

CUNOAȘTEREA ȘTIINȚIFICĂ

ISSN 2821 – 8086, ISSN – L 2821 – 8086, Volumul 2, Numărul 1, Marte 2023

Epistemologia gravitației cuantice

Nicolae Sfetcu

Sfetcu, Nicolae (2023), Epistemologia gravitației cuantice, *Cunoașterea Științifică*, 2:1, 20-38,

DOI: 10.58679/CS96800, <https://www.cunoasterea.ro/epistemologia-gravitatiei-cuante/>

Publicat online: 09.01.2023

© 2023 Nicolae Sfetcu. Responsabilitatea conținutului, interpretărilor și opiniilor exprimate revine exclusiv autorilor

Epistemologia gravitației cuantice

Nicolae Sfetcu
nicolae@sfetcu.com

Epistemology of Quantum Gravity

Abstract

From a methodological point of view, both Newton and Einstein, and later Dirac, unreservedly supported the principle of mathematical simplicity in the discovery of new physical laws of nature. They were joined by Poincaré and Weyl. Eduard Prugovecki states that quantum gravity has forced the consideration of some fundamental epistemological questions, which can be identified in philosophy with the mind-body problem and the problem of free will. These questions influenced the epistemology of quantum mechanics in the form of von Neumann's "psycho-physical parallelism" and Wigner's subsequent analysis of the thesis that the "collapse of the wave packet" occurs in the mind of the "observer".

Keywords: epistemology, gravity, quantum gravity

Rezumat

Din punct de vedere metodologic, atât Newton cât și Einstein, și ulterior Dirac, au susținut fără rezerve principiul simplității matematice în descoperirea noilor legi fizice ale naturii. Lor li s-au alăturat și Poincaré și Weyl. Eduard Prugovecki afirmă că gravitația cuantică a impus luarea în considerare a unor întrebări epistemologice fundamentale, care pot fi identificate în filosofie cu problema minții-corp și cu problema liberului arbitru. Aceste întrebări au influențat epistemologia mecanicii cuantice sub forma "paralelismului psiho-fizic" al lui von Neumann și analiza ulterioară a tezei de către Wigner că "colapsul pachetului de unde" are loc în mintea "observatorului".

Cuvinte cheie: epistemologie, gravitație, gravitația cuantică

CUNOAȘTEREA ȘTIINȚIFICĂ, Volumul 2, Numărul 1, Martie 2023, pp. 20-38

ISSN 2821 – 8086, ISSN – L 2821 – 8086, DOI: 10.58679/CS96800

URL: <https://www.cunoasterea.ro/epistemologia-gravitației-cuantice/>

© 2023 Nicolae Sfetcu. Responsabilitatea conținutului, interpretărilor și opiniilor exprimate revine exclusiv autorilor.



Acesta este un articol cu Acces Deschis (Open Access) distribuit în conformitate cu termenii licenței de atribuire Creative Commons CC BY 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), care permite utilizarea, distribuirea și reproducerea fără restricții pe orice mediu, cu condiția ca lucrarea originală să fie citată corect.

Ultimele decenii indică "o estompare a distincției dintre știința fizică și abstractizarea matematică ... [reflectând] o tendință crescătoare de a accepta, iar în unele cazuri de a ignora, probleme grave de testare."¹Oldershaw enumeră zeci de probleme majore de netestare în epoca pre-instrumentalistă.

Din punct de vedere metodologic, atât Newton cât și Einstein, și ulterior Dirac, au susținut fără rezerve principiul simplității matematice în descoperirea noilor legi fizice ale naturii. Lor li s-au alăturat și Poincaré și Weyl. "Pentru Dirac, principiul frumuseții matematice a fost parțial o moralitate metodologică și parțial un postulat despre calitățile naturii. El a fost inspirată în mod clar de teoria relativității, de relativitatea generală în special, și de dezvoltarea mecanicii cuantice... considerațiile matematice-estetice ar trebui (uneori) să aibă prioritate față de faptele experimentale și în felul acesta să acționeze ca și criterii ale adevărului."²

Eduard Prugovecki afirmă că gravitația cuantică a impus luarea în considerare a unor întrebări epistemologice fundamentale, care pot fi identificate în filosofie cu problema minții-corp și cu problema liberului arbitru.³ Aceste întrebări au influențat epistemologia mecanicii cuantice sub forma "paralelismului psiho-fizic" al lui von Neumann⁴ și analiza ulterioară a tezei de către Wigner⁵ că "colapsul pachetului de unde" are loc în mintea "observatorului". Gravitația cuantică în cosmologie implică problema libertății experimentatorului de a schimba condițiile fizice locale,

¹Robert L. Oldershaw, „The new physics—Physical or mathematical science?”, *American Journal of Physics* 56, nr. 12 (1 decembrie 1988): 1076, <https://doi.org/10.1119/1.15749>.

²Helge Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, 1 edition (Cambridge England; New York: Cambridge University Press, 1990), 277, 284.

³Hermann Weyl și Frank Wilczek, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Revised ed. edition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2009).

⁴John Von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, (Berlin: J. Springer, 1932).

⁵E. P. Wigner et al., „The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas”, *American Journal of Physics* 32, nr. 4 (1 aprilie 1964): 168–81, <https://doi.org/10.1119/1.1970298>.

un "observator" pasiv. În orice teorie care descrie un singur univers se nasc întrebări cu privire la natura cauzalității în sensul filosofic tradițional.⁶

O teorie cuantică a gravitației poate fi utilă în unificarea relativității generale cu principiile mecanicii cuantice, dar apar dificultăți în această încercare.⁷ Teoria rezultată nu este renormalizabilă⁸, și nu poate face predicții fizice semnificative. Dezvoltările ulterioare au dus la teoria corzilor și gravitația cuantică în bucle.⁹ Structura relativității generale ar rezulta din mecanica cuantică a interacțiunii particulelor teoretice fără masă de tip spin-2, numite gravitoni,¹⁰ deși nu există dovezi concrete ale acestora.

Dilatonul a apărut în teoria lui Kaluza-Klein, o teorie cinci-dimensională care combina gravitația și electromagnetismul, și ulterior în teoria corzilor. Ecuația câmpului care guvernează dilatonul, derivată din geometria diferențială, ar putea fi supusă cuantizării.¹¹ Deoarece această teorie poate combina efectele gravitaționale, electromagnetice și cuantice, cuplarea lor ar putea conduce la un mijloc de justificare a teoriei prin cosmologie și experimente.

Cu toate acestea, gravitația este nerenormalizabilă perturbativ.¹² Teoria trebuie să fie caracterizată printr-o alegere a unor parametri *finit de mulți*, care, în principiu, se pot stabili prin

⁶Mario Bunge, „The Revival of Causality”, în *La Philosophie Contemporaine / Contemporary Philosophy: Chroniques Nouvelles / A New Survey*, ed. Guttorm Fløistad, International Institute of Philosophy / Institut International de Philosophie (Dordrecht: Springer Netherlands, 1982), 133–55, https://doi.org/10.1007/978-94-010-9940-0_6.

⁷A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*, 2 edition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010), 172, 434–435.

⁸Renormalizarea este o "absorbție" a infinităților prin redefinirea unui număr finit de parametri fizici. Parametrii fizici (masa, sarcina, etc.) au valori perfect finite când sunt observate în experimente reale. În cazul gravitației, teoria perturbativă nu este renormalizabilă. Pentru a renormaliza teoria ar trebui să introducem infinit de mulți "parametri de absorbție", fiecare trebuind să fie determinat prin experiment.

⁹Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007), 1017.

¹⁰S. Deser, „Self-Interaction and Gauge Invariance”, *General Relativity and Gravitation* 1, nr. 1 (1 martie 1970): 1: 9–18, <https://doi.org/10.1007/BF00759198>.

¹¹T. Ohta și R. B. Mann, „Canonical reduction of two-dimensional gravity for Particle Dynamics”, *Classical and Quantum Gravity* 13, nr. 9 (1 septembrie 1996): 13 (9): 2585–2602, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/9/022>.

¹²Richard P Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995), xxxvi–xxxviii; 211–12.

experiment. Dar, în cuantificarea gravitației există, în teoria perturbației, *infinit de mulți parametri independenți* necesari pentru a defini teoria.

Este posibil ca, într-o teorie corectă a gravitației cuantice, parametrii necunoscuți infiniți să se reducă la un număr finit care poate fi apoi măsurat. Una din posibilități este să existe principii de simetrie noi, nedescoperite, care constrâng parametrii și îi reduc la un set finit, o cale urmată de teoria corzilor.

Există mai multe teorii care abordează gravitația cuantică, dar niciuna nu este completă și consistentă. Modelele trebuie să depășească probleme majore formale și conceptuale, inclusiv formularea de predicții care să poată fi verificate prin teste experimentale.¹³

Teoria corzilor implică obiecte asemănătoare cu corzile se propagă într-un fundal spațiu-timp fix, iar interacțiunile dintre corzile închise dau naștere spațiu-timpului într-un mod dinamic. Aceasta promite să fie o descriere unificată a tuturor particulelor și interacțiunilor.¹⁴ Unui mod în teoria corzilor îi va corespunde întotdeauna un graviton, dar la această teorie apar caracteristici neobișnuite, precum șase dimensiuni suplimentare ale spațiului. În o evoluție a acestui program, teoria supercorzilor, s-a încercat unificarea teoriei corzilor, a relativității generale și supersimetriei, cunoscute sub denumirea de supergravitație într-un model ipotetic cu unsprezece dimensiuni cunoscut sub numele de teoria-M.¹⁵

Efectele gravitaționale cuantice sunt extrem de slabe, și deci dificil de testat. În ultimii ani fizicienii s-au concentrat pe studierea posibilităților testelor experimentale,¹⁶ cele mai vizate fiind încălcările invarianței Lorentz, efectele gravitaționale cuantice în fundalul cosmic de microunde, și decoerența indusă de fluctuațiile spațio-temporale.

Teoriile gravitației cuantice sunt afectate de o mulțime de probleme tehnice și conceptuale. TianCao susține că gravitatea cuantică oferă o oportunitate unică filosofilor, permițându-le "o

¹³Abhay Ashtekar, „Loop quantum gravity: four recent advances and a dozen frequently asked questions”, în *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting* (World Scientific Publishing Company, 2008), 126, https://doi.org/10.1142/9789812834300_0008.

¹⁴L. E. Ibanez, „The second string (phenomenology) revolution”, *Classical and Quantum Gravity* 17, nr. 5 (7 martie 2000): 17 (5): 1117–1128, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/17/5/321>.

¹⁵P. K. Townsend, „Four Lectures on M-theory”, *arXiv:hep-th/9612121*, 11 decembrie 1996, 13: 385, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.

¹⁶Sabine Hossenfelder, „Experimental Search for Quantum Gravity”, *arXiv:1010.3420 [gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th]*, 17 octombrie 2010, cap. 5, <http://arxiv.org/abs/1010.3420>.

șansă bună să vină cu contribuții pozitive, mai degrabă decât să analizeze filosofic ceea ce fizicienii au stabilit deja."¹⁷ Carlo Rovelli (arhitectul gravitației cuantice în bucle) îndeamnă filosofi să nu se limiteze la "comentarea și polizarea teoriilor fizice fragmentare actuale, să riște încercând să privească înainte."¹⁸

Dificultățile conceptuale rezultă în principal din natura interacțiunii gravitaționale, în special echivalența maselor gravitaționale și inerțiale, care permite reprezentarea gravitației ca proprietate a spațiului în sine, mai degrabă decât ca un câmp propagat în spațiu-timp. Când se cuantizează gravitația unele dintre proprietățile spațiu-timpului sunt supuse fluctuațiilor cuantice. Dar teoria cuantică presupune un fundal clasic bine definit pentru aceste fluctuații.¹⁹

Yoichiro Nambu²⁰ a făcut cercetări cu privire la "fizica postmodernă" a gravitației cuantice, a distanțării acesteia de experimente. Există anumite metode de evaluare a teoriei, și constrângeri. Investigarea acestora constituie o problemă de cercetare actuală.²¹ Audretsch²² susține că cercetarea cuantică a gravitației contravine paradigmelor lui Kuhn, în gravitația cuantică coexistând mai multe paradigme, ambele bine confirmate și universale. Având în vedere că atât relativitatea generală cât și teoria cuantică pretind a fi teorii universale, orice tensiune conceptuală sau formală dintre ele ar indica faptul că universalitatea unei sau a ambelor teorii este eronată. Peter Galison²³ susține că constrângerile matematice iau locul, în gravitația cuantică, constrângerilor empirice.

¹⁷Tian Yu Cao, „Prerequisites for a Consistent Framework of Quantum Gravity”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32, nr. 2 (2001): 138.

¹⁸Carlo Rovelli, „Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time”, în *The Cosmos of Science*, ed. John Earman și John Norton (University of Pittsburgh Press, 1997), 182.

¹⁹Steven Weinstein, „Absolute Quantum Mechanics”, Preprint, 2000, 52: 67–73, <http://philsci-archive.pitt.edu/836/>.

²⁰Y. Nambu, „Directions of Particle Physics”, *Progress of Theoretical Physics Supplement* 85 (1985): 104–110, <https://doi.org/10.1143/PTPS.85.104>.

²¹Dean Rickles, „A philosopher looks at string dualities”, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 42: 54–67, <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.

²²Jürgen Audretsch, „Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions”, *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, nr. 2 (1 septembrie 1981): 12(2): 322–339, <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.

²³Peter Galison, *Laws of Nature: Essays on the Philosophic, Scientific, and Historical Dimensions* (Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1995), 369–408.

Majoritatea fizicienilor își concentrează atenția asupra teoriei corzilor, dar și gravitația cuantică în bucle este un program activ, ca și alte programe. Este extrem de dificil să se facă predicții concrete în aceste teorii. Teoria corzilor este afectată de lipsa predicțiilor experimentale testabile datorită numărului extrem de mare de stări distincte, și absența principiilor călăuzitoare pentru evidențierea celor semnificative din punct de vedere fizic.²⁴ GCB pare a fi mai puțin afectată de lipsa de predicții, discretitudinea operatorilor de arie și de volum reprezintă previziuni concrete ale teoriei, cu consecințe potențial verificabile, făcând teoria mai susceptibilă la falsificare și deci mai științifică decât teoria corzilor.²⁵ Dar nu este clar cum se pot observa efectiv aceste cantități.

Steven Weinstein și Dean Rickles afirmă că este dificil să se elaboreze un test de observație al unei teorii dacă nu știm unde să privim sau la ce să privim,²⁶ datorită și faptului că majoritatea teoriilor gravitației cuantice par să ia în considerație numai scale energetice foarte mari, de ordinul 10^{19} GeV, fiind nevoie de un accelerator de particule de dimensiuni galactice pentru a se apropia de energiile necesare.

Cel mai notabil "test" al teoriilor cuantice ale gravitației impus de comunitate până în prezent implică un fenomen care nu a fost observat niciodată, așa-numita radiație Hawking din găurile negre. Teoria corzilor și gravitația cuantică în bucle au trecut amândouă testul, folosind grade diferite de libertate microscopice. Erik Curiel²⁷ a argumentat modul în care acest test este folosit ca dovadă în același mod în care dovezile empirice sunt folosite pentru a justifica o teorie obișnuită. Deși rezultatul lui Bekenstein-Hawking nu are statutul de fapt empiric, este o deducere puternică dintr-un cadru care este destul de matur, și anume teoria câmpului cuantic pe un fundal spațio-temporal curbat, putând funcționa ca o constrângere asupra posibilelor teorii.

²⁴Steven Weinstein și Dean Rickles, „Quantum Gravity”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/>.

²⁵Lee Smolin, *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*, Reprint edition (Boston u.a: Mariner Books, 2007).

²⁶Katherine Brading, Elena Castellani, și Nicholas Teh, „Symmetry and Symmetry Breaking”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.

²⁷Erik Curiel, „Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty”, *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, nr. 3 (2001): 68(3): S424–S441.

În gravitația cuantică, este deosebit de important să avem unele constrângeri convenite pentru a ghida construcția, iar o teorie completă a gravitației cuantice ar trebui să reproducă predicțiile teoriei semi-clasice a gravitației ca una din limitele sale posibile.²⁸ Curie pune la îndoială clasarea abordărilor gravitației cuantice în funcție de meritul științific, precum eleganța și coerența, pe care el nu le consideră ca fiind științifice. El afirmă că trebuie ținut cont de potențialul explicativ al teoriilor. Până în prezent niciunul dintre programele principale de cercetare nu a demonstrat că reproduce în mod corespunzător lumea la energii joase. Există indicii că ambele teorii vor depăși această provocare.²⁹³⁰

Bryce DeWitt a afirmat că câmpul gravitațional ar trebui să fie cuantizat pentru a fi în concordanță cu mecanica cuantică,³¹ pe baza a două premise: argumente logice, și analogia între câmpul electromagnetic și cel gravitațional. Dar Lungimea Planck este atât de mică încât aspecte ale realității care definesc o teorie a gravitației cuantice, precum "aparitie", "fenomen" sau "empiric", nu pot fi luate în considerare sub această dimensiune.

Prima abordare a interpretării teoriei cuantice a fost "instrumentalistă". Jeremy Butterfield și Christopher Isham afirmă că interpretarea teoriei cuantice de la Copenhaga este nu doar ca o interpretare statistică minimală a formalismului cuantic în ceea ce privește frecvența rezultatelor măsurătorilor, ci și ca insistând asupra unui domeniu clasic care, dacă include spațiul și timpul clasic, implică faptul că, vorbind despre "gravitația cuantică", greșim încercând să aplicăm teoria cuantică la ceva ce aparține fundalului clasic al acestei teorii. Trebuie evitată o teorie cuantică a gravitației, dar se poate încerca dezvoltarea unei "teorii cuantice a spațiului și timpului."³²

Viziunea "literalistă" presupune interpretarea teoriei cuantice "cât se poate de apropiată" de formalismul cuantic. Aceasta implică două versiuni, cea a lui Everett și cea bazată pe logica

²⁸Weinstein și Rickles, „Quantum Gravity”.

²⁹Thomas Thiemann, „The Phoenix Project: Master Constraint Programme for Loop Quantum Gravity”, *Classical and Quantum Gravity* 23, nr. 7 (7 aprilie 2006): 23(7): 2211, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/7/002>.

³⁰Mariana Graña, „The Low Energy Limit of String Theory and Its Compactifications with Background Fluxes”, *Letters in Mathematical Physics* 78, nr. 3 (1 decembrie 2006): 78(3): 279–305, <https://doi.org/10.1007/s11005-006-0125-z>.

³¹Bryce S. DeWitt, „Definition of Commutators via the Uncertainty Principle”, *Journal of Mathematical Physics* 3 (1 iulie 1962): 619–24, <https://doi.org/10.1063/1.1724265>.

³²Jeremy Butterfield și Chris Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”, în *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale* (Cambridge University Press, 2001).

cuantică. Literalismul lui Everett a fost discutat în legătură cu gravitația cuantică (în special cosmologia cuantică). Scopul lui este de a rezolva "problema de măsurare": când se întâmplă colapsul funcției de undă în raport cu obiectele macroscopice (precum instrumentele).

Teoriile valorilor suplimentare își propun să interpreteze teoria cuantică, în special în problema de măsurare, fără a apela la colapsarea vectorului de stare, prin postularea unor valori suplimentare pentru o anumită "cantitate preferată", împreună cu o regulă pentru evoluția acestor valori. Dar, față de teoria lui Everett, "valori suplimentare" nu implică alte lumi fizice reale; ele doar încearcă să fie mai exacte cu privire la cantitatea preferată și dinamica valorilor sale. Astfel de teorii sunt interpretarea de Broglie-Bohm a "unde pilot" a teoriei cuantice, și diferitele tipuri de interpretare modale.³³ Practic, "valorile suplimentare" păstrează dinamica unitară obișnuită (ecuația Schrodinger) a teoriei cuantice, dar adaugă ecuații care descriu evoluția temporală a valorilor sale suplimentare. Interpretarea unde pilot a fost aplicată doar programului de cercetare al gravitației cuantice bazat pe geometrodinamica cuantică.³⁴

Conform lui Jeremy Butterfield și Christopher Isham, dinamica nouă este mai radicală decât "valorile suplimentare". Ea înlocuiește dinamica obișnuită pentru rezolvarea problemei de măsurare prin suprimarea dinamică a suprapunerilor. În ultimii ani dinamica nouă, în special ca urmare a teoriilor de "localizare spontană" ale lui Ghirardi, Rimini și Weber³⁵ și Pearle,³⁶ s-a dezvoltat considerabil. Penrose a fost deosebit de activ în susținerea acestei idei.

Motivații pentru o teorie a gravitației cuantice, din perspectiva fizicii elementare a particulelor și a teoriei câmpului cuantic:

1. Materia este construită din particule elementare descrise cuantic și care interacționează gravitațional.
2. Teoria câmpului cuantic relativist ar putea avea sens numai prin includerea gravitației.
3. Gravitația cuantică va ajuta la unificarea celor trei forțe non-gravitaționale fundamentale.

Motivații pentru o teorie a gravitației cuantice, din perspectiva relativității generale:

³³Jeffrey Bub, *Interpreting the Quantum World*, 1st edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1999).

³⁴Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”.

³⁵G. C. Ghirardi, A. Rimini, și T. Weber, „Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems”, *Physical Review D* 34, nr. 2 (15 iulie 1986): D34:470–491, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>.

³⁶null Pearle, „Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization”, *Physical Review. A, General Physics* 39, nr. 5 (1 martie 1989): A39:2277–2289.

1. Speranța eliminării singularităților prin introducerea efectelor cuantice.
 2. Explicarea cuantică a naturii finale a găurilor negre are pierd masă prin radiația Hawking.
 3. Gravitatea cuantică poate ajuta la explicarea universului foarte timpuriu, deducând de aici 4-dimensionalitatea spațiu-timpului, și originea evoluției inflaționiste.
 4. Se speră că o teorie a gravitației cuantice va oferi o cosmologie cuantică.
- J. Butterfield enumeră patru tipuri de abordări în căutarea unei teorii a gravitației:³⁷

1. *Relativitatea generală cuantizată*: se începe cu relativitatea generală la care se aplică un anumit tip de algoritm de cuantificare. Se folosesc în acest scop două tipuri de tehnici: o abordare spațio-temporală 4-dimensională a teoriei câmpului cuantic, și o abordare canonică 3-dimensională pentru spațiul fizic. A fost primul tip de abordare.
2. *Relativitatea generală ca limită la energie scăzută a unei cuantificări a unei teorii clasice diferite*. Se aplică un algoritm de cuantificare unei anumite teorii clasice, recuperată ca o limită clasică a noii teorii cuantice. Acest tip de abordare este exemplificat prin principalul program de cercetare actual: teoria supercorzilor. Au existat câteva încercări de a construi și teorii cuantice a topologiei, și a structurile cauzale. .
3. *Relativitatea generală ca limită la energie scăzută a unei teorii cuantice care nu este o cuantificare a unei teorii clasice*: se ia în considerare construirea unei teorii cuantice de la zero fără o referință la o teorie clasică, fără o anumită limită clasică.
4. *Se începe de la zero cu o teorie radical nouă*: se dezvoltă o teorie diferită atât de relativitatea generală cât și de teoria cuantică.

Principiile fundamentale ale relativității generale și ale teoriei cuantice sunt atât de incompatibile încât orice reconciliere va necesita o regândire a categoriilor de spațiu, timp și materie. În prezent, programul dominant este cel al supercorzilor, de tipul al doilea. Gravitația cuantică canonică în abordarea Ashtekar este de primul tip.

Construcția unei teorii a gravitației cuantice este asociată cu două presupuneri: noțiunile clasice de spațiu și timp sunt doar concepte valide aproximativ, care rezultă din natura cuantică "reală" a spațiului și timpului,³⁸ și gravitația cuantică va furniza fizica clasică la un nivel mai profund.^{39,40}

³⁷Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”.

³⁸J. Butterfield și C. J. Isham, „On the Emergence of Time in Quantum Gravity”, *arXiv:gr-qc/9901024*, 8 ianuarie 1999, 111–68, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901024>.

³⁹Steven Weinberg, *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature* (Random House, 2010).

⁴⁰Max Tegmark și John Archibald Wheeler, „100 Years of the Quantum”, *arXiv:quant-ph/0101077*, 17 ianuarie 2001, 68–75, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077>.

Problema de măsurare implică faptul că teoria cuantică nu poate explica, în sine, niciun fenomen clasic - cum ar fi rezultate de măsurare definite cu spațiu bine definit - timp și proprietăți energetice.⁴¹ Necesitatea relativității generale pentru gravitația cuantică este oarecum analogă cu necesitatea mecanicii clasice pentru mecanica cuantică, rolul relativității generale în primul caz fiind de a specifica domeniul de aplicare al teoriei cuantice. Dar gravitația cuantică poate eluda necesitatea unei teorii clasice prin alegerea unei interpretări diferite a mecanicii cuantice.

O primă încercare de a dezvolta o teorie a gravitației cuantice a fost cuplarea TGR și TCC, formând așa-numitele teorii semi-clasice.⁴² În aceste teorii câmpurile de materie sunt structuri teoretice fundamentale cuantice, iar gravitația, adică spațiu-timpul, este fundamental clasică (non-cuantică"). Practic, o astfel de teorie rescrie ecuațiile lui Einstein.

În prezent, "gravitația cuantică" este o reconciliere mai substanțială în ceea ce privește cuantizarea gravitației,⁴³ construind o teorie cuantică a cărei limită clasică este de acord cu teoria clasică. Cuantizarea nu implică neapărat discretitatea tuturor observabilelor, ca în cazul operatorilor de poziție și impuls. Deci, cuantificarea TGR nu implică discretitatea spațiului.

Potrivit lui Kiefer⁴⁴, teoriile de gravitație cuantică pot fi grupate în teorii primare și secundare. Primele folosesc proceduri standard de cuantizare (canonică sau covariantă) precum în cazul electrodinamicii cuantice. A doua include GC ca o limită a unui cadru teoretic cuantic fundamental, de ex. teoria corzilor. De reținut că această clasificare se bazează pe modul în care se desfășoară abordările. Din punct de vedere sistemic, abordările respective pot fi totuși corelate.⁴⁵

Se speră ca prin gravitația cuantică să se rezolve incompletenta fizicii actuale legată de problema GC, având drept motivații considerații cosmologice, evoluția gaurilor negre, probleme

⁴¹Henrik Zinkernagel, „The Philosophy Behind Quantum Gravity”, *Theoria : An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 21, nr. 3 (2010): 295–312.

⁴²S. Carlip, „Is Quantum Gravity Necessary?”, *Classical and Quantum Gravity* 25, nr. 15 (7 august 2008): 154010, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/15/154010>.

⁴³Christian Wuthrich, „To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity”, Published Article or Volume, *Philosophy of Science*, 2005, 777–788, <http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946>.

⁴⁴C. Kiefer, „Quantum gravity: general introduction and recent developments”, *Annalen der Physik* 518 (1 ianuarie 2006): 15(12), 129148, <https://doi.org/10.1002/andp.200510175>.

⁴⁵Steven Weinberg, „What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is?”, *arXiv:hep-th/9702027*, 3 februarie 1997, 241–251, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9702027>.

teoretice în TCC și unificarea.⁴⁶⁴⁷ Dar nu există nicio necesitate empirică pentru a construi teoria. Ambele teorii (TC și TGR) sunt în perfectă concordanță cu toate datele disponibile. Scala tipică a energiei (sau a lungimii) în care efectele gravitaționale cuantice devin relevante este cu aproximativ 16 ordine de mărime mai mare decât cea actuală.⁴⁸ Deci, pragmatic nu putem spera cu adevărat la date experimentale directe.⁴⁹

În gravitația cuantică, dimensiunea lungimii Planck este atât de mică încât sugerează că acele aspecte ale realității care necesită o teorie a gravitației cuantice pentru descrierea lor nu ar trebui să le numim ca, de exemplu, "aspect", "fenomen" sau "empiric". Kantienii afirmă că "apariție" nu este doar ceea ce este practic accesibil, ci orice este localizat în spațiu este o parte a realității empirice. Dar J. Butterfield consideră că este inacceptabil ca aceste scale de lungime, energie etc., fiind atât de mici, există cu adevărat "în principiu."⁵⁰ El afirmă că aceste elemente sau aspectele lor localizate nu sunt empirice, deși am putea să le numim în continuare "fizice", și "reale". Dacă se acceptă acest lucru, s-ar putea reconcilia diferitele pretenții kantiene că spațiul și timpul trebuie să aibă anumite caracteristici - de exemplu, continuitate - ca o chestiune *a priori* față de pretențiile acelor programe de gravitație cuantică care neagă spațiul și timpul acelor trăsături. "Contradicția aparentă ar fi un artefact al unei ambiguități în "spațiu și timp": programele de gravitație cuantică nu ar fi despre spațiu și timp în sens kantian."⁵¹

Interpretarea de la Copenhaga poate fi înțeleasă nu doar ca o interpretare statistică minimală a formalismului cuantic pentru frecvența rezultatelor măsurătorilor, ci și ca accentuând asupra unui domeniu clasic din sistemul cuantic, cu o departajare fermă de acesta și o descriere cuantică a primei interpretări. Dacă domeniu clasic include spațiul și timpul clasic, în privința "gravitației cuantice" am greși aplicând teoria cuantică la ceva ce face ține de fundalul clasic a

⁴⁶Wuthrich, „To quantize or not to quantize”, 777–788.

⁴⁷Kiefer, „Quantum gravity”, 15(12), 129148.

⁴⁸Nima Arkani-Hamed, „The Future of Fundamental Physics”, 2012, 141(3), 53–66.

⁴⁹Kian Salimkhani, „Quantum Gravity: A Dogma of Unification?”, în *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science*, vol 9., ed. Alexander Christian et al. (Cham: Springer, 2018), 23–41.

⁵⁰Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”.

⁵¹Butterfield și Isham.

acelei teorii. Pentru a construi o "teorie cuantică a spațiului și timpului" este nevoie de o schimbare radicală a interpretării, eventual și a formalismului matematic, și a teoriei cuantice în sine.⁵²

O viziune instrumentalistă specifică teoriei cuantice ar trebui sau să nege faptul că starea cuantică descrie sisteme individuale, cel puțin între măsurători (similar, să fie prudentă în descrierea cuantică a acestor sisteme), sau să postuleze un domeniu "non-cuantic" a cărui descriere poate fi luată literal (nu instrumentalist ca în prima condiție), cu domeniul respectiv fiind postulat ca "domeniul clasic" înțeles ca macroscopic și/sau domeniul "măsurătorilor" și/sau descris de fizica clasică.⁵³ Dar aplicațiile recente ale teoriei cuantice fac dificil de îndeplinit aceste condiții. Rezultă că ar trebui să căutăm o interpretare în care niciun rol fundamental nu este atribuit "măsurării", înțeleasă ca o operație exterioară domeniului formalismului.

Dacă interpretarea instrumentalistă a teoriei cuantice este "cât se poate de apropiată" de formalismul cuantic ("literalism"), se poate respinge folosirea unor idei precum măsurare, "domeniu clasic" sau "observator extern" cărora se refuză o descriere cuantică-teoretică, căutându-se mai degrabă o potrivire a interpretării cu formalismul.

În prezent se pune întrebarea dacă declarațiile teoretice pot aborda orice subiect dincolo de datele observaționale. Antirealiștii științifici neagă această posibilitate, spre deosebire de realiștii științifici. Realistul științific acordă electronului și quarkului aceeași stare ontologică ca și scaunelor și meselor. Antirealistul consideră conceptele de obiecte invizibile ca simple instrumente tehnice pentru a descrie și prezice fenomene vizibile, utile dar fără o valoare de adevăr. De asemenea, instrumentalistul neagă posibilitatea unor afirmații adevărate despre obiecte teoretice invizibile. Bas van Fraassen consideră un mod mai puțin radical de a respinge realismul științific. Empirismul său constructiv consideră că declarațiile despre obiectele teoretice pot avea în principiu o valoare de adevăr, dar este imposibil să se colecteze suficiente dovezi pentru adevărul oricărei declarații particulare. Richard Dawid afirmă că prin evitarea calității ontologice a afirmației instrumentaliste, empirismul constructiv rămâne la un nivel epistemologic.⁵⁴

Datorită multitudinii datelor empirice, oamenii de știință trebuie să construiască structuri teoretice care să ajute la manipularea și analiza acestor date. Pot exista mai multe seturi de astfel

⁵²Butterfield și Isham.

⁵³Butterfield și Isham.

⁵⁴Richard Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”, *Physics and Philosophy*, 2007.

de structuri teoretice, care concură între ele și se înlocuiesc una pe alta, în timp. Nici măcar elementele esențiale ale teoriilor științifice nu sunt determinate în mod unic de datele empirice (principiul subdeterminării teoriilor științifice prin date experimentale). Deci, nu există declarații științifice care trebuie considerate incontestabile (meta-inducția pesimistă). Teoriile științifice par prea subdeterminate pentru a se potrivi într-o schemă realistă, dar nu sunt suficient de subdeterminate pentru a permite empirismul, fiind dificil de evitat această dilemă.⁵⁵

O generalizare a ipotezei de subdeterminare susținută în mod deosebit de către Quine, susține că nicio descriere teoretică ideală ipotetică, care să acopere în mod consecvent toate datele experimentale posibile, nu ar fi unică. El admite existența unor teorii care au consecințe fenomenologice identice, dar sunt încă "logic incompatibile" datorită seturilor lor incompatibile de obiecte ontologice. Quine este astfel nevoit să distingă între diferite teorii prin mijloace pur conceptuale, și pe baze ontologice.

Richard Dawid consideră că instrumentalismul este cel mai plauzibil în contextul teoriei subdezvoltate, pentru că ascensiunea teoriei poate deschide "noi frontiere ale vizibilului a cărei identificare cu frontierele existenței pare mai puțin plauzibilă decât în cazul clasic", și pentru că "odată ce dezechilibrul dintre efortul teoretic și consecința observațională a devenit prea mare, devine destul de problematic să presupunem că motivațiile sănătoase ale activității fizicianului teoretic se află exclusiv în regimul vizibil."⁵⁶ Concluzia lui este că fizicienii care lucrează în teoria corzilor nu sunt interesați de experimente pentru predicția fenomenelor vizibile. Teoria lor nu este, deocamdată, capabilă de așa ceva. Dar observarea este o condiție prealabilă necesară pentru atribuirea înțelesului conceptelor și în teoria corzilor. O motivare prin posibile viitoare consecințe vizibile nu pare convingătoare.

Steven Weinstein consideră GC ca o "teorie fizică care descrie interacțiunile gravitaționale ale materiei și energiei în care materia și energia sunt descrise și de teoria cuantică".⁵⁷ Multe teorii ale gravitației cuantice sunt cuantizări ale gravitației dar, după cum subliniază Callender și

⁵⁵Dawid.

⁵⁶Dawid.

⁵⁷Weinstein și Rickles, „Quantum Gravity”.

Huggett, aceasta este o alegere empirică, mai degrabă decât una logică.⁵⁸ În cele din urmă, o cuantificare a gravitației prin TGR sugerează mai mult, în special celor din tabăra canonică de gravitație cuantică (GCC), că o anumită metodă de cuantizare este necesară pentru spațiu.

Una dintre încercările anterioare de reconciliere a cuanticii cu gravitația a apărut în anii 1960 și este cunoscută sub numele de teoria semi-clasică. Deși teoria semi-clasică a fost rapid înțeleasă ca fiind defectă, ea a fost văzută ca un dispozitiv euristic excelent pentru alimentarea problemei gravitației cuantice. Această teorie, alături de alte dileme, cum ar fi dezbaterea cuantificării, a determinat necesitatea unor teorii mai robuste despre gravitația cuantică.

Spre deosebire de alte teorii moderne din fizică, în care s-a ajuns la un consens în teorie, gravitația cuantică are un număr de programe de cercetare alternative care dezvoltă o ipoteză de bază prin ipotezele auxiliare. Trei dintre cele mai populare programe de cercetare ale gravitației cuantice pe parcursul istoriei sale scurte includ teoria semi-clasică, teoria corzilor și gravitația cuantică canonică. Dar până acum niciuna nu beneficiază de suport experimental. Au fost efectuate câteva experimente, dar toate au fost negative. Experimentele au fost elaborate astfel încât teoria prezice doar ceea ce s-ar putea întâmpla în funcție de un anumit scenariu specific, care nu este singurul posibil, deci nu sunt potențial refutabile.

Data fiind lipsa progresului empiric, în toate abordările gravitației cuantice se recomandă o strategie pluralistă de dezvoltare teoretică. În teoria corzilor există diferite formulări teoretice, sau dualități, fizic echivalente, aspect relevant pentru problema subdeterminării teoriilor prin date. Se argumentează că ar trebui adoptată o perspectivă mai empirică asupra semanticii teoriilor, pentru înțelegerea a ceea ce ne spun teoriile despre spațiu și timp.

În teoria corzilor, spre deosebire de celelalte abordări, există o adevărată unificare a diferitelor forțe, nu doar o descriere cuantică a gravitației, dar unii oameni de știință critică această teorie că folosește prea multe resurse în dauna altor abordări ale gravitației cuantice.

Experimentele de gândire pot fi importante în scopuri euristice, dar în cazul gravitației cuantice concluziile bazate pe experimentele de gândire nu sunt foarte fiabile. Lipsa rezultatelor empirice i-a determinat pe unii oameni de știință și filosofi să afirme că aceste teorii nu sunt cu adevărat științifice.

⁵⁸Craig Callender și Nick Huggett, *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity* (Cambridge University Press, 2001).

SimonlucaPinna și Simone Pinna propun un "test conceptual" pentru a evalua dacă conținutul matematic al teoriei gravitației cuantice se referă la un model empiric posibil verificabil.⁵⁹ Cele mai bune observații empirice sunt cele astrofizice pentru gravitația puternică, astfel încât rămân două opțiuni: (1) elaborarea de noi cadre experimentale adecvate,⁶⁰ și (2) posibilitatea înlocuirii criteriilor standard de verificare științifică cu cele mai puțin reglementate empiric.⁶¹ Există două opinii puse ale oamenilor de știință: cei care consideră că spațiu-timpul nu este o structură fizică fundamentală,⁶² și cei care îl consideră fundamental în orice domeniu fizic⁶³ care presupun abordarea conservatoare epistemologică exprimată de (1). Cei care susțin dispariția spațiu-timpului spațial par să urmeze perspectiva, (2).

Unii metodologi afirmă că teza dispariției spațiu-timpului la energii înalte impune o schimbare a criteriilor de verificare științifică, pentru a adapta coerența empirică la aceste teze în gravitația cuantică. Aceasta ar implica modificări în conceptele de "observator" și legătura sa cu observațiile și măsurătorile.

Geometrodinamica⁶⁴ a fost prima încercare de cuantificare a gravitației pornind de la formularea canonică (hamiltoniană) a teoriei generale a relativității interpretată ca o teorie independentă de fundal.⁶⁵ Ulterior, adepții gravitației cuantice în bucle (GCB), o abordare canonică, afirmă că spațiu-timpul relativist dispare la limita energiei ridicate. Aceasta ar putea

⁵⁹S. Pinna și Simone Pinna, „A Conceptual Test for Cognitively Coherent Quantum Gravity Models”, 2017, <https://doi.org/10.3390/technologies5030051>.

⁶⁰Sabine Hossenfelder și Lee Smolin, „Phenomenological Quantum Gravity”, *arXiv:0911.2761 [gr-qc, physics:physics]*, 14 noiembrie 2009, 66, 99–102, <http://arxiv.org/abs/0911.2761>.

⁶¹Richard Dawid, *String Theory and the Scientific Method*, 1 edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2013).

⁶²Carlo Rovelli, „Quantum Gravity”, Cambridge Core, noiembrie 2004, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755804>.

⁶³Amit Hagar și Meir Hemmo, „The Primacy of Geometry”, ResearchGate, 2013, 44, 357–364, https://www.researchgate.net/publication/259158226_The_primacy_of_geometry.

⁶⁴Karel Kuchar, „Canonical Quantum Gravity”, *arXiv:gr-qc/9304012*, 8 aprilie 1993, 119–150, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304012>.

⁶⁵C. Kiefer, „Time in Quantum Gravity”, în *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, ed. Craig Callender (Oxford University Press, 2011), 663–678.

implica inexistența unui cadru spațio-temporal.⁶⁶ Există suspiciuni privind dispariția spațiu-timpului și în alte abordări,⁶⁷ inclusiv în teoria corzilor care în general este interpretată ca dependentă de fundal.

Hagar și Hemmo declară nevoia unui anumit tip de spațiu-timp chiar și la nivelul GC; fizica nu este formată doar din teorii dinamice, ci și din experimente și măsurători prin care trebuie testate modelele. Deci, trebuie să existe ceva observabil cu caracteristici geometrice sau care pot fi traduse în termeni geometrici.⁶⁸ Aceștia afirmă că interpretarea teoriilor GC ca teorii fără spațiu ar fi în contradicție cu bazele epistemice ale fizicii experimentale, respectiv cu primatul observațiilor și măsurătorilor geometrice.

Suporterii dispariției spațiu-timpului urmăresc o abordare leibniziană, conform lui Earman, chiar pitagoreică, a realității, conform căreia sensul realității fizice se poate deriva direct din teoria matematică cu ajutorul unor criterii *a priori* mai "rezonabile."⁶⁹ Perspectiva operaționalistă definește realitatea fizică față de măsurabilitatea ei, respectiv orice concept este "nimic mai mult decât un set de operațiuni, conceptul este sinonim cu setul corespunzător de operații."⁷⁰ Detectarea cantităților măsurabile în gravitația cuantică este scopul principal al experimenterilor, întrucât măsurabilitatea este o caracteristică esențială pentru identificarea mărimilor relevante din punct de vedere fizic.

Încă nu s-a reușit includerea gravitației în cadrul teoretic al câmpului cuantic al modelului standard, deoarece interacțiunile gravitaționale nu satisfac principiile renormalizabilității.

Bibliografie

Arkani-Hamed, Nima. „The Future of Fundamental Physics”, 2012, 14.

⁶⁶Carlo Rovelli, „The Disappearance of Space and Time”, în *The Disappearance of Space and Time*, ed. Dennis Dieks (Elsevier, 2007), 25–36.

⁶⁷Nick Huggett, Tiziana Vistarini, și Christian Wuthrich, „Time in quantum gravity”, *arXiv:1207.1635 [gr-qc, physics:physics]*, 3 iulie 2012, 242–261, <http://arxiv.org/abs/1207.1635>.

⁶⁸Hagar și Hemmo, „The Primacy of Geometry”, 44, 357–364.

⁶⁹John Earman, „Thoroughly Modern McTaggart: Or, What McTaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity”, *Philosophers' Imprint* 2 (2002): 2, 1–28.

⁷⁰Richard Feldman, „Naturalized Epistemology”, 5 iulie 2001, 5, <https://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/epistemology-naturalized/>.

- Ashtekar, Abhay. „Loop quantum gravity: four recent advances and a dozen frequently asked questions”. În *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting*, 126–47. World Scientific Publishing Company, 2008. https://doi.org/10.1142/9789812834300_0008.
- Audreusch, Jürgen. „Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions”. *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, nr. 2 (1 septembrie 1981): 322–39. <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.
- Brading, Katherine, Elena Castellani, și Nicholas Teh. „Symmetry and Symmetry Breaking”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.
- Bub, Jeffrey. *Interpreting the Quantum World*. 1st edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- Bunge, Mario. „The Revival of Causality”. În *La Philosophie Contemporaine / Contemporary Philosophy: Chroniques Nouvelles / A New Survey*, ediție de Guttorm Fløistad, 133–55. International Institute of Philosophy / Institut International de Philosophie. Dordrecht: Springer Netherlands, 1982. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9940-0_6.
- Butterfield, J., și C. J. Isham. „On the Emergence of Time in Quantum Gravity”. *arXiv:gr-qc/9901024*, 8 ianuarie 1999. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901024>.
- 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.
- Callender, Craig, și Nick Huggett. *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*. Cambridge University Press, 2001.
- Cao, Tian Yu. „Prerequisites for a Consistent Framework of Quantum Gravity”. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32, nr. 2 (2001): 181–204.
- Carlip, S. „Is Quantum Gravity Necessary?” *Classical and Quantum Gravity* 25, nr. 15 (7 august 2008): 154010. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/15/154010>.
- Curiel, Erik. „Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty”. *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, nr. 3 (2001): S424-.
- Dawid, Richard. „Scientific Realism in the Age of String Theory”. *Physics and Philosophy*, 2007. ———. *String Theory and the Scientific Method*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- Deser, S. „Self-Interaction and Gauge Invariance”. *General Relativity and Gravitation* 1, nr. 1 (1 martie 1970): 9–18. <https://doi.org/10.1007/BF00759198>.
- DeWitt, Bryce S. „Definition of Commutators via the Uncertainty Principle”. *Journal of Mathematical Physics* 3 (1 iulie 1962): 619–24. <https://doi.org/10.1063/1.1724265>.
- Earman, John. „Thoroughly Modern McTaggart: Or, What McTaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity”. *Philosophers' Imprint* 2 (2002): 1–28.
- Feldman, Richard. „Naturalized Epistemology”, 5 iulie 2001. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/epistemology-naturalized/>.
- Feynman, Richard P, Fernando B Morinigo, William G Wagner, și Brian Hatfield. *Feynman Lectures on Gravitation*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.
- Galison, Peter. *Laws of Nature: Essays on the Philosophic, Scientific, and Historical Dimensions*. Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1995.

- Ghirardi, G. C., A. Rimini, și T. Weber. „Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems”. *Physical Review D* 34, nr. 2 (15 iulie 1986): 470–91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>.
- Graña, Mariana. „The Low Energy Limit of String Theory and Its Compactifications with Background Fluxes”. *Letters in Mathematical Physics* 78, nr. 3 (1 decembrie 2006): 279–305. <https://doi.org/10.1007/s11005-006-0125-z>.
- Hagar, Amit, și Meir Hemmo. „The Primacy of Geometry”. ResearchGate, 2013. https://www.researchgate.net/publication/259158226_The_primacy_of_geometry.
- Hossenfelder, Sabine. „Experimental Search for Quantum Gravity”. *arXiv:1010.3420 [gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th]*, 17 octombrie 2010. <http://arxiv.org/abs/1010.3420>.
- Hossenfelder, Sabine, și Lee Smolin. „Phenomenological Quantum Gravity”. *arXiv:0911.2761 [gr-qc, physics:physics]*, 14 noiembrie 2009. <http://arxiv.org/abs/0911.2761>.
- Huggett, Nick, Tiziana Vistarini, și Christian Wuthrich. „Time in quantum gravity”. *arXiv:1207.1635 [gr-qc, physics:physics]*, 3 iulie 2012. <http://arxiv.org/abs/1207.1635>.
- Ibanez, L. E. „The second string (phenomenology) revolution”. *Classical and Quantum Gravity* 17, nr. 5 (7 martie 2000): 1117–28. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/17/5/321>.
- Kiefer, C. „Quantum gravity: general introduction and recent developments”. *Annalen der Physik* 518 (1 ianuarie 2006): 129–48. <https://doi.org/10.1002/andp.200510175>.
- . „Time in Quantum Gravity”. În *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, ediție de Craig Callender, 667. Oxford University Press, 2011.
- Kragh, Helge. *Dirac: A Scientific Biography*. 1 edition. Cambridge England; New York: Cambridge University Press, 1990.
- Kuchar, Karel. „Canonical Quantum Gravity”. *arXiv:gr-qc/9304012*, 8 aprilie 1993. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304012>.
- Nambu, Y. „Directions of Particle Physics”. *Progress of Theoretical Physics Supplement* 85 (1985): 104–10. <https://doi.org/10.1143/PTPS.85.104>.
- Ohta, T., și R. B. Mann. „Canonical reduction of two-dimensional gravity for Particle Dynamics”. *Classical and Quantum Gravity* 13, nr. 9 (1 septembrie 1996): 2585–2602. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/9/022>.
- Oldershaw, Robert L. „The new physics—Physical or mathematical science?” *American Journal of Physics* 56, nr. 12 (1 decembrie 1988): 1075–81. <https://doi.org/10.1119/1.15749>.
- Pearle, null. „Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization”. *Physical Review. A, General Physics* 39, nr. 5 (1 martie 1989): 2277–89.
- Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.
- Pinna, S., și Simone Pinna. „A Conceptual Test for Cognitively Coherent Quantum Gravity Models”, 2017. <https://doi.org/10.3390/technologies5030051>.
- Rickles, Dean. „A philosopher looks at string dualities”. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.
- Rovelli, Carlo. „Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time”. În *The Cosmos of Science*, ediție de John Earman și John Norton, 180–223. University of Pittsburgh Press, 1997.
- . „Quantum Gravity”. Cambridge Core, noiembrie 2004. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755804>.
- . „The Disappearance of Space and Time”. În *The Disappearance of Space and Time*, ediție de Dennis Dieks. Elsevier, 2007.

- Salimkhani, Kian. „Quantum Gravity: A Dogma of Unification?” În *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science*, vol 9., ediție de Alexander Christian, David Hommen, Nina Retzlaff, și Gerhard Schurz, 23–41. Cham: Springer, 2018.
- Smolin, Lee. *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*. Reprint edition. Boston u.a: Mariner Books, 2007.
- Tegmark, Max, și John Archibald Wheeler. „100 Years of the Quantum”. *arXiv:quant-ph/0101077*, 17 ianuarie 2001. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077>.
- Thiemann, Thomas. „The Phoenix Project: Master Constraint Programme for Loop Quantum Gravity”. *Classical and Quantum Gravity* 23, nr. 7 (7 aprilie 2006): 2211–47. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/7/002>.
- Townsend, P. K. „Four Lectures on M-theory”. *arXiv:hep-th/9612121*, 11 decembrie 1996. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.
- Von Neumann, John. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: J. Springer, 1932.
- Weinberg, Steven. *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature*. Random House, 2010.
- . „What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is?” *arXiv:hep-th/9702027*, 3 februarie 1997. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9702027>.
- Weinstein, Steven. „Absolute Quantum Mechanics”. Preprint, 2000. <http://philsci-archive.pitt.edu/836/>.
- Weinstein, Steven, și Dean Rickles. „Quantum Gravity”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/>.
- Weyl, Hermann, și Frank Wilczek. *Philosophy of Mathematics and Natural Science*. Revised ed. edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2009.
- Wigner, E. P., I. J. Good, A. J. Mayne, J. M. Smith, și Thornton Page. „The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas”. *American Journal of Physics* 32, nr. 4 (1 aprilie 1964): 322–322. <https://doi.org/10.1119/1.1970298>.
- Wuthrich, Christian. „To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity”. Published Article or Volume. *Philosophy of Science*, 2005. <http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946>.
- Zee, A. *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*. 2 edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010.
- Zinkernagel, Henrik. „The Philosophy Behind Quantum Gravity”. *Theoria: An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 21, nr. 3 (2010): 295–312.