Näköala modernin tieteen reunalta

Ajan ja aineen arkkitehdit

Onko utopiaa kuvitella, että planeettojen liikkeet, veden virtaus ja elollisten olentojen kasvu voitaisiin ymmärtää yleisempien periaatteiden manifestaationa? Vai voisiko taustalla sittenkin olla yhtenäinen ajan teoria? Juuri nyt tämä suuri synteesi on tapahtumassa. Matematiikan ja luonnontieteen eturintamaan on kohonnut dynaamisten systeemien teoria, kirjoittaa Kari Eloranta. Aihe on esillä pian alkavilla soluautomaattipäivillä Espoossa.

UUSI SUOMI

Kari Eloranta

Ympäröivän maailman ilmiöiden aikariippuvuus on meistä selvää. Kaikki syntyy, kasvaa, liikkuu ja häviää, siis muuttuu ajassa. Pysyvän löytäminen vaikuttaa paljon vaikeammalta kuin muuttuvan. Näin ei ole aina ollut. Aika on uusi keksintö. **Zenon** ei sitä vielä ymmärtänyt nuolen lentoa seuratessaan ja siksi formuloi kuuluisan paradoksinsa. Vasta kun keskiaika murtui uudeksi ajaksi, teki **Galilei** kokeensa ja muuttumattomuuden opin, statiikan syrjäytti uusi tiede, liikeoppi eli dynamiikka. Häntä seurasivat **Newton, Laplace, Poincaré** ja muut mestarit, joiden ansiosta tunnemme yhä mutkikkaampaa dynamiikkaa. Tiedämme jopa elollisen luonnon muutoksen periaatteita kuten evoluutioteorian.

Tietomme luonnonilmiöistä on menneinä vuosisatoina laajentunut suunnattomasti. Onko siis pelkkää utopiaa kuvitella, että planeettojen liikkeet, veden virtaus ja elollisten olentojen kasvu voitaisiin ymmärtää yleisempien periaatteiden manifestaationa? Vai voisiko kaiken taustalla sittenkin olla yhtenäinen teoria, ajan teoria?

Juuri nyt tämä suuri synteesi on tapahtumassa. Matematiikan ja luonnontieteen eturintamaan on viime vuosikymmeninä kohonnut dynaamisten systeemien teoria, joka ulottaa vaikutustaan yhä laajemmalle. Jo nyt se yhdistää käsitteellisellä tasolla niin yksinkertaiset jaksolliset ilmiöt kuin kaaoksen ja satunnaisuudenkin. Ja mukaan tulee kenties kohta niiden vastapoolinkin, itseorganisaatio huippunaan elämä. Kyseessä on abstrakti matemaattinen teoria, mutta sen periaatteita voi valaista yksinkertaisten mallien avulla.

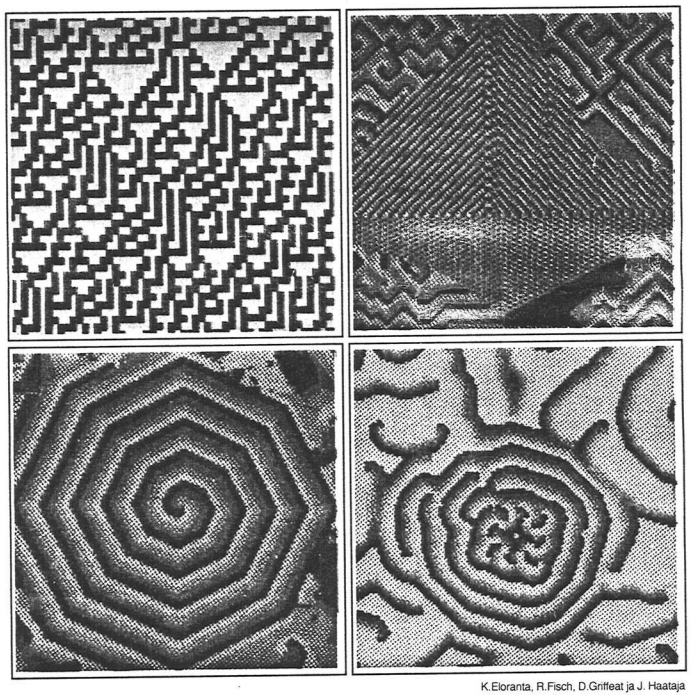
Solujen leikki

Soluautomaatti on dynaamisten systeemien eräs prototyyppi. Nimensä mukaisesti se on kokoelma identtisia lokeroita, siis eräänlaisia "soluja", jotka on järjestetty vierekkäin esimerkiksi jonoon tai tasoon. Soluilla on tila, joka voi muuttua. Tyhjä lokero vastaa solua lepotilassa ja täysinäinen aktiivista solua. Automaatti-osa nimestä viittaa siihen, että solut vuorovaikuttavat keskenään päivittäen tilaansa esimerkiksi joka sekunti. Päivitystä varten on yksinkertainen sääntö, joka huomioi vain solun naapureiden tilan. Eräs sääntö on vaikkapa se, jossa solu aina jäljittelee oikeanpuoleista naapuriaan. On helppo keksiä uusia sääntöjä ja osoittautuu, että niitä vaihtelemalla voidaan aikaansaada suunnaton kirjo erilaista dynamiikkaa. Kuvassa 1 on havainnollistettu eräiden tällaisten solukkojen historiaa. Jo kuvan lyhyessä evoluutiossa näkyy samanaikaisesti jaksollisuus, kaoottisuus ja fraktaalisuus eli saman rakenteen toistuminen eri mittakaavoissa. Fraktaalit ovatkin eräänlainen vinjentti dynamiikkaan, sen detalji, joka voidaan luoda vain jos ensin keksitään dynamiikka.

Matemaatikot **John von Neuman** ja **Stanislaw Ulam** keksivät soluautomaatit 1950-luvulla. He kuitenkin pystyivät vain aavistamaan niiden dynamiikan rikkauden. Näin siksi, että sopivia tietokoneita, joilla niiden kehitystä voidaan simuloida, ei vielä ollut. Heidän keskeisenä pyrkimyksenään oli osoittaa, että tällainen systeemi kykenee lisääntymään. Edellinen tutkijoista esittikin myöhemmin soluautomaatin, jolla oli tämä elämän perusominaisuus.

Elämänpeli

Suurta huomiota herätti 70-luvun alussa matemaatikko **John H. Conwayn** suunnittelema soluautomaatti. The *Game of Life* eli Elämänpeli. Se on eksoottinen universumi, jossa solut ovat tasoruudukolla ja siten helposti havainnollistettavissa tietokoneen näytöllä. Jälleen jokaisen solun lähinaapurit määräävät sen tulevan tilan, mutta vuorovaikutus on taitavasti tasapainotettu. Sääntö on sellainen, että solun on löydettävä riittävä määrä eläviä naapureita voidakseen jatkaa elämistään. Toisaalta liikakansoitus johtaa solun menehtymiseen. Säännön yksinkertaisuudesta huolimatta sen kuvaruudulle aiheuttama kuhina on ällistyttävä. Jos "evoluutio" aloitetaan satunnaistilasta, ilmestyy jo muutamien kymmenien sekuntien päästä selkeitä rakenteita. Osa niistä on staattisia, osa taas vaeltaa pitkin ruutua, kunnes törmää toiseen siirtokuntaan. Edessä voi olla yhteensulautuminen, pirstoutuminen tai häviäminen. Elämänpeli lienee myös maailman pelatuin tietokonepeli ja juuri siitä syystä sen oliot ja niiden elämä on sangen hyvin kartoitettu. Conway itse osoitti, että tämä soluautomaatti kykenee suorittamaan minkä tahansa laskutoimituksen, jonka mikään tietokone voi suorittaa.



K.Eloranta, R.Fisch, D.Griffeat ja J. Haataja

Solut ovat vierekkäin vaakarivissä ja niiden tila seuraavalla ajanhetkellä on lähinnä alempi rivi. Värit vastaavat eri tila-arvoja.

80-luku kulta-aikaa

Soluautomaattien varsinaisen tieteellisen tutkimuksen kulta-aikaa on ollut 80-luku. Osittain tämä on johtunut siitä, että silloin dynaamisten järjestelmien teoria on kehittynyt riittävän korkealle asteelle. Tutkimuksen primus motorina on toiminut Illinoisin yliopiston professori **Stephen Wolfram**. Hänen tutkimustensa pohjalta näyttää siltä, että dynamiikka jakautuu oleellisesti kolmeen tai neljään eri luokkaan.

Yksinkertaisimmillaan se on silloin, kun systeemi ajautuu muuttumattomaan tilaan tai jokin tilajono alkaa toistua. Automaatti siis "kuolee" tai muuttuu jaksolliseksi. Huomattavasti rikkaampi ja syvällisempi on ns. kaoottisten soluautomaattien luokka. Niiden käyttäytymiselle on tyypillistä yllätykset — evoluutiota ei voi helposti ennakoida. Tämä villi vaihtelu ikäänkuin sivuaa satunnaisuutta, mitä se ei kuitenkaan voi olla, koska sääntö ja alkutila ovat tunnetut.

Tällaisen soluautomaatin (esim. kuva 1) historia näyttää mutkikkaalta, mutta se johtuu vain siitä, että sääntö toistettuna ei ole yksinkertaisesti kuvattavissa (ja siten tuottaa vaikeuksia meidän ajatuskyvyllemme). Kaoottisten soluautomaattien monimuotoinen luokka jakautuu edelleen alalohkoihin. Osa niistä on kaoottisia oleellisesti samalla tavoin kuin epästabiileina kieppuvat taivaankappaleet, osa taas vieläkin syvällisemmällä tavalla. Yhteistä niille kaikille on kuitenkin järjestyksen rapautuminen, solujen anarkia.

Itseorganisaatio

Soluautomaattien neljäs päätyyppi on niistä ehkä kiehtovin. Tässä luokassa jo kuvattu naapurivuorovaikutus synnyttää dynamiikan, jossa eksoottiset rakenteet syntyvät kuin tyhjästä, liikkuvat, muuttuvat ja lopulta joko hajoavat tai monistuvat. Hallitseva ilmiö on itseorganisaatio, "solumaterian" järjestäytyminen saarekkeiksi. Näiden automaattien käyttäytyminen muistuttaa alkeellisimpien tunnettujen elollisten organismien käyttäytymistä. Kiinnostavaa on myös se, että tämä soluautomaattien luokka näyttää olevan aivan kaoottisen luokan reunalla. Eli siis rajaviiva toisaalta itseorganisaation ja elämän, toisaalta taas hajaantumisen ja kaoottisen hortoilun välillä on hiuksenhieno! Elämänpeli on esimerkki tästä luokasta kuten ovat myös ns. virittyvät soluautomaatit.

Virittyvien soluautomaattien johtavia tutkijoita on Yhdysvaltalaisen Wiconsinin yliopiston matematiikan professori **David Griffeath**. Erityistä ajankohtaisuutta hänen tuloksilleen antaa se, että hän on yksi pääesitelmöitsijöistä Espoossa huhtikuun puolivälissä järjestettävillä soluautomaattipäivillä. Griffeathin ja hänen ns. hiukkassysteemejä tutkivien kollegojensa ansiosta näiden systeemien einomaisen haastavan dynamiikan tutkimus on saatu lupaavaan alkuun.

Spontaanit hirviöt

Näissä systeemeissä solut tarkkailevat naapureitaan yrittäen löytää jonkun, joka on lähinnä ylemmässä tilassa. Löydettyään tämän solu voi muuttua kyseiseen arvoon. Mekanismi on perustavaa laatua oleva mallittaen esimerkiksi hermosolujen laukeamista, entsyymien toimintaa, epidemioiden leviämistä ja galaksien muodostumista. Suotuisilla alkuehdoilla näissä systeemeissä tapahtuu hämmästyttäviä ilmiöitä.

Kuvassa 2. on eräiden kaksiulotteisten maailmojen tiloja, kun alkutilana on ollut "satunnaispuuro". Spiraalit ja epäsäännölliset rakenteet, ns. hirviöt, ovat syntyneet täysin spontaanisti eli itseorganisoituneet ilman, että päivityssäännössä olisi mitäään reseptiä tällaisen rakenteen tekemiseen. Pyöriessään ne vähitellen lakaisevat kaiken "kaoottisen rojun" ulos avaruudesta. Rakenteet eivät ole muuttumattomia, vaan elävän organismin lailla uudistuvat jatkuvasti.

Elävät koneet

Jo soluautomaatit yksinään osoittavat, miten näennäisesti yksinkertaiset systeemit voivat synnyttää dynamiikan koko kirjon. Matemaattista synteesiä dynamiikalle luoville tiedemiehille ne ovat eräänlainen testauslaboratorio. Yhtäällä ne ovat tarpeeksi rikkaita ollakseen realistisia, toisaalta tarpeeksi yksinkertaisia, jotta ne voisi kuvitella täysin selvittävänsä.

Mutta aina löytyy uskalikkoja, tutkimusmatkailijoita, joita mikään jo kartoitettu ei kiinnosta. Ja kun kurkoittaa tieteen reunalta, saattaa ulottua niihin eksoottisiin maailmoihin, joita eräät tutkijat parhaillaan simuloivat tietokoneiden uumenissa.

Tekoelämän syntyhetkeksi voitanee sanoa sitä aikaa, jolloin 70-luvun alussa Bellin laboratorion tutkijat Yhdysvalloissa alkoivat ns. keskusmuistisodat. He antoivat tietokoneensa sisällä erilaisten ohjelmien yrittää vallata lisätilaa, monistua, ja agressiivisempien lajikkeiden kohdalla jopa hävittää muita ohjelmia. Tarkoituksena oli siis saada ohjelma "eliölajina" menestymään. Näiden ohjelmien pahamaineisina sukulaisina tunnetaan tietokonevirukset.

Virtuaalimuurahaiset

Tällä hetkellä yksi kiinnostavimmista tutkimuskohteista on ns. virtuaalimuurahaisten elämä. Nämä ovat alkeellisia liikkumiseen, aistimiseen, syömiseen ja lisääntymiseen kykeneviä olioita, joiden populaatiot elävät tietokoneiden muisteissa. Siirtokuntien toimia tarkkaillaan jatkuvasti. Niiden menestys vaikuttaa edelleen siihen, miten ohjelmaan koodatut perintötekijät muuttuvat.

Kaiken kaikkiaan kyseessä on muurahaislajikkeiden evoluutio tietokoneen muistissa.

Ironisesti eräs tämän tutkimuksen aktiivisimpia keskuksia on Los Alamosin laboratorio, jossa ensimmäinen ydinpommi kehitettiin. Tekoelämän tutkimuksella sen sijaan ei liene samanlaista yhteyttä aseteknologian luomiseen. Mutta se on kylläkin yhteydessä tekoälytutkimuksen perusteelliseen uudelleenarviointiin. Taustalla oleva motivaatio on "älykkäiden" koneiden ja ohjelmien rakentaminen hyväksikäyttäen soluautomaatteja ja muita eksoottisia arkkitehtuureja.

Abstraktin elämän ehdot

Puhtaan tieteen kannalta näiden tutkimusten keskeinen ongelma on kysymys "abstraktin" elämän ehdoista. Miksi elämän olisi oltava sellaista kuin se maapallolla sattuu olemaan? Miksi sen pitäisi perustua orgaanisiin molekyyleihin ja niiden kemiaan? Jospa ne ovatkin vain elämän kasvualusta, yksi muiden joukossa. Mitkä ovat ne tavat, joilla tämän itseorganisoitumisen on tapahduttava eli mitkä ovat elämän kehittymisen rajat? Kaikissa mahdollisissa maailmoissa.

Nämä ovat jättiläismäisiä kysymyksiä, mutta samalla myös osoitus siitä, miten pitkälle dynamiikan vaikutuspiiri jo ulottuu. Kenties meillä lähitulevaisuudessa on vastaukset joihinkin näistä arvoituksista.

Dynamiikan tutkimus on myös ratkaisevasti vaikuttanut tieteen paradigman muuttumiseen. Simulaatiosta on tullut tieteen uusi menetelmä. Se on välttämätöntä silloin, kun evoluutio kestäisi aivan liian kauan kuten myös silloin, kun kokeilu "oikealla" elämällä olisi puhtaasti eettisistä syistä mahdotonta. Mutta mikä sitten onkaan "oikeaa", jos kerran olento tietokoneen uumenissä käyttäytyy kuin biologinen muurahainen.

Kirjoittaja Kari Eloranta PhD työskentelee tutkijana Teknisen korkeakoulun matematiikan laitoksella.