

A DEMOKRÁCIA MINT A TÚLÉLÉS TÖBBMILLIÁRD ÉVES EVOLÚCIÓS ESZKÖZE¹

DEMOCRACY AS A SUCCESSFUL EVOLUTIONARY SURVIVAL STRATEGY

Csermely Péter

az MTA levelező tagja, egyetemi tanár, Semmelweis Egyetem Orvosi Vegytani, Molekuláris Biológiai és Patobiokémiai Intézet
csermely.peter@med.semmelweis-univ.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A komplex rendszerek (és hálózatos modelljeik) tanulási folyamatai, illetve az ezeket létrehozó „döntéshozatali” mechanizmusok számos tudományág igen forrongó területévé váltak. A cikk arra hoz meggyőző példákat, hogy a szerveződési szintek igen változatos formáit képviselő komplex rendszerek (így a fehérjék, a sejtek, az idegrendszer és a társadalom) mind-mind kétféle, egymástól markánsan különböző választ adnak akkor, ha 1.) a komplex rendszer egy visszatérő, ismétlődő, ismert helyzetbe kerül, ahol egy begyakorolt válasz gyors és hatékony megisméltése a cél; vagy akkor, ha 2.) a komplex rendszer egy új helyzetre kell hogy választ találjon. A begyakorolt válaszokat a komplex rendszert leíró hálózat magja kódolja, amely a hálózatnak egy központi, egymáshoz nagy élsúllyal, sűrűn kapcsolódó nóduscsoportja. Az új válaszok kialakításához azonban a hálózat periferiáján elhelyezkedő nódusok új keresztkapcsolataira is szükség van. A cikkben leírtak alapján kimondható, hogy a deliberatív demokrácia nem morális alapállás kérdése, hanem az evolúció hosszú évmilliárdjai által kikísérletezett és a biológiai rendszerekbe kódolt sikeres válaszforma.

ABSTRACT

Learning and adaptation mechanisms of complex systems (and their network descriptions) gained increasingly intensive recent attention. This paper lists a number of salient examples showing that complex systems at various levels of organization (such as proteins, cells, neuronal and social networks) all display markedly different responses in case of re-occurring and novel stimuli. Prior experience requires a fast and efficient response. This is encoded by the strongly connected nodes of the network core. Responses to novel stimuli require the novel, creative cross-links of the weakly connected network periphery. The paper demonstrates that deliber-

¹ A cikk angol változata itt érhető el: Csermely, Péter (2018): The Wisdom of Networks: A General Adaptation and Learning Mechanism of Complex Systems. The Network Core Triggers Fast Responses to Known Stimuli; Innovations Require the Slow Network Periphery and Are Encoded by Core-remodeling. *BioEssays* 40, 1, 201700150. DOI: 10.1002/bies.201700150

ative democracy is not only a moral standpoint, or a social decision making technique, but a learning strategy, which developed as the success of a billion-year evolution, and which became encoded to our cells.

Kulcsszavak: adaptáció, deliberatív demokrácia, döntéshozatali mechanizmus, hálózatok, komplex rendszerek, tanulás

Keywords: adaptation, deliberative democracy, decision making, networks, complex systems, learning

BEVEZETÉS

A bennünket körülvevő, illetve minket alkotó komplex rendszereknek a környezetük változásaihoz alkalmazkodó adaptációs (tanulási) folyamatai, illetve az ezeket létrehozó „döntéshozatali” mechanizmusok napjainkban számos tudományág igen „forrongó” területévé váltak. A komplex rendszerek egyik leírási módja a hálózatos leírás, amelyben a komplex rendszer alkotórészeit mint egy hálózat nódusait fogjuk fel, és definiáljuk a közöttük lévő kapcsolatrendszer (Csermely et al., 2013a).

Cikkemben arra fogok néhány meggyőző példát hozni, hogy a szerveződési szintek igen változatos formáit képviselő komplex rendszerek (így a fehérjék, a sejtek, az idegrendszer és a társadalom) mind-mind kétféle, egymástól markánsan különböző választ adnak akkor, ha 1.) a komplex rendszer egy visszatérő, ismétlődő, ismert helyzetbe kerül, ahol egy begyakorolt válasz gyors és hatékony megismétlése a cél; vagy akkor, ha 2.) a komplex rendszer egy új helyzetre kell hogy választ találjon. Az elmúlt néhány évben adatok sokasága valószínűsítette, hogy a begyakorolt válaszokat a komplex rendszert leíró hálózat magja kódolja. A hálózatos mag a hálózatnak egy központi, egymáshoz nagy élsúllyal, sűrűn kapcsolódó nóduscsoportja. (A hálózatos mag matematikai definícióját e közleményünkben foglaltuk össze: Csermely et al., 2013b.)

Az új válaszok kialakításához azonban a hálózatos mag „tudása” a legtöbb esetben nem elég, arra a hálózat periferiáján (azaz a maghoz szorosan kapcsolódó, de egymással nem annyira összekötött nódusok csoportjában) elhelyezkedő nódusokra is szükség van. A cikk példái szemléletesen mutatják meg, hogy új helyzet esetén a hálózat „tudásának” (szinte) egészét mozgósító válaszkeresés a biológiai rendszerek (például az agy) szintjén is igen hasonló a deliberatív (diskurzív) demokrácia sok esetben lassú, de kreatív, és az új helyzetre az adekvát választ a hierarchikusan irányított rendszernél sokkal nagyobb eséllyel megtaláló mechanizmusához.

A cikkben leírtak alapján kimondható, hogy a deliberatív demokrácia nem morális alapállás kérdése, hanem az evolúció hosszú évmilliódjai által kikísérletezett, és a biológiai rendszerekbe kódolt sikeres válaszforma. Az előző mondatban a deliberatív jelző rendkívül fontos. A deliberációnak a különböző véleményeket tisztelő, megérteni vágyó és mérlegelő magatartásformája ugyanis messze nem keverhető össze a többség „demokratikus döntésével”, különösen akkor nem, ha ez a „döntés” a vélemények és a megoldási javaslatok tényleges ismerete, megértése és mérlegelése nélkül leadott szavazatok formájában valósult meg. A leegyszerűsített jelszavak vagy a változatos módon értelmezett „identitások” alapján leadott szavazatokon alapuló döntéshozatali forma *nem* egyezik meg az evolúció során kialakult, sikeres válaszkeresés mechanizmusával, hanem annak ellentmond.

A KOMPLEX RENDSZEREK VÁLASZAI ATTRAKTOROKBA SZERVEZŐDNEK A TANULÁS SORÁN

Stuart Kauffman 1969-ben fedezte fel, hogy a komplex rendszerek válasza néhány stabil állapotba, úgynevezett „attraktorba” szerveződnek (Kauffman, 1969). Az attraktorok nemcsak stabil pontok, hanem ciklikus, illetve bonyolultabb módon állapotok egy szűkebb csoportját bejáró állapotsorok is lehetnek. Az elmúlt évtizedekben kiderült, hogy a legtöbb komplex rendszer az elérhető milliárdnyi állapotainak csak egy elképesztően szűk részében tartózkodik az idő jelentős részében, azaz csak néhány attraktora van. A fehérjék konformációi, a sejtek alapvető viselkedési formái (fenotípusai), az agyunk gondolatai mind-mind attraktoroknak tekinthetők. Ha ez a jelenség nem lenne, azaz a komplex rendszerek egymáshoz hasonló valószínűséggel állapotok milliárdjait lennének képesek felvenni, akkor nem alakult volna ki a tudomány sem mint emberi megismerési forma, hiszen nem lennének olyan megfigyeléseink, amelyeket a vizsgált rendszerek megbízhatóan reprodukálnának.

John Hopfield 1982-ben bizonyította, hogyha egy hálózatos szerkezet a Hebb-féle tanulási szabályt alkalmazza (amely a válaszban gyakran használt hálózatos nódusok közötti kapcsolatot erősíti, a többi kapcsolatot pedig gyengíti), akkor attraktorokat fejleszt ki, illetve mélyít el (Hopfield, 1982). Azóta a tanulásal attraktorokat kifejlesztő, úgynevezett „attraktorhálózatok” vizsgálatára egy egész tudományterület szerveződött.

AZ ATTRAKTOROKAT A KOMPLEX RENDSZEREKET LEÍRÓ HÁLÓZATOK MAGJA KÓDOLJA

Az elmúlt néhány évben Albert Réka és Atsushi Mochizuki csoportjából számos olyan munka jelent meg, amelyik bizonyította, hogy a komplex rendszerek attraktorait a rendszereket leíró hálózat erősen összefüggő komponensében elhe-

lyezkedő nódusok határozzák meg (Fiedler et al., 2013; Saadatpour et al., 2013). A hálózat erősen összefüggő komponense (azaz egy irányított hálózat azon nódusainak halmaza, ahol bármely nódus bármely másik nódusból elérhető) a hálózat magjával azonos.

KOMPLEX RENDSZEREK ELTÉRŐ VÁLASZKERESÉSI MÓDJA SZOKVÁNYOS ÉS ÚJ HELYZETBEN

Cikkem legfontosabb állításai a következők. 1.) A komplex rendszert érő környezeti inger a hálózat perifériájából igen gyorsan a hálózat magjába vezetődik. 2.) A komplex rendszer által korábban már ismert helyzetben a magban az inger azt a nóduscsoportot aktiválja, amelynek tagjai korábban már úgy kapcsolódtak össze egymással és a környezetükkel, hogy az erre a helyzetre adott választ kódolták. A nóduscsoport az egész hálózatot (és így a hálózattal jellemzett komplex rendszert) egy adott attraktorába billenti, amely igen erősen, igen hatékonyan és igen gyorsan mobilizálja az adott helyzetre korábban már megtanult választ. 3.) A komplex rendszer által korábban még nem ismert helyzetben a magban az inger számos olyan nóduscsoportot aktivál, amelyek a komplex rendszert különböző attraktorokba akarják vinni. Az attraktorok által kódolt válaszok egymással vetélkednek, így a komplex rendszer egészének a szintjén észrevehetően erős, gyors válasz nem alakul ki. A hálózatos magba került környezeti inger egy idő után újra a perifériára kerül, ahol a periféria olyan részeit is összekötheti egymással, amelyek egymással eddig nem voltak kapcsolatban. Az átalakuló periféria – ismétlődő inger esetén és sokszor a mag néhány nódusával együtt – részt vesz a rendszer új választ jelentő új attraktorának a kialakításában és kódolásában. Az új választ (új attraktort) kódoló perifériális nódusok belépnek a hálózat magjába, és annak részévé válnak.

Ennek az elképzelésnek a matematikai tisztaságú bizonyításán jelenleg dolgozunk. A cikkem következő részében néhány olyan példát mutatok be, amelyek erősen alátámasztják, hogy a szerveződési szintek igen változatos formáit képviselő komplex rendszerek, így a fehérjék, a sejtek, az idegrendszer és a társadalom az itt leírt módon válaszolnak ismert, illetve új helyzetekre.

PÉLDÁK KOMPLEX RENDSZEREK ELTÉRŐ „DÖNTÉSI” MECHANIZMUSAI RA SZOKVÁNYOS ÉS ÚJ HELYZETEKBEN

Az első példám a fehérjék példája. A fehérjék jelentős része esetén az információt az evolúció már korábban kódolta, azaz azok a fehérjék nincsenek már jelen, amelyek nem adtak optimális választ. A létező fehérjék sokaságára különböző módszerekkel bizonyítani lehetett azt, hogy a magjukban van egy olyan aminosavcsop-

port, amely a fehérjének az evolúció során kialakult „fogadó helyeire” (például ligand-kötő helyére, aktív centrumába, allosztérikus aktivátor és inhibitor kötő helyére stb.) érkező jeleket „begyűjti”, és igen gyorsan, igen hatékonyan, valamint igen szelektív (anizotrop) módon továbbítja. Ezzel szemben, ha a környezet bármely más aminosavval közöl energiát, akkor az az energia csak igen lassan és minden irányba egyformán történő passzív disszipációval adódik át. Olyan esetek is előfordulnak, amikor a fehérje magjának aminosavai úgy adják át egymásnak az energiát, hogy a köztük lévő aminosavakat kihagyják, és energiátranzfer jelensége lép fel. Izgalmas jelenség, hogy allosztérikus aktiváció esetén a fehérje magja tömörebbé válik, és ezzel a fehérjeszerkezetbe kódolt energiaátadás még gyorsabban, még hatékonyabban valósul meg (Li et al., 2014). Ezt a folyamatot tekinthetjük az allosztérikus aktiváció szerkezeti hátterének.

A fehérjék azonban nemcsak az evolúció során megmaradt példányaikkal tudják kódolni a környezet által igényelt válaszokat, hanem „konformációs memóriával” is rendelkeznek. Nagy öröm a számomra, hogy ennek egyik első leírását Tompa Péternek és a néhai Friedrich Péternek köszönhetjük, akik 1998-ban a prion fehérjéknek az agy memóriájának a kialakulásában való részvételét valószínűsítették (Tompa–Friedrich, 1998). Azóta a rendezetlen fehérjék egész soráról bizonyosodott be, hogy részt vesznek mind a sejtes szintű, mind az idegrendszerben kódolt memória kialakításában. A memória kialakítása során a rendezetlen fehérjeszakasz részben rendeződik, és ezáltal perifériaszerű elhelyezkedésből megszerű elhelyezkedésbe kerül a fehérjét leíró hálózatban.

A mag-periféria megkülönböztetések a sejteken belül található hálózatokra is igazak. Példaként a sejtek metabolizmusát leíró hálózatnak is van egy magja, amely a sejt általános túléléséhez szükséges központi metabolizmust kódolja. A metabolikus magban csak igen kevés enzim vesz részt. A sejt DNS-ében kódolt enzimek többsége csak bizonyos környezeti körülmények között aktív, és a metabolikus hálózat perifériáján helyezkedik el.

Padisák Judit 1992-ben írta le, hogy az ökológiai rendszerek kétfajta memóriával és ellenálló képességgel rendelkeznek. Az egyik a gyakran előforduló környezeti változásokra ad egy stabil, megbízható választ, a másik pedig a változatos, újonnan létrejövő környezeti változásokra tartalékol különböző válaszokat (Padisák, 1992). Azóta ezt a kettősséget számos más kutató is megerősítette.

Az elmúlt két évben Buzsáki György és mások csoportjaiból származó cikkek igen szép sora tisztázta, hogy az agy neuronjai is egy hálózatos magot képeznek akkor, amikor rögzítenek egy megtanult választ. Példaként a *Tritonia gilberti* tengeri csiga menekülési reflexét néhány szorosan kapcsolódó, hálózatos magot alkotó idegsejtje kódolja. Megismételt, menekülést kiváltó inger esetén további idegsejtek kapcsolódnak ehhez a maghoz, ami a menekülési válasznak mind az erősségét, mind pedig a gyorsaságát megnöveli (Hill et al., 2015). Ugyanígy a patkány vagy az egér agyának hippocampus régiójában a tartózkodási hely fel-

ismerésének megtanulása során a plasztikus, addig a többi idegsejttel nem egy időben és általában lassan aktiválódó idegsejtek a többi idegsejttel egy időben és gyorsabban aktiválódó idegsejteké válnak (Grosmark–Buzsáki, 2016). A memória felidézése a tanulás során hálózatos maggá összekapcsolt idegsejtcsoportokat aktivál.

Daniel Kahneman Nobel-díjas pszichológusnak magyarul 2013-ban jelent meg a *Gyors és lassú gondolkodás* című könyve (Kahneman, 2013). A könyv pszichológiai megfigyelések alapján azt foglalta össze, hogy az emberi gondolkodás is két fajtára osztható. Egyrészt kerülhetünk olyan helyzetbe, amelyet egyértelműen azonosítunk, és már régről ismerünk: erre reflexből, gyorsan válaszolunk. Másrészt kerülhetünk olyan helyzetbe, ami vagy új, vagy nem értjük, vagy lenne ugyan rá válaszunk, de az nem egyértelmű vagy tilos. Ez az utóbbi helyzet egy elgondolkodó, sok információt feldolgozó, mérlegelő, adott esetben másokat megkérdező, de mindenképpen lassú választ indukál.

Az utolsó példám a társadalmi hálózatok példája. Hangyacsoportokon, halrajokon és mindenféle más állatok csoportjain is bizonyították, hogy a csoport nagyobb részének vagy egészének az együttműködésére van szükség a jó megoldás megtalálásához akkor, amikor a feladat bonyolult. Ezzel szemben az egyszerű feladatokat egyetlen hangya sokkal nagyobb valószínűséggel tudja jól megoldani, mint egy nagyobb csoport. A társadalmi hálózatokban a társadalmi elit az, amelyik a szorosan kapcsolt magot alkotja. A véleményformálók magja egyszerű, egyértelmű helyzetekre sok esetben egyformán válaszol. Gyökeresen új helyzetek azonban különböző válaszokat hívnak elő. Ezek között nyilván vannak kevésbé optimális megoldások is. Az elmúlt években számos bizonyíték látott napvilágot arra, hogy ilyenkor a közösség egésze nagy hatékonysággal ki tudja, és ki is szokta javítani a téves megoldásokat.

KOMPLEX RENDSZEREK ÚJ VÁLASZAIT GENERÁLÓ LEHETSÉGES HÁLÓZATOS MECHANIZMUSOK

Hogyan tud a hálózatok perifériája hozzájárulni egy kreatív, új válasz kialakulásához? Hogyan kódolódik az új válasz a hálózat szerkezetében? Henri Poincaré igen szép választ adott ezekre a kérdésekre, amikor leírta, hogy a gondolatok kombinációiból azok lehetnek igazán újak és kreatívak, amelyek az emberiség addigi gondolkodásában egymástól távoli ismereteket kötnek újonnan össze (Poincaré, 1908). Ezzel összhangban a ritkán együtt emlegetett témák összekötése mind a Twitteren, mind a Facebookon sokkal nagyobb figyelmet kelt, mintha olyan témákat kötöttek volna össze, amelyek amúgy is gyakran fordultak elő együttesen. Tovább erősítve ugyanezt, embercsoportok más és másféleképp való összekötése bizonyított módon sokkal kreatívabb megoldásokat ad, mintha ez egész embercsoport végig együtt gondolkodott volna.

A hálózatos mag konfliktusait a Twitteren, a telefonhálózatokban, de még halrajokban is a mag csomópontjait összekötő hidak próbálják meg mediálni. Ezek a hidak lesznek legtöbbször az innovátorok azért, mert őket nem kötik a társadalmi csoportok normái. Ezzel ellentétben a társadalmi csoportok középpontjai általában nem innovátorok, mert tartanak attól, hogy nem lesznek majd középpontok (azaz a csoport magjának a részei), ha majd valami egészen más helyzet alakul ki az innováció miatt.

Az új információt általában a hálózatos mag új konfigurációja kódolja. Az új válasz kódolása során néhány, korábban a perifériához tartozó nódus bekerül a magba. Ezzel párhuzamosan néhány, korábban a magba tartozó nódus esetleg kiesik a magból. Így tehát az új információ kódolása a régebbi információ háttérbe szorulásával (a felejtéssel) is együtt járhat.

A LEÍRT ÁLTALÁNOS ADAPTÁCIÓS (TANULÁSI) MECHANIZMUS KORLÁTAI ÉS LEHETSÉGES ALKALMAZÁSAI

A komplex rendszerek igen sok szerveződési szintjén érvényes gondolatmenete alól vannak kivételek. A hálózatos mag például szupermerev lehet, és ezáltal mesterségesen lelassított válaszokat adhat. Ennek a bürokrácia egy kivételesen „szép” esete. A hálózatos mag több részből is állhat (Csermely et al., 2013b). A kezdeti elnagyolt, de gyors választ egy későbbi, lassú válasz pontosíthatja (Kahneman, 2013). Az új válasz kódolása sok, ismételt tanulási cikluson át valósulhat meg, és így tovább. A leírt adaptációs, tanulási mechanizmus hozzásegíthet a sejttes jelátvitel, a tanulási és döntéshozatali mechanizmusok pontosabb megértéséhez, valamint az új mesterséges intelligencia, robotrajvezérlés, internetes elosztó és gyógyszertervezési eljárások tervezésében is hasznos lehet (Csermely et al., 2013a).

ÖSSZEZÉS

Cikkem fő mondanivalóját három gondolatban lehet összegezni. 1.) A korábban optimalizált válaszok attraktorait a komplex hálózatok magjának egymással átfedő nóduscsoportjai kódolják. A már ismert helyzetekre a hálózat magja gyors és hatékony választ ad. 2.) Az új helyzetek kreatív megoldásához ez nem elég, kell a hálózat perifériájának tudása is. Ez új választ, új attraktort alakít ki. Az új attraktort kódoló nódusok az új helyzet ismétlődése esetén a hálózatos mag részévé válnak. 3.) Mindezek a mechanizmusok úgy tűnik, hogy általánosak a komplex rendszerek számos szerveződési szintjén.

A fentiekből következik, hogy a deliberatív demokrácia nem pusztán egy morális alapállás, avagy egyike a sok döntési technikának, hanem az evolúció által a sejtjeinkbe kódolt olyan parancs, amely egy igen sikeres válaszkeresési mechanizmust rögzített új, eddig még nem tapasztalt helyzetek megoldására. A történelem bizonyos korszakaiban (például középkor) gyökeresen új helyzetek viszonylag ritkán adódtak. Nem is volt nagy szükség demokratikus berendezkedésű államokra. A 21. század azonban nem ilyen. Az emberiség ma korábban soha nem látott kihívások elé néz, amelyek – ráadásul – évtizedről évtizedre, de lassan már évről évre változnak. Mindehhez szükség van arra, hogy az a társadalom, amelyik túl akarja élni a 21. századot, egymás gondolatait tisztelő, abból tanulni vágyó, a közös megoldások kimunkálására kész emberekből és embercsoportokból álljon. Ehhez ma is jó útravalót adnak Széchenyi Istvánnak 1826. december 10-én a naplójában megfogalmazott gondolatai: „Nem, mi nem születünk reformátoroknak, előbb mi magunkat kell megreformálnunk. Látogatnunk kell az alázat, az önmegtartóztatás iskoláját.”

A szerző köszönetet mond a hálózatos LINK kutatócsoport (URL1) tagjainak azért a pezsgő szellemi életért, amely a cikkben összefoglalt gondolatok megszületéséhez nagyban hozzájárult, valamint Patthy Lászlónak, Simon Istvánnak és ifj. Tusnády Gábornak a Magyar Tudományos Akadémia Bioinformatikai Osztályközi Bizottsága és a Magyar Bioinformatikai Társaság 2016. november 10-i tudományos ülésének megszervezéséért, ahol e közlemény anyaga előadás formájában elhangzott. A kutatást az NKFIH/OTKA K-115378-as számú pályázata támogatta.

IRODALOM

- Csermely P. – Korcsmáros T. – Kiss H. J. et al. (2013a): Structure and Dynamics of Molecular Networks: A Novel Paradigm of Drug Discovery. *Pharmacology and Therapeutics*, 138, 3, 333–408. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2013.01.016, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC23384594/>
- Csermely P. – London, A. – Wu, L. Y. et al. (2013b): Structure and Dynamics of Core-periphery Networks. *Journal of Complex Networks*, 1, 2, 93–123. DOI: 10.1093/comnet/cnt016, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1309/1309.6928.pdf>
- Fiedler, B. – Mochizuki, A. – Kurosawa, G. et al. (2013): Dynamics and Control at Feedback Vertex Sets. II: Informative and Determining Nodes in Regulatory Networks. *Journal of Dynamics and Differential Equations*, 25, 3, 563–604. DOI: 10.1007/s10884-013-9312-7, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519313002816?via%3Dihub>
- Grosmark, A. D. – Buzsáki, G. (2016): Diversity in Neural Firing Dynamics Supports Both Rigid and Learned Hippocampal Sequences. *Science*, 351, 6280, 1440–1443. DOI: 10.1126/science.aad1935, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4919122/pdf/nihms788765.pdf>

- Hill, E. S. – Vasireddi, S. K. – Wang, J. et al. (2015): Memory Formation in *Tritonia* via Recruitment of Variably Committed Neurons. *Current Biology*, 25, 22, 2879–2888. DOI: 10.1016/j.cub.2015.09.033, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4654661/pdf/nihms724117.pdf>
- Hopfield, J. J. (1982): Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective, Computational Abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 79, 8, 2554–2558. DOI: 10.1073/pnas.79.8.2554, <http://www.pnas.org/content/pnas/79/8/2554.full.pdf>
- Kahneman, D. (2013): *Gyors és lassú gondolkodás*. Budapest: HVG Könyvek Kiadó
- Kauffman, S. (1969): Homeostasis and Differentiation in Random Genetic Control Networks. *Nature*, 224, 5215, 177–178. DOI: 10.1038/224177a0, https://www.researchgate.net/publication/17824699_Homeostasis_and_Differentiation_in_Random_Genetic_Control_Networks
- Li, G. – Magana, D. – Dyer, R. B. (2014): Anisotropic Energy Flow and Allosteric Ligand Binding in Albumin. *Nature Communications*, 5, 3100. DOI: 10.1038/ncomms4100, <https://www.nature.com/articles/ncomms4100.pdf>
- Padisák J. (1992): Seasonal Succession of Phytoplankton in a Large Shallow Lake (Balaton, Hungary) – A Dynamic Approach to Ecological Memory, Its Possible Role and Mechanisms. *Journal of Ecology*, 80, 2, 217–230. DOI: 10.2307/2261008, <https://goo.gl/vCqzS5>
- Poincare, H. (1908): *Foundations of Science*. New York: The Science Press, <https://archive.org/details/foundationsscie01poingooog>
- Saadatpour, A. – Albert, R. – Reluga, T. (2013): A Reduction Method for Boolean Network Models Proven to Conserve Attractors. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 12, 4, 1997–2011. DOI: 10.1137/13090537X, <https://www.math.psu.edu/treluga/Saadatpour2013.pdf>
- Tompa P. – Friedrich P. (1998): Prion Proteins as Memory Molecules: An Hypothesis. *Neuroscience*, 86, 4, 1037–1043. DOI: 10.1016/S0306-4522(98)00148-1, https://www.researchgate.net/publication/13588381_Prion_proteins_as_memory_molecules_An_hypothesis

URL1: <http://linkgroup.hu>