

Charles S. Cockell

ELU VÕRRANDID

Evolutsiooni suunavad varjatud reeglid



elav teadus

Originaali tiitel
Charles S. Cockell
The Equations of Life: The Hidden Rules Shaping Evolution

Copyright © Charles S. Cockell, 2018
All rights reserved

Tõlkija Vahur Lokk
Toimetaja Lauri Laanisto
Keeletoimetaja Helve Hennoste
Kujundaja Kaspar Ehlvest
Küljendaja Erje Hakman

Tõlge eesti keelde © Vahur Lokk ja kirjastus Argo, 2020
Kõik õigused kaitstud

www.argokirjastus.ee

ISBN 978-9949-688-19-7

Trükitud trükikojas Tallinna Raamatutrükikojas

SISUKORD

Eessõna	9
1 Elu vaikne käskija	11
2 Hulkade korraldamine	27
3 Lepatriinufüüsika	47
4 Kõik suured ja väikesed olevused	67
5 Elukämbud	91
6 Elu piirid	113
7 Elu kood	133
8 Väävlist ja võileibadest	153
9 Vesi, see elu neste	177
10 Elu aatomid	193
11 Kas bioloogia on universaalne?	225
12 Elu seadused: ühendatud evolutsioon ja füüsika	249
Autorist	269
Märkused	270

HULKADE KORRALDAMINE

Kaheksa-aastasena olin tavaline unistav jõmpsikas. Armastasin istuda viktoriaanlikul sillutisel, nõjatuda vastu musta raudtara ja pisikese suurendusklaasiga koondada päikesekiiri pahaaimamatult oma asju ajavale sipelgale. Selle surmakiirega ajasin pisikesi olevusi mööda konarlikku ja auklikku pinda taga, kuni nad fookusesse püüdsin ja sipelgad ära kõrbesid.

Sipelgate jahtimine oli Inglise internaatkoolis tüüpiline klassiväline tegevus ja kindlasti eelistatud mõnele teisele, sealhulgas ladina keele õppimisele. Julgen arvata, et uudishimulikele ja mõningaste destruktiiivsete kalduvustega lastele on see tänini pisut morbiidne meelelahutus. Oma lapselikus vaenus nende süütute satikate vastu olin osa nende miniatuursest maailmast. Nägin palju kordi, kuidas pikk ja korrapärane sipelgarivi üle kivide edasi ja tagasi marssis, mõned aeglaselt, mõned kiiresti, mõned toidupalaga, vähesed langenud kaaslaste kehadele. Aeg-ajalt pistsid kaks kiirustavat kogu pead kokku, justkui juhtnööre vahetades, ja läksid taas lahku, joostes kiirustamisi vastasuunas. Millest nad rääkisid? Sipelgate sotsiaalne tegevus tundus mulle põnev ja üsna sageli ma lihtsalt istusin vaikselt ning jälgisin neid.

Ma nägin aga midagi muud. Oma eelpuberteetlikes toimetustes olin tunnistajaks elu õrnale olemusele. Võttes lihtsalt päikese loodusliku valguse ja võimendades seda mõne korra, võisin orgaanilisest ainest elava, keeruka masin muundada leegitsevaks põrguks. Elu oli tööpoolest habras, balansseerides füüsikaliste äärmuste piiril, mille kergegi

muutus võis tähendada piiri elu ja surma vahel. Need olendid, nagu me kõik, elasid maailmas karmide füüsikaliste piirangute armust.

Kõigele vaatamata ajasid sipelgad neid piiranguid järgides oma asju edasi. Nähes neid kogunemas, teavet vahetamas ja organiseerumas, võinuks igaüks veenduda, et tegu on sotsiaalse organiseerumisega. Putukate tohtu ühiskond, mis vaid mõõtmetelt meie omale alla jääb, töötab oma eesmärgi nimel, ehitada pesa ja tagada, et koloonia igavesti kestmiseks jätkub piisavalt toitu. Palju aastaid nägid teadlased seda ülalt alla orienteeritud ühiskonda just nõnda. Pesakambris turvaliselt varjul olev sipelgaema oli täiendav tõend, et seda uskumatut kollektiivset tööd juhivad juht, kes suunab ja annab arvukaid juhiseid, mida sadade, tuhandete ja vahel miljonite sipelgate ühe kindla ülesande nimel koordineerimiseks kindlasti on vaja.

Lihtne on mõista, kuidas tilluke sipelgaema, olgugi tavalisest sipelgast suurem, võiks mahutada kogu sipelgaühiskonna käigushoidmiseks vajalikku teabemahtu, rääkimata selle töötlemise võimest. Sipelgate tsivilisatsioon äratas paljude bioloogide ja loomade käitumise uurijate tähelepanu.¹ Teiste seas oli näiteks Ameerika teadlane E. O. Wilson, kelle 1970. aastatel avaldatud tööd putukaühiskondade kohta aitasid panna aluse sotsiobioloogiale.

Huvi putukaühiskondade vastu ja püüid mõista, kuidas nende hulki juhatakse, pani teadlaste uue rühma tegelema sipelgate organisatsiooniga. Nende vastu hakkasid huvi ilmutama füüsikud, kes muidu eelistavad sipelgate kombel piiranguteta asjade peadpööritavat keerukust vältida. Tekkis bioloogide ja füüsikute koostöö. Nemad esitasid pisut teistsuguseid küsimusi: kas need ühiskonnad on tõepoolest nii keerukad? Kas neid kujundavad teabevoored ja juhised, mis ületavad meie arvutite võimalusi? Kas neid juhivad ja valitsevad tõesti ema, juht, keda me ehk kunagi päriselt mõista ei suuda?

Nende avastused olid tähelepanuväärsed.

Sipelgapesad on keerulised struktuurid, mille ulatus ja üksikasjad võivad saavutada kolossaalseid mõõtmeid. Jaapanis Hokkaidō saare rannikul leiti 2000. aastal pesade linn, kus elab hinnanguliselt kolmsada miljonit töösipelgat ja miljon ema. Tegemine pole ühe pesaga. Seda 45 000 pesast koosnevat rajatist, mis meenutab labürinti, ühendavad

maa-alused tunnelid ja šahtid ning selle pindala on enam kui 2,5 ruutkilomeetrit. Kui inimesed ehitaksid niisuguse linna oma suurust arvestades, läheks vaja arvukaid arhitekte, kes mõtiskleksid, arutleksid ja kavandaksid ühe inimese juhtimisel, kes suunab kogu projekti ning kellele võib toetuda, et hoida kogu ettevõtmine õigel rajal.

Tundub aga, et sipelgad rajavad selliseid hiiglaslikke impeeriume kõige lihtsamate reeglite alusel.

Sügaval maa all eemaldab sipelgas hoolikalt ja õrnalt korraka ühe liivatera, lohistab selle minema ja heidab kõrvale. Vaikselt ja näiliselt kindla kavatsusega asub ta tegema tööd, mis on ühele sipelgale liiga suur, seega laseb ta välja teatud keemilisi aineid, feromoonid, mis kutsuvad naabri appi. Nüüd rabavad tööd teha kaks sipelgat, eemaldavad terakesi ja alustavad uue kambri ehitamise tööd. Nemaadki vajavad abi, seega toovad nad juurde veel kaks sipelgat, ja need neli sipelgat toovad juurde veel neli. Nüüd on neid kaheksa. Kiiresti ilmneb nähtus, mida tuntakse *positiivse tagasiside efektina*, pinnaseterakesi järjekindlalt ära vedavate sipelgate arvu peaaegu eksponentsiaalne kasv.² Lõpuks ometi on meil mingi märkimisväärne jõupingutus ja kamber hakkab kasvama mõistliku kiirusega. Minutite ja tundidega võtab uus kodu kuju.

Nüüd ilmneb probleem: saadaolevate sipelgate arv pole lõpmatu. Ehitatakse ka teisi kambreid, mis paneb tööliste üle kogu laieneva impeeriumi üha suurema surve. Sedamööda, kuidas kamber kasvab, hajuvad selles töötavad sipelgad pinda mööda üha enam laiali. Sipelgate juurde toomine aeglustub ja seejuures käivitub negatiivne tagasiside. Vähem sipelgaid tähendab vähem eritatud feromoonid ja seega veel vähem sipelgaid. Uue kambri ehitamine aeglustub ja seiskub. Mureks pole aga põhjust, juba on mõni sipelgas alustanud uut ava sipelgaid täis käigu läheduses. Nõnda see kordub ja kordub, kogu pesas tekivad väikestest avadest uhiuued kambrid. Nüüd, kui kogu see uus elamisepind on käepärast, mahub pesa elama rohkem sipelgaid, nii et pesa mahu kasvades suureneb ka koloonia elanike koguarv, mis püsib pesa mahuga proportsioonis.

Võtke need lihtsad ideed positiivsest ja negatiivsest tagasisidest, kui üksikud sipelgad tunnelidžunglis kohtuvad ning omavahel tervitavad,

ja kirjutage nende põhjal arvutiprogramm. Nii saab sipelgate kambriehitustööd matkida ja isegi kogu koloonia kasvu ennustada.

Tähelepanuväärsel kombel pole selleks vaja ühtegi arhitekti ega kujundajat, kes sipelgapesa jooniseid kokku paneks ning töölisi nende tegevuses suunaks ja valvaks.³ Himu tõmmata paralleele nende putukate kollektiivse jõupingutuse muljetavaldava ulatuse ja Egiptuse püramiidide ehitamise vahel võib olla suur, kuid erinevused on tohutud. Sipelgapesa kujunemist saab ennustada vaid väheste sipelgate omavaheliste suhete lihtsate reeglite abil. Ema on pesa keskpunkt, munade ja uute tööliste allikas, kuid pesa ehitamise igapäevased ülesanded tulenevad suure hulga ametis olevate sipelgate suhtlusest.

Asjade sellise korralduse tõttu saab osa neist kirja panna üsna lihtsate võrranditena. Looduses, füüsikalistes, keemilistes ja bioloogilistes süsteemides kehtib asjade vahel sageli astmeseadus. Lühidalt öeldes tähendab see, et üks asi, mida me mõõdame, näiteks sipelgapesa maht, muutub proportsionaalselt (astmes) millegi teisega, võib-olla sipelgate arvuga, kusjuures kõige lihtsam avaldis on

$$y = kx^n,$$

kus x on üks mõõdetav asi (näiteks pesa ruumala), y on muutuja, mida me teada soovime (näiteks sipelgate arv), ja n on arv (astendaja, sellest ka astmeseadus), mis määrab nendevahelise suhte (mida saab mõõta). Sipelgaliigil *Messor sancta* on see näiteks 0,752.⁴ Väärtus k on veel üks proportsionaalsuskonstant, mille saab iga kõnealuse protsessi korral välja arvutada.

Astmeseadused on tingitud sellest, et mingi kahe mõõdetava nähtuse vahel on olemuslik seos ja sageli on see tingitud mõnest füüsikalisest põhimõttest. Meie sipelganäite korral: mida rohkem on sipelgaid, seda rohkem liivateri või pinnaseosakesi suudavad nad teisaldada. Kogutud kolmemõõtmelised terad annavad sisuliselt kokku pesa kambrite koguruumala, seetõttu pole ilmselt üllatav, et kõigi muude asjaolude võrdsuse juures on sipelgate arv seoses nende ehitatud pesa ruumalaga.

Astmeseadused ei piirdu ainult sipelgatega, vaid on bioloogias levinud kõikjal, suurimast vähima skaalani. Mujalgi ilmnevad seaduspärad ja nende lai levik rõhutab elu korrapärasust. Samu matemaatilisi

seoseid võime leida üpris erinevates paikades. Sipelgate seadused on kirjutatud samadesse võrranditesse, mis määravad teistegi elusolendite omadusi.

Astmeseadustest kõige paremini on tuntud ehk Kleiberi seadus, mis on nime saanud Šveitsis sündinud füsioloogi Max Kleiberi järgi.⁵ Tema mõõtis mitmesuguste loomade aktiivsust ja leidis ainevahetuse kiiruse (mis sisuliselt tähistab olendi põletatavat energiahulka) ning olendi massi järgmise lihtsa seose:

$$\text{ainevahetuse kiirus} = 70 \times \text{mass}^{0,75}.$$

See võrrand ütleb meile, et suurte loomade ainevahetusvajadus on suurem kui väiksematel loomadel. Kassi ainevahetuse kiirus on umbes 30 korda suurem kui hiirel. See suhe on mõistetav, sest suuremal loomal on vaja käigus hoida suuremat massi. Küll aga ütleb astmeseadus, et väiksematel loomadel on suurem ainevahetuse kiirus iga nende ruumala osa kohta võrreldes suuremate loomadega. Väiksematel loomadel on suurem osatähtsus „struktuuril“, näiteks lihastel, võrreldes suuremate loomade rasvareservidega. Neil on ka ruumalaga võrreldes suurem keha pind, mistõttu nad kaotavad kergemini soojust ja põletavad rohkem kaloreid keha massi ühiku kohta kui suuremad loomad.

Kleiberi seaduse ja paljude teiste niinimetatud allomeetriliste astmeseadustega, mis seovad elusolendite suurust, füsioloogiat ja isegi käitumist, oleme üha paremini tundma õppinud füüsikalisi aluspõhimõtteid.⁶ Nende nimetamine „seadusteks“, paneks paljusid füüsikuid nägusid tegema. Suurem osa neist matemaatilistest reeglitest ei järgi mõnd fundamentaalset seadust, nagu näiteks Newtoni seadused, pigem on tegu üldiste seaduspärasustega. Siiski räägivad need olulised seosed, nagu paljud teisedki astmeseadused bioloogias, meile bioloogilise maailma aluskorraldusest, sisemisest seotusest, sipelgapopulatsioonidest elusasjade suuruse ja füsioloogiani välja, mis kõik peavad lõppude lõpuks järgima tõelisi füüsikaseadusi. Paljusid astmeseadusi järgivaid püsiseoseid saab selgitada elu võrgustikulaadsete omadustega elusolendite omaduste, näiteks loomade ainevahetuse kiiruse, eluea ja suuruse vahel.⁷

Sipelgakambri nähtus annab meile ilusa näite, kuidas lihtsate reeglitega organismide populatsioonis saab tekkida keerukus. Pange kokku palju sipelgaid, kes omavahel suhtlevad, ja nende kokkupuudete kahesuunalised seosed hakkavad looma mustreid. Olemuselt on need kokkupuuted elementaarsed, kuid segamisel ja sobitamisel viivad mitmekesise käitumiseni.

Püüded taandada organismide, sipelgatest lindudeni, populatsioonide keerukuse segadus lihtsamini haaratavate füüsikaseaduste tasemele, kuuluvad füüsika valdkonda, mida vahel nimetatakse a k t i i v - s e k s m a t e e r i a k s.⁸ See valdkond uurib, kuidas käitub materia, kui see on tasakaalupunktist kaugel ega ole settinud stabiilsesse ja vahel passiivsesse olekusse.⁹ Enamikule meist tähendab „tasakaalust väljas„ sama, mis „korratus ja tasakaalutus„. Siiski leiavad füüsikud, et kui süsteemid on tasakaaluolekust kaugel, ilmuvad korratuse asemel vahel korrastatud mustrid ja selline korrapära võib suunata bioloogilisi protsesse.

Aastal 1995 avaldatud ja teetähiseks saanud artiklis, mis oli üks esimesi aktiivse materia uurimise katseid, koostas Tamás Vicsek Ungari Eötvös Lorándi ülikoolist ringi pörkavate ja aeg-ajalt kokku puutuvate hüpooteetiliste osakeste lihtsa mudeli. Ta leidis, et väikese tiheduse korral käituvad need virtuaalolendid või andmekogumid juhuslikult. Nende kontsentratsioon oli lihtsalt liiga väike, et midagi märkimisväärset juhtuks. Kui need aga piisavalt tihedalt kokku panna, hakkab nende liikumist mõjutama naabrite liikumine. Vastasmõjud tekitavad kollektiivseid mustreid ja käitumist. Toimub järsk nihe, faasiüleminek ühest olekust teise. Need esimesed katsetused aktiivse materia valdkonnas näitasid, kuidas lihtsatest asjadest võivad saada suured. Neile järgnes kasvav huvi iseorganiseerumise vastu elus ja eluta süsteemides.

Bioloogia on kahtlemata aktiivse materia eriline osa. Elusolenditel on ajalugu, evolutsioonilised eripärad, isegi käitumisega seotud spetsialiseerumine, mistõttu pole nende korral tegu vaid üksikest pörkavate osakestega, nagu kastis olevad gaasi aatomid, vaid tegu on keerukamate ja teatud määral ennustamatute nähtustega. Neile eripäradele vaatamata saab bioloogilise maailma paljusid omadusi kogu populat-

siooni tasandil taandada edukalt paremini läbipaistvatele põhimõtetele. Olgu tegu bakterite kobardumise või linnuparve kogunemisega, looduses nähtava käitumise ennustamiseks on võimalik tuletada võrandeid. Vicseki elegantne töö viitas olendite kogumite füüsikaliste aluspõhimõtetele evolutsiooni suures eksperimendis.

Kasvatat sipelgaimpeeriumi suunavad tagasisideahelad otsustavad ka selle üle, kuidas need samad sipelgad süüa saavad. Meie sipelgapesa lähistel on puuoksalt äsja alla pudenenud maitsev ja mahlakas apelsin.

Palava päikese all hakkab see mõne päevaga roiskuma ja suhkrune sisemus voolab maha. Antennidega palavikuliselt vehkides tabab pesaümbruses patrulliv sipelgas laguneva puuvilja lõhna. Ta komistab sellele aardele ja asub tegutsema. Apelsini ümber sebides põrkab ta kokku ühe kaastöölisega ja, pead korraks kokku pannud, annab teisele korralduse pessa naasta ning rohkem töölisi tuua. Peagi toob pesast puuviljani rada, mida mööda sibavad edasi ja tagasi sipelgad, kandes suiste vahel suhkru vedeliku tilku. Iga rajal olev sipelgas haarab kaasa teisi lähedal olijaid, sestap kasvab nende arv kiiresti ja peagi on meie miniatuurne maantee täis edasi-tagasi sebivaid sipelgaid.

Kui apelsin sipelgate alla mattub, pole lisatööjõust enam olulist kasu. Köögis on liiga palju kokkasid. Peagi saab koloonia ablaste suiste vahel tükkideks kistud apelsin otsa ja selle juurde kutsutavate sipelgate arv väheneb. Teised sipelgad tagavad, et pesa ei sõltuks ainult ühest apelsinist ja reageerivad „hoia eemale„ sõnumile. Need, kui soovite, koloonia mustad lambad liiguvad teadlikult uutes suundades, et leida uusi toiduallikaid. Lõpuks saab apelsin otsa ja rada jääb tühjaks. Sipelgaradade tekkimise ja kadumise korral pole meil sipelgaema, kes istuks oma kambris kaardi taga ja kavandaks uusi toiduotsingute retki, tõmbaks ruudustikule jooni ja juhendaks alluvaid igast ruudust süüa otsima. Selle asemel kehtivad lihtsad reeglid, mis algavad oma territooriumil matkavast üksikust maakuulajast ja viivad matemaatiliste protsessideni, mille tulemus on toit.