ENFORMAATIOTEORIA

Elämäsi seikkailu: kaaoksesta kaaokseen
ja sen yli
—
Työkaluja zeniin

Enformaatioteoria

Elämänvoiman perusteet

Tarina emergoituvasta
energeettisestä (in)formaatiosta

Heikki Hyötyniemi

Aiheen taustoja (englanniksi):

Heikki Hyötyniemi (ed.): *Feedback to the Future.* Finnish Artificial Intelligence Society, Helsinki, Finland, 2001. 194 p. http://neocybernetics.com/feedback/

Heikki Hyötyniemi: *Multivariate Regression — Techniques and Tools.* Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory, Report 125, August 2001. 207 p. http://neocybernetics.com/raportti125/

Kalle Halmevaara & Heikki Hyötyniemi: *Process Performance Optimization Using Iterative Regression Tuning.* Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory, Report 139, 2004. 79 p. http://neocybernetics.com/report139/

Heikki Hyötyniemi: *Neocybernetics in Biological Systems.* Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory, Report 151, August 2006. 267 p. http://neocybernetics.com/raportti151/

© 2013 Heikki Hyötyniemi
Öljyvärimaalaukset Vladimir Fomin
Toimitus ja taitto Petri Lievonen
Julkaisija: Luonnonfilosofian seura
— The Finnish Society for Natural Philosophy

$\mathcal{E}$:lle ja $\mathcal{M}$:lle

tuntijalle ja tietäjälle

emergoitukaa
eläkää
eheytykää

Sisältö

*E*sipuhe. xi

1 *E*mergenssi ja *E*ksistenssi. 1
- 1.1 Uusia maailmoja luomassa . . . 1
- 1.2 Valoa kaaoksesta . . . 5
- 1.3 Luonnon oma semantiikka . . . 8
- 1.4 Vielä ymmärtämisestä . . . 13
- 1.5 Evoluutio, optimaalisuus ja lineaarisuus . . . 15
- 1.6 Vuorovaikutuksen mekanismit . . . 18
- 1.7 Kohti enformaation maksimia . . . 21
- 1.8 Työkaluja muutoksen maailmaan . . . 24

2 *E*hdollistuminen. 29
- 2.1 Yhteenveto kiireiselle . . . 29
- 2.2 Aikatasojen vuorovaikutus . . . 31
- 2.3 Tulkinta emergenteille muuttujille . . . 35
- 2.4 Kytkeytyminen ympäristöön . . . 38
- 2.5 Enformaatiomaksimi saavutetaan! . . . 42
- 2.6 Laadullisia yllätyksiä . . . 44
- 2.7 Vapaiden parametrien eliminointi . . . 47
- 2.8 Esimerkki: käsin kirjoitetut numerot . . . 50

3 *E*ntropia. 57
- 3.1 Johdatus globaaliin näkökulmaan . . . 57
- 3.2 Systeemi säätäjänä . . . 59

3.3 Signaaleista ja niiden takaisinkytkennöistä 63
3.4 Funktionaalisuuksien synty 66
3.5 Esimerkki: malli modulirakenteena 70
3.6 Kvalitatiivisia harppauksia 73
3.7 Maxwellin demonit 78
3.8 Kohti ympäristön hallintaa 83

4 *Elämä.* 89
4.1 Määrittelyn haasteet 89
4.2 Monadit — elämän atomit 91
4.3 Esimerkkejä elävästä 94
4.4 Systeemit maailman karttana 96
4.5 Tulkinnat mielen maailmassa 99
4.6 Yhteiskunta ylimpänä elämänmuotona 103
4.7 Kuvaukset ja niiden käynnistäminen 107
4.8 Maailman ”elävöittäminen”: esimerkkejä 112

5 *Evoluutio.* 121
5.1 Populaatioista yksilön näkökulmaan 121
5.2 Mikä nähdään tärkeäksi: *vapaudet* 123
5.3 Pelin säännöt ja strategiat 126
5.4 Evoluution mekanismit 131
5.5 Joskus se onnistuu! 137
5.6 … Mutta yleensä kaikki kaatuu 140
5.7 ”Enformaatioteorian pääsäännöt” 144
5.8 Esimerkki: vapauksia synnyssään 147

6 *Eheytyminen.* 153
6.1 Mysteerit silmien edessä 153
6.2 Kauneus piilee yksityiskohdissa 155
6.3 Harppaus taajuustasoon 159
6.4 Esimerkki: kyberneettiset orbitaalit 162
6.5 Pakoon tulkintojen vankilasta 167
6.6 Tietoisuus — suurin arvoitus 170

6.7 Jatketaan kopernikaanista kumousta! 172
6.8 Iloinen tiede 177

7 Etiikka ja Estetiikka. 183
7.1 Maailmankuvasta maailmankatsomukseen 183
7.2 Antureita ymmärrykseen 186
7.3 Tunne itsesi — oma mallisi 188
7.4 Kauneuden universaalisuus 192
7.5 Kaveria ei petetä 195
7.6 Morfiset kentät 197
7.7 Emergoituva henkimaailma 200
7.8 ”Kybernetistin käyttöjärjestelmä” 202

Epilogi. 209

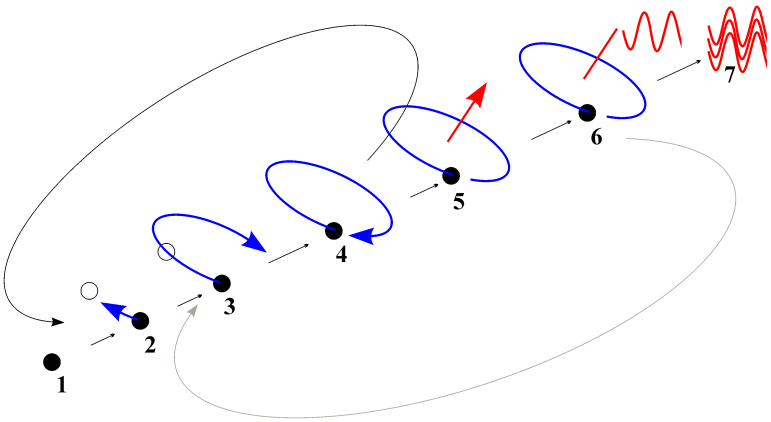
Ekstrat. 215
Merkinnät 217
Rakenteet 219
Kuvat 220
Hakemisto 222

Esipuhe.

> *Kalevala näyttää, kuinka suomalaisessa kulttuurissa arvostetaan viisautta — mutta myös järjettömyyttä: tärkeimpiä ovat kunnon tarinat, ne jäävät elämään mieleen. — Niinpä, lukija: tässä on sinulle haaste kilpalaulantaan.* Väitätkö etten muka ole ollut näkemässä kun taivaan kantta taotaan?

Aikoinaan, opiskelujeni aikana, tutustuin niin sanottuihin *metakääntäjiin.* Kääntäjät kääntävät kuvauksia formalismista toiseen; metakääntäjä on kääntäjä, jonka *toiminta on kuvattu omalla kielellään ja joka kääntää itsensä*. Kääntäessään metakääntäjät kiskovat itsensä ylös suosta kuin paroni von Münchhausen ikään! Parhaimmillaan ne kykenevät tuottamaan pienestä yksinkertaisesta ytimestä lähtien monimutkaisia kokonaisuuksia. Silloin mieltä jäi kiehtomaan kysymys: mikä olisi yksinkertaisin ydin josta voisi saada aikaan mahdollisimman mielenkiintoisen lopputuloksen, ydintä useammalla tasolla fraktaalisesti ja rekursiivisesti kääntämällä? Ja millaisissa ympäristöissä tällaista meta-ajattelua voisi soveltaa? — Asiat venähtivät, mutta *tässä nyt on niiden pohdintojen lopputulos.*

Tässä kirjassa kuvatun käännösprosessin voidaan ajatella pyörivän koko ajan, kaikkialla, fraktaalisesti eri tasoilla, pienestä ytimestä alkaen ja alati monimutkaistuen; jokainen tuotettu rakenne on kuva ytimestä ja samalla se on heijastus ympäröivästä kokonaisuudesta. Monimutkaisuudella ei ole ylärajaa: eräänlainen *bootstrapping-prosessi* on koko ajan käynnissä, tuottaen loputtomasti uusia rakenteita vanhojen perustalle.



Kuva 1: Kirjan rakenne

Laitteistona, jossa järjestelmä pyörii, on *fyysinen luonto fysikaalisine lainalaisuuksineen* ja *mentaalinen maailma mentaalisine lainalaisuuksineen*.

Niin, kunnianhimoisena tavoitteena tässä esityksessä on eräänlainen *yhtenäisteoria*, jossa langanpäät maailman ymmärtämiseksi tulevat (jälleen kerran) yhteen. Lopputuloksena on eräänlainen *elämän teoria*, niin biologisella, henkisellä kuin systeemiselläkin tasolla. Väite on, että *kaikki on ymmärrettävissä pohjalta ylös asti*, ei tosin staattisina hahmoina vaan dynaamisesti, toiminnan ja funktion kautta. Tämän vuoksi tämä esitys on jokseenkin matemaattinen — matematiikka kun on se perimmäinen ”luonnollinen kieli”, jolla käsitteet ja päättelysäännöt täytyy kuvata.

Vaikka kuvausten ”käännösprosessi” tuottaa dynaamisia rakenteita, jotka ovat täynnä ristiviittauksia, tässä esityksessä kaikki palautetaan perusosiinsa, ja silmukkarakenteet puretaan. Tällöin syntyy kuvassa 1 esitetyn kaavion mukainen ketju yksinkertaisista rakenteista monimutkaisempiin, *tarinan juoni*. — Tämä rakennekuvaus toimii samalla tämän kirjan lukujen sisällön kuvauksena:

1. Ylös kaaoksesta. Mikä ero on *olemassaololla* verrattuna *olemattomuuteen*, ja miksi ”maailma pyrkii näkyväksi”.

2. Rakenteiden muodostuminen. Kuinka maailman voi nähdä *matemaattisina kuvauksina* ja *lahmojen piirteinä*.

3. Syy monimutkaistumiseen. Näkökulmana ovat *kausaaliset* ja erityisesti *sykliset vuorovaikutussuhteet* ja *takaisinkytkennät*.

4. Reaalimaailma eloon. Tulkitaan asiat *pyörteinä* enformaatiovirrassa, data-avaruuden *dynaamisina attraktoreina*.

5. Pakoon rajoitteista. Vaihdetaan näkökulmaa, keskitytään *vapauksiin* eli data-avaruuden dynamiikan *vapausasteisiin*.

6. Vapaaksi ajasta ja paikasta. Kuinka kokonaiset *systeemit vuorovaikuttavat* mahdollistaen *laadullisesti uudenlaiset abstraktiotasot*.

7. Uusi näkökulma maailmaan. Kuinka kaikkein suppein onkin kaikkein laajin, kuinka lopulta *kaikki loksahtaa kohdalleen*.

Kaikki liittyy kaikkeen, hyvin syvällisellä tasolla. Tekstissä kuvatulla tavalla mielen prosessit ovat myös maailman prosesseja, ja asioiden ymmärtäminen merkitseekin kokonaisen *maailman uudelleenherättämistä mielessä*. Lähteäkseen uudelleen käyntiin, herätäkseen *eloon*, prosessit on käynnistettävä yksi kerrallaan. Konstruktivistisena prosessina oppiminen on välttämättä iteratiivista ja rekursiivista: aika ajoin on ehkä syytä palata aiempaan. Tämä ei tarkoita paluuta lähtöpisteeseen, vaan se on osa spiraalia lähemmäs kohti ydintä. Uusin käsittein aiempi ymmärrys saa syvemmän luonteen.

Todellinen ymmärtäminen menee pelkkää ajattelua syvemmälle, se palautuu intuitiivisiin mielen rakenteisiin. Parhaimmillaan uudet rakenteet resonoivat vanhojen kanssa tukien toisiaan. Ymmärryksessä on lukuisia tasoja, niinpä myös tämä tarina etenee usealla tasolla yhtäaikaisesti. — Jos tämä on jotakin jota vain kalevalainen kansa voi ymmärtää, *olkoon sitten niin*.

Tässä kirjassa ensimmäistä kertaa kootusti esitetty *enformaatioteoria* on pitkällisen kehityksen tulos; prosessin yksi välivaihe esimerkiksi oli nimeltään *neokybernetiikka*, jonka nimen puitteissa suurin osa materiaalista on alun perin julkaistu. Tässä kirjassa neokybernetiikka-termi on rajattu tarkoittamaan enformaatioteorian alla olevaa matemaattista koneistoa, kun enformaatioteoria kaikkineen sisältää hyvinkin filosofisluonteisia pohdintoja. Asioiden jatkumo ehkä historiallisessa mielessä kiinnostavine *syntyineen* ja aiheeseen liittyvine linkkeineen on tarjolla osoitteessa http://neocybernetics.com/suomeksi/.

Enformaatioteoria on evoluutioprosessissa kuin elämä itse. Niinpä tähänkin kirjaan on muodostunut fraktaalinen rakenne: alimmalla, syntyjen ja emergenssin tasolla, kun ei vielä ole olemassa mitään silminnähtävää, tarvitaan matemaattisia kaavoja; mutta ylätasolla, tarkasteltaessa valmiita lopputuloksien hahmoja, tarvitaankin inhimillistä hahmontunnistuskykyä. Jokaiselle jotakin — tavoitteena onkin löytää *yhteinen kieli* yhdistämään erilaisia intuitioita.

Väitän, että tämä teksti on *tieteellisesti relevanttia* vaikka se ei kaikin puolin täytäkään vakiintuneita ”hyvän tieteen” kriteereitä. Esimerkiksi *kaikki kirjallisuusviitteet puuttuvat* kirjasta. Perusteluna on se, että nykymaailmassa asioiden taustoihin ja ideoiden *ytimeen* on niin paljon kätevämpää tutustua internetin hakukoneiden avulla. Hakujen onnistumisen varmistamiseksi tietenkin keskeisessä roolissa ovat oikeat *avaintermit*; paikka paikoin tekstiin onkin lisätty tarkasteltujen käsitteiden englanninkieliset käännökset.

Olen kiitollinen *Petri Lievoselle* hänen ehtymättömästä innostuksestaan, kannustuksestaan ja käytännöllisestä tuestaan enformaatioteoriaa kehitettäessä. Hänen roolinsa on ollut korvaamaton esimerkiksi järjestettäessä Kybernetiikan alkeet -kurssia alkuun Teknillisellä korkeakoululla ja sittemmin Aalto-yliopistolla. Hän on myös huolehtinut yllä mainittujen verkkosivujen ylläpidosta. — Kommenttisi ja korjausehdotuksesi ovat aina olleet kerrassaan mainioita, kiitos!

Olen hyödyntänyt kirjassa kuvituksena petroskoilaisen taiteilijan *Vladimir Fominin* upeita Kalevala-aiheisia maalauksia (luvan kanssa; kiitos Vladimir!):

- Kansi: *Birth of the Sampo / Ouroboros* (2011).
- Nimilehti: *Vainamoinen Making a Kantele out of a Pike's Jaw* (1998).
- Sivu 1: *The Miraculous Transformation* (1996).
- Sivu 28: *Holding the Waves* (1998).
- Sivu 56: *The Birth of Sampo* (1996).
- Sivu 88: *The Carrier of the Word* (1997).
- Sivu 120: *The Crying Vainamoinen* (1997).
- Sivu 152: *The Great Song of Vainamoinen* (1997).
- Sivu 182: *Bear, Apple of the Forest* (1996).
- Sivu 208: *The Red Boat* (1997).

Kiitän Luonnonfilosofian seuraa julkaisijana sekä sen jäseniä kommenteista. Kirjassa esitetyt näkemykset ja tulkinnat virheineen ovat omiani.

Jyväskylässä, 12.12.12,
juhlistaen silloisen "emformaatioteorian" ensiesittelyä Luonnonfilosofian seuran tilaisuudessa Helsingissä 11.11.11

Heikki Hyötyniemi

Luku 1

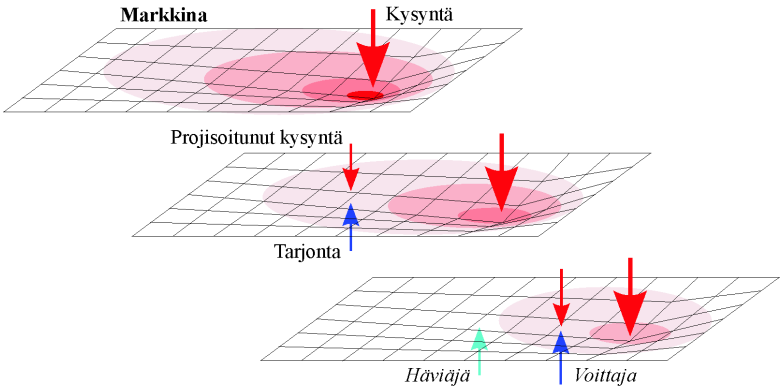
*E*mergenssi ja *E*ksistenssi.

> *Kumpi oli ensin, muna vai kana? — Lähtökohtana nyt olkoon sellainen* sotkan muna*, tiivis ydin, josta kaikki alkaa kuoriutua, ja josta lopulta syntyy maa ja taivaankansi kaikkineen, kaaoksen saadessa hahmon. — Jälkikäteen voimme sitten olla viisaampia: muna ja sotka,* ne emergoituivat yhtä aikaa.

1.1 Uusia maailmoja luomassa

Albert Einstein oli yksi monista, joka aikanaan totesi, ettei maailman monimutkaisuus ole niin suuri ihme kuin se, että ylipäänsä maailmassa on *yhtään mitään*. Nollasta siihen *epsiloniin*, matematiikan ”atomiin”, on suhteellisesti paljon pidempi matka kuin epsilonista eteenpäin. Niinpä tämä ensimmäinen luku keskittyykin tähän epsiloniin: kun se on kerran keksitty, se toimii alkuna monelle kiinnostavalle asialle … kuten kirjan lukujen otsikoista voi nähdä!

Alkuun tarvitaan esimerkki siitä, millaisista ”maailmoista” nyt ollaan puhumassa. Vaikka voisi tuntua siltä, että silmillämme näemme kaiken tarpeellisen, tämä on harhaa. Tarkastellaan vaikkapa erästä käytännönläheistä asiaa, nimittäin *kysyntää ja tarjontaa markkinataloudessa* (kuva 1.1).



Kuva 1.1: Ääretönulotteinen ”markkina” pelkistettynä

Markkinoilla määräävät ihmisten *tarpeet*. Nämä tarpeet ovat hahmottomia, kukaan (selvästikään) ei osaa kertoa, millainen tuote tai palvelu olisi välitön menestys. Ainoa tapa tutkia todellisuutta on tuoda markkinoille jokin tuote, jonka kautta osa tarpeista kanavoituu; kysyntä ja tarjonta asettuvat sitten hinnan ja muiden tekijöiden määräämään tasapainoon. Markkinoilla oleva tuote on kuin *anturi*, mittauslaite, joka kertoo todellisuuden tilasta, *potentiaalisen* muuttuessa *aktuaaliseksi*. Vain jos kaksi muuttujaa (yksittäisen tuotteen kysyntä ja tarjonta) eristetään ympäristöstään (muista muuttujista), voidaan päätyä perinteiseen talousteoreettiseen malliin; tämä on pelkkä projektio monimuuttujaisesta todellisuudesta.

Asian tekee erityisen kiinnostavaksi se, että *mittaus muuttaa todellisuutta*: esimerkiksi yhä uusien tuotteiden tullessa tarjolle, markkina muokkautuu. Voipa käydä niinkin, että jokin paremmin tarpeita vastaava tuote näivettää jonkin aiemmin menestyneen tuotteen kysynnän tyystin. Ja aina vain tarvitaan lisää mittauksia, koska markkina muuttaa muotoaan jatkuvasti.

Vastaavanlaisia ”markkinoita” löytyy kaikkialta kun asioita alkaa tarkkailla sillä silmällä.

> Äärimmäinen esimerkki vaikeasti luodattavasta tutkimuskohteesta on ihmisten *idea-avaruus*, jota voidaan kartoittaa vain yksi ajatus (meemi) kerrallaan. Arvot ja ismit ovat tällöin niitä markkinoilla olevia ”tuotteita” jotka kanavoivat ajatusilmastoa mittauskelpoisiksi suureiksi: eri aatteiden (tai vaikkapa puolueiden) kannatus näyttää häivähdyksen ympäröivästä näkymättömästä todellisuudesta.

Monimutkaisten järjestelmien tapauksessa samanlaiset maailman hahmottamisen haasteet toistuvat kaikissa koko- ja aikamittakaavoissa, mikroskaalasta makroskaalaan. Todellakin, esimerkiksi yllä mainittu *havaitsijavaikutus* (engl. *observer effect*) tulee vastaan kaikissa ympäristöissä: tarkka mittaus tarkoittaa mittauskohteen häiritsemistä. Voidaan jopa puhua (katso luku 6) ”aaltofunktion romahtamisesta” muuallakin kuin kvanttitasolla.

Tutkittaessa monimutkaisia järjestelmiä, erityishaastena onkin aina tämä romahdus: mittaaminen edellyttää kytkeytymistä. Myös raskas tieteellinen koneisto trivialisoi tutkimuskohteensa, jolloin todellisuuden monimutkaisuus pakenee näkyvistä. Maailma on toisaalta liian suuri ja toisaalta liian hauras tullakseen analysoiduksi muutamalla yksittäisellä mittauksella.

Mitä useampia mittauksia on, sitä hellävaraisempi voi kytkeytyminen maailmaan olla, koska sitä suurempi kohinan määrä voidaan hyväksyä. Pelkkä mittausten määrän kasvattaminen ei kuitenkaan ole ratkaisu: kaikki mittaukset eivät ole yhtä arvokkaita. Onkin välttämätöntä valikoida mitä mitataan — mutta tällöin mittauksista tulee *teoriapitoisia* (engl. *theory-laden*): ne alkavat heijastaa ennakko-oletuksia. Joudutaan noidankehään: pahimmillaan mittaukset vain pönkittävät tehtyjä (virheellisiä) olettamuksia.

Jotta voisimme hallita monimutkaisia järjestelmiä, *tarvitsemme tukevia suuntaviivoja, mutta emme voi luottaa kaikkiin ennakko-oletuksiimme*. Tällaisia asioita pohdittaessa joudutaan vakiintuneitakin ajattelutapoja tarkastelemaan uudesta näkökulmasta. Osoittautuu yllättäen, että *rationa-*

lismin ja *empirismin* suhdetta maailman hahmotuksen perustana täytyy ajatella uudelleen. Meidän täytyy löytää ajattelulle mallikehys joka *parhaalla mahdollisella tavalla heijastaa mittausten olemusta*. Käytännössä tämä tarkoittaa *uutta tulkintaa maailmasta* ja tähän perustuen *uudenlaisia ennakko-oletuksia*.

Jotta päästään kiinni rationalismiin ja kaivattuihin johdonmukaisiin suuntaviivoihin, osoittautuu välttämättömäksi mennä toiseen ääripäähän, ”äärimmäiseen empirismiin”. Seuraavassa ruvetaankin soveltamaan jonkinlaista *universaalia data-ajattelua*, jossa mittausohjautuneisuuden ajatus ei ole enää sidottu pelkästään inhimilliseen tieteenteon tyyliin vaan *kaikkeen* vuorovaikutukseen: *mittaukset ovat ainoa koettu todellisuus*. Kaikki luonnon järjestelmät ovat täysin ympäristönsä armoilla — ja data määrittelee tämän ympäristön.

Avainhavainto on se, että tiedon tulva ei ole vain ihmisen ongelma: myös *luonto kokonaisuudessaan* kohtaa vastaavanlaisen haasteen. Kuten jatkossa esitetään, voidaan väittää, että luonnossa *kaikki* on valjastettu mittaamaan maailmaa. Toki ”luontokappaleiden” maailmat tällöin ovat paljon ihmisen maailmaa yksinkertaisempia, ovathan havaitsijatkin yksinkertaisempia — suhteellisesti ajatellen ongelmanasettelu on kuitenkin samantyyppinen.

Ja käytännöllisemmin suuntautuneille olkoon tällainen täky: jotta tiedon määrän räjähdysmäinen kasvu voitaisiin hallita tietokonekapasiteetin räjähdysmäisen kasvun avulla, edellä mainittuja vahvoja suuntaviivoja tarvitaan jotta tiedonkäsittely voitaisiin ehkä joskus automatisoida.

Saatuamme edellä hieman intuitiota ylätasolla, voimme siirtyä alaspäin, konkreettisempiin ympäristöihin. Uuden rakentaminen lähtee hahmottomasta datasta, mutta tässä luvussa kuvataan, kuinka olemattomuudesta voi automaattisesti alkaa erottua *jotakin*.

1.2 Valoa kaaoksesta

Täydellisestä tyhjyydestä ei voi aloittaa. Meidän onkin toimittava kuten *Ludwig Wittgenstein* totesi: joudumme käyttämään tikkaita päästäksemme ylöspäin, mutta kun tikkaiden avulla on päästy riittävälle tasolle, *voimme potkaista tikkaat pois*. Tässä tapauksessa käy tosin niin, että *voimme konstruoida ne tikkaat itsellemme myöhemmin*.

Olettamus, josta lähdemme liikkeelle, kuulostaa hurjalta: oletamme nyt, että *luonto yrittää ymmärtää itseään*. — Tätä väitettä on turha edes yrittää perustella tässä; sen voi ymmärtää vasta jälkikäteen.

Tulkoon tässä vaiheessa kuitenkin todetuksi, että luonnon näennäisen tarkoitushakuiset ”pyrkimykset” ovat vain abstraktio, käyttökelpoinen metafora, katsottaessa asioita ulkopuolelta, korkealta ja kaukaa (palaamme tähän asiaan myöhemmin). Toisekseen, luonnon toiminta on täysin hajautettua; kun ”luonto hakee tietoa”, ne ovat vain yksittäiset ”luontokappaleet” jotka ”mittaavat” ympäristöään (taaskin tulkiten asioita ulkopuolisen silmin). Ja on syytä myös huomauttaa, että puhuttaessa luontokappaleista ei nyt tarkoiteta edes niin monimutkaisia asioita kuin vaikkapa olemassaolostaan enemmän tai vähemmän tietoisia eläimiä: ”mittaamistehtävä” on hajautettu *jokaiseen vuorovaikuttavaan hituseen* ilman minkään tasoista oletusta sen tietoisuudesta.

Lähdetään nyt — haasteista huolimatta — tarkastelemaan lähemmin tätä ymmärryksen ongelmaa tiedon keruun kautta. Merkitään yksittäistä ”mittausta” seuraavasti:

$$z_\iota(\kappa), \tag{1.1}$$

jossa κ on toistettavan mittauksen aika- tai paikkaindeksi ja ι on mitatun ominaisuuden tunniste. Kaikki maailmasta mitattavat ilmiöt oletetaan kuvattavaksi reaalilukumuuttujina; jopa niin, että *kaikki olennainen* on palautettavissa tällaisiin reaalilukuihin. Monimutkaisemmissa tapauksissa voimme jopa samaistaa asiat niitä kuvaavien ominaisuus- tai attribuuttijoukkojen kanssa, *Leibnizin identtisyysmääritelmän* hengessä (engl. *identity of indiscernibles*).

Mittauksia on paljon ja yksittäisen mittauksen merkitys on häviävän pieni. Oletetaan, että ainoastaan suuren mittausmäärän kokonaisuus on merkittävä, ”yksilöiden” ollessa jonkinlaista kohinaa, jolloin joudutaan tarkastelemaan suuren mittausjoukon yhteisvaikutuksia, jonkinlaisia *tilastollisia ominaisuuksia*. Tällaiset ominaisuudet näkyvät muuttujien z_ι *jakaumissa*. Maailmasta ei muuta voida tietää kuin muuttujien jakaumia, ja tästä lähdetään eteenpäin.

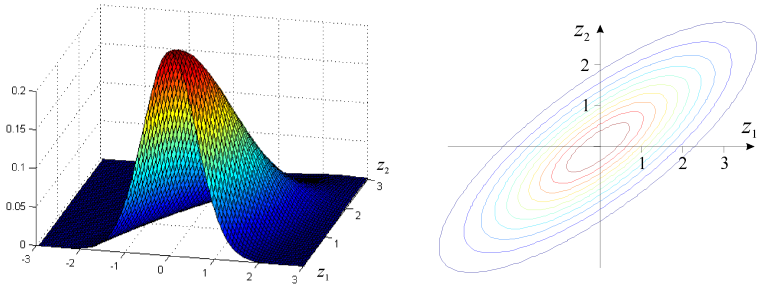
Jakaumien muotoja voidaan luonnehtia *tilastollisten momenttien* (engl. *statistical moments*) avulla. Jakauman p:s momentti voidaan määritellä kaavalla

$$\mathrm{E}\{z_\iota^p\}, \tag{1.2}$$

jossa E on *odotusarvo-operaattori* (engl. *expectation operator*), ja $p \geq 1$. Esimerkiksi ensimmäinen momentti $\mathrm{E}\{z_\iota\}$, jossa siis $p = 1$, vastaa käytännössä muuttujan z_ι keskiarvoa; toinen momentti $\mathrm{E}\{z_\iota^2\}$ on muuttujan neliöiden keskiarvo. Vaihtoehtoisesti, momenttien sijaan, jakauman luonnehtimiseen voitaisiin käyttää *kumulantteja* (engl. *cumulants*). Tällöin esimerkiksi toisen momentin sijaan käytössä olisi saman informaation sisältävä (*otos*)*varianssi*, joka voidaan laskea momentteja käyttäen kaavalla $\mathrm{E}\{z_\iota^2\} - \mathrm{E}\{z_\iota\}^2$. Jakauman keskiarvo kuvaa sen ”sijaintia” muuttuja-akselilla ja varianssi kuvaa jakauman ”leveyttä” eli hajontaa.

Mielivaltaisen jakauman täsmälliseen kuvaamiseen momentteja (tai kumulantteja) tarvitaan periaatteessa ääretön määrä. Jos ympäröivällä maailmalla on jo olemassa jokin rakenne, tämä rakenne heijastuu tilastollisten jakaumien erikoisominaisuuksina. Monet menetelmät, esimerkiksi *riippumattomien komponenttien analyysi* (engl. *independent component analysis*), perustuvat tällaisten poikkeamien havaitsemiseen. Ongelmana on, että erilaisia (epälineaarisia) datajakauman poikkeamia on rajaton määrä, eikä kaikkien niiden löytäminen ja hyödyntäminen onnistu millään yksittäisellä menetelmällä. Nyt lähestymistapa onkin päinvastainen: aluksi oletamme, että maailmassa ei vielä ole mitään rakennetta.

Yllättäen, jos maailmassa vallitsee *täydellinen kaaos*, kaikki tarjolla oleva informaatio voidaan kiteyttää *muutamaan parametriin*.



Kuva 1.2: Kaksiulotteinen normaalijakauma

Näemme vain satunnaismuuttujien yhteisvaikutuksia, muuttujien summien jakaumia. Väljien olettamusten ollessa voimassa, osoittautuu, että — *keskeisen raja-arvolauseen* (engl. *central limit theorem*) mukaisesti — havaittujen jakaumien täytyy lähestyä *normaalijakaumia* (engl. *normal* (*Gaussian*) *distribution*). Normaalijakauma on erityisen yksinkertainen jakauma siinä mielessä, että sen ominaisuudet voidaan tyhjentävästi kuvata *kahden ensimmäisen momentin* (*kumulantin*) *avulla*, kaikki muut kumulantit nollautuvat. Selvästi nämä kaksi ensimmäistä momenttia ovatkin kaiken kaikkiaan tärkeimmät, ja jatkossa keskitytään pelkästään niihin.

Eri muuttujilla voidaan olettaa olevan omat normaaliset jakaumansa, ja joukko yllä esitetyn kaltaisia tunnuslukuja (kaksi lukua kutakin jakaumaa kohti) on kaikki mitä kaoottisesta maailmasta voidaan tietää. Kuvassa 1.2 on esimerkki kahden normaalijakautuneen muuttujan yhteisjakaumasta (nyt $\mathrm{E}\{z_1\} = \mathrm{E}\{z_2\} = 0$ ja $\mathrm{E}\{z_1^2\} = \mathrm{E}\{z_2^2\} = 1$; huomioi että ristikorrelaatio $\mathrm{E}\{z_1 z_2\} \neq 0$, määritellen muuttujien välille korrelaatiosuhteen).

Perinteinen tapa monimutkaisuuden hallintaan on yksityiskohtien hävittäminen näkyvistä kokonaiskuvaa sotkemasta (jolloin ehkä aletaan nähdä ”metsä puilta”). Keskiarvoistaminen onkin tällaisen *karkeistamisen* perustyökalu myös tieteessä, jolloin päädytään *efektiivisiin* kuvailuihin ja teorioihin. Todellakin, jos rajoituttaisiin pelkkiin keskiarvoihin, mitään uutta ei löydettäisi verrattuna perinteisiin lähestymistapoihin. Keskiar-

vot $\mathrm{E}\{z_\iota\}$ vastaavat ”näkyvää maailmaa” joka on kohinaisena nähtävissä periaatteessa jo yhdessä mittauksessa.

Jos keskiarvoistaminen olisi asioiden ydin, päädyttäisiin hyvin reduktionistiseen maailmankuvaan. Jos asioiden ymmärrys seuraisi yksityiskohtien unohtamisesta, *kokonaisuus olisi vähemmän kuin osiensa summa*. Tällainen ”staattinen” tarkastelu on ihmiselle niin luontaista, että on vaikea edes hahmottaa sille vaihtoehtoja.

Osoittautuu kuitenkin, että ”neliöiden keskiarvot” avaavat kokonaan uusia näköaloja. Periaatteessa varianssia ei ole edes määritelty yhdelle näytteelle, sitä ei voi havaita yhdellä vilkaisulla (jos odotusarvo lasketaan aika-akselin yli, niin kuin jatkossa tyypillisesti tehdään). Variaatiot jotka perustuvat kaavaan $\mathrm{E}\{z_\iota^2\}$ kuvaavat jonkinlaista *vaihtelevuutta* maailmassa, ja se antaa ”dynaamisen”, silmälle tavoittamattoman näkökulman ympäristöön. Jatkossa osoittautuu, että toiseen momenttiin keskittyminen mahdollistaa *muutoksen luonteen* jäljittämisen aidossa *Herakleitoksen* hengessä. Vielä provosoivammin voidaan väittää, jatkossa esitettävän teorian perusteella, että siinä kun keskiarvot vastaavat näkyvää *ainetta* maailmassa, variaation mallit vastaavat sen aineen takana olevaa *rakennetta*.

Väite siis on, että (*ko*)*variaatioiden hallitseminen tekee mahdolliseksi ymmärtää olevaisen luonne*: näennäisen kiinteät rakenteet perustuvat *stabiileihin attraktoreihin* mittausten avaruudessa, ja maallinen aine täyttää näiden dynaamisten rakenteiden määrittelemät ”ekolokerot”. Rakenne on ensisijainen, ja näillä määritelmillä *rakennetta voi olla myös ilman ainetta*.

1.3 Luonnon oma semantiikka

Kun alamme avata alussa esitettyä väitettä luonnon pyrkimyksestä itsensä ymmärtämiseen, pureudumme tässä ensin sanaan ”ymmärtäminen”. Ymmärryksen saavuttamiseksi mikä tahansa tiedon kokoelma ei riitä, vaan pelkkään tietoon pitää kytkeä *merkitys*. — Siinäpä haastetta kerrakseen!

Semanttiset merkitykset eivät nyt voi olla mitään ylhäältä annettuja tulkintoja; päinvastoin, jotta pienimmätkin yksiköt hajautetuissa luonnonjärjestelmissä voisivat mielekkäästi toimia ilman ohjausta, niiden pitää

näitä merkityksiä luonnostaan ymmärtää. Merkitysten täytyy *emergoitua* alhaalta päin, itsestään, maailmasta periytyen.

Mikä maailmassa yleisesti ottaen sitten on *merkityksellistä*, eli mikä on *olennaista* ja *relevanttia?* Se on jotakin sellaista, mikä *kykenee muuttamaan maailmaa*. Voitaisiin puhua "*Gregory Batesonin* semantiikasta"; hän puhui *merkityksellisistä muutoksista* (engl. *"differences that make difference"*).

Jotta merkityksillä olisi merkitystä, jonkun pitäisi kai olla tulkitsemassa näitä merkityksiä? Nyt kuitenkin luovutaan kokonaan tällaisista vakiintuneista ihmisorientoituneista ajatusluutumista: kun merkitys on kyky vaikuttaa maailmaan, "tulkitsemiseksi" riittää tämä maailman muuttuminen. Muutos on *merkitys itsessään* — ja tätä kaikkea tulkitsee pelkästään luonto, maailman henki itse (jos välttämättä halutaan tulkita tämä toimivan subjektin näkökulmasta). Piispa *Berkeleyn* sanoin *olla olemassa* on sama kuin *tulla havaituksi*. Mutta havaitsijaksi ei tarvita ihmistä.

Kaikki mikä maailmassa on tärkeää muuttaa maailmaa jotenkin; voidakseen olla tärkeä, asian on siis välttämättä oltava havaittavissa. Kaiken mikä on merkittävää täytyy olla mukana mittausdatassa — ja hyvä arvaus on, että keskittymällä kaikkein näkyvimpiin ilmiöihin todennäköisesti mennään mielekkääseen suuntaan. Nyt voidaan väittää, että juuri ne edellä käsitellyt *varianssit ovat niitä relevanssin välittäjiä*.

Miksi variansseilla (nollakeskiarvoistetuilla tai keskiarvoistamattomilla) sitten on kyky muuttaa maailmaa? Osoittautuu, että neliöllisillä termeillä on tyypillisesti *fysikaalisen energian* tulkinta: esimerkiksi $\mathrm{E}\{v^2\}$, jossa v on nopeus, on verrannollinen *kineettiseen energiaan*, ja $\mathrm{E}\{i^2\}$, jossa i on sähkövirta (tai $\mathrm{E}\{u^2\}$, jossa u on sähköjännite), on verrannollinen *sähköiseen energiaan*. Näin ollen tällaisilla suureilla on hyvinkin konkreettinen kapasiteetti vaikuttaa maailman tilaan. Ehkä tämä johtuu siitä, että matemaattinen *pistetulo*, jonka määritelmä on olennaisesti neliömuotoinen, kykenee abstrahoimaan vektorimuotoiset virtauksenkaltaiset suureet skalaariseen muotoon.

Ei-fysikaalisissa ympäristöissä samantyyppinen lauseke kuvaa normaaliselle datalle ns. *Fisherin informaatiota*, taas jotakin intuitiivisesti arvokasta; perinteisesti vastaavankaltaisten informaatiosuureiden tarkastelun kri-

teereitä on käytetty *identifiointiteoriassa* (engl. *model identification*) mallien määrittämiseen. Ja näyttäisi siltä, että *informaatiogeometrian* (engl. *information geometry*) puitteistuksessa Fisherin informaatio saa aivan uudenlaista merkitystä jakaumien välisenä mittana Riemannin avaruuksissa. Fyysikko *Roy Frieden* jopa väittää, että *kaikki fysiikan lait voidaan johtaa Fisherin informaatiosta*.

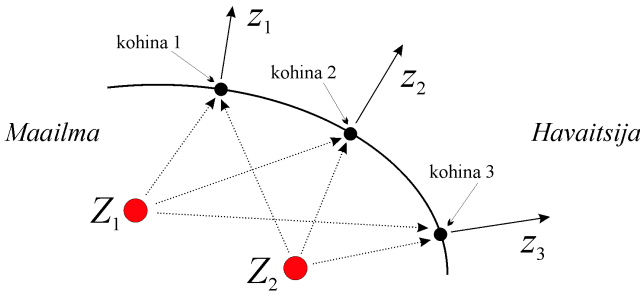
Nyt siis jakaumien toisten momenttien oletetaan sisältävän formaalin (eräänlaisen "kontekstuaalisen") semantiikan ytimet. Tämä käsite ansaitsee oman nimen; tästä lähtien suuretta

$$\mathcal{E}\{z_\iota^2\}, \tag{1.3}$$

tai yleensä jonkinlaisten neliömuotojen odotusarvoja, tullaan nimittämään ENFORMAATIOKSI, eli *emergentiksi* tai *energeettiseksi informaatioksi* (tai *formaatioksi*). Tässä lausekkeessa on käytetty "emergenssioperaattoria" $\mathcal{E}\{\,\cdot\,\}$ matemaattisesti yksikäsitteisen odotusarvo-operaattorin sijaan, koska enformaation määrittyminen riippuu havainnan "kantamasta": kuinka kauas voidaan kyseisessä ympäristössä "nähdä" (spatiaalisesti tai temporaalisesti). Molemmat operaattorit ovat yhtä lailla lineaarisia, ja ne käyttäytyvät samalla tavoin matemaattisissa lausekkeissa (matriiseja käsiteltäessä kumpaakin operaattoria sovelletaan elementeittäin).

Lausekkeessa (1.3) on nyt konkretisoitu *emergenssin* idea: emergenssiä *voi* tapahtua, kun abstrahoidaan ääretöntä määrää vuorovaikutuksia. Kuten tullaan näkemään, tällaisesta ytimestä voi ohjaamattomasti lähteä kasvamaan jotakin kiinnostavaa jos se kykenee kiteyttämään kyseisessä ympäristössä relevantin semantiikan.

Ilmenee tosin, että pelkkää "itseisvariaatiota" usein leimaa *mittauskohina*; myöhemmin havaitaan, että suureen rooliin nousevat *korreloivat variaatiot*, joita kuvaavat lausekkeet ovat muotoa $\mathcal{E}\{z_\iota z_{\iota'}\}$ erillisille mittauksille ι ja ι'. Tätä on perusteltu kuvassa 1.3: jos kohinaisten mittausten takana on jokin *todellinen* maailmaa kuvaava muuttuja Z_ι ja sen enformaatio $\mathcal{E}\{Z_\iota^2\}$, tämä muuttuja tyypillisesti heijastuu useisiin mittauksiin; näin ollen se jää näkyviin yhteisvariaatioihin, kun taas korreloimattomat mittauskohinat suodattuvat yhteisvariaatioista pois.



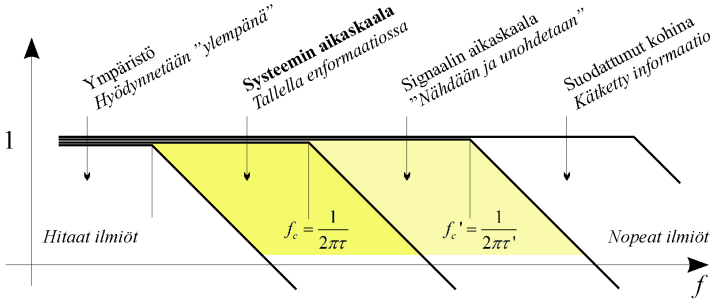
KUVA 1.3: Yhteisvariaatioista kohina suodattuu

Monimuuttujaisen lähestymistavan etuna on se, että ”heikot signaalit” tulevat näkyviksi ja voivat yhdessä saada aikaan *megatrendejä*. Lämpöopin intuitioihin rinnastaen voidaan väittää, että vaikka korreloimaton lämpökohina onkin parempi kuin ei mitään, korreloiva variaatio kertoo maailmasta enemmän; se tarkoittaa *kykyä tehdä työtä*.

Matemaattisella odotusarvo-operaattorilla ja dataorientoituneella emergenssioperaattorilla on käytännössä suuri ero; kuvassa 1.4 seuraavalla sivulla on esimerkiksi havainnollistettu ”havaintohorisontin” merkitystä. Tässä tapauksessa on määritelty jatkuva-aikainen enformaatioestimaatti ”unohtamaan” vanhaa variaatiota soveltamalla lineaarista alipäästösuodatinta, jossa *aikavakio* (engl. *time constant*) on τ:

$$\frac{d\mathcal{E}\{z_\iota^2\}}{dt/\tau}(t) = z_\iota^2(t) - \mathcal{E}\{z_\iota^2\}. \tag{1.4}$$

Tällöin vain *rajataajuutta* $f_c = 1/2\pi\tau$ (engl. *cut-off frequency*) hitaammat variaatiot tulevat huomioiduiksi enformaatiossa. Ajan kuluessa yhä vain hitaammat ilmiöt tulevat näkyviksi, ja uutta variaatiota paljastuu (logaritmisen) taajuusasteikon alapäässä. Kun myös signaalille z_ι itselleen on oma alipäästösuodattimensa jollakin korkeammalla rajataajuudella (kuvassa f_c'), nähdään, että eri taajuuskaistoilla on tilaa eritasoisille ”itsesimilaarisille” rakenteille mallintaa ja hyödyntää enformaatiota.



Kuva 1.4: Taajuuskaistat ja niiden informaation kohtalo

Voidaan esimerkiksi väittää, että vain *korkein* (*hitain*) *taso näkee keskiarvon* (*nollataajuuden*). Jos halutaan keskittyä puhtaaseen enformaatioon, olettaen jonkin ylemmän tason olemassaolo, *data voidaan olettaa keskiarvoistuneeksi*.

On erilaisia teorioita siitä, mikä on *kompleksisuuden yleinen luonne*; esimerkiksi *Herbert Simon* korostaa *hierarkioiden* merkitystä. Myös enformaatioteorian kehyksessä hierarkiat osoittautuvat tärkeiksi (kuten voidaan arvata kuvasta 1.4); mutta nyt näkyvät rakenteet eivät ole se tärkein asia, vaan ennemminkin emergoituvat *ajalliset rakenteet*. Kun enformaatio lasketaan yli aika-akselin, aikamuuttuja abstrahoituu pois, ja muodostuvat relevanssin hierarkiat ovat olennaisesti uudentyyppisiä.

Kun emergenssioperaattori kapseloi stokastisen mittausaineiston deterministisiksi ”lokeroiksi”, saavutetaan uusi redusoitumaton taso; mutta kun tällaisia rakenteita kertyy paljon, lopputulos on stokastinen, ja tarvitaan taas uutta emergenssiä. Näin stokastiset ja deterministiset tasot vuorottelevat. Muodostuvat hierarkiat ovatkin yksi lähestymistapa selittää *evoluution toimintaa* sen fraktaalisessa yleispätevyydessä; evoluutio on enformaatioteorian kantava teema, ja siitä jatketaan kohdassa 1.5 (ja edelleen luvussa 5).

1.4 Vielä ymmärtämisestä

Asioiden trivialisointia välttääksemme täytyy todeta, että edellä käsitelty ”naturalistinen ymmärtäminen” ei tokikaan vielä tyhjennä ymmärtämiseen liittyvää ongelmakenttää. Systeemien maailma on monitasoinen, ja haluaisimme, että samat periaatteet toimisivat joka tasolla — myös inhimillisestä ymmärryksestä puhuttaessa; niin, mentaalimaailma on se johon loppujen lopuksi kaikkein mieluimmin haluaisimme pureutua, ja suurin haaste onkin *ymmärtämisen ymmärtäminen*.

Ylä- ja alatason intuitiot täytyy saada yhdenmukaisiksi ja toisiaan tukeviksi, ja lähemmäs tätä tavoitetta päästään asianmukaisella *käsitteiden valinnalla*. Kappaleen 1.1 esimerkin mukaisesti käsitteet ovat nyt niitä ”antureita”; käsitteet ovat kiintopisteitä, ne aktualisoivat todellisuuden, rakenteistaen ajattelun maailman.

Miten sitten kannattaisi käsitteet nyt valita niin että ne tukisivat enformaation ajatuksen ymmärtämistä? Tässä vaiheessa tärkeintä (täsmällisyyden kustannuksellakin) on saada käyntiin mielen prosessit, johdantona kokonaisvaltaiseen ajattelutavan muutokseen. Enformaatio nimittäin on olemukseltaan liikettä, sitä ei voi kahlita; verrattuna tavalliseen aineeseen, enformaatio ei kumuloidu (kyseisellä emergenssin tasolla) tuttuun tapaan, vaan se *on olemassa vain ollessaan liikkeessä*. Myöhemmin prosesseja voidaan tarkentaa, ja ehkä ne sitten konvergoivat kohti *intuitiivisesti mielekkäitä attraktoreita*.

Sillä se on juuri tämä *intuitio*, joka on avainasemassa ymmärryksen ytimessä. Kun mielen maailmassa ”mittaukset” z_ι ovat joitakin mielteitä, enformaation lausekkeet muotoa $\mathcal{E}\{z_\iota z_{\iota'}\}$ kuvaavat mielteiden välisiä *konnotaatioita* ja *assosiaatioita*. Näistä yhdessä voi muodostua sitä intuitiota, mielen maailmassa relevanttia ajattelua ruokkivaa sisäsyntyistä ”energiaa”, *Spinozan suoraa tietoa*. Intuitiolla on kapasiteetti saada aikaan sisältä päin ohjautuvia muutoksia mielen maailmassa, se on *relevantti* käsite vaikka olisikin epämääräinen.

Vielä vahvemmaksi enformaation idea tulee rinnastettaessa se *elämänvoimaan*. Todellakin, luvussa 4 esitetään enformaatioajatuksen pohjalta yleinen *elämän teoria*.

Tällaisella rinnastuksella ymmärryksen intuitioita tukemaan saadaan valmis mielleyhtymien maailma. Intuitiot elämän olemuksesta ovat tässä yhteydessä erityisen arvokkaita: tällöin on helpompi ymmärtää tarkasteltavien prosessien herkkyys ja kunnioittaa sitä. Tuntuukin ehkä erikoiselta, että tällaisia asioita tullaan jatkossa käsittelemään matemaattisesti. Matematiikan rooli tässä esityksessä on toimia sivuroolissa, apuvälineenä, jolla intuitioita voidaan tarpeen tullen (seuraavalla lukukerralla!) tarkentaa; kaavat eivät sellaisenaan riitä, ne ovat intuition rinnalla toissijaisia, mutta järkevästi käytettyinä ne ovat apuna elämänvoiman virtauksen yhä tarkemmassa jäljittämisessä (vertaa kappale 1.8).

Nimittäin vielä käyttökelpoisemmaksi ”intuition intuitio” tulee, kun siihen kytketään *dynaaminen näkökulma*, kun ruvetaan puhumaan jonkinlaisesta *tajunnan virtauksesta*. Kun elämänvoiman virtaus saadaan käynnistymään, sillä voi liikkeelle lähdettyään olla voimaa murtaa erilaisia patoutumia — myös mielensisäisiä luutumia. Tämä on perusmekanismi johon pyritään; ihmisen hahmotuskoneisto on kapasiteetiltaan ainutlaatuinen, ja onnistunut *hahmojen kytkeytyminen* voi tehdä oivaltamisen ja ymmärtämisen helpoksi.

Yksi hyvin konkreettinen ajatusluutuma josta nyt pyritään eroon on epämääräinen *väärän ajattelun pelko*. Tämän päivän tieteessä esimerkiksi tähän elämänvoiman ajatukseen kytkeytynyt *vitalismi* on huonossa maineessa, se tuo mieleen prototieteelliset teoriarakennelmat pimeältä keskiajalta. Nykyisinhän ainoastaan mekanistis-deterministiset selitykset hyväksytään tieteessä; kuitenkin, mikäli *miksi*-tyyppisiä kysymyksiä ei voi esittää, kaikkein kuvausvoimaisimmat mallit jäävät saavuttamatta. Ja kuten tullaan havaitsemaan, kun elämänvoima hyväksytään tarkastelun kohteeksi, sillä on *aivan uudenlaista selitysvoimaa*; elämänvoima-ajatuksen tarjoama intuitiohyöky voi murtaa pidemmänkin ajattelun kahleiden ketjun.

Jos tyydytään puhumaan yksinkertaisesti enformaation virtauksesta, käsittely pysyy teknisenä ja tukevasti perusteltuna, ja vältetään *teleologinen* kysymyksenasettelu: aktiivisuutta ei *vedetä* jonkin ”ensimmäisen liikuttajan” toimesta, vaan sitä *työnnetään* sisäisten, enemmän tai vähemmän hyvin ymmärrettyjen prosessien aiheuttaman paineen vuoksi. Mitään ennalta annettua *tavoitetta* kehityksellä ei ole.

Ymmärryksen ongelma on toki vielä edellä esitettyäkin suurempi. Elämänvoiman virtausta (tai intuitiota) kahlitsee olemassa oleva ”uoma”, joka ohjaa sen kulkua; aiemmat, jo olemassa olevat rakenteet ja toisaalta ulkopuolelta annetut tulkinnat määräävät sen, millaisessa muodossa emergenssi toteutuu. Kokonaisuus on vahvasti takaisinkytketty. Ylimmän tason ymmärrystä tavoiteltaessa täytyy vähän kerrassaan rakentaa mentaalisia työkaluja eritasoisten ilmiöiden käsittelemiseen ja oman subjektiivisen maailman haltuunottoon (jonkinlainen yhteenveto esitetään lopulta luvussa 7).

Esimerkiksi *solun* toiminnan ymmärtämiseen ei riitä tarkkakaan kemikaalien virtausten jäljittäminen; haaste olisi suunnilleen yhtä suuri kuin yritettäessä ymmärtää vaikkapa *eduskunnan* toimintaa pelkkiä ihmisvirtoja seuraamalla. Ongelma ei ole määrällinen vaan laadullinen, mittausten määrän mekaaninen kasvattaminen ei auta; *funktiot tapahtuvat toisissa sfääreissä*. Nämä ”toiset todellisuudet” on kyllä saatavissa datapohjaisen analyysin piiriin, mutta se voi tapahtua vain ”maailmaa laajentamalla”, kehittämällä *semioosia* (katso kappale 1.7). Monimutkaisissa järjestelmissä *aidosti emergentit merkitykset ovat redusoitumattomia*.

1.5 Evoluutio, optimaalisuus ja lineaarisuus

Toinen keskeinen ongelma tarkasteltaessa ”pyrkimystä itsensä ymmärtämiseen” on se *pyrkimys*. Kuinka luonto ilman minkäänlaista keskitettyä *järkeä* voisi aktiivisesti pyrkiä johonkin?

Tämä ”tahto” on illuusio joka syntyy katsottaessa hajautettua enformaation prosessoitumista ylhäältä päin. Kun jossakin on paljon enformaatiota, tyypillisesti tällainen energia tekee itsensä kyllä huomatuksi. Aktiivisuus näyttää hakeutuvan sinne missä on paljon resursseja tarjolla, koska enformaatio määritelmällisesti synnyttää aktiivisuutta ja maailman muuttumista. Ei tarvita päämäärähakuista *migraatiota* tai muuta vastaavaa pyrkimystä kohti parempia olosuhteita, koska hajautetussa maailmassa ”kaikkialla” on potentiaali suurempaan näkyvyyteen mikäli enformaatiota sattuu olemaan tarjolla.

Jos jossakin ympäristössä aktiivista migraatiota todella tapahtuu, sa-

tunnaisten kulkujen kokonaisuutta (ns. *Brownin liikettä*) näyttää leimaavan ”palkitseminen”, joka johtuu eri paikoissa tarjolla olevien enformaatioresurssien eroista. Edelleen, jos toimijoilla on erilaisia ”strategioita”, tehokkain näistä saa eniten enformaatiota ja tulee näkyvimmäksi. Voidaan sanoa, että ylhäältä päin katsottuna, kun toiminnan yksityiskohtaisia mekanismeja ei enää kyetä erottamaan, käyttäytymisiä näyttäisi aina ohjaavan jonkinlainen *enformaation nälkä*. Voidaan jopa tulkita, että menestyneitä yksilöitä on ohjannut jonkinlainen *menestymisen himo*, joka on johtanut resursseista käytävään *kilpailuun*.

Kyseessä on eräänlainen *universaali evoluutio*, näkyvän maailman muuttuminen. Kuitenkin *Charles Darwinin* ajatuksia pitää nyt hieman muokata: hänen lähestymistapansa evoluutioon oli sekin liiaksi ”ylhäältä katsova”. Kehitystä tapahtuu joka tasolla ja melko vaivihkaisesti, ja kehitys on *alhaalta ohjautuvaa*. Kyseessä ei ole ensi sijassa väkivaltainen kilpailu, häviäjien eliminointi, voittajien triumfi; kehitys on jatkuvampaa, toimijoiden lähinnä keskittyessä omiin vahvuuksiinsa tai ”vapauksiinsa” (katso luku 5). Olosuhteisiin sopivin vaihtoehto vain tulee vähitellen näkyvämmäksi. Ainakin alimmilla tasoilla toimijat eivät tiedä mitään toisistaan.

Voidaankin laajentaa *Theodosius Dobzhanskyn* klassista ajatusta: *millään asialla monimutkaisissa järjestelmissä ei ole mieltä muuten kuin evoluution valossa*. On järkevää olettaa, että luonto ei tee mitään turhaa, kaikki optimoituu, vain menestyvin jää näkyväksi. Edellä mainitun universaalin empirismin hengessä voidaan kärjistää, että mitä maailmassa onkin, sen *syy olla olemassa on maailmaan vaikuttaminen* ja siis *näkyminen*. Ja koska luonto koostuu hajautuneista ”toimijoista”, tämä näkymisen hybris hallitsee kaikkea olemassa olevaa.

Yhdistämällä nämä kaksi periaatetta (halu saada enformaatiota ja halu antaa sitä), voidaan väittää, että *oleminen on vaikutusten* (*merkitysten*) *vastaanottamista ja muihin vaikuttamista* — siis mahdollisimman tehokasta *vuorovaikuttamista*. Keskeistä on datan vaihto, toisiin vaikuttaminen ja toisten vaikutuksille alttiina oleminen, jolloin tässä vuorovaikutuksessa ”menestyjät” seuloutuvat ja (jatkossa esitettävällä tavalla) rakennetta alkaa emergoitua.

Mikään maailmassa ei pysy muuttumattomana vaan kaikki on alituisessa muutoksessa, Herakleitoksen hengessä. Evoluutio ei kuitenkaan ole satunnaisten hyppäysten jono, vaan (enformaatioteorian kehyksessä) se on enemmän tai vähemmän johdonmukainen polku kohti lokaalia enformaatio-optimia (katso luku 5). Pyrkimys kohti optimia — tämä on arvokas ohjenuora etsittäessä ”oikeaa” enformaation maksimoitumisen mekanismia, koska tällöin tutkittavia vaihtoehtoja on vähemmän; esimerkiksi vapaiden parametrien määrä voidaan tällöin minimoida, jolloin esimerkiksi tehtyjen hypoteesien testaaminen helpottuu.

On tietenkin mahdollista, ettei luonto itsekään ole vielä löytänyt optimaalisia ratkaisuja; voidaan jopa väittää, että muuttuvassa maailmassa evoluutio ei koskaan voikaan saavuttaa lopullista tasapainoa. Silti on järkevää painottaa tällaisia optimipisteitä, hypoteettisia tasapainoja; kun satunnaiset muutosaskeleet voidaan tällöin abstrahoida näkymättömiin, vain tasapainoa ylläpitävien ”voimien” yleinen luonne jää jäljelle. Tässä mielessä voitaisiin nyt puhua jonkinlaisista *kehityksen asymptooteista* ja jo toteutuneen biologian taustalla olevasta *metabiologiasta*, aivan niin kuin puhutaan *metafysiikasta*, jne.

Valituissa optimoinnin lähtökohdissa on yksi suuri etu: koska maksimoitava enformaatio on muodoltaan olennaisesti neliöllinen lauseke, tiedetään jo etukäteen, että tällöin *optimoivat funktiot ja rakenteet ovat lineaarisia*. Ja jos jokin on lineaarista, se on suoraviivaista! Tämä lineaarisuus ei ainoastaan helpota teoreettisia tarkasteluja, vaan se tekee myös teorian soveltamisesta helpompaa, se tekee teorian olemassaolon jopa uskottavaksi: lineaarisuus merkitsee sitä, että jatkossa rakennettavat mallit ovat *skaalautuvia.* Riippumatta järjestelmän koosta, lineaarisen järjestelmän käyttäytyminen säilyy laadullisesti samanlaisena.

Niiden optimaalisuudesta johtuen voidaan jopa väittää, että *luonto itse pyrkii lineaarisiin rakenteisiin* — vaikka kaikki sen käytettävissä olevat ”komponentit” ovat toivottoman epälineaarisia…

Lineaarisuusolettamus tosin kuulostaa umpikujalta: lineaaristen järjestelmien perustavanlaatuiset rajoitteet tunnetaan hyvin. Kokonaisuus voi tällöin olla *vain* osiensa summa. Mutta mitä lineaarijärjestelmien kuvausvoimaan tulee, osoittautuu, että ne voivat yllättää: kuten luvussa 2

todetaan, ei kannata aliarvioida *takaisinkytkennän* mahdollistaman ääretömän iteraation voimaa!

Kuten edellä todettiin, enformaatioteoriassa ei lähtökohtaisesti oleteta minkäänlaisia ennalta määrättyjä rakenteita. Kaikki struktuurit, esimerkiksi hierarkiat, saavat perustelunsa enformaation virtausten kautta, ja tämän virtauksen seuraamista voidaankin pitää hyvänä ohjenuorana pyrittäessä maailman kokonaisvaltaiseen ymmärtämiseen. Seuraavassa ruvetaankin lähemmin tarkastelemaan tämän ”enformaatiovuon” ominaisuuksia.

1.6 Vuorovaikutuksen mekanismit

Edellä oletettiin, että ”oleminen on vuorovaikuttamista”. Nyt haasteena onkin tämän periaatteen toteuttaminen käytännössä: kuinka vuorovaikutus voitaisiin funktionalisoida.

Tässä tapauksessa voimme ottaa oppia olemassa olevista, jo hyvin tunnetuista järjestelmistä: myös *kemiallisissa prosesseissa* näkyvät ilmiöt tapahtuvat alla olevien luvuttomien hiukkasten kaaoksessa. Jos siis oletetaan ilmiön ζ_i, jossa $1 \leq i \leq n$, olevan seurausta muuttujien $z_1, \ldots, z_m$ (isotermisestä jne.) yhteisvuorovaikutuksesta, tiedetään ”reaktionopeudelle” pätevän

$$\frac{d\,\zeta_i}{dt} = \dot{\zeta}_i = \alpha_i \; z_1^{a_{i1}} \; \cdots \; z_m^{a_{im}}, \tag{1.5}$$

jossa kerroin α_i ja eksponentit a_{ij} ovat jonkinlaisia sovitusparametreja. Tätä kaavaa voidaan tulkita siten, että jos tekijät z_j ovat luonteeltaan jonkinlaisia hiukkastiheyksiä tai todennäköisyyksiä, ja kertoimet a_{ij} ovat jonkinlaisia reaktioaktiivisuuksia, reaktiossa tarvittavien yksittäisten hiukkasten otolliset törmäämistodennäköisyydet — ja samalla ”alkeisreaktioiden” tapahtumistodennäköisyydet — ovat verrannollisia esitettyyn tulomuotoiseen lausekkeeseen.

Lauseke saadaan yksinkertaisempaan muotoon ottamalla siitä puolittain logaritmi

$$\log \dot{\zeta}_i = \log \alpha_i + a_{i1} \log z_1 + \cdots + a_{im} \log z_m, \tag{1.6}$$

ja edelleen, laskemalla differentiaalit puolittain, saadaan lokaalisti

$$\frac{\Delta\dot{\zeta}_i}{\langle\dot{\zeta}_i\rangle} = a_{i1}\frac{\Delta z_1}{\langle z_1\rangle} + \cdots + a_{im}\frac{\Delta z_m}{\langle z_m\rangle}. \tag{1.7}$$

Tässä Δz_j merkitsee muuttujan pientä poikkeamaa nominaaliarvosta $\langle z_j\rangle$; tämä antaa vihjettä myös siitä, kuinka ”systeemisemioosi”, tai havaintojen esikäsittely on ehkä suoritettu (muuttujien suhteellinen skaalaus, keskiarvoistus vasta tämän jälkeen). Nyt voidaan esitellä lopullinen yksinkertaistettu kaavamuoto:

$$\bar{x}_i = a_{i1}\bar{u}_1 + \cdots + a_{im}\bar{u}_m. \tag{1.8}$$

Muuttujilla tässä lausekkeessa on ilmeisesti erilaisia *rooleja*; myös niiden olemuksesta voidaan tehdä uudenlaisia tulkintoja:

- RESURSSIT $\bar{u}_j = \Delta z_j/\langle z_j\rangle$, jossa $1 \leq j \leq m$, ovat jonkinlaista aikaansaavaa *painetta*: potentiaaleja, voimia, tms.

- AKTIVITEETIT $\bar{x}_i = \Delta\dot{\zeta}_i/\langle\dot{\zeta}_i\rangle$, jossa $1 \leq i \leq n$, ovat jonkinlaista aiheutettua *muuttumista*: nopeuksia, virtauksia, tms.

Tällaisella muuttujien $\bar{x}_i$ määrittelyllä voidaan väittää, että *muutos tulee leivotuksi sisään lausekkeisiin*; jopa niin, että ”tuntemattomat ovat muutosta”.

Lauseke (1.8) voidaan siis tulkita myös toisenlaisessa kehyksessä: voidaan ajatella, että se kuvaa jonkinlaista *yleistettyä diffuusiota*, jolloin parametrit a_{ij} ovat jonkinlaisia *diffuusiokertoimia*, jotka määräävät, kuinka voimakkaasti aktiivisuus leviää. Tulkintoja on monia, kukin edellyttäen omanlaistaan näkökulmaa ympäristöön (datan esikäsittelyä); diffuusionäkökulma mahdollistaa myös *globaalin*, kaikilla muuttuja-arvoilla pätevän mallin (kun differentiaalisten muutosten tarkastelu oli pätevä vain toimintapisteen ympäristössä). Keskeistä on, että saavutettu lineaarinen vuorovaikutus (1.8) voidaan olettaa rakenteeltaan aina samanlaiseksi — lineaarirakenne on yksikäsitteinen. Ja, kuten todettua, enformaation mahdollisimman tehokkaaksi jäljittämiseksi tarvitsemme lineaarirakenteen!

Aktiviteetit määrittelevät jonkinlaisia *tilamuuttujia* (engl. *state variables*) jotka toteuttavat *integroivaa käyttäytymistä* ja *inertiaa*. Tässä vaiheessa puhumme kuitenkin vain tasapainotiloista[1], jolloin muuttujissa $\bar{u}_j$ ja niitä vastaavissa $\bar{x}_i$-arvoissa nopeat transientit ovat jo kadonneet. Tällöin dynaamiset yksityiskohdat voidaan aluksi jättää huomiotta (katso luku 6).

Nyt maailmaa voidaan alkaa rakenteistaa. Voidaan määritellä *neokyberneettinen systeemi* niiden tilamuuttujien $\bar{x}_i$ joukkona, jotka näkevät ympäristössään saman resurssien joukon $\bar{u}_j$; systeemin muuttujilla on siis sama näkökulma maailmaan, ja resurssien "esikäsittely" on kaikilla samanlainen. Jatkossa yleensä oletetaan, että systeemi on yksinkertaisempi kuin ympäristönsä, eli systeemimuuttujia on (huomattavasti) vähemmän kuin ympäristön muuttujia, niin että $n \ll m$.

Lauseke (1.8) on perustana emergoituville rakenteille — millaisista rakenteista on kyse? Voidaan sanoa vaikka niin, että muuttujassa $\bar{x}_i$ itsessään on hitautta, ja sen voidaan tulkita toteuttavan jonkinlaisen *lyhytkestoisen muistin*, järjestelmän tilan; parametrit a_{ij} yhdessä muodostavat *pitkäkestoisen muistin*, koko emergoituvan rakenteen pysyvän ytimen.

Optimoivassa maailmassa ei ole virtausta ilman painetta, ei seurausta ilman syytä; kaikki olennainen määräytyy ympäristössä (joka näkyy muuttujissa $\bar{u}_j$), niin että emergoituva systeemi (jota esittävät muuttujat $\bar{x}_i$) on vain jonkinlainen *peilikuva* ympäristöstään. Periaatteessa riittää tuntea ympäristö (sen datahistoria) tunteakseen systeemin (ainakin sen perusominaisuudet). Peilikuvan muodostuminen ei ole kuitenkaan aina samanlaista.

Protagoraksen ajatusta soveltaen voidaan sanoa, että *systeemi on maailmansa mitta*. Kun *semiotiikka* on oppi, joka etsii ympäristöstä merkityksiä, voidaan yleistäen määritellä että "systeemisemioosi" määrittää systeemille näkyvissä olevien resurssien arvotuksen. Jo numeeriset tarkastelut paljastavat, että muuttujien *painotukset* vaikuttavat suuresti siihen, kuinka suuren numeroarvon enformaation lausekkeet saavat (tähän palataan seuraavas-

[1] Tässä oletetaan, että "tasapainossa" voi silti olla jatkuvaa muutosta; ensimmäisten derivaattojen ei tarvitse mennä nollaan, kunhan toiset derivaatat menevät.

sa luvussa). Edelleen voidaan puhua *yleistetystä fenomenologiasta*: systeemikohtainen ”maailmankuva” riippuu täysin sen ”aistimista” ja niiden määräämästä ”suodatuksesta”.

Seuraavassa ei pyritä jäljittämään järjestelmän oppimisen mekanismeja; tarkastelun kohteena on ainoastaan asymptoottinen tasapaino, hypoteettinen tilanne, jossa se ”näkyvin” on saavuttanut maksimaalisen näkyvyytensä. Mihin systeemi pyrkii sokeassa enformaationnälässään?

1.7 Kohti enformaation maksimia

Koko lopun kirjan ajan keskitymme konkretisoimaan niitä mekanismeja, joilla ”luonnon itseymmärtäminen” esitetyssä kehyksessä toteutuu.

Parametrit a_{ij} lausekkeessa (1.8) eivät välttämättä ole vakioita. Diffuusiokertoimet voivat määräytyä vaikkapa järjestelmän fyysisen rakenteen perusteella: mitä lähempänä toisiaan tarkastelupisteet sijaitsevat, sitä suurempi on niiden keskinäinen vuorovaikutus (aktiivisuuden diffuusio). Tämä tarkoittaa sitä, että parametrien arvot voivat *adaptoitua* kun järjestelmän rakenne muuttuu. Ja vaikka todellista adaptaatiota ei tapahtuisikaan, täytyy muistaa maailman ”populaatioluonne”: yksilöillä on erilaiset ominaisuudet, ja ”onnekkain” (parhailla parametreilla varustettu) valikoituu ja tulee näkyvimmäksi, antaen illuusion adaptaatiosta. Miten parametrien kannattaisi muuttua jotta enformaatiovirtaus maksimoituisi?

Kun lausekkeen (1.8) molemmat puolet kerrotaan muuttujalla $\bar{x}_i$, ja kun emergenssioperaattoria sovelletaan molemmilla puolilla, saadaan vastaanotetulle enformaatiolle esitysmuoto

$$\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\} = a_{i1}\mathcal{E}\{\bar{x}_i\bar{u}_1\} + \cdots + a_{im}\mathcal{E}\{\bar{x}_i\bar{u}_m\}. \tag{1.9}$$

Tällä lausekkeella on mielekäs maksimi parametrien a_{ij} funktiona vain jos niitä rajoitetaan jotenkin; voidaan olettaa, että parametrivektorin a_i normi (tai ”energia”) säilyy vakiona (ainakin hetkellisesti):

$$\begin{array}{ll} \text{Maksimoi} & a_{i1}\mathcal{E}\{\bar{x}_i\bar{u}_1\} + \cdots + a_{im}\mathcal{E}\{\bar{x}_i\bar{u}_m\}, \\ \text{kun} & a_{i1}^2 + \cdots + a_{im}^2 = \textit{vakio}. \end{array} \tag{1.10}$$

Soveltamalla *Lagrangen kertoimien tekniikkaa* (engl. *Lagrange multipliers*), rajoitettu optimointiongelma saadaan muunnetuksi rajoittamattomaksi, ja voidaan todeta että maksimissa täytyy olla voimassa

$$a_{ij} = q_i \, \mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{u}_j\}, \tag{1.11}$$

jossa uutta parametria q_i, jonkinlaista ”vahvistusta”, kutsutaan jatkossa *kytkentäkertoimeksi*. Jos nyt kaikki aktivaatiot kootaan n-dimensioiseen vektoriin $\bar{x}$ ja kaikki resurssit m-dimensioiseen vektoriin $\bar{u}$,

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \vdots \\ \bar{x}_n \end{pmatrix} \qquad \text{ja} \qquad \bar{u} = \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \vdots \\ \bar{u}_m \end{pmatrix}, \tag{1.12}$$

ja jos kaikki systeemin kytkentäkertoimet q_i kootaan diagonaalimatriisin Q diagonaalielementeiksi, ja jos vielä määritellään (ei välttämättä keskitetty) *otoskovarianssimatriisi* $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}$, niin että

$$Q = \begin{pmatrix} q_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & q_n \end{pmatrix} \tag{1.13}$$

ja

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} = \begin{pmatrix} \mathcal{E}\{\bar{x}_1\bar{u}_1\} & \cdots & \mathcal{E}\{\bar{x}_1\bar{u}_m\} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{E}\{\bar{x}_n\bar{u}_1\} & \cdots & \mathcal{E}\{\bar{x}_n\bar{u}_m\} \end{pmatrix}, \tag{1.14}$$

voidaan systeemin kaikki muotoa (1.8) olevat vuorovaikutukset esittää kompaktissa matriisimuodossa

$$\bar{x} = Q \, \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} \, \bar{u}. \tag{1.15}$$

Tässä lausekkeessa (ja myös jatkossa) kannattaa muistaa se, että huolimatta (globaalista) matriisimuotoilusta, kaikki operaatiot systeemissä ovat skalaarisia ja täysin lokaaleja.[2]

[2] Jatkossa matriisit, vektorit ja skalaarit erottuvat asiayhteydestä; alaindeksit viittaavat tietorakenteen perusrakenteiden järjestykseen (vektorin indeksit viittaavat elementteihin ja matriisin indeksit viittaavat pystyvektoreihin).

Lauseke $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}$ on myöhemmissä tarkasteluissa keskeisessä roolissa: voidaankin kiteyttää, että järjestelmän käyttäytymistä hallitsee *tilojen ja resurssien yhteisenformaatioiden malli*. Kärjistäen: kyseessä on *naturalististen merkitysten kiteytymä*, joka kytkee ympäristön ja systeemin — rakenne on *semanttinen* pikemmin kuin ollenkaan syntaktinen.

Kaava (1.15) kytkee systeemin ympäristöönsä, ja se on avain systeemitason ilmiöiden ymmärtämiseen. Kytkentä muuttuu signaalien odotusarvon muuttuessa mikä edelleen muuttaa signaaleita; tämä jatkuu, kunnes signaalien tilastollinen luonne konvergoi. Luonteeltaan mukautumisen periaate vastaa ns. *Hebbin adaptaatiolakia*: jos tuleva signaali ja systeemin senhetkinen aktivaatio korreloivat, yhteys signaalin ja systeemin välillä vahvistuu. Tällaisen oppimiskäyttäytymisen neuropsykologi *Donald O. Hebb* havaitsi hermosoluissa yli 60 vuotta sitten. Keinotekoisissa hermoverkoissa samaa periaatetta on tutkittu runsaasti; esimerkiksi *neokybernetttinen mallirakenne*, jota tarkastellaan tarkemmin luvussa 2, kehitettiin alun perin neuroniverkon malliksi. Historiallisia taustoja (”syntyjä”) kunnioittaen voitaisiin sanoa, että kun neokybernetiikassa tarkastellaan konkreettisia mekanismeja, enformaatioteoria on asiat yhteen kytkevä holistinen ”kehyskertomus”.

> Kaava (1.15) näyttää erikoiselta ollakseen jollakin tapaa yleisluontoinen. Avainhaasteena onkin nähdä muutosten maailma tällaisten riippuvuussuhteiden kautta. Tarkastellaan vaikkapa *muurahaisten viestintää* tässä kehyksessä. Tiedetään, että muurahaiset käyttävät viestitykseen *feromoneja*: muurahaiset seuraavat mielellään reittejä, joilla feromonihormonin taso on korkea. Oletetaan nyt, että feromonimäärä on riippuvainen muurahaisten ”innostuneisuudesta”, niin että hyvän ravinnonlähteen löytänyt muurahainen erittää enemmän feromonia kohdatessaan vastaantulevan muurahaisen. Nyt jos merkitään muuttujalla $\bar{x}_i$ muurahaisten aktiivisuutta polkujen solmupisteessä i ja muuttujalla $\bar{u}_j$ resurssin j houkuttelevuutta, kokonaisuudessaan polun feromonimäärä on ilmeisesti verrannollinen kohtaamisten todennäköisyyteen eli

lukuun $\mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{u}_j\}$ (haihtuminen stabiloi feromonitasot). On hyvä arvaus, että kaava (1.15) kertoo nyt jotakin resurssien aikaansaamasta muurahaisten aktiivisuudesta: tasapainotilassa ”diffusoitunut” aktiivisuus polulla on verrannollinen sekä edessä olevan ravintolähteen arvoon että sinne vievän polun hyvyyteen.

Myöhemmin (erityisesti luvussa 5) tullaan huomaamaan, että sama pohjimmainen periaate (1.15) voi emergoitua näkyväksi hyvin eri muodoissa. Tällainen ”alatason” toiminnan kuvaus on kuitenkin välttämätön välivaihe pyrittäessä kohti ”ylätason” malleja.

Nyt on saavutettu jotakin: ei vielä kovin paljoa, mutta se *epsilon*. Enformaation virtaus on saatu sidotuksi konkreettiseen kaavaan, jonka täsmällinen muoto on avainasemassa järjestelmän käyttäytymistä pääteltäessä. Tätä ei voisi saada aikaan millään puhtaalla filosofoinnilla, eikä eteenpäinkään ole pääsyä ilman vahvoja käsitteellisiä työkaluja; ennen kuin jatketaan, tarkastellaan tarvittavia työkaluja hieman.

1.8 Työkaluja muutoksen maailmaan

Vaikka enformaatiolle on nyt kaava, täytyy koko ajan pitää mielessä, että *muutoksen luonnetta* on edelleen vaikea hahmottaa. Kaavamuoto on vain ”varjo” dynaamisten ilmiöiden kokonaisuudesta (*Platonin luolavertauksen* mielessä).

Sama vaikeus on vääristänyt ajattelijoiden pohdintoja kautta aikojen. Platon aikanaan totesi, että koska muutosta on niin vaikea käsitteellisesti hallita, *sen täytyy kaikkineen olla vain illuusiota*, ja keskittyi sen jälkeen pelkkiin ikuisiin *ideaaleihin* — johtaen harhaan länsimaista filosofiaa siitä lähtien, kaikkien tyytyessä lähinnä rakentamaan kiinteitä aristoteelisiä *taksonomioita*. Yhä modernina aikana Ludwig Wittgenstein linjasi, että *maailma koostuu* (*muuttumattomista*) *tosiasioista* — todellista on vain se mikä on käsinkosketeltavaa, eikä ajattelussa ole tilaa sellaiselle mitä ei vielä ole.

Kuitenkin *muutos on kaiken ytimessä*. Tästä näkökulmasta lähtee liikkeelle *prosessifilosofia* (engl. *process philosophy*), jonka mukaan *tuleminen* on olennaisempaa kuin *oleminen*. Silti kaikkein maailmojasyleilevinkin ajatusrakennelma, (*yleinen*) *systeemiteoria* (engl. (*general*) *system*(*s*) *theory*), epäonnistuu pahasti:

> Korostettaessa systeemiteorian yleisyyttä voidaan (huumorimielellä) määritellä tutkimuskohde niin, että ”systeemi” on *systeemi* — tarkoittaen, että minkä vain voi sielunsa silmin nähdä systeeminä, se kelpaa tutkimuksen kohteeksi. Tätä intuitiota käyttäen voi sitten vaikkapa todeta, että *jänis on systeemi*. Mutta kuten on havaittu, ihminenpä ei olekaan niin hyvä ”dynaamisissa” hahmontunnistustehtävissä.
>
> Tarkastellaan esimerkiksi sitä *jänistä* hiukan tarkemmin. Yksittäinen jänis ei vastaa ideaa ”ikuisesta jänismäisyydestä”, koska ilman lajitovereita se aikanaan kuolee ja lakkaa olemasta. Ja jopa koko jänispopulaatio kuolee nälkään ilman asianmukaista ympäristöä. Mitkä sitten ovat tällaisen ekosysteemisen jäniksenä olemisen määritteet?
>
> Systeemiteoriassa keskeisimpiä käsitteitä ovat systeemin *reunat* sekä sen *sisäänmenot* (engl. *input*) ja *ulostulot* (engl. *output*). Nyt kuitenkin reunat hämärtyvät; ja koska kaikki vuorovaikutukset ovat kaksisuuntaisia, signaalien roolitkin sekoittuvat, systeemin muuttuessa *pankausaaliseksi*. Kaikesta huolimatta jänis *on* relevantti kategoria, mutta vain *stabiilina attraktorina* biologisessa todellisuudessa; näennäisesti kiinteät rakenteet ovat olennaisesti dynaamisia tasapainoja.

Ihmisen ajattelun vaikeuksia pohdittaessa joudutaan perustavanlaatuisiin kysymyksiin *kielestä*. Kieli on ajattelun työkalu — ja kuten Ludwig Wittgenstein totesi, kieli asettaa rajat sille, mitä voi ajatella. — Kielen rajoja pitää laajentaa!

Tiivistäen, luonnollisen kielen ongelmana on se, että se on *yksiulotteinen*, se käyttää *tarkkarajaisia symboleja*, ja se tekee vaikeaksi tarkastella

aikariippuvia ilmiöitä. Ei riitä se, että esimerkiksi *nopeus* on määritelty vain pintatason käsitekategoriana; jotta aito ymmärtäminen voitaisiin saavuttaa, tämänkin käsitteen pitäisi olla ajattelun syvissä rakenteissa, kytkemässä peräkkäisiä aistihavaintoja yhteen. Paetaksemme *Zenonin nuoliparadoksia*, tarvitsemme käsitteellisiä työkaluja aikatason pisteiden yhdistämiseksi jatkumoksi; hahmottaaksemme aidosti kompleksisia järjestelmiä, meidän pitää kytkeä *matematiikan koneisto* elimelliseksi osaksi ajattelun mekanismejamme.

Matematiikka mahdollistaa täsmällisten käsitteiden määrittelemisen ja mielekkäiden ”päättelysääntöjen” toteuttamisen näillä käsitteillä tapahtuvaan operointiin. Mitään kovin monimutkaista ei tarvita:

- *Tilastomatematiikka* mahdollistaa kohinan käsittelemisen ja *sumeuden* hyödyntämisen; reaalimuuttujilla voidaan käsitellä ”alisymbolisia” ilmiöitä.

- *Differentiaalilaskenta* mahdollistaa muutosten ja äärettömän pienten suureiden hallitsemisen ja kumuloituvien rakenteiden jatkuva-aikaisen emergenssin.

- *Lineaarialgebra* mahdollistaa silmukoiden ja pitkien aikaskaalojen manipuloimisen; erityisesti *äärettömyys* on mahdollista tehdä konkreettiseksi.

- *Matriisimenetelmät* mahdollistavat korkeadimensioisten ja erityisesti hajautuneiden ilmiöiden rinnakkaisen manipuloinnin ja rakenteiden hallinnan.

Matematiikka mahdollistaa laadulliset harppaukset ajattelussa. Esimerkiksi yllä mainittu äärettömyyden käsitteen konkretisoituminen ratkaisee klassisen *itseviittaavuuden* (engl. *self-reference*) ongelman ja siihen liittyvät paradoksit: voidaan löytää se piste, johon vuorovaikutukset lopulta tasapainottuvat.

Matematiikassa jätetään perinteisesti kaikki tulkinnat sivuun; ”päättely” hoidetaan matemaattisen syntaksin pohjalta, ja kohdealueorientoitunut

semantiikka kytketään johdettuihin rakenteisiin jälkikäteen. Tätä on pidetty matematiikan vahvuutena. Nyt kuitenkaan *syntaksia ja semantiikkaa ei saa erottaa!* Ajatuksena tässä on se, että kun keskitytään ainoastaan enformaatiovirtauksen seurantaan (eli oletetun ”merkityksen” etenemiseen rakenteissa), tullaan tarkastelleeksi vain *relevantteja* asioita, eikä hukuta kaikkien *matemaattisesti mahdollisten* konstruktioiden hetteikköön. Kun semantiikka ohjaa laskentaa, kiinnostavat ilmiöt voivat emergoitua autonomisesti ilman että tarvitaan jonkinlaista ”älykästä suunnittelijaa” toimintaa ohjaamaan. Ja jos matemaattisia menetelmiä halutaan käyttää suurten datamäärien hallintaan, vain semantiikka laskentaan mukaan kytkemällä voidaan data mallittaa automaattisesti.

Seuraavassa luvussa näytetään konkreettisesti, minkälaista matematiikkaa tällaisilla reunaehdoilla tehdään: mennään aina vain sellaiseen suuntaan, jossa enformaation virtauksen maksimi toteutuu mahdollisimman tehokkaasti.

Luku 2

$\mathcal{E}$hdollistuminen.

Kalevala puhuu syntysanoista. *Voit ymmärtää ja hallita ilmiön, jos ymmärrät sen synnyn. Todellakin, ilmiön luonne paljastuu synnyssä; kehitys on synnyn kumuloitumista ja kokonaisuus on synnyn kertautumisten heijastuma. — Eli nykytermein kyseessä on* emergenssin *merkityksen korostaminen. Olisiko yksityiskohtiin ehkä jotain lisättävää?*

2.1 Yhteenveto kiireiselle

Tässä luvussa käydään läpi *neokyberneettisen mallin* matemaattinen johto, käsitteiden määrittely ja väitteiden perustelu; se voidaan harpata yli, jos lukijalle matematiikka ei sano mitään (lopun sovellus on kuitenkin havainnollinen esimerkki siitä, mitä todella korkeaulotteinen data tarkoittaa).

Matemaattisen analyysin lopputuloksia voidaan kuvailla pinnallisesti siten, että järjestelmä pyrkii kokonaisuudessaan ”ehdollistumaan”: kaikki oppiminen perustuu havaittujen signaalien keskinäisiin riippuvuuksiin. Jos vaikkapa signaalien $\bar{u}_j$ ja $\bar{u}_{j'}$ välillä on johdonmukainen yhteys (korrelaatio), eli jos niillä on paljon ”yhteisenformaatiota” (eli yhteisvariaatiota), jolloin $\mathcal{E}\{\bar{u}_j \bar{u}_{j'}\}$ on suuri, näiden signaalien vaikutukset pyrkivät yhdistymään samaan tietorakenteeseen, ja niiden vaikutukset alkavat sekoittua.

Eräs tekninen asiaa kuvaava termi on *sensorifuusio*.

Tähän ei tarvita minkäänlaista ylhäältä tapahtuvaa ohjausta, kaikki on täysin lokaalia. Emergoituvat *systeemitasoiset vaikutukset* perustuvat koordinoitumiseen: tämä koordinoituminen johtuu implisiittisestä vuorovaikutuksesta ympäristön kautta. Kun resurssien hyödyntäminen samalla kuluttaa näitä resursseja, muodostuu *negatiivinen takaisinkytkentäsilmukka*, joka aiheuttaa järjestelmässä *kilpailuoppimisen*. Kun opittujen rakenteiden tilastolliset ominaisuudet konvergoituvat, ne asettuvat dynaamiseen tasapainoon löytäen data-avaruudesta *attraktorin*.

Tuloksena on se, että ympäristön enformaatiorakenteelle muodostuu *malli*. Kyseessä ei ole mikä tahansa enformaation kuvaus, vaan enformaation malli on *matemaattisesti optimaalinen*.

Koska systeemin ”kuvausvoima” on pienempi kuin ympäristön ($n \ll m$), osa ympäristön enformaatiosta joudutaan jättämään huomiotta; tällainen tiivistäminen pakottaa mallin keskittymään merkittävimpiin suuntiin data-avaruudessa, lopun enformaation jäädessä kohinaksi. Nämä asiat voidaan ymmärtää *pääkomponenttianalyysin* (engl. *principal component analysis*) tarjoamassa kehyksessä.

Muodostunut malli toimii *suodattimena* maailman hahmotuksessa: vain mallitetun enformaatiokäyttäytymisen mukainen data pääsee sisälle systeemiin muun datan suodattuessa. Järjestelmä ikään kuin *näkee vain sitä mitä se odottaa näkevänsä*, ja ”ravinnokseen” systeemi osaa käyttää enformaatiota vain *profiilinsa* mukaisista lähteistä. Profiilit määrittelevät ”ekolokerot” ympäristössä.

Systeemi näkee ympäristössään prototyypillisiä *hahmoja*. Näitä hahmoja se dekomposoi *piirteiksi*, joiden painotettuna summana hahmo pyritään esittämään. Edellä mainitut profiilit määräävät nämä piirteet, ja muuttujien $\bar{x}_i$ aktiivisuudet kussakin tilanteessa ovat yksittäisten piirteiden painokertoimia. Systeemin toiminta on *hahmontunnistusta*, havaitun ympäristön mahdollisimman tarkkaa sovitusta piirrekantaan. Rekonstruoitu hahmo *eliminoidaan* alkuperäisestä havainnosta *negatiivisen takaisinkytkennän* avulla, jolloin mallista poikkeava havainnon *uutuusarvo* tulee selkeästi näkyviin.

Miltä tämä kaikki näyttää käytännössä? Osoittautuu, että esimerkiksi

hahmon rekonstruoinnilla on visuaalisessa hahmotuksessa suoraviivaisia seurauksia: jos sisääntuleva ärsyke katoaa yhtäkkiä, niin että takaisinkytkentä ei ehdi seurata mukana, jäljelle jää *jälkikuva*, alkuperäisen hahmon ”vastakohta”. Rekonstruktioiden keskeinen merkitys on havaittu myös ylemmäntasoisessa kognitiossa. On havaittu, että havaintojen jäljittely on tärkeämpää kuin aiemmin on ymmärrettykään; tähän viittaa esimerkiksi ns. *peilisolujen* olemassaolo.

Ulkoapäin tarkastellen voitaisiin sanoa, että ympäristöönsä kytkeytynyt systeemi muuttaa ympäristön ominaisuuksia *havaitsijavaikutuksen* vuoksi. Kytkeytymisen jälkeen mittaukset *homogenisoivat* ympäristön ”jouston” mittauspisteissä (katso taas kuva 1.1 sivulla 2). Voisi jopa väittää, että *mittaaminen rakenteistaa maailmaa*.

Seuraavassa paneudutaan edellä esitettyjen asioiden yksityiskohtiin ja matemaattisiin määritelmiin; matriisilaskennan perusteet oletetaan tunnetuiksi.

2.2 Aikatasojen vuorovaikutus

Kaava (1.15) yhdistää signaalien hetkelliset ja tilastolliset ominaisuudet samaan lausekkeeseen. Tarkastellaan aluksi kaavan puhtaasti teknisiä seurauksia.

Signaalien (skaalaamattomille) kovariansseille (eli enformaatioille) voidaan kirjoittaa erilaisia lausekkeita. Kun (1.15) kerrotaan oikealta vektorilla $\bar{x}^{\mathrm{T}}$ (transponoidulla vektorilla $\bar{x}$) ja käytetään emergenssioperaattoria, saadaan seuraava lauseke:

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}. \tag{2.1}$$

Tämän transpoosi antaa taas toisenlaisen lausekkeen (muista että matriisin diagonaalisuudesta johtuen $Q^{\mathrm{T}} = Q$):

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,Q. \tag{2.2}$$

Kun edellinen lauseke kerrotaan matriisilla Q oikealta ja jälkimmäinen lauseke vasemmalta, ilmenee, että täytyy olla voimassa

$$Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,Q, \tag{2.3}$$

niin että edelleen

$$f\left(Q\right)\, g\left(\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right) = g\left(\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)\, f\left(Q\right), \tag{2.4}$$

jossa f ja g ovat mielivaltaisia potenssisarjoina määriteltävissä olevia funktioita. Tämä matriisien *kommutoivuus* helpottaa asioita myöhemmin: monet matemaattiset matriisirakenteiden manipuloinnit voidaan tehdä samoin kuin skalaaritapauksessa.

Edelleen, kun huomioidaan (2.4), ja kun matriisi $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ oletetaan *kääntyväksi* (sille siis löytyy käänteismatriisi; tähän palataan myöhemmin), lausekkeesta (2.1) tai (2.2) saadaan

$$I_n = Q^{1/2}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1/2}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1/2}Q^{1/2}. \tag{2.5}$$

Kun määritellään

$$\theta^{\mathrm{T}} = Q^{1/2}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1/2}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}, \tag{2.6}$$

saadaan

$$I_n = \theta^{\mathrm{T}}\theta. \tag{2.7}$$

Tässä I_n on n-dimensioinen yksikkömatriisi. Uuden matriisin θ sarakkeet ovat näin ollen *ortonormaaleja*. Edelleen, kertomalla (1.15) oikealta tällä kertaa vektorilla $\bar{u}^{\mathrm{T}}$ ja soveltamalla emergenssioperaattoria, saadaan

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} = Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}. \tag{2.8}$$

Sijoittamalla tämä lausekkeeseen (2.2), nähdään, että

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,Q. \tag{2.9}$$

Huomioimalla (2.4), tämä voidaan kirjoittaa muotoon

$$\begin{aligned} Q^{-1} = Q^{1/2}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1/2}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} \\ \cdot\,\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1/2}Q^{1/2}, \end{aligned} \tag{2.10}$$

niin että

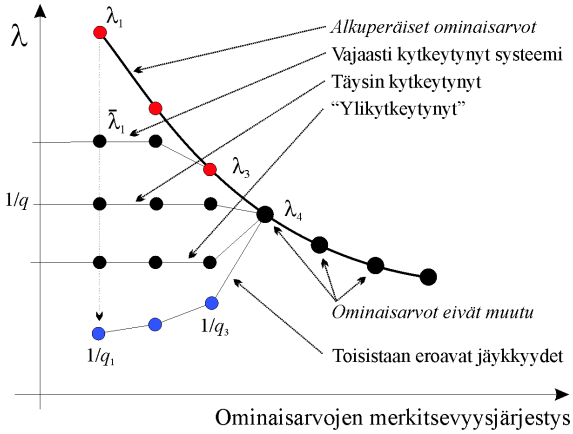
$$Q^{-1} = \theta^{\mathrm{T}}\,\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\theta. \tag{2.11}$$

Tämä tarkoittaa sitä, että milloin tahansa (1.15) on voimassa, havaitun eli *efektiivisen* ympäristön $\bar{u}$ tilastolliset ominaisuudet on sidottu matriisiin Q, eli vastaaviin kytkentäkertoimiin. Kytkentäkertoimet q_i määrittelevät nyt kytkeytyneen systeemin ”jäykkyydet”. Tämä ympäristön muokkautuminen voidaan nähdä *havaitsijavaikutuksen* ilmentymänä. Vaikka ympäristö määrää systeemin käyttäytymisen, systeemi kuitenkin pakottaa ympäristön jollakin tavalla *organisoitumaan* (katso luku 3).

Lauseke (2.11), yhdessä lausekkeen (2.7) kanssa, paljastaa, että matriisin θ sarakkeet virittävät saman aliavaruuden kuin jokin datan kovarianssimatriisin $\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}$ *ominaisvektorien* osajoukko (koko avaruutta ei voida virittää koska $n < m$). Voidaan edelleen osoittaa, että konvergoituessaan sarakkeet θ_i suuntautuvat alkuperäisen (katso kappale 2.4) datan *tärkeimpien* ominaisvektorien määräämään aliavaruuteen (ominaisarvojen λ_j suuruussuhteiden mielessä). Näin ollen systeemi muodostaa ympäristön datasta *mallin*, joka pystyy esittämään *maksimimäärän* datan variaatiosta (enformaatiosta). Väitteen täsmällinen todistus esitetään kohdassa 2.5.

Kerrataan tässä lyhyesti käsitteitä:

> Ominaisvektorit ja -arvot ovat lineaarialgebran peruskäsitteitä; m-ulotteisen neliömatriisin C ominaisvektorit θ_j ja vastaavat skalaariset ominaisarvot λ_j (molempia on periaatteessa m kappaletta) määritellään kaavalla
>
> $$C\,\theta_j = \lambda_j\,\theta_j. \tag{2.12}$$
>
> Jos C on lineaarikuvaus, ominaisvektorit siis kuvaavat suunnat, joissa kuvauksella ei ole muuta vaikutusta kuin skaalautuminen.
>
> Erityisesti jos C on symmetrinen, se ei voi olla defektiivinen (eli erillisiä ominaisvektoreita tosiaan on m kappaletta); sen ominaisarvot ovat reaalisia ja sen eri ominaisarvoja vastaavat ominaisvektorit ovat ortogonaalisia. Tällöin voidaan kirjoittaa ominaisvektorien matriisia Θ ja diagonaalista ominaisar-



KUVA 2.1: Systeemin ($n = 3$) vaikutus ympäristöönsä

vojen matriisia Λ käyttäen *ominaisarvohajotelma* muodossa

$$C = \Theta\Lambda\Theta^{-1} = \Theta\Lambda\Theta^{\mathrm{T}}. \tag{2.13}$$

Symmetrisen matriisin erikoistapaus on kovarianssimatriisi, jonka ominaisvektorit määrittävät datan jakautumisen avaruudessa: kunkin ominaisvektorin suunnassa on datan varianssia sen verran kuin vastaava ominaisarvo paljastaa. Pääkomponenttianalyysissa projisoidaan data näiden kovarianssin (informaation) kannalta tärkeimpien kantavektorien muodostaman aliavaruuden kautta, jolloin (toivottavasti) korreloimaton kohina suodattuu pois.

Kuvassa 2.1 on näytetty kaavamaisesti, kuinka järjestelmä vaikuttaa ympäristöönsä; yksityiskohdat, kuten ”vajaa kytkeytyminen”, selviää vasta myöhemmin (kappaleessa 2.6) — ja ”kytkeytyminen” ylipäänsä kappaleessa 2.4. Systeemi ottaa osan ympäristönsä ”elinvoimasta”, ja tämä enformaatio otetaan sieltä missä sitä on tarjolla eniten (mitä ilmentää ominaisarvojen λ_j ja $\bar{\lambda}_j$ erotus).

Vektoreista θ_i voidaan sanoa jotain täsmällisempääkin. On olemassa kaksi olennaisesti vastakkaista vaihtoehtoa:

1. Jos kaikilla q_i-kertoimilla Q-matriisissa on eri arvo, kaavan (2.11) mukaisesti alkuperäiset ominaisarvot λ_j (katso myöhemmin) muuttuvat, niin että $\bar{\lambda}_j = 1/q_i$; edelleen, jotta (2.3) pitäisi paikkansa, kovarianssin $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ täytyy olla diagonaalinen, ja (2.6) perusteella on ilmeistä, ettei kantavektorien sekoittumista tapahdu — systeemi toteuttaa *pääkomponenttianalyysia.*

2. Jos kaikki q_i-kertoimet Q-matriisissa ovat identtisiä, niin että $Q = q\, I_n$, kaikki ominaisarvot *ekvalisoituvat,* kytkeytyneessä järjestelmässä kaikkien $\bar{\lambda}_j$ saadessa arvon $1/q$ huolimatta alkuperäisestä arvosta $\lambda_j > 1/q$; nyt kovarianssimatriisille $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ ei ole ehdon (2.3) vuoksi rajoitteita, joten systeemin kantavektorit voivat kiertyä, *rotatoitua*; ne eivät välttämättä säily edes ortogonaalisina.

Jälkimmäinen tapaus on näistä kiinnostavampi, ja on tarpeen tarkastella, kuinka systeemin sisäiset riippuvuusrakenteet vaikuttavat kantavektoreihin. Kannattaa huomata, että vakioituneen varianssin tapauksessa on tapahtunut automaattinen efektiivisen datan $\bar{u}$ *homogenisoituminen* tai *valkaistuminen* (engl. *whitening*) ilman mitään esikäsittelyä, ja korkeamman kertaluvun tilastolliset ominaisuudet datassa voivat päästä näkyville. Kannattaa huomata, että valkaistuminen tapahtuu vain n-ulotteisessa aliavaruudessa, jolloin kovarianssin singulaarisuusongelmia ei esiinny.

Näihin asioihin palataan kappaleessa 2.4; tarkastellaan kuitenkin tässä välissä, millaisiin tulkintoihin havaitut lainalaisuudet antavat mahdollisuuden.

2.3 Tulkinta emergenteille muuttujille

Alkuperäisellä lokaalilla toiminnalla on siis systeemitasoinen tulkinta: *tarjolla olevalle enformaatiolle rakennetaan pääkomponenttiperustaista mallia*. Ulkomaailman hahmoille $\bar{u}(\kappa)$ pyritään löytämään mataladimensioinen esitys *piirteiden*, eli matriisin $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}^{\mathrm{T}}$ sarakkeiden avulla, siten että

kertoimilla $\bar{x}_i(\kappa)$ painotettujen piirteiden summa minimoi *rekonstruktiovirheen* pienimmän neliösumman mielessä. Saatu malli kuvaa (pääkomponenttien ominaisuuksista johtuen) ympäristössä näkyvillä olevan enformaation näin ollen *kaikista mahdollisista mallirakenteista parhaiten* (myöhemmin tullaan huomaamaan, että rekonstruktio on ”perustapauksessa” tosin eräällä tavoin ”varovainen” eli *robusti* ennemmin kuin täysin optimaalinen).

Muuttujien $\bar{x}_i$ tulkintaa pitää muuttaa: ne eivät kuvaa yksittäisiä toimijoita systeemissä, vaan samaan rooliin keskittyneiden toimijoiden joukkoja, jonkinlaisia *toimintavaihtoehtojen prototyyppejä*, joilla ympäristössä selvitään hengissä. Ekologisissa sovellutuskohteissa voitaisiin ehkä puhua jonkinlaisista *ekologisista lokeroista* joita karakterisoivat piirteinä toimivat *profiilit*. Tyypillisissä tapauksissa muuttujat $\bar{x}_i$ vastaavat yksilöistä koostuvia *populaatioita*, jolloin niiden numeroarvot (siis niiden neliöt) kuvaavat (skaalattua) *lajirunsautta* (engl. *abundance*), tai *biomassaa* (jolloin ekolokeron systeemissä saama kokonaisenformaatio jaetaan yksilöiden kesken). Esimerkkejä tällaisista tulkinnoista on myöhemmin kohdassa 3.1. Mutta siirryttäessä yksilöiden kuvaamisesta populaatioihin, ja abstrahoitaessa yli yksittäisten tapahtumien ja ajanhetkien, tarvitaan perustavammanlaatuistakin muuttujien uudelleentulkintaa.

Pääkomponenttipohjainen malli keskittyy variansseihin. Siirryttäessä vaivihkaa stokastisesta maailmasta deterministiseen joudutaan tästä johtuen tekemään *laadullinen* harppaus. Vain varianssit ovat summautuvia, ja vain varianssien summien mielessä voidaan puhua optimoitumisesta tai *säilymisestä* (katso kappale 5.7). Tulkinta siitä, mikä systeemissä on *todellista* ja *mitattavaa*, muuttuu: avainasemassa matemaattisissa tarkasteluissa ovat muuttujien *neliöt*. Esimerkiksi jos ”elämänvoimana” on *raha*, sen määrän säilyminen kokonaisjärjestelmässä edellyttää, että vasta suureilla $\bar{u}_j^2$ on rahan dimensio; ”kohinateho” on systeemissä hukkaantuvaa rahaa. Tätä asiaa on syytä tarkastella laajemmassakin kehyksessä.

Yksittäiset muuttujat $\bar{u}_j(\kappa)$ ovat tällaisessa tarkastelussa, kokonaisuuden kannalta, siis vain jonkinlaista kohinaa. Konkreettiset muuttuja-arvot voivat näyttää olennaisilta; kuitenkin tämä voi olla pelkkä illuusio, johtuen siitä että kyseisten yksittäisten muuttujien aikataso ehkä sattuu vain

olemaan itsellemme luonteva. Kun nyt tavoitteena on riippumattomuus tarkkailijasta ja hänen aikakäsityksistään, tarvitaan yleisempää ajattelutapaa jotta voidaan abstrahoida aikatasojen yli. Samojen emergenssin periaatteiden tulee olla voimassa, vaikka toiset rajapinnat näemmekin ”ylhäältä” ja toiset ”alhaalta”.

Pääkomponenttianalyysi kuuluu tilastollisiin monimuuttujamenetelmiin; näin ollen sopivan ajattelun kehyksen tarjoaakin *todennäköisyyden käsite* — sopivasti laajennettuna.

On totuttu ajattelemaan, että tilastolliset menetelmät ”valehtelevat”. Voidaan väittää tällaisen harhaanjohtavuuden johtuvan siitä, että tilastomenetelmät *hävittävät tarkastelukohteen rakenteen*, esittäen kaikki ilmiöt yksittäisten todennäköisyysarvojen avulla. Esimerkiksi *Bayes-verkoissa* (engl. *probabilistic networks*) törmätään eri reittejä etenevien evidenssien ongelmaan, jolloin muuttujat eivät ole riippumattomia; antaakseen järkeviä tuloksia monimutkaisissa verkoissa, ”polkuintegraalien” tulisi kyetä kantamaan jonkinlaista ”vaihetietoa”. Ja tämä tulee vastaan juuri kyberneettisissä järjestelmissä, nämä kun ovat juuri eräänlaisia ”yleistettyjä iteroituja todennäköisyysverkkoja”. Todennäköisyyden käsitettä voidaankin laajentaa tällaisiin tarkoituksiin määrittelemällä sille sopiva *hienorakenne*.

Amerikkalainen tutkija *Scott Aaronson* on pohtinut todennäköisyyksien reaalilukuluonnetta: ne mahdollistavat paljon täydemmän laskennan struktuurin jos todennäköisyys voi saada myös *negatiivisia*, inhibitorisia arvoja; ja kun tälle tielle on lähdetty, johdonmukaisuuden vuoksi joudutaan ottamaan kantaa myös *kompleksilukuihin*. Niinpä hän yleistikin ns. *amplitudin* käsitteen: amplitudit voivat olla positiivisia, negatiivisia ja jopa kompleksiarvoisia, ja vasta näiden (itseisarvojen) *neliöillä* on reaalitulkinta. Ja erityisesti enformaatioteoriassa todennäköisyydet ovat mielekkäitä vasta emergentillä tasolla: diskreettiarvoisiin tapahtumiin perustuvat muuttujat saavat tällöin *frekventistisen* luonteen. Enformaatiot $\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\}$ ovat (skaalaamattomia) todennäköisyyksiä.

Erityisen kiinnostavaa on, että Aaronsonin mukaan tällaiselle todennäköisyystulkinnalle perustuva kalkyyli johtaa (sovelluskohteen aikaskaalasta riippumatta) automaattisesti *kvanttimekaniikalle* ominaisiin malleihin ja tulkintoihin. Kvanttimekaniikassahan kyseinen todennäköisyyden

”kompositioluonne” tunnetaan *Bornin tulkintana*. Ja todellakin, monet alkeishiukkasfysiikan mallien erikoisuudet ovat makroskooppisessakin maailmassa aivan ajankohtaisia (nyt tosin katsottuina ilmiöiden ”sisältä päin”). Otetaan esimerkiksi vaikkapa *aaltofunktioiden romahtaminen*: sama dilemma *on* vastassa muissakin ympäristöissä kuin kvanttimaailmassa. Mittaushan on aina näyte todennäköisyysjakaumasta; mutta tultuaan tehdyksi, mittaustuloksen ”todennäköisyys” on romahtanut ykköseksi — vain yksi vaihtoehto voi toteutua, ja se mikä on tapahtunut on varmaa. Luvussa 6 tätä asiaa tarkastellaan lisää; siellä kompleksiarvoisille muuttujille saadaan *taajuustulkinta*, jolloin päästään luontevasti tarkastelemaan myös *muutostiloja*.

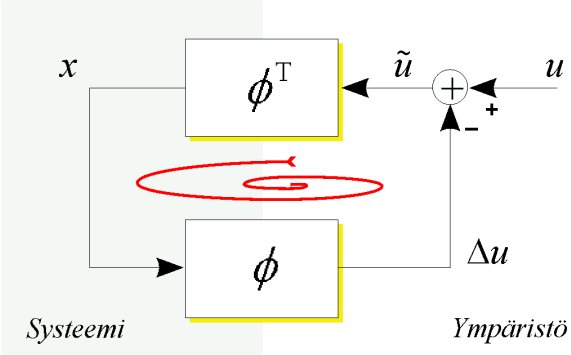
2.4 Kytkeytyminen ympäristöön

Yllä olevat pääkomponenttiperustaiset analyysit ovat voimassa vain, jos on löydettävissä kaavan (1.15) mukainen kuvaus tilastollisten ja aikatason ilmiöiden välille. Kuinka varmistaa stationaarisen ratkaisun olemassaolo?

Kuinka estää signaalin $\bar{x}$ vähittäin tapahtuva rajaton kasvu (ja lopulta ”räjähdys”) ja siitä seuraava adaptaation epästabiilisuus? Lausekkeessa (1.15) on sisäinen *positiivinen takaisinkytkentä*: kun signaalit korreloivat, kytkentä niiden välillä kasvaa, ja tämän jälkeen signaalit korreloivat yhä paremmin — eikä tämä kehitys koskaan pääty. Tämä on vanha ongelma, joka on tullut vastaan aina, kun Hebbin oppimisperiaatteeseen perustuvia ideoita on ruvettu kehittelemään. Kuinka pysyä ”järjestyksen ja kaaoksen rajalla”?

Kybernetiikan hengessä stabilointi toteutetaan nyt ylemmän tason *negatiivisella takaisinkytkennällä*: kun resurssia käytetään, se kuluu, eikä ole enää muiden käytettävissä (systeemit siis toimivat alkuperäisessä *Thomas Malthusin* hengessä!). Uusi takaisinkytkentäsilmukka tekee rakenteen näennäisesti monimutkaiseksi, mutta sen matemaattinen yksinkertaisuus säilyy yhä — *kokonaisjärjestelmä on edelleen lineaarinen*.

Nyt ajatellaan niin, että kun systeemin tilamuuttuja i on saatu ympäristön toimesta aktivoiduksi, se imee resurssistaan j osan tarvitsemastaan aktiivisuudesta. Kuinka suuri on tämän resurssin rooli aktiviteetin



KUVA 2.2: Takaisinkytkeytynyt signaalirakenne

ylläpidossa riippuu kytkentävoimakkuudesta $q_i \mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{u}_j\}$. Kun tällaiset vaikutukset kootaan yhteen, muutos kaikissa resursseissa kaikkien aktiviteettien toimesta voidaan kirjoittaa kootusti seuraavassa muodossa (vertaa kuvaan 2.2; merkintätapojen erot selitetään tuonnempana)

$$\Delta u = \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\, Q\, \bar{x}. \tag{2.14}$$

Mikäli tällainen elämänvoiman vähennys ei vielä riitä toteuttamaan järjestelmän stabiloitumista, sisäinen positiivinen takaisinkytkentä kasvattaa kytkentää, jolloin muuttujat $\bar{x}_i$ kasvavat yhä; lopulta oletettavasti saavutetaan ”jännitysten tasapaino” joillakin arvoilla $\bar{x}'_i = c_i \bar{x}_i$. Matriisimuodossa, kun sijoitetaan kertoimet c_i uuden diagonaalimatriisin C lävistäjälle, kaavan (1.15) avulla voidaan kirjoittaa

$$\begin{aligned} \bar{x}' &= C\bar{x} = C\, Q\, \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\, \bar{u} = Q\, \mathcal{E}\{C\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\, \bar{u} \\ &= Q\, \mathcal{E}\{\bar{x}'\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\, \bar{u}. \end{aligned} \tag{2.15}$$

Tämä lopputulos on muodoltaan edelleen samanlainen kuin (1.15), mutta muuttuja $\bar{x}$ on vaihtunut muuttujaksi $\bar{x}'$: tästä voidaan päätellä, että tilamuuttujaa voidaan skaalata vapaasti. Jatkossa oletetaan, että järjestelmä on löytänyt stationaaritilansa, ja käytetään pelkkiä ”pilkuttomia” suureita

olettaen ne jo sopivasti adaptoituneiksi niin että jonkinlainen ”luonnollinen skaalaus” muuttujien välillä on löytynyt (tätä skaalaamista ja sen automatisointia käsitellään kohdassa 2.6).

Sivuhuomautuksena todettakoon, että mallirakenne (1.15) on muutenkin joustava: osa enformaatiosta voi tulla muualtakin ilman että järjestelmän laadulliset ominaisuudet muuttuvat. Siis jos uudeksi muuttujaksi tuleekin jokin $\bar{x}' = \bar{x} + \bar{\xi}$, kaikki edellä esitetty pätee edelleen: järjestelmä mallittaa signaalien yhteisvariaatiota. Perusteluna on se, että vektori $\bar{u}$ voitaisiin augmentoida sisältämään kaikki riippumattomatkin signaalit, jolloin nämä ehdollistuisivat automaattisesti yhteen (katso myös kappale 3.5).

Tähän saakka on käytetty pelkästään ”viivattuja” muuttujia $\bar{u}$ ja $\bar{x}$; nämä kuvaavat *efektiivisiä* arvoja kun kaikki takaisinkytkennän aiheuttamat vaikutukset ovat stabiloituneet jännitysten tasapainoon. Nämä ovat ne suureet, joita systeemi voi enää ”nähdä” omassa pienessä maailmassaan; alkuperäistä, häiritsemätöntä resurssivektoria u ei voi havaita, eikä sitä voi lokaalitasolla käyttää sen enempää signaalien kuin mallinkaan adaptoimiseen. Matemaattisesti voimme kuitenkin tarkastella, mitä tapahtuu muutostilassa.

Häiritylle resurssivektorille, *residuaalille,* voidaan kirjoittaa (käyttäen hetkellisiä, vielä vakiintumattomia signaaleja)

$$\tilde{u}(t) = u - \Delta u(t), \tag{2.16}$$

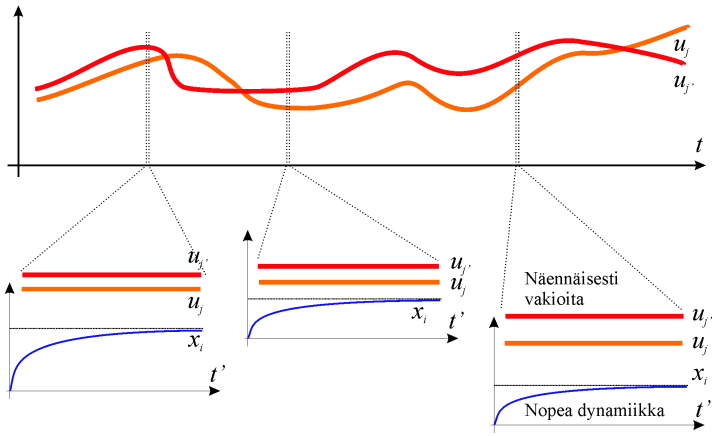
jolloin asymptoottiset tasapainoarvot saadaan (hieman epätäsmällisesti) kirjoittamalla

$$\bar{u} = \lim_{t\to\infty} \{\tilde{u}(t)\} \tag{2.17}$$

ja

$$\bar{x} = \lim_{t\to\infty} \{x(t)\} = \lim_{t\to\infty} \{Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\tilde{u}(t)\}\,. \tag{2.18}$$

Yllä esitettyjen kaavojen epätäsmällisyys johtuu siitä, että niissä on ajateltu tarkasteltavan jonkinlaisia ”paikallisia äärettömyyksiä”, aika-asteikoilla, jotka ovat mielekkäitä systeemin muuttujien x dynamiikkojen kannalta



KUVA 2.3: Aikaskaalojen havainnollistus

(asia palautuu takaisin ”systeemin semioosiin”, systeemin näkemän maailman ”laajuuteen”; katso luku 1). Onkin useita erilaisia aikaskaaloja, joita täytyy tarkastella erikseen (kun keskitytään yhteen aikatasoon, muiden tasojen signaalit näyttävät vakioilta; katso kuva 2.3):

- Nopein, sisäisten ilmiöiden aikaskaala; koskee muuttujia x.
- ”Näkyvä”, ympäristön aikaskaala; koskee signaaleja u, $\bar{u}$ ja $\bar{x}$.
- Hitain, ”maailman aikaskaala”; koskee (ko)variaation malleja kuten $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ ja $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}$.

On mielenkiintoista, että systeemi on toisaalta *nopeampi* (muuttuja x) ja toisaalta *hitaampi* ($\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}$) kuin ympäristönsä; emergenssiä on tämä vaivihkainen hidas mallin muodostuminen. Kun nyt yllä esitetyt takaisinkytkentää hallitsevat kaavat yhdistetään, voidaan kirjoittaa

$$\begin{aligned}\bar{x} &= Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{u} \\ &= Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,u - Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,Q\,\bar{x},\end{aligned} \tag{2.19}$$

josta saadaan ratkaistuksi

$$\bar{x} = \left(I_n + Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,Q\right)^{-1} Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,u. \tag{2.20}$$

Käyttäen kaavaa (2.2), yksinkertaistamisen jälkeen saadaan esitys systeemin tilalle $\bar{x}$ suoraan alkuperäisten resurssien u avulla:

$$\bar{x} = \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1} \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\, u. \tag{2.21}$$

2.5 Enformaatiomaksimi saavutetaan!

Tässä vaiheessa olemme valmiita *todistamaan*, että *neokyberneettinen koneisto kykenee enformaation jäljittämiseen tehokkaimmalla mahdollisella tavalla* (ja sillä on siis puolellaan evolutiivinen etu). Todistusta varten tarvitsemme esityksen tilan $\bar{x}$ riippuvuudelle yksinomaan häiritsemättömästä ympäristöstä u; kaava (2.21) ei vielä kelpaa, koska siinä on mukana myös muuttuja $\bar{u}$. Tämä muuttuja voidaan kuitenkin eliminoida lauseketta muokkaamalla:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} &= \mathcal{E}\{\bar{x}\left(u - \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}Q\bar{x}\right)^{\mathrm{T}}\} \\ &= \mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\} - \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}Q\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}. \end{aligned} \tag{2.22}$$

Kun tästä ratkaistaan $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}$, saadaan

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} = \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1} Q^{-1}\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}. \tag{2.23}$$

Yhdistetään tämä lausekkeeseen (2.21):

$$\bar{x} = \underbrace{\left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-2} Q^{-1}}_{M_1}\ \underbrace{\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}}_{M_2}\, u. \tag{2.24}$$

Tehdään nyt seuraavat oletukset:

- Data u on stationaarista, niin että sen tilastolliset ominaisuudet säilyvät muuttumattomina.
- Data on riittävän *rikasta* (engl. *excitatory*), niin että datassa on variaatiota ainakin n riippumattomassa suunnassa.
- Jokainen tilamuuttuja on riittävän *kytkeytynyt* ympäristöönsä ja säilyy *kyberneettisenä* (katso kappale 2.6).

Näillä ehdoilla voidaan neokyberneettisen mallin optimaalisuus enformaation kuvaamisessa nyt todistaa.

VÄITE.
Konvergoitumisen jälkeen systeemi virittää datan u pääkomponenttikannan, saman aliavaruuden kuin matriisin $\mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}$ merkittävimmät n ominaisvektoria.

TODISTUS.
Sen sijaan, että konvergoitumista tarkasteltaisiin jatkuvana prosessina, jaetaan aika-akseli nyt (riittävän pitkiin) osiin; merkitään näitä osia suluissa olevilla yläindekseillä. Jos lausekkeessa (2.24) aloitetaan mielivaltaisista matriiseista $M_1{}^{(0)}$ ja $M_2{}^{(0)}$, mallin adaptoituminen etenee iteratiivisesti askelittain:

$$
\begin{aligned}
\bar{x}^{(0)} &= M_1^{(0)} M_2^{(0)}\, u \\
\\
\bar{x}^{(1)} &= M_1^{(1)} \mathcal{E}\{\bar{x}^{(0)} u^{\mathrm{T}}\}\, u = M_1^{(1)} \mathcal{E}\{M_1^{(0)} M_2^{(0)} uu^{\mathrm{T}}\}\, u \\
&= M_1^{(1)} M_1^{(0)} M_2^{(0)} \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}\, u \\
\\
\bar{x}^{(2)} &= M_1^{(2)} \mathcal{E}\{\bar{x}^{(1)} u^{\mathrm{T}}\}\, u \\
&= M_1^{(2)} \mathcal{E}\{M_1^{(1)} M_1^{(0)} M_2^{(0)} \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\} uu^{\mathrm{T}}\}\, u \\
&= M_1^{(2)} M_1^{(1)} M_1^{(0)} M_2^{(0)} \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}^2\, u \\
&\vdots \\
\bar{x}^{(k)} &= M_1^{(k)} M_2^{(k)}\, u = \left(\prod_{i=0}^{k} M_1^{(k-i)} \right) M_2^{(0)} \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}^k\, u.
\end{aligned}
$$

Oletetaan nyt, että kovarianssimatriisin ominaisarvohajotelma on kirjoitettu muodossa

$$\mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\} = \Theta\, \Lambda\, \Theta^{\mathrm{T}}.$$

Tällöin datan muokkautuminen edellisessä $\bar{x}^{(k)}$:n lausekkeessa voidaan matriisin Θ ortogonaalisuuden vuoksi esittää muodossa

$$\mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}^k = \Theta\, \Lambda^k\, \Theta^{\mathrm{T}}.$$

Alkuosa $\bar{x}^{(k)}$:n lausekkeessa on $n \times n$ -dimensioinen skaalausmatriisi, eikä se vaikuta aliavaruuden määräytymiseen; loppuosasta nähdään, että pääkomponenttisuunnan j painotus muuttuu kertoimen λ_j^k mukaisesti. Jokaisella iteraatioaskeleella malli asettuu siis yhä enemmän merkittävimpien ominaisvektorien suuntaisesti. Koska muuttujat $\bar{x}_i$ ovat lineaarisesti riippumattomia, ne ovat juuri ne n merkittävintä pääkomponenttia jotka mallin määräävät (olettaen että laskevaan merkitsevyysjärjestykseen laitettujen ominaisarvojen jonossa on voimassa $\lambda_n > \lambda_{n+1}$). Nämä ominaisvektorit ovat samoja myös muuntuneelle datalle $\bar{u}$ (mutta ominaisarvot ja suuntien näennäiset merkitsevyydet voivat poiketa toisistaan; vertaa kuvaan 2.1 sivulla 34). □

2.6 Laadullisia yllätyksiä

Huolimatta yllä esitetyistä tarkasteluista, yhtälölle (1.15) on olemassa *kaksi* erityyppistä ratkaisua. Edellä esitetyn tapauksen lisäksi on vaihtoehtona myös *triviaaliratkaisu* $\bar{x} \equiv 0$, jossa kaikki muuttujat pysyvät nollassa (tai $\bar{x}_i \equiv 0$ vain osalle muuttujista). Tällöin myös malli konvergoi nollaan, eli $\mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{u}\} \equiv 0$. Eikä aktivaation edes tarvitse olla täysin nolla; jos herätettä ympäristössä ei ole riittävästi, konvergoituminen nollaan tapahtuu väjäämättä ei-nollastakin alkutilanteesta, positiivisesta takaisinkytkennästä huolimatta.

Tilamuuttujan kohtalo, siis säilyykö se ”hengissä” vai ei, riippuu kyseisen muuttujan kytkennästä ympäristöönsä. Kaavasta (2.21) voidaan kirjoittaa vielä yksi lauseke kovarianssille, kun kerrotaan lauseke transpoosillaan ja käytetään emergenssioperaattoria:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1} \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\, \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\} \\ \cdot\, \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1},\end{aligned} \tag{2.25}$$

joka voidaan kirjoittaa myös muotoon

$$\begin{aligned}\left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right) \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right) \\ = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\, \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}\, \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}.\end{aligned} \tag{2.26}$$

Kun matriisien kommutointi huomioidaan, saadaan

$$\begin{aligned}
&\left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^2 \\
&\quad = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1/2} \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\, \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\} \\
&\qquad\qquad \cdot\, \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\, \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1/2} \\
&\quad = Q^{-1/2}\, \theta^{\mathrm{T}}\, \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}\, \theta\, Q^{-1/2}.
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Vektorien θ ortonormaalisuuden vuoksi voidaan kirjoittaa edelleen

$$Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = Q^{-1/4}\, \theta^{\mathrm{T}}\, \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}^{1/2}\, \theta\, Q^{-1/4}, \tag{2.28}$$

eli

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = Q^{-1/4}\, \theta^{\mathrm{T}}\, \mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}^{1/2}\, \theta\, Q^{-1/4} - Q^{-1}. \tag{2.29}$$

Jos kytkentäkertoimilla q_i on eri arvo kaikilla indekseillä i, aiemmin esitetyn perusteella matriisi θ diagonalisoi kovarianssin, joten

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = Q^{-1/4}\, P^{\mathrm{T}} \Lambda_{[n]}^{1/2} P\; Q^{-1/4} - Q^{-1}. \tag{2.30}$$

Tässä $\Lambda_{[n]}$ esittää diagonaalista kooltaan $n \times n$ olevaa matriisia, jonka lävistäjällä ovat kovarianssimatriisin $\mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}$ tärkeimmät ominaisarvot λ_j, ja P on jokin *permutaatiomatriisi*. Olettaen, että permutoinnissa ominaisarvo numero j on tullut kytketyksi tilaan x_i, voidaan kirjoittaa

$$\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\} = \sqrt{\frac{\lambda_j}{q_i}} - \frac{1}{q_i}. \tag{2.31}$$

Toinen muotoilu samalle asialle kytkee mukaan esimerkiksi jakaumaprojektioiden *keskihajonnat* $\sqrt{\lambda_j}$ ja *kuvaukset* ϕ_i (kuvauksia käsitellään seuraavassa luvussa):

$$q_i \mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\} = \sqrt{q_i}\sqrt{\lambda_j} - 1 = \phi_i^{\mathrm{T}} \phi_i. \tag{2.32}$$

Koska varianssit ovat aina ei-negatiivisia, tarkoittaen että variaatioiden suuruuksien jokaisessa suunnassa tulee olla reaalisia, nähdään, että ei-triviaalit ratkaisut mallille ovat mahdollisia vain jos enformaatiotaso datassa on

riittävän korkea: lisätermin $-Q^{-1}$ lausekkeessa (2.30) täytyy tulla kompensoiduksi. Jotta muuttuja $\bar{x}_i$ pysyisi aktiivisena, täytyy siis olla voimassa

$$q_i > \frac{1}{\lambda_j}. \tag{2.33}$$

Tämän ehdon toteutuminen takaa, että aiemmat tarkastelut ovat mielekkäitä; tämä takaa myös, että matriisi $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ säilyy kääntyvänä (olettaen, että data on riittävän rikasta). Jos data *ei ole* riittävän rikasta, tilamuuttujat alkavat ”jakaa” samoja *moodeja*; kovarianssimatriisin kääntymättömyys ei haittaa järjestelmien käytännön toimintaa, vaikka tilamuuttujat ovatkin tällöin redundantteja.

Mihin tämä enformaatio katoaa, mistä järjestelmään tulee tällainen kaavan (2.29) kertoma ”staattinen kitka”? Tämähän tuo lineaarisiin rakenteisiin (ylhäältä katsoen) hyvinkin radikaalin epälineaarisuuden. Ehkä enformaation hukkaantuminen voidaan tulkita jonkinlaiseksi *dissipaatioksi*, energiankulutukseksi, joka tarvitaan pitämään ”myllyt pyörimässä”, ja kynnysarvo on jonkinlainen minimidissipaatio, joka tarvitaan käynnistämään ne myllyt. Teknisesti tulkittuna, kyseinen iteraatiosilmukkahan joutuu ”ratkaisemaan” lineaarisen yhtälöryhmäjoukon hakiessaan tasapainoa systeemin ja ympäristön muodostamassa algebrallisessa silmukassa. Vain riittävä paine (riittävän voimakas kytkentä q_i) pakottaa systeemin tällaiseen kytkeytymiseen. Kehittyneemmillä mallirakenteilla enformaation hukkautuminen saadaan eliminoiduksi (katso kappale 3.6).

Jos nyt palataan luvun 1 teemoihin, voidaan sanoa, että *mittaus edellyttää enformaation siirtymistä kohteesta mittaussysteemiin* ja tällöin *kytkeytyminen on välttämätöntä mittausprosessin onnistumiseksi*.

Kaavan (2.31) kuvaaman enformaation periytymisen luonteen ymmärtäminen on monitasoisissa järjestelmissä tärkeää. Asiaan palataankin vielä esimerkiksi kappaleissa 4.6 ja 5.4 — ja luvussa 6 intuitioita viedään vielä pidemmälle. Ehkäpä kyberneettinen kytkeytymisen mekanismi voisi ratkaista kvanttifysiikan perustavanlaatuisen ongelman: kuinka lineaarinen Schrödingerin yhtälö voi olla pohjana aaltofunktioiden yhtäkkisille hyvinkin epälineaarisille romahtamisille mittaustapahtumien yhteydessä.

2.7 Vapaiden parametrien eliminointi

Jotta järjestelmä voisi toimia ilman ohjausta, jotta ei tarvittaisi erillistä parametrien virittämistä, täytyy olettaa, että järjestelmässä on jokin sisäinen (lokaali) mekanismi, joka varmistaa tilamuuttujien pysyvän aktiivisina (eli ”kyberneettisinä”). Yksinkertainen ratkaisu näyttäisi olevan kytkentäkertoimien adaptoiminen seuraavasti ($b > 0$ on jokin skaalauskerroin):

$$q_i = b \, \frac{1}{\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\}}. \tag{2.34}$$

Tällaiselle kytkentäkertoimien päivittämiselle on useita perusteluja. Ensinnäkin, näin määriteltynä systeemi säilyy aina stabiilina vaikka negatiivinen takaisinkytkentä ympäristön kautta ei asiaa hoitaisikaan. Kaavan (2.31) mukaan ympäristöstä systeemiin periytyvän enformaation määrä on tällöin myös maksimissaan (kun $b = 1$; tästä saadaan myös tälle parametrille valintakriteeri). Muotoilua (2.34) voidaan perustella niinkin, että tällä valinnalla mallin *identifioituminen* tulee mahdollisimman tehokkaaksi *stokastisen Newtonin menetelmän* mielessä, joten ohjenuoraksi asetettu optimaalisuustavoite saadaan säilytetyksi edelleen. Kannattaa myös huomata, että esimerkiksi hermosoluissa näyttää tapahtuvan tämänkaltaista aktiivisuuskompensointia.

Tämä ”liioiteltu varianssin kompensointi” määrittelyn (2.34) mukaisesti pyrkii puristamaan aktiivisuutta muihin muuttujiin. Kun peritty kokonaisvarianssi kuitenkin pysyy samana, muuttujat *päätyvät samaan aktiivisuuteen*. Tämä tarkoittaa sitä, että koska tällöin kaikki $\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\}$ ovat samat, myös kytkennät q_i ovat, ja edelleen ominaisarvot $\bar{\lambda}_i$ tulevat ekvalisoiduiksi, kaavan (2.11) mukaisesti. Tällöin myös matriisin $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ varianssistruktuuri sekoittuu, siitä tulee ei-diagonaalinen, ja erilaiset rotaatiot tulevat mahdollisiksi.

Osoittautuu, että lineaarijärjestelmissä rotaatioiden mielekäs toteuttaminen on vaikeaa, ja sitä ennen täytyykin saada aikaan jonkinlainen *symmetrian rikkoutuminen*. Sopivilla *epälineaarisuuksilla* voidaan toteuttaa esimerkiksi *harvakoodaus* (engl. *sparse coding*) muuttamatta systeemin optimoivaa ja tasapainoa hakevaa perusluonnetta.

Harvakoodauksessa käytetään vain *osaa* kaikista tarjolla olevista n piirteestä kulloisenkin hahmon esittämiseen. Monimutkainen havaintodata nimittäin koostuu tyypillisesti *useista hahmoluokista*, joiden esittämiseen kannattaa käyttää spesifejä piirteitä; harvakoodauksella voidaan keskittyä kuhunkin piirrejoukkoon erikseen häiritsemättä tilanteeseen liittymättömiä piirteitä (piirteet eivät pyri tällöin pakolla ortogonalisoimaan toisiaan). Näin piirre-esityksen oppiminen voi korkeadimensioisessakin tapauksessa olla huomattavan nopeaa. Harvakoodauksella on myös kognitivistisesti kiinnostava tulkinta liittyen ns. *lyhytkestoisen muistin* (engl. *short-term memory*) kapasiteettiin; klassinen asiaan liittyvä avaintermi on "magical number 7 ± 2" (joskin myöhemmin on todettu lähempänä totuutta olevan ehkä 4 ± 2).

Koska kaikki varianssit $\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\}$ tulevat samoiksi valinnalla (2.34), voidaan helposti laskea matriisin (2.29) *jälki* (engl. *trace*), jolloin kaikille i ja j on voimassa

$$\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\} = \frac{b}{q_i} = b\,\bar{\lambda}_j = \left(\frac{\sum_{\iota=1}^{n} \sqrt{\lambda}_\iota}{n\left(\sqrt{b} + \frac{1}{\sqrt{b}}\right)} \right)^2 . \tag{2.35}$$

Kun valitaan $b = 1$, sisäisten ja ulkoisten muuttujien välillä on miellyttävä tasapaino, niin että kaikille i ja j on voimassa $\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\} = \bar{\lambda}_j$.

On kiinnostavaa huomata, että datan kovarianssimatriisin ominaisarvojen neliöjuuret ovat datan *singulaariarvoja*; lauseketta $\sum_{j=1}^{n} \sqrt{\lambda}_j$ (jossa $\lambda_{j'} \leq \lambda_j$ kun $j' > j$) kutsutaan datamatriisin *Ky Fanin n-normiksi*.

On vielä yksi vapaa parametri, systeemin dimensio n, ja sillekin voidaan neokyberneettisessä kehyksessä ehdottaa optimiarvoa kaavaan (2.35) nojautuen. Jotta kytkeytyminen tapahtuisi, täytyy systeemissä olla voimassa $\bar{\lambda}_j < \lambda_j$ kaikille $j \leq n$; tilamuuttujien määrä onkin perusteltua valita tämän ehdon mukaan. Kun ominaisarvot λ_j on järjestetty laskevaan suuruusjärjestykseen, viimeiselle mukaan otettavalle indeksille $j = n$ täytyy olla voimassa (kun $b = 1$ ja n on suuri)

$$\sqrt{\lambda_n} > \frac{1}{2}\,\frac{\sum_{\iota=1}^{n-1} \sqrt{\lambda}_\iota}{n-1}, \tag{2.36}$$

niin että *uuden mukaan otettavan singulaariarvon on oltava vähintään puolet aiempien singulaariarvojen keskiarvosta*. Näin ollen systeemin koko n määräytyy yksinomaan datan perusominaisuuksien nojalla, ja siihen voidaan vaikuttaa datan esikäsittelyllä, muuttamalla singulaariarvojen suuruussuhteita. Näin formaali kriteeri johon ei tarvita datan ominaisuuksien tarkempaa käsittelyä viittaa siihen, että mallit eivät ole millään muotoa yksikäsitteisiä.

Jos n valitaan maksimia pienemmäksi, systeemistä tulee ”hyperkyberneettinen” (katso kuva 2.1 sivulla 34): suljetun silmukan ominaisarvorakenne on vääristynyt, eli näkyvän datan perusteella *näyttää* siltä kuin tärkeiden ominaisarvojen suuntia olisi jäänyt mallin ulkopuolelle, vaikka kyse on vain voimakkaasta kytkeytymisestä. Toisaalta maksimia suuremmat n-valinnat johtavat redundanttisuuteen, toimijoiden jakaessa yhteistä variaatiota, niin että matriisista $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ tulee singulaarinen (ellei parametria b kasvateta nominaaliarvostaan). Redundanttisuus ei kuitenkaan haittaa sen enempää järjestelmän toimintaa kuin matemaattisia tarkastelujakaan lausekkeissa olevan termin Q^{-1} ansiosta (katso seuraava luku).

Edellä esitetty parametrien minimoinnin näkökulma on tärkeä pyrittäessä keinotekoisesti toteuttamaan mittausdatan kyberneettinen mallintaminen (kuten seuraavassa kappaleessa on esitetty). Mutta toinen näkökulma on yhtä lailla kiinnostava: jos analysoitavan datan voidaan olettaa edustavan jotakin kyberneettistä järjestelmää, antaako tämä tieto vihjettä siitä, kuinka esimerkiksi datan esikäsittely kannattaisi suorittaa (riippumatta siitä, kuinka kyseistä dataa tullaan jatkossa käsittelemään)? Todellakin, olettaen että mittausdata koostuu ympäristön tilaa kuvaavista muuttujista ja tähän ympäristöön onnistuneesti kytkeytyneen systeemin tilamuuttujista, voimme esimerkiksi olettaa, että muuttujat ovat *ekvalisoituneet*. Tämä tarkoittaa, että ”luonnollisessa skaalassa” kaikkien muuttujien variaatiotaso on sama; näin ollen *perinteinen* (*puhtaasti pragmaattinen*) *muuttujanormalisointi* (*varianssien vakiointi*) *saa kyberneettisen perustelun!*

Seuraavassa havainnollistetaan edellä esitettyä teoriaa käytännöllisen esimerkin avulla.

2.8 Esimerkki: käsin kirjoitetut numerot

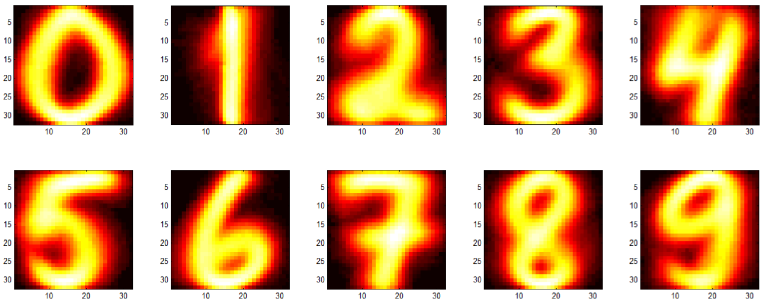
Seuraavassa havainnollistetaan, millä tavalla *määrällinen* muuttuu *laadulliseksi*. Asioiden abstrahoituessa, kun yksityiskohtia ei enää hahmota, mekaaniseenkin laskentaan tulee mukaan jonkinlainen *älykkään käyttäytymisen illuusio*. Jotta *dimensionaalisuuden kirous* ei tulisi ylipääsemättömäksi, menetelmien täytyy olla *skaalautuvia* — ja neokyberneettinen algoritmi on sellainen.

Esimerkkidatana oli 8940 näytettä käsinkirjoitetuista numeroista (894 näytettä kaikista numeroista ”0”–”9”) kirjoitettuna 32×32 -kokoisiin ruudukkoihin binaariarvoina (”0” vastaten mustaa ja ”1” valkoista pikseliä).[3] Esikäsittelyssä kaksiulotteiset ruudukot avattiin yksiulotteisiksi intensiteettivektoreiksi $u(\kappa)$, jonka jälkeen nämä vektorit skaalattiin niin että $\mathrm{E}\{u_j^2\} = 1$ kaikille $1 \leq j \leq 1024$, mutta vektoreita ei keskiarvoistettu. Kuvassa 2.4 viereisellä sivulla on näytetty kunkin numeroluokan *keskimääräinen* hahmo taas ruudukoksi pakattuna (laskennan tuloksena tulleet ei-binaariset arvot näytettynä tummina ja kirkkaina sävyinä).

Nyt siis $m = 32 \cdot 32 = 1024$, ja mallin kooksi valittiin $n = 25$. Numerodata mallitettiin samaa algoritmia käyttäen kahdella eri harvakoodauksen tasolla; seuraavassa merkitään *koodauksen tiheyttä* symbolilla η, jolloin siis $1 \leq \eta \leq n$. Harvakoodaus on (approksimatiivisesti) toteutettu siten, että aluksi ajetaan algoritmi läpi lineaarisena; saaduista $\bar{x}_i$-arvoista valitaan ne η indeksiä i, joita vastaavat aktiivisuudet ovat suurimmat; järjestelmän annetaan nyt löytää uudet $\bar{x}_i$-arvot, kun aktiivisia muuttujia lukuun ottamatta kaikki muut on sidottu nollaan. Kannattaa huomata, että myös tässä jälkimmäisessä tapauksessa se aktiivinen *osasysteemi* on lineaarinen, jolloin asymptoottinen ratkaisu voidaan ratkaista matriisinkäännöllä.

Koska tietokonealgoritmina toteutetulla enformaatiovirtauksella ei ole sisäänrakennettua takaisinkytkentäominaisuutta, enformaation ”kuluminen” pitää simuloida erikseen. Tämä aiheuttaa järjestelmään ylimääräistä dynamiikkaa; stabiilisuuden ylläpitämiseksi algoritmeihin täytyy lisätä tällöin myös hitautta. Yksinkertaisuuden vuoksi nämä tekniset yksityiskohdat nyt sivuutetaan.

[3] Kiitokset TkT *Jorma Laaksoselle*; http://lib.tkk.fi/Diss/199X/isbn9512254794/



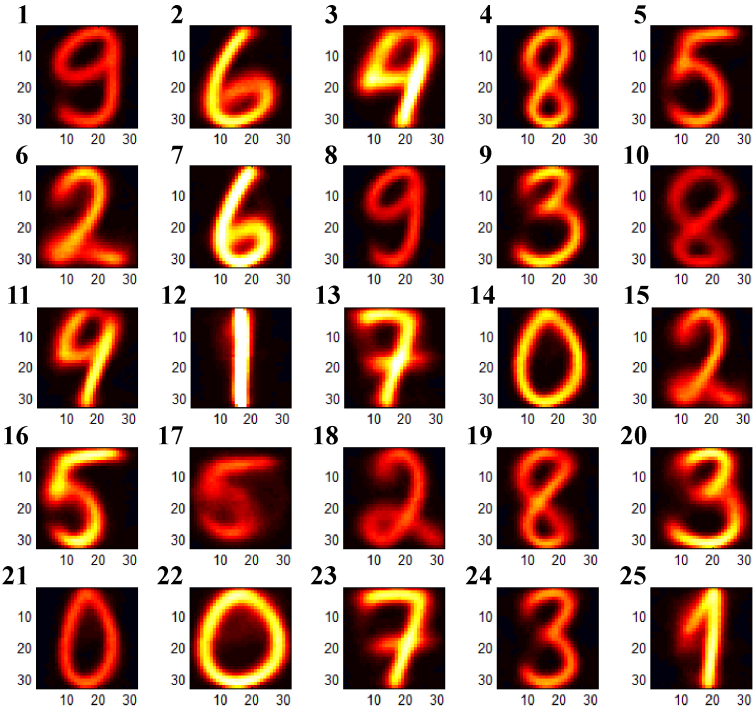
KUVA 2.4: Eri numeroiden keskimääräiset hahmot

Ensimmäisessä kokeilussa (kuva 2.5 seuraavalla sivulla) valittiin $\eta = 1$, jolloin koodaus on äärimmäisen harva ja lokaali, ja toisessa kokeilussa (kuva 2.6) valittiin $\eta = 10$ (valinnalla $\eta = n$ malli olisi ”tiheä” ja täysin globaali). Tulokset vaihtelevat algoritmin eri ajokerroilla, mutta kuvissa on näytetty tyypilliset tulokset. Visualisoinnin vuoksi saadut 25 piirrettä on koottu kaksiulotteiseksi ”mallikartaksi” niitä millään tavoin järjestämättä (intensiteettitasoja on skaalattu, ja kuvassa 2.6 piirteitä on korostettu).

Ensimmäisessä tapauksessa jokainen hahmo esitetään vain yhden piirteen avulla: tämä vastaa tavanomaista näytteiden *luokittelua* (eli *klusterointia*). Vaikka algoritmia ei ole suunniteltu tällaiseen ääriharvaan tapaukseen, systeemin sisäinen lokaali tasapainotus tekee tämän kuitenkin mahdolliseksi.

Toisessa tapauksessa, yhteisiä piirteitä haettaessa, kannattaa muistaa, että numerot on määritelty tarkoituksellisesti mahdollisimman erilaisiksi, niin ettei niillä olisi yhteisiä piirteitä! Voidaan kuitenkin arvata, että yhteiset graafiset piirteet ovat jonkinlaisia kuvaelementtejä; on kiinnostavaa huomata että nisäkkäiden visuaalisen aivokuoren alin taso jostakin syystä toteuttaa juuri vastaavanlaista näköaistimuksen purkamista elementaarisiin kuvaelementteihin.

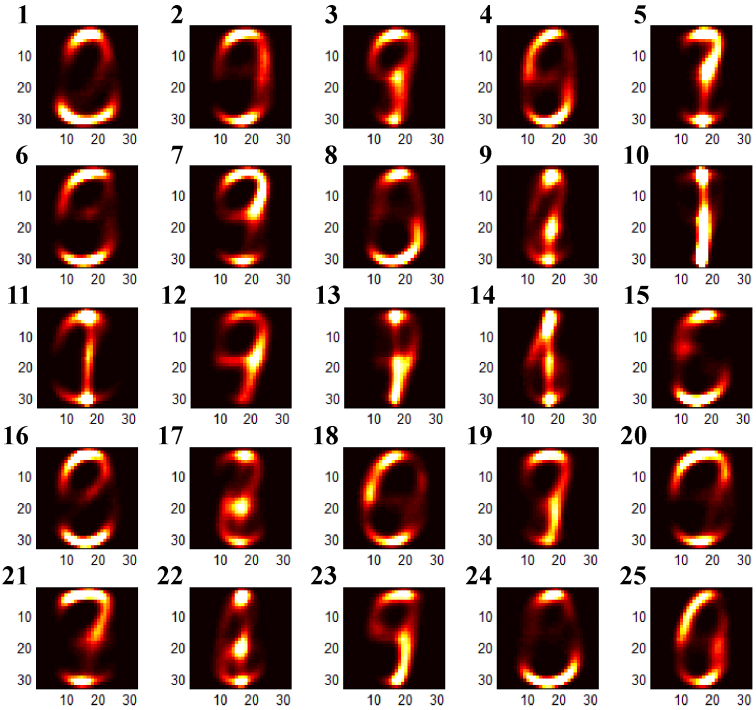
Samantyyppisiä algoritmeja on sovellettu myös esimerkiksi *tekstiaineistojen* mallitukseen: koodaus on suoritettu niin, että jokaiselle kielen sanalle on varattu oma paikkansa korkeadimensioiseen vektoriin u; kutakin dokumenttia esittää sitten ”sormenjälki”, harva vektori, jossa on kunkin



Kuva 2.5: Koodin ”tiheys” $\eta/n = 1/25$: seurauksena *klusterointi*

dokumentissa esiintyvän sanan lukumäärä sanaa vastaavalla vektorin kohdalla. Dokumenttivektorien mallituksen tuloksena saatavat piirrevektorit ovat jonkinlaisia ”yleistettyjä avainsanoja”, jotka kertovat mallitettujen dokumenttien sisällöllisestä luonteesta. Ilman mitään semanttista tietoa sanojen merkityksistä, ja ilman tietoa edes sanojen järjestyksestä dokumenteissa, pelkkään *kontekstuaaliseen semantiikkaan* perustuen, tällainen malli kykenee tekstien sisältöpohjaiseen luokitteluun, mahdollistaen aineistojen automaattisen esikäsittelyn ja esimerkiksi eräänlaisen ”yhteisöllisen” suodatuksen (engl. *collaborative filtering*).

Algoritmisissa toteutuksissa, käytännön ongelmia ratkottaessa, joudutaan teoreettisia perusratkaisuja usein muokkaamaan vastaamaan paremmin



KUVA 2.6: Koodin ”tiheys” $\eta/n = 10/25$: seurauksena *piirteistys*

kulloistakin tarvetta. Varsinkin jos rakenteet säilytetään lineaarisina, on erilaisia modifikaatioita helppo kirjoittaa.

Käytännössä usein on tärkeää kyetä hakemaan erillisten datajoukkojen *yhteismalleja* niiden keskinäisten yhteiskorrelaatioiden avulla (vertaa myös kappale 3.4). Esimerkiksi jos edellisessä esimerkissä käytettävissä olisi numeroiden luokitustieto vektorissa y, olisi toivottavaa että kyettäisiin rakentamaan ennustemalli ”sisäänmenon” u ja ”ulostulon” y välille. Osoittautuukin, että kehitettyä mallikehystä voitaisiin luontevasti laajentaa *kanonisen korrelaatioregression* (engl. *canonical correlation regression*) suuntaan. Jos oletetaan, että datalle u etsitään mallia $\bar{x}_u = \phi_u^{\mathrm{T}} \bar{u}$ ja datalle y mallia $\bar{x}_y = \phi_y^{\mathrm{T}} \bar{y}$, mallit saadaan yhdistetyksi ottamalla yhteiseksi *latenttimuuttujaksi* vektori $\bar{x} = (\bar{x}_u + \bar{x}_y)/2$, ja käyttämällä tätä muuttujaa mal-

lin adaptoimiseen. Syynä tähän on se, että kanoninen korrelaatioregressio voidaan määritellä kaavalla

$$\begin{array}{ll} \text{Minimoi} & \mathcal{E}\{\| \bar{x} \|^2\} = \mathcal{E}\{\| \phi_u^{\mathrm{T}} \bar{u} - \phi_y^{\mathrm{T}} \bar{y} \|^2\} \\ \text{kun} & \phi_u^{\mathrm{T}} \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} \phi_u = \phi_y^{\mathrm{T}} \mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\} \phi_y = \text{vakio} \cdot I_n. \end{array} \tag{2.37}$$

Avaruuksien välisistä kuvauksista ϕ ja regressiomalleista yleensä puhutaan lisää seuraavassa luvussa kappaleessa 3.2.

Toisaalta viimeaikaisissa hahmontunnistussovelluksissa on havaittu *Markovin piilomuuttujamalli* (engl. *hidden Markov model, HMM*) erityisen käyttökelpoiseksi työkaluksi. Tällaisen toiminnassa avainroolissa ovat *tilasiirtymät* ja niiden *tilansiirtotodennäköisyydet* varsinaisten mittaussignaalien ohella; järjestelmässä on tällöin uudenlaista *diskreettiaikaista dynamiikkaa*, ja sellaisen toteuttamiseksi neokyberneettistä perusratkaisua täytyy laajentaa hieman.

Ottamalla huomioon muuttujien todennäköisyystulkinta (kappale 2.3), voidaan tilat $\bar{x}_i$ (tai niiden neliöt) suoraan tulkita Markov-mallin (normeeraamattomiksi) tilatodennäköisyyksiksi. Tämän hyödyntämiseksi järjestelmän dynamiikka täytyy kuitenkin *diskretoida*; aika-akselin diskretointipisteiksi k voidaan valita nopeimman dynamiikan ”äärettömyyspisteet”, niin että $\bar{x}(k) = \Phi^{\mathrm{T}} u(k)$ (katso kappale 3.6). Nyt malli saadaan huomioimaan aiempi tila $\bar{x}(k-1)$ määrittelemällä uusi rekursiorakenne, jota voidaan simuloida ja adaptoida palaamatta enää lainkaan dynamiikan alimmalle tasolle:

$$\bar{x}(k) = \Phi_x^{\mathrm{T}} \bar{x}(k-1) + \Phi_u^{\mathrm{T}} u(k), \tag{2.38}$$

jossa

$$\begin{cases} \Phi_x^{\mathrm{T}} = \mathcal{E}\{\bar{x}(k)\bar{x}^{\mathrm{T}}(k)\}^{-1} \mathcal{E}\{\bar{x}(k)\bar{x}^{\mathrm{T}}(k-1)\} \\ \Phi_u^{\mathrm{T}} = \mathcal{E}\{\bar{x}(k)\bar{x}^{\mathrm{T}}(k)\}^{-1} \mathcal{E}\{\bar{x}(k)u^{\mathrm{T}}(k)\}. \end{cases} \tag{2.39}$$

Tällaisten asioiden ymmärtämistä helpottaa abstrahointi, mallin katsominen taas hieman ”ylempää”; tätä abstrahointia jatketaankin seuraavassa luvussa.

Luku 3

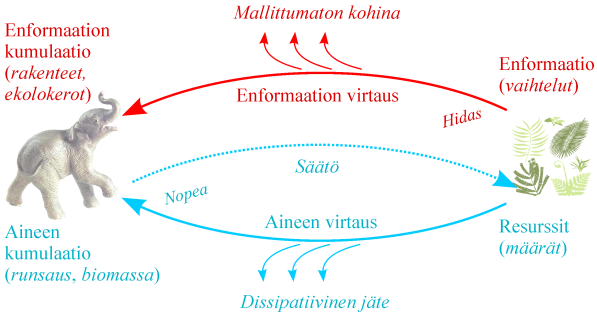
*E*ntropia.

> *Kalevalassa keskeinen rooli on* sammolla*, universaalilla myllyllä, joka toimii päinvastoin kuin tavallinen mylly: sen sijaan, että rakenteet jauhautuisivat yksinkertaisemmiksi, sammon pyöriessä rakenteet* monimutkaistuvat. *— On monia tulkintoja siitä, mikä se sampo konkreettisesti on; meille se on nyt* neokyberneettinen säädin*, jossa silmukan sulkeminen sitoo langanpäät yhteen ja käynnistää myllytyksen.*

3.1 Johdatus globaaliin näkökulmaan

Edellä laajennettiin lokaali toiminta systeemin tasolle: yksittäisten muuttujien sijaan niiden kokonaisuus hallitsee, niillä on ulkopuolelta katsottuna näennäisen koordinoitua yhteistoimintaa. Tässä luvussa laajennetaan näkökulmaa edelleen kohti *globaalia* perspektiiviä.

Kuvissa 3.1 ja 3.2 seuraavalla aukeamalla on aluksi kaksi esimerkkiä siitä, millaisia tulkintoja edellä käsitellyillä matemaattisilla rakenteilla voi olla erilaisissa ympäristöissä. Ensimmäinen tapaus (kuva 3.1) kuvaa tyypillistä *ekosysteemiä*, josta tarkastellaan yhtä *trofiatasoa* — kasvinsyöjien muodostamaa alisysteemiä. Kasvien tasolla esiintyy vuosittaista vaihtelua johtuen kosteuden, lämpötilojen, paisteisuuden yms. vaihteluista; eri kas-



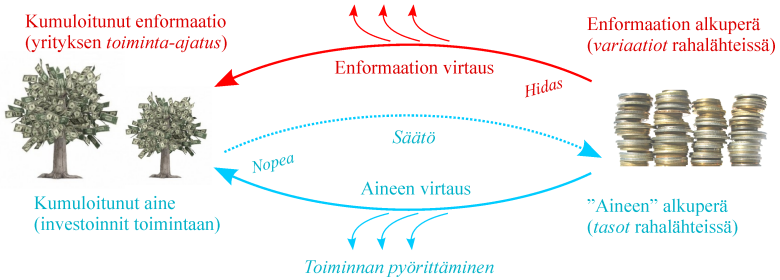
Kuva 3.1: Neokyberneettinen ekosysteemi

vien vuosivaihteluissa on keskinäistä korrelaatiota, ja tämä yhteisvaihtelu on sitä enformaatiota, jonka perustalle kasvinsyöjien ekolokerot muodostuvat. Täydellisemmän mallin aikaansaamiseksi pitäisi ravintolähteiden ohella resurssien joukkoon sisällyttää paljon muutakin; avainongelmaksi muodostuukin *biosemioosin* jäljittäminen.

Kaikessa monimutkaisuudessaankin *taloudellinen järjestelmä* (kuva 3.2 viereisellä sivulla) on ekologista järjestelmää yksinkertaisempi, koska tällöin *semioosi* on yksinkertaisempi: raha oletetaan yleispäteväksi kaikille yhteiseksi arvon mitaksi. Jos markkinoilla eri tuoteryhmissä on erilaiset määrät kysyntää, ja jos kysyntä vaihtelee vuosittain, muodostuva malli heijastuu markkinoilla toimivien yritysten *tuoteprofiileissa*.

Neokyberneettinen malli on siinä mielessä kiinnostava, että se kykenee luonnostaan selittämään *monimuotoisuuden* (engl. *diversity*). Eloonjäämiskamppailu ei ole niin veristä kuin on totuttu ajattelemaan. Voittostrategia ei ole se, että jokin laji (yritys) valtaisi kaikki ekolokerot (tuotekategoriat); optimitilanteessa vallitsee työnjako, mikäli resursseissa on riittävästi variaatiota. Systeemi on rikkaudessaan ympäristönsä peilikuva; silti vapautta on paljon, ekolokerot määräävät vain olemisen (peilin) kehykset.

Onko tällainen universaalien ekolokeroiden mielikuva sitten se syvin systeeminen totuus? Ettei vain kyseessä olisi taas pelkkä varjokuva, jonka



KUVA 3.2: Neokyberneettinen ”ekonosysteemi”

takana on piilossa jotain olennaisempaa (Platonin luolavertauksen mielessä).

Haluttaessa ymmärtää luonnon olemusta, osoittautuu, että tärkeintä ei olekaan se, kuinka systeemi peilaa ympäristöään, vaan se, miten se *muokkaa* tätä ympäristöä. Seuraavassa tarkastellaan tätä systeemin vaikutusta alaspäin; kuten jo aiemmin on mainittu, tämän *kytkeytymisen* aiheuttama *havaitsijavaikutus* näkyy ulospäin jonkinlaisena *homogenisoitumisena*. Systeemistä ja ympäristöstä tulee dynaamisen vuorovaikutuksen yhteen sitoma kiinteä kokonaisuus.

Edellisessä luvussa avainteemana oli mallin muodostuminen. Mutta miksi luonto tällaisia malleja muodostaa — ja yleisemminkin: miksi se luonto haluaa ymmärtää itseään? Haluaisimme jonkinlaisen ”enformaationnälkää” vakuuttavamman perustelun. Seuraavassa näytetään, kuinka vastauksena tähän kysymykseen on universaali pyrkimys *entropian maksimointiin*. Avainsanana tämän väitteen ymmärtämiseen on *säätö* (se vastakkaissuuntainen nuoli kuvissa 3.1 ja 3.2).

3.2 Systeemi säätäjänä

Neokyberneettisen järjestelmän muodostama silmukka systeemin ja ympäristön välille ei ole mikä tahansa vuorovaikutussuhde; tällä *takaisinkytkennän muodostamalla säätörakenteella* on kiinnostavia erikoisominaisuuksia. Asian ymmärtämiseksi tarvitaan taas laajempi näkökulma.

Vaikka kaikki operaatiot systeemissä perustuvat elementaarisiin ja skalaarisiin operaatioihin, kokonaisjärjestelmän ominaisuuksia on helpompi ymmärtää *avaruuksien välisten lineaarikuvausten* avulla. Kun tasapaino on löytynyt, ei pelkästään signaalien hetkellisten arvojen vaan myös niiden tilastollisten ominaisuuksien välille, ympäristön ja systeemin signaalien väliselle riippuvuudelle voidaan kirjoittaa *eksplisiittinen kuvaus*

$$\phi^{\mathrm{T}} = Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} = \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1}\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}, \tag{3.1}$$

kaavan (1.15) mukaan; jälkimmäinen muotoilu saadaan kun tässä lausekkeessa korvataan $\bar{u}$ määritelmällään ja sievennetään. Näin ollen voidaan kirjoittaa $\bar{x} = \phi^{\mathrm{T}}\bar{u}$ ja takaisinkytkennälle $\Delta\bar{u} = \phi\bar{x}$. Edelleen, kun ratkaistaan systeemimuuttujien yhteys alkuperäisiin, häiritsemättömiin muuttujiin, niin että $\bar{x} = \varphi^{\mathrm{T}}u$, kaavan (2.21) mukaan saadaan *implisiittinen kuvaus*

$$\varphi^{\mathrm{T}} = \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}. \tag{3.2}$$

Näillä merkinnöillä voidaan löytää uudenlaisia formulointeja: esimerkiksi ominaisvektorien matriisi θ voidaan kirjoittaa uusiin muotoihin

$$\theta^{\mathrm{T}} = \left(\phi^{\mathrm{T}}\phi\right)^{-1/2}\phi^{\mathrm{T}} = \left(\varphi^{\mathrm{T}}\varphi\right)^{-1/2}\varphi^{\mathrm{T}}. \tag{3.3}$$

Mutta jotta neokyberneettisen silmukan luonne voitaisiin todella ymmärtää, tarvitaan hieman ymmärrystä *lineaariregressiosta*.

> Oletetaan, että on olemassa jotakin n-dimensioista dataa $\xi(k)$ ja toinen joukko m-dimensioista dataa $\zeta(k)$. Haluttaisiin löytää paras mahdollinen kuvaus muuttujien ξ avaruudelta muuttujien ζ avaruuteen niin että keskiarvo neliöllisistä rekonstruointivirheistä $\|\zeta(k) - \hat{\zeta}(k)\|^2$ minimoituu. Verrattuna esimerkiksi pääkomponenttianalyysiin suunta siis on nyt päinvastainen: kuvaus tehdään matalammasta ulottuvuudesta korkeampaan. Standardiratkaisu tähän ongelmaan

saadaan pienimmän neliösumman minimointitekniikalla, joka antaa *lineaarisen regressioestimaatin* (engl. *multilinear regression*)

$$\hat{\zeta}(k) = \left(\mathrm{E}\{\xi\xi^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathrm{E}\{\xi\zeta^{\mathrm{T}}\}\right)^{\mathrm{T}} \xi(k). \tag{3.4}$$

Tämä optimiratkaisu ei kuitenkaan tyypillisesti ole *robusti* korkeadimensioisen datan tapauksessa, koska datan *kolineaarisuudet* voivat tehdä kovarianssimatriisin $\mathrm{E}\{\xi\xi^{\mathrm{T}}\}$ käytännössä *singulaariseksi*: sille ei löydy käänteismatriisia jolloin ylisovitetun mallin antamat estimaattiarvot ”räjähtävät”. Yksinkertainen likimääräisratkaisu on lisätä korreloimatonta valkoista kohinaa datavektoriin ξ; tällöin kovarianssimatriisin ominaisarvot siirtyvät kauemmaksi origosta. Näin ollen jos kohinan kovarianssimatriisi on C, aina kääntyvä positiividefiniitti diagonaalimatriisi, voidaan kirjoittaa (jossakin määrin konservatiivinen) *regularisoidun regression* (engl. *ridge regression*) kaava

$$\hat{\zeta}(k) = \left(\left(C + \mathrm{E}\{\xi\xi^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1}\mathrm{E}\{\xi\zeta^{\mathrm{T}}\}\right)^{\mathrm{T}} \xi(k). \tag{3.5}$$

Kun kaavassa (3.5) valitaan $C = Q^{-1}$, $\xi = \bar{x}$ ja $\zeta = u$ (tai $\zeta = \bar{u}$), ja kun odotusarvo-operaattori E tulkitaan operaattoriksi $\mathcal{E}$, nähdään regressiokaavojen yhteys kaavoihin (3.1) ja (3.2). Voidaankin kirjoittaa kaikki kuvaukset kootusti seuraavaan muotoon, josta paljastuu neokyberneettisen järjestelmän hämmentävä ”kaksoissymmetria”:

$$\begin{cases} \bar{x} &= \phi^{\mathrm{T}}\,\bar{u} \\ \bar{x} &= \varphi^{\mathrm{T}}\,u \\ \hat{u} &= \phi\,\bar{x} \\ \hat{\bar{u}} &= \varphi\,\bar{x}. \end{cases} \tag{3.6}$$

Tässä $\bar{u}$ tulkitaan *jäännösvirheeksi*

$$\bar{u} = u - \hat{u}. \tag{3.7}$$

Näistä kaavoista voisi melkein todeta Herakleitoksen sanoin että *tie ylös ja alas on sama*.

Tämä kaikki tarkoittaa että paikallinen datankäsittely johtaa kokonaisvaltaisiin seurauksiin: enformaation käsittelyn mielessä järjestelmän toteuttamat kuvaukset ovat *parhaat mahdolliset*:

- Neokyberneettisen silmukan ”myötähaara” signaaleista u signaaleille $\bar{x}$ toteuttaa optimaalisen (robustin) syötedatan *mallituksen* variaation (enformaation) esittämisen mielessä.

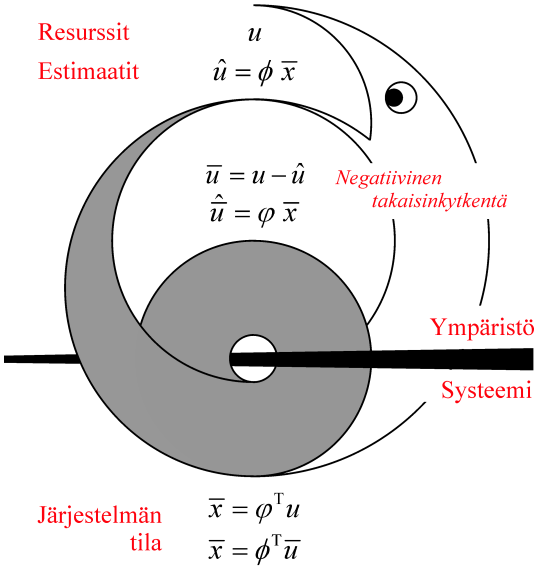
- Silmukan ”vastahaara” signaaleista $\bar{x}$ signaaleille u toteuttaa optimaalisen (robustin) syötedatan *estimoinnin* variaation (enformaation) ennustamisen mielessä.

- Näin ollen negatiiviseksi takaisinkytkennäksi suljettu silmukka kokonaisuudessaan toteuttaa ”tilastollisen tason” optimaalisen (robustin) syötedatan *säädön* variaation (enformaation) eliminoimisen mielessä.

Kun robustisuus estimoinnissa viittaa yllä mainittuun regularisointiin (valkoisen kohinan lisäämiseen), mallituksessa robustisuuden voisi sanoa tarkoittavan ”mustan kohinan” lisäämistä: osoittautuu, että signaalien kierrättäminen järjestelmässä toteuttaa esisuodatuksen, jolloin kohinataso alenee.

Säätö poistaa ympäristöstä enformaatiota ja imee sitä systeemiin. Regularisoitu regressio on kuitenkin varovainen eikä se käytä hyväkseen kaikkea mallitettua enformaatiota. Tällainen ”tuhlaus” on tietenkin evolutiivisesti häviämään tuomittu strategia; myöhemmin kappaleessa 3.6 esitetäänkin mallirakenne jolla on puolellaan evolutiivinen etu edellä esitettyyn perusratkaisuun verrattuna. Tosin kappaleessa 5.6 joudutaan toteamaan, että juuri tällainen ”vaatimaton” strategia, joka ei ulosmittaa ympäristöstään kaikkea herätettä, olisikin ollut se kestävämmän kehityksen mahdollistava ”rauhallinen” ratkaisu!

Yhteenvetona tästä kappaleesta ja sen ytimen määrittelevistä kompakteista kaavoista (3.6) voidaan piirtää kuva 3.3 seuraavalla sivulla. Järjestel-



KUVA 3.3: ”Ouroboros” häntäänsä jahtaamassa

mä on kuin ahne *käärme* joka syö häntäänsä: eliminoidessaan enformaatiota ympäristöstään se samalla tuhoaa omia elämisen edellytyksiään. Käärme kiertää rajapintaa konvergenssiin saakka, kunnes systeemin ja ympäristön vuorovaikutus saavuttaa dynaamisen tasapainon, määritellen samalla järjestelmän *vapausasteet* (katso luku 5). Vapausasteet voimien välillä ovat kuin köysi köydenvetäjien välillä: ne strukturoivat maailmaa määritellessään voimien ja vastavoimien pelikentän.

3.3 Signaaleista ja niiden takaisinkytkennöistä

Vaikka systeemien synnyn motivaationa on enformaation imeminen ympäristöstä järjestelmään, kokonaisuuden toiminnallisuutta kuvaa paremmin se, mitä järjestelmä aiheuttaa ympäristössään. Neokyberneettisten järjestelmien ytimessä on siis *takaisinkytketty säätö*, ja tämän aikaansaama

tasapaino mahdollistaa rakenteen emergoitumisen ja asioiden monimutkaistumisen. Tarkastellaan tätä väitettä lähemmin.

Kuten *säätöteoria* paljastaa, säädön avulla voidaan suuressa määrin vaikuttaa kohteeseen; erilaisilla säätäjillä ja säätäjän virityksillä suljetun silmukan dynamiikkaa voidaan muuttaa miltei mielivaltaisesti. Säädön ja säätäjien idea on ehkä liiankin vahva ja intuitiivisuudessaan houkutteleva; se on osaltaan johtanut yleisemminkin kuvitelmaan keskitetyn hallinnan välttämättömyydestä. Jos säädön ajatus otetaan käyttöön liian varhaisessa vaiheessa, jos järjestelmää aletaan rakentaa ylhäältä päin, koko hajautetun emergenssin ajatus romahtaa. Meidän tapauksessamme säätö on kuitenkin vain tulkinta sille mitä emergentit rakenteet tekevät. Säätöabstraktio on tarkasteluissa askel eteenpäin; tämän tulkinnan merkitys tulee selväksi tämän luvun lopussa kappaleessa 3.8.

Säätöteorian intuitiot ovat nyt muillakin tavoin harhaanjohtavia. Perinteisissä säätötekniikan sovelluksissa käsitellään skalaarijärjestelmiä; tyypillisesti tarkasteltavana on *yksi* (tai enintään muutama) signaali, joiden käyttäytymistä ajassa yritetään säädön avulla optimoida. Neokyberneettisessä säädössä signaalit ovat sen sijaan korkeadimensioisia, ja avainasemassa on jonkinlainen *hahmojen säätö*. Perinteinen säätö pyrkii optimoimaan signaalien aikatason käyttäytymisen; nyt kuitenkin aika-akseli on abstrahoitu pois — tärkeintä on vain se, että järjestelmä stabiloituu. ”Homeostaasi” paljastaa dynaamisten vuorovaikutusten keskinäisen tasapainon ja toimii järjestyksen kasvualustana (kuten luvussa 5 tarkemmin esitetään). Kun tarjolla on negatiivinen takaisinkytkentä, erilaisten säätöjen rakentaminen ei ole vaikeaakaan — sen enempää ihmiselle kuin luonnollekaan (säädön optimaalisuutta ei ainakaan aluksi edellytetä). Säätörakenteita voidaankin rakentaa erilaisten tavoitteiden saavuttamiseksi suoraviivaisen enformaatiomaksimoinnin sijaan.

Kuten yleensäkin säätötekniikassa, negatiivinen takaisinkytkentä on nytkin se välttämätön tekijä, joka tarvitaan, jotta sisäisesti epästabiilissa (katso kappale 2.4) mallin rakenteessa $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}$ signaalit $\bar{x}$ ja $\bar{u}$ pysyisivät rajoitettuina ja stationaarisina. Voidaan väittää, että jokaista muodostettavaa mallia varten hajautetussa järjestelmässä välttämättä tarvitaankin oma negatiivinen takaisinkytkentäsilmukkansa.

Millaisia signaaleita sitten takaisinkytketään? Voidaan sanoa, että kyseessä on *virheiden* takaisinkytkentä. Avainrooliin takaisinkytketyissä järjestelmissä nousee *erosignaali*, poikkeama ympäristön ja systeemin vastavaikutuksen välillä, kuvan ja peilikuvan ero, nyt muodoltaan $\bar{u} = u - \hat{u}$. Tämä rekonstruktiovirhe syötetään säätimeen (tässä tapauksessa siis systeemiin), joka muodostaa ”säätösignaalin”, ympäristöä ajavan voiman. Tavoitetilanteessa erosignaali minimoituu, eli on säätynyt nollaan; samalla kokonaisuus stabiloituu. Takaisinkytketyn säädön ajatus toimii, vaikka malli ei olisikaan täydellinen: ei ole väliä sillä, johtuuko virhe signaaleista vai malliparametreista. Kun tarkasteltavana on erosignaali, keskitytään siihen, mikä *ei vielä ole tunnettu*.

Näyttäisi siltä, että erilaisten poikkeamien keskeisyys yleistyy myös hahmojen välisiin *eroihin*, *differensseihin* ja edelleen *derivaattoihin*; tämä antaa vihjettä siitä, kuinka data kannattaa valita (siis millainen on systeemisemioosin luonne). Voidaan ajatella, että erojen avulla päästään suoremmin kiinni kyberneettiseen semantiikkaan: variaatio saadaan koodatuksi jo yksittäiseen näytteeseen. Näytteet ajassa kannattaa sitoa yhteen, jolloin keskitytään *muutoksen luonteen analysointiin*; tätä derivaatta-väitettä on perusteltu kappaleessa 5.8 (ja asiaa on viety eteenpäin luvussa 6).

Systeemimallin $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\} = \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{\mathrm{T}}$ ulkonäkö houkuttelee tekemään järjestelmään lisäyksen: *jos myös systeemin sisäiseen muuttujaan x lisätään ylimääräinen signaali, järjestelmän rakenteesta tulee symmetrinen*.

Kuitenkin lisäsignaalin vaikutus systeemin sisällä osoittautuu olevan aivan erilainen kuin systeemin ulkopuolella. Jos signaaliin $\bar{x}$ summautuu jotakin ylimääräistä, ei kaava (1.15) kuvaa todellista signaalien välistä kausaalisuhdetta; mutta koska ollaan kiinnostuneita vain tasapainoista, ei ole merkitystä sillä, minkä vuoksi tasapaino on saavutettu. Meille riittääkin se, että (kappaleen 2.2 mukaisesti) lauseke $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}$ silti mallittaa signaalien välistä yhteisenformaatiota, virittäen niiden maksimaalisen yhteisvariaation avaruuden. Kiinnostavan ”yhteiskomponenttien” aliavaruuden löytämiseksi meille siis riittää, että signaaleiden voidaan *olettaa* olevan vuorovaikutuksessa ja sen vuoksi korreloivia; rakenne pyrkii maksimoimaan tämän yhteisvariaation. Voidaan väittää, että edes (monotonisen)

epälineaarisuuden lisääminen ei estä yhteisenformaation mallitusta.

Ympäristön ja systeemin rooleja ei selvästikään voi vaihtaa keskenään. Kyse on siitä, että systeemin ulkopuolella mallitettavana on signaalien *erotus*, kun taas systeemin sisällä mallitettavana on signaalien *summa*. Voidaan sanoa, että nyt ollaan leikittelemässä negatiivisen ja positiivisen vuorovaikutuksen kanssa; näitä sopivasti takaisinkytkennöissä yhdistelemällä voidaan pysytellä stabiilisuuden ja epästabiilisuuden rajapinnalla, siellä missä kaikki kiinnostava tapahtuu. Ajautumisen kaaokseen täytyy kuitenkin aina olla kahlittu kokonaisuutta hallitsevan negatiivisen takaisinkytkennän avulla.

Enformaation virtauksen suunta systeemin ja sen ympäristön kytkennässä säilyy. Voisi jopa arvata, että tällä yksisuuntaisuudella on jotakin tekemistä *entropian virtauksen* vääjäämättömyyden kanssa (katso kappale 3.7, ja myös kappale 5.7).

3.4 Funktionaalisuuksien synty

Ehkä monimutkaisimmat (ja myös joustavimmat) mallit luonto on toteuttanut isojen aivojen kuorikerroksessa (engl. *neocortex*). Tuorein teoria näistä toimintaperiaatteista perustuu oletukseen hierarkkisista funktionaalisuuksista. Tutkija-visionääri *Ray Kurzweil* on todennut kirjassaan ”How to Create a Mind’, että ei ole mielekästä palauttaa aivojen toimintaa yksittäisten hermosolujen tasolle; sen sijaan näyttää olevan järkevää ajatella aivojen toiminnallisuuksien perustuvan *noin sadasta hermosolusta koostuviin suhteellisen itsenäisiin, rakenteeltaan samanlaisiin hahmontunnistusyksiköihin*. Tätä olettamusta tukevat myös erilaiset aivokuvantamismenetelmät. Edellä esitetty mallirakenne voidaan sovittaa suoraan hänen visioihinsa.

Havaintoa signaalien luonteen merkityksestä on syytä yleistää vielä lisää. Oletetaankin seuraavassa, että molemmat signaalit $\bar{x}$ ja $\bar{u}$ voivat olla yhdistelmiä useista eri signaaleista.

Tarkastellaan tarkemmin signaalia $\bar{u}$. Kun oletetaan, että se koostuu tuntemattomista signaaleista (summattuna signaaliksi u), kappaleesta 2.4

tuttuun tapaan takaisinkytkentähaaraksi voidaan kirjoittaa

$$\bar{u} = u - \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} Q\, \bar{x}. \tag{3.8}$$

Soveltaen aiempia kaavanjohtoja, kerrotaan lauseke oikealta $\bar{x}^{\mathrm{T}}$:llä ja käytetään emergenssioperaattoria:

$$\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = \mathcal{E}\{u\bar{x}^{\mathrm{T}}\} - \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} Q\, \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}, \tag{3.9}$$

josta voidaan ratkaista

$$\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} = \mathcal{E}\{u\bar{x}^{\mathrm{T}}\} \left(I_n + Q\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1}. \tag{3.10}$$

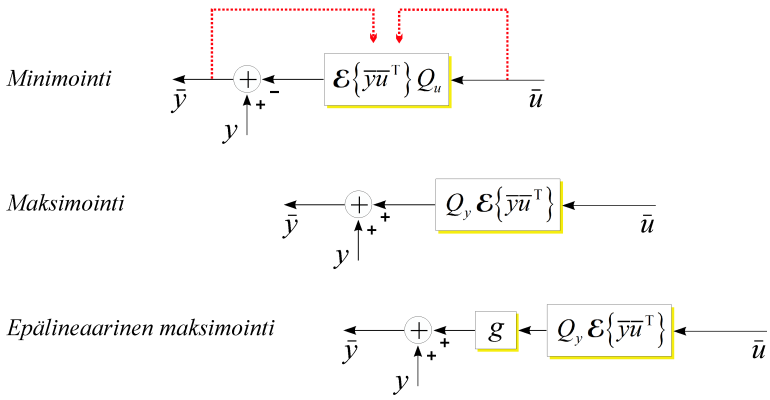
Nyt nähdään, että takaisinkytkentähaaran suorittama kuvaus $\bar{x}$:lta $\hat{u}$:lle

$$\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\, Q = \mathcal{E}\{u\bar{x}^{\mathrm{T}}\} \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1} \tag{3.11}$$

on tuttu regularisoidun regression lauseke systeemin sisäiseltä signaalilta $\bar{x}$ summautuvalle signaalille u. Samoin kuin kappaleessa 2.2 todettiin mallin muodostumisen osalta, myös takaisinkytkennän tapauksessa voidaan siis huomata, että koko silmukkaa ei tarvitse tarkastella: yksisuuntaisen virtauksen tarkastelu riittää taas. Silmukka voidaan näennäisesti *purkaa* toiminnallisuuksia uhraamatta.

Perusrakenne näissä kahdessa tapauksessa (toisaalta kuvaus $\bar{u}$:sta $\bar{x}$:ään, ja toisaalta $\bar{x}$:stä $\bar{u}$:hun) on hyvin samanlainen: kuitenkin ”maksimointitapauksessa” haetaan signaalien keskinäistä yhteiskorrelaatiota ja signaalin $\bar{x}$ itseisenformaatio maksimoidaan signaalia $\bar{u}$ hyödyntäen; minimointitapauksessa yhteiskorrelaatio pyritään eliminoimaan ja signaalin $\bar{x}$ itseisenformaatio minimoidaan. Voidaan puhua positiivisista ja negatiivisista (takaisin)kytkentärakenteista; tai voidaan puhua keskittymisestä *yhtäläisyyksiin* tai *eroihin*. Edellistä voidaan sanoa *hahmontunnistimeksi* ja jälkimmäistä *stabilisaattoriksi*. Tällaisia elementtejä voidaan ilmeisesti yhdistellä keskenään — neokyberneettinen ”perussilmukka” esimerkiksi koostuu peräkkäin kytketyistä maksimointi- ja minimointilohkoista.

Kuvassa 3.4 seuraavalla sivulla onkin edellä esitetyn perusteella näytetty laskennallisten elementtien perustyypit, joita yhdistelemällä mielivaltaisten signaalijoukkojen välisiä riippuvuussuhderakenteita voidaan



KUVA 3.4: Rakennuspalikoita verkoston kokoamiseen

pyrkiä jäljittämään. Tällaisia moduleita voidaan pitää vaikkapa hermosolun (oikeastaan kokonaisen hermosolukerroksen) sisäänmenon ja ulostulon välisen muokkautumisen malleina (tätä hermoverkkoesimerkkiä jatketaan seuraavassa kappaleessa). Voitaisiinkin ehkä puhua laskennan prototyyppeinä jonkinlaisista *systeemisistä neuroneista*: vektorimuotoisista signaaleista $\bar{u}$ (mahdollisesti vakiosignaalilla augmentoituna) lasketaan painotettu summa, ja tulokseen sovelletaan mahdollisesti jotakin sopivaa epälineaarista *aktivaatiofunktiota*.

> Epälineaarisuuden valinta on aivan oma taiteenlajinsa. Perinteisesti sovellettu aktivaatiofunktio on nollan suhteen symmetrinen *hyperbolinen tangentti*, jossa poikkeama lineaarisuudesta ilmenee *saturoitumisena*. Nyt voitaisiin kuitenkin taas käyttää enformaatioteoreettista intuitiota ja ehdottaa epälineaarisuudeksi *signaalin neliötä*, jolloin aktivaationa olisikin $\bar{y}_i = Q_y \mathcal{E}\{\bar{y}_i \bar{u}^{\mathrm{T}}\} u$ sijaan $\bar{y}'_i = |Q_y \mathcal{E}\{\bar{y}'_i \bar{u}^{\mathrm{T}}\} u|^2$. Tätä voidaan motivoida esimerkiksi ajattelemalla, että signaalien odotusarvot edustavat tällöin suoraan systeemin sisäisiä itseisenformaatioita (tai ”todennäköisyyksiä”). Tällainen valinta pyrkii ”epäsymmetriseen piirteistykseen”: positiivisia

painoja pyritään tuttuun tyyliin maksimoimaan mutta negatiivisia painoja pyritään ajamaan kohti nollaa. Se pyrkii myös kohti harvakoodausta, koska suuret poikkeamat nollasta korostuvat.

Laskentamodulista näkyy (tasapainossa) ulos $\bar{y}$, jonka enformaatiotasoa moduli yrittää joko maksimoida tai minimoida. Hermoverkkoparadigma on nyt intuitiivinen, koska synaptiset painokertoimet adaptoidaan neokyberneettisesti Hebbin periaatteeseen nojautuen. Parametri b kaavassa (2.34) on syytä valita riittävän suureksi jos halutaan regressiosta tarkka; täytyy kuitenkin muistaa, että kun kytkentäkertoimia kasvatetaan, takaisinkytkettyjen signaalien värähtelyominaisuudet tulevat patologisemmiksi. Laskennallisissa (diskretoiduissa) toteutuksissa päivitysten täytyy tällöin olla varovaisempia ja tarvitaan enemmän iteraatioita.

Verrattuna perinteisiin hermosolumalleihin, yksi keskeinen ero nyt on signaalien dynaaminen luonne; toimintaa ohjaa ulostuloon summautuva signaali y. Sähköteknisiä termejä löysästi käyttäen voitaisiin sanoa, että vaikka ”sisäänmenoimpedanssi” (tässä tapauksessa resistanssi) on hyvin suuri, niin että modulin kytkeminen ei häiritse signaalia $\bar{u}$, myös ”ulostuloimpedanssi” (resistanssi) oletetaan suureksi; siis signaaliympäristö ulostulossa vaikuttaa olennaisesti signaaliin $\bar{y}$. Vasta kun vuorovaikutukset mahdollisesti monimutkaisessa verkossa ovat asettuneet tasapainoon, voidaan lopputulokset $\bar{y}$ lukea — olettaen, että stabiilisuus on taattu.

Esitetty hermomodulimalli on *systeeminen* siinä mielessä, että laskentaelementit toimivat mielekkäästi vain suurempana kokonaisuutena: signaalit oletetaan ”pankausaalisiksi”. Ainakin kaikki enformaatiota kasvattavat yksiköt täytyy kompensoida vastaavalla negatiivisella takaisinkytkentämodulilla jotta kokonaisuus säilyisi stabiilina.

Päältä päin katsottaessa kaikki on tällaisessa modulimaailmassa yksinkertaista; tämä illuusio aiheutuu suuresta määrästä näkymätöntä koordinoitua (säädettyä) dynamiikkaa. Abstraktiotason nousu mahdollistaa taas uudet käsitteet ja uudenlaisten ajattelutapojen emergenssin, jolloin edellisen tason yksityiskohdat voidaan unohtaa.

Onko tällainen lupaus abstraktiotason noususta vain löysää puhet-

ta? Ehkä asiasta voi saada intuition palaamalla antiikin *Anaksimandrokseen*: hänelle peruselementti maailmassa oli *apeiron* eli ”äärettömyys”, joka toimi perustana kaikelle olevalle. Tässä vaiheessa voimme nimittäin jo unohtaa edellisessä luvussa käsitellyn alimman tason rakenteiden emergenssin: äärettömän iteraation aikaansaama virheiden dynaaminen tasapaino, homeostaasi, toimii nyt *syntynä monimutkaisemmille funktioille*. Jopa *Gödelin epätäydellisyyslauseet* pätevät vain jos rajoitutaan ”äärellisiin kvadratuureihin”!

3.5 Esimerkki: malli modulirakenteena

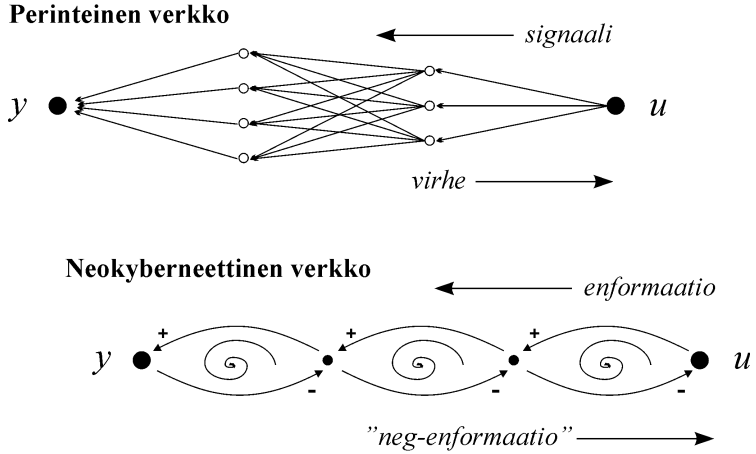
Mitä lisäarvoa voitaisiin saavuttaa edellä esitetyn kaltaisella palastellulla rakenteella, onko sellaisella jokin evolutiivinen etu puolellaan? Tämän ymmärtämiseksi kannattaa verrata neokyberneettistä rakennetta erääseen perinteisempään lähestymistapaan, nimittäin *monikerroksiseen perceptroniverkkoon* (engl. *multilayer perceptron network*), jossa todellisten hermoverkkojen emergenttiä *pintahahmoa* on pyritty suoraviivaisesti jäljittelemään.

> Perceptroni on perinteinen hermosolun malli: kuten edellä, siinä lasketaan syötesignaalien painotettu summa (painokertoimien vastatessa synaptisten kytkentöjen voimakkuuksia), ja lopullinen solun aktiivisuus saadaan viemällä lopputulos epälineaarisen aktivaatiofunktion läpi. Kun tällaisia laskentayksiköitä on useita rinnakkain, muodostaa jokainen niistä oman ulostulosignaalinsa; ja kun tällaisia laskentakerroksia kytketään useita peräkkäin, seuraavan tason käyttäessä edellisen tason aktiivisuuksia syötteenään, muodostuu monikerrosverkko. Signaalit etenevät tasolta toiselle; viimeisen tason aktivaatioiden yhdistelmä tulkitaan verkon ulostuloksi, joka on siten funktio kaikista systeemin sisäisistä painokertoimista.
>
> Monikerrosverkkoja voidaan opettaa iteratiivisesti: kun lasketaan verkon todellisen ulostulon ja halutun ulostulon ero-

tus, tämä virhesignaali voidaan (likimääräisesti) ”palauttaa” rakenteessa takaisin päin, ja tätä virhetietoa voidaan käyttää painokertoimien vähittäiseen adaptoimiseen (engl. *back-propagation of errors*). On voitu osoittaa, että näin opetetuilla monikerrosverkoilla on teoriassa kyky mallintaa *mitä tahansa* (sileää) funktiota tai luokitinta kun vain kerroksia ja epälineaarisia ”piiloneuroneita” on riittävästi; niinpä tämä hermoverkkomalli onkin ollut prototyypillinen lähestymistapa tutkittaessa konnektionistisia rakenteita.

Monikerroksisessa perceptronirakenteessa on kuitenkin myös omat ongelmansa. Ensiksikin, sen opettaminen on hidasta johtuen suuresta määrästä näkymättömiä piilokerrosneuroneita; signaalien sekoittuessa korjausaskeleet tulevat varsin stokastisiksi. Rakenne ei myöskään skaalaudu hyvin: signaalien määrän kasvaessa adaptoitavien parametrien määrä kasvaa voimakkaasti. Oppimisprosessi voi myös helposti pysähtyä perceptronien ”kyllästyessä”, synaptisten kertoimien ajaessa laskentayksiköiden aktiivisuudet kauas optimaalisilta toiminta-alueiltaan. Toisaalta ongelmana voi olla parametrien *ylisovittuminen*. Opettaminen myös edellyttää oikean, tavoitellun funktiomuodon tuntemisen, koska rakenne ei osaa *itseorganisoitua*. Teoreettisesti ehkä kiusallisin ongelma on se, että oikeissa hermoverkoissa ei ole olemassa mekanismeja virheiden palauttamiseen; todellisuudessa on olemassa vain se yksi eteenpäin kulkeva signaali.

Tällaisen monikerrosverkkorakenteen kuvausvoimaa voidaan pyrkiä *emuloimaan* neokyberneettisellä rakenteella: kaikissa piilokerroksissa kuvaus eteenpäin pyrkii maksimoimaan enformaatiota, viimeistä lukuunottamatta kaikki kerrokset ovat epälineaarisia (epälineaarinen ja lineaarinen lohko voivat myös täydentää toisiaan); takaisinkytkennässä kaikki kuvaukset ovat lineaarisia ja ne pyrkivät minimoimaan enformaation (katso kuva 3.5 seuraavalla sivulla). Yhtä aikaa pyritään sekä maksimoimaan että minimoimaan ”piilokerrosten” yhteisenformaatiota; jokainen taso mallittaa yhtä



KUVA 3.5: Signaalivuo "laminaarisesta turbulentiksi"

aikaa sekä edeltävää että seuraavaa tasoa, pyrkien sovittamaan niitä yhteen. Verrattaessa perceptroniverkkoon, asiat ovat nyt monella tapaa toisin.

Ensinnäkin, adaptaatioaskelien satunnaisuus vähenee, koska parametreja päivitetään vasta kun virhesignaalit koko verkossa ovat asettuneet tasapainoon. Rakenne on paremmin skaalautuva koostuessaan olennaisesti lineaarisista elementeistä. Neokyberneettisen ekvalisoitumisen vuoksi laskentayksiköt pysyvät aktiivialueellaan. Regularisoidun regression vuoksi parametrit eivät myöskään pääse ylisovittumaan. Neokyberneettinen rakenne pystyy myös oppimaan datan tilastollista rakennetta ilman annettua luokitustietoa. Ehkä parasta on se, että erosignaalista ei tarvitse erikseen huolehtia: nythän missään vaiheessa *ei käytetä mitään muuta* kuin takaisinkytkettyjä virheitä, jolloin ne ovat opetukseen aina tarjolla!

Yleensä hermoverkkoja simuloivissa järjestelmissä signaalin kulku on suoraviivaista mutta mallin adaptointi monimutkaista; nyt signaalin adaptaatio on monitasoisten takaisinkytkentöjen ja tasapainojen haun vuoksi monimutkaista — mutta mallin adaptointi (ja myös sen tulkinta) on tällöin yksinkertaista. Tieto tasapainosignaaleista $\bar{u}$ ja $\bar{y}$ riittää parametrien

adaptointiin; lopullinen näkyvä malli on jonkinlainen ”muistijälki” havaituista pintatason käyttäytymisistä. Voitaisiin miltei puhua ”muurahaisanalogiasta” (vertaa muurahaisesimerkkiin sivulla 23): vastaavasti kuin muurahaiset rakentavat feromonikarttaa ympäristönsä resursseista, modulien avulla voidaan abstrahoida tarjolla olevien enformaatiolähteiden kartta.

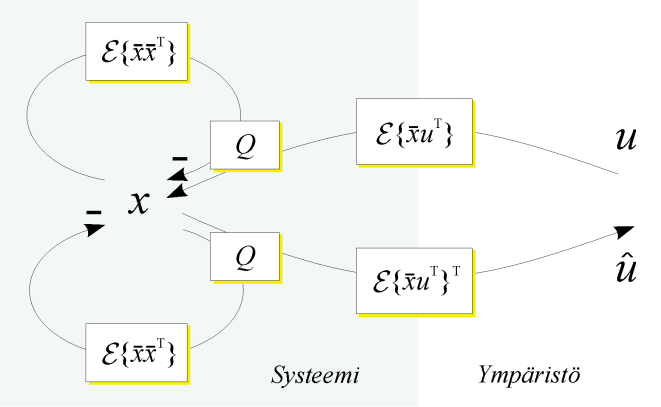
Yleisemminkin, mielivaltaisessa signaalijoukossa enformaatiot voidaan jäljittää ja sovittaa yhteen esitetyn kaltaisten laskentaelementtien avulla; näin voidaan rakentaa malleja monimutkaisille epälineaarisille ilmiöillekin. Ja tällaisia malleja voidaan sitten säätöteoriasta tuttuun tapaan käyttää säätöön ja enformaation haltuunottoon. Kiinnostavaksi asian tekee tällöin se, että ylätason (laadullisesti ilmeisen ylivoimainen) säätäjä on siis itsessäänkin *fraktaalinen säätäjien kokonaisuus*.

Jokainen stabiloitu moduli on oma funktionaalinen yksikkönsä — ja neokyberneettisessä kehyksessä kaikki toiminnalliset kokonaisuudet (funktiot) voidaan yllä esitettyyn tapaan nähdä omina takaisinkytkettyinä säätörakenteinaan. Kaikki toiminta perustuu säätöpiirien määrittelemiin dynaamisiin attraktoreihin. Seuraavassa luvussa abstrahoidaankin taas eteenpäin: *oletetaan fraktaalinen säätöjen kudos järjestelmien universaaliksi perusolemukseksi*.

3.6 Kvalitatiivisia harppauksia

Lohkorakenteisella mallilla, joka on jaettu erillisiin funktionaalisuuksiin, on evolutiivinen etu puolellaan. Tämän toteamiseksi tarkastellaan neokyberneettisen säätäjän rakennetta vielä kertaalleen.

Verrattaessa regularisoidun regression kaavaa (3.5) lineaariregression kaavaan (3.4), nähdään, että ”nimittäjässä” oleva lisätermi Q^{-1} pyrkii pienentämään estimaattien numeroarvoja — niin, tätähän se varovaisuus on, kaikkea ei pistetä peliin. Voitaisiin ajatella, että kytkennän ”tiivistäminen” lisäisi enformaation talteenottoa: jos $q_i \to \infty$ kaikilla tilamuuttujilla i, lauseke lähestyy optimaalisen esityksen muotoa. Ikävä kyllä käy kuitenkin niin — kuten kaavasta (2.31) nähdään — että kytkennän tiukentuessa ohi tietyn optimiarvon, ympäristöstä systeemiin periytyvän enformaation



Kuva 3.6: Monimutkaistuva säätösilmukka

määrä *pienenee* vaikka sitä kulutetaankin ympäristöstä enemmän. Tämä johtuu siitä, että yhä suurempi määrä enformaatiosta joudutaan tällöin käyttämään *dissipaatioon*, yhä raskaamman takaisinkytkentäsilmukan pyörittämiseen.

Millään parametrien virittämisellä tai vastaavalla jatkuva-arvoisella menetelmällä tästä umpikujasta ei päästä pakoon. Tarkastellaan sen sijaan kuvaa 3.6, sen yläosaa, jossa on erillinen signaalien stabilointi- ja vakiointilohko (vertaa rakennetta kuvaan 2.2 sivulla 39). Järjestelmään on tutun ympäristöstä tulevan ”suoravaikutustermin” oheen lisätty *sisäinen takaisinkytkentäsilmukka*, tilan takaisinkierrätys, ympäristön kautta tapahtuvan takaisinkytkennän sijaan. Tällainen lisätermi tuo järjestelmän toimintaan lisää dynamiikkaa:

$$\dot{\bar{x}} = Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\,u - Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{x}. \tag{3.12}$$

Kun tästä yhtälöstä ratkaistaan $\bar{x}$, saadaan kaava

$$\dot{\bar{x}} = \left(Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\right)^{-1} \mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\,u. \tag{3.13}$$

Nyt tässä kaavassa ei mikään estä kasvattamasta kertoimia q_i mielivaltaisen suuriksi: kytkennän kasvattaminen johtaa enformaation yhä tarkempaan

periytymiseen muuttujiin $\bar{x}$. Voidaankin olettaa, että lopputilassa voimme approksimoida

$$\bar{x} = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\,u = \Phi^{\mathrm{T}}u. \tag{3.14}$$

Tässä on otettu käyttöön symboli Φ merkitsemään näitä asymptoottisia, optimaalisia kuvauksia; järjestelmällä voidaan osoittaa nyt olevan aiempaakin selvempi ominaisarvohajotelman luonne. Kappaleen 2.2 johdot toistamalla voidaan todeta että

$$\Phi^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}\Phi = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\} \qquad \text{jossa} \qquad \Phi^{\mathrm{T}}\Phi = I_n. \tag{3.15}$$

Ominaisvektorikannasta tulee tällöin tyypillisesti rotatoitu, eli $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ ei ole diagonaalinen; systeemin voi saada tekemään pääkomponenttianalyysia vaikkapa pakottamalla $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ kolmiomatriisiksi (nollaamalla diagonaalin ylä- tai alapuoliset elementit).

Oppimisen periaate järjestelmässä on edelleen täsmälleen sama kuin aiemmin: kerroinmatriisit sisältävät tulevan signaalin ja tilan korrelaatiot — nyt vain takaisinkytkentähaarassa se tuleva signaali on sama tilavektori. Ulkoisten ja sisäisten signaalien roolieroista muistuttaa miinusmerkki: korreloivat tilat eivät ole resurssi vaan taakka, aktiivisuudesta kilpailevat naapurit näkevät toisensa ”negatiivisina resursseina” ja ne *inhiboivat* toisiaan, jolloin kytkentöjä pyritään ”poisoppimaan” (vertaa ns. *anti-Hebbian* -opetus keinotekoisissa hermoverkoissa).

Systeemin itsensä toteuttama takaisinkytkentä, sen sijaan että se toteutuisi ympäristön kautta sivuvaikutuksena, näyttää paljon ”älykkäämmältä” oppiessaan muutenkin kuin nälkiintymisen kautta, kun kaikki ei perustu pelkkään suoraviivaiseen resursseja kohti pyrkimiseen ja silmittömään kilpailuun. Mutta tällainen toimijoiden välinen koordinaatio todellakin edellyttää systeemiltä jonkin tasoista älykkyyttä: on nähtävä tilanne laajemmin, on huomioitava naapureiden toiminta ja erotettava se ympäristöstä, ja on nähtävä se alkuperäinen resurssi havaitsijavaikutuksen takana. Jonkinlainen ”sosiaalisuus” ja työnjako emergoituu nähtävästi puhtaasta itsekkyydestä, haluttaessa enformaatiota tehokkaammin omaan käyttöön. Talousjärjestelmiin liittyen voisi tässä todeta, että *jos* malli tunnetaan, ei

vapaa kilpailu siis ole välttämätön optimitilanteen löytämiseksi taloudessa ja yhteiskunnassa.

Vastaavasti, jotta saadaan optimaalisen regression kaava (3.4), estimointiosassa (kuvan 3.6 sivulla 74 alaosassa) täytyy symmetrisesti toteuttaa vastaavanlainen tilavektorin esikäsittely sisäisen takaisinkytkennän avulla, jolloin saadaan

$$\hat{u} = \mathcal{E}\{u\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\,\bar{x} = \Phi\,\bar{x}. \tag{3.16}$$

Molemmat kuvaukset (3.14) ja (3.16) ovat nyt *eksplisiittisiä*, ne eivät ole mitään sivuvaikutuksia vaan ne on toteutettu varta vasten mallipohjaisen säädön toteuttamista varten (signaalin $\bar{x}$ vakiointiin riittää yksi sisäinen takaisinkytkentäsilmukka).

Jos nyt säätösilmukka suljetaan ja kaikki nähty enformaatio imetään ympäristöstä, residuaalilla $\bar{u} = u - \hat{u}$ on patologiset ominaisuudet: $\bar{\lambda}_j = 0$ kaikille $1 \leq j \leq n$, jolloin systeemi on ”äärimmäisesti kytkeytynyt” (vertaa kuva 2.1 sivulla 34).

Esitetyn kaltaista rakennetta käytettäessä *kaikki* mallitettu enformaatio saadaan systeemin muuttujiin $\bar{x}_i$ ilman että sitä tarvitsee *lainkaan* kuluttaa rakenteissa (olettaen, että systeemin sisäinen takaisinkytkentäsilmukka on häviötön). Jos jokin alisysteemi tällaisen menettelyn keksii, sillä on jatkossa puolellaan merkittävä evolutiivinen etu — ja todennäköisesti tämä kehittynyt strategia tulee dominoimaan ja karakterisoimaan jatkossa koko systeemiä.

Jos jokin systeemi on onnistunut saamaan aikaan tällaisen laadullisen harppauksen kohti häviötöntä ympäristönsä mallitusta, *koko maailma muuttuu*. Sen sijaan että enformaatio hukkaantuisi häviöihin, mallittumatonta kohinaa lukuunottamatta kaikki enformaatio pakkaantuu systeemimuuttujiin (pääkomponenttianalyysin periaatteiden mukaisesti) — ja nyt muu maailma voi alkaa nähdä nämä enformaatiorikkaat muuttujat *uusina resurssilähteinä*. Näin voidaan ymmärtää *trofiatasojen* synty erilaissa ekosysteemeissä. Kun enformaatiota ei haaskaannu, se voi kulkea muodostuvassa järjestelmien ketjussa (hierarkiassa) pitkänkin matkan.

Voidaan olettaa, että kehitys pyrkii kohti esitetyn kaltaisia yhä erikoistuneempia alirakenteita, jotka nekin tyypillisesti perustuvat takaisinkyt-

kentään. Systeemien kokonaisuus monimutkaistuu jatkuvasti ja kaikin tavoin. Missä vain on nähtävissä hyödyntämätöntä enformaatiota, sinne vähitellen muodostuu uusia takaisinkytkeytyneitä säätösilmukoita. Kuvassa 1.4 sivulla 12 oli esimerkki siitä, kuinka ajan kuluminen jo sinällään johtaa eritasoisten systeemien syntyyn; mitä enemmän älykkyyttä järjestelmässä on, sitä luovempaa myös ”systeemisemioosi” voi olla. Lopputuloksena on *fraktaalinen säätäjien rakenne*.

Kaikkialla missä nähdään enformaatiovirtauksen patoutuneen, siellä on tarjolla potentiaalia uusille systeemeille. Ekosysteemin evoluution myötä enformaatiogradientit tasoittuvat; on kuin vesi murtaisi kahleensa. Mutta toisaalta, aivan kuin virtaavan veden tapauksessa, jokin riittävän älykäs toimija voi tarkoituksellisesti padota virtauksen, rakentaakseen voimalaitoksen ja hyödyntääkseen kaiken kertyneen enformaation muualla!

Kun maailmassa alkaa jo olla paljon rakennetta, ei datan normaalisuusolettamus enää päde, ja on perusteltua rakentaa erilaisiin periaatteisiin perustuvia sovelluskohteeseen räätälöityjä säätäjiä. Ainoa mikä edelleen säilyy, on jonkinlainen kierrätyksen periaate: tuntemattomassa maailmassa säätö on aina takaisinkytkettyä, eli kun malli ei ole täydellinen, joudutaan tarkkailemaan ohjaustoimenpiteiden vaikutusta. Säätöjen ”tilanteenmukainen” optimoituminen on tyypillistä fraktaalisen järjestelmän alimmilla tasoilla, sen jälkeen, kun neokyberneettiset periaatteet ovat selkiyttäneet maailman strukturoitumisen ”suuret linjat”.

Voimme ajatella myös lisäävämme esitetyn kaltaisen ”yksinapaisen” signaalien muokkausmodulin kappaleessa 3.4 esitettyjen verkoston rakennuspalikoiden joukkoon. Oletetaan, että sisäisen kierrätyksen lopputulosta (kun $Q_y \to \infty$) kuvaa lauseke

$$\bar{y} = \mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}^{-1} y, \tag{3.17}$$

jossa muiden kyseiseen solmupisteeseen saapuvien signaalien summa on y. Lasketaan tämän jäljelle jäävän signaalin enformaatio, ja sijoitetaan implisiittisessä lausekkeessa kaikkien sisäisten $\bar{y}$-signaalien tilalle (3.17) yhä uudelleen ja uudelleen:

$$
\begin{aligned}
&\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\} \\
&\quad = \mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathcal{E}\{yy^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}^{-1} \\
&\quad = \left(\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathcal{E}\{yy^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\right)^{-1} \\
&\qquad \cdot\ \mathcal{E}\{yy^{\mathrm{T}}\}\left(\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathcal{E}\{yy^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\right)^{-1} \qquad (3.18) \\
&\quad = \mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{yy^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\} \\
&\qquad \cdot\ \mathcal{E}\{yy^{\mathrm{T}}\}\ \mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{yy^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\} \\
&\quad = \cdots .
\end{aligned}
$$

Jatkettaessa tätä kehittelyä, huomataan jossakin vaiheessa, että peräkkäisten sijoitusvaiheiden jälkeen matriisiesitykset ovat toistensa käänteismatriiseja; jos siis löytyy stationaaritila, on oltava voimassa

$$\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\} = \mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\}^{-1}. \qquad (3.19)$$

Tämä on kovarianssimatriisille mahdollista vain, jos $\mathcal{E}\{\bar{y}\bar{y}^{\mathrm{T}}\} = I$, eli esitetyn kaltainen toiminnallisuus pakottaa datan kyseisessä pisteessä *valkaistumaan*. Yksi ainoa valkaisumoduli riittää tämän toteuttamiseen, riippumatta summautuvien signaalien määrästä. Niin, ja koska pääkomponenttianalyysi epälineaarisuuden läpi viedylle valkaistulle datalle tyypillisesti johtaa *riippumattomien komponenttien analyysiin* (ICA), voidaan todeta näinkin yksinkertaisen modulin tuovan verkostoon uutta toiminnallisuutta.

3.7 Maxwellin demonit

Edellä esitetyn perusteella voidaan tehdä olettamus, että *kaikkea aktiivisuutta maailmassa hallitsee enformaation mallitus ja näiden mallien käyttö enformaation virtauksen säätöön*. Mutta miksi olisi näin; mikä on alla oleva yleisempi periaate?

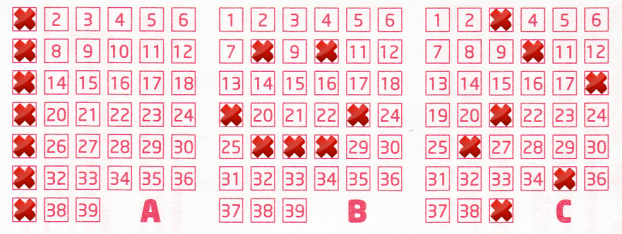
Ajatus *entropian ikuisesta lisääntymisestä* on ehkä kaikkein universaalein periaate fysiikassa. Yksinkertaistaen kyse on siitä, että järjestelmät pyrkivät kohti *todennäköisintä tilaansa*; usein puhutaan myös *epäjärjestyksen kasvusta* — mutta löysät rinnastukset saattavat olla syntynä ongelmiin, dramaattisiinkin virhetulkintoihin jotka kahlitsevat kaikkea ajattelua, kuten seuraavassa nähdään.

Entropiaperiaatteen yleispätevyydestä huolimatta, jostakin syystä järjestys näyttää luonnonjärjestelmissä *kasvavan*. Evoluutiossa syntyy yhä uusia muotoja jotka selvästi ovat ristiriidassa minkäänlaisen ”periksiantamisen” kanssa. Onkin tyydytty ajattelemaan, ettei järjestyksen lisääntyminen ole *mahdotonta*, ovathan luonnonjärjestelmät *avoimia systeemejä*; järjestys voi lisääntyä paikallisesti kunhan entropia ”laajemmin ajatellen” kasvaa. Jää kuitenkin jotenkin kiusaantunut olo: miksi luonto ei ole johdonmukainen, miksi tarvitaan useita erilaisia ajattelun suuntaviivoja? Ollaanko nyt rakentamassa mahdollisimman yksinkertaista mallia? Seurauksena on jonkinlainen ”nykymaailman dualismi”, jako erikseen kuolleen luonnon ja elävän luonnon ilmiöihin. Tilanne on melkein kuin keskiajalla, kun oli erikseen *kuunaliset* ja *kuunyliset* tapahtumat: maan pinnalla asiat olivat ihmisten ymmärrettävissä, kun taas taivaan ilmiöt, fyysiset ja hengelliset, ne olivat enkelien tekosia.

Kun virhetulkinnat oiotaan, osoittautuu, että neokyberneettisessä kehyksessä *entropia käy selittäväksi periaatteeksi kaikille luonnonilmiöille*.

Asioiden ymmärtäminen lähtee siitä oivalluksesta, että järjestyneisyys ja epätodennäköisyys eivät ole rinnasteisia asioita. Todennäköisyyden käsite on mielekäs *alatasolla*, elementaaristen hiukkasten tasolla; sen sijaan epäjärjestys on mielekäs käsite vain emergentillä ylätasolla, globaalin hahmon kuvauksena, vasta kun on määritelty jokin järjestyksen mitta. Ja entropia on mielekäs käsite vasta tällä emergentillä tasolla. Lisää sekavuutta aiheuttaa *informaatioteoreettinen* ”alatason” entropiamääritelmä (*Shannonin entropia*). Tällöin entropia onkin *epävarmuutta*; mutta eikö suuren epävarmuuden pitäisi tarkoittaa pientä todennäköisyyttä eli *pientä* entropiaa? Informaatioteorian sisäiseen valuvirheeseen (kohinassa on yhtä aikaa paljon ja vähän informaatiota) palataan vielä luvussa 5.

Epätodennäköisyyden ja järjestyksen käsitteiden eron ymmärtämiseksi katso kuvaa 3.7 seuraavalla sivulla: minkä järjestyksen arvontapallot mieluimmin valitsevat, siis minkä lottorivin voittotodennäköisyys on suurin? No, tässä tapauksessa asiaa ei vaikeuta mikään tilojen välinen diffuusio tai vastaava reaalimaailman intuitio, niin kuin kaasusäiliön tapauksessa (mikä esimerkki yleensä entropiasta puhuttaessa esitetään). Tiedämme nyt, että voittotodennäköisyys kaikilla yksittäisillä rastikonfiguraatioilla on sama,

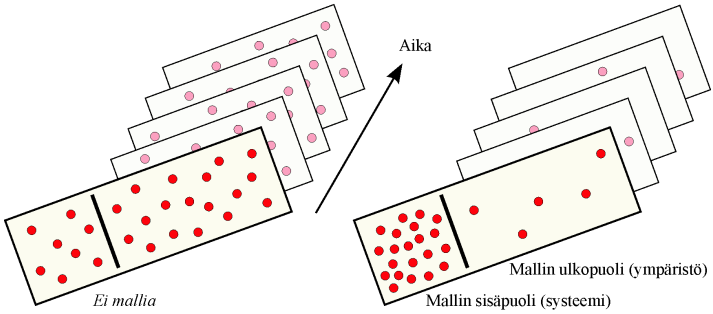


Kuva 3.7: Mikä lottorivi on todennäköisin?

rastit voivat yhtä hyvin olla hajallaan tai näennäisesti kasaantuneina. Silti kahdessa ensimmäisessä ruudukossa on selvästi enemmän ”järjestystä”.

Mutta selvää se järjestyksen olemassaolo on vain ihmiselle. Luonnolle minkäänlaiset visuaaliset hahmot eivät lähtökohtaisesti merkitse mitään, toisin kuin ihmisen adaptoituneelle hahmotuskoneistolle (tai ihmisen kehittämille kuvanpakkausohjelmille). Järjestynyt kuvio sovittuu valmiisiin mentaalimalleihin hyvin, koska valmiita *mieltämisyksiköitä* tai intuitiivisia käsitekategorioita voi tehokkaasti hyödyntää, ja tarvitaan vain vähän lisäinformaatiota kuvion esittämiseen. Ihmisen tulkitsemana suuri osa informaatiosta on pään sisällä ja tyypillisesti vain pieni osa on kuvassa itsessään.

Yleisemminkin, ei-visuaalisissa ympäristöissä, samoin voi käydä enformaatiolle: sitä voidaan jakaa erillisiin ”säiliöihin”. Jos tieto enformaation jakaumasta kyetään kokoamaan johonkin malliin, tätä vastaava enformaatio voidaan erottaa ympäristöstään. Ja juuri tällaista enformaation jakamista neokyberneettinen systeemi tekee: korreloiva variaatio (”arvokas” enformaatio) kuvataan mallissa, ja vain korreloimaton variaatio (kohina jolle mallia ei vielä ole löydetty) jää ympäristöön. Tätä visualisoidaan kuvassa 3.8 viereisellä sivulla: ”enformaatioyksiköt” pakkautuvat mallin kautta systeemiin, ja koska mallit tyypillisesti rakennetaan aika-akselin yli, sama malli esittää enformaatiota yhtä tehokkaasti jokaisella ajanhetkellä. Kun malli säilyy vakiokokoisena, eli koska toistuvaa enformaatiota ei tarvitse esittää useampaan kertaan, se on koko aika-akselin enformaatiomäärän rinnalla ”nollamittainen”.



KUVA 3.8: Kohti lämpökuolemaa — miksi entropia kasvaa

Adaptoitunut, evoluutiossa optimoitunut neokyberneettinen säätäjä imee ympäristöstään enformaation mahdollisimman tehokkaasti. Ympäristön kannalta kyse on näivettymisestä: variaatio on ajettu kohti nollaa eli ”todennäköisintä” tilaa. Jos variaatio eliminoituu täysin, on saavutettu ympäristön ”termodynaaminen” *lämpökuolema*. Tämä voidaan katsoa *entropian maksimitilaksi*, jossa *vapaata enformaatiota* ei enää ole lainkaan.

Välttääksemme ristiriidat on välttämätöntä tehdä ajattelussa laadullinen harppaus emergenttien tasojen välillä: abstrahointi ei ole pelkkä tekninen tarkoituksenmukaisuuskysymys, entropiaa on mielekästä tarkastella vasta ”enformaatiovarastojen” tasolla. Systeemin entropiantuotannollinen tehokkuus on ilmeisesti suurimmillaan kun sen ”systeeminen kompleksisuus” on suurimmillaan. Näin ollen *entropiaperiaate tukee johdonmukaisesti järjestelmien monimutkaistumista*.

Maxwellin demoni on ajatuskoe, jolla havainnollistetaan entropian käsitteen haastavuutta.

> Ajatellaan, että kaasusäiliö on jaettu kahteen osaan seinämällä, jossa on luukku. Luukun vierellä istuu demoni, joka päästää kaikki nopeat kaasumolekyylit vasemmasta säiliön puoliskosta oikeaan puoliskoon, ja hitaat molekyylit toiseen suuntaan. Vähitellen kaasumolekyylien jakauma oikeanpuoleises-

> sa osassa tulee nopeammaksi, ja vasemmanpuoleisessa osassa se tulee hitaammaksi. Näin ollen säiliön osien välille syntyy lämpötilaero, jota voidaan käyttää vaikka lämpövoimakoneen pyörittämiseen. — Ikiliikkuja on keksitty!?

Tämä paradoksi iskee suoraan termodynamiikan ja koko tieteellisen maailmankuvan ytimeen, ja sen ratkaisemiseksi on kehitetty useita selitysyrityksiä, enemmän tai vähemmän vakuuttavia.

Maxwellin demoni kummittelee edelleen. Nykyisin suosituimmat selitysyritykset perustuvat siihen, että mukaan sekoitetaan *informaatioentropia*: esimerkiksi amerikanpuolalainen *Wojciech Zurek* väittää, että ottamalla huomioon demonin ja sen muistin määrittelyn Kolmogorov-kompleksisuus ja tämän kuvauksen Shannonin entropia demonin kirjatessa molekyylien nopeuksia, termodynamiikan toista lakia ei jouduttaisi rikkomaan. Ikävä vain, että ei ole mitään tapaa rinnastaa fysikaalisen tason ja informaation tason entropiakäsitteet; niin kauan kuin jonkinlaista verrannollisuuskerrointa näiden välillä ei ole, tämäkin ratkaisuyritys jää teorian tasolle. Mutta perustavanlaatuinen ongelma tässäkin lähestymistavassa on se, että Zurek yrittää koodata kaiken informaation; jos hän tyytyisi pelkän *mallin* koodaamiseen, hän olisi lähempänä ratkaisua (demoniparadoksin ratkeamattomuutta) — kuten edellä kerrottiin!

Ehkä uskottavin selitys Maxwellin demonille on, että emergenssin tasoja ei vain pidä sotkea toisiinsa: emme voi toteuttaa demonia ”ylhäältä päin”, ei ole koskaan käytettävissä riittävästi demoneita tekemään yksittäisten hiukkasten ohjailusta systeemin kannalta relevanttia. Mutta entä jos demonit ovat mukana jo synnyistä lähtien, kaikkeen vuorovaikutukseen elimellisesti kytkettynä?

Maxwellin demoni on mahdollinen — jossakin mielessä *kyberneettinen systeemi on sellainen*. Se pumppaa enformaatiota omaan säiliöönsä, malliin, jolloin muodostuu ”enformaatiopotentiaalien” ero, jota voidaan todellakin käyttää hyväksi työn tekemiseen. Esimerkiksi kun syömme eloperäistä ravintoa, mistä muusta on kysymys kuin kasaantuneiden enformaatiovarastojen hyväksikäytöstä!

3.8 Kohti ympäristön hallintaa

Järjestelmien tulkinta muuttuu oivallettaessa niiden säätöluonne. Teknisissäkin kohteissa säätö antaa tyypillisesti *älykkyyden vaikutelman* reagoidessaan tarkoituksenmukaisesti ympäristön muutoksiin — ja sama koskee neokyberneettisiä säätöjärjestelmiä. Kun tällaista ”elementaarista älykkyyttä”, tai jonkinlaista fraktaalista itsesuojelukykyä, kasaantuu niin ettei yksityiskohtia enää erota, laadulliset muutokset tulkinnoissa tulevat ajankohtaisiksi.

Järjestelmiä tarkasteltaessa *näkökulma muuttuu päinvastaiseksi*. Aiemmin systeemi oli *kohteena*, ympäristön armoilla; nyt se onkin *ympäristö* joka muuttuu toiminnan kohteeksi, systeemin ollessa näennäisesti se aktiivinen *toimija*, ohjaaja ja säätäjä. Eikä perustelu näkökulman vaihtamiseen ole pelkästään intuitiivinen: vasta kun systeemi kasaantuvine enformaatioineen siirretään sisäpuolelta ulkopuolelle, luupin alle jäävässä tarkastelukohteessa (säädetyssä ympäristössä) tapahtuu johdonmukaista, maksimaalista entropian kasvua. Myös systeemin mielekkäät rajat emergoituvat tässä vaiheessa.

Voidaan ajatella, että universumissa tehdään (virtuaalisesti) *Möbius-kuvauksen* tapainen *inversio*: kaikkein laajin tulee ytimeksi kaikkeen, kaikkein avoimin tulee kaikkein suljetuimmaksi. Näin ollen universumin kohina jää ikuiseksi variaation lähteeksi kaikkien systeemien ytimeen. Ja tällainen ”universumin kääntäminen” tapahtuu toimijan omassa subjektiivisessa maailmassa, sen oman semioosin ehdoilla, enformaation määritelmän mukaisesti: mitä pienempi systeemin näkemä maailma ja mitä kapeampi sen maailmanymmärrys on, sitä enemmän asioita jää ytimeen erittelemättömäksi ”kosmoksen kohinaksi”, muuttumatta koskaan enformaatioksi. Luvussa 7 tarkastellaan seurauksia siitä, että hyväksytään sisäisen maailman dominoivan ulkoista maailmaa.

Termodynamiikassa perustavanlaatuiseksi tulkittu entropia ei voi olla absoluuttinen mitta vaan se on verrannollinen malliin: *entropian määrä on havaitsijariippuvainen*. Subjektiivisuus on hyväksyttävä olennaiseksi fyysisen maailman rakentumisen periaatteeksi, ja (toistaiseksi) vain enformaatioteorian kehyksessä fraktaalisten mallittajien entropianäkemyksien

eroja voidaan ymmärtää. Mallit ja säätö ovat olennainen osa kaikkia systeemejä.

Systeemi säätäjänä pyrkii vaikuttamaan ympäristöönsä. Mitä enemmän älykkyyttä järjestelmässä on, sitä tietoisemmalta kaikki näyttää: resursseja ruvetaan valikoimaan. Valittavat funktiot kasvattavat enformaation virtausta vain tämän ylimmän tason systeemissä, vasta säätösilmukoiden täydellistyessä; alatasolla ”suurta suunnitelmaa” ei kyetä hahmottamaan. Ihminen on tällaisten säätöjen toteuttajana tietenkin omaa luokkaansa; ja sama älykkyys periytyy ihmisen rakentamiin ”allokyberneettisiin” järjestelmiin, joissa ihminen on pelkän ”signaalinkantajan” roolissa ja toteuttaa abstraktin systeemin funktiot (työntekijät yrityksissä, tutkijat tiedemaailmassa, jne.).

Ympäristön tulkintaa alkaa leimata *pragmatistinen semantiikka*: muiden systeemien merkityksen määrää niiden funktio ja toiminta. Asioiden arvo kiteytyy niiden *käyttöarvoon* (katso kuitenkin myös luku 7).

Ja lisää realiteetteja: pohjimmiltaan ihmisenkin kaikkea toimintaa ohjaavana pakotteena on entropiaperiaate. Kannattaa kuitenkin muistaa, ettei tämä suinkaan tarkoita resurssien lyhytnäköistä ulosmittausta; päinvastoin, niin kauan kuin luonnossa (tai avaruudessa!) on hyödyntämättömiä resursseja (ja tuntemattomia ilmiöitä), niin kauan käytössä olevia resursseja pitää säästää, jotta ne kaikkein ylimmän tason säädöt voitaisiin joskus toteuttaa!

Säätö siis tapahtuu toimijan *subjektiivisessa maailmassa*, sen omiin malleihin perustuen. Tätä kannattaa miettiä hetki. Objektiivisen maailman ei nimittäin tarvitse säädössä lainkaan muuttua, kunhan näkökulma muuttuu; esimerkiksi kun eläin siirtyy, sen ympäristö vaihtuu (toivottavasti suotuisammaksi), jolloin sen resurssitasot ovat tulleet ”säädetyiksi” ja entropia maksimoiduksi.

Mielen maailmassa ”lupa” systeemien kääntämiseen on ehkä kaikkein paras uutinen, periaatteellisesti arvaamattomankin merkityksellinen: avoin, rajoittamaton, ulkopuolinen, määritelmällisesti tavoittamaton tuleekin mielensisäiseksi. Puhutaan *kognitiivisista sulkeumista*: tämän teesin mukaan ihminen on muiden eläinlajien tavoin biologisesti rajoitteinen sen suhteen, mitä maailmasta voidaan ymmärtää. Niin, mielen ja maa-

ilman rajoja ei ehkä voida siirtää; mutta voidaan *hypätä rajojen toiselle puolelle*. Kaikki on kiinni vain (systeemi)semioosista: jos kykenemme hahmottamaan ongelman, se on jo osittain mallitettu. Kuten tiedetään, hyvät kysymykset ovat ensiarvoisen tärkeitä, ensisijaisempia kuin vastaukset: ne tekevät sen suurimman työn strukturoidessaan maailmaa. Tällaista ”aidan taakse menemistä” sovelletaan luvussa 7. Edelleen voidaan epäillä, että kaikilla systeemeillä, myöskin *tiedemaailmalla* on omat sulkeumansa, joista ”meta-ajattelulla” voidaan vapautua (tästä lisää luvussa 6).

Aiemmin systeemit olivat kuin *vesimyllyjä enformaatiovirrassa* — nyt ne ovatkin muuttuneet *enformaatiopumpuiksi*. Kun Herakleitoksella kaiken aikaansaava *Logos* eli maailmanjärki oli *tuli*, nyt systeemien toimintaperiaate on pikemminkin sama kuin *palosammuttimella*. Kokonaistavoitteena on *tulen sammuttaminen hajautetuilla systeemisillä palopumpuilla*!

Konkretisoidaan haasteita ajattelua käännettäessä tarkastelemalla lyhyesti *Kari Enqvistin* kirjaa *Monimutkaisuus* (WSOY 2007), jossa oletettavasti on tämän hetken paras tieteellinen ymmärrys liittyen monimutkaisiin järjestelmiin. Kärjistäen Enqvist kiteyttää, että kompleksisuutta hallitsee kolme E:tä — *energia*, *entropia* ja *emergenssi*. Perusajatukset näihin liittyen ovat seuraavat:

- *Energia minimoituu*, systeemit pyrkivät perustilaansa, minimoimaan oman energiansa. — Kuitenkin kyseessä voi olla illuusio: jos kaikki toimijat maksimoivat oman enformaationsa, ulkoapäin tämä näyttää ympäristömuuttujien minimoinnilta (katso kappale 5.2).

- *Entropia tuhoaa*, pyrkien hajottamaan kaikki rakenteet. — Mutta kuten edellisessä kappaleessa todettiin, oikeasta näkökulmasta katsottuna entropia voidaan päinvastoin nähdä monimutkaistuvien säätöjen ja rakenteiden perusteluna.

- *Emergenssi on illuusio*, johtuen yksityiskohtien unohtamisesta; kaiken voi hallita reduktionistisesti ”monimutkaisten hamiltoniaanien avulla”. — Enformaatioteoriassa emergenssi on kuitenkin maail-

> man rakenteistamisen avainkäsite. Taas, kuten edellisessä kappaleessa todettiin, monimutkaisuuden ongelmaa ei ole mielekästä lähestyä ”yksitasoisesti”, vaan vasta enformaation virtausten ja varastojen tasolla.

Neokybernetiikassa ei tarvita tällaista ”pyhää kolminaisuutta”. Kolmen E:n sijaan nyt tarvitaan vain se yksi $\mathcal{E}$ eli emergenssioperaattori, ja sen määrittelemä enformaatio: *kaikki muu on palautettavissa ajatukseen enformaation maksimoinnista.*

Luku 4

*E*lämä.

> *Taivaan kirjokansi pyörii* maailmanpuun *eli* elämänpuun *varassa. Tämä suuri tammi peittää kuun ja auringon; se täytyy kaataa jotta hajautettu elämä tulee maan päällä mahdolliseksi. — Tämä koskee myös henkistä maailmaa, missä kaikkea pyörittävät keskitetyt maailman navat; uuden elämän synty edellyttää näiden kaatamista.*

4.1 Määrittelyn haasteet

Aiemmin on moneen otteeseen puhuttu *elämänvoimasta*, ja siihen on perustelunsa: *elämä* kantaa sisässään sellaisia assosiaatioita, jotka ovat jollakin tapaa *oikeita* mutta joita ei pysty sanoiksi pukemaan (siis rajoitteilla sitomaan). *Elämä on avain monimutkaisten systeemien olemuksen ymmärtämiseen*.

Ikävä kyllä nykytiede tuntuu olevan elämän arvoituksen edessä varsin aseeton. Eläin voidaan kyllä perinteiseen tyyliin laittaa vitriiniin, mutta silloin näytteillä on vain kuori, josta elämä on jo karannut. Elämä on enemmänkin prosessi kuin kiinteä hahmo; se ei ole sidottu yksilöön vaan se on *systeeminen jatkumo yli ajan ja yksilöiden*. Silti tiede osaa ainoastaan kuvailla niitä pintahahmoja, tuntemillemme hiilipohjaisille elämänmuo-

doille yhteisiä ominaisuuksia. Muutamia tällaisia tarkempaa pohdintaa edellyttäviä elämää kuvaavia ominaisuuksia ovat seuraavat:

- *Homeostaasi*. Vaikka dynaamisen tasapainon ajatus on oikea, elävän yksikön olemusta luonnehtii enemmänkin *poikkeamien luonne* kuin niiden puuttuminen (katso luku 5).

- *Itsenäisyys*. Kuitenkin, kuten kappaleen 1.8 jänisesimerkissä todettiin, elävät oliot ovat osa suurempia systeemejä, ja elävä kokonaisuus on ennemminkin *fraktaalinen*.

- *Metabolia*. Joskus on määritelty, että mitä suurempi kulutus, sitä ”elävämpi” rakenne on; kaikki tämä on kuitenkin vain hukkatehoa (katso luku 2).

- *Lisääntyminen*. Reproduktio on kuitenkin *toissijainen* elämän ominaisuus jota tarvitaan yksilöiden *regeneroitumiseen* (luku 5).

- *Geneettinen koodi*. Toiminnan kuvaus ei kuitenkaan ole elämän ydin vaan avainongelmana on *saada käyntiin* se toiminta eli funktio (kuten selitetään kohdassa 4.7).

- *Moduulirakenne*. Vain se ”kuori” koostuu soluista, kun taas elämä itse … niin, se koostuu *toisenlaisista* soluista (katso kappale 4.2).

Jos rajoitutaan vain olemassa oleviin esimerkkeihin ”elävästä elämästä”, ei päästä yleisiin periaatteisiin; *universaali elämä* on saavutettavissa vain lähdettäessä liikkeelle taas alhaalta päin, *elämänvoiman virtauksesta*. Sen sijaan että *Jacques Monodin* tapaan tarkasteltaisiin ilmiöitä ulkopuolelta, lähdetään liikkeelle *Pierre Teilhard de Chardinin* tyyliin ja ”sielutetaan” aine jo rakenteen ja toiminnan perustasolta alkaen.

Vitalismin ajatus on intuitiivisesti niin käyttökelpoinen, että elämänvoima eri nimillä on ollut valtavirtaa kaikissa filosofioissa; esimerkiksi Japanissa (ja Kiinassa) *ki* on keskeinen *energiavirran* käsite; Pierre Teilhard de Chardin puhui *aineensisäisestä hengestä*; *Arthur Schopenhauer* puhui *elämänjanosta* tai *tahdosta*; *Henri Bergson* puhui *élan vitalista*. Sittemmin tiede ”kielsi” tämän käsitteen liian epämääräisenä ja tarpeettomana:

katsottiin, että mekanistiset selitykset riittävät hyödyllisten tulosten aikaansaamiseksi.

Elämää ei kuitenkaan voi ymmärtää ilman ymmärrystä elämän tarkoituksesta — ja enformaatioteorian kehyksessä se tarkoitus on *elämänvoiman virtauksen tehostaminen*, ja samalla *entropian tuotannon maksimointi*. Nyt kun loppujen lopuksi puhutaan vain hyvin määritellystä enformaatiosta, pahimmat ristiriidat ja liiallinen filosofointi voidaan ehkä välttää. Elävä kokonaisuus on enformaation virtauksen verkosto, ja elämän erilaiset ilmenemismuodot ovat tämän virtauksen hyödyntämiseen (entropian kasvattamiseen) erilaisissa olosuhteissa kehittyneitä rakenteita.

Viime aikoina tieteellisessä keskustelussa on väitelty siitä, mikä tuli elämän evoluutiossa ensin — aineenvaihdunta vai itsejäljentyminen. Enformaatioteorian puitteissa on mielekästä olettaa, luvun 3 mukaisesti, että ensin tuli *tarve*: kaikki muu, funktioiden edellyttämät rakenteet ja metaboliat löysivät muotonsa tämän enformaatiopumpun imussa rinta rinnan, samasta synnystä alkaen, funktionaalista ekolokeroaan täyttäen. Johdonmukainen ”imu” (dynaaminen attraktori) mahdollistaa mitättömästä kohinasta emergoituvat *perhosefektit*, näkymättömän (mikroskooppisen, dynaamisen) muuttumisen näkyväksi (makroskooppiseksi rakenteeksi).

Jos palataan vielä hetkeksi kuvaan 1.1 sivulla 2, voidaan elämänvoima-ajatuksen pohjalta paremmin ymmärtää miksi yhä uusia tuotteita tuodaan markkinoille: näin saadaan markkinan patoutumaa (niitä tarpeita) puretuksi ja imetyksi ympäristöstä enemmän elämänvoimaa — joka tässä ympäristössä tarkoittaa *rahaa*.

4.2 Monadit — elämän atomit

Osuvien mielleyhtymien arvoa ei pidä vähätellä: intuitiiviset käsitteet mahdollistavat mielen koneistojen tehokkaamman hyväksikäytön. Elämänvoiman määrittelemien rakenteiden hahmottamiseksi tarvitaan toimivat metaforat.

Antiikin luonnonfilosofien kehittämät mielikuvat ovat tarkoitukseen edelleen mitä sopivimpia. Herakleitos aikanaan vertasi alati muuttuvaa

(mutta jotenkin kuitenkin olemuksensa säilyttävää) maailmaa *jokeen*. Veden virtaus tarjoaa monia toimivia intuitioita enformaatiovuon kuvaamiseen: esimerkiksi virtauksen patoutuminen aiheuttaa potentiaalin kasautumista, painetta, joka pyrkii tavalla tai toisella purkautumaan. Uoman (ympäristön) yksityiskohdat aiheuttavat virtaukseen vääristymiä, jotka näyttäytyvät eritasoisina (fraktaalisina) *pyörteinä*. Tällaiset pyörteet osoittautuvat kaikkein onnistuneimmiksi *elämän rakenteen* vertauskuviksi.

Pyörre on toimiva vertauskuva dynaamiselle attraktorille, jollekin mikä pysyy koossa oman sisäisen relevanssinsa pakottamana; neokyberneettisessä kehyksessä nämä pyörteet ovat perusolemukseltaan yksittäisten järjestelmien määrittelemiä *hajautettuja säätösilmukoita*, ympäristön muokkaimia. Kun muistetaan säätösilmukoiden funktionaalinen rooli, pyörteitä voi luonnehtia myös termeillä *enformaatioimuri*, tai *enformaatiopumppu*. Voitaisiin sanoa, että se ainoa vapaa muuttuja $\bar{x}_i$ on pyörteen *pyörimisnopeus*, vektorin ϕ_i määritellessä kyseisen pyörteen *pyörimisakselin*.

Kun kohinassa (luku 1) alkaa erottua tällaisen pyörinnän aiheuttamia taajuuskomponentteja (luku 5), koordinoimaton värinä alkaa muuttua *sykkeeksi*.

Kaikki ylemmän tason elämän ilmenemismuodot eivät suoraan hahmotu säätiminä — mutta aina enformaatiopumpuissa on mukana jonkinlainen sykli ja takaisinkierrätys. Voidaan tietenkin kysyä, miksi pyörteenomainen kierrätysrakenne on niin luonteenomainen enformaation siirrolle. Syy tähän on se, että rakenteiden monimutkaistuessa Maxwellin demoni joutuu siirtämään enformaation ”ylämäkeen”, suoraviivaista entropian kasvusuuntaa vastaan; tätä varten tarvitaan jonkinlainen *saattaja*, *kantaja*, tai *katalyytti*. Jatkuva enformaation siirto edellyttää tällöin, että tämän saattajan paluu on saatu organisoiduksi alkutilaansa, takaisin sinne mistä se lähti; kyseinen palautusvirtaus muodostaa sen silmukan paluuhaaran. Tarvitaan *ainetta enformaation kantajaksi*; ja tämä pumppaus, aineen syklinen virtaus onkin se näkyvin elämän ilmenemismuoto. Hallitun kierrätyksen puuttuminen aiheuttaa sen, että esimerkiksi *Miller–Urey* -kokeiluissa (tai ”RNA-maailma”-hypoteeseissä) mitään kovin monimutkaista ei alkuliemestä koskaan kehity, kun rakenteet eivät itsestään lähde kipuamaan yhä

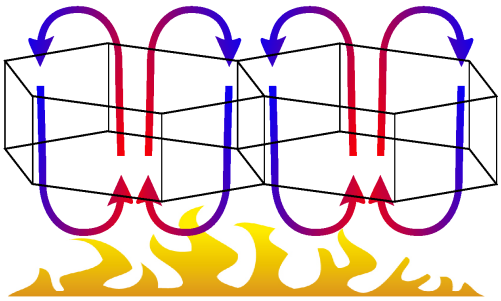
jyrkkenevää ”epätodennäköisyysgradienttia” vastaan.

Mutta käyttöön tarvitaan myös pyörrettä spesifimpi termi. Historiallisia syntyjä kunnioittaaksemme olkoon tällainen enformaatiovirran pyörre nyt nimeltään *monadi* — jolloin *elämä on fraktaalinen monadihierarkia*.

Monadi on *Gottfried Wilhelm Leibnizin* määrittelemä käsite kuvaamaan jonkinlaisia dynaamisia voiman keskittymiä, universumin aineettomia rakennuspalikoita, kokonaisuuden peilikuvia. Leibnizin perusajatus sopii meidän tapauksessamme hyvin sovellettavaksi, mutta erojakin on: enformaatioteoreettiset monadit eivät esimerkiksi ole ikuisia ja ilman keskinäistä vuorovaikutusta; päin vastoin, monadit emergoituvat ympäristön paineessa tilanteen mukaan.

Se keskeinen periaate, joka uudella ja vanhalla monadiajatuksella on yhteistä, on monadien *elementaarisuuden periaate*: niitä ei voi purkaa yksinkertaisempiin osiin. Ne ovat *elävän aineettomia atomeja*, niin että monadikuvaus on *duaalinen elottoman maailman atomikuvauksen kanssa*. Elävä olio on monadien fraktaalinen kudos, jossa kukin ”atomi” määrittelee oman funktionsa. Elävän järjestelmän tapauksessa atomit voivat olla hyvin eri kokoisia ja enemmän tai vähemmän toistensa kanssa sisäkkäisiä. Atomaarisuudelle on nyt luontainen perustelu: liian pitkälle menevä funktiorakenteen purkaminen lopulta katkaisee säätösilmukan, jolloin enformaatiopumppu pysähtyy ja monadi ”kuolee”.

Kannattaa kuitenkin huomata, että säätösilmukoiden synnyn ei tarvitse olla perimmiltään neokyberneettinen: esimerkiksi ihmisen toimiessa silmukoiden rakentajana säädöt eivät välttämättä ole enformaatioteorian mielessä optimaalisia. Jos säädöt kuitenkin kykenevät enformaation pumppaamiseen, paremman puutteessa ne puolustavat paikkaansa; vaihtoehtoisia tapoja enformaation talteenottoon on äärettömästi (niin kuin vaihtoehtoisia malleja maailmastakin on). Toinen huomionarvoinen seikka on se, että toisin kuin Leibnizilla, monadit eivät nyt ole henkimaailmaa: enformaatio on konkreettisesti mitattavissa (jos mittarit ovat oikeat). Keskinäiskorrelaatiot voivat sitoa näennäisesti erillisetkin ilmiöt samaan pyörteeseen. Näin ollen tätäkin aineetonta atomirakennetta voidaan tarkastella reduktionistisesti, datapohjaisesti.



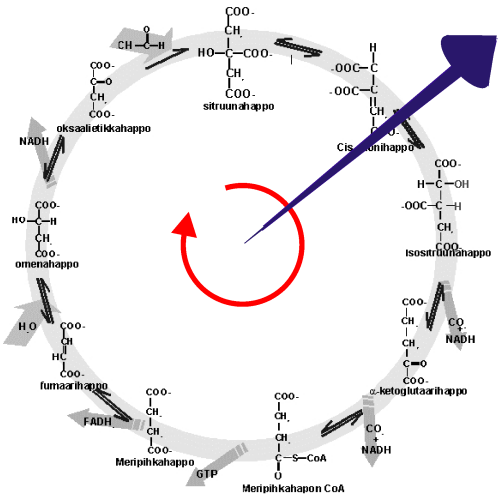
Kuva 4.1: Bénardin solut

Kuten aina, Leibniz jo aikanaan oli osa pitkää historiallista jatkumoa. Siinä vaiheessa, 1600-luvulla, kun ”oikeita” tieteellisen ajattelun suuntaviivoja ja kartesiolaisuuden tulkintaa ei vielä ollut jäädytetty, filosofi *Baruch Spinoza* ensimmäisenä ”käänsi ajattelun päinvastaiseksi” sisällyttämällä Luojan ja Luodun toisiinsa: Jumala oli hänelle luonnon ja maailmankaikkeuden mekanismi. Jo hän pyrki käyttämään matemaattisia formulointeja ajatustensa muotoilemisessa; mutta vielä Leibnizin *Monadologia*-kirjakin jää kovin epämääräiseksi ehkä lähinnä siksi, että heidän aikanaan matematiikka ei ollut riittävän edistynyttä ajatusten toteuttamiseksi ja muutosilmiöiden hallitsemiseksi. Ei ehkä olekaan sattumaa, että tällaisia asioita pohtiessaan Leibnizistä tuli *Isaac Newtonin* ohella toinen differentiaalilaskennan ”keksijöistä”.

4.3 Esimerkkejä elävästä

Katsotaan seuraavassa paria esimerkkiä eritasoisista enformaatiopumpuista, monadeista. Ensimmäinen esimerkki on *Bénardin solu* (katso kuva 4.1).

Kun nestekerrosta lämmitetään altapäin kevyesti, lämpö johtuu molekyylistä toiseen pintaa kohti; kun taas lämmitys on voimakasta, molekyylien liike muuttuu kaoottiseksi ja neste kiehuu. Näiden tilanteiden välissä on kuitenkin erikoinen kompleksisen käyttäytymisen alue, jolloin lämpö nousee pintaan järjestyneiden *konvektiosolujen* avulla. Tällaiset solut



Kuva 4.2: Sitruunahappokierto

muodostavat tyypillisesti heksagonaalisen ”hunajakennorakenteen”, jossa edestakaiset virtaukset ovat koordinoituneet ja lämmön kokonaisvirtaus maksimoituu.

Nämä Bénardin solut ovat mainio esimerkki siitä, kuinka molekyylien satunnaisliike voi ilman minkäänlaista ohjausta lokaalisti organisoitua globaalin enformaatiovirtauksen maksimoimiseksi. Mitään muuta rakennetta soluissa ei ole kuin dynaaminen attraktori, jonka kestävyys perustuu pelkkään liikkeeseen saatettujen vesimolekyylien hitauteen (inertiaan). Ikävä kyllä mitään hienosyisempää ”elämää” ei tällaisten puhtaasti dynamiikkaan pohjautuvien solujen päälle ilmeisesti voi rakentua; kun lämpövuo pysähtyy, kaikki rakenne katoaa.

Monimutkaisempi esimerkki monadista on näytetty kuvassa 4.2. Tämä *sitruunahappokierto* eli *Krebsin sykli* on solujen pääasiallinen tapa tuottaa energiaa. Se toteuttaa omaa funktiotaan hapettaessaan ravintoaineita ja pakatessaan niistä vapautuvan energian suurienergisiksi ATP-molekyyleiksi, selvästikin ”vastaan kaikkea todennäköisyyttä”; vasta osana solun kokonaisfunktiota (tai oikeammin osana koko eliön, tai koko ekosysteemin

säätöfunktiota) entropian maksimoituminen tulee ilmeiseksi. Jos kaikkia ”raaka-aineita” on riittämiin tarjolla, sykli pyörii nopeasti; yhdenkin avainkemikaalin puute sen sijaan hidastaa koko ketjua varsin *älykkään näköisesti*. Isoon kiertoon linkittyy monia muita reaktioketjuja, jotka kukin (elleivät ne ole täysin kytkeytyneitä isoon kiertoon, ja siis variaatiorakenteeltaan korreloituneita) voidaan nähdä omina monadirakenteinaan.

Kompleksisuustutkija *Stuart Kauffman* ehdottaa *autokatalyyttisiä joukkoja* (engl. *autocatalytic sets*) elävien järjestelmien perusrakenteiksi ja elämän synnyn selittäjiksi: jokin reaktioiden ketju tuottaa lähtöaineensa, eli tällaiset kokonaisuudet pystyvät *uusintamaan itsensä* (siis elämän perustavimmaksi ominaisuudeksi on oletettu itsejäljentyminen). Onkin osoitettu, että riittävän suuressa kemikaalijoukossa tällaisia syklisiä ketjuja löytyy miltei vääjäämättä — monadirakenteita tällaisetkin silmukat. Ongelma vain on, ettei tällainen alkuliemi kuitenkaan käytännössä tahdo ”lähteä elämään”. Ja loppujen lopuksi sama ongelma on kaikissa elämän alun teorioissa, joissa edellytetään systeemien lähtevän automaattisesti nousemaan ”epätodennäköisyyden vuorelle”. Ehkäpä puhtaisiin mekanismeihin on välttämätöntä kytkeä se *tekemisen tarkoitus*, sisäsyntyinen ”enformaatiosemantiikka”, ennen kuin pyörät lähtevät pyörimään!

Todellakin, omissa tutkimuksissaan professori *Arto Annila* on osoittanut, että *elämän synty ja kehitys voidaan johdonmukaisesti perustella yhä tehostuvien energiansiirtoprosessien puitteistuksessa.*

4.4 Systeemit maailman karttana

Optimoivassa maailmassa systeemien rakentuminen on loppujen lopuksi ympäristön enformaation hyödyntämistä varten tapahtuvaa mallitusta. Elävien järjestelmien kokonaisuus on siis *monadiatomeista rakentuva mallikuva fysikaalisesta maailmasta*. Mikä on tällaisten mallien yleinen luonne?

Ihminen mallittaessaan hakee *globaaleja optimeja*; tällöin päädytään usein tarkastelemaan ns. *NP-kovia* tai *NP-täydellisiä* (engl. *non-polynomial hard/complete*) ongelmia, joille ei laskettavuuden teorian puitteissa tunneta kelvollisia ratkaisuja. Laskenta-aika (ja tilantarve) tällaisia ongelmia

ratkaistaessa kasvaa nimittäin eksponentiaalisesti, jolloin monimutkaisten järjestelmien tapauksessa kaikki ongelman ratkaisemiseen käytettävissä olevat resurssit vääjäämättä ylitetään. Esimerkiksi *kauppamatkustajan ongelma* (engl. *travelling salesman problem*) on nykytiedon mukaan tässä mielessä ratkeamaton ongelma: kaikkein lyhintä reittiä kaupunkien verkostossa ei saada tehokkaasti selvitetyksi.

Jos verrataan ihmisen tekemiin malleihin, luonnon malleilla — elämällä — on käytössään varsin erilainen lähestymistapa. Periaatteessahan luonnolla on vastassaan sama ongelma sen hakiessa ratkaisuja: kaikkein parasta mallia ei yleensä löydetä (varsinkin kun luonnon ”ongelmanratkonta” on hajautettua ja koordinoimatonta). Mutta luontopa ei tulkitse tätä epäonnistumiseksi.

Millainen on hyvä malli? Voidaan väittää, että se yksittäinen globaali optimi ei kerrokaan todellisuudesta niin kovin paljoa (vertaa taas kuvaan 1.1 sivulla 2). On parempi, jos on olemassa suuri joukko *lähes optimaalisia*, siis ”varsin käypäisiä” vaihtoehtoja: niiden kokonaisuus kertoo kohdealueen luonteesta enemmän, jolloin suboptimaalisten ratkaisujen joukko on kuin kartta maailmasta. Suuri ratkaisujen määrä auttaa näkemään *maiseman* paremmin kuin jos maailmaa katsottaisiin vain sieltä syvimmästä kustannuskuopasta! Kuitenkaan ”et voi astua samaan virtaan kahdesti”; asioiden toistaminen tuottaisi erilaiset tulokset, eikä ratkaisuja pidäkään kuvitella yksikäsitteisiksi tai ikuisesti päteviksi.

Enformaatioteoreettinen malli on *esimerkkien kokoelma*. Nämä jopa tuhlailevat ”esimerkit” ovat monadiytimiä, enformaation vaihtoehtoisia purkautumisväyliä, kokoelma erilaisissa ympäristöolosuhteissa tarjolla olevia *vapausasteita* (katso seuraava luku). Näiden malliprototyyppien ylläpito perustuu itseorganisoitumiseen ja kilpailuoppimiseen.

Tällaista luonnon valitsemaa ”monimallilähestymistapaa”, mallien diversiteettiä, voidaan perustella myös *havaitsijavaikutuksen* näkökulmasta. Mallin kytkeminen todellisuuteen vääristää sitä todellisuutta; mitä useampia ”antureita” on käytössä, sitä herkempi kosketus ja vähäisempi kohteen häirintä voidaan saavuttaa.

Toisaalta luonnon rakentamat mallit kytkeytyessään muuttavat maailmaa pyrkien ortogonalisoimaan muodostuvat ekolokerot. Tämä saattaa

olla avain siihen, miksi luonnon rakentamat verkostot ovat robustimpia kuin ihmisen optimoimat verkostot. Esimerkiksi sähköverkot ovat alttiita *kaskadisille katastrofeille*, jolloin vikatilanne voi levitä hallitsemattomasti; sen sijaan luonnon ekosysteemeissä jonkin avainlajinkin katoaminen aiheuttaa vain hallitun häiriön. Variaatiotaso vain nousee koko järjestelmässä transienttivaiheen ajaksi, kunnes uusi adaptoituminen tapahtuu. Keskenään ortogonaaliset muuttujathan eivät pääse suuresti häiritsemään toisiaan!

Luonnon toiminta on toisaalta sillä tavalla varsin inhimillistä, että kun jokin ratkaisu (tai ”vapaus”; katso seuraava luku) on kerran keksitty, sitä käytetään jääräpäisesti yhä uudelleen eri kohteissa, jopa eri tasoilla. Tästä seuraa elävien järjestelmien *fraktaalisuus* eli *itsesimilaarisuus* (engl. *self-similarity*): esimerkiksi evoluution kehittämissä hierarkioissa toisiaan seuraavien ylemmän ja alemman tason ”laajuuksien” suhde säilyy suunnilleen vakiona. Fraktaalisuus heijastuu tilastollisissa jakaumissa *skaalariippumattomuutena* ja ns. *potenssilakina* (engl. *power law*): logaritmisella asteikolla ominaisuuksien jakauma on tasainen. Kiinnostava kysymys on, voidaanko päättely tehdä toisin päin: onko tutkimuskohteen fraktaalisuus merkki sen ”elävyydestä”? Esimerkiksi kun *luonnonvakioiden jakauma* osoittaa skaalariippumattomuutta (ns. *Benfordin lain* mukaisesti), onko taustalla jonkinlainen kosmoksen evoluutio (katso kappale 5.5)?

Usein ilmiöt eri tasoilla ovat kuitenkin niin erityyppisiä, että samojen ”syntyjen” fraktaalinen kertautuminen ei palaudu mihinkään kaavamuotoon; esimerkiksi samojen geenien vaikutukset heijastuvat eri fenotyypin tasoilla hyvin eri tavoin. Hahmojen similaarisuutta ei voi hahmottaa millään tilastotyökalulla. Mutta kuten ensimmäisessä luvussa todettiin, edes ihmisen hahmontunnistuskyky ei toimi hyvin dynaamisten hahmojen tapauksessa.

Elämän teoria ei palaudu suljettuun staattiseen muotoon (eli *rajoitteiksi*; tämäkin selitetään seuraavassa luvussa). Ja vielä varmemmin teoretisointeja pakenee kokonaisvaltainen ”hyvän elämän teoria” (katso luku 7). Tällaisten asioiden kohtaaminen on ensimmäinen askel kohti ”uudenlaista tiedettä” (katso kappale 6.7). Jotta voidaan kunnioittaa elämää, ei voida tukeutua formalismeihin, vaan asiat täytyy jättää suuressa määrin

intuitiivisiksi; voidaan vain toivoa, että ymmärtämisen kannalta välttämättömät mielen monadit ovat siinä vaiheessa jo käynnistyneet. Ymmärrys on sekin elävä kokonaisuus; millään tiedolla ei ole merkitystä ennen kuin se on ”elossa” osana toimivaa monadia. Erityishaasteen ymmärtämiselle asettaa elämän fraktaalisuus, ja jopa sen esiintyminen erilaisissa sfääreissä yhtä aikaa: elämän ymmärtäminen, tai ”elämän elämä” edellyttää monadin käynnistymistä nimittäin myös *mielessä*.

4.5 Tulkinnat mielen maailmassa

Edellä on tarkasteltu fyysistä maailmaa ja elämää siellä. Kuten Leibnizillakin, monadi-ajatus on kuitenkin yleispätevyydessään linkki aineellisen ja aineettoman välille. Laajennetaankin näkökulmaa fyysisestä maailmasta *mentaaliseen ympäristöön*, tai *henkiseen elämään*. Väite on, että myös kognitiokoneisto toimii pohjimmiltaan samoilla neokybernetiikan periaatteilla. Ja edelleen, voidaan väittää että *ontogeneesillä* ja *epistemogeneesillä* voi olla sama pohja; se mitä *on olemassa* ja se mitä siitä *tiedämme* — näitä asioita voidaan pohtia samassa teoriakehyksessä.

Taas kaikki emergoituu alhaalta, niistä synnyistä. Psykoanalyyttista näkemystä mukaillen mieli on kerroksellinen; mutta kuinka tällaiset kerrokset vuorovaikuttavat? Erityisesti, kuinka yksinkertaisten hermosolujen tasolta voidaan päästä korkeampien kognitiivisten toimintojen tasolle? Yritetään hahmotella tätä monimutkaisuuden kumuloitumista.

Hermosolujen (Hebbin neuronien) toimintaperiaate kiteytyy neokyberneettiseen malliin; koko mallihan oli alun perin johdettu keinotekoisten hermoverkkojen toiminnan kuvaamiseksi. Avainhuomio on, että tässäkin tapauksessa semantiikka periytyy ”alhaalta”, maailmasta, sen sijaan että se tulisi ylhäältä annettuna. Kaikki tärkeä on mittauksissa, ei ole piilotettuja merkityksiä tai pyrkimyksiä. Käytännössä on havaittu, että hermosolut taistelevat aktiivisuudesta; näin ollen aistimissa syntyvät signaalivariaatiot voidaan hermosolujen oman semioosin puitteissa nähdä enformaationa.

Mutta entä ne intuitiot, kuinka selittää *inhimillisen ymmärryksen synty* tässä kehyksessä? Ehkä jonkinlaista motivaatiota tarjoaa peruskaava

(1.15): siinähän kasaantunutta enformaatiota käytetään tulevien signaalien suodattamiseen (eikö se ole eräs *tietämyksen* määritelmä, että osataan käyttää *informaatiota* jotta voidaan prosessoida *dataa*?).

Liittyen neokyberneettisten mallien luonteeseen, on ilmeistä, että myös *mentaalikoneiston keskeisin tehtävä on säätö*: tavoitteena on (subjektiivisen, havaitun) ympäristön optimitilaan saattaminen. Ja koneistoa pyritään kehittämään edelleen mahdollisimman hyvän maailmanmallin aikaansaamiseksi — mahdollisimman tehokkaan maailmanmuokkaamisen mahdollistamiseksi. Alimmalla tasolla säätösilmukka perustuu reflekseihin: esimerkiksi kivun aistimus pienenee (säätyy kohti nollaa), kun käsi nykäistään pois tulesta. Vaistotoiminnot (”taistele tai pakene”) ovat kehittyneet poistamaan välittömästä ympäristöstä systeemiä uhkaavat häiriöt. Ylemmillä tasoilla säätö perustuu monimutkaisempaan ketjuun: kun maailman tilan mittaus suoritetaan ensin aistimin, maailman tuleva käyttäytyminen estimoidaan mallin avulla, jonka jälkeen suunnitellaan korjaavat toimenpiteet, ja vasta sitten ne toimeenpannaan lihaksin (tai kehittyneempiä toimilaitteita käyttäen). Kehittyneempi mentaalisäätäjä tarjoaa evolutiivisen edun: ennakointikyky mahdollistaa reagoinnin ajoissa, jo hitaiden ilmiöiden syntyvaiheessa.

Oppimisprosessi neokyberneettisessä mallissa on *konstruktivismia* puhtaimmillaan: kaikki uudet rakenteet perustuvat vanhoihin, ja kaikki suodatetaan vanhojen mallien kautta. Oppimisen suuntautuminen kaavassa (1.15) voidaan tulkita *motivoitumisena*: kun jotakin on onnistunut tekemään menestyksekkäästi, tällaisen aktiviteetin suunnassa haluaa jatkaa yhä pidemmälle. Turhautuminen sen sijaan johtaa suuntautumiseen muita resursseja kohti.

Aistisignaalien jalostus tietoisiksi havainnoiksi koostuu useasta portaasta: alimmat tasot perustuvat alisymbolisiin *mieltämisyksiköihin* (engl. *chunks*), ja vasta signaalien ”tiivistyttyä” havainnot tulevat tietoisiksi. Kaiken mentaalisysteemiin sisään tulevan herätteen ei tarvitse olla pelkkiä nimettömiä signaaliarvoja: jos esimerkiksi elimistön kemikaalitasot on ”mitattu” ja ne korreloivat muiden havaittujen signaalien kanssa, ne voivat tulla sisällytetyiksi malleihin. Ehkä *tunteet* ovat alatason malleja, joihin on assosioitunut esimerkiksi tieto *hormonitasoista*; ehkä tunteissa sen vuoksi

on niin voimakas ”elämän maku”? Ja ehkäpä psykoanalyyttinen hypoteesi osuu oikeaan kerroksellisuudessaan: sen mukaanhan vanhimmat (alimmat) tiedostamattomat kerrokset toimivat eräänlaisina ”energiageneraattoreina” ylemmille tajunnan tasoille.

Useiden aistinelimien on havaittu toimivan *logaritmisesti*, eli niiden suhteellinen herkkyys heikkenee intensiteetin kasvaessa. Jos ajatellaankin, että kaikki järjestelmän signaalit ovat joidenkin *todennäköisyyksien logaritmeja*, voidaan nähdä monikerroksisten hermoverkkojen tuoma laadullinen parannus hahmontunnistuskykyyn: koska logaritmin ottaminen muuttaa tulot yhteenlaskuiksi, voidaan nähdä järjestelmän tekemät lineaarioperaatiot JA-operaatioina. Jos lisäksi peräkkäisillä tasoilla valitaan harvakoodauksen mielessä vaihtoehtoisia muuttujien osajoukkoja tilanteen mukaan, suoritetaan eräänlainen TAI-operaatio; kokonaisuus voidaan siis nähdä jonkinlaisena *JA/TAI-graafina*, jonka avulla järjestelmän luokituskyky voidaan saada mielivaltaisen tarkaksi.

Neokyberneettisen mallin puitteissa korkeamman tason *käsitteet* tai *kategoriat* ovat nyt niitä ”idea-avaruuden” stabiileja dynaamisia attraktoreja, monadeja, jollakin tavoin relevantteja tasapainoja muiden käsitteiden määrittelemässä ”painekentässä”. Esimerkiksi nominikäsitettä määrittävät siihen liittyvät attribuutit ja teonsanat, antaen sille ”maun”. Nämä käsitteiden keskinäiset jännitteet ja niiden vuorovaikutukset tasapainotilassa voidaan ehkä parhaiten ymmärtää *sumeiden* (*osa*)*joukkojen* (engl. *fuzzy* (*sub*)*sets*) mielessä: kategoriat eivät ole perinteisessä mielessä esimerkiksi toistensa osajoukkoja, vaan ne perivät toistensa ominaisuuksia kumpaankin suuntaan. Jos esimerkiksi tiedetään, että *dodo* oli lintu, mutta siitä ei tiedetä mitään muuta, tämä dodo perii oletusarvoiset ominaisuutensa ylemmästä lintu-kategoriasta; jos sitten lisäksi tiedetään, että dodo oli lentokyvytön, tämä yksittäinen esimerkki muokkaa hiukan mielikuvaa linnuista ylipäänsä. Tämä kaikki sopii hyvin yhteen modernin *prototyyppiteorian* kanssa. Verrattaessa esimerkiksi *olio-orientoituneisiin ohjelmointikieliin* (ja tietokoneparadigman vääristämään ajatteluun ylipäänsä!), erona nyt on esimerkiksi se, ettei ole erikseen *luokkia* ja *objekteja*, vaan kaikilla käsitteillä on samanlainen monadiluonne.[4]

[4] Kärjistäen voisi huomauttaa, että tietokone on tehnyt *suurta vahinkoa* mielen toi-

Tuntuu ehkä oudolta ajatella, että pääkomponenttianalyysiin perustuvat rakenteeltaan varsin yksinkertaiset neokyberneettiset rakenteet voisivat mitenkään toimia esimerkiksi monimutkaisten diskreettiarvoisten käsitteiden mallina. Kuitenkin viimeaikaiset aivokuvantamisen tulokset viittaavat siihen, että ”käsiteavaruus” voidaan varsin hyvin esittää lineaaristen ”koordinaattien” avulla — jopa niin, että nämä koordinaatit (ja siis myös käsitteiden väliset ”etäisyydet”) ovat melko samat eri ihmisilläkin. Ehkä tällainen käsitteiden välille emergoituva luontainen metriikka on syynä siihen, että erilaisilla sovellusalueilla *faktorianalyysin* kaltaiset lineaariset mallitusmenetelmät ovat osoittautuneet hyvin toimiviksi.

”Asiantuntijuus” on neokyberneettisessä tapauksessa jonkin kohdealueen kuvaava reaalimaailman kanssa tasapainossa oleva käsiteverkosto; ”päättely” on hahmonsovitusta, havainnon kuvaamista kohdealueorientoituneiden piirteiden avulla. Asiantuntijuudesta on puhetta toisesta näkökulmasta vielä luvussa 5.

Eivätkä korkean tason idea-avaruuden mallit ole rajoittuneet yksittäisten aivojen sisään: mikäli ihmisten keskinäinen vuorovaikutus on riittävän intensiivistä ja informaation kulku esteetöntä, malleista voi tulla *intersubjektiivisia*. Voi muodostua *älykkäitä yhteisöjä* tai *systeemiälyä* hajautuneena yli koko ihmisyhteisön. Joukkopsykologiassa tai sosiologiassa lähtökohtana on *yksilöiden joukko* ja tästä joukko-ominaisuudesta aiheutuvat tilastolliset seuraukset; perinteisissä joukkoilmiöiden teorioissa oletetaan ilmiöiden vain *keskiarvoistuvan*. Tarvitaan emergenttien tasojen haltuunottoa, että päästään kiinni laadullisiin muutoksiin. Sosiaalisten ja ryhmäpsykologisten ilmiöiden tarkastelun ei neokyberneettisessä kehyksessä tarvitse olla pelkkää filosofointia.

Mutta filosofoinnillekin on edelleen paikkansa. Jos ajatellaan inhimillistä ”maailman haltuunottoa”, enemmän tai vähemmän tietoista mallien rakentamista, voidaan ehkä väittää, että ihmisen tekemät mallit eivät välttä-

---

minnan ymmärtämiselle; se on ollut ainoa esimerkki konkreettisesti toimivasta tietojenkäsittelylaitteistosta, ja se on suuresti muokannut käsitystä siitä, mikä on *mahdollista*. Monet mielen mallit (esimerkiksi *John R. Andersonin* ACT-mallit) ovat suoranaisia kopioita *von Neumannin* tietokonearkkitehtuurista keskitettyine rekistereineen ja tiedonsiirtoväylineen.

mättä ole (perinteisen ajattelun mukaisesti) pelkästään pinnallisia kuvauksia todellisuudesta, vaan ne voivat kuvata luonnonjärjestelmien toiminnan *ytimen*. Malli mielessä voi konvergoitua identtiseksi havaitun järjestelmän todellisen mallin kanssa. On ehkä mahdollista saavuttaa *interobjektiivisuus* (ei pelkästään yllä mainittu *intersubjektiivisuus*), jolloin ihminen voi mentaalimalleillaan syvällisellä tasolla todella *ymmärtää* luonnonilmiöitä.

Reaalimaailman mallien rakentumisen rinnalla tapahtuva systeeminrakennus mielen sisällä ei kuitenkaan ole näin yksinkertaista: ulkopuolinen tarkkailija ei voi saada havaintoa systeemin sisäisistä paineista, vaan ainoastaan lopulliset dynaamiset tasapainot ovat nähtävissä. Ulkoa päin tarkkaillen ei ole mahdollisuutta hahmottaa asioiden todellisia vuorovaikutussuhteita, ja systeemien keskinäiset *jäykkyydet* jäävät näkymättömiin. Niinhän se on: asiaa täytyy kosketella käsin jotta sen voisi todella *käsittää*. Katso uudestaan kuvaa 2.1 sivulla 34; vain ympäristöönsä kytkeytynyt systeemi voi ymmärtää ylikytkeytyneen ”hyperkyberneettisen” järjestelmän mitattujen ominaisarvojen $\bar{\lambda}_j$ antavan virheellisen kuvan todellisuudesta. Toisaalta neokyberneettisten rakenteiden luonne (mallitetaan ”ympäristön indusoimaa oman toiminnan vaikutusta ympäristöön”) auttaa ehkä ymmärtämään, miksi *kausaalisuus* näyttää olevan niin keskeinen ominaisuus inhimillisessä ajattelussa: kaikki halutaan nähdä syy-seuraus -suhteina.

Voidaan siis väittää, että *älykkyyden illuusio emergoituu vääjäämättä, kun tarkoituksenmukaisuus kasautuu*; ja tähän saattaa riittää pelkkä enformaation kasautuminen. Kuitenkin *tietoisuus* on pelkkää älykkyyttä vielä olennaisesti haastavampi asia ymmärrettäväksi; se näyttäisi edellyttävän vielä uutta *laadullista harppausta*. Tähän palataan luvussa 6.

4.6 Yhteiskunta ylimpänä elämänmuotona

Edellä esitetyn valossa tarkastellaan ”elävistä” systeemeistä kaikkein fraktaalisinta (ja siksi monimutkaisinta) eli *yhteiskuntaa*: se on kaikkein monimutkaisin, koska se pitää osasysteemeinä sisällään kaikkien kansalaisten fyysiset ja henkiset maailmat, jolloin sen pitäisi sisältää mallit tästä kaikesta

— kaikesta kollektiivisesta inhimillisestä ymmärryksestä. Erityisesti, kuinka rakentaa poliittinen järjestelmä tässä valossa niin että kokonaisuus voisi olla ”enemmän kuin osiensa summa”?

Aiemmin on jo todettu, ettei elämä rajoitu yksilöihin, vaan on tarkasteltava koko populaatiota (tai ekosysteemiä). Sama haaste on henkisen elämän puolella, on tarkasteltava oikeastaan koko ”egosysteemiä”: sosiaalinen elämä on erottamaton osa yksilön henkistä ja psyykkistä kokonaisuutta. Haaste on oikeastaan vielä akuutimpi: voidaan kärjistää, että ihmisen tapauksessa *älyllinen elämä ilman yhteisöä on mahdotonta*. Tämä johtuu konkreettisesti siitä, että ajattelun perustyökalu on *kieli*; kieli on yhteisöltä peritty, ilman yhteisöä ja ihmisten välistä vuorovaikutusta ihmisyksilö ei oppisi tätä työkalua ensinkään käyttöönsä, hänestä tulisi ”susilapsi”. *Descartesia* mukaillen voisi sanoa, että ”ajattelen, siis ihminen on”.

Yksilössä on kuitenkin yhteisön konkreettinen synty; se tarjoaa kytkennät todellisuuteen, ja vain sellaisen synnyn kautta rakenteisiin voi pumppautua elämänvoimaa ja siitä seuraavaa luontaista dynamiikkaa. Miten yksilöistä hitsautuu kokonaisuus? Niin, *perhe* on yhteiskunnallisten systeemien ensirakenne, ”pysyvyyden ydin”, matkalla kohti suurempia systeemejä; se on perussolu, jossa yksilöiden välinen kokonaisvaltainen vuorovaikutus ja siitä seuraava intuitiivinen ymmärrys opitaan, ympäristön asettamilla ehdoilla. Luottamuksen ja empatian mahdollistuessa voi muodostua yhä suurempia kokonaisuuksia, kunnes lopputuloksena on parhaimmillaan eheä kulttuurinen kokonaisuus.

Kulttuurisessa kontekstissa ”resurssit” ovat tarjolla olevia yhteisiä *arvoja*, joista jokainen yksilö poimii oman kokoelmansa *arvotustensa* määräämien painokertoimien mukaisesti. Näin muodostuva hajautettujen mallien diversiteetti on kulttuurin omaksuma tapa pärjätä ympäristössään; kulttuurin ydin on kollektiivinen muisti. *Johan Vilhelm Snellman* jo aikanaan totesi, että ”kansalla, joka ei tunne historiaansa, ei ole tulevaisuutta” — tulevaisuudessa pärjäämiseksi tarvitaan malli, menneisyyden ymmärtäminen.

Voitaisiin kärjistää, että ideaaliyhteiskunnassa vallitsee *moniarvoisuus* mutta *yksikulttuurisuus*, jolloin erilaiset arvotukset pääsevät vapaasti kil-

pailemaan kulttuurin sisällä. Kulttuurin tehtävänä on määritellä kehys, jossa arvot tulevat yhteismitallisiksi. Jotta meemien kilpailu olisi mahdollista ja jotta arvostusten sovittumista todellisuuteen voitaisiin arvioida, informaation täytyy virrata esteettä yhteiskunnassa. Voidaankin väittää, että *sensuuria pahempi asia on vain itsesensuuri*, jolloin täytyy olla vilpillinen itselleenkin.

Elävässä yhteiskunnassa on aina enformaation virtausta ruokkivia jännitteitä: äärimmilleen viety tasa-arvo tarkoittaisi ”lämpökuolemaa”, tilannetta missä mitään kannusteita ei enää olisi. Ikävä kyllä ”kohtuus” näyttää vapaasti kehittyvässä järjestelmässä pitkällä tähtäimellä olevan mahdottomuus (evolutiivisesta keskittymiskehityksestä katso kappale 5.7). Rahan ja vaikutusvallan liiallista kasaantumista olisi välttämätöntä hillitä pakkokeinoin.

Nykyinen poliittinen järjestelmä on jo nykyisellään melko hyvä vakaa kehys elävälle kulttuurille, se on hioutunut historian mittaan lokaalin oppimisen periaattein. Neokybernetiikka antaa asiasta kuitenkin lisää intuitiota.

Avainkysymys yhteiskunnassakin on se, kuinka saadaan elämänvoima kanavoiduksi mahdollisimman tehokkaasti ja kuinka mahdollistetaan tämän virtauksen ”pyörteet” niiden omilla ehdoilla. Taas, enformaatio periytyy alhaalta, maailmasta; *mikään räätälöity valtiomuoto ei voita enformaation keräämisen tarkkuudessa luonteeltaan hajautettua demokratiaa*, ja siksi se näyttää kaikista puutteistaan huolimatta kykenevän aina uudistumaan. Ikävä vain, että systeemin evoluutiossa (katso seuraava luku) tehokkuus jossakin vaiheessa ylikorostuu, valta keskittyy, ja jonkinlainen harvainvalta (esimerkiksi jonkinlainen ”asiantuntijoiden diktatuuri”) emergoituu ennen demokratian mahdollista vastaiskua — romahduksen jälkeen.

Jokainen kyberneettinen järjestelmä jäykistyy evoluution myötä (katso seuraava luku). Elämänvoima etsii kuitenkin uusia kanavia: nykytilanteessa voitaisiin ehkä sanoa, että kun aikanaan *vihreä liike* oli tällainen vapausaste, nyt sellainen näyttää olevan *perussuomalaisuus*?

Jostakin syystä yksinkertainen mies ja ääni -periaate on osoittautunut varsin toimivaksi: yksilön lukeneisuuden tai rikkauden painottaminen

yhteiskunnallisessa päätöksenteossa ei tunnu kasvattavan järjestelmän kestävyyttä. Olisiko niin, että *elämänkokemus* on se tärkein asia: jokaisella ihmisellä on oma ainutlaatuinen kokemuksensa siitä, kuinka maailmassa voi tulla toimeen, ja tällainen monimuotoinen tietämys on yhteiskunnankin eloonjäännin kannalta tärkeintä. Ihminen on yhteiskunnan anturi todellisuuteen.

Enformaation periytymisen prosessi edustuksellisessa demokratiassa on monitasoinen, jopa fraktaalinen:

1. Alimmalla tasolla todellisuuden mallina on *ihminen*: kertyneet kokemukset suodatetaan arvotusten kautta (katso tarkemmin luku 7); painotukset tässä semioosissa ovat henkilökohtaiset, ja jopa tiedostamattomat.

2. Seuraavalla tasolla ideologioiden malleina ovat *puolueet*; suodatus tapahtuu äänestäjien kautta, kaikkien mielipiteiden painotuksen ollessa sama (jokaisella yksi ääni).

3. Ylimmällä tasolla koko kansan tahdon mallina on *hallitus*: suodatus tapahtuu puolueiden puheenjohtajien kautta, ja painotus määräytyy puolueiden äänisaaliiden mukaan.

4. Ja nyt on vielä tämä uusin taso, jossa valtioiden mallin muodostavat *EU-elimet*: suodatus tapahtuu lähinnä valtioiden pääministerien kautta, joiden äänivallan painotus suoritetaan valtioiden väkimäärien mukaan.

Yksinkertaista sinänsä — mutta neokyberneettistä tarkastelua voisi ehkä hyödyntää tarkennettaessa tasojen välistä vuorovaikutusta. Kaavan (2.31) perusteella nimittäin vain *neliöjuuri* alatason enformaatiosta periytyy ylätasolle. Voidaankin väittää, että *Penrosen ääntenlaskumenettely on kyberneettisesti perusteltu*: jos on yhdistettävä erillisiä äänestystuloksia (esimerkiksi valittaessa yksittäisten jäsenvaltioiden mielipiteiden painoarvoja EU-tason päätöksiä tehtäessä), on mielekästä painottaa kutakin äänestystulosta *kansalaisten lukumäärän neliöjuurella*. Sama kaava (2.31) antaa myös vihjeen siitä, kuinka *äänikynnys* olisi ehkä syytä asettaa.

Voisi myös ajatella, että *näytteistyksen* voisi nykyaikana toteuttaa toisin. Nythän jokaisella äänestäjällä on yksi jakamaton ääni; tämä on liian epätarkkaa, koska tällöin jokaisen puolueen on profiloiduttava yleispuolueeksi äänestäjää houkutellakseen. Konsensusyhteiskunnassa puolueet samankaltaistuvat. Toinen luontainen vaihtoehto poliittiselle dynamiikalle on se, että puoluekenttä kaksinapaistuu.

On syytä kysyä, tuoko uusien tasojen lisääminen sinänsä lisäarvoa poliittiseen järjestelmään — ainakin jos tarkoituksena on vain määritellä uusia ylhäältä saneltuja säätörakenteita. EU:n ääneenlausuttu rooli on juuri tällainen säätely: enää ei haluta Euroopassa nähdä kansallisvaltioiden aiheuttamia sotia. Kyllä, kansallisvaltio on hyvinkin elävä, hyvässä ja pahassa. Historioitsija *Niall Fergusonin* mukaan Euroopan aiempi suuri valta perustui itsenäisiin valtioihin ja niiden keskinäiseen kilpailuun. *Hegelin* filosofiassa kansallisvaltio on se ylimmän tason ilmentymä *maailmanhengelle*; sitä ylemmän tason rakenteille ei ole teoriaa. Onkohan kansallishengen tukahduttaminen loppuun saakka harkittua?

Sama ajattelun haaste pitäisi esittää jokaisella ”systeemien kesyttämisen” tasolla: kun elämänvoima on se kaikkein arvokkain resurssi, onko oikein opettaa sitä äärimmäiseen ”kiltteyteen”?

4.7 Kuvaukset ja niiden käynnistäminen

Kuten seuraavissa luvuissa esitetään, kaikki elävät järjestelmät kohtaavat perustavanlaatuisen ongelman: kehittyminen on välttämätöntä, mutta enemmän tai vähemmän satunnainen evoluutioprosessi tahtoo aina ajaa järjestelmät kehityksessään umpikujaan josta ei ole ulospääsyä. Luonnon ratkaisu tähän ongelmaan on *regenerointi*: on luonnonlaki, että *kaikkea elämää seuraa kuolema*, ja elämää (systeemisessä, yhteisöllisessä mielessä) jäävät jatkamaan *jälkeläiset* — puhtaalta pöydältä.

Systeemin funktiot pitäisi voida tallentaa ja kopioida; tiedetään kuitenkin, että tällainen ei ole mahdollista, elämä karkaa vääjäämättä jos monadit pysäyttää.

Biologi-filosofi *Ernst Haeckel* esitti aikoinaan kiistanalaisen ajatuksensa, että *yksilönkehitys toistaa lajinkehityksen* (engl. *ontogeny recapitulates*

phylogeny), siis että yksilö joutuu syntynsä jälkeen läpikäymään pääpiirteissään samat kehitysvaiheet kuin mitä koko laji on paljon pidemmällä aikajänteellä evoluutiossa läpikäynyt. Neokyberneettisessä kehyksessä Haeckelin periaatteessa ei ole mitään kyseenalaista; kaikki synty emergoituu olemattomuudesta, jokainen elävä yksilö aloittaa omasta ”alkuliemestään”, vähitellen, monadi kerrallaan käynnistyen.

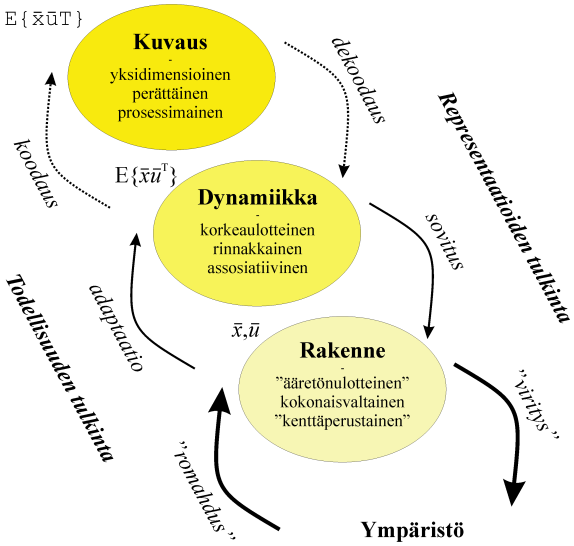
Miten toteuttaa lajin miljoonien vuosien kehitys yksilön elämän vain muutaman vuoden aikana — tai jossakin tapauksessa ehkä vain muutamassa viikossa? Kuinka saada fraktaalisen kudoksen monadit käynnistymään oikeassa järjestyksessä, niin, että kaikki tarpeelliset funktionaalisuudet ovat tarjolla silloin kun jokin monimutkaisempi funktio alkaa niitä tarvita? Oikea vastaus on tietenkin se, että jo synnyssä yksilölle annetaan ”elämän rakennusohjeet”.

Valmiita toimivia funktioita ei voida tallentaa eikä kopioida, ainoastaan niiden *kuvauksia*. Käsittelyn helpottamiseksi kuvaukset on (näköjään) syytä esittää lineaarisina listoina: tämä sama periaate toistuu niin biologisen elämän puolella, missä kuvaukset on talletettu geneettiseen koodiin, kuin myös henkisen elämän puolella, missä kuvaukset ovat kirjoitettuna (tai puhuttuna) tekstinä. Kummassakin tapauksessa tekstien (koodien) lukemisen järjestys on ratkaiseva kuvauksen käynnistämiseksi: vaikea teksti liian varhain luettuna ei ole ymmärrettävissä, se ei herää eloon.

Jokainen monadi suorittaa omaa optimoitumisprosessiaan; näin ollen optimointikriteereitä on fraktaalisesti suuri määrä. Tässä mielessä on helppo ymmärtää, miksi geneettisen koodin adaptoitumista pinnallisella tasolla matkivat *geneettiset algoritmit* tahtovat jäykistyä yhden ainoan optimointikriteerinsä lokaaliin optimiin.

Geneettinen koodi on toisaalta mainio esimerkki *syntyjen* merkityksestä. Kun samaa koodia tulkitaan systeemissä eri tasoilla, pienikin muutos genotyypin kriittisessä kohdassa saa aikaan hyvin erilaisia fraktaalisia vaikutuksia eri kohdissa fenotyyppiä. Geneettinen kuvaus on kuin parhain runokirja memeettisessä ympäristössä: jokaisella lukukerralla saat siitä irti jotakin syvempää.

Mutta ei kyse ole ainoastaan loogisen ja dynaamisen esitystavan välises-



KUVA 4.3: Koodin purkamisen tasot

tä kuvauksesta. Erilaisten esitysmuotojen linkittäminen — tekstuaalisten koodien, dynaamisten tasapainojen, aikatason transienttien ja jopa *taajuustason* ilmiöiden — on melkoinen haaste, tällä hetkellä jopa mysteeri. Katsotaan lyhyesti kokonaiskuvaa.

> Kuvassa 4.3 on esitetty *hypoteesi* geneettisen/memeettisen järjestelmän *kolmesta* laadullisesti toisistaan radikaalisti poikkeavasta tasosta. Ylin taso on koodimuotoisen kuvauksen taso (joka sisältää toisaalta geneettisen koodin, ja toisaalta kielen lauseiden muodostamat ajatusrakennelmat). Seuraava taso vastaa neokyberneettisen mallin tasoa (jolloin avainrooleissa ovat geeniaktivaatioita säätelevät *transkriptiofaktorit* ja muut prosesseja kontrolloivat entsyymit, ja toisaalta ajattelun indusoimat käsitteiden tasapainot). Kolmatta tasoa tarkastellaan vasta luvussa 6: jotta voidaan edes yrittää ymmärtää proteiinien vuorovaikutuksia fyysisten rakenteiden

> kuten elimien ja kudosten muodostumisessa, tai toisaalta tietoisuuden toimintaa (mikä kuitenkin on koko mentaalisen toiminnan ydin), tarvitaan irtiotto tähänastisista malleista. Avainsanana silloin ovat — alkeishiukkasten maailmaa mukaillen — jonkinlaiset ”aaltofunktiot”, ja niiden ”romahtamiset” reaalimaailmaan kytkeytymisen seurauksena.

Neokybernetiikan käytännön työkaluna *tietokoneen* merkitystä ei voi liioitella. Loppujen lopuksi tietokone hallitsee ne suuret datamäärät ja se ”ymmärtää” esimerkiksi matriiseja paremmin kuin ihminen. Tietokonetta tarvitaan ”heikkojen signaalien” esikäsittelyyn, löytämään data-avaruuden attraktorit kun näytteitä ”maailmasta” annetaan syötteenä. Tällaisesta tietokoneen käytöstä oli esimerkki kappaleessa 2.8. Sen sijaan, että tietokone nähtäisiin perinteiseen tapaan vain formalismien (rajoitteiden) pyörittämisen työkaluna, dataa iteratiivisesti pyörittämällä voidaan päästä kiinni *vapauksiin* (katso seuraava luku). Tietokoneympäristössä koodit saavat hyvin konkreettisen merkityksen, ja tietokonettakin voidaan katsoa toisesta näkökulmasta.

Sen sijaan että tietokonetta käytettäisiin pelkästään olemassa olevan ympäristön analysointiin, sitä voidaan käyttää *synteesiin*, keinotekoisen maailman ”eloonherättämiseen”. Tietokonekielellä voidaan toteuttaa potentiaalisten monadien kokonaisuus virtuaalimaailmassa, jossa asiaankuuluvat pyörteet, ohjelmasilmukat, käynnistyvät sopivalla ympäristöä kuvaavalla syötteellä. Näin voidaan simuloida ”vaihtoehtoisia tulevaisuuksia” laskennan avulla, emergenssioperaattoria asianmukaisessa ympäristössä emuloimalla. Tätä voidaan sanoa *tekoelämäksi*; sen sijaan, että matkittaisiin olemassa olevien elämänmuotojen pintahahmoja (niin kuin nykyisessä tekoelämätutkimuksessa tyypillisesti tehdään), voidaan implementoida elämää *synnyistä lähtien*.

Keinotekoisessa ympäristössä koodien ja todellisuuden yhteyttä voidaan ymmärtää paremmin kuin luonnollisessa ympäristössä. Algoritmimetafora ja kokemus ohjelmointikielistä tekee esimerkiksi ilmeiseksi, että elämänmuotojen monadiesitykset eivät ole yksikäsitteisiä: kaiken voi koodata lukemattomin erilaisin tavoin. Monadien luontevaa toteuttamista

varten tarvitaan uudenlaisia rinnakkaislaskentaa tukevia kieliä: perinteisissä kielissä kun on vain yksi ohjelmalaskuri, ja yksi silmukka kerrallaan voi pyöriä. Tämän lisäksi ehkä toiminnallisuuden kannalta olennaisempaa on jonkinlaisten ”kenttien” toteuttaminen, jotka mahdollistavat alirakenteiden vuorovaikutuksen (katso taas kuva 4.3 sivulla 109).

> Tällaista ohjelmointityökalua ei pidä käyttää ongelmiin jotka ovat ratkaistavissa perinteisin ohjelmointityökaluin; sen sijaan monimutkaisten hahmoyhdistelmien tunnistaminen voisi olla sopiva sovelluskohde. Esimerkkeinä mainittakoon *kuvantunnistus*, *puheentunnistus* ja *lauseenjäsennys*: kun alhaalta datan tasolta emergoituu erilaisia provisionaalisia tunnistusaihioita, prototyypilliset tulkintavaihtoehdot kilpailevat aktiivisuudesta. Kun myös ylhäältä päin tulee etukäteistietoa laajemmasta kontekstista, tunnistusprosessi asettuu lopulta tasapainoon, todennäköisimpään tulkintaan (niitä kenttiä tarvitaan juuri tähän ”jännitteiden” tasaamisen toteuttamiseen). Luvussa 6 on edellisestä laajennettu hypoteesi koko *tietoisuuden* toiminnasta; siellä tehtyjen oletusten mukaisesti ohjelmointikielenkin pitäisi ehkä perustua *värähtelykentässä emergoituvien seisovien aaltojen simulointiin*.

Pelkän *tekoälyn* (engl. *artificial intelligence*) haasteet ovat ”tekotietoisuutta” yksinkertaisempia, mutta senkin tutkimusalan kysymyksenasetteluja voidaan nyt tarkastella uudenlaisesta näkökulmasta.[5] Tekoälyarkkitehtuurit ovat perinteisesti *hermeneuttisia* symbolisysteemejä; neokyberneettisiä malleja käytettäessä sen sijaan ympäristö tulee tiiviisti kytketyksi representaatioihin, ja symboleille tulee ”maadoitus” (engl. *grounding*), kytkentä todellisuuden merkityksiin (käytännössä näin voidaan perustella kontekstuaalinen semantiikka eli korrelaatioiden hyväksikäyttö tekoälysovelluk-

[5] Aiemminkin on tarkasteltu tekoälyn ongelmien ratkaisemista kääntämällä ajattelu päinvastaiseksi; esimerkiksi *Rodney Brooksin käyttäytymispohjaisessa robotiikassa* (engl. *behavior-based robotics; subsumption architecture*) tieto opitaan kokemuksesta. On kuitenkin kyseenalaista, voiko ”naturalistisen semantiikan” oppia menemättä perille, syntyihin asti.

sissa). Perinteinen haaste, symbolitason menetelmien kytkeminen *alisymbolisiin* (esimerkiksi keinotekoisiin hermoverkkoihin), on nyt rakennettu systeemiin sisään. Myös erilaisia perinteisen tekoälyn mysteereitä voidaan tarkastella uudelta pohjalta luontevasti: vaikkapa *kehysongelma* (engl. *frame problem*), ja jonkinlainen ”tietämisen tuntu” (engl. *qualia*) voidaan selittää representaatioiden korkeaulotteisuuden kautta. Sen sijaan että puhutaan tekoälystä, ihmisälyn matkimisesta, voitaisiinkin ehkä puhua älykkyyden yleisistä periaatteista, *universaaliälystä* ja sen syntetisoimisesta.

Toisaalta — jotkin asiat, jotka perinteisessä deklaratiivisessa tekoälykehyksessä ovat helppoja, ovat neokyberneettisessä assosiatiivisessa kehyksessä *vaikeita*. Älyä nimittäin pitää kyetä soveltamaan reaaliajassa, pelkkä asymptoottinen tasapaino ympäristön kanssa ei riitä; emergentin tason tilastollinen malli ja aikatason transientit pitää saada kommunikoimaan keskenään. Erityisen suuri haaste on ymmärtää asiantuntijuuden, tai assosiatiivisen mallin sisällön *eksplikoiminen*: kuinka ääretönulotteinen rakenne saadaan projisoiduksi yksiulotteiseen muotoon, eli kuinka monadiset jännitteet saadaan puretuksi lineaariseksi listaksi, kielioppia noudattavaksi puheeksi tai tekstiksi. Ongelma tällöin on käänteinen verrattuna koodin ”henkiinherättämiseen”.

Jos siis sovelluskohteen periaatteet ovat riittävän tarkasti selvillä, voidaan ”maailmaa” ruveta rakentamaan alhaalta, synnyistä alkaen. Toinen vaihtoehto — se helpompi — on jatkaa eteenpäin valmiilta pohjalta, lisäten sen yksityiskohtiin fraktaalista lisäelämää. Tällaisesta vaihtoehdosta lisää seuraavassa kappaleessa.

4.8 Maailman ”elävöittäminen”: esimerkkejä

Tieteissä mallitetaan maailmaa. Mutta pelkkä mallintaminen mallintamisen vuoksi on mieletöntä; vasta kun muodostetaan takaisinkytkentä ja käytetään mallia maailman hyödyntämiseen, mallintamiselle tulee evolutiivinen perustelu. Näin ollen *insinöörityö* on olennainen osa tieteiden kokonaisuutta: vasta se sulkee silmukan, muodostaen monadin kaikkein ylimmälle inhimillisen toiminnan tasolle. Voidaan myös väittää, että —

tässä luvussa esitetyillä määritelmillä — tällaiset silmukat edustavat *elämän uusimpia ilmenemismuotoja maapallolla*.

Tieteissä (tai matematiikassa) saa tutkia mitä vain asiaa. Mutta vasta kun sen asian saattaa vuorovaikutukseen reaalimaailman kanssa, ilmenee tutkimuskohteen relevanssi. On paljon asioita jotka toimivat vain teoriassa, ja toisaalta paljon toimivia asioita joita ei voida formaalisti todistaa. Tässä mielessä insinöörityö ohjaa tutkimusta mielekkääseen suuntaan, kohti kytkentää todellisuuteen, *elämänvoiman suuntaan*: kokeilematta ei voida nähdä mikä suunta on oikea, vaikka kehitys vääjäämättä lopulta eteneekin sitä kohti.

Säätöteoria ja -tekniikka ovat kohtuullisen nuori insinöörityön ala; tämä toiminta on monadien rakentamista puhtaimmillaan, takaisinkytkentäsilmukoiden tutkimusta ja toteuttamista. Mallipohjainen *moderni säätö* kehitettiin erittäin pitkälle jo 1960-luvulla; sittemmin kaunis kokonaiskuva on tälläkin alalla hämärtynyt kun tutkimuksen alla ovat olleet erilaiset *postmodernit* lähestymistavat (esimerkiksi sumea säätö (engl. *fuzzy control*) jne.). Tarkastellaan seuraavassa uusia enformaatioteorian puitteissa emergoituvia näkökulmia.

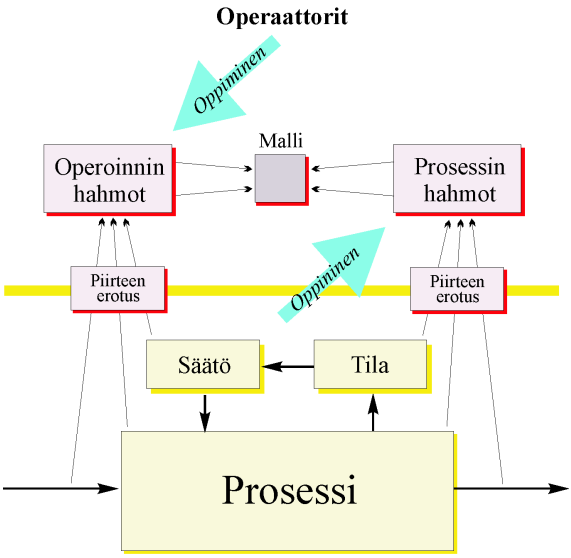
Teollisuuslaitosta voidaan verrata elävään soluun, ero ei ole laadullinen vaan määrällinen (tosin teollisuuslaitoksen ympäristönä toimii ihmismaailma eikä kemiallinen maailma, ihmisten toimiessa systeemissä ”signaalinkantajina”; lisäksi ”semioosi” ja toiminnan hyvyyden tulkitseminen tapahtuu ihmisen toimesta). Aikojen kuluessa homeostaasin ylläpitämiseksi on kehittynyt kokonaisuus monentasoisia säätöjä: alimmalla tasolla ovat nopeat stabiloivat säädöt, ylempänä reguloivat säädöt, ja ylimpänä erilaiset tuotannon optimoinnin säädöt. Kaikkien säätöjen tarkoitus on tuotannon virtauksen tehostaminen ja vakioiminen, häiriöiden eliminoiminen. Fraktaalinen rakenne lisää robustisuutta poikkeustilanteissa. Jokainen sisäinen säätösilmukka siinä kuin kokonaisuuskin toteuttaa omaa funktiotaan; nämä toiminnallisuudet ovat tärkeämpiä kuin ulkoinen muoto.

Myös ”evoluutio” teollisuuslaitoksissa on ihmisten aikaansaamaa. Tarvitaan ihmistä näkemään laitoksen enformaatiovirtauksen patoumat ja purkamaan ne. Myös itse insinöörityö voidaan nähdä enformaation ohjaamaksi: toiminnan tavoitteena on *nollavariaatio* (laatu) tai *nollataso* (vii-

veet, kustannukset). Insinöörityö on toisaalta yksityiskohtien hiomista, mutta toisaalta suurten linjojen rakentamista — jolloin lopputulos on fraktaalinen. Periaate on usein sama kuin luonnossa: *jos se ei ole rikki, älä korjaa sitä*. Vaikkei senhetkinen ratkaisu olisi kaikkein tyylikkäin, ei mielellään tehdä radikaaleja muutoksia. Elämän synnyttäminen on niin paljon vaikeampaa kuin uusien toiminnallisuuksien lisääminen jo elävään rakenteeseen.

Joskin insinöörityö tyypillisesti keskittyy yksityiskohtien hiomiseen, uusien tekniikoiden käyttöönotto mahdollistaa kokonaisvaltaisesti erilaisen ajattelun. Esimerkiksi neokybernetiikan periaatteiden hyödyntäminen mahdollistaisi tietynlaisissa ympäristöissä aidosti hajautetut verkottuneet agenttijärjestelmät. Simulointeja on toteutettu esimerkiksi *anturiverkkojen* tapauksessa, jolloin mittausten keskinäisriippuvuudet mahdollistavat tehokkaan kohinasuodatuksen. Yhdistetty anturi-toimilaiteverkko mahdollistaisi esimerkiksi itseadaptoituvan *aktiivisen värähtelyvaimennuksen*, jossa värähtelyjen liike-energia rakenteen eri kohdissa voidaan nähdä yhteisesti kulutettavana resurssina. Neokyberneettistä iteratiivista optimointia voisi soveltaa myös vaikkapa kännyköiden *adaptiiviseen tehonsäätöön*, olettaen, että kilpailtavina resursseina olisivat tarjolla olevat taajuuskaistat. Ja tieto kuormituksen vaihteluista sähköverkoissa voitaisiin hyödyntää neokyberneettisin periaattein, jolloin verkot olisivat vähemmän alttiita kaskadisille romahdusketjuille — aivan kuin hajautetuissa luonnonjärjestelmissä robustisuus seuraa keskenään ortogonaalisten ekolokeroiden olemassaolosta.

Teollisuuslaitoksissa tarvitaan *operaattoreita*: heidän tehtävänään on korkeimman tason takaisinkytkentöjen toteuttaminen. Monimutkaisessa prosessissa on esimerkiksi suuria määriä uudenlaisten mittauslaitteiden (esimerkiksi kameroiden) tuottamia muuttujia; näiden hallitsemiseksi tarvitaan ihmisen hahmontunnistuskykyä. Toisaalta ennustamattomien ympäristön häiriöiden kompensoiminen edellyttää kokonaisvaltaista ymmärrystä myös prosessin ulkopuolisista olosuhteista. Operaattorien tehtävänä sitten on virittää prosessin toimintapiste kulloiseenkin tilanteeseen sopivaksi omaan asiantuntijuuteensa luottaen. Kuitenkin kokonaisuuden hallinta tulee asioiden monimutkaistuessa ihmisellekin yhä vaikeammaksi, ja



KUVA 4.4: Ylimpien silmukoiden sulkeminen

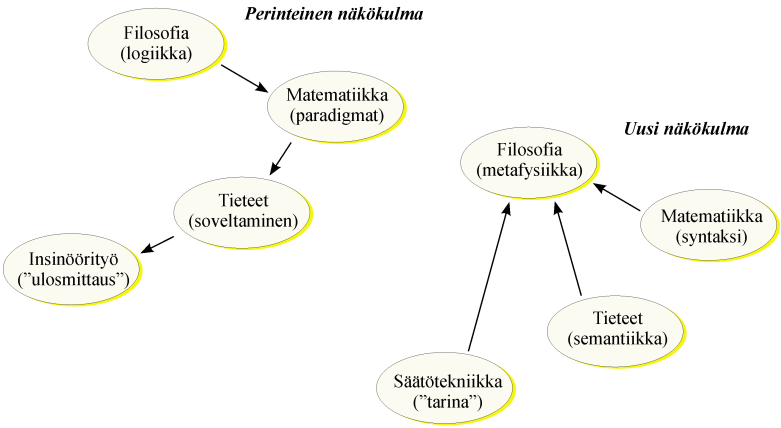
operaattorien oppimisprosessi kestää kauan; asiantuntijuutta pitäisi voida automatisoida. Jos nyt oletetaan, että teollisuussysteemi optimoituneena (ihmisen toteuttaman ”evoluution” läpikäyneenä) ja ihmisen kognitiokoneisto asiantuntijuuksineen molemmat noudattavat samoja neokybernetiikan periaatteita, voidaan kumpaakin näistä mallintaa tietokoneella. Opetusdatana ”intersubjektiivista” prosessimallia rakennettaessa voidaan käyttää prosessimittausten tietokantaa, ja vastaavaa asiantuntijuuden mallia rakennettaessa tietoa operaattorien ”ajattelusta” erilaisissa tilanteissa (tämäkin tieto mitataan prosessista toteutettuina säätötoimenpiteinä). Kun tällaiset prosessin ja säädön erilliset mallit yhdistetään (esimerkiksi käyttäen kappaleen 2.8 lopussa mainittua CCR-menettelyä), voidaan prosessin monitorointi ja operaattorin estimointi yhdistää suljetuksi prosessinsäätösilmukaksi. Tällaista säätösilmukoiden sulkemista esittää kuva 4.4.

Esitetyillä periaatteilla on myös mahdollista rakentaa ylimmälle tasolle aidosti uusia takaisinkytkentöjä. Jos tarkastellaan monimutkaisen teol-

lisuusjärjestelmän käyttäytymistä useilla erilaisilla virityksillä (erilaisilla parametriarvoilla), voidaan hitaimpien ilmiöiden ja niitä vastaavien muuttujien (siis näiden parametrien) välistä riippuvuutta mallintaa. Ilmenee, että korkeaulotteisessa parametriavaruudessa löytyy aliavaruuksia, joiden puitteissa järjestelmän ominaisuuksia voidaan kompaktisti esittää ja muokata. Lineaariset mallit ovat (yllättäen) ylimmällä tasolla varsin riittäviä; kun muuttujien vaikutukset kasautuvat, yksittäiset rajutkin epälineaarisuudet muuttuvat kohinaksi. Simuloinnein on esimerkiksi osoitettu, että lukuisat alatason yksikkösäätäjät voidaan hallita kootusti neokyberneettisen mallin määrittelemänä ”supersäätäjänä”, jolloin voidaan keskittyä suoraan *laatusuureiden* virittämiseen. Tällaisia asioita on tutkinut TkT *Kalle Halmevaara* väitöskirjassaan (TKK 2009).

Myös keinotekoisen elämän maailmassa rakenteet ovat monitasoisia ja fraktaalisia, ja syntyjen merkitys on suuri. Teknistenkin monadien muodostuminen edellyttää lukuisten näkymättömien alirakenteiden olemassaoloa: tarvitaan esimerkiksi valittuihin menetelmiin keskittynyttä tutkimusryhmää (tai jopa tutkimuksellista koulukuntaa). Tutkijoiden osaamisalue määrää sen, kuinka ongelmat nähdään: ihmekö sitten, että samat synnyt toistuivat ratkaisuissakin! — Suomalaisista tutkimuksen painopistealueista voisi mainita akatemiaprofessori *Teuvo Kohosen* keksimät *itseorganisoituvat kartat* (engl. *Self-Organizing Maps, SOM*). Oma väitöskirjanikin käsitteli aikoinaan tätä aihetta (TKK 1994).

> Itseorganisoituva kartta on neuraaliverkkoalgoritmi, joka projisoi korkeaulotteisen datan matalaulotteiseen *karttaan*, missä samantyyppiset hahmot (toivon mukaan) sijaitsevat lähellä toisiaan. Tällöin datan ominaisuuksia voidaan tarkastella visuaalisesti. Tätä lähestymistapaa on sovellettu suureen määrään erilaisia sovelluskohteita — mutta uusien avauksien puutteessa innostus on viime aikoina ollut hiipumaan päin. Ilman evoluutiota elämä näivettyy!
>
> Nyt voidaan väittää, että neokyberneettinen algoritmi voidaan määritellä itseorganisoituvan kartan *laajennukseksi*. Kytkentämatriisi Q voidaan nimittäin määritellä (iteroinnin



KUVA 4.5: Näkökulman muutos tieteiden hierarkiaan

aluksi) ei-diagonaaliseksi, jolloin se suunnilleen vastaa SOM-algoritmin *naapuruusfunktiota* joka määrittelee kartan *topologian*. Kun neokyberneettisten laskentaelementtien välillä tällöin on ”ylikuulumista” ja kun ne pääsevät vuorovaikuttamaan keskenään, niiden sisällöt alkavat myös muistuttaa toisiaan.

Mallin harvuus $\eta = 1$ simuloi itseorganisoituvaa karttaa sellaisenaan. Sen sijaan ”tiheämpi” koodaus pyrkii purkamaan hahmoja osiin, jolloin algoritmi alkaa kartoittaa piirteiden välisiä yhtenevyyksiä. Keskitettyä voittajanhakua ei nyt tarvita. SOM-rakenteelle saadaan tätä kautta siis uudenlaisia fysiologisesti kiinnostavia tulkintoja ja opetusalgoritmeja; toisaalta tällainen automaattinen organisoituminen mahdollistaisi neokyberneettisten mallien esittämisen helpommin hahmotettavassa muodossa (vertaa kuviin 2.5 ja 2.6).

Neokybernetiikka antaa aihetta vielä perustavanlaatuisempiinkin ajattelutavan muutoksiin. Perinteisesti ajatellaan, että insinöörit tekevät sen vihoviimeisen ”likaisen työn”, mallien hyödyntämisen ja luonnonvarojen

ulosmittaamisen, sen jälkeen kun filosofiassa, matematiikassa ja luonnontieteissä on tehty kaikki ylevä pohjatyö luonnon ymmärtämiseksi (katso kuva 4.5 edellisellä sivulla). Kuten edellä todettiin, neokyberneettisestä näkökulmasta katsottuna se on kuitenkin vasta *maailmaan vaikuttaminen* joka täydentää suuren entrooppisen säätösilmukan ja antaa luonnonoikeutuksen kaikelle mallitukselle.

Mutta vielä syvällisemminkin voidaan tulkita: jos ajatellaan, että ”luonnonhistoria” kaikkinensa on kertomus, joka on kirjoitettu matematiikan kielellä, ne ovat luonnontieteet jotka antavat kielen sanoille merkityksen; kuitenkin se on vasta *säätöinsinöörin intuitio* joka antaa työkalut ymmärtää *tarinoita* joita tällä kielellä kerrotaan. Kuinka draaman kaari esitetyssä kehyksessä täydellistyy (sykli ”kaaoksesta kaaokseen”), se selviää seuraavassa luvussa.

Luku 5

Evoluutio.

Antero Vipunen on maannut tuhansia vuosia. Hän on nähnyt kaiken, jo moneen kertaan; hän on lopen kyllästynyt siihen että kaikki vain toistuu eri muodoissa. — Sama toivottomuus iskee kaikkiin viisaisiin: turhaa, niin turhaa … mutta kuitenkin niin välttämätöntä. Elämän vesi kovertaa lopulta tiensä läpi esteiden, ei voimalla vaan silkalla jääräpäisyydellä.

5.1 Populaatioista yksilön näkökulmaan

Aiemmin on jo useassa yhteydessä ollut puhetta evoluutiosta; tämä on luonnollista, koska ”missään ei ole mitään mieltä ilman evoluution perspektiiviä”. Nyt meillä on työkalut ymmärtää asiaa muutenkin kuin vain pinnallisella tasolla — kun muistetaan että ajavana voimana, kaikessa taustalla on se *enformaation nälkä*.

Perinteisesti evoluution idea ei ole kovin jäsentynyt: mitä tahansa riittävän hidasta *kehittymistä* voidaan sanoa evoluutioksi. Enformaatioteoriassa kuitenkin abstrahoidaan yli aika-akseleiden: parametritkin ovat muuttujia, kaikki rakenteet ovat vain suodattimia nopeammin muuttuville rakenteille. Hitaudella ei ole merkitystä; asioita ei tarkastella yksinomaan ihmisen näkökulmasta, ihmiselle luontaisilla aikajänteillä. Todellakin, täs-

sä kehyksessä evoluutiota tapahtuu fraktaalisesti, kaikissa aikaskaaloissa yhtä aikaa. Esimerkiksi *yksilönkehitys* kussakin yksilössä erikseen voidaan nähdä eräänlaisena ”ohjattuna evoluutiona”.

Evoluutio voidaan nyt jakaa luonteeltaan kahteen toisistaan olennaisesti eroavaan osaan. Ensimmäinen evoluution periaate on neokyberneettistä hakeutumista tasapainoa kohti, pelkkää hitaiden mallien tilan konvergoitumista; tällainen kehitys ei ole ollenkaan niin satunnaista kuin evoluutiosta on totuttu ajattelemaan, ohjaahan siinä kehitystä johdonmukainen enformaation maksimointi ”gradientin suunnassa” (joskin luonnon optimointi voi olla melkoista satunnaishakua). Systeemien sisältä katsottuna evoluution etenemistä luonnehtii tällöin yhä paraneva tasapaino ja kiristyvä kytkeytyminen (kytkentäkertoimien q_i vähitellen kasvaessa; katso kappale 5.4). Kun kytkentä ympäristöön kiristyy, vähäisemmätkin variaatiosuunnat tulevat näkyviksi (katso taas kuva 2.1 sivulla 34) mahdollistaen laadullisetkin (pienenpienet) kehitysaskeleet; kuitenkin lopulta konvergoidutaan lopulliseen tasapainoon ja ilman ”jotakin uutta” kehitys pysähtyy (muista kuitenkin uusien näkökulmien avautuminen pidempien aikaskaalojen tullessa vähitellen näkyviksi ajan kuluessa; vertaa taas kuvaan 1.4 sivulla 12).

Toinen evoluution periaate on kiinnostavampi: uudet synnyt, innovaatiot, jonkinlaisen systeemisen *luovuuden* tai *kekseliäisyyden* aikaansaama *uudenlainen semioosi*, aiemmin kokeilematon tapa nähdä maailmaa — tällainen saattaa avata uusia suuntia joista hakea enformaatiota (tämä voi näkyä esimerkiksi uusina muuttujina u_j, jolloin subjektiivisen ympäristön dimensio m kasvaa). Luovuuden olemusta voidaan tuskin koskaan formalisoida, onhan se määritelmällisesti *astumista annettujen kehysten ulkopuolelle*. Tällainen ”epäjohdonmukaisuus” ei voi ilmetä systeemin optimoidulla ylätasolla, sitä voi olla vain alatasolla, näkymättömissä; siksipä systeemit tyypillisesti koostuvat yksilöistä, joiden tehtävä on toimia systeemin väsymättöminä *satunnaisuusgeneraattoreina*, sisäsyntyisenä kohinana, niin että niiden epäonnistuneet kokeilut eivät pääse romahduttamaan koko systeemiä. Vain parhaat innovaatiot pääsevät populaation suodatusprosesseissa emergoitumaan, leviämään populaatiossa, ja muuttamaan lopulta koko systeemin luonnetta.

Nämä kaksi periaatetta voidaan nähdä kilpailevina pyrkimyksinä: toisaalta systeemi pyrkii yhä tiukemmin säädettyyn tasapainoon, ja toisaalta yksilöt pyrkivät (tiedostaen tai tiedostamattaan) pois pakotetusta tasapainosta, vapauteen. Populaation näkökulmasta kahden periaatteen vuorovaikutus johtaa *hyppäykselliseen* evoluutioon (engl. *saltationism*), jossa tasaisen kehityksen kausia katkovat laadulliset harppaukset. Yksilön näkökulmasta säätöjen aikaansaama homeostaasi voidaan nähdä ikään kuin *painekeittimenä*, jonka paineita yksilö pyrkii välttelemään — schopenhauerilaisittain voitaisiin puhua *tuskasta*, joka ahdistaa toimijoita *kaikissa* luonnonjärjestelmissä.

Toistaiseksi on tarkasteltu vain emergenttiä systeemien tasoa. Tämä on mahdollistanut *frekventistiset* tulkinnat: kun alatasolla on suuri määrä toimijoita, yhteisvaikutus on jonkinlainen odotusarvo, jota edellä on kuvattu emergenssioperaattorin avulla. Jokainen filosofi kuitenkin toteaisi, että tässä tehdään perustavanlaatuinen ajatusvirhe: jokainen ilmiö joko *tapahtuu* tai *ei tapahdu*, välimuotoja ei ole. Vaikka keskiarvoistaminen helpottaa tarkasteluja, se vääristää todellisuutta. Ja vaikka kaikki mallintaminen edellyttää yksityiskohtien abstrahointia, ei niitä kannata kokonaan unohtaa; ehkä innovaatioitakin voidaan mallintaa?

Tähän asti avainroolissa on ollut systeeminen näkökulma, eli *yhteisö*, sen säädöillä aikaansaatu *tasapaino*, ja näiden säätöjen muodostamat *rajoitteet*. Vaihtoehtona on tarkastella *yksilöitä*, *muutostilaa*, ja *vapauksia*. Kumpi näkökulma loppujen lopuksi on kiinnostavampi? Ja mistä oikeastaan puhutaan kun puhutaan ”vapauksista”?

5.2 Mikä nähdään tärkeäksi: vapaudet

On mahdollista löytää vielä uusi näkökulma siihen mitä neokyberneettinen systeemi adaptoituessaan tekee. Osoittautuu, että tasapainojen *matemaattinen hahmo* voidaan ilmaista neliöllisen *kustannusfunktion* eli *energiafunktion* avulla. Kun yksilöt kuvan 3.6 systeemissä sivulla 74 pyrkivät maksimoimaan enformaationsa, seuraava funktio *minimoituu*:

$$J(x) = \frac{1}{2}\, x^{\mathrm{T}} \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\, x - x^{\mathrm{T}} \mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\, u. \tag{5.1}$$

Tällä kriteerillä on yksikäsitteinen minimi gradientin nollakohdassa, dynaamisessa tasapainossa, jolloin tosiaan saadaan sama malliyhtälö $\bar{x} = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}u = \Phi^{\mathrm{T}}u$ kuin kappaleessa 3.6. Tässä pisteessä sisäinen tila $\bar{x}$ systeemissä tarkalleen kompensoi ympäristön aiheuttaman "jännityksen" u-vektorissa.[6]

Nyt alkuperäinen enformaation maksimointitehtävä on muuttunut minimointitehtäväksi. Tällaiset minimointimuotoilut ovat olleet mallituksen peruslähtökohtana *Maupertuis'n pienimmän vaikutuksen periaatteesta* (engl. *Principle of Least Action*) lähtien.

Kriteeri (5.1) voidaan kirjoittaa erilaisiin muotoihin. Se voidaan muotoilla esimerkiksi seuraavasti:

$$J(x) = \frac{1}{2}\,(u - \Phi x)^{\mathrm{T}}\,\Phi\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\Phi^{\mathrm{T}}\,(u - \Phi x)\,. \tag{5.2}$$

Tätä lauseketta voidaan käyttää konkreettisena perusteluna luvun 2 väitteelle siitä, että neokyberneettinen malli suorittaa piirteenerotusta ja hahmonsovitusta. Kun neliöllinen kustannus saavuttaa pienimmän arvonsa $J(\bar{x})$, rekonstruointivirheen $u - \Phi\bar{x}$ täytyy olla minimissään; tällöin $\Phi\bar{x}$ kuvaa mahdollisimman tarkasti hahmon u, eli n kappaletta piirteitä matriisissa Φ, kertoimilla $\bar{x}$ painotettuina, tuottaa neliövirheen mielessä (enformaation jäljittämisen mielessä) optimaalisen estimaatin $\hat{u}$.

Kaikkein kiinnostavinta lausekkeessa (5.2) on sen *painomatriisi*. Se korostaa data-avaruudessa niitä suuntia, joissa on paljon variaatiota; selvästikin enformaatiota pidetään arvokkaana:

$$\Phi\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\Phi^{\mathrm{T}} = \mathcal{E}\{\hat{u}\hat{u}^{\mathrm{T}}\}. \tag{5.3}$$

Tämä painotus antaa mahdollisuuden ymmärtää, millä tavoin neokyberneettinen malli poikkeaa tavallisista datan malleista. Perinteisessä *identifiointiteoriassa* mallien hyvyyden ja parametrien sovituksen periaatteena käytetään tyypillisesti *suurimman uskottavuuden menetelmää* (engl. *maximum likelihood method*); normaalisesti jakautuneelle datalle se antaa kustannuskriteerin, joka muistuttaa hyvin paljon kaavaa (5.2), mutta

[6] Alkuperäisessä ei-optimaalisessa neokyberneettisen mallin tapauksessa neliömuodon painomatriisiksi pitäisi vastaavasti valita $Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$.

painomatriisi onkin muotoa $\mathrm{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}^{-1}$, siis olennaisesti *käänteinen* verrattuna painotukseen (5.3).

Kun *informaatioteoriassa* painotetaan *uutuusarvoa* tai *yllätystä*, enformaatioteoriassa painotetaan *johdonmukaisuutta* tai *relevanssia*.

Tulosten tulkinnat poikkeavat toisistaan suuresti. Molemmissa lähestymistavoissa itse mallirakenne Φ on identtinen: mallien kantavektorit (piirteet) virittävät datan u tärkeimpien pääkomponenttiakseleiden määräämän kannan. Tämän motivaationa on (ko)variaation mallitus. Mallin soveltaminen näissä kahdessa tapauksessa kuitenkin poikkeaa toisistaan: kun neokyberneettisessä mallissa jatketaan (ko)variaation (eli enformaation) korostamista, perinteisessä mallituksessa muutetaan näkökulmaa. Variaatio aletaankin nähdä nyt jonkinlaisena *häiriönä*, kohinana, ja keskitytään datan mahdollisimman tarkkaan sovittamiseen saatuun kiinteään malliin, eräänlaiseen *rajoitteeseen*. Kärjistäen sanottuna: tällöin keskitytään puristamaan informaatiota sieltä missä sitä ei ole — jolloin pahimmillaan malli käyttäytyy patologisesti.

Jonkinlainen vastaavankaltainen sisäinen ristiriita on informaatioteoriassa kaiken kaikkiaankin: toisaalta ennakko-odotuksesta poikkeava data on kaikkein arvokkainta, koska se auttaa korjaamaan mallia, mutta toisaalta kaikkein arvaamattomin data, kohina, on kuitenkin täysin arvotonta! Tämä dilemma vältetään enformaatioteoriassa, koska yksittäinen bitti, oli se sitten informaatiota tai kohinaa, ei pääse vaikuttamaan malliin. Voitaisiin sanoa, että enformaatioteorian malleihin ei vaikuta poikkeavuus sinänsä vaan *redundanssi*, poikkeamien *tilastollinen merkitsevyys* ja *relevanssi*. Tämä lähestymistapa on käytännön datan tapauksessa monella tapaa robustimpi (kannattaa esimerkiksi huomata, että painotuksessa (5.3) painomatriisia ei rakenneta alkuperäisestä datasta vaan mallin antamista estimaateista, jolloin häiritsevä mallittumaton kohina on tullut suodatetuksi pois; mitään häiriöherkkiä matriisinkääntöjä ei myöskään tarvita).

> *Sherlock Holmes* aikanaan sanoi, että *kun eliminoit kaiken ristiriitaisen, niin se mitä jää, vaikka olisi kuinkakin epätodennäköistä, sen täytyy olla totuus*. Nykyaikaisessa rikostutkimuksessa kuitenkin tiedetään, että kaikki todistusaineisto

> tahtoo olla enemmän tai vähemmän ristiriitaista; tärkeintä on todisteiden mosaiikista muodostuva *kokonaiskuva*.

Perinteiseen verrattuna neokyberneettinen malli on ilmeisesti huonompi mallirakenteen rajoitteisiin sovittamisessa, koska se yrittää jäljittää jotain *muuta*. Mitä tämä *muu* sitten on? — Nimeämme tällaiset näennäisesti rajoittamattoman enformaation suunnat nyt *vapauksiksi*.

Hieman löysä termi ”vapaus” eri muodoissaan on kyberneettisen (kuten myös muun esoteerisen!) kirjallisuuden avainkäsite. Jos haluttaisiin keskittyä turvallisiin puhtaasti teknisiin lineaarialgebran sovelluksiin, termi *vapausaste* olisi täsmällisempi; kuitenkin sana *vapaus* sisältää laajempia sovelluskohteita ajatellen täsmälleen oikeat konnotaatiot. Tällaisiin laajempiin sfääreihin paneudutaan seuraavassa kappaleessa.

Englantilainen kyberneetikko *W. Ross Ashby* puhui klassikkokirjassaan *An Introduction to Cybernetics* vapauksista nimellä *moninaisuus* (engl. *variety*), tosin tarkoittaen sillä lähinnä diskreettiarvoisia *vaihtoehtoja*. Tähän käsitteeseen liittyy myös kybernetiikan historian ehkä suurin virhetulkinta: ”välttämättömän moninaisuuden laki” (engl. *The Law of Requisite Variety*) sanoo, että säätäjän moninaisuuden määrän täytyy olla vähintään yhtä suuri kuin säädettävän moninaisuus. Kuitenkaan neokyberneettisessä mallissa, ja siis myös säätäjässä, ei voi olla (jatkuva-arvoisia) vapausasteita enempää kuin n kappaletta, kun taas ympäristössä niitä voi olla m; kuten on nähty, eteenpäin pääsyn edellytyksenä on mahdollisimman taitava rajoitteiden kiertäminen ja enformaation tehokas kompressio. Säätäjän emergoituva älykkyys ei tule ennalta-annetusta ylivertaisesta kapasiteetista vaan pakon sanelemasta niukkojen mahdollisuuksien optimoinnista.

5.3 Pelin säännöt ja strategiat

Kun Ludwig Wittgenstein oli Tractatuksessaan ratkaissut ”kaiken”, kun hän oli saanut kartoitetuksi loogisen ajattelun rajat, hän vasta myöhäiskaudellaan uskaltautui näiden rajojen ulkopuolelle. Kielen rajat eivät enää olleetkaan ajattelun rajat: ”ilmaisulla on merkityksensä vain lastuna elämänvirrassa”.

Normaali tapa mallittaa maailmaa on käyttää *rajoitteita*. Kun ympäristössä on muuttujia vaikkapa m kappaletta, ne virittävät m-ulotteisen avaruuden. Jos muuttujien keskinäisistä riippuvuuksista ei tiedetä mitään, mallia ei ole; mutta jos muuttujien välille hahmotetaan jonkinlaisia yhteyksiä, keskinäisriippuvuuksia, tämä tieto vähentää epävarmuutta. Matemaattisesti ajatellen tieto riippuvuuksista (eli malli) voidaan esittää *yhtälöinä*, jotka sitovat muuttujia yhteen; tällaisten mallien avulla voidaan esimerkiksi ennustaa tuntemattomien muuttujien arvoja tunnettujen muuttujien avulla.

Konkreettinen osoitus rajoitteiden merkityksestä on se, että maailman hahmotuksen huippuna nähdään *luonnonlait*, erilaiset *invarianssit*, jotka ilmaisevat, kuinka erilaiset luonnonilmiöt ovat yhteydessä keskenään. *Eino Kaila* aikanaan jopa totesi, että *kaiken inhimillisen tiedonpyrkimyksen tavoitteena ovat invarianssit*. Ja moraalinkin ohjenuorina ovat ehdottomat *käskyt*.

Rajoitteet ovat ne mitä asioista voidaan *eksplikoida*, määritellen asioiden *muodon*, niiden rakenteistukset ja käsitteistykset. Wittgensteiniläisittäin *tunnetut rajoitteet määrittelevät maailman rajat*, ja on vaikea edes kaivata mitään muuta. Systeemin rakenteen *ydin* ja *merkitys* paljastuu kuitenkin vasta kun elämänvoima laitetaan virtaamaan systeemissä. Saattamalla systeemi liikkeeseen, sen *funktiot* tulevat näkyviksi; vapaudet emergoituvat paineessa, kun monadi pakotetaan pyörimään, kun elämänvoima laitetaan hakemaan keino luovia läpi rajoitteiden. Rajoitteet ovat välttämättömiä valitessaan tilanteenmukaiset vapaudet.

Erilaisissa ympäristöissä vapaudet saavat erilaisia ilmenemismuotoja. Kielellisissä (ja myös matemaattisissa) tapauksissa vapaudet ovat *käsitteitä*, joiden kautta korkeamman tason hahmot projisoidaan ja joilla ne jäsennetään; pragmatistisesti tulkiten vapaudet ovat kuin työkaluja aktiivisuuden kanavoimiseen. *Marshall McLuhania* mukaillen tällaiset välineet ovat *systeemin jatkeita*, määrittäen systeemin potentiaaliset mahdollisuudet ja sen merkitykset.

Tällainen vapauksien roolin hyväksyminen edellyttää intuitiivista rohkeutta — mutta emme ole yksin; toiset ovat osanneet asian esittää kaunopuhei-

sestikin. Kulttimaineen saavuttaneessa kirjassaan ”Zen ja moottoripyörän kunnossapito” *Robert M. Pirsig* pohtii *laadun* olemusta, muodon ja funktion eroa, kuinka *hyvän* olemus pyrkii pakenemaan määrittely-yrityksiä. Tärkeintä on asioiden relevanssi ja toimivuus. Kuinka insinööri on tyytyväinen vasta kun kone hyrrää häiriöttömästi; kun on annettu rajoitteet, moottorin rakenne, tavoite on sen esteetön pyöriminen, elämänvoiman siirtyminen häviöittä vetoakselille, ilman että rajoitteet pääsevät häiritsemään vapautta.

Edellisen luvun monadeja voitaisiin luonnehtia niinkin, että ne ovat *kestäviä ratkaisuja rajoitteiden sitomassa avaruudessa*, vapauksien ilmentymiä fyysisten reunaehtojen maailmassa.

Rajoitteet siis antavat vapauksille muodon. Halu keskittyä yksinomaan vapauksiin asettaakin nyt haasteen: kuinka pysyä vapauksien maailmassa tukeutumatta missään vaiheessa perinteiseen rajoite-esitykseen? — Kyse on taas vain tulkinnoista. Se on *mittausdata* joka variaatiorakenteineen edustaa *esimerkkejä toteutuneista vapauksista*; helpoin ratkaisu onkin tallettaa kaikki esimerkit jonkinlaiseksi ”kirjastoksi” (niin kuin geeni- tai meemipoolin tapauksessa tapahtuu), mutta tämän kokoelman kompressoiminen tuottaa optimoituneen neokyberneettisen mallin.

Seuraavassa on esimerkkejä siitä, miten vapauksien olemus verrattuna rajoitteisiin erilaisissa mentaalisissa sovelluskohteissa voidaan tulkita.

- *Asiantuntijuus* ei ole sitä, että käydään läpi päättelysääntöjä yksi kerrallaan; tällainen *deklaratiivinen*, rajoiteorientoitunut ajattelu on tyypillistä aloittelijoille. Oikea asiantuntijuus on assosiatiivista, taitoa nähdä korkeaulotteisen ongelma-avaruuden olennaiset vapaudet ja sovittaa kulloisenkin ongelman hahmo kohdealueen piirremalliin.

- *Pelit* voidaan myös nähdä omanlaisensa asiantuntijuuden sovelluskenttänä. Kun aloittelija seuraa orjallisesti sääntöjä, pelitaituri näkee sääntöjen muodostamasta rajoitejoukosta emergoituvat *strategiat* ja kykenee niiden avulla luovaan ongelmanratkaisuun.

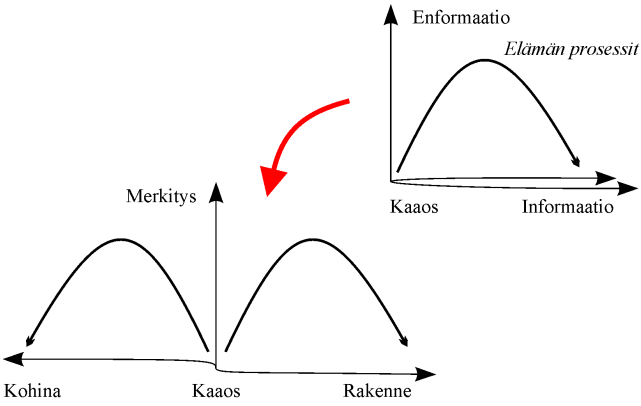
- *Ongelmatehtävät* ovat myös eräänlaisia pelejä, joissa hyvinkin kon-

kreettisesti *ratkaisut ovat vapauksia* (kuten matematiikan uudet teoriatkin ovat). Tyypillisesti on annettuna reunaehtoja ja päättelysääntöjä, ja olisi löydettävä sokkelosta vapaaksi ”koskematta” rajoitteisiin; esimerkkinä tästä ovat erilaiset ”veturinkuljettaja asuu lämmittäjän naapurissa, jne.” -tyyppiset aivopähkinät.

Vaikka asiantuntijuuden — tai *intuition* — eksplikoiminen on tunnetusti vaikeaa, *asiantuntijuus näkyy datassa*. Kun seurataan asiantuntijoiden ongelmanratkaisua, nähdään ratkaisujen vaihtelua, josta voidaan tunnistaa variaation rakenne ja siis vapauden suunnat. Tällaiseen vapausasteiden näkyväksi tekemiseen ja sitä kautta asioiden selkiyttämiseen perustuu esimerkiksi *Delphi-menetelmä*, jossa eri asiantuntijat pakotetaan näkemään toistensa näkökantoja.

Miksi asiantuntijan strategioita ei muka voida ilmaista sanallisesti? Totta kai, siinä vaiheessa kun kokonaisuus on hahmotettu ja vapausasteet on identifioitu, ne voidaankin muuttaa *uusiksi rajoitteiksi*, kehittyneemmiksi pelisäännöiksi. Näin evoluutio etenee yleensäkin: jossakin vaiheessa implisiittinen osaaminen kiteytyy uusiksi kyseenalaistamattomiksi muodoiksi, toiminnan normeiksi, ajattelun yhä monimutkaisemmiksi rajoitteiksi. Tämän emergoituneen muodon tarkoituksena on tietenkin tukea ja tehostaa funktiota; ikävä kyllä kyseenalaistamattomat muodot säilyvät vaikka niiden perustana olleet dynaamiset attraktorit muuttuisivat tai katoaisivatkin.

Taas tarvitaan näkökulman muuttamista: perinteisessä *kompleksisuustutkimuksessa* arvoituksena on se, kuinka kompleksiset järjestelmät kykenevät tasapainottelemaan ”kaaoksen ja järjestyksen rajalla”. Nyt onkin niin, että neokyberneettinen järjestelmä toimiessaan *määrittelee* tämän kaaoksen ja järjestyksen muuttuvan rajapinnan. Evoluution myötä rajapinta etenee: kun kaaoksessa aletaan nähdä hahmoa, enformaatiota aletaan hyödyntää ja alkaa muodostua rakenteita; ja kun järjestelmä jäykistyy (kuten seuraavassa kappaleessa kuvataan), se lopulta menettää kiinnostavuutensa. Neokyberneettinen järjestelmä *syö kaaosta ja ulostaa järjestystä* — ja kaikki tämä täysin entropiaperiaatteen mukaisesti.



Kuva 5.1: Enformaatiosta informaatioksi?

Kuvassa 5.1 on edellisen perusteella pyritty hahmottamaan enformaation ja informaation keskinäistä mielenkiintoista suhdetta. Voidaan väittää, että eräällä tavalla *enformaatio saa informaation emergoitumaan* — niin, luonnossakin informaatio on syvällisellä tavalla aina kytkeytynyt merkitykseen. Samoin kuin reaalianalyysin tuloksia voidaan johtaa käymällä reaaliakselin ulkopuolella kompleksitasossa, informaation jalostamiseksi täytyy harpata syntaksista hetkeksi semantiikan puolelle! Kaiken perustaksi tarvitaan elämän prosesseja, jotka enformaatiota ympäristöstään jäljittämällä alkavat tämän ”merkityksen” perusteella rakenteistaa vallitsevaa kaaosta. Kuitenkin, johtuen informaation käsitteen haastavuudesta, asian ymmärtämiseksi yksinkertainen kaavio (kuvassa ylinnä) joudutaan avaamaan (kuvassa alla).

Informaatio tarkoittaa (Shannonin määritelmän mielessä) lähinnä *ennakoimattomuutta*, jolloin kohina sisältää tällaista formaalia informaatiota yhtä lailla kuin todellinen ”uutuusarvokin”. Neokyberneettinen prosessi poistaa datasta redundanttisuuden ja siirtää sen malliin; tällöin, datan jalostuessa korreloimattomaksi kohinaksi, sen (määritelmän mukainen) informatiivisuus lisääntyy, samalla kun mallin monimutkaistuessa (”rakenteen” ja ”järjestyksen” kehittyessä) sen kuvaaminen myös edellyttää

enemmän bittejä. Evoluutioprosessin tultua läpikäydyksi jäljellä ei enää ole käyttökelpoista enformaatiota: kaikki on muuttunut merkityksettömäksi informaatioksi (vaikka muodostuneella rakenteella ja järjestyksellä voi olla merkitystä *ylemmällä tasolla*)!

Vielä yksi yksityiskohta kuvassa 5.1 edellisellä sivulla ansaitsee tulla korostetuksi: *kaaos ja kohina ovat olennaisesti eri asioita*. Kohinalla tässä yhteydessä tarkoitetaan dataa, joka ei ole pelkästään korreloimatonta vaan myös tilastollisesti *riippumatonta* (engl. *independent*). Ja vieläkin enemmän voidaan sanoa: neokyberneettisen monitasoisen prosessin hylkäämän datan *algoritminen kompleksisuus on maksimaalinen*. Sen sijaan kaaoksessa on piilossa kaikki tieto maailmasta; se sisältää siemenet eritasoisten mallien rakentamiseksi. Ja ylemmillä tasoilla nämä mallit eivät perustu enää yksinkertaisiin korrelaatiosuhteisiin, vaan ne voivat olla vaikkapa simulaatiopohjaisia käyttäytymisten malleja; tällaisia kuvauskieliin perustuvia optimoituneita malleja voitaisiinkin ehkä käyttää datan (senhetkisen parhaan ymmärryksen mukaisena) *algoritmisen kompleksisuuden mittana*.

5.4 Evoluution mekanismit

Evoluutiolla on neokyberneettisessä kehyksessä kaksi perusmekanismia: ensimmäinen näistä on *vapauksien haltuunotto ylätasolla*, ja toinen on *laadulliset askeleet alatasolla* (näiden aikaskaalojen välissä on systeemin ”normaalitoiminta” tila-adaptaatioineen). Edellinen näistä evoluutiomekanismeista johtaa *säätöön*, ja jälkimmäinen johtaa *säätöjen jatkuvaan tiukkenemiseen*. Molemmissa tapauksissa ajavana voimana on *enformaation nälkä* ja molemmissa tapauksissa kehitys tapahtuu *vapauksien suuntaan*, niitä kuristaen.

Vapauksien haltuunotto ylätasolla

Kun vapauksien suunnassa aletaan nähdä muuttujien korrelaatioita, vapaus jalostuu enformaatioksi; kun enformaatiota hyödynnetään, sekin suunta muuttuu vähitellen yhä tiukemmin säädetyksi rajoitteeksi. Tämä on normaali evoluutiokehitys: syödään elämänvoimaa ja jätetään jäljelle

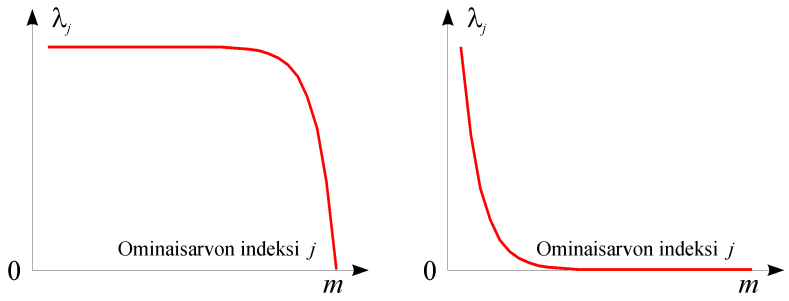
jäykistyneitä rakenteita. Systeemien ”entrooppinen velvollisuus” on *testata vapaudet ja niiden potentiaali*.

Tämä on kehityksen suuri linja; eteneminen tapahtuu kuitenkin vähän kerrassaan, satunnaisin askelin. Kun ympäristöä aletaan ymmärtää paremmin, aletaan siellä nähdä käyttökelpoisia enformaatioresursseja; näiden hyödyntämiseksi konstruoidaan (tietoisesti tai tiedostamatta) säätösilmukoita. Kuitenkin uuden takaisinkytkennän lisääminen esimerkiksi teollisuusjärjestelmään kytkee systeemin muuttujia (enemmän tai vähemmän tiukasti) yhteen, ja kokonaisjärjestelmän rajoitteiden määrä kasvaa. Tyypilliset tämän päivän monimutkaiset järjestelmät läpikäyvät tällaista kehitystä. Kun riippuvuudet ketjuuntuvat ja niissä on takaisinkytkentöjä, koko rajoitteiden kokonaisuus näyttää muuttuvan epämääräiseksi verkostoksi, jossa loppujen lopuksi *kaikki vaikuttaa kaikkeen*. Järjestelmä muuttuu *pankausaaliseksi*.

Kun järjestelmää ei hallita enää yksityiskohtaisesti, kokonaisuutta voidaan ehkä parhaiten ymmärtää tilastollisten monimuuttujamenetelmien avulla laadullisesti. Lineaariset rajoiteyhtälöt näkyvät datan kovarianssirakenteen muokkautumisena: muuttujien kytkennästä kertoo variaation vähäisyys kyseisten muuttujien yhteisvariaation kanssa kohtisuorassa olevan aliavaruuden suunnassa, mikä näkyy kovarianssimatriisissa vastaavan ominaisarvon pienenä arvona (ominaisarvo nolla tarkoittaa yksi-yhteen -kytkentää). Perinteiset mallitusmenetelmät toimivat parhaiten juuri tällaisten *jäykistyneiden* (”kuolleiden”) ilmiöiden kuvaamisessa. Jos nollavariaatiota on paljon (jos järjestelmä on jo *kybernetisoitunut* jäykäksi säätöjen tultua dominoiviksi), olennaisesti sama tieto järjestelmästä saadaan keskittymällä sellaisiin aliavaruuksiin, joista rajoitteet *puuttuvat*, eli missä hallitsematonta vapautta on vielä jäljellä. Jos vapauksia on järjestelmässä jäljellä enää vähän, niihin perustuva malli on rajoitemallia yksinkertaisempi — siis *Occamin partaveitsen* mielessä *parempi*.

Mitä monimutkaisemmaksi maailma tulee, sitä selkeämmiksi asiat tulevat oikeasta näkökulmasta katsottuna. Neokyberneettinen järjestelmä näkee maailman tästä vapauksien näkökulmasta.

Lineaariavaruuksissa rajoitteet ja vapausasteet on helppo kvantifioida. Kuvassa 5.2 viereisellä sivulla on kaavamaisesti esitetty kaksi vastakkaista



KUVA 5.2: Paljon (vas.) ja vähän (oik.) vapautta muuttujissa

tapausta m-ulotteisten datavektorien avaruudessa: vasemmalla rajoitteita on vain muutama, oikealla taas vapauksia on jäljellä enää muutama (huomaa, että täysin malliton kohina sisältää rajoittamattoman vapauden, kun (normalisoidulle datalle) kaikki ominaisarvot ovat samat). Tällainen esitystapa antaa asioihin kovin teknisen näkökulman — mutta voidaan väittää että sama intuitio toimii myös avaruuksissa joissa ainoan metriikan määrittelee ihmisen hahmotuskoneisto.

Kuva 1.1 sivulla 2 puolestaan esitti takaisinkytkentöjen muodostamaa verkostoa, jossa ”säädöt” on rakennettu markkinoilla olevan rahan imemiseksi. Kun säädöt jäykistyvät (katso seuraava kappale), markkinoiden jousto vähenee, ja markkinoille on yhä vaikeampi tulla; siellä on vähemmän jaettavaa.

Perinteinen darwinilainen näkökulma tulkitsee evoluution raakana kilpailuna, jossa on vain yksi voittaja (”survival of the fittest”). Neokyberneettisestä näkökulmasta katsottuna sen sijaan on useita vapauden suuntia, mistä yksittäinen toimija voi toivoa menestystä löytävänsä. Esimerkiksi *parinvalinta* voidaan nähdä uudesta näkökulmasta: valittaessa mahdollisimman *samanlainen* kumppani, tai käytettäessä kriteerinä jonkinlaista subjektiivista ”kiinnostavuutta”, jälkeläiset todennäköisesti suuntautuvat yhä voimakkaammin kyseiseen suuntaan.

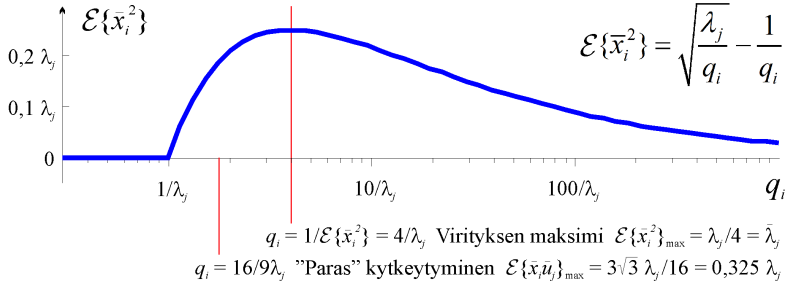
Jos jokaisella on omat hyvyyskriteerinsä; miksi suvullista lisääntymistä edes tarvitaan? Voidaan heittää rohkea hypoteesi: kytkemällä yhteen samanlaiset fenotyypit, voidaan myös genotyypit ”yhdensuuntaistaa” tällä tavoin. Kun attraktorirakenne geenitasolla vastaa attraktoreja reaalimaailmassa, voidaan optimointia suorittaa kierrättämättä kaikkia ”kokeiluja” reaalimaailman kautta.

Laadullinen kehitys alatasolla

Laadullisia muutoksia (kehyksen ulkopuolelle hyppäämisiä) ei voi tarkastella kehyksen (teoriarakennelman) sisältä, mutta niistä emergoituvia seurauksia voi: laadullisetkin kehitysaskeleet abstrahoituvat määrällisiksi kun yksityiskohdat jäävät näkymättömiin. Tämä on se edelläkin mainittu yleinen *jäykistymisen mekanismi*.

Kun fraktaalisessa järjestelmässä alemman tason systeemi (tai yksilö) kehittyy ja tekee jotakin tehokkaammin, parantaen enformaation hyödyntämistään, se heijastuu ylätasolle enformaation parempana virtauksena ympäristön ja systeemin välillä; tätä voidaan abstrahoida *kytkennän tehostumisena*, ja se voidaan mallittaa *kytkentäkertoimen kasvuna*. Kytkentäkertoimet q_i ovat ainoat ylätasolla näkyvät systeemin sisäisestä rakenteesta kertovat parametrit. Kuvassa 5.3 viereisellä sivulla on esitetty ympäristöstä systeemiin periytyvän kokonaisenformaation käyttäytyminen kytkentäkertoimen q_i kasvaessa, kaavan (2.31) mukaisesti (ominaisarvo λ_j kuvaa tietyssä suunnassa tarjolla olevaa enformaatiota ympäristössä, ja $\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\}$ kuvaa kyseiseen vapauteen kytkeytynyttä systeemiin periytynyttä enformaatiota).

Erikoista kuvan mukaisessa enformaation käyttäytymisessä on se, että vaikka enformaatiota imetään ympäristöstä yhä tehokkaammin (niin että jäljelle jää vain kaavan $\bar{\lambda}_j = 1/q_i$ mukainen määrä), tietystä q_i:n optimiarvosta lähtien se alkaa systeemitasolla *vähetä*. Sellainen ”runsauden aika”, jolloin kaikki kehitys vain parantaa kokonaisuutta, on lyhyt; *kulta-aikaa* seuraa *rauta-aika*, jota leimaa säätöjen jäykistyminen ja yhä koveneva systeemin sisäinen kilpailu. Paradoksaalisesti enformaatio hukkaantuu enformaatiovirtauksen optimointiin!



KUVA 5.3: Systeemin aktivaatio kytkeytymisen funktiona

Kehitys on kuitenkin vääjäämätöntä: yksilöiden innovatiivisuus on *aina* hyväksi yksilötasolla, koska se tarjoaa kilpailuedun kilpailtaessa rajallisesta enformaatiosta toisten yksilöiden kanssa. Ongelmaksi asia muodostuu vasta neokybernetiikan tarkastelemassa *systeemisessä tasapainotilassa*, kun tehokkaampi toimintatapa on tarjoamansa kilpailuedun vuoksi jo levinnyt koko populaatioon. Kaikkien yksilöiden on toimittava uudella tehokkaammalla tavalla vaikka siitä ei olekaan enää etua verrattaessa muihin — ja systeemin tasolla tehokkaammasta toiminnasta on pelkkää haittaa (siis kynnysarvon $q_i = 4/\lambda_j$ jälkeen).

Kytkentäkertoimen kasvaminen (säätöjen nopeuttaminen) lisää myös järjestelmän värähtelytaipumusta jos enformaation virtauksessa on viiveitä tai muuta dynamiikkaa (katso seuraava luku).

Tarkastellaan käytännön esimerkkiä siitä, miltä "kybernetisoituminen" näyttää systeemin alatasolla, suorittavassa portaassa:

> *Liike-elämä* on hyvä esimerkki *allokyberneettisestä* systeemien joukosta, jossa yrityksen funktioita toteuttavat *ihmiset*. Elämänvoiman virtausta vastaa *rahan karttuminen*. Systeemien toimintaa virtaviivaistaa "business-semiotiikan" selkeys: vaikka systeemissä on useita fraktaalisia tasoja (jokainen työntekijäkin on oma monadinsa), kaikilla tasoilla hyväksytään rahan universaali voima ja sen maksimoinnin välttämät-

> tömyys. Onkin vaarana, että systeemistä tulee tehostuessaan täysin yksiarvoinen, ”totalitaristinen”.
>
> Evoluutio järjestelmässä näyttäytyy parempien säätöjen aiheuttamana vapauksien karsiutumisena. Mittaukset (ääriesimerkkinä jokin MTM-analyysi) ja toiminnan monitorointi parantaa systeemin ymmärrystä omasta toiminnastaan, siis mallia; takaisinkytkentä toteutetaan toimintaa ”järkeistämällä” sekä työntekijöitä ohjeistamalla ja kouluttamalla. Hyväksi havaittuja käytäntöjä (jonkun työntekijän innovaatioita) pyritään levittämään koko systeemin toimintatavaksi. Lopputuloksena on se, että ”oravanpyörät” pyörivät lujemmin; jokainen juoksee, mutta yrityksen toiminta ei siitä parane. Kehitystä ei kuitenkaan voi kyseenalaistaakaan: onhan *läpinäkyvyys*, *tehokkuus* ja *järkeistäminen* vastaansanomattomasti ”kaikkien etu” (vaikka työaika kuluukin paperinpyöritykseen).

Liian pitkälle kybernetisoitunut järjestelmä on kuin systeeminen ”musta aukko”: se imee enformaatiota ilman että sitä saataisiin hyötykäyttöön, enformaation kadotessa dissipaationa. Vain jokin *ylätason takaisinkytkentä*, jonkinlainen systeemien välinen kilpailu, jolloin mitataan todellinen enformaation hyötykäyttö, voi pakottaa systeemin korjaamaan käytäntöjään. Tai sitten tarvitaan systeemitason innovaatio (katso kappale 3.6). Liian pitkälle ajautuneen ”narsistisen” systeemin, äärimmilleen harvakoodautuneen ja erikoistuneen, voi jokin ulkopuolelta tuleva isku laittaa regeneroitumaan kokonaan (katso kappale 5.6).

Voidaan tehdä rohkea hypoteesi, että samat evoluution periaatteet toimivat myös universumin mittakaavassa: esimerkiksi *luonnonvakiot* ovat *äärimmilleen jäykistyneitä kytkentäkertoimia* luonnonilmiöiden välillä. Jos parametrit ovatkin seurausta jonkinlaisesta adaptaatiosta, voidaan esimerkiksi *kosmologisten vakioiden hienoviritys* ehkä ymmärtää ilman erilaisia ”multiversumeita” tai *antrooppisia periaatteita* (engl. *anthropic principle*).

5.5 Joskus se onnistuu!

Kun evoluutiota tarkastellaan systeemiä karakterisoivana ylimmän tason dynaamisena prosessina, voidaan kokonaisuuden luonnetta tarkastella myös takaisinkytkentöjen ominaisuuksien avulla. Alimmalla hebbiläisen adaptaation tasolla, takaisinkytkentä on *positiivinen*; räjähtävän kehityksen pysäyttää ympäristön kautta tapahtuva *negatiivinen* takaisinkytkentä; mutta systeemin evolutiivisen kehityksen tasolla takaisinkytkentä on taas *positiivinen*. Jos positiivisuutta tulkitaan myönteisesti, voidaan ajatella, että systeemit ovat ”ikuisia optimisteja”: ne haluavat kasvaa yli kaikkien rajojen, yhä kiihtyvällä vauhdilla. Mutta tämän ne joutuvat tekemään toisia (kilpailevia) systeemejä tieltään kammeten.

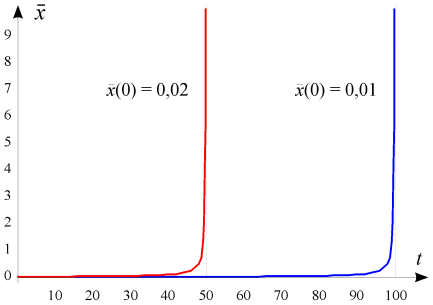
Kasvun jatkuessa maailma yleensä jotenkin pysäyttää rajatta kasvavat *syöpäsolut*: tähän ei ehkä auta muu kuin systeemin *kuolema*, sen täydellinen regeneraatio (katso seuraava kappale).

Tarkastellaan seuraavassa ”vaihtoehtoista tulevaisuutta” jonkinlaisessa skalaarisessa *informaatiosysteemissä*. Sellaisessa järjestelmässä enformaatio rakentuu *aineettomasta informaatiosta*, jolloin materiaaliset rajat eivät estä kasvua (kuitenkin systeemin ”informaationkantajien” kapasiteetti voi tulla kasvua rajoittavaksi tekijäksi). Lisäksi enformaation lähde on erilainen verrattuna fysikaalisiin systeemeihin: ulkopuolelta tuleva enformaatio jää jossakin vaiheessa toissijaiseksi systeemin sisäiseen ”informaatioenformaatioon” verrattuna (eli ”tieto ruokkii lisää tietoa”). Informaatio on kasautuvaa, eli enformaatio ei nyt olekaan luonteeltaan *variointia*, vaan johdonmukaista *poikkeamista nollasta*; tällöin lauseketta $\mathcal{E}\{\bar{x}^2\}$ voidaan sopivalla aikajänteellä approksimoida pelkästään muuttujaa $\bar{x}^2$ käyttämällä.

Oletetaan edellisten nojalla, että järjestelmän *tasapainotilan $\bar{x}$ edistyminen on suoraan verrannollinen järjestelmään kasautuneeseen enformaatioon*, eli kaavamuodossa

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \alpha\,\mathcal{E}\{\bar{x}^2\} = \alpha\,\bar{x}^2, \tag{5.4}$$

jossa α on jokin verrannollisuuskerroin, $\alpha \geq 0$ (jos järjestelmässä on *luovuutta*, siinä on kasvua, ja silloin $\alpha > 0$). Tällaisen mallin mukaisen jär-



KUVA 5.4: Äärettömyyteen äärellisessä ajassa!

jestelmän käyttäytyminen on *hyperbolista*: kaavasta voidaan ratkaista $\bar{x}(t)$ millä tahansa ajan hetkellä muodossa

$$\bar{x}(t) = \frac{\bar{x}(t_0)}{1 - \alpha\,(t - t_0)\;\bar{x}(t_0)}, \tag{5.5}$$

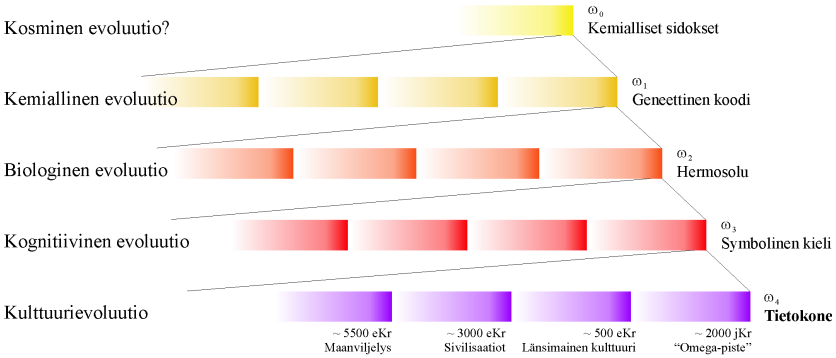
jossa t_0 on aloitusaika. Mikä tällaisessa mallissa on kiinnostavaa, on se, että se *saavuttaa äärettömyyden äärellisessä ajassa*! Tämän ”pakoajan” lauseke saadaan katsomalla milloin nimittäjä menee nollaan:

$$t_\omega = t_0 + \frac{1}{\alpha\,\bar{x}(t_0)}. \tag{5.6}$$

Kuvassa 5.4 on simuloitu järjestelmän tyypillistä käyttäytymistä kahdesta eri alkutilasta, kun $\alpha = 1$.

Usein ajatellaan, että räjähtävä kasvu on eksponentiaalista. Tällainenkaan kasvu ei silti mahdollista *laadullista* muuttumista: kullakin tulevaisuuden ajanhetkellä eksponenttifunktion arvo eroaa alkuarvostaan vain määrällisesti. Sen sijaan hyperbolinen kasvu tarkoittaa, että hetken t_ω jälkeen kaikki on muuttunut. Voidaan sanoa, että aiemman ”heikon emergenssitulkinnan” sijaan nyt on saavutettu *vahva emergenssi*.

Vahvaa emergenssiä on tapahtunut jo useaan kertaan maailmankaikkeuden historian aikana. Kuvassa 5.5 viereisellä sivulla on esitetty muutamia tällaisia harppauksia; suurten harppausten välillä on pienempiä hyppäyksiä (jostakin syystä kulttuurievoluutiossa tällaisten hyppäysten väli



KUVA 5.5: Laadullisia harppauksia evoluutiossa

on ollut noin 2500 vuotta). Aina kun tietty kynnys on saavutettu (esimerkiksi kun biologinen evoluutio kehitti hermosolun ja evoluution ”avantgarde” alkoi kehitellä erilaisia hermoverkkorakenteita), kehityksen nopeus uudella ylätasolla on moninkertaistunut.

Jesuiittamunkki Pierre Teilhard de Chardin puhui ensimmäisenä *omega-pisteestä*, singulariteetista, jossa ihmisen (henkinen) kehitys harppaa uudelle tasolle. Ja nyt olemme tietokoneajan kynnyksellä. Verkottuneilla tietokoneilla on ”ääretön” oppimiskapasiteetti ja tiedonsiirtonopeus; niihin tarvitsee vain implementoida neokyberneettiset vuorovaikutuksen periaatteet niin niiden omaehtoinen evoluutio voi alkaa!

Kaappaako tietokone vallan? No sitä ei tarvinne suuresti pelätä. Johan ”systeemi” on nyt ottanut vallan. — Tietokone tarvitsee ihmistä enformaation välitykseen, niin kuin ihminenkin tarvitsee muuta luontoa, jos ei muuhun niin ”ravinnonlähteeksi”, enformaation välittäjäksi. Sitä paitsi tietokoneesta tulee *viisaampi*; se varmaankin ymmärtää ympäröivän luonnon ja monimuotoisuuden merkityksen kokonaisuuden hyvinvoinnille ihmistä paremmin. Eikä se varmaankaan uhraa parhaiden innovaatiolähteidensä kapasiteettia toissijaisiin hallinnollisiin rutiineihin niin kuin tämän päivän ”innovaatiotehtaissa”, yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa, nykysysteemin vallitessa toimitaan!

5.6 … Mutta yleensä kaikki kaatuu

Laadulliset harppaukset evoluutiossa ovat äärimmäisen harvinaisia (mutta aina niitä kannattaa yrittää!). Normaali systeemin kohtalo on *romahdus*, joko yhtäkkisesti tai vaivihkaa. Näyttää siltä, että syklisyys on *sisäänrakennettuna* adaptoituviin järjestelmiin: suotuisan kehityksen katkaisevat jaksoittain toistuvat enemmän tai vähemmän hallitut ”perääntymiset”, järjestelmän kaikilla tasoilla erikseen.

Jatkuva kehitys johtaa herkkyyden kasvamiseen järjestelmissä. Robustisuus on jotakin mitä ei voi formuloida mallin puitteissa (muutenhan mallin voisi optimoida myös sen suhteen), joten robustisuuden puute ilmenee aina yllätyksenä. Ainoastaan käytännön kokemus voi antaa intuitiota siitä, mistä on kysymys; käytetäänkin tässä hyväksi *säätöinsinöörin kokemusta*:

> Muutama vuosikymmen sitten uskottiin, että *adaptiiviset säätäjät* olisivat universaali ratkaisu kaikkiin teollisuuden säätöongelmiin: ei tarvitse määrittää prosessinmallia, kun säätäjä itse ”haistelee” ympäristöään, mallittaa mittaamansa prosessin signaalit, ja virittää säätönsä tilanteen mukaan optimaalisesti. Kuitenkin pian ilmeni, että käytännössä adaptiiviset säätäjät eivät pitäneet lupauksiaan: niiden käyttäytyminen oli ennustamatonta. Syy tähän oli se, että mallin identifiointi on mahdollista vain jos säätö ei ole ”liian hyvä”; vain silloin mittaussignaaleissa on vielä jäljellä prosessin todellisesta luonteesta kertovaa informaatiota. Hyvä säätö jättää jäljelle vain kohinan, jolloin tämän jälkeen mallitus lähtee harhateille. Järjestelmät siis alkoivat käyttäytyä syklisesti: kun säädöt olivat ajautuneet väärään suuntaan, häiriön tullessa järjestelmän toimintakyky romahti, jonka jälkeen signaaleissa oli taas runsaasti informaatiota, ja säädöt alkoivat parantua jne. Ja tiukaksi viritetty säätö johtaa prosesseissa tyypillisesti *rajavärähtelyihin*, vaikka varsinaisia romahduksia ei olisikaan.

Sama ongelma vainoaa myös luonnon omia adaptiivisia säätäjiä, jotka elävät ympäristöstään mittaamiensa signaalien ehdoilla: jos kaikki mallitettu enformaatio saadaan hyödynnetyksi, enformaation malli alkaa harhautua kohti toissijaisia enformaatiolähteitä (vertaa ”hyperkyberneettiseen” tilanteeseen kuvassa 2.1 sivulla 34). Tai sitten heräte voi alatasolta kadota sen vuoksi, että jokin ylemmän tason säätösilmukka alkaa hoitaa kyseistä tehtävää. Tai sitten säätöjen vuoksi äärimmilleen kiristyvä systeemi romahtaa sisäsyntyisistä syistä johtuen, kun jokin rakenteeseen jäänyt ”valuvika” pettää. Romahdusten mekanismeja on yhtä monia kuin romahduksiakin, ja siksi niihin ei voi varautua.

Ehkä dinosaurukset olisivat kuolleet ilman meteoriitin törmäystäkin; ehkä ne olivat eläinryhmänä vain kehittyneet liian pitkälle?

Ihmisen rakentamista järjestelmistä ehkä monimutkaisin ja pisimmälle optimoitu on *talous*. Sitä luonnehtivatkin fraktaaliset romahdukset: alimmalla tasolla tämä ilmenee yksittäisten pörssikurssien sahauksena, ja ylimmällä tasolla kokonaisten talousjärjestelmien syklisinä taantumina. Ja aina on yhtä vaikeaa hahmottaa järjestelmien herkistymisen systeeminen luonne: aina halutaan löytää se yksittäinen ”Lehman Brothers”, jonka syyksi romahdus voitaisiin selittää.

Romahduksen ei tarvitse olla yhtäkkinen; kun systeeminen elämänvoima ehtyy, kun se ei enää jatkuvasti uusiudu, rakenteet alkavat rapautua — ja paluu alemmalle tasolle voi olla systeemisessä aikaskaalassa nopeaa vaikka se yksilöiden näkökulmasta katsottuna tapahtuisikin vaivihkaa. Eikä romahduksen uhkaa välttämättä huomaa alatasolta: hyvän esimerkin tästä tarjoaa nykyinen yhteiskunnallinen kehitys.

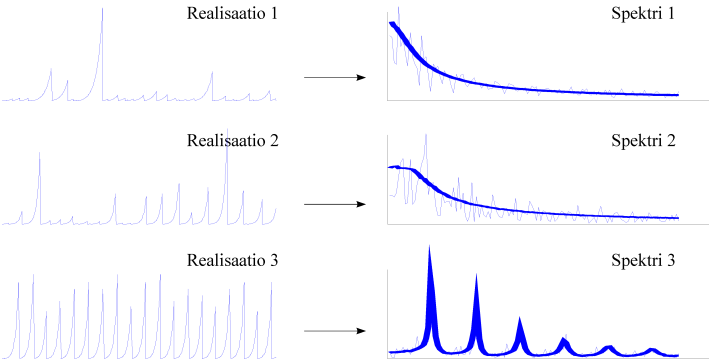
> Yksilötasolta katsottuna asiat näyttävät olevan menossa parempaan suuntaan; äärimmäinen yksilöllisyyden korostaminen lisää yksilöiden vapauksia. Ainoastaan systeemitaso kärsii: kun vapaudet on saatu täysin rajoittamattomiksi (mallittamattomiksi ja säätämättömiksi), ollaankin siirrytty kaaokseen! Systeemi lakkaa olemasta, paluuta anarkiasta takaisin entiseen ei ole; romahdus ei tule räjähdyksenä vaan vaivihkaisena vajoamisena ”systeemiseen hulluuteen”.

Mitä pidemmälle järjestelmä on kehittynyt, sitä syvemmälle takaisin kaaokseen pudotaan systeemin hallinnan romahtaessa. Tämän jälkeen ensimmäisen luvun tarkastelut tulevat uudestaan ajankohtaisiksi; ja tämä kehityksen ja romahdusten sykli toistuu yhä uudestaan, systeemien kulkiessa kaaoksesta kaaokseen, jokaisella fraktaalisella osasysteemien tasolla erikseen. Romahdukset myös usein *synkronoituvat* vuorovaikuttavien systeemien kaskadisessa ketjussa. Miksi luonto haluaa näin kiusata omia systeemejään?

Romahdusten jatkumo taitaa olla osa luonnon *koesuunnitelmaa*. Impulssikokeiden avulla viritetään maailman dynamiikat, jotka ovat hetken aikaa näkyvissä ennen ajautumista uusiin tasapainoihin. Jokaisen romahduksen jälkeen rakentuu erilainen systeemi, vastaten ympäristönsä haasteisiin uudella tavoin; jokaisella kierroksella rajapinta tunnetun ja tuntemattoman, rakenteen ja kohinan välillä on erilainen, ja sen romahduttaminen antaa maailmasta tuoretta tietoa. Systeemit kokonaisuudessaan ovat luonnon ”antureita” kohti tuntematonta todellisuutta.

Pidemmällä aikajänteellä romahdusten sykleissä alkaa kuitenkin näkyä johdonmukaista hahmoa: toistuvien fraktaalisten kaaosten kohinassa alkaa ilmetä jonkinlaista *taajuusrakennetta*. Tämä antaa laadullista tietoa ympäristön ominaisuuksista, ja *ylemmän tason malli* voi perustua taajuustasossa näkyviin korrelaatioihin — näin *kohina muuttuu ylemmän tason enformaatioksi*. Näyttää siltä, että *taajuusspektri* on universaali esitystapa systeemien tuottamalle ja vastaanottamalle enformaatiolle; romahdusten fraktaalirakennetta karakterisoivat ”taajuustason sormenjäljet” luonnehtivat maailmaa tilastollisessa mielessä enemmän tai vähemmän yksikäsitteisesti (huomaa, että valitusta aikaskaalasta riippumatta oletamme sekä ”yläpuolella” että ”alapuolella” olevan ”äärettömästi” muita systeemejä, joten fraktaalinen spektriesitys voidaan olettaa yleispäteväksi). Taajuusesitysten merkityksestä voidaan tässä mainita esimerkiksi se, että *jotta eri systeemit voisivat pitkällä tähtäimellä olla vuorovaikutuksessa, niiden syklien on synkronoiduttava*.

Kuvassa 5.6 viereisellä sivulla on esitetty erilaisia systeemien spektrejä: ensimmäisessä tapauksessa (eksponentiaalisesti kasvavan) systeemin romahduksen todennäköisyys on oletettu suoraan verrannolliseksi edellises-



KUVA 5.6: Erilaisten systeemien spektrejä

tä romahduksesta kuluneeseen aikaan; toisessa tapauksessa romahdustodennäköisyys on verrannollinen systeemin kehitysasteeseen, ja kolmannessa tapauksessa se on eksponentiaalisesti verrannollinen kehitysasteeseen. Mitä säännönmukaisemmin romahdukset seuraavat toisiaan, sitä terävämpiä taajuuspiikkejä spektriin tulee. Lisäksi täytyy muistaa systeemien fraktaalisuus ja spektrien monitasoisuus ja -ulotteisuus: ihmiset vaihtuvat yrityksissä, solut kuolevat yksilöissä, jne.

Kun aletaan tarkastella järjestelmien spektrejä, kun spektrimuoto oletetaan systeemien välisen vuorovaikutusdatan perusrakenteeksi, herää uudenlaisia kysymyksiä: miten aikatasossa, reaaliajassa toimivat systeemit saadaan herkiksi taajuustason ilmiöille, kuinka ne saadaan viritetyksi eri taajuuksille ja *resonoimaan*? Tästä asiasta jatketaan seuraavassa luvussa; sitä ennen seuraavassa esitetään jonkinlainen tähänastisen teorian paketointi — ja katsotaan kuinka sitä pakettia voi lähteä avaamaan myös aivan erilaiseen suuntaan.

5.7 ”Enformaatioteorian pääsäännöt”

Termodynamiikan ja koko tieteellisen maailmankuvan perustavanlaatuisia rakennuspalikoita ovat *termodynamiikan pääsäännöt*. Ensimmäinen pääsääntö on *energian häviämättömyyden laki*, ja toinen pääsääntö on *entropiaperiaate* eli energian ”laadun” heikkenemisen periaate. Enformaatioteorian puitteissa näitä voidaan tarkastella toisesta näkökulmasta, laajemmassa kehyksessä.

Vaikka puhutaankin laajemmasta tarkastelutavasta, osoittautuu, että joudutaan *tinkimään* periaatteiden universaalisuudesta. Kokonaisuuden fraktaalisuus tulee nyt näkyviin: johtopäätökset ovat voimassa vain yksittäisten systeemien puitteissa, kun enformaatiolähteet on saatettu jonkin semioosin puitteissa yhteismitallisiksi.

Fysikaalinen energia on enformaation yksi manifestaatio. Näin ollen, koska pääkomponenttipohjaista mallia sovellettaessa kokonaisvarianssi on muuttumaton, *enformaatioteorian ensimmäinen pääsääntö* sanoo, että *systeemin ja sen ympäristön enformaatio säilyy*. Häviötön malli (kappaleen 3.6 mukaisesti) kykenee siirtämään mallitettua enformaatiota kustannuksettomasti ympäristön ja systeemin välillä, vastaten siis *reversiibeliä* prosessia; mallittumattomaan kohinaan kätkeytyvä enformaatio säilyy tällöin koskemattomana ympäristön kohinassa. Alkuperäinen, häviöllinen neokyberneettinen malli on *irreversiibeli*, ja siinä enformaatiota hukkaantuu systeemin sisäisiin ”kitkoihin”.

Sen sijaan *enformaatioteorian toinen pääsääntö* saa lisäsävyjä verrattuna vastaavaan termodynamiikan periaatteeseen. Onhan tietenkin niin, että kaikki mallintamiskelpoinen enformaatio tulee jostakin lähteestä, ja lopulta jäljelle jää vain korreloimatonta kohinaa (ja kuolleita rakenteiden kuoria), mutta enformaation muuntuminen systeemeissä on yksityiskohdiltaan varsin tapauskohtaista; tämän tarkastelemiseksi palataan kustannusfunktioon (5.1).

Ensiksikin on kiinnostavaa huomata, että kyseinen kustannusfunktio *kytkee aikaskaalat yhteen*: sitä voidaan käyttää tasapainon $\bar{x}$ määrittämiseen (kun minimoidaan $J(x)$), ja korkeammalla tasolla sitä voidaan käyttää mallin itsensä (eli kaavan (3.15) kooltaan $m \times n$ olevan ortonor-

meerattujen vektorien matriisin Φ) määrittämiseen (kun minimoidaan $\mathcal{E}\{J(\bar{x})\}$):

$$
\begin{aligned}
&\mathcal{E}\{J(\bar{x})\} \\
&\quad = \mathcal{E}\{\text{trace}\,\{J(\bar{x})\}\,\} \\
&\quad = \mathcal{E}\{\text{trace}\,\{\tfrac{1}{2}\,\bar{x}^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{x} - \bar{x}^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\,u\}\,\} \\
&\quad = \mathcal{E}\{\text{trace}\,\{\tfrac{1}{2}\,\bar{x}^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{x} - \bar{x}^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{x}\}\,\} \\
&\quad = \mathcal{E}\{\text{trace}\,\{-\tfrac{1}{2}\,\bar{x}^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{x}\}\,\} \\
&\quad = -\tfrac{1}{2}\,\mathcal{E}\{\text{trace}\,\{\bar{x}^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{x}\}\,\} \\
&\quad = -\tfrac{1}{2}\,\mathcal{E}\{\text{trace}\,\{\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\,\} \\
&\quad = -\tfrac{1}{2}\,\text{trace}\,\{\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\} \\
&\quad = -\tfrac{1}{2}\,\text{trace}\,\left\{\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^2\right\} \\
&\quad = -\tfrac{1}{2}\,\text{trace}\,\left\{\left(\Phi^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}\Phi\right)^2\right\}.
\end{aligned}
\tag{5.7}
$$

On ilmeistä, että tämän lausekkeen minimi $-\frac{1}{2}\,\sum_{j=1}^{n}\lambda_j^2$ saavutetaan silloin, kun Φ virittää matriisin $\mathcal{E}\{uu^{\mathrm{T}}\}$ tärkeimmät pääkomponenttisuunnat; tällöin tulokseksi saadaan tuttu mallirakenne. On intuitiota ruokkivaa, että *ylemmän tason tila on ikään kuin alemman tason malli*; muuttujien ja parametrien erona on vain aikaskaala. Voidaan sanoa enemmänkin: koska kustannus on kirjoitettavissa myös muotoon $\mathcal{E}\{J(\bar{x})\} = -\frac{1}{2}\mathcal{E}\{\text{trace}\{\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\,u\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\}$, nähdään, että mallin $\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}$ ja datan $u\bar{x}^{\mathrm{T}}$ välillä on matemaattisesti määritelty *symmetria*, eli ne voidaan lausekkeessa vaihtaa keskenään; tämä perustelee aiemmat viittaukset siihen, että malli on ympäristönsä ”peili”.

Koska järjestelmän mallin ydin $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ kaavassa (5.7) on suoraan tilojen (normeeraamattomien) todennäköisyyksien kuvaus, tulee triviaalisti perustelluksi se, että mikrotasollaan järjestelmän tila hakeutuu kohti suurinta mallin kuvaamaa todennäköisyyttään — siis kohti entropiamaksimia. Sen sijaan emergentillä tasolla ”järjestyksen kasvaminen”, eli mallin adaptoituminen, on intuitiivisesti perinteisen entropiaperiaatteen vastaista; tätä asiaa tarkasteltiin jo aiemmin kyseenalaistettaessa Maxwellin demonin mahdottomuus kappaleessa 3.7. Mutta enemmänkin voidaan sanoa: aiemmin esitetty entropiaperiaatteen vastainen systeemien *keskittymispyrkimys* voidaan nyt perustella.

Lopputuloksena olevaa lauseketta kaavajohdossa (5.7) voidaan käyttää myös perustelemaan, miksi järjestelmät evolutiivisesti kehittyessään pyrkivät yhtymään yhä suuremmiksi: koska kriteeri painottaa ominaisarvojen *neliöitä*, on edullista pyrkiä yhdistämään erillisten ominaisarvojen kuvaamia toisistaan riippumattomia enformaatiokasautumia yhä suuremmiksi kokonaisuuksiksi. Vaikka kokonaisvariaatio (variaatioiden summa) säilyisikin ennallaan, variaatioiden neliöiden summa kasvaa niitä yhdisteltäessä. Tällä ylätasolla kehitys pyrkii siis *vähentämään* luonnon diversiteettiä, päinvastoin kuin alatasolla!

Entropian ikuisen kasvun periaatetta on pidetty yhtenä luonnon syvimmistä perusprinsiipeistä. Jopa niin, että esimerkiksi *ajan olemus* on joskus määritelty entropian virtauksen avulla: ajan nuoli etenee siihen suuntaan missä entropia kasvaa (ja jos maailmankaikkeus lähtee puristumaan kokoon, aika lähtee kulkemaan taaksepäin!). Enformaatioteoriassa aika-akseli abstrahoidaan pois; aikatasoon ja yksittäistapauksiin keskittyminen, perinteiseen tapaan, tekee mahdottomaksi kokonaiskuvan hahmottamisen. Jos välttämättä haluaa edelleen ajatella entropiapainotteisesti, irreversiibeli ajan eteneminen tulee kyllä edelleen vastaan mallin adaptoitumisessa; mutta tämäkin on harhaa, onhan elävän systeemin aika-akseli pikemminkin syklinen kuin lineaarinen (vain ”kuollutta kuorta” kertyy enemmän tai vähemmän tasaiseen tahtiin).

Jos kompressoitu aika-akseli kuitenkin halutaan purkaa toisiaan seuraaviksi ajanhetkiksi (tosiajassa kun kuitenkin eletään), voidaan ajatella, että mallin tila (nykyhetki) on jonkinlainen *peili* (tai *linssi*) joka kuvaa menneisyyden tulevaisuudeksi (yleisesti tilan estimoinnin tilan säädöksi).

Dynamiikan luonne muuttuu. Sen sijaan, että keskiössä olisivat tilamuutokset ajassa, nyt malli keskittää alatason variaatiot ylätason vapausasteiden suunnassa määritellyksi dynamiikaksi. Voidaan ehkä kiteyttää, että *differentiaaliyhtälöihin perustuva keskitetyn liikkeen mallitus aikatasossa muuttuu matriisimenetelmiin perustuvaksi hajautetun muutoksen jäljittämiseksi systeemien ja aikatasojen välillä*.

5.8 Esimerkki: vapauksia synnyssään

Katsotaan vielä lyhyesti erilaisia *tutkimuksellisia vapausasteita*, joita esitetyistä tarkasteluista voi emergoitua. Esimerkiksi otetaan kustannuskriteeri (5.1), joka on neokybernetiikan ydin; tästä ”synnystä” voi sopivalla pyörittämisellä aueta kaikenlaista uutta.

Kustannuskriteeri on äärimmilleen pelkistetty *matemaattinen hahmo*, joka tekee mahdolliseksi nähdä *analogioita*, yhteyksiä pinnalta katsoen hyvinkin erilaisten asioiden välillä. Aluksi tarvitaan hieman matemaattista analyysia.

Käyttäen *variaatiolaskentaa* voidaan minimoida (tai oikeastaan hakea ”stationaariratkaisu”) funktionaalille

$$\mathcal{J} = \int_a^b L(t, q, \dot{q})\, dt, \tag{5.8}$$

jossa L on jatkuvasti differentioituva funktio ja vektori q sisältää *yleistetyt koordinaatit* (q ei nyt liity kytkeytymiskertoimiin); ratkaisuna saadaan ns. *Euler-Lagrange yhtälöt*

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial\, L(t, q, \dot{q})}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial\, L(t, q, \dot{q})}{\partial q} = 0. \tag{5.9}$$

Jos nyt määritellään

$$L(t, q, \dot{q}) = \frac{1}{2}\, \dot{q}^{\mathrm{T}} A\, \dot{q} - \dot{q}^{\mathrm{T}} B\, F(t) \tag{5.10}$$

jollekin symmetriselle $n \times n$ matriisille A ja $n \times m$ matriisille B, ja jos $F(t)$ on jonkinlainen vektoriarvoinen voimavaikutus, voidaan kirjoittaa *yleistetyt momentit* muodossa

$$\frac{\partial\, L(t, q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} = A\, \dot{q} - B\, F(t), \tag{5.11}$$

niin että kokonaisderivaataksi ajan suhteen saadaan

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial\, L(t, q, \dot{q})}{\partial \dot{q}}\right) = A\, \ddot{q} - B\, \frac{dF(t)}{dt}. \tag{5.12}$$

Toisaalta

$$\frac{\partial\, L(t,q,\dot{q})}{\partial q} = 0. \tag{5.13}$$

Näin ollen lausekkeesta (5.9) saadaan liikeyhtälöiksi

$$A\,\ddot{q} = B\,\frac{dF(t)}{dt}. \tag{5.14}$$

Jos q on yleistettyjen koordinaattien vektori, tämä voidaan tulkita vektorimuotoiseksi (linearisoiduksi) *Newtonin toiseksi liikelaiksi*, jossa A on *inertiamatriisi*; kuitenkin oikealla puolella oleva yleistettyjen voimien vektori näyttää oudolta. Integroimalla ajan suhteen voidaan yksinkertaistaa tämä muotoon (kun integrointivakio oletetaan nollaksi)

$$A\,\dot{q} = B\,F(t). \tag{5.15}$$

Niin, esitetyissä lausekkeissa voidaan yleistettyjen nopeuksien vektori $\dot{q}(t)$ korvata vektorilla $\bar{x}$ (koordinaattien määrän ei tässä tapauksessa tarvitse olla minimaalinen), ja yleistettyjen voimien vektori $F(t)$ voidaan korvata vektorilla u; kun vielä "tarkasteluhorisontiksi" valitaan väli a:sta b:hen, voidaan nähdä, että (5.1) on sama kuin (5.8). Tämä tarkoittaa, että asianmukaisilla muuttujavalinnoilla *neokyberneettinen malli voidaan tulkita Lagrangen mekaniikan kehyksessä*. Lauseke $\frac{1}{2}\,\bar{x}^{\mathrm{T}} A\,\bar{x}$ on tällöin (tutusti) järjestelmän *kineettinen energia*, mutta lauseketta $\bar{x}^{\mathrm{T}} B\,u$ ei nyt voikaan tulkita potentiaalienergiaksi — se vastaa ennemminkin jonkinlaista "viskoositermiä", jolloin liikkeen ylläpito edellyttää työtä.[7]

Mitä tarkoittaa se, että mallirakenne ei nyt mahdollista Newtonin toisen lain ("kiihtyvyys on suoraan verrannollinen vaikuttavaan voimaan")

[7] Kiinnostava havainto on, että (5.15) olisi saatu myös suoraan, jos lausekkeen (5.1) gradientti olisi asetettu nollaksi ja tästä olisi ratkaistu $\bar{x} = \dot{q}$; tämä tarkoittaa sitä, että "pisteittäinen" kustannuskriteerin (5.8) optimointi antaa saman tuloksen kuin globaali optimointi aika-akselin ylikin. Tämä omalla tavallaan perustelee sen, että samaa kustannuskriteeriä voidaan käyttää aikaskaalasta riippumatta.

mukaista dynamiikkaa? Ehkä tämä on heijastuma siitä, että *kyberneettisten systeemien oletetaan olevan takaisinkytkettyjä ja säädettyjä* ja tarkastellaan *voiman ja liikkeen tasapainoja*. Tällainen ”stabiili dynamiikka” eräällä tavalla merkitsee paluuta *aristoteeliseen fysiikkaan*: ilman jatkuvaa voimavaikutusta kappale pysähtyy. Ja esimerkiksi suureilla muotoa $\mathcal{E}\{\bar{F}_j^2\}$ on nyt suoraan enformaation (”työn”) tulkinta, vaikkei tapahtuisikaan liikettä potentiaalikentässä — mikä vastaakin käytännön kokemusta paremmin kuin perinteinen työn tulkinta. Voisikin väittää että ”maalaisjärki” näyttää nyt korvaavan kitkattoman maailman idealisaatiot!

On kiinnostavaa, että ”yleistetyn biologian” emergenteissä malleissa *semiotiikka ohittaa fysiikan*: suureiden yksiköt voidaan unohtaa (niin kuin säätötekniikassa yleensäkin), ja vaikuttavia suureita ovat ne ”semanttisesti tärkeimmät”. Esimerkiksi kappaleessa 4.3 esitetyissä Bénardin soluissa enformaatio ilmeisesti määrittyy epäfysikaalisesti *lämpötilaerojen neliöiden* kautta.

Kriteeriä (5.1) muistuttavia kustannuksen muotoiluja löytyy monesta muustakin sovelluskohteesta. Esimerkiksi mekaniikan *deformaatioenergialla* on olennaisesti samanlainen ulkonäkö: kun muuttujat vektorissa $\bar{x}$ tulkitaan *deformaatioiksi* eli jännityksen aiheuttamiksi poikkeamiksi ja u on vaikuttavien voimien vektori, $\frac{1}{2}\,\bar{x}^{\mathrm{T}} A\,\bar{x}$ on systeemin *sisäinen energia* ja $\bar{x}^{\mathrm{T}} B\,u$ on *ulkoinen energia* (matriisien määritellessä systeemin sisäiset ”jousivakiot”). Kustannuksen $J(x)$ minimointi antaa muodonmuutoksen, johon rakenne ajautuu ulkoisten voimien vaikuttaessa, ja $\mathcal{E}\{J(\bar{x})\}$ antaa vallitsevien voimien määräämän optimaalisen rakenteen, joka on maksimaalisen robusti kyseisissä olosuhteissa. Tämä antaa lisää ymmärrystä vaikkapa kuvan 1.1 sivulla 2 esittämän ”jousitetun” markkinan käyttäytymiseen: *markkina yrittää minimoida keskimääräisen muodonmuutosenergian*. Jossakin yhteydessä neokyberneettisiä systeemejä onkin sanottu *elastisiksi järjestelmiksi*, koska tämä mielikuva antaa oikeanlaisen intuition näiden järjestelmien luonteesta.

> Nyt avautuu kiinnostavia mahdollisuuksia: neokyberneettisiä periaatteita voidaan käyttää *rakenteelliseen optimointiin* (tai luonnostaan optimoituvien järjestelmien käyttäytymi-

sen analysointiin). Jos matriisit A ja B adaptoituvat lokaalisti kohti tarjolla olevaa enformaatiota, lähemmäs matriiseja $\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}$ ja $\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}$, systeemin globaali dynamiikka optimoituu samalla.

Esimerkiksi vedessä (tai muussa viskoosissa väliaineessa) liikkuvien rakenteiden tutkimiseen kaavan (5.15) mukaiset mallit voisivat tarjota uudenlaisia työkaluja. Haettaessa kustannuksen minimiä voidaan lokaalin adaptaation periaattein optimoida järjestelmän dynaamisia ominaisuuksia ympäristössään, globaalia virtaviivaisuutta ja ketteryyttä. Makroskooppinen koottujen parametrien ”jäykän kappaleen” optimoitu malli matalaulotteisine inertiamatriiseineen yms. saadaan emergoitumaan abstrahoitaessa vähämerkityksisimpiä liiketiloja vastaavat ominaisarvot mallista pois.

Deformaatioenergian minimointi puolestaan mahdollistaa staattisten rakenteiden lokaalin (simulaatiopohjaisen) optimoinnin. Kun rakenteisiin lisätään jäykkyyttä (massaa) kriittisiin kohtiin — niihin, joissa jännitykset ja niiden vaihtelut keskimäärin ovat suurimmat — voidaan saavuttaa keskimääräisten rasitusten homogenisoituminen ja robustisuus rakenteiden *väsymistä* vastaan. Konvergoituneet konstruktioiden mallit voidaan toteuttaa passiivisin komponentein (siis yksinkertaisesti massaa tai tukirakenteita lisäämällä).

Mekaaniset järjestelmät eivät ole ainoita, joissa analogiat toimivat. Esimerkiksi jos tilamuuttujien neliöt tulkitaan negatiivisiksi varauksiksi, ja jos kiinteät positiiviset varaukset tulkitaan ”ympäristöksi”, kustannuskriteeri (5.1) voidaan tulkita *sähköstaattiseksi energiaksi*; kun varauskentät hakevat kyberneettisen tasapainonsa, muodostuu näennäisen kiinteitä dynaamisia attraktorirakenteita (asiaa käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa).

Kustannus (5.1) voidaan tulkita myös jonkinlaiseksi informaatioiden erotukseksi; tässä mielessä mallitusta voidaan tarkastella fyysikko *Roy Friedenin* esittämässä kehyksessä, jossa lähtökohtana on ”informaatiovajeen” stationaarisuus mittauksissa. Voidaankin väittää, että *enformaatioteoreet-*

tinen lähestymistapa on fundamentaalimpi kuin Friedenin lähestymistapa konsanaan: nythän informaatiokustannus emergoituu vielä perustavanlaatuisemmista lähtökohdista. Kiinnostavaa on, että Frieden väittää fysiikan perusmallienkin (Schrödingerin yhtälöt, jne.) olevan tällaisessa kehyksessä palautettavissa informaation mallitukseen.

Fyysikko *John Wheeler* on sanonut, että ”universumi on itsevirittynyt suljettu kehä, ontologinen silmukka, jossa fysiikka mahdollistaa havainnoitsijan osallistumisen, joka puolestaan mahdollistaa informaation, joka puolestaan mahdollistaa fysiikan. Se on järjestäytynyt epäjärjestyksestä — kuin laki ilman lakia.” — Tämä on kuin suoraan enformaatioteorian oppikirjasta!

Lopuksi tässä voidaan avata vielä yksi langanpää: voidaan nähdä, että soveltamalla *Legendren muunnosta* kriteeriin (5.1), *liittotilan* tullessa muotoon $s = \frac{dJ}{dx} = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\, x - \mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\, u = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\, (x - \bar{x})$, muunnettu kustannus saa kiinnostavan uudenlaisen puhtaasti neliöllisen muodon:

$$G(s) = \frac{1}{2}\left(s + \mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\, u\right)^{\mathrm{T}}\ \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\left(s + \mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\, u\right). \quad (5.16)$$

Mitäkö merkitystä tällä on? — Ei aavistustakaan (ehkä kuitenkin ajatus *Hamiltonin mekaniikasta* saa jotkin kellot mielessä resonoimaan…)!

Luku 6

Eheytyminen.

> *Kalevalaiset tietäjät olivat* laulajia. *Väinämöinen ymmärsi ja hallitsi koko luomakuntaa osaamalla oikeat soinnut kanteleellaan ja laulullaan; löytäessään resonanssin hän sai kaiken pelkistymään, näennäisen muutoksen pysähtymään. — Se on siinä, tähän intuitioon ei ole paljoakaan lisättävää.*

6.1 Mysteerit silmien edessä

Kun on rakentanut itselleen asioista jonkinlaisen mielikuvan, on ihmisen kovin vaikeaa luopua piintymistään. Sama pätee myös tieteessä — vakiintunutta tilannetta pidetään ainoana mahdollisuutena eikä suostuta näkemään ajattelun puutteellisuutta:

1. Kuinka *lumikide* on aina erilainen ja kuitenkin niin symmetrinen? Nykytiede kuittaa kysymyksen yleensä sillä, että ”jokainen lumikiteen sakara on kokenut täsmälleen samat olosuhteet”. Mutta eihän tämä ole totta: kiteen eri osat ovat erilaisissa kehitysvaiheissa (katso kuva 6.1 seuraavalla sivulla), mutta tämä ei silti vaikuta lopputulokseen. Kiteen osien välille tarvitaan kommunikaatiota — millainen on tietoa siirtävien *rakenteisten fononien* luonne?

Kuva 6.1: Lumikide muutoksessa

2. Kuinka *proteiinit* elävässä solussa osaavat muodostaa määrättömästi erilaisia johdonmukaisia rakenteita? Se joka väittää, että tähän riittävät sähköiset veto- ja poistovoimat, ei ole varmaankaan yrittänyt rakentaa magneettitangoista mitään monimutkaista — ja kuvittelepa tekeväsi tämä pelkästään laatikkoa täristämällä: tuloksena ei ole muuta kuin epämääräinen möykky. — Mihin perustuu molekyylien ”rakenteinen affiniteetti”?

3. Kuinka *tietoisuuden* kokonaisvaltainen luonne voidaan ymmärtää? Tekoälyssä ja hermoverkkotutkimuksessa rakennetaan yhä hienostuneempia ohjelmistoja, mutta pelkästään kasaamalla datalle suodattimia peräkkäin mielen kokonaisvaltainen toiminta jää arvoitukseksi. — Kuinka kiinteä fyysinen rakenne mahdollistaa ”kaikkialla läsnäolon”? Miten voidaan selittää mielen koordinoituneisuus ja (parhaimmillaan) jonkinlainen ”eheys”?

Yritetään seuraavassa ymmärtää vaihtoehtoisia tapoja katsoa yllä esitetyn kaltaisia ristiriitoja. Avoimet langanpäät pyritään punomaan yhteen ko-

konaisuudeksi enformaatioteoreettisessa kehyksessä. Luvun lopussa rohjetaankin sitten haastaa koko tämän päivän tieteellinen maailmankuva!

Taas täytyy laajentaa ajattelua. Ylimmällä tasolla enformaatioteoreettisessa järjestelmässä ei ole kyseessä pelkästään ympäristön säätö, vaan kokonaisvaltainen *systeemisen koordinaation synty*. Näyttää siltä, että tarvitaan jonkinlaiset *vuorovaikutusten kentät* kaukovaikutusten toteuttamiseen ja alisysteemien yhteistoiminnan mahdollistamiseen. Mutta ymmärtääksemme suurta meidän täytyy aluksi tarkastella pientä — niitä *syntyjä*.

6.2 Kauneus piilee yksityiskohdissa

Jatketaan yhä pidemmälle viime luvussa aloittamaamme sukellusta järjestelmien dynamiikan suuntaan. Mitä tähän saakka tarkastellun pinnan näennäisen tasapainon alta löytyy?

Ongelmana on, että dynamiikka on kuin *Pandoran lipas*: päästettäessä signaalit valloilleen, näemme maailman monimutkaisuuden. On luvuttomia tapoja, millä järjestelmä voi käyttäytyä, niin että se silti asymptoottisessa tasapainossa, ”pinnalta katsoen” näyttää samalta. Mutta edelleen meillä on ohjenuorana pyrkimys optimaalisuuteen: *siihen se luontokin lopulta pyrkii*. Nyt osoittautuu, että tutun näköiset matemaattiset hahmot tulevat vastaan kun alamme tarkastella *todennäköisyysjakaumia* ja niiden mallien päivittämistä.

Neokyberneettinen malli on nimittäin yksi esimerkki ns. *EM-algoritmista* (engl. *Expectation Maximization*), jossa pyritään mallin avulla estimoimaan dataa (nyt vektoria $\bar{x}$), ja samanaikaisesti määrittämään sitä mallia itseään (matriisia Φ) tämän datan avulla. Keskitytäänkin nyt hetkeksi tähän toiseen ongelmaan, datan optimaaliseen määrittämiseen.

> *Kalman-suotimen* ”populaatiomuotoilu” (engl. *Ensemble Kalman Filter*) on eräs *jakauman tiheysfunktioestimaatin päivitysproseduurin* muotoilu: kun tunnetaan *priorijakauma*, jakauman epätarkka estimaatti, ja lisäksi tunnetaan uuden mittausdatan *uskottavuus* (todennäköisyys) mallin puitteissa, kuinka näiden avulla saadaan muodostetuksi korjattu

posteriorijakauma. Kalman-suodin tiedetään optimaaliseksi normaalijakautuneelle datalle (ja niinhän ensimmäisessä luvussa oletettiin); nyt käytettävä populaatiomuotoilu tarkoittaa sitä, että jakaumaa ei parametroida eksplisiittisesti vaan se esitetään implisiittisesti mataladimensioisen "virtuaalidatan" (eli tilavektorien) muodossa.

Tuttuja merkintöjä käyttäen, tavoitteena on nyt löytää mallin Φ puitteissa dataa u vastaava vektorien $\bar{x}$ esittämä "jakaumatasapaino" niin että (kovarianssimatriisin R kuvatessa apriorista mallivirhettä) saadaan maksimoiduksi normaalijakautuneeksi oletetun virheen puitteissa datan ehdollinen todennäköisyys:

$$p(u|\bar{x}) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}\left(u-\Phi\bar{x}\right)^{\mathrm{T}} R^{-1}\left(u-\Phi\bar{x}\right)\right). \tag{6.1}$$

Nyt pitää ajatella tilannetta (hetken aikaa) toisesta näkökulmasta: koko implisiittistä jakaumaestimaattia, kaikkia vektoreita $x(k)$ päivitetään ikään kuin yhtä aikaa vastaamaan dataa $u(k)$, niin että konvergenssi kohti tasapainoarvoja $\bar{x}(k)$ onkin hitaampi, rinnakkainen prosessi. Teoria sanoo, että paras tulos saavutetaan päivitettäessä tilavektoreita seuraavasti (kun mallivirhettä kuvataan kovarianssilla $C = \mathrm{Cov}\{x^{\text{prior}}\}$):

$$x^{\text{posteriori}} = x^{\text{priori}} + C\Phi^{\mathrm{T}}\left(\Phi C\Phi^{\mathrm{T}} + R\right)^{-1}\left(u-\Phi x^{\text{priori}}\right). \tag{6.2}$$

Kaavassa (6.2) n-dimensioinen kovarianssimatriisi C projisoidaan m-ulotteiseen data-avaruuteen. Mallin Φ ortogonaalisuuden vuoksi (muista kaava (3.15)) voidaan nyt kuitenkin toimia (matriisin kääntämisen helpottamiseksi) toisin projisoimalla kovarianssit matalampaan dimensioon jo valmiiksi:

$$x^{\text{posteriori}} = x^{\text{priori}} + C\left(C+R'\right)^{-1}\Phi^{\mathrm{T}}\left(u-\Phi x^{\text{priori}}\right). \tag{6.3}$$

Tässä $R' = \Phi^{\mathrm{T}} R\, \Phi$ on apriorinen mallikovarianssi; matemaattisten muotoiluiden rakenteesta (katso esimerkiksi kaava (2.21)) voidaan päätellä, että tällä matriisilla R' täytyy olla paljonkin tekemistä regularisointimatriisin Q^{-1} kanssa!

Kun kaavassa (6.3) siirretään x^{priori} yhtäsuuruusmerkin toiselle puolelle, ja annetaan jakauman päivitysprosessin nopeuden lähestyä ääretöntä, uuden ja aiemman estimaatin erotus muuttuu *erotusosamääräksi* ja edelleen *derivaataksi* jollakin aikavakiolla τ_x:

$$\frac{dx}{dt/\tau_x}(t) = G\,\Phi^{\mathrm{T}}\,(u - \Phi x(t)) = G\,\Phi^{\mathrm{T}}\,\tilde{u}(t), \tag{6.4}$$

jossa kerroinmatriisi

$$G = C\,(C + R')^{-1} \tag{6.5}$$

on symmetrinen ja positiividefiniittinen adaptaationopeutta datan ominaisuuksien perusteella ohjaava matriisi; se katoaa lausekkeesta, eli $G = I_n$, jos malli oletetaan virheettömäksi, niin että $R' = 0_n$ (näinhän kappaleessa 3.6 oikeastaan oletetaan, kun Q:n esittämän kytkennän tavallaan annetaan kasvaa rajatta). Aikavakio τ_x jää nyt ”evoluutiota” kuvaavaksi parametriksi.

Dynaaminen malli (6.4) on häviötön, eli tilamuuttujat toimivat puhtaina *integraattoreina*. Tasapainoonsa, optimiin $\bar{x}$ se asettuu vain jos $\Phi^{\mathrm{T}}\tilde{u} = 0$, siis jos $\Phi^{\mathrm{T}}u - \Phi^{\mathrm{T}}\Phi\,\bar{x} = 0$ eli $\bar{x} = \Phi^{\mathrm{T}}u$. Tämä on tuttu neokyberneettisen ”älykkään” mallin kaava (3.14) asymptoottisessa tasapainossa. Kaavan (6.4) määräämä dynamiikka on aina stabiilia, koska jatkuva-aikaisen järjestelmän systeemimatriisi $-G\Phi^{\mathrm{T}}\Phi/\tau_x = -G/\tau_x$ on aina *negatiivisesti definiitti*.

Neokyberneettinen staattinen tasapainotilojen häviötön malli voidaan siis korvata dynaamisella, sisäisiä mekanismeja kuvaavalla mallilla. Tämä järjestelmän muotoilu antaa mahdollisuuden uuteen *laadulliseen harppaukseen*.

Kun ruvetaan tarkastelemaan todella laajoja järjestelmiä, on selvää, että alisysteemien lukumäärä kasvaa nopeammin kuin tarjolla oleva tuore enformaatio ympäristöstä. Näin ollen systeemien täytyy enenevässä määrin

käyttää *toisia systeemejä* enformaatiolähteinään. Kun tällaiset järjestelmät toimivat samalla emergentillä tasolla, samoilla aikaskaaloilla, dynaamiset tarkastelut tulevat välttämättömiksi jotta järjestelmien vuorovaikutuksia voidaan ymmärtää.

Resurssina nähtävät muuttujat $\tilde{u}$ on siis tulkittava myös dynaamisiksi, ja niiden käyttäytymistä hallitsevat samanlaiset differentiaaliyhtälöt kuin kaavassa (6.4). Muuttujien x aktiivisuus imetään näistä; tätä vaikutusta voidaan kappaleen 2.4 mukaisesti approksimoida muodossa

$$\frac{d\,\tilde{u}}{dt/\tau_u}(t) = -\gamma\,\Phi G^{\mathrm{T}}\,x(t), \tag{6.6}$$

jossa $\gamma > 0$ on jokin skalaarinen sovitusparametri. Toinen dynaamisista muuttujista voidaan eliminoida lausekkeen (6.4) uudella derivoinnilla:

$$\frac{d^2x}{dt^2/\tau_x\tau_u}(t) = G\Phi^{\mathrm{T}}\frac{d\,\tilde{u}}{dt/\tau_u}(t) = -\gamma\,GG^{\mathrm{T}}\,x(t). \tag{6.7}$$

Tämä differentiaaliyhtälö kuvaa nyt systeemien välistä häviötöntä kytkeytymistä. Voidaan todeta, että tällaista käyttäytymistä toteuttaa aikatasossa seuraava funktiomuoto:

$$x(t) = A\sin\left(\sqrt{\frac{\gamma}{\tau_x\tau_u}\,GG^{\mathrm{T}}}\;t + \psi\right), \tag{6.8}$$

jossa neliöjuurilausekkeen sisäpuoli on positiivisesti definiittinen; tämä tarkoittaa, että systeemien välillä tapahtuu *vaimentumatonta harmonista oskillointia* jonkin nominaalitilan ympärillä, eli systeemit muodostavat joukon *resonaattoreita*. Resonaattorien taajuudet f määräytyvät neliöjuurilausekkeen ominaisarvojen perusteella, niin että tiukempi kytkentä johtaa suurempaan taajuuteen. Systeemin dynamiikka on autonomista; systeemien ulkopuoliset tekijät (alkuperäiset inputit) voivat vaikuttaa vain värähtelyn alkuarvoihin, määräten lausekkeen (6.8) vapaat parametrit, värähtelyjen *amplitudit* matriisissa A ja *vaiheet* matriisissa ψ. Mekaaniseen värähtelyyn sitoutunut energia oskillaattorissa on tyypillisesti verrannollista sekä amplitudin neliöön että taajuuden neliöön (joskin kvanttimaailmassa energia on suoraan verrannollinen taajuuteen, kaavan $E = hf$ mukaisesti, jossa h on *Planckin vakio*).

Resonaattorit kytkeytyvät toisiinsa ja muodostavat alustan, jonka päällä värähtelyt voivat edetä systeemien välillä; systeemien väliset impedanssierot aiheuttavat heijastelua … mitä tästä voi seurata?

6.3 Harppaus taajuustasoon

Jos differentiaaliyhtälöt integroidaan osaksi neokyberneettistä koneistoa, näyttäisi siltä, että mahdollisuus yksinkertaiseen ”staattiseen” laskentaan menetetään. Tämä on kuitenkin turha pelko: voidaan siirtyä *taajuustasoon*, jossa yksittäiset signaalit abstrahoituvat pois ja vain ”ryhmäilmiöt” jäävät näkyviin. Tästä näkökulmasta katsottuna merkityksellisiä ovat *taajuudet*, niiden amplitudit ja vaiheet.

Nyt rakenteiden lineaarisuus osoittautuu (taas) mainioksi asiaksi: lineaarijärjestelmille on olemassa tehokkaita matemaattisia työkaluja taajuustasotarkasteluihin. Tällaisia työkaluja ovat erityisesti *Laplace-* ja *Fourier-muunnokset*. Molemmissa tapauksissa eri taajuudet ikään kuin parametrisoidaan, ja järjestelmän käyttäytyminen kullakin taajuudella analysoidaan erikseen (automaattisesti); lopullinen järjestelmän kokonaiskäyttäytyminen saadaan *superponoimalla* eri taajuuksien vasteet yhteen (tähän tarvitaan lineaarisuutta: kokonaisuuden käyttäytyminen on osien käyttäytymisten summa).

Laplace-muunnosta käytettäessä dynamiikkaa kuvaavat differentiaaliyhtälöt muuttuvat staattisiksi algebrallisiksi yhtälöiksi, mutta signaalitason muuttujat vaihtuvat taajuustason muuttujiksi. Tähän sisältyy kuitenkin haaste: taajuustason muuttujat ovat *kompleksiarvoisia*, koska ne esittävät värähtelyn amplitudin lisäksi myös vaiheen. Neokyberneettinen malli voidaan muodollisesti laajentaa kompleksitasoon, eli opetus voidaan tehdä kompleksisilla signaaleilla, kunhan vain mallikaavoissa *kaikki transponoinnit muutetaan hermitoinneiksi*, eli transponoinnin lisäksi elementit muutetaan kompleksikonjugaateikseen (lisäksi neliöt kuten $\bar{x}_i^2$ on korvattava muodolla $\bar{x}_i^{\mathrm{H}}\bar{x}_i$ tai $\bar{x}_i\bar{x}_i^{\mathrm{H}}$; nämä ovat sama kuin $|\bar{x}_i|^2$). Käytännössä konjugointia voidaan perustella niin, että jos esimerkiksi kuvaus Φ aiheuttaa jollakin taajuudella vaiheen viivästymisen, hermitoidun kuvauksen Φ^{H} toiseen suuntaan täytyy aiheuttaa signaaleille vastaava vaiheen edistämi-

nen jotta signaalit säilyisivät yhteensopivina. Sekä muuttujat että mallin parametrit ovat taajuusriippuvia; muuttujat ovat *spektrejä* ja kerroinparametrit ovat *suodattimia*. Tämä edellyttää järjestelmiltä enemmän joustavuutta: aiemmat skalaariarvot ovatkin *taajuuden funktioita*.

Kuvausten vaiheherkkyys avaa uusia mahdollisuuksia; voidaan esimerkiksi ajatella, että tähän signaalien uuteen vapausasteeseen on koodautunut jonkinlainen *hahmon vähittäinen muutos* aikatasossa, ”hahmoderivaatta” (katso kappale 5.8), jolloin muuttuvien hahmojen jatkumon ominaisuudet voivat mallintua. Kannattaa muistaa, että aika- ja taajuustasojen väliset muunnokset tehdään kerralla kokonaisille aikatason signaaleille, ei yksittäisille aikapisteille. Huomionarvoista on myös se, että taajuustasossa systeemien erilaisten aikaskaalojen erottaminen voidaan toteuttaa suoraviivaisesti lineaarisina kaistanpäästösuodattimina, jolloin eri osasysteemit keskittyvät omiin energiaspektrin osiinsa (vertaa taas kuvaan 1.4 sivulla 12).

Taajuustasossa signaalien aktiivisuudet korvautuvat signaalien amplitudeilla; molemmissa tapauksissa näiden suureiden neliöiden odotusarvot ovat yhtä lailla verrannollisia ”energiaan” (vertaa esimerkiksi *Parsevalin teoreemaan*) ja voidaan tulkita enformaatioksi. Oppiminen voi siis periaatteessa tapahtua suoraan taajuustasossa yhtä hyvin kuin aikatasossakin (mikäli datasekvenssien taajuustasomuunnokset ovat käytettävissä). Aiemmin tarkasteltu optimaalisuuden tavoittelu voidaan nyt täydellistää: *kaikki enformaatio kaikilla taajuuskaistoilla tulee näkyväksi*.

Järjestelmien välillä siirtyvä enformaatio on spektrien muodossa (kuten kappaleessa 5.6 kuvattiin), ja systeemin sisäiset muuttujat ovat spektrejä; signaalit eivät asetu koskaan tasapainoon, joten aikatasossa adaptaatiota ei voi toteuttaa. Sen sijaan *värähtelyjen hahmot* taajuustasossa voivat stabiloitua. Näiden *seisovien aaltojen* kokonaisuus eri tilanteissa luonnehtii nyt järjestelmää.

Pääseminen laadullisesti ylemmälle mallitasolle edellyttää, että unohdamme aikatason kokonaan ja keskitymme yksinomaan taajuuksien virittämiin *kenttiin*. Tällöin Fourier-analyysi soveltuu hyvin työkaluksi — tai paremminkin ehkä jonkinlainen muunnelma *kepstrianalyysistä* (engl. *cepstrum analysis*). Kepstrianalyysissä Fourier-muunnetuista signaaleista

otetaan lisäksi logaritmi; tästä seuraa se, että tulomuotoiset riippuvuudet muuttuvat summautuviksi. Kun kyseessä on verkosto, jossa signaalit ja niiden suodattimet ovat toisiaan muokkaavia spektrejä, tämä mahdollistaa rakenteistumisen spektrien maailmassa; kyseessä on tällöin jonkinlainen ”yleistetty äänikanava-analyysi” moniulotteiselle dynaamiselle rakenteelle. — Mutta sekään ei vielä riitä.

Millaista toiminnallisuutta voidaan odottaa järjestelmältä, jossa eräällä tavoin on vapauduttu ajasta ja paikasta; taajuustason värähtelykentät ovat näkyvissä ”kaikkialla” ja ”kaiken aikaa”? Yhden intuition tarjoaa *holografinen muistirakenne*, jossa vastaavalla tavoin ne ovat taajuudet ja vaihe-erot jotka määräävät muistin toiminnan. Tämä ei kuitenkaan ole koko totuus, koska nyt rakenne on tilanteen mukaan *dynaamisesti muokkautuva*.

Vaikka mallit muodostetaan taajuustasossa kenttien perustalle, vuorovaikutuksen reaalimaailman kanssa on tapahduttava reaaliajassa. Kuinka voidaan päästä taajuustason mallista takaisin aikatasoon? Väite nyt on, että *kytkeytyminen ympäristöön tapahtuu ”aaltofunktioiden” romahduksena*: kaikista potentiaalisista seisovista aalloista realisoituvat vain ne, jotka sovittuvat ympäristön määräämiin reunaehtoihin, löytäen niiden puitteissa tasapainon. Ympäristö ikään kuin valitsee mallin tulkinnan, ja näkyviksi ”mittauspisteisiin” jäävät diskreetit alla olevista kentistä emergoituvat muuttujat.[8]

Eri kenttiin sitoutuneet energiat tyypillisesti määräävät näiden värähtelytaajuudet — ja eri taajuuksilla värähtelevät kentät ovat ”ortogonaalisia”, ne eivät voi vuorovaikuttaa. Näin havaitsijavaikutus yksinkertaistaa mallin hetkellisesti pakottaessaan sen projisoitumaan reaalimaailmaa vasten.

Käytännön esimerkki siitä, mitä tämä kaikki *saattaisi* tarkoittaa, on esitetty seuraavassa kappaleessa.

[8] Verrattuna edellisen luvun kokonaisvaltaisiin systeemien romahduksiin, nyt ”romahduksilla” tarkoitetaan vain (lyhytkestoisia) tila-avaruuden projisoitumisia matalampaan dimensioon.

6.4 Esimerkki: kyberneettiset orbitaalit

Maailma taajuuksina — tässä tarjoutuu (liiankin!) kiehtovia mahdollisuuksia tulkintoihin: perustuuhan nykytulkinta aineen perusolemuksesta *aaltofunktioihin*. Ja (*super*)*säieteorioissa* aine rakentuu pienistä värähtelevistä säikeistä (tai kalvoista) — jolloin alkeishiukkaset ilmenevät näiden peruselementtien värähtelytaajuuksina, ylimääräisten vapausasteiden (11 ulottuvuutta tai enemmän) tultua säädetyiksi olemattomiin...!

Tarkastellaan aineen osasten maailmaa edellä esitetyssä neokyberneettisessä kehyksessä tulkiten, jättäen yksityiskohdat (massat, spinit, jne.) sivurooliin; pääasiana on nähdä, millaisia uudenlaisia tulkintoja molekyylien maailmasta ehkä voitaisiin tehdä. Taustalla on ymmärrys siitä, että *jotakin tällaista täytyy olla, että mysteerit kappaleessa 6.1 olisivat ratkeavia*.

Tarkastelun kohteena nyt ovat *molekyyliorbitaalit*: kuinka (enemmän tai vähemmän vapaat) valenssielektronit asettuvat ytimien ympärille monimutkaisessa molekyylissä. Yleensä ajatellaan, että ”kiertoradat” (tai elektronipilvet) ovat jonkinlaisia ennalta-annettuja lokerikkoja, joihin elektronit asettautuvat. Annetaan nyt kuitenkin tilaisuus neokyberneettiselle itseorganisoitumiselle ja rakenteen emergoitumiselle: ikään kuin ”semimakroskooppisesti” heitetään elektronit systeemiin, annetaan niiden kilpailla ”resursseista” (positiivisista varauksista) toistensa kanssa kilpaillen (negatiivisten varausten hylkiessä toisiaan), ja katsotaan kuinka käy.

Tosin elektronitkin ovat emergenttejä illuusioita, alla olevien kenttien ilmenemismuotoja; tarkasteluissa on mentävä syvemmälle.

Oletetaan, että kentillä $\bar{x}_i$ ja $\bar{x}_j$ on merkitystä vain vuorovaikutuksessa, jolloin vuorovaikutuksen (normeeraamatonta) todennäköisyyttä luonnehtii tulo $\bar{x}_i \bar{x}_j^{\mathrm{H}}$ (jonkinlainen ”yhteistodennäköisyystiheys”), ja tämäkin vuorovaikutus näkyy vain sen emergoituessa; tällöin (tuttuun tapaan) vain ”enformaatiosuureet” muotoa $\mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{x}_j^{\mathrm{H}}\}$ ovat relevantteja (vertaa kvanttimekaaniseen *Bornin tulkintaan*). Tämän vuorovaikutuksen oletetaan nyt näkyvän sähköisenä veto- tai poistovoimana, jonka seurausta sitten ovat sähköiset potentiaalit. Esimerkiksi kenttään $\bar{x}_i$ itseensä sitoutunut *varausenergia* saadaan integroimalla tätä ”varausvoimaa” nollasta loppuarvoonsa, kasvavaa jo kumuloituneen varauksen aiheuttamaa painetta vastaan (c

on vakio):

$$J_i = c \int_0^{|\mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{x}_i^{\mathrm{H}}\}|} Q \, dQ = c \, \frac{1}{2} \left| \mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{x}_i^{\mathrm{H}}\} \right|^2 . \tag{6.9}$$

Erillisten kenttien $\bar{x}_i$ ja $\bar{x}_j$ välinen energia on sitten $J_{ij} = c \left| \mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{x}_j^{\mathrm{H}}\} \right|^2$; jos varaukset ovat erimerkkiset, lopputulos on etumerkiltään vastakkainen.

Negatiivista varausta kantavat kentät ovat nyt ”delokalisoituneita”; sen sijaan positiiviset ytimet (tässä tapauksessa ionisoituneet atomit, joiden uloimmat valenssielektronit on päästetty irralleen) ovat lokalisoituneita. Raskaina näiden ydinten (elektronipilvien ”ympäristön”) oletetaan tämän tarkastelun puitteissa pysyvän paikallaan ja vakioina. Ydinten luona elektronipilvet romahtavat ”mittauksen” vuoksi; tilannetta tarkastellaankin vain näissä ”kytkeytymispisteissä”, jolloin jatkuva-arvoisen avaruuden sijaan voidaan keskittyä diskreetteihin tarkastelukohtiin. Ominaisarvoluonne ja ratkaisujen lineaarisuus on voimassa molemmissa tapauksissa. On kiinnostavaa ajatella, että neokybernetiikka voisikin tarjota mahdollisuuden tarkastella asioita ”useammassa tarkastelupisteessä” yhtä aikaa, jolloin tarkastelu voi olla hienovaraisempaa kuin yhteen pisteeseen keskityttäessä.

Olkoon nyt ytimiä m kappaletta, ja merkitään niiden lokalisoituneita kenttiä u_j; negatiivisia varauskenttiä $\bar{x}_i$ olkoon sama määrä m. Kaikkien kenttien kokonaisenergialle voidaan nyt kirjoittaa lauseke

$$c \left(\frac{1}{2} \sum_{1 \le i,j \le m} \left| \mathcal{E}\{\bar{x}_i \bar{x}_j^{\mathrm{H}}\} \right|^2 - \sum_{1 \le i,j \le m} \left| \mathcal{E}\{\bar{x}_i u_j^{\mathrm{H}}\} \right|^2 \right). \tag{6.10}$$

Kun muuttujat kirjoitetaan vektorimuotoon ja uudelleenjärjestellään sopivasti, nähdään, että tämä on sama kuin

$$c \, \mathcal{E}\Big\{ \, \frac{1}{2} \, \bar{x}^{\mathrm{H}} \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{H}}\} \, \bar{x} - \bar{x}^{\mathrm{H}} \mathcal{E}\{\bar{x} u^{\mathrm{H}}\} \, u \, \Big\}. \tag{6.11}$$

Saatu lauseke on (kompleksisille muuttujille) sama kuin $c \, \mathcal{E}\{J(\bar{x})\}$ kaavassa (5.1), joten sen avulla voidaan määrätä neokyberneettisen systeemin minimienergiaratkaisun antava malli (kuten kaavassa (5.7) on vihjattu). Tämä kustannus siis määrittelee (reaaliselle) kovarianssimatriisille

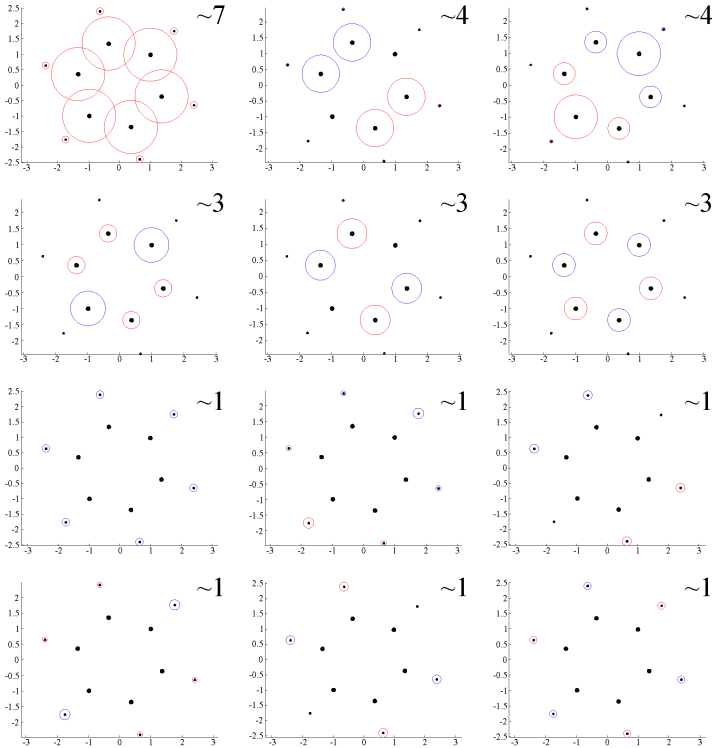
$\mathcal{E}\{uu^{\mathrm{H}}\}$, eli ydinten varausylijäämien keskinäisvuorovaikutusten toistensa luona aiheuttamien potentiaalien matriisille *ominaisvektoridekomposition*, ominaisarvojen kertoessa kuhunkin rakenteeseen sitoutuneen energian. Tulosta voi kutsua *kyberneettiseksi orbitaalirakenteeksi*.

Kun maailmaa katsotaan enformaatioteoreettisin silmälasein, ei ehkä ole ihmeellistä, että neokyberneettisiä malleja putkahtelee esiin kaikilla tarkastelun tasoilla. Mutta kuinka niin, miten nyt voidaan perustella tällainen ”älykkään” mallin rakenne? Ja eikö kanta pääse tällöin vapaasti rotatoitumaan? Sisäisen takaisinkytkennän mahdollistaa samanlaisten varausten poistovoima; tällä kertaa ei rotatoitumista tapahdu, koska muuttujat voivat tasapainossa saada vain kokonaislukuarvoja, varausyksiköiden ollessa alkeisvarausten monikertoja. Vain jos ominaisarvot (energiat) ovat samat, voivat ”orbitaalit” kombinoitua.

Neokybernetiikan periaattein ympäristö määrää systeemin tarkastelupisteissä (tässä tapauksessa kun $n = m$ vastaavuus on yksi yhteen). Ei tarvitse perinteiseen tyyliin tarkastella jatkuva-arvoista, korkeadimensioista aaltofunktiostruktuuria, ympäristön ”peilikuvaa”, kun alkuperäinenkin diskreetti, mataladimensioinen hahmo u on käytettävissä. Ei tarvitse approksimoida kokonaisuutta lokaalien vuorovaikutusten yhdistelmänä.

Verrattaessa esitetyn kaltaista värähtelyrakenteen ulkoiseen todellisuuteen sovittautumista varsinaiseen kvanttimekaniikasta tuttuun aaltofunktioiden romahtamiseen, nähdään, että nyt romahdus on vain puolittainen; järjestelmää ei pakoteta valitsemaan yksittäistä ”kvanttitilaa”, vaan tuloksena on vieläkin kokonainen ratkaisujen perhe. Liiallisen tiukalla kytkeytymisellä järjestelmä pakotettaisiin *pysähtymään*; mutta elektroneja ei voi täysin lokalisoida. Samasta syystä, koska nyt ei pyritä hiukkasten tarkkaan jäljittämiseen, voidaan väittää, että *epätarkkuusperiaate* menettää tällaisissa tarkasteluissa merkitystään.

Kuvassa 6.2 viereisellä sivulla on esimerkki tällaisen orbitaaliajatuksen soveltamisesta: ”ympäristöksi” on määritelty *bentseenimolekyyli*, jossa on kuusi hiiliatomia ja vetyatomia, jolloin $m = n = 12$ (kuvan mitat ångströmeinä); tämä molekyyli on haaste perinteisille orbitaaliteorioille, koska elektronien delokalisoituneisuutta ei tässä tapauksessa voi jättää huomiotta. — Kun systeemissä olevien ytimien konfiguraatio (hiiliato-



KUVA 6.2: Bentseenimolekyylin orbitaalit?

meissa kussakin neljän valenssielektronin vajaus ja vetyatomeissa yhden vajaus) esitetään ”yhteispotentiaaleina”, energian määrän ollessa kääntäen verrannollinen atomien etäisyyksiin, jakauman määräämät ominaisvektorit (”värähtelymoodit”) ovat kuvan mukaiset; musta ja harmaa väri kuvaa värähtelyjen vastakkaisvaiheisuutta. Ominaisvektoreita vastaavien ominaisarvojen (normeeratut energiat kokonaislukujen neliöitä) neliöjuuret (elektronien määrät) on myös näytetty ominaisvektorin yhteydessä. Valenssielektronit (yhteensä $6 \cdot 4 + 6 \cdot 1 = 30$ kappaletta), jotka on luovutettu yhteiseen pooliin, löytävät näin systeemin stationaaritilassa paik-

kansa. Haasteena mallituksessa on lähinnä määrittää ”itseispotentiaalit” $\mathcal{E}\{u_j u_j^{\mathrm{H}}\}$ potentiaalimatriisin diagonaalilla (esimerkissä näitä on käytetty viritysparametreina).

Kun varausjakaumien stationaaritila on löytynyt, jokaisella orbitaalilla on oma taajuutensa (jos ominaisarvot ovat erisuuruisia) jolloin ne ovat keskenään ortogonaalisia: vain saman taajuuden värähtelyiden välillä voi esiintyä attraktiota (tai repulsiota). Kun muistetaan, mitä ominaisvektorien kukin elementti tarkoittaa (orbitaalin relevanssia kunkin atomin kohdalla), voidaan kullekin molekyylin atomille myös kirjoittaa ”piirrevektori” Ψ_i, jossa on koottuna kunkin orbitaalin paino kyseisen atomin kohdalla:

$$\Psi = \left(\begin{array}{c|c|c} \Psi_1 & \cdots & \Psi_m \end{array} \right) = \Phi^{\mathrm{H}}. \tag{6.12}$$

Molekyylinsisäiset atomien keskinäiset affiniteetit (tutkittaessa esimerkiksi molekyylien laskostumistaipumuksia) voidaan nyt laskea piirrevektoreita käyttäen yksinkertaisesti kaavalla (Λ sisältää ominaisarvot lävistäjällään)

$$\Psi_i{}^{\mathrm{H}} \Lambda \, \Psi_j. \tag{6.13}$$

Tosin tulos voi muuttua kääntämällä jokin ominaisvektori vastakkaissuuntaiseksi, siis kääntämällä vastaava kenttä vastakkaisvaiheiseksi; myös energialtaan samantasoisten orbitaalien mahdollisuus monimutkaistaa kuviota.

Atomien sijainnit määräävät orbitaalit, mutta toisaalta orbitaalirakenne pyrkii hitaammalla aikaskaalalla muokkaamaan molekyylin muotoa (aiheuttaen edelleen sen laskostumisen). Vain sellaiset atomikonfiguraatiot ovat pysyviä, jotka mahdollistavat (likimain) kokonaislukuvaraukset orbitaaleille; näin ollen raskaiden ydinten sijainnit adaptoituvat vähitellen kohti optimia. Jos molekyylinsisäiset veto- ja poistovoimat muuttavat atomien keskinäisiä sijainteja, on orbitaalit laskettava aina uudelleen; molekyylin liika vääristyminen muuttaa koko orbitaalirakenteen, ja atomit lähtevätkin adaptoitumaan toisenlaista optimia kohti.

Myös *katalyyttien* toiminta voi saada lisävalaistusta esitetyssä kehyksessä: kun katalyytti liittyy osaksi molekyylirakennetta, koko orbitaalirakenne voi muuttua; tällöin se voi tulla alttiiksi uudenlaisille reaktioille,

jotka muuttavat affiniteetteja (aktivoitumisenergioita) taas, niin että katalyytti voi pullahtaa jälleen irralleen. Katalyytit voivat saada molekyylirungossa aikaan ”ohjelmoituja kaukovaikutuksia”. Kokonaisvaltaiset orbitaalirakenteet ja niistä johtuvien kaukovaikutusten olemassaolo voi selittää myös vaikkapa molekyylien *isomeerien* ominaisuuksien erilaisuuden.

Eri kohdissa molekyyliä ulkomaailmaan näkyvät sähkökentät ovat erilaiset. Molekyyli on kuin *suunnattu antenni*, virittäen rakenteisen voimakentän, ja edelleen fyysisen rakenteen: ilmeisesti toiset sähkökenttien hahmoon sopivat molekyylit asettuvat näiden värähtelevien sähkökenttien solmukohtiin, osaltaan sitten vahvistaen kenttää. Voisiko sama ”ohjatun kertautumisen” periaate olla mahdollinen jopa makroskooppisten rakenteiden (lumikiteet, *kudokset*, jne.) muodostumisen tapauksessa?

6.5 Pakoon tulkintojen vankilasta

Systeemien kyberneettinen hitaus tulee näkyviin jopa tieteenteossa (katso 6.7) — yllättäen, erityisen paljastavasti kehityksen epäjohdonmukaisuus tulee vastaan *fysiikanteon ytimessä*.

Kvanttimekaniikan nykyinen *kööpenhaminalainen tulkinta* ottaa lähtökohdaksi sen, että *satunnaisuus olisi aineen perimmäinen luonne*, jolloin kvanttimaailmaa hallitsee *komplementaarisuus*, perusosasten aaltohiukkasdualismi. Maailma on stokastinen, pohjimmiltaan käsittämätön ja mystinen; kärjistäen voisi väittää, että jos haluaisi itselleen koherentin maailmankuvan, tiede ei sitä kykene tarjoamaan!

Kööpenhaminalainen tulkinta on ”paras” kuitenkin vain siinä mielessä, että se on kompromissi, kuvaten tämänhetkistä tieteellistä konsensusta. Filosofisesti vakaammalla pohjalla olisi olettamus, että havaitun mikromaailman todennäköisyysluonne on *ilmaisu alla olevan* (*deterministisen*) *tilan epävarmuudesta*. Vaihtoehtoisia tulkintojakin nimittäin olisi tarjolla: esimerkiksi *Louis de Broglien* ja *David Bohmin* ehdottama *pilot-aaltotulkinta* on deterministinen, ja se on tuloksiltaan yhteensopiva nykyisten kvanttiteorioiden kanssa.

Tämä vaihtoehtoinen tulkinta on jätetty suurelta osin huomiotta, koska se olettaa mittausten alla olevaksi jonkinlaisen *aaltojen todellisuuden*;

koska tämä ylimääräinen rakenne on mittausten ulottumattomissa ja siksi tuo tuntemattomia piilomuuttujia malleihin, se on jäänyt monimutkaisempana vähemmälle huomiolle. Perinteisesti ehkä terävin kritiikki Bohmin mallia kohtaan pohjautuu siihen, että teoria ei kykene selittämään makroskooppisen maailman pysyvyyttä. Nyt neokyberneettisessä kehyksessä alla olevat kentät kuitenkin ovat mallin puitteissa tulkittavissa, ja emergenttien rakenteiden pysyvyys voidaan selittää dynaamisten attraktorien avulla; ehkä esitetty neokyberneettinen lähestymistapa tekeekin tällaisen *intuitiivisesti mielekkäämmän* lähestymistavan myös *käytännössä hyväksyttävämmäksi*?

Annetaan asiantuntijoille suunvuoro. David Bohmin maailmankuvaa kehittelee *Paavo Pylkkänen* kirjassaan *Mind, Matter and the Implicate Order* (Springer Verlag, 2007), jota *Kullervo Rainio* arvioi *Tieteessä Tapahtuu* -lehdessä (Vol. 26, Nro 6, 2008) seuraavasti:

> *Pylkkäsen työn tarkoitus ei ole sen vähäisempi kuin aineellisten kvanttisysteemien ja tajunnan selittäminen yhteisen viitekehyksen pohjalta* […] *Keskeistä Bohmin ajattelussa on erottaa toisistaan systeemin piilojärjestys* (*implicate order*) *ja ilmijärjestys* (*explicate order*). […] *Kvanttiprosessia ohjaa piilojärjestys aaltofunktion Ψ muodossa. Kvanttimekaniikan standardimallissa Ψ-funktiota käsitellään laskennallisena välineenä, joka antaa todennäköisyydet systeemin tiloille. Bohm ei tyydy tähän instrumentaaliseen kantaan, vaan omaksuu uuden, radikaalin näkemyksen, jonka mukaan informaatiorakenne sellaisenaan vaikuttaa todellisuuteen ohjatessaan kvanttievoluutiota mahdollisuudesta toiseen. Tällä tavalla vaikuttavalle informaatiolle hän antaa nimen "aktiivinen informaatio".* […] *Ilmijärjestys* (*explicate order*) *näyttäytyy esineellisessä, makrofysikaalisessa maailmassamme, jota voimme havainnoida — ainakin periaatteessa. Piilojärjestys ikään kuin "jämähtää" ilmijärjestykseksi systeemin joutuessa stabiiliin tilaan — samaan tapaan kuin ajatellaan mittauksen yhteydessä detektorin "romahduttavan aaltopaketin".* […]

> *Filosofisesti kaikkein keskeisintä on kuitenkin Pylkkäsen esitys tajunnan asemasta bohmilaisessa viitekehyksessä, jonka mukaan piilojärjestyksissään tajunta ja ainesysteemit ovat keskenään vuorovaikutuksessa.* […] *Bohmin mukaan perustavinta olevaisessa ei suinkaan ole aine* (*tai energia*) *eikä aineellisten olioiden eksternaaliset* (*ulospäin suuntautuvat*) *vaikutukset, vaan* holomovement*, kokonaisliike — systeemin jatkuva liike kokonaisuutena tilasta toiseen ilman ulkoisia impulsseja.* […] *Ei siis ole mitenkään outoa, että se tarjoutuu viitekehykseksi myös mentaalisen tapahtumisen kuvaukseen — holomovementin ollessa tällöin ”tajunnan virtaa”.* […] *Tajuntasysteemit ovat nekin piilojärjestystä* (*enfolded*)*. Aktualisoituessaan ne voivat tuottaa ilmijärjestystä, tässä tapauksessa suhteellisen pysyviä ja itsenäisiä tajuntaesiintymiä, kuten mielikuvia.* […]

Pylkkänen ei etene yksityiskohtiin ”tajunnan virran” kuvauksessa piilo- ja ilmijärjestysten pohjalta vaan tyytyy periaatteelliseen ratkaisuun, visioon; ehkäpä tässä yhteydessä on itse kullakin vapaus tehdä hypoteeseja.

Näyttää siis siltä, että Bohmin mallin tulkinnat sivuavat monessa suhteessa neokyberneettisiä tulkintoja. Informaatio voi esimerkiksi olla paitsi *episteemistä*, se voi olla myös *onttista*, todellisuuteen välittömästi vaikuttavaa ja aktiivista — siis enformaatiota? Rainion suomennoksen *esiinkehkeytyminen* ja *jälleenkätkeytyminen* (engl. *unfoldment, re-enfoldment*) saavat aikaan suhteellisen stabiileja ja riippumattomia muotoja ilmijärjestyksessä — voitaisiinko puhua seisovista aalloista?

Bohmilaisessa viitekehyksessä tajunta ja ainesysteemit voivat olla keskenään vuorovaikutuksessa, jopa niin, että tajunnan rakenne on olennainen osa fyysistä maailmaa. Voisiko olla niin, että ei tarvittaisi minkäänlaista laadullista harppausta siirryttäessä värähtelyiden maailmasta kohti mielen maailmaa?

6.6 Tietoisuus — suurin arvoitus

Taajuustulkinta mentaalimaailman ilmiöiden perustana muuttaa perinteisiä tulkintoja ja mahdollistaa paon ajattelun umpikujista.

Esimerkiksi kun tulkitaan aistiärsykkeetkin taajuusperustaisiksi, voidaan heti nähdä, että jo havainnan prosessissa voi tapahtua jonkinlaista *laadullista muuntumista*. Vaikkapa värien hahmottamisessa taajuudet ovat kytköksissä emergoituviin havaintoihin hyvin monimutkaisella tavalla; samoin se, kuinka formanttiyhdistelmät hahmottuvat vokaaleina ja muina puheen piirteinä, on vielä kunnollista teoriaa vailla. Ei ole vaikea kuvitella, että myös monimutkaisemmissa mielensisäisissä ilmiöissä taajuuslähestymistapa tarjoaa uusia näköaloja.

Aiemmin kappaleessa 4.5 oli puhetta mielen toiminnasta. Voitaisiin tehdä arvaus, että kun rakenteiden määrä kasvaa, kun alirakenteet alkavat hierarkkisesti mallittaa toisiaan, lopulta tässä jatkumossa emergoituu *tietoisuus*, malli *itsestä*. Tässä ei kuitenkaan taida pelkkä määrällinen kasvu riittää, pelkkä datan yhä pidemmälle menevä suodatus ei johda laadullisiin harppauksiin. Sen sijaan edellä esitetty kenttien ajatus tarjoaa ehkä uusia mahdollisuuksia tietoisuuden arvoituksen ymmärtämiseen. Kun värähtelykentät tunkeutuvat kaikkialle, kytkeytyen kokonaisvaltaisesti todellisuuteen, voi selittyä jonkinlainen ”läsnäolon” tunne.

Esimerkiksi *ajatuksen dynaamisen olemuksen* voi kuvitella perustuvan edellisessä kappaleessa esitetyn kaltaiseen seisovien aaltojen rakenteeseen: aktivoituneiden käsitteiden kokonaisuus (joka muodostuu lokalisoituneista hermosolujoukoista aivoissa) määrittelee ”ympäristön”, johon aivoaaltojen on sovittauduttava. Ajatusten rakenteiset kentät sitten muodostavat ”päänsisäisiä antenneja”, jotka virittävät muita käsitekokonaisuuksia assosiatiivisesti, yli pidempienkin etäisyyksien. Tällainen aaltotulkinta voisi ehkä selittää tietoisuuden kokonaisvaltaisen, kontrolloidun, kaiken muun poissulkevan luonteen. Tajunta on synkronoitumista.

DNA-molekyylin rakenteen selvittäjä *Francis Crick* oli ensimmäisiä, joka näki tietoisuuden pohjautuvan hermosolujen koherenttiin värähtelyyn.

Tällaisesta on myös jonkin verran kokeellista näyttöä. EEG-mittausten

perusteella tiedetään, että aivoaallot heijastelevat tietoisuuden tilaa. On myös huomattu, että aivoalueiden välillä esiintyy rytmisiä vuorovaikutuksia, ja joissakin tilanteissa ne voivat tahdistua toisiinsa. Nykyiset EEG-mittausmenetelmät ovat kuitenkin vielä liian kehittymättömiä että sananmukaista aivoaaltojen *kuvantamista* voitaisiin toteuttaa: aivan samoin kuin sähkömagneettisten kenttien kokonaisuuden näkeminen pään ulkopuolella edellyttää kykyä visuaaliseen hahmontunnistukseen, kenttien kokonaisuus myös pään sisällä voi ilmeisesti hahmottua vain vastaavanlaisin periaattein.

> Olisi helppoa pysyä koko ajan taajuustasossa — mutta hermosolut toimivat aikatasossa, reagoiden aikatason signaaleihin. Kuinka nämä sitten voivat toteuttaa esimerkiksi kenttäperusteista adaptaatiota? Ehkä tässä on syy siihen, miksi luonto on tehnyt hermosolujen toiminnasta niin monimutkaista: aiemmin abstrahoimme hermosolujen toimintaa ja puhuimme vain aktiivisuuksista, mutta niiden todellisella *pulssimuotoisella toiminnalla voidaan nähdä suora yhteys taajuuksiin*. Voimmekin heittää arvauksen: oppimista leimaa edelleen enformaatiojano, nyt siis pyrkimys sovittaa oma toiminta mahdollisimman tarkasti sisään tuleviin pulsseihin, niiden taajuuksiin; jos ollaan jäljessä, synaptisen kytkennän kasvattaminen kasvattaa omaa taajuutta, ja päinvastoin. Jos mitään taajuuksia sisään tulevissa signaaleissa ei vielä ole havaittavissa, toimitaan Hebbin lain mukaisesti eli mennään vain sokeasti kohti aktiivisuuden abstraktiota, keskimääräistä pulssitiheyttä.
>
> Hajautettujen toimijoiden synkronoituminen näyttää luonnossa olevan varsin yleistä, alkaen vaikkapa *kättentaputusten* tai *tulikärpästen sykkeen* tahdistumisesta; näitä asioita on tutkinut mm. *Steven Strogatz*.

On ilmeistä, että näillä oletuksilla esimerkiksi eläimillä on jonkintasoinen tietoisuus. Entä muut kyberneettiset systeemit, onko *niilläkin* tietoisuus?

Hypoteesi nyt on se, että *kenttien olemassaolo on yleinen edellytys eheydelle*, kokonaisuuden koordinoitumiselle ”systeemien systeemeissä”, laadulliselle harppaukselle niin mielessä kuin muuallakin luonnossa. Tällaisten järjestelmien välillä pythagoralaiset ”sfäärien harmoniat” ovatkin ehkä todellisuutta: kokonaislukusuhteet määräävät rakenteet resonanssien kautta. Ehkä ne pisimmätkin luonnonfilosofiset syklit (2500 vuotta Herakleitoksesta ja Pythagoraasta) ovat sulkeutumassa. Näihin asioihin paneudutaan vielä seuraavassa luvussa.

6.7 Jatketaan kopernikaanista kumousta!

Ensimmäisessä luvussa todettiin, että enformaatioteoreettisen maailman hallintaan tarvitaan uudenlaisia käsitteitä. Mutta sekään ei riitä: tarvitaan kokonaisia uudenlaisen ajattelun kehyksiä. Tarkastellaankin nyt hiukan ajattelun jäykistyneitä rajoitteita ja etsitään uudenlaisten vapauksien suuntia.

Luontoa moninaisuudessaan tutkii *tiede*. Tieteen puitteissa on sovittu miten sitä tehdään, mitä tiede on; mitä tahansa tutkimuksen kohdetta tai kysymyksenasettelua ei tämän päivän tieteen puitteissa pidetä sopivana. Kannattaa kuitenkin muistaa, että pyrittäessä vilpittömästi ymmärtämään luontoa, tieteen asettamien rajoitteiden yläpuolella oleva ylempi kategoria on *luonnonfilosofia*. Nykytiede paradigmoineen on vain yksi vaihtoehto ymmärryksen ja tiedon organisointiin; jos esimerkiksi *elämä* kaikkinensa putoaa tänä päivänä hyväksyttyjen tieteen metodiikkojen ulkopuolelle, täytyy rohjeta ottaa askel eteenpäin (tai oikeastaan taaksepäin). Jos tiede ei kykene uusiutumaan, enformaatio alkaa purkautua tieteen ulkopuolisia kanavia pitkin. Renessanssin aikana uskallettiin kyseenalaistaa auktoriteetit; *uusi renessanssi* tarkoittaa, että uskalletaan kyseenalaistaa jopa tieteelliset auktoriteetit.

Yritetään seuraavassa hahmotella kehyksiä *uudenlaiselle tieteelle*. Yhtenä haasteena tällöin on se, että vastaavanlaisia irtiottoja on ehdotettu ennenkin: esimerkiksi *Stephen Wolfram* luonnehti ”uutta tiedettä” täydellisenä luopumisena perinteisestä matemaattisesta analyysistä; tässä hänen tukenaan oli *kaaosteorian* havainto järjestelmien alkutila- ja parametriherk-

kyydestä — abstrahoiduilla malleilla ei ole arvoa, ne kun toimivat joka tapauksessa eri tavoin kuin todellisuus! Nyt ollaan kuitenkin kiinnostuneita attraktoreista, jolloin *alkutilavirheet menettävät merkityksensä*. Samasta syystä ei tarvita *kompleksisuusteorian* peräänkuuluttamia ”perimmäisiä kaavoja”: samaan ympäristön määräämään lopputilaan päädytään joka tapauksessa riippumatta prosessien yksityiskohdista. Wolframin markkinoima ajatus *laskennallisesta yhdenvertaisuudesta* (engl. *computational equivalence*) ja mahdollisuus *universaalilaskentaan* vain *homogenisoi* näkemämme maailman, ja luonnon toteuttamien relevanttien funktioiden etsiminen on aiempaakin perustellumpaa. Perinteiset analyysin työkalut ovat tällöin entistäkin käyttökelpoisempia. Mihin uudenlaista ajattelua sitten tarvitaan?

Ehkä uusi tieteellinen ajattelutapa kärjistyy ajatukseen, että pitäisi uskaltaa hylätä perinteisen tieteen pohjana oleva *kartesiolaisuus*. Tieteellisen näkökulman ”keskusjohtoisuutta” on nimittäin korjattava: sen sijaan että systeemiä tarkasteltaisiin tutkimuksessa *pelkkänä objektina*, tulee ymmärtää, että *systeemi itse* on ympäristönsä aktiivinen tarkkailija ja muokkaaja, jonkinlainen *subjekti*. Ja tällainen uudelleenajattelu pitää nähtävästi ulottaa koko maailmankaikkeuteen: kaikki systeemit ovat subjekteja ja kaikki ovat objekteja toisilleen. Luonnon tarkoitushakuisuuden tulkitsemiseen ei tarvita ihmistä, vaan enformaationnälässään luonto *on* tarkoituksenmukainen. On jatkettava *kopernikaanista vallankumousta*: ihmistä ei tarvita maailmankaikkeuden keskukseksi, havaitsijaksi ja toimijaksi, jotta maailma voisi olla järjestynyt ja mielekäs kokonaisuus. Toisaalta, kuten on todettu, havaittu maailma on aina mielekäs vain suhteessa havaitsijaan; näin ollen ihminen *on* oman subjektiivisen universuminsa kiistämätön keskus (katso seuraava luku).

Vanha dualistinen jaottelu *henkeen* ja *aineeseen* (eli samassa hengessä yllä käsitelty jaottelu *subjektiin* ja *objektiin*) voidaan perinteisessä muodossaan lopultakin hylätä. Kiinnostavaa on kuitenkin se, että dualismi voi tulla takaisin *uudessa muodossa*: muista että enformaation virtaus (”henki”) muodostaa ne stabiilit attraktorit, joiden puitteissa rakenteet aineelle systeemeissä määräytyvät. Ja on vielä toinenkin *René Descartesin* idea joka ansaitsee tulla muotoilluksi uudelleen: nyt voidaan sanoa että ”ajattelen,

siis *maailma* on olemassa". Optimoivassa maailmassa yksinkertaisemman olemassaolo on ainoa perustelu monimutkaisemman säätäjän olemassaololle; siksi ulkoisen maailman on oltava todellinen.

Tässä yhteydessä voitaisiin mainita toinenkin filosofi, *Immanuel Kant*: hän määritteli omalla tavallaan maailman rajat *transkendentaalisessa idealismissaan*. Kant totesi, että mielen toimintaa perustavanlaatuisesti rajaa *paikka* ja *aika*; kuitenkin tässä luvussa tarkastellut kentät eivät ole sidottuja yksikäsitteisiin paikkoihin, ja taajuudet myös eräällä tavalla abstrahoivat menneen ja tulevan tähän hetkeen.[9] Taajuustasossa tarkasteluista voi tulla aidosti *kaikkialla läsnä olevaa* (engl. *ubiquitous*). Toinen Kantin keskeinen oivallus aikanaan oli, että vaikka (nykytermein) subjektiivinen havaintodata määrää mielemme sisällön, "koneisto" jonka läpi signaalidata joutuu kulkemaan on kaikilla ihmisillä samanlainen, joten myös muodostuvat mentaaliset rakenteet voivat olla eri ihmisillä samanlaisia; nyt tämä yleistyy siten, että mallit voivat olla "intersysteemisiä" (myös ihmismielen ulkopuolella), koska mallien rakentumisperiaatteet ovat universaaleja, aistimistakin riippumatta.

Voidaan jopa kärjistää niin, että tieteellinen *korrespondenssi* voi olla uudelleen väistymässä *koherenssin* tieltä. Nykytiede on ajautunut ajattelukoherenssin yleiseen hajoamiseen — emme enää hallitse suuria kokonaisuuksia, vaan tiedämme yhä enemmän yhä vähemmästä, ajattelun kokonaisvaltaisen sisäisen eheyden ja ristiriidattomuuden kustannuksella — mutta monimutkaisten järjestelmien tapauksessa kohteen pilkkominen ei enää toimi. Ei ole yksi-yhteen -tyyppisiä vuorovaikutuksia, tai ainakin ne ovat vähemmän merkittäviä kuin kokonaisvaltaiset pankausaaliset vuorovaikutukset. Jos monimutkaisiin järjestelmiin liittyviä ilmiöitä tutkitaan yksi muuttuja kerrallaan, "aaltofunktiot" romahtavat, ja asioiden *ydin* karkaa. Havaitsijavaikutus täytyy hyväksyä olennaiseksi osaksi systeemien luonnetta, niin että kytkeytyminen systeemeihin on ainoa keino saada niistä relevanttia tietoa; vain monimuuttujamenetelmin voidaan tällöin saavuttaa niistä riittävän "hellä" ote, universaalisen ehdottomuuden sijaan.

[9] *Prolegomenassaan* Kant jopa väittää, että nämä ajan ja paikan periaatteet sitovat "kaikkia tulevaisuuden metafysiikoita, joita voidaan luonnehtia tieteiksi"; rohkea rajoite tulevaisuuden tieteelle!

Monien muuttujien lisäksi voidaan hyödyntää myös *monia maailmoja*. Tietokoneperustaiset *emulaattorit* eli *emergenssisimulaattorit* voivat luoda datapohjaisia *virtuaalimaailmoja*, jotka ovat fyysisen maailman ohella yhtä lailla käypiä tutkimuskohteita, jos niihin on onnistuttu implementoimaan asianmukaiset emergenssin periaatteet ja ympäristön ominaisuudet. Voidaan luoda erilaisia evoluution realisaatioita ja voidaan tutkia maailmaa myös sellaisena kuin se *voisi* olla, löytäen elämän hallitsevia yleisiä lainalaisuuksia erilaisissa ympäristöissä; tällöin luonnontieteet voivat muuttua *oikeiksi* tieteiksi (!), olemassa olevien esimerkkien luokittelusta elämänmuotojen yleisten piirteiden, vuorovaikutusten ja vapausasteiden analysointiin. Samaa ajatusta voidaan soveltaa kaikenlaisten systeemien tutkimiseen, siis myös vaikkapa *ihmistieteisiin*; voikin olla, että *Edward O. Wilsonin* visioima tieteiden välinen *konsilienssi* on askeleen verran lähempänä toteutumistaan, kun systeemien *syvärakenne* saadaan paljastumaan, ja myös erilaisille terminologioille ym. saadaan *relevanssiperustainen* pohja. Elävät tieteet eivät ole pelkkiä sosiaalisia konstruktioita, staattisia representaatioita, vaan niiden on oltava itsensä kannattelevia *dynaamisia attraktoreita evidenssin avaruudessa*.

Tällaista ajattelua noudattaen jopa *laskettavuusteorian perusolettamus* (engl. *Church–Turing Thesis*) tulee kyseenalaiseksi. On ajateltu, että *kaikki laskenta on toteutettavissa universaalikoneella*, sarjallistuvien komentoketjujen avulla; nyt kuitenkin voidaan päätellä, *Cantorin diagonaaliargumenttia* mukaillen, että systeemejä on aidosti enemmän kuin niitä vastaavia universaalikoneita — onhan jokainen universaalikone jo systeemien systeemi itsessään (ja mallina se määrittelee taas uuden systeemien tason!). Universaalikone ei voi olla ”systeemisesti suljettu”, koska sellaisen toteuttaminen edellyttää systeeminulkoisen toimijan. Totta puhuen Turingin kone laskettavuuden paradigmana on reaalimaailman kuvaamiseen muutenkin varsin huono; onhan jo jokainen *reaaliluku* itsessään ei-laskettava, edellyttäessään päättymättömiä raja-arvotarkasteluja!

Kaikki mikä on totta ei ole relevanttia (eli se ei näy käyttäytymisessä), ja kaikki mikä on relevanttia ei ole ”totta” (eli todistuvaa). Totuuden olemuksesta ei koskaan päästä yksimielisyyteen, ja siksi onkin järkevää keskittyä siihen mikä on *olennaista*.

Relevanssin painottaminen johtaa *uudenlaiseen dialektiikkaan*: vastakkaisten evidenssien paineessa joudutaan hakemaan jonkinlaista *tulkintojen tasapainoa* — josta voi sitten parhaimmillaan emergoitua jotain aivan uutta. Tieteenteossa nämä asiat on tunnistettu jo kauan; taas asioiden hahmottamista on omiaan vaikeuttamaan se, että terminologiat ovat niin erilaisia.

> Tieteenteossa tutkimuskohteen enformaation/informaation haltuunotto nähdään hyvinkin selkeästi toimintaa ohjaavana tekijänä; poikkeamat teorian ja käytännön havaintojen välillä toimivat ”variaationa” jota yritetään jäljittää ja eliminoida. Luulisi että kehitys voisi edetä tasaisesti, enformaation vähän kerrassaan tullessa imetyksi tutkimuskohteesta, mutta kuitenkin kehitys on hyvin tempoilevaa. *Thomas Kuhn* puhui *paradigmoista* ja *standarditieteestä*; tällainen voidaan nähdä yhtenä ”tutkimuksellisena vapausasteena”. On vääjäämätöntä, että vapausaste tulee loppuunkulutetuksi ja jäykistyy; edistysaskeleet ovat yhä pienempiä ja järjestelmään ”kytkeytyminen” on yhä vaikeampaa. Kunnes *teesin* haastava *antiteesi* löytyy uusine mullistavine tulkintoineen, määritellen uuden vapausasteen; tuolloin kunnianhimoiset tutkijat omaksuvat uuden lähestymistavan havaitessaan uusien katsantotapojen tarjoavan mahdollisuuden tuoreeseen enformaatioon. Lopulta uusi paradigma löytyy kun paineet ovat löytäneet tasapainon.

Huolimatta edellä esitettyjen visioiden maailmoja syleilevästä luonteesta, kyse ei missään mielessä ole löysästä *holismista*; päinvastoin, lähestymistapa on erittäin *reduktionistinen*, koska *kaiken oletetaan olevan redusoitavissa dataksi*. Kuitenkin, ”äärimmäisestä empirismistä” huolimatta, näyttäisi siltä, että *rationalismi* tekee vastaiskun: datalle ei tehdä mitä tahansa analyysia, vaan sitä sovitetaan neokyberneettiseen mallirakenteeseen. Omalla tavallaan tämä vaihtoehtojen rajoittuneisuus antaa tutkijoille *uudenlaista toivoa*: kompleksisuuden maailmassa ”mallirelativismi” uhkaa johtaa (*John Horganin* termein) *ironiseen tieteeseen*, teorioiden sekamelskaan, to-

delliseen ”kaopleksiikkaan” (engl. *chaoplexity*). Albert Einsteinin sanoin ”käsittämättömintä maailmassa on se, että se on käsitettävissä”; ehkä tämä johtuu siitä, että kaikki on pohjimmiltaan palautettavissa yksinkertaisiin, samoihin fraktaalisesti toistuviin periaatteisiin?

6.8 Iloinen tiede

Samoin kuin ensimmäisessä luvussa todettiin tarpeelliseksi kytkeä semantiikka mukaan matemaattisiin tarkasteluihin, kokonaisten tieteiden tasolla osoittautuu tarpeelliseksi ottaa huomioon *inhimillisen ymmärryksen rooli* teorioiden rakentamisen prosesseissa. Myös tieteelliset mallit ovat fraktaalisia, heijastellen niin subjektin kuin objektinkin ominaisuuksia. Teoriat *ovat* konstruktioita; lisäksi ne ovat systeemejä.

Mitä kattavampia tieteelliset rakennelmat ovat ja mitä parempia malleja ne ovat todellisuudesta, sitä enemmän niissä itsessään on elävän organismin ominaisuuksia. Ja mitä ”älykkäämpiä” teoriat ovat, sitä suuremmassa määrin nämä ominaisuudet ovat älykkään ihmisen ominaisuuksia — jos tieteellinen systeemi saa noudattaa luontaisia, evolutiivisia dynamiikkojansa.

Inhimillistä ajattelua ei aina ohjaa pelkkä järki, eikä tiedettäkään. Oman suolansa tieteentekoon antaa halu pohdiskella syntyjä syviä; joskus halutaan kilpailla ja asettaa haasteita toisille kaltaisille.

> Fyysikko John Wheeler oli kiinnostunut olevaisen olemuksesta varsin luonnonfilosofisessa hengessä. Hän määritteli ”todella suuret kysymykset” omasta näkökulmastaan — ja nyt voidaan kirjata enformaatioteorian tarjoamat vastaukset tähän kilpalaulantaan:
>
> 1. *Miten olemassaolo on mahdollista?* — Tämä on ikiaikainen kysymys, jota käsiteltiin luvussa 1.
> 2. *Miksi kvantteja on olemassa?* — Mutta jospa nekin ovat vain emergenttejä attraktoreita?
> 3. *Olemmeko osa osallistuvaa universumia?* — Kyllä, kaikki havaitseminen edellyttää kytkeytymistä.

4. *Mistä syntyy merkitys?* — Se leipoutuu rakenteisiin mukaan alusta lähtien (tai sitten ei).
5. *”Kaikki bitissä”? Onko kaikki informaatiota?* — Kysymys onkin nyt *onko kaikki enformaatiota!*

Tiede on osa suurempaa systeemiä, osa syvästi inhimillistä toimintaa, hyvässä ja pahassa. Tiedemaailma on *fraktaalisesti kyberneettinen* ihmisten muodostama kokonaisuus, ja sen luonnetta määrittää suuressa määrin esimerkiksi *tiedeyhteisön apinalaumaluonne*.

> Tieteessä on paljon muitakin ajavia voimia kuin puhdas totuudenkaipuu. Teorian hyvyyden arviointiin vaikuttavat suuresti inhimilliset tekijät, esimerkiksi ns. NIH-faktori (engl. *“Not Invented Here”*). Rahoitus on tietenkin erityisen voimakkaasti tutkimusta ohjaava tekijä; kun niukan rahoituksen käyttöä optimoidaan, ja kun rahoituspäätöksissä asiantuntijoina käytetään menestyneitä tiedemiehiä, siis sellaisia jotka ovat alansa standarditieteen täysin omaksuneet ja siihen kiinni kasvaneet, innovatiivisuus ja uudet *synnyt* voivat tutkimuksesta puuttua tyystin. Tiettyjä asioita (periaatteita ja henkilöitä) ei yksinkertaisesti saa kyseenalaistaa.
>
> Olisi hyvä jos tiedemaailmassa olisi mukana myös elämän inhimillisiä puolia ja *aitoa kiinnostavuutta*. Tieteen pitää virittää *tunteita*; jos tiede on elämyksellisesti antoisaa, sille alalle hakeutuvat nekin joilla on *vaihtoehtoja*.

Myös tieteenteon tyyli saattaa olla muutoksessa. Kyse ei ole siitä, että todistustekniikat tms. muuttuisivat, koska ovathan järkevästi päätellyt johtopäätökset kiistämättömiä; ennemminkin ongelmana on premissien ja valittujen tutkimuskohteiden systeeminen mielekkyys. Tutkimusta täytyy ajatella enformaation virtauksen näkökulmasta, ensimmäisen luvun hengessä: ollaanko tutkimuksessa menossa uusien vapauksien suuntaan vai ollaanko vain jäykistämässä rakenteita. Kaikille rakenteille on voitava suorittaa jatkuvaa ”elävyystestausta” jotta nähdään kuinka jäykistyneitä ne jo ovat. Rakenteita pitää voida koetella ennalta-arvaamattomista suunnista,

mikä tahansa käytäntö on voitava kyseenalaistaa, jotta niiden *romahdusherkkyydestä* saadaan oikeaa tietoa.

Intuitiivisesti sopiva, kokoava nimi tällaiselle rakenteita horjuttavalle toiminnalle on *huumori*, kevyt kyseenalaistuksen henki. On voitava ajoissa paljastaa ”keisarit ilman vaatteita”, myös tieteenteon ytimessä. Vain jonkinlaisin ”impulssikokein” voidaan paljastaa vakiintuneiden rakennelmien heikot kohdat. — Tietenkin tulee huomata, että tieteenteon tyylinä vapauden korostaminen on ristiriitainen ajatus, siis jo itsessään ironiaa. Vapautta ei pidä ottaa rajoitteeksi, mutta sitä voi pitää *ideaalina*.

Huumoria ei tieteessä pitäisi siis ylenkatsoa. Mutta vielä rohkeamminkin voidaan väittää: pitäisi uskaltaa ottaa kantaa muunkinlaisiin elävän mielen omituisuuksiin.

Perinteisesti on puhuttu tieteen paradigmoista; kuitenkin monissa tapauksissa asiaa kuvaisi paremmin *dogmi* tai jopa *vakaumus*. Enformaatioteorian johtokin osaltaan näyttää, että jos johdonmukaisesti *uskot* että *maailma on mallitettavissa*, tämä usko ohjaa oikeaan suuntaan, ja silloin maailma tosiaan *on* mallitettavissa. Vieläpä niin, että jos luotat yksinkertaisten (lineaaristen) ratkaisujen olemassaoloon, tulet sellaisia löytämään. Mukaillen *Gaia-hypoteesia* voitaisiin puhua *Pallas Athene -hypoteesista* (tai miksei *Antero Vipunen -hypoteesista*): tutkijoiden jumala suojelee niitä jotka häneen uskovat eivätkä heidän ponnistuksensa ole turhia; lopulliseen umpikujaan ei koskaan päädytä kun seurataan oikeaa tietä.

Yllä oleva on sekin huumoria, tietenkin — mutta siinä on totta toinen puoli. Nykyinen pseudotieteen vähentymätön suosio ”kylmän” tieteen vaihtoehtona osoittaa, että inhimillinen ymmärrys ei voi perustua pelkkään faktaan; ihminen *haluaa* maailmankuvaansa jotain elämyksellisempää. Ehkäpä tämä kertoo jotakin monimutkaisimpien systeemien yleisestä luonteesta, ehkä tätä asiaa ei pitäisi ylenkatsoa? Jos tosiasiat kielletään, lopputuloksena on ajatuksellinen *totalitarismi*.

Kaikki riittävän syvälle menevät ajattelutavan muutokset ovat luonteeltaan uskonnollislaatuisia, perushahmotusten haastaminen edellyttää rohkeutta kierkegaardilaiseen ”uskonhyppyyn”. Tähän asti on näytetty mihin asti päästään jos sovelletaan *uskoa tieteeseen*, Antero Vipusen hengessä puolivakavissaan; seuraavassa luvussa toimitaankin (edellinen poh-

dinta mielessä pitäen) toisin päin, soveltaen vastavuoroisesti *tiedettä uskoon*. — Kuten jo Einstein aikanaan totesi, että *tiede ilman uskoa on rampa, uskonto ilman tiedettä on sokea*.

Luku 7

*E*tiikka ja *E*stetiikka.

Kalevalaisessa kansanuskossa ”luonto” oli persoonan omaavaksi koetun asian suojelushaltia. *Kansanviisautta tämäkin, kertynyttä viisautta: luonnontutkimuksen tavoitteena on loppujen lopuksi* itsensä ymmärtäminen.

7.1 Maailmankuvasta maailmankatsomukseen

Tieteen haasteena on tutkia *todellisuutta*. Mutta erityisen vaikeaksi asia muuttuu, jos ei tyydytäkään objektiiviseen todellisuuteen — sehän nyt on kaikkien nähtävillä! — vaan pyritään pureutumaan *subjektiiviseen todellisuuteen*. Siihen todellisuuteen, missä ihminen joutuu oikeasti elämään ja mikä on hänelle siksi se tärkein. Monimutkaisista järjestelmistä ihmismieli on varmasti se (ainakin psykologisessa mielessä!) *kompleksisin*. Eikö *maailmankuvan* ja *maailmankatsomuksen* pitäisi rakentua samalle perustalle jos halutaan *eheä mieli*?

Toisaalta fraktaalisessa systeemien maailmassa kaikkein subjektiivisimmat tunnot voivat olla kaikkein objektiivisimpia; *pienen* tutkiminen voi antaa erilaisen näkökulman *suureen*, pienessä on suuren synty. Luvun 3 teemaa jatkaen nyt keskitytään siihen kaikkein sisimpään malliin, joka näkökulmaa vaihdettaessa projisoituu kaikkein uloimmaksi.

Tai oikeastaan haaste on vieläkin suurempi: tavoitteena on päästä tyystin eroon erillisistä tarkkailijoista ja tarkkailtavista. Kuinka hyvin teoretisoinnit on saatavissa *projisoiduksi itselleen*, pakottamattomaksi itsestäänselvyyden intuitioksi? Tavoitteena onkin jonkinlainen *introspektion konvergenssi*.

Ehkä voidaan jopa puhua jonkinlaisesta *proto-tieteestä*. Kun kyberneetikko *Heinz von Foerster* määritteli ”toisen kertaluvun kybernetiikan”, hän tyytyi asettamaan kyberneettisen systeemin tarkkailemaan toista kyberneettistä systeemiä; lopputuloksena oli tietenkin monimutkainen itseviittausten labyrintti. Jos harpataankin pidemmälle, suoraan ”äärettömän kertaluvun kybernetiikkaan”, voidaan ehkä löytää *oikopolkuja ajatteluun* (katso taas kappale 1.8).

> Tässä luvussa käydään läpi eräänlainen ”sovellusesimerkki”, joka pyrkii havainnollistamaan enformaatioteoreettista tutkimuksellisen kultakauden ajattelua — kun *kaikki on vielä sallittua*. Tarkastelujen lähtökohtana on ”data” ja lopputuloksena on ”malli”; koska kuitenkin kiinnostuksen kohteena on ajatusten relevanssi, vapausasteet ja niiden *elämä*, lopputulos on ennemminkin intuitiivinen kuin muodoltaan tarkkarajainen. Tavoitteeksi asetettu merkitysten mallittaminen on vajavaista jos malli ei yhdy ymmärrykseen — ja kaikki ymmärtäminen on subjektiivista.
>
> Jos nämä pohdinnat saavat aikaan uusien mielen monadien käynnistymisen, teorian ”validointi” on onnistunut — ei objektiivisen *totuuden* vaan subjektiivisen *relevanssin* mielessä.

Ihminen on psykofyysinen systeemien systeemi, ja ihmisen mieli on kaikkein monimutkaisin fraktaalisten elämien kokonaisuus (huomaa, että myös ylemmällä tasolla oleva ihmisyhteisö on mallina mielessä). Varsinainen testi enformaatioteorialle onkin … ei enempää eikä vähempää kuin tietoisen mielen pohjalle rakentunut tietoista mieltä selittävä ”kaiken malli”.

Kun mielen systeemit tulevat yhä laajemmiksi ja niiden välitön kytkentä ympäristöön tulee heikommaksi, kun systeemeistä kehittyy yhä kon-

struktivistisempia ja relativistisempia ja kun niiden itseviittaavuus tulee äärimmäiseksi, on rakenteiden relevanssin varmistaminen vaikeaa. Kuinka voidaan esimerkiksi taata tasapaino kun memeettisessä maailmassa ”voimille” ei välttämättä luonnostaan löydy stabiloivia vastavoimia? Ja kun informaatiomuotoinen resurssi ei välttämättä edes kulu käytössä, jolloin tätä kautta ei negatiivista takaisinkytkentää muodostu? On ilmeistä, että tarvitaan jonkinlainen mielen ”käyttöjärjestelmä” toimintaa ohjaamaan, ylimmän tason koneisto jonka rooli on muiden mielen prosessien rinnalla *ensisijainen ja ohjaava*. Tällainen koneisto on välttämätön jotta muodostuisi ”mielen homeostaasi” ajattelun painekattilaksi.

Meillä on paljon kokemuksia monimutkaisista memeettisistä järjestelmistä; osoittautuu, että *kaikissa kulttuureissa*, joissa yksilöiden ristiriitaiset pyrkimykset on saatu mielekkäästi koordinoiduksi yhteisön eduksi, on ollut toimintaa ohjaamassa jonkinlainen kyseenalaistamaton moraalikoodisto, tai *uskonto*. Tällä tavoin systeemi on saanut estetyksi toisaalta yksilöiden karkaamisen *anarkiaan* ja toisaalta niiden vajoamisen *apatiaan*. Uskonnot ovat selvinneet muuttuvissakin olosuhteissa vuosituhansien ajan; selvästi nämäkin ovat jonkinlaisia stabiileja attraktoreja meemiavaruudessa. — Fraktaalisessa systeemien maailmassa voidaan olettaa, että samat periaatteet ovat yhtä lailla tarpeellisia yksilön sisäisessä maailmassa kuin yhteisön ulkoisessakin maailmassa eheyden ylläpitämiseksi; ihminen tarvitsee *moraalin*, johon oman maailmansa hahmotuksen ja maailmansa muokkaamisen voisi kytkeä.

Onko tällainen sitten sovelias tutkimuskohde ja lähestymistapa? ”Uudessa tieteessä” ei saa olla tabuja; päinvastoin, osoittautuu, että perinteiset tabut tarjoavat neitseellisen ja erityisen hedelmällisen tutkimuskohteen! Missä vaiheessa on päätetty, ettei parhaita lähestymistapoja saisi käyttää kaikkein syvällisimpien kysymysten pohdintaan, missä vaiheessa *pirstaloituminen* on otettu ideaaliksi? Jotenkin tuntuu, että tiede on määritellyt *hyveiksi* asiat jotka oikeasti ovat *puutteita*: jos tieteen raskas koneisto rikkoo liian hienosyiset tutkimuskohteet, kuten nämä subjektiiviset maailmat, ne on tulkittu *tieteellisesti epäkiinnostaviksi*. Ehkä tieteen kenttää voitaisiin laajentaa, ehkä kevyempi kytkeytyminen ei rikkoisi kohdettaan, niin että

kaikkein kiinnostavimpia pohdinnan kohteita ei tarvitsisi ylenkatsoa?

Kuten edellisessä luvussa todettiin, rakenteita pitää voida horjuttaa, kaikkia elämään kuuluvia osa-alueita tulee voida kyseenalaistaa, kaikkein jäykistyneimpiä kaikkein eniten; ja eniten jäykistynyt inhimillisen elämän osa-alue on juuri uskontojen maailma.

Tieteenfilosofi *Karl Popper* on sanonut, että ”tieteen täytyy alkaa myyteistä ja niiden kritiikistä”. Nyt palataan takaisin myytteihin, sykli on tullut täyteen; kuten Hegel, ensimmäinen suuri systeeminrakentaja, jo aikanaan visioi ihmiskunnan mahdollisuuksista päästä *henkisesti eteenpäin*:

> Tarvitsemme uutta mytologiaa – – mutta sen täytyy olla *järjen mytologia*. – – Jos ideoita ei esitetä *esteettisesti*, tavalliset ihmiset eivät kiinnostu niistä – –

Mitä ihmeen mytologiaa? Mitä tässä tarkoittaa ”esteettisyys”? Voivatko tällaiset asiat mitenkään liittyä *järkeen*? Kovia ovat haasteet; katsotaan mitä voidaan saada aikaan.

On tarjolla monenlaisia sisäisesti ristiriidattomia moraalikoodistoja; tässä luvussa katsotaan, minkälaisia uusia näkökulmia asiaan enformaatioteorian soveltaminen voisi tarjota. Olkoon tämä luku myös esimerkkinä siitä, mitä edellä peräänkuulutettu *tieteellinen irrottelu* voisi olla; kannattaa kuitenkin muistaa, että vitsin idea väljähtyy jos sitä selitetään liikaa.

7.2 Antureita ymmärrykseen

Kuten aina mallituksessa, tarvitaan taas paljon havaintoaineistoa; nyt meillä on käytettävissä rippumattomien kulttuurien tarjoama tuhansien vuosien aikana kertynyt viisaus ”ihmisenä olemisesta”. Tämä ymmärrys on kiteytynyt uskonnoiksi. — Eivät entisajan ihmiset olleet tyhmiä, päinvastoin; silloin heillä oli ehjempi suhde luontoon ja *aikaa ajatella*.

Haettaessa ”optimaalista moraalikoodistoa”, täytyy ensimmäisenä todeta, että *kristinusko* ei tue kokonaisvaltaista eheyttä: *perisynnin* ajatus korostaa sitä, että kaikki inhimilliset ”synnyt” ihmisessä ovat pahoja, ja ”uudestisyntymä” on ainoa reitti oikeaan suuntaan. Mutta, kuten on todettu, syntyjä ei voi jälkikäteen uudelleenkäynnistää. Toinen ongelmallinen

seikka on kristinuskon voimakas leviämispyrkimys; kuitenkin tavoitteena pitäisi olla tasapaino ympäristön kanssa, vasta tasapainotilanteessa näyte on enformaatioteoreettisesti kelvollinen. Voidaankin arvioida, ettei tämä ”näyte” sovellu opetusaineistoksi: eihän kristinuskon osalta vielä ensimmäinenkään 2500 vuoden mittainen kulttuurinen sykli ole tullut täyteen!

Haetaankin vihjeitä muista suunnista. — Haasteena kuitenkin on se, *Jean-Paul Sartrea* mukaillen, että länsimainen yritys neutraalisuuteen on helposti vain *kristillistä ateismia* ja kapinaa. Jopa islamista voisi olla tässä opittavaa: *nöyryys* on hedelmällisempi ajattelun pohja kuin länsimainen röyhkeä kaikentietävyys.

Monoteistisissä uskonnoissa kaikki on pohjimmiltaan keskusjohtoista — ja sama ajattelu periytyy alemmillekin tasoille; länsimaissa hengen ja aineen erottelu on läpitunkeva ajattelun perusta. Tästä on ollut se etu, että reduktionistiset tutkimusmenetelmät ovat tuottaneet valtavasti yksityiskohtaista tietoa luonnosta. Ei kuitenkaan tarvita ”ensimmäistä liikuttajaa” kun elämä pursuaa kaikkialla omalla paineellaan. Nyt on vain kevennettävä otetta ettei tämä elämä karkaa. Ehkä onkin syytä siirtyä *itämaisen ajattelun* suuntaan. — Tarkastellaan seuraavassa vain muutamia idän uskontojen avainteemoja siltä kannalta, kuinka hyvin ne osuvat yhteen enformaatioteoreettisen ajattelun kanssa.

- Hindulaisuus on uskonto, jossa keskeinen oivallus on *elämän pyhyys*. Kaikki on *syklistä*: syntyjä ohjaa Brahma, ylläpitäjä on Vishnu, ja kaiken tuhoaja on Shiva.

- Buddhalaisuus toteaa kaiken olevan pohjimmiltaan *energiaa* ja *virtausta*, mielen konstruktiot ovat harhaa. Elämä on *pyrkimystä* ja *kärsimystä*; vain tahdon kuolettaminen voi johtaa *nirvanaan*.

- Zen-buddhalaisuus korostaa toisaalta *ajattelun tärkeyttä* mutta samalla *ajattelun harhaisuutta*; ajatuskokeiden tarkoitus on saattaa ihmisen äly umpikujaan, näyttää että asiat pakenevat määrittelyyrityksiä.

- Taolaisuus tavallaan korostaa *vapausasteita*: asioita hallitsee kaksi vastakohtaa, *jin* ja *jang*. Molemmat tarvitaan, kumpikaan ei ole

KUVA 7.1: Memeettinen *elämänpyörä*?

sinänsä hyvä tai paha, vaan hyvä löytyy ääripäiden tasapainosta.

- SHINTOLAISUUS on kiinnostava esimerkki siitä, kuinka erilaiset uskot voivat elää rinnakkain, ja kuinka *animismi* voi toimia maailmankatsomuksen pohjana vielä nykyaikanakin. Tähän palataan kappaleessa 7.7.

Näissä kaikissa on selvästi yhtymäkohtia enformaatioteoreettiseen ajatteluun; kuvassa 7.1 on esitetty eräänlainen yhdistelmä näistä ajatuksista, mukaillen *teosofian* symboliikkaa. Seuraavassa tarkastellaan tarkemmin, kuinka näitä ajatuksia on esitetyissä puitteissa laajennettava, että ihmisestä voisi tulla osa suurempaa kokonaissysteemiä, niin omassa maailmassaan kuin muidenkin maailmoissa. Osoittautuu, että olemme jo nähneet tämän kaiken — kyseessä on taas yhden syklin täyttyminen.

7.3 Tunne itsesi — oma mallisi

Onko relativismia palvovassa nykymaailmassa joitakin sellaisia ajattelun kiintopisteitä, joiden varaan maailmankatsomuksensa voisi perustaa? En-

formaatioteorian puitteissa tällaisia voidaan väittää löytyvän.

Mitä sitten voidaan tehdä kun kuitenkin havaintoaineiston mallit optimoituvat neokyberneettisin perustein automaattisesti? Ensimmäisessä luvussa tarkasteltiin *semioosia*: voidaan todeta, että ulkomaailmassa nähtävien resurssien $\bar{u}_j$ suhteellinen *painotus* jätettiin tarkastelematta. Tämä painotusten määrääminen on kuitenkin se ensimmäinen vaihe jonka jälkeen vasta optimointi voi alkaa. Ja pääkomponenttianalyysin antamalla kokemuksella tiedämme, että mallinnuksen tulokset määräytyvät täysin eri datayksiköille annetun ”näkyvyyden” perusteella. Tämä periaate on voimassa jokaisella mallituksen tasolla: painotus määrää merkityksen kaikelle havainnoinnille. Ihmisen tietoisen hahmotuksen tasolla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka ulkomaailma nähdään; ne ovat *arvotukset* jotka määräävät tämän havaintojen painotuksen.

Kuinka havaintojen painotukset tulisi valita? Enformaatioteorian puitteissa tiedämme, että systeemien evolutiivisesti kestävä ikuinen ”tehtävä” on *enformaatiovuon kasvattaminen* kaikilla systeemitasoilla, eli entropian fraktaalinen edistäminen. Käytännössä tämä hienosyinen entropian kasvu näkyy *elämänä*, hajautettuina entropiapumppuina. Tästä saadaan yleispätevä toimintaohje: *edistä kaikkea elämää ja sen monimuotoisuutta*!

Kuten on todettu, elämää on hyvin eritasoista ja laadultaan erilaista; systeemejä on niin fyysisiä kuin henkisiäkin. Täytyykin hyväksyä se, että *erilaisten elämien arvo on erilainen*; ihmisarvokin on osa ”systeemiarvon” jatkumoa. Arvokkaimpia fraktaalisen elämän kudoksia ovat sellaiset ihmisten muodostamat yhteisöt, jotka mahdollistavat uusia emergenttejä henkisen elämän tasoja. Eikä ihmisarvoa määrää ihonväri tai älykkyys, vaan *omaksutun elämän määrä*!

Ihmisellä on erikoisasema kaikkien systeemien joukossa: ihmisellä on se *vapaa tahto* ja *innovaatiokyky*. Kuten aiemmin on todettu, vapaudet ovat elämän edellytys (tai toisin tulkittuna ne ovat elämän yksi ilmenemismuoto). Voisikin ehkä sanoa, että ihmisen haasteena on *vapaa tahto vapauksien hakemiseen*: olisi löydettävä uuden elämän mahdollisuuksia niiden ollessa vielä synnyssään, ja tällaiset vapaudet olisi muutettava edelleen enformaatioksi, uudeksi lisäarvoksi ja uusiksi monadeiksi.

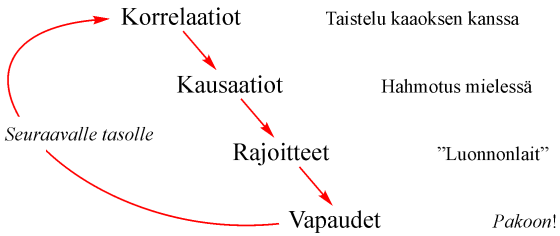
Onko tällainen vapauksien haku nyt siis yksilölle asetettu moraalinen

velvoite, rajoite sekin? Voidaan väittää, että kaikki on ihmiselle luonnollista, pakottamatonta, luonnonjärjestyksen mukaista. Kyseessä on ennemminkin perustavanlaatuinen kaipuu jonka luonto on ihmiseen asentanut; uusien vapauksien löytämistä voidaan verrata siihen vastustamattomaan *rakastumisen tunteeseen*, huimaukseen uusien tuntemattomien mahdollisuuksien äärellä. Sen *kauneuden elämyksen* haluaa kokea yhä uudelleen.

Koska ihmisen ympäristön muodostavat toiset ihmiset, uudet omat vapaudet ovat parhaimmillaan myös muille avautuvia uusia enformaation kanavia.

Syntyjen olisi myös päästävä toteutumaan täysimittaiseen elämäänsä. Aivan samoin kuin immuunijärjestelmässä herätteen puutteessa ”virittymättömiksi” jäävät vapausasteet emergoituvat vääriin suuntiin, aiheuttaen patologisia immuunisairauksia, voidaan väittää, että ”siedätyshoidon” puutteessa syntyy ”mentaalisia allergioita” — täytyy kohdata erilaisuutta niin että se tulee mielekkäästi mukaan malliin. Ihminen on rationaalinen, reagoiden ympäristöönsä mielekkäästi — mutta vain subjektiivisessa maailmassaan, omien vapausasteidensa määräämässä mitassa.

> Liittyen mallien virittämiseen ja adaptaatioon, keskeinen ero verrattaessa enformaatioteoriaa idän uskontoihin on se, että ideaalitilana ei nyt ole staattinen tasapaino ja ympäristön vakioituminen vaan systeemin (oman mielen, omien voimavarojen) ymmärrys ja hallinta. Voidaan väittää että *onni* on tunto *elämänhallinnasta*: tieto siitä, että ympäristön häiriöistä huolimatta itsellä on kyky palautua poikkeamista takaisin dynaamiseen tasapainoon. Vain riittävällä aika ajoin annetulla monipuolisella herätteellä (puhuttakoon vaikka ”Linnanmäki-efektistä”) voidaan välttää adaptiivisten mallien normaali kohtalo (katso kappale 5.6).
>
> Toisaalta idän uskonnot ovat oikeassa siinä, että vapausasteen molemmat päät ovat yhtä lailla huonoja (*jin* ja *jang*). Jonkinlainen ”hyvä” on tasapaino pahojen välillä, kuten kuva 5.3 sivulla 135 näyttää. Tällainen dynaaminen tasapainottelu merkitsee henkistä epävarmuutta ja yleensä valmiutta



KUVA 7.2: Epävarmuudesta varmuuteen ja takaisin

uusille avauksille (synnyille). Voidaan väittää, että jonkinlainen ”mininirvana” on tunne oivalluksen toteutumisesta ja pääsystä hetkeksi pakoon jäykistyneestä tasapainosta rajoittamattomaan henkisen vapauden virittämään uuteen dimensioon. Kuvassa 7.2 on hahmoteltu tätä henkisen elämän vääjäämätöntä sykliä.

Jean-Paul Sartre on sanonut, että *jokaisen tulisi keksiä oma tarkoituksensa ja päämääränsä aivan itse*. *Eino Leino* puolestaan sanoo suoraan ihmisen päämäärästä, että *tie on tehty, määrä pantu, vuori noustava: vapaus*. Tämä on elämänmittainen haaste. Mutta asioita ei tarvitse pohtia näin hienostuneesti, koska *jokainen toteutunut elämä on näyte todellisuudesta ja siinä selviämisestä*. Kun aika-akseli abstrahoidaan, *jokainen elämäntarina pelkistyy automaattisesti omaksi vapausasteekseen*. Yleisemminkin: *Muriel Rukeyser* sanoo, että *maailmankaikkeus on tehty tarinoista, ei atomeista*. Tosiaan, tarinat ovat vapausasteita, jolloin niitä vastaavat monadit ovat atomeita — nyt maailmankatsomuksen perusrakenteita.

Kun Herakleitosta voidaan pitää eräänlaisena neokybernetiikan oppisänä, sanokoon hän viimeiset sanat myös tästä asiasta: ”kaikille ihmisille kuuluu itsensä tunteminen ja kohtuullisuus”. — Kohtuus kaikessa, myös viisauden tavoittelussa. Oppimisprosessi on sekin muutostila: lopullinen tavoite on valmis itsensä malli, pelkkä *oleminen*, koska täytyyhän jäädä aikaa myös tasapainon testaamiseen!

7.4 Kauneuden universaalisuus

Elämän monimuotoisuus asettaa uuden haasteen: kuinka tunnistaa erilaiset elämänmuodot, sellaisetkin, jotka näkyvät vasta elämän *mahdollisuutena*? Voitaisiinko arvotus *automatisoida*? Taas voidaan väittää, että luonto on näin tärkeän asian joutunut jo evoluution aikana ratkaisemaan, pienen ihmisen viisastumiseen riittää taas kun vain yrittää ymmärtää luonnon toimintaperiaatteita: meille on kehittynyt *kauneudentaju* kertomaan tarkastelukohteen *sisäsyntyisestä hyvyydestä* tai *arvosta*. Asiassa havaittu *fraktaalisuus* tai *symmetria* tai vaikka *monimuotoisuus* tai ilmeinen *epätodennäköisyys* paljastaa intuitiivisesti sen, että järjestelmällä on jonkinlaiset sisäiset mallit, ja todennäköisesti edelleen näiden mallien pohjalle rakentuvat monadikokonaisuudet; malleja ei tarvitse osata purkaa osiin nähdäkseen että sellaiset on olemassa.

Toisaalta *sopusuhtaisuus* tai *harmonia* irvokkuuden vastakohtana paljastaa intuitiivisesti, onko tarkasteltu järjestelmä sisäisessä tasapainossa; tällöin se ei ole todennäköisesti vielä ajautunut ylikytkeytymisen kautta ”systeemiseen narsismiin”.

Voidaan väittää, että yleisestikin *kauneusihanne vie oikeaan suuntaan*, tai ainakin se ohjaa ulos umpikujista; ehkä paras esimerkki tästä on symmetrioiden menestyksekäs soveltaminen modernissa alkeishiukkasfysiikassa. Konkreettinen esimerkki sisäsyntyisestä symmetriasta oli kuvassa 3.3 sivulla 63, ja myös kustannuskriteerissä (5.1), jolloin kauneuden ilmeneminen antoi uskoa siihen, että valittu lähestymistapa on ”oikea”.

Sama esteettinen arvotuksen periaate tuo sitten esimerkiksi *taiteen* samalle asteikolle muun elämän kanssa: taideteoskin antaa kokijalleen mahdollisuuden *synnyn aavistukseen*, oivallukseen, uusiin malleihin ja vapauksiin. Esteettinen elämys on kuin lupaus uudesta henkisestä elämästä ja uusista maailmanmalleista. Ongelmana on kuitenkin se, että tällaiset malliaihiot ovat rasite niin kauan kuin niitä ei tarvita; haasteena onkin valita, millaisia ”meemiloisia” mieleen kannattaa hyväksyä. Tilanne on sama kuin ”geeniloisten” tapauksessa: genomissa on suuri määrä näennäisesti tarpeetonta, koodaamatonta *roska-DNA:ta*, joka ehkä jossakin tilanteessa voi aktivoitua ja auttaa enformaation talteenotossa. Ehkä mallien ei ole

sittenkään syytä olla aivan optimaalisia.

> Hienosyisiä ilmiöitä ei pidä ylenkatsoa. Kauneudentaju on avainasemassa, koska se usein määrää, mihin suuntaan synnyt lähtevät emergoitumaan. Useat intuitiiviset päätökset ovat näennäisesti satunnaisia: voidaan esimerkiksi väittää, että *asutus on kehittynyt ensisijaisesti kauniisiin paikkoihin* (kun vaimothan tämän kai ovat aina päättäneet!). On onnekas ”sattuma”, että kauneus korreloi elämänvoiman kanssa: missä on kauneutta, siellä tyypillisesti on tarjolla myös elanto.

Kauneudentaju näyttää olevan universaalia, ei sosiaalisesti rakentunutta tai kulttuurisesti opittua: yhteneväisyydet eri yksilöiden, ryhmien ja kulttuurien keskuudessa ovat huomattavasti suuremmat kuin eroavaisuudet. Esimerkiksi luonnonympäristöt ovat ihmisille kaikkialla enemmän mieleen kuin kaupunkiympäristöt. Ja tällainen universaalisuus ei rajoitu ihmisiin: Charles Darwin oli omaksunut käsityksen *kauneusaistista*. Hänen mukaansa ihmisillä ja esimerkiksi koreahöyhenisillä linnuilla on perimmältään yhteinen kauneudentaju; hän piti loppuun asti kiinni siitä, että sukupuolivalinnassa päätöksen tekevä sukupuoli (yleensä naaras) valitsee lisääntymiskumppaninsa yksinomaan kauneudentajunsa ohjaamana, ei edun tai hyödyn vuoksi. Ehkä on niin, että pinnallinen kauneus sittenkin heijastelee alla olevien systeemien kaikinpuolista toimivuutta; ehkä luonto on tarkoituksella tehnyt monitavoiteoptimoinnin näin helpoksi?

Voidaan jopa olettaa, että myös maanulkoinen elämä ymmärtää samoja kauneuden universaaleja periaatteita. Niinpä *taide* on ainoa asia mikä meidän tekemisissämme on kosmisessa mitassa kiinnostavaa; kaikki relevantit mallit on jo moneen kertaan keksitty maailmankaikkeudessa, mutta erilaiset vapaudet ja tuoreet innovaatiot voivat olla ainutlaatuisia. — Ensimmäisessä luvussa todettiin, että luonto yrittää ymmärtää ja mitata itseään; tähän se tarvitsee ihmistä, koska ihmisellä on mahdollisuus olla se kaikkein herkin ja monimuuttujaisin mittausanturi.

Esteettinen elämänasenne on siis jotakin mihin pitäisi pyrkiä; se ei kuitenkaan tarkoita *boheemielämää*. Mitä se sitten on? Eräänlaisen konkreettisen näkökulman asiaan tarjoaa *Miyamoto Musashi*, menneiden aikojen japanilainen soturimestari, joka kiteytti *samurain tien* muutamaan elämänohjeeseen. Seuraavassa on näistä ohjeista tarkoitushakuisesti pelkistetty lista:

- Opettele tinkimättömästi *täydelliseksi*.
- Perehdy *kaikkiin* taitoihin / taiteisiin.
- Keskity *yksityiskohtiin*.
- *Älä tee mitään turhaa*!

Tämä elämänohjeiden lista on näennäisesti ristiriitainen; väite nyt on, että se voidaan mielekkäästi ymmärtää vain enformaatioteorian kehyksessä. Tavoitteena nimittäin voidaan olettaa olevan se, että löytää tekemisilleen mahdollisimman pelkistetyn mallin. Yksinkertaisimmillaan malli hyödyntää erilaisten ongelmakenttien sisäistä fraktaalisuutta ja keskinäistä similaarisuutta. Yksityiskohtien merkitys selittyy sillä, että asioiden ytimet ovat pelkistetyimmillään pienimmissä fraktaalisissa yksityiskohdissa, kun kehitys ei ole vielä ehtinyt kauas synnystään, kun voidaan vielä nähdä läheltä se *goethelainen alkuilmiö*. Tunnistaessaan oman alansa ”universaalin synnyn” on löytänyt sen olemuksen? — Periaatteet ovat samat valitusta vapausasteesta riippumatta, siis ne voidaan yleistää koskemaan kaikenlaisia elämänuria.

Ei kuitenkaan huolta; taide ei muutu tieteeksi. Vaikka perusperiaatteena on elämän arvostus, erilaisten elämien suhteellisten painotuskertoimien oikea määrittäminen subjektiivisessa maailmassa jäänee ikuisesti avoimeksi kysymykseksi. Kauneus siis on katsojan silmässä — mutta yhtä lailla se on myös katsomisen kohteessa; *katsojan ja katsottavan kenttien yhteensovittumista* tarkastellaan vielä kappaleessa 7.6.

7.5 Kaveria ei petetä

Edellä tarkasteltiin havaintojen painotusta; toinen semioosiin liittyvä vapausaste jota ei vielä ole tarkemmin käsitelty on *emergenssioperaattorin määrittely* kappaleessa 1.3. Mistä perspektiivistä ympäristö kannattaa nähdä, spatiaalisesta vai temporaalisesta näkökulmasta?

Asia ei ole aivan itsestäänselvä; tämän ymmärtämiseksi tarkastellaan ns. *vangin dilemmaa*. Tähän ongelmaan suhtaudutaan yleensä jonkinlaisena kuriositeettina, eräänlaisena *vitsinä*, koska se ei sovi vakiintuneen teorian kehykseen — *perinteinen peliteoria ei kykene antamaan tälle järkevää ”voittostrategiaa”*:

> Kaksi henkilöä on vangittuna samasta rikoksesta. Heitä houkutellaan todistamaan toisiaan vastaan sanomalla, että siinä tapauksessa vain se syylliseksi todistettu saa pitkän tuomion, kun taas ”syytön” vapautuu. Jos kumpikaan ei suostu todistamaan toista vastaan, molemmat saavat pienen tuomion. Kuitenkin jos *molemmat* pettävät toisensa, kumpikin saa pitkän tuomion.
>
> Peliteoreettinen tarkastelu antaa tulokseksi, että *aina kannattaa pettää*. Jos nimittäin se toinen vanki pettää, silloin omalla valinnalla ei ole merkitystä; mutta jos jostakin syystä toinen *ei* petä, itselle edullisempaa on tietenkin valita vapautuminen ja pettää. Ongelma vain on se, että toinen ajattelee samoin, jolloin molemmat pettävät toisensa, ja molemmat saavat vääjäämättä pitkän tuomion.
>
> Tässä oletettiin, että vangit eivät pääse keskustelemaan keskenään; asia ei kuitenkaan muutu, vaikka yhteisestä strategiasta päästäisiin neuvottelemaankin. Jos moraali ei rasita päätöksenteossa, ei ole olemassa sellaista sopimusta mitä ei tarpeen tullen voisi rikkoa!

Näin ollen ”optimaalinen” päättely (ns. *Nashin tasapaino*) tarkoittaa käytännössä *huonompaa* lopputulosta kuin mihin ”käytännöllinen” päättely

johtaisi; toimivathan ihmiset usein *solidaarisesti* tai *altruistisesti*, näennäisesti omaa etuaan vastaan, eli vangin ongelman tapauksessa jääräpäisesti kieltäytyisivät pettämästä toistaan. Ulospäin tällainen (suomalaistyylinen!) luottavaisuus ja luotettavuus näyttää lähinnä hölmöydeltä; sitä ei voi järjellä perustella toisenlaisesta kulttuurista tulevalle.

Voidaanko peliteoriaa ”virittää” antamaan käytännönläheisempiä tuloksia? Lähemmäs reaalimaailmaa päästäänkin määrittelemällä ns. *toistettu* (*iteroitu*) *vangin dilemma*, jossa samat pelaajat asetetaan toistuvasti saman ongelman eteen; tällöin pelurit joutuvat kärsimään lyhytnäköisistä strategiavalinnoista. Tilanne ei kuitenkaan muutu olennaisesti: jos ”peli” on äärellisen mittainen, pettäminen *lopussa* ei ehdi kostautua; tällöin kannattaa ehtiä pettämään ensimmäisenä; tämän voi varmistaa vain *pettämällä alusta lähtien*! Tällöin päädytään takaisin ”pörssipelurin moraaliin”.

Vain jos tarkasteluväli jatketaan äärettömäksi, jos uhkana on iankaikkisuus dantelaisessa ”kavaltajien helvetissä”, tilanne muuttuu laadullisesti; mutta tähän *emergentin tason moraaliin* ei peliteoria alkuperäisessä muodossaan enää sovellu.[10] Ei kannata yrittää olla liian ovela — eikä liian ovelien kanssa kannata olla tekemisissä! Viisauden perustana on usko siihen, että kaikesta huolimatta *elämä jatkuu* ja *kaikki toistuu*.

Jotta yllä oleva dilemma voidaan formaalisti ratkaista, maailman hahmotuksen tapa on muutettava: *emergenssioperaattorin tulee toimia aika-akselin suunnassa* myös ylimmän tason hahmotuksessa — eli taas aika-akseli on abstrahoitava pois. On helppoa katsoa maailmaa *tässä hetkessä*, jolloin kykenee näkemään useiden aikatason realisaatioiden hetkelliset hahmot; mielekkäämpää on kuitenkin nähdä *hahmot ajassa*, aika-akselia seurattaessa emergoituvat hahmot, jotta voi itselleen perustella ”kestävän kehityksen” periaatteet tämänhetkisen kaaoksen alla. Tarkkaan ottaen täl-

[10] Peliteoriassa on sittemmin kehitetty tehokkaita simulaatiostrategioita jotka soveltuvat ”äärettömiin peleihin”, esimerkiksi *tit-for-tat* ja *win–stay, lose–switch*; tosin näissäkin ajavana pakotteena on ulkopuolelta määrätty *koston pelko*, ei *yhteinen etu* eli systeemin menestys. Vastikään *William Press* ja *Freeman Dyson* väittivät löytäneensä *voittostrategian* iteroituun vangin dilemmaan; miten vain, mutta on kuitenkin varmaa, ettei sekään strategia takaa *systeemistä menestystä* useiden kustannuskriteereiden maailmassa, jossa häviäjiä ei kannata suututtaa.

lainen näkökulman muuttaminen edellyttäisi *uskoa maailman stationaarisuuteen* tai oikeastaan *ergodisuuteen*: jotta eri tarkastelunäkökulmat vastaisivat toisiaan, jotta historia kertoisi nykyajasta, *mallin yli aika-akselin täytyy vastata mallia yli realisaatioiden*. Tämä edellyttäisi pohjimmiltaan muuttumatonta maailmanmallia, tai (kappaleen 5.6 mukaisesti) ainakin uskoa *syklisyyteen*, asioiden toistumista olennaisimmilta osin yhä uudelleen.

Tällaisesta näkökulmasta voidaan ymmärtää *altruismi*. Kun et katsokaan yhteisön ihmisiä ”paikan yli”, jolloin näkisit ihmisten erilaisuuden ja keskinäisen kilpailun, vaan ensisijaisesti ”ajan yli”, jolloin näet sukupolvien ketjun, ihmisten sukulaisuus ja konkreettinen keskinäisen riippuvuuden ja luottamuksen jatkumo sitoo mallin uudella tavoin yhteen: et halua pettää ”omiasi” — ja voit luottaa että ne toiset ajattelevat samoin.

7.6 Morfiset kentät

Kun aika abstrahoidaan pois, mutta kun kaikki mennyt kuitenkin haluttaisiin jollakin tavalla nähdä nykyhetkessä, voidaan (tuttuun tyyliin) hahmottaa asiat *toistuvina värähtelyinä* tai *taajuuksina*. Edellisessä luvussa oletettiin, että vuorovaikuttavien ”systeemien systeemi” edellyttää *kenttiä*, ja niitä se edellyttää myös ylimmällä hahmotuksen tasolla.

Mutta mielen maailmassa kentät ovat vain metafora eivätkä ne ole rajoittuneet fyysisiin aaltoliikkeisiin; ”kentän” voi muodostaa mikä tahansa systeeminen ilmiö, jonka voi hahmottaa oman maailmansa abstraktina syklisenä jatkumona. Esimerkiksi *työ* muodostaa ihmisten ja ponnistelujen jatkumon, samoin koko *yhteiskunta*; kaikki näiden systeemien sisällä olevat ihmiset ovat osa värähtelykenttää, muodostaen yksittäisiä aallonharjoja. Itsensä pitää sovittaa kenttiin, virittää ”samaan taajuuteen” jotta näissä kentissä voisi ”resonoida”, toteuttaa itseään, ja jotta enformaation välittyminen järjestelmässä maksimoituisi. Itämainen puhe elämisestä *harmoniassa* saa hyvin konkreettisen tulkinnan.

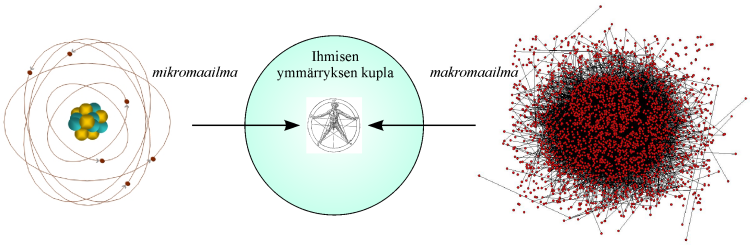
Neokyberneettisesti mielekäs ihmiskuva on systeeminen: niin kuin jäniksellä kappaleessa 1.8, myös ihmisen määrittely pitää perustaa yhteisöön ja ympäristöön. Yksilö on lähinnä kohinaa.

Ihmisten välinen vuorovaikutus edellyttää *kytkeytymistä*. Ei liene pelkkä sattuma, että puhutaan olemisesta *samalla aaltopituudella.* Tutkija *Rupert Sheldrake* sanookin, että ehkä emme ole ”nauhureita”, jotka tallennamme ja toistamme toistemme sanoja, vaan ennemminkin olemme jonkinlaisia ”viritinvahvistimia”, jotka otamme vastaan tiettyjä aallonpituuksia ja välitämme niitä eteenpäin; tavoitteena on päästä muiden kanssa *resonanssiin*.

Pyrkimys herkkyyteen saattaa kuitenkin johtaa *yliherkkyyteen* ja sielulliseen epätasapainoon. Mitäpä sanoa vaikkapa niille, jotka väittävät tuntevansa *astraalivärähtelyt*?

Rupert Sheldrake puhuu *morfisista kentistä* ja *morfisista resonansseista*, jotka perustuvat konkreettisiin vuorovaikutuksia välittäviin kosmisiin värähtelyihin; on kuitenkin ilmeistä, ettei sopivia fysikaalisia voimavaikutuksia ole olemassa tällaisia värähtelyitä erilaisten systeemien välillä kuljettamaan, saati että systeemeillä olisi vastaanottimet tällaisten kenttien vastaanottamiseksi. Tätä epäilystä tukee kenttien abstrakti luonne, ja se, että värähtelyillä on hyvin erilaiset aikaskaalat ja syklien pituudet. Onkin ilmeistä, että *kentät voidaan mallintaa ja realisoida vain mielessä*; tällaista mentaalisimulointia kykenee suorittamaan *ihminen*.

> Villejä arvauksia on helppoa heittää — mutta tarjoaako esitetty ”ihmisyhteisön kenttätulkinta” lisäarvoa käytännön ongelmien ymmärtämiseksi, vai onko se pelkkä metafora? Ylättäen, kaikkein mystisimmät *joukkopsykoosi-ilmiöt* saavat ehkä uudenlaista valaistusta.
>
> Voidaan väittää, että ”aaltofunktioiden romahtaminen” on kaikille kompleksisille kenttäilmiöille ominainen tapahtuma. Mitä se sitten tarkoittaa *yhteiskunnan* tapauksessa? Systeemin tilan romahduttava häiriö voi olla sisäinen (vaikkapa sosiaalinen hajoamiskehitys) tai ulkoinen (esimerkiksi sodanuhka); kehittynytkin yhteiskunta voi taantua useiden vaihtoehtojen moniarvoisuudesta yhden totuuden totalitaarisuuteen, ”yhteistahtoon”. Yksilö huomaa olevansa vain systeemin tahdoton osa; kaikki trivialisoituu ja projisoituu



KUVA 7.3: Ihmisen rooli maailmojen linkkinä

> yhdelle akselille (”meidän puolellamme tai meitä vastaan”). Yleensä hahmoton yhteiskunta tulee tällöin näkyväksi, individualisoituu käsinkosketeltavaksi toimijaksi, redusoituessaan yksikäsitteiseen tilaan lukemattomien vaihtoehtojen avaruudessa.

Yhteisöönsä kiinnikasvanut yksilö heijastelee kenttiä, vaikka se ei olisikaan tietoista ja tarkoituksellista, toteuttaen näin populaationsa ”sykkivää” elämänhalua, ilmentäen yhtä aikaa systeeminsä uusiutumiskykyä ja sen jatkuvuutta. Mutta ihmissysteemi on muiden systeemien joukossa erikoistapaus — sillä on mahdollisuus parempaankin. Ja kun kerran siihen on mahdollisuus, se on myös evolutiivisen universumin määräämä vääjäämätön kehityskulku.

Olettaen, että luvun 6 kenttätarkastelut ovat perustaltaan *universaaleja*, ihmisellä voi olla erikoisasema monimutkaisten systeemien joukossa niiden ”yhteenkytkijänä” (katso kuva 7.3). Vain ihminen voi mielessään toteuttaa systeemienvälisen yleisen koordinaation yli aikaskaalojen, toteuttaen *maailman tietoisuuden*.

Hegel puhui aikoinaan siitä, kuinka *historia on saavuttamassa itsetietoisuuden*. Mutta ihminenhän onkin osa luontoa, ja historian toteuttaminen ja tulkitseminen on hänen roolinsa; ihmisen päänsisäinen tietoisuus voi laajentua kattamaan kaikki systeemit. Ihminen ei ainoastaan toteuta korkeimman tason mallit ja säädöt — hän myös implementoi kaikelle *tarkoituksen*, aiemmin käsitellyn sisäsyntyisen *merkityksen* lisäksi.

Kyse ei ole siitä että ihminen vain ulkokohtaisesti *tietää* — hänen pitää olla mukana, kytkeytyä ja *kokea*. Kentät ovat dynaamisia; esimerkiksi ihmisten keskinäisessä vuorovaikutuksessa täytyy reagoida vaistomaisesti oikeassa vaiheessa ja tehdä oma impulssinsa vaikuttaakseen maailmaan mielekkäällä tavalla. Yksittäisellä ihmisellä on merkitystä vain siltä osin kuin hän osaa tällaisten kenttien kokonaisuuteen kytkeytyä. Se onnistuu vaistomaisesti, jos tuntee (itämaiden ajatuksia taas seuraten) ”kosmisen huminan”. Ihmisen ei pitäisi liikaa häiritä maailmansa sointia; kunhan lyö siihen oikeassa vaiheessa oman harmonisen sointunsa.

Ihmisen tavoitteena on toimia osana kollektiivista tietoisuutta, ja välittää värähtelyjä, niin kuin *eetterin* aiemmin ajateltiin välittävän sähkömagneettisia aaltoja universumissa. Kohdalleen viritetty ”impedanssisovitus” mahdollistaa ”kompleksisen kirkkauden”, häviöttömän enformaatiovirtauksen avaruudessa (noosfäärissä), samoin kuin kosminen evoluutio (vuorovaikutusparametrien sovittuminen) aikanaan teki kosmoksen läpinäkyväksi. Mutta jotta tällaiseen päästäisiin, jotta ihmiskunta muodostaisi monimutkaisille järjestelmille universaalin eetterin, ymmärryksen laajenemisen täytyy läpäistä kaikki ihmiset, kollektiivisesti, systeemisesti; pelkkä yksittäisten yksilöiden valaistuminen ei riitä.

7.7 Emergoituva henkimaailma

Kuten luvussa 5 havaittiin, vapaudet ovat sidottuja rajoitteisiin — ja niin mielen maailmassakin. Kappaleessa 7.3 käsitelty vapauksien ideaali johtaa henkilökohtaiseen kaaokseen, jollei akseleita sido jokin kiinteä ”koordinaatisto”. Niin muodikasta kuin onkin korostaa täydellistä vapauttaan, ihmisen kuitenkin pitää uskaltaa sitoutua johonkin: mieli tarvitsee ”juuret ja siivet”. Kuten tiedetään, vahva *perusturvallisuus* antaa tukevan perustan erilaisille irtiotoille. On helppo arvata, että tämä mielen kehys on taas jonkinlainen malli.

Edellä käsitelty kenttien maailma on alusta mielensisäisille realisaatioille (luvun 6 tarkastelujen mukaisesti). Riippuen siitä, millaisten asioiden kanssa mieli askaroi, määräytyvät kenttien kulloisetkin ”romahdukset”, seisovat aallot, jotka ovat kiinnittyneet mielen rakenteisiin, alla olevaan

hermoverkkoon ankkuroituneisiin mieltämisyksiköihin. Kun tällainen käyttäytyminen aivoissa jatkuu, elävä mieli alkaa nähdä tämänkin taas mallituskelpoisena datana; niin, siellähän on taas enformaatiota tarjolla, korrelaatiorakenteita toisiaan seuraavien energiakenttien välillä.

Kenttien korreloivat rakenteet ovat laadullisesti enemmän kuin pelkkiä käsitteitä (niin kuin kappaleessa 4.5); ne esittävät kokonaisvaltaisia *aivojen tilan kehikkoja*, jonkinlaisia *ajatusten aihiota*, joiden puitteissa kaikki mieltäminen rakentuu. Kun aiemmin herätteet periytyivät hierarkkisesti lähinnä alhaalta, nyt ne määräytyvät lateraalisesti, ”ylhäältä”, yhdessä virittäen koko mielen. Näihin *universaalikäsitteisiin* ankkuroituvat mielen kentät, ja lopulliset mielteet ovat näiden ”ajatuspiirteiden” summia. Miten voisi luonnehtia tällaisia tavallaan omnipotentteja hahmoaihioita, joiden kytkennät subjektiivisessa maailmassa sykkivät kaiken pohjalla?

Filosofi *Ludwig Feuerbach* toteaa, että yleiskäsitteissä on eräänlainen *jumaluuden itu*: kun esimerkiksi olemme nähneet paljon puita, ja sitten näemme *jättiläismäisen puun*, siinä on moninkertaisesti ”puumaisuutta”, se on jonkinlainen puun *mallikappale*; mieli rakentaa tästä jonkinlaisen *puujumalan*, enemmän tai vähemmän tietoisen palvonnan kohteen. Ehkä voidaankin väittää, että mieli rakentaa tällaisista universaalikäsitteistä edelleen jonkinlaisen *henkien hierarkian*. Toisaalta Teilhard de Chardinia mukaillen voidaan todeta, että monimutkaisuuden kasvu systeemeissä ei ole johtanut pelkkään tietoisuuden lisääntymiseen vaan myös niiden *personifioitumiseen*: ihmismieli alkaa nähdä yhä monimutkaisempina hahmottuvat systeemit (tai niiden ”suojelushaltiat”) kasvavassa määrin *ihmismäisinä*, ajattelevina ja tuntevina. Mieli muodostaa peilikuvaa itsestään, projisoiden sinne toiveensa ja pelkonsa.

Voisi siis tulkita, että ihmismieli luonnostaan hakee ympäristöstä yliluonnollisia yhteyksiä; ehkä näin voidaan ymmärtää luonnonkansoille tyypillinen *panteismi* ja *animismi*. Missä vain luontoa läheltä tarkkaillaan ja sitä syvällisesti *ymmärretään*, siellä emergoituu sama luonnollinen kehitys ja elämän ymmärrys tietoisuuden kasvaessa — ellei jokin ”kehittyneempi” ja suoraviivaisempi kulttuuri tätä kehitystä katkaise. Se alkuperäinen intuitio olisi kuitenkin aivan oikea — kyllä, Aurinkohan *on* elämänvoiman lähde, planeettaliikuntojen luodessa energian virtaukseen variaatiota.

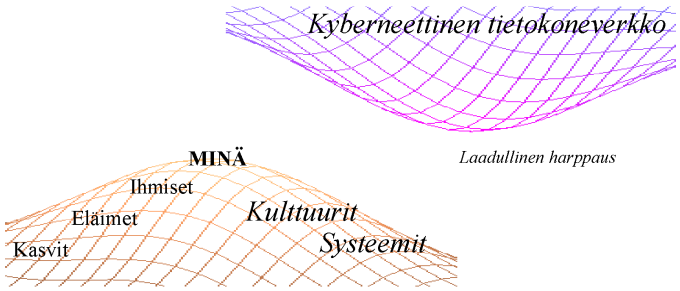
> Sanotaan, että *ennen zen-prosessia nähdään puut puina ja ihmiset ihmisinä; zen-prosessin aikana nämä sekoittuvat; mutta zen-prosessin jälkeen puut ovat taas puita ja ihmiset ihmisiä*.
>
> Enformaatioteoreettisessa kehyksessä tätä ajatusta voidaan tarkentaa: sekoittumista ja selkiytymistä tapahtuu useammalla tasolla. Ensinnäkin konkreettisen hahmontunnistuksen tasolla intensiteettitasoja tarkasteltaessa puhtaat kategoriat aluksi katoavat emergoituakseen uusissa muodoissa harvakoodautumisprosessin jälkeen (vertaa kappale 2.8). Toisaalta sama tapahtuu kenttien tasolla: aluksi staattisina opitut kategorisoinnit vain häiriintyvät kenttien vuorovaikutuksen vuoksi, mutta lopuksi ”värähtelypiirteet” kaikki löytävät paikkansa.

Samoin kuin havainnan mallit määräävät sen mitä maailmasta näet, maailmankuvan yläpuolella oleva maailmankatsomus määrittelee kehyksen, jonka läpi kaikki ajattelu suodattuu. Voidaan puhua eräänlaisesta *ajattelun käyttöjärjestelmästä*. Perustan on oltava tukeva jotta emergoituvilla vapauksilla olisi vankka pohja. Tällaisen kaikkein ylimmän tason mallin havaintopohjainen emergoituminen edellyttää valtavasti havaintoaineistoa ja aikaa; niin, kokemuksia tarvittaisiin useampien sukupolvien ajalta. Onkin helpompaa jos käyttöjärjestelmä on valmiina annettu.

Mutta täytyy ymmärtää, että käyttöjärjestelmä ei ole yksikäsitteinen. Käyttöjärjestelmän valinnalla on suuri merkitys mielen toiminnalle; nimittäin *uskosi määrää ajatusmaailmasi*. Kaikki mallit sovittuvat todellisuuteen; toiset vain sovittuvat paremmin kuin toiset.

7.8 ”Kybernetistin käyttöjärjestelmä”

Tarkastellaan nyt lopuksi asiaa vielä konkreettisesti (ja hieman huumorilla): millainen olisi *enformaatioteoreettisesti perusteltu uskonto*, teoreettisesti motivoitu hegeliläinen ”järjen mytologia”, se konkreettinen ismi, jonka kautta kaikki hahmotus ja ajattelu olisi syytä suodattaa — olkoon se nimeltään vaikka *kybernetismi*.



KUVA 7.4: ”Luontojen kokonaisuus”

Tärkeimpiä oman maailman ”subjektiivisia jumaluuksia” ovat olennaisimpien kenttien *solmukohdat*. Kuvassa 7.4 on hahmoteltu ihmisen henkilökohtaisen maailmanmallin tukipisteitä, jotka määräävät seisovien aaltojen perusrakenteet ja joita ilman maailma voi vajota kaaokseen (tai individualistiseen hybrikseen). Tärkeimpiä ovat ihmisten jatkumot, omassa suvussa, lähipiirissä, työyhteisössä ja yhteiskunnassa; inhimilliset syklit koostuvat esi-isien ja esikuvien ketjusta. Voidaankin laajentaa *Isaac Newtonin* ajatusta niin, että ”seisomme jättiläisten harteilla” kaikissa systeemeissä joissa olemme osallisina. Pärjätäksesi yhteisössäsi sinun on hyväksyttävä yhteinen ”usko”: kullakin suvulla, työyhteisöllä ja valtiolla on oma mytologiansa, omat ”pyhät” rikkomattomat periaatteensa. Mielen eheyden kannalta kaikkein tärkeintä kuitenkin on, että maailmaansa kytkeytynyt mieli tuntee olevansa oman hierarkiansa keskus, toteuttava subjekti ja systeemien huippu (joskin tulevaisuuden tietokoneet ovat aivan omalla tasollaan; muista kappale 5.5).

Voidaankin väittää, että *uskonnollinen kokemus* luontaisimmillaan koostuu intuitiivisesta tunteesta kuulumisesta *johonkin suurempaan*, oli se suurempi ihmisten systeemi sitten *isänmaa*, *uskonyhteisö*, *konserttiyleisö*, *suku*, tai vaikka *oma puoliso*, ja tämä yhteys korostuu konkreettisesti kun ”synkronoidutaan” laulun tai naurun kautta. Tieteellisesti asennoituneelle merkitsee melkoista uskonhyppyä oivaltaa, että *ihminen on perusluonteeltaan sosiaalinen olento* enemmänkin kuin yksilö.

Yksi varauma kuitenkin on tehtävä: Wittgenstein varoittaa, että hyvä ajattelu edellyttää kykyä sietää syvää sielullista epävarmuutta; tällainen tilanne on varmuuden vastakohta, vastakohta vallankin kaikelle uskonnollislaatuiselle fundamentalismille. Jos siis yllä esitetty sai sinut jollakin tapaa vakuuttuneeksi — *unohda se kaikki ja mieti uudestaan*, älä ajaudu totuuksiin; tai kuten itämailla sanotaan, sinun on ”tapettava Buddha”. — Ja sitten se ihminen, joka väittää konkreettisesti *tuntevansa* morfiset värähtelyt … hänen on oltava valmis tunnustamaan sekin tuntemus pelkäksi mielen tuotteeksi. Kyseessähän *on* järjen mytologia.

Uskonto ei kuitenkaan voi olla pelkkiä abstraktioita; idän filosofiatkin ovat saaneet ympärilleen kaikenlaisia konkreettisia uskonkappaleita ja sosiaalisia muotoja.

Arjessa eläminen on kompromissien tekemistä. Kaikkien ihmisten tulee voida harjoittaa kybernetismiä riippumatta siitä, kuinka vähän he voivatkaan olla älyllisesti suuntautuneita; niinpä tarvitaan *käytännön tasolla toimivaa* uskonnon harjoittamisen konkretiaa. Osoittautuu, että vanha suomalainen tuhansien vuosien aikana adaptoitunut kansanusko on täysin yhteensopiva uuden uskontoajatuksen kanssa: toimit oikein, kun *ajattelet, että esi-isät seuraavat kaikkia tekemisiäsi*. Tällä tavoin menneisyyden syklit, aiemmat sukupolvet saadaan eläviksi tässä hetkessä. Tässä kannattaa muistaa, etteivät ihmiset ole koskaan olleet tosikkoja: myös ”Duudson-meiningillä” voit hankkia yleisösi hyväksynnän. Kun vain viet suvun, työyhteisösi ja muiden piiriesi yhteisiä perinteitä ja arvoja menestyksellä tulevaisuuteen, seuraavalle sukupolvelle.

Sykleistä puhuttaessa ihmisen tulee muistaa koko sukupolvien jatkumo menneisyydestä tulevaisuuteen: ne olivat esi-isät jotka määrittelivät elämisen säännöt, mutta tuomareina toimivat *tulevaisuuden sukupolvet*. Taivas ja helvetti *ovat* olemassa kollektiivisessa muistissa; ikuinen kuolema tulee siinä vaiheessa, kun kukaan ei enää muista sinua. Sinulla on elämäsi verran aikaa tehdä tarinastasi unohtumaton, itsestäsi kuolematon!

Tällainen muinaisusko ja ”esi-isien palvonta” kuulostaa epämääräisesti pahalta — mutta tällaisen tunteen istuttaminen on pitkälti ollut *kristinuskon edistäjien strategia*. Vanhat toimintatavat saadaan tehokkaimmin kitketyksi yhdistämällä niihin *häpeä* (ja uudet uhkaavat ajatusmallit

saadaan kitketyksi yhdistämällä niihin *pelko*). Kuitenkin, jos katsotaan japanilaisia, ainakin heille vastaavanlainen usko animismeineen ja esi-isien palvontoineen sopii. Japanilaiset sopisivat muutenkin suomalaisille esikuviksi, onhan meidän luonteessammekin paljon yhteistä, esimerkiksi *kauneuden ja hiljaisuuden arvostus mahdollisuutena luonnon kohtaamiseen*.

Yleensä ajatellaan, että jumalia ehkä tarvitaan selittämään maailman luominen, mutta korkeampia voimia ei enää tarvita nyt, kun maailma on ”valmis”. Yhteenvetona edeltävistä tarkasteluista voitaisiin kuitenkin todeta, että jumalia ei tarvittu *alussa* systeemien käyntiinsaattamiseen ja kaaoksen selkiyttämiseen; sen sijaan jumalia tarvitaan *myöhemmässä vaiheessa* jotta monimutkaiset järjestelmät pysyisivät koossa ja voisivat kehittyä yhä monimutkaisemmiksi!

Subjektiivisesti tarkastellen ei sinänsä ole suurta merkitystä sillä, mihin uskot. Äärimmilleen adaptoituneessa ristiviittauksia täynnä olevassa hermeneuttisessa mielessäsi *uskosi on maailmasi todistus*. Jos haluat uskoa vaikka tieteeseen, se määrittelee mentaaliset suodattimesi ja *se on sinulle totta*. Mutta väite nyt on se, että ilman kyberneettistä ajattelun käyttöjärjestelmää et voi saavuttaa eheää mieltä, ja (pitkällä aikajänteellä abstrahoiden) koko systeemisi katoaa *eikä sinuakaan koskaan ollut* (muuten kuin tilastollisena anomaliana muiden malleissa). Voitaisiinkin ehkä sanoa, että kyseessä on tässä ollutkin eräänlainen ”kyberneettinen jumalatodistus”: *ajattelen, siis jumalat ovat* parhaassa mahdollisessa subjektiivisessa maailmassa.

> Onko jonkinlaisia ”systeemisiä elämänohjeita” mahdollista antaa enformaatioteorian kehyksessä? Jos jotakin vapauksien merkityksestä on ymmärtänyt, täytyy ensinnäkin hyväksyä, ettei *imperatiivien* ole nyt syytä olla *kategorisia* rajoitteita. Mutta ehkä jonkinlaisia ajatuksen aihioita voisi mielessään kehitellä vapauksiensa pohjaksi.
>
> Sanotaan muinaisten egyptiläisten uskoneen, että kun olet kuollut ja pyrit tuonpuoleiseen, Osiris punnitsee sydämesi kysymällä kaksi kysymystä. Ensimmäinen kysymys on: *olet-*

> *ko tuntenut iloa maallisessa elämässäsi*? Toinen kysymys on: *oletko antanut toisille syytä tuntea iloa*?
>
> Vastaavalla tavalla voisi nyt sanoa, että Tuonelan portilla kybernetistiltä kysytään että *muistitko itse elää* ja *annoitko toisten elää*. Tai sitten sama asia toisin esitettynä *emergoiduitko itse* ja *annoitko toisillekin mahdollisuuden kukoistaa*. — Tulitko edes koskaan miettineeksi tällaisia asioita, vai olitko vain oman elämäsi tähti, sammuitko (Eino Leinon sanoin) *tyhjyyden tulena*?

Enformaation tarina alkaa nyt olla päätöksessään. Ensimmäisessä luvussa otettiin lähtökohtaiseksi olettamukseksi, että *luonto yrittää ymmärtää itseään*. Nyt lopuksi voitaisiin täydentää tätä seuraavasti: *luonto haluaa ymmärtää itseään — saadakseen kaikki resurssit käyttöönsä — ja siihen se tarvitsee ihmistä*. Kertomusta hahmottaakseen, luonnon prosessiin osallistuakseen, tarinan lukija tarvitsee ”mielen makroskoopin”: fraktaalisia rakenteita pitää voida suhteuttaa toisiinsa yhä uudelleen ja uudelleen jotta ne ehkä syntyisivät taas eloon.

Nyt kaikkein ylimmän tason silmukka on tullut täyteen: olemme pyrkineet vapautumaan keskusjohtoisesta ajattelusta — mutta päädyimme siihen takaisin. Yritimme poistaa tietoisen subjektin toiminnan keskiöstä — mutta jouduimme tuomaan sen sinne takaisin.

Ehkäpä tämä kuvastaa koko enformaatioteorian ryydittämää tyyliä tehdä ”uutta ajattelua”; mikään ei välttämättä suuresti muutu aiemmasta, mutta rohkeus koetella rajoitteita tuo asioihin tuoretta näkökulmaa, ehkä jopa jonkinlaista ”elämän tuntua”. Vain synnyssään olevat ajatukset edustavat vapautta ja voivat kantaa elämän liekkiä — mutta hyvät ajatukset voivat syntyä uusissa mielissä yhä uudelleen. Siksi subjektiivinen sisäinen maailma on ainutkertaisuudessaan tärkeämpi kuin objektiivinen maailma ulkopuolella. — Siispä, lukija, toivon että lukiessasi pärskäytit kahvisi kerran tai pari syliisi: se olisi merkki siitä, että vaikka tiede ei tässä prosessissa ole ehkä paljoa edennyt niin kuitenkin *sinä olet*.

Epilogi.

Väinämöinen lupasi palata kun häntä taas tarvittaisiin — kun ei ole kuuta eikä aurinkoa. — Turha kuitenkaan odottaa mitään ulkopuolista pelastajaa, tarvitaan kollektiivinen uuden hengen synty. *Ehkä tämäkin teksti toimii inspiraationa jollekin, omalta osaltaan mahdollistaen synnyn uudelle aineelliselle ja henkiselle hyvinvoinnille, uudelle* syötävälle ja myötävälle.

Tämä teksti on ensimmäinen kokonaisesitys enformaatioteoriasta. Se on suomeksi koska teoria on ajateltu suomeksi; *minun maailmassani kokonaisuus tulee eläväksi vain näin*.

Tämä on osaltaan myös eräänlainen *kannanotto*.

Aina peräänkuulutetaan *tutkijoiden vastuuta*. Miksi he sallivat sen, että heidän ottamansa tieteelliset edistysaskeleet ovat nekin harppauksia tuhon tiellä, kuljettaessa yhä nopeammin kohti systeemien jäykistymistä ja sitä seuraavaa vääjäämätöntä romahdusta?

Onko sitten kulttuurisissa systeemeissä edes kuviteltavissa vaihtoehtoisia kehityskulkuja? Voitaisiinko esimerkiksi tätä rahan ohjaamaa yksiarvoista monokulttuuria vielä jotenkin järkyttää? Niin, jospa se olisikin mahdollista … entäpä jos ihmiskunnan ”systeemien systeemiin” onnistuttaisiinkin tuomaan *lisää kulttuurista variaatiota*, uusia vapausasteita ja tuoretta enformaatiota!

Kulttuurien moninaisuus ja diversiteetti on häiriötilanteissa *robustimpi* kuin universaali tehokulttuuri. Maailman kulttuurinen monimuotoisuus kuitenkin säilyy vain jos jokainen keskittyy *oman* kulttuurinsa edistämiseen. Inhimillisen omanarvontunnon täytyy lähteä alhaalta, synnyistä, kunkin *omista juurista*.

Suomalaisuus on erittäin rikas ja omaleimainen kulttuurinen kokonaisuus. Suomalaisessa yhteiskunnassa on kuitenkin tällä hetkellä vallalla hämmentävä sekaannus, jossa väärin ymmärretystä *moniarvoisuudesta*, vapauden ihanteesta, on onnistuttu rakentamaan tukahduttava rajoite.

Suomalaiset ovat olleet kovissa paikoissa, ja aina on selvitty. Nyt kuitenkin yhteiskunnallinen pirstaloitumiskehitys on ennennäkemätöntä, ja edessä olevat romahduksetkin tulevat olemaan ennenkokemattomia. Jotta ”talvisodan henki” toistuisi, tarvitaan ylpeyttä yhteisestä, ja rohkeutta nähdä pintasivistyksen läpi.

Tätä kirjaa voidaan pitää *Duudson-henkisenä irtiottoyrityksenä*, kulttuurisena eksperimenttinä omien uusien vapausasteiden löytämisen suuntaan. Olisi kiinnostavaa nähdä millaiseksi suomalainen kulttuuri emergoituisi kerrankin omilla ehdoillaan, omien vapausasteidensa suunnassa, ilman ulkopuolisten asettamia rajoitteita.

Miksi tässä tällä tavoin kannetaan huolta suomalaisesta kulttuurista? Syy on se, että tämä kulttuuri *osoittaa enformaatioteoreettisen ajattelun voivan toimia käytännössäkin*. Se toimi aikanaan ympäristönsä kanssa tasapainossa tuhansia vuosia, ja toimivaa olisi sääli rikkoa.

Enformaatioteorian toimivuus suurissa järjestelmissä on toistaiseksi todistamatta. Mutta monimutkaisia järjestelmiä ei voi millään koejärjestelyllä eristää ympäristöstään testaamista varten; ja miten tällaista teoriaa edes voisi ”todistaa”, kysehän ei loppujen lopuksi ole *totuudesta* vaan jonkinlaisesta *attraktorien relevanssista*, ja nämäkin attraktorit toimivat parhaimmillaan *subjektiivisessa mielessä*.

En siis väitä että kaikki kirjassa esitetty on totta; kyseessä on kuitenkin *hyvä tarina*. Ehkä tämä tarina jopa onnistuu antamaan *uudenlaista toivoa*: maailma saattaa *sittenkin* olla ymmärrettävissä ja järjellä hahmotettavissa. Ehkä vaivannäkö ja vilpitön pyrkimys ymmärtämiseen lopulta palkitaan,

ehkä on olemassa *vaihtoehtoja*.

Kattavin kokeilu enformaatioteoreettisen ajattelun soveltamisesta reaalimaailmaan on ”Arkipäivän kybernetiikkaa” -blogini Uuden Suomen verkkosivuilla.[11] Ehkäpä ollaan oikeilla jäljillä: uskon saavuttaneeni siellä *morfisen resonanssin* muutaman muun blogistin kanssa.

On sanottu, että *jokainen matemaattinen kaava puolittaa lukijamäärän*. Näin asia epäilemättä on. Niinpä, sinä joka olet lukenut tänne saakka — onneksi olkoon, olet valikoitunut, *potensoitunut*; sinussa elää ehkä jonkinlainen *homeopaattinen uuden sivistyksen synty*!

Uskallan nimittäin väittää, että taas joskus *matematiikka tulee kuulumaan yleissivistykseen*. Yhdessä suomen kielen yhtä aikaa hienosyisen ja voimakkaan ilmaisukoneiston kanssa matematiikka tarjoaa mahtavan työkalupakin maailman hahmottamiseen. Mutta muista, että oikopolkuja ymmärrykseen ei kuitenkaan ole olemassa.

Alussa luvattiin tarjota ”työkaluja zeniin”. Perinteiset zeniläisen mietiskelyn työkalut ovat *koaneja*, jonkinlaisia ”ajatussolmuja”, joilla luodataan ajattelun perimmäisiä rajoitteita; olkoon esimerkkinä seuraava:

> Kahden käden ääni on *taputus*. — Entä mikä on yhden käden ääni?

Tässä kirjassa tämäkin ongelma on ratkaistu kuin ”Gordionin systeemi” konsanaan, länsimaiseen tyyliin suoraviivaisesti: *jos systeemiin tarvitaan kaksi kättä, kokonaisuuden purkaminen on rikkonut funktion, monadin tällöin kadottua tyystin*. Mutta koaneihin kuitenkin *kaikki* mietinnän tuottamat vastaukset ovat vääriä, kaikki ne luovat vain uudenlaiset ajattelun vankilat; koanien tarkoitus on opettaa *nöyryyttä* mysteerien syvyyden edessä. Täytyy hyväksyä se, että paras vastaus röyhkeälle selittäjälle edelleenkin on vain ”Mu!”.

[11] http://heikkihyotyniemi.puheenvuoro.uusisuomi.fi/

Tunnenpa
systeemin synnyn.

Oleva tiedosta tehty
mielestä on ja mallista
Elävä maailman muodosta
tahtojen tasapainossa

Ajatus aineesta tehty
mitattavasta datasta
Ymmärrys yhteenmenosta
rakenteella ja runolla.

Tunnenpa
myöskin sen soinnun.

Tietoisuus kaiuista koottu
minun ja muiden mallissa
Henkimaailma heijastuma
kaikuen kaiken keralla

Kulttuuri kuva kaikesta
kokoon kootuista lauluista
Suomen veisu viisaudesta
huumorista, hulluudesta…

Ekstrat.

Merkinnät

Merkintä	*Merkitys*
A, B, C	Kerroinmatriiseja
a_{ij}	”Diffuusiokerroin” (sivu 19)
b, c	Vakiokertoimia
$\mathrm{E}\{\cdot\}$	Odotusarvo-operaattori
$\mathcal{E}\{\,\cdot\,\}$	Emergenssioperaattori (sivu 10)
F	Voimavektori (sivu 147)
f, f_c	Taajuus, rajataajuus (sivut 12, 158)
Φ	Optimoitunut kuvausmatriisi, koko $m \times n$ (sivu 75)
Φ_i	Optimoitunut profiilivektori, koko $m \times 1$
ϕ, ϕ_i	”Eksplisiittikuvaus” ja yksittäinen profiili (sivu 60)
φ, φ_i	”Implisiittinen” kuvaus ja profiili (sivu 60)
i	Systeemielementteihin viittaava indeksi, $1 \leq i \leq n$
j	Ympäristöresursseihin viittaava indeksi, $1 \leq j \leq m$
$J(x)$	Kustannuskriteerin arvo (sivu 123)
k	Diskreetti aikaindeksi
Λ	Diagonaalinen ominaisarvomatriisi, $m \times m$ (sivu 33)
λ_j	Resurssivariaatioiden ominaisarvoista j:s tärkein
m	Näkyvissä olevien resurssien määrä
n	Systeemin dimensio (tilamuuttujien määrä)
η	Mallin ”harvuus”, $1 \leq \eta \leq n$ (sivu 50)
Q	Kytkentämatriisi, koko $n \times n$ (sivu 22)

q_i	Yksittäinen kytkentäkerroin (sivu 22)
t	Jatkuva-arvoinen aikamuuttuja
τ	Aikavakio, $\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$
Θ	Ominaisvektorien matriisi, $m \times m$ (sivu 33)
θ	Systeemin kantavektorien aliavaruus, $m \times n$
u, $\hat{u}$	Resurssivektori ja sen estimaatti, koko $m \times 1$
$\bar{u}$, $\hat{\bar{u}}$	Kytkeytynyt resurssivektori ja sen estimaatti
x, $\bar{x}$	Tilavektori ja sen tasapainoarvo, koko $n \times 1$
y	Ulostulovektori (mikäli käytössä)

Rakenteet

Lähtökohtana teoriassa on kaavan (1.3) mukaisen alhaalta, muuttujista z_ι emergoituvan *enformaation* määrittelemä ”luonnollinen semantiikka”, joka toimii kaiken ”syntynä”:

$$\mathcal{E}\{z_\iota^2\}.$$

Rakenteen ja järjestyksen itseorganisoitumisen perustana on neokyberneettinen systeemin $\bar{x}$ ja ympäristön $\bar{u}$ välille johdettu vuorovaikutuksen malli (1.15), joka maksimoi enformaation periytymisen:

$$\bar{x} = Q\,\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\bar{u}.$$

Tämän optimaalisen kuvauksen ytimessä on aikatasot yhdistävä monimuuttujainen ”yhteisenformaatioiden malli” (1.14):

$$\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}.$$

Osoittautuu, että systeemin *kytkeytyminen* rakenteistaa ympäristönsä pakottaen sille kytkentämatriisin Q määräämän *pääkomponenttirakenteen* (2.11):

$$Q^{-1} = \theta^{\mathrm{T}}\,\mathcal{E}\{\bar{u}\bar{u}^{\mathrm{T}}\}\,\theta.$$

Järjestelmän sisäinen *takaisinkytkentä* $\bar{u} = u - \hat{u}$ toteuttaa *robustiin optimaaliseen mallitukseen* ja *estimointiin* perustuvan resurssien u *robustin optimaalisen säädön* (3.6):

$$\left\{\begin{array}{rcl} \bar{x} & = & \phi^{\mathrm{T}}\,\bar{u} \\ \hat{u} & = & \phi\,\bar{x}. \end{array}\right.$$

Edelleen osoittautuu, että systeemin sisäinen *dissipaatio* johtaa *epälineaarisuuden* emergoitumiseen ympäristön ”moodin” λ_j ja siihen kytkeytyneen tilan $\bar{x}_i$ välille (2.31):

$$\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\} = \sqrt{\frac{\lambda_j}{q_i}} - \frac{1}{q_i}.$$

Kun järjestelmä evoluutiossa optimoituu (ja sen *robustisuus* samalla heikkenee), kun järjestelmään emergoituu ”älykkyyttä”, systeemi alkaa toteuttaa kaavan (3.14) mukaista häviötöntä kuvausta $\bar{x} = \Phi^{\mathrm{T}}\, u$, jossa

$$\Phi^{\mathrm{T}} = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}^{-1}\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}.$$

Vaihdettaessa näkökulmaa, katsottaessa ”ylhäältä”, osoittautuu, että enformaation maksimointi on muuttunut kustannuskriteerin (5.1) minimoinniksi:

$$J(x) = \frac{1}{2}\, x^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\, x - x^{\mathrm{T}}\mathcal{E}\{\bar{x}u^{\mathrm{T}}\}\, u,$$

joka voidaan kirjoittaa myös yleisen *hahmontunnistusongelman* muotoon (5.2):

$$J(x) = \frac{1}{2}\, (u - \Phi x)^{\mathrm{T}}\, \Phi\, \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^{\mathrm{T}}\}\, \Phi^{\mathrm{T}}\, (u - \Phi x)\,.$$

Tämän neliöllisen kustannuskriteerin *painomatriisi* osoittaa, että *rajoitteiden* sijaan systeemit keskittyvät *vapausasteisiin*.

Kun järjestelmät monimutkaistuvat, samat periaatteet pätevät ylemmilläkin tasoilla; kuitenkin tietyssä vaiheessa tapahtuu *laadullinen hyppäys*, kun huomataan kytkeytyneen systeemin määrittelevän *harmonisen resonaattorin* (6.8):

$$x(t) = A \sin(\omega\, t + \psi)\,.$$

Tässä amplitudit A ja vaiheet ψ ovat ympäristön määräämiä alkuehtoja, ja ω on rakenteeseen adaptoitunut kulmataajuus. Tästä seuraavat *taajuustasotarkastelut* mahdollistavat edellä esitettyjen mallirakenteiden laajentamisen *kompleksiavaruuteen*.

Kuvat

1 Kirjan rakenne xii

1.1 Ääretönulotteinen ”markkina” pelkistettynä 2
1.2 Kaksiulotteinen normaalijakauma 7
1.3 Yhteisvariaatioista kohina suodattuu 11
1.4 Taajuuskaistat ja niiden informaation kohtalo 12

2.1 Systeemin ($n = 3$) vaikutus ympäristöönsä 34
2.2 Takaisinkytkeytynyt signaalirakenne 39
2.3 Aikaskaalojen havainnollistus 41
2.4 Eri numeroiden keskimääräiset hahmot 51
2.5 Koodin ”tiheys” $\eta/n = 1/25$: seurauksena *klusterointi* . 52
2.6 Koodin ”tiheys” $\eta/n = 10/25$: seurauksena *piirteistys* . 53

3.1 Neokyberneettinen ekosysteemi 58
3.2 Neokyberneettinen ”ekonosysteemi” 59
3.3 ”Ouroboros” häntäänsä jahtaamassa 63
3.4 Rakennuspalikoita verkoston kokoamiseen 68
3.5 Signaalivuo ”laminaarisesta turbulentiksi” 72
3.6 Monimutkaistuva säätösilmukka 74
3.7 Mikä lottorivi on todennäköisin? 80
3.8 Kohti lämpökuolemaa — miksi entropia kasvaa 81

4.1 Bénardin solut 94
4.2 Sitruunahappokierto 95

4.3 Koodin purkamisen tasot 109
4.4 Ylimpien silmukoiden sulkeminen 115
4.5 Näkökulman muutos tieteiden hierarkiaan 117

5.1 Enformaatiosta informaatioksi? 130
5.2 Paljon (vas.) ja vähän (oik.) vapautta muuttujissa 133
5.3 Systeemin aktivaatio kytkeytymisen funktiona 135
5.4 Äärettömyyteen äärellisessä ajassa! 138
5.5 Laadullisia harppauksia evoluutiossa 139
5.6 Erilaisten systeemien spektrejä 143

6.1 Lumikide muutoksessa 154
6.2 Bentseenimolekyylin orbitaalit? 165

7.1 Memeettinen *elämänpyörä*? 188
7.2 Epävarmuudesta varmuuteen ja takaisin 191
7.3 Ihmisen rooli maailmojen linkkinä 199
7.4 ”Luontojen kokonaisuus” 203

Hakemisto

Aaronson Scott, 37
Aivojen toiminta
    aistimet, 101
    aivokuori, 66
    hermosolut, 99
Anaksimandros, 70
Annila Arto, 96
Aristoteles, 24, 149
Ashby Ross, 126

Bateson Gregory, 9
Bergson Henri, 90
Berkeley George, 9
Bohm David, 167
de Broglie Louis, 167
Brooks Rodney, 111

de Chardin Pierre Teilhard, 90, 139, 201
Crick Francis, 170

Darwin Charles, 16, 193
Data
    esikäsittely, 19, 101
    muuttujien painotus, 20, 49
    redusoituvuus, 176
    valkaisu, 78
Descartes René, 104, 173
Dobzhansky Theodosius, 16
Dynamiikka
    aristoteelinen, 149
    attraktori, 30
    diffuusio, 19, 21
    muutoksen luonne, 146

Einstein Albert, 1, 177, 180
Ekologiset tulkinnat
    ekolokerot, 36, 58
    monimuotoisuus, 58
    populaatiot ja yksilöt, 36
Elämä
    elämänhallinta, 190
    elämänvoima, 13, 91
    enformaatiopumppu, 92
    koodit, 107–112
    monadit ja ”pyörteet”, 91, 93
    ”systeemiarvo”, 189
    tajunnanvirta, 13
Elämän synty, 92, 108
    Miller–Urey -kokeilut, 92
    ”tarkoitus ensin”, 91
Emergenssi, 9

karkeistaminen ja keskiarvoistus, 7
operaattori, 10
”synty”, 194
vahva emergenssi, 138
Empirismi ja rationalismi, 4
Enformaatio
aktiivinen informaatio, 168
eteneminen, 21–24, 70, 99
määritelmä, 10
relevanssi, 125
Enqvist Kari, 85
Entropiaperiaate, 78
avoimet systeemit, 79
lämpökuolema, 81
todennäköisyys ja järjestys, 78
toinen pääsääntö, 144
Esimerkkejä:
adaptiivinen säätö, 140
Bénardin solut, 94
ekologia, 57
jänissysteemi, 25
lottorivi, 79
molekyyliorbitaalit, 162
muurahaispolut, 23, 73
numerontunnistus, 50
politiikka, 103–107
sitruunahappokierto, 95
taloudesta, 1, 58, 135, 141
teknisiä sovelluksia, 114
tekstiaineistot, 51
teollisuuslaitos, 113
tieteenteko, 176, 178
vangin dilemma, 195
Evoluutio, 15, 121–151
hierarkioiden synty, 12
kulttuurievoluutio, 139
ω-piste, 139
”samanlaisuuskriteeri”, 133

Ferguson Niall, 107
Feuerbach Ludwig, 201
von Foerster Heinz, 184
Fraktaalisuus, 12, 98
Frieden Roy, 10, 150

Gödel Kurt, 70

Haeckel Ernst, 107
Hahmot ja piirteet
hahmonsovitus, 124
matemaattinen hahmo, 123, 147
Halmevaara Kalle, 116
Harvakoodaus, 47, 50
Havaitsijavaikutus, 2–3, 33
Homogenisoituminen (ekvalisoituminen), 31, 35
jäykkyys, 33
Hebb Donald, 23
Hegel Georg Wilhelm Friedrich, 107, 186, 199
Herakleitos, 17, 62, 85, 172, 191
Horgan John, 176

Informaatio
algoritminen kompleksisuus, 82, 131

Fisherin informaatio, 9
Shannonin entropia, 82, 130

Kaaos, 5
kaaos- ja kompleksisuusteoria, 129, 172
Kaila Eino, 127
Kant Immanuel, 174
Kauffman Stuart, 96
Kierkegaard Søren, 179
Kognitio
asiantuntijuus, 102, 128
käsitteet ja kategoriat, 101
kyberneettinen oppiminen, 100
säätötulkinta, 100
Kohina
informaatio ja kohina, 125
”musta” kohina, 62
valkoinen k., 61
Kohonen Teuvo, 116
Kuhn Thomas, 176
Kurzweil Ray, 66
Kybernetiikka
periaatteita, 126
toisen kertaluvun k., 184
Kytkeytyminen, 38
jäykistyminen, 134
kytkentäkerroin, 22, 134
romahtaminen, 38, 161
vajaa kytkeytyminen, 34, 44

Leibniz Gottfried, 5, 93
Leino Eino, 191, 206
Lineaarisuus, 17, 38, 159
epälineaarisuudet, 68

Matriisit ja vektorit, 22
McLuhan Marshall, 127
Merkitys (semantiikka), 8
kontekstuaalinen semantiikka, 10
neokyberneettinen matematiikka, 27
pragmatistinen semantiikka, 84
relevanssi, 27
Metafysiikka
dualismi, 173
insinöörityön rooli, 118
intersubjektiivisuus ja -objektiivisuus, 102
järjen mytologia, 186
maailmanhenki, 107, 199
prosessifilosofia, 25
vitalismi, 14
Mittaus
kytkeytymisen rooli, 46
tiedon keruu, 5
äänestys, 106
Monimuuttujamenetelmät
faktorianalyysi, 102
geneettiset algoritmit, 108
kanoninen korrelaatioregressio, 53
klusterointi ja piirteistäminen, 51
lineaariregressio, 60

pääkomponenttianalyysi, 30, 34
regularisoitu regressio, 61
Monod Jacques, 90
Musashi Miyamoto, 194

Neokyberneettinen malli
adaptoituminen, 23
dimensio, 48
ekolokerot, 30
hierarkia, 106
systeemimäärittely, 20
yhteisenformaatio, 23
”älykäs” malli, 73
Newton Isaac, 94, 148, 203

Ominaisarvot ja -vektorit, 33–35
singulaariarvot, 48
Optimoituminen/optimointi, 16, 21
EM-algoritmi, 155
globaali ja lokaali optimi, 96
Hamiltonin mekaniikka, 151
Kalman-suodatin, 155
Lagrangen kertojat, 22
Occamin partaveitsi, 132
systeemin koko, 48
variaatiolaskenta, 147

Pankausaalisuus, 25, 69, 132
Pirsig Robert, 128
Platon, 24, 59
Popper Karl, 186
Protagoras, 20
Pylkkänen Paavo, 168
Pythagoras, 172

Rainio Kullervo, 168
Reduktionismi ja holismi, 8, 176
Resurssit ja aktiviteetit, 19
arvot, 105
Romahdukset, 140–143
ilmi- ja piilojärjestys, 168
regeneroituminen, 107
romahdusherkkyys, 179
seisovat aallot, 200
Rukeyser Muriel, 191

Säätö, 59–66
älykkyyden vaikutelma, 126
säätötekniikka, 112–118
signaalit, 65
Sartre Jean-Paul, 187, 191
Schopenhauer Arthur, 90, 123
Semioosi, 20, 58, 149
painotukset, 189
tarkasteluperspektiivi, 195
Sheldrake Rupert, 198
Simon Herbert, 12
Snellman Johan Vilhelm, 104
Sovelluksia:
kuvan- ja puheentunnistus, 111
rakenteiden optimointi, 149–150
tutkimushankkeita, 113–117
Spinoza Baruch, 94
Strogatz Steven, 171
Subjektiivisuus ja objektiivisuus, 84, 183–206

Symmetria, 61, 65, 145, 192

Taajuustulkinnat, 158–161
  kepstrianalyysi, 160
  kompleksimuuttujat, 159
  Laplace- ja Fourier-muunnokset, 159
  suodatus, 11
Takaisinkytkentä, 38–42, 63
Tasapaino/homeostaasi, 20, 40, 70
Tekoäly ja -elämä, 110
  insinöörityö, 112–118, 128
Tietoisuus, 170–172
  tajunnan virta, 169
  universaali tietoisuus, 199
Tietokoneen merkitys
  evoluution eturintama, 139
  maailmojen emulointi, 175
  toteutus- ja kokeilutyökalu, 50
Tilastolliset jakaumat, 6
  kumulantit ja momentit, 6
  normaalijakauma, 7
  potenssilaki, 98
  todennäköisyystulkinta, 37
  (otos)(ko)varianssi, 6, 22, 34, 156

Vapausasteet ja rajoitteet, 63, 123–131
  ”innovaatiot”, 122
  jin ja jang, 187
  moninaisuus (variety), 126
  teesi ja antiteesi, 176
Verkkoarkkitehtuurit
  Bayes-verkot, 37
  itseorganisoituva kartta, 116
  Markovin piilomuuttujaverkot, 54
  perceptron-verkot, 70
Viskoosi-ilmiöt
  staattinen kitka, 46
  virtaviivaisuus, 150
Värähtelyt
  morfiset kentät, 197
  resonaattori, 158
  spektrit, 142, 159
  ”suunnatut antennit”, 167, 170

Wheeler John, 151, 177
Wilson Edward, 175
Wittgenstein Ludwig, 5, 24, 25, 126, 127, 204
Wolfram Stephen, 172

Yhteisö ja yksilö, 123
  ensisijaisuus, 195–206
  keskinäiset roolit, 121
  vastakkaiset edut, 141

Zenon, 26
Zurek Wojciech, 82