
ENFORMAATIOTEORIA

”fysikaalinen vitalismi”

Heikki Hyötyniemi

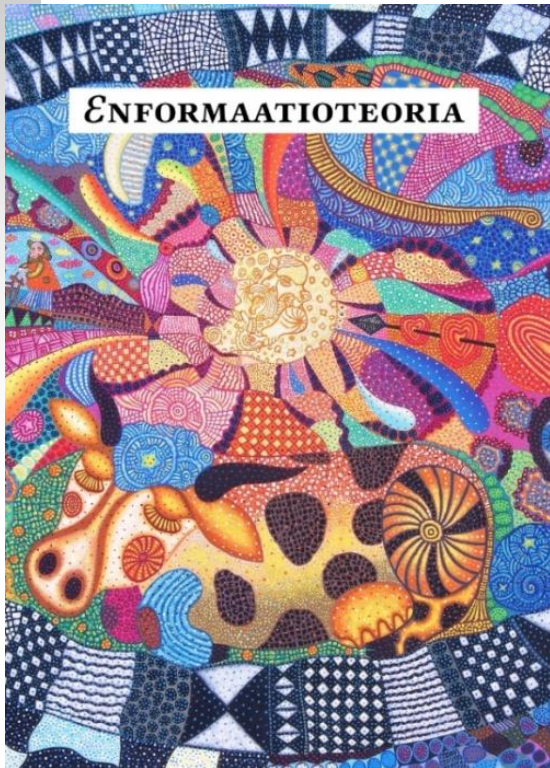
Esitys Jyväskylässä 26.4.2013

Esitys Helsingissä 6.5.2013



Heikki Hyötyniemi

- Automaatiotekniikan professori Teknillisellä korkeakoululla 2001–2009
- Tausta tekoälytutkimuksessa ja keinotekoisissa hermoverkoissa (erityisesti SOM-lähestymistapa)
- Myöhemmin ... kohti *luonnonfilosofiaa?*



heikki.hyotyniemi@aalto.fi

Yhteistyössä *Petri Lievonen*

- Mies kulisseissa: ideoita, korjauksia, simulointeja, kursseja, verkkosivuja...
- Jatkossa suurempi rooli enformaatio-tutkimuksen eteenpäinviennissä?



petri.lievonen@hiit.fi

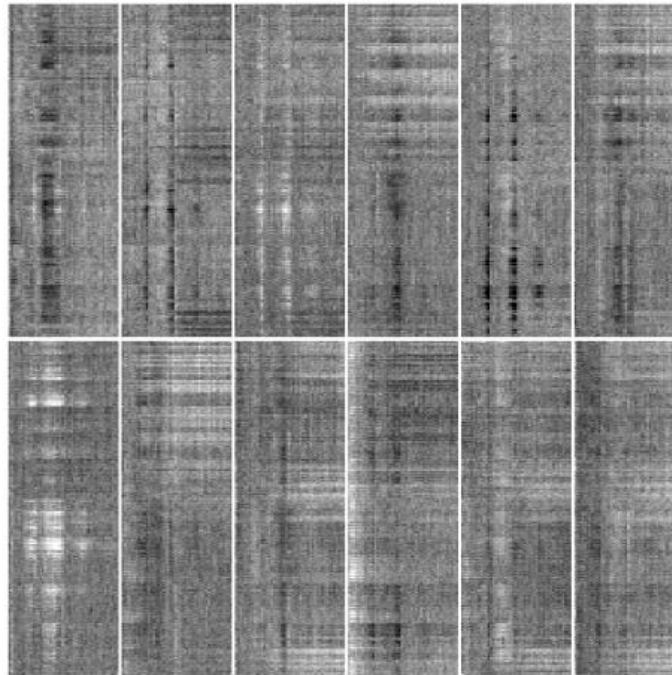
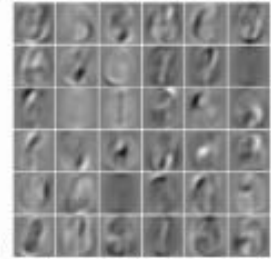


Figure A.6: Profiles of 12 emergent components of MEG data, now augmented with class information in extra dimensions. This external information rotates and mixes the profiles to facilitate classification. With these linear components one can predict with 60% accuracy which of the five classes the subject is watching.

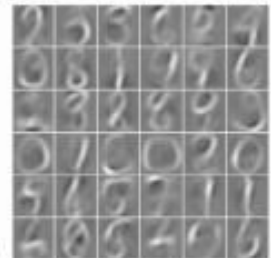
Binary data



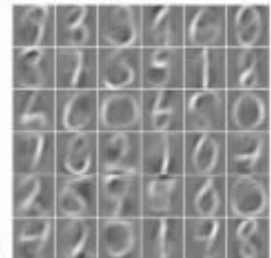
Linear neurons



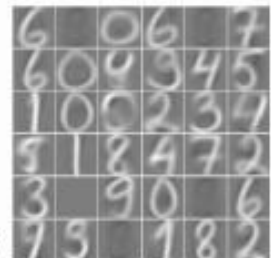
Activation function tanh(x)



Activation function cut(x)



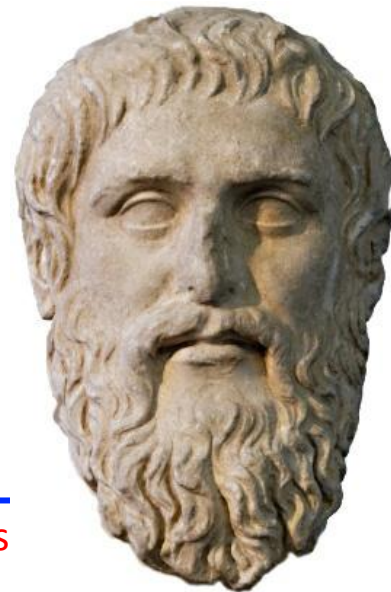
Activation function |x|



Activation function log(cosh(x))

Periaatteiden perustaa

- Puhdas *empirismi* ei riitä: on liikaa dataa, tarjolla liian monia tulkintavaihtoehtoja
- Empirismiä pitäisi täydentää *rationalismilla*: tarvitaan yleisiä mallikehyksiä tulkintojen pohjaksi
- ... Mutta jonkinlaisten ennakko-oletusten asettaminen maailmalle on *filosofiaa* – jopa *metafysiikkaa*!
- Mutta kaikki mallintaminen perustuu ennakko-oletukseen (havaintojen ”teoriapitoisuus”)
- Nykyinen *analyttinen filosofia* näkee maailman ”faktojen joukkona” (varhainen Wittgenstein)
- Intuitiivisempi lähestymistapa olisi haastaa staattinen maailmankuva (myöhempi W)



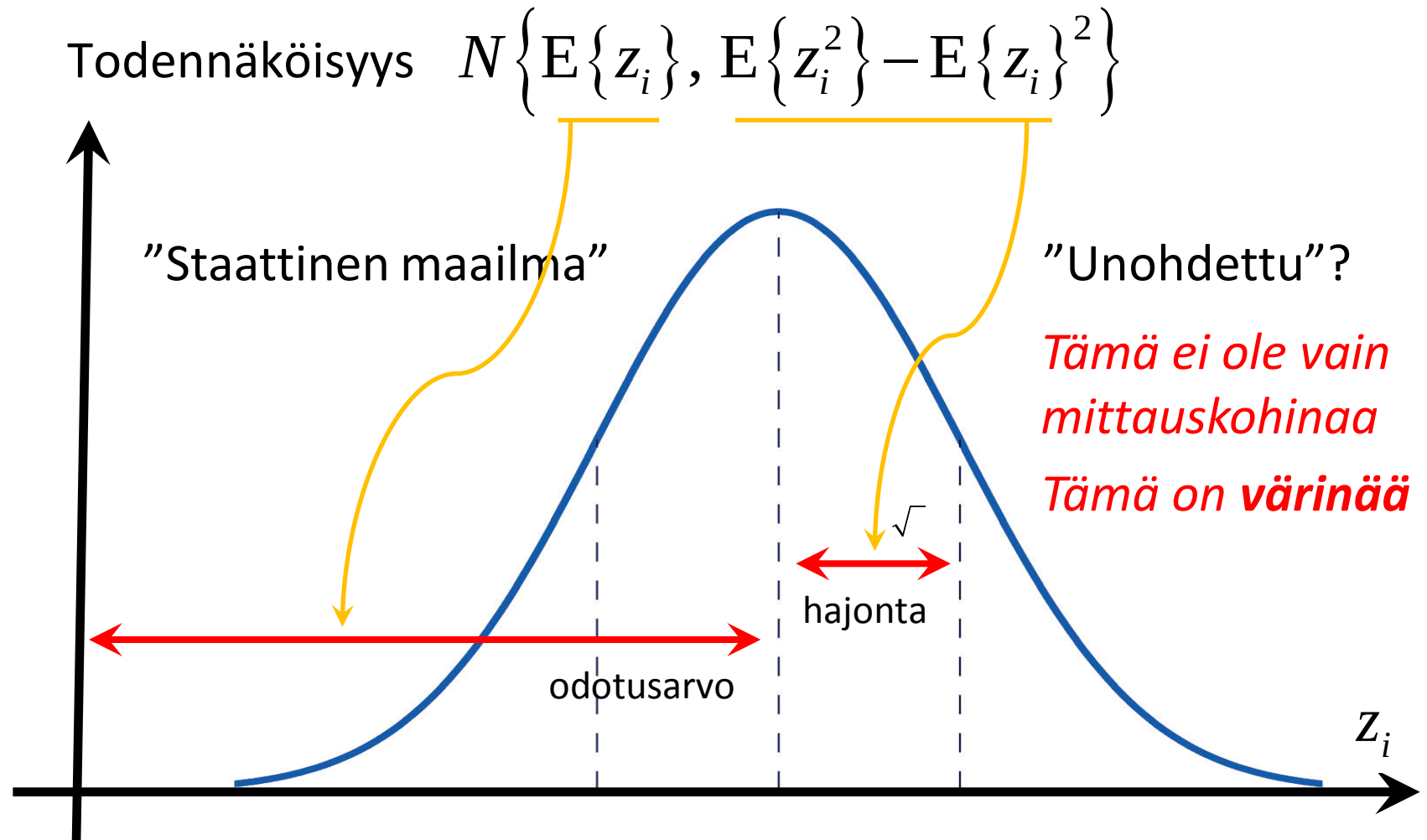
Herakleitos

Kaaoksen kohtaaminen

- *Prosessifilosofia* korostaa dynamiikan olennaisuutta maailman hahmotuksessa – *tuleminen* on tärkeämpää kuin *oleminen*
 - Oletus nyt: kaikki mikä on relevanttia on *liikettä*, yksinkertaisimmillaan jonkinlaista *värinää*
 - Myöhemmin ... osoittautuu, että korreloivat värähtelyt muodostavat *virtauksia* ja *dynaamisia attraktoreita*
 - Siis *prosessi* ja *dynamiikka* on tärkeämpää kuin *rakenteet* tai *mekanismit*
 - Kun asioita yksinkertaistetaan äärimmilleen, voidaan olettaa, että aluksi *ei ole olemassa minkäänlaista rakennetta*
 - Aloitetaan ”synnyistä”, täydellisestä kaaoksesta, ja tarkastellaan, millaista *informaatiota* (datajakaumien muodossa) on tarjolla
-

”VITALISMIA” ilman FINALISMIA

Ei rakennetta – *normaalijakauma*



*Tulee kiinnostavaksi korkeammissa ulottuvuuksissa,
monimuuttujajakaumien tapauksessa*

Jakaumien luonnehtiminen ja *tulkitseminen*

- "*Materia*" – havaittu todellisuus; keskiarvoistus, *karkeistus*

$$E\{z_i\}$$

- **Enformaatio** – variaatio, muutoksen luonne, *dynamiikka*

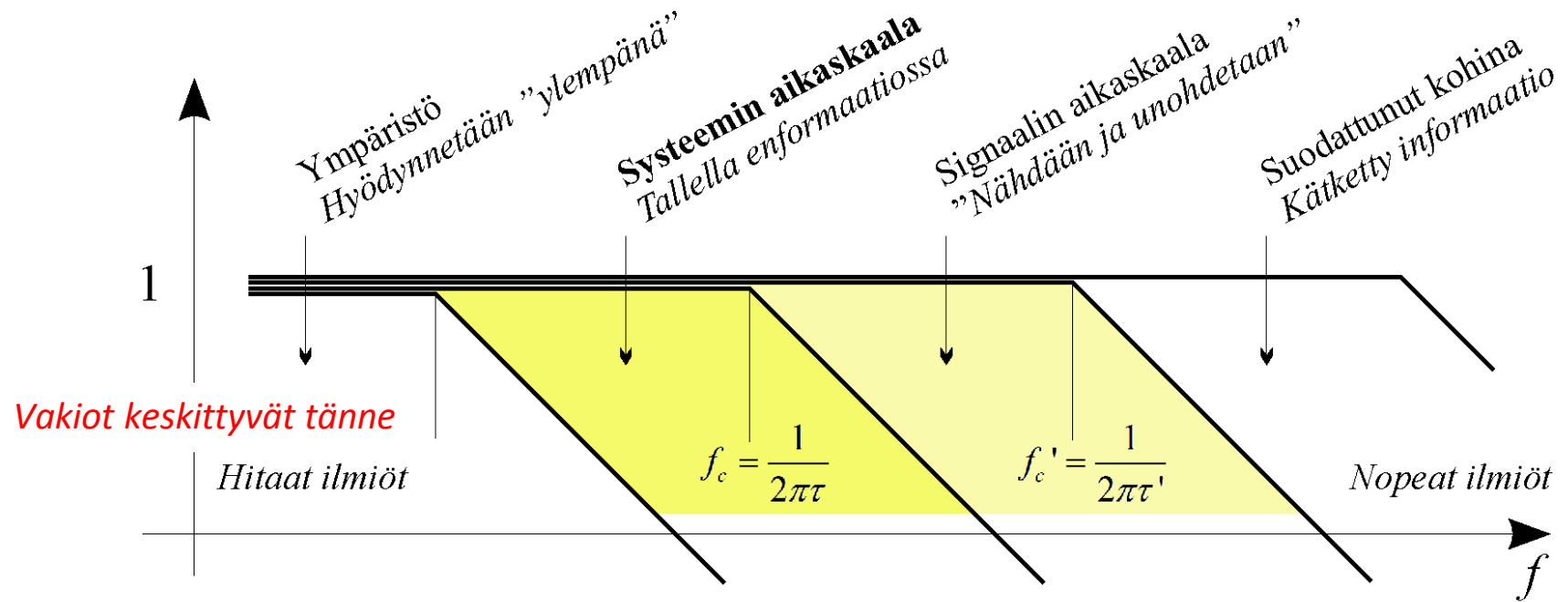
$$E\{z_i^2\} - E\{z_i\}^2 \quad \text{varianssi} \quad \text{korrelaatiot - kovarianssit}$$



- "Jos kaikki on *jousia* ja jousen *i* tila (*poikkeama tasapainosta*, tai *amplitudi*) on z_i , sen *energia* on verrannollinen suureeseen z_i^2 "
- "Energeettinen informaatio" – kyky maailman muuttamiseen = perusta *luonnonsemantiikalle*
- Osoittautuu, että enformaatio voidaan tulkita *elämänvoimaksi*

"MITEN" → "MIKSI"

Enformaatio käytännössä

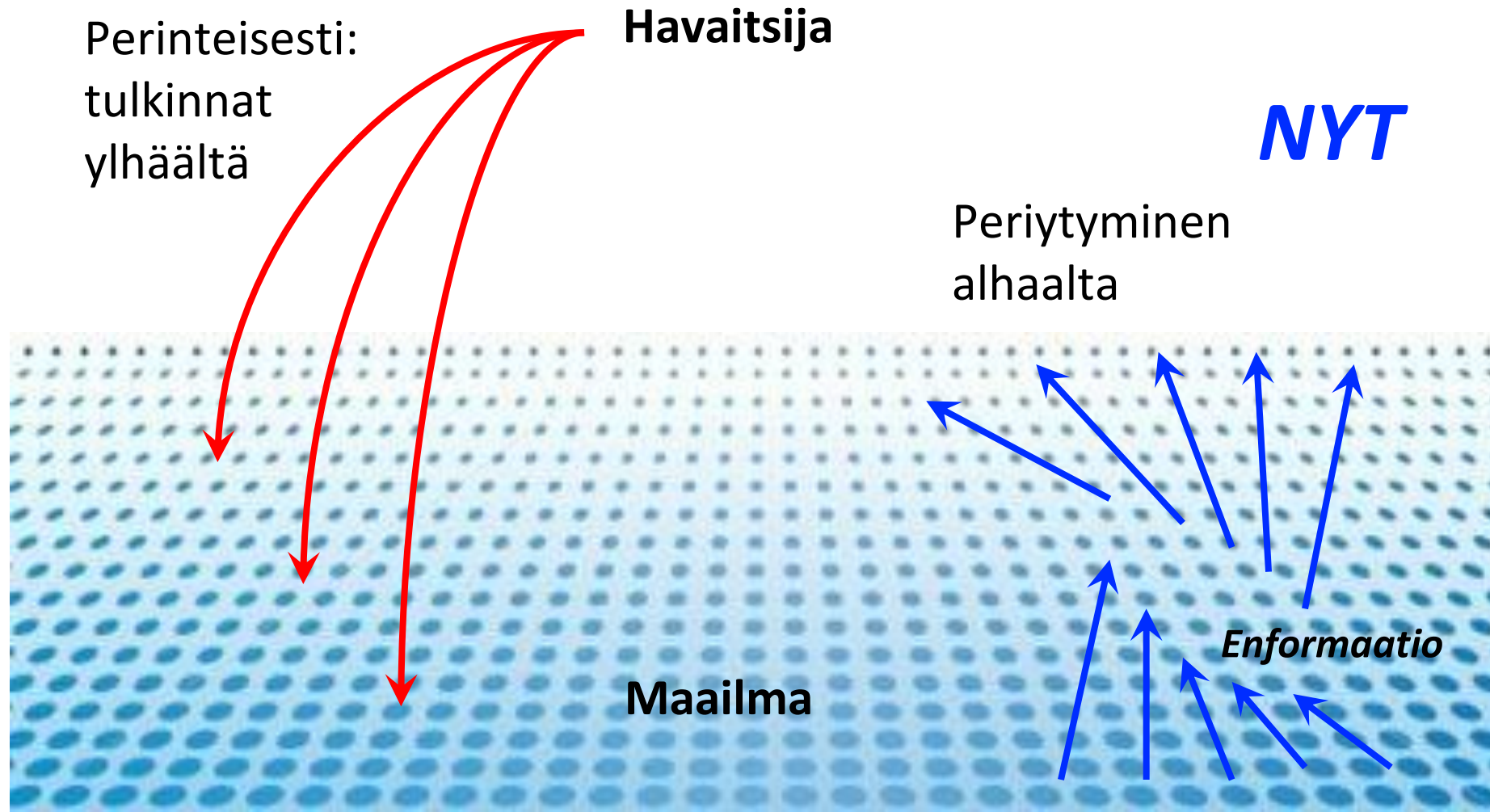


- Jos havaitsijan "havaintahorisontti" on äärellinen, $E\{\}$:n sijaan

$$\frac{d\mathcal{E}\{z_i^2\}}{dt/\tau}(t) = z_i^2(t) - \mathcal{E}\{z_i^2\}$$

Opetus: todellisen maailman epäideaalisuuksien huomioiminen antaa vihjettä emergoituvista rakenteista (tässä *hierarkioista*)

Semantiikka – ”merkityksen synty”



Maksimoidaan enformaation haltuunotto – mennään kohti ”maksimirelevanssia”

Näkökulman laajennus

- Luonnonsemantiikka = kyberneettinen ”Gregory Batesonin semantiikka”: kaikki pohjautuu ”merkityksellisiin muutoksiin”
 - Piispa Berkeley sanoi että *oleminen on havaituksi tulemista*
 - Tätä voidaan yleistää: olemassaolo on *enformaation käyttöä ympäristössä*, havaitсииihin vaikuttamista
 - Olemassaolon edellytys siis on *enformaation hankinta* jotta sitä olisi käytettävissä maailmaan vaikuttamiseen
 - Siis: tavoitteena on *vuorovaikutus* ja *enformaation muokkaus*
 - Toisaalta ”mittaus” on luonnonjärjestelmien perustoiminnallisuus: kaikki mittaa toistaan, *tähän ei tarvita ihmistä*
 - Optimoituminen: ”voittaja” on se joka onnistuu hankkimaan eniten enformaatiota; päämäärähakuisuus on kuitenkin illuusio
-

Vuorovaikutuksen mallintaminen

- Oletus: "reaktiot" johtuvat "törmäyksistä" joiden todennäköisyys riippuu "aktiivisuuksista", "konsentraatioiden" funktioista

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

- Ottamalla logaritmit

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

ja differentioimalla nominaalipisteessä saadaan

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

Enformaatioteoreettinen *systeemi*

- Mallista tulee *lineaarinen*:

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

- Tämän voidaan tulkita esittävän myös jonkinlaista ”yleistettyä diffuusiota”
- Maailma jakautuu *syötteisiin* (*resursseihin*, jonkinlaisiin *paineisiin*) ja *tiloihin* (*aktiviteetteihin*, jonkinlaisiin *virtauksiin*)

$$\bar{u}_j = \Delta z_j / \langle z_j \rangle$$

$$\bar{x}_i = \Delta \dot{\zeta}_i / \langle \dot{\zeta}_i \rangle$$

*Lokaalit tasapainoarvot =
havaittava ilmiömaailma*

- *Systeemi* on niiden tilojen joukko jotka *näkevät maailman samoin*
-

Matematiikka – ”avustettu ajattelu”

- Matematiikkaa tarvitaan enformaatiovirtauksen saumattomaan jäljittämiseen, ”enformatiiviseen päättelyyn”:
 - Alisymboliset ja sumeat ilmiöt ovat tällöin käsiteltävissä
 - Ilmiöiden suuridimensioisuus ja yhtäaikaisuus voidaan hallita
 - Ajalliset rakenteet ja äärettömyyden käsite tulevat mahdollisiksi
 - Emergenssi ja konvergenssi voidaan hallita
 - Optimoituminen voidaan simuloida, jne.
- Enformaatio on neliöllinen suure – optimirakenteet *lineaarisia*
- Normaalisti matematiikka on puhtaasti syntaktista – nyt kuitenkin semantiikka on kytketty mukaan laskentaan alusta lähtien
- Suoritetaan vain ”mielekästä”, fysikaalisesti relevanttia laskentaa?

Huolimatta rakenteiden lineaarisuudesta, *ääretön iteraatio* (katso myöhemmin) mahdollistaa ei-triviaalit lopputulokset

Systemien ”selviämisstrategia”

- Vastaanotetun enformaation määrä ilmaisee systeemisen ”toimintatavan” evolutiivisen vahvuuden:

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

- Voittajastrategia löydetään soveltamalla Lagrangen kertojen tekniikkaa rajoitettuun ongelmaan ($|a_i| = \text{vakio}$), jolloin

$$a_{ij} = q_i \mathcal{E}\{\bar{x}_i\bar{u}_j\} \qquad q_i = \text{tilaspesifi ”jousto”}$$

- Siis optimivuorovaikutusten malli kerralla kaikille i ja j on matriisimuodossa

$$\bar{x} = Q \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^T\} \bar{u}$$

$$\bar{x} = Q \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^T\} \bar{u}$$

- Tietorakenteet ovat

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \vdots \\ \bar{x}_n \end{pmatrix} \quad \bar{u} = \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \vdots \\ \bar{u}_m \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} q_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & q_n \end{pmatrix}$$

"Kytkentämatriisi"

"Yhteisenformaatio"

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

Semanttinen suodatin

... Kaikki on silti täysin lokaalia

Analyysi kaavalle $\bar{x} = Q \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^T\} \bar{u}$

- Jos määritellään

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

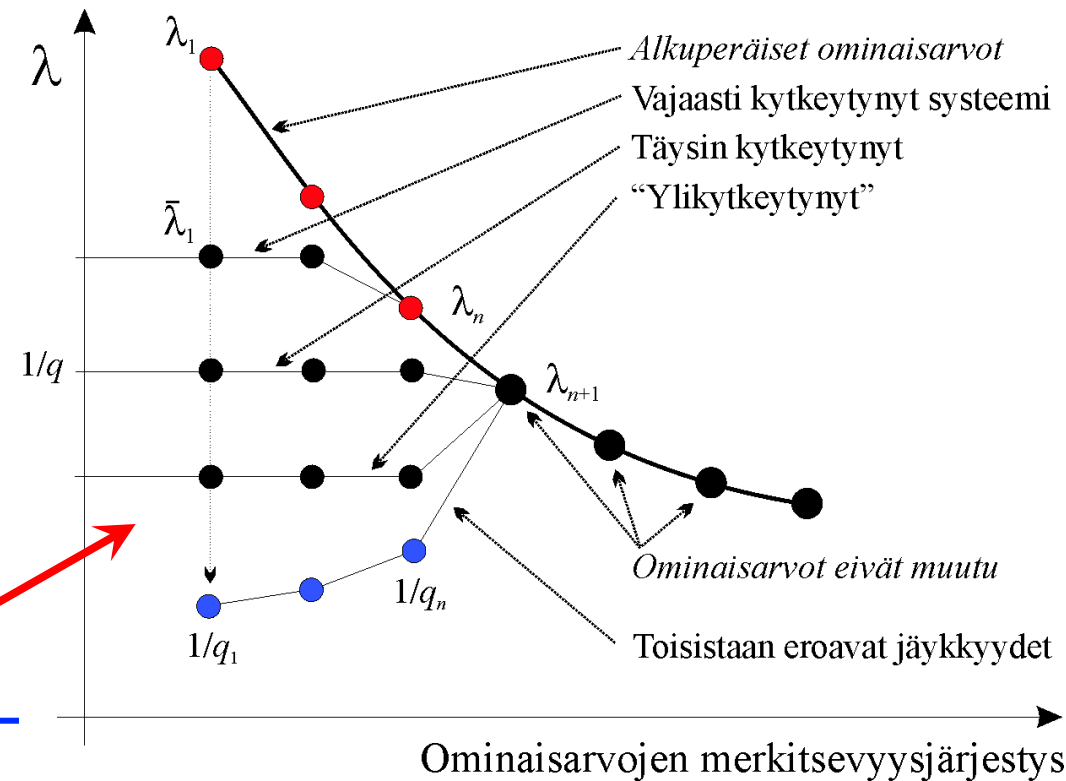
osoittautuu, että

$$I_n = \theta^T \theta$$

$$Q^{-1} = \theta^T \mathcal{E}\{\bar{u}\bar{u}^T\} \theta$$

- Pääaliavaruusanalyysi (PSA) tulee toteutetuksi
- Kytkeytyminen muuttaa kovarianssirakenteen!

"Kytkeytymisen" vaikutus

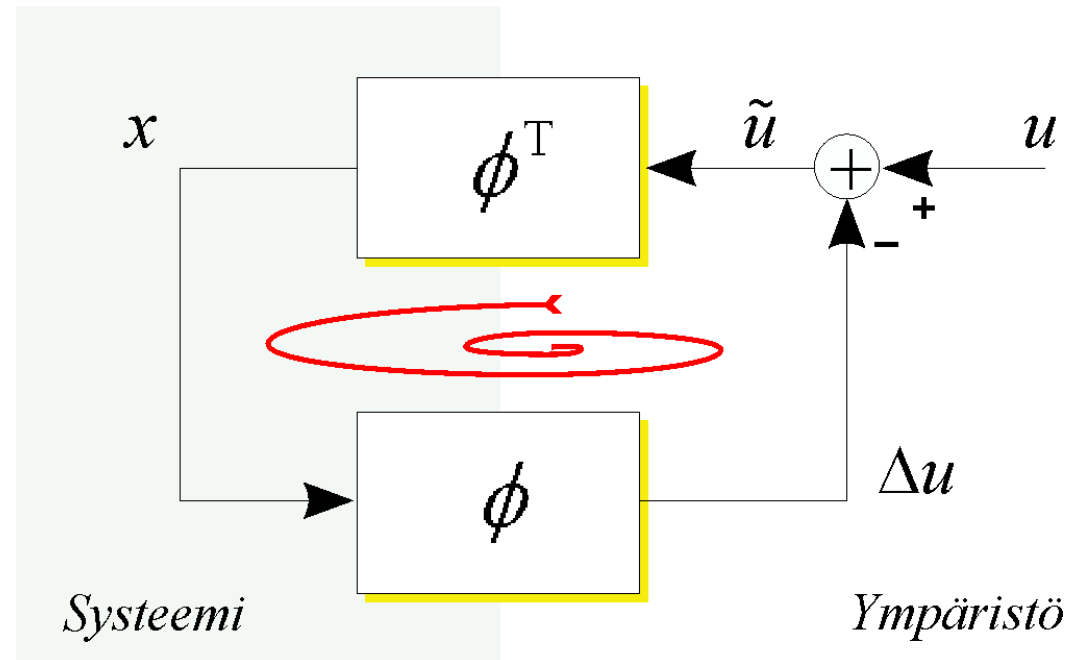


Mutta jotta se toimisi...

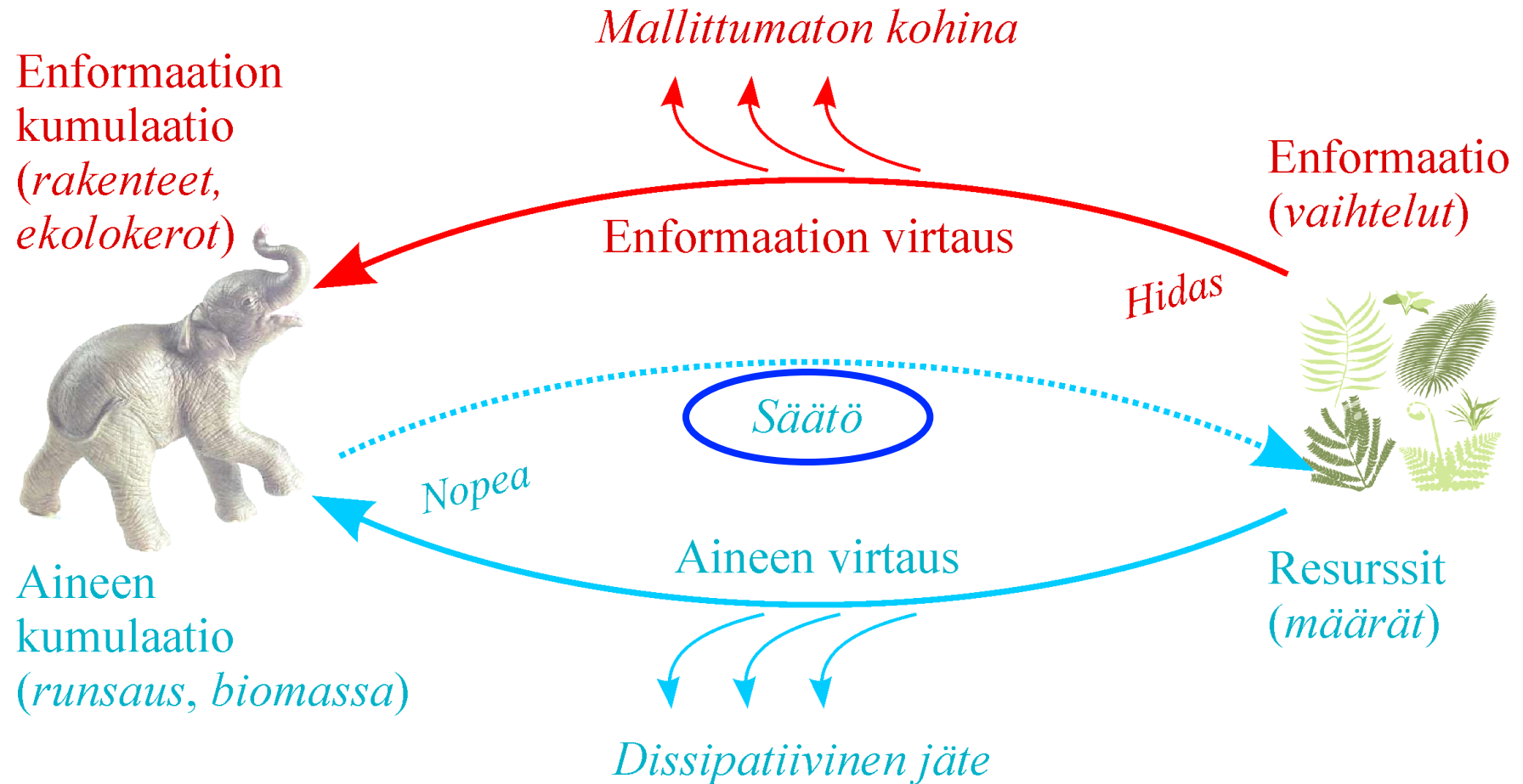
- Yllä esitetty pitää paikkansa vain jos *stationaarinen ratkaisu* löytyy
- Käytetään (Adam Smith -tyylistä!) *negatiivista takaisinkytkentää*: informaatio *ei ole* informaatiota, vaan ”käyttäminen kuluttaa”
- Seuraa *kilpailuoppiminen* ja *itseorganisoituminen*
- Stationaaritilan signaalien yhteensovitus edellyttää yhtälöryhmän ratkaisua

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

$$\bar{u} = \lim_{t \rightarrow \infty} \{\tilde{u}(t)\}$$



Esimerkki: "Ekolokerot" ja *monimuotoisuus*



Epälineaarisuudet kiertävät kantavektoreita
tyypillisesti *harvojen komponenttien* suuntaan

Kaiken kaikkiaan: ~~enformaation optimaalinen~~ säätö *robusti*

- Tasapainotilassa vuorovaikutuksia hallitsevat kuvaukset

$$\phi^T = Q \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^T\} = (Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^T\})^{-1} \mathcal{E}\{\bar{x}u^T\}$$

$$\varphi^T = (Q^{-1} + \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^T\})^{-1} \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{u}^T\}$$

siten että

$$\begin{cases} \bar{x} &= \phi^T \bar{u} \\ \bar{x} &= \varphi^T u \\ \hat{u} &= \phi \bar{x} \\ \hat{u} &= \varphi \bar{x} \end{cases}$$

← Optimaalinen enformaation *mallitus*

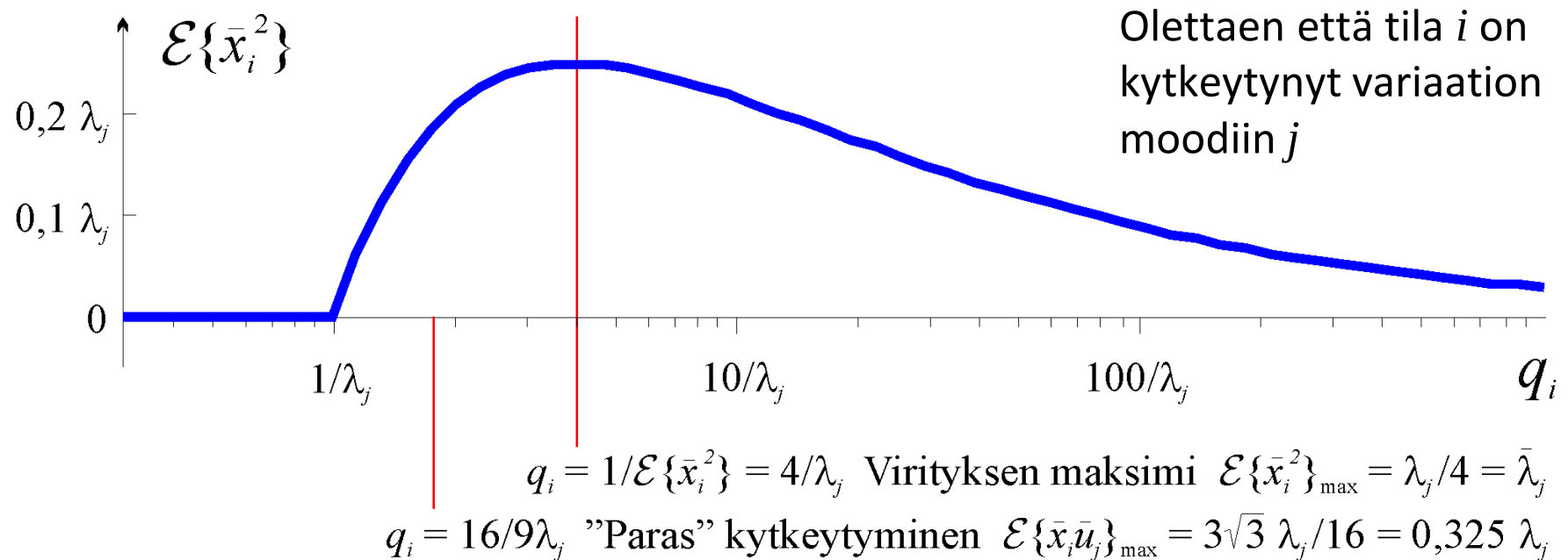
robusti
← ~~Optimaalinen~~ enformaation *estimointi*

Regressio on *regularisoitu* (huomaa Q)

– se ei ole herkkä *kolineaarisuudelle*

missä $\bar{u} = u - \hat{u}$

Enformaation periytyminen



- Saadaan

$$\mathcal{E}\{\bar{x}_i^2\} = \sqrt{\frac{\lambda_j}{q_i}} - \frac{1}{q_i} \quad \text{jolloin kytkeytymisehto on} \quad q_i > \frac{1}{\lambda_j}$$

"Staattinen kitka" emergoituu?

Mallin yksinkertaistaminen

- Kytkentäkertoimien automaattinen adaptointi (tyypillisesti $b = 1$)

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

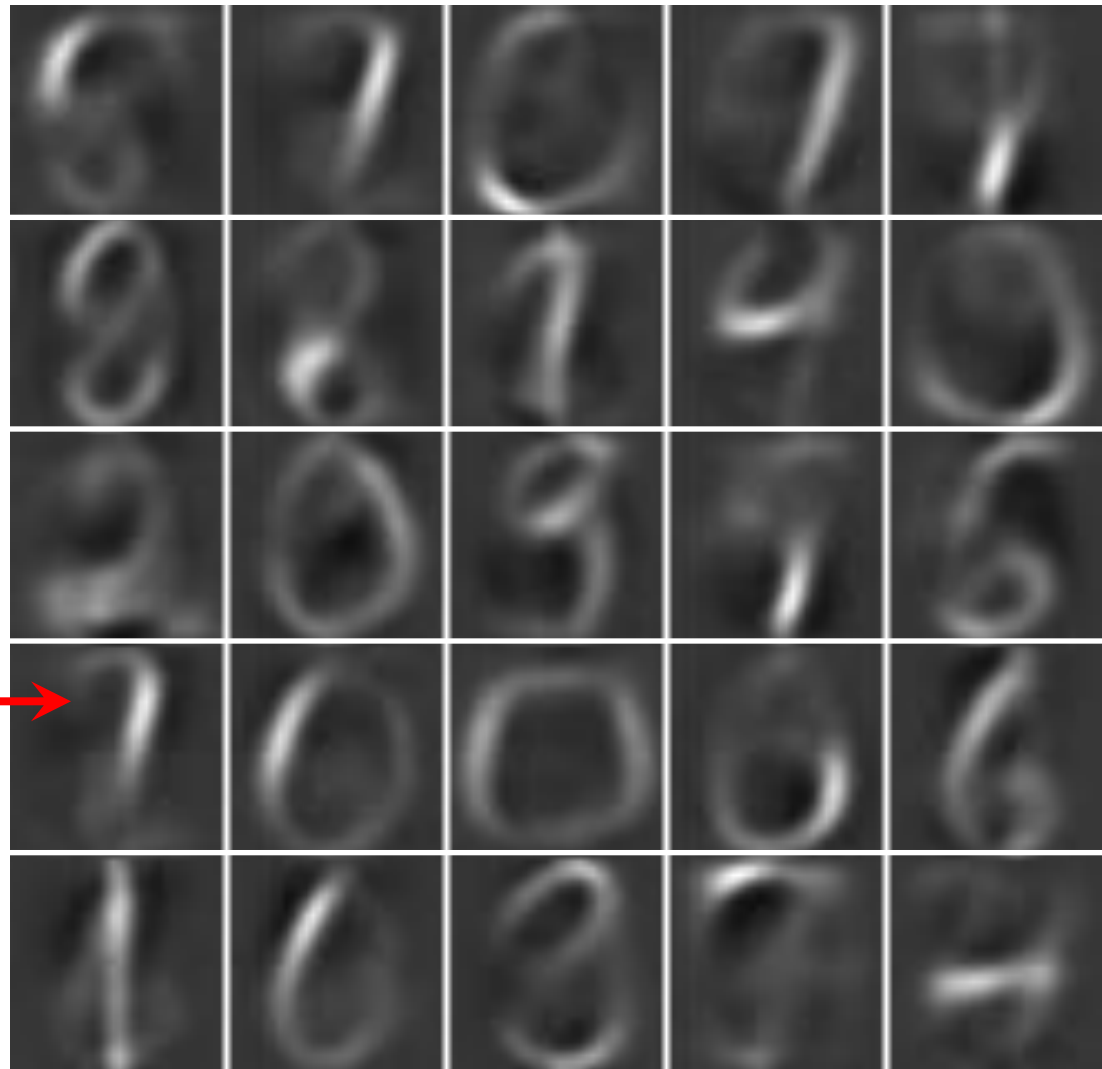
josta seuraa systeemin *maksimieksitaatio*

- Tällöin näkyvä data muokkautuu kiinnostavalla tavalla:
 - Muuttujat *ekvalisoituvat* = kaikkien varianssit tulevat samoiksi
 - Näkyvä ympäristö *valkaistuu* = kovarianssista tulee yksikkömatriisi
- Systeemin koko voidaan optimoida datan ominaisuuksien avulla:

$$\sqrt{\lambda_n} > \frac{1}{2} \frac{\sum_{\ell=1}^{n-1} \sqrt{\lambda_\ell}}{n-1}, \quad \text{täytyy päteä kaikille moodeille}$$

Esimerkki: *käsin kirjoitetut numerot*

- Laajennus mentaaliseen maailmaan: hermosoluille *aistisignaalien vaihtelu* on nyt enformaatiota
- Opitut piirteet 25 vektoria ϕ_i →
- Itseisarvo-muotoinen epälineaarisuus lisätty tiloihin



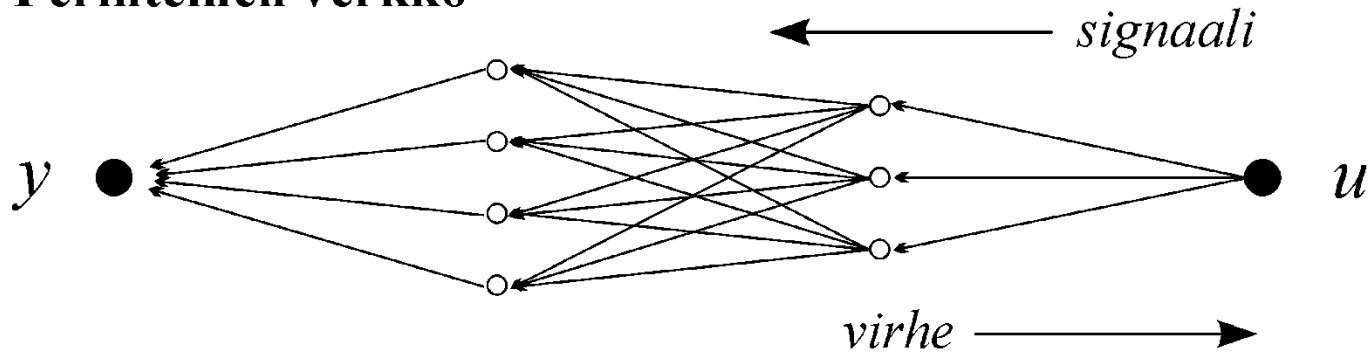
Kierros
500

Yhteyksiä muihin koneoppimismenetelmiin

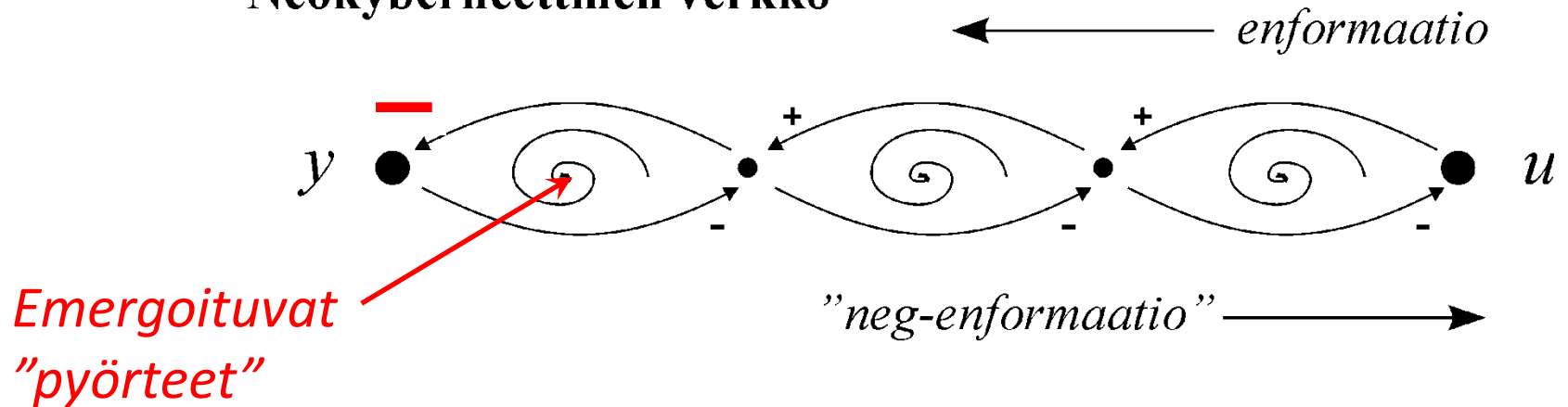
- **Hopfieldin verkot:** Nytkin käyttäytymistä hallitsevat *energiafunktiot*, mutta hahmot purkautuvat *piirteiksi*
 - **(Rajoitetut) Boltzmannin koneet:** Taas signaaleita kierrätetään kohinan suodattamiseksi, mutta *äärettömyyteen saakka*
 - **(Yleistetyt/Anti-) Hebbin algoritmit ja Ojan periaate:** Myös korrelaatioperusta, mutta nyt rakenteet ovat uskottavampia
 - **(Kohosen) itseorganisoituvat kartat:** Antamalla matriisin Q olla aluksi *ei-diagonaalinen*, voidaan huomioda *naapuruusvaikutus*
 - **Riippumattomien / harvojen komponenttien analyysi:** Suoraviivaisia (?) perusrakenteen muunnelmia
 - **Monikerroksiset perceptron-verkot:** Virhesignaalit ovat nyt olennainen osa rakennetta, eikä tarvita *takaisinketjutusta* 
-

"Laminaarinen" virtaus "turbulentiksi"

Perinteinen verkko



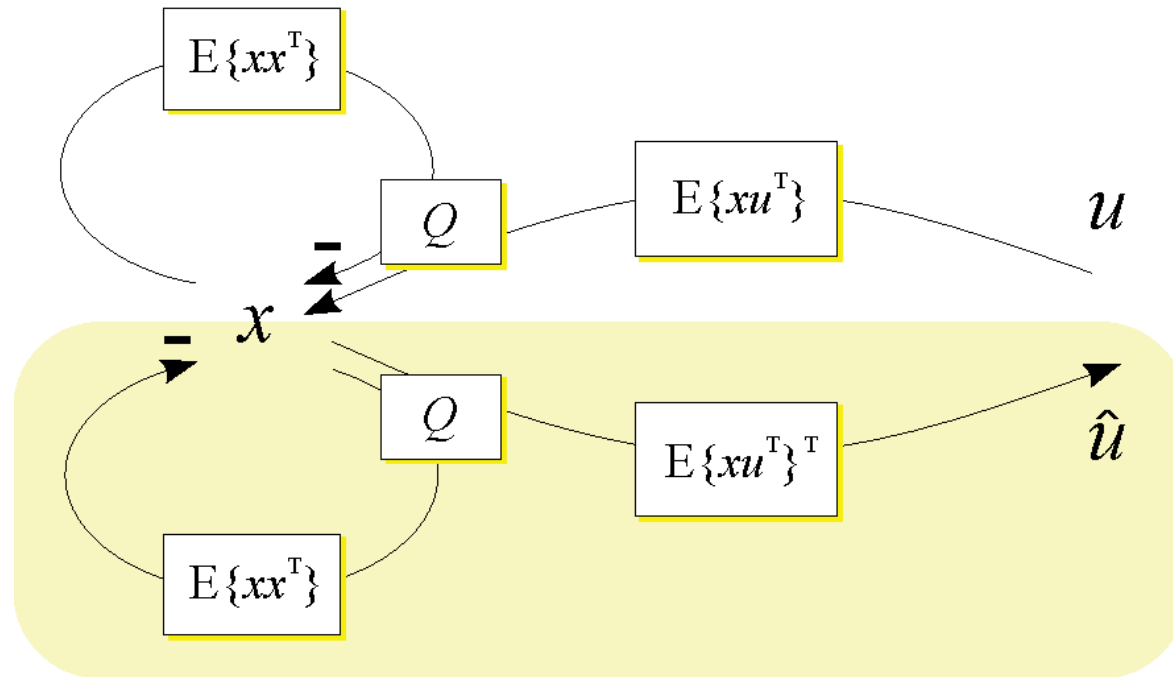
Neokyberneettinen verkko



Yksinkertainen signaalivirtaus ja monimutkainen adaptaatio muuttuu monimutkaiseksi signaalivirtaukseksi ja yksinkertaiseksi adaptaatioksi

Evoluutioaskeleen jälkeen

- Sisäinen häviötön takaisinkytkentä: tarvitaan tieto "naapureista"
- Voidaan saavuttaa koordinoituminen ilman dissipaatiota
- Optimaalinen PSA / MLR toteutuu:



$$\bar{x} = \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^T\}^{-1} \mathcal{E}\{\bar{x}u^T\} u = \Phi^T u$$

$$\hat{u} = \mathcal{E}\{u\bar{x}^T\} \mathcal{E}\{\bar{x}\bar{x}^T\}^{-1} \bar{x} = \Phi \bar{x}$$

Näkökulma ylhäältä

- Matemaattinen hahmo: minimoituva kustannuskriteeri

$$J(x) = \frac{1}{2} x^T \mathcal{E} \{ \bar{x} \bar{x}^T \} x - x^T \mathcal{E} \{ \bar{x} u^T \} u$$

Mahdollisia tulkintoja *mekaanisena energiana* (seurauksena "Aristoteelinen mekaniikka"), *deformaatioenergiana*, *sähköstaattisena energiana*...

- Hahmontunnistuksen näkökulma (sovitus *piirteisiin*):

$$J(x) = \frac{1}{2} (u - \Phi x)^T \Phi \mathcal{E} \{ \bar{x} \bar{x}^T \} \Phi^T (u - \Phi x) \quad + \text{vakio}$$

Vertaa tätä perinteiseen *suurimman uskottavuuden* menettelyyn!

Nyt painotus *vapauksien* suuntaan: $\Phi \mathcal{E} \{ \bar{x} \bar{x}^T \} \Phi^T = \mathcal{E} \{ \hat{u} \hat{u}^T \}$

Vapauksien näkökulma

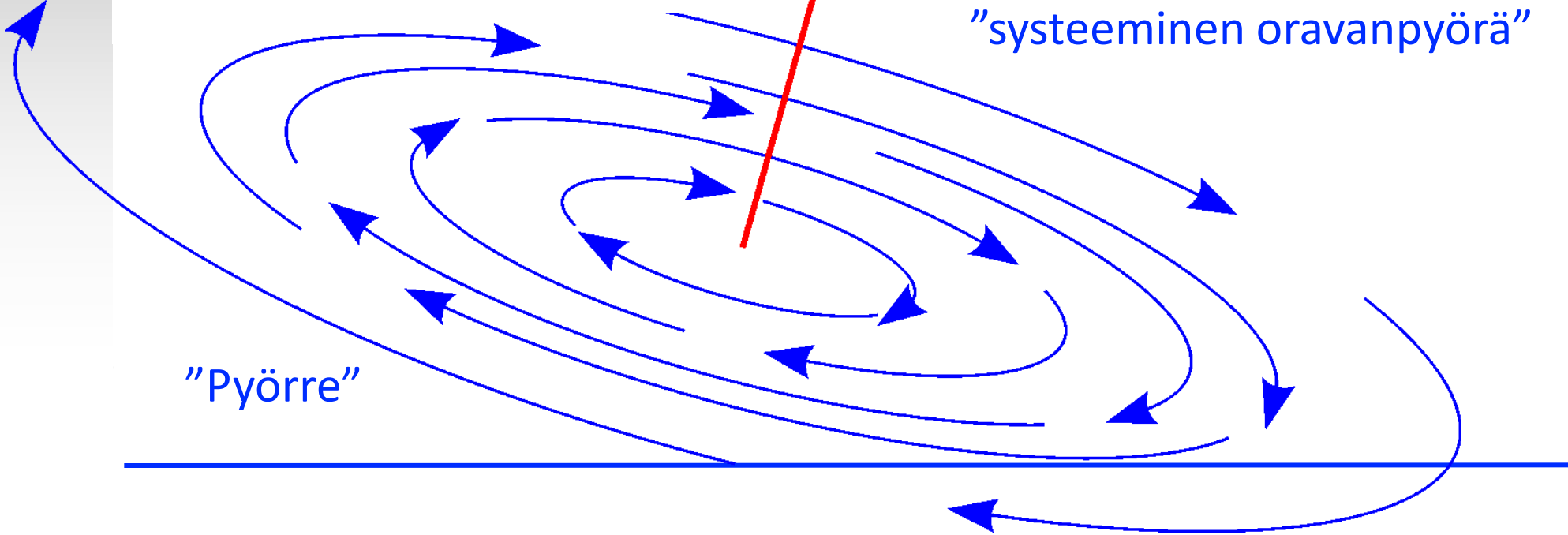
... *kehityksen* suunta

- Kun on jo paljon säätöjä (yhteisriippuvuuksia), on järkevää keskittyä niihin jäljellejääneisiin suuntiin ("Okkamin partaveitsi")

Vapausaste,
yhteisvariaation suunta,
"enformaatiokanava"

Rajoitteet, invarianssit,
"systeminen oravanpyörä"

"Pyörre"



Kohti *emergenssin seuraavaa tasoa*

- Edellä, *dynamiikka-ajattelu* ja *optimoitumisen periaate* oli avain uusien toiminnallisuuden löytymiseen
- Nyt, tarkastellaan samoista lähtökohdista vielä stationaaritilan saavuttamisen yksityiskohtia
- “Expectation Maximization”-lähestymistapa soveltaen “Ensemble Kalman filter”-mittaussuodatinta:

$$x^{\text{posteriori}} = x^{\text{priori}} + C\Phi^T (\Phi C\Phi^T + R)^{-1} (u - \Phi x^{\text{priori}})$$

... josta:

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

Mallit *taajuustasossa*

- Jos systeemin ”resurssit” ovat vastaavalla tavalla dynaamisia

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

- Kun tällöin dynamiikat yhdistetään, saadaan

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

joka kuvaa *harmonista oskillointia*:

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

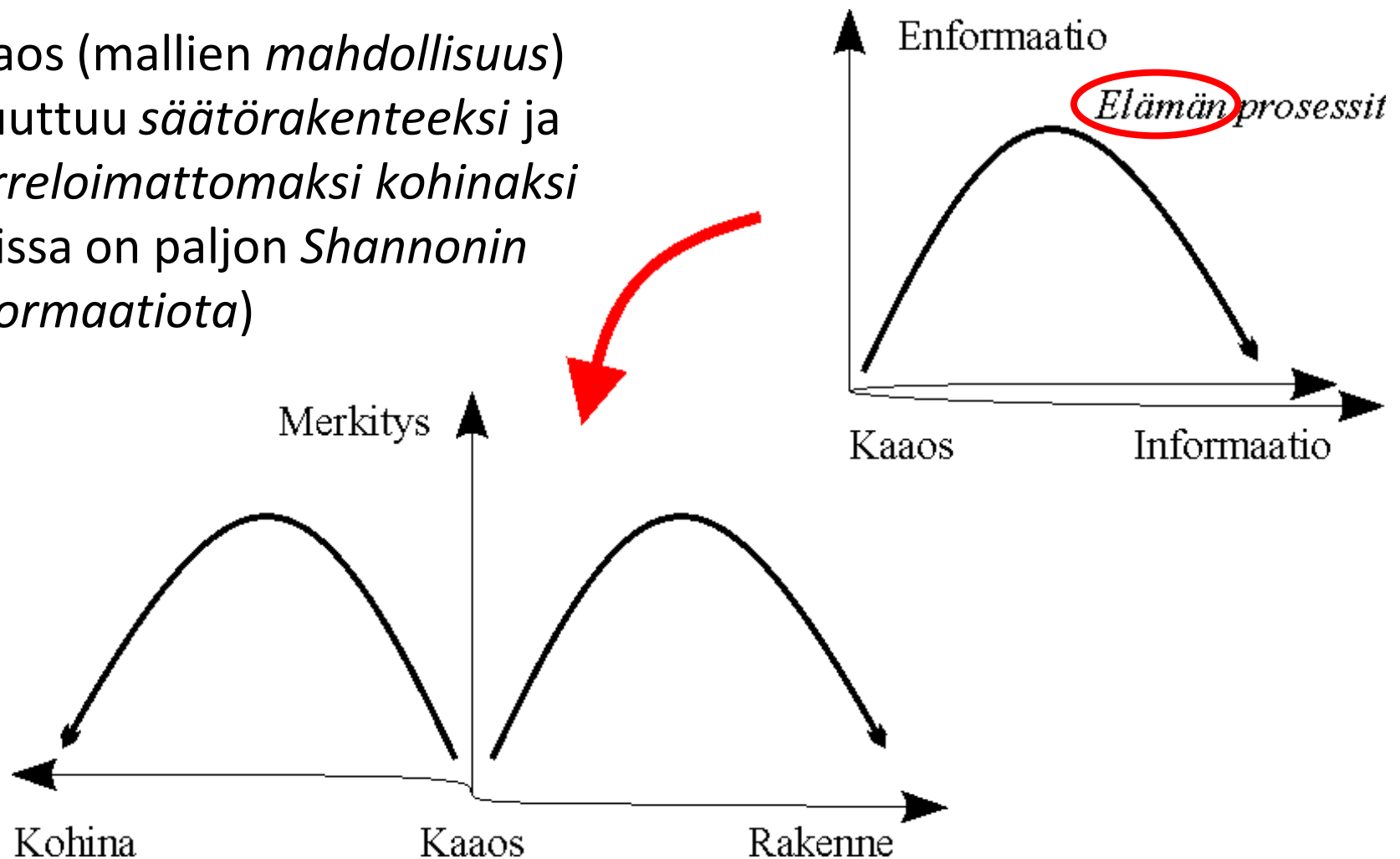
**Kirjassa
virhe!**

Uudet tulkinnat

- Signaalit nähdään *spektreinä*, systeemit *suodattimina*, ja tasapainot ympäristön kanssa ovat *kenttiä*
 - Vapaus ajasta ja paikasta – niiden sijaan *amplitudit* ja *vaiheet* tulevat keskeisiksi
 - Häviötön enformaatiovirtaus systeemien kesken edellyttää *impedanssisovitusta*, jne.
 - Systeemit muodostavat ”suunnattuja antenneja”, mikä tekee mahdolliseksi ymmärtää *ylätason emergenttejä rakenteita*
 - Kytkeytyminen ympäristöön tarkoittaa ”aaltofunktioiden romahtamista”, jolloin *seisovat aallot* sovittuvat reunaehtoihin
 - Avain *tietoisuuden* ymmärtämiseen (?!) – ja *intersubjektiivisuus* edellyttää yhteisön ”morfisten kenttien” simulointia mielessä ...
-

Loppuhuipennus: *informaatio* ja *enformaatio*

- Kaaos (mallien *mahdollisuus*) muuttuu *säätörakenteeksi* ja *korreloimattomaksi kohinaksi* (joissa on paljon *Shannonin informaatiota*)



Evoluution luonne

Tuoretta enformaatiota tarvitaan pitämään prosessi liikkeessä!

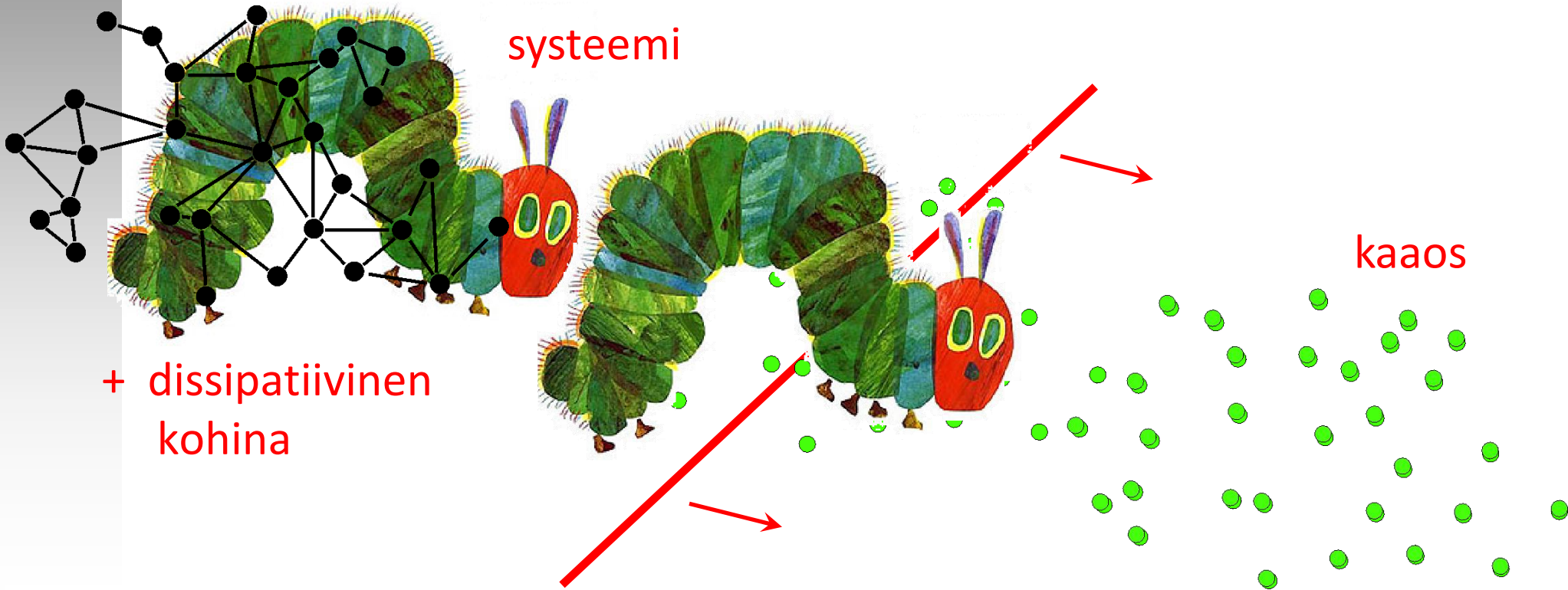
rakenne

systeemi

+ dissipatiivinen
kohina

kaaos

Kaaoksen ja järjestyksen välinen rajalinja



Elämän teoria

- **Ajateltu ja kirjoitettu suomeksi!**
- Elämä = "Pyörteiden" (säätosilmukoiden, *enformaatiopumppujen*) fraktaalinen kudος
- *Entropiantuotanto maksimoituu* – mutta vain säätömallin puitteissa
- Vain *subjektiivisessä maailmassa* on mahdollisuus *eheyteen*

***... Kerromme mielellämme lisää!
Ota yhteyttä.***

