

# KOMPLEXITÁS-ELMÉLET

Vicsek Tamás

az MTA rendes tagja, tanszékvezető egyetemi tanár,  
ELTE TTK Fizika Tanszékcsoport, Biológiai Fizika Tanszék – vicsek@angel.elte.hu

Egy 1987 tavaszán a Stanford Egyetem parkjában sétálgató jó nevű, modern gondolkozású közgazdász, Brian Arthur, megszólította az akkor már közgazdasági Nobel-díjas Kenneth Arrow, és megkérdezte, volna-e kedve pár hónap múlva előadást tartani *mode-locking* elméletéről Santa Fében. Amikor a meglepett Arthur érdeklődni kezdett a tervezett előadásorozatról és a helyszínről, kiderült, hogy a festői Rocky Mountains hegyvonulatai között, közel a Los Alamos-i kutatóintézethez (ahol annak idején az atombombát kifejlesztették), az egyébként kellemes üdülővároskaként ismert Santa Fében létrehoztak egy újszerű intézetet, ahol sajátos találkozókat terveztek tartani. Arrow tíz közgazdászt, a szintén Nobel-díjas fizikus, Philip Anderson tíz fizikust hívott meg, hogy megvitassák a fizika és a közgazdaságtan kapcsolatát.

A kis magánvállalkozásként működő Santa Fé-beli intézetet nem sokkal korábban már eleve olyan, általuk komplexnek (magyarul összetettnek) nevezett rendszerek megértése céljából hozta létre néhány nagyon neves tudós (köztük elsősorban Murray Gell-Mann, Nobel-díjas részecskefizikus, a kvarkok „fetalálója”), amelyek legfontosabb tulajdonsága, hogy sok, erősen kölcsönható részből állnak. Ez a definíció – talán szándékosan – nem túl precíz, és a komplex rendszerek meghatározása azóta is vita tárgya. Mindenesetre, 1987 táján beindult egy nagy részt fizikusok kezdeményezte folyamat, amelynek eredményeképpen ma már szo-

kás utalni a címben említett komplexitás elméletre, még ha ilyen – és ezért az idézőjel a címben – egyelőre valójában nem is létezik.

Létezik azonban az igény, hogy az emberiség minél kvantitatívabb módon tudja kezelni az életét közvetlenül meghatározó folyamatokat. És ezek a folyamatok bizony nagyon összetettek, bonyolultak, kimenetük nehezen megjósolható. Nagyon sokáig nem is lehetett komoly reménnyel elméleti úton kezelni a komplikáltan összetett rendszereket, de az elméletek fejlődésével, valamint a számítógépek megjelenésével olyan új dimenziók nyíltak meg, amelyek már sikerrel kecsegtettek.

Az út azonban röggös, sőt, már a kiindulás is problematikus, nincs a szempontunkból való komplexitásán igazán jó definíciója (erre utalt az első mondatok egyike abban a *Science* mellékletben, amelyik három évvel ezelőtt a komplexitásról szólt – *Science*. Complex Systems. 1999. április 2. Vol. 284 Num. 5411). Azt körülbelül sejtjük, hogy milyen rendszereket sorolnánk a komplex rendszerek kategóriájába, ilyenek például a turbulensen kavargó folyadék (időjárást meghatározó légáramlatok), az adott hálózatba összekapcsolt, kommunikáló számítógépek együttese vagy a csapatosan mozgó élőlények. De az egyes összetevők bonyolultsági fokán feljebb haladva, ide tartoznak az embercsoportok (mondjuk egy iskola diákjai), illetve talán a sor végén, az emberi társadalom. A gazdaság is valahol ebben a

sorban van, a kölcsönható egységek hol az egyes emberek, hol a vállalatok, a kérdés-felvetés jellegétől függően.

Az összetettség általában valamiféle hierarchiát feltételez. A rendszer attól lesz bonyolult, hogy a hierarchia egy adott szintjén lévő egységek kölcsönhatnak. A komplex rendszereket az teszi olyan érdekessé, hogy a részei közötti kölcsönhatás eredményeképpen a részek viselkedése oly módon változik meg, hogy az egész rendszer minőséileg új, a részek tulajdonságaitól eltérő viselkedésmintát követ. Kicsit másképpen: pusztán a részek vizsgálatából nem jósolható meg az egész rendszer viselkedése, a globális tulajdonságok új törvényszerűségeket követnek.

A fizikában a komplex rendszerek egyik paradigmája a turbulens áramlás. Itt, egy folyadék áramlásán belül is már több összetettségi fokozatot találhatunk. Míg a folyadék molekulái, egyenként tekintve őket, a köztük ható egyszerű fizikai erőnek megfelelő módon egymással ütköző, nagyrészt sztochasztikus pályát követő részecskék, addig egy „folyadék-darab” (a folyadék egy meghatározott tömegű, kompakt része) már többnyire *simán*, folyamatos, determinisztikusan áramlik. Legalábbis egy adott szinten nézve, mert a nagy kiterjedésű, gyors áramlások turbulensek, különböző méretű és különböző irányba forgó örvények összetett kombinációi. Az örvények kölcsönhatása már bonyolult, például képesek megsemmisíteni vagy erősíteni egymást, és a kialakuló áramlás – ezt tapasztaljuk, amikor borús időt jeleztek, és mégis a nap süt – nehezen megjósolható. De míg tíz éve a London környéki szuperszámítógép huszonnégy óra alatt csak egy órára előre tudta megjósolni Európa időjárását (másnapra számított ki az előző napi időjárás), addig ma napokra előre ad megbízható becsléseket.

Bár nem létezik egyesített komplexitás-elmélet, azért van néhány kulcsfogalom,

amelyekkel kapcsolatba szokták hozni. Hármat említenék meg ezek közül.

1.) Szokás hangsúlyozni, hogy a komplex rendszerek jellemző tulajdonsága az önszerveződés. Ha egy ilyen rendszert valamilyen egyszerű kiindulási állapotban magára hagyunk, akkor benne spontán szerveződési folyamatok indulnak meg, amelyek eredményeképpen meghatározott, korábban a rendszerben meg nem levő, és a részeire önmagukban nem jellemző struktúrák jönnek létre. Ide tartozik többek között az egyensúlytól távoli, például a bonyolult hópehelyek kialakulásához vezető dendrites kristályosodás.

2.) A komplex rendszerek fontos aspektusaként említem meg, hogy rendszerint hozzájuk rendelhető egy hálózat. Abban a rendkívül bonyolult helyzetben, amelyben nagyszámú, specifikusan kölcsönható rész van jelen a rendszerben, az egyik legegyszerűbb megközelítés a gráfelméleti leírás. Ahelyett, hogy a teljes dinamikát íránk le, első közelítésben csak feltérképezzük a kölcsönhatások hálózatát. Megmutatták, hogy már ennek a statikus hálózatnak, vagy ahogy mondani szokták, gráfnak a topológiája is rejt néhány nemtriviális, újszerű érdekességet a gyakorlati rendszerek egy nagy családjára vonatkozóan. Az ilyen gráfoknak sztochasztikus, de korrelált mátrixok felelnek meg, hasonlóan ahhoz, ahogy számos fizikai (például kvantummechanikai, magfizikai) rendszer képezhető le véletlen mátrixokra.

3.) Van egy nem túl jól meghatározott fogalom, amit ebben a kontextusban szintén említeni szoktak: a káosz peremén való létezés. Úgy tartják, hogy az *érdekes* viselkedésnek van egy ilyen, a komplex rendszerekre jellemző fajtája: a rendszernek van egy állapota (illetve más esetekben úgy fogalmazzuk, hogy előszeretettel tartózkodik egy olyan állapotban), amelyik köztes a teljesen rendezett és a teljesen kaotikus között. A fizikában ilyen például a következő átme-

net: kristály (rendezett), folyadék (rendezetlen), és ezek között, a káosz peremén van a fázisátalakulási pontban uralkodó komplex állapot, amelyik sem az egyik, sem a másik.

Ez utóbbi szemponthoz tartozik az összetettségnek vagy bonyolultságnak egy képies interpretációja is. Képzeljünk el három rajzot egy-egy négyzet alakú keretbe foglalva. Mindhárom tartalmazzon sok pontot, de különbözőféleképpen. Az *első (A) ábra* tartalmazza a pontokat szabályos (például négyzet-) rácsba rendezve (mint kristályokban a molekulák). A harmadikban (C) legyenek a pontok teljesen véletlenszerűen elszórva (hasonlóan a gázokban levő molekulákhoz). A középsőben (B) pedig a pontok legyenek valamilyen komplikált (például szabálytalan, önmagát metsző) görbe mentén elhelyezve (ez jelképezheti például egy anyag különböző tulajdonságú tartományai közötti határvonalat). Vajon melyik ábra a legösszetettebb? Az még eléggé nyilvánvaló, hogy az A ábra a legegyszerűbb, a pontok egy nagyon primitív szabály szerint sorjáznak a papíron. Első pillanatra az utolsó (C) ábra egyszerre tűnik a legbonyolultabbnak és a legegyszerűbbnek is: egyszerű, mert a szabály, amelyik a pontok elhelyezését meghatározza, nagyon triviális: minden új pont koordinátája véletlen-

szerű, független az összes többiétől. És mégis; mint közismert, egy ilyen teljesen véletlen ponthalmazban rejlő információ a legnagyobb, azaz egy ilyen ponthalmaz pontos reprodukciójához van szükség a legtöbb adatra. Ezen esetek között van a B ábra, amelyik nem egyszerű, de valamiféle törvényszerűséget tartalmaz, a pontok egy vonalgeomolyag mentén, bizonyos feltételeket követve helyezkednek el. A rendezett A és a teljesen rendezetlen C ábra tehát algoritmikusan egyszerű (primitív szabály segítségével előállítható), míg a B ábra információtartalom (reprodukálhatóság) szempontjából középen van, algoritmikusan viszont a legbonyolultabb; ez a legösszetettebb ábra.

Összefoglalva: a bonyolultság elemzése során az egyik fontos elem a komplexitás fogalmának megértése. A fizikustársadalom krémje, tudatosan meghaladni próbálván a korábbi fizikusi mentalitást, de maximálisan építve az előző szaktudományos eredményekre, kezdeményezte a komplex rendszerek vizsgálatát. Egy hosszú út elején már sok érdekes összefüggésre bukkantak.

Kulcsszavak: *önszerveződés, hálózatok, káosz, információ, algoritmikus komplexitás, turbulencia, rendezetlen, Santa Fé Intézet*

