksia. Jo kauan on tiedetty, että tietyt munien tai maidon proteiinit auttavat tehostamaan sperman kylmäsäilytystä. Tarhamehiläisten kuningatarhyttelön pitkää ikää ja terveyttä tukevat molekyylit toimivat myös, kun sitä käytetään nisäkkäiden ravintolisänä.

Laajemmin ajateltuna monet näiden materiaalien kuljetus- ja vakautusmolekyylit voinee valjastaa sekä lääketieteen että esimerkiksi tuholistorjunnan avuksi. Maidon kykyä kuljettaa pieniä molekyylejä, probioottisia bakteereja ja lääkkeitä on tutkittu viime vuosina laajasti.

Adria Leboeuf kollegoineen uskoo, että sosiaaliset materiaalin-siirrot ovat tärkeämpiä kuin tällä hetkellä ymmärretään. Ne ovat molekulaaristen ja fysiologisten prosessien ja käyttäytymispiirteiden monimutkainen kokonaisuus, joka tarjoaa evoluutiolle valtavasti erilaisia leikittelysuuntia kautta koko eliökunnan.

—  
*Sanja Hakala on Sveitsissä Lausannen yliopistossa työskentelevä tutkijatohtori, joka tutkii sosiaalisuuden evoluutiota ja kirjoittaa*

*parhaillaan toista tietokirjaansa elonkirjosta. Hän on yksi Europpan evoluutiobiologien seuran (ESEB) Sosiaalisten materiaalin siirtojen tutkimusverkoston johtajista. Tämä teksti pohjaa verkoston jäsenten kirjoittamaan katsausartikkeliin. Aiemmin Sanja Hakala on kirjoittanut Tieteessä tapahtuu -lehteen tutkijoiden roolista ilmastoaktivisteina.*

## KIRJALLISUUS

- Guernsey, M. W., Chuong, E. B., Cornelis, G., Renfree, M. B., & Baker, J. C. (2017). Molecular conservation of marsupial and eutherian placentation and lactation. *ELife*, 6, 1–19. <https://doi.org/10.7554/eLife.27450>
- Hakala, S. M., Fujioka, H., Gapp, K., De Gasperin, O., Genzoni, E., Kilner, R. M., Koene, J. M., König, B., Linksvayer, T. A., Meurville, M. P., Negroni, M. A., Palejowski, H., Wigby, S., & LeBoeuf, A. C. (2023). Socially transferred materials: why and how to study them. *Trends in Ecology and Evolution*, 38(5), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.11.010>
- Hopkins, B. R., & Perry, J. C. (2022). The evolution of sex peptide: sexual conflict, cooperation, and coevolution. *Biological Reviews*, 97, 1426–1448. <https://doi.org/10.1111/brv.12849>
- Koene, J. M., & Ter Maat, A. (2001). "Allohormones": A class of bioactive substances favoured by sexual selection. *Journal of Comparative Physiology – A Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 187(5), 323–326. <https://doi.org/10.1007/s003590100214>
- Lefèvre, C. M., Sharp, J. A., & Nicholas, K. R. (2010). Evolution of lactation: Ancient origin and extreme adaptations of the lactation system. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 11, 219–238. <https://doi.org/10.1146/annurev-genom-082509-141806>
- Maleszka, R. (2018). Beyond Royalactin and a master inducer explanation of phenotypic plasticity in honey bees. *Communications Biology*, 1(8), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s42003-017-0004-4>
- Niklas, K. J. (2014). The evolutionary-developmental origins of multicellularity. *American Journal of Botany*, 101(1), 6–25. <https://doi.org/10.3732/ajb.1300314>