

Épistémologie de la gravité quantique

Nicolae Sfetcu

06.02.2020

Sfetcu, Nicolae, « Épistémologie de la gravité quantique », SetThings (6 février 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/epistemologie-de-la-gravite-quantique/>

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.....8

Les dernières décennies indiquent « un flou de la distinction entre les sciences physiques et l'abstraction mathématique ... [reflétant] une tendance croissante à accepter, et dans certains cas à ignorer, de graves problèmes de test. »¹ Oldershaw répertorie des dizaines de problèmes majeurs non liés aux tests de l'ère pré-instrumentiste.

D'un point de vue méthodologique, Newton et Einstein, et plus tard Dirac, ont soutenu sans réserve le principe de la simplicité mathématique en découvrant les nouvelles lois physiques de la nature. Ils ont été rejoints par Poincaré et Weyl. « Pour Dirac, le principe de la beauté mathématique était en partie une morale méthodologique et en partie un postulat sur les qualités de la nature. Il était clairement inspiré par la théorie de la relativité, la relativité générale en particulier, et le développement de la mécanique quantique ... considérations mathématiques-esthétiques ... ils devraient (parfois) primer sur les faits expérimentaux et agir ainsi comme des critères de vérité. »²

Eduard Prugovecki déclare que la gravité quantique a nécessité la prise en compte des questions épistémologiques fondamentales, qui peuvent être identifiées en philosophie avec le problème corps-esprit et le problème du libre arbitre³. Ces questions ont influencé l'épistémologie de la mécanique quantique sous la forme du « parallélisme psycho-physique » de von Neumann⁴ et l'analyse ultérieure de la thèse de Wigner⁵ selon laquelle « l'effondrement du paquet d'ondes » se produit dans l'esprit de « l'observateur ». La gravité quantique en cosmologie pose le problème de la liberté de l'expérimentateur de changer les conditions physiques locales, un « observateur » passif. Dans toute théorie qui décrit un seul univers, des questions se posent sur la nature de la causalité au sens philosophique traditionnel.⁶

Une théorie quantique de la gravité peut être utile pour unifier la relativité générale aux principes de la mécanique quantique, mais des difficultés surgissent dans cette tentative⁷. La

¹ Robert L. Oldershaw, « The new physics—Physical or mathematical science? », *American Journal of Physics* 56, n° 12 (1 décembre 1988): 1076, <https://doi.org/10.1119/1.15749>.

² Helge Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, 1^{ère} édition (Cambridge England ; New York: Cambridge University Press, 1990), 277, 284.

³ Hermann Weyl et Frank Wilczek, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Revised ed. édition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2009).

⁴ John Von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, (Berlin: J. Springer, 1932).

⁵ E. P. Wigner et al., « The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas », *American Journal of Physics* 32, n° 4 (1 avril 1964): 168-81, <https://doi.org/10.1119/1.1970298>.

⁶ Mario Bunge, « The Revival of Causality », in *La Philosophie Contemporaine / Contemporary Philosophy: Chroniques Nouvelles / A New Survey*, éd. par Guttorm Fløistad, International Institute of Philosophy / Institut International de Philosophie (Dordrecht: Springer Netherlands, 1982), 133-55, https://doi.org/10.1007/978-94-010-9940-0_6.

⁷ A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*, 2^e édition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010), 172, 434–435.

théorie qui en résulte n'est pas renormalisable⁸ et ne peut pas faire de prédictions physiques significatives. Les développements ultérieurs ont conduit à la théorie des cordes et à la gravité quantique à boucles⁹. La structure de la relativité générale résulterait de la mécanique quantique de l'interaction des particules théoriques sans masse spin-2, appelées gravitons¹⁰, bien qu'il n'y ait aucune preuve concrète de leur existence.

Le dilaton est apparue dans la théorie de Kaluza-Klein, une théorie à cinq dimensions qui combine la gravité et l'électromagnétisme, et plus tard dans la théorie des cordes. L'équation du champ qui régit le dilaton, dérivée de la géométrie différentielle, pourrait faire l'objet d'une quantification¹¹. Puisque cette théorie peut combiner des effets gravitationnels, électromagnétiques et quantiques, leur couplage pourrait conduire à un moyen de justifier la théorie à travers la cosmologie et les expériences.

Cependant, la gravité n'est pas normalisable de manière perturbatrice¹². La théorie doit être caractérisée par un choix de *paramètres de nombre fini* qui, en principe, peuvent être établis par l'expérience. Mais, pour quantifier la gravité, dans la théorie de la perturbation, il existe *une infinité de paramètres indépendants* nécessaires pour définir la théorie.

Il est possible que, dans une théorie correcte de la gravité quantique, les paramètres inconnus infinis soient réduits à un nombre fini qui peut ensuite être mesuré. L'une des possibilités est d'avoir de nouveaux principes de symétrie non découverts qui contraignent les paramètres et les réduisent à un ensemble fini, un chemin suivi par la théorie des cordes.

⁸ La renormalisation est une « absorption » de l'infini en redéfinissant un nombre fini de paramètres physiques. Les paramètres physiques (masse, charge, etc.) ont des valeurs parfaitement finies lorsqu'ils sont observés dans des expériences réelles. Dans le cas de la gravité, la théorie perturbative n'est pas renormalisable. Afin de renormaliser la théorie, nous devons introduire une infinité de « paramètres d'absorption », chacun devant être déterminé par l'expérience.

⁹ Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007), 1017.

¹⁰ S. Deser, « Self-Interaction and Gauge Invariance », *General Relativity and Gravitation* 1, n° 1 (1 mars 1970): 1: 9–18, <https://doi.org/10.1007/BF00759198>.

¹¹ T. Ohta et R. B. Mann, « Canonical reduction of two-dimensional gravity for Particle Dynamics », *Classical and Quantum Gravity* 13, n° 9 (1 septembre 1996): 13 (9): 2585–2602, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/9/022>.

¹² Richard P Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995), xxxvi-xxxviii; 211-12.

Il existe plusieurs théories sur la gravité quantique, mais aucune n'est complète et cohérente. Les modèles doivent surmonter des problèmes formels et conceptuels majeurs, y compris la formulation de prévisions qui peuvent être vérifiées par des tests expérimentaux.¹³

La théorie des cordes implique des objets similaires aux cordes se propageant dans un arrière-plan espace-temps fixe, et les interactions entre les cordes fermées donnent lieu à l'espace-temps de manière dynamique. Cela promet d'être une description unifiée de toutes les particules et interactions¹⁴. Une façon dans la théorie des cordes correspondra toujours à un graviton, mais à cette théorie, des caractéristiques inhabituelles apparaissent, telles que six dimensions supplémentaires de l'espace. Dans une évolution de ce programme, la théorie des supercordes, on a essayé d'unifier la théorie des cordes, la relativité générale et la supersymétrie, connue sous le nom de supergravité dans un modèle hypothétique à onze dimensions connu sous le nom de théorie M.¹⁵

Les effets gravitationnels quantiques sont extrêmement faibles et donc difficiles à tester. Ces dernières années, les physiciens se sont concentrés sur l'étude des possibilités de tests expérimentaux¹⁶, les plus ciblés étant les violations de l'invariance de Lorentz, les effets gravitationnels quantiques dans le fond micro-ondes cosmique et la décohérence induite par les fluctuations spatio-temporelles.

Les théories de la gravité quantique sont affectées par de nombreux problèmes techniques et conceptuels. Tian Cao soutient que la gravité quantique offre une opportunité unique aux philosophes, leur permettant « une bonne chance de trouver des contributions positives, plutôt que d'analyser philosophiquement ce que les physiciens ont déjà établi. »¹⁷ Carlo Rovelli (l'architecte de la gravité quantique à boucles) exhorte les philosophes à ne pas se limiter « à commenter et à polir les théories physiques fragmentaires actuelles, mais à risquer d'essayer de regarder vers l'avenir ».¹⁸

¹³ Abhay Ashtekar, « Loop quantum gravity: four recent advances and a dozen frequently asked questions », in *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting* (World Scientific Publishing Company, 2008), 126, https://doi.org/10.1142/9789812834300_0008.

¹⁴ L. E. Ibanez, « The second string (phenomenology) revolution », *Classical and Quantum Gravity* 17, n° 5 (7 mars 2000): 17 (5): 1117–1128, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/17/5/321>.

¹⁵ P. K. Townsend, « Four Lectures on M-theory », *arXiv:hep-th/9612121*, 11 décembre 1996, 13: 385, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.

¹⁶ Sabine Hossenfelder, « Experimental Search for Quantum Gravity », *arXiv:1010.3420 [gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th]*, 17 octobre 2010, chap. 5, <http://arxiv.org/abs/1010.3420>.

¹⁷ Tian Yu Cao, « Prerequisites for a Consistent Framework of Quantum Gravity », *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32, n° 2 (2001): 138.

¹⁸ Carlo Rovelli, « Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time », in *The Cosmos of Science*, éd. par John Earman et John Norton (University of Pittsburgh Press, 1997), 182.

Les difficultés conceptuelles proviennent principalement de la nature de l'interaction gravitationnelle, en particulier de l'équivalence des masses gravitationnelles et inertielles, qui permet la représentation de la gravité comme la propriété de l'espace lui-même, plutôt que comme un champ propagé dans l'espace-temps. Lorsque la gravité est quantifiée, certaines des propriétés de l'espace-temps sont soumises à des fluctuations quantiques. Mais la théorie quantique implique un fond classique bien défini pour ces fluctuations.¹⁹

Yoichiro Nambu²⁰ a étudié la « physique postmoderne » de la gravité quantique, sa distance par rapport aux expériences. Il existe certaines méthodes d'évaluation de la théorie et des contraintes. Leur enquête est un problème de recherche actuel²¹. Audretsch²² soutient que la recherche sur la gravité quantique va à l'encontre des paradigmes de Kuhn, la gravité quantique coexistant avec plusieurs paradigmes, à la fois bien confirmés et universels. Étant donné que la relativité générale et la théorie quantique prétendent être des théories universelles, toute tension conceptuelle ou formelle entre elles indiquerait que l'universalité d'une ou des deux théories est erronée. Peter Galison²³ soutient que les contraintes mathématiques prennent la place, en gravité quantique, des contraintes empiriques.

La plupart des physiciens concentrent leur attention sur la théorie des cordes, mais la gravité quantique à boucles (GCB) est également un programme actif, comme d'autres programmes. Il est extrêmement difficile de faire des prédictions concrètes dans ces théories. La théorie des cordes est affectée par le manque de prédictions expérimentales testables en raison du nombre extrêmement élevé d'états distincts et par l'absence de principes directeurs pour mettre en évidence les états physiquement significatifs²⁴. GCB semble moins affecté par le manque de prédictions, la discrétion des opérateurs de surface et de volume représente des prévisions concrètes de la théorie, avec des conséquences potentiellement vérifiables, rendant la théorie

¹⁹ Steven Weinstein, « Absolute Quantum Mechanics », Preprint, 2000, 52: 67–73, <http://philsci-archive.pitt.edu/836/>.

²⁰ Y. Nambu, « Directions of Particle Physics », *Progress of Theoretical Physics Supplement* 85 (1985): 104–110, <https://doi.org/10.1143/PTPS.85.104>.

²¹ Dean Rickles, « A philosopher looks at string dualities », *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 42: 54–67, <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.

²² Jürgen Audretsch, « Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions », *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, n° 2 (1 septembre 1981): 12(2): 322–339, <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.

²³ Peter Galison, *Laws of Nature: Essays on the Philosophic, Scientific, and Historical Dimensions* (Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1995), 369–408.

²⁴ Steven Weinstein et Dean Rickles, « Quantum Gravity », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/>.

plus vulnérable à la falsification et donc plus scientifique que la théorie des cordes²⁵. Mais on ne sait pas comment ces quantités peuvent être réellement observées.

Steven Weinstein et Dean Rickles déclarent qu'il est difficile de développer un test d'observation d'une théorie si nous ne savons pas où regarder ni quoi regarder²⁶, car la plupart des théories de la gravité quantique semblent ne considérer que de très grandes échelles d'énergie, de l'ordre de 10^{19} GeV, nécessitant un accélérateur de particules de taille galactique pour s'approcher des énergies nécessaires.

Le « test » le plus notable des théories quantiques de la gravité imposé par la communauté à ce jour implique un phénomène qui n'a jamais été observé, le soi-disant rayonnement Hawking des trous noirs. La théorie des cordes et la gravité quantique à boucles ont toutes deux réussi le test, en utilisant différents degrés de liberté microscopique. Erik Curiel²⁷ a expliqué comment ce test est utilisé comme preuve de la même manière que les preuves empiriques sont utilisées pour justifier une théorie commune. Bien que le résultat de Bekenstein-Hawking n'ait pas le statut factuel empirique, il s'agit d'une forte déduction d'un cadre qui est assez mature, à savoir la théorie des champs quantiques sur un fond spatio-temporel incurvé, qui peut fonctionner comme une contrainte sur les théories possibles.

En gravité quantique, il est particulièrement important de convenir de certaines contraintes pour guider la construction, et une théorie complète de la gravité quantique devrait reproduire les prédictions de la théorie semi-classique de la gravité comme l'une de ses limites possibles²⁸. Curiel remet en question la classification des approches de la gravitation quantique selon le mérite scientifique, comme l'élégance et la cohérence, qu'il ne considère pas comme scientifique. Il déclare que le potentiel explicatif des théories doit être pris en compte. Jusqu'à présent, aucun des principaux programmes de recherche n'a montré qu'il reproduit correctement le monde à basse énergie. Il semble que les deux théories surmonteront ce défi. ²⁹ ³⁰

²⁵ Lee Smolin, *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*, Reprint edition (Boston u.a: Mariner Books, 2007).

²⁶ Katherine Brading, Elena Castellani, et Nicholas Teh, « Symmetry and Symmetry Breaking », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.

²⁷ Erik Curiel, « Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty », *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, n° 3 (2001): 68(3): S424–S441.

²⁸ Weinstein et Rickles, « Quantum Gravity ».

²⁹ Thomas Thiemann, « The Phoenix Project: Master Constraint Programme for Loop Quantum Gravity », *Classical and Quantum Gravity* 23, n° 7 (7 avril 2006): 23(7): 2211, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/7/002>.

³⁰ Mariana Graña, « The Low Energy Limit of String Theory and Its Compactifications with Background Fluxes », *Letters in Mathematical Physics* 78, n° 3 (1 décembre 2006): 78(3): 279–305, <https://doi.org/10.1007/s11005-006-0125-z>.

Bryce DeWitt a déclaré que le champ gravitationnel devrait être quantifié pour être cohérent avec la mécanique quantique³¹, sur la base de deux prémisses : les arguments logiques et l'analogie entre les champs électromagnétiques et gravitationnels. Mais la longueur de Planck est si petite que les aspects de la réalité qui définissent une théorie de la gravité quantique, tels que « l'émergence », le « phénomène » ou « empiriquement », ne peuvent pas être considérés sous cette dimension.

³¹ Bryce S. DeWitt, « Definition of Commutators via the Uncertainty Principle », *Journal of Mathematical Physics* 3 (1 juillet 1962): 619-24, <https://doi.org/10.1063/1.1724265>.

Bibliographie

- Ashtekar, Abhay. « Loop quantum gravity: four recent advances and a dozen frequently asked questions ». In *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting*, 126-47. World Scientific Publishing Company, 2008. https://doi.org/10.1142/9789812834300_0008.
- Audreusch, Jürgen. « Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions ». *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, n° 2 (1 septembre 1981): 322-39. <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.
- Brading, Katherine, Elena Castellani, et Nicholas Teh. « Symmetry and Symmetry Breaking ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.
- Bunge, Mario. « The Revival of Causality ». In *La Philosophie Contemporaine / Contemporary Philosophy: Chroniques Nouvelles / A New Survey*, édité par Guttorm Fløistad, 133-55. International Institute of Philosophy / Institut International de Philosophie. Dordrecht: Springer Netherlands, 1982. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9940-0_6.
- Cao, Tian Yu. « Prerequisites for a Consistent Framework of Quantum Gravity ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32, n° 2 (2001): 181–204.
- Curiel, Erik. « Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty ». *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, n° 3 (2001): S424-.
- Deser, S. « Self-Interaction and Gauge Invariance ». *General Relativity and Gravitation* 1, n° 1 (1 mars 1970): 9-18. <https://doi.org/10.1007/BF00759198>.
- DeWitt, Bryce S. « Definition of Commutators via the Uncertainty Principle ». *Journal of Mathematical Physics* 3 (1 juillet 1962): 619-24. <https://doi.org/10.1063/1.1724265>.
- Feynman, Richard P, Fernando B Morinigo, William G Wagner, et Brian Hatfield. *Feynman Lectures on Gravitation*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.
- Galison, Peter. *Laws of Nature: Essays on the Philosophic, Scientific, and Historical Dimensions*. Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1995.
- Graña, Mariana. « The Low Energy Limit of String Theory and Its Compactifications with Background Fluxes ». *Letters in Mathematical Physics* 78, n° 3 (1 décembre 2006): 279-305. <https://doi.org/10.1007/s11005-006-0125-z>.
- Hossenfelder, Sabine. « Experimental Search for Quantum Gravity ». *arXiv:1010.3420 [gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th]*, 17 octobre 2010. <http://arxiv.org/abs/1010.3420>.
- Ibanez, L. E. « The second string (phenomenology) revolution ». *Classical and Quantum Gravity* 17, n° 5 (7 mars 2000): 1117-28. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/17/5/321>.
- Kragh, Helge. *Dirac: A Scientific Biography*. 1 edition. Cambridge England ; New York: Cambridge University Press, 1990.
- Nambu, Y. « Directions of Particle Physics ». *Progress of Theoretical Physics Supplement* 85 (1985): 104-10. <https://doi.org/10.1143/PTPS.85.104>.
- Ohta, T., et R. B. Mann. « Canonical reduction of two-dimensional gravity for Particle Dynamics ». *Classical and Quantum Gravity* 13, n° 9 (1 septembre 1996): 2585-2602. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/9/022>.
- Oldershaw, Robert L. « The new physics—Physical or mathematical science? » *American Journal of Physics* 56, n° 12 (1 décembre 1988): 1075-81. <https://doi.org/10.1119/1.15749>.
- Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.

- Rickles, Dean. « A philosopher looks at string dualities ». *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.
- Rovelli, Carlo. « Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time ». In *The Cosmos of Science*, édité par John Earman et John Norton, 180–223. University of Pittsburgh Press, 1997.
- Smolin, Lee. *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*. Reprint edition. Boston u.a: Mariner Books, 2007.
- Thiemann, Thomas. « The Phoenix Project: Master Constraint Programme for Loop Quantum Gravity ». *Classical and Quantum Gravity* 23, n° 7 (7 avril 2006): 2211-47. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/7/002>.
- Townsend, P. K. « Four Lectures on M-theory ». *arXiv:hep-th/9612121*, 11 décembre 1996. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.
- Von Neumann, John. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: J. Springer, 1932.
- Weinstein, Steven. « Absolute Quantum Mechanics ». Preprint, 2000. <http://philsci-archive.pitt.edu/836/>.
- Weinstein, Steven, et Dean Rickles. « Quantum Gravity ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/>.
- Weyl, Hermann, et Frank Wilczek. *Philosophy of Mathematics and Natural Science*. Revised ed. edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2009.
- Wigner, E. P., I. J. Good, A. J. Mayne, J. M. Smith, et Thornton Page. « The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas ». *American Journal of Physics* 32, n° 4 (1 avril 1964): 322-322. <https://doi.org/10.1119/1.1970298>.
- Zee, A. *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*. 2 edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010.