

Itsekkäät geenit sosiaalisissa yhteisöissä

Pekka Pamilo

Uusi genomitutkimus tuottaa tietoa mekanismeista, jotka säätelevät hyönteisyhteiskuntien kehitystä. Tämä tieto on läheisesti kytköksissä sukulaivalinnan teoriaan, joka selittää kehityksen suuntaviivoja ja antaa testattavia hypoteeseja. Tutkimusalue tarjoaa hyvän esimerkin siitä, miten matemaattinen evoluutioteoria yhdistyy uuteen genomitutkimukseen ja miten malliorganismitutkimuksen tietoa voidaan käyttää hyväksi lajien biologisten erikoispiirteiden selvittämisessä.

Teoksessaan *Lajien synty* Charles Darwin nosti esille kysymyksen, jonka hän katsoi muodostavan erityisen koetinkiven evoluutioteorialleen. Kysymys koski hyönteisyhteiskuntien evoluutiota, josta Darwin totesi ”Tämä vaikeus, joka ensimmältä näyttää voittamattomalta ...”. Luonnonvalinnan mukaan lajin populaatioissa yleistyvät ominaisuudet, jotka antavat kantajilleen kilpailuedun ja auttavat yksilöitä lisääntymään tehokkaasti. Darwinin ongelma oli, miten valinta voi johtaa lisääntymättömien yksilöiden kehittymiseen, sellaisiin kuin työmuurahaiset ja työmehiläiset, jotka eivät yleensä lainkaan muni vaan uurastavat yhteisönsä hyväksi.

Darwin itse hahmotteli ongelmalle ratkaisun muistuttamalla, että ”valinta voi yhtä hyvin kohdistua koko perheeseen kuin yksilöönkin”. Kesti kuitenkin sata vuotta, ennen kuin englantilainen biologi William Hamilton kehitti sukulaivalinnan nimellä kulkevan teorian, joka tarkastelee valintaa ja evoluutiota geenin näkökulmasta. Teorian perusteella voimme ymmärtää käyttäytymispiirteiden kehittymistä, jos se johtaa kyseiseen käyttäytymiseen vaikuttavien geenimuotojen runsastumiseen populaatioissa. Sukulaivalilla on yhteisiltä esivanhemmilta perittyjä identtisiä geenimuotoja, ja geenien kannalta on vähemmän tärkeää, kuka niitä siirtää eteenpäin, kunhan suku kokonaisuudessaan onnistuu tehokkaasti kilpailemaan muita sukuja vastaan.

Tämä sukulaivalinnan teoria muodostaa perustan sille, miten me tänä päivänä tulkitsemme ja ymmärrämme sosiaalisten yhteisöjen toimintaa ja erityisesti yhteiskuntahyönteisten käyttäytymistä ja evoluutiota.

Yhteiskuntahyönteisten – muurahaisten, termittien, ampiaisten, kimalaisten ja mehiläisten – perinteinen geneettinen tutkimus on hankalaa, koska niitä on vaikea kasvattaa ja risteyttää. Hyönteiset, varsinkin niiden emot eli kuningattaret, ovat pitkäikäisiä, ja yhteiskunnat vievät tilaa laboratorioissa. Genomitutkimuksen avulla voimme kuitenkin selvittää niiden geenistöä ja DNA-vertailujen perusteella voimme päätellä niiden ja muiden hyönteisten välisistä eroista. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, mitkä geneettiset tekijät vaikuttavat sosiaalisen käyttäytymisen ja yhteiskuntaelämän taustalla. Voimme jakaa ongelman kolmeen erilliseen lohkoon:

1) Sukulaival- ja geenivalinnan teoria nojautuu yksilöiden väliseen sukulaivaluuteen, koska geneeille on edullista auttaa sukulaivalyksilöä lisääntymään. Niinpä voimme teoriasta johtaa tarkkojakin ennusteita sukulaivaluuden ja käyttäytymisen välisestä yhteydestä ja testata niitä selvittämällä yksilöiden sukulaivaluuteita geneettisiä merkkiominaisuuksia käyttäen.

2) Merkkiominaisuuksiin pohjautuva tutkimus ei vielä kerro niistä geneettisistä muutoksista, joita sosiaaliseen käyttäytymiseen liittyy. Tutkimuksen tavoitteena onkin etsiä muutoksia ja sellaista lajinsisäistä geneettistä muuntelua, jotka suoraan yhdistyvät sosiaivaluuden piirteisiin.

3) Yhteiskuntahyönteisten keskeinen piirre on yksilöiden välinen työnjako, joka näkyy selvimpänä kuningattarien ja työläisten välisenä erona. Miten tämä ero määräytyy? Perustuuko se yksilöiden välisiin geneettisiin eroihin vai yksilökehityksen aikana muodostuneisiin eroihin, jotka heijastelevat geenitoiminnan erilaista säätelyä samaan tapaan kuin eri kudosten ja elinten väliset erot. Kolmantena tutkimuksen haasteena onkin selvittää, miten yksilön kehitys ohjautuu, mitkä geenit siihen vaikuttavat ja miten näiden geenien toimintaa säädellään.

Voimme siis jakaa yhteiskuntahyönteisten geneettisen tutkimuksen kolmeen osa-alueeseen. Seuraavaksi esittelen tarkemmin näitä alueita, saavutettuja tuloksia ja edessä olevia kysymyksiä.

Sukulaisvalinta

Suurin osa yhteiskuntahyönteisistä, ja kaikki ne, joita voimme täällä pohjoisessa Euroopassa tutkia, kuuluvat pistiäisten lahkoon. Näitä ovat muurahaiset, kimalaiset, ampiaiset ja mehiläiset. Pistiäisille on luonteenomaista, että niiden sukupuoli määräytyy sen mukaan, hedelmöityykö muna vai ei. Jos muna hedelmöityy eli kehittyvällä toukalla on diploidi kromosomisto, siitä normaalisti kehittyy naaras. Hedelmöittymättömästä munasta kehittyy kromosomistoltaan haploidi koiras.

Sukupuolen määräytyminen on tarkennettu hieman mutkikkaampi. Se ei nimittäin johdu pelkästään munan hedelmöitymisestä vaan tietystä geenistä. Mikäli kehittyvällä yksilöllä on kaksi erilaista kopiota geenistä eli se on sen suhteen heterotsygootti, siitä kehittyy naaras. Mikäli kopioita on vain yksi, siitä tulee koiras. Siten haploidit yksilöt kehittyvät koiriksi, mutta myös ne diploidit yksilöt jotka ovat esimerkiksi sisäsiitoksen tuloksena homotsygoottisia kyseisen geenin suhteen. Tällaiset diploidit koiraat ovat yleensä steriilejä ja muodostavat populaatiolle geneettisen taakan. Voimme siten yksinkertaistaa, että naaraat ovat diploideja ja koiraat haploideja.

Tästä sukupuolen määräytymisestä on merkittävät seuraamukset yksilöiden sukulaisuudelle. Koiraille ei ole isää, ja koirasta voi itse asiassa pitää pelkästään naaraan tuottamana sukusolujen siirtoaparaattina. Sisarukset puolestaan ovat geneettisesti hyvin samanlaisia, koska ne perivät identtiset kromosomit haploidilta isältään. Näin ollen täyssisarten välinen geneettinen sukulaisuusaste on poikkeuksellisen korkea eli 75, kun taas äidin ja tyttären välinen sukulaisuus on 50 kuten ihmiselläkin. Sukulaisuuden perusteella voimme asettaa yksilöt geneettiseen arvojärjestykseen ja ennustaa, keitä muurahaispesän jäsenten tulisi suosia. Naaraiden osalta lähisukulaisten järjestys on

täyssisarret (75 % > omat tyttäret (50 % > puolisisaret (25 %)

ja koiraiden osalta

omat pojat (50 %) > sisarten pojat (37,5 %) > veljet (25 %) > puolisisarten pojat (1,5 %)

Kun muurahaistyöläiset ovat geneettisesti naaraita, voimme todeta, että niille on edullisempaa kasvattaa täyssisaria kuin omia tyttäriä. Toisaalta

niiden kannattaisi itse munia hedelmöittymättömiä, haploideja koirasmunia ja jopa sisarenpojat ovat arvokkaampia kuin veljet. Näiden sukulaisarvojen avulla voimme laatia matemaattisen yhtälön kunkin yksilön laajennetulle lisääntymiskelpoisuudelle, jota yksilön pitäisi maksimoida, jotta sen kantamat geenit runsastuisivat.

Tarkastelu osoittaa, että yhteisön jäsenten välillä – erityisesti kuningattaren ja työläisten välillä – on geneettisiä konflikteja, jotka koskevat lisääntymistä ja yhteiskunnan yhteisten voimavarojen käyttöä. Kaikkien yhteiskunnan jäsenten yhteisenä intressinä on, että yhteiskunta on vahva ja kilpailukykyinen, mutta mielipiteet eroavat siitä, miten tuotto jaetaan. Tilanne on siten sama kuin ihmisyhteisön tuotantolaitoksissa. Hyönteisyhteiskunnissa tuotto mitataan perimältään identtisten geenien tuottamisena eli kyse on siitä, kuka onnistuu parhaiten siirtämään geeninsä seuraavaan sukupolveen. Kuningattaren ja työläisten välisessä konfliktissa voidaan erottaa seuraavat kolme perusasetelmaa, joskin yhteisöjen koostumuksen mutkistuessa konfliktitkin tulevat moninaisemmiksi:

Koiraskonflikti – Kuka tuottaa koirasjälkeläiset?

Ylläpitokonflikti – Miten käytössä olevat resurssit jaetaan pesän ylläpidon ja uusien lisääntymisyksilöiden välillä?

Sukupuolikonflikti – Miten voimavarat jaetaan koiras- ja naarasjälkeläisten kesken?

Konfliktiteorian avulla voimme tutkia, kuka viime kädessä päättää yhteiskunnan asioista, kuningatar vai työläiset. Työläisiä on usein pidetty tahdottomina yhteisön ja kuningattaren edun valvojina, mutta geneettiset tutkimukset ovat muuttaneet tätä käsitystä ja osoittaneet työläiset itsekkäiksi toimijoiksi, jotka usein pystyvät ratkaisemaan konfliktin omaksi edukseen.

Merkkigeenitutkimukset ovat myös vahvistaneet sen, mikä jo varhempien havaintojen perusteella on ollut tunnettua, eli yhteiskunnat voivat olla hyvin eri tavoin rakentuneita. Keskeistä sekä yhteisöjen toimintojen että geneettisten piirteiden kannalta on lisääntyvien yksilöiden lukumäärä. Mehiläisyhteiskunnassa on yksi emo, kuningatar, joka huolehtii munimisesta, mutta muurahaispesissä kuningattaren lukumäärä voi vaihdella yhdestä useisiin satoihin. Tällaista vaihtelua voi tavata lajin sisällä, tai lähisukuiset lajit voivat rakentaa hyvin eri tyyppisiä yhteisöjä.

Emme tiedä, mikä tekijä saa yhteisön muuttamaan sosiaalista rakennettaan siten, että pesään yhden kuningattaren asemesta tulee kym-

meniä tai satoja kuningattaria. Kuningatarten lukumäärän räjähdysmäisesti kasvaessa pesät alkavat helposti jakautua ja muodostavat suuren pesäverkoston, joka voi laajeta syöpäkudoksen tavoin.

Eurooppaan levinneen argentiinanmuurahaisen on havaittu muodostavan 6000 km pitkän yhtenäisen pesäverkoston Välimeren alueella Espanjasta Italiaan. Toinen eteläisestä Amerikasta levinnyt muurahainen, tulimuurahainen, on nykyisin Yhdysvaltain pahimpia tuholaisia, koska se on aggressiivinen, allergioita aiheuttava ja erityisen tehokas pesäverkostojen rakentaja avoimilla nurmikkoalueilla kuten laidunmailla, puistoissa, golf-kentillä ja pientareilla. Verkoston jokaisessa pesässä on runsaasti kuningattaria. Lajista tunnetaan myös toinen yhteisömuoto, jossa kukin pesä sisältää vain yhden kuningattaren. Samanlaisia sosiaalisen rakenteen muuntelua on todettu myös meillä tavallisen kekomuurahaisen sukulaisilla.

Itse asiassa kekomuurahainen tai punamuurahainen, kuten sitä myös kutsutaan, on usean lähisukuisen lajin muodostama kompleksi. Mitokondriaalisen genomien sekvenssimuutosten perusteella voimme – hieman spekulatiivisesti – arvioida, että lajiryhmä on eriytynyt paljon sen jälkeen, kun ihmisen ja ihmisapinoiden kehityslinjat erkanivat toisistaan, ja lähisukuisimmat lajit ovat ilmeisesti muodostuneet vasta sen jälkeen, kun nykyihminen aloitti levittäytymisensä Afrikasta maapallon muihin osiin. Lajinmuodostus on siten ollut nopeaa.

Osa kekomuurahaisista luonnehtii yksikuningattarinen yhteisömuoto, kun taas niiden lähisukuiset muodostavat pesäverkostoja, joissa kussakin keossa voi olla satoja kuningattaria. Tässä tapauksessa sosiaalisen muodon määräytymisessä täytyy olla jonkinlainen geneettinen ero. Mutta kumpi tuli ensin? Onko vaihtoehtoinen yhteisömuoto kehittynyt lajiutumisen jälkeen vai voiko lajin sisällä oleva sosiaalisen käyttäytymisen eroavuus johtaa lajiutumiseen?

Tähän kysymykseen ei ole selkeää vastausta, mutta sitä voi lähestyä tutkimalla populaatioiden erilaistumista lajin sisällä tapauksissa, joissa samasta lajista löytyy jyrkästi poikkeavia yhteisömuotoja. Tätä vertailua olemme tehneet tutkimalla sekä tuman DNA:n geneettistä muuntelua että mitokondrion DNA:n eroja. Mitokondrio periytyy maternaalisesti munasolussa, ja sen kehityslinjaan vaikuttaa siten vain naaras. Tuman geenit puolestaan periytyvät yhtä lailla naaraiden kuin koiraidenkin välityksellä. Näiden kahden eri tavalla periytyvän genomien osan ver-

tailu osoittaa siten myös naaraiden ja koiraiden liikkuvuuden eroja samaan tapaan kuin ihmisen mitokondrion ja Y-kromosomin avulla voidaan selvittää naisten ja miesten liikkumisen väestöhistoriallisia eroja.

Tulokset osoittavat, että monikuningattaristen pesäyhteisöjen naaraat liikkuvat rajoitetusti ja että geenivaihto samalla alueella olevien yksi- ja monikuningattaristen yhteisöjen välillä on vähäistä tai liki olematonta. Tämä viittaa siihen, että paikka paikoin muurahaispesät, joissa normaalisti on vain yksi kuningatar, hyväksyvät useita kuningattaria ja alkavat pilkkoutua rakentamalla ympärilleen pesäverkoston. Koska uudet sukupolvet voivat turvallisesti jäädä syntyneeseen verkostoon, liikkuvuus alenee ja verkosto voi ajan myötä erilaistua geneettisesti.

Useissa tapauksissa syntyneet verkostot voivat tuhoutua ympäristön muuttuessa, epidemioiden levitessä tai sisäsiitosheikkouden aiheuttaessa ongelmia. Jotkut verkostot voivat kuitenkin jatkaa eloaan menestyksekkäästi ja ajan myötä kehittyä uudeksi lajiksi. Vaikka tällainen sosiaalinen lajiutumisen ei olisikaan kovin yleistä, se vaikuttaa varteenotettavalta mahdollisuudelta ja yhdistää mielenkiintoisella tavalla lajin sosiaalisen käyttäytymisen ja yhteisörakenteen populaatioiden erilaistumiseen ja lajiutumiseen.

Sosiaaliin piirteisiin vaikuttavat geenit

Valtaosa yhteiskuntahyönteisten geneettisestä tutkimuksesta on perustunut merkkigeenien käyttöön, sukulaivalintateoriasta johdettujen ennusteiden testaamiseen ja populaatioiden geneettisen koostumuksen selvittämiseen. Tämä on ymmärrettävää käytössä olleiden menetelmien valossa, mutta myös siksi, että sukulaivalinta muodostaa sen teoriarungon, jonka avulla ymmärrämme sosiaalisuuden kehityksen. On kuitenkin selvää, että mielenkiinto geneettisen tutkimuksen kehittyessä on kiinnittynyt myös niihin geeneihin, jotka suoraan vaikuttavat sosiaaliseen käyttäytymiseen. Toistaiseksi tällaisista geeneistä tiedetään hyvin vähän.

Yksi sosiaaliseen käyttäytymiseen vaikuttavien geenien ryhmä muodostuu niistä geeneistä, jotka vaikuttavat sukulaisten tunnistukseen. Kokeellinen tutkimus, mukaan lukien omat työmme, on selkeästi osoittanut, että niin muurahaiset, mehiläiset kuin ampiaisetkin tunnistavat pesätoverinsa. Itse asiassa ne eivät välttämättä tunnista sukulaisia vaan yksilöt joilla on saman-

lainen kemia kuin pesätovereilla. Jos siirrämme toukkia pesien välillä, aikuistuva nuori muurahainen oppii uusien pesätoveriensa ominaishajun, vaikka ne eivät olekaan sukua. Luonnossa toukat eivät yleensä siirry, joten mekanismi käytännössä yhdistyy sukulaisten tunnistamiseen ja hyönteiset tunnistavat kemiallisen profiilin perusteella myös muista pesistä tulevat sukulaiset. Tunnistukseen liittyviä geenejä ei ole löydetty, mutta ne liittynevät lähinnä kitiinikuoren pinnalla olevien hiilivety-yhdisteiden tuottamiseen.

Koska itse tunnistus perustuu oppimiseen, mekanisme on myös helppo käyttää hyväksi jos haluaa huijata toisia. Tähän perustuu sosiaalinen parasitismi, jossa naaraat ovat oppineet hyödyntämään lähisukuisen lajin pesiä. Ne käyttäytyvät käen tavoin, tunkeutuvat toisen lajin pesään, saattavat tappaa siellä olleen kuningattaren ja munitilalle omia muniaan, joita isäntälajin työläiset ruokkivat ja puolustavat. Sosiaalisilla parasiiteilla ei ole omia työläisiä vaan kaikki yksilöt kehittyvät lisääntyviksi naaraiksi tai koiriaiksi.

Edellä käsiteltiin yhteisörakenteen eroja, miten toisia yhteisöjä monopolisoi yksi kuningatar, kun toisissa kuningattaria voi olla kymmeniä tai jopa satoja. Tulimuurahaisella tämä ero esiintyy lajinsisäisenä sosiaalisen yhteisörakenteen muunteluna ja yhdistyy yksilöiden geneettiseen eroon. Geneettiset tutkimukset ovat löytäneet geenin, jonka yksi sekvenssimuoto, B, yhdistyy yksikuningattariseen yhteisöön ja toinen muoto, b, monikuningattariseen pesäverkostoon. Jos kuningatar ei kannu b-geenimuotoa, monikuningattarisen yhteisön työläiset tappavat kuningattaren. Toisaalta, b-varianttia kantavat kuningattaret eivät pysty itsenäiseen pesämuodostukseen.

Näin sosiaaliset muodot määräytyvät geneettisesti. Kyseinen ero löytyi alunperin sattumalta, ja asianomainen geeni on sittemmin sekvensoitu. Rakenteensa perusteella se on tunnistettavissa feromonireseptoriksi eli sen tuottama proteiini on osallisena kemiallisessa viestinnässä. Havainto osoittaa, että verraten yksinkertainen muutos kemiallisessa viestinnässä voi johtaa kauaskantoisiin seurauksiin lajin biologiassa.

Geenitoiminnan ja yksilönkehityksen säätely

Biologiassa, erityisesti genomitutkimuksessa, on viime vuosina yleisesti alettu käyttää malliorganismeja. Ajatuksena on, että selvittämällä perusteellisesti joidenkin eri eliötyyppien edustavien lajien genomi ja geenien toiminta,

voimme käyttää saatua tietoa hyväksi myös lähisukuisten lajien biologian ymmärtämisessä. Hyönteismaailmassa mallilajina on ollut banaanikärpänen, ja saatua tietoa on käytetty hyväksi myös yhteiskuntahyönteisten tutkimuksessa.

Banaanikärpäseltä tunnetaan geeni, joka vaikuttaa kärpästen ravinnonhankintaan siten, että geenistä esiintyy ainakin kaksi eri muotoa. Toinen muoto yhdistyy kärpäsen suureen liikkuvuuteen ravinnon hankinnassa ja on siten edullinen ympäristössä, jossa ravintoa on niukalti ja kärpänen joutuu liikkumaan laajalti. Toinen muoto puolestaan saa aikaan rajoitetun liikkumisen ja valinta suosii tätä geenimuotoa alueilla, joissa ravintoa on runsaasti saatavilla. Kyseinen geeni tunnetaan nimellä *foraging* ja se liittyy energia-aienevaihduun.

Yhteiskuntahyönteisistä tiedetään, että työläisyksilöiden välillä on työnjako ja yksilöt erikoistuvat eri työtehtäviin osin iän perusteella. Niinpä nuoret mehiläiset pysyttelevät pesän sisätiloissa huolehtien siivouksesta ja jälkeläisten hyvinvoinnista. Iän karttuessa ne siirtyvät vähitellen ulkotoihin ja ravinnon hankintaan. Kun tutkittiin *foraging*-geenin ilmentymistä eri ikäisillä mehiläisillä, havaittiin, että sisätöissä olevilla nuorilla mehiläisillä kyseinen geeni ei lainkaan ilmennyt ja proteiinin tuotto geenissä alkoi vasta, kun mehiläiset siirtyivät ulos pesästä ravinnon hankkijoiksi. Sama geeni vaikuttaa siis ravinnonhankintakäyttäytymiseen niin kärpäselä kuin mehiläisellä, mutta yksilöiden väliset erot määräytyvät hyvin eri tavoin.

Mehiläisellä säädellään geenin ilmentymistä ja siten voidaan joustavasti vaikuttaa yksilöiden käyttäytymiseen. Banaanikärpäselä puolestaan yksilön genotyyppi määrää käyttäytymisen pysyvästi ja muutokset ravinnonhankintakäyttäytymisessä tapahtuvat hitaasti populaation tasolla, jos valinta alkaa suosia vaihtoehtoista geenimuotoa. Vastaava tilanne on vuorokausirytmien vaikuttavan *period*-geenin kohdalla. Nuoret, sisätöissä olevat mehiläiset ovat vuorokausirytmistä riippumattomia, ja geenin aktiivisuus kasvaa iän myötä mehiläisten siirtyessä pesästä ulos ja ravinnon hankintaan. Muilla hyönteisillä yksilöiden väliset erot pohjautuvat lähinnä perinnölliseen muunteluun ja genotyyppien välisiin eroihin. Esimerkit osoittavat, miten malliorganismitutkimusta voidaan soveltaa lajien biologian selvittämisessä.

Tässä yhteydessä on syytä huomauttaa, että työmehiläisten, samoin kuin työmuurahaistenkin, työnjako on osin myös perinnöllisten erojen

säätelämä. Mehiläisnaaras pariutuu normaalisti usean, jopa usean kymmenen kuhnurin kanssa ja varastoi siittiöt myöhempää käyttöä varten. Geneettisin analyysien työmehiläisistä voidaan siten erottaa eri täysssisarjryhmät eli työmehiläiset, jotka ovat saman kuhnurin jälkeläisiä. Tällaisten täysssisarjryhmien on havaittu jakautuvan epätasaisesti eri työtehtäviin, mikä osoittaa geneettistä taipumusta työtehtävien määrätymisessä. Ravinnonhakumatalla mehiläiset voivat kerätä joko vettä, mettä tai siitepölyä. Geneettiset analyysit ovat osoittaneet ja paikantaneet kolme geenä, jotka oleellisesti vaikuttavat siihen, mitä työmehiläiset retkillään keräävät.

Nämä esimerkit osoittavat että yhteisön toiminta, yksilöiden välinen työnjako, voi perustua osin geneettisiin eroihin ja osin geenitoiminnan säätelyyn. Näiden vaihtoehtoisten säätelymekanismien yleisyydestä on toistaiseksi hyvin vähän tietoa, emmekä vielä tiedä, ovatko eri evoluutiolinjat ratkaisseet kysymyksen eri tavoin.

Edellisissä esimerkeissä käytettiin hyväksi banaanikärpäsen genomista saatua tietoa ja tutkimus kohdistettiin haluttuun geenin ja sen ilmenemiseen. Toinen lähestymistapa on tutkia kaikkia ilmeneviä genejä siten, että eristetään soluista lähetti-RNA ja katsotaan mitkä geenit ovat toiminnassa. Vertaamalla kahta eri kehityslinjaa, saadaan selville kehityserojen taustalla olevat geenit. Tätä lähestymistapaa on käytetty verrattaessa mehiläistoukan kehittymistä työmehiläiseksi tai kuningattareksi. Kastin määrätymisen tapahtuu toukan kolmen ensimmäisen elinvuorokauden aikana ja kehitys voidaan tänä aikana ohjata uudelle uralle siirtämällä toukkaa pienen työläiskennon ja erityisen kuningatar-kennon välillä.

Eri-ikäisten toukkien geenitoimintaa selvittämällä on löydetty genejä, joiden aktiviteetti eroaa työläiseksi ja kuningattareksi kehittyvien toukkien välillä. On selvää, että kahden niin erilaisen yksilön kehitys perustuu usean geenin toimintaeroon ja kiinnostus kohdistuu usein ensisijaisesti niihin geeneihin, jotka vaikuttavat erilaistumisen alkuvaiheessa ja saavat aikaan kehityksen ajautumisen eri suuntiin. Ensimmäiset tutkimukset ovat löytäneetkin pari kandidaattigeeniä, jotka voisivat toimia tällaisina kehityksen suunnan ohjaajina.

Kastin määrätymiseen vaikuttavien geenien tunnistus on keskeisellä sijalla, kun halutaan ymmärtää, miten hyönteisyhteiskunnat kehittyvät. Onhan lisääntyvän ja lisääntymättömän kastin esiintyminen kaikkein oleellisin niitä luonnehtiva piirre. Mehiläinen on noussut yhteiskun-

tahyönteisten malliorganismiksi, mutta sen genomien tutkimus on vasta alkutekijöissään.

Tutkimusalojen yhdistäminen

Kastin määrätymisen ja sen ohjailu tuo meidät myös takaisin sukulaivalintaan ja niihin geneettisiin konflikteihin, joita teoria ennustaa. Yksi keskeisistä ja eniten tutkituista konflikteista on kuningattaren ja työläisten välinen konflikti resurssien allokoinnista uusien naaraiden ja koiraiden tuottoon. Hieman yksinkertaistaen kuningattaren kannalta on edullisinta panostaa yhtä paljon naaras- kuin koirasjälkeläistenkin tuottoon, kun taas työläisten ennustetaan suosivan geneettisesti läheistä sukua olevia täysssaria ja siten panostavan enemmän naarastuottoon. Miten ne voivat sen käytännössä tehdä?

Yksi mahdollisuus on eliminoida kehittyviä koiraita tai suosia erityisesti uusiksi kuningattariksi kehittyviä sisaria. Mutta yksi mahdollisuus on myös vaikuttaa kastin määrätymiseen. Teoria ennustaa nimittäin myös konfliktia sen suhteen, miten kuningatar ja työläiset panostavat vanhan pesän ylläpitoon ja uuden sukupolven kasvattamiseen. Kuningatar on ennusteen mukaan konservatiivisempi ja haluaa säilyttää itsensä ja vanhan pesän seuraavaan vuoteen.

Työläiset puolestaan ovat herkempiä hylkäämään vanhan kuningattaren ja satsaamaan enemmän uuden sukupolven ja erityisesti sisarsensa kasvattamiseen. Jos ne pystyvät vaikuttamaan kehittyvien toukkien kastin määrätymiseen ja ohjaamaan naarastoukkia työläisen kehityslinjalta kuningattaren kehityslinjalle, ne yhdellä siirrolla vaikuttavat kumpaankin konfliktiin: tuottavat enemmän lisääntymisyksiköitä ja tekevät sukupuolten lukumääräsuhteesta naarasvoittoisen.

Uusi genomitutkimus tuottaa tietoa mekanismeista, jotka säätävät hyönteisyhteiskuntien kehitystä, ja tämä tieto on läheisesti kytköksissä siihen sukulaivalinnan teoriaan, joka selittää kehityksen suuntaviivoja ja antaa testattavia hypoteeseja. Nähdäkseni tämä tutkimuksen alue tarjoaa hyvän esimerkin siitä, miten matemaattinen evoluutioteoria yhdistyy uuteen genomitutkimukseen ja miten malliorganismitutkimuksen tietoa voi käyttää hyväksi muiden lajien biologisten erikoispiirteiden selvittämisessä.

Kirjoittaja on Oulun yliopiston perinnöllisyystieteen professori. Kirjoitus perustuu esitelmään Tieteen päivillä 9.1.