

# Gravitația cuantică – Euristică și teste gravitaționale

Nicolae Sfetcu

22.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Gravitația cuantică – Euristică și teste gravitaționale", SetThings (22 iulie 2019), URL = <https://www.setthings.com/ro/gravitatie-cuantica-euristica-si-teste-gravitationale/>

Email: [nicolae@sfetcu.com](mailto: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/>.

**TESTE ALE GRAVITAȚIEI CUANTICE.....6**

**BIBLIOGRAFIE..... 11**

În încercarea de dezvoltare a unei teorii solide a gravitației cuantice, au existat mai multe programe de cercetare, dintre care unele au căzut în timp în desuetitudine datorită puterii euristice mai mari a altor programe. J. Butterfield distinge astfel trei mari programe de cercetare:<sup>1</sup>

**Programul particulelor** stabilește ca entitate de bază *gravitonul*, cuanta câmpului gravitațional. Gravitonul se propagă într-un spațiu-timp Minkowski și este asociat cu o reprezentare specifică a grupului Poincare prin masa zero și spinul 0 sau 2. Dar acest program prezintă foarte multe disfuncționalități conceptuale.

**Programul superstructurilor**, o abordare motivată de succesul trecerii de la vechea teorie non-renormalizabilă a interacțiunilor slabe la noua unificare renormalizabilă a forțelor slabe și electromagnetice găsite de Salam, Glashow și Weinberg. Ideea a fost adăugarea de câmpuri de materie din relativitatea generală pentru a anula problema UV. Așa a apărut teoria supergravitației care, după unele succese minore, s-a ajuns la concluzia că nu rezolvă divergențele, dar linia sa de gândire este continuată în prezent de teoria supercorzilor, care este programul de cercetare dominant în gravitația cuantică. Programul încă nu a ajuns la maturitate. Din punctul de vedere al răspunsului oferit la aspectele conceptuale, programul supercorzilor este similar în multe privințe cu programul particulelor.

**Programul gravitației cuantice canonice** a început cu teoria Wheeler-DeWitt. Ulterior a apărut programul lui Ashtekar care utilizează ecuația Wheeler-DeWitt,<sup>2</sup> cu ajutorul unui set de variabile canonice care produc o simplificare a structurii funcțiilor de constrângere centrală, fiind și în prezent un program foarte activ, cu evoluții impresionante în ultimii ani.

Toate cele trei programe sunt similare în sensul că principala modalitate în care acestea depășesc tratamentul comun al spațiu-timpului este prin cuantificarea unei cantități care este un tip standard de variabilă din fizica clasică.

Există trei probleme majore în conceperea unei teorii a gravitației cuantice: atât teoria cuantică cât și relativitatea generală prezintă probleme conceptuale semnificative în sine, bazele fundamentale disparate ale celor două teorii generează noi probleme majore atunci când se încearcă combinarea lor, și contrastul dintre lipsa unei

---

<sup>1</sup> Jeremy Butterfield și Chris Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”, în *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale* (Cambridge University Press, 2001).

<sup>2</sup> Bryce S. DeWitt, „Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory”, *Physical Review* 160, nr. 5 (25 august 1967): 160 (5): 1113–1148, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.160.1113>.

teorii satisfăcătoare a gravitației cuantice și a teoriilor ingredientelor de succes ridică întrebări cu privire la natura și funcția discuției filosofice a gravitației cuantice.

Potrivit lui Laudan, teoria preferată este cea care maximizează succesele empirice, reducând în același timp pasivele conceptuale, iar tradiția preferată de cercetare este aceea care sprijină cele mai reușite teorii.

Conform lui Péter Szegedi, istoria interpretărilor din mecanica cuantică se potrivesc foarte bine metodologiei lui Lakatos a programelor de cercetare științifică rivale, față de Kuhn care nu permite existența simultană a diferitelor paradigme rivale.<sup>3</sup>

<sup>4</sup> Rezultă că dezvoltarea mecanicii cuantice în sine este o dezvoltare, o evoluție a problemelor progresive, dacă este progresivă atât teoretic, cât și empiric. Interpretările mecanicii cuantice se pot aranja ca o serie de teorii, rezultând o progresivitate teoretică, dar progresivitatea empirică este dificil de evaluat. Astfel, conform criteriilor, programele interpretative pot fi științifice, dar degenerative, respectiv sunt caracterizate de stagnare. Evaluarea se poate schimba în viitor, fiind vorba de un program pe termen lung: "Mai mult decât atât, uneori se întâmplă ca, atunci când un program de cercetare ajunge într-o fază degeneratoare, o mică revoluție sau o schimbare creativă a euristicii sale pozitive o poate împinge din nou înainte."<sup>5</sup>

Există posibilitatea ca un program degenerat să fie revigorat, sau chiar să fie considerat de succes dacă oferă rezultate utile pentru alte programe.<sup>6</sup>

Péter Szegedi distinge, în cazul diverselor interpretări cuantice, un nucleu dur și o euristică adaptându-se la problemele apărute.<sup>7</sup> Astfel în programul lui Louis de Broglie, sinteza imaginilor undă-particulă este nucleul dur, în timp ce formele reale ale realizării în ordinea apariției (euristica pozitivă) sunt următoarele: principiul soluției duble, teoria undelor pilot, ipoteza non-liniarității și termodinamica ascunsă. În cazul lui David Bohm, nucleul dur este teoria variabilelor ascunse și potențialul cuantic, la care a adăugat la un moment dat ipoteza stochasticității. Vigier a folosit același nucleu dur, dar cu o presupunere suplimentară a ipotezei privind gradele ascunse de libertate.

---

<sup>3</sup> Péter Szegedi, „Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics”, în *Appraising Lakatos: Mathematics, Methodology and the Man*, ed. G. Kampis, L. : Kvasz, și M. Stöltzner (Kluwer Academic Publishers, 2002), 1–101.

<sup>4</sup> Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers* (Cambridge University Press, 1980), 33–34.

<sup>5</sup> Lakatos, 51.

<sup>6</sup> H. Zandvoort, Paul Weingartner, și *Methodology and Philosophy of Science International Congress of Logic, Intrinsic Success and Extrinsic Success of Research Programs, in 7th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science: Salzburg, July 11th-16th, 1983 Vol. 4, Vol. 4*, (Salzburg: Huttegger, 1983), 289–92.

<sup>7</sup> Szegedi, „Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics”.

Există și alte programe în interpretările mecanicii cuantice. În programul de cercetare Fényes-Nelson-de la Peña, stochasticitatea nu este o ipoteză suplimentară, ci un nucleu dur, unde euristica pozitivă a impus utilizarea inițială a proceselor de difuzie, apoi mișcarea Browniană și, în final, electrodinamica stocastică. Euristica pozitivă a acestor programe este diferită, dar în general se folosesc de abordarea relativistă, principiul determinismului sau cauzalității și principiul unității naturii. În interpretarea ortodoxă, conform lui Cushing, nucleul dur constă din relațiile canonice de comutare și ecuațiile de mișcare ale lui Hamilton, iar euristica pozitivă se aplică formelor clasice ale hamiltonienilor pentru sisteme specifice, principiul corespondenței și principiul observabilelor; ca ipoteză auxiliară a fost folosit raportul operatori-observatori. Lakatos afirmă despre acest program:

"În noua teorie cuantică post-1925, poziția" anarhistă "a devenit dominantă și fizica cuantică modernă, în interpretarea sa de la Copenhaga, a devenit unul dintre principalii purtători standard ai obscurantismului filosofic. În noua teorie, principiul "complementarității" a încorporat inconsecvența [slabă] ca o caracteristică fundamentală de bază a naturii și a îmbinat pozitivismul subiectivist și filosofia dialectică antilogică și chiar limbajul obișnuit într-o singură alianță nesănătoasă. După 1925, Bohr și asociații lui au introdus o scădere nouă și fără precedent a standardelor critice pentru teoriile științifice. a condus la o înfrângere a rațiunii în fizica modernă și la un cult anarhist de haos incomprehensibil."<sup>8</sup>

Experimentele cruciale în sensul lui Lakatos în mecanica cuantică încep cu un experiment gedanken, experimentul Einstein-Podolsky-Rosen.<sup>9</sup> Comentatorii disting (cel puțin) cinci ipoteze aici: principiul realismului, valabilitatea formalismului mecanic cuantic, ipoteza de completitudine, principiul separabilității, și validitatea logicii clasice. Conform argumentului EPR, una dintre cele cinci ipoteze este falsă. Următorul pas a fost făcut de Bohm, care a reformulat experimentul gedanken cu spini,<sup>10</sup> dar fără să pară încă un experiment crucial întrucât nu s-a afirmat că diferitele teorii oferă rezultate diferite ale măsurătorilor.

Lucrarea lui John Bell a oferit o speranță că este posibilă testarea experimentală a interpretărilor,<sup>11</sup> subliniind că trebuie să existe diferențe între predicțiile mecanice cuantice și cele ascunse. El presupunea că într-un experiment real putem măsura

---

<sup>8</sup> Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 59–60.

<sup>9</sup> A. Einstein, B. Podolsky, și N. Rosen, „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?“, *Physical Review* 47, nr. 10 (15 mai 1935): 770–80, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>.

<sup>10</sup> David Bohm, *Quantum Theory*, Revised ed. edition (New York: Dover Publications, 1989).

<sup>11</sup> J. S. Bell, „On the Einstein Podolsky Rosen paradox“, *Physics Physique Fizika* 1, nr. 3 (1 noiembrie 1964): 447, <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>.

probabilitățile. Inegalitatea Bell s-a apropiat și mai mult de condițiile reale ale unui experiment ușor de gestionat.

## Teste ale gravitației cuantice

Testul primordial al oricărei teorii cuantice a gravitației este reproducerea succeselor relativității generale. Aceasta implică reconstrucția geometriei locale din observabilele nelocale. În plus, gravitația cuantică ar trebui să prezică probabilistic topologia la scară largă a Universului, care în curând poate fi măsurabilă,<sup>12</sup> și fenomene la scala Planck.<sup>13</sup>

Există deja o predicție care ține de gravitația cuantică: existența și spectrul radiației Hawking a găurii negre, o predicție "semiclassică" rezultată din teoria câmpului cuantic pe un fundal curbat fix, și confirmată ulterior teoretic.<sup>14</sup> Se presupune că o teorie a gravitației care nu va reproduce această predicție este greșită.

Pentru scara la nivelul energiei Planck au fost propuse mai multe teste bazate pe două idei: că putem detecta abateri foarte mici de simetriei exacte, și că putem să integrăm pe distanțe sau timpuri mari pentru a observa efecte colective foarte mici. Aceste propuneri rămân extrem de speculative, dar sunt plauzibile.<sup>15</sup> Unele dintre aceste idei pot fi găsite în Giovanni Amelino-Camelia, *Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology*:<sup>16</sup>

- Încălcări ale principiului echivalenței.<sup>17</sup> S-ar putea dezvolta teste de precizie ale principiului de echivalență prin interferometria atomică și neutronică.
- Încălcări ale invarianței CPT, de exemplu prin formarea găurilor negre virtuale.<sup>18</sup> Limitele experimentale actuale se apropie de nivelul de observare al acestor efecte.<sup>19</sup>

---

<sup>12</sup> Neil Cornish, David Spergel, și Glenn Starkman, „Circles in the Sky: Finding Topology with the Microwave Background Radiation”, *Classical and Quantum Gravity* 15, nr. 9 (1 septembrie 1998): 15, 2657, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/15/9/013>.

<sup>13</sup> Richard Easther et al., „Inflation as a Probe of Short Distance Physics”, *Physical Review D* 64, nr. 10 (16 octombrie 2001): 103502, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.103502>.

<sup>14</sup> Fay Dowker et al., „Pair Creation of Dilaton Black Holes”, *Physical Review D* 49, nr. 6 (15 martie 1994): 2909, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.49.2909>.

<sup>15</sup> S. Carlip, „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>.

<sup>16</sup> Giovanni Amelino-Camelia, „Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology?”, *arXiv:gr-qc/9910089*, 25 octombrie 1999, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9910089>.

<sup>17</sup> G. Z. Adunas, E. Rodriguez-Milla, și D. V. Ahluwalia, „Probing Quantum Aspects of Gravity”, *Physics Letters B* 485, nr. 1–3 (iulie 2000): 215, [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(00\)00697-3](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(00)00697-3).

<sup>18</sup> Alan Kostelecky și Rob Potting, „Expectation Values, Lorentz Invariance, and CPT in the Open Bosonic String”, *Physics Letters B* 381, nr. 1–3 (iulie 1996): 89, [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00589-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00589-8).

<sup>19</sup> R. Adler et al., „Test of CPT Symmetry and Quantum Mechanics with Experimental data from CPLEAR”, *Physics Letters B* 364, nr. 4 (decembrie 1995): 239, [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(95\)01416-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)01416-0).

Pot apare și încălcări ale altor simetrii globale, precum CP, cu consecințe observabile la scala Planck.<sup>20</sup>

- Distorsiuni ale relațiilor de dispersie pentru lumină și neutrini pe distanțe lungi, rezultând o viteză a luminii dependentă de frecvență.<sup>21</sup> Se poate observa prin observarea razelor gama, limitele experimentale actuale sunt aproape de nivelul de observare. Dacă efectul depinde de polarizare, testele birefrinței induse de gravitație pot fi în limite de observație.<sup>22</sup>
- Interferometrele pentru detectarea undelor gravitaționale ar putea observa fluctuațiile cuantice testabile în geometria spațiului,<sup>23</sup> o idee încă controversată.
- Gravitația cuantică în apropierea masei Planck afectează fluxurile grupului de renormalizare și constantele de cuplare a energiei joase în teoriile mari unificate,<sup>24</sup> dar acest efect este mai degrabă un dezavantaj făcând mai dificile alte posibile teste.
- Utilizarea laserelor puternice pentru observarea (indirectă) a radiației Unruh, contrapartida radiației Hawking pentru o particulă de accelerare.<sup>25</sup> Acesta poate fi cel puțin un test al predicțiilor teoretice de câmp cuantic din gravitația cuantică.
- Un test indirect din analogii ale materiei condensate cu găurile negre, care ar trebui să emită fononi prin "radiații Hawking" din orizonturile sonice.<sup>26</sup> Testele pot fi posibile în viitor în condensatele Bose-Einstein,<sup>27</sup> heliul superfluid  $^3\text{He}$ <sup>28</sup> și "lumina lentă" în dielectrice.<sup>29</sup>

Aceste experimente nu vor diferenția între modele specifice de gravitație cuantică, întrucât actualele modele nu pot încă să facă predicții suficient de clare, dar se pot testa fenomenele la scala Planck afectate de gravitația cuantică. În ultimul timp

---

<sup>20</sup> Renata Kallosh et al., „Gravity and global symmetries”, *Physical Review D* 52, nr. 2 (15 iulie 1995): 912, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.912>.

<sup>21</sup> Jorge Alfaro, Hugo A. Morales-Tecotl, și Luis F. Urrutia, „Quantum gravity corrections to neutrino propagation”, *Physical Review Letters* 84, nr. 11 (13 martie 2000): 2318, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2318>.

<sup>22</sup> Reinaldo J. Gleiser și Carlos N. Kozameh, „Astrophysical limits on quantum gravity motivated birefringence”, *Physical Review D* 64, nr. 8 (septembrie 2001): 083007, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.083007>.

<sup>23</sup> Y. Jack Ng și H. van Dam, „Measuring the foaminess of space-time with gravity-wave interferometers”, *Foundations of Physics* 30, nr. 5 (2000): 795, <https://doi.org/10.1023/A:1003745212871>.

<sup>24</sup> L. J. Hall și U. Sarid, „Gravitational Smearing of Minimal Supersymmetric Unification Predictions”, *Physical Review Letters* 70, nr. 18 (3 mai 1993): 2673, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2673>.

<sup>25</sup> Pisin Chen și Toshi Tajima, „Testing Unruh Radiation with Ultraintense Lasers”, *Physical Review Letters* 83, nr. 2 (12 iulie 1999): 256, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.256>.

<sup>26</sup> Matt Visser, „Acoustic black holes”, *arXiv:gr-qc/9901047*, 15 ianuarie 1999, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901047>.

<sup>27</sup> L. J. Garay et al., „Sonic analog of gravitational black holes in Bose-Einstein condensates”, *Physical Review Letters* 85, nr. 22 (27 noiembrie 2000): 4643, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4643>.

<sup>28</sup> G. E. Volovik, „Field theory in superfluid  $^3\text{He}$ : What are the lessons for particle physics, gravity and high-temperature superconductivity?”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96, nr. 11 (25 mai 1999): 6042, <https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.6042>.

<sup>29</sup> U. Leonhardt și P. Piwnicki, „Relativistic Effects of Light in Moving Media with Extremely Low Group Velocity”, *Physical Review Letters* 84, nr. 5 (31 ianuarie 2000): 822, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.822>.

fizicienii s-au concentrat pe ideea testelor experimentale pentru o anumită clasă de modele de gravitație cuantică, "gravitația la scala TeV" sau "lumea membranelor",<sup>30</sup> care postulează dimensiuni suplimentare "mari", de un milimetru.

Problema modului în care măsurarea afectează starea ontologică a sistemului observat este numită *problema de măsurare*. Măsurarea în mecanica cuantică este privită în moduri diferite în diverse interpretări. În mecanica clasică, un sistem simplu punctual este descris pe deplin de poziția și impulsul particulei. În mecanica cuantică, un sistem este descris de starea lui cuantică, prin probabilitățile posibilelor poziții și impulsuri. Valorile precise ale măsurătorilor sunt descrise printr-o distribuție a probabilității sau o "medie" (sau "așteptare") a operatorului de măsurare pe baza stării cuantice a sistemului pregătit. Procesul de măsurare este adesea considerat aleatoriu și indeterminist în unele interpretări, în timp ce în alte interpretări indeterminismul este fundamental și ireductibil.

Există câteva modalități posibile de a descrie matematic procesul de măsurare (atât distribuția de probabilități, cât și funcția de undă colapsată). Descrierea cea mai convenabilă depinde de spectrul (adică de setul de valori proprii) observabilei.

Cea mai evidentă particularitate în gravitația cuantică este lipsa de date (nu există fenomene care să poată fi identificate fără echivoc ca urmare a unei interacțiuni dintre relativitatea generală și teoria cuantică). Aceasta se datorează faptului că scala gravitației cuantice (lungimea Planck) este extrem de mică, la fel și energia Planck și timpul Planck. Reultă că singurul regim fizic în care efectele gravitației cuantice ar putea fi studiate direct este în epoca imediată de după Big Bang, pe lângă problemele legate de interacțiunea gravitonilor de spin-2 cu un tensor conservat de energie-impuls. Rezultă că teoriile de gravitație cuantică diferite ar putea fi verificate empiric doar la energii foarte mari.

Pentru fizică, aceasta înseamnă că este foarte dificil să se construiască o teorie pe deplin satisfăcătoare. Din punct de vedere filosofic, dificultatea se datorează problemelor conceptuale despre spațiu, timp și materie, dar și dificultăți datorită construcției teoretice întrucât nu există niciun acord asupra tipurilor de date pe care le-ar obține o teorie cuantică a gravitației. În această situație, J. Butterfield afirmă că construcția teoretică ajunge să fie mult mai puternic influențată de considerente teoretice, bazându-se pe diferitele opinii prima facie despre cum ar trebui să arate

---

<sup>30</sup> Lisa Randall și Raman Sundrum, „A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension”, *Physical Review Letters* 83, nr. 17 (25 octombrie 1999): 3370, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.3370>.



teoria, întemeiate parțial pe prejudecățile filosofice ale cercetătorului și pe tehnicile matematice considerate de succes. Astfel, un program de cercetare tinde spre construirea schemelor teoretice abstracte compatibile cu un cadru conceptual preconceptuat și coerente intern într-un sens matematic, rezultând o "subdeterminare a teoriei prin date". Mai mult, programul tinde să producă scheme bazate pe o gamă largă de motivații filosofice, care ar putea fi presupuse a fi proiecții inconștiente ale psihicului cercetătorului individual, și ar putea fi respinse ca atare.

Este important de determinat dacă există efecte ale gravitației cuantice măsurabile sub limitele Planck, eventual rezultând dintr-un efect non-perturbativ. Dar însăși existența unor astfel de efecte, și fenomenele pe care le prezic, sunt ele însele probabil puternic dependente de teorie. Rezultă că subiectul gravitației cuantice prezintă filosofului o gamă largă și variată de abordări, în condițiile în care în gravitația cuantică nu există teorii suficiente de bine definite, nici măcar bine stabilite.

Din analizele dimensionale ar rezulta că gravitația cuantică necesită experimental energii mari, de nivelul energiei Planck. Pentru aceasta ar fi nevoie de un accelerator de particule mai mare decât galaxia noastră, și deci testele directe ale gravitației cuantice par imposibile conform acestor calcule. Rezultă că testele de laborator de înaltă precizie în câmp slab vor fi singura posibilitate de a face din gravitația cuantică o teorie fizică testabilă/falsificabilă. Aceasta ar fi posibil în sistemele macroscopice care încă respectă legile teoriei cuantice - cele descrise de funcțiile de undă macroscopice. Acestea ar permite măsurarea, de exemplu, a energiilor de excitație gravitațională cuantică.<sup>31</sup> Johan Hansson și Stephane Francois sugerează posibilitatea de a testa teoriile gravitației cuantice folosind sisteme cuantice macroscopice; heliul superfluid, condensatele gazoase Bose-Einstein și moleculele "macroscopice" care încă se supun mecanicii cuantice, și stelele neutronice. Efectele gravitației cuantice, definite aici ca interacțiuni gravitaționale observabile între obiecte cuantice, ar trebui să fie observate folosind tehnologia existentă, permițând o falsificabilitate la energie scăzută în regimul de câmp slab.<sup>32</sup>

Roberto Balbinot și Alessandro Fabbri, în *Amplificarea semnalului Hawking în BEC*,<sup>33</sup> propun modele simple ale condensatelor Bose-Einstein pentru a studia efectele

---

<sup>31</sup> Johan Hansson, „Aspects of nonrelativistic quantum gravity”, *arXiv:0910.4289 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:quant-ph]*, 22 octombrie 2009, 707 (2009), <http://arxiv.org/abs/0910.4289>.

<sup>32</sup> Johan Hansson și Stephane Francois, „Testing Quantum Gravity”, *International Journal of Modern Physics D* 26, nr. 12 (octombrie 2017): 1743003, <https://doi.org/10.1142/S0218271817430039>.

<sup>33</sup> Roberto Balbinot și Alessandro Fabbri, „Amplifying the Hawking signal in BECs”, *Advances in High Energy Physics* 2014 (2014): 1–8, <https://doi.org/10.1155/2014/713574>.

analogice de creare a perechilor, și anume, efectul Hawking din găurile negre acustice și efectul dinamic Casimir. Ideea constă din reproducerea într-un context al materiei condensate a unor efecte cuantice prezise de teoria câmpului cuantic în spațiul curbat, inclusiv emisia termică a găurilor negre prezise de Hawking în 1974.<sup>34</sup> Concluzia autorilor acestui experiment este că au obținut unele rezultate care ar putea fi utile în cercetarea experimentală viitoare.

*Formalismul THE* se bazează pe forma lagrangianului care reglementează dinamica particulelor punctuale cu masă și sarcină și câmpul electromagnetic într-un câmp gravitațional static, sferic simetric descris de potențialele gravitaționale fenomenologice T, H, e. Această teorie a fost utilizată pentru a interpreta rezultatele testelor experimentale ale PPE.<sup>35</sup>

*Formalismul xg* introdus de W.-T. Ni<sup>36</sup> a oferit inițial un cadru pentru analiza fizicii electrodinamice într-un câmp gravitațional de fond, extins apoi pentru a acoperi alte sectoare ale modelului standard.

*Formalismul Kostelecky*, dezvoltat de Colladay și Kostelecky, se folosește pentru tratarea posibilității de defalcare spontană a simetriei Lorentz în contextul teoriei corzilor.<sup>37</sup>

Un formalism bazat pe formele ecuațiilor de mișcare are avantajul de a aborda direct unele cerințe naturale.

---

<sup>34</sup> S. W. Hawking, „Particle Creation by Black Holes”, *Communications in Mathematical Physics* 43, nr. 3 (1 august 1975): 199–220, <https://doi.org/10.1007/BF02345020>.

<sup>35</sup> J. E. Horvath et al., „Einstein equivalence principle and theories of gravitation: A gravitationally modified standard model”, *Physical Review D* 38, nr. 6 (15 septembrie 1988): 1754, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.38.1754>.

<sup>36</sup> W.-T. Ni, „Equivalence principles and electromagnetism”, *Physical Review Letters* 38 (1 februarie 1977): 301, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.301>.

<sup>37</sup> Don Colladay și Alan Kostelecky, „Lorentz-Violating Extension of the Standard Model”, *Physical Review D* 58, nr. 11 (26 octombrie 1998): 6760, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.58.116002>.

## Bibliografie

- Adler, R., et al, J. Ellis, J. Lopez, N. Mavromatos, și D. Nanopoulos. „Test of CPT Symmetry and Quantum Mechanics with Experimental data from CPLEAR”. *Physics Letters B* 364, nr. 4 (decembrie 1995): 239–45. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(95\)01416-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)01416-0).
- Adunas, G. Z., E. Rodriguez-Milla, și D. V. Ahluwalia. „Probing Quantum Aspects of Gravity”. *Physics Letters B* 485, nr. 1–3 (iulie 2000): 215–23. [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(00\)00697-3](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(00)00697-3).
- Alfaro, Jorge, Hugo A. Morales-Tecotl, și Luis F. Urrutia. „Quantum gravity corrections to neutrino propagation”. *Physical Review Letters* 84, nr. 11 (13 martie 2000): 2318–21. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2318>.
- Amelino-Camelia, Giovanni. „Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology?” *arXiv:gr-qc/9910089*, 25 octombrie 1999. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9910089>.
- Balbinot, Roberto, și Alessandro Fabbri. „Amplifying the Hawking signal in BECs”. *Advances in High Energy Physics* 2014 (2014): 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/713574>.
- Bell, J. S. „On the Einstein Podolsky Rosen paradox”. *Physics Physique Fizika* 1, nr. 3 (1 noiembrie 1964): 195–200. <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>.
- Bohm, David. *Quantum Theory*. Revised ed. edition. New York: Dover Publications, 1989.
- Butterfield, Jeremy, și Chris Isham. „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”. În *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*. Cambridge University Press, 2001.
- Carlip, S. „Quantum Gravity: a Progress Report”. *Reports on Progress in Physics* 64, nr. 8 (1 august 2001): 885–942. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>.
- Chen, Pisin, și Toshi Tajima. „Testing Unruh Radiation with Ultraintense Lasers”. *Physical Review Letters* 83, nr. 2 (12 iulie 1999): 256–59. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.256>.
- Colladay, Don, și Alan Kostelecky. „Lorentz-Violating Extension of the Standard Model”. *Physical Review D* 58, nr. 11 (26 octombrie 1998): 116002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.58.116002>.
- Cornish, Neil, David Spergel, și Glenn Starkman. „Circles in the Sky: Finding Topology with the Microwave Background Radiation”. *Classical and Quantum Gravity* 15, nr. 9 (1 septembrie 1998): 2657–70. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/15/9/013>.
- DeWitt, Bryce S. „Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory”. *Physical Review* 160, nr. 5 (25 august 1967): 1113–48. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.160.1113>.
- Dowker, Fay, Jerome P. Gauntlett, David A. Kastor, și Jennie Traschen. „Pair Creation of Dilaton Black Holes”. *Physical Review D* 49, nr. 6 (15 martie 1994): 2909–17. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.49.2909>.
- Easther, Richard, Brian R. Greene, William H. Kinney, și Gary Shiu. „Inflation as a Probe of Short Distance Physics”. *Physical Review D* 64, nr. 10 (16 octombrie 2001): 103502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.103502>.
- Einstein, A., B. Podolsky, și N. Rosen. „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” *Physical Review* 47, nr. 10 (15 mai 1935): 777–80. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>.
- Garay, L. J., J. R. Anglin, J. I. Cirac, și P. Zoller. „Sonic analog of gravitational black holes in Bose-Einstein condensates”. *Physical Review Letters* 85, nr. 22 (27 noiembrie 2000): 4643–47. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4643>.
- Gleiser, Reinaldo J., și Carlos N. Kozameh. „Astrophysical limits on quantum gravity motivated birefringence”. *Physical Review D* 64, nr. 8 (septembrie 2001): 083007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.083007>.

- Hall, L. J., și U. Sarid. „Gravitational Smearing of Minimal Supersymmetric Unification Predictions”. *Physical Review Letters* 70, nr. 18 (3 mai 1993): 2673–76.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2673>.
- Hansson, Johan. „Aspects of nonrelativistic quantum gravity”. *arXiv:0910.4289 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:quant-ph]*, 22 octombrie 2009.  
<http://arxiv.org/abs/0910.4289>.
- Hansson, Johan, și Stephane Francois. „Testing Quantum Gravity”. *International Journal of Modern Physics D* 26, nr. 12 (octombrie 2017): 1743003.  
<https://doi.org/10.1142/S0218271817430039>.
- Hawking, S. W. „Particle Creation by Black Holes”. *Communications in Mathematical Physics* 43, nr. 3 (1 august 1975): 199–220. <https://doi.org/10.1007/BF02345020>.
- Horvath, J. E., E. A. Logiudice, C. Riveros, și H. Vucetich. „Einstein equivalence principle and theories of gravitation: A gravitationally modified standard model”. *Physical Review D* 38, nr. 6 (15 septembrie 1988): 1754–60.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.38.1754>.
- Kallos, Renata, Andrei Linde, Dmitri Linde, și Leonard Susskind. „Gravity and global symmetries”. *Physical Review D* 52, nr. 2 (15 iulie 1995): 912–35.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.912>.
- Kosteletsky, Alan, și Rob Potting. „Expectation Values, Lorentz Invariance, and CPT in the Open Bosonic String”. *Physics Letters B* 381, nr. 1–3 (iulie 1996): 89–96.  
[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00589-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00589-8).
- Lakatos, Imre. *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.
- Leonhardt, U., și P. Piwnicki. „Relativistic Effects of Light in Moving Media with Extremely Low Group Velocity”. *Physical Review Letters* 84, nr. 5 (31 ianuarie 2000): 822–25.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.822>.
- Ng, Y. Jack, și H. van Dam. „Measuring the foaminess of space-time with gravity-wave interferometers”. *Foundations of Physics* 30, nr. 5 (2000): 795–805.  
<https://doi.org/10.1023/A:1003745212871>.
- Ni, W.-T. „Equivalence principles and electromagnetism”. *Physical Review Letters* 38 (1 februarie 1977): 301–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.301>.
- Randall, Lisa, și Raman Sundrum. „A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension”. *Physical Review Letters* 83, nr. 17 (25 octombrie 1999): 3370–73.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.3370>.
- Szegedi, Péter. „Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics”. În *Appraising Lakatos: Mathematics, Methodology and the Man*, ediție de G. Kampis, L. : Kvasz, și M. Stöltzner, 1–101. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Visser, Matt. „Acoustic black holes”. *arXiv:gr-qc/9901047*, 15 ianuarie 1999.  
<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901047>.
- Volovik, G. E. „Field theory in superfluid 3He: What are the lessons for particle physics, gravity and high-temperature superconductivity?”. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96, nr. 11 (25 mai 1999): 6042–47.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.6042>.
- Zandvoort, H., Paul Weingartner, și Methology and Philosophy of Science International Congress of Logic. *Intrinsic Success and Extrinsic Success of Research Programs, in 7th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science: Salzburg, July 11th-16th, 1983 Vol. 4, Vol. 4.* Salzburg: Huttegger, 1983.