

Teorii alternative la relativitatea generală – Formalismul PPN

Nicolae Sfetcu

07.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Teorii alternative la relativitatea generală – Formalismul PPN", SetThings (7 iulie 2019), URL = <https://www.setthings.com/ro/teorii-alternative-la-relativitatea-general-a-formalismul-ppn/>

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/>.

FORMALISMUL PARAMETRIZAT POST-NEWTONIAN (PPN)..... 6

BIBLIOGRAFIE..... 10

Imediat după elaborarea și succesul relativității generale, au început să apară teorii alternative pentru gravitație, care se pot încadra în patru mari categorii:¹

- Teorii bifurcate (cu nucleul dur identic sau foarte asemănător cu cel al relativității generale), sau legate direct de relativitatea generală dar fără a fi bifurcate, precum teoriile bimetrice Cartan, Brans-Dicke și Rosen.
- Teorii unificatoare care încearcă să unifice mecanica cuantică cu relativitatea generală (teorii ale gravitației cuantice), precum gravitația cuantică în bucle.
- Teorii unificatoare care încearcă să unifice gravitația cu alte forțe, precum Kaluza-Klein.
- Teorii unificatoare care încearcă să unifice mai multe teorii simultan, precum teoria M.

În dezvoltarea acestor teorii s-au încercat multe strategii (euristici pozitive) diferite, prin adăugarea de noi ipoteze la TGR, utilizarea unui spațiu-timp pentru care universul este static, ipoteze care elimină singularitățile gravitaționale, etc. În competiția cu TGR, deocamdată a câștigat teoria lui Einstein, dovedind de departe o putere euristică mult mai mare decât rivalii săi. Unele din aceste teorii au fost abandonate, altele sunt dezvoltate în continuare de diverse comunități de cercetători, încercând să elimine anomaliile găsite în TGR, sau să extindă TGR prin bifurcație sau ca teorii unificatoare.

După 1980, când comunitatea științifică a fost de acord că TGR este confirmată, au supraviețuit, în general, doar teoriile care includ TGR ca un caz particular. O atenție deosebită a început să se acorde teoriilor gravitației cuantice, în special teoria corzilor. Majoritatea teoriilor gravitației mai noi care nu sunt cuantice încearcă să rezolve diverse anomalii cosmologice, precum inflația cosmică, materia întunecată, energia întunecată, etc. Înmulțirea anomaliilor TGR din ultimul timp, inclusiv în cazul Pioneer, au dus la o revigorare a alternativelor la această teorie.

Majoritatea teoriilor din prima categorie listată mai sus includ o densitate lagrangiană, o "acțiune" (care garantează existența legilor de conservare, și a cărei componentă gravitațională este dedusă din densitatea lagrangiană prin integrare),² și o metrică.

Teoriile metrice se pot clasifica în (de la cele mai simple la cele mai complexe):

¹ Timothy Clifton et al., „Modified Gravity and Cosmology”, *Physics Reports* 513, nr. 1–3 (martie 2012): 1–189, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>.

² Franz Mandl și Graham Shaw, *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory* (John Wiley & Sons, 2013), 25–38.

- Teorii privind câmpurile scalare (inclusiv teorii plan conforme și teorii stratificate cu felii de spațiu conforme)
- Teoriile quasiliniare
- Teorii tensoriale
- Teorii tensorial-scalare
- Teorii tensorial-vectoriale
- Teorii bimetriche
- Alte teorii metrice

Teoriile non-metriche mai importante includ

- Belinfante-Swihart
- Teoria Einstein-Cartan
- Kustaanheimo
- Teleparalelismul
- Gravitația pe baza teoriei gauge

Câteva din aceste teorii se bazează pe principiul lui Mach (cadru de referință provine din distribuția materiei în univers,³ considerat a fi un intermediar între Newton (spațiu și timp absolut) și Einstein (nu există cadru de referință absolut). Dovezile experimentale arată că principiul lui Mach este greșit, dar teoriile aferente nu au fost în întregime excluse.

Pentru a verifica și clasifica toate aceste teorii s-au dezvoltat teste specifice, bazate pe auto-consistență (între teoriile non-metriche include eliminarea teoriilor care permit tahioni, poli fantomă și poli de ordine superioară, și pe cele care au probleme cu comportamentul la infinit), și pe completitudine (să permită analiza rezultatului fiecărui experiment de interes). De exemplu, orice teorie care nu poate prezice din primele principii mișcarea planetelor sau comportamentul ceasurilor atomice este considerată incompletă.

Trei teste sunt considerate "clasice" pentru capabilitatea teoriilor de gravitație de a gestiona efectele relativiste:

- deplasarea spre roșu gravitațională
- lentile gravitaționale (în jurul Soarelui)

³ Alfred North Whitehead, *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science* (Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008).

- avansul anormal al periheliului planetelor.

La aceste teste s-a adăugat, în 1964, al patrulea test, numit întârzierea Shapiro. Fiecare teorie ar trebui să confirme aceste teste.

Principiul echivalenței lui Einstein (PEE), care se testează de asemenea pentru teoriile relativiste ale gravitației, are trei componente:

- *unicitatea căderii libere (principiul slabei echivalențe)*: masa inerțială este egală cu masa gravitațională;
- *invarianța Lorentz*: în absența efectelor gravitaționale, viteza luminii este constantă;
- *invarianța poziției locale*: rezultatul oricărui experiment non-gravitațional local este independent de locul și momentul în care este efectuat.

Conjectura lui Schiff afirmă că orice teorie completă, auto-consecventă a gravitației care verifică principiul slabei echivalențe, verifică în mod necesar și principiul echivalenței lui Einstein (dacă teoria are o conservare completă a energiei).

Teoriile metrice satisfac PEE. Doar unele teorii non-metrice satisfac PEE.

Principalele teorii post-relativitatea generală, non-cuantice, sunt teoria Brans–Dicke, A cincea forță, și Geometrodinamica.

Teoria Brans–Dicke este o teorie scalar-tensorială, în care interacțiunea gravitațională este mediată de un câmp scalar, și de câmpul tensorial al relativității generale.⁴ Teoria este considerată ca fiind în acord, în general, cu observațiile. Sursa câmpului gravitațional este, la fel ca în RG, tensorul stres-energie sau *tensorul de materie*. În teoria Brans-Dicke, în plus față de metricile care au un *câmp tensorial de rangul doi*, există un *câmp scalar* care schimbă *constantă gravitațională efectivă* în funcție de locație (aceasta este o caracteristică-cheie a teoriei, făcând parte din nucleul dur). Teoria Brans-Dick, față de RG, admite mai multe soluții. Ea prezice deflecția luminii și precesiunea periheliului planetelor, iar relativitatea generală se poate obține din teoria Brans-Dicke ca un caz particular, dar Faraoni susține că aceasta nu este valabilă în toate situațiile permise de teorie,⁵ iar unii fizicieni susțin că nu satisface principiul puternic de echivalență.

⁴ C. Brans și R. H. Dicke, „Mach’s Principle and a Relativistic Theory of Gravitation”, *Physical Review* 124, nr. 3 (1 noiembrie 1961): 925–935, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.

⁵ Valerio Faraoni, „Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity”, *Physical Review D* 59, nr. 8 (22 martie 1999): 084021, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021>.

A cincea forță este o teorie care implică, pe lângă forțe gravitaționale, electromagnetice, nucleare puternice și nucleare slab, o a cincea forță pentru a explica diferite observații anormale care nu se potrivesc cu teoriile existente. O ipoteză a acestei teorii este că materia întunecată ar putea fi legată de o forță fundamentală necunoscută. Alții speculează că o formă de energie întunecată numită chintesență ar putea fi o forță a cincea.⁶ O astfel de forță fundamentală nouă, slabă, este dificil de testat. La sfârșitul anilor 1980, unii cercetători,⁷ au raportat că au descoperit această forță în timp ce reanalizau rezultatele lui Loránd Eötvös de la începutul secolului, dar alte experimente nu au reușit să reproducă acest rezultat. Unul din testele care pot fi întreprinse pentru a demonstra teoria se presupune că s-ar putea baza pe principiul puternic de echivalență (a cincea forță s-ar manifesta printr-un efect asupra orbitelor sistemului solar, numit efectul Nordtvedt) cu Lunar Laser Ranging și interferometria de bază foarte lungă. Alte teste pot lua în considerare dimensiuni suplimentare;⁸ mantia pământului ca detector de particule gigantice, concentrându-se pe geoelectroni;⁹ rata de pulsație a stelelor variabile cefeide în 25 de galaxii;¹⁰ etc. În ultimii ani s-au propus diverse ipoteze suplimentare pentru consolidarea teoriei, dar niciun rezultat nu a fost concludent până în prezent.

Geometrodinamica este o încercare de a descrie spațiu-timpul și fenomene asociate în termeni de geometrie. Aceasta este o teorie unificatoare, încercând să unifice forțele fundamentale și să reformuleze relativitatea generală. Este o teorie inițiată de Einstein, dar încă activă. Într-un fel, termenul *geometrodinamică* este sinonim pentru relativitatea generală, caz în care este denumită mai exact ca *geometrodinamica lui Einstein* pentru a denota formularea inițială a valorii relativității generale. John Wheeler a promovat această teorie în anii 1960, încercând să reducă fizica la geometrie într-un mod fundamental, cu o geometrie dinamică cu o curbura variabilă în timpul. Practic, Wheeler a încercat integrarea a trei concepte: masa fără masă, sarcina fără sarcină, și câmp fără câmp.¹¹

⁶ Michele Cicoli, Francisco G. Pedro, și Gianmassimo Tasinato, „Natural Quintessence in String Theory”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nr. 07 (23 iulie 2012): 44, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044>.

⁷ E. Fischbach et al., „Reanalysis of the Eotvos experiment”, *Physical Review Letters* 56 (1 ianuarie 1986): 3–6, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.

⁸ A. J. Sanders et al., „Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements”, *Measurement Science and Technology* 10, nr. 6 (ianuarie 1999): 514–524, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317>.

⁹ Jacob Aron, „Earth’s Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature”, *New Scientist*, 2013, <https://www.newscientist.com/article/dn23202-earth-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/>.

¹⁰ Bhuvnesh Jain, Vinu Vikram, și Jeremy Sakstein, „Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe”, *The Astrophysical Journal* 779, nr. 1 (25 noiembrie 2013): 39, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39>.

¹¹ John A. Wheeler, „On the nature of quantum geometrodynamics”, *Annals of Physics* 2, nr. 6 (1 decembrie 1957): 604–14, [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7).

Formalismul parametrizat post-newtonian (PPN)

În domeniul gravitației experimentale, una dintre aplicațiile importante este formalismul. Pentru evaluarea modelelor de gravitație, au fost propuse mai multe seturi de teste. *Formalismul post-newtonian* ia în considerare aproximații ale ecuațiilor de gravitație ale lui Einstein prin abaterile de ordinul cel mai scăzut de la legea lui Newton pentru câmpuri slabe. Pentru a crește precizia se pot adăuga termeni de ordin superior. La limită, expansiunea post-newtoniană se reduce la legea gravitației lui Newton. *Formalismul parametrizat post-newtonian* (PPN) detaliază parametrii care diferențiază teoriile gravitației, în câmpul gravitațional slab și viteze mult mai mici decât viteza luminii. PPN poate fi aplicat tuturor teoriilor metrice de gravitație în care toate corpurile satisfac principiul Einstein de echivalență (PEE). Viteza luminii rămâne constantă în formalismul PPN și se presupune că tensorul metric este întotdeauna simetric. PPN este folosit pentru compararea și clasificarea teoriilor metrice alternative de gravitație. Cu ajutorul acestui formalism au fost eliminate multe teorii considerate anterior viabile.

În notația *beta-delta*, comportamentul câmpului slab gravitațional în relativitatea generală sunt caracterizate complet de zece parametri post-newtonieni. În notația lui Will,¹² și Misner et al.¹³ ei au următoarele valori:

- γ : Cât de multă curbura a spațiului g_{ij} este produsă prin masa de repaus a unității
- β : Cât de multă neliniaritate există în legea superpoziției pentru gravitația g_{00}
- β_1 : Câtă gravitație este produsă de energia cinetică unitară $\rho_0 v^2/2$
- β_2 : Câtă gravitație este produsă de energia potențială gravitațională unitară ρ_0/U
- β_3 : Câtă gravitație este produsă de energia internă unitară $\rho_0\Pi$
- β_4 : Câtă gravitație este produsă de unitatea de presiune p
- ζ : Diferența dintre energia cinetică radială și transversală asupra gravitației
- η : Diferența dintre solicitările radiale și transversale asupra gravitației
- Δ_1 : Câtă glisare a cadrelor inerțiale g_{0j} este produsă de impulsul unitar $\rho_0 v$?
- Δ_2 : Diferența dintre impulsul radial și transversal în tragerea cadrelor inerțiale

¹² C. M. Will, „Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect.”, *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971)., 1 ianuarie 1971, 163, 611–28, <https://doi.org/10.1086/150804>.

¹³ Charles W. Misner, Kip S. Thorne, și John Archibald Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman, 1973).

Aici, $g_{\mu\nu}$ este tensorul metric simetric 4 x 4 cu indicii μ și ν luând valori între 0 și 3. Un indice 0 va indica direcția timpului iar indicii i și j cu valori de la 1 la 3 vor indica direcțiile spațiale. În relativitatea generală, valorile acestor parametri sunt aleși astfel încât în limita vitezelor și a masei mici să coincidă cu legea gravitației lui Newton, să se asigure conservarea energiei, masei, impulsului și momentului unghiular; și pentru a asigura independența ecuațiilor de cadrul de referință.

Pentru relativitatea generală, $\gamma = \beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \Delta_1 = \Delta_2 = 1$ și $\zeta = \eta = 0$.

În notația *alpha-zeta* mai recentă a lui Will & Nordtvedt¹⁴ și Will¹⁵ se utilizează un set diferit de zece parametri PPN.

- $\gamma = \gamma$
- $\beta = \beta$
- $\alpha_1 = 7\Delta_1 + \Delta_2 - 4\gamma - 4$
- $\alpha_2 = \Delta_2 + \zeta - 1$
- $\alpha_3 = 4\beta_1 - 2\gamma - 2 - \zeta$
- $\zeta_1 = \zeta$
- $\zeta_2 = 2\beta + 2\beta_2 - 3\gamma - 1$
- $\zeta_3 = \beta_3 - 1$
- $\zeta_4 = \beta_4 - \gamma$
- ξ se calculează din $3\eta = 12\beta - 3\gamma - 9 + 10\xi - 3\alpha_1 + 2\alpha_2 - 2\zeta_1 - \zeta_2$

α_1 , α_2 și α_3 măsoară amploarea efectelor de cadru preferate. ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 și α_3 măsoară abaterea de la conservarea energiei, a impulsului și a momentului unghiular.

În această notație, relativitatea generală are parametrii PPN $\gamma = \beta = 1$ și $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3 = \zeta_4 = \xi = 0$

Există o relație matematică între metrică, potențialul metric, și parametrii PPN pentru această notație, cu zece potențiale metriche (câte unul pentru fiecare parametru PPN) pentru a asigura o soluție unică. Metodologia de aplicare a formalismului PPN la teoriile alternative de

¹⁴ Kenneth Nordtvedt Jr. și Clifford M. Will, „Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity”, *The Astrophysical Journal* 177 (1 noiembrie 1972): 177, 757, <https://doi.org/10.1086/151755>.

¹⁵ 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>.

gravitate este un proces în nouă etape.¹⁶ Limitele parametrilor PPN¹⁷ sunt determinate din teste experimentale, astfel:

Parametru	Limita	Efect	Experiment
$\gamma - 1$	$2,3 \times 10^{-5}$	Întârziere de timp, Deflectarea luminii	Monitorizarea Cassini
$\beta - 1$	3×10^{-3}	Schimbarea periheliului	Schimbarea periheliului
$\beta - 1$	$2,3 \times 10^{-4}$	Efectul Nordtvedt cu ipoteza $\eta_N = 4\beta - \gamma - 3$	Efectul Nordtvedt
	0,001	Mareea Pământului	Date gravimetrice
α_1	10^{-4}	Polarizarea orbitelor	Reflector lunar
α_2	4×10^{-7}	Precesia de spin	Aliniamentul axei solare cu ecliptica
α_3	4×10^{-20}	Auto-accelerare	Statistici pulsar spin down
η_N	9×10^{-4}	Efectul Nordtvedt	Reflector lunar
1	0,02	-	Legaturile PPN combinate
2	10^{-8}	Accelerația pulsarilor binari	PSR 1913 + 16
3	10^{-8}	Legea a treia a lui Newton	Accelerație lunară
4	0,006 (*)	-	Experimentul Kreuzer

(*) Pe baza lui $6\zeta_4 = 3\alpha_3 + 2\zeta_1 - 3\zeta_3$ din Will (q201). Este teoretic posibil ca un model alternativ de gravitație să ocolească această legătură, caz în care legătura este $|\zeta_4| < 0,4$.

Tabelul 2.1 Limitele parametrilor PPN¹⁸ determinate din teste experimentale. Sursa: C. M. Will¹⁹

Singurul câmp gravitațional care intră în ecuațiile de mișcare este metrica g. Alte câmpuri vor contribui doar la generarea curburii spațiu-timp asociate metricii. Materia poate crea aceste câmpuri, și ele plus materia pot genera metrica, dar nu pot reacționa direct asupra materiei. Materia răspunde numai la metrică.²⁰ Rezultă că metrica și ecuațiile de mișcare pentru materie sunt entități primare pentru calcularea efectelor observabile, și singura distincție între două teorii metrice este modul particular în care materia și eventual alte câmpuri gravitaționale generează metrica.

La limita post-newtoniană (mișcarea lentă, câmp slab), compararea unei teorii cu experimentele și a teoriilor gravitaționale între ele este suficient de precisă pentru majoritatea

¹⁶ Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

¹⁷ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

¹⁸ Will.

¹⁹ Clifford M. Will, „Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16”, *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 iulie 1992): L59–61, <https://doi.org/10.1086/186451>.

²⁰ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

testelor, în special cele care implică sistemul solar. Diferențele apar în valorile numerice ale coeficienților din fața potențialului metric (parametri în formalismul PPN).

Parametrii γ și β sunt utilizați pentru a descrie testele "clasice" ale RG și sunt cei mai importanți, singurii parametri non-zero în RG și gravitația scalară-tensor. Parametrul ξ este non-zero în orice teorie a gravitației care prezice efectele localizării preferate; α_1 , α_2 , α_3 măsoară dacă teoria prezice sau nu efecte ale cadrului preferat post-newtonian; α_3 , ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 măsoară dacă teoria prezice sau nu încălcarea legilor globale de conservare pentru impulsul total.

Carlton Morris Caves a ajuns la concluzia că experimentele de laborator pentru cercetarea caracteristicilor neliniare ale câmpului gravitațional, ca și măsurătorile de laborator ale gravitației produse de energia internă, sunt dificile și neconcludente.²¹ Cele mai accesibile experimente de laborator din punctul de vedere ale efectelor post-newtoniene sunt efectele de cadru preferat și de orientare preferată (pot fi modulate prin rotirea întregului aparat de laborator în raport cu spațiul inerțial) și efectele gravitaționale de tip magnetic (efectele asociate cu componentele metricei g : glisarea cadrelor inerțiale prin corpuri rotative, precesia giroscopică Lens-Thirring, accelerațiile gravitaționale produse de interacțiunile spin-spin ale corpurilor rotative și accelerațiile gravitaționale datorate cuplării pe orbită de spin). Efectele de tip magnetic sunt mult mai sensibile la direcția de rotație sau la mișcarea unei surse sau a unui detector de laborator față de alte experimente de laborator. Ca sursă se poate folosi un corp cu rotație rapidă, simetric axial și se poate modula încet viteza sa unghiulară.²²

²¹ Carlton Morris Caves, „Theoretical investigations of experimental gravitation” (phd, California Institute of Technology, 1979), <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.

²² Caves.

Bibliografie

- Aron, Jacob. „Earth’s Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature”. *New Scientist*, 2013. <https://www.newscientist.com/article/dn23202-earths-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/>.
- Brans, C., și R. H. Dicke. „Mach’s Principle and a Relativistic Theory of Gravitation”. *Physical Review* 124, nr. 3 (1 noiembrie 1961): 925–35. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.
- Caves, Carlton Morris. „Theoretical investigations of experimental gravitation”. Phd, California Institute of Technology, 1979. <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- Cicoli, Michele, Francisco G. Pedro, și Gianmassimo Tasinato. „Natural Quintessence in String Theory”. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nr. 07 (23 iulie 2012): 044–044. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044>.
- Clifton, Timothy, Pedro G. Ferreira, Antonio Padilla, și Constantinos Skordis. „Modified Gravity and Cosmology”. *Physics Reports* 513, nr. 1–3 (martie 2012): 1–189. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>.
- Faraoni, Valerio. „Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity”. *Physical Review D* 59, nr. 8 (22 martie 1999): 084021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021>.
- 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>.
- Jain, Bhuvnesh, Vinu Vikram, și Jeremy Sakstein. „Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe”. *The Astrophysical Journal* 779, nr. 1 (25 noiembrie 2013): 39. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39>.
- Mandl, Franz, și Graham Shaw. *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory*. John Wiley & Sons, 2013.
- Misner, Charles W., Kip S. Thorne, și John Archibald Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.
- Nordtvedt, Kenneth, Jr., și Clifford M. Will. „Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity”. *The Astrophysical Journal* 177 (1 noiembrie 1972): 775. <https://doi.org/10.1086/151755>.
- Sanders, A. J., A. D. Alexeev, S. W. Allison, K. A. Bronnikov, J. W. Campbell, M. R. Cates, T. A. Corcovilos, et al. „Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements”. *Measurement Science and Technology* 10, nr. 6 (ianuarie 1999): 514–524. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317>.
- Wheeler, John A. „On the nature of quantum geometrodynamics”. *Annals of Physics* 2, nr. 6 (1 decembrie 1957): 604–14. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7).
- Whitehead, Alfred North. *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science*. Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008.
- Will, C. M. „Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect.” *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971)., 1 ianuarie 1971. <https://doi.org/10.1086/150804>.
- Will, Clifford M. „Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16”. *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 iulie 1992): L59–61. <https://doi.org/10.1086/186451>.
- . „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>.

———. *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.