

Prolifération des théories post-newtoniennes

Nicolae Sfetcu

11.12.2019

Sfetcu, Nicolae, « Prolifération des théories post-newtoniennes », SetThings (20 iunie 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/prolifération-des-theories-post-newtoniennes/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NonDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Une traduction partielle de Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.15421.61925, URL = <https://www.setthings.com/ro/e-books/epistemologia-gravitatiei-experimentale-rationalitatea-stiintifica/>

BIBLIOGRAPHIE..... 10

Les théoriciens ont formulé un ensemble de critères fondamentaux que toute théorie de la gravité devrait satisfaire, deux purement théoriques et deux fondés sur des preuves expérimentales.¹ Ainsi, une théorie doit être :

1. *Complet* (capable d'analyser à partir des « premiers principes » le résultat de toute expérience d'intérêt)
2. *Auto-cohérent* (sa prédiction pour le résultat de chaque expérience doit être unique)
3. *Relativiste* (à la limite où la gravité est négligée par rapport à d'autres interactions physiques, les lois non gravitationnelles de la physique doivent être réduites à des lois de relativité spéciales)
4. Avec la *limite newtonienne correcte* (dans les limites des champs gravitationnels faibles et des mouvements lents, ils doivent reproduire les lois de Newton).

Les principales théories de la gravité de 1686 à 1900, jusqu'à ce que Lorentz ait développé sa propre théorie puis l'élaboration des théories de la relativité d'Einstein, sont

- *Loi de Newton* sur la gravité universelle (1686) : La théorie de Newton est considérée comme étant exactement dans les limites des champs de gravité et des vitesses faibles et toutes les autres théories de la gravité doivent reproduire la théorie de Newton dans les limites appropriées.
- *Explications mécanistiques* (1650-1900): Théories bifurquées ayant une théorie mécaniste de noyau dur; ils ont échoué parce que la plupart ont conduit à une valeur inacceptable de la dragage de l'éther, qui n'est pas confirmée, viole la loi sur la conservation de l'énergie et est incompatible avec la thermodynamique moderne.²
 - René Descartes (1644) et Christiaan Huygens (1690) ont utilisé des vortex pour expliquer mécaniste la gravité.³ Newton s'est opposé à la théorie en arguant du manque de déviations d'orbite grâce à la résistance fluide-dynamique, à la direction parfois différente des satellites naturels comparativement à la direction du vortex, et aux explications circulaires de Huygens.
- *Modèles électrostatiques* (1870-1900): On a essayé de combiner les lois de Newton avec celles de l'électrodynamique (Weber, Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann, James Clerk Maxwell), essayant d'expliquer l'avance du périhélie de Mercure. Il y a eu des succès partiels, en 1890 (Lévy) et en 1898 (Paul Gerber), mais ils ont été rejetés parce qu'ils étaient basés sur des hypothèses qui se sont révélées fausses par la suite.⁴

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.

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

- Robert Hooke (1671) et James Challis (1869) ont supposé que chaque corps émette des ondes dont l'effet est l'attraction entre les corps. Maxwell a soutenu que cette théorie nécessite une production constante d'ondes, qui doit s'accompagner d'une consommation d'énergie infinie. Challis lui-même a reconnu qu'il n'était pas parvenu à un résultat précis en raison de la complexité des processus.⁵
- Y compris Isaac Newton (1675), et plus tard Bernhard Riemann (1853) ont proposé une théorie selon laquelle les flux éthériques déplacent tous les corps les uns vers les autres.⁶ Comme pour la théorie de Le Sage, la théorie viole la loi de conservation de l'énergie. Il existe également des problèmes liés à l'interaction des corps avec l'éther.
- Nicolas Fatio de Duillier (1690) et Georges-Louis Le Sage (1748) ont proposé un modèle corpusculaire, utilisant une sorte de mécanisme de criblage ou d'ombrage - une bifurcation de la loi de Newton qui respecte la loi des carrés inverses. Il a été réinventé, entre autres, par Lord Kelvin (1872) et Hendrik Lorentz (1900), et critiqué par James Clerk Maxwell (1875) et Henri Poincaré (1908) notamment pour les anomalies thermodynamiques. La théorie de Le Sage a été étudiée par Radzievskii et Kagalnikova (1960), Shneiderov (1961), Buonomano et Engels (1976), Adamut (1982), Jaakkola (1996), Tom Van Flandern (1999) et Edwards (2007). Une variété de modèles de Le Sage et des sujets connexes sont discutés dans Edwards et al.⁷
- Newton a proposé une seconde théorie basée sur l'éther (1717) développée plus tard par Leonhard Euler (1760) dans laquelle l'éther perd sa densité près de la masse, conduisant à une force nette dirigée vers les corps.⁸ James Clerk Maxwell a souligné que, dans ce modèle « hydrostatique », « la demande que nous devons supposer existe dans l'environnement invisible est 3000 fois supérieure à celle que l'acier le plus résistant pourrait supporter ».
- Plus tard, un modèle similaire a été créé par Hendrik Lorentz, qui a utilisé le rayonnement électromagnétique au lieu des corpuscules.
- Lord Kelvin (1871) et Carl Anton Bjerknes (1871) ont estimé que chaque corps vibre, ce qui pourrait être une explication de la gravité et des charges électriques. Cette hypothèse a également été étudiée par George Gabriel Stokes et Woldemar Voigt. Mais la théorie force l'hypothèse que toutes les pulsations dans l'univers sont en phase, ce qui semble hautement improbable. Et l'éther devrait être

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

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

incompressible. Maxwell a soutenu que ce processus doit s'accompagner d'une nouvelle production et d'une destruction permanente de l'éther.

Clifford M. Will explique, dans *Theory and experiment in gravitational physics*, les motivations de certaines de ces théories, y compris après l'élaboration de la relativité générale et de la théorie quantique,⁹ qui incluent des bifurcations de la théorie initiale de Newton, ou ne répondent pas aux critères actuels d'une théorie gravitationnelle, avec l'observation qu'il est possible que, dans le cas de la modification des formes actuelles, certaines de ces théories puissent par la suite répondre à ces critères:

- Théorie newtonienne de la gravité : elle n'est pas relativiste
- Relativité cinématique de Milne¹⁰ : elle a été initialement conçue pour résoudre certains problèmes cosmologiques. Il est incomplet - il ne prédit pas le déplacement gravitationnel vers le rouge.
- Les différentes théories vectorielles de Kustaanheimo^{11 12} : contiennent un champ gravitationnel vectoriel dans l'espace-temps plat. Ils sont incomplets - ils ne peuvent pas être couplés avec les autres lois de la physique non gravitationnelle (équations de Maxwell), à moins d'imposer un espace-temps plat. Ils sont incohérents - ils donnent des résultats différents dans la propagation de la lumière pour les aspects corpusculaires et ondulatoires de la lumière.
- Théorie de Poincaré (généralisée par Whitrow et Morduch): la théorie de l'action à distance dans l'espace-temps plat. Elle est incomplète ou incohérente au même titre que les théories de Kustaanheimo.¹³
- Théorie vectorielle de Whitrow-Morduch (1965): contient un champ gravitationnel vectoriel dans un espace plat. Elle est incomplète ou incohérente au même titre que les théories de Kustaanheimo.¹⁴
- Théorie de Birkhoff (1943) : contient un champ gravitationnel tensoriel utilisé pour construire une métrique. Il viole la limite newtonienne par les conditions spécifiques imposées.¹⁵

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

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

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

¹² G. J. Whitrow et 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 et Morduch, « Relativistic theories of gravitation ».

¹⁴ Whitrow et Morduch.

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

- Théorie de Yilmaz (1971, 1973) : contient un champ gravitationnel tensoriel utilisé pour construire une métrique. Il est mathématiquement incohérent - la dépendance fonctionnelle des métriques sur le champ tensoriel n'est pas bien définie.¹⁶

D'autres théories historiques alternatives développées au fil du temps ont été réfutées par des vérifications expérimentales ou remplacées par des théories mieux corroborées :

- En 1690, Pierre Varignon a supposé que tous les corps étaient exposés à des poussées de particules d'éther de toutes les directions, avec une limitation à une certaine distance de la surface de la Terre, sous laquelle les corps seraient plus attirés par la Terre.¹⁷
- En 1748, Mikhaïl Lomonosov a supposé que l'effet de l'éther soit proportionnel à la surface complète des composants élémentaires dont la matière est composée.¹⁸
- En 1821, John Herapath a tenté d'appliquer le modèle co-développé de la théorie cinétique des gaz à la gravité. Il a supposé que l'éther soit chauffé par les corps et que la densité diminue, ce qui pousse les corps dans cette direction.¹⁹ Taylor a montré que la faible densité due à l'expansion thermique est compensée par l'augmentation de la vitesse des particules chauffées ; par conséquent, aucune attraction n'apparaît.
- Théorie de la gravité de Ritz,²⁰ électrodynamique de Weber-Gauss appliquée à la gravité. Promotion classique des périhélie.²¹
- La théorie de la gravité de Nordström (1912, 1913), un des premiers concurrents de la relativité générale.
- Théorie de Kaluza Klein (1921)²²
- La théorie de la gravité de Whitehead (1922), un autre concurrent précoce de la relativité générale.

La théorie de l'éther de Lorentz a été développée à partir de la « théorie des électrons » d'Hendrik Lorentz, entre 1892 et 1895, la considérant comme un éther complètement

¹⁶ Hüseyin Yilmaz, « New approach to relativity and gravitation », *Annals of Physics* 81, n° 1 (1 novembre 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>.

¹⁸ Mikhaïl Vasil'evich Lomonosov, *Mikhaïl 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>.

immobile.²³ Elle a introduit une hypothèse *ad hoc* pour annuler l'échec des expériences négatives de déviation d'éther de premier ordre en v/c en introduisant une variable auxiliaire appelée « heure locale ». Le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley a conduit à l'introduction d'une autre hypothèse *ad hoc*, de la contraction de la longueur, en 1892. Mais les expériences ultérieures n'ont pas non plus confirmé la théorie, qui est devenue une théorie dégénérée selon Lakatos. Lorentz a tenté de la revitaliser en 1899 et 1904 en introduisant la transformation de Lorentz. Mais ni les nouveaux modèles théoriques n'ont résolu le problème de l'éther. Henri Poincaré a corrigé les erreurs en 1905 et a incorporé les effets non électromagnétiques dans la théorie, en l'appelant « Nouvelle mécanique » et en utilisant pour la première fois l'expression « principe de relativité ». ²⁴ Il a également critiqué Lorentz pour avoir introduit trop d'hypothèses utiles dans sa théorie. Plus tard, Minkowski (1908) et Arnold Sommerfeld (1910) ont également essayé de développer une loi de gravité invariante Lorentz. ²⁵ La théorie de Poincaré a résisté à une période en raison de son plus grand pouvoir heuristique, mais il a été vaincu par la relativité restreinte d'Albert Einstein, qui a également repris certaines des idées de cette théorie. Lorentz a reconnu en 1914 que sa théorie était incompatible avec le principe de relativité et l'a rejeté. ²⁶ À l'heure actuelle, certains physiciens considèrent la théorie de Lorentz développée plus tard par Poincaré comme une interprétation spéciale, « lorentzienne » ou « néo-lorentzienne », de la relativité restreinte. ²⁷ Étant donné que les deux utilisent des transformations de Lorentz et le même formalisme mathématique, il n'est pas possible de faire

²³ Hendrik A. Lorentz, « Considerations on Gravitation », in *The Genesis of General Relativity*, éd. par 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.

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 », in *The Genesis of General Relativity*, éd. par 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*, éd. par William Lane Craig, 1 édition (London: Routledge, 2007).

la distinction entre les deux théories par expérience. La différence entre elles est que Lorentz suppose l'existence d'un éther indétectable.

La dynamique newtonienne modifiée (MOND) est une théorie qui propose de modifier la loi de Newton de la gravité universelle dans le but de prendre en compte les propriétés observées des galaxies. MOND essaie d'éliminer la théorie controversée de la matière noire. Il a été développé en 1982 et publié en 1983 par le physicien israélien Mordehai Milgrom.²⁸ Milgrom a introduit l'hypothèse que la force gravitationnelle subie par une étoile dans les régions extérieures d'une galaxie est proportionnelle au carré de l'accélération centripète (par opposition à la proportionnalité simple, de la deuxième loi de Newton) ou, alternativement, que la force gravitationnelle dans ces cas varient inversement proportionnellement au rayon (par opposition au carré inverse du rayon dans la loi de gravité de Newton). Dans le MONDE, la modification des lois de Newton n'a lieu que pour le mouvement des galaxies, à des accélérations extrêmement faibles.

MOND a prédit avec succès des phénomènes galactiques inexplicables grâce à la théorie de la matière noire,²⁹ mais ne parvient pas à confirmer les propriétés des clusters de galaxies, ni à développer un modèle cosmologique qui rivalise avec le modèle Λ CDM actuel.³⁰ La mesure exacte de la vitesse des ondes gravitationnelles par rapport à la vitesse de la lumière en 2017 n'a pas exclu les théories MOND.

Une grande variété de phénomènes astrophysiques sont corroborés par le MOND,^{31 32} tels que :

- Relation concrète entre la masse baryonique totale de la galaxie et la vitesse de rotation asymptotique selon la prédiction MOND.

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

²⁹ Stacy S. McGaugh, « A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of Λ CDM and MOND », *Canadian Journal of Physics* 93, n° 2 (21 avril 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 et Stacy McGaugh, « Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions », *Living Reviews in Relativity* 15, n° 1 (décembre 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, n° 3 (21 janvier 2014): 2531–41, <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066>.

- MOND prédit une bien meilleure corrélation entre les caractéristiques de la distribution de la masse non barionique et la courbe de rotation que l'hypothèse de la matière noire, observée dans plusieurs galaxies spirales.
- MOND prédit une relation spécifique entre l'accélération des étoiles à n'importe quelle distance du centre d'une galaxie et la quantité de matière noire dans ce rayon qui serait déduite dans une analyse newtonienne, une prédiction vérifiée par observation.
- Confirme la stabilité des galaxies à disques pour les régions des galaxies dans le régime MOND profond.
- Pour les galaxies particulièrement massives, MOND prévoit que la courbe de rotation devrait diminuer de $1/r$, selon la loi de Kepler, confirmée par les observations de galaxies elliptiques de grandes masses.

À partir de la théorie initiale de MOND, un certain nombre de théories concurrentes ont été bifurquées qui sont basées sur le même noyau dur (heuristique négative) mais avec différentes stratégies de développement (heuristique positive) :

- AQUAL a été développé en 1984 par Milgrom et Jacob Bekenstein, ³³ générant un comportement MOND en modifiant le terme gravitationnel dans le lagrangien classique.
- QUMOND³⁴ a introduit une distinction entre le champ d'accélération MOND et le champ d'accélération newtonien.
- TeVeS part du comportement du MOND mais considère un cadre relativiste. TeVeS a réussi à observer les lentilles gravitationnelles et la formation de structures, mais ne parvient pas à expliquer d'autres aspects cosmologiques. ³⁵

Il existe aussi d'autres généralisations relativistes alternatives du MOND, comme BIMOND et les théories généralisées d'Einstein. ³⁶

L'effet de champ externe implique une rupture fondamentale de MOND du principe d'équivalence fort (mais pas nécessairement par le principe d'équivalence faible), ce qui est reconnu comme un élément crucial du paradigme MOND.

Les partisans de la théorie MOND ont proposé plusieurs tests d'observation et expérimentaux pour aider à établir la théorie la mieux corroborée entre les modèles MOND³⁷

³³ J. Bekenstein et M. Milgrom, « Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity? », *The Astrophysical Journal* 286 (novembre 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, n° 2 (4 février 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, n° 6 (14 mars 2005): 069901, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.069901>.

³⁶ Famaey et McGaugh, « Modified Newtonian Dynamics (MOND) ».

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

et la matière noire, tels que: l'existence d'accélération anormales sur Terre qui pourraient être détectées dans une expérience de précision; ³⁸ tests dans le système solaire en utilisant la mission LISA Pathfinder en observant les marées prédites par le MOND et un point Soleil-Terre de potentiel gravitationnel newtonien³⁹; mesurer les corrections MOND à la précession du périhélie des planètes du système solaire⁴⁰; un test astrophysique pour étudier le comportement des galaxies isolées et le comportement non newtonien dans les systèmes d'étoiles binaires; tests utilisant la dépendance au décalage vers le rouge de l'accélération radiale.

La « cinquième force » est une théorie qui modifie la loi de Newton de la gravité universelle. Les premières expériences ont donné des résultats contradictoires : l'un a affirmé l'existence de la cinquième force, tandis que l'autre a contredit cette théorie. Après de nombreuses répétitions de l'expérience, la discorde a été résolue et le consensus a été atteint que la Cinquième Force n'existe pas.

³⁸ V. A. De Lorenci, M. Faundez-Abans, et J. P. Pereira, « Testing the Newton second law in the regime of small accelerations », *Astronomy & Astrophysics* 503, n° 1 (août 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 janvier 2010, <http://arxiv.org/abs/1001.1303>.

⁴⁰ Luc Blanchet et 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>.

Bibliographie

- Bekenstein, J., et M. Milgrom. « Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity? » *The Astrophysical Journal* 286 (novembre 1984): 7-14. <https://doi.org/10.1086/162570>.
- Bekenstein, Jacob D. « Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm ». *Physical Review D* 71, n° 6 (14 mars 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, n° 8 (1 août 1943): 231-39. <https://doi.org/10.1073/pnas.29.8.231>.
- Blanchet, Luc, et 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.
- De Lorenci, V. A., M. Faundez-Abans, et J. P. Pereira. « Testing the Newton second law in the regime of small accelerations ». *Astronomy & Astrophysics* 503, n° 1 (août 2009): L1-4. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811520>.
- Edwards, Matthew R., éd. *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, et Stacy McGaugh. « Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions ». *Living Reviews in Relativity* 15, n° 1 (décembre 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>.
- 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/zhaozhh02>.
- Kroupa, Pavel. *The vast polar structures around the Milky Way and Andromeda*, 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=UPVGDXNSBZM>.
- Kustaanheimo, Paul Edwin, et 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. edition. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1970.
- Lorentz, Hendrik A. « Considerations on Gravitation ». In *The Genesis of General Relativity*, édité par Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, et 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, n° 2 (21 avril 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 (juillet 1983): 365. <https://doi.org/10.1086/161130>.
- Milgrom, Mordehai. « MOND laws of galactic dynamics ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, n° 3 (21 janvier 2014): 2531-41. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066>.
- . « Quasi-linear formulation of MOND ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, n° 2 (4 février 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*. Édité par William Lane Craig. 1 edition. London: Routledge, 2007.
- Trenkel, Christian, Steve Kemble, Neil Bevis, et Joao Magueijo. « Testing MOND/TEVES with LISA Pathfinder ». *arXiv:1001.1303 [astro-ph]*, 8 janvier 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, et Gary L. Page. « Testing Gravity in the Outer Solar System: Results from Trans-Neptunian Objects ». *The Astrophysical Journal* 666, n° 2 (10 septembre 2007): 1296-1302. <https://doi.org/10.1086/520528>.
- Walter, Scott. « Breaking in the 4-Vectors: The Four-Dimensional Movement in Gravitation, 1905–1910 ». In *The Genesis of General Relativity*, édité par Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, et 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., et 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, n° 1 (1 novembre 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 ». In *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen: Fünfter Band in Drei Teilen Physik*, édité par A. Sommerfeld, 25-67. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1903. https://doi.org/10.1007/978-3-663-16016-8_2.