

Tests de la relativité générale et des théories post-einsteiniennes

Nicolae Sfetcu

04.01.2020

Sfetcu, Nicolae, « Tests de la relativité générale et des théories post-einsteiniennes », SetThings (4 janvier 202-), URL = <https://www.setthings.com/fr/tests-de-la-relativite-generale-et-des-theories-post-einsteiniennes/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NoDerivatives 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

Clifford M. Will décrit, dans *Theory and Experiment in Gravitational Physics*¹, l'émergence d'une nouvelle ère pour la relativité générale, les tests et les vérifications à des niveaux de précision très élevés.

En 1959, des scientifiques des Lincoln Laboratories du Massachusetts ont bombardé la planète Vénus d'ondes radio de la Terre, espérant détecter l'écho des ondes réfléchies. Ils n'ont détecté aucun écho. Après une analyse plus approfondie, ils ont détecté un écho le 14 septembre, ce qui est le premier écho radar enregistré sur une planète.

En 1960, les astronomes Thomas Matthews et Allan Sandage et leurs collègues du Mount Palomar ont utilisé un télescope pour enregistrer une plaque photo du champ stellaire autour de la source radio 3C48. Ils s'attendaient à trouver un groupe de galaxies, mais à l'emplacement exact de la source radio, un objet a été observé comme une étoile mais avec un spectre inhabituel et une luminosité variable avec une fréquence de 15 minutes². Ce fut le premier quasar observé.

3

L'expérience Pound-Rebka (1960) a vérifié le principe d'équivalence et le décalage vers le rouge gravitationnel et a démontré l'utilité de la technologie quantique (horloges atomiques, mesures laser, gravimètres supraconducteurs, détecteurs d'ondes gravitationnelles) dans des expériences gravitationnelles de haute précision.⁴

Les radiations enregistrées depuis Vénus ont fait du système solaire un laboratoire pour tester la gravité relativiste⁵. Le programme spatial interplanétaire développé au début des années 1960 et la découverte en 1964 de l'effet relativiste du retard⁶ ont offert de nouveaux tests précis de la relativité générale. Jusqu'en 1974, le système solaire était le seul moyen de réaliser des tests de haute précision de la relativité générale.

Dans le développement de la relativité générale, Einstein a été guidé par des critères théoriques d'élégance et de simplicité. Sa théorie a d'abord rencontré « trois tests classiques »: le

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 Thomas A. Matthews et Allan R. Sandage, « Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects. », *The Astrophysical Journal* 138 (1 juillet 1963): 30-56, <https://doi.org/10.1086/147615>.

³ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

⁴ R. V. Pound et G. A. Rebka, « Apparent Weight of Photons », *Physical Review Letters* 4, n° 7 (1 avril 1960): 337-41, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>.

⁵ W. B. Smith, « Radar observations of Venus, 1961 and 1959 », *The Astronomical Journal* 68 (1 février 1963): 15-21, <https://doi.org/10.1086/108904>.

⁶ Irwin I. Shapiro, « Fourth Test of General Relativity », *Physical Review Letters* 13, n° 26 (28 décembre 1964): 789-91, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.

déplacement anormal du périhélie de Mercure, la déviation de la lumière par le Soleil et le décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière.

À la fin des années 50, il a été suggéré que le décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière n'est pas, cependant, un véritable test de relativité générale. Il est une pure conséquence du principe d'équivalence et ne teste pas les équations de champ de la théorie gravitationnelle. Schiff a suggéré que l'expérience Eotvos est plus précise que le décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière, qu'il a remplacé comme important, l'expérience Eotvos vérifiant dans quelle mesure les corps de composition différente ont la même accélération.⁷

Par la suite, d'autres tests de relativité générale ont été proposés, tels que l'effet Lense-Thirring, la perturbation orbitale due à la rotation d'un corps, et l'effet Sitter, un mouvement séculaire du périhélie et du nœud de l'orbite de la lune^{8 9}, mais les perspectives de les détecter étaient encore faibles.¹⁰

Un autre domaine d'essai pour l'observation de la relativité générale était la cosmologie, prédisant l'explosion primordiale appelée le « Big Bang » et l'expansion subséquente de l'Univers, mais à la fin des années 1950 les observations cosmologiques ne pouvaient pas distinguer les différentes théories de la gravité.¹¹

Entre-temps, une « prolifération » de théories alternatives de gravité concurrentes de la relativité générale est apparue. En 1960, il existait au moins 25 théories alternatives de ce type.¹²

Selon Will, jusqu'en 1960 la relativité générale était empiriquement appuyée par un test de précision modérée (changement de périhélie, environ 1%), un test de faible précision (distorsion de la lumière, environ 50%), un test non concluant (décalage gravitationnel vers le rouge) et des observations cosmologiques qui ne pouvaient pas distinguer entre différentes théories. C'est

⁷ L. I. Schiff, « On Experimental Tests of the General Theory of Relativity », *American Journal of Physics* 28, n° 4 (1 avril 1960): 340-43, <https://doi.org/10.1119/1.1935800>.

⁸ Josef Lense et Hans Thirring, « Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie », *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918): 156-63, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L>.

⁹ W. de Sitter, « On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 décembre 1916): 77, 155-84, <https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155>.

¹⁰ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

¹¹ 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): chap. 14, [https://doi.org/10.1016/0083-6656\(65\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4).

¹² C. DeWitt, *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*, Second Printing edition (Gordon & Breach, 1965), 165-313.

ce que Lakatos a appelé la « période stationnaire ». En raison de ses confirmations expérimentales limitées, la relativité générale a même été retirée de la physique de base.¹³

La période de 1960 à 1980 a été la période de maturité de la relativité générale: de nouvelles méthodes de test de haute précision ont été développées qui comprenaient de nouveaux tests, tels que la précession gyroscopique, le retard de la lumière et l'« effet Nordtvedt » dans le mouvement mensuel, y compris les observations astrophysiques et satellites artificiels.

En raison de la prolifération des théories alternatives, un meilleur cadre théorique était nécessaire pour comparer les vérifications des différentes expériences, classer les théories et comparer leurs prédictions avec les résultats des expériences de manière systématique.

- Année
 - Résultats expérimentaux ou observationnels
 - Résultats théoriques
- 1960
 - Anisotropie de Hughes-Drever de la masse
 - Les travaux de Penrose sur les spinors
 - Expérience Pound-Rebka du décalage gravitationnel vers le rouge
 - Précision gyroscopique (Schiff)
 - Théorie de Brans-Dicke
- 1962
 - Découverte des sources de rayons X non solaires
 - Formule de Bondi pour la perte de masse
 - Découverte du décalage gravitationnel vers le rouge des quasars
 - Découverte de la métrique Kerr
- 1964
 - Eotvos Experiment, Princeton
 - Retard dans le temps de la lumière (Shapiro)
 - L'expérience Pound-Snider du décalage gravitationnel vers le rouge
 - Les théorèmes de singularité en relativité générale
 - La découverte du fond micro-ondes 3K
- 1966
 - Détection d'aplatissement solaire
 - Production des éléments dans le Big Bang
 - Découverte des pulsars
- 1968
 - Mesures avec le radar planétaires pour la retard du temps
 - Effet Nordtvedt et premier cadre PPN
 - Lancement des Mariners 6 et 7
 - Écho laser lunaire
 - Premières mesures de déviation radio
- 1970
 - CygX1: un candidat au trou noir
 - Effets de cadre préféré
 - Mesures de temporisation à l'aide de Mariners 6 et 7

¹³ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

- Cadre PPN raffiné
- Augmenter de la surface des trous noirs en relativité générale
- 1972
 - L'expérience Eotvos, Moscou
- 1974
 - La découverte des pulsars binaires
 - Evaporation quantique des trous noirs
 - Rayonnement gravitationnel dipolaire dans des théories alternatives
- 1976
 - Expériences de déplacement gravitationnel vers le rouge avec des fusées
 - Test lunaire de l'effet Nordtvedt
 - Résultats de temporisation obtenus avec Mariner 9 et Viking
- 1978
 - Mesures de la décroissance de la période orbitale du pulsar binaire SS 433
- 1980
 - La découverte des lentilles gravitationnelles

Tableau 2.2 Chronologie des tests de vérification de la théorie de la relativité générale entre 1960-80. Source: Clifford M. Will, Theory and Experiment in Gravitational Physics¹⁴

Robert Dicke a effectué plusieurs expériences de nullité de haute précision pour confirmer les théories de la gravité¹⁵. Dicke a conclu que les expériences gravitationnelles peuvent être divisées en deux classes:

1. Une qui teste la base de la théorie de la gravité (par exemple, le principe d'équivalence): l'expérience Eotvôs, l'expérience Hughes-Drever, l'expérience du déplacement gravitationnel vers le rouge, etc.), vérifiant que la gravité est un phénomène spatio-temporel courbe (décrit par une « théorie métrique » de la gravité). La relativité générale et la théorie de Brans-Dick sont des exemples de théories métriques de la gravité.
2. La deuxième classe qui teste les théories métriques de la gravité: le formalisme post-newtonien paramétré, ou PPN, initié par Kenneth Nordtvedt, Jr. ¹⁶, et développé et amélioré par Will¹⁷. PPN prend en compte les faibles vitesses et les champs faibles (limite post-newtonienne) des théories métriques, sur la base d'un ensemble de 10 paramètres réels. Le PPN a été utilisé pour analyser les expériences gravitationnelles du système solaire, pour découvrir et analyser de nouveaux tests de la théorie de la gravité, tels que l'effet Nordtvedt, les effets de cadre préféré et les effets de

¹⁴ Will.

¹⁵ DeWitt, *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*, 165-313.

¹⁶ Kenneth Nordtvedt, « Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory », *Physical Review* 169, n° 5 (25 mai 1968): 1017-25, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017>.

¹⁷ 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 janvier 1971, 163, 611-28, <https://doi.org/10.1086/150804>.

localisation préféré, et pour analyser et classer des mesures alternatives de la gravité, devenant l'outil théorique standard pour ces expériences, recherches et études.

Au milieu des années 1970, de nombreuses théories alternatives de la gravité ont été confirmées par des expériences au niveau du système solaire, mais pas au niveau cosmologique. En 1974, Joseph Taylor et Russell Hulse ont découvert le pulsar binaire¹⁸, dont les impulsions extrêmement stables ont été surveillées par radiotélescope, permettant une mesure précise des paramètres astrophysiques. En 1978, le taux de changement de la période orbitale du système a été mesuré, ce qui a été confirmé par la relativité générale mais pas par la plupart des théories alternatives.

Dans l'**expérience Michelson-Morley**, Michelson a testé les théories contradictoires de Fresnel et Stokes sur l'influence de l'éther.^{19 20} Stokes pensait initialement que les deux théories étaient équivalentes sur le plan de l'observation, les deux théories expliquant l'aberration de la lumière. Michelson a soutenu que son expérience de 1881 était une expérience cruciale qui démontrait la théorie de Stokes. Lorentz a souligné que Michelson avait « mal interprété » les faits et que les calculs de Michelson étaient erronés. Michelson, avec Morley, a décidé de répéter l'expérience « à des intervalles de trois mois et d'éviter ainsi toute incertitude »²¹, leur conclusion rejetant l'explication de Fresnel. Lorentz a également remis en question la nouvelle expérience: « La signification de l'expérience de Michelson-Morley est plutôt qu'elle peut nous apprendre quelque chose sur les changements des dimensions. » En 1897, Michelson a fait une nouvelle expérience, concluant que le résultat de l'expérience était « improbable » et a décidé qu'en 1887 il avait tort: la théorie de Stokes devait être rejetée et celle de Fresnel devait être acceptée.

Fitzgerald, indépendant de Lorentz, a produit une version testable qui a été rejetée par les expériences de Trouton, Rayleigh et Brace car elle était théoriquement progressive, mais pas empirique, la théorie de Fitzgerald étant considérée comme *ad hoc* (qu'il n'y a « aucune preuve indépendante » [positif] pour elle)²². Einstein, ignorant ces expériences, mais stimulé par les critiques de Mach à l'égard de la mécanique newtonienne, est venu à un nouveau programme

¹⁸ R. A. Hulse et J. H. Taylor, « Discovery of a pulsar in a binary system », *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 janvier 1975): L51-53, <https://doi.org/10.1086/181708>.

¹⁹ A. Fresnel, « Lettre à François Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes optiques », in *Annales de chimie et de physique - 98 Years available - Gallica*, 1818, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN>.

²⁰ George Gabriel Stokes, *On Fresnel's Theory of the Aberration of Light* (London, 1846), 76-81.

²¹ 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), 1038-52, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.

²² Joseph Larmor, *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904, 624.

de recherche progressive²³, qui a « prédit » et expliqué le résultat de l'expérience de Michelson-Morley, mais a également prédit une vaste gamme de faits non découverts auparavant, qui ont obtenu des corroborations spectaculaires. Ainsi, seulement vingt-cinq ans plus tard, l'expérience Michelson-Morley est devenue une expérience cruciale, considérée comme « la plus grande expérience négative de l'histoire des sciences »^{24 25}, démontrant la tolérance méthodologique préconisée par Lakatos.

Dans ce contexte, un signal typique de la dégénérescence d'un programme est la prolifération de « faits » contradictoires. En utilisant une fausse théorie comme théorie interprétative, on peut obtenir - sans commettre une « erreur expérimentale » - des propositions factuelles contradictoires, des résultats expérimentaux incohérents²⁶. Michelson lui-même était frustré par l'incohérence des « faits » résultant de ses mesures.

Carlton Morris Caves a proposé six expériences de laboratoire possibles pour la gravité non newtonienne: trois utilisent une balance de torsion comme détecteur et trois utilisent un cristal diélectrique à haute sensibilité²⁷. L'idée de Caves est de démontrer que la technologie rendra bientôt possible une nouvelle classe d'expériences, exclusivement en laboratoire. La conclusion de Caves est qu'aucune de ces expériences ne serait facile à faire, en raison des limites de la technologie actuelle. Mais la plupart sont réalisables dans un avenir proche.

Les effets forts de la gravité sont observés astrophysiquement (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs), auquel cas ils sont utilisés, comme tests expérimentaux, la stabilité des naines blanches, la vitesse de rotation des pulsars, les orbites des pulsars binaires, l'existence d'un horizon de trous noirs, et ainsi de suite.

Récemment, une série de tests cosmologiques ont été développés pour les théories de la matière noire, en utilisant pour les contraintes la rotation de la galaxie, la relation de Tully-Fisher, la vitesse de rotation des galaxies naines et les lentilles gravitationnelles.

Pour les théories liées à l'inflation cosmique, le test le plus rigoureux consiste à mesurer la taille des ondes dans le spectre du rayonnement de fond micro-ondes cosmique.²⁸

²³ Karl Raimund Popper, *The Logic of Scientific Discovery* (Psychology Press, 2002).

²⁴ J. D. Bernal, *Science in History* J. D. Bernal, 3rd edition (M.I.T Press, 1965).

²⁵ Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers* (Cambridge University Press, 1980).

²⁶ Lakatos.

²⁷ Carlton Morris Caves, « Theoretical investigations of experimental gravitation » (phd, California Institute of Technology, 1979), <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.

²⁸ La fonction potentielle, qui est cruciale pour déterminer la dynamique de l'inflation, est simplement postulée et non dérivée d'une théorie physique sous-jacente.

Pour les théories de l'énergie noire, les résultats de la luminosité de la supernova et de l'âge de l'univers peuvent être utilisés comme tests.

Il existe de grandes différences dans les prévisions entre la relativité générale et la physique classique, telles que la dilatation du temps gravitationnelle, la lentille gravitationnelle, le décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière, etc. Et il existe de nombreuses théories relativistes de la gravité, bifurquées ou indépendantes, mais la théorie générale de la relativité d'Einstein a confirmé toutes les prédictions et est la plus simple de ces théories.

Bibliographie

- Bernal, J. D. *Science in History* J. D. Bernal. 3rd edition. M.I.T Press, 1965.
- Caves, Carlton Morris. « Theoretical investigations of experimental gravitation ». Phd, California Institute of Technology, 1979. <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- DeWitt, C. *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*. Second Printing edition. Gordon & Breach, 1965.
- Fresnel, A. « Lettre a Francois Arago sur L'Influence du Mouvement Terrestre dans quelques Phenomenes Optiques, in Annales de chimie et de physique - 98 Years available - Gallica », 1818. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN>.
- Hulse, R. A., et J. H. Taylor. « Discovery of a pulsar in a binary system ». *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 janvier 1975): L51-53. <https://doi.org/10.1086/181708>.
- Lakatos, Imre. *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.
- Larmor, Joseph. *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904.
- Lense, Josef, et Hans Thirring. « Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie ». *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918). <http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L>.
- 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.
- Matthews, Thomas A., et Allan R. Sandage. « Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects. » *The Astrophysical Journal* 138 (1 juillet 1963): 30. <https://doi.org/10.1086/147615>.
- Nordtvedt, Kenneth. « Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory ». *Physical Review* 169, n° 5 (25 mai 1968): 1017-25. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017>.
- Popper, Karl Raimund. *The Logic of Scientific Discovery*. Psychology Press, 2002.
- Pound, R. V., et G. A. Rebka. « Apparent Weight of Photons ». *Physical Review Letters* 4, n° 7 (1 avril 1960): 337-41. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>.
- Schiff, L. I. « On Experimental Tests of the General Theory of Relativity ». *American Journal of Physics* 28, n° 4 (1 avril 1960): 340-43. <https://doi.org/10.1119/1.1935800>.
- Shapiro, Irwin I. « Fourth Test of General Relativity ». *Physical Review Letters* 13, n° 26 (28 décembre 1964): 789-91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.
- Sitter, W. de. « On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 décembre 1916): 155-84. <https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155>.
- Smith, W. B. « Radar observations of Venus, 1961 and 1959 ». *The Astronomical Journal* 68 (1 février 1963): 15. <https://doi.org/10.1086/108904>.
- Stokes, George Gabriel. *On Fresnel's Theory of the Aberration of Light*. London, 1846.
- 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, 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 janvier 1971. <https://doi.org/10.1086/150804>.

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