

*Giorgio Parisi: A seregélyek röpte. A komplex rendszerek csodái. Park Könyvkiadó, 2023; ISBN:9789633558621*

A szerzőről: elméleti fizikus és a kvantumelmélet professzora a római Sapienzia Egyetemen. Klaus Hasselmannnal és Syukuro Manabeval megosztva kapták a 2021-es fizikai Nobel-díjat.

A *Libri*-ajánló remek részlete: „Önmagukat látszólag minden törvényszerűség alól kivonó kísérleti valóságok, magát a tudóst is meglepő felfedezésekhez vezető kutatások, a fizikai és matematikai intuíció felvillantása – ez az a világ, amelyet Giorgio Parisi több mint ötven éve kutat. A részecskékkal kapcsolatos úttörő felfedezések, szenvedélyes érdeklődés az olyan rejtélyes jelenségek iránt, mint az állapotváltozások, a 'spinüvegek' és a seregélyek röpte, a gondolatok születésével kapcsolatos elmélkedések, a tudomány társadalmi szerepét firtató eszmefuttatások – ez a könyv tematikai sokféleségével izgalmas utazás egy olyan fizikus zseniális elméjében, aki az összetett rendszerek törvényszerűségeit keresi, mert az egyszerűek mindig is unalmasnak tűntek a számára.” Még inkább azért, mert a világunk összetett rendszerek sokban összefonódó halmaza, így Parisi valójában a megértéséhez visz közelebb – a könyve révén minket is. (Kiemelések a recenzió szerzőjétől.)

Folytassuk ezúttal néhány jellemzővel, amelyekkel a *Penguin Co UK* indítja a recenzióját e könyvről:

„Az ember, aki madarakat nézett, és felfogta a világegyetem csodáit... E könyv ad némi szédítő betekintést, milyen érzés lehet egy csúcskategóriás karriert befutni a fizikában.” – *Daily Telegraph*

„Az olasz fizikus a komplex rendszerek ördögien trükkös elméletét madarak és autóbusz-utazások példáin át mutatja meg, arra törekedve, hogy a tudománynak ezt az ágát érthetővé tegye mindenki számára.” – *Observer*

„Ebben a nagyszerű és mélyen elgondolkodtató könyvben Parisi egy gobelint sző tapasztalatokból és eszmékből, amely összeköti a tudományágakat, és felkészít bennünket, hogy értékelni tudjuk a tudomány szépségét, fontosságát és kulturális értékét.” – *Frances Arnold, Nobel-díjas*

„Egy rendkívüli tudós.” – *Carlo Rovelli* (olasz elméleti fizikus, több könyvről szóltunk már, legutóbb a Helgoland – Hogyan változtatta meg világgépünket a kvantumelmélet, Park Könyvkiadó, 2022, Iparjogvédelmi és Szerzői Jogi Szemle 2023/1. sz.)

„Parisi nagyra becsült a tudományos kreativitásáért, az eredetiségéért. Ebben a felvillanyozó kis könyvben megmutatja emberi oldalát is. A végére érve az olvasók úgy érzik majd, egy elragadó és szellemes új baráttra leltek.” – *Frank Wilczek, Nobel-díjas*

*S a Penguin ajánlójából:* „A 2021-es fizikai Nobel-díj nyertesétől egy rendkívüli ismerkedő út a korszakalkotó tudomány gyakorlatába. A világot a komplexitás alakítja. Ebben a megvilágító erejű könyvében a Nobel-díjas Parisi végigvezet a rendhagyó, ám lelkesítő munkáján, hogy megmutassa annak mikéntjét. Az út során Parisi elmélkedik a tanulságo-

kon, amelyekkel a tudományos igazságok keresésével töltött élet szolgál neki, az érdekes/értékes dolgok véletlen/váratlan felismerése képességének (serendipidity) fontosságán az új eszmék felfedezésében, a meglepő rokonságon a fizika és más kutatási területek között, és a tudomány értékén egy virágzó társadalom számára. Megmutatja a tudomány gyakorlatának alkalmazását a tényleges világban. *Részben elegáns tudományos értekezés, részben borzogatóan izgalmas intellektuális utazás, e könyv arra hív, hogy csodát találjunk a környező világban.*

A *Penguin Random House* ajánlója is idéz kritikákat. Ezekből:

„Még csak érdeklődni sem kell a fizika iránt, sem érteni hozzá, hogy értékeljük Parisi művét. Világos fogalmakat használva ír a laikus számára, nehogy úgy érezze, mintha betévedt volna egy előadóterembe, bepillantást ad a munkájába, s képet arról, miként fejlődött a tudományos kutatás az évek során. A megtévesztően karcsú kötet *erőteljes érvelésként szolgál a tudományos irodalom értéke mellett* olyan időben, amikor azt a félretájékoztatót mindinkább kétségbe vonja. Parisi könyve lépés afelé, hogy a fizikát számunkra is érthetőbbnek érezzük.” – *Associated Press* (Erre lentebb visszatérünk.)

A *Publishers Weekly* értékeléséből: „*Létfontosságú, hogy a nagyközönség lényegi ismeretekkel rendelkezzen a tudomány gyakorlatáról*” – hangsúlyozza Parisi. Idézi a klímaváltozást és a Covid19-et mint fenyegetéseket, amelyek esetében a tudomány megértése kritikus szerepet játszik a nagyközönség felkészítésében, hogy mozgósítsa magát és reagáljon. Filozofikus hangnemre váltva fejtegeti, miként születik a tudományos innováció, és azt sugallja, hogy a tudat szintje alatt végbemenő gondolkodás hozzájárul az áttörésekhez. *Nagyban sikerül érthetővé tennie olyan komplikált tárgyakat, mint a részecskefizika*, és ebben sokatmondóak a személyes anekdotái. *Ez az óda a tudományos fejlődéshez elbűvöl.*”

Az 1846 óta működő *Associated Press* ajánlója egy manapság különösen fontos vonást is kiemel: „*Parisi kiáll azért, hogy a tudományos közösség közérthetőbbé tegye a kommunikációját annak érdekében, hogy ezzel oszlassák a munkájukat körüllegő misztikus ködöt*, és elejét vegyék annak, hogy a nagyközönség irracionális és hamis információkat tegyen magáévá. A szembesülés egy tudománnyal, amelyet érthetetlen mágiának éreznek, a laikusokat irracionális hiedelmek felé taszítja. Ha a tudomány pszeudo-mágiaként látszik, akkor már miért ne válasszák a tényleges mágiát helyette?” – írja Parisi. *Könyve egy lépés a fizika olyan megjelenítése felé, amely révén az jobban érthetőnek és kevésbé mágikusnak érződik.*” S jó vagy rossz hír, affinitás szerint: az AP-recenzióban: „*Az Olvasó készüljön fel arra, hogy a könyv sok ábrát tartalmaz, amelyekkel Parisi segíteni igyekszik őt, hogy megértse kutatásai kulcsfontosságú részeit.*”

A *Telegraph* recenziójából: „A könyv újabb adalékkal járul hozzá a tudósok vallomásai örökzöld műfajához. Elbűvölő, és otthonos, ahogy egy kiemelkedő ember egy letűnt kor történeteit osztja meg. Parisi első egyetemi évét 1966-ban kezdte a római Sapienza Egyetemen, amikor a számítógépes elemzés lyukkártyák méteres fiókjainak hurcolásával – s olykor elejtésével – járt.”

Ismerkedjünk tovább a könyvvel pár részlet segítségével az interjúból, amelyet a *The Guardian* készített annak kapcsán a szerzővel.

„G: Mi készítette a megírására?

P: Az eredeti elképzelés annak leírása volt, hogyan műveljük a tudományt. Növekvőben van a tudománnyal szembeni bizalmatlanság, a Covid-tagadókkal, a védőoltás-tagadókkal, a klímaváltozás-tagadókkal. *Ennek a problémának a kezelése érdekében nagyon fontos megmutatni, miként végzik a tudósok a munkájukat.*

G: Ön azzal kezdi, hogy a seregélyek murmurációjának tanulmányozásáról ír, ami szokatlan témának tűnik egy fizikus számára. (A murmuráció a természet egyik csodája: hatalmas számú állat egyetlen nagy, tökéletesen összehangolt, tűnő alakzatban történő együttes – és nagyon látványos – kötelékrepülése a térben. Bizonyos madár és halfajok produkálják, s olyan, mintha valami közös vezérlés biztosítaná a tökéletes együttmozgást, miközben az alakzatuk halad vagy épp manőverezik – Osman P.) Miért érte meg ezt kutatni?

P: Látni akartuk, vannak-e kölcsönhatást biztosító szabályok a seregélyek között, amelyeknek betudható a kollektív mozgásuk. Ez kapcsolódott a törekvésekhez a fizikában, hogy megértsük a nagyszámú, kölcsönhatásban álló összetevőből álló rendszerek viselkedését. Az egyik probléma volt megérteni a raj háromdimenziós alakját, amelyet lehetetlen volt egyetlen nézőpontból átlátni. Világos volt a számunkra, hogy ehhez fizikusok kellenek, mert óriási mennyiségű adatot kell elemezni.

G: Ez rengeteg munkának tűnik.

P: Sok időbe és erőfeszítésbe került. A háromdimenziós képhez két kamerát használtunk egymástól 25 m távolságban, hogy kövessük minden egyes madár mozgását. Madarak ezrei voltak, és rekonstruálnunk kellett mindegyikük 3D-s pozícióját. Két szimultán képpel egyazon rajról, eltérő szögből felvéve, nem könnyű beazonosítani ugyanazt a madarat az egyik képen és a másikon. Ez volt az egyik legnagyobb nehézség.

G: Beszéljen megfigyeléseik eredményeiről!

P: Amikor a raj fordult, azt a benyomást keltették, hogy együtt, rajként fordulnak, valójában azonban egyes madarak kezdték a fordulást, mások pedig követték őket. *Képesek voltunk detektálni mindegyik madár gyorsulását* (nem kis teljesítmény! – Osman P.), és látni, hogy egyes madarak kezdenek gyorsulni vagy fordulni egy irányba, mások követik, és ez a döntés terjed a rajban. Azt is felfedeztük, hogy a rajok laposak, mint a palacsinta, inkább, mint gömbszerűek, és ez az egyik ok, amely folytán olyan gyorsan tudnak alakot váltani.

G: Az Ön munkája ördögien komplex. Kihívást jelentett közérthetően írni róla?

P: Igen, az. *Számomra nagyon fontos, hogy képekben/hasonlatokban gazdag nyelvezetet használjak.* Olykor az ismeretterjesztő könyvek szerzői képleteket írnak le. Ez sok időt megtakarít, viszont sok lehetséges olvasót elveszítenék vele, mert egy képlet, amely könnyen érthetőnek tűnik nekem, másoknak nehézséget okozhat. Ezért *valódi erőfeszítéseket igényel megkísérelni képletek nélkül írni le bizonyos komplex és bonyolult fizikai problémákat.*

G. Mondjon néhány gyakorlati felhasználási lehetőségét az Ön munkájának!

P: Egy egyenes 'leszármazott' a mesterséges intelligencia, abban az értelemben, hogy a spinüvegek terén végzett kutatás (Parisi egyik kutatási területe, egy fejezet szól róla a könyvben, és rájuk vonatkozott a Guardian előző kérdése és Parisi válasza is – Osman P.) nagyon fontos volt sok fejlesztéshez a neurális hálózatok tanulmányozásában az 1980-as és '90-es években, a neurális hálózatok pedig a modern mesterséges intelligencia alapját alkotják.

G: Vannak aggodalmi a mesterséges intelligenciát illetően?

P: Nos, világos, hogy szükséges a szabályozás. Például, az MI-k által készített képeket valamiféle szignóval kellene ellátni, hogy az emberek megérthessék, vajon azok valóságosak vagy hamisak, s ezzel elejét vegyük annak, hogy elveszítjük a kapcsolatot a valósággal. Volt egy akadémiakülálkozó a 2019-es párizsi G7 csúcson, és az egyik dolog, ami nagyon aggasztott bennünket, az MI által vezérelt fegyverrendszerek kérdése volt. A mi álláspontunk az volt, hogy ha döntés születik emberi lények meggyilkolására, azt embereknek kell meghozniuk, nem pedig gépeknek." – Parisi ezzel olyan csatarérré visz, amelyről egyelőre legfeljebb bizonytalan előképeink vannak. Szinte határtalan, mi mindenre lesznek képesek az MI-k, de az már jól látható, hogy gyorsan növekvő számú területen okozhatnak majd különféle sérelmeket a magán- szintű az üzleti szférákban, s ki tudja, még miben. Ez nyilvánvalóan szabályozásért kiállt, ahogyan az már ma is történik, a szabályozás viszont az idők kezdete óta olyan kerítés, amely a gyengébbeket megállítja, az erősek azonban, ha elegendően nagy érdek sarkallja őket, áttörnek rajta vagy megkerülik, s minél több hasznot várnak ettől, annál többet fordítanak a kérdéses szabályozás semlegesítésére. Ennek az örök rablóbandúr játéknak bizzar jövője lesz, hogy minden bizonnyal MI-k segítenek majd a vonatkozó jogalkotásban, s MI-k a velük szembeni örökös harcban.

*A mondandó íve a fejezetcímekkel és sokatmondó részletekkel:*

- „A seregélyek röpte – „[A murmurációról beszél] A végtelenségig elnézegethetnénk őket, hiszen a látvány mindig más és más, váratlan formákat ölt. A kutató azonban fura szerzet: olykor bizony még e tiszta szépség láttán is elötör belőle a szakmai elfogultság, és kérdések sokasága kavargatja a fejében. Vajon létezik-e csakugyan ez a bizonyos karmester, vagy a csoportos viselkedést önszerveződés irányítja? *Hogyan terjed az információ ilyen sebességgel a madárrajon belül?* Hogyan változhatnak ilyen gyorsan az alakzatok? Milyen a madarak sebességének és gyorsulásának eloszlása a rajban? Hogyan tudnak összehangoltan együtt megfordulni? *Elégségesek-e a seregélyek közötti egyszerű interakciós szabályok* ahhoz, hogy tagolt és változékony együttes mozgásokat alakítsanak ki – olyanokat, amilyeneket a Róma feletti égbolton megfigyelhetünk?

*A seregélyek röpte különös módon lenyűgözött, mert nemcsak az én kutatásaim vezérfonalához kapcsolódott, hanem a modern fizika sok más témájához is: valamennyi az egymással kölcsönhatásban álló, nagyszámú alkotóelemből (szereplőből) álló rendszerek viselkedését igyekszik megérteni. Ezek a szereplők a fizikában lehetnek elektronok, atomok, spinek, molekulák, mikor mik. Viselkedésük szabályai nagyon egyszerűek, együttvéve azonban jóval*

összetettebb csoportos viselkedésre képesek. A statisztikus fizika a 19. század óta ilyesféle kérdésekre keres választ: miért forr fel vagy fagy meg egy folyadék egy bizonyos hőmérsékleten; miért vezetnek jól bizonyos anyagok (például a fémek) az elektromosságot és adják jól tovább a hőt, mások meg miért szigetelők... Ezekre a kérdésekre már régen megtalálták a választ, más kérdésekre ellenben még mindig keressük őket.

*Mindezekben a fizikai problémákban kvantitatív módon megérthetjük, hogy a szereplők közötti kölcsönhatás egyszerű szabályaiból hogyan alakul ki együttes viselkedés. A nehézség az volt, hogy a statisztikus mechanika technikáit az élettelen létezőkről kiterjesszük eleven lényekre, például a seregélyekre. Az eredmények nemcsak az etológiában és az evolúcióbíológiaiában lennének érdekesek, hanem nagyon hosszú távon az embertudományokban is elvezethetnek a gazdasági és társadalmi jelenségek jobb megértéséhez. E humán területeken is nagyszámú, egymást kölcsönösen befolyásoló egyénről van szó. Meg kell értenünk az egyén viselkedésmódjai és a kollektív viselkedésmódok közötti kapcsolatot.*

• *„A fizika Rómában, úgy ötven évvel ezelőtt – Fontos, hogy a tudomány területén is megőrizzük a múlt emlékét, sőt ott különösen. Ezért fel szeretném idézni első egyetemi éveimet, és azt, hogy milyen volt azokban az időkben a fizika. Nem vagyok történész: a magam emlékeire szorítkozom. Emlékeim az elemi részecskék fizikája iránt érdeklődő elméleti fizikus emlékei.”*

Ennek során szól *a részecske kutatás dinamikájáról*: „Ma már mindannyian tudjuk, hogy léteznek kvarkok: ragasztóanyagként gluonok tartják össze őket, ezek a proton és a neutron alkotórészei, és létezik egy elmélet – a kvantum-színdinamika (quantum chromodynamics, QCD) –, amely kiszámíthatóvá teszi a tulajdonságaikat. Akkoriban ez szinte teljesen felfoghatatlan volt. A harmincas évektől fogva ismerték a protont és a neutronot, majd az ötvenes és hatvanas években fokozatosan felfedezték, hogy rendkívül sok más részecske is létezik, csak nagyon nehéz megfigyelni őket, mert nagyon rövid az átlagos élettartamuk: ez a ma barionoknak nevezett részecskék végtelen családjá, közülük csak a proton és a neutron nem bomlik el gyorsan, mert ezek a legkönnyebbek. Nem tűnt úgy, hogy a protonnak vagy a neutronnak volnának más különleges tulajdonságai is.

Abból, hogy hasonló részecskéknek népes családja létezhet, és hogy a bomlásnak különféle típusait sikerült megfigyelni – épp azokat a típusokat, és nem másokat –, arra lehetett következtetni, hogy ezek a részecskék maguk is összetevőkből állnak, és különbözőképpen összeállva különböző objektumokat hoznak létre. A kémiai anyagok szinte végtelen sokfélesége száz-egynéhány különböző atom kombinációja; az atomok atommagból és elektronokból állnak; az atommagok meg protonokból és neutronokból; de miből állhatnak vajon a protonok és neutronok? Erre nem volt könnyű a válasz, és nem volt semmi, ami világos útbaigazítást adhatott volna. 1962-ben az amerikai Geoffrey Chew forradalmi elgondolással állt elő: a bootstrap elmélettel. A szerint valamilyen módon minden részecske az összes többi részecskéből áll össze; az elemi részecskék közt ‚demokrácia’ uralkodik, egyik sem alapvetőbb a többinél.

Számos olyan elméleti iskola létezett, amely más-más jellegű elvek segítségével próbált rendet tenni a hatalmas adathalmazban: különféle szimmetriákkal, a fénysebességnél gyorsabb információátvitel lehetetlenségével és így tovább. Ezek az iskolák keveset beszéltek egymással, a céljaik korlátozottak voltak, *a bootstrap volt a legradikálisabb olyan gondolat, amely egy teljes elmélet kidolgozását tűzte ki célul.*

A hatvanas évek vége felé a dolgok szép lassan megváltoztak: új kísérleti adatok érkeztek, finomodott az elmélet, és végül felismerték, hogy a színes kvarkok és gluonok igenis magyarázatot adhatnak a kísérleti adatokra. Ez a nézőpont az 1974-es novemberi forradalommal aratott végleg sikert, amikor a pszi-részecske felfedezése és különös tulajdonságai végleg a ma ismert elmélet felé billentették a mérleg nyelvét.” A történet folytatódik, megjelenik a húrelmélet és „1974-ben Joël Scherk és John Schwarz ráébredt, hogy a húrelmélet kiindulópontként szolgálhat a gravitációs erő kvantum fogalmakkal való leírásához, bár ezzel sok részlet kicsúszik a kezünkől, és ez így van ma is. Különös, hogy az anyag elemi alkotóelemei kiküszöbölésére alkotott bootstrap filozófiája egy olyan új elmélet kiindulópontja lehetett, amely szerint húrokból áll minden, ami a világegyetemben létezik (az anyag, a fény és a gravitációs hullámok).

*A gondolatok gyakran viselkednek úgy, mint a bumeráng: elindulnak valamerre, de azután máshol kötnek ki. Ha érdekes és szokatlan eredményeket kapunk, akkor teljesen váratlan területeken is alkalmazhatóvá válhatnak.*

Napjainkról szólva: jól megértettük a proton és más részecskék tulajdonságait, *de ami a kvantumgravitációt illeti, a helyzet semmivel sem jobb, mint ötven évvel ezelőtt.* Különböző gondolati iskolák léteznek: a húrok, a hurok-quantumgravitáció (loop gravity) és így tovább. De vajon helyes-e közülük valamelyik, vagy várunk kell egy új elméleti elgondolásra, netán egy kísérletre, amely váratlan eredményeket hoz? Milyen formát ölt majd a végső elmélet? Nehéz megmondani. *Bármekkora erőfeszítéssel igyekszünk is megjósolni a jövőt, a jövő meg fog lepni bennünket.”*

- *„Fázisátalakulások, azaz a kollektív jelenségek – A fázisátalakulások ’hétköznapi’ fizikai jelenségek; olyan gyakoriak, hogy rájuk sem hederítünk. Egy fizikus szemében azonban nagyon is érdekesek: meg kell értenie őket. A 20. század első évtizedében a fizikusoknak már megvoltak az első kísérleti bizonyítékaik az atomoknak és a molekuláknak mint az anyag ’kis építőkockáinak’ a létezéséről, és ezáltal a makroszkopikus jelenségeket – például épp a víz megfagyását – megpróbálták az anyag e parányi egységeinek kollektív viselkedéséből adódó jelenségekként értelmezni.*

Mikroszkopikus szinten a fázisátalakulások leírása jóval nehezebb feladat. Tanulmányozásához meg kell értenünk az ’objektumsokaságok’ – sok atom vagy molekula, sok apró mágnes – viselkedését: itt sok olyan ’elemi dologról’ van szó, amelyeket – a hagyományos fizikánál általánosabb kontextusba helyezve őket – ’ágenseknek’ nevezhetünk: ezek kölcsönhatásba lépnek egymással, információt cserélnek, és a kapott információ szerint változtatják viselkedésüket. *A fizikában az ’információcsere’ egyenértékű az ’erőhatásokra való reagálás’*



*képességével*, de általánosságban szólva – mivel a modell a fizikától a biológián át a közgazdaságtanig sokféle kutatási területen alkalmazható – számos olyan tárgyunk van, amelyeknek a viselkedése más, többé-kevésbé hozzájuk közel eső tárgyak viselkedésétől függ, általában az elég közeliektől, mivel az egymástól túl távol eső tárgyak nem tudnak információt cserélni.

A makroszkopikus szinten mérhető fizikai mennyiségek – például a víz hőmérséklete – mikroszkopikus tényezők viselkedésétől függnnek, így a molekulák sebességétől, ezeket viszont nem tudjuk megfigyelni. (Alighanem gyakorlatilag hasonló mondható el a legtöbb sokaság viselkedésére – pl. az emberekére a gazdaság különféle terepein – Osman P.)

Aki a fázisátalakulásokat tanulmányozza, azt voltaképpen nem is az érdekli, hogy milyen hőmérsékleten és nyomáson megy végbe egy bizonyos állapotváltozás, hanem *annak inkább a mechanizmusát akarja megérteni. Miért történik meg egyszerre ez a jelenség, és épp egy ennyire specifikus ponton? Mi változik a rendszerben 100 °C-on? Mi az oka annak, hogy ha a kritikus hőmérsékletnél akár csak egy fokkal is alacsonyabb hőmérsékleten figyeljük meg a rendszert, akkor még nem érzékelünk semmit? Aztán meg miért elég csak egyfokos hőmérséklet-emelkedés ahhoz, hogy hirtelen megváltozzon a rendszer makroszkopikus viselkedése?* – Malcolm Gladwell nagyon érdekes könyvben mutatja be, hogy hasonló „billenőpont” jelenségek vannak a társadalomban, és az élet szinte minden területén: Fordulópont – ahol a kis különbségekből nagy változás lesz (HVG Könyvek, 2020): „Billenőpont (eredetiben tipping point – Osman P.), vagyis az a különleges jelenség, midőn valaminek az állapota váratlanul átbillen egy, az addigiaktól erősen eltérő új minőségbe, a stagnálásból gyorsulva terjedő 'járvánnyá' lép elő. A járvány itt természetesen átvitt értelemben értendő.”

Itt már a fizika sűrűjébe is bepillantást kap az olvasó, olyan alcímekkel, mint Első- és Másodrendű fázisátalakulások, Univerzalitási osztályok, Skálainvariancia, Renormalizációs csoport.

• *Spinüvegek: a rendezetlenség bevezetése* – „Az internet elterjedt alkalmazásaiba épített mesterséges intelligencia nagyrészt a spinüvegek elméletén és a neurális hálózatokon alapul” – ez a fejezet mottója. „*A legizgalmasabb munka egy kutatással töltött élet alatt még véletlenül is előbukkanhat: egy másfelé tartó úton haladva találhat rá az ember. Velem ez így esett meg.* A spinüvegelmélet – ezt tartják legjobb hozzájárulásomnak a fizikához – akkor született meg, amikor épp az elemi részecskékkel kapcsolatos egyik problémát tanulmányoztam. A megoldáshoz a legmegfelelőbb eszköznek egy bizonyos matematikai technika, a replikamódszer tűnt, de azt még nem ismertem. [Beleásta magát a szakirodalomba és] Elhatároztam tehát, hogy kiderítem, mennyire megbízható ez a választott eszköz.

A cikk a rendezetlen rendszerekkel és a spinüvegekkel kapcsolatos problémákról szól, olyan témákról, amelyek nagyon távol álltak az általam akkoriban tanulmányozott területtől; soha nem foglalkoztam velük. Másfelől viszont kulcsfontosságú volt megértenem, hogy az én esetemben miért nem vált be a módszer. Megvizsgáltam a modellt, újra elvégeztem az

összes számítást: helyesek voltak, de az eredmény nem volt megfelelő. Érdekes volt a dolog mélyére nézni.

A spinüvegek fémötvözetek, és arról kapták a nevüket, hogy az ötvözetet alkotó részecskék spinjének viselkedése az üvegehez hasonlóvá teszi a fázisátalakulásait. (Az üveget, sajátosságai miatt, amelyeket Parisi itt felvázol, nevezik szilárd folyadéknak is – Osman P.) Bonyolult dolog ezeknek a rendszereknek a tanulmányozása, és a legjobb ötlet minden bizonnyal az, ha megalkotjuk a valós helyzetek egyszerűbb, összefoglaló modelljét: ez segíthet abban, hogy megoldásokat találjunk. (A továbbiakban meglehetősen alapos betekintést kapunk a fizikai kutatásban alkalmazott modellezés szerepébe és problémáiba – Osman P.)

Ha be tudjuk építeni a meghatározó jelentőségű szabályokat a modellbe, akkor remélhetjük, hogy sikerül reprodukálniuk a vizsgálni kívánt jelenség néhány lényeges jellemzőjét. Ha már megszerkesztettük a modellt, és beépítettük a működését leíró szabályokat, akkor fokozatosan fejleszthetjük a rendszert. A modell, ahogy fejlődik, hoz bizonyos eredményeket. (Finomítása lényegében egy iterációs folyamatként működik – Osman P.) Ezután összegzőmodellünk szabályaiból és kezdeti adataiból kiindulva kezdődhet a munka: *a következő lépés az elmélet, azaz a szimulációk eredményeit reprodukáló matematikai struktúra kidolgozása*. Ha sikerrel járunk, akkor egy következő lépésben *megkísérelhetjük megérteni, hogy a kidolgozott elmélet miképp lehet csakugyan hasznos valós esetekben*: ha fémötvözetekről, üvegről, viaszról és sok, nagyon sok más rendszerről van szó.”

Parisi a spinüvegmodellt drámaként magyarázza, s ennek során egy érdekes megállapítással szolgál: „Részletekbe menő tanulmányok mutatták ki, hogy Shakespeare tragédiáiban az így meghatározott drámai feszültség meglehetősen alacsony a tragédia elején, nagyjából az előadás felénél hág a tetőfokára, majd fokozatosan alábbhagy a mű vége felé.” A továbbiakban elmondja, miként haladt előre a kutatásban és a lényeg megértésében. Az első témabeli tanulmánya publikálása után „[a]z igazság az, hogy egyszerűen nem értettem, mit csinálok. Rábukkantam néhány szabályra, amellyel kezelhető volt a probléma, alkalmaztam őket, és végül jó néhány lépés után olyan egyenleteket kaptam, amelyeknek volt értelmük, és – márpedig ez lényegi kérdés – reprodukálták a numerikus szimulációkból származó adatokat, és pozitív értéket adtak az entrópiára. De hogy mi történt a 'számítások közben', azt nem értettem: olyan érzés volt, mint amikor az ember sötét alagútba lép be, azután egyszer csak a túloldalon megint kijut a szabadba. Következő cikkemben az elmélet és a szimulációk eredményei közötti egyezés már azt sejtette, hogy az elméletnek lehet értelme, de hogy vajon mi, az homályban maradt. A fizikai tény, amit nem értettem, a fizikusok által rendparaméternek nevezett fogalommal függött össze.”

A kutatás folytatásának leírásából csak a logikusan egymásra épülő alcímeket idézzük:

- *Egy különös fajta matematika* – az indítása: „Mielőtt rátérnénk a fizikára, próbáljuk megérteni, milyen módosításra volt szükség matematikai szempontból. A replikamódszert, hogy működőképes legyen, ki kellett 'terjesztenünk'. A matematikai módszerek kiterjesztésének lehetősége nagyon régi gondolaton alapul: elsőként feltehetően Nicole



Oresme, a 14. század derekán élt francia püspök, matematikus, fizikus és közgazdász alkalmazta. Oresme hihetetlen személyiség volt, nyilvánvaló jeleként annak, hogy a középkor nem volt olyan sötét korszak a tudományok szempontjából, mint azt iskolai könyveink esetleg lefestették. Sok más dolog mellett, amelyek alapján képet alkothatunk Oresme adottságairól, írt egy könyvet (1360 körül!) a csillagok helyzetének a légköri fénytörés miatti torzulásáról. Persze az egészet én sem olvastam, latinul írta... Mindenetre koncepcionális szempontból helyes volt az érvelése.” A folytatás e kiterjesztés megvalósítását mutatja be, a matematikai eszközfejlesztést.

- *A fizikai értelmezés* – ebből: „Egy összegzőmodell megalkotása és megoldása egy *olyan jelenség felfedezését tette lehetővé, amelynek létezéséről nem is tudtunk*: szélesre tártuk a kapukat a rendezetlen rendszerek világa felé. A fizikai értelmezésből kiindulva sikerült eljutnunk a matematikai értelmezéshez. *A matematikai bizonyítás több mint húsz évig tartott.*”
- *A modelltől a valóságig* – vagyis a kutatás és fejlesztés legfontosabb szakasza, amelyben eldőlnek az eredmény hasznosítási lehetőségei, tudományos és/vagy gyakorlati értéke. Egy meglepő kijelentés: „A spinüvegre talált megoldás jó alapot ad a valódi üveg, vagyis az ablaküveg tanulmányozásához, amelynek viselkedését fizikai szempontból még nem értjük teljesen.” – Gondoltuk volna ezt olyan hétköznapi anyagról, mint az ablaküveg?
- *A perspektíva tágítása* – „A valóságos világ rendezetlen, és ahogy az elején már volt róla szó, sok valós helyzetet nagyszámú, egymással kölcsönhatásban álló elemi ágenssel írhatunk le. A kölcsönhatások egyszerű szabályokkal sematizálhatók, a kollektív cselekvés eredményei azonban csakugyan váratlanok lehetnek. Elemi entitások a spinek, az atomok vagy a molekulák, a neuronok, a sejtek általában, sőt a weboldalak, a tőzsdeügynökök, a részvények és a kötvények is, azután az emberek, az állatok, az ökoszisztémák összetevői és így tovább. Az elemi entitások közötti kölcsönhatások nem mindig vezetnek rendezetlen rendszerekhez. A rendezetlenség abból fakad, hogy némelyik elemi entitás nem úgy viselkedik, mint a többi, mindezekben a rendezetlen esetekben az általam megtalált matematikai és fogalmi eszköz nélkülözhetetlen a nehézségekkel való megküzdéshez.” – „Némelyik elemi entitás nem úgy viselkedik” – a közgazdaságtanban előbb Nobel-emlékdíjat hozott kidolgozójának az elmélet, hogy az emberek racionális módon viselkednek a piacokon, majd Nobel-emlékdíjat a viselkedésgazdaságtan kimunkálása, amelynek alaptétele, hogy a piaci viselkedést nem mindig az ésszerűség irányítja. Idekívánkozik annak említése, hogy egyes kiemelkedően sikeres tőzsdei befektetők az eredményeiket kifejezetten annak a stratégiának tulajdonítják, hogy a tőzsdei műveleteikkel mindig szembe mentek a nagy többség piaci magatartásával.
- *Óriások vállán* – ennek záró bekezdése: „Abból az emberi képességből kiindulva, hogy a fizikai jelenségeket vissza tudjuk vezetni a lényegi összefüggésekre, megalkottuk az elmúlt évszázadok fizikáját. *A fizika pedig olyan gazdag és ütőképes lett, hogy ismét képes*

*belevinni modelljeibe az összetettséget és a rendezetlenséget – azt, amit Galilei kénytelen volt kirekeszteni.”*

- *Metaforák cseréje fizika és biológia között* – Nyitómondata: „A tudomány kísérleteken, analitikus bizonyításokon, elméleti tételeken alapszik. A tudomány építményének alapzatát azonban intuitív okfejtések nagyszámú együttállása is alkotja. A tudományokban – akár csak a művészetekben és sok más emberi tevékenységben – az intuíció az első, a bizonyosságot csak utána érhetjük el.” S a nem kevésbé meglepő felvezetés: „Mendel 20. század eleji újrafelfedezése nyomán a génekkel azonosították az evolúció működésének fizikai rétegét; a darwini elmélet vált a biológia meghatározó paradigmájává. Érdekes megjegyezni, hogy ha egy olyan, a biológiától rendkívül távoli területet veszünk is példának, mint a kvantummechanika, annak a koppenhágai iskola által a húszas évek végére kidolgozott értelmezése sok tekintetben egybecseng a darwini szelekcióval: egy kvantumrendszer több különböző állapotban is lehet, és a kísérlet (vagy a megfigyelés) véletlenszerűen választ ki egyet a különböző lehetőségek közül.

*A biológiai evolúció, akár csak a fizikai, a darwini elméletben és a kvantummechanikában is átmege az új lehetőségek felvetődésének, majd a kiválasztódásnak a szakaszán.* A részletek persze lényegesen különböznek: a természetes kiválasztódásban az új lehetőségek véletlenszerűen merülnek fel, a kiválasztódás maga determinisztikus – a legrátermettebb marad fenn –, a kvantummechanikában viszont determinisztikusan alakul az állapot, és a mérés véletlenszerűen választ a kísérlet különböző lehetséges kimenetelei közül. *A különbségeken túl azonban erős hasonlóságok is mutatkoznak a két megközelítmódben:* lehetséges, hogy Niels Bohr, Max Born és a koppenhágai iskola más kiemelkedő képviselői fejében ott motoszkált a darwini evolúciós elmélet, és valamiképpen befolyásolta is őket.”

Újabb alfejezet: *„Metaforák, modellek és analógiák”.* „A biológiában is akadnak sokáig fennmaradó, fontos szerepet játszó metaforák. A 17. században például gépezetnek tekintették a szervezetet, amelynek nagyon kicsik az alkotóelemei, olyannyira, hogy látni sem lehet őket. A múlt század második felében, a DNS-ben kódolt információ alapvető szerepének felfedezése után bevezették a számítógép-metaforát; e szerint a fehérjeapparátus a hardver, a szoftver pedig a DNS-ben van. A metafora (szoftver: DNS és hardver: fehérjék) rendkívül sikeres volt, mert hatásos magyarázattal szolgált, és jól összefoglalta az akkori tudásszintet. A későbbiekben tisztázódott, hogy a fehérjék és a DNS közötti kölcsönhatás sokkal összetettebb, a DNS maga módosítja önmagát, az ez utáni felfedezések pedig szép lassan elavulttá tették ezt a metaforát, bár gyakran továbbra is használják.” – Ahogy A jövő emberénél idézzük, „[a]z epigenetika a környezet és az életmód lenyomata a géneken: a környezet változásai epigenetikai változásokat hoznak létre, amelyek hatással vannak a gének működésére. Az élet forgatókönyve többféle módon is előadható, és az epigenetika határozza meg, milyen lesz az előadás.” „Ma a biológiában új metaforákat láthatunk. Némelyik például a komplexitáson alapul, azon az elgondoláson, hogy ahol nagyszámú, kölcsönhatásban álló ágens

van jelen (molekulák, gének, sejtek, állatok, fajok – a tárgyalt jelenség szintje szerint), ott a kollektív kölcsönhatás eredményeképpen új jelenségek lépnek fel.”

Következik a „*Keresztmegtermékenyítés*” – az izgalmas cím mögötti tartalom felfedezését meghagyjuk az Olvasónak.

- *Hogyan születnek a gondolatok?* Sokrétű kérdés, hány Nobel-díjat is hozna teljes körű megválaszolása – hát még ha filozófiai díj is lenne? A fejezet mottója a kutatás és az alkotó elme csodája: „*A kutatómunkában rendre jóval több új kérdés merül fel, mint ahányra sikerül választ találni.*” Parisi így indít: „Honnan jönnek a gondolataink? Hogyan formálódnak egy magamfajta elméleti fizikus fejében? Milyen típusú logikai eljárásokkal dolgozunk? Nem szándékozom kizárólag a nagy gondolatokról beszélni, azokról, amelyek megváltoztatják az emberiség, a gondolkodás történetét. *Inkább azokról lenne itt szó, amelyeket 'mikrokreativitásnak' neveztek el, vagyis a mindennapi életben felbukkanó apró ötletekről.* Ezek igencsak fontosak, ha a tudomány területén előre akarunk lépni. *Számomra az ötlet egy váratlan, meglepő, egyáltalán nem nyilvánvaló gondolat.*” – Rejtő Jenő regényhőse, Wagner úr, tíz fontot kért száz helyett, mert, amint mondta, az utóbbit elképzelni sem tudta. Hasonló okok állhattak amögött, hogy amikor a '70-es évek második felében nálunk a politika felkapta és sűrűn emlegette az innovációt, sok megszólaló az ötlettel azonosította. Parisinál természetesen azt jelenti, ami valójában: egy lehetséges új kiindulópontot.

A fejezet önmagában, önmagáért is roppant érdekes. Az ötletek születésében Henri Poincaréval és Einsteinnel indít, s azzal a jelenséggel, hogy egy problémával való küszködésben „az éjszaka ötletekkel szolgál”, illetve ahogy a francia és a spanyol mondást idézi „[h]asznos konzultálni a párnával.” Érzékeltetésül csak pár mondatot emelünk ide a továbbiakból:

- „Bár nem vagyok a terület szakértője, engedtessek itt meg nekem, hogy a tudatos és a tudattalan gondolkodással kapcsolatban megosszam az olvasóval néhány gondolatomat.”
- „Az a benyomásunk, hogy szavakban gondolkodunk, mondatokat fogalmazunk meg. Ez nemcsak akkor igaz, ha másokkal beszélünk, hanem akkor is, ha csendben elmélkedünk. Ha valaki arra kérne bennünket, hogy szavak nélkül gondolkodjunk egy problémáról, teljesen tehetetlennek éreznénk magunkat: képtelenek vagyunk elménkben úgy megoldani a problémát, hogy az érvelést ne öntenénk szavakba; lehetnek azok bármely nyelv szavai, de szavaknak kell lenniük. Mindamellett a verbális alak nem merítheti ki teljesen azt, ahogyan gondolkodunk...”

Két fejezet jön még. Az első olyan kérdést tárgyal, amely a maga nemében nem csekélyebb, mint az élet értelmének keresése: „*A tudomány értelme*”. Ezt egy felettébb talányos fejezetcím követi: „*Je ne regrette rien*”, amely Edith Piaf egyik leghíresebb szononja – Nem bánok semmit sem. Remek fogás az érdeklődés felkeltésére, vajon mit hoz Parisi ezzel a címmel (különösen, hogy az első strófa vége „[j]e me fous du passé”, azaz teszek a múltra.

*Dr. Osman Péter*