

Mitä on elämä?

Kysymys, mitä on elämä, lienee yhtä vanha kuin ihminen itse. Tietysti nykyään tiedämme elämästä paljon. Tunne elämää ylläpitäviä toimintoja ja rakenteita, toisinaan jopa atomiarisella tarkkuudella. Elämän perusmekanismit ovat osoittautuneet hämmästyttävän samankaltaisiksi koko eliökunnassa, mikä on johtanut luontevaan päätelmään siitä, että elämällä olisi yksi yhteinen alku eli synty. Mutta me emme siis tiedä. Arvelemme vain, että jollakin tavoin olisi muodostunut itseään monistava molekyyli, kenties pätkä RNA:ta, johon olisi voinut kohdistua mutaatiota ja johon luonnonvalinta olisi siten alkanut vaikuttaa. Tällä tavoin olisi alkanut se pitkä, pitkä matka, *evoluutio* kohti sitä suunnatonta luonnon monimuotoisuutta, joka nykyään peittää planeettaamme.

Biosfäärissä ja myös pienemmissä ekosysteemeissä elämä ilmenee monina lainalaisuuksina. Esimerkiksi nk. bioklimaatinen laki sanoo, että lämpö on elämän edellytys tehden siten ymmärrettäväksi, ainakin osittain, miksi monimuotoisuus on rikkainta tropiikissa ja vähenee maan navoille päin. Toki monimuotoisuus riippuu myös siitä pinnasta, jolla ekosysteemi elää. Pinta-alan kasvaessa lajien kirjo kasvaa, mutta vähenevästi. Ekologian lainalaisuuksia ilmenee myös ajassa, esimerkiksi saalis- ja petokantojen jaksollisina vaihteluina.

Kaiken kaikkiaan me siis tiedämme elämästä paljon, molekyyleistä ekosysteemeihin ja menneenaikain evoluutiosta nykypäivän kehitykseen. Mutta sitenkin minulla on tunne, ja arvelen että jaatte tunteen siitä, että jotakin, jotakin olennaista vielä puuttuu ymmärryksestämme siitä, mitä on elämä. Elämä on jollakin tavoin mysteeri. Ja voi olla vaikea sanoa, mitä vielä toivoisimme tietävämmä, jotta kysymys saisi lopullisen ja täydellisen vastauksensa.

Unelma täydellisestä vastauksesta

Voi olla helpompi unelmoida tuollaisesta täydellisestä vastauksesta kuin etsiä sitä lukemattomista yksityiskohdista. Kuvitella niitä ominaisuuksia, joita vastauksella tulisi olla, jotta ymmärtäisimme entistä paremmin maailmamme kokonaisuudessaan.

Odotamme siis, että tuo täydellinen vastaus olisi kaiken kattava. Sen tulisi puhua samalla tavalla molekyyleistä ja ekosysteemeistä niin myös menneenaikain evoluutiosta kuin nykypäivän kehityksestäkin. Arvatenkin täydellinen vastaus liittäisi biologian saumattomasti kemiaan ja edelleen fysiikkaan. Sillä toistaiseksi elämän perusteoriaa, evoluutioteoriaa, ei ole kirjoitettu fysiikan teoriana matematiikan täsmällisellä kielellä.

Ehkäpä tuo täydellinen vastaus myös selittäisi muutamat kummallisuudet. Miksi proteiinit koostuvat vain L-aminohapoista? Miksi nukleiinihapot rakentuvat vain D-riboosia sisältävistä tähteistä? Mistä tulee tämä kaiken kattava kiraalisuus? Miksi perimässämme on valtavasti koodaamatonta ai-

nesta, introneita, intergeenisia alueita, roska-DNA:ta, vailla minkäänlaista ilmeistä funktionaalista merkitystä? Vain 1.5 % perimästämme ilmentyy ja olisi siten alttiina luonnonvalinnalle. Mistä tulevat nuo aiemmin mainitut ja monet muut ekologian lainalaisuudet? Onko niillä jonkin yhteinen perusta? Miksi jotkut eläimet lisääntyvät suvullisesti, toiset suvuttomasti? Mistä aiheutuu lajiutumisen? Mikä tuottaa tuntee siitä, että evoluutiolla on suunta? Ja sitten on vielä kysymyksistä se suurin ja tärkein. Mitä oikeastaan on luonnonvalinta? Mitä oikeastaan tarkoittaa, ”Survival of the fittest”? Mikä on tämä elinkelpoisuuden mitta? Eloojääminenkö, jonka kriteerinä usein mainitaan juuri tuo elinkelpoisuus? Miten voimme murtautua tästä ilmeisestä kehäpäätelmästä?

Näin tarkasteltuna vaikuttaa todellakin siltä, että on olemassa jotakin, joka vielä uupuu ymmärryksestämme siitä, mikä ilmiö elämä on. Ja näin tarkasteltuna täydellisen vastauksen vaatimukset vaikuttavat korkeilta. Arvelen kuitenkin ettemme olisi täysin tyytyväisiä, jollei tuo täydellinen vastaus sisältäisi jotakin filosofista painoarvoa, ei yksin selittäen meille, miten elämä on syntynyt, vaan myös miksi niin on tapahtunut.

Voi olla, että tuohon täydelliseen vastaukseen liittyisi lisäksi jotakin odottamatonta. Ottaakseni esimerkin menneisyydestä, Kopernikuksen aurinkokeskeinen malli ei yksin tehnyt helpoksi laskea planeettain ratoja vaan muutti käsitystämme itsestämme siirtäen meidät keskuksesta laitamille. Ja tietysti kehitysoppi ei tyytynyt yksin kuvailemaan lajien syntyä vaan totesi, ettemme oikeastaan ole sen kummoisempi luontokappale kuin mikään muukaan. Ehkä meidän pitäisi siis varautua menettämään vielä jotakin sellaista, jonka luulimme omistavamme tai olevan meille ominaista. Tosin, ei juuri näytä enää olevan sellaista arvokkuutta jäljellä, jonka saattaisimme menettää. Vai olisiko sittenkin? Voisiko se olla se järki ja tarkoituksenmukaisuus, jonka mielellämme näemme tekojemme ja toimiemme perustana?

Ajatus

Nyt kun meillä on jonkinlainen käsitys siitä, mitä odottaa ja vaatia täydelliseltä vastaukselta, tarkastelkaamme seuraavaa ajatusta, ajatusta siitä mitä elämä on. Se voidaan lausua näin: *Elämä on luonnon prosessi, siis luonnon tapahtumain kulku, jossa energia virtaa korkeammalta matalampaan mahdollisimman nopeasti.*

Äkkipäätä toteamus vaikuttaa monimutkaiselta tavalta sanoa yksinkertainen asia. Elämä on luonnollista, kuinkas muutenkaan. Toisaalta tiedämme että aine, siis esimerkiksi tavarat menevät sekaisin keskenään kuin luonnostaan. Joten yhdistelmälause oikeastaan lyhyesti toteaa, että elämä on epäjärjestyttä. Väite vaikuttaa kummalliselta, etenkin kun juuri pääsimme puhumasta toiminnoista, rakenteista, mekanismeista, lainalaisuuksista, organisoiduista hierarkioista. Ne eivät ole tunnusomaisia epäjärjestykselle, ainakaan siltä osin kuin tuo

käsite on meille tuttu. Väite vaikuttaa siis sisäisesti ristiriitaiselta, jotenkin samaan tapaan kuin sanoisi: Pilvet peittävät taivaan siellä, missä aurinko paistaa. Tämän jälkimmäisen väitteen te tietysti nopeasti huomaatte, ei epäloogiseksi vaan pikemminkin fysikaaliseksi väistämättömyydeksi. Sillä eikö olekin niin, että päivänpaiste saa veden höyrystymään ja siten pilvet muodostumaan. Se on vain meidän näkökulmamme pilvien alta, joka luo ensivaikutelman ristiriidasta. Ehkä meidän siis pitäisi tutustua paremmin epäjärjestyksen käsitteeseen ennen kuin hylkäämme ajatuksen siitä, mitä elämä on.

Epäjärjestyksen käsite

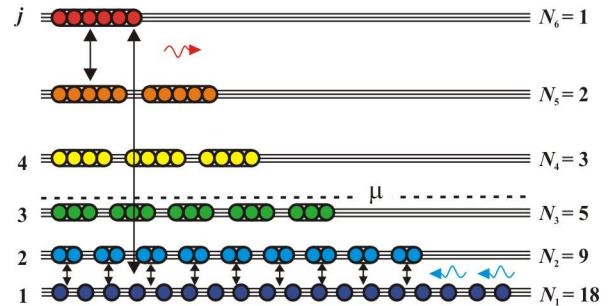
Aluksi näytän yksinkertaisen kokeen. Tuossa on lasillinen vettä, johon pipetoidaan tippa mustetta ja katsokaahan mitä tapahtuu. Huomaan, huomaan, ettette ole lainkaan hämmästyneitä. Vaikuttaa pikemminkin siltä, että olisitte nähneet tämän tai vastaavan kokeen lukuisia kertoja aiemmin. Tällaiset ilmiöt, jotka eivät hämmästyttäneitä mutta, jotka näytettynä takaisinpäin kelattuna vaikuttavat omituisilta, ovat *luonnon prosesseja* siis luonnon tapahtumain kulkuja.

On todennäköistä, että muste leviää veden sekaan ja on epä-todennäköistä, että mustemolekyylit kokoontuisivat yhteen. Vaikuttaa siis siltä, että ymmärtäisimme luonnon prosessit, jos tunnemme niihin liittyvät todennäköisyydet. Ja me tunnemme, ainakin yksinkertaisten homogeenisten systeemien tapauksessa. Resepti on vanha, jo 1800-luvun puolivälissä Ludwig Boltzmannin kirjoittama. On myös muita luonnon prosesseja kuin diffuusio, joka tasoittaa pitoisuuserot. Lämmön virtaaminen kuumasta kylmään tasoittaen lämpötilaerot on luonnon prosessi. Myös kemialliset reaktiot etenevät tasoittaen kemialliset potentiaalierot kohti todennäköisintä tilaa, kemiallisen tasapainon tilaa. Tämä periaate oli tuttu jo 1800-luvun lopussa amerikkalaiselle Willard Gibbsille.

Useinhan sanotaan, että elämä on kemiaa, joten seurataamme tätä johtajatusta. Tarkasti ottaen Boltzmann ja ei myöskään Gibbs kuitenkaan koskaan kirjoittanut kemiallisille reaktiolle todennäköisyyksien reseptiä, mutta meidän on helppo seurata heidän jalan jälkiään ja astua kaksi askelta pidemmälle.

Kuvitellaan nyt sitä varhaista maapalloa, sellaiset nelisen miljardia vuotta sitten. Kuvitellaan sitä ankean karua maisemaa, jossa kuitenkin kaiketi oli joitakin lammikoita, suuria ja pieniä. Ehkä juuri sellaisia, joista Darwin puhuu, pieniä lämpimiä lampareita, joissa oli joitakin yksinkertaisia yhdisteitä, jotka saattoivat reagoida keskenään. Merkitsen näitä yksinkertaisia yhdisteitä yksinkertaisesti palloilla. Jos ne reagoivat keskenään, saattaa syntyä esimerkiksi tällaisia kahden pallon yhdisteitä (kuva 1). Mikäli reaktiot jatkuvat pidempään, saattaa syntyä kolmen, neljän pallon yhdisteitä, ja vieläkin monimutkaisempia yhdisteitä. Totta kai on olennaista mitä nämä yksinkertaiset yhdisteet olivat ja mitä reaktiota saattoi tapahtua, mutta nyt huomiomme ei ole mekanistissa yksityiskoh-

dissa vaan siinä yleisessä periaatteessa, joka ohjaa pienen lämpimän lammikon kehitystä. Periaate on hyvin yksinkertainen. Se mikä on todennäköistä, se tapahtuu. Leibnizkin totesi jotenkin paradoksaalisesti, että kaikista mahdollisista maailmoista todennäköisin on se, jossa elämme. Kysymme, siis miten aine todennäköisimmin jakaantuu erinäisten yhdisteiden kesken moninaisten reaktioiden seurauksena?



Kuva 1. Aineen jakautuminen yhdisteiden N_j kesken kemiallisten reaktioiden (pystysuorat nuolet) seurauksena. Reaktiot voivat vaatia ulkoista energiaa (siniset aaltonuolet) tai luovuttaa energiaa pois systeemistä (punainen aaltonuoli). Reaktioiden seurauksena systeemi lähestyy todennäköisintä tilaa.

Merkitseen lammikossa olevien ainesosien kokonaismäärää N :llä. Voitte ajatella, että se kuvaa reaktioissa mukana olevien atomien kokonaismäärää. Jonakin ajanhetkenä osa niistä, n_1 kappaletta voi olla ensimmäisellä "hyllyllä", yksinkertaisimmassa yhdisteissä (Kuva 1). Sitä vastaava todennäköisyys on teille lukiosta jo tuttu binomitodennäköisyys

$$P_1 = \frac{N!}{n_1!(N - n_1)!} \quad (1)$$

joka sanoo, kuinka monella eri tavalla n_1 voidaan valita N :stä. Toisen hyllyn todennäköisyys saadaan vastaavalla tavalla, mutta meidän on tietysti muistettava, että olemme käyttäneet jo osan aineesta ensimmäisellä hyllyllä. Joten valintoja voidaan tehdä korkeintaan $N - n_1$ kappaleesta. Lisäksi meidän täytyy huomioida, että toisella hyllyllä ainesosat ovat "lukiutuneina" yhdisteisiin, joita on puolet vähemmän kuin ainesosasia.

$$P_2 = \frac{(N - n_1)!}{\left(\frac{n_2}{2}\right)!(N - n_1 - n_2)!} \quad (2)$$

Saattaa vaikuttaa yllättävältä, mutta stoikiometrian merkitseminen on toinen niistä kahdesta askeleesta, jotka otamme Boltzmannia pidemmälle. Se avaa tien homogeenisuudesta heterogeeniaan. Kolmannen hyllyn todennäköisyys saadaan vastaavalla tavalla, neljännen, viidennen, jne.

Systeemin kokonaistodennäköisyys saadaan osatodennäköisyyksien tulona, jossa peräkkäisten termien nimittäjät ja osoittajat menevät mukavasti vastakkain.

$$P = \prod_{j=1}^n \frac{1}{(n_j/j)!} = \prod_{j=1}^n \frac{1}{N_j!} \quad (3)$$

Koska kaikki ainesosat ovat identtisiä lauseke 3 on jaettu vielä $N!$:lla. Emme voi erottaa toista hiiliatomi toisesta hiiliatomista. Jatkon kannalta on tarkoituksenmukaista merkitä ainesosien lukumäärää jaettuna stoikiometrialla lyhyesti vain kullakin hyllyllä olevin yhdisteiden lukumäärillä N_j :llä.

Yhdisteiden aineisosiin liittyvän todennäköisyyden lisäksi meidän on tietysti ilmaistava, mistä yhdisteet tulevat. Saattaa vaikuttaa kummalliselta, että tämä nimenomainen seikka oli jotenkin epäselvä Boltzmannille. Voimme tietysti antaa hänelle anteeksi, sillä tuolloin 1800-luvulla atomiteoria, jonka kannattaja Boltzmann oli, ei ollut vielä ottanut muotoaan. Nykyään meidän on tietysti helppo todeta, että yhdisteet tulevat toisista yhdisteistä kemiallisten reaktioiden seurauksena, ja siten astua toisen askeleen Boltzmannia pidemmälle. Ilmiselvästi tuotteet ovat epätodennäköisiä, jollei ole käytettävissä juurikaan lähtöaineita ja mahdollisesti myös reaktioissa tarvittavaa ulkoista energiaa. ”Hyllyjen” väliset etäisyydet merkitsevät yhdisteiden Gibbsin vapaaenergiain $-\Delta G_{jk}$ välisiä eroja joita voidaan ylittää myös ulkoisen energian ΔQ_{jk} turvin. Kun tähän liittyvät todennäköisyydet otetaan huomioon, saadaan

$$P = \prod_{j=1}^n \frac{\Gamma_j^{N_j}}{N_j!} = \prod_{j=1}^n \frac{\left\{ \prod_k N_k \exp\left[(-\Delta G_{jk} + \Delta Q_{jk})/RT\right] \right\}^{N_j}}{N_j!} \quad (4)$$

Osoittaja on korotettu N_j potenssiin, sillä lähtöaineilla N_k on N_j mahdollisuutta tulla tuotteiksi.

Näin olemme muodostaneet systeemin kokonaistodennäköisyyden lausekkeen. Se on hieman monimutkaisen näköinen ja onkin vaikeasti laskettavissa, erityisesti kertomien takia. Suurin kertoma, jonka saatte taskulaskimen näytölle on $69!$. Voitte vain kuvitella niitä huikkeitä lukuja, joita syntyy esim. Avogadron luvun $\sim 10^{23}$ kertomasta. Maailmankaikkeuden aine ei riittäisi edes esittämään tuollaisia lukuja. Voimme kuitenkin saada lausekkeen laskettavaan muotoon ottamalla siitä logaritmin, jolloin saadaan entropia moolia kohden

$$S = R \ln P = R \sum_{j=1}^n N_j \left[\ln \frac{\prod_k N_k}{N_j} \exp\left(\frac{-\Delta G_{jk} + \Delta Q_{jk}}{RT}\right) + 1 \right] \quad (5)$$

$$= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^n N_j \left[\sum_k \mu_k - \mu_j + \Delta Q_{jk} + RT \right]$$

Viimeisellä rivillä entropia on lausuttu yhdisteiden kemiallisten potentiaalien avulla. Entropian, siis logaritmissa todennäköisyyden, synonyyminä usein käytetään tuota alussa mainit-

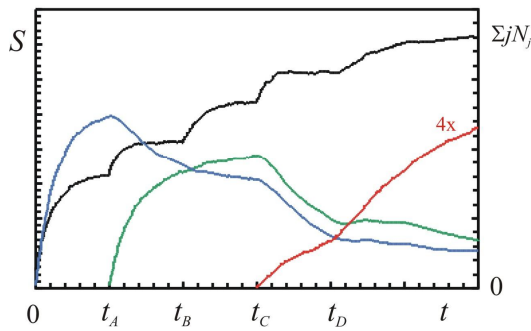
tua *epäjärjestyä*. Mutta entropia on enemmän kuin hajan hajan olevat tavarat. Entropia on todennäköisyyden mitta systeemin energeettiselle tilalle. Systeemi on osasensa aineena ja energiana mukaan lukien vuorovaikutukset. Entropia on sidotun ja vapaana olevan energian mitta. Se ei ole epäjärjestyksen mitta kuten usein erheellisesti luullaan. Järjestyksen mitta on koherenssi.

Askeleet kohti elämää

Seuraavaksi selvitämme, miten systeemi liikkuu kohti todennäköisempiä tiloja. Arvatenkin on olemassa hienostuneita matemaattisia menetelmiä lausekkeen 5 maksimin etsimiseen, mutta me voimme turvautua yksinkertaiseen menettelyyn. Sattumanvaraisesti ajamme jotakin reaktiota johonkin suuntaan ja katsomme kasvaako todennäköisyys. Jos kasvaa, suunta on oikea. Jollei, suunta on väärä, ja meidän tulee ajaa reaktiota vastakkaiseen suuntaan. Tällä tavoin *satunnaisesti muunnellen ja luonnollisesti valiten* lähestymme väijäämättä tilaa, joka vastaa suurinta todennäköisyyttä. Huomasitteko Darwinin termit: satunnainen muuntelu ja luonnollinen valinta. Onko tämä sattumaa? Ehkä, mutta Boltzmann oli Darwinin suuri ihailija. Hän halusi luoda jotakin yhtä suurta fysiikassa kuin Darwinin evoluutioteoria on biologiassa. Voitte hämmästyä, kuinka lähelle Boltzmann pääsi tavoitettaan, ei luoden jotakin yhtä suurta kuin evoluutioteoria biologiassa vaan kirjoittamaan evoluutioteorian fysiikan teoriana. Saattaa vaikuttaa uskomattomalta, että yhtälö 5 olisi koko maailman malli. Sitä nyt kuitenkin sen enempää märehittäen, tarkastellaan pienen lammikon kehitystä.

Oletetaan, että lammikossa oli alussa vain yksinkertaisimpia yhdisteitä. Kun reaktiot käynnistyivät, todennäköisyys kasvoi nopeasti kun tuotteet *lisääntyivät ja erilaistuivat*. Nämä, jo molekulaarisella tasolla havaittavat ilmiöt, ovat elämän perusprosesseja. Pian pieni systeemi kuitenkin näyttäisi saavuttaneen tasapainon. Jos synteeseihin kytkeytyy ulkoa enemmän energiaa, systeemi kehittyi hypähtäen korkeamman todennäköisyyden tilalle, koska tuotteiden tasapainopitoisuudet ovat ulkoisen energian turvin korkeampia. *Energian käyttökin* on tunnusomaista eläville systeemeille. Jos systeemi laajentuu saaden lisää ainetta ulkopuolelta, todennäköisyys nousee entistä korkeammalle tasolle. *Laajentuminen ja levittäytyminen* ovat niin ikään elämän perusprosesseja (Kuva 2).

Olennaista on huomata, että todennäköisyys kasvaa, kun reaktiot tapahtuvat entistä nopeammin. Tämä johtuu siitä, että tuotteet ovat metastabiileja, ne siis hajoavat tuon tuostakin. Korkean entropian tilaa on jatkuvasti ylläpidettävä. Huomio on tietysti yhtä itsestään selvä kuin maidon viimeisen käyttöpäivän huomioiminen, mutta ratkaiseva jotta ymmärtäisimme mitä elämä on. Nopeampi synteesi antaa hitaampaa suuremmat hajoavien yhdisteiden pitoisuudet, jolloin ne ehtivät toimia seuraavien synteisien lähtöaineina. Maito on juotava ennen happanemistaan.



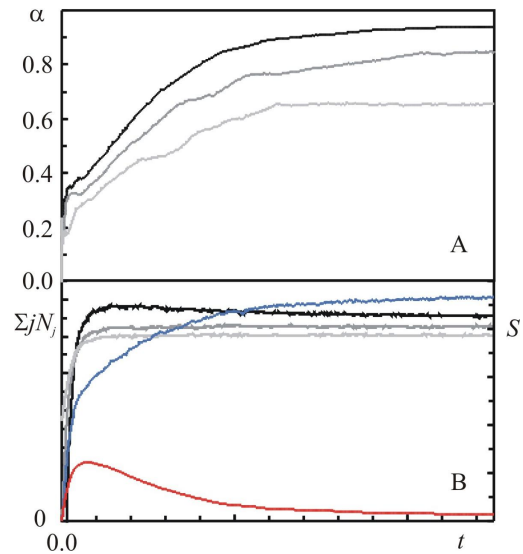
Kuva 2. Systeemin todennäköinen kehittyminen yhtälön 5 perusteella. Alussa systeemi käsittää vain perusainesosia N_1 . Kun reaktioreitit aukeavat ajanhetkellä $t = 0$ entropia S kasvaa nopeasti kun tuotteita $N_{j>1}$ tulee enemmän ja erilaisia. Lähestyvä tasapainotila muuttuu uudestaan hetkellä t_A kun ilmaantuu uusia entistä nopeampia reaktioreittejä. Entropia kasvaa erilaistumisen seurauksena. Seuraava kasvupyrrähdyks alkua hetkellä t_B kun systeemin reaktioihin kytkeytyy enemmän ulkoista energiaa. Kasvu kiihtyy uudestaan hetkellä t_C kun autokatalyyttisiä reaktioreittejä avautuu. Monimutkaisemmille yhdisteille on mallinnettu paremmat katalyyttiset ominaisuudet. Viimein kasvun vaihe hetkellä t_D seuraa siitä, että autokatalyyttisille reiteille on mallinnettu kyky laajentaa systeemiä. Lopulta systeemi saavuttaa tasapainotilan kun uusia reittejä tai mekanismeja kasvattaa entropiaa ei löydy. Eri nopeuksilla toimivissa reiteissä olevan aineen kokonaismäärää on kuvattu sinisellä, vihreällä ja punaisella.

Molekulaarisen monimuotoisuuden kasvu suuntautuu juuri niihin reaktioihin, jotka ovat entistä nopeampia reittejä, ja molekyyliin, jotka ovat entistä parempia katalyyttejä liikuttamaan systeemiä kohti todennäköisempiä tiloja. Katalyytteinä toimivat aiemmin syntyneet tuotteet. Ainevirrat ohjautuvat kenties vain pienin parannuksin mutta vääjäämättä yhä nopeampiin väyliin tyrehtyttäen entiset hitaat polut sukupuuttoon. Joten *luonnonvalinnan kriteeri on entropian kasvunopeus*

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \sum_{j=1} \frac{dN_j}{dt} \left[\sum_k \mu_k - \mu_j + \Delta Q_{jk} \right] = \frac{1}{T} \sum_{j=1} \frac{dN_j}{dt} A_j. \quad (6)$$

Väite voi vaikuttaa yksinkertaisuudessaan uskomattomalta, joskin mahdolliselta yksinkertaisessa systeemissä. Monimuotoisessa nykyajassa entropia kasvu suuntautuu pitkien lukematomia reittejä monin mekanismein, minkä vuoksi meidän on ehkä vaikea nähdä niiden kaikkien yhteistä perustaa, entropian kasvua. Mutta kuinka tarkasti Boltzmann jo aikoinaan näki kukaan todetessaan Darwinia mukailleen, että *eliöt kamppailevat entropiasta*, eivät siis sitä vastaan, kuten usein ajatellaan. Biologisilla toiminnoilla, rakenteilla, mekanismeilla ja hierarkkisilla organisaatioilla ei sinänsä ole mitään itseisarvoa. Ne saavat olemassaolonsa oikeutuksensa, vain jos niiden avulla entropian kasvu joutuu. Katalyytteja ovat kaikki, eivät vain entsyymit vaan myös me ja muut luontokappaleet, kukin tavallaan ja kukin löytämiensä mahdollisuuksiensa mukaan.

Niin, useinhan sanotaan, että nopeat syövät hitaat, mutta miksi hitaitakin on? Syy on selvä. Kilpailu entropian tuotannosta on raivokasta, kun ominaisuudet ovat samanlaisia, ja yhteiselo mahdollista, kun ominaisuudet ovat erilaisia ja erityisesti toisiaan täydentäviä. Esimerkiksi aikain alussa L-aminohapot kilpailivat samankaltaisten D-aminohappojen kanssa, mutta katalyyysin kehittyessä, kenties sattumoisin suurempi ja siten nopeampi L-aminohapposysteemi pääsi edelle. Sittemmin systeemin koon kasvaessa aineen virta vakiintui yhä enemässä määrin tälle kiraaliselle reitille (Kuva 3).



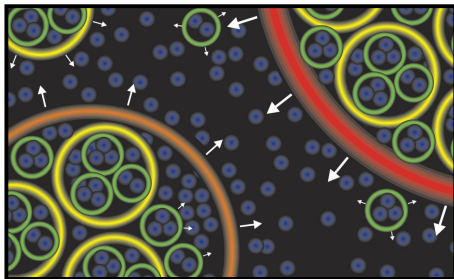
Kuva 3. (A) Kätisyyden aste α kasvaa systeemin koon kasvaessa (systeemin koko 4:2:1 harmaan sävyissä). Satunnaisesti toinen kiraalisista systeemeistä (sininen) saattaa päästä toista (punainen) suuremmaksi ja nopeammaksi, minkä seurauksena aineen virta suuntautuu siihen yhä tehokkaammin näivettäen toisen systeemin kokonaan. Entropia S kasvaa nopeasti erilaisten kiraalisten yhdisteiden synteessin seurauksena.

Tuo samanlaisuuden poissulkeva periaate on myös ekologian lainalaisuus. Kaksi samankaltaista lajia eivät viihdy samassa elinympäristössä vaan toinen niistä syrjäytyy. Niin ikään geneettisen koodin vakiintuminen kaikkialla tällä planeetalla osoittaa, ei elämän singulaarista syntyä, vaan että biosfääri on yksi yhtenäinen ekosysteemi. Geneettisesti ohjautun tuotannon myötä ainetta ei ole juuri kiinni inaktiivisissa välituotteissa vaan katalyyttisissä lopputuotteissa. Hitailakin on mahdollisuutensa toiminnallisen erilaistumisen myötä, joka takaa mahdollisuuden sellaisiin aineen ja energian virtoihin, joihin nopeat eivät pääse käsiksi tai eivät takaa riittävää elintasoja. Toki tunnistatte nämä moninaiset mahdollisuudet kohti todennäköisempiä tiloja niiksi, joita tavallisesti kutsutaan ekologiseksi lokeroiksi.

Varhaisimpia symbioosin muotoja lienee proteiinien ja RNA toisiaan tukevat toiminnot. Autokatalyyttinen RNA-maailma olisi sellaisenaan Lyapunovin stabiliteetti perustein epävakaa. Sen sijaan proteiini-nukleiinihappo systeemi kehiti-

tyi vakaammin ja saavutti korkeamman todennäköisyyden tilan. Epävakautta tosin esiintyy nykyäänkin ohuissa autokatalyyttisissä vuorovaikutusverkostoissa ja näkyy esimerkiksi saalis-petokantojen jaksollisena vaihteluna. Petokannan kasvaessa ainetta ja energiaa sananmukaisesti sitoutuu saaliista petoihin ja saaliiden vähetessä vuorostaan vapautuu petokannan romahtaessa. Aine virtaa taas saaliiden hyväksi joskin vasta lukuisten vaiheiden jälkeen. Tämä fluktuatioidissipaatio periaate on tuiki tuttu yksinkertaisista fysikaalisista systeemeistä, johon perustuu esimerkiksi rankekellojen toiminta kvartsikiteen värähtelynä. Aineen ja energian kytkettyä värähtelyä ilmenee myös kemiallisissa reaktiosykleissä.

Monimuotoisuuden metastabiilisuudesta seuraa hierarkioiden synty. Molekyylit voivat osallistua vain niihin reaktioihin, joihin ne ehtivät elinaikanaan kulkeutua. Tämä vuorovaikutusten sfääri on noin solun suuruusluokkaa. Entropian kasvu jatkuu korkeammalla hierarkian tasolla, kun molekyylit muodostavat solut, jotka vuorovaikuttavat keskenään muodostaen monisoluisia eliöitä, jotka edelleen keskinäisten vuorovaikutustensa myötä muodostaen yhteisöjä, jotka edelleen yhteiskuntia. Organisoitumisen kriteeri voidaan ilmaista entropian ehtona, siis luonnonvalinnan perusteella. Osaset liittyvät kokonaisuudeksi, kun niiden keskinäiset vuorovaikutukset lisäävät entropiaa enemmän kuin yksittäisten jäsenten vuorovaikutukset ympäristönsä kanssa sellaisenaan (Kuva 4).



Kuva 4. Aine organisoituu hierarkkiseksi toiminnallisiksi rakenteiksi liikkeessään kohti todennäköisempiä tiloja. Organisaatio saa olemassaolon oikeutuksensa vain, jos se pystyy suuremman entropian ylläpitoon kuin erilliset osasensa toisistaan riippumattomana.

Entropia-epäyhtälöin, siis luonnonvalinnan perusteella, voidaan muotoilla valintaperusteet myös monien muiden vaihtoehtoisten toimintamallien välillä, esimerkiksi suvullisen ja suvuttoman lisääntymisen välillä, ja lisääntymisen ja lajittumisen välillä. Kaiken kaikkiaan rakenteellistoiminnallinen monimuotoisuus kehittyy yhä suuremmiksi hierarkkiseksi organisaatioiksi, jotka nekin voivat aikaa myöten hajota ei pelkästään ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta vaan myös sisäisten prosessien muutosten seurauksena. Aine- ja energiavirrat saattavat uusien mekanismien löytyessä ohjautua uusiin uumiin romuttaen ylemmän hierarkiatason epätarkoituksenmukaisena. Kun puhumme vapaudesta, puhumme mahdollisuuksista entropiaa kasvuun.

Entropian kasvu suuntautuu kaikkialle minne se voi. Sen seurauksena myös perimämme on sirpaloitunut ja paisunut paljon sitä suuremmaksi, jonka miellämme tarkoituksenmukaiseksi. Turhaa, harvakseltaan tarvittavaa, tavaraa kertyy, kun siihen on varaa. Useinhan ei kuitenkaan ole. Viimekädessä luonnon monimuotoisuutta, todennäköisintä tilaa, rajoittaa aineen ja energian kokonaismäärä. Tämä lainalaisuus tunnetaan ekologiassa monimuotoisuus-pinta-ala -relaationa. Sekin on johdettavissa entropian lausekkeesta kattamaan hierarkiat atomeista biosfääriin. Pinta-alan ts. käytettävissä olevan aineen määrän kasvu luo uusia edellytyksiä monille eri tavoille lisätä entropiaa. Esimerkiksi kun luoto on kyllin suuri, sine juurtuvat puut, jotka tarjoavat monille muillekin kuin vesilinnulle pesimäpaikkoja. Suuremmilla saarilla on tietysti lisää reviiriä, muttei yhtä nopeasti uusia elinympäristöjä. Mantere on jo niin iso alue, ettei mikään lintu kykene hyödyntämään sen kaikkia elinympäristöjä kokonaisuudessaan. Näyttäisi kuitenkin siltä, että nykyihminen monitaitoisuudessaan ja teknologioineen kurkottaa hyvinkin näihin aineen ja energian globaaleihin rajoihin.

Ajanvirta

Saattaa vaikuttaa yllättävältä, että elämän lainalaisuudet ilmenivät yhtälöstä, jonka johtamiseen riittää lukion matematiikan tiedot. Ei tietenkään ole syytä monimutkaistaa asioita, mutta sittenkin on ihmeteltävä eikö modernilla fysiikalla ole mitään sanottavaa asiasta. Nykyinen ”gendre” perustuu Schrödingerin aaltofunktion liikeyhtälöstä johdettuun systeemin todennäköisyyden tiheysoperaattorin liikeyhtälöön

$$i \frac{\partial \hat{P}}{\partial t} = \hat{L} \hat{P} \quad (7)$$

joka on minullekin tuttu NMR-spektroskopiasta. Kemiallisia reaktioita ajavaa Liouville-operaattoria ei kuitenkaan tunneta, mutta Ilya Prigogine sai siitä selville vielä ennen vanhuuden kuolemaansa vuonna 2003, että liikeyhtälö ei ole ratkaistavissa. Voi olla, että yritykset ymmärtää kemiaa olisivat jo kauan olleet tuloksellisempia, jos käytettävissä olisi ollut alussa johtamamme yhtälö 4, jonka differentiaali ajan suhteen antaa tutunnäköisen liikeyhtälön

$$\frac{\partial P}{\partial t} = LP, \quad L \approx \sum_{j=1} \frac{dN_j}{dt} \frac{A_j}{RT} \quad (8)$$

Liouville-funktionaalista näkyy, että kemiallisten potentiaalien ero, affiniteetti A_j , määrää liikkeen suunnan. Tässä perinteisessä liikeyhtälössä, ei ole modernin liikeyhtälön imaginaariosaa. Symmetriarikko tarkoittaa, ettei avoimen systeemin kokonaisenergia säily evoluutiossa. Systeemi *muuttuu* joko energiaa luovuttaen kuten aurinko, kun eksotermisissä reaktiossa syntyy pysyviä rakenteita, alkuaineita, tai energiaa vastaanottaen kuten biosfäärissä, jossa syntyy endotermisissä

reaktiassa metastabiileja rakenteita, eliöitä. Päädyimme johtopäätökseen – ajanvirta eli kausaliteetti seuraa energian virrasta ja se ilmenee avoimen systeemin rakennemuutoksina. Reaktioiden edetessä muuttuvat affiniteetit muuttavat reaktioiden kulkua, jotka muuttavat affiniteetteja. *Ceteris paribus* periaate, siis se että muutettaisiin vain yhtä muuttujaa kerrallaan, ei päde. Aivan kuten Stephen Jay Gould terävästi toteaa viimeiseksi jääneessään järkälemäisessä eepoksessaan *Evoluutioteorian rakenne*. Kehitys on kaoottinen Henry Poincaréen jo 1800-luvun lopussa esittämässä merkityksessä. Systeemin liikerataa, siis myös omaa tulevaisuuttamme, ei voida ennustaa, ja kokonaisenergia säilymättömyys sinetöi menneisyytemme virheet korjaamattomiksi.

Vihdoin, suurikin systeemi saavuttaa tasapainon. Kun uusiutumattomat energiavarat ovat käytetty loppuun ja uusia entistä nopeampia mekanismeja ei enää ilmaannu, etenevä kehitys on päättynyt. Dynaamisessa tasapainossa liike on vain satunnaista ja jaksollista, kun biosfääri seuraa auringon vuota vuorokauden ja vuoden ajasta toiseen. Sukupolvet tulevat sukupolvien jälkeen ja aikakäsityksemmekin on taas kerran oleva syklinen, aivan kuten se oli muinaisilla kulttuureilla.

Vuonna 1943 Dublinissa sotaa paossa ollut Erwin Schrödinger kirjoitti Trinity Collagessa pitamiensä luentojen pohjalta pienen mutta varsin laajasti tunnetun kirjan *What is Life?* Jo tuolloin hänen nimeään kantava liikeyhtälö, johon 1900-luvun kvanttimekaniikan suuri menestys perustuu, oli langettanut syvän varjon 1800-luvun lopun fysiikan ylle, fysiikan, jonka mielenkiinto perustuu paljolti Boltzmannin, Darwinin, Gibbsin ja Poincaréen intuitioon.

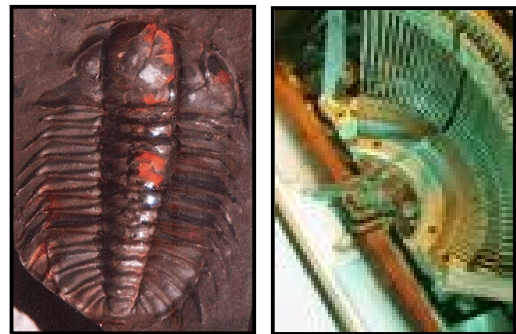
Johtopäätöksiä

Summa summarum, tilastollinen teoria perustuu vain aineen todennäköiseen käyttäytymiseen, mikä voi otollisissa olosuhteissa ulkoisessa energiavirrassa tuottaa hämmästyttäviä ilmentymiä. Kysymys elämän synnystä on vastauksensa myötä rauennut olemattomiin, aivan kuten Ludwig Wittgenstein aikoinaan ennakoï. Elämä ei milloinkaan syntynyt, vaan kyseessä on aineen vääjäämätön liike satunnaisten prosessien seurauksena kohti entistä todennäköisempiä tiloja. Tuloksena on tuttua biologiaa, mutta myös muuta.

Ajatus elämän ja talouselämän samankaltaisuudesta ei ole uusi. Itse Darwin sai välähdyksenomaisesti ajatuksen eloonjäämiskamppailusta lukiessaan Thomas Malthusin kirjaa. Samanhenkisiä aikalaisia oli jo kotikulmillakin (Antti Chydenius) mutta tunnetuimmiksi tulivat myöhemmin David Ricardo ja Adam Smith, jotka niin ikään ihmettelivät, mistä prosessista oikeastaan oli kyse varhaisteollistuvassa Englannissa. Nyt tiedämme – luonnon prosessista. Kaikki luonnon prosessit etenevät kohti logaritminormaalisia tasapainojakaumia tuottavan rakenteellis-toiminnallista hierarkiaa.

Tuolloin 1700-luvun lopulta alkanut nopean kasvun pyrähdys uusiutumattomien energialähteiden turvin on tuottanut

lyhyessä ajassa mitä moninaisimpia aineen muotoja, joista jo monet ovat painuneet unholaan tai päätyneet museoiden hyllyille kuin Burgessin liuskeen kambrisen kauden moninaiset fossiilit konsanaan (Kuva 5). Tuo kaukainen satumainen moninaisuus kehittyi nopeasti vuorovaikutusverkostojen tiivistyessä tehokkaaksi muotoisuudeksi. Aivan kuten nyt meillä on oleva maailmantalouden integraatio vapaan markkinatalouden myötä ohjaa nopeasti moninaiset aineen virrat ripeän funktionaalisiin väyliin ja kustannustehokkaihin linjoihin. Tässäkö, entropian kasvun tavoittelussako, ilmenee se ihmiselle niin tunnusomainen järki ja toimiansa tarkoituksenmukaisuus?



Kuva 5. Ammoiset aineen toiminnalliset (fossiili, kirjoituskone) muodot korvautuvat aikain kuluessa uusilla nopeammilla, jotka nekin saattavat pian korvautua vielä nopeammilla tavoilla edetä kohti suuremman entropian tilaa.

Tilastollinen teoria, todennäköisyyksien totuus, vahvistaa vihdoin arvelumme ja ounastelumme kirkkaiksi käsityksiksi. Meidän on havahduttava maailmamme väistämättömiin lainalaisuuksiin, jotta planeettamme voisi säilyä sukupolvelta toiselle elävänä ja kauniina. Niin ... joutsenlaulu, se on syvin syy maailmamme niin ihmeelliseen kauneuteen. *Carpe Diem!*

Arto Annala

Viitteitä

- Boltzmann, L. (1909) *Wissenschaftliche Abhandlungen*, 1 (F. Hasenröhl ed., Barth, Leipzig) (Reissued: Chelsea, New York, 1969).
- Darwin, C. (1859) *On the Origin of Species*. (John Murray, London).
- Gibbs, J. W. (1993–1994) *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs* 1, 2, (Ox Bow Press).
- Gould, S. J. (2002) *The Structure of Evolutionary Theory*, (Harvard University Press, Cambridge, Mass.).
- Kondepudi, D., Prigogine, I. (1998) *Modern Thermodynamics*. (Wiley, New York).
- Lotka, A. J. (1925) *Elements of Mathematical Biology* (Dover, New York).
- Prigogine, I. (2002) *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 360, 299–301.