

Epistemologia gravitației cuantice canonice – Gravitația cuantică în bucle

Nicolae Sfetcu

20.06.2019

Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia gravitației cuantice canonice – Gravitația cuantică în bucle", SetThings (20 iunie 2019), URL = <https://www.setthings.com/ro/epistemologia-gravitatiei-cuantice-canonice-gravitatia-cuantica-in-bucle/>

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/>.

<u>TESTE PROPUSE PENTRU GCC</u>	<u>3</u>
<u>GRAVITAȚIA CUANTICĂ ÎN BUCLE.....</u>	<u>5</u>
<u>BIBLIOGRAFIE</u>	<u>11</u>

În interpretarea GCC, gravitația apare ca o pseudoforță geometrică, este redusă la geometria spațio-temporală și devine un simplu efect al curburii spațiu-timpului.¹ (Maudlin²). Lehmkuhl³ susține că formalismul canonic nu confirmă această interpretare. TGR asociază gravitația cu spațiu-timpul, dar tipul de asociere nu este fixat.⁴ În locul interpretării geometrice se poate folosi interpretarea câmpului (geometria spațiu-timp este redusă la un câmp gravitațional, respectiv metrica, considerată drept "doar un alt câmp") sau interpretarea egalitară (o identificare conceptuală a gravitației și spațiu-timpului în TGR.⁵). Aceste interpretări alternative reduc diferențele conceptuale dintre TGR și celelalte teorii ale câmpului.

Instrumentalismul permite ignorarea gravitației cuantice, întrucât concepe teoriile științifice doar ca instrumente de predicție. Gravitația canonică cuantică urmărește o teorie cuantică nonperturbantă a câmpului gravitațional. Ea se bazează pe consistența între mecanica cuantică și gravitație, fără a încerca să unifice toate câmpurile. Ideea principală este aplicarea unor proceduri standard de cuantificare la teoria generală a relativității. Pentru aceasta, este necesar ca relativitatea generală să fie exprimată în formă canonică (hamiltoniană) și apoi se cuantizează în mod obișnuit. Acest lucru a fost (parțial) realizat cu succes de Dirac⁶ și (diferit) de Arnowitt, Deser și Misner.⁷

¹ Kian 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.

² Tim Maudlin, „On the Unification of Physics”, *Journal of Philosophy* 93, nr. 3 (1996): 129–144.

³ D. Lehmkuhl, D. Dieks, și M. Redei, „Is spacetime a gravitational field?”, in *The Ontology of Spacetime II, Volume 4 - 1st Edition*, 2008, 83–110, <https://www.elsevier.com/books/the-ontology-of-spacetime-ii/dieks/978-0-444-53275-6>.

⁴ Lehmkuhl, Dieks, și Redei, 84.

⁵ Lehmkuhl, Dieks, și Redei, 84.

⁶ Paul A. M. Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics* (Mineola, NY: Snowball Publishing, 2012).

⁷ R. Arnowitt, S. Deser, și C. W. Misner, „The Dynamics of General Relativity”, *General Relativity and Gravitation* 40, nr. 9 (septembrie 2008): 1997–2027, <https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1>.

Teste propuse pentru GCC

Carlip afirmă, cu referire la gravitația cuantică: "Măsura supremă a oricărei teorii este acordul său cu Natura; dacă nu avem astfel de teste, cum vom ști dacă avem dreptate?"⁸ De obicei, o nouă teorie se construiește cu ajutorul datelor experimentale disponibile, la care se încearcă să se potrivească modelele fenomenologice, verificându-se apoi prin predicții. Adesea, consistența conceptuală și formală este ocolită în încercarea de a se potrivi cu realitatea. La gravitația cuantică totul se petrece în mod foarte diferit: ea se bazează aproape în întregime pe consistența conceptuală și formală, împreună cu constrângerile impuse, și pare imposibil de abordat prin cercetarea experimentală. Dean Rickles afirmă că testul de bază al oricărei teorii științifice este un test experimental, fără de care teoria se încurcă în matematică pură sau, mai rău, în metafizică.⁹

Giovanni Amelino-Camelia a inițiat un nou program de cercetare denumit "fenomenologie gravitațională cuantică", prin care încearcă să transforme cercetarea cuantică a gravitației într-o adevărată disciplină experimentală. Scara la care apar efecte gravitaționale cuantice este stabilită de diferitele constante fizice ale fizicii fundamentale: h , c și G , care caracterizează fenomenele cuantice, relativiste și gravitaționale. Prin combinarea acestor constante se obțin constantele Planck la nivelul cărora trebuie să se manifeste efectele gravitației cuantice:

Nume	Formula	Valoarea (SI)
Lungimea Planck	$l_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,616229(38) \times 10^{-35} \text{ m}$
Masa Planck	$m_P = \sqrt{\hbar c/G}$	$2,176470(51) \times 10^{-8} \text{ kg}$
Timpul Planck	$t_P = l_P/c = \hbar/m_P c^2 = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39116(13) \times 10^{-44} \text{ s}$
Sarcina Planck	$q_P = \sqrt{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = e/\sqrt{\alpha}$	$1,875\,545\,956(41) \times 10^{-18} \text{ C}$
Temperatura Planck	$T_P = m_P c^2/k_B = \sqrt{\hbar c^5/G k_B^2}$	$1,416808(33) \times 10^{32} \text{ K}$

Tabelul 1 Constantele Planck

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

⁹ Dean Rickles, „Quantum Gravity: A Primer for Philosophers.”, Preprint, octombrie 2008, <http://philsci-archive.pitt.edu/5387/>.

Acestea sunt cu multe ordini de mărime dincolo de capacitățile experimentale actuale. Dar argumentul scalei se aplică evenimentelor gravitaționale cuantice individuale. Ideea este de a combina astfel de evenimente pentru a amplifica efectele care pot fi detectate cu echipamentele actuale sau din viitorul apropiat. Gravitația cuantică poate fi studiată și prin observarea capătului opus al spectrului scalei, sistemele astronomice, prin observarea radiației cosmice, exploziilor generatoare de raze gama, exploziile Kaon, particule, lumina și radiația cosmică de fond, prin efectele gravitaționale cuantice care s-ar putea manifesta în aceste sisteme. În aceste sisteme, efectele la scala Planck sunt amplificate în mod natural.

Dar astfel de efecte pot fi studiate și în dispozitive experimentale pe Pământ, folosind de asemenea "experimente naturale", precum particule care se deplasează pe distanțe mari la viteze enorme.¹⁰ Bryce DeWitt a argumentat că efectele gravitaționale cuantice nu vor fi măsurabile pe particulele elementare individuale, întrucât câmpul gravitațional în sine nu are sens la aceste scale. Câmpul static dintr-o astfel de particulă nu ar depăși fluctuațiile cuantice.¹¹

Pentru folosirea universului ca dispozitiv experimental se apelează la ideea că lumina își schimbă proprietățile pe distanțe mari în cazul spațiu-timpului discret, care produce efecte birefringente.¹² Baza teoretică este că o undă care se propagă în un spațiu-timp discret va încălca invarianța Lorentz, aceasta putând fi o "probă" pentru a testa modelele de gravitație cuantică. Dar discretitudinea spațiu-timpului nu este o condiție suficientă pentru non-invarianța Lorentz: un contraexemplu sunt seturile cauzale care sunt structuri discrete și nu par să o încalce.

¹⁰ Rickles.

¹¹ B. S. DeWitt și Louis Witten, *The Quantization of Geometry, in Gravitation an Introduction to Current Research*, First Edition edition (John Wiley & Sons, 1962), 372.

¹² Rodolfo Gambini și Jorge Pullin, „Quantum Gravity Experimental Physics?”, *General Relativity and Gravitation* 31, nr. 11 (1 noiembrie 1999): 1999, <https://doi.org/10.1023/A:1026701930767>.

Gravitația cuantică în bucle

Gravitația cuantică în bucle (GCB) încearcă unificarea gravitației cu celelalte trei forțe fundamentale începând cu relativitatea și adăugând trăsături cuantice. Ea se bazează direct pe formula geometrică a lui Einstein.

În GCB, spațiul și timpul sunt cuantizate la fel ca energia și impulsul în mecanica cuantică. Spațiul și timpul sunt granulare și discrete, existând o dimensiune minimă. Spațiul este considerat ca o țesătură sau o rețea extrem de fină de bucle finite, numite rețele de spin sau spumă de spin, cu o dimensiune limitată inferior de ordinul unei lungimi Planck, aproximativ 10^{-35} metri. Consecințele sale se aplică cel mai bine cosmologiei, în studiul universului timpuriu și fizica Big Bang. Predicția sa principală, neverificată, implică o evoluție a universului dincolo de Big Bang (Big Bounce).

Orice teorie a gravitației cuantice trebuie să reproducă teoria relativității generale a lui Einstein ca o limită clasică. Gravitația cuantică trebuie să poată reveni la teoria clasică când $\hbar \rightarrow 0$. Pentru aceasta trebuie să se evite anomalii cuantice, pentru a nu avea restricții asupra spațiului fizic Hilbert fără corespondent în teoria clasică. Rezultă că teoria cuantică are mai puține grade de libertate decât teoria clasică. Lewandowski, Okolow, Sahlmann și Thiemann¹³ pe de o parte, și Christian Fleischhack¹⁴ pe de altă parte, au dezvoltat teoreme care stabilesc unicitatea reprezentării buclei așa cum este definită de Ashtekar. Aceste teoreme exclud existența altor teorii în cadrul programului de cercetare GCB și deci, dacă GCB nu are limita semiclassicală corectă, asta ar însemna sfârșitul reprezentării GCB în totalitate.

Programul de gravitație cuantică canonică tratează metrica spațiu-timp ca un câmp și o cuantizează direct, cu spațiul împărțit în straturi tridimensionale. Programul presupune rescrierea relativității generale în formă "canonică" sau "hamiltoniană",¹⁵ prin un set de variabile de configurație care pot fi codificate într-un spațiu de fază. Se determină apoi evoluția în timp a acestor variabile, mișcările fizice posibile în spațiul de fază, o familie de curbe, se cuantizează, și se generează evoluția dinamică cu ajutorul

¹³ Jerzy Lewandowski et al., „Uniqueness of Diffeomorphism Invariant States on Holonomy–Flux Algebras”, *Communications in Mathematical Physics* 267, nr. 3 (1 noiembrie 2006): 267 (3): 703–733, <https://doi.org/10.1007/s00220-006-0100-7>.

¹⁴ Christian Fleischhack, „Irreducibility of the Weyl Algebra in Loop Quantum Gravity”, *Physical Review Letters* 97, nr. 6 (11 august 2006): 97 (6): 061302, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.061302>.

¹⁵ Karel Kuchař, „Canonical Quantization of Gravity”, *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237–88, https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.

operatorului hamiltonian.¹⁶ Apar astfel unele constrângeri ale variabilelor canonice impuse după cuantificare.

În gravitația canonică în bucle, Ashtekar a folosit un set diferit de variabile cu o metrică mai complexă,¹⁷ rezolvând mai ușor constrângerile. Prin modificările introduse în program, se pot recupera toate caracteristicile geometrice standard ale relativității generale.¹⁸ Avantajul acestei versiuni este un control mai mare (matematic) asupra teoriei (și cuantificării sale).

Programul GCB impune ca o teorie a spațiu-timpului să fie independentă de fundal, față de teoria corzilor unde spațiu-timpul este tratat ca un fond fix. GCB folosește formularea hamiltoniană sau canonică a TGR. Avantajul unei formulări canonice a unei teorii este ușurința și standardizarea cuantificării. Buclele din GCB ne dau o descriere a spațiului. La intersecția buclelor apar noduri care reprezintă unități de bază ale spațiului, care este astfel discretizat; două noduri conectate prin o legătură reprezintă două unități de spațiu una lângă cealaltă. Suprafața este determinată de intersecțiile cu buclele. Se poate astfel imagina un grafic (rețea de spini¹⁹) realizat din anumite numere cuantice atașate la acesta. Numerele determină suprafețele și volumele de spațiu.²⁰ Problema timpului în GCB este de a încorpora timpul în această imagine.

GCB consideră TGR ca punct de pornire, la care aplică o procedură de cuantificare pentru a ajunge la o teorie cuantică viabilă a gravitației. În procedura de cuantificare, denumită cuantizare canonică, este necesară reformularea TGR ca sistem hamiltonian, permițând astfel o evoluție în timp a tuturor gradelor de libertate ale sistemului. Formulele hamiltoniene respective împart spațiu-timpul folii de hipersuprafețe spațiale tridimensionale, printr-un formalism denumit ADM după autorii săi (Richard Arnowitt, Stanley Deser și Charles Misner). Formalismul ADM preia metricile induse pe suprafețele spațiale ca variabile ale "poziției" și o combinație liniară a componentelor curburii exterioare a acestor hipersuprafețe care codificând

¹⁶ Steven 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/>.

¹⁷ Carlo Rovelli, „Notes for a brief history of quantum gravity”, *arXiv:gr-qc/0006061*, 16 iunie 2000, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061>.

¹⁸ Lee Smolin, „The case for background independence”, *arXiv:hep-th/0507235*, 25 iulie 2005, 196–239, <http://arxiv.org/abs/hep-th/0507235>.

¹⁹ Rețeaua de spin este un grafic al cărui noduri reprezintă "bucăți" de spațiu și ale căror legături reprezintă suprafețe care separă aceste bucăți, reprezentând o stare cuantică a câmpului gravitațional sau a spațiului.

²⁰ Keizo Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research* (Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012).

încorporarea lor în spațiu-timp 4-dimensional ca variabile "impuls" conjugate canonic cu metricile.²¹ Ecuațiile hamiltoniene rezultate nu sunt echivalente cu ecuațiile câmpului lui Einstein. Pentru a le face echivalente, trebuie introduse restricții, rezultând anumite condiții pentru datele inițiale. Prima familie de constrângeri codifică libertatea de a alege foliația (constrângere hamiltoniană), iar al doilea set de constrângeri ține de libertatea de a alege coordonatele în spațiul 3-dimensional (constrângeri vectoriale), rezultând în total patru ecuații de constrângere. În GCB mai există o familie de constrângeri suplimentare, legate de simetriile interne. Până în prezent au fost rezolvate doar două dintre cele trei familii de constrângeri. Procedura de cuantizare canonică se desfășoară conform lui Paul Dirac,²² transformând variabilele canonice în operatori cuantici care acționează pe un spațiu de stare cuantică.

Utilizarea formalismului ADM s-a lovit de complicații tehnice insurmontabile, astfel încât în anii 1980 Abhay Ashtekar a introdus variabile noi care au simplificat ecuațiile constrângerilor, cu dezavantajul pierderii semnificației geometrice directe a variabilelor ADM. În acest caz geometria spațiu-timp este captată de un "câmp triadic" care codifică cadrele inerțiale locale definite pe hipersuprafețe spațiale, mai degrabă decât metricile. Trecerea de la ADM la variabilele Ashtekar reprezintă o reinterpretare a ecuațiilor câmpului Einstein. Teoria generalizată a relativității reinterpretată este apoi supusă procedurii canonice ca mai sus.²³

În multe abordări al gravitației cuantice, inclusiv în teoria corzilor și în GCB, nici spațiul nu mai este o entitate fundamentală, ci doar un fenomen "emergent" care provine din fizica de bază.²⁴ Christian Wüthrich afirmă că nu este clar dacă putem formula o teorie fizică în mod coerent în absența spațiului și a timpului.²⁵

O abordare mai nouă este utilizarea așa-numitelor modele "spumă de spini",²⁶ care utilizează o integrare a căii pentru a genera spațiu-timpul. Evoluția în timp a rețelelor de spin se presupune că reprezintă spațiu-timpul spațial în termenii spumei de spini.

²¹ Christian Wüthrich, „In Search of Lost Spacetime: Philosophical Issues Arising in Quantum Gravity” (2011).

²² Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*.

²³ Wüthrich, „In Search of Lost Spacetime”.

²⁴ Wüthrich.

²⁵ Christian Wüthrich, „To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity”, Published Article or Volume, *Philosophy of Science*, 2005, 72 : 777-788, <http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946>.

²⁶ John W. Barrett și Louis Crane, „Relativistic spin networks and quantum gravity”, *Journal of Mathematical Physics* 39, nr. 6 (iunie 1998): 32:3296–3302, <https://doi.org/10.1063/1.532254>.

GCB este un vast program de cercetare activ, dezvoltat în mai multe direcții cu același nucleu dur.²⁷ Două direcții de dezvoltare sunt mai importante: GCB canonică mai tradițională, și GCB covariantă, numită teoria spumei de spin.

Gravitația cuantică în bucle a rezultat dintr-o încercare de a formula o teorie cuantică independentă de fundal. Aceasta ia în considerare abordarea relativității generale că spațiu-timpul este un câmp dinamic și, prin urmare, un obiect cuantic. A doua ipoteză a teoriei este că discretitudinea cuantică care determină comportamentul asemănător cu particulele altor teorii ale câmpului afectează și structura spațiului. Rezultă o structură granulară a spațiului la lungimea Planck. Starea cuantică a spațiu-timpului este descrisă prin intermediul unei structuri matematice denumită rețea de spin. Rețelele de spin nu reprezintă stări cuantice ale unui câmp în spațiu, ci stările cuantice ale spațiu-timpului. Teoria s-a obținut prin reformularea relativității generale cu ajutorul variabilelor Ashtekar.²⁸ În prezent există mai multe euristici pozitive pe baza cărora se dezvoltă dinamica teoriei.

Termodinamica găurii negre încearcă să concilieze legile termodinamicii cu orizonturile de evenimente ale găurilor negre. Un succes recent al teoriei este calculul entropiei tuturor găurilor negre ne-singulare direct din teorie și independent de alți parametri. Aceasta este singura derivare cunoscută a acestei formule dintr-o teorie fundamentală, în cazul găurilor negre generice care nu sunt singulare. Teoria a permis și calculul corecțiilor gravitației cuantice la entropia și radiația găurilor negre.

În 2014, Carlo Rovelli și Francesca Vidotto au sugerat, pe baza GCB, că există o stea Planck în interiorul unei găuri negre, încercând să rezolve astfel protecția găurii negre și paradoxul informațiilor găurii negre.

Cosmologia cuantică în bucle (CCB) a prezis un Big Bounce înainte de Big Bang. CCB s-a dezvoltat folosind metode care imită pe cele ale GCB, care prezice o "punte cuantică" între ramurile cosmologice contractante și expansive. Prin CCB s-au prezis singularitățile Big Bang, Big Bounce, și un mecanism natural pentru inflație. Dar rezultatele obținute sunt supuse restricției datorită suprimării artificiale a gradelor de libertate. Evitarea singularităților în CCB se face prin mecanisme disponibile numai în aceste modele restrictive; evitarea singularităților în teoria completă poate fi obținută doar printr-o trăsătură mai subtilă a GCB.

²⁷ Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*.

²⁸ Abhay Ashtekar, „New Variables for Classical and Quantum Gravity”, *Physical Review Letters* 57, nr. 18 (3 noiembrie 1986): 57 (18): 2244–2247, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244>.

Încă nu s-a confirmat reproducerea TGR ca limităclasică la energie mică în GCB, și încă nu au fost calculate amplitudinile de împrăștiere.

Probleme cele mai presante ale GCB sunt lipsa noastră de înțelegere a dinamicii (incapacitatea de a rezolva ecuația de constrângere hamiltoniană), și eșecul în a explica cum apare spațiul clasic neted (cum reușește TGR în acest caz).

Altă problemă a GCB este o problemă generală a MC: timpul. Carlo Rovelli și Julian Barbour au încercat să formuleze mecanica cuantică într-un mod care nu necesită un timp extern, înlocuind timpul prin relaționarea evenimentelor direct unul cu celălalt.²⁹

Efectele gravitației cuantice sunt dificil de măsurat deoarece lungimea Planck este mult prea mică, dar se încearcă măsurarea efectelor din observațiile astrofizice și detectorii de undă gravitațională. Încă nu s-a dovedit că descrierea GCB a spațiu-timpului la scara Planck are limita continuă corectă descrisă de relativitatea generală cu posibile corecții cuantice. Alte probleme nerezolvate includ dinamica teoriei, constrângerile, cuplarea cu câmpurile de materie, renormalizarea gravitonului.³⁰

Încă nu există o observație experimentală pentru care GCB să fi făcut o predicție diferită de cele din Modelul Standard sau relativitatea generală. Din cauza lipsei unei limite semiclastice, GCB nu a reprodus predicțiile făcute de relativitatea generală.

GCB are dificultăți în încercarea de a permite teoria relativității generale la limita semiclastică, printre care

- Nu există niciun operator care să răspundă difeomorfismelor infinitezimale, acesta trebuie aproximat prin difeomorfisme finite și astfel structura parantezelor Poisson a teoriei clasice nu este reprodusă exact. Problema poate fi eludată prin introducerea unor constrângeri.³¹
- Dificultatea reconcilierii naturii combinatoriale discrete a stărilor cuantice cu natura continuă a câmpurilor teoriei clasice.
- Dificultăți generate de structura parantezelor Poisson care implică difeomorfismul spațial și constrângerile hamiltoniene.³²

²⁹ Carlo Rovelli, „Relational Quantum Mechanics”, *International Journal of Theoretical Physics* 35, nr. 8 (august 1996): 35 : 1637-1678, <https://doi.org/10.1007/BF02302261>.

³⁰ Hermann Nicolai, Kasper Peeters, și Marija Zamaklar, „Loop quantum gravity: an outside view”, *Classical and Quantum Gravity* 22, nr. 19 (7 octombrie 2005): 22(19): R193–R247, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/19/R01>.

³¹ Thomas Thiemann, *Modern Canonical Quantum General Relativity*, 1 edition (Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008).

³² Thiemann.

- Mecanismele semiclassical dezvoltate se potrivesc doar operatorilor care nu schimbă graficul.
- Problema formulării observabilelor pentru relativitatea generală datorită naturii sale neliniare și invarianței difeomorfismului spațiu-timp.³³

GCB este o soluție posibilă a gravitației cuantice, la fel ca teoria corzilor dar cu diferențe. Față de teoria corzilor care postulează dimensiuni suplimentare și particule și simetrii suplimentare neobservate, GCB se bazează numai pe teoria cuantică și relativitatea generală, iar domeniul său de aplicare este limitat la înțelegerea aspectelor cuantice ale interacțiunii gravitaționale. În plus, consecințele GCB sunt radicale, modificând fundamental cuantic natura spațiului și a timpului.

³³ B. Dittrich, „Partial and Complete Observables for Hamiltonian Constrained Systems”, *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 11 (1 noiembrie 2007): 39 (11): 1891–1927, <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0495-2>.

Bibliografie

- Arnowitt, R., S. Deser, și C. W. Misner. „The Dynamics of General Relativity”. *General Relativity and Gravitation* 40, nr. 9 (septembrie 2008): 1997–2027.
<https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1>.
- Ashtekar, Abhay. „New Variables for Classical and Quantum Gravity”. *Physical Review Letters* 57, nr. 18 (3 noiembrie 1986): 2244–47.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244>.
- Barrett, John W., și Louis Crane. „Relativistic spin networks and quantum gravity”. *Journal of Mathematical Physics* 39, nr. 6 (iunie 1998): 3296–3302.
<https://doi.org/10.1063/1.532254>.
- 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>.
- DeWitt, B. S., și Louis Witten. *The Quantization of Geometry, in Gravitation an Introduction to Current Research*. First Edition edition. John Wiley & Sons, 1962.
- Dirac, Paul A. M. *Lectures on Quantum Mechanics*. Mineola, NY: Snowball Publishing, 2012.
- Dittrich, B. „Partial and Complete Observables for Hamiltonian Constrained Systems”. *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 11 (1 noiembrie 2007): 1891–1927.
<https://doi.org/10.1007/s10714-007-0495-2>.
- Fleischhack, Christian. „Irreducibility of the Weyl Algebra in Loop Quantum Gravity”. *Physical Review Letters* 97, nr. 6 (11 august 2006): 061302.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.061302>.
- Gambini, Rodolfo, și Jorge Pullin. „Quantum Gravity Experimental Physics?” *General Relativity and Gravitation* 31, nr. 11 (1 noiembrie 1999): 1631–37.
<https://doi.org/10.1023/A:1026701930767>.
- Kuchař, Karel. „Canonical Quantization of Gravity”. *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237–88. https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.
- Lehmkuhl, D., D. Dieks, și M. Redei. „Is spacetime a gravitational field?, in The Ontology of Spacetime II, Volume 4 - 1st Edition”, 2008. <https://www.elsevier.com/books/the-ontology-of-spacetime-ii/dieks/978-0-444-53275-6>.
- Lewandowski, Jerzy, Andrzej Okołów, Hanno Sahlmann, și Thomas Thiemann. „Uniqueness of Diffeomorphism Invariant States on Holonomy–Flux Algebras”. *Communications in Mathematical Physics* 267, nr. 3 (1 noiembrie 2006): 703–33.
<https://doi.org/10.1007/s00220-006-0100-7>.
- Matsubara, Keizo. *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research*. Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012.
- Maudlin, Tim. „On the Unification of Physics”. *Journal of Philosophy* 93, nr. 3 (1996): 129–144.
- Nicolai, Hermann, Kasper Peeters, și Marija Zamaklar. „Loop quantum gravity: an outside view”. *Classical and Quantum Gravity* 22, nr. 19 (7 octombrie 2005): R193–247.
<https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/19/R01>.
- Rickles, Dean. „Quantum Gravity: A Primer for Philosophers.” Preprint, octombrie 2008.
<http://philsci-archive.pitt.edu/5387/>.
- Rovelli, Carlo. „Notes for a brief history of quantum gravity”. *arXiv:gr-qc/0006061*, 16 iunie 2000. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061>.
- . „Relational Quantum Mechanics”. *International Journal of Theoretical Physics* 35, nr. 8 (august 1996): 1637–78. <https://doi.org/10.1007/BF02302261>.

- 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 case for background independence”. *arXiv:hep-th/0507235*, 25 iulie 2005. <http://arxiv.org/abs/hep-th/0507235>.
- Thiemann, Thomas. *Modern Canonical Quantum General Relativity*. 1 edition. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008.
- 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/>.
- Wuthrich, Christian. „In Search of Lost Spacetime: Philosophical Issues Arising in Quantum Gravity”, 2011.
- . „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>.