

Teorii alternative la gravitația newtoniană

Nicolae Sfetcu

01.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Teorii alternative la gravitația newtoniană", SetThings (1 iulie 2019), DOI: 10.13140/RG.2.2.22012.90244, URL = <https://www.setthings.com/ro/teorii-alternative-la-gravitatia-newtoniana/>

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/>.

Teoreticienii au formulat un set de criterii fundamentale pe care orice teorie a gravitației ar trebui să le satisfacă, două pur teoretice și două care se bazează pe dovezi experimentale.¹ Astfel, o teorie trebuie să fie:

1. *completă* (capabilă să analizeze din "primele principii" rezultatul oricărui experiment de interes).
2. *auto-consistentă* (predicția sa pentru rezultatul fiecărui experiment trebuie să fie unică)
3. *relativistă* (la limită când se neglijează gravitația în comparație cu alte interacțiuni fizice, legile non-gravitaționale ale fizicii trebuie să se reducă la legile relativității speciale)
4. *cu limita newtoniană corectă* (în limitele câmpurilor gravitaționale slabe și ale mișcărilor lente, trebuie să reproducă legile lui Newton)

Principalele teorii ale gravitației din perioada 1686-1900, până la dezvoltarea de către Lorentz a propriei teorii și apoi elaborarea teoriilor relativității de către Einstein, sunt

- *Legea gravitației universale a lui Newton (1686)*: Teoria lui Newton este considerată a fi exact corectă în limitele câmpurilor gravitaționale slabe și viteze mici și toate celelalte teorii ale gravitației trebuie să reproducă teoria lui Newton în limitele corespunzătoare.
- *Explicațiile mecaniciste (1650-1900)*: Teorii bifurcate având ca nucleu dur teoria mecanicistă; au eșuat deoarece majoritatea au condus la o valoare inacceptabilă de mare de tragere a eterului, care nu se confirmă, încalcă legea privind conservarea energiei și sunt incompatibile cu termodinamica modernă.²
 - René Descartes (1644) și Christiaan Huygens (1690) au folosit vortexuri pentru a explica mecanicist gravitația.³ Newton s-a opus teoriei argumentând cu lipsa unor abateri ale orbitelor datorită rezistenței

¹ Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

² Edward Grant, *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts* (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1996), 60–61.

³ Christiaan Huygens, *Discours de La Cause de La Pesanteur*, 1885, 443–88.

fluidodinamice, direcția uneori diferită a sateliților naturali față de direcția vârtejurilor, și a explicațiilor circulare ale lui Huygens.

- *Modele electrostatice* (1870-1900): S-a încercat combinarea legilor lui Newton cu cele ale electrodinamicii (Weber, Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann, James Clerk Maxwell), încercând să explice avansul periheliului lui Mercur. Au existat succese parțiale, în 1890 Lévy și în 1898 Paul Gerber, dar au fost respinse pentru că porneau de la ipoteze care s-au dovedit ulterior a fi eronate.⁴
 - Robert Hooke (1671) și James Challis (1869) au presupus că fiecare corp emite unde ale căror efect este atracția între corpuri. Maxwell a obiectat că această teorie necesită o producție constantă de unde, care trebuie să fie însoțită de un consum infinit de energie. Challis însuși a recunoscut că nu a ajuns la un rezultat precis din cauza complexității proceselor.⁵
 - Inclusiv Isaac Newton (1675), și ulterior Bernhard Riemann (1853) au propus o teorie conform căreia fluxurile eterice mută toate corpurile unul către altul. ⁶ Ca și în cazul teoriei lui Le Sage, teoria încalcă legea conservării energiei. De asemenea, apar probleme legate de interacțiunea corpurilor cu eterul.
 - Nicolas Fatio de Duillier (1690) și Georges-Louis Le Sage (1748) au propus un model corpuscular, folosind un fel de mecanism de screening sau de umbrire - o bifurcație a legii lui Newton care respectă legea pătratelor inverse. A fost re-inventată, printre alții, de Lordul Kelvin (1872) și Hendrik Lorentz (1900), și criticată de James Clerk Maxwell (1875) și Henri Poincaré (1908) în special pentru anomaliile termodinamice. Teoria lui Le Sage a fost studiată de Radzievskii și Kagalnikova (1960), Shneiderov (1961), Buonomano și Engels (1976), Adamut (1982), Jaakkola (1996), Tom Van Flandern (1999) și Edwards (2007). O varietate de modele Le Sage și subiecte conexe sunt discutate în Edwards, et al.⁷

⁴ J. Zenneck, „Gravitation”, în *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen: Fünfter Band in Drei Teilen Physik*, ed. A. Sommerfeld (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1903), 25–67, https://doi.org/10.1007/978-3-663-16016-8_2.

⁵ James Challis, *Notes on the Principles of Pure and Applied Calculation: And Applications of Mathematical Principles to Theories of the Physical Forces*. (University of Michigan Library, 1869).

⁶ B. Riemann, *Neue mathematische Prinzipien der Naturphilosophie* (Leipzig: Dedekind, R.; Weber, W., 1876).

⁷ Matthew R. Edwards, ed., *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation*, y First edition edition (Montreal: Apeiron, 2002).

- Newton a propus o a doua teorie pe baza eterului (1717) dezvoltată ulterior de Leonhard Euler (1760) în care eterul își pierde densitatea în apropierea masei, ducând la o forță netă îndreptată spre corpuri.⁸ James Clerk Maxwell a subliniat că în acest model "hidrostatic" "solicitarea pe care trebuie să o presupunem că există în mediul invizibil, este de 3000 de ori mai mare decât cea pe care cel mai puternic oțel ar putea să o suporte".
- Mai târziu, un model similar a fost creat de Hendrik Lorentz, care a folosit radiații electromagnetice în locul corpusculilor.
- Lordul Kelvin (1871) și Carl Anton Bjerknes (1871) au considerat că fiecare corp pulsează, ceea ce ar putea fi o explicație a gravitației și a sarcinilor electrice. Această ipoteză a fost studiată și de George Gabriel Stokes și de Woldemar Voigt. Dar teoria obligă la presupunerea că toate pulsațiile din univers sunt în fază, ceea ce pare foarte improbabil. Iar eterul ar trebui să fie incompresibil. Maxwell a susținut că acest proces trebuie să fie însoțit de o nouă producție și distrugere permanentă a eterului.

Clifford M. Will explică, în *Theory and experiment in gravitational physics*, motivațiile unora din aceste teorii apărute inclusiv după elaborarea relativității generale și a teoriei cuantice,⁹ care includ bifurcații ale teoriei inițiale a lui Newton, sau nu satisfac criteriile actuale ale unei teorii gravitaționale, cu observația că este posibil ca, în cazul modificării formelor actuale, unele din aceste teorii să poată satisface ulterior aceste criterii:

- Teoria Newtoniană a gravitației: nu este relativistă
- Relativitatea cinematică a lui Milne¹⁰: a fost concepută inițial pentru a rezolva anumite probleme cosmologice. Este incompletă - nu face predicția deplasării gravitaționale spre roșu.

⁸ Leonhard Euler, *Briefe an eine deutsche Prinzessin, aus dem Französischen übersetzt* (Junius, 1773), <https://books.google.ro/books?id=FaMAAAAAMAAJ>.

⁹ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

¹⁰ E. A. Milne, *Kinematic relativity* (Facsimile Publisher, 2015), 566–78.

- Diferitele teorii vectoriale ale lui Kustaanheimo^{11 12} conțin un câmp gravitațional vectorial în spațiu-timpul plat. Sunt incomplete - nu pot fi cuplate cu celelalte legi ale fizicii non-gravitaționale (ecuațiile lui Maxwell), decât dacă impunem un spațiu-timp plat. Sunt inconsistente - dau rezultate diferite în propagarea luminii pentru aspectele corpuscular și ondulatoriu ale luminii.
- Teoria lui Poincare (generalizată de Whitrow și Morduch): teoria acțiunii la distanță în spațiu-timpul plat. Este incompletă sau inconsecventă în același mod ca și teoriile lui Kustaanheimo.¹³
- Teoria vectorială Whitrow-Morduch (1965): conține un câmp gravitațional vectorial în spațiu-timpul plat. Este incompletă sau inconsecventă în același mod ca și teoriile lui Kustaanheimo.¹⁴
- Teoria lui Birkhoff (1943): conține un câmp gravitațional tensorial utilizat pentru a construi o metrică. Violează limita newtoniană prin condițiile specifice impuse.¹⁵
- Teoria lui Yilmaz (1971, 1973): conține un câmp gravitațional tensorial utilizat pentru a construi o metrică. Este incoerentă din punct de vedere matematic - dependența funcțională a metricilor de câmpul tensorial nu este bine definită.¹⁶

Alte teorii istorice alternative dezvoltate de-a lungul timpului au fost refutate prin verificări experimentale sau înlocuite de teorii mai bine coroborate:

- În 1690, Pierre Varignon a presupus că toate corpurile sunt expuse la împingeri de particule de eter din toate direcțiile, cu o limitare la o anumită distanță de suprafața Pământului, sub care corpurile ar experimenta o atracție mai mare spre Pământ.¹⁷

¹¹ Paul Edwin Kustaanheimo și V. S. Nuotio, *Relativistic Theories of Gravitation* (Helsingin Yliopisto. Department of Applied Mathematics, 1967).

¹² G. J. Whitrow și G. E. Morduch, „Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests”, *Vistas in Astronomy* 6 (1965): 1–67, [https://doi.org/10.1016/0083-6656\(65\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4).

¹³ Whitrow și Morduch, „Relativistic theories of gravitation”.

¹⁴ Whitrow și Morduch.

¹⁵ George D. Birkhoff, „Matter, Electricity and Gravitation in Flat Space-Time”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 29, nr. 8 (1 august 1943): 231–39, <https://doi.org/10.1073/pnas.29.8.231>.

¹⁶ Hüseyin Yilmaz, „New approach to relativity and gravitation”, *Annals of Physics* 81, nr. 1 (1 noiembrie 1973): 81, [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(73\)90485-5](https://doi.org/10.1016/0003-4916(73)90485-5).

¹⁷ Pierre (1654-1722) Auteur du texte Varignon, *Nouvelles Conjectures Sur La Pesanteur*, Par M. Varignon, ..., 1690, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k74179x>.

- În 1748, Mikhail Lomonosov a presupus că efectul eterului este proporțional cu suprafața completă a componentelor elementare din care este compusă materia.¹⁸
- În 1821, John Herapath a încercat să aplice modelul co-dezvoltat al teoriei cinetice a gazelor asupra gravitației. El a presupus că eterul este încălzit de corpuri și apar scăderi de densitate care împing corpurile în acea direcție.¹⁹ Taylor a arătat că densitatea scăzută datorată dilatării termice este compensată de viteza crescută a particulelor încălzite; prin urmare, nu apar atracții.
- Teoria gravitației a lui Ritz,²⁰ electrodinamica Weber-Gauss aplicată gravitației. Promovarea clasică a periheliilor.²¹
- Teoria gravitației a lui Nordström (1912, 1913), un concurent timpuriu al relativității generale.
- Teoria lui Kaluza Klein (1921)²²
- Teoria gravitației a lui Whitehead (1922), un alt concurent timpuriu al relativității generale.

Teoria eterului Lorentz s-a dezvoltat din "teoria electronilor" lui Hendrik Lorentz, între 1892 și 1895 considerând un eter complet nemișcat.²³ Ea a introdus o ipoteză ad-hoc pentru a anula eșecul experimentelor negative de deviere a eterului la primul ordin în v/c introducând o variabilă auxiliară denumită "timp local". Rezultatul negativ al experimentului Michelson-Morley a determinat introducerea unei alte ipoteze ad-hoc, de contracție a lungimii, în 1892. Dar nici experimentele ulterioare nu au confirmat teoria, aceasta ajungând o teorie degenerată conform lui Lakatos. Lorentz a încercat să o revitalizeze în 1899 și 1904 prin introducerea transformării Lorentz. Dar nici noile modele teoretice nu au rezolvat problema eterului. Henri Poincaré a corectat

¹⁸ Mikhail Vasil'evich Lomonosov, *Mikhail Vasil'evich Lomonosov on the Corpuscular Theory*, First edition. edition (Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1970), 224–233.

¹⁹ J Herapath, „On the Causes, Laws and Phenomena of Heat, Gases, Gravitation I, II, III, in *Annals of Philosophy, or Magazine of Chemistry, Mineralogy, Mechanics, Natural History, Agriculture and the Arts* 1 Pp. 273–293”, Atticus Rare Books, 1821, 273–93, <https://www.atticusrarebooks.com/pages/books/761/john-herapath/on-the-causes-laws-and-phenomena-of-heat-gases-gravitation-i-ii-iii-in-annals-of-philosophy-or>.

²⁰ Walther Ritz, „Recherches critiques sur l'électrodynamique générale”, *Annales de chimie et de physique*, 1908, 267–71.

²¹ Ritz, 267–271.

²² Theodor Kaluza, „Zum Unitätsproblem in der Physik | BibSonomy”, 1921, 966–972, <https://www.bibsonomy.org/bibtex/19218e3a965ffaefa3af2d4c14bb5ae52/zhaozh02>.

²³ Hendrik A. Lorentz, „Considerations on Gravitation”, în *The Genesis of General Relativity*, ed. Michel Janssen et al., Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 2007), 559–574, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.

în 1905 erorile și a încorporat efectele non-electromagnetice în teorie, numind-o "Noua mecanică" și folosind pentru prima dată expresia "principiul relativității."²⁴ A criticat în același timp pe Lorentz pentru că a introdus prea multe ipoteze ajutătoare în teoria sa. Ulterior, Minkowski (1908) și Arnold Sommerfeld (1910) au încercat și ei să dezvolte o lege gravitațională invariantă Lorentz.²⁵ Teoria lui Poincaré a rezistat o perioadă datorită puterii sale euristice mai mare, dar a fost învinsă de relativitatea specială lui Albert Einstein, care a și preluat o parte din ideile acestei teorii. Lorentz a recunoscut în 1914 că teoria sa este incompatibilă cu principiul relativității și a respins-o.²⁶ În prezent unii fizicieni consideră teoria lui Lorentz dezvoltată ulterior de Poincaré ca o interpretare specială, lorentziană" sau "neo-lorentziană", a relativității speciale.²⁷ Întrucât amândouă folosesc transformările Lorentz și același formalism matematic, nu este posibil să se facă distincția între cele două teorii prin experiment. Diferența între ele este că Lorentz presupune existența unui eter nedetectabil.

Dinamica newtoniană modificată (MOND) este o teorie care propune modificarea legii gravitației universale a lui Newton cu intenția de a ține cont de proprietățile observate ale galaxiilor. MOND încearcă să elimine teoria controversată a materiei întunecate. Ea a fost dezvoltată în 1982 și publicată în 1983 de fizicianul israelian Mordehai Milgrom.²⁸ Milgrom a introdus ipoteza că forța gravitațională experimentată de o stea în regiunile exterioare ale unei galaxii este proporțională cu pătratul accelerației centripete (spre deosebire de proporționalitatea simplă, din cea de-a doua lege a lui Newton) sau, alternativ, că forța gravitațională în aceste cazuri variază invers proporțional cu raza (spre deosebire de pătratul invers al razei din legea gravitației lui Newton). În MOND, modificarea legilor lui Newton are loc doar pentru deplasarea galaxiilor, la accelerații extrem de mici.

²⁴ Henri Poincaré, „Les Relations Entre La Physique Expérimentale et La Physique Mathématique, in *Revue Générale Des Sciences Pures et Appliquées*”, issue, Gallica, 1900, 1163–1175, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k17075r>.

²⁵ Scott Walter, „Breaking in the 4-Vectors: The Four-Dimensional Movement in Gravitation, 1905–1910”, în *The Genesis of General Relativity*, ed. Michel Janssen et al., Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 2007), 193–252, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_18.

²⁶ Eduard Prugovecki, „Historical and Epistemological Perspectives on Developments in Relativity and Quantum Theory”, ResearchGate, 1992, https://www.researchgate.net/publication/300434048_Historical_and_Epistemological_Perspectives_on_Developments_in_Relativity_and_Quantum_Theory.

²⁷ Quentin Smith, *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*, ed. William Lane Craig, 1 edition (London: Routledge, 2007).

²⁸ M. Milgrom, „A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis”, *The Astrophysical Journal* 270 (iulie 1983): 371–389, <https://doi.org/10.1086/161130>.

MOND a prezis cu succes fenomene galactice neexplicate prin teoria materiei întunecate,²⁹ dar nu reușește să confirme proprietățile clusterelor de galaxii, și nici să dezvolte un model cosmologic care să concure cu actualul model Λ CDM.³⁰ Măsurarea exactă a vitezei undelor gravitaționale în comparație cu viteza luminii din 2017 nu a exclus teoriile MOND.

O mare varietate de fenomene astrofizice sunt coroborate prin MOND,^{31 32} precum:

- relație concretă între masa barionică totală a galaxiei și viteza de rotație asimptotică conform predicției MOND.
- MOND prezice o corelație mult mai bună între caracteristici în distribuția masei nebarionice și curba de rotație decât ipoteza materiei întunecate, observată în mai multe galaxii spirale.
- MOND prezice o relație specifică între accelerația stelelor la orice distanță de centrul unei galaxii și cantitatea de materie întunecată din această rază care ar fi dedusă în o analiză newtoniană, predicție verificată observațional.
- Confirmă stabilitatea galaxiilor disc pentru regiunile de galaxii din cadrul regimului MOND profund.
- Pentru galaxiile deosebit de masive MOND prezice că curba de rotație ar trebui să scadă cu $1/r$, în conformitate cu legea lui Kepler, confirmată de observațiile galaxiilor eliptice cu masă mare.

Din teoria MOND inițială au fost bifurcate o serie de teorii concurente care se bazează pe același nucleu dur (euristica negativă) dar cu strategii de dezvoltare (euristici pozitive) diferite:

²⁹ Stacy S. McGaugh, „A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of Λ CDM and MOND”, *Canadian Journal of Physics* 93, nr. 2 (21 aprilie 2014): 250–259, <https://doi.org/10.1139/cjp-2014-0203>.

³⁰ Pavel Kroupa, *The vast polar structures around the Milky Way and Andromeda*, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=UPVGDXNSBZM>.

³¹ Benoit Famaey și Stacy McGaugh, „Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions”, *Living Reviews in Relativity* 15, nr. 1 (decembrie 2012): 10, <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-10>.

³² Mordehai Milgrom, „MOND laws of galactic dynamics”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, nr. 3 (21 ianuarie 2014): 2531–41, <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066>.

- AQUAL a fost dezvoltată în 1984 de Milgrom și Jacob Bekenstein,³³ generând comportamentul MOND prin modificarea termenului gravitațional în lagrangeanul clasic.
- QUMOND³⁴ introduce o distincție între câmpul de accelerare MOND și câmpul de accelerare newtonian.
- TeVeS pornește de la comportamentul MOND dar ia în considerare un cadru relativist. TeVeS a avut succes în observațiile lentilelor gravitaționale și formarea structurii, dar nu reușește să explice alte aspecte cosmologice.³⁵

Există și alte generalizări alternative relativiste ale MOND, precum BIMOND și teoriile generalizate Einstein-Eter.³⁶

Efectul de câmp extern presupune o rupere fundamentală a lui MOND de principiul echivalenței puternice (dar nu neapărat de principiul slabei echivalențe), acesta fiind recunoscut ca un element crucial al paradigmei MOND.

Susținătorii teoriei MOND au propus mai multe teste observaționale și experimentale pentru a ajuta la a stabili cea mai bine coroborată teorie³⁷ dintre modelele MOND și materia întunecată, precum: existența unor accelerații anormale pe Pământ care ar putea fi detectate într-un experiment de precizie;³⁸ testarea în sistemul solar utilizând misiunea LISA Pathfinder prin observarea mareelor prezise de MOND și a unui punct de sa Pământ-Soare al potențialului gravitațional newtonian;³⁹ măsurarea corecțiilor MOND la precesiunea periheliului planetelor din Sistemul Solar;⁴⁰ un test astrofizic pentru a investiga comportamentul galaxiilor izolate, și

³³ J. Bekenstein și M. Milgrom, „Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity?”, *The Astrophysical Journal* 286 (noiembrie 1984): 7–14, <https://doi.org/10.1086/162570>.

³⁴ Mordehai Milgrom, „Quasi-linear formulation of MOND”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, nr. 2 (4 februarie 2010): 886–95, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16184.x>.

³⁵ Jacob D. Bekenstein, „Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm”, *Physical Review D* 71, nr. 6 (14 martie 2005): 069901, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.069901>.

³⁶ Famaey și McGaugh, „Modified Newtonian Dynamics (MOND)”.

³⁷ John F. Wallin, David S. Dixon, și Gary L. Page, „Testing Gravity in the Outer Solar System: Results from Trans-Neptunian Objects”, *The Astrophysical Journal* 666, nr. 2 (10 septembrie 2007): 1296–1302, <https://doi.org/10.1086/520528>.

³⁸ V. A. De Lorenci, M. Faundez-Abans, și J. P. Pereira, „Testing the Newton second law in the regime of small accelerations”, *Astronomy & Astrophysics* 503, nr. 1 (august 2009): L1–4, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811520>.

³⁹ Christian Trenkel et al., „Testing MOND/TEVES with LISA Pathfinder”, *arXiv:1001.1303 [astro-ph]*, 8 ianuarie 2010, <http://arxiv.org/abs/1001.1303>.

⁴⁰ Luc Blanchet și Jerome Novak, „Testing MOND in the Solar System”, *arXiv:1105.5815 [astro-ph, physics:gr-qc]*, 29 mai 2011, <http://arxiv.org/abs/1105.5815>.

comportamentul non-newtonian în sistemele de stele binare; testarea folosind dependența de deplasarea spre roșu a accelerației radiale.⁴¹

"**A cincea forță**" este o teorie care modifică legea lui Newton a gravitației universale. Experimentele inițiale au dat rezultate contradictorii: unul a susținut existența celei de-a cincea forțe, în timp ce celălalt a contrazis această teorie. După numeroase repetări ale experimentului, discordia a fost rezolvată și în consens s-a ajuns la concluzia că Forța a cincea nu există.⁴²

⁴¹ Sabine Hossenfelder și Tobias Mistele, „The Redshift-Dependence of Radial Acceleration: Modified Gravity versus Particle Dark Matter”, *International Journal of Modern Physics D* 27, nr. 14 (octombrie 2018): 1847010, <https://doi.org/10.1142/S0218271818470107>.

⁴² 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): 044–044, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044>.

Bibliografie

- Bekenstein, J., și M. Milgrom. „Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity?” *The Astrophysical Journal* 286 (noiembrie 1984): 7–14. <https://doi.org/10.1086/162570>.
- Bekenstein, Jacob D. „Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm”. *Physical Review D* 71, nr. 6 (14 martie 2005): 069901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.069901>.
- Birkhoff, George D. „Matter, Electricity and Gravitation in Flat Space-Time”. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 29, nr. 8 (1 august 1943): 231–39. <https://doi.org/10.1073/pnas.29.8.231>.
- Blanchet, Luc, și Jerome Novak. „Testing MOND in the Solar System”. *arXiv:1105.5815 [astro-ph, physics:gr-qc]*, 29 mai 2011. <http://arxiv.org/abs/1105.5815>.
- Challis, James. *Notes on the Principles of Pure and Applied Calculation: And Applications of Mathematical Principles to Theories of the Physical Forces*. University of Michigan Library, 1869.
- 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>.
- De Lorenci, V. A., M. Faundez-Abans, și J. P. Pereira. „Testing the Newton second law in the regime of small accelerations”. *Astronomy & Astrophysics* 503, nr. 1 (august 2009): L1–4. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811520>.
- Edwards, Matthew R., ed. *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation*. Y First edition edition. Montreal: Apeiron, 2002.
- Euler, Leonhard. *Briefe an eine deutsche Prinzessin, aus dem Französischen übersetzt*. Junius, 1773. <https://books.google.ro/books?id=FaMAAAAAMAAJ>.
- Famaey, Benoit, și Stacy McGaugh. „Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions”. *Living Reviews in Relativity* 15, nr. 1 (decembrie 2012): 10. <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-10>.
- Grant, Edward. *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1996.
- Herapath, J. „On the Causes, Laws and Phenomena of Heat, Gases, Gravitation I, II, III, in Annals of Philosophy, or Magazine of Chemistry, Mineralogy, Mechanics, Natural History, Agriculture and the Arts 1 Pp. 273–293”. Atticus Rare Books, 1821. <https://www.atticusrarebooks.com/pages/books/761/john-herapath/on-the-causes-laws-and-phenomena-of-heat-gases-gravitation-i-ii-iii-in-annals-of-philosophy-or>.
- Hossenfelder, Sabine, și Tobias Mistele. „The Redshift-Dependence of Radial Acceleration: Modified Gravity versus Particle Dark Matter”. *International Journal of Modern Physics D* 27, nr. 14 (octombrie 2018): 1847010. <https://doi.org/10.1142/S0218271818470107>.
- Huygens, Christiaan. *Discours de La Cause de La Pesanteur*, 1885.
- Kaluza, Theodor. „Zum Unitätsproblem in der Physik | BibSonomy”, 1921. <https://www.bibsonomy.org/bibtex/19218e3a965ffaefa3af2d4c14bb5ae52/zhaozhho2>.

- Kroupa, Pavel. *The vast polar structures around the Milky Way and Andromeda*, 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=UPVGDxNSBZM>.
- Kustaanheimo, Paul Edwin, și V. S. Nuotio. *Relativistic Theories of Gravitation*. Helsingin Yliopisto. Department of Applied Mathematics, 1967.
- Lomonosov, Mikhail Vasil'evich. *Mikhail Vasil'evich Lomonosov on the Corpuscular Theory*. First edition. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1970.
- Lorentz, Hendrik A. „Considerations on Gravitation”. În *The Genesis of General Relativity*, ediție de Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, și John Stachel, 1038–52. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.
- McGaugh, Stacy S. „A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of Λ CDM and MOND”. *Canadian Journal of Physics* 93, nr. 2 (21 aprilie 2014): 250–59. <https://doi.org/10.1139/cjp-2014-0203>.
- Milgrom, M. „A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis”. *The Astrophysical Journal* 270 (iulie 1983): 365. <https://doi.org/10.1086/161130>.
- Milgrom, Mordehai. „MOND laws of galactic dynamics”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, nr. 3 (21 ianuarie 2014): 2531–41. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066>.
- . „Quasi-linear formulation of MOND”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, nr. 2 (4 februarie 2010): 886–95. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16184.x>.
- Milne, E. A. *Kinematic relativity*. Facsimile Publisher, 2015.
- Poincaré, Henri. „Les Relations Entre La Physique Expérimentale et La Physique Mathématique, in Revue Générale Des Sciences Pures et Appliquées”. Issue. Gallica, 1900. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k17075r>.
- Prugovecki, Eduard. „Historical and Epistemological Perspectives on Developments in Relativity and Quantum Theory”. ResearchGate, 1992. https://www.researchgate.net/publication/300434048_Historical_and_Epistemological_Perspectives_on_Developments_in_Relativity_and_Quantum_Theory.
- Riemann, B. *Neue mathematische Prinzipien der Naturphilosophie*. Leipzig: Dedekind, R.; Weber, W., 1876.
- Ritz, Walther. „Recherches critiques sur l'électrodynamique générale”. *Annales de chimie et de physique*, 1908.
- Smith, Quentin. *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*. Ediție de William Lane Craig. 1 edition. London: Routledge, 2007.
- Trenkel, Christian, Steve Kemble, Neil Bevis, și Joao Magueijo. „Testing MOND/TEVES with LISA Pathfinder”. *arXiv:1001.1303 [astro-ph]*, 8 ianuarie 2010. <http://arxiv.org/abs/1001.1303>.
- Varignon, Pierre (1654-1722) Auteur du texte. *Nouvelles Conjectures Sur La Pesanteur*, Par M. Varignon,..., 1690. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k74179x>.
- Wallin, John F., David S. Dixon, și Gary L. Page. „Testing Gravity in the Outer Solar System: Results from Trans-Neptunian Objects”. *The Astrophysical Journal* 666, nr. 2 (10 septembrie 2007): 1296–1302. <https://doi.org/10.1086/520528>.
- Walter, Scott. „Breaking in the 4-Vectors: The Four-Dimensional Movement in Gravitation, 1905–1910”. În *The Genesis of General Relativity*, ediție de Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, și John Stachel,

- 1118–78. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_18.
- Whitrow, G. J., și G. E. Morduch. „Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests”. *Vistas in Astronomy* 6 (1965): 1–67. [https://doi.org/10.1016/0083-6656\(65\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4).
- Will, Clifford M. *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.
- Yilmaz, Hüseyin. „New approach to relativity and gravitation”. *Annals of Physics* 81, nr. 1 (1 noiembrie 1973): 179–200. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(73\)90485-5](https://doi.org/10.1016/0003-4916(73)90485-5).
- Zenneck, J. „Gravitation”. În *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen: Fünfter Band in Drei Teilen Physik*, ediție de A. Sommerfeld, 25–67. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1903. https://doi.org/10.1007/978-3-663-16016-8_2.