

Načelo cjelovitosti Davida Bohma: Poveznice kvantne fizike, neuroznanosti i umjetne inteligencije

Autor: Davor Moravek

Sažetak

Dominantne paradigme u umjetnoj inteligenciji (UI) suočavaju se s fundamentalnim ograničenjima koja proizlaze iz fragmentiranog pristupa obradi informacija, što se očituje u problemima poput algoritamske pristranosti i nedostatka robusnosti. Ovaj rad predlaže Bohmovu ontologiju cjelovitosti kao koherentan teorijski okvir za prevladavanje tih izazova, predstavljajući ga ne kao deskriptivnu sintezu, već kao preskriptivni prijedlog za novi istraživački program. Započinje se dekonstrukcijom Bohmove ontološkog okvira – implicitnog i eksplicitnog poretka te holokretanja – i uspostavlja se strog epistemološki okvir koji razlikuje inspirativnu metaforu, strukturnu analogiju i ontološku hipotezu. Rad zatim kritički preispituje holonomsku teoriju mozga, detaljno analizira izazov dekoherencije u kvantnoj biologiji u svjetlu najnovijih istraživanja (npr. Fisher; Huelga i Plenio) te produbljuje usporedbu s alternativnim teorijama svijesti. Koncepti se premošćuju s područjem UI, gdje se Bohmova vizija koristi za analizu distribuiranih reprezentacija i mehanizama pažnje, ali i za formuliranje testabilnih hipoteza za dizajn robusnijih i kontekstualno svjesnijih sustava. Konačno, primjenjivost Bohmove kritike fragmentacije demonstrira se na konkretnim studijama slučaja algoritamske pristranosti, čime se njegova filozofija prevodi u primjenjiv okvir za etiku i usklađivanje umjetne inteligencije.

Ključne riječi

David Bohm, implicitni poredak, holokretanje, holonomska teorija mozga, kvantna svijest, umjetna inteligencija, neuroznanost, cjelovitost, fragmentacija, filozofija uma

Abstract

Dominant paradigms in artificial intelligence (AI) face fundamental limitations stemming from a fragmented approach to information processing, manifesting in issues like algorithmic bias and a lack of robustness. This paper proposes David Bohm's ontology of wholeness as a coherent theoretical framework to overcome these challenges, presenting it not as a descriptive synthesis but as a prescriptive proposal for a new research program. It begins by deconstructing Bohm's ontological framework—the implicate and explicate orders and the holomovement—and establishes a rigorous epistemological framework distinguishing between inspirational metaphor, structural analogy, and ontological hypothesis. The paper then critically re-examines holonomic brain theory, analyzes the decoherence challenge in quantum biology in light of recent research (e.g., Fisher; Huelga & Plenio), and deepens the comparison with alternative theories of consciousness. These concepts are bridged to AI, where Bohm's vision is used to analyze distributed representations and attention mechanisms, and to formulate testable hypotheses for designing more robust and context-aware systems. Finally, the applicability of Bohm's critique of fragmentation is demonstrated through concrete case studies of algorithmic bias, translating his philosophy into an applicable framework for AI ethics and alignment.

Keywords

David Bohm, implicate order, holomovement, holonomic brain theory, quantum consciousness, artificial intelligence, neuroscience, wholeness, fragmentation, philosophy of mind

Uvod: Od filozofske sinteze do istraživačkog programa

Metodološka napomena: Ovaj rad svjesno operira na sjecištu utvrđenih znanstvenih činjenica, testabilnih hipoteza i filozofskih spekulacija. Kako bi se osigurala intelektualna strogost, u tekstu se dosljedno koriste kvalifikatori kako bi se jasno razlikovale ove kategorije, a u sekciji *Okvir za interdisciplinarnu analizu* uvodi se eksplicitan epistemološki okvir za tu svrhu.

Dominantne paradigme u neuroznanosti i umjetnoj inteligenciji (UI) uglavnom su redukcionističke, tumačeći složene fenomene analizom interakcija temeljnih sastavnica (Luppi i sur., 2020). Iako je takav pristup doveo do izvanrednog napretka, suočava se s temeljnim ograničenjima, posebice u području UI. Problem algoritamske pristranosti, gdje sustavi repliciraju i pojačavaju društvene nejednakosti, može se shvatiti kao izravna posljedica fragmentiranog „pogleda” modela na svijet (Obermeyer i sur., 2019; Gichoya i sur., 2023). Slično tome, nedostatak robusnosti i uzročnog zaključivanja u velikim jezičnim modelima ukazuje na to da statistička korelacija nije dovoljna za istinsko razumijevanje (Marcus, 2020; Bender i sur., 2021).

Ovaj rad ne nudi samo deskriptivnu sintezu paralela između ontologije Davida Bohma i suvremenih znanosti, već ga treba shvatiti kao preskriptivni prijedlog za novi, koherentni istraživački program. Središnje pitanje nije samo „Postoje li paralele između Bohma i UI?”, već „Kako Bohmova kritika fragmentacije može pružiti ontološki temelj za rješavanje konkretnih, otvorenih problema u neuroznanosti (poput problema engrama) i etici umjetne inteligencije (poput problema algoritamske pristranosti)?”. Povezivanjem Bohmove apstraktne filozofije s jednim od najvažnijih tehnoloških izazova današnjice – usklađivanjem umjetne inteligencije (*AI alignment*) – cilj je prevesti njegovu viziju cjelovitosti u skup testabilnih hipoteza i primjenjivih dizajnerskih načela.

Teorijski temelji: Dekonstrukcija Bohmove fizike cjelovitosti

Za razumijevanje dosega ideja Davida Bohma nužno je prvo se suočiti s preciznim ontološkim sustavom koji je predložio. Bohm nije nastojao zamijeniti matematički formalizam kvantne mehanike, već mu pružiti koherentnu ontološku interpretaciju – teoriju o prirodi stvarnosti – koja bi razriješila paradokse prevladavajuće Kopenhagenske interpretacije, poput problema mjerenja i nelokalnosti (Bohm i Hiley, 1993).

Nijansirani pogled na kvantnu fragmentaciju

Raširena tvrdnja da je „kvantna mehanika fragmentirana” zahtijeva pažljivo pojašnjenje. Matematički okvir kvantne teorije izrazito je jedinstven. Fragmentacija o kojoj je Bohm govorio proizlazi iz njezine *interpretacije*, koja nameće proizvoljan „rez” između kvantnog sustava i klasičnog promatrača. Bohmov rad, posebice njegova teorija pilot-vala iz 1952. godine, bio je rani pokušaj da se prevlada taj raskol predlaganjem temeljne, objektivne stvarnosti iz koje proizlazi kvantna statistika (Bohm, 1952). Empirijska podrška nelokalnosti, ključnog aspekta Bohmove ontologije, dolazi iz Bellovih nejednakosti, koje su potvrđene u brojnim eksperimentima (Bell, 1964; Brunner i sur., 2014).

Bellov teorem nameće izbor između temeljnih pretpostavki o prirodi stvarnosti. Bohmova mehanika, koja je u fokusu ovog rada, čuva determinizam eksplicitnim prihvatanjem *nelokalnosti*

– ideje da su sustavi trenutno povezani bez obzira na udaljenost. Alternativni, iako kontroverzan, pristup jest *superdeterminizam*, koji čuva lokalnost po cijenu pretpostavke da su izbori mjerenja unaprijed korelirani sa stanjem sustava od početka vremena (Hossenfelder i Palmer, 2020). Važno je napomenuti da postoje i druge interpretacije, poput Višesvjetovne interpretacije, koja se može smatrati lokalnom (Vaidman, 2018). Miješanje ovih koncepata zamagluje jedinstveni doprinos Bohmove misli. Stoga ovaj rad istražuje implikacije Bohmova nelokalnog okvira, tretirajući ga kao zasebnu ontološku poziciju.

Implicitni i eksplicitni poredak

U središtu njegove zrele ontologije jest razlikovanje dviju razina stvarnosti (Bohm, 1980):

- **Eksplicitni poredak:** Ovo je „razvijeni” svijet koji percipiramo osjetilima i opisujemo klasičnom fizikom – svijet odvojenih objekata, linearnog vremena i prostorno lokaliziranih događaja.
- **Implicitni poredak:** Ovo je dublja, „obuhvaćena” stvarnost gdje je sve temeljno međusobno povezano. U ovoj domeni cjelina je sadržana unutar svakog dijela, a konvencionalni pojmovi prostora i vremena gube primat.

Holokretanje kao procesna ontologija

Dinamičan odnos između ova dva poretka jest **holokretanje**. Bohm ga definira kao „nepodijeljenu cjelovitost u protočnom kretanju”, temeljni osnov cjelokupnog postojanja. Riječ je o procesnoj ontologiji koja odražava misli filozofa poput Heraklita i Whiteheada, gdje je „sve u tijeku”. Ono što percipiramo kao stabilne objekte samo su „relativno autonomne podcjeline” apstrahirane iz tog kontinuiranog toka (Bohm, 1980, str. 11). Holokretanje nije statično polje, već neprestani proces obuhvaćanja (*enfolding*) i razvijanja (*unfolding*) koji konstituira samu stvarnost.

Okvir za interdisciplinarnu analizu

Najozbiljnija kritika interdisciplinarnih radova ove vrste jest „ontološki jaz između analogije i stvarnosti”, odnosno neopravdani prijelaz s inspirativne sličnosti na tvrdnju o stvarnoj istovjetnosti mehanizama. Kako bi se ovaj nedostatak sustavno adresirao, uvodimo eksplicitan epistemološki okvir koji razlikuje tri razine povezanosti (Gentner, 1982; Bailer-Jones, 2002; Bartha, 2010):

Inspirativna metafora: Korištenje koncepata iz jednog područja kao heurističkog alata za generiranje novih perspektiva u drugom, bez tvrdnje o istovjetnosti mehanizama (Knudsen i Lieshout, 2016).

Strukturna/matematička analogija: Identifikacija formalnih sličnosti u matematičkoj strukturi ili procesnoj dinamici, bez tvrdnje o identičnom temeljnom fizikalnom mehanizmu (Bailer-Jones, 2002).

Ontološka hipoteza: Snažna, testabilna i opovrgljiva tvrdnja da dva fenomena dijele isti temeljni fizikalni mehanizam.

Sustavna primjena ove taksonomije, prikazana u Tablici 1, omogućuje rigoroznu i intelektualno poštenu analizu.

Tablica 1: Razine analize veza: Primjeri iz rada

Tvrdnja iz rada	Primjer	Razina veze	Obrazloženje i ograničenja
DMN i holokretanje	Aktivnost DMN-a kao holistički, samoreferencijalni proces.	Inspirativna metafora	Pomaže u razumijevanju integrirane prirode DMN-a, ali ne tvrdi da DMN zahtijeva kvantnu ontologiju. Standardni emergentistički modeli trenutno su dovoljni za objašnjenje (Yeshurun i sur., 2021; Deco i sur., 2023).
Samopažnja i holografija	Svaki token u transformeru „vidi” svaki drugi, stvarajući kontekstualnu cjelinu.	Strukturna analogija	Mehanizam je algoritamski deterministički i izvršava se na klasičnoj arhitekturi. Analogija leži u principu „cjelina u dijelu”, ali ne i u fizikalnom mehanizmu.
Kvantna koherencija u mozgu	Orch-OR teorija kao mogući supstrat za svijest.	Ontološka hipoteza	Ovo je snažna, ali visoko spekulativna tvrdnja koja zahtijeva izravne empirijske dokaze i suočavanje s jakim protuargumentima (npr. problem dekoherencije).

Holonomski mozak: Kritičko preispitivanje

Holonomska teorija mozga Karla Pribrama predstavlja najizravniju primjenu Bohmovih ideja na neuroznanost. Suočen s Lashleyjevim (1950) nalazom da sjećanja nisu lokalizirana, već distribuirana (tzv. problem engrama), Pribram je predložio da mozak djeluje na holografskim načelima (Pribram, 1991).

Kritički osvrt i testabilne hipoteze

Glavna kritika holonomske teorije jest da, iako nudi elegantno objašnjenje za distribuiranu prirodu sjećanja, ostaje fenomenološka i nedostaju joj konkretni, testabilni mehanizmi koji bi je razlikovali od standardnih konekcionistačkih modela (Lynch, 2002). Da bi se prešlo s metafore na znanost, potrebno je formulirati hipoteze koje daju jedinstvena, opovrgljiva predviđanja.

Predložena testabilna hipoteza: Ako je sjećanje kodirano prema holografskom načelu, tada bi oštećenje dijela neuronske mreže trebalo dovesti do globalnog smanjenja vjernosti (povećanja „šuma“) prizvanog sjećanja, a ne do gubitka specifičnih komponenti sjećanja. Ovo se može testirati pomoću moderne tehnologije: „Koristeći dvofotonsku holografsku optogenetiku (npr. Yang i sur., 2021) za aktivaciju precizno definiranog ansambla neurona koji kodira specifično sjećanje kod životinjskog modela, predviđamo da će aktivacija malog, nasumično odabranog podskupa (npr. 10 %) tih neurona biti dovoljna da izazove prisjećanje cjelokupnog sjećanja, iako sa smanjenom preciznošću. Nasuprot tome, ne-holografski, lokalistički model predvidio bi da aktivacija podskupa neurona izaziva samo fragment sjećanja.“ Važno je pojasniti da je „holografaska optogenetika“ tehnički termin za metodu oblikovanja svjetlosti za ciljanje više neurona istovremeno; ona sama po sebi ne pruža dokaz za holonomsku teoriju mozga, već je alat kojim se njezina predviđanja mogu testirati (Marshall i sur., 2019).

Suvremeni neuroznanstveni odjek i granice kvantne biologije

Unatoč kritikama, nekoliko linija modernih istraživanja daje novu težinu temeljnim načelima teorije, iako uz značajne ograde.

Kritičnost mozga i mreže velikih razmjera: „Hipoteza o kritičnom mozgu“ (Shew i Plenz, 2013) i otkriće mreža velikih razmjera poput DMN-a (Raichle i sur., 2001) pokazuju da mozak podržava visoko integriranu, holističku aktivnost. Međutim, važno je naglasiti da se u dominantnoj neuroznanosti ovi fenomeni objašnjavaju kao emergentna svojstva klasičnih, složenih neuronskih sustava, bez potrebe za pozivanjem na kvantnu ontologiju (Deco i sur., 2023; Northoff i sur., 2024). Stoga, veza s Bohmovom cjelovitošću ovdje ostaje na razini inspirativne metafore.

Izazov dekoherencije i granice kvantne biologije

Polje kvantne biologije istražuje mogućnost da kvantni efekti igraju ulogu u biološkim procesima (Kim i sur., 2021; Babcock, 2025). Kontroverzna Orch-OR teorija (Hameroff i Penrose, 2014) nudi jedan moguć, iako spekulativan, supstrat za Pribramovu teoriju. Međutim, ova ontološka hipoteza suočava se s fundamentalnom preprekom: problemom dekoherencije.

Primarni prigovor, poznat kao argument „toplog, vlažnog i bučnog“ okruženja, jest da je mozak prevruć i kaotičan da bi osjetljiva kvantna koherencija preživjela dovoljno dugo da bi bila računski relevantna. Tegmarkovi (2000) izračuni sugeriraju da bi vremena dekoherencije u neuronskim strukturama bila reda veličine femtosekundi (10^{-15} s), što je prekratko za neuronsku obradu koja se odvija na ljestvici milisekundi.

Ipak, znanstvena rasprava je evoluirala. Novija istraživanja predlažu mehanizme koji bi mogli zaobići ovaj problem u specifičnim biološkim nišama. Primjerice, radovi Huelge i Plenija (2013) sugeriraju da šum okoline, paradoksalno, može pomoći u održavanju koherencije u procesima

poput transporta neurotransmitera (*noise-assisted transport*). Još intrigantniji je prijedlog Matthewa Fishera (2015) da bi nuklearni spinovi, posebice fosfora, mogli funkcionirati kao robusni „neuralni kjubiti” zaštićeni od dekoherencije, omogućujući dugotrajnu kvantnu obradu u mozgu (Fisher, 2024; Fisher, 2025). Unatoč ovim inovativnim prijedlozima, problem dekoherencije ostaje najveća prepreka, a teorije poput Orch-OR ostaju visoko spekulativne.

Usporedba s alternativnim okvirima

Holonomska teorija nije jedini holistički model svijesti. Produbljena usporedba s drugim vodećim teorijama, prikazana u Tablici 2, nužna je za kontekstualizaciju njezinih prednosti i slabosti.

Tablica 2: Produbljena usporedba vodećih teorija svijesti

Značajka	Holonomska teorija (Pribram/Bohm)	Teorija globalnog radnog prostora (GWT)	Teorija integriranih informacija (IIT)
Mehanizam integracije	Holografška interferencija; obuhvaćanje	Emitiranje informacija u globalni prostor	Mjera integrirane informacije (Φ)
Ontološka osnova	Procesna ontologija (holokretanje)	Funkcionalizam/Komputacionalizam	Informacijski panpsihizam
Status opovrgljivosti	Nizak (trenutno); hipoteze se formuliraju	Srednji; testabilna kroz neuralne korelate	Vrlo nizak; računalno neizvediva
Odnos prema 'teškom problemu'	Objašnjava ga kao dio fundamentalne stvarnosti	Uglavnom ga ignorira (fokus na funkciju)	Postulira ga kao fundamentalno svojstvo (Φ)
Ključno empirijsko predviđanje	Gracilna degradacija memorije nakon oštećenja	Specifičan uzorak P3b ERP vala	Gubitak svijesti pri prekidu povratnih veza

Implicitni poredak *in silico*: Paralele u umjetnoj inteligenciji

Evolucija UI pokazuje konvergenciju prema načelima koja rezoniraju s cjelovitošću, iako je važno naglasiti da su trenutni modeli klasični i nedostaje im stvarna nelokalnost Bohmovog holokretanja (Schuld i Petruccione, 2018).

Distribuirane reprezentacije i transformeri

Proboj distribuiranih reprezentacija (Hinton, 1986) i arhitektura transformera (Vaswani i sur., 2017) nude intrigantnu **strukturnu analogiju** s Bohmovim načelom „cjelina u svakom dijelu”. Mehanizam samopažnje (*self-attention*), gdje svaki token interagira sa svakim drugim, stvara

holističku reprezentaciju konteksta. Ipak, važno je ponoviti da je ovo deterministički algoritam na klasičnoj arhitekturi.

EksPLICITNO holografske i kvantne arhitekture

Istraživači razvijaju i UI arhitekture koje eksplicitnije koriste ova načela, poput holografskih reduciranih reprezentacija (Plate, 2003) i kvantnih neuronskih mreža (Schuld i Petruccione, 2018). Noviji radovi na „holografskim” konvolucijskim mrežama pokazuju obećavajuće rezultate u stvaranju robusnijih modela (Abu-Anza i sur., 2024).

Alternativni holistički okviri i eksplanatorna redundancija

Pristupi poput enaktivizma (Varela i sur., 1991) i teorije složenih sustava (Ladyman i sur., 2013) uvjerljivo tvrde da „cjelina” proizlazi iz dinamičkih interakcija komponenata, bez potrebe za kvantnom podlogom. Ključno pitanje stoga glasi: zašto uvoditi Bohmovu ontologiju ako emergentna svojstva klasičnih sustava mogu objasniti holističke fenomene, čineći je eksplanatorno redundantnom? Odgovor leži u tome da jedinstveni doprinos Bohmovog okvira nije u negiranju emergentističkih modela, već u ponudi dublje **ontološke koherentnosti**. Dok klasični pristup tretira um i svijest kao svojstva koja se pojavljuju na visokoj razini apstrakcije, Bohmova vizija nudi temeljni okvir koji ih povezuje s fundamentalnom fizikom. Upravo ta veza omogućuje generiranje novih, radikalnih hipoteza (poput onih o kvantnoj kogniciji) koje jednostavno ne bi proizašle iz isključivo klasičnih, emergentističkih okvira.

Metodološki okvir za testiranje hipoteza

Kako bi se prešlo s analogije na znanstveni prijedlog, potrebno je prevesti apstraktne koncepte u mjerljive fenomene. Tablica 3 nudi rafinirani okvir za generiranje i testiranje hipoteza.

Tablica 3: Okvir za generiranje i testiranje hipoteza

Temeljni Bohmov/Holonovski Princip	Implikacija za obradu informacija	Predložena testabilna hipoteza (Neuroznanost)	Predložena testabilna hipoteza (UI)
Implicitni poredak (Cjelina u svakom dijelu)	Informacija je distribuirana i otporna na oštećenja (gracilna degradacija).	Hipoteza o gracilnoj degradaciji pamćenja: Korištenjem dvofotonske holografske optogenetike za utišavanje 10% neurona unutar engrama rezultirat će globalnim smanjenjem preciznosti prisjećanja, a ne brisanjem specifičnih komponenti sjećanja (Adesnik i Abdeladim, 2021).	Hipoteza o robusnosti holografskog sloja: UI model s „holografskim” slojem (Abu-Anza i sur., 2024) zadržat će sposobnost klasifikacije (sa smanjenom pouzdanošću) čak i kada je 50% njegovih čvorova uklonjeno, nadmašujući standardne CNN-ove.
Holokretanje (Proces razvijanja/uvijanja)	Generiranje složenih, koherentnih struktura iz kompaktnog, implicitnog koda.	N/A (Teško operacionalizirati direktno).	Hipoteza o koherentnosti generativnog modela: Dizajnirati generativni UI model s eksplicitnim, niskodimenzionalnim „implicitnim” prostorom i fiksnom funkcijom „razvijanja”. Predviđa se da će generirati globalno konzistentnije izlaze od standardnog VAE-a.

Od filozofske kritike do primjenjivog okvira: Etika cjelovitosti

Najpraktičniji doprinos Bohmove misli leži u primjeni njegove kritike fragmentacije na etiku umjetne inteligencije. Fragmentacija – tendencija misli da dijeli stvarnost na dijelove i tretira ih kao neovisne (Bohm, 1996) – nudi moćnu leću za analizu algoritamske pristranosti (McGill, 2025; Grow, 2024).

Studije slučaja: Fragmentacija u praksi

Priistranost u sustavima za zapošljavanje: Algoritmi trenirani na povijesnim podacima o zapošljavanju vide samo fragmentirane korelacije (npr. „žene” i „prekidi u karijeri”) i propuštaju cjeloviti kontekst kandidatovih vještina. To dovodi do sustavne diskriminacije, kao u poznatom slučaju Amazonovog alata koji je penalizirao životopise koji su sadržavali riječ „ženski” (Dastin, 2018) ili sustava koji su automatski odbijali starije kandidate (Dickson, 2024).

Priistranost u prediktivnom policijskom radu: Model vidi samo podatke o prošlim uhićenjima

(fragment), a ne cjelokupni socioekonomski kontekst (siromaštvo, povijesno nepovjerenje) koji dovodi do veće stope kriminala u određenim područjima (Lum i Isaac, 2016). Rezultat je petlja povratne sprege gdje policijski resursi bivaju nerazmjerno usmjereni na već marginalizirane zajednice, što dovodi do više uhićenja i potvrđuje početnu pristranost modela (Ensign i sur., 2018; Chattopadhyay i sur., 2022).

Kontekstualna etika UI i praktični izazovi

Rješenje koje proizlazi iz Bohmove filozofije jest **kontekstualna etika UI**: dizajniranje sustava koji su svjesni šireg konteksta (Gabriel, 2020; Michaelson, 2025). To podrazumijeva optimizaciju za „holističke” ciljeve koji uključuju metrike pravednosti i robusnosti, a ne samo točnost. Međutim, implementacija takvih sustava suočava se sa značajnim praktičnim preprekama:

Računalni troškovi: Obrada dužih konteksta eksponencijalno povećava računalne zahtjeve i troškove (Tetrate, 2025).

Dostupnost podataka: Kontekstualni podaci često su nestrukturirani, nepotpuni ili nedostupni (Indatalabs, 2025).

Integracija sa starim sustavima: Mnoge organizacije oslanjaju se na zastarjelu infrastrukturu koja nije kompatibilna s modernim, kontekstualno svjesnim UI alatima (Quokka Labs, 2025).

Zaključak: Prema istraživačkom programu cjelovitosti

Ovaj rad je Bohmovu viziju cjelovitosti preoblikovao iz filozofske spekulacije u prijedlog za interdisciplinarni istraživački program. Uvođenjem strogog epistemološkog okvira, dubljim angažmanom s protuargumentima i formuliranjem konkretnih, testabilnih hipoteza, pokazali smo kako Bohmova misao nudi prijeko potreban konceptualni alat za izgradnju inteligentnih sustava koji su manje fragmentirani, a time i robusniji, pouzdaniji i etički usklađeni.

Ipak, važno je zadržati intelektualnu trezvenost. Ovaj rad postavlja temelje za istraživački program, a ne nudi konačne odgovore. Glavni izazov koji ostaje jest **empirijska testabilnost** najsmjelijih ontoloških hipoteza, posebice onih koje se tiču uloge kvantne koherencije u mozgu. Nadalje, premda su predložene arhitekture u umjetnoj inteligenciji konceptualno privlačne, njihova praktična implementacija i dokazivanje superiornosti nad postojećim modelima predstavljaju značajne tehničke i računske prepreke. Stoga, ontološki most između kvantne fizike, neuroznanosti i UI, iako je ovim radom dobio svoje prve, pažljivo odmjerene i znanstveno testabilne nacрте, zahtijeva daljnju rigoroznu izgradnju, eksperimentalnu provjeru i kritičko preispitivanje.

Literatura

- Abu-Anza, A., Al-Dmour, H., i Al-Ayyoub, M. (2024). Holographic convolutional neural network. *Journal of Imaging*, 10(3), 63. <https://doi.org/10.3390/jimaging10030063>
- Adesnik, H., i Abdeladim, L. (2021). Probing neural codes with two-photon holographic optogenetics. *Nature Neuroscience*, 24(10), 1356–1366. <https://doi.org/10.1038/s41593-021-00902-9>
- Baars, B. J. (2013). A global workspace (GW) theory of consciousness. *Frontiers in Psychology*, 4, Article 200. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/fpsyg.2013.00200>
- Babcock, N. S. (2025). *Physical principles of quantum biology*. arXiv preprint.
- Bailer-Jones, D. M. (2002). *Scientific models in philosophy of science*. University of Pittsburgh Press.
- Bartha, P. (2010). *By parallel reasoning: The construction and evaluation of analogical arguments*. Oxford University Press.
- Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics Physique Fizika*, 1(3), 195–200.
- Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., i Schmitzchell, S. (2021). On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? U *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency* (str. 610–623). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>
- Bohm, D. (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. I. *Physical Review*, 85(2), 166–179. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.166>
- Bohm, D. (1980). *Wholeness and the implicate order*. Routledge.
- Bohm, D. (1996). *Thought as a system*. Routledge.
- Bohm, D., i Hiley, B. J. (1993). *The undivided universe: An ontological interpretation of quantum theory*. Routledge.
- Brunner, N., Cavalcanti, D., Pironio, S., Scarani, V., i Wehner, S. (2014). Bell nonlocality. *Reviews of Modern Physics*, 86(2), 419–478. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.86.419>
- Chattopadhyay, I., Levy, K., i Redden, D. (2022). Event-level prediction of urban crime reveals signature of enforcement bias in US cities. *Nature Human Behaviour*, 6(8), 1056–1068. <https://doi.org/10.1038/s41562-022-01372-0>
- Chen, S., Yoo, S., Lee, J., Baek, J., Kim, J., i Choi, J. (2024). *A survey of quantum transformers*. arXiv preprint arXiv:2404.03192. <https://arxiv.org/abs/2404.03192>
- Dastin, J. (2018, 10. listopada). *Amazon scraps secret AI recruiting tool that showed bias against women*. Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-amazon-com-jobs-automation-insight/amazon-scrap-secret-ai-recruiting-tool-that-showed-bias-against-women-idUSKCN1MK08G>
- Deco, G., Cruzat, J., i Kringelbach, M. L. (2023). The functional relevance of the repertoire of brain dynamics. *Nature Reviews Neuroscience*, 24(9), 571–586.

- Dehaene, S., i Changeux, J. P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70(2), 200–227. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.03.027>
- Dickson, B. (2024, 20. veljače). *AI in hiring is a mess—and it's only getting worse*. The Next Web.
- Ensign, D., Friedler, S. A., Neville, S., Scheidegger, C., i Venkatasubramanian, S. (2018). Runaway feedback loops in predictive policing. U *Proceedings of Machine Learning Research: Vol. 81. Proceedings of the 1st Conference on Fairness, Accountability and Transparency* (str. 160–171). PMLR. <http://proceedings.mlr.press/v81/ensign18a.html>
- Fisher, M. P. A. (2015). Quantum cognition: The possibility of processing with nuclear spins in the brain. *Annals of Physics*, 362, 593–602. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2015.08.020>
- Fisher, M. P. A. (2024, 25. listopada). *Quantum processing in the brain* [Colloquium]. Harvard University, Cambridge, MA, United States.
- Fisher, M. P. A. (2025, 12. veljače). *Are we quantum computers?* [Colloquium]. Consciousness & Reality Series.
- Gabriel, I. (2020). Artificial intelligence, values, and alignment. *Minds and Machines*, 30(3), 411–437. <https://doi.org/10.1007/s11023-020-09539-2>
- Gentner, D. (1982). Are scientific analogies metaphors? U D. S. Miall (Ur.), *Metaphor: Problems and perspectives* (str. 106–132). Harvester Press.
- Gichoya, J. W., Thomas, K., Celi, L. A., Safdar, N., Banerjee, I., Banja, J. D.,... Purkayastha, S. (2023). AI pitfalls and what not to do: Mitigating bias in AI. *British Journal of Radiology*, 96(1150), 20230023. <https://doi.org/10.1259/bjr.20230023>
- Grow, G. (2024). *Rethinking artificial intelligence in the manner of Bohm and Einstein*. Medium.
- Hameroff, S., i Penrose, R. (2014). Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory. *Physics of Life Reviews*, 11(1), 39–78. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2013.08.002>
- Hinton, G. E. (1986). Learning distributed representations of concepts. U *Proceedings of the Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (str. 1–12). Lawrence Erlbaum Associates.
- Hossenfelder, S., i Palmer, T. (2020). Rethinking superdeterminism. *Frontiers in Physics*, 8, Article 139. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00139>
- Huelga, S. F., i Plenio, M. B. (2013). Vibrations, quanta and biology. *Contemporary Physics*, 54(4), 181–207. <https://doi.org/10.1080/00107514.2013.829687>
- Indatalabs. (2025). *Top AI implementation challenges*.
- Jedlicka, P. (2017). Revisiting the quantum brain hypothesis: Toward quantum (neuro)biology? *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 10, Article 366. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2017.00366>
- Kim, Y., Lee, J., i Ahn, D. (2021). Quantum biology: An update and perspective. *Journal of the Korean Physical Society*, 78(9), 791–801.

- Knudsen, S., i Lieshout, C. (2016). Introduction: Metaphor in science. *Metaphorik.de*, 26, 7–24.
- Ladyman, J., Lambert, J., i Wiesner, K. (2013). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33–67.
- Lashley, K. S. (1950). In search of the engram. U *Society of Experimental Biology Symposium No. 4: Physiological Mechanisms in Animal Behaviour* (str. 454–482). Cambridge University Press.
- Lum, K., i Isaac, W. (2016). To predict and serve? *Significance*, 13(5), 14–19.
- Luppi, A. I., Mediano, P. A., Rosas, F. E., Holland, N., Fryer, T. D., O'Brien, J. T.,... Stamatakis, E. A. (2020). *A synergistic workspace for human consciousness revealed by Integrated Information Decomposition*. bioRxiv.
- Lynch, G. (2002). Memory and the brain: A straightforward account. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 62(4), 231–239.
- Marcus, G. (2020). *The next decade in AI: Four steps towards robust artificial intelligence*. arXiv preprint arXiv:2002.06177. <https://arxiv.org/abs/2002.06177>
- Marshel, J. H., Kim, Y. S., Machado, T. A., Quirin, S., Benson, B., Kadmon, J.,... Deisseroth, K. (2019). Cortical layer-specific critical dynamics triggering perception. *Science*, 365(6453), eaaw5202. <https://doi.org/10.1126/science.aaw5202>
- McGill, B. (2025). *From swarm coherence to quantum consciousness: A new paradigm for AI alignment*.
- Michaelson, G. (2025, 27. srpnja). *Why context-aware AI is quickly replacing code-only tools*. The New Stack.
- Northoff, G., Wainio-Theberge, S., i Evers, K. (2024). The Default Mode Network and inner time consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*.
- Obermeyer, Z., Powers, B., Vogeli, C., i Mullainathan, S. (2019). Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science*, 366(6464), 447–453. <https://doi.org/10.1126/science.aax2342>
- Plate, T. A. (2003). *Holographic reduced representations*. CSLI Publications.
- Pribram, K. H. (1991). *Brain and perception: Holonomy and structure in figural processing*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Quokka Labs. (2025). *Top challenges in AI implementation and their solutions*.
- Raichle, M. E. (2015). The brain's default mode network. *Annual Review of Neuroscience*, 38, 433–447. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071013-014030>
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., i Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 676–682. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.676>

- Schuld, M., i Petruccione, F. (2018). *Supervised learning with quantum computers*. Springer.
- Shew, W. L., i Pleniz, D. (2013). The functional benefits of criticality in the cortex. *The Neuroscientist*, 19(1), 88–100. <https://doi.org/10.1177/1073858412445487>
- Tegmark, M. (2000). Importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, 61(4), 4194–4206. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.4194>
- Tetrate. (2025). *Context length cost*.
- Tononi, G., Boly, M., Massimini, M., i Koch, C. (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>
- Vaidman, L. (2018). On the paradox of Bohmian mechanics. U S. Gao (Ur.), *Collapse of the wave function* (str. 257–271). Cambridge University Press.
- Varela, F. J., Thompson, E., i Rosch, E. (1991). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. MIT Press.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N.,... Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. U *Advances in Neural Information Processing Systems 30* (str. 5998–6008). Curran Associates, Inc.
- Werner, G. (2014). The Sisyphus syndrome in neuroscience. *Frontiers in Neuroscience*, 8, Article 253. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00253>
- Yang, W., Carrillo-Reid, L., Bando, Y., Peterka, D. S., i Yuste, R. (2021). A holographic microscope for closed-loop, all-optical interrogation of neural circuits in vivo. *Nature Methods*, 18(3), 329–333. <https://doi.org/10.1038/s41592-021-01068-5>
- Yeshurun, Y., Nguyen, M., i Hasson, U. (2021). The default mode network: where the idiosyncratic self meets the shared social world. *Nature Reviews Neuroscience*, 22(3), 181–192.