

Teste gravitaționale în câmp puternic

Nicolae Sfetcu

11.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Teste gravitaționale în câmp puternic", SetThings (1 iulie 2019), DOI: 10.13140/RG.2.2.18088.93441, URL = <https://www.setthings.com/ro/teste-gravitational-in-camp-puternic/>

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/>.

LENTILE GRAVITAȚIONALE	4
UNDE GRAVITAȚIONALE.....	6
PULSARI DE SINCRONIZARE.....	9
MEDII EXTREME.....	10
BIBLIOGRAFIE	11

Când densitatea corpului devine suficient de mare, relativitatea generală prezice formarea unei găuri negre. Stelele neutronice de circa 1,4 mase solare și găurile negre sunt starea finală pentru evoluția stelelor masive.¹ De obicei o gaură neagră într-o galaxie a jucat un rol important în formarea acesteia și a structurilor cosmice aferente. Astfel de corpuri oferă un mecanism eficient pentru emisia de radiații electromagnetice² și formarea de microquasari.³ Accreția poate duce la jeturi relativiste. Relativitatea generală permite modelarea acestor fenomene,⁴ confirmate prin observații.

Găurile negre sunt zonele în care sunt căutate undele gravitaționale, formate uneori prin unirea stelelor binare cu găuri negre, detectate pe Pământ; faza dinaintea fuziunii ("chirp") poate fi folosită ca o "iluminare standard" pentru a deduce distanța până la evenimentele de fuziune, servind ca probă a expansiunii cosmice la distanțe mari.⁵ Atunci când o gaură neagră se unește cu o altă gaură neagră supermasivă, poate furniza informații directe despre geometria găurii negre supermasive.⁶

În februarie 2016 și ulterior în iunie 2016, iunie 2017 și august 2017, Advanced LIGO a anunțat că a detectat direct undele gravitaționale de la o fuziune stelară cu gaura neagră.⁷ Undele gravitaționale pot fi detectate direct, și din studiul lor se pot afla multe aspecte ale Universului. Astronomia undelor gravitaționale se ocupă de testarea relativității generale și a teoriilor alternative, verificându-se forma prezisă a undelor și conformitatea lor cu soluțiile ecuațiilor de câmp ale teoriilor.⁸

Alte teste pentru gravitația puternică permit observarea deplasării gravitaționale spre roșu a luminii de la steaua S2 care orbitează gaura neagră

¹ Cole Miller, „Stellar Structure and Evolution (Lecture notes for Astronomy 606)”, 2002, <http://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr606/>.

² R. D. Blandford, „Astrophysical black holes.”, în *Three Hundred Years of Gravitation*, 1987, 277–329, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..277B>.

³ Annalisa Celotti, John C. Miller, și Dennis W. Sciama, „Astrophysical evidence for the existence of black holes”, *Classical and Quantum Gravity* 16, nr. 12A (1 decembrie 1999): A3–A21, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.

⁴ José A. Font, „Numerical Hydrodynamics in General Relativity”, *Living Reviews in Relativity* 6, nr. 1 (19 august 2003): 2, <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-4>.

⁵ Neal Dalal et al., „Short GRB and binary black hole standard sirens as a probe of dark energy”, *Physical Review D* 74, nr. 6 (18 septembrie 2006): 063006, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063006>.

⁶ Leor Barack și Curt Cutler, „LISA capture sources: Approximate waveforms, signal-to-noise ratios, and parameter estimation accuracy”, *Physical Review D* 69, nr. 8 (30 aprilie 2004): 082005, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.082005>.

⁷ Charles Q. Choi, „Gravitational Waves Detected from Neutron-Star Crashes: The Discovery Explained”, Space.com, 2017, <https://www.space.com/38471-gravitational-waves-neutron-star-crashes-discovery-explained.html>.

⁸ B. P. Abbott et al., „Tests of General Relativity with GW150914”, *Physical Review Letters* 116, nr. 22 (31 mai 2016): 221101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101>.

supermasivă Sagittarius A* în centrul Căii Lactee, cu ajutorul Very Large Telescope folosind GRAVITY, NACO și SIFONI.⁹

Principiul puternic de echivalență al relativității generale în cazul corpurilor cu auto-gravitație puternică a fost testat folosind un sistem triplu stele numit PSR J0337 + 1715, format din o stea neutronică cu o stea pitică albă situat la aproximativ 4.200 de ani-lumină de la Pământ care orbitează împreună cu o altă stea pitică albă situată mai departe. Observațiile, cu o precizie ridicată, compară modul în care tragerea gravitațională a piticei albe exterioră afectează pulsarul care are o autogravitație puternică și pitica albă interioară. Rezultatele au confirmat teoria generală a relativității.¹⁰

⁹ R. Abuter et al., „Detection of the Gravitational Redshift in the Orbit of the Star S2 near the Galactic Centre Massive Black Hole”, *Astronomy & Astrophysics* 615 (1 iulie 2018): L15, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718>.

¹⁰ Anne M. Archibald et al., „Universality of Free Fall from the Orbital Motion of a Pulsar in a Stellar Triple System”, *Nature* 559, nr. 7712 (iulie 2018): 73–76, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0265-1>.

Lentile gravitaționale

Când un corp astronomic masiv se află între observator și un corp îndepărtat cu o masă și distanță adecvate, se pot vedea mai multe imagini distorsionate ale corpului îndepărtat, formându-se efectul cunoscut ca lentile gravitaționale,¹¹ două sau mai multe imagini sun forma unui inel luminos cunoscut sub numele de inelul Einstein sau inele parțiale (arce).¹² Prima astfel de observație a fost în 1979.¹³ Efectul poate fi măsurat în funcție de strălucirea corpului îndepărtat. Lentilele gravitaționale permit detectarea prezenței și distribuției materiei întunecate, fiind un fel de "telescop natural" pentru a observa galaxiile îndepărtate și a obține o estimare independentă a constantei Hubble. Evaluările statistice ale acestora furnizează informații despre evoluția structurală a galaxiilor.¹⁴ Se așteaptă ca observarea lentilelor gravitaționale să completeze observațiile din spectrul electromagnetic,¹⁵ să furnizeze informații despre găurile negre, stelele neutronice și piticele albe și despre procesele din supernove și din universul foarte timpuriu, inclusiv despre teoria corzilor din ravația cuantică.¹⁶

Lentilele gravitaționale se formează și la nivelul sistemului solar, cu Soarele interpus între observator și sursa înseparată de lumină, dar punctul de convergență al unor astfel de lentile ar fi la aproximativ 542 UA de la Soare. Această distanță însă depășește capacitățile echipamentelor sondelor și iese mult în afara sistemului solar.

Sursele pentru lentile gravitaționale sunt surse radio aflate la mare depărtare, în special unii quasari. Pentru detecție se folosesc telescoapele radio separate pe distanțe mari combinate prin tehnica de interferometrie de bază foarte lungă. Pentru precizie se iau în considerare efectele sistematice la nivelul Pământului, unde sunt localizate telescoapele. Observațiile au confirmat valoarea deformării prezisă de relativitatea generală.¹⁷

¹¹ Joachim Wambsganss, „Gravitational Lensing in Astronomy”, *Living Reviews in Relativity* 1, nr. 1 (2 noiembrie 1998): 12, <https://doi.org/10.12942/lrr-1998-12>.

¹² Bernard Schutz, „Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz”, Cambridge Core, decembrie 2003, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.

¹³ D. Walsh, R. F. Carswell, și R. J. Weymann, „0957 + 561 A, B: Twin Quasistellar Objects or Gravitational Lens?”, *Nature* 279, nr. 5712 (mai 1979): 381–384, <https://doi.org/10.1038/279381a0>.

¹⁴ Ramesh Narayan și Matthias Bartelmann, „Lectures on Gravitational Lensing”, *arXiv:astro-ph/9606001*, 3 iunie 1996, sec. 3.7, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9606001>.

¹⁵ Kip S. Thorne, „Gravitational Waves”, *arXiv:gr-qc/9506086*, 30 iunie 1995, 160, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086>.

¹⁶ Curt Cutler și Kip S. Thorne, „An Overview of Gravitational-Wave Sources”, *arXiv:gr-qc/0204090*, 30 aprilie 2002, 4090, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204090>.

¹⁷ E. Fomalont et al., „Progress in Measurements of the Gravitational Bending of Radio Waves Using the VLBA”, *The Astrophysical Journal* 699, nr. 2 (10 iulie 2009): 1395–1402, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/699/2/1395>.

Cu ajutorul satelitului astronomic Hipparcos al Agenției Spațiale Europene s-a constatat că întregul cer este ușor distorsionat datorită deviației gravitaționale a luminii cauzată de Soare (cu excepția direcției opusă Soarelui). Aceasta necesită unele mici corecții pentru practic toate stelele.

Unde gravitaționale

Undele gravitaționale au fost prezise în 1916 de Albert Einstein.¹⁸ Ele sunt perturbații în geometria curbată a spațiu-timpului, generate de masele accelerate și propagându-se cu viteza luminii. Au fost confirmate pe 11 februarie 2016 de echipa Advanced LIGO.¹⁹ Pentru câmpurile slabe se poate face o aproximare liniară pentru aceste unde. Metodele de analiză a datelor se bazează pe descompunerea Fourier a acestor unde.²⁰ Se pot obține soluții exacte fără aproximație, dar pentru undele gravitaționale produse de fuziunea a două găuri negre, metodele numerice sunt singura modalitate de a construi modele adecvate.²¹

Undele gravitaționale au fost inițial sugerate de Henri Poincaré în 1905, și poi prezise în 1916 de Albert Einstein pe baza teoriei generale a relativității. Legile mecanicii clasice nu le asigură existența, aceasta fiind una din limitările clasice. Sistemele de stele neutronice binare sunt o sursă puternică de unde gravitaționale în timpul fuzionării. Undele gravitaționale au fost detectate de observatoarele LIGO și VIRGO. Ele permit observarea fuziunii găurilor negre și studiul Universului îndepărtat, opac la radiațiile electromagnetice.

Einstein și Rosen au publicat prima versiune corectă a undelor gravitaționale în 1937.²² Undele gravitaționale sunt create prin accelerarea masei în spațiu, dar dacă accelerația este simetric sferică nu sunt radiate unde gravitaționale. Sistemele binare întotdeauna radiază unde gravitaționale, deoarece accelerația lor este asimetrică.

Prima detectare indirectă a undelor gravitaționale a fost în 1974 de către Hulse și Taylor, de la un pulsar binar PSR 1913 + 16, folosind detecția undei radio temporizate.²³ Ei au descoperit că dilatarea timpului gravitațional a fost în concordanță

¹⁸ Albert Einstein, „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation”, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, Seite 688-696., 1916, 1: 688–696, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1916SPAW.....688E>.

¹⁹ B. P. Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration, „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, *Physical Review Letters* 116, nr. 6 (11 februarie 2016): 116(6): 061102, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.

²⁰ Piotr Jaranowski și Andrzej Królak, „Gravitational-Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case”, *Living Reviews in Relativity* 8, nr. 1 (21 martie 2005): 8 (1): 3, <https://doi.org/10.12942/lrr-2005-3>.

²¹ Edward Seidel, „Numerical Relativity: Towards Simulations of 3D Black Hole Coalescence”, *arXiv:gr-qc/9806088*, 23 iunie 1998, 6088, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9806088>.

²² A. Einstein și N. Rosen, „On Gravitational Waves”, *Journal of The Franklin Institute* 223 (1 ianuarie 1937): 43–54, [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(37\)90583-0](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0).

²³ R. A. Hulse și J. H. Taylor, „Discovery of a pulsar in a binary system”, *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 ianuarie 1975): L51–L53, <https://doi.org/10.1086/181708>.

cu predicția GR și au contrazis cele mai multe teorii alternative.²⁴ Prima detectare directă a undelor gravitaționale a avut loc în 2015, cu doi detectori Advanced LIGO, de la sursa GW150914, o gaură neagră binară.²⁵ Prin aceste observații s-a confirmat curbura spațiu-timp așa cum este descrisă de GR.

Joseph Weber a proiectat și construit primii detectori de undă gravitațională, în 1969 raportând că a detectat primele unde gravitaționale, raportând apoi semnale în mod regulat de la Centrul Galactic. Dar frecvența detectării a ridicat îndoieli cu privire la valabilitatea observațiilor sale.²⁶

Unii oameni de știință nu sunt de acord cu faptul ca rezultatele experimentale să fie acceptate pe baza argumentelor epistemologice. Pe baza experimentelor de detectare a undelor gravitaționale, Harry Collins a dezvoltat un argument pe care îl numește regresul "experimentatorilor":²⁷ un rezultat corect este obținut cu un aparat experimental bun, respectiv unul care dă rezultate corecte. Collins susține că nu există criterii formale pentru verificarea aparatului, nici măcar prin calibrarea unui aparat prin utilizarea unui semnal "surogat".²⁸ Problema se rezolvă în cele din urmă prin negociere în cadrul comunității științifice, în funcție de factori precum interesele carierei, sociale și cognitive ale oamenilor de știință, și utilitatea percepută pentru munca viitoare, dar fără a folosi criterii epistemologice sau judecată rațională. Astfel, Collins afirmă că există dubii serioase cu privire la dovezile experimentale și utilizarea lor în evaluarea ipotezelor și teoriilor științifice. Exemplul dat de Collins sunt experimentele timpurii de a detecta radiațiile gravitaționale sau undele gravitaționale.²⁹

Comunitatea fizică a fost forțată să compare presupunerile lui Weber cu rapoartele a șase alte experimente care nu au detectat undele gravitaționale. Collins susține că decizia dintre aceste rezultate experimentale contradictorii nu putea fi făcută

²⁴ Clifford M. Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”, *Living Reviews in Relativity* 17, nr. 1 (decembrie 2014): 17, <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

²⁵ Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration, „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, 116(061102).

²⁶ Jorge L. Cervantes-Cota, Salvador Galindo-Uribarri, și George F. Smoot, „A Brief History of Gravitational Waves”, *Universe* 2, nr. 3 (septembrie 2016): 2 (3): 22, <https://doi.org/10.3390/universe2030022>.

²⁷ Harry M. Collins, *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*, Reprint edition (Chicago: University of Chicago Press, 1992), 4:79-111.

²⁸ Allan Franklin și Slobodan Perovic, „Experiment in Physics”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2016 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016), <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/>.

²⁹ Allan Franklin, „Calibration”, în *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, ed. Allan Franklin, Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 1999), 5: 31–80, https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8_9.

pe baze epistemologice sau metodologice - cele șase experimente negative nu au putut fi considerate legitim ca replicări, și astfel au fost considerate mai puțin importante. În experimentele sale Weber a folosit un nou tip de aparat pentru a detecta un fenomen până acum neobservat, care nu a putut fi supus tehnicilor standard de calibrare.³⁰

Rezultatele celorlalți oameni de știință care contraziceau pe cele ale lui Weber erau mai numeroase, și au fost verificate cu atenție, fiind confirmate și de alte grupuri de cercetători. Aceștia au investigat dacă procedura lor de analiză, un algoritm liniar, ar putea explica eșecul în observarea rezultatelor lui Weber. Au schimbat procedura cu cea folosită de Weber, un algoritm neliniar, pentru a-și analiza propriile date, dar din nou nu au găsit nicio urmă a undelor gravitaționale. Și-au recalibrat aparatele experimentale prin introducerea impulsurilor acustice de energie cunoscute și detectând astfel un semnal.³¹

Au existat și alte dubii cu privire la procedurile de analiză ale lui Weber. O eroare de programare admisă a generat coincidențe false între cei doi detectori care puteau fi interpretate, în timpul experimentelor, ca reale.

Rezultatele criticilor erau mult mai credibile din punctul de vedere a procedurilor care trebuiau respectate: au verificat rezultatele prin confirmare independentă care a inclus partajarea datelor și a programelor de analiză, au eliminat o sursă plauzibilă de eroare, și au calibrat aparatele prin injectarea de impulsuri de energie cunoscute și observând ieșirea. Allan Franklin și Slobodan Perovic consideră că comunitatea științifică a făcut o judecată motivată respingând inițial rezultatele lui Weber acceptând pe cele ale criticilor săi. Deși nu s-au aplicat reguli formale stricte, procedura a fost rezonabilă.³²

O altă modalitate de detecție a undelor gravitaționale este prin interacțiunea undelor cu pereții unei cavități cu microunde, cu un formalism dezvoltat de Caves, pentru măsurarea tragerii cadrelor inerțiale³³ și detecția undelor gravitaționale de înaltă frecvență.³⁴

³⁰ Franklin și Perovic, „Experiment in Physics”.

³¹ Franklin și Perovic.

³² Franklin și Perovic.

³³ C. M. Will, „The theoretical tools of experimental gravitation”, 1974, 1, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974exgr.conf....1W>.

³⁴ Carlton Morris Caves, „Theoretical investigations of experimental gravitation” (phd, California Institute of Technology, 1979), <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.

Pulsari de sincronizare

Pulsarii sunt stele neutronice în rotație care emit unde radio în pulsuri în timp ce se rotesc, funcționând astfel ca ceasuri care permit o măsurare foarte precisă a mișcărilor lor orbitale. Observațiile acestora au arătat că precesiile lor care nu pot fi explicate prin mecanica clasică se pot explica prin relativitatea generală.³⁵

Prin măsurători asupra pulsarilor binari se pot testa efectele relativiste combinate, inclusiv întârzierea Shapiro.³⁶ Și, întrucât câmpul gravitațional lângă pulsari este puternic, se poate testa și PSE datorită invarianței poziției locale a obiectelor cu proprietăți puternice de auto-gravitație.³⁷

³⁵ Joel M. Weisberg, David J. Nice, și Joseph H. Taylor, „Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16”, *The Astrophysical Journal* 722, nr. 2 (20 octombrie 2010): 722 (2): 1030–1034, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1030>.

³⁶ Lijing Shao și Norbert Wex, „Tests of gravitational symmetries with radio pulsars”, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, nr. 9 (septembrie 2016): 59(699501), <https://doi.org/10.1007/s11433-016-0087-6>.

³⁷ Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

Medii extreme

Mediile extreme de gravitație se află în apropierea unor corpuri compacte foarte masive, unde curbura spațiu-timp este foarte pronunțată iar efectele generale relativiste sunt profunde. Acestea sunt de obicei stelele neutronice și găurile negre (în special cele supermasive), nucleul galactic activ și quasarii. Abaterile de la TGR sunt cel mai probabil să apară aici, în regim de gravitație puternică. Un astfel de test, timp de 16 ani, a fost realizat de Gillessen et al.,³⁸ pentru Sagitarius A* [Sgr A *], o sursă radio luminoasă în centrul Căii Laptelui unde se află o gaură neagră supermasivă. Observațiile efectuate de Hambaryan și colab.,³⁹ au fost în totală concordanță cu TGR, o confirmare esențială pentru această teorie.

³⁸ S. Gillessen et al., „Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center”, *The Astrophysical Journal* 692, nr. 2 (20 februarie 2009): 692(2), pp.1075–1109, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.

³⁹ V. Hambaryan et al., „On the compactness of the isolated neutron star RX J0720.4-3125”, *Astronomy & Astrophysics* 601 (mai 2017): A108, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630368>.

Bibliografie

- Abbott, B. P., The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration. „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”. *Physical Review Letters* 116, nr. 6 (11 februarie 2016): 061102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- Abbott, B. P., LIGO Scientific and Virgo Collaborations, M. R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, et al. „Tests of General Relativity with GW150914”. *Physical Review Letters* 116, nr. 22 (31 mai 2016): 221101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101>.
- Abuter, R., A. Amorim, N. Anugu, M. Bauböck, M. Benisty, J. P. Berger, N. Blind, et al. „Detection of the Gravitational Redshift in the Orbit of the Star S2 near the Galactic Centre Massive Black Hole”. *Astronomy & Astrophysics* 615 (1 iulie 2018): L15. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718>.
- Archibald, Anne M., Nina V. Gusinskaia, Jason W. T. Hessels, Adam T. Deller, David L. Kaplan, Duncan R. Lorimer, Ryan S. Lynch, Scott M. Ransom, și Ingrid H. Stairs. „Universality of Free Fall from the Orbital Motion of a Pulsar in a Stellar Triple System”. *Nature* 559, nr. 7712 (iulie 2018): 73. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0265-1>.
- Barack, Leor, și Curt Cutler. „LISA capture sources: Approximate waveforms, signal-to-noise ratios, and parameter estimation accuracy”. *Physical Review D* 69, nr. 8 (30 aprilie 2004): 082005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.082005>.
- Blandford, R. D. „Astrophysical black holes.” În *Three Hundred Years of Gravitation*, 277–329, 1987. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..277B>.
- Caves, Carlton Morris. „Theoretical investigations of experimental gravitation”. Phd, California Institute of Technology, 1979. <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- Celotti, Annalisa, John C. Miller, și Dennis W. Sciama. „Astrophysical evidence for the existence of black holes”. *Classical and Quantum Gravity* 16, nr. 12A (1 decembrie 1999): A3–21. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.
- Cervantes-Cota, Jorge L., Salvador Galindo-Uribarri, și George F. Smoot. „A Brief History of Gravitational Waves”. *Universe* 2, nr. 3 (septembrie 2016): 22. <https://doi.org/10.3390/universe2030022>.
- Choi, Charles Q. „Gravitational Waves Detected from Neutron-Star Crashes: The Discovery Explained”. Space.com, 2017. <https://www.space.com/38471-gravitational-waves-neutron-star-crashes-discovery-explained.html>.
- Collins, Harry M. *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*. Reprint edition. Chicago: University of Chicago Press, 1992.
- Cutler, Curt, și Kip S. Thorne. „An Overview of Gravitational-Wave Sources”. *arXiv:gr-qc/0204090*, 30 aprilie 2002. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204090>.
- Dalal, Neal, Daniel E. Holz, Scott A. Hughes, și Bhuvnesh Jain. „Short GRB and binary black hole standard sirens as a probe of dark energy”. *Physical Review D* 74, nr. 6 (18 septembrie 2006): 063006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063006>.
- Einstein, A., și N. Rosen. „On Gravitational Waves”. *Journal of The Franklin Institute* 223 (1 ianuarie 1937): 43–54. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(37\)90583-0](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0).
- Einstein, Albert. „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation”. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*

- (Berlin), Seite 688-696., 1916.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1916SPAW.....688E>.
- Fomalont, E., S. Kopeikin, G. Lanyi, și J. Benson. „Progress in Measurements of the Gravitational Bending of Radio Waves Using the VLBA”. *The Astrophysical Journal* 699, nr. 2 (10 iulie 2009): 1395–1402. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/699/2/1395>.
- Font, José A. „Numerical Hydrodynamics in General Relativity”. *Living Reviews in Relativity* 6, nr. 1 (19 august 2003): 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-4>.
- Franklin, Allan. „Calibration”. În *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, ediție de Allan Franklin, 237–72. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8_9.
- Franklin, Allan, și Slobodan Perovic. „Experiment in Physics”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2016. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016.
<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/>.
- Gillessen, S., F. Eisenhauer, S. Trippe, T. Alexander, R. Genzel, F. Martins, și T. Ott. „Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center”. *The Astrophysical Journal* 692, nr. 2 (20 februarie 2009): 1075–1109. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.
- Hambaryan, V., V. Suleimanov, F. Haberl, A. D. Schwope, R. Neuhaeuser, M. Hohle, și K. Werner. „On the compactness of the isolated neutron star RX J0720.4-3125”. *Astronomy & Astrophysics* 601 (mai 2017): A108.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630368>.
- Hulse, R. A., și J. H. Taylor. „Discovery of a pulsar in a binary system”. *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 ianuarie 1975): L51–53.
<https://doi.org/10.1086/181708>.
- Jaranowski, Piotr, și Andrzej Królak. „Gravitational-Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case”. *Living Reviews in Relativity* 8, nr. 1 (21 martie 2005): 3. <https://doi.org/10.12942/lrr-2005-3>.
- Miller, Cole. „Stellar Structure and Evolution (Lecture notes for Astronomy 606)”, 2002. <http://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr606/>.
- Narayan, Ramesh, și Matthias Bartelmann. „Lectures on Gravitational Lensing”. *arXiv:astro-ph/9606001*, 3 iunie 1996. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9606001>.
- Schutz, Bernard. „Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz”. Cambridge Core, decembrie 2003. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.
- Seidel, Edward. „Numerical Relativity: Towards Simulations of 3D Black Hole Coalescence”. *arXiv:gr-qc/9806088*, 23 iunie 1998. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9806088>.
- Shao, Lijing, și Norbert Wex. „Tests of gravitational symmetries with radio pulsars”. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, nr. 9 (septembrie 2016): 699501. <https://doi.org/10.1007/s11433-016-0087-6>.
- Thorne, Kip S. „Gravitational Waves”. *arXiv:gr-qc/9506086*, 30 iunie 1995.
<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086>.
- Walsh, D., R. F. Carswell, și R. J. Weymann. „0957 + 561 A, B: Twin Quasistellar Objects or Gravitational Lens?” *Nature* 279, nr. 5712 (mai 1979): 381.
<https://doi.org/10.1038/279381a0>.
- Wambsganss, Joachim. „Gravitational Lensing in Astronomy”. *Living Reviews in Relativity* 1, nr. 1 (2 noiembrie 1998): 12. <https://doi.org/10.12942/lrr-1998-12>.

- Weisberg, Joel M., David J. Nice, și Joseph H. Taylor. „Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16”. *The Astrophysical Journal* 722, nr. 2 (20 octombrie 2010): 1030–34. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1030>.
- Will, C. M. „The theoretical tools of experimental gravitation”, 1, 1974. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974exgr.conf....1W>.
- 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>.
- . *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.