

# Tests gravitationnels en champ fort

Nicolae Sfetcu

20.01.2020

Sfetcu, Nicolae, « Tests gravitationnels en champ fort », SetThings (20 janvier 2020), URL = <https://www.setthings.com/fr/tests-gravitationnels-en-champ-fort/>

Email: [nicolae@sfetcu.com](mailto: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/>

## Sommaire

<b><u>LENTILLES GRAVITATIONNELLES .....</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b><u>ONDES GRAVITATIONNELLES.....</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b><u>PULSARS DE SYNCHRONISATION .....</u></b>	<b><u>10</u></b>
<b><u>ENVIRONNEMENTS EXTRÊMES .....</u></b>	<b><u>11</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE.....</u></b>	<b><u>12</u></b>

Lorsque la densité du corps devient suffisamment importante, la relativité générale prédit la formation d'un trou noir. Les étoiles à neutrons d'environ 1,4 masses solaires et les trous noirs sont l'état final de l'évolution des étoiles massives<sup>1</sup>. Habituellement, un trou noir dans une galaxie a joué un rôle important dans sa formation et les structures cosmiques associées. De tels corps fournissent un mécanisme efficace pour l'émission de rayonnement électromagnétique<sup>2</sup> et la formation de microquasars<sup>3</sup>. L'accrétion peut conduire à des jets relativistes. La relativité générale permet la modélisation de ces phénomènes<sup>4</sup>, confirmée par des observations.

Les trous noirs sont les zones où les ondes gravitationnelles sont recherchées, parfois formées par la combinaison des étoiles binaires avec des trous noirs, détectés sur Terre ; la phase de pré-fusion ("chirp") peut être utilisée comme "éclairage standard" pour déduire la distance jusqu'aux événements de fusion, servant de preuve de l'expansion cosmique sur de longues distances<sup>5</sup>. Lorsqu'un trou noir rejoint un autre trou noir supermassif, il peut fournir des informations directes sur la géométrie du trou noir supermassif.<sup>6</sup>

En février 2016 et plus tard en juin 2016, juin 2017 et août 2017, Advanced LIGO a annoncé qu'il avait directement détecté les ondes gravitationnelles d'une fusion d'étoiles avec le trou noir<sup>7</sup>. Les ondes gravitationnelles peuvent être détectées directement, et de nombreux aspects de l'Univers peuvent être trouvés dans leur étude. L'astronomie des ondes gravitationnelles vise

---

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

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

<sup>3</sup> Annalisa Celotti, John C. Miller, et Dennis W. Sciama, « Astrophysical evidence for the existence of black holes », *Classical and Quantum Gravity* 16, n° 12A (1 décembre 1999): A3–A21, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.

<sup>4</sup> José A. Font, « Numerical Hydrodynamics in General Relativity », *Living Reviews in Relativity* 6, n° 1 (19 août 2003): 2, <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-4>.

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

<sup>6</sup> Leor Barack et Curt Cutler, « LISA capture sources: Approximate waveforms, signal-to-noise ratios, and parameter estimation accuracy », *Physical Review D* 69, n° 8 (30 avril 2004): 082005, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.082005>.

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

à tester la relativité générale et des théories alternatives, à vérifier la forme prédite des ondes et leur conformité avec les solutions des équations de champ.<sup>8</sup>

D'autres tests pour la gravité forte permettent d'observer le décalage gravitationnel vers le rouge de la lumière de l'étoile S2 en orbite autour du trou noir supermassif Sagittaire A\* au centre de la Voie lactée, à l'aide du très grand télescope utilisant GRAVITY, NACO et SIFONI.<sup>9</sup>

Le principe d'équivalence fort de la relativité générale pour les corps à autogravité forte a été testé à l'aide d'un système à trois étoiles appelé PSR J0337+1715, composé d'une étoile à neutrons avec une étoile naine blanche située à environ 4200 années-lumière de la Terre qui orbite avec une autre étoile naine blanche éloignée. Les observations, avec une grande précision, comparent la manière dont l'attraction gravitationnelle de la naine blanche extérieure affecte le pulsar qui a une forte autogravité et la naine blanche intérieure. Les résultats ont confirmé la théorie générale de la relativité.<sup>10</sup>

---

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

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

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

## Lentilles gravitationnelles

Lorsqu'un corps astronomique massif se trouve entre l'observateur et un corps distant avec une masse et une distance appropriées, plusieurs images déformées du corps distant peuvent être vues, formant l'effet connu sous le nom de lentilles gravitationnelles<sup>11</sup>, deux images ou plus ont la forme d'un anneau lumineux connu sous le nom d'anneau d'Einstein ou d'anneaux partiels (arches)<sup>12</sup>. La première observation de ce type remonte à 1979<sup>13</sup>. L'effet peut être mesuré en fonction de la luminosité du corps éloigné. Les lentilles gravitationnelles permettent de détecter la présence et la distribution de matière noire, étant une sorte de "téléscope naturel" pour observer des galaxies éloignées et obtenir une estimation indépendante de la constante de Hubble. Leurs évaluations statistiques fournissent des informations sur l'évolution structurelle des galaxies<sup>14</sup>. La lentille gravitationnelle devrait compléter les observations dans le spectre électromagnétique<sup>15</sup>, fournir des informations sur les trous noirs, les étoiles à neutrons et les naines blanches, et sur les processus dans les supernovae et l'univers immédiatement après le Big Bang, y compris la théorie des cordes de la gravité quantique.<sup>16</sup>

Des lentilles gravitationnelles se forment également au niveau du système solaire, le Soleil étant interposé entre l'observateur et la source distante de lumière, mais le point de convergence de ces lentilles serait à environ 542 UA du Soleil. Cette distance, cependant, dépasse les capacités de l'équipement de sonde et va bien au-delà du système solaire.

Les sources de lentilles gravitationnelles sont des sources radio très éloignées, en particulier certains quasars. Pour la détection, les radiotélescopes séparés par de grandes distances combinés en utilisant la technique d'interférométrie de base très longue sont utilisés. Pour plus de précision, sont considérés les effets systématiques au niveau de la Terre, où les télescopes

---

<sup>11</sup> Joachim Wambsganss, « Gravitational Lensing in Astronomy », *Living Reviews in Relativity* 1, n° 1 (2 novembre 1998): 12, <https://doi.org/10.12942/lrr-1998-12>.

<sup>12</sup> Bernard Schutz, « Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz », Cambridge Core, décembre 2003, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.

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

<sup>14</sup> Ramesh Narayan et Matthias Bartelmann, « Lectures on Gravitational Lensing », *arXiv:astro-ph/9606001*, 3 juin 1996, sect. 3.7, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9606001>.

<sup>15</sup> Kip S. Thorne, « Gravitational Waves », *arXiv:gr-qc/9506086*, 30 juin 1995, 160, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086>.

<sup>16</sup> Curt Cutler et Kip S. Thorne, « An Overview of Gravitational-Wave Sources », *arXiv:gr-qc/0204090*, 30 avril 2002, 4090, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204090>.

sont situés. Les observations ont confirmé la valeur de la déformation prédite par la relativité générale.<sup>17</sup>

À l'aide du satellite astronomique Hipparcos de l'Agence spatiale européenne, il a été constaté que le ciel entier était légèrement déformé en raison de la déviation gravitationnelle de la lumière provoquée par le Soleil (sauf la direction opposée au Soleil). Cela nécessite quelques corrections mineures pour pratiquement toutes les étoiles.

---

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

## Ondes gravitationnelles

Des ondes gravitationnelles ont été prédites en 1916 par Albert Einstein<sup>18</sup>. Ce sont des perturbations dans la géométrie spatio-temporelle courbe, générées par les masses accélérées et se propageant à la vitesse de la lumière. Ils ont été confirmés le 11 février 2016 par l'équipe Advanced LIGO<sup>19</sup>. Pour les champs faibles, une approximation linéaire peut être faite pour ces ondes. Les méthodes d'analyse des données sont basées sur la décomposition Fourier de ces ondes<sup>20</sup>. Des solutions exactes peuvent être obtenues sans approximation, mais pour les ondes gravitationnelles produites par la fusion de deux trous noirs les méthodes numériques sont le seul moyen de construire des modèles appropriés.<sup>21</sup>

Les ondes gravitationnelles ont été initialement suggérées par Henri Poincaré en 1905, puis prédites en 1916 par Albert Einstein sur la base de la théorie générale de la relativité. Les lois de la mécanique classique ne garantissent pas leur existence, ce qui est l'une des limitations classiques. Les systèmes d'étoiles à neutrons binaires sont une puissante source d'ondes gravitationnelles lors de la fusion. Des ondes gravitationnelles ont été détectées par les observatoires LIGO et VIRGO. Ils permettent l'observation de la fusion des trous noirs et l'étude de l'univers lointain, opaque au rayonnement électromagnétique.

Einstein et Rosen ont publié la première version correcte des ondes gravitationnelles en 1937<sup>22</sup>. Les ondes gravitationnelles sont créées en accélérant la masse dans l'espace, mais si l'accélération est sphérique symétrique, aucune onde gravitationnelle n'est rayonnée. Les systèmes binaires rayonnent toujours des ondes gravitationnelles, car leur accélération est asymétrique.

La première détection indirecte des ondes gravitationnelles a eu lieu en 1974 par Hulse et Taylor, à partir d'un pulsar binaire PSR 1913+16, en utilisant la détection d'onde radio

---

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

<sup>19</sup> B. P. Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration, « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger », *Physical Review Letters* 116, n° 6 (11 février 2016): 116(6): 061102, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.

<sup>20</sup> Piotr Jaranowski et Andrzej Królak, « Gravitational-Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case », *Living Reviews in Relativity* 8, n° 1 (21 mars 2005): 8 (1): 3, <https://doi.org/10.12942/lrr-2005-3>.

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

<sup>22</sup> A. Einstein et N. Rosen, « On Gravitational Waves », *Journal of The Franklin Institute* 223 (1 janvier 1937): 43–54, [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(37\)90583-0](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0).

retardée<sup>23</sup>. Ils ont constaté que l'expansion du temps gravitationnel était conforme à la prédiction de la RG et contredisait la plupart des théories alternatives<sup>24</sup>. La première détection directe des ondes gravitationnelles a eu lieu en 2015, avec deux détecteurs Advanced LIGO, de la source GW150914, un trou noir binaire<sup>25</sup>. Ces observations ont confirmé la courbure spatio-temporelle décrite par la RG.

Joseph Weber a conçu et construit les premiers détecteurs d'ondes gravitationnelles, signalant en 1969 qu'il avait détecté les premières ondes gravitationnelles, puis signalant régulièrement les signaux du Centre Galactique. Mais la fréquence de détection a soulevé des doutes quant à la validité de ses observations.<sup>26</sup>

Certains scientifiques ne sont pas d'accord avec le fait que les résultats expérimentaux sont acceptés sur la base d'arguments épistémologiques. Sur la base d'expériences de détection d'ondes gravitationnelles, Harry Collins a développé un argument qu'il appelle la régression des "expérimentateurs"<sup>27</sup>: un résultat correct est obtenu avec un bon appareil expérimental, respectivement celui qui donne des résultats corrects. Collins fait valoir qu'il n'y a pas de critères formels pour vérifier l'appareil, pas même en étalonnant un appareil en utilisant un signal "de substitution"<sup>28</sup>. Le problème est finalement résolu par la négociation au sein de la communauté scientifique, en fonction de facteurs tels que la carrière, les intérêts sociaux et cognitifs des scientifiques et l'utilité perçue pour les travaux futurs, mais sans utiliser de critères épistémologiques ou de jugement rationnel. Ainsi, Collins affirme qu'il existe de sérieux doutes sur les preuves expérimentales et leur utilisation dans l'évaluation des hypothèses et des théories scientifiques. L'exemple donné par Collins concerne les premières expériences pour détecter le rayonnement gravitationnel ou les ondes gravitationnelles.<sup>29</sup>

---

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

<sup>24</sup> Clifford M. Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment », *Living Reviews in Relativity* 17, n° 1 (décembre 2014): 17, <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

<sup>25</sup> Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration, « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger », 116(061102).

<sup>26</sup> Jorge L. Cervantes-Cota, Salvador Galindo-Uribarri, et George F. Smoot, « A Brief History of Gravitational Waves », *Universe* 2, n° 3 (septembre 2016): 2 (3): 22, <https://doi.org/10.3390/universe2030022>.

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

<sup>28</sup> Allan Franklin et Slobodan Perovic, « Experiment in Physics », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2016 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016), <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/>.

<sup>29</sup> Allan Franklin, « Calibration », in *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, éd. par Allan Franklin, Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 1999), 5: 31–80, [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8_9).



La communauté physique a été obligée de comparer les hypothèses de Weber avec les rapports de six autres expériences qui n'ont pas détecté d'ondes gravitationnelles. Collins soutient que la décision entre ces résultats expérimentaux contradictoires ne pouvait pas être prise pour des raisons épistémologiques ou méthodologiques - les six expériences négatives ne pouvaient pas légitimement être considérées comme des répliques, et étaient donc considérées comme moins importantes. Dans ses expériences, Weber a utilisé un nouveau type d'appareil pour détecter un phénomène jusque-là non observé, qui ne pouvait pas être soumis à des techniques d'étalonnage standard.<sup>30</sup>

Les résultats d'autres scientifiques qui contredisaient celui de Weber étaient plus nombreux et ont été soigneusement vérifiés et confirmés par d'autres groupes de chercheurs. Ils ont cherché à savoir si leur procédure d'analyse, un algorithme linéaire, pouvait expliquer l'échec de l'observation des résultats de Weber. Ils ont changé la procédure pour celle utilisée par Weber, un algorithme non linéaire, pour analyser leurs propres données, mais n'ont à nouveau trouvé aucune trace d'ondes gravitationnelles. Ils ont recalibré leurs dispositifs expérimentaux en introduisant des impulsions d'énergie acoustique connues et en détectant ainsi un signal.<sup>31</sup>

Il y avait aussi d'autres doutes sur les procédures d'analyse de Weber. Une erreur de programmation admise a généré de fausses coïncidences entre les deux détecteurs qui pourraient être interprétées comme réelles pendant les expériences.

Les résultats des critiques étaient beaucoup plus crédibles du point de vue des procédures à suivre : ils ont vérifié les résultats par une confirmation indépendante qui comprenait le partage des données et des programmes d'analyse, ont éliminé une source d'erreur plausible, et ils ont calibré les dispositifs en injectant des impulsions d'énergie connues et en observant la sortie. Allan Franklin et Slobodan Perovic croient que la communauté scientifique a porté un jugement motivé en rejetant initialement les résultats de Weber en acceptant ceux de ses détracteurs. Bien qu'aucune règle formelle stricte n'ait été appliquée, la procédure était raisonnable.<sup>32</sup>

Une autre façon de détecter les ondes gravitationnelles est par l'interaction des ondes avec les parois d'une cavité à micro-ondes, avec un formalisme développé par Caves, pour mesurer l'effet Lense-Thirring<sup>33</sup> et détecter les ondes gravitationnelles à haute fréquence.<sup>34</sup>

---

<sup>30</sup> Franklin et Perovic, « Experiment in Physics ».

<sup>31</sup> Franklin et Perovic.

<sup>32</sup> Franklin et Perovic.

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

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

## Pulsars de synchronisation

Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation qui émettent des ondes radio par impulsions pendant leur rotation, fonctionnant ainsi comme des montres qui permettent une mesure très précise de leurs mouvements orbitaux. Leurs observations ont montré que leurs précessions, qui ne peuvent être expliquées par la mécanique classique, peuvent être expliquées par la relativité générale.<sup>35</sup>

Par des mesures sur les pulsars binaires peuvent être tester les effets relativistes combinés, y compris le retard Shapiro<sup>36</sup>. Et, comme le champ gravitationnel près des pulsars est fort, le principe d'équivalence faible peut également être testé en raison de l'invariance de position locale d'objets ayant de fortes propriétés d'auto-gravité.<sup>37</sup>

---

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

<sup>36</sup> Lijing Shao et Norbert Wex, « Tests of gravitational symmetries with radio pulsars », *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, n° 9 (septembre 2016): 59(699501), <https://doi.org/10.1007/s11433-016-0087-6>.

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

## Environnements extrêmes

Les environnements extrêmes de gravité sont proches des corps compacts très massifs, où la courbure de l'espace-temps est très prononcée et les effets relativistes généraux sont profonds. Ce sont généralement des étoiles à neutrons et des trous noirs (surtout supermassifs), le noyau galactique actif et les quasars. Les écarts par rapport à la RG sont les plus susceptibles de se produire ici, sous un régime de gravité forte. Un tel test, pendant 16 ans, a été réalisé par Gillessen et al.<sup>38</sup>, pour Sagittarius A\* [Sgr A \*], une source lumineuse au centre de la Voie lactée où se trouve un trou noir supermassif. Les observations faites par Hambaryan et al.<sup>39</sup> a été en plein accord avec la RG, une confirmation essentielle de cette théorie.

---

<sup>38</sup> S. Gillessen et al., « Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center », *The Astrophysical Journal* 692, n° 2 (20 février 2009): 692(2), p.1075–1109, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.

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

## Bibliographie

- Abbott, B. P., The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration. « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger ». *Physical Review Letters* 116, n° 6 (11 février 2016): 061102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- Abbott, B. P., LIGO Scientific and Virgo Collaborations, M. R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, et al. « Tests of General Relativity with GW150914 ». *Physical Review Letters* 116, n° 22 (31 mai 2016): 221101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101>.
- Abuter, R., A. Amorim, N. Anugu, M. Bauböck, M. Benisty, J. P. Berger, N. Blind, et al. « Detection of the Gravitational Redshift in the Orbit of the Star S2 near the Galactic Centre Massive Black Hole ». *Astronomy & Astrophysics* 615 (1 juillet 2018): L15. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718>.
- Archibald, Anne M., Nina V. Gusinskaia, Jason W. T. Hessels, Adam T. Deller, David L. Kaplan, Duncan R. Lorimer, Ryan S. Lynch, Scott M. Ransom, et Ingrid H. Stairs. « Universality of Free Fall from the Orbital Motion of a Pulsar in a Stellar Triple System ». *Nature* 559, n° 7712 (juillet 2018): 73. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0265-1>.
- Barack, Leor, et Curt Cutler. « LISA capture sources: Approximate waveforms, signal-to-noise ratios, and parameter estimation accuracy ». *Physical Review D* 69, n° 8 (30 avril 2004): 082005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.082005>.
- Blandford, R. D. « Astrophysical black holes. » In *Three Hundred Years of Gravitation*, 277-329, 1987. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..277B>.
- Caves, Carlton Morris. « Theoretical investigations of experimental gravitation ». Phd, California Institute of Technology, 1979. <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- Celotti, Annalisa, John C. Miller, et Dennis W. Sciama. « Astrophysical evidence for the existence of black holes ». *Classical and Quantum Gravity* 16, n° 12A (1 décembre 1999): A3-21. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.
- Cervantes-Cota, Jorge L., Salvador Galindo-Uribarri, et George F. Smoot. « A Brief History of Gravitational Waves ». *Universe* 2, n° 3 (septembre 2016): 22. <https://doi.org/10.3390/universe2030022>.
- Choi, Charles Q. « Gravitational Waves Detected from Neutron-Star Crashes: The Discovery Explained ». Space.com, 2017. <https://www.space.com/38471-gravitational-waves-neutron-star-crashes-discovery-explained.html>.
- Collins, Harry M. *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*. Reprint edition. Chicago: University of Chicago Press, 1992.
- Cutler, Curt, et Kip S. Thorne. « An Overview of Gravitational-Wave Sources ». *arXiv:gr-qc/0204090*, 30 avril 2002. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204090>.
- Dalal, Neal, Daniel E. Holz, Scott A. Hughes, et Bhuvnesh Jain. « Short GRB and binary black hole standard sirens as a probe of dark energy ». *Physical Review D* 74, n° 6 (18 septembre 2006): 063006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063006>.
- Einstein, A., et N. Rosen. « On Gravitational Waves ». *Journal of The Franklin Institute* 223 (1 janvier 1937): 43-54. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(37\)90583-0](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0).
- Einstein, Albert. « Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation ». *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, Seite 688-696., 1916. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1916SPAW.....688E>.

- Fomalont, E., S. Kopeikin, G. Lanyi, et J. Benson. « Progress in Measurements of the Gravitational Bending of Radio Waves Using the VLBA ». *The Astrophysical Journal* 699, n° 2 (10 juillet 2009): 1395-1402. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/699/2/1395>.
- Font, José A. « Numerical Hydrodynamics in General Relativity ». *Living Reviews in Relativity* 6, n° 1 (19 août 2003): 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-4>.
- Franklin, Allan. « Calibration ». In *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, édité par Allan Franklin, 237-72. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8_9).
- Franklin, Allan, et Slobodan Perovic. « Experiment in Physics ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2016. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016. <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/>.
- Gillessen, S., F. Eisenhauer, S. Trippe, T. Alexander, R. Genzel, F. Martins, et T. Ott. « Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center ». *The Astrophysical Journal* 692, n° 2 (20 février 2009): 1075-1109. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.
- Hambaryan, V., V. Suleimanov, F. Haberl, A. D. Schwöpe, R. Neuhäuser, M. Hohle, et K. Werner. « On the compactness of the isolated neutron star RX J0720.4-3125 ». *Astronomy & Astrophysics* 601 (mai 2017): A108. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630368>.
- Hulse, R. A., 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>.
- Jaranowski, Piotr, et Andrzej Królak. « Gravitational-Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case ». *Living Reviews in Relativity* 8, n° 1 (21 mars 2005): 3. <https://doi.org/10.12942/lrr-2005-3>.
- Miller, Cole. « Stellar Structure and Evolution (Lecture notes for Astronomy 606) », 2002. <http://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr606/>.
- Narayan, Ramesh, et Matthias Bartelmann. « Lectures on Gravitational Lensing ». *arXiv:astro-ph/9606001*, 3 juin 1996. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9606001>.
- Schutz, Bernard. « Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz ». Cambridge Core, décembre 2003. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.
- Seidel, Edward. « Numerical Relativity: Towards Simulations of 3D Black Hole Coalescence ». *arXiv:gr-qc/9806088*, 23 juin 1998. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9806088>.
- Shao, Lijing, et Norbert Wex. « Tests of gravitational symmetries with radio pulsars ». *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, n° 9 (septembre 2016): 699501. <https://doi.org/10.1007/s11433-016-0087-6>.
- Thorne, Kip S. « Gravitational Waves ». *arXiv:gr-qc/9506086*, 30 juin 1995. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086>.
- Walsh, D., R. F. Carswell, et R. J. Weymann. « 0957 + 561 A, B: Twin Quasistellar Objects or Gravitational Lens? » *Nature* 279, n° 5712 (mai 1979): 381. <https://doi.org/10.1038/279381a0>.
- Wambsganss, Joachim. « Gravitational Lensing in Astronomy ». *Living Reviews in Relativity* 1, n° 1 (2 novembre 1998): 12. <https://doi.org/10.12942/lrr-1998-12>.
- Weisberg, Joel M., David J. Nice, et Joseph H. Taylor. « Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16 ». *The Astrophysical Journal* 722, n° 2 (20 octobre 2010): 1030-34. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1030>.
- Will, C. M. « The theoretical tools of experimental gravitation », 1, 1974. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974exgr.conf...1W>.
- Will, Clifford M. « The Confrontation between General Relativity and Experiment ». *Living Reviews in Relativity* 17, 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.