

# A KOMPLEXITÁS UNIVERZÁLIS MODELLJEIRŐL: LEHETŐSÉGEK ÉS HATÁROK

Interjú Néda Zoltán fizikussal

*A számítógépes, statisztikus kutatási módszerek fejlődésével az utóbbi évtizedekben a fizika határterületeinek kutatása nagy lendületet vett. A különféle hálózatokra épülő komplex rendszerek modellezése révén biológiai, társadalmi vagy akár gazdasági rendszereket tudunk tanulmányozni: a „big data”, azaz a nagy mennyiségű és gyors ütemben változó adatok elemzésével matematikai jellegű törvényszerűségeket fogalmazhatunk meg. A társadalmi fizika (szociofizika) az embertömegek viselkedésének különféle aspektusait kutatja, ezzel szoros összefüggésben a gazdasági fizika (ökonofizika) a gazdasági jelenségeket próbálja megérteni és modellezni a statisztikus fizika módszereivel.*

*A BBTE Magyar Fizika Intézetében Néda Zoltán irányításával számos érdekes kutatási eredmény született az utóbbi években a kollektív jelenségekkel és komplex rendszerekkel kapcsolatban. Néda Zoltán kutatási területe az interdiszciplináris alkalmazású statisztikus fizika, ezen belül is a társadalmi jelenségek statisztikus fizikai megközelítése érdekli.*

– *Miért kezdte el komplex rendszereket kutatni, és számodra miért érdekes ez a kutatási terület?*

– A komplex rendszerek meghatározása már önmagában sem egyszerű, mert egy nagyon tág fogalommal van dolgunk: általában azokat a rendszereket értjük ez alatt, amelyek a kezdeti feltételek függvényében sokféle, számos esetben nem várt, meglepő viselkedésekre képesek, és ezek között átjárhatóság van. Ide tartoznak a



**A cél éppen ez lenne,  
hogy univerzálisan  
alkalmazható modellek  
segítségével egységesen  
megértsük a biológiai,  
társadalmi vagy  
gazdasági  
rendszerekben  
tapasztalható kollektív  
viselkedések lényegét.**

fázisátalakulások (fagyás, olvadás vagy párolgás), kaotikus viselkedések, a mintázatok kialakulása, továbbá a kollektív viselkedések nagy része, mint például a természetben a rajzás vagy a szinkronizáció. A statisztikus fizika által vizsgált komplex jelenségek forrása a rendszerben levő egyedek közti kölcsönhatás, amelynek a következménye az, hogy olyan jelenségeket figyelhetünk meg, amelyek nem értelmezhetők direkt módon az egyének tulajdonságaiból. Ami engem leginkább érdekel, hogy megértssem az átmeneteket az egyik lehetséges kollektív viselkedési formából a másikba, egyszerű analitikus vagy számítógépes modellekkel.

– *Mióta végeznek ilyen jellegű kutatásokat, és miért népszerű manapság a komplex rendszerek kutatása?*

Mivel a fizika kísérleti tudomány, szüksége van minél több mérési adatra, amelyek visszaigazolnak egy tesztelhető elméleti modellt. A komplex rendszerek kutatása akkor vált népszerűvé, amikor az ezredforduló táján a számítógépek elterjedése révén megjelentek az elektronikusan rendelkezésre álló adatok. Az ilyen jellegű kutatások berobbanását a digitalizált formában elérhető, nagy mennyiségű adatok tanulmányozhatóságának a lehetősége idézte elő. Másfelől, a számítógépen tárolt digitalizált adatok nemcsak az általam említett komplex rendszerek kutatását, hanem az interdiszciplináris területek vizsgálatát is lehetővé teszik, például a társadalmi és közgazdasági jelenségek jobb megértését, a hálózati kapcsolatok kutatását is elősegítik. A fizika ekkor kezdett mélyebben belemenni a biológiai rendszerek kutatásába is: a biológiában hirtelen nagyon sok adat vált elérhetővé, amivel a biológusok nem tudtak mit kezdeni. A közgazdasági jelenségekről is nagyon sok adat elérhető, ami manapság egy aranybánya a fizikus számára, főleg, ha számítógépes és statisztikai módszerekkel dolgozik.

– *Szociálfizikával és gazdasági fizikával, ugyanakkor biofizikával is foglalkoztál már. Van-e valami közös ezekben a komplex rendszerekben, amelyek eltérő területeken alakulnak ki?*

– A cél éppen ez lenne, hogy univerzálisan alkalmazható modellek segítségével egységesen megértsük a biológiai, társadalmi vagy gazdasági rendszerekben tapasztalható kollektív viselkedések lényegét. Van pár alapmodellünk a fizikában, ilyen például a rendszerek időbeli alakulását leíró evolúciós egyenletek, ezek alkalmazása révén első közelítésben megérthetők a biológiai vagy közgazdasági rendszerekben levő univerzális statisztikák. Az alapmodellekhez sorolnám a hálózati modelleket is, például az Erdős–Rényi-modellt vagy a Barabási–Albert-modellt, amelyek jól alkalmazhatók a biológiában és a közgazdaságban is. A módszerek és modelljeinkben az a szép, hogy átvihetők egyik tudományterületről a másikra. Ha ilyen modellekben gondolkodunk, akkor átjárhatóvá válnak a különböző tudományterületek, át tudunk lépni biofizikai, szociálfizikai vagy akár a közgazdasági fizikai alkalmazásokra is.

– *Hol vannak az alkalmazhatósági határok, vannak-e olyan rendszerek, amelyek nem modellezhetők?*

– A modelljeink leegyszerűsítik a valóságot, azaz a valóság egyik vetületét ragadják meg, és nem biztos, hogy adott esetben megfelelően írják le a lényegét. Azokban a rendszerekben lehet jól alkalmazni a fizikát, ahol sok hasonlónak tekinthető egyednek a kölcsönhatása jelenik meg, és ennek következtében észlelünk valamilyen komplex folyamatot. Például a fizika nem tudja leírni az emberi viselkedést az egyén szintjén: a statisztikával nem fogom megérteni a gondolatok eredetét, a motivációkat, hogy miért cselekszik valaki úgy, ahogyan cse-

lepszik. Ehhez más tudományterületekhez kell fordulni, ilyen feladatokra nem alkalmasak a modelljeink. Azokat a kérdéseket, problémákat tudjuk aránylag jól kezelni, amikor az egyed szerepe elvész a sokaságban, és a közöttük levő kölcsönhatás a fontos, de sok ilyen feladat van a fizikán kívül is a kiterjedt biológiai vagy közgazdasági rendszerekben.

– *Miben különböznek, illetve miben hasonlítanak a kutatásaid a Barabási Albert-László kutatásaihoz?*

– Vannak közös elemek, egy időben dolgoztunk is együtt, de mostanság eltérnek a módszereink. Barabási Albert-László azzal az elgondolással vált népszerűvé, hogy egy komplex rendszert legegyszerűbben a hálózatok oldaláról lehet megközelíteni. Az elképzelés alapja, hogy a hálózatok a komplex rendszerek csontvázát képezik, és ha ezeket megértjük, a komplex rendszereket is le tudjuk írni. Nekem az a célom, olyan modelleket hozzak létre, ahol a matematika segítségével meg tudjuk érteni a rendszerben levő karakterisztikus eloszlásokat. Nem a hálózati modellek, hanem a rendszer alakulását leíró dinamikai egyenletek révén közelítem meg a komplex rendszereket.

– *Az utóbbi években közgazdasági problémák – például vagyoneeloszlások és jövedelemeloszlások – fizikai modellezésével foglalkoztál. Mi vezetett erre a területre, és milyen eredményeid voltak?*

– Amikor egy feladatot kiválasztok, akkor az vezérel, hogy megközelíthető legyen analitikus modelljeinkkel, és jó minőségű, kimerítő jellegű adatokat tudjunk beszerezni. Ebben különbözik a nézőpontunk és a módszerünk a szociológusok vagy közgazdászok módszereitől, hiszen a fizikusoknak általában nem elegendő a statisztikai, populációs minták alapján létrehozott adat, hanem az összes egyed szintjére lebontott adatokkal szeretünk dolgozni. Ha például jövedelemeloszláshoz vezető dinamikát akarom modellezni Kolozs megyében, nekem, mint fizikusnak, ideális esetben a megyében élő összes egyén jövedelemadatára szükségem van. Ilyen adatok beszerzése korábban lehetséges volt, ma már a GDPR miatt nem könnyű feladat. A szociológus vagy közgazdász megelégszik egy reprezentatív mintával, ami akár ezer ember jövedelmének az eloszlására terjed ki. Egyébként a közgazdaság terén nemcsak vagyon- és jövedelemeloszlást, hanem például a tőzsdei indexeknek a fluktuációját is vizsgáltuk, éppen azért, mert a tőzsdeindexek változására akár több száz éven keresztül perces felbontású adataink vannak, és ezekkel megfelelően tudjuk tesztelni a modelljeinket.

A módszereink kutatásának folyamatában az első lépés a jó felbontású adatok megszerzése. A jövedelmet könnyű mérni az adózási adatok alapján, erre rendelkezésre álltak az adóhivatal adatbázisai. A vagyon nehezebben megközelíthető fogalom, mert sok komponense van, és ezeket közvetlenül nehéz mérni, de nem lehetetlen. A közgazdasági interdiszciplináris kutatások felé az hajtott, hogy nagyon sok gazdasági jellegű adat vált elérhetővé manapság, és ezekre tudjuk alkalmazni a statisztikus fizika módszereit. A vagyoneeloszlás például ősi probléma, Vilfredo Pareto olasz közgazdász már a 18–19. század fordulóján rájött, hogy a vagyon eloszlása a társadalomban nem egy klasszikus normál eloszlás, hanem egy hatványfüggvény szerint írható le, és ebből adódik, hogy kiélezett különbségek vannak gazdagok és szegények között. A híres Pareto-törvény szerint a társadalomban a népesség 20%-a birtokolja a vagyon 80%-át. Ez a jövedelem eloszlásában is így van, és igazolni is tudjuk ezt a rendelkezésre álló adatok alapján. Ami a munkáinkban igazán jelentős előrelépés az eddigi modellek-

hez képest, hogy a teljes eloszlás görbét le tudtuk egységesen írni ugyanazon modellnek az alkalmazásával a vagyon és a jövedelem eloszlására. Korábban a közgazdászok és fizikusok csak bizonyos tartományokban tudták ezen eloszlásfüggvényt megközelíteni: a rendkívül gazdagok tartományban hatványfüggvénnel, a közepes és kis vagyontartományokban exponenciális viselkedéssel, a nagyon kis vagyonoknál pedig gammaeloszlással. A különböző kategóriákra különböző modelleket használtak. Fizikusi nézőpontból ez nem volt megfelelő, ezért kidolgoztunk egy átfogó elméletet a budapesti Wigner Kutatóközpont tudományos tanácsadójával, dr. Biró Tamással (a véletlen növekedési és lenullázási modellt), amelynek segítségével a három tartományt egységes eloszlásfüggvénnel közelítettük meg.

*– Lehetnek-e konkrét alkalmazásai a komplex rendszerekre vonatkozó kutatási eredményeknek?*

– Alapjában az a célunk, hogy megértsük a világban zajló folyamatokat, és további kutatások alapját fektessük le, a hasznosíthatóság által vezérelt témakiválasztás inkább mérnöki gondolkodást takar. A tőzsdeindex-kutatásokkal sem gondoltunk alkalmazhatóságra, csupán az univerzálisan észlelhető karakterisztikus eloszlásokat és fluktuációkat szeretttük volna megérteni. Ez azonban nem zárja ki azt, hogy ezen eredmények birtokában a tőzsdén talán pénz is lehet szerezni. Sok fizikust alkalmaznak a brókercégek is, hogy az univerzális törvényszerűségek birtokában specifikus esetekben előrejelzést is tudjanak adni.

A vagyon- és jövedelemeloszlásban mindenki számára nyilvánvaló, hogy erős társadalmi egyenlőtlenségek mutatkoznak meg. Modelljeinkkel meg tudjuk magyarázni, hogy miben keresendő ezen egyenlőtlenségek forrása, és mivel lehet ezeket szabályozni. Egyértelmű számunkra, hogy az egyenlőtlenségek forrása, a multiplikatív növekedés, ami az úgynevezett Máté-elvnek a kifejeződése, mi szerint a gazdagabb egyén gyorsabban gazdagszik. A növekedés általában azzal arányos, ami pillanatnyilag van. A multiplikatív növekedést megfelelő adórendszerrel lehet megfékezni, de persze ez manapság már közhelynek számít, a politikusok is tudják, és nem feltétlenül a fizikusok bukkantak modelljeikkel erre az eredményre. Ami új azonban a fizikusi megközelítésben, hogy az általunk kifejlesztett analitikus modellekkel tanulmányozhatóvá válik, hogy milyen következménye lesz annak, ha megváltoztatjuk a rendszerben meglévő társadalmi törvényeket.

*– A világvárvány terjedésére milyen modellek léteztek, és mennyire voltak ezek valóságok?*

A járvány kitorérésekor kifejezett verseny indult a pandémia terjedésének modellezésére. Amikor megjelentek az első jelzések arra vonatkozólag, hogy globálisan terjedni fog a vírus, a fizikusok százával kezdték gyártani a cikkeket, amelyek a terjedés modellezéséről szóltak. De nemcsak a fizikusok, hanem teljesen amatőrök is kezdtek játszódzni a modellekkel, s a politikum is sokszor megpróbált segítséget keresni az előrejelzésekben a politikai döntések indoklására. A járvány kirobbanása után a komplex rendszerekkel dolgozó fizikusok körében hamarosan világhossá vált, hogy nagyon sok az ismeretlen ebben a történetben: meg tudjuk érteni és modellezni tudjuk a járványterjedés univerzális vonatkozásait, de a rendszer komplexitása miatt nem készíthetünk megbízható előrejelzéseket. Nem ismerjük pontosan a szociális hálókat, amin a vírus terjed, az emberek mobilitását, illetve a mobilitást korlátozó hatósági intézkedéseket, amik állandóan változtak. A vírus önmaga is állandó és gyors változáson ment keresz-

tül, a társadalom oldaláról meg az intézkedések állandóan változtak. A fizikusok felhagytak tehát azon próbálkozásokkal, hogy megjósolják azt, hogyan fog nőni a fertőzöttek száma, vagy mikor lesz vége a járványnak. Példaként itt az időjárás-előrejelzést hoznám fel. Az atmoszféra tulajdonságait nagyon pontosan és jó felbontással mérjük, az atmoszférában levő fizikai folyamatokat régóta tanulmányozzuk, és úgy gondoljuk, hogy ezeket jól értjük. A rendszer komplexitása miatt azonban manapság még a legmodernebb szuperszámítógépek segítségével sem tudunk néhány napnál hosszabb előrejelzést készíteni, és ezt mindenki számára világos. Miért várnánk el tehát, hogy egy jóval komplexebb és kevésbé ismert probléma esetén pontosabban tudjunk előrejelzést adni?

– *Számos kutatásban vettél részt, melyikre vagy a legbüszkébb?*

– Nehezen tudom eldönteni, de talán a szinkronizációs jelenségeknek a kutatása hozta a tudományos közösségben a legelismertebb eredményeket. Elég sok rendszerben kutattuk ezt a típusú meglepő kollektív viselkedést. Azért meglepő jelenség ez, mert az úgynevezett közjó érdekében az egyes egyedek feladják saját alapvető tulajdonságaikat: ha oszcillátoraim vannak, akkor mindegyiknek más a saját frekvenciája, de a kölcsönhatásuk azt eredményezi, hogy mindenki felvesz egy közös, általában a sajátjától különböző frekvenciát. Rengeteg példa van erre természeti vagy emberi szociális rendszerekben. Újabban a gyertyalángok és a felszálló gázoszlopok szinkronizációját kutattuk kísérletileg és elméletileg is. Ezekre a rendszerekre – például a vastaps kialakulására – néhány önálló modellt sikerült kidolgoznunk.

– *Mit tud kezdeni egy fizikus a véletlen fogalmával?*

– A véletlennek több aspektusa is van a fizikában. A statisztikus fizika arra alapszik, hogy a sokrészecske-rendszerek leírása könnyebben megvalósítható, ha fenomenológiailag egy véletlenszerűnek tekintett folyamattal helyettesítjük a rendszerben levő nagyszámú determinisztikus kölcsönhatást. A klasszikus fizikában azonban rigorózan nem jelenik meg a véletlen, a kvantummechanika hozza be a véletlent a fizikába a mérési folyamat révén. A kvantummechanika legmeglepőbb eredménye szerint, amikor mikroszkopikus szinten mérünk egy fizikai mennyiséget, a mérés során a rendszer véletlenszerűen választja ki a lehetséges állapotai közül az egyiket. Ha ez nem lenne, a világunk determinisztikus lenne, s igaz lenne a descartes-i elv, ami szerint, ha egy adott pillanatban ismerem minden paraméterét a világegyetemnek, akkor az időben következő állapotok is pontosan előrejelezhetők. De a kvantumfizika ennek ellentmond, s itt jelenik meg nemcsak fizikai, hanem filozófiai problémaként is a valós véletlen. Manapság úgy gondoljuk, hogy ez összekötődik egy adott szinten a gondolkodás megértésével. Ameddig a véletlent nem fogjuk megérteni, addig a gondolkodásunkat sem tudjuk megérteni. A kognitív jelenségek megértése, a véletlen és a mérési folyamat összekapcsolódik. Valahol a neurotudományok és a kvantumfizika határán fog szerintem bekövetkezni egy érdekes áttörés, ha megértjük a valós véletlen hátterét.

– *Manapság sokan beszélnek arról, hogy a komplex rendszerek a fejlődésük során eljutnak arra a pontra, amikor már törékenyek, sebezhetők lesznek, és ezt a jelen társadalmi és gazdasági rendszereire is ki lehet vetíteni. Mit gondolsz erről?*

– A jelenlegi fejlődés fenntartásához minden szinten szükséges az exponenciális növekedés, ami a már említett széles körű multiplikatív növekedési folyamatoknak az eredménye. A gazdasági folyamatok mind erre épülnek annak el-

lenére, hogy tudatában vagyunk annak, hogy az exponenciális növekedés veszélyes, hiszen ez rendkívül gyors, és ezáltal fenntarthatatlan a véges erőforrások birtokában. Ezen folyamatokat próbáltuk mi is leírni a nemrég kidolgozott növekedés és lenullázási modellünkkel: a növekedés általában egy adott ponton összeomlik, és elkezdődik egy újabb növekedés. Ezeket a folyamatokat az élet számos területén tapasztalhatjuk, és nemcsak a társadalmi és gazdasági, hanem biológiai, sőt az élettelen fizikai rendszerek esetén is nagyon általánosak.

**Kérdezett Gyórfy Gábor**

