

Tests proposés par Einstein et des théories post-einsteiniennes

Nicolae Sfetcu

08.01.2020

Sfetcu, Nicolae, « Tests proposés par Einstein et des théories post-einsteiniennes », SetThings (8 janvier 2020), URL = <https://www.setthings.com/fr/tests-proposees-par-einstein-et-des-theories-post-einsteiniennes/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NonCommercial 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/>

TESTS PROPOSÉS PAR EINSTEIN 2

TESTS DES THÉORIES POST-EINSTEINIENNES 5

BIBLIOGRAPHIE 10

Tests proposés par Einstein

Einstein déclare, dans *Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală*¹, que les théories évoluent à travers des déclarations basées sur l'observation, sous la forme de lois empiriques, à partir desquelles des lois générales sont obtenues. L'intuition et la pensée déductive jouent un rôle important dans ce processus. Après la phase initiale, l'investigateur développe un système de pensée guidée par des données empiriques, construit logiquement à partir d'hypothèses fondamentales (axiomes). La « vérité » d'une théorie résulte de sa corrélation avec un grand nombre d'observations uniques. Pour les mêmes données empiriques, plusieurs théories peuvent différer.

Einstein parle, dans *Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală*, de la prédiction confirmée de la relativité générale (RG) pour le mouvement du *périhélie* de Mercure, avec une précision bien supérieure à celle prédite par la loi de Newton sur la gravité universelle.
2

Une autre prédiction confirmée discutée par Einstein est la *déviaton de la lumière* par un champ gravitationnel, qui admet un test expérimental par enregistrement photographique des étoiles pendant une éclipse solaire totale, ainsi : les étoiles au voisinage du soleil sont photographiées pendant une éclipse solaire. La deuxième photo des mêmes étoiles est prise lorsque le soleil est dans une position différente sur le ciel, quelques mois plus tôt ou plus tard. En comparant les positions des étoiles, elles devraient apparaître radialement vers l'extérieur. La British Royal Society et la Royal Astronomical Society ont effectué ces tests sur deux expéditions, à Sobral (Brésil) et sur l'île Principe (Afrique de l'Ouest), confirmant la prédiction.

Le déplacement des lignes spectrales vers le rouge a également été prédit par la relativité générale et discuté par Einstein dans le même livre, mais lorsque ce livre a été écrit, il n'avait pas encore été confirmé. Des expériences ont été menées sur des bandes cyanogènes, mais les résultats n'ont pas été concluants pendant cette période. Einstein a proposé une vérification du déplacement moyen des raies vers la limite la moins réfractaire du spectre, à travers des investigations statistiques des étoiles fixes.

Dans la deuxième édition du livre *Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală*³, Einstein déclare qu'en développant sa théorie du « problème cosmologique », il s'est appuyé sur deux hypothèses :

1. Il y a une densité moyenne de matière dans tout l'espace, qui est partout la même et différente de zéro.

¹ Albert Einstein, *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală* (Nicolae Sfetcu, 2017), <https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ>.

² Einstein.

³ Einstein.

2. La taille (« rayon ») de l'espace est indépendante du temps.

Les hypothèses se sont révélées conformes à la théorie générale de la relativité après l'introduction d'un terme hypothétique dans les équations de champ (« le terme cosmologique des équations de champ »). Par la suite, Einstein est parvenu à la conclusion que l'on peut garder l'hypothèse (1) sans faire appel à ce terme, si l'on peut renoncer à l'hypothèse (2) respectivement les équations initiales du champ admettent une solution dans laquelle le « rayon du monde » dépend du temps (l'expansion de l'espace), permettant ainsi l'expansion de l'espace.

Hubble, à travers une enquête sur les nébuleuses extra-galactiques, a confirmé que les raies spectrales émises montraient un décalage vers le rouge proportionnel à la distance entre les nébuleuses.

Pour Einstein, l'approche épistémologique des expériences de pensée revêtait une importance particulière. Ces expériences, par la manière dont elles ont été développées, ont offert une nouvelle compréhension des phénomènes discutés.

À seize ans, Einstein a imaginé ce qui se passerait **si un faisceau de lumière est suivi la vitesse de la lumière**⁴. L'expérience est plus difficile qu'il n'y paraît à première vue. Einstein cherchait, à cette époque, un « principe universel » qui pouvait conduire à une véritable connaissance. L'expérience commence avec l'hypothèse de suivre une onde lumineuse à la vitesse c . Dans ce cas d'égale amplitude des vitesses, le « surfeur » observera une onde lumineuse « gelée », avec le rayonnement lumineux comme un champ électromagnétique statique oscillant statique, et les propriétés de l'onde disparaîtraient. Mais ce champ indépendant du temps n'existe pas, car il n'est pas conforme à la théorie de Maxwell. Sa conclusion serait qu'un observateur ne peut jamais atteindre la vitesse de la lumière, l'hypothèse étant fautive par *modus tollens* dans la logique classique. Einstein a déclaré que cette expérience contient un paradoxe en ce que les deux hypothèses incluses (la constance de la vitesse de la lumière et l'indépendance des lois (donc aussi la constance de la vitesse de la lumière) du choix du système inertiel (le principe de la relativité restreinte)) sont « mutuellement incompatibles (malgré le fait que les deux sont prises séparément sont basés sur l'expérience) ».

En septembre 1905, Einstein a tenté d'étendre le principe de la relativité aux systèmes de référence accélérés en introduisant un nouveau principe physique puissant en 1907, le « principe d'équivalence » (les lois de la physique prennent la même forme dans un système uniforme d'accélération des coordonnées que dans un système qui est au repos par rapport à un champ gravitationnel homogène), avec une valeur heuristique très élevée⁵. Il a défendu ce principe à travers « **l'expérience de la pensée de l'ascenseur** », parfois considérée comme l'expérience

⁴ Albert Einstein, « Autobiographische Skizze », in *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, éd. par Carl Seelig (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956), 9-17, https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.

⁵ Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005), 179-80.

de pensée la plus importante d'Einstein. Einstein suppose un cadre de référence accéléré avec une accélération constante dans la direction x , et un deuxième cadre au repos dans un champ gravitationnel homogène qui donne à tous les objets une accélération dans la même direction x . Sur le plan observationnel, il n'y a pas de distinction entre les deux cadres. Tous les corps sont accélérés dans le même champ gravitationnel. Ainsi, le principe d'équivalence permet de remplacer un champ gravitationnel homogène par un système de référence uniformément accéléré. Cette hypothèse de l'équivalence physique exacte des deux cadres a deux conséquences théoriques importantes : on ne peut pas parler d'une accélération absolue du système de référence, et la chute égale de tous les corps dans un champ gravitationnel.

Tests des théories post-einsteiniennes

Avec l'aide du formalisme PPN, les théories de la gravité sont confrontées aux résultats d'expériences dans le système solaire. Le paramètre γ dans ce formalisme met en évidence la déviation de la lumière et le retard de la lumière. Par des calculs selon PPN, la *déviaton de la lumière* est obtenue par rapport aux lignes droites locales, par rapport aux tiges rigides ; en raison de la courbure de l'espace autour du Soleil, déterminée par le paramètre γ , les lignes locales droites sont courbées par rapport aux lignes droites asymptotiques à l'écart du Soleil. Le développement de l'interférométrie radioélectrique de base très longue (VLBI) a amélioré la mesure de la déviation de la lumière, permettant des observations VLBI transcontinentales et intercontinentales des quasars et des radio galaxies pour surveiller la rotation de la Terre⁶. Le satellite d'astrométrie optique Hipparcos a permis d'améliorer les performances.⁷

Les tests de *retard de la lumière* sont basés sur un signal radar envoyé sur le système solaire le long du Soleil vers une planète ou un satellite et qui, lors de son retour sur Terre, subit un retard non newtonien supplémentaire. Irwin Shapiro a découvert cet effet en 1964. Les cibles utilisées comprennent des planètes comme Mercure ou Vénus, comme réflecteurs passifs de signaux radar (radar passif), et des satellites artificiels tels que Sailors 6 et 7, Voyager 2, Viking Mars et le vaisseau spatial Cassini à Saturne, utilisé comme émetteurs de signaux radar actifs⁸. Kopeikin a suggéré, en 2001, de mesurer le retard de la lumière d'un quasar au moment du passage de la planète Jupiter⁹, mesurant ainsi la vitesse de l'interaction gravitationnelle. En 2002, des mesures précises du retard Shapiro¹⁰ ont été effectuées. Mais plusieurs auteurs ont souligné que cet effet ne dépend pas de la vitesse de propagation de la gravité, mais uniquement de la vitesse de la lumière.¹¹

⁶ S. S. Shapiro et al., « Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999 », *Physical Review Letters* 92, n° 12 (26 mars 2004): 121101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101>.

⁷ François Mignard et F. Arenou, « Determination of the ppn parameter with the hipparcos data », 1997.

⁸ Clifford M. Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment », *Living Reviews in Relativity* 17, n° 1 (décembre 2014): 4, <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

⁹ Sergei M. Kopeikin, « Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry », *The Astrophysical Journal* 556, n° 1 (2001): L1-5, https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY.

¹⁰ E. B. Fomalont et S. M. Kopeikin, « The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results », *The Astrophysical Journal* 598, n° 1 (20 novembre 2003): 704-11, <https://doi.org/10.1086/378785>.

¹¹ Fintan D. Ryan, « Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments », *Physical Review D* 52, n° 10 (15 novembre 1995): 5707–5718, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707>.

L'explication des *anomalies de l'orbite de Mercure* est depuis longtemps un problème non résolu, un demi-siècle depuis l'annonce de Le Verrier en 1859. Plusieurs hypothèses *ad hoc* ont été testées pour expliquer cette incohérence avec la théorie, y compris l'existence d'une nouvelle planète Vulcaine près du Soleil, un anneau de planétoïdes, un moment solaire quadrupolaire et une déviation du carré inverse dans la loi de la gravité, mais toutes ces hypothèses ont échoué. La relativité générale a naturellement résolu ce problème.

Une autre classe d'expériences au niveau du système solaire pour la gravité vérifie le *principe d'équivalence fort* (PEF). La violation de PEF peut être testée en violant le principe d'équivalence faible pour les corps gravitationnels conduisant à des perturbations dans l'orbite Terre-Lune, l'emplacement préféré et les effets du cadre préféré dans la constance gravitationnelle mesurée localement qui pourraient produire des effets géophysiques observables et les variations possibles de la constante gravitationnelle sur le temps cosmologique.¹²

Nordtvedt¹³ a également déclaré que de nombreuses théories métriques sur la gravité prédisent que les corps massifs violent le *principe d'équivalence faible* (tombant avec différentes accélérations, en fonction de leur énergie gravitationnelle). Dicke¹⁴ note que cet effet (« l'effet Nordtvedt ») se produit dans les théories avec une constante gravitationnelle spatialement variable, comme la gravité tenseur-scalaire. L'effet Nordtvedt n'est pas remarqué dans les résultats des expériences de laboratoire, pour les objets de dimensions de laboratoire. Les analyses de données n'ont trouvé aucune preuve, dans l'incertitude expérimentale, de l'effet Nordtvedt¹⁵. Dans le RG, l'effet Nordtvedt disparaît.¹⁶

Certaines théories violent le principe de l'équivalence faible en prédisant que les résultats des expériences gravitationnelles locales peuvent dépendre de la vitesse du laboratoire par rapport au cadre de repos moyen de l'univers (les *effets du cadre préféré*, correspondant aux paramètres

¹² Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

¹³ Kenneth Nordtvedt, « Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology », ResearchGate, 1968, 1014-16, https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology.

¹⁴ P. G. Roll, R. Krotkov, et R. H. Dicke, « The equivalence of inertial and passive gravitational mass », *Annals of Physics* 26 (1 février 1964): 26, 442–517, [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(64\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3).

¹⁵ James G. Williams, Slava G. Turyshev, et Dale H. Boggs, « Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity », *Physical Review Letters* 93, n° 26 (29 décembre 2004): 261101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101>.

¹⁶ Kenneth Nordtvedt, « The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging », ResearchGate, 1995, 51–62, 114, https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging.

PPN α_1 , α_2 et α_3) ou à l'emplacement du laboratoire par rapport à un corps gravitationnel à proximité (*effets de localisation préférés*, certains étant régis par le paramètre PPN ζ)¹⁷. Les effets consistent en variations et anisotropies de la valeur localement mesurée de la constante gravitationnelle conduisant à l'apparition de valeurs anormales de la Terre et de variations de la vitesse de rotation de la Terre, de contributions anormales à la dynamique orbitale des planètes et de la Lune, d'auto-accélération des impulsions et des moments anormaux du Soleil qui déterminerait l'orientation aléatoire de son axe de rotation vers l'écliptique.¹⁸

La plupart des théories qui violent le principe d'équivalence faible prédisent une variation de la constante gravitationnelle newtonienne mesurée localement, en fonction du temps.

D'autres tests pour vérifier les théories gravitationnelles sont basés sur le *gravitomagnétisme* (la matière en mouvement ou en rotation produit un champ gravitationnel supplémentaire analogue au champ magnétique d'une charge en mouvement ou d'un dipôle magnétique). Les effets relativistes mesurables concernent le système Terre-Lune et les systèmes des pulsars binaires.¹⁹

Les expériences au *gyroscope* tentent de détecter cette précession des cadres ou l'effet Lense-Thirring. Une autre façon de tester la précession Lense-Thirring consiste à mesurer la précision des plans orbitaux des corps qui tournent sur un corps en rotation, en mesurant la précession relative²⁰. Le système Terre-Lune peut être considéré comme un « gyroscope », avec l'axe perpendiculaire au plan orbital.

Une valeur non nulle pour l'un des paramètres PPN ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 et α_3 entraînerait une violation de la *conservation* de la quantité de mouvement ou de la troisième loi de Newton dans les systèmes gravitationnels. Un test pour la troisième loi de Newton pour les systèmes gravitationnels a été effectué en 1968 par Kreuzer, dans lequel l'attraction gravitationnelle du fluor et du brome a été comparée avec une précision de 5 parties sur 10^5 . Un test planétaire a été rapporté par Bartlett et van Buren²¹. Une autre conséquence de la violation de la conservation de la quantité de mouvement est une auto-accélération du centre de masse d'un système binaire stellaire.

¹⁷ Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

¹⁸ Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

¹⁹ K. Nordtvedt, « Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites », *Physical Review Letters* 61, n° 23 (5 décembre 1988): 61, 2647–2649, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647>.

²⁰ John C Ries et al., « Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission », s. d., 7.

²¹ D. F. Bartlett et Dave Van Buren, « Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon », *Physical Review Letters* 57, n° 1 (7 juillet 1986): 21–24, 57, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21>.

Le formalisme PPN n'est plus valable pour les champs gravitationnels puissants (étoiles à neutrons, trous noirs), mais dans certains cas, des approximations post-newtoniennes peuvent être faites. Les systèmes dans des champs gravitationnels forts sont affectés par l'émission de rayonnement gravitationnel. Par exemple, un mouvement orbital relativiste (fusion ou effondrement de systèmes d'étoiles à neutrons binaires ou de trous noirs dans la phase finale) peut être détecté par un réseau d'observateurs avec des ondes d'interférence gravitationnelles avec un interféromètre laser, mais l'analyse se fait en utilisant différentes techniques.

Seuls deux paramètres peuvent être utilisés pour observer la génération et le déplacement des ondes gravitationnelles : la quantité de mouvement de masse et le moment angulaire. Les deux quantités peuvent être mesurées, en principe, en examinant le champ gravitationnel externe des corps sans aucune référence à leur intérieur. Damour²² appelle cela un « effacement » de la structure interne du corps.

Une autre façon de vérifier l'accord avec la RG est de comparer la phase observée de l'orbite avec la phase théorique du modèle en fonction du temps.

L'observation des ondes gravitationnelles peut fournir les moyens de tester les prévisions relativistes générales pour la polarisation et la vitesse des ondes, pour amortir le rayonnement gravitationnel et pour la gravité des champs forts, en utilisant des détecteurs d'ondes gravitationnelles avec interféromètre ou bande résonante. Les interféromètres laser à large bande sont particulièrement sensibles à l'évolution des phases des ondes gravitationnelles, qui véhiculent des informations sur l'évolution de la phase orbitale.

Une autre possibilité implique des ondes gravitationnelles d'une petite masse orbitant en spirale dans un trou noir.²³

L'un des problèmes pris en compte par les physiciens dans les tests de la RG dans le champ fort est la possibilité de contamination par une physique incertaine ou complexe. Par exemple, quelques secondes après le Big Bang, la physique est relativement claire, mais certaines théories de la gravité ne parviennent pas à produire des cosmologies qui répondent même aux exigences minimales pour la nucléosynthèse du big-bang ou aux propriétés du fond cosmique des micro-ondes²⁴. Mais, dans de modestes incertitudes, on peut évaluer la différence quantitative entre

²² T. Damour, « The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity. », in *Three Hundred Years of Gravitation*, 1987, 128-98, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D>.

²³ Ryan, « Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments », 52, 5707–5718.

²⁴ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, chap. 13.2.

les prédictions et les autres théories dans des conditions de champ fortes en les comparant aux observations.²⁵

²⁵ Clifford M. Will, *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*, 2 edition (New York, NY: Basic Books, 1993).

Bibliographie

- Bartlett, D. F., et Dave Van Buren. « Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon ». *Physical Review Letters* 57, n° 1 (7 juillet 1986): 21-24. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21>.
- Damour, T. « The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity. » In *Three Hundred Years of Gravitation*, 128-98, 1987. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D>.
- Einstein, Albert. « Autobiographische Skizze ». In *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, édité par Carl Seelig, 9-17. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956. https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.
- . *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală*. Nicolae Sfetcu, 2017. <https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ>.
- Fomalont, E. B., et S. M. Kopeikin. « The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results ». *The Astrophysical Journal* 598, n° 1 (20 novembre 2003): 704-11. <https://doi.org/10.1086/378785>.
- Kopeikin, Sergei M. « Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry ». *The Astrophysical Journal* 556, n° 1 (2001): L1-5. https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY.
- Mignard, François, et F. Arenou. « Determination of the ppn parameter with the hipparcos data », 1997.
- Nordtvedt, K. « Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites ». *Physical Review Letters* 61, n° 23 (5 décembre 1988): 2647-49. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647>.
- Nordtvedt, Kenneth. « Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology ». ResearchGate, 1968. https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology.
- . « The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging ». ResearchGate, 1995. https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging.
- Pais, Abraham. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
- Ries, John C, Richard J Eanes, Byron D Tapley, et Glenn E Peterson. « Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission », s. d., 7.
- Roll, P. G., R. Krotkov, et R. H. Dicke. « The equivalence of inertial and passive gravitational mass ». *Annals of Physics* 26 (1 février 1964): 442-517. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(64\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3).
- Ryan, Fintan D. « Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments ». *Physical Review D* 52, n° 10 (15 novembre 1995): 5707-18. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707>.
- Shapiro, S. S., J. L. Davis, D. E. Lebach, et J. S. Gregory. « Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999 ». *Physical Review Letters* 92, n° 12 (26 mars 2004): 121101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101>.
- Will, Clifford M. « The Confrontation between General Relativity and Experiment ». *Living Reviews in Relativity* 17, n° 1 (décembre 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.
- . *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*. 2 edition. New York, NY: Basic Books, 1993.
- Williams, James G., Slava G. Turyshev, et Dale H. Boggs. « Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity ». *Physical Review Letters* 93, n° 26 (29 décembre 2004): 261101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101>.