Magyar Tudomány 187/11 (2026), 1538–1546
DOI: 10.1556/2065.187.2026.11.6

TANULMÁNYOK

A számítógép és az agy intelligenciájának elemzése gráfelméleti módszerekkel

Analysing Computer and Brain Intelligence Using Graph-Theoretical Methods

Kozma Robert
PhD, egyetemi tanár, University of Memphis, Tennessee, USA; Óbudai Egyetem, Budapest
rkozma@memphis.edu

Absztrakt

Neumann János posztumusz munkája, *A számítógép és az agy* látnoki módon vetítette előre napjaink tudományának egyik központi kérdését: mi várható el a számítógép által létrehozott mesterséges intelligenciától (MI)? Neumann szerint az agy nyelve nem egyezik meg a matematika nyelvével. Ez a vélemény különösen fontos a számítógépes szuperintelligencia értelmezésében, amely szerint az MI minden tekintetben képes meghaladni az emberi intelligenciát, beleértve a gépi tudat megjelenését. Először az emberi tudat kialakulását leíró elméletek kapcsolatát írjuk le az agyműködésben megfigyelt tranziens oszcillációkkal. Különösen fontos szerepet játszik az emberi tudatban a hirtelen megértés „Heuréka!" élményének pillanata, amely fázisátmenetként értelmezhető. E tranziens kognitív folyamatok nem tükröződnek a fokozatos változásokon alapuló szuperintelligenciában. A gráfelmélet hasznos a neurális fázisátmeneti hipotézis elemzésére, és felhasználása jelentősen segíthet az MI kritikus problémáinak megoldásában.

Abstract

John von Neumann's posthumously published work, *The Computer and the Brain*, presciently anticipated one of the central questions of contemporary science: what can be expected of artificial intelligence (AI) created by computers? According to von Neumann, the language of the brain is not the same as the language of mathematics. This view is particularly important for understanding computer superintelligence, according to which AI could surpass human intelligence in every respect, including the emergence of machine consciousness. First, we describe the relationship between theories of the emergence of human consciousness and the transient oscillations observed in brain activity. A particularly important role in human consciousness is played by the moment of sudden understanding – the "Eureka!" experience – which can be interpreted as a phase transition. These transient cognitive processes are not reflected in superintelligence based on gradual changes. Graph theory is useful for analysing the neural phase-transition hypothesis, and its application could significantly contribute to addressing critical problems in AI.

Kulcsszavak: mesterséges intelligencia (MI), tudat, gráfelmélet, fázisátmenet, perkoláció

Keywords: artificial intelligence (AI), consciousness, graph theory, phase transition, percolation

© 2026 Akadémiai Kiadó

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC

Bevezetés

Neumann János egyedülálló eredményeket ért el a legkülönfélébb tudományos területeken, további úttörő munkáját csak korai halála akadályozta meg. Neumann posztumusz műve, *A számítógép és az agy* speciális szerepet játszik Neumann munkásságában, mintegy látnoki módon vetítve előre napjaink tudományának egyik központi kérdését: mit várhatunk el a mesterséges intelligenciától, különösen az emberi intelligenciával való összehasonlításban? Neumann megállapítja: „Mint ahogy a görög vagy a szanszkrit nyelv létezése történeti tény, nem pedig feltétlen logikai szükségszerűség, ugyanúgy józanul feltételezhetjük, hogy a logika és a matematika is történeti eredetű és esetleges kifejezési formák" (Neumann 1958, 81). Ha a logika és a matematika történeti természetűek, akkor az agy működési folyamatai nem alapulhatnak rajtuk. Végezetül Neumann arra a következtetésre jut, hogy „[a]z agy nyelve nem egyezik meg a matematika nyelvével" (Neumann 1958, 80).

Ez a megállapítás különösen figyelemreméltó, mivel Neumann vezető szerepet játszott a digitális számítógépek létrehozásában, és a nevével fémjelzett architektúra napjainkig a számítógépek központi működési elve, amely matematikai logikán alapszik.[1] Neumann alapvető különbséget látott a számítógép és az agy működése között. Napjainkban sok kutató viszont úgy véli, hogy az agy valójában egy nagy számítógép, és feltételezi, hogy nincs lényegi különbség az agy és a számítógép között. Mivel digitális számítógépeink döntő többségükben továbbra is a Neumann és kortársai által létrehozott alapelveken működnek, az agy számítógépként való kezelése közvetlenül mond ellent Neumann következtetéseinek.

Ha az agy nyelve nem a logikus matematika, akkor mi lehet az? A válasz megtalálásában fontos szerepet játszik az agykutatás drasztikus fejlődése az elmúlt jó fél évszázad során. Az új kísérleti módszerek, amelyek az agyműködés megjelenítését szolgálják, így az elektroenkefalográfia (EEG), az elektrokortikográfia (ECoG), a mágneses rezonanciás képalkotás (MRI), a pozitronemissziós tomográfia (PET), a magnetoenkefalográfia (MEG) és a funkcionális MRI (fMRI) mérési technikák korábban elképzelhetetlen részletességgel képesek leírni a komplex, térben és időben változó neurális folyamatokat, amelyek a különféle kognitív aktivitások során lépnek fel (Crick–Koch 2003). Amennyiben a mesterséges intelligencia eléri az emberi intelligencia szintjét, akkor magyarázatot kell adnia a számítógépi tudat megjelenésére, mivel a tudat az agyunk legmagasabb szintű kognitív tevékenysége. Itt áttekintjük az emberi tudat néhány vezető elméletét, és a tudathoz tartozó fázisátmenetek hipotézisét, amely szerint a tudat fellépése nagy agyi területeket lefedő tranziens szinkronizációs dinamika eredménye. A gráfelméleti módszer segít a tudat fázisátmeneteken

[1] Fontos megjegyeznünk, hogy a kvantumszámítógépek (*quantum computers,* QCs) elmélete és gyakorlata jelentősen fejlődött az elmúlt évtizedben (Werbos 2024). A jelen munka nem érinti a QCs témakörét, e tanulmányban az agyműködésen alapuló számítógépek (*neural computers,* NCs) elemzésére szorítkozunk.

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC

alapuló matematikai modelljének kialakításában. Ezen eredmények várhatóan hasznosak lesznek egy új típusú mesterséges intelligencia megalapozásában is, túllépve a meglévő matematikai módszerek Neumann által jelzett korlátain.

Szuperintelligencia

Napjaink vezető MI-eredményei egyre inkább megközelítik és sok tekintetben meg is haladhatják a tipikus emberi intelligencia szintjét. Ezen eredmények azon alapulnak, hogy az MI sikereiben központi szerepet játszó gépi tanulási algoritmusok az emberi teljesítménynél összehasonlíthatatlanul gyorsabban és sokkal pontosabban képesek megoldani sok gyakorlati problémát. Az MI sikereinek kiemelkedő példája volt az 1997-es sakkmérkőzés az akkori világbajnok Garri Kaszparov és az IBM Deep Blue között, amelyet a Deep Blue nyert meg. Egy másik példa a 2016-os góverseny a világbajnok Lee Sedol és a Google DeepMind között, amelyen a DeepMind AlphaGo programja győzött. Az elmúlt évtizedekben a mesterséges intelligencián alapuló számítógépes algoritmusok széles körben elterjedtek a legkülönfélébb alkalmazási területeken, beleértve a komplex döntési, alakfelismerési, előrejelzési és szabályozási feladatokat.

Az MI sikereire építve neves kutatók arra a következtetésre jutottak, hogy a tudomány fejlődése egy szingularitáshoz közelít, ami szuperintelligenciát eredményez (Kurzweil 2026). A szuperintelligencia a számítógépek magas szintű működésének eredménye, ami azzal jellemezhető, hogy a gépi intelligencia *minden tekintetben* meghaladja az emberi kognitív képességeket, beleértve a kreatív gondolkodás teljes skáláját, így az emberi tudat szintjét is.

A szuperintelligenciát képviselő kutatók szerint az evolúciós fejlődés, ami a *Homo sapiens* kialakulásához vezetett, napjainkra befejeződik, és az emberi intelligencia dominanciáját a mesterséges intelligencia dominanciája váltja fel. E vélemények szerint az emberiség szerepe a tudományos-technikai fejlődésben másodrangúvá válik a mesterséges intelligencia, illetve annak robotikai megtestesülései mögött. A szuperintelligenciára vonatkozó feltételezések elemzéséhez hasznos röviden áttekintenünk a biológiai/emberi tudat leírására szolgáló népszerű elméleteket.

A tudat neurális korrelátumai és a kognitív fázisátmenet hipotézise

A következőkben az emberi tudat *(consciousness)* néhány vezető elméletét írjuk le, különös tekintettel lehetséges felhasználásukra a mesterséges intelligenciára vonatkozó kutatásokban (lásd Kondor Zsuzsanna [2025] áttekintését). A globális munkaterület elmélete (*Global Workspace Theory,* GWT) szerint (Baars 1988) egy adott kognitív állapotban sokféle adatfeldolgozó részfolyamat verseng az agyunkban meglevő korlátozott globális munkaterületért. A versengés részeként koalíciók jönnek létre. Az adott körülmények és korlátozások végül egy győztes koalíció dominanciájához vezetnek. A színpadi metafora szerint ez azt jelenti, hogy a győztes koalíció hirtelen a figyelem

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC

középpontjába kerül és magára vonja a reflektorok fényét. Ebben a pillanatban egy terjedési folyamat *(broadcasting)* indul be, amely nagyon gyorsan elterjeszti a győztes koalíció által megtestesített információt és annak jelentését a versengő populáció összes résztvevője között. A GWT szerint a tudati folyamat fő eleme a lokalizált észlelet gyors szétterjedése a globális munkaterület minden részébe.

Az eredeti GWT nem tárgyalta az agy komponenseinek szerepét, de feltételezte az agykéreg-talamusz rendszer oszcillációinak fontosságát. A neurális globális munkaterület elmélete (*Neural Global Workspace,* NGW) továbblépett az eredeti GWT-modellen azzal, hogy a specifikus agyterületek és az azokat összekötő nemlineáris ideghálózatok szerepét elemezte az agyra vonatkozó képalkotási adatok tükrében. Különösen fontos annak a vizsgálata, hogy mely agyterületek játszanak központi szerepet a különböző észlelési folyamatokban (Mashour et al. 2020).

A további vezető tudatmodellek közül megemlítjük az integrált információ elméletét (*Integrated Information Theory,* IIT) (Tononi et al. 2016) és a magasabb rendű tudat elméletét (*Higher-Order Theories,* HOT) (LeDoux–Brown 2017). Az IIT szerint a tudat nem egy számítási folyamat, hanem az adott rendszer alapvető informatikai tulajdonsága. Ennek megfelelően a tudat szintjét egy rendszerben az határozza meg, hogy az információ milyen mértékben van integrálva a komponensek között. Ahogy az információ integrációja növekszik, a rendszer intelligenciája és tudati szintje is nő. Különféle kiértékelések szerint, a specifikus számítógépes rendszerek szintje és intelligenciája elérheti és meg is haladhatja a tipikus emberi tudat által képviselt integrált információ szintjét. A HOT egyfajta alternatív megközelítést ad. Eszerint az érzékelés önmagában nem elegendő a tudati folyamatokhoz – ilyen értelemben hasonló a GWT-elmélethez. Azonban a HOT feltételezi, hogy a tudathoz szükség van egy magasabb rendű reprezentációra. Ez fontos különbség a GWT-hez képest, amely szerint az agyban nincsenek reprezentációk, hanem a tudat egy dinamikus folyamat, amely oszcillációkat mutat fragmentált lokális érzetek és a globális mentális koordináció között.

A GWT-modell azon feltevése, hogy a tudat egy dinamikusan oszcilláló folyamat, jelentős támogatást kapott az elmúlt évtizedek neurofiziológiai mérései által. Kiemeljük azt az elméletet, amely szerint az agy dinamikája egy mozifilm *(cinematic)* működési alapelve szerint magyarázható (Kozma–Freeman 2026 [2016]). Ennek megfelelően az agy működése során metastabilis térbeli aktivitási mintázatok lépnek fel, amelyek 100–200 ezred másodperc időtartamig maradnak fenn. Egy metastabilis térbeli mintázat egy filmkockának tekinthető *(movie frame),* majd ez a mintázat hirtelen megszűnik, ami a zár működését illusztrálja *(shutter).* Ekkor egyre növekvő szinkronizáció indul ki az agykéreg egy térbeli pontjából. A szinkronizáció gyorsan terjed, és 10–20 ezred másodperc alatt betölti az agyi féltekét, és egy új mintázat jön létre. Ez a mintázat újból metastabilis, és 100–200 ms-ig áll fenn; utána az egész szinkronizációs-deszinkronizációs folyamat újraindul.

A szinkronizációs mintázatok kialakulása és gyors növekedése értelmezhető úgy, mint a GWT által posztulált terjedés *(broadcast),* amit a domináns koalíció gerjeszt

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC

(Baars–Geld–Kozma 2021). A mintázatok időbeli sorozata szinkronizált és deszinkronizált állapotok között oszcillál. Ezen eredmények azon hipotézishez vezetnek, hogy az emberi intelligencia és tudat kialakulásában a térben és időben terjedő tranziens fázisátmenetek szükségszerűek. A fázisátmenetek mély intuíciót, értelmezést és hirtelen megértést demonstrálnak, amit „Heuréka!" pillanatnak nevezhetünk. E hipotézis szerint az emberi tudat működéséhez elengedhetetlenek a komplex téridőben megtestesülő oszcillációk fellépései az agyterületek között, amelyek gyors átmeneteket mutatnak a metastabilis aktivációs mintázatok sorozatában.

A neuroperkoláció alkalmazása az agykéreg fázisátmeneteinek leírására

Az agykéreg sűrű szöveti állománya (neuropil) a legbonyolultabb anyagi forma az általunk ismert univerzumban. A neuropil az idegsejtek és gliasejtek szövevénye, amelyben az idegsejtek dendritek és hosszú axonok révén kapcsolódnak egymáshoz. Az agy kísérletileg megfigyelt oszcillációi ezen anyagi forma komplex dinamikai viselkedésén alapulnak. Az agykéreg tipikusan kétdimenziós rétegek szuperpozíciójaként modellezhető, leginkább hat réteget szokás megkülönböztetni.

Különböző matematikai módszerek használhatók a megfigyelések értelmezésére és modellezésére. Differenciálegyenleteket sikeresen alkalmazunk a térben terjedő neurális aktivitások leírására. A sikerek ellenére a differenciálegyenleteken alapuló megközelítések gyakran korlátozottak, ugyanis a hosszú axonokon keresztül történő terjedés az agy viszonylag távoli pontjaiba, átugorva a környező neuronok által kitöltött teret, rendkívül gyors, csaknem azonnali effektív hatást eredményez. A differenciálegyenletek nehezen tudják követni ezeket a kísérletileg megfigyelt, gyakran ugrásszerű változásokat.

A hirtelen változások leírására az Erdős Pál és Rényi Alfréd által a véletlen gráfokban bevezetett fázisátmenetek szolgálhatnak kiindulópontként (Bollobás 2001). Az agy gráfelméleti leírásában különösen hasznosnak mutatkozott az a modell, amely a neuropilt egy véletlen gráf és egy rács felhasználásával közelítette meg, és a neurális aktivitás terjedését sejtautomataként írta le (Bollobás–Kozma–Miklós 2010). A következőkben ezt a gráfelméleti megközelítést vezetjük be, amely lehetőséget nyújt a korábban leírt agybeli oszcillációkra vonatkozó hipotézis elemzésére.

A sejtautomaták következő egyszerű példája a kétdimenziós négyzetrácson van definiálva, ahol a rácspontok kezdeti állapota aktív (1) vagy inaktív (0), egy determinisztikus vagy véletlen feltételnek megfelelően. A rácspontok állapota diszkrét időlépésekben változik egy átmeneti szabály szerint, amely az adott pont és a szomszédainak az előző időpontbeli állapotától függ. Egy népszerű szabály szerint a rácspont aktívvá válik, ha a szomszédainak többsége aktív, ellenkező esetben inaktív lesz a következő időpillanatban. A sejtautomaták különféle térbeli dinamikus alakzatok kialakulásához vezetnek, és népszerűvé váltak az eredeti bevezetésük után, mint John Horton Conway életjátéka (Berlekamp–Conway–Guy 1982), Leon Chua

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC

idegsejthálózatai (*Cellular Neural Network*, CNN), a termodinamikai Ising-modellek és John Hopfield neurális hálózatai (HNN).

A felhasznált matematikai módszerek egy másik fontos eleme a perkolációk (átszivárgás) elmélete, azon belül a *bootstrap* perkolációk (BPerc) családja. A BPerc-modellt egy d-dimenziós rácson definiáljuk, és a kezdeti pillanatban a rácspontok mindegyike p valószínűséggel aktivizálódik. Ezt követően a rácspontok állapota úgy változik, hogy egy aktív rácspont mindig aktív marad (*boostrap* tulajdonság), míg egy inaktív pont aktívvá válik, ha legalább k pont aktív a környezetében. Ha az iterációk sorozata végül egy olyan állapothoz vezet, amikor minden rácspont aktívvá válik, akkor azt mondjuk, hogy perkoláció történt a rácson. Megmutatható, hogy a BPerc-modellekben létezik egy kritikus p *érték* (p_C) a d és k függvényében, amikor perkoláció történik $p > p_C$ esetén, de nincs perkoláció, ha $p < p_C$. A kritikus p_C értéke fázisátmenetet jelez a perkoláló és nem perkoláló állapotok között (Balister–Bollobás–Kozma 2006).

Az agy dinamikájának leírásában hasznosnak bizonyultak a neuroperkolációs (NPerc) modellek, amelyek a BPerc-modellek általánosításai, figyelembe véve a neuropil tulajdonságait. A NPerc a következő általánosításokat tartalmazza (Kozma et al. 2005):

1. Az átmeneti szabály véletlen komponenst is tartalmaz, amit ε jelöl ($0 \leq \varepsilon \leq 1$). Például az aktív rácspont aktív marad ($1 - \varepsilon$) valószínűséggel, de inaktívvá válik ε valószínűséggel.
2. A szabályos négyzetrácshálóra ráhelyezünk egy véletlen gráfot, és az aktivitás terjedését a négyzetrács és a véletlen gráf unióján vizsgáljuk. Az eredeti rácson a szomszédos rácspontok közötti élek viszonylag rövidek, míg a véletlen gráf élei nagyon hosszúak is lehetnek a következő szabálynak megfelelően. A véletlen gráf éleit tetszőleges két rácspont között λ valószínűséggel definiáljuk, ahol λ a pontok rácsbeli távolságának függvénye. Az agykéregben minden idegsejt több ezer dendrittel kapcsolódik más idegsejtekhez, amelyek főként rövid dendritek, és egy hosszú axont tartalmaznak. Így a hosszú axonok aránya alacsony (az összes kapcsolat kevesebb mint 0,1%-a). Az agykéregben megfigyelhető nagyon gyors terjedési sebességek nem magyarázhatóak szinaptikus transzmissziók alapján.
3. Eddig azonos rácspontokat tekintettünk, amelyek kölcsönösen pozitívan hatnak egymásra *(exhibition).* Most bevezetünk egy új típusú rácspontot, amely negatív hatást tesz a környezetére *(inhibition);* vagyis ha ez a pont aktív, akkor a hatása levonódik a szomszédai aktivitásából. A folyamat kezdetén a rácspontok β része negatív típusú lesz, míg a többi pont ($1 - \beta$) pozitív típusú marad ($0 \leq \beta < 0{,}5$).

Összefoglalva, NPerc a következő paramétereket tartalmazza: d, k és p az eredeti BPerc szerint; valamint: ε, λ és β a BPerc-en túlmenően. Tudjuk, hogy adott d és k esetén p kritikus értéke (p_C) fázisátmenetet definiál. A kérdés az, hogy mi a szerepe ε, λ és β paramétereknek az NPerc dinamikájában.

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC

Különféle matematikai eredmények bizonyítják a fázisátmenetek fellépését a neuroperkolációs modellekben. Az átmeneti szabály véletlen komponensét *(ε)* vizsgálva megmutatható, hogy a rendszer dinamikája különféle fixpontokat és oszcillációkat mutathat. Nevezetesen a neuroperkolációs modell *mean field* megközelítésében fázisátmenetek léphetnek fel; például a fixpontdinamika átválthat periodikus és nemperiodikus (kaotikus) oszcillációkba (Balister–Bollobás–Kozma 2006).

A különféle hosszúságú élek hatását vizsgálja az a modell, amely egy fix rács éleit kombinálja egy véletlen gráf éleivel. A véletlen élek hossza a rácsbeli távolsággal *(d)* fordítottan arányos, így az egymástól *d* távolságban lévő élek valószínűsége $p_d \sim c/d$, ahol *c* egy konstans. Megmutatható, hogy a kombinált rács- és véletlengráf-modellben fázisátmenetek lépnek fel a hosszú élek arányának *(λ)* függvényében, és éles becslések léteznek a kritikus paraméterekre (Janson et al. 2019).

Végezetül NPerc definiálható két típusú rácspontra, vagyis gerjesztő *(excitatory)* és gátló *(inhibitory)* rácspontokra, ahol a gátló csúcsok aránya *β*. Különféle dinamikai viselkedések léphetnek fel *ε, λ* és *β* paraméterek függvényében, így a dinamika konvergálhat fixpontú aktivációkhoz, illetve kváziperiodikus oszcillációkhoz. A fellépő dinamikus viselkedések szisztematikus matematikai leírása még hiányzik, de léteznek különféle részeredmények és sejtések a fázisátmenetek fellépésére. Számítógépes szimulációk támasztják alá a fázisátmenetekre vonatkozó sejtéseket, és jelentőségüket neurális folyamatok értelmezésében (Kozma–Puljic 2015; Heck et al. 2017).

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a neuroperkoláció átfogó módszert nyújt az agybeli struktúrák és dinamikai folyamatok egységes modellezésére. A neuroperkoláció az agykéreg neuropiljének dinamikáját gyakori fázisátmenetek sorozataként írja le térben kiterjedt mintázatok között. Ez úgy érhető el, hogy az agykéreg dinamikája a kritikusság határán oszcillál, és érzékenyen reagál kis változásokra. Például a hosszú axon vetületei effektív arányának kis változása drasztikusan meg tudja változtatni a dinamikát, és fázisátmenetet (kondenzációt) tud előidézni rendezetlen (nem szinkronizált), magas entrópiájú állapotokból rendezett (szinkronizált), alacsony entrópiájú állapotokba.[2] Ezek a fázisátmenetek nagy sebességgel terjednek az agytekén keresztül, és központi szerepet játszanak az emberi intelligencia és tudat működésében a kognitív fázisátmeneti hipotézis szerint.

[2] A nem lokális hatás létrejötte a neuropilben a hosszú axonok következményeként, valamint a fázisátalakulás fellépésére különböző szinkronizációs állapotok között érdekes módon emlékeztet a QC által bevezetett távolbahatásra (*entanglement* – összefonódás) és kvantum-fázisátmenetekre. Habár a QC és az NC gyökeresen eltérő matematikát használ, mégis az általuk javasolt megközelítések az agybeli folyamatokhoz hasonló folyamatokat írhatnak le, csak különböző módszerek segítségével.

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC

Mesterséges intelligencia fejlesztése biológiai intelligencia segítségével

A jelenlegi mesterséges intelligencia képes kitűnő eredményeket elérni bizonyos területeken, de elmarad az emberi kognitív képességektől, különösen a kreativitás és a megértés kulcsfontosságú aspektusai tekintetében. Ennek egyik oka, hogy az MI módszerei többnyire fokozatos változásokon alapulnak, és nem tartalmazzák a fázisátmeneteket magukba foglaló dinamikai folyamatokat. Az agykutatási kísérleti eredmények arra mutatnak, hogy a fázisátmenetek nagyon fontosak az agy működésében. Ezek hiányában az MI csak korlátozott értelemben képes megközelíteni az emberi intelligenciát. További intenzív kutatások szükségesek, hogy a fázisátmenetek kellő szerepet kapjanak az agy működésének leírásában, és hogy a jelenlegi perifériális megítélésből általánosan elfogadott megközelítéssé váljanak. Amikor a fázisátmenetek módszerei szervesen beépülnek a mesterséges intelligencia módszerei közé, akkor várhatjuk, hogy a mesterséges intelligencia valóban közelítsen az emberi intelligenciához.

Érdekes összefüggésekre világít rá a tudományos forradalmak Thomas Kuhn által kidolgozott elmélete (Kuhn 1997). Kuhn szerint egy relatívan hosszan tartó és fokozatos tudományos fejlődési időszakot követően, amely évtizedekig vagy akár évszázadokig is tarthat, és amelynek során nagy mennyiségű új tudás halmozódik fel, egy hirtelen paradigmaváltozás történhet, amikor gyökeresen új tudományos elméletek jönnek létre. Az ilyen forradalmi változások leggyakrabban új kísérleti technikák eredményein alapulnak, amelyek új elméleti megközelítéseket igényelnek. Példa erre a fizika newtoni forradalma a mechanika mozgástörvényeinek megalkotásával és a matematikai analízis kifejlesztésével, a csillagászatban Kopernikusz, Galilei, Kepler és kortársaik által elért kiemelkedő eredmények alapján. Isaac Newton *Principia Mathematica* című munkája létrehozta azt a szilárd matematikai módszert, amely az elmúlt 350 évben központi szerepet játszott a tudományos kutatásokban.

Visszatérve Neumann János szellemi örökségéhez, a számítógép és az agy viszonyára alkalmazható a tudományos fejlődés fent leírt mechanizmusa. Feltételezhető, hogy az agykutatásban a newtonihoz hasonló tudományos áttörés történt, és jelenleg is zajlik az új kísérleti technikák eredményeként, amelyek lehetővé teszik az agy aktivitásának vizsgálatát magas téridő-felbontású megfigyelésekkel. A komplex agyi folyamatok megfelelő leírása új matematikai módszerek kidolgozását igényli. Így például gráfelméleti módszerek segíthetik a neurális és kognitív folyamatok leírását, beleértve a fázisátmeneteket, amelyek hipotézisünk szerint a magasabb intelligencia és az emberi tudat fontos tulajdonságai. A jelen kutatási eredmények az emberi és gépi tudatról még nagyon korlátozottak. A jövőbeli agykutatások sikeres alkalmazásának eredményeként a mesterséges intelligencia és robotikai megtestesülései várhatóan az emberiség valódi partnerévé tudnak válni egy fenntartható jövő létrehozásában.

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC

Irodalomjegyzék

Baars, Bernard J. (1988). *A Cognitive Theory of Consciousness.* New York, NY: Cambridge University Press.

Baars, Bernard J. – Geld, Natalie – Kozma, Robert (2021). „Global Workspace Theory (GWT) and Prefrontal Cortex: Recent Developments". *Frontiers in Psychology* 12, 749868. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.749868.

Balister, Paul – Bollobás, Béla – Kozma, Robert (2006). „Large Deviations for Mean Field Models of Probabilistic Cellular Automata". *Random Structures and Algorithms* 29/3, 399–415. https://doi.org/10.1002/rsa.20126.

Berlekamp, Elwyn R. – Conway, John H. – Guy, Richard K. (1982). *Winning Ways for Your Mathematical Plays,* 2. New York, NY: Academic Press.

Bollobás, Béla (2001). *Random Graphs.* Cambridge Studies in Advanced Mathematics. 2. kiad. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Bollobás, Béla – Kozma, Robert – Miklós, Dezső, szerk. (2010). *Handbook of Large-scale Random Networks.* Bolyai Society Mathematical Studies 18. Berlin–Heidelberg: Springer Nature.

Crick, Francis – Koch, Chris (2003). „A Framework for Consciousness". *Nature Neuroscience* 6/2, 119–126. https://doi.org/10.1038/nn0203-119.

Heck, Detlef H. et al. (2017). „Breathing as a Fundamental Rhythm of Brain Function". *Frontiers in Neural Circuits* 10, 115. https://doi.org/10.3389/fncir.2016.00115.

Janson, Svante et al. (2019). „A Modified Bootstrap Percolation on a Random Graph Coupled with a Lattice". *Discrete Applied Mathematics* 258, 152–165. https://doi.org/10.1016/j.dam.2018.11.006.

Kondor Zsuzsanna (2025). „A mesterséges intelligencia és a tudat". *Magyar Tudomány* 186/8, 1567–1573. https://doi.org/10.1556/2065.186.2025.8.10.

Kozma, Robert et al. (2005). „Phase Transitions in the Neuropercolation Model of Neural Populations with Mixed Local and Non-Local Interactions". *Biological Cybernetics* 92/6, 367–379. https://doi.org/10.1007/s00422-005-0565-z.

Kozma, Robert – Freeman, Walter J. (2026) [2016]. *Cognitive Phase Transitions in the Cerebral Cortex – Enhancing the Neuron Doctrine by Modeling Neural Fields*. 2. kiad. Cham: Springer.

Kozma, Robert – Puljic, Marko (2015). „Random Graph Theory and Neuropercolation for Modeling Brain Oscillations at Criticality". In: Buzsáki, George – Freeman, Walter J., szerk. Special Issue: Brain Rhythms and Dynamic Coordination. *Current Opinion in Neurobiology* 31, 181–188. https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.11.005.

Kuhn, Thomas S. (1984) [1962]. *A tudományos forradalmak szerkezete*. Ford. Bíró Dániel. Budapest: Gondolat Könyvkiadó.

Kurzweil, Ray (2026). *The Singularity Is Nearer: When We Merge with AI*. New York: Penguin Books.

LeDoux, Joseph E. – Brown, Richard (2017). „A Higher-Order Theory of Emotional Consciousness". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 114/10, E2016–E2025. https://doi.org/10.1073/pnas.1619316114.

Mashour, George A. et al. (2020). „Conscious Processing and the Global Neuronal Workspace Hypothesis". *Neuron* 105/5, 776–798. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2020.01.026.

Neumann, John von (1958). *The Computer and the Brain*. New Haven, CT: Yale University Press.

Tononi, Giulio et al. (2016). „Integrated Information Theory: From Consciousness to Its Physical Substrate". *Nature Reviews Neuroscience* 17/7, 450–461. https://doi.org/10.1038/nrn.2016.44.

Werbos, Paul J. (2024). „The New AI: Basic Concepts, and Urgent Risks and Opportunities in the Internet of Things". In: Morabito, Carlo et al., szerk. *Artificial Intelligence in the Age of Neural Networks and Brain Computing.* London: Academic Press, 93–127. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96104-2.00006-3.

Brought to you by MTA Könyvtár és Információs Központ olvasók | Unauthenticated | Downloaded 11/17/26 01:47 PM UTC