

Anomalii ale relativității generale

Nicolae Sfetcu

18.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Anomalii ale relativității generale", SetThings (18 iulie 2019), URL = <https://www.setthings.com/ro/anomalii-ale-relativitatii-generale/>

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/>.

PUNCTUL DE SATURAȚIE4

BIBLIOGRAFIE11

În timp, teoria generală a relativității a acumulat mai multe anomalii și discrepanțe, indicând necesitatea unor teorii mai bune despre gravitație sau alte moduri de abordare:

- Stelele din galaxii au o distribuție a vitezelor în creștere de la centru spre periferie, cu o variație mai mare decât cea prezisă. La fel și în cazul galaxiilor din clusterelor de galaxii. Ipoteza materiei întunecată, care ar interacționa prin gravitație dar nu electromagnetic, ar putea explica discrepanța. Există și diferite modificări ale dinamicii newtoniene care pot explica această anomalie, precum teoria MOND.
- Navele spațiale au experimentat o accelerație mai mare decât cea prezisă în timpul manevrelor gravitaționale.
- Expansiunea metrică a spațiului pare să se accelereze. Energia întunecată a fost introdusă ca o ipoteză pentru a explica acest lucru. O explicație recentă este că geometria spațiului nu este omogenă datorită grupărilor de galaxii, dar această ipoteză este contestată.¹
- Măsurătorile recente arată că orbitele planetare cresc mai repede decât prin predicția pierderii masei Soarelui prin energie radiativă.
- Fotonii din radiația cosmică ar trebui să câștige energie și apoi să o piardă pe drum, dar în realitate aceștia câștigă de două ori mai multă energie decât cea prezisă de teorie. O ipoteză ar fi că gravitația scade *mai repede* decât pătratul invers la anumite scale de distanță.
- Norii de hidrogen masivi suplimentari: Liniile spectrale Lyman-alpha sugerează că norii de hidrogen sunt mai aglomerati la anumite scale decât se aștepta și, ca și fluxul întunecat, pot indica faptul că gravitația scade *mai lent* decât pătratele inverse la anumite scale de distanță.²

Ipotezele ad-hoc introduse în relativitatea generală pentru a explica singularitățile gravitaționale pe baza condițiilor energetice nu sunt foarte eficiente. Sunt necesare ipoteze mai detaliate asupra conținutului materiei.³ Mulți oameni de

¹ Anil Ananthaswamy, „Swiss-Cheese Model of the Cosmos Is Full of Holes”, New Scientist, 2008, <https://www.newscientist.com/article/mg20026783-800-swiss-cheese-model-of-the-cosmos-is-full-of-holes/>.

² Marcus Chown, „Gravity May Venture Where Matter Fears to Tread”, New Scientist, data accesării 3 mai 2019, <https://www.newscientist.com/article/mg20126990-400-gravity-may-venture-where-matter-fears-to-tread/>.

³ Alan D. Rendall, „The nature of spacetime singularities”, *arXiv:gr-qc/0503112*, noiembrie 2005, 76–92, https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003.

știință și filosofi au ajuns la concluzia că singularitățile trebuie să fie asociate cu atingerea limitelor valabilității fizice a relativității generale, fiind nevoie să se dezvolte o nouă teorie, a gravitației cuantice.

O singularitate care poate influența cauzal anumite părți din spațiu este numită *singularitate goală*. Penrose a propus eliminarea singularităților goale folosind ipoteza cenzurii cosmice.⁴ Demonstrarea ipotezei cenzurii cosmice este una din problemele matematice centrale ale relativității generale.

În opinia unor oameni de știință, relativitatea generală conține germenii propriei distrugerii, întrucât teoria nu este capabilă să prezică fizica la scara Planck, iar probleme precum non-renormalizabilitatea și singularitățile sunt ”cunoscute necunoscute.”⁵

⁴ R. Penrose, „Singularities and time-asymmetry.”, 1979, 581–638, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1979grec.conf..581P>.

⁵ David Tong, *String Theory* (University of Cambridge, 2009), <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.

Punctul de saturație

Conform metodologiei programelor de cercetare a lui Lakatos, relativitatea generală poate fi divizată în mai multe perioade: perioada inițială, perioada de stagnare, perioada de maturitate, și punctul de saturație. Perioada inițială (1887-1919) include cele două mari experimente ale fizicii relativiste, experimentul Michelson-Morley și experimentul Eotvos, și cele două confirmări, deformarea luminii și avansul perihelului lui Mercur. A urmat apoi o perioadă de stagnare (1920-1960) în timpul căreia teoria a luat-o înaintea posibilităților tehnologice și experimentale, teoria fiind chiar scoasă din manualele de fizică și al astronomie.

Maturitatea teoriei începe în 1960, când descoperirile astronomice și noile experimente au atras atenția asupra TGR. Această perioadă (1960 - 1980) a fost numită de Will drept "o era de aur",⁶ în care au fost sistematizate predicțiile observabile ale TGR, comparate cu alte teorii alternative, și au fost propuse noi experimente pentru testare. Primul experiment din această perioadă a fost elaborat pentru confirmarea schimbării de frecvență gravitațională a luminii (1960) și s-a încheiat cu confirmarea predicției TGR a pierderii de energie a undelor gravitationale (1979) prin observarea pulsarului binar Hulse-Taylor.

Din 1980 a început zona de saturație a TGR, denumită de Will "căutarea unei gravitații puternice". Parte din noile previziuni ale teoriei sunt ne semnificative și dificil de verificat, în unele cazuri necesitând tehnologii încă nedezvoltate. Teoria a început să fie atacată prin noile teorii sau tehnici experimentale, precum utilizarea de atomi și capcane ionice răcite cu laser pentru a efectua teste ultra-precise, propunerea unei "a cincea" forțe, sau dimensiuni suplimentare pentru testarea legii pătrate inverse a gravitației. A început să se acorde o atenție din ce în ce mai mare efectelor câmpurilor gravitaționale puternice, în apropierea orizontului evenimentului unei găuri negre nerotative, în stelele neutronice sau, pentru universul extins, câmpuri gravitaționale asociate la scara Planck.

În ecuațiile lui Einstein din relativitatea generală clasică rămâne o asimetrie fundamentală între câmpurile gravitaționale și cele non-gravitaționale: pe partea stângă, un obiect geometric ($g_{\mu\nu}$, tensorul Einstein), reprezentând curbura spațiu-

⁶ Clifford M. Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”, *Living Reviews in Relativity* 17, nr. 1 (decembrie 2014): 4, <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

timpului, este identic cu reprezentarea fenomenologică tensorială, dar non-geometrică, a materiei din partea dreaptă.

$$(1) G_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}, \text{ unde } G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R$$

Astfel în prelegerea pentru premiul Nobel din iulie 1923, Einstein afirma:

”Cei care caută unificarea teoriei nu pot fi satisfăcuți de existența a două domenii care, prin natura lor, sunt destul de independente. Este căutată o teorie de câmp unificat matematic, în care câmpul gravitațional și câmpul electromagnetic sunt interpretate ca fiind doar diferite componente sau manifestări ale aceluiași câmp uniform ... Teoria gravitațională, considerată în termeni de formalism matematic, adică geometria Riemanniană, ar trebui generalizată astfel încât să includă legile câmpului electromagnetic.”⁷

Există dovezi teoretice care infirmă PEE în anumite cazuri, prin efecte gravitaționale cuantice, efecte derivate din teoria corzilor, sau prin alte interacțiuni nedetectate până în prezent. În teoria corzilor există astfel de câmpuri care încalcă PEE, dar teoria nu este încă suficient de matură pentru a concretiza o astfel de refutare. Clifford M. Will afirmă că observarea unor efecte care par să încalce PEE ține, într-o oarecare măsură, de semantică. Câmpurile implicate de teoria corzilor pot fi de lungă distanță și pot imita câmpurile gravitaționale, dar nu s-a găsit nicio modalitate de a face acest lucru.⁸ Ideea utilizării testelor PEE în acest mod a apărut în anii 1980, în căutarea unei "a cincea" forțe⁹ ca o forță de aproximativ un procent din gravitație dar cu un interval de câteva sute de metri, implicând o deviație de la legea inverso-pătrată a gravitației newtoniene. Ideea a apărut cu ocazia măsurătorilor profilului gravitațional din minele adânci din Australia și din noile idei din fizica particulelor sugerând posibila prezență a particulelor de masă foarte mică cu gravitație. Numeroase experimente au căutat dovezi ale acestei forțe prin măsurarea unor diferențe de accelerație în funcție de compoziție, dar rezultatele nu au fost concludente, consensul fiind că nu există dovezi credibile experimentale pentru o a cincea forță.¹⁰

⁷ Albert Einstein, *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity: Lecture Delivered to the Nordic Assembly of Naturalists at Göteborg on July 11, 1923* (Nobel Museum, 2009), 489.

⁸ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

⁹ E. Fischbach et al., „Reanalysis of the Eotvos experiment”, *Physical Review Letters* 56 (1 ianuarie 1986): 56, 3–6, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.

¹⁰ C. M. Will, „Twilight time for the fifth force?”, 1990, 80, 472–479, <http://connection.ebscohost.com/c/articles/9011192203/twilight-time-fifth-force>.

Posibilitatea ca legea pătrată inversă să fie încălcată la intervale foarte scurte în verificările de laborator¹¹ prevedea că unele dintre dimensiunile spațiale suplimentare din teoria corzilor ar putea să se extindă peste scalele macroscopice. La scară mică gravitația ar devia de la legea cunoscută. Au fost elaborate multe metode de înaltă precizie și zgomot redus, adaptate pentru teste de laborator. Nu s-au găsit abateri de la legea pătrată inversă.¹²

Singularitățile gravitaționale sunt considerate ca fiind o limită a spațiu-timpului. Relativitatea generală permite existența singularităților, dar nu poate spune nimic despre ceea ce se întâmplă în interiorul lor, iar oamenii de știință nu s-au pus încă de acord asupra unei definiții a acestora, luând în considerare și faptul că fără o geometrie conformă cu legile fizicii nu poate exista o locație în spațiu-timp. În concluzie, spun aceștia, nu se poate vorbi de singularități, ci mai degrabă de spațiu-timpuri singulare, deși în principiu acești termeni sunt echivalenți.¹³ Clarke¹⁴ și Earman,¹⁵ ca și Geroch, Can-bin și Wald¹⁶ și Curiel,¹⁷ susțin că este nevoie de o definiție precisă, riguroasă și univocă a singularității pentru o mai bună abordare a acestora și pentru o modelare mai exactă a aspectelor spațio-temporale.¹⁸ Este comună afirmația că relativitatea generală, considerând spațiu-timpul ca fiind singular, își prezice propriile neputințe la limita singularităților găurilor negre și la Big Bang, negând realitatea acestora. Se speră că o teorie mai fundamentală, eventual a gravitației cuantice, va rezolva această problemă.¹⁹

Găurile negre apar, conform relativității generale, atunci când corpul cosmic a colapsat sub așa-numita rază Schwarzschild, proporțională cu masa corpului.

¹¹ Lisa Randall și Raman Sundrum, „An Alternative to Compactification”, *Physical Review Letters* 83, nr. 23 (6 decembrie 1999): 83, 4690–4693, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.

¹² Joshua C. Long et al., „Upper Limits to Submillimetre-Range Forces from Extra Space-Time Dimensions”, *Nature* 421, nr. 6926 (februarie 2003): 421, 922–925, <https://doi.org/10.1038/nature01432>.

¹³ Erik Curiel, „Singularities and Black Holes”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Spring 2019 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/spacetime-singularities/>.

¹⁴ C. J. S. Clarke, „The Analysis of Space-Time Singularities by C. J. S. Clarke”, Cambridge Core, mai 1994, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608155>.

¹⁵ John Earman, „Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes”, *British Journal for the Philosophy of Science* 49, nr. 2 (1998): 338–347.

¹⁶ Robert Geroch, Liang Can-bin, și Robert M. Wald, „Singular boundaries of space-times”, *Journal of Mathematical Physics* 23, nr. 3 (1 martie 1982): 23(3): 432–435, <https://doi.org/10.1063/1.525365>.

¹⁷ Erik Curiel, „The Analysis of Singular Spacetimes”, *Philosophy of Science* 66, nr. 3 (1999): 66(S1): S119–S145.

¹⁸ Nicolae Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale* (MultiMedia Publishing, 2018), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242>.

¹⁹ Abhay Ashtekar și Martin Bojowald, „Quantum geometry and the Schwarzschild singularity”, *Classical and Quantum Gravity* 23, nr. 2 (21 ianuarie 2006): 23(2): 391–411, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/2/008>.

"Orizontul evenimentului" unei găuri negre este punctul de unde nu mai există întoarcere, în interiorul căruia atracția gravitațională este mai mare decât orice încercare de a ieși din această zonă, inclusiv pentru lumină.²⁰ Pentru o gaură neagră standard (neîncărcată, care nu se rotește), orizontul evenimentului se află la raza Schwarzschild. Din punctul de vedere al unei persoane aflate în afara orizontului evenimentului, timpul în apropierea unei găuri negre se dilată datorită gravitației puternice, până când intervalele temporale ajung infinit de mari în interiorul orizonturilor evenimentelor. Din perspectiva persoanei care intră în orizontul evenimentelor, nu se întâmplă nimic neobișnuit. Timpul se scurge la fel și nu realizează că a intrat în interiorul orizontului evenimentelor.

Găurile negre relativiste sunt entități pur gravitaționale. Ele sunt soluții de "vid" a ecuațiilor câmpului lui Einstein. În contextul relativității generale, Erik Curiel afirmă că se renunță la gravitație și se postulează o geometrie curbă a spațiului temporal care produce toate efectele gravitației, gaura neagră nemafiind un "lucru" în spațiu, ci o caracteristică a spațiu-timpului în sine.²¹ Materia stelei colapsante dispare în singularitatea gaurii negre, rămânând doar proprietățile geometrice ale gaurii negre (masa, sarcina și momentul unghiular), conform unor teoreme numite "fără păr", indiferent de proprietățile fizice anterioare ale obiectelor care se prăbușesc într-o gaură neagră.

O singularitate "goală" nu are un orizont al evenimentelor. Aceasta presupune o ruptură fundamentală în structura a spațiu-timpului.^{22 23} O versiune a unei singularități goale este "gaura albă", o gaură neagră inversată în timp, din care ar putea să apară materie și obiecte din nimic. Deoarece ecuațiile câmpului relativității generale nu selectează o direcție preferată a timpului, iar formarea unei găuri negre este permisă, atunci și găurile albe vor fi permise de aceste legi.²⁴ Roger Penrose afirmă că singularitățile goale nu se vor forma niciodată, introducând o ipoteză ad-hoc denumită "ipoteza cenzurii cosmice": o singularitate se va afla întodeauna într-o gaură neagră care este înconjurată de orizontul evenimentelor. Datorită unor contraexemple, această ipoteză a fost abandonată în timp. Au fost propuse mai multe ipoteze

²⁰ O descriere mai exactă distinge și alte tipuri de orizont, precum orizonturile aparente, cf. Stephen W. Hawking et al., *The Large Scale Structure of Space-Time*, New Ed edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1975), 312–20.

²¹ Curiel, „Singularities and Black Holes”.

²² Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale*.

²³ Earman, „Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks”, 65–66.

²⁴ Curiel, „Singularities and Black Holes”.

alternative pentru eliminarea posibilității singularităților goale care încalcă principiul cauzalității,^{25 26} dar niciuna nu este considerată satisfăcătoare până în prezent.

Găurile negre oferă un teren de testare esențial pentru problemele conceptuale care stau la baza gravitației cuantice și a relativității generale, referitor la încălcarea conservării energiei și a microcauzalității, și paradoxul pierderii informației. Gravitația cuantică pare a fi cel mai bun candidat pentru o modelare a acestor fenomene.

În 1971, Hawking a introdus conjectura că suprafața totală a orizonturilor evenimentului din orice grupare de găuri negre nu scade, chiar dacă acestea se unesc (a doua lege a mecanicii găurilor negre, prin similitudine cu entropia în termodinamică).²⁷ Pentru a evita ca găurile negre să aibă entropie zero, Bekenstein a propus ca o gaură neagră să aibă o entropie proporțională cu aria orizontului ei.²⁸ Hawking a descoperit că teoria câmpului cuantic prezice că o gaură neagră se comportă ca un corp negru care radiază la o temperatură constantă, încălcând astfel a doua lege a mecanicii găurilor negre datorită pierderii de energie și deci a micșorării. Dar radiația îndepărtează și entropia, și deci suma entropiei materiei este în creștere. Aceasta permite formularea primei legi a mecanicii găurilor negre similar cu prima lege a termodinamicii, cu masa acționând ca energie, gravitația suprafeței ca temperatură, și aria ca entropie.²⁹ În această interpretare a găurii negre, relativitatea generală este nesatisfăcătoare, fiind nevoie de o teorie mai bună a gravitației cuantice.³⁰

O gaură neagră păstrează doar informațiile referitoare la masa totală, sarcina și momentul unghiular. Teoria găurilor negre stabile afirmă că această pierdere nu e o problemă, deoarece informațiile pot fi considerate ca fiind prezente în gaura neagră, inaccesibile din exterior dar reprezentate în orizontul evenimentului în conformitate cu principiul holografic. Dar în teoria că găurile negre se evaporă încet prin emisia de radiații Hawking, informațiile despre materia care a format gaura neagră se pierd iremediabil. În mecanica cuantică, pierderea informațiilor corespunde încălcării unitarității, legată de conservarea probabilității, rezultând încălcarea conservării

²⁵ Pankaj S. Joshi, „Cosmic Censorship: A Current Perspective”, *arXiv:gr-qc/0206087*, 28 iunie 2002, 17(15): 1067–1079, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0206087>.

²⁶ Earman, „Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks”, cap. 3.

²⁷ S. W. Hawking, „Gravitational Radiation from Colliding Black Holes”, *Physical Review Letters* 26, nr. 21 (24 mai 1971): 26 (21): 1344–1346, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1344>.

²⁸ Robert M. Wald, „The Thermodynamics of Black Holes”, *Living Reviews in Relativity* 4, nr. 1 (9 iulie 2001): 4 (1): 6, <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-6>.

²⁹ Wald, 4 (1): 6.

³⁰ S. Carlip, „Black Hole Thermodynamics and Statistical Mechanics”, în *Physics of Black Holes: A Guided Tour*, ed. Eleftherios Papantonopoulos, Lecture Notes in Physics (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009), 769: 89–123, https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6_3.

energiei.³¹ Ultimele studii arată că informațiile și unitaritatea sunt păstrate totuși într-un tratament cuantic al problemei.³²

În cazul unui corp care cade într-o gaură neagră, teoria câmpului cuantic în spațiu curbat implică cuante ale radiației Hawking, incluzând doar o cantitate finită de informații codificate în radiația Hawking. Dar inseparabilitatea particulei la ieșire de toată radiația Hawking pe care gaura neagră a emis-o anterior creează un paradox numit "monogamia inseparabilității."³³ Pentru rezolvarea paradoxului, ar trebui să se renunțe la una din cele trei teorii testate în timp: principiul echivalenței lui Einstein, unitaritatea, sau teoria câmpului cuantic existentă. Renunțarea la principiul echivalenței implică un "paravan" care distruge particulele de intrare în orizontul evenimentului.³⁴ Datele LIGO din 2016 arată posibile semnale de ecouri datorate unui orizont fuzzy de evenimente, posibile în teoriile paravanului, dar imposibile în relativitatea generală clasică.³⁵

Necesitatea unei consistențe între teoria cuantică și relativitatea generală,³⁶ și existența singularităților, impun apariția unei teorii complete a gravitației cuantice.³⁷ Până în prezent nu s-a reușit să se dezvolte o astfel de teorie completă și consecventă, deși există mai mulți candidați.³⁸

Generalizarea teoriei câmpului cuantic din fizica particulelor elementare astfel încât să includă gravitația, a eșuat.³⁹ La energii joase teoria este acceptabilă, dar la energii foarte mari, rezultatele sunt foarte divergente și duc la modele fără putere predictivă.⁴⁰

³¹ Steven B. Giddings, „The black hole information paradox”, *arXiv:hep-th/9508151*, 28 august 1995, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9508151>.

³² Samir D. Mathur, „The Information Paradox: Conflicts and Resolutions”, *Pramana* 79, nr. 5 (1 noiembrie 2012): 1059–73, <https://doi.org/10.1007/s12043-012-0417-z>.

³³ Zeeya Merali, „Astrophysics: Fire in the Hole!”, *Nature News* 496, nr. 7443 (4 aprilie 2013): 20–23, <https://doi.org/10.1038/496020a>.

³⁴ Jennifer Ouellette, „Black Hole Firewalls Confound Theoretical Physicists”, *Scientific American*, 2012, <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-firewalls-confound-theoretical-physicists/>.

³⁵ Zeeya Merali, „LIGO Black Hole Echoes Hint at General-Relativity Breakdown”, *Nature News*, 2016, 540, <https://doi.org/10.1038/nature.2016.21135>.

³⁶ S. Carlip, „Quantum Gravity: a Progress Report”, *Reports on Progress in Physics* 64, nr. 8 (1 august 2001): sec. 2, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>.

³⁷ Bernard Schutz, „Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz”, Cambridge Core, decembrie 2003, 407, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.

³⁸ Herbert W. Hamber, *Quantum Gravitation: The Feynman Path Integral Approach* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009), <https://www.springer.com/gp/book/9783540852926>.

³⁹ G. 't Hooft și M. Veltman, „One-loop divergencies in the theory of gravitation”, *Annales de L'Institut Henri Poincaré Section (A) Physique Theorique* 20 (1974): 20 (1): 69, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AIHPA..20...69T>.

⁴⁰ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume 2: Modern Applications*, 1 edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2005).

O încercare de eliminare a acestor limitări este teoria corzilor, o teorie cuantică. Teoria promite o unificare a gravitației cu celelalte forțe, suplimentând cele trei dimensiuni spațiale cu încă șase.⁴¹ O versiune mai nouă a teoriei, teoria supercorzilor, se încearcă o unificare a relativității generale și supersimetriei, sub numele de supergravitație,⁴² și un model ipotetic unificator cu unsprezece dimensiuni cunoscut sub numele de teoria-M.⁴³

O altă abordare folosește cuantizarea canonică a teoriei cuantice în care, pornind de la relativitatea generală e ajunge la ecuația Wheeler-deWitt, un analog al ecuației Schrödinger, dar care s-a dovedit a fi greșit definită.⁴⁴ Prin introducerea unor ipoteze ad-hoc (variabile) Ashtekar, a dezvoltat teoria gravitației cuantice în bucle.⁴⁵

Există numeroase alte încercări de a ajunge la o teorie viabilă a gravitației cuantice, bazate pe abordarea traseului Feynman și calculul Regge, triangulațiile dinamice, seturile de cauzalitate, modelele twistor⁴⁶ sau modelele bazate pe integrale de căi ale cosmologiei cuantice.⁴⁷ Toate teoriile candidate au încă probleme majore formale și conceptuale greu de depășit deocamdată, inclusiv imposibilitatea verificării predicțiilor prin teste experimentale.⁴⁸

⁴¹ M. B. Green, J. H. Schwarz, și E. Witten, „Superstring Theory. Vol. 1: Introduction”, *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik* 68, nr. 6 (1988): 258–258, <https://doi.org/10.1002/zamm.19880680630>.

⁴² Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume 3: Supersymmetry*, 1st Edition edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2005).

⁴³ P. K. Townsend, „Four Lectures on M-theory”, *arXiv:hep-th/9612121*, 11 decembrie 1996, 13: 385, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.

⁴⁴ Karel Kuchař, „Canonical Quantization of Gravity”, *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237–288, https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.

⁴⁵ Abhay Ashtekar și Jerzy Lewandowski, „Background Independent Quantum Gravity: A Status Report”, *Classical and Quantum Gravity* 21, nr. 15 (7 august 2004): 21 (15): R53–R152, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01>.

⁴⁶ Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007).

⁴⁷ S. W. Hawking și W. Israel, *Quantum Cosmology, in Three Hundred Years of Gravitation* (Cambridge University Press, 1989), 631–651.

⁴⁸ John H. Schwarz, „String Theory: Progress and Problems”, *Progress of Theoretical Physics Supplement* 170 (1 mai 2007): 170: 214–226, <https://doi.org/10.1143/PTPS.170.214>.

Bibliografie

- Ananthaswamy, Anil. „Swiss-Cheese Model of the Cosmos Is Full of Holes”. *New Scientist*, 2008. <https://www.newscientist.com/article/mg20026783-800-swiss-cheese-model-of-the-cosmos-is-full-of-holes/>.
- Ashtekar, Abhay, și Martin Bojowald. „Quantum geometry and the Schwarzschild singularity”. *Classical and Quantum Gravity* 23, nr. 2 (21 ianuarie 2006): 391–411. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/2/008>.
- Ashtekar, Abhay, și Jerzy Lewandowski. „Background Independent Quantum Gravity: A Status Report”. *Classical and Quantum Gravity* 21, nr. 15 (7 august 2004): R53–152. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01>.
- Carlip, S. „Black Hole Thermodynamics and Statistical Mechanics”. În *Physics of Black Holes: A Guided Tour*, ediție de Eleftherios Papantonopoulos, 89–123. *Lecture Notes in Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6_3.
- . „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>.
- Chown, Marcus. „Gravity May Venture Where Matter Fears to Tread”. *New Scientist*. Data accesării 3 mai 2019. <https://www.newscientist.com/article/mg20126990-400-gravity-may-venture-where-matter-fears-to-tread/>.
- Clarke, C. J. S. „The Analysis of Space-Time Singularities by C. J. S. Clarke”. Cambridge Core, mai 1994. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608155>.
- Curiel, Erik. „Singularities and Black Holes”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Spring 2019. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/spacetime-singularities/>.
- . „The Analysis of Singular Spacetimes”. *Philosophy of Science* 66, nr. 3 (1999): 145.
- Earman, John. „Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes”. *British Journal for the Philosophy of Science* 49, nr. 2 (1998): 338–347.
- Einstein, Albert. *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity: Lecture Delivered to the Nordic Assembly of Naturalists at Göteborg on July 11, 1923*. Nobel Museum, 2009.
- Fischbach, E., D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, și S. H. Aronson. „Reanalysis of the Eotvos experiment”. *Physical Review Letters* 56 (1 ianuarie 1986): 3–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.
- Geroch, Robert, Liang Can-bin, și Robert M. Wald. „Singular boundaries of spacetimes”. *Journal of Mathematical Physics* 23, nr. 3 (1 martie 1982): 432–35. <https://doi.org/10.1063/1.525365>.
- Giddings, Steven B. „The black hole information paradox”. *arXiv:hep-th/9508151*, 28 august 1995. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9508151>.
- Green, M. B., J. H. Schwarz, și E. Witten. „Superstring Theory. Vol. 1: Introduction”. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik* 68, nr. 6 (1988): 258–258. <https://doi.org/10.1002/zamm.19880680630>.

- Hamber, Herbert W. *Quantum Gravitation: The Feynman Path Integral Approach*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. <https://www.springer.com/gp/book/9783540852926>.
- Hawking, S. W. „Gravitational Radiation from Colliding Black Holes”. *Physical Review Letters* 26, nr. 21 (24 mai 1971): 1344–46. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1344>.
- Hawking, S. W., și W. Israel. *Quantum Cosmology, in Three Hundred Years of Gravitation*. Cambridge University Press, 1989.
- Hawking, Stephen W., G. F. R. Ellis, P. V. Landshoff, D. R. Nelson, D. W. Sciama, și S. Weinberg. *The Large Scale Structure of Space-Time*. New Ed edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1975.
- Hooft, G. 't, și M. Veltman. „One-loop divergencies in the theory of gravitation”. *Annales de L'Institut Henri Poincare Section (A) Physique Theorique* 20 (1974): 69–94. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AIHPA..20...69T>.
- Joshi, Pankaj S. „Cosmic Censorship: A Current Perspective”. *arXiv:gr-qc/0206087*, 28 iunie 2002. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0206087>.
- Kuchař, Karel. „Canonical Quantization of Gravity”. *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237–88. https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.
- Long, Joshua C., Hilton W. Chan, Allison B. Churnside, Eric A. Gulbis, Michael C. M. Varney, și John C. Price. „Upper Limits to Submillimetre-Range Forces from Extra Space-Time Dimensions”. *Nature* 421, nr. 6926 (februarie 2003): 922. <https://doi.org/10.1038/nature01432>.
- Mathur, Samir D. „The Information Paradox: Conflicts and Resolutions”. *Pramana* 79, nr. 5 (1 noiembrie 2012): 1059–73. <https://doi.org/10.1007/s12043-012-0417-z>.
- Merali, Zeeya. „Astrophysics: Fire in the Hole!” *Nature News* 496, nr. 7443 (4 aprilie 2013): 20. <https://doi.org/10.1038/496020a>.
- . „LIGO Black Hole Echoes Hint at General-Relativity Breakdown”. *Nature News*, 2016. <https://doi.org/10.1038/nature.2016.21135>.
- Ouellette, Jennifer. „Black Hole Firewalls Confound Theoretical Physicists”. *Scientific American*, 2012. <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-firewalls-confound-theoretical-physicists/>.
- Penrose, R. „Singularities and time-asymmetry.”, 581–638, 1979. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1979grec.conf..581P>.
- Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.
- Randall, Lisa, și Raman Sundrum. „An Alternative to Compactification”. *Physical Review Letters* 83, nr. 23 (6 decembrie 1999): 4690–93. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.
- Rendall, Alan D. „The nature of spacetime singularities”. *arXiv:gr-qc/0503112*, noiembrie 2005, 76–92. https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003.
- Schutz, Bernard. „Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz”. Cambridge Core, decembrie 2003. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.
- Schwarz, John H. „String Theory: Progress and Problems”. *Progress of Theoretical Physics Supplement* 170 (1 mai 2007): 214–26. <https://doi.org/10.1143/PTPS.170.214>.
- Sfetcu, Nicolae. *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale*. MultiMedia Publishing, 2018. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242>.
- Tong, David. *String Theory*. University of Cambridge, 2009. <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.

- Townsend, P. K. „Four Lectures on M-theory”. *arXiv:hep-th/9612121*, 11 decembrie 1996. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.
- Wald, Robert M. „The Thermodynamics of Black Holes”. *Living Reviews in Relativity* 4, nr. 1 (9 iulie 2001): 6. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-6>.
- Weinberg, Steven. *The Quantum Theory of Fields, Volume 2: Modern Applications*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- . *The Quantum Theory of Fields, Volume 3: Supersymmetry*. 1st Edition edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Will, C. M. „Twilight time for the fifth force?”, 1990. <http://connection.ebscohost.com/c/articles/9011192203/twilight-time-fifth-force>.
- Will, Clifford M. „The Confrontation between General Relativity and Experiment”. *Living Reviews in Relativity* 17, nr. 1 (decembrie 2014): 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.