

Saulius Norvaišas

Sudėtingumas



So far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain. And so far as they are certain, they do not refer to reality.

A. Einstein

Nepagaunamoji tikrovė

Mokslas per šį amžių pažengė toli, bet ne tiek, kaip daug kas tikėjosi. Ir galbūt ne ta kryptimi, kuria daugelio nuomone mokslas turėtų judėti. Kokia gi yra ta tikrovė, kurią mokslas pasišovė atskleisti, taip ir lieka neatsakyta. Ir kuo toliau, tuo ji darosi pinesnė, paslaptinesnė. Bent jau einant klasikinio mokslo keliu. Bet kaip visada mokslas kupinas naujų idėjų. Tūkstančiai tikrovės skeveldrų – modelių, išbarstytų konferencijų darbų rinkiniuose, žurnaluose, knygose, archyvuose – laukia savo valandos, kada jos suras savo vietą kokioje nors teorijos mozaikoje, laukia negalutinio nuosprendžio. Todėl nenuostabu, kad daug kas net neužsimena ir nepretenduoja į tikrovės aprašymą – ir tik kukliai žaidžia, atrodytų, uždaroje neprieštarinčių teorijų aikštelėse. Šiaip ar taip, galime pastebėti, kad nuo Einšteino laikų atsirado daug naujovių, o reliatyvumo teorija nors ir liko sunkiai pakartojamu iššūkiu tikrovei, bet kartu užėmė vieną iš sudedamųjų tikrovės poveikio dalių. Mūsų ir toliau nenustoja „maitinti“ nepagaunamoji tikrovė, tokia, kokią mes galime jausti visais savo jausmais ir suvokti gerai apginkluotu protu. Mes ir toliau nesiliaujame tyrę mus supančios aplinkos, stebimės jos išradingumu ir semiamės iš jos vis sunkesnių uždavinių.

Pirmieji žingsniai sudėtingumo link

Sudėtingumas yra kylanti ideologija, paskutinis iššūkis ir nauja viltis ieškant išeities iš tikrovės supratimo aklavietės. Kas gi yra tas sudėtingumas (*complexity*, angl.) ir kokių teorijų kompleksu bandoma jį apipavidalinti? Bet kuriame aiškinamajame žodyne apibūdinama taip: „Sudėtingas objektas yra daugelio dalių junginys, taip supainiotas, kad sunku jį suvokti ir nagrinėti.“ Nuo šitokio „vulgaraus“ sudėtingumo apibūdinimo galima ir pradėti.

Net ir tokiam buitiniame apibūdinime iš karto galima pastebėti tam tikrą dualumą: sudėtingo objekto dalys tuo pat metu yra ir skirtingos, individualios, ir tarpusavyje priklausomos, susietos. Iš tiesų čia dažnai slypi principinis

sunkumas – tokios sistemos neįmanoma **suskaidyti** į atskirus modulius, nesugriovus visos sistemos funkcionavimo. Todėl sudėtingų sistemų tyrinėtojo tradiciniai *in vitro* tyrimo metodai negelbsti. O tai reiškia, kad sudėtingas sistemas nepaprastai sunku aprašyti ir turimi metodai retai padeda prognozuojant bei valdant sistemų elgesį. Visi puikiai žinome, kad sudėtingi uždaviniai yra tie, kurie sunkiai sprendžiami. Todėl nieko nuostabaus, kad dabartinės „sudėtingos sistemos“ yra istoriškai atsiradusios iš „sunkių uždavinių.“ Intuityviai galima suvokti, kad sistema yra tuo sudėtingesnė, kuo joje yra daugiau dalių ir kuo daugiau sąryšių tarp jų dalių. Be to, sistema yra tuo sudėtingesnė, kuo daugiau laiko sugaištama jos analizei. Pastarasis sudėtingumo kriterijus gali pasirodyti subjektyvus ir kintantis. Dažnai taip ir būna – vieniems atrodanti sudėtinga sistema kitiems gali būti paprasta. Todėl labai gerai būtų turėti objektyvų ir pastovų sudėtingumo matą.

Tokios būtų pradinės pastabos apie sudėtingas sistemas. Sudėtingų reiškinių toli ieškoti nereikia. Dažniausiai jie dėl savo neakivaizdumo būna nuolatinių diskusijų apie paslaptį sutvėrimą argumentais. Tūkstančiai genų reguliuoja vienas kitą, įsijungia ir išsijungia pagal vien jiems būdingas taisykles, nematomi ir paslaptį organizmo ląstelių sąryšiai, milijardai neuronų, sutartinai valdančių mūsų judesius, reguliuojančių mąstymą ir kalbą. Platesnis žvilgsnis gali aprėpti įvairaus dydžio ekologines sistemas, kurios „juda“ savo kelyje keisdamos vienas rūšis kitomis; toliau – biosfera, visa planeta (prisiminkime Gėjos hipotezę), Saulės sistema, galaktikos... Ir visa tai yra autonominiai dariniai, nežinia kaip atsiradę ir puikiai funkcionuojantys. Vis labiau darosi aišku, kad evoliucija nėra būdinga vien tik biologinėms sistemoms. Ji apima ne tik negyvą gamtą nuo mikro- iki megapasaulyje, bet ir kultūras, mokslines teorijas, kūrybinį mąstymą, kalbas, ekonomiką, kompiuterinį modeliavimą. Todėl po sudėtingumo vėliava norima suburti tuos dėsnius, kurie yra universalūs ir reiškiasi pačiose kraštutiniausiose materijos formose ir žemiškosios gyvybės bei kultūros judėjime.

Sudėtingumo kiekybinis apibūdinimas yra plati ir šiuo metu greitai besivystanti tema. Nors šios sąvokos interpretacijos priklauso nuo nagrinėjamos disciplinos, jokio vientiso, apibendrinančio jos nagrinėjimo dar neatlikta. Sritys, į kurias sutelktas pagrindinis dėmesys, yra automatų ir informacijos teorijos, taip pat kompiuterių mokslas. Palyginus neseniai į šią veiklą įsijungė ir fizikai, ypač nagrinėjantys fazinius virsmus ir chaosą. Be to, sudėtingumo apibūdinimu labai domisi ir sukonstravę pirmąjį evoliucinės biologijos ir dirbtinių neuroninių tinklų modelį.

Redukcionizmas ir sudėtingumas

Šiuolaikinio mokslo sėkmė labai glaudžiai siejasi su eksperimentinių metodų galimybėmis. Pasieltas kraštutinis matavimų tikslumas, ir atsirado galimybė

juos pakartoti. Tam tikrų sričių eksperimentus galima atlikti labai gerai kontroliuojamomis sąlygomis. Todėl nenuostabu, kad galutiniai fizikos dėsniai formuluojami taip, kad leistų tiksliausiai numatyti sistemos elgesį. Kai tarp teorijos ir eksperimento aptinkami esminiai nesutapimai, jie priskiriami arba neįtrauktoms išorinėms jėgoms, arba nepilnai informacijai apie pačios sistemos būseną. Pastaruoju atveju problema iki šiol buvo sprendžiama redukcionistiniu būdu: sistema yra stebima skaidant ją ir ieškant „elementarių“ sudėtinių dalių. Medžiaga suskaidoma į molekules, atomus, nuklonus, kvarkus - taip suvedant realią sistemą į milžinišką „plytų“ rinkinį, kuriame veikia tik trys fundamentalių jėgos: branduolinė, elektrosilpnoji ir gravitacinė.

Pastebėjimas, kad bet kokią naują reiškinį galima suvesti į skirtingų rūšių dalelių ir kelių dinaminių dėsnių sąveiką, yra ištis puikus. Tačiau ar kas nors išdrįs teigti, kad taip galima paaiškinti žemės drebėjimus, oro permainas, medžių augimą, gyvybės evoliuciją? Iš principo taip. Tereikia fiksuoti pradines sąlygas ir įstačius jas į atitinkamas dinamines lygtis rasti sprendinį. Pastebėjus, kad tokiam sprendimo metodui reikia tikslų pradinių duomenų, pasidaro aišku, jog šis sumanymas yra akivaizdžiai neįgyvendinamas, bent jau dėl uždavinio neaprepiamumo. Reikia elgtis kažkaip kitaip. Dar stipresnis kontrargumentas šiai nuostatai yra tas, kad tikras reiškinio supratimas dažniausiai reiškia stebimų duomenų „sintetinimą“, eliminuojant tą informaciją apie kintamuosius, kuri nebūtina reiškiniui „pakankamai“ aprašyti. Pavyzdžiui, dujų pusiausvyros būsenai aprašyti užtenka trijų makroskopinių dydžių (slėgio, tūrio ir temperatūros), susietų „uždara“ lygtimi. Manoma, kad dujos yra sudarytos iš visiškai nepriklausomų dalių, kurių „vidiniai“ laisvės laipsniai yra visai nesvarbūs. Taigi mikroskopinio sistemos aprašymo pakeitimas makroskopiniu leidžia sistemą laikyti visiškai paprasta.

Tačiau toks sistemos suvidurkinimas netinka, kai būtina nagrinėti judėjimą mezoskopiniu masteliu, pavyzdžiui, dujų ar skysčių priemaišų elgesį. Ištis Brauno dalelės (pvz., žiedadulkės) trajektorija skystyje gali būti tiksliai nustatoma tik tada, kai žinomos veikiančios jėgos visų ją supančių molekulių. Nors šią problemą „tiksliai“ išspręsti sunku, tačiau iš dalies galima, tik vietoje **atskiros dalelės** judėjimo aprašymo reikia konstruoti visų **dalelių ansamblio** judėjimo aprašymą. Užuo stebėję atskiros dalelės judėjimo orbitą, galime įvertinti Brauno dalelės **tikimybę** būti tam tikroje būsenoje. Tai tas pats, jei nagrinėtume visą orbitų šeimą su ta pačia pradine sąlyga, tik esant skirtingoms skysčio mikroskopinėms būsenoms. Taigi šitoks Brauno dalelės aprašymo būdas nėra tikslus, be to, reikia įvertinti ir manipuluoti žymiai didesniu informacijos kiekiu: būtent tolydžia kintančių laiko atžvilgiu pradinių sąlygų aibe. Šis sunkumas pusiausvirojoje statistinėje mechanikoje apeinamas postuluoju vienodą mikroskopinių būsenų tikėtinumą. Tai yra labai „stiprus apkarpymas“, tačiau Brauno dalelės judėjimo modelis pasidaro labai

kompaktiškas ir makroskopinės informacijos pakanka. Skystis vėl yra pusiausvyroje, tačiau Brauno dalelė atlieka atviros posistemės vaidmenį, – netaisyklingai juda veikiamą tiek atsitiktinių fluktuacijų, tiek su trintimi susijusio judėjimo slopinimo. Į šitokį modelį papildomai gali būti įtrauktas deterministinis pernešimas.

Sudėtingumas ir netiesiškumas (chaosas)

Šie pavyzdžiai iškelia dvi fundamentalias fizikinio modeliavimo problemas. Pirma, kaip esant žinomiems dinaminiam dėsniams **praktiškai** realizuoti predikciją, t.y. numatyti modeliuojamos sistemos būsenas. Antra, įvertinti nagrinėjamos sistemos momentinio poveikio bruožų **tikrumą**. Pastaroji problema kyla iš beviltiškų pastangų sekti didžiulį judančių dalelių kiekį ir tvarkytis su paklaidomis. Iš tiesų netiesinių sistemų nagrinėjimas atskleidė, kad be galo maži pradinių sąlygų netikslumai eksponentiškai didėja laiko atžvilgiu – tai vadinamasis determinuotas chaosas. Šiam reiškiniui atsirasti pakanka trijų kintamųjų (laisvės laipsnių), susietų netiesiniais sąryšiais. Todėl aišku, kad ribota galimybė numatyti sistemos būsenas atsiranda ne tiek dėl stebėtojo silpnumo, kiek dėl vidinių sistemos savybių – būtent netiesiškumo. Kita vertus, atsisakius nagrinėti dalelių koordinates ir vietoje jų pasirinkus makroskopinius kintamuosius, dažnai reikalingų dydžių predikcija nesumažėja. Mums dažniausiai visai nereikia žinoti kiekvienos dalelės trajektorijos. Statistinės mechanikos sėkmė nagrinėjant tokius reiškinius kaip elektrinis laidumas, šiluminė talpa, magnetinis jautris ir kt. rodo suvidurkinimo metodo naudingumą. Taigi jeigu kiti sistemos laisvės laipsniai nėra svarbūs, chaotiškas dalelių judėjimas (būdingas daugiakomponentėms sistemoms) ne tik nesumenkina grubaus sistemos dinamikos vaizdavimo, bet netgi gali pagreitinti jos konvergavimą į vieną iš atraktorių.

Sudėtingumas ir universalumas (struktūros)

Kaip jau minėjome, gamta pateikia daugybę pavyzdžių, kuriuose koherentiškos, arba suderintos struktūros atsiranda pačiais įvairiausiais masteliais ir nėra elementariai viena su kita susietos. Tokie pavyzdžiai gali būti sudėtingi biologiniai organizmai, sūkuriai atmosferoje arba geologiniai dariniai (smėlio kopos, vulkaniniai kalnai). Tokie dariniai verčia ieškoti kuo paprastesnio erdvinės ir laikinės dinamikos aprašymo ir remtis makroskopinių sistemos elementų sąryšiais užuot gilinantis į jų vidinę struktūrą. Žodžiu, mūsų patirtis sako, jog dažniausiai prieinamą informaciją naudinga kondensuoti. Tai nėra vien tik taktinė gudrybė susidorojant su, atrodytų, skirtingomis ir nesusijusiomis sistemomis. Priešingai, panašios struktūros aiškiai atsiranda esant visiškai skirtingoms aplinkybėms, o tai gali reikšti, kad skirtingų sistemų evoliucija slepia universalius dėsnius. Šešiakampės figūras galima stebėti skysčių dinamikoje, taip

pat ir lazerio spindulio sukurto elektrinio lauko erdviniam profilyje. Sukuriai atsiranda turbulentiniuose skysčiuose, chemiškai sąveikaujančiose sistemose bei „žaisliniuose“ ląstelių automatų modeliuose.

Sudėtingumas ir mastelio simetrija

Sistemos, turinčios panašias struktūras įvairiais masteliais, be labai įdomių ir vertų nagrinėjimo savybių, yra nepalyginamai paprasčiau aprašomos negu tos, kuriose reiškiasi struktūrų įvairiais masteliais **hierarchija**. Nuostabiausia nehierarchinių struktūrų matematinį pavyzdį pateikia visur besireiškiantys fraktalai – objektai, demonstruojantys vos ne tobulą geometrinę mastelio invariantiškumo savybę ir galintys būti niekur nediferencijuojami. Šių savybių buvimu natūraliuose objektuose paprasčiausiai galima įsitikinti vis didinant pradinį vaizdą, pavyzdžiui, išraižytą jūros pakrantės liniją: vis mažesnės ir mažesnės įlankos ir pusiasaliai yra atrandami didinant išskaidymą (rezoliuciją), tuo tarpu stambūs bruožai išnyksta iš žvilgsnio ir suvokimo lauko. Ir atvirkščiai, didinant galima atskleisti beveik invariantišką struktūrą. Tarp daugelio natūralių fraktališkų darinių galima paminėti žiedinius kopūstus, debesis, putas, galaktikas, plaučius, kempinę, medžius. Jei panašias, bet skirtingo dydžio objekto dalis galima interpretuoti kaip skirtingą aprašymo lygį, kaip tikslų mastelio invariantiškumą, nesvarbu, kur jis bebūtų stebimas, – tokiu atveju mes turime **paprastą** sistemą. Nors iš pirmo žvilgsnio tokie į save panašūs objektai gali būti suvokti kaip postūmiui invariantiškai raštai, sukeičiant postūmio ir didinimo operacijas vietomis, tačiau čia yra esminis skirtumas. Dinaminės taisyklės, susijusios su tam tikru raštu, bendru atveju yra invariantiškos tam tikrai simetrijos grupei (pvz., postūmiui). Todėl nieko nuostabaus, kad raštas irgi turi tą pačią simetriją (pvz., periodiškumą – kristalo atveju). Tačiau tai netinka fraktalams, kurių simetrija nėra paslėpta jo generavimo taisyklėje. Neaišku, ar tie patys fizikiniai dėsniai yra atsakingi už abi simetrijos rūšis ir už nuostabią formų įvairovę, kurią mes paprastai stebime.

Sudėtingumas ir struktūrų hierarchija

Hierarchinė struktūra gerai matoma sistemose, kur vyksta tolydus perėjimas iš vienos būsenos (fazės) į kitą, pavyzdžiui, magnetikuose arba superlaidinukuose. Grūdelėjimo (*coarse-graining*, angl.) procedūra (*Kadanoff*, 1966) leido suformuluoti pernормavimo grupių teoriją (*Wilson*, 1971), kuri, nepaisant idėjos paprastumo, labai tiksliai paaiškino stebimus reiškinius. Kita vertus, fazinis virsmas vyksta tik esant tam tikroms parametro reikšmėms (lydimosi taškams), tuo tarpu hierarchinės struktūros yra daug bendresnis gamtos reiškinys. Kaip pavyzdį galima pateikti $1/f$ triukšmą, kuris rodo laikinio signalų panašumo į save savybę. Šis reiškinys, nepaisant jo plataus pasireiškimo gamtoje, iki šiol neturi teorinio pagrindimo.

Kitos sistemos irgi sukuria įvairius hierarchinius lygius. Tačiau tokiose sistemose struktūros nėra nei griežtos, kaip kristalų atveju, nei tokios laisvos, kaip dujų atveju, nei paklūsta kokiam nors jau žinomam teoriniam modeliui. Tokioms sistemoms glaustai aprašyti kliūtis gali būti posisteminių blausumas, neleidžiantis aiškiai atskirti jų kontūrų. Kita sunkumų priežastis gali būti esminis skirtumas tarp sąveikų, atsirandančių įvairiuose modeliavimo lygiuose.

Nuo subjektyvių prie objektyvių kriterijų

Šiaip ar taip, nagrinėjamo reiškinių sudėtingumas priklauso nuo mūsų sugebėjimo jį suprasti, o pastarasis – nuo to, kaip mes tiksliai sugebame sistemą aprašyti, naudodami koncentruotą informaciją apie ją. Todėl sudėtingumo teoriją galima išivaizduoti kaip modeliavimo teoriją, įtraukiančią įvairias redukcines schemas (kintamųjų eliminavimą arba jungimą, atskyrimą silpnų sąryšių nuo stiprių, vidurkinimą), įvertinant jų efektyvumą ir galbūt pasiūlant naują reiškinių modelį. Tuo pat metu turi būti pateiktas sistemos sudėtingumo apibrėžimas, kartu nurodant priemones jam analizuoti. Tai reiškia, kad sistema sudėtinga ne pagal kažkokius abstrakčius kriterijus, bet todėl, kad ją sunku modeliuoti „iš vidaus“, nesvarbu, koks matematinis aparatas tam taikomas.

Apibrėžiant sistemos sudėtingumą, reikia atsižvelgti į kelis dalykus.

- Visų pirma, sistemos supratimas reiškia, kad yra subjektas (stebėtojas), kuris turi aprašyti objektą (paprastai čia turima galvoje sistemos būsenų, jos savybių predikcijos modelį). Todėl sudėtingumas yra tiek subjekto, tiek ir objekto funkcija.
- Antra, objektas arba jo atitinkamas aprašymas turi būti patogiai padalintas į dalis, kurios savo ruožtu gali būti suskaidytos į smulkesnius elementus. Tokiu būdu gaunama sistemos hierarchija. Tačiau reikia pastebėti, kad dažnai šitaip gautą hierarchiją demonstruoja ne tiek pats tiriamasis objektas, kiek modelio konstravimo etapuose atsiradęs produktas. Todėl laikinosios hierarchinės struktūros buvimas dar nėra tikrasis sudėtingumo rodiklis.
- Trečia, aiškindamas užkoduotą tiriamojo objekto hierarchiją, subjektas turi nagrinėti įvairius objektų posisteminių sąryšius ir juos įtraukti į modelį. Sąveikų skirtingais masteliais nagrinėjimas veda prie mastelio (*scaling*, angl.) sampratos. Tačiau ar didinant išskaidymą pagaliau išaiškėja stabilus sąveikų paveikslas, ar ir tokiu būdu negalima pagauti jo kontūrų? Jei taip, tai gal kitas modelis atskleis paprastesnę reiškinių schemą?

Algoritminis sudėtingumas

Nežiūrint į tai, kad **viso** mokslo pirmutinis tikslas yra rasti pačius glausčiausius modelius, šio uždavinio formalizavimas prasideda nuo diskrečiosios matematikos. Objektas aprašomas skaičių seka, kurią tyrinėtojas turi atkartoti

nustatydamas tos sekos generavimo taisykles ir įdėdamas jas į modelį, kuris taip pat yra skaičių seka. Darbas yra sėkmingas, jei objekto aprašymo apimtis sumažėja – informacija suspaudžiama. Pavyzdžiui, periodinė seka 011011011... yra tiksliai aprašoma pasikartojančia „statybine ląstele“ 011.

Ši idėja raudona gija sieja dvi vystymosi aukštumas pasiekusias teorijas: matematinę logiką ir informatiką. Pastarojoje modelis yra kompiuterinė programa, o generuojamas objektas – simbolių seka. Matematinės logikos atveju modelis yra formalios sistemos taisyklių aibė (pvz., taisyklė, kaip ištraukti kvadratinę šaknį), tuo tarpu objektas yra bet koks pagrįstas tos sistemos teiginys (pvz., kvadratinė šaknis iš 4 yra 2). Informacijos suspaudimas reiškia, kad turint formalią sistemą galima automatiškai gauti visas teoremas (teisingus tos sistemos teiginius) nenaudojant jokios **išorinės** informacijos. Šiuo atveju simbolių sekos sudėtingumas yra vadinamas **algoritminiu** ir lygus minimaliai tam tikrą simbolių seką generuojančiai programai. Kaip nesunku suprasti, visiškai atsitiktiniai objektai turi maksimalų algoritminį sudėtingumą, nes jo neįmanoma aprašyti glausčiau, negu nurodant pačią seką. Tačiau taip aprašant bestruktūrius objektus šis algoritminio sudėtingumo apibrėžimas mažai naudingas nagrinėjant fizikinius objektus. Dažnai algoritminis sudėtingumas tapatinamas su entropija ir naudojamas kaip netvarkos matas.

Kruopštesnė algoritmų analizė leido sugrupuoti modelius į atskiras klases pagal tai, kaip kokybiškai ir kiekybiškai skiriasi jų gebėjimas manipuluoti simboliniais objektais. Pagrindinės keturios klasės sudaro hierarchiją, kurią 1956 metais pasiūlė N. Chomsky. Šią hierarchiją vainikuoja Turingo automatas – universalaus kompiuterio prototipas. Tinkamai užprogramuotas, šis automatas, gali imituoti visus kitus automatus. Chomsky hierarchija leidžia klasifikuoti skaičių sekas pagal minimalius **skaičiavimo** resursus, atgaminančius tas sekas. Taigi nagrinėjamų objektų sudėtingumas yra reprezentuojamas automato sudėtingumu.

Praktiškai minimalią programą (arba skaičiavimo klasę) galima rasti tik atskirais atvejais. Išties yra įrodyta, kad neegzistuoja bendras šio uždavinio su bet kokia įeinančia išraiška sprendimo algoritmas. Lygiai taip pat negalima gauti bendro atsakymo, ar teorema (panašiai kaip skaičių seka) priklauso tam tikrai formaliai sistemai (kaip Turingo automatų klasei). Šie „negalimumai“ yra susiję su begaliniu skaičiavimu, dėl kurio Turingo mašina negali iki galo baigti savo darbo. Matematiškai tai galima išreikšti šitaip: jei žinoma nuosekli ir efektyvi aritmetinė teorija, joje yra teisingi tvirtinimai apie natūraliuosius skaičius, kurie nėra tos teorijos teoremos (*Gödel*, 1931). Bet kokiai formaliai logikai $\mathcal{L}$, nuosekliai naudojančiai **aritmetiką**, mes negalime pasiūlyti jokios Turingo mašinos, pasakančios, ar **bet kokia** paimta $\mathcal{L}$ formulė yra teorema, ar ne.

Teorija ir praktika

Toliau, kaip ir nuo pat pradžių, mus labiausiai domina „natūralūs“ objektai ir jų modeliai. Padarius gana griežtas prielaidas, tam tikras fizikines ir biologines sistemas galima laikyti universaliais automatais. Todėl nieko keisto, kad įvairiausiose mokslo srityse buvo konstruojami automatų modeliai. Čia galima paminėti valdymo ir informacijos perdavimo teoriją (*Wiener*, 1948), teorinę biologiją (*von Neumann*, 1966), dirbtinį intelektą (*Minsky*, 1988). Tarp daugelio „išvestinių“ tyrinėtojų tikslų galima paminėti robotų judėjimo paprastose vietovėse modeliavimą, vaizdų atpažinimą, mokymą bandymų ir klaidų metodu, loginių uždavinių sprendimą, žaidimą šachmatais, biologinės evoliucijos modeliavimą (ląstelių automatus), protavimo imitavimą (dirbtinius neuronų tinklus). Be abejo, norint išvengti dažnai atsirandančių neišsprendžiamų situacijų ir neekvoti laiko bei erdvės resursų, ieškoma tik apytikslų praktinio realizavimo sprendinių. Gali būti, kad tai yra nepaprastai perspektyvi modeliavimo sritis, ypač kada modeliuojant naudojama blausios logikos (*fuzzy logic*, angl.) teorijos elementai.

Reikia pastebėti, kad nors šis „mechanistinis“ natūralių sistemų modeliavimas yra priimtinas didžiajai daugumai tyrinėtojų, tačiau kartu yra suprantama, kad vis dėlto tai yra laikina priemonė, hipotezė *ad hoc*. Ji gali naudingai tarnauti iki to momento, kai bus atrastas koks nors šios prielaidos prieštaravimas. Kita vertus, kai šis požiūris naudojamas „ribinėms“ sistemoms aprašyti, pavyzdžiui, gyvūno smegenų funkcionavimui aiškinti, mokslinės visuomenės požiūriai ryškiai išsiskiria ir vieningumo nebelieka. Čia galima paminėti britų matematiką R. Penrose, kuris mano, kad protinei veiklai modeliuoti šiuo metu nėra jokių adekvačių teorijų.

Pastaruoju metu sudėtinga sistema dažnai laikoma tokia, kurią sudaro didelis elementų skaičius. Tokios yra ekologinės, ekonominės, imuninės sistemos. Vienas iš svarbiausių tokių sistemų bruožas yra tas, kad labai sunku sutapatinti modelio rezultatus ir stebėjimo duomenis. Ir nebūtinai čia kaltas atsirandantis chaotiškas sistemos elgesys, maskuojantis tokį sutapimą, tuo labiau, kad yra visas arsenalas metodų chaoso charakteristikoms nustatyti. Aišku, kad šis sistemų panašumas dar nėra argumentas **unifikuotai** daugiakomponenčių sistemų teorijai sukurti. Be to, įvairių sistemų elgesio panašumas nebūtinai reiškia, kad egzistuoja bendri sudėtingas sistemas valdantys principai. Todėl vietoje visaapimančios teorijos ieškojimo dažnai vertingiau yra išryškinti tipinius sudėtingo sistemos elgesio bruožus ir tada nukreipti pastangas į panašius bruožus turinčios ir gerai apibrėžtos sistemų grupės analizę. Tarp tokių tipinių bruožų galima būtų paminėti sistemos tvarkingumą ir netvarkingumą tuo pačiu metu, tam tikrą sistemos elgesio neprognozuojamumą, posistemų sąveiką. Pastaroji dažnai priklauso nuo to, kaip sistema yra padalyta, t.y. dėl skirtingų mastelių gali atsirasti ir nevienoda sąveika.

Galima sakyti, kad šiuo metu toliausiai pažengta nagrinėjant dezoksiribonukleines rūgštis – gyvybės cheminį pagrindą. Tačiau ne tik DNR, biologinių sistemų sudėtingumo prototipą, galima simboliškai užkoduoti, šikart naudojant tik keturis simbolius. Panašiai galima koduoti visas pagrindines fizikines sistemas, turinčias tolydžias erdvines ir laikines struktūras. Šis sistemų aprašymo bendrumas, kuris tik atrodo bereikalingai ribojantis ir pernelyg griežtas, yra aiškiai apibrėžto matematinio konteksto nuopelnas, leidžiantis išvengti daugelio nereikalingų diskusijų apie sudėtingumą. Neturint aiškių kontūrų, lengva nukrypti nuo mokslinio tako ir pasiklysti (geriausiu atveju) filosofinėse spekuliacijose.

Susigeneravęs sudėtingumas

Nepaisant to, kad sudėtingų sistemų „bendra kalba“ leidžia vieningai pažvelgti į gana skirtingas sistemas, kiekvienu atveju dar būtina turėti aiškius tyrimo tikslus ir nepasiklysti tarp skirtingų sudėtingumo šaltinių. Nežinomos kilmės simbolinių struktūrų painumas dažnai priskiriamas vienam iš dviejų gana skirtingų mechanizmų. Viena vertus, tai gali būti daugelio silpnai priklausomų poveikių (vidinio arba išorinio) rezultatas. Tai standartinis atvejis. Pavyzdžiui, nagrinėjamas šildomas baseinas su skysčiu, įgaunančiu kokią nors erdvinę struktūrą. Kita vertus, galima postuliuoti, kad struktūros susidaro iš bendriausių bestruktūrų pradinių sąlygų veikiant gana paprastoms dinaminėms taisyklėms. Šis sudėtingumas vadinamas **susigeneravusiu**. Apie jį galima kalbėti visada, kai tik kelių pagrindinių taisyklių (bėgalinės) iteracijos sukuria darinius, nebūdingus pačioms taisyklėms. Būdingiausi tokio scenarijaus pavyzdžiai gali būti simetrijos sugriovimas (superlaidininkai, šilumos sklidimas) ir tolimosios koreliacijos (faziniai virsmai, ląstelių automatai). Šių reiškinių svarba ir jų universalios savybės, atrastos statistinėje mechanikoje, leidžia laikyti susigeneravimo sąvoką prasmingiausia ir daugiausiai žadančia nagrinėjant sudėtingumą. Kita vertus, čia derėtų pastebėti, kad susigeneravimo sąvoka yra per daug turtinga ir per plati norint ją atskirai nagrinėti ar naudoti kaip klasifikavimo įrankį. Iš tiesų ji apima tokias skirtingas sritis, kaip chaotiška dinamika, ląstelių automatai ir kombinatorinių uždavinių optimizavimo algoritmai.

Modeliai

Kokie bebūtų nežinomi dinamikos dėsniai, pagal kuriuos vystosi vienas ar kitas reiškinys, tyrinėtojui pirmiausiai reikia sukurti ar pasirinkti modelį, galintį atgaminti stebimas struktūras. Pasirinkimą riboja keli fundamentalūs klausimai, į kuriuos verta atsakyti iš pat pradžių. Iš tiesų stebimą darinį galima laikyti unikaliu ir jį identišškai atkurti. Kita vertus, jį galima laikyti vienu iš daugelio galimų eksperimento rezultatų. Pastaruoju atveju reikėtų nagrinėti patį struktūros šaltinį ir aprašyti bendras taisykles. „Unikalaus varianto“ metodas

yra būdingas informatikai ir kodavimo teorijai, tuo tarpu „ansamblio“ metodo taikymo sfera yra fizikinė ir statistinė.

Bet koku atveju gali susidaryti dvi kraštutinės situacijos: modelis yra arba „didelis“ automatas su daugybe parametrų, per trumpą laiką pasiekiantis tikslą, – sugeneruojantis struktūrą, arba „mažas“ automatas, darbą atliekantis labai ilgai. Todėl sugeneruotos struktūros sudėtingumas vaizdžiai gali būti nusakytas arba ankstesniojo automato dydžiu, arba skaičiavimo laiku. Reikia pastebėti, kad tiek automato dydis, tiek ir skaičiavimo laikas yra naudojami biologinei evoliucijai aprašyti. Manoma, kad dabar aptinkamos DNR molekulės yra tų pačių elementarių surinkimo operacijų ilgo kartojimo rezultatas (susigeneravęs sudėtingumas), kartais „pabarstomas“ mutacijomis, po kurių jau veikia atrankos mechanizmas, t.y. tikrinama, kaip gautasis produktas „draugauja“ su aplinka. Šis paskutinyasis etapas yra ekvivalentus testavimui, ar susidariusią simbolių struktūrą (DNR) atpažįsta labai sudėtingas automatas – būtent – aplinka. Tačiau reikia pastebėti, jog sudėtingas automatas nebūtinai turi gaminti sudėtingas struktūras. Kartais netgi atsitiktinai surinktas Turingo automatas gali gaminti elementarias struktūras.

Reikėtų vengti labai rūpestingo struktūros ir modelio sudėtingumo nustatymo bent jau iki tol, kol jie abu labai skiriasi ir ypač kol dar nėra iki galo surasto optimalaus sistemos modelio. Kaip tik čia išryškėja dar ir kitas modeliavimo aspektas – sudėtingumas gali būti susijęs ne tiek su paties objekto apimtimi, kiek su tuo, kad modelis neatitinka objekto. Tai savo ruožtu apeliuoja į subjekto (stebėtojo) vaidmenį identifikuojant sistemos sudėtingumą, t.y. į jo patirtį ir gebėjimą konstruoti adekvatų sistemos modelį. Išties sistema gali atrodyti sudėtinga tol, kol nerastas jos adekvatus aprašymas. Pavyzdžiui, modeliuojant deterministinį chaosą su jo nenumatomumu ir egzotiškais geometrinėmis struktūromis visiškai nepateisinama naudoti vien tik tiesinius stochastinius procesus.

Deja, visi šiuo metu žinomi sudėtingumo matai turi labai siaurą taikymo sritį ir juo labiau nėra vienintelio sudėtingumo identifiktoriaus, analogiško sistemos dezorganizaciją apibūdinančiai entropijai. Todėl čia tenka naudotis įvairių disciplinų tyrimo įrankiais – tikimybių ir informacijos teorija, informatika, statistinė mechanika. Galų gale sudėtingumas išryškėja įvertinus visą modelių grupę ir gali būti išreikštas vienokiais ar kitokiais skaičiais, o gal net ir funkcijomis. Iš tikrųjų būtų tam tikras prieštaravimas, jei kieno nors surasta vienintelė „sudėtingumo funkcija“, galėtų įvertinti tiek daug skirtingų objektų ir pati nebūtų sudėtinga!