

Sjølorganisering og biologisk evolusjon

Av Jørn-Frode Nordbakken

Innledning

Moderne naturvitenskap kan fortelle en historie om alle tings utvikling, der menneskets rolle hele tiden minker i takt med at flere opplysninger kommer til. Vitenskapen kan ta ting fra hverandre til enklere deler – reduksjonisme, og ved å forstå samvirke mellom delene kan man ofte bedre forstå det sammensatte fenomenet. I 1931 beviste imidlertid Kurt Gödel at for begrensede formelle (aritmatiske) systemer er helheten mer enn summen av delene. Mer generelt kan en si at et system kan ha såkalte emergente egenskaper, det vil si strukturer og egenskaper som ikke kan forutsies med utgangspunkt i kunnskap om systemets komponenter. Tross reduksjonismens metodiske begrensninger, kan vi ikke gi forutsigelser uten bruk av formelle systemer og kjennskap til 'lover' som styrer transformasjoner innen et system. Evolusjonære evner finnes hos de energidrevne systemer med emergente egenskaper som kan gi opphav til avkom som er forskjellige fra hverandre.

Religiøs tro er mystisisme fordi svar på vitenskapelige spørsmål avhenger av en tro om noe utenfor rasjonalitetens domene. Den viktigste forskjellen mellom en vitenskapelig hypotese og ideer i religion eller metafysikk er at hypoteser i prinsippet kan forkastes på grunn av observasjon. Kreasjonister tenker verden gjennom en utenforstående skaper. Et eksempel er den amerikanske biokjemikeren Michael Behe, som vel kan han ha rett i at ortodoks Darwinistisk gradualisme ikke kan forklare evolusjonen av biokjemiske reaksjonssystemer fullt ut. Behe mener imidlertid at såkalt "ikke-reducerbar kompleksitet" gjør at levende organismer må være designet av en utenforstående skaper. Jeg tror at Behe tar feil i sine konklusjoner, og tiltrekkes mer av den dristighet som ligger i å forsøke å forstå verden uten en utenforstående designer. Ockham's razor, et prinsipp

som tillegges den engelske fransiskaneren William of Okham (1285-1347), sier at det ikke er hensiktsmessig å anvende flere ledd enn det som er nødvendig i en forklaringsmodell. En utenforstående designer er nettopp et slikt unødvendig ledd. Moderne naturvitenskap påpeker at materiens sjølorganiserende egenskaper og emergens gir tilstrekkelig forklaring på naturens kompleksitet.

En av 1900-tallets store tenkere, biologen og antropologen Gregory Bateson (1904-1980), delte virkeligheten i to ved å skille mellom en materiell verden av ikke-levende stoff (pleroma) og kommunikasjonens verden (creatura). Pleroma mangler tenkning og informasjon, men inneholder mange typer regulariteter (krefter, støt, trykk, energi, osv.). Creatura eksisterer innen og gjennom pleroma, og kunnskap om pleroma eksisterer kun i creatura, som kjennetegnes av ikke-materielle organisasjonsmessige og kommunikasjonsmessige karakteristikk som ikke finnes i pleroma. Fenomenene i creatura styres og bestemmes av forskjeller, distinksjon og informasjon, og fysikk og kjemi gir ikke tilstrekkelig forklaring. Creatura er verden sett som et mentalt system, noe som innebærer bruk av kommunikasjonsteori, systemteori og kybernetikk som forklaringsramme. I creatura er alt navn, kart, og navn på relasjoner - men fortsatt er navnet på en ting ikke tingen, og navnet på en relasjon er ikke relasjonen. Ved å ved å gjøre distinksjoner (erkjennelse er en følge av mønstre av forskjeller) kan vi mennesker oversette pleromas regulariteter til creaturas språk, f.eks. i form av fysikk og kjemi (termodynamikk er en bro mellom pleroma og creatura), men grensen mellom pleroma og creatura er som kontrasten mellom kart og terreng. Den materielle verden forblir utilgjengelig, så alt vi sier om pleroma blir spekulasjoner.

Det mentale er alltid trekk ved en helhet, og et mentalt system ('mind') er en samling av samvirkende deler (som er mulige subminds),

hvor interaksjoner mellom delene er av kommunikativ natur, og hendelser utløses av forskjeller mellom delene. Et mentalt system er et uunngåelig resultat av en passende kompleksitet, hvor som helst denne kompleksitet opptrer. Store og kompliserte kybernetiske systemer med mentale egenskaper inkluderer fra det å tenke, handle, sanse, lære, huske, løse problemer, ha sjølkontroll, til embryologi, biologisk evolusjon, samt økologisk og kulturell suksessjon. De mentale prosessenes verden er en sjølorganiserende verden av kinesiske esker hvor informasjon genererer mer informasjon. Informasjon (i henhold til Bateson: en forskjell som skaper en forskjell) består ikke bare av meldinger, men også meldinger om meldinger (metameldinger), som utgjør en annen klasse av informasjon, og antyder et hierarki av ulike logiske typer. Forskjellene er objektive egenskaper ved verden, men ikke alle forskjeller oppfattes; kun effektive forskjeller blir informasjonsenheter. Mentale prosesser krever energitilførsel og lukkede sirkulære (eller mer kompliserte) kommunikasjonskretsløp (ikke-lineære årsak-virkning sammenhenger). Paradokser i systemiske prosesser kan oppstå fordi et større systems konstans og overlevelse opprettholdes av forandringer i de subsystemer som utgjør deler av helheten.

Termodynamikk og sjølsamling

Termodynamikk er vitenskapen om det som er mulig. Entropi er i så måte et mål på et systems tilgjengelige energi, men også grad av sammenblanding og tilfeldighet; høy entropi er forbundet med usorterte, udifferensierte og uforutsigelige systemer. Termodynamikkens 2. lov sier at entropien i universet øker, at mengden energi som kan utføre arbeid avtar og at graden av uorden øker. Livsprosesser er avhengig av kjemiske prosesser. Den del av energiomsetningen i en kjemisk reaksjon som kan omdannes til arbeid kalles (Gibbs) fri energi (G), og endringen i fri energi (ΔG) sier noe om evnen til å utføre arbeid. Prosesser skjer spontant, men ikke nødvendigvis raskt, dersom et systems frie energi avtar ($\Delta G < 0$) og entropien øker. En reaksjon med $\Delta G > 0$ må tilføres energi, mens et system i dynamisk likevekt har $\Delta G = 0$. Livsprosesser er koblet til forandring i energi, og endring i fri energi ($\Delta G = \Delta U + p\Delta V + T\Delta S$) ved kon-

stant trykk (p) skyldes endringer i indre energi (ΔU) og endringer i entropi (ΔS) (ΔV , endring i volum ~ 0).

Hvis verden av natur er uordnet, kaotisk og tilfeldig (noe som uttrykkes i religiøse myter hos flere kulturer), hvordan oppstår da orden? Hvis tilfeldige hendelser førte til at tingene ble blandet sammen, ved hvilke ikke-tilfeldige hendelser ble de da sortert? Entropiloven sier at for et isolert system med en fiksert total energi er likevektstilstanden den med maksimum entropi. Energi som strømmer inn i et ellers isolert system driver det bort fra likevekt; og siden likevektstilstanden har maksimum entropi, blir effekten at systemets entropi reduseres; dets orden øker ('order out of chaos'). Levende organismer er åpne (varmeisolererte) systemer, hvor likevektstilstanden kjennetegnes ved lite fri energi. En energistrøm inn i et slikt system driver det bort fra likevekt, og systemets frie energi øker (økt evne til å drive ikke-spontane prosesser), noe som kan skyldes økt indre energi (f.eks. dannelse av energirike fosfatbindinger og proteiner). Et åpent system, som kan utveksle energi og stoff med omgivelsene, kan utvikle seg og opprettholde sin orden og redusere sin entropi ved å avgi positiv entropi til omgivelsene (varme, nedbrutte kjemiske forbindelser). Dette krever at systemet (f.eks. en levende organisme) ikke er i termodynamisk likevekt, noe som i sin tur krever en ytre energikilde (sola) og indre irreversible prosesser. Energistrømmen er essensiell for all sjølorganisering, fordi det på enhver skala er en tendens til at ting blir mer uordnet.

Energi var tilstede i mengder fra det øyeblikk universet oppsto. Stoff kom senere, dannet fra energi etterhvert som temperatur og trykk avtok. Tyngre grunnstoffer er dannet ved nukleosyntese i stjerner, og er et eksempel på hvordan energistrøm produserer komplekse tilstander av stoff med utgangspunkt i enkle bestanddeler: gravitasjonsenergi og kjerneenergi omdannet store mengder av det enkleste grunnstoffet, hydrogen, til mer komplekse grunnstoffer. Dannelsen av de tyngste grunnstoffene og planetenes opprinnelse er forbundet med såkalte supernovaeksplosjoner. På samme måte som livet er en del av biosfærens økologiske syklus, er Jorda en del av en mye eldre syklus av stoff og energi i en galakse. Materie- og energistrøm-

mer gjør spiralgalaksene til noen av de mest komplekse ikke-levende systemer. Det er ca 10^{11} galakser i det observerbare universet, og hver har et tilsvarende antall stjerner.

Energistrømmer på den primitive jordas overflate (lyn, UV-stråling, vulkansk varme, jernkatastrofen) medførte geokjemiske forhold langt fra likevekt, og de opprinnelige 12 livsnødvendige grunnstoffene (H, C, N, O, Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Fe) ble omdannet til mer komplekse strukturer, og stabile småmolekyler (eks. CO_2 , N_2 , H_2O) dannet sukker og aminosyrer (100 ulike sidegrupper hvorav 20 inngår i proteiner hos nålevende organismer). Disse relativt stabile byggesteinene (monomerer) i levende organismer dannes spontant i rikelige mengder fra grunnstoffene, noe som stemmer bra overens med at slike molekyler også er påvist i det interstellare rom, i meteoritter og på månens overflate. Viktige elementer i DNA, RNA og ko-enzymmer (puriner, pyrimidiner) er andre mulige produkter i ikke-biologiske, geofysiske prosesser.

Ikke alle kjeder av aminosyrer og sukkerarter kunne dannes i en ikke-biologisk sammenheng på den primitive jorda. Vann, som er den viktigste molekylære komponenten i celler, tjener som løsningsmiddel for nesten alle kjemiske reaksjoner, og bufferer mot endringer i pH og temperatur. Et vannrikt miljø er imidlertid ikke et gunstig sted å kjede sammen monomerer med en energikrevende, vannavspaltende reaksjon, fordi den motsatte prosessen, nedbrytning ved hydrolyse er en termodynamisk spontan, men langsom prosess. Levende organismer omgår problemet ved å aktivere monomerer til en tilstand hvor polymerisering forekommer spontant. De polymerene som dannes er fortsatt utsatt for hydrolyse, men så lenge polymeriseringsraten er høy nok kan en ikke-triviell konsentrasjon av polymerer bygges opp. På den primitive jorda forekom syre-base reaksjoner (overføring av protoner fra en type molekyler til et annet), og reduksjon-oksidasjon reaksjoner (elektronoverføring fra et molekyl til et annet; i noen reaksjoner også protoner). Slik prebiotisk geofysisk energioverføring dannet energirike fosfatbindinger, som kunne drive polymeriseringen og dannelsen av makromolekyler med emergente egenskaper, f.eks. enzymer, som er biologiske katalysatorer.

Energimetabolismen til det tidligste livet lignet trolig på glykolysen (uavhengig av fotosyntese og elektrontransportkjeden, individuelt virkende vannløselige enzymer), men overføringen av reduksjon-oksidasjon energi til fosfatbindinger kan ha skjedd via svovel og jern (og ikke krevd moderne enzymer, ribosomer, DNA, RNA, syntetaser, polymeraser og proteinfaktorer). Energimetabolismen (og organismen) må ha vært enkel og hatt mulighet til å utvikle seg til dagens kompleksitet. Det faktum at liv eksisterer i sin nåværende form indikerer at energirike fosfatbindinger drev polymeriseringsreaksjoner på den primitive jorda, heller enn å bli degradert til varme.

Mange enzymkomplekser og membraner sjølsamles etter syntese (f.eks. proteiner i elektrontransportkjeden, enzymer i Krebs syklus i eukaryotenes mitokondriemembran). Cellen utgjør en sjølsamling av mange subsamlinger, omgitt av en sjølsamlet membran. De fleste samlingene krever ikke tilførsel av fri energi og trenger vanligvis ingen katalysatorer. Sjølsamlingen reduserer også polymerhydrolysen, fordi mye av overflaten er avsondret i komplekser unna vannmolekylene. Sjølsamling kan virke paradoksal fordi overgangen fra spredte subenheter (start) til samling (slutt) synes å gå i retning av økt organisering, eller økt orden. Samlingsprosessen drives imidlertid av entropiøkning i vannet ($\Delta S > 0$), slik at for hele reaksjonen er $\Delta G < 0$ på grunn av økt entropi i omplasserte vannmolekyler. Termale bevegelser bringer subenhetene sammen, hvorpå de spontant bindes sammen med multiple spesifikke svake bindinger. Siden initiering, utvikling, og evolusjon av liv er basert på energirike fosfatbindinger, er det ikke overraskende å finne kontrollmekanismer dominert av fosfatoverføringer. Glykogen- og stivelsesmetabolismen er eksempler på cellulær energilagring regulert av fosfat. Energien i fosfatbindinger drev polymerisering og ble senere involvert i regulering av metabolske funksjoner i sjølsamlete aggregater av disse polymerene.

Den elektroniske strukturen til grunnstoffene avgjør mange av deres egenskaper, inkludert fosforets egnethet til energimetabolisme, men gitt det opprinnelige dusinet grunnstoffer er det mange av egenskapene ved den levende tilstanden som ikke kan forutsies fra de første prinsip-



Alan Turing

Enkel Turing-struktur (Witten and Sander)

pene. Betingelsen om energistrøm og evne til å evolvere i kompleksitet tilfredsstilles ved overføring av fosfatbindingsenergi, feedbackeffekter og regulering via proteiner og gener, slik at liv er mer en konsekvens av spesielle substanser og deres emergente egenskaper enn av energistrøm. Det er f eks en evolusjonær sammenheng mellom muskelproteinene (aktin og myosin) og relaterte proteiner, som gir et cytoskjelett og bevegelse for encellede organismer. Overflodsenergi i miljøet tillot energilagring i fosfatbindinger, noe som førte til cytoskjelett og enkle cellebevegelser; med muskler som en naturlig utvikling i flercellede former. Utnyttelse av energirike fosfatbindinger i muskelvev ga evolusjonære fordeler.

På 1950-tallet benyttet Alan Turing systemer med differensiallikninger for å studerte hvordan ustabilitet oppstod i enkle geometriske samlinger av celler. En vanlig overgang var fra homogenitet og symmetri til bølger og symmetribrudd. Når en parameter ble endret på en bestemt måte ble en tilstand av tidsavhengig romlig uniformitet transformert til en tidsavhengig oscillasjon av et romlig mønster. Turlings ideer førte til begrepet romlig sjølorгани-

sering, som begrepsmessig er beslekta med sjølsamling av proteiner. Begge viser en tendens fra homogenitet mot asymmetriske mønstre, og begge krever energitilførsel. I sjølsamling resulterer energitilførselen i proteinsyntese, i sjølorgering medfører tilførsel av kjemiske forbindelser et autokatalytisk reaksjonsskritt. Med energitilførsel kan romlige og tidsavhengige dissipative systemer holdes stabile langt fra likevekt. Når energitilførselen tar slutt brytes de dissipative strukturene og systemet går mot likevekt og dør (f eks Bénards konveksjon, levende celler, økosystemer).

Evolusjon

Det fundamentale problem i biologi er overgangen fra ikke-liv til liv. Den kontinuerlige energistrømmen som entrer biosfæren i form av kortbølget, energirikt sollys, og forlater den som langbølget varmestråling, gjør livet mulig ved at usannsynlig strukturerte konfigurasjoner blir sannsynlige. Liv er et eksempel på en sjølorgerende prosess som opptrer spontant når det er en stabil strøm av energi (og stoff) gjennom et system. Levende organismer er i så måte et resultat av emergente egenskaper. Livet

på Jorda, som oppstod for mer enn fire milliarder år siden, er et sjøorganiserende og sjøloppholdende system som har utviklet seg til en tilstand av væren hvor opprinnelsen ikke lenger er gjenkjennelig. Celler forbundet i en blind metabolsk utveksling skapte de første økosystemene, som siden har utfoldet seg ved at organismer gir opphav til nye arter og lever i nisjer skapt av andre organismer. Biosfæren er et sjøorganiserende komplekst system med mange samvirkende komponenter, den historiske utvikling og nåværende stabilitet (f eks temperatur, oksygennivå, saltnivå i havet) avhenger i stor grad av feedbackprosesser som involverer levende organismer.

I levende organismer styres prosesser av et program som er lagret symbolsk og som kan reproducere seg sjøl. Informasjonen er kodet inn i sekvenser av DNA. Slike molekylkonfigurasjoner er i seg sjøl svært usannsynlige, og i tillegg truer atomenes tilfeldige bevegelser, som bryter DNA- og aminosyresekvenser, den levende cellens funksjoner. Hele den biologiske verden ville med andre ord ende i kaos hvis ikke evolusjonen hadde utviklet måter å kontrollere og reparere informasjonen i cellenes DNA. En levende organisme må kontinuerlig rekonstruere og reparere seg sjøl, men for å motstå tendensen til økt uorden kreves energi. Levende systemer, som utgjør en avgrenset samling av stoff hvorigjennom det strømmer energi og stoff, organiserer seg sjøl ved å ha et skille mellom seg sjøl og verden utenfor (cellemembran; hud; gravitasjonsfelt, atmosfære/ozonlag). Skal en organisme ha en 'steady state' må det være en form for stabilitet, slik at små endringer i energistrømmen ikke gir store endringer i stoffsirkulasjonen gjennom systemet. Et sjøorganisert system langt fra likevekt kan opprettholde en stabil konfigurasjon i lang tid, sammenlignet med de dynamiske internprosessenes tidsskalaer. Denne konfigurasjonen opprettholdes ved hjelp av sykler som involverer transport av stoff og energi innen systemet og mellom systemet og dets ytre. Systemet stabiliseres mot små forstyrrelser ved feedbackløkker som regulerer syklenes strømningsrater.

Det er all grunn til å tro at vi deler en felles kjemi med de første bakteriene. Alle levende organismer er i slekt med hverandre og kan deles inn i tre hovedgrupper: arkebakterier,

eubakterier og eukaryoter. Molekylær fylogeni indikerer at fototrof metabolisme og klorofyll oppstod hos forfedrene til de fleste eubakterielle grupper. Livet var encellet i over 3 milliarder år før flercellede organismer oppstod i den "kambriske eksplosjonen" for 530 millioner år siden. Parasittisme, mutualisme og symbiose er drivende krefter i cellulær evolusjon. For eksempel har organellene i cellene hos eukaryoter oppstått via endosymbiose mellom en vertscelle (en pre-eukaryot) og visse bakterier. Mitokondriet (30-40 gener) er trolig av a-protobakterie opprinnelse, og kloroplasten (100-170 gener) av cyanobakteriell opprinnelse. Hos flere grupper av alger er opprinnelsen til kloroplasten mer kompleks. Hos haptofytter (svepeflagellater) og diatomeer (kiselalger) har kloroplasten oppstått ved at forløperne til disse gruppene ved endosymbiose har innlemmet en annen alge, som så har blitt degenerert til en kloroplast. Det vil si at gener i kjerne og kloroplast har ulik fylogeni. Hos dinoflagellater er situasjonen enda mer kompleks, med en tertiær endosymbiose. Kloroplasten hos en gruppe dinoflagellater har oppstått ved endosymbiose med en (tidlig) haptofytt.

Evolusjonen gjør livet til en prosess som kontinuerlig genererer og oppdager nyheter. Gendynamikken hos levende organismer består av genoverføringer innen et genom (lateralt), mellom kjerne og organeller (vertikalt), og mellom arter (horisontalt). Dette gjør at i en evolusjonær sammenheng er levende organismer kimære, det vil si at et genom er en blanding av sekvenser med ulikt evolusjonært opphav. Hvilke muligheter og begrensninger har naturlig seleksjon, og hva slags komplekse systemer kan samles ved evolusjonære prosesser? Det synes klart at ikke alle komplekse systemer kan "forbedres" og samles ved en evolusjonær serie av små endringer, for i noen tilfeller vil en minimal endring føre til katastrofale endringer i systemets adferd. Mye av den orden som finnes er trolig ikke et resultat av naturlig seleksjon, men skyldes spontant sjøorganiserende prosesser (f eks lipider som danner vesikler med dobbeltmembran, sjøsamling av virus, Fibonacci serier i bladenes arrangement på stengelen, oppståen av orden genetiske nettverk, oppståen av liv som en faseovergang i kjemiske reaksjonssystemer, atferden til biosfæ-

ren, eller koevolusjon i økologiske-, økonomiske- og kulturelle systemer). Stuart Kaufmanns modellsystemer har vist at komplekse mønstre av samvirkende gener som utsettes for tilfeldige mutasjoner ikke resulterer i tilfeldig evolusjon, men at de konvergerer mot et relativt lite antall mønstre ('attractors'). Slike forhold kan ha spilt større rolle enn naturlig seleksjon ved evolusjonen av liv.

Biologiske systemer er i stand til adaptive endringer (f eks en enkel respons, innlæring, biologisk evolusjon, økologisk suksessjon og kulturell utvikling). I tidlige stadier av en adaptiv evolusjonær prosess forventes at ulike varianter oppstår, og at det eksperimenteres med modifikasjoner for å forberede designet. Etterhvert blir det vanskeligere å finne forbedringer, variasjonen avtar, og de best tilpassete variantene vil være mindre forskjellige fra hverandre. Lange perioder uten forbedringer følges av rask forbedring når bedre tilpassede varianter plutselig oppstår. Evolusjonstreet blir vidt og buskaktig forgreinet ved basis på grunn av rask forgreining (nye artsdannelse), og følges av mer konservativ detaljeksperimentering og mindre forgreining etterhvert som tilpasningen øker. Gitt at populasjoner vokser eksponentielt, vil de i løpet av få generasjoner fylle alle tilgjengelige nisjer. Dette medfører at enhver planet med noe liv er i en overgangsstilling og at hvilke som helst stabil okkupasjon av en planet av liv må involvere hele planeten. Dette er essensen av Lovelocks observasjon, som er at tilstedeværelse av liv eller ikke-liv er en egenskap ved hele planeten, og lett kan leses ut fra blandingen av kjemikalier i atmosfæren (eller havet).

Mange av de store endringer i Jordas historie er utledet på grunn av marine fossiler, fordi disse lagrekkene er mye mer fullstendig enn de terrestre. Sjøl om det trolig var 10-100x så mange dyrearter på land i forhold til havet (som i dag), er omlag 95% av de 250 000 kjente fossile artene marine. Dette illustrerer hvor dårlig forestilling vi har om fortidas terrestre liv. Darwin antok at økningen i artsantall fulgte en stødig kurs, men det har vist seg at heller ikke her er det en gradvis progresjon. Levende organismer har flere ganger vært utsatt for masseutryddelser (fulgt av en ny progresjon fra bunnen av og opp). Noen av utryddelsene var av moderat

størrelse (15-40% av marine arter forsvant), men i fem biotiske kriser forsvant enda flere marine arter i løpet av et kort geologisk øyeblikk. De viktigste hendelsene var ved slutten av de geologiske periodene ordovicium (440 millioner år siden, 85% av artene forsvant; antall dyrerekker som i dag), devon (365 millioner år siden, 82% av artene forsvant), perm (225 millioner år siden; 96% av artene forsvant), trias (210 millioner år siden, 76% av artene forsvant), og kritt (65 millioner år siden, 96% av artene forsvant). Ved utgangen av kritt ble dinosaurene, som hadde dominert landoverflata i 140 millioner år, utradert. I den påfølgende perioden (tertiær) kom vertebratene til å dominere. Omlag 99.9% av alle de artene som har eksistert siden flercellet liv oppsto er nå utdødd. Jorda huser i dag 10 til 100 millioner arter, så livets historie har sett 10 til 100 milliarder arter komme og gå. Livet er således en endeløs prosessjon av endring, med små og store utbrudd av artsdannelse, og små og store utbrudd av utdøing. De fleste slektene dør unge, men noen varer i millioner av år. Det gjennomsnittlige livsløp for en dyreart er 4 millioner år.

Levende systemer (celler, organismer, økonomier, samfunn, teknologi) viser lovmessig adferd ved at de søker å optimalisere systemer med ulike interesser. Optimale løsninger for en del av totaldesignet kommer i konflikt med optimale løsninger for andre deler, så det må finnes et kompromiss som møter fellesbehovet. Slik adaptiv evolusjon utforsker mangedimensjonale rom av muligheter i "fitness"- eller "cost"-landskaper. Samfunn og økosystemer samler arter (eller varer og tjenester i et økonomisk system) som lever i nisjer de gir hverandre. Arter gjennomgår en koevolusjon, fordi de ikke bare utvikles i sitt eget fitnesslandskap, men også sammen med andre. På enda lengre tidsskala utvikler koevolusjonære prosesser seg, fordi koevolusjon både endrer organismene og måten de påvirker hverandre (fitnesslandskapet endres på grunn av adaptive endringer hos spillerne), noe som tillater koevolverende arter å opprettholde en slags balanse mellom orden og kaos. Kaufmann mener at tilpasningsdyktige, komplekse systemer, fra enkle celler til økonomier, utvikler seg til en naturlig tilstand mellom orden og kaos, som et kompromiss mellom struktur og overraskelse. Ved denne like-

vektstilstanden brer små og store skred av koevolusjonær endring seg gjennom systemet som en følge av aktørenes valg. Teorien tilsier at en liten hendelse (fjerning av en enkel art) kan starte kjedereaksjoner med både små og store utdøingssskred i et samfunn. Små utdøings-skred er vanlige, men hvis man venter lenge nok vil til slutt en utdøingshendelse av hvilke som helst størrelse oppstå. Artsdannelse og utdøen reflekterer den spontane dynamikken i samfunn av arter. Arter både konkurrerer og samarbeider for å overleve, og kampen for overlevelse består i å tilpasse seg små og store endringene hos koevolverende partnere. Over evolusjonær tid vil økosystemer innstille seg i et overgangsregime mellom orden og kaos, maksimere tilpasningen, og minimalisere den gjennomsnittlige utryddelsesraten.

Merknad:

«Sjøl» er en mindre brukt, men lovlig norsk variant av ordet «selv». Forfatteren regner seg som ateist og betrakter evolusjonen som et faktum.

Litteratur

Atkins, P.W. 1984. *The second law. Scientific American Books, Freeman, New York.*
 Batson, G. 1979. *Mind and nature. A necessary unit.* Wildwood house, London.
 Bateson, G. & Bateson, M.C. 1987. *Angels fear. An investigation into the nature and meaning of the sacred.* Macmillan, New York.
 Behe, M. J. 1996. *Darwins black box. The biochemical challenge to evolution.* Touchstone, New York.
 Brooks, D.R. & Wiley, E.O. 1988. *Evolution as entropy* (2. utg). University of Chicago Press, Chicago.
 Capra, F. 1996. *The web of life. A new scientific understanding of living systems.* Anchor, New York.
 Fox, R.F. 1988. *Energy and the evolution of life.* Freeman, New York.
 Harrier-Jones, P. 1995. *A recursive vision: ecological understanding and Gregory Bateson.* University of Toronto Press, Toronto.
 Hoffmeyer, J. 1984. *Naturen i hovedet. Om biologisk videnskap.* Rosinante, København.
 Hofstadter, D. 1980. *Gödel, Escher, Bach - an*

eternal golden braid. - Penguin Books, Harmondsworth.

Horgan, J. 1996. *The end of science. Facing the limits of knowledge in the twilight of the scientific age.* Addison Wesley, New York.

Jakobsen, K.S. 1998. *Med gener langs grener på slektskapets tre.* Apollon 4: 13-18.

Jakobsen, K.S. 1999. *Hva kan modellgenomet lære oss om det humane genomet?* Biolog 1: 11-21.

Kaufmann, S. 1993. *Origins of order.* Oxford University Press, Oxford.

Kaufmann, S. 1995. *At home in the Universe. The search for laws of complexity.* Oxford University Press, Oxford.

Kaufmann, S. 1996. *Investigations. The nature of autonomous agents and the worlds they mutually create.* Santa-Fe Institute, preprint. (<http://www.santafe.edu/sfi/People/kauffman/Investigations.html>).

Klaveness, D. 1994. *Algenes opprinnelse og tidlige evolusjon.* Blyttia 4: 167-179.

Lovelock, J. 1988. *The ages of Gaia. A biography of our living earth.* Oxford university press, Oxford.

Monroe, J. & Wicander, R. 1997. *The changing earth. Exploring geology and evolution* (2. utg.). West/Wadsworth, Belmont.

Nordbakken, J.-F. 1999. *Betydninger av Gödels teorem.* Origo 65: 9-15.

Prigogine, I. & Stengers, I. 1985. *Ordning ur kaos - människans nya dialog med naturen* (2. utg.). Bok skogen, Stockholm.

Rifkin, J. & Howard, T. 1980. *Entropy: a new world view.* Paladin books, London.

Smolin, L. 1997. *The life of the cosmos.* Oxford University Press, Oxford.

Rosenzweig, M.L. 1995. *Species diversity in space and time.* Cambridge university press, Cambridge.

Ølgaard, B. 1986. *Kommunikasjon og økologiske systemer - i følge Gregory Bateson.* Ask, Åbyhøj.

Jørn-Frode Nordbakken

Universitetet i Oslo, Botanisk hage og museum, Trondheimsveien 23B, N-0562 Oslo.