

Unificarea gravitației cu celalalte forțe fundamentale

Nicolae Sfetcu

30.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Unificarea gravitației cu celalalte forțe fundamentale",
SetThings (30 iulie 2019), URL =
<https://www.setthings.com/ro/unificarea-gravitatiei-cu-celalalte-forțe-fundamentale/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Acest articol este licențiat Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0
International. Pentru a vedea o copie a acestei licențe, vizitați
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

TEORII ALTERNATIVE ALE GRAVITAȚIEI CUANTICE.....	2
UNIFICAREA (TEORIA FINALĂ).....	4
COSMOLOGIA.....	8
BIBLIOGRAFIE.....	11

Teorii alternative ale gravitației cuantice

Gravitația bimetrică este o clasă de teorii modificate ale gravitației în care se folosesc doi tensori metrici în loc de unul,¹ a doua metrică putând fi folosită la energii înalte. În cazul în care cele două metrici interacționează, apar două tipuri de gravitoni, unul masiv și unul fără masă. Setul de teorii încearcă să explice gravitația masivă.² Astfel de teorii sunt cele ale lui Nathan Rosen, (1909-1995)³ sau Modified Newtonian Dynamics (MOND) a lui Mordehai Milgrom. Evoluțiile gravitației masive au încurajat apariția de noi teorii consistente ale gravitației bimetrică,⁴ dar niciuna nu reflectat observațiile fizice mai bine decât teoria relativității generale.⁵ Unele dintre aceste teorii (MOND, de ex.) sunt alternative la energia întunecată. Alte teorii bimetrică nu iau în considerare gravitonii masivi și nu modifică legea lui Newton, descriind universul ca o varietate de două metrici riemanniene cuplate, unde materia interacționează prin gravitație. Unele din ele stipulează viteza variabilă a luminii la densitate energetică ridicată.⁶

Bigravitația lui Rosen (1940)⁷ propune ca în fiecare punct al spațiu-timpului să existe un tensor metric euclidian în plus față de tensorul metric riemannian. Astfel, în fiecare punct al spațiu-timpului există două valori. Primul tensor metric descrie geometria spațiu-timpului, și deci câmpul gravitațional. Al doilea tensor metric, se referă la spațiu-timpul plat și descrie forțele inerțiale. Bigravitația lui Rosen satisface principiul covarianței și echivalenței. Bigravitația lui Rosen și TGR diferă în cazul propagarea undelor electromagnetice, al câmpului extern al unei stele de înaltă densitate, și în comportamentul undelor gravitaționale intense care se propagă printr-un câmp gravitațional static puternic. Predicțiile radiației gravitaționale din teoria lui Rosen nu fost infirmate de observațiile pulsarului binar Hulse-Taylor.⁸

¹ N. Rosen, „General Relativity and Flat Space. I”, *Physical Review* 57, nr. 2 (15 ianuarie 1940): 57 (2): 147–150, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.147>.

² S. F. Hassan și Rachel A. Rosen, „Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity”, *Journal of High Energy Physics* 2012, nr. 2 (24 februarie 2012): 1202 (2): 126, [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2012\)126](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2012)126).

³ Rosen, „General Relativity and Flat Space. I”, 57 (2): 147–150.

⁴ Lisa Zyga, „Gravitational Waves May Oscillate, Just like Neutrinos”, 2017, <https://phys.org/news/2017-09-gravitational-oscillate-neutrinos.html>.

⁵ Clifford Will, *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1992), 18.

⁶ J. P. Petit și G. D’Agostini, „Cosmological bimetric model with interacting positive and negative masses and two different speeds of light, in agreement with the observed acceleration of the Universe”, *Modern Physics Letters A* 29, nr. 34 (27 octombrie 2014): 29 (34): 1450182, <https://doi.org/10.1142/S021773231450182X>.

⁷ Rosen, „General Relativity and Flat Space. I”, 57 (2): 147–150.

⁸ Will, *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics*, 18.

Bigravitația masivă a apărut în 2010, dezvoltată de Claudia de Rham, Gregory Gabadadze și Andrew Tolley (*dRGT*)⁹ În teoria dRGT apare o "metrică de referință" nondinamică. Valoarea metrică de referință trebuie specificată manual. O extensie ulterioară a fost introdusă de Fawad Hassan și Rachel Rosen.¹⁰

Gravitația cuantică bohmiană încorporează configurația reală în teorie ca variabila de bază și stipulează că aceasta evoluează într-un mod natural sugerat de simetrie și de ecuația lui Schrodinger.¹¹ Teoria rezolvă problema timpului (același rol ca în TGR), și parțial problema difeomorfismului. Nu are problemele legate de rolul observatorilor și observabilelor, deoarece aceștia nu joacă niciun rol în această teorie. Funcția de undă dependentă de timp, care satisface ecuația lui Schrodinger, nu este necesară aici.

Gravitația cuantică bohmiană implică o tranziție simplă de la mecanica cuantică, încorporând configurația reală în teorie ca variabila de bază și stipulând că aceasta evoluează într-un mod natural sugerat de simetrie și de ecuația lui Schrodinger.

⁹ Claudia de Rham, Gregory Gabadadze, și Andrew J. Tolley, „Resummation of Massive Gravity”, *Physical Review Letters* 106, nr. 23 (10 iunie 2011): 106 (23): 231101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.231101>.

¹⁰ Hassan și Rosen, „Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity”, 1202 (2): 126.

¹¹ Sheldon Goldstein și Stefan Teufel, „Quantum spacetime without observers: ontological clarity and the conceptual foundations of quantum gravity”, *arXiv:quant-ph/9902018*, 5 februarie 1999, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9902018>.

Unificarea (Teoria Finală)

Domeniile de aplicabilitate ale TGR și TCC sunt diferite, astfel încât cele mai multe situații necesită folosirea doar a uneia din cele două teorii.¹² Suprapunerile apar în regiuni de dimensiuni extrem de mici și de masă ridicată, precum gaură neagră sau universul timpuriu (imediat după Big Bang). Acest conflict se presupune că poate fi rezolvat doar unificând gravitația cu celelalte trei interacțiuni, pentru a integra TGR și TCC într-o singură teorie. Teoria corzilor afirmă că la începutul universului (până la 10^{-43} secunde după Big Bang), cele patru forțe fundamentale au fost o singură forță fundamentală. Conform fizicalismului din filosofie, o TF fizică va coincide cu o teorie filosofică finală.

Au fost propuse mai multe teorii unificatoare. Marea unificare presupune existența unei forțe electronucleare. Ultimul pas în unificare ar necesita o teorie care să includă atât mecanica cuantică cât și gravitația prin relativitatea generală ("teoria finală"). După 1990, unii fizicieni consideră că teoria M 11-dimensională, identificată adesea cu una dintre cele cinci teorii ale supercorzilor perturbative, sau uneori cu supergravitația maximal-supersimetrică 11-dimensională, este teoria finală. Ideea teoriei M¹³ a preluat din ideile teoriei Kaluza-Klein, în care s-a constatat că folosirea unui spațiu-timp 5-dimensional pentru relativitatea generală (cu una din dimensiuni mică) se vede, din perspectiva 4-dimensională, la fel ca relativitatea generală obișnuită împreună cu electrodinamica lui Maxwell. O proprietate importantă a teoriei corzilor este supersimetria sa (versiunea teoriei supercorzilor) care, împreună cu dimensiunile suplimentare, sunt cele două propuneri principale pentru rezolvarea problemei. Dimensiunile suplimentare ar permite gravitației să se răspândească în celelalte dimensiuni, celelalte forțe rămânând limitate într-un spațiu-timp 4-dimensional.

Încercările de a folosi gravitația cuantică în bucle (GCB) într-o TF au eșuat, dar adepții acestui program continuă cercetările.¹⁴

Există încercări de a dezvolta o teorie finală și prin alte teorii, precum teoria sistemelor de fermioni cauzală care conține cele două teorii fizice curente (relativitatea generală și teoria câmpului cuantic) drept cazuri limitative. O altă teorie este cea a

¹² S. Carlip, „Quantum Gravity: a Progress Report”, *Reports on Progress in Physics* 64, nr. 8 (1 august 2001): 64 (8): 885–942, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>.

¹³ Steven Weinberg, *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature* (Random House, 2010).

¹⁴ Sundance Bilson-Thompson et al., „Particle Identifications from Symmetries of Braided Ribbon Network Invariants”, *arXiv:0804.0037 [hep-th]*, 1 aprilie 2008, <http://arxiv.org/abs/0804.0037>.

seturilor cauzale. Altă propunere este E8 a lui Garrett Lisi, care propune unificarea în cadrul grupului Lie.¹⁵ Modelul Strand al lui Christoph Schiller încearcă să reflecte simetria gauge a modelului standard al fizicii particulelor, iar o altă versiune implică ER=EPR, care susține că particulele inseparabile sunt legate printr-o gaură de vierme (sau podul Einstein-Rosen).¹⁶

Jürgen Schmidhuber este pentru TF, afirmând că teoremele de incompletură ale lui Gödel¹⁷ sunt irelevante pentru fizica computațională.¹⁸ Majoritatea fizicienilor susțin că teorema lui Gödel nu implică imposibilitatea unei TF.¹⁹ Unii fizicieni, inclusiv Einstein, consideră că nu trebuie confundate modelele teoretice cu adevărata natură a realității, și susțin că aproximările nu vor ajunge niciodată la o descriere completă a realității.²⁰ O dezbateră filosofică este cu privire la dacă o teorie finală poate să fie numită *legea fundamentală a universului*.²¹ Adepții TF reduționiste afirmă că teoria reprezintă legea fundamentală. Alt punct de vedere este că legile emergente (precum a doua lege a termodinamicii și teoria selecției naturale) ar trebui considerate la fel de fundamentale, și deci independente.

Numele de "teoria finală" este contrazis de natura probabilistică a predicțiilor mecanicii cuantice, de sensibilitatea la condițiile inițiale, limitările datorate orizonturilor evenimentelor, și alte dificultăți deterministe. Frank Close contrazice ideea de TF susținând că straturile naturii sunt ca niște straturi de ceapă, și numărul acestor straturi ar putea fi infinit,²² implicând o serie infinită de teorii fizice. Weinberg²³ afirmă că devreme ce este imposibil să calculăm precis chiar și un proiectil real în atmosfera Pământului, nu putem vorbi de o TF.

¹⁵ A. Garrett Lisi, „An Exceptionally Simple Theory of Everything”, *arXiv:0711.0770 [gr-qc, physics:hep-th]*, 6 noiembrie 2007, <http://arxiv.org/abs/0711.0770>.

¹⁶ Ron Cowen, „The Quantum Source of Space-Time”, *Nature News* 527, nr. 7578 (19 noiembrie 2015): 527 (7578): 290–293, <https://doi.org/10.1038/527290a>.

¹⁷ Teoremele de incompletură ale lui Gödel sunt două teoreme ale logicii matematice care stabilesc limitări inerente tuturor sistemelor axiomatice, cu excepția celor mai triviale, capabile de aritmetică. Prima teoremă afirmă că orice teorie generată efectiv, capabilă să exprime aritmetica elementară, nu poate fi atât consistentă, cât și completă.

¹⁸ Jürgen Schmidhuber, „A Computer Scientist’s View of Life, the Universe, and Everything. Lecture Notes in Computer Science”, 1997, 201–208, <http://people.idsia.ch/~juergen/everything/>.

¹⁹ Jürgen Schmidhuber, „Hierarchies of generalized kolmogorov complexities and nonenumerable universal measures computable in the limit”, *International Journal of Foundations of Computer Science* 13, nr. 04 (1 august 2002): 13 (4): 587–612, <https://doi.org/10.1142/S0129054102001291>.

²⁰ Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005), cap. 17.

²¹ Weinberg, *Dreams Of A Final Theory*.

²² Frank Close, *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*, Revised edition (New York: CRC Press, 2006).

²³ Weinberg, *Dreams Of A Final Theory*.

Unificarea nu implică neapărat reducția. Teoria câmpului cuantic și relativitatea generală sunt ele însele teorii unificate. Relativitatea generală este o generalizare gravitațională a teoriei speciale a relativității care a unificat electromagnetismul cu mecanica clasică non-gravitațională, iar teoria câmpului cuantic este o combinație între relativitatea specială și mecanica cuantică. Modelul standard este deseori prezentat ca un exemplu de unificare de succes. În încercarea de unificare a gravitației cu celelalte forțe, gravitația cuantică în bucle este o versiune "minimalistă" (este doar o încercare de cuantizare a relativității generale). Teoria corzilor încearcă să fie "teorie a tuturor", în care un singur tip de interacțiune determină orice alte aspecte ale realității.

Între teoria cuantică și relativitatea generală există probleme de compatibilitate conceptuală în dezvoltarea unei gravitații cuantice: independența de fundal a relativității generale datorită lipsei unui cadru de referință preferat, este opusă geometriei din teoria cuantică care implică o dependență de fond legată de existența unui cadru de referință preferat.²⁴ Metrica în relativitatea generală determină geometria spațiu-timpului și acționează ca un potențial. Deoarece este o variabilă dinamică, rezultă că geometria însăși este dinamică. Teoria cuantică necesită o geometrie fixă, rezultă un tratament foarte diferit al spațiu-timpului față de TGR. O teorie a gravitației cuantice poate renunța la dependența de fond, sau se poate modifica teoria cuantică.

Conform lui Reiner Hedrich, teoria corzilor este o construcție matematică fără niciun control empiric, care pare să transcedă din ce în ce mai mult contextul fizicii, prin creșterea autoimunizării, devenind în final o formă de metafizică a naturii de inspirație matematică.²⁵ Întoarcerea la o metafizică a naturii trebuie văzută ca un pas retrograd. Teoria corzilor poate fi înțeleasă ca o reîntoarcere la idealului antic al unei aprofundări a naturii exclusiv prin intermediul intelectului nostru (matematic), fără observații sau dispozitive experimentale. Jeremy Butterfield și Christopher Isham subliniază că imensa auto-referință care se găsește în toate teoriile gravitației cuantice este o consecință a inexistenței datelor empirice, a semnificației metafizice a ipotezelor

²⁴ Steven Weinstein, „Absolute Quantum Mechanics”, Preprint, 2000, 52: 67-73, <http://philsci-archive.pitt.edu/836/>.

²⁵ Reiner Hedrich, „The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View”, *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, nr. 2 (2006): 261–278.

și predispozițiilor, și a aparatul matematic și modelului teoretic pe care sunt concepute teoriile respective.²⁶

Baza matematică a teoriei corzilor (o versiune extinsă a aparatului teoriei câmpului cuantic) nu s-a schimbat semnificativ în timpul evoluției sale. Au mai existat încercări de unificare a gravitației cu alte forțe pe baze matematice, precum teoriile lui Einstein, Schrodinger, Misner și Wheeler de a unifica geometric gravitația și electromagnetismul, dar și acestea au eșuat.²⁷ Toți cercetătorii, indiferent dacă sunt adepți sau critici ai Teoriei Finale, încearcă să caute un răspuns la întrebarea de ce nu s-a reușit până acum această unificare. În fond, nu există un consens nici măcar în a defini în ce constă efectiv unificarea, și în ce măsură poate reflecta ea, epistemic, această eventuală unitate ontică. Limitele noastre epistemice ar putea face imposibilă o astfel de explorare.

Practic, filosofii științei sunt sceptici în ceea ce privește motivațiile filosofice ale acestei unități, și în ceea ce privește succesul ei științific.²⁸

²⁶ Jeremy Butterfield și Chris Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”, în *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale* (Cambridge University Press, 2001), 33–89.

²⁷ Robert Weingard, „A Philosopher Looks at String Theory”, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1988 (1988): 95–106.

²⁸ Nancy Cartwright, *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science* (Cambridge University Press, 1999).

Cosmologia

La nivel cosmologic, modelul cosmologic standard conține teoria gravitației lui Einstein ca parte a "nucleului dur". Materia întunecată, energia întunecată, și inflația au fost adăugate teoriei ca răspuns la observații. Niciuna dintre aceste ipoteze auxiliare nu a fost încă confirmată. Modelul cosmologic standard nu are predicții de succes, el este în permanență ajustat în urma observațiilor. Reproducerea spectrului fluctuațiilor de temperatură în mediul cosmic cu microunde este considerat un succes al modelului, dar a fost obținut prin modificarea forțată a parametrilor modelului, cu consecvențe cu valorile determinate în alte moduri mai directe.

David Merritt²⁹ atrage atenția asupra unui program de cercetare alternativ, care a fost inițiat la începutul anilor 1980 și care a făcut predicții noi; programul lui Mordehai Milgrom (MOND), inițiat în 1983, a cărui principiu specific afirmă că legile gravitației și mișcării diferă de cele ale lui Newton sau Einstein în regimul de accelerare foarte scăzută (la nivel de galaxii). Programul are o lungă listă de alte predicții, evitând ipotezele materiei întunecate și a energiei întunecate.

În cosmologie, metafizica implică un domeniu larg de întrebări dincolo de dovezile empirice, folosind uneori inferența speculativă. Analiza epistemologică în cosmologie ajută la evaluarea modelelor. Studiul filosofic oferă un cadru general pentru interpretarea inferențelor care depășesc știința.³⁰

În cosmologie există câteva principii ontologice care ajută la clasificarea modelelor în funcție de caracteristici, la conceperea realității cosmice într-o descriere mai transparentă, și permit să rezolvăm ecuațiile matematice ca niște construcții centrale ale oricărui model. Aceste principii sunt: ³¹

1. Omogenitatea spațiului (distribuția uniformă a materiei)
2. Omogenitatea timpului (structură independentă de timpul cosmic global)
3. Izotropia spațiului (independența structurii de direcția de observare)
4. Homotetia spațiului (independența structurii de transformările scalare)

²⁹ David Merritt, „Gravity: The Popper Problem”, IAI TV - Changing how the world thinks, 2 octombrie 2017, <https://iai.tv/articles/gravity-the-popper-problem-auid-899>.

³⁰ Petar V. Grujic, „Some epistemic questions of cosmology”, *arXiv:0709.3191 [physics]*, 20 septembrie 2007, <http://arxiv.org/abs/0709.3191>.

³¹ Grujic.

Astfel, modelul standard (Hot Big Bang) include modelele (a, c), modelul staționar include (a, b, c), modelul ierarhic include (c, d).

Pentru a evalua epistemic modelele cosmologice, presupunem că legile fizice sunt valabile și aceleași peste tot în cosmos, în spațiu și timp. Izotropia spațiului este singura proprietate a cosmosului ușor de verificat. Deoarece inferența asupra proprietăților și fenomenelor fizice este întotdeauna indirectă și legată de modelele teoretice, dovezile empirice se bazează pe valabilitatea acestor construcții teoretice.³² În estimarea distanțelor cosmice luăm în considerare schimbarea de culoare a liniilor spectrale de la aceste obiecte și ne bazăm pe interpretarea acestei schimbări, atribuită efectului Doppler (cinematic), fenomenelor gravitaționale (dinamic), dilatării spațiului (geometric) etc., în funcție de modelul nostru al universului. În cadrul "spațiului epistemic", principiile ontologice definite (a, b, c) sunt postulate, dar a patra (d) nu mai este valabilă la scări suficient de mici, inclusiv probabil gravitațională. O parte a cosmosului observabil, cosmografia, poate fi privită ca o structură construită pe componente particulare elementare.

Modelele cosmografice încep cu galaxia ca unitate elementară. Cosmologia tratează galaxiile ca puncte fizice, dotate cu mișcări colective (coerente) și proprii (haotice).

În cosmologie, predicțiile teoretice sau descrierile trebuie să fie în concordanță cu dovezile empirice, rezultă că modelele vor fi adaptate la noile situații empirice, sau se pot introduce noi elemente externe în model, cu condiția să nu contrazică structura inițială.³³

Piatra de încercare pentru un model cosmologic este modul în care tratează problema Începutului, inclusiv condițiile inițiale și problema eshatologică. Abordarea abderiană este imună la aceste probleme. În general, o bună teorie include un model matematic formal și procedura de cuplare cu realitatea fizică. Hawking a propus o soluție care are ca scop formularea unui model care este autosuficient.

Astfel, programul de cercetare pentru modelul cosmologic standard este un program unificator în sensul metodologiei programelor de cercetare a lui Lakatos, incluzând mai multe programe unificate (precum cel pentru Big Bang, evoluția stelară și a galaxiilor, singularitățile gravitaționale, etc.). Aceste programe unificate sunt în

³² Grujic.

³³ P. Duhem, „La Théorie Physique, Son Objet Et Sa Structure”, *Revue Philosophique de la France Et de l'Étranger* 61 (1906): 324–327.

același timp subprograme de cercetare ale programului unificator întrucât, chiar dacă sunt create și dezvoltate fără a fi impuse de programul unificator, trebuie să țină cont de cerințele acestuia pentru a fi validate și încadrate în el.

Relativitatea generală a apărut ca un model extrem de reușit pentru gravitație și cosmologie, care a depășit până acum multe teste observaționale și experimentale neechivoce. Cu toate acestea, există indicii puternice că teoria este incompletă.³⁴ Problema gravitației cuantice și chestiunea realității singularităților spațiu-timp rămân deschise. Datele observaționale care sunt luate ca dovadă a energiei întunecate și a materiei întunecate ar putea indica nevoia unei noi fizici. Chiar și așa cum este, relativitatea generală este bogată în posibilități de explorare ulterioară. Relatiștii matematici caută să înțeleagă natura singularităților și proprietățile fundamentale ale ecuațiilor lui Einstein,³⁵ în timp ce relațiștii numerici rulează simulări computerizate din ce în ce mai puternice (cum ar fi cele care descriu găurile negre care fuzionează). Un secol după introducerea sa, relativitatea generală rămâne o zonă de cercetare foarte activă.

³⁴ John Maddox, *What Remains to Be Discovered: Mapping the Secrets of the Universe, the Origins of Life, and the Future of the Human Race*, 1st Touchstone Ed edition (New York: Free Press, 1999), 52–59, 98–122.

³⁵ H. Friedrich, „Is General Relativity ‘Essentially Understood’?”, *Annalen Der Physik* 15, nr. 1–2 (2006): 15 (1–2): 84–108, <https://doi.org/10.1002/andp.200510173>.

Bibliografie

- Bilson-Thompson, Sundance, Jonathan Hackett, Lou Kauffman, și Lee Smolin. „Particle Identifications from Symmetries of Braided Ribbon Network Invariants”. *arXiv:0804.0037 [hep-th]*, 1 aprilie 2008. <http://arxiv.org/abs/0804.0037>.
- Butterfield, Jeremy, și Chris Isham. „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”. În *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*. Cambridge University Press, 2001.
- Carlip, S. „Quantum Gravity: a Progress Report”. *Reports on Progress in Physics* 64, nr. 8 (1 august 2001): 885–942. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>.
- Cartwright, Nancy. *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge University Press, 1999.
- Close, Frank. *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*. Revised edition. New York: CRC Press, 2006.
- Cowen, Ron. „The Quantum Source of Space-Time”. *Nature News* 527, nr. 7578 (19 noiembrie 2015): 290. <https://doi.org/10.1038/527290a>.
- Duhem, P. „La Théorie Physique, Son Objet Et Sa Structure”. *Revue Philosophique de la France Et de l'Étranger* 61 (1906): 324–327.
- Friedrich, H. „Is General Relativity ‘Essentially Understood’?” *Annalen Der Physik* 15, nr. 1–2 (2006): 84–108. <https://doi.org/10.1002/andp.200510173>.
- Goldstein, Sheldon, și Stefan Teufel. „Quantum spacetime without observers: ontological clarity and the conceptual foundations of quantum gravity”. *arXiv:quant-ph/9902018*, 5 februarie 1999. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9902018>.
- Grujic, Petar V. „Some epistemic questions of cosmology”. *arXiv:0709.3191 [physics]*, 20 septembrie 2007. <http://arxiv.org/abs/0709.3191>.
- Hassan, S. F., și Rachel A. Rosen. „Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity”. *Journal of High Energy Physics* 2012, nr. 2 (24 februarie 2012): 126. [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2012\)126](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2012)126).
- Hedrich, Reiner. „The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View”. *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, nr. 2 (2006): 261–278.
- Lisi, A. Garrett. „An Exceptionally Simple Theory of Everything”. *arXiv:0711.0770 [gr-qc, physics:hep-th]*, 6 noiembrie 2007. <http://arxiv.org/abs/0711.0770>.
- Maddox, John. *What Remains to Be Discovered: Mapping the Secrets of the Universe, the Origins of Life, and the Future of the Human Race*. 1st Touchstone Ed edition. New York: Free Press, 1999.
- Merritt, David. „Gravity: The Popper Problem”. IAI TV - Changing how the world thinks, 2 octombrie 2017. <https://iai.tv/articles/gravity-the-popper-problem-auid-899>.
- Pais, Abraham. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
- Petit, J. P., și G. D’Agostini. „Cosmological bimetric model with interacting positive and negative masses and two different speeds of light, in agreement with the observed acceleration of the Universe”. *Modern Physics Letters A* 29, nr. 34 (27 octombrie 2014): 1450182. <https://doi.org/10.1142/S021773231450182X>.
- Rham, Claudia de, Gregory Gabadadze, și Andrew J. Tolley. „Resummation of Massive Gravity”. *Physical Review Letters* 106, nr. 23 (10 iunie 2011): 231101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.231101>.
- Rosen, N. „General Relativity and Flat Space. I”. *Physical Review* 57, nr. 2 (15 ianuarie 1940): 147–50. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.147>.

- Schmidhuber, Jürgen. „A Computer Scientist’s View of Life, the Universe, and Everything. Lecture Notes in Computer Science”, 1997.
<http://people.idsia.ch/~juergen/everything/>.
- . „Hierarchies of generalized kolmogorov complexities and nonenumerable universal measures computable in the limit”. *International Journal of Foundations of Computer Science* 13, nr. 04 (1 august 2002): 587–612.
<https://doi.org/10.1142/S0129054102001291>.
- Weinberg, Steven. *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature*. Random House, 2010.
- Weingard, Robert. „A Philosopher Looks at String Theory”. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1988 (1988): 95–106.
- Weinstein, Steven. „Absolute Quantum Mechanics”. Preprint, 2000. <http://philsci-archive.pitt.edu/836/>.
- Will, Clifford. *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- Zyga, Lisa. „Gravitational Waves May Oscillate, Just like Neutrinos”, 2017.
<https://phys.org/news/2017-09-gravitational-oscillate-neutrinos.html>.