

Approches de l'interprétation de la gravité quantique

Nicolae Sfetcu

10.02.2020

Sfetcu, Nicolae, « Approches de l'interprétation de la gravité quantique », SetThings (10 février 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/approches-de-linterpretation-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..... 16

La première approche de l'interprétation de la théorie quantique était « instrumentiste ». Jeremy Butterfield et Christopher Isham affirment que l'interprétation de la théorie quantique à Copenhague n'est pas seulement comme une interprétation statistique minimale du formalisme quantique en termes de fréquence des résultats de mesure, mais comme insistant sur un domaine classique qui, s'il comprend l'espace et le temps classiques, implique le fait que, en parlant de « gravité quantique », nous avons tort d'essayer d'appliquer la théorie quantique à quelque chose qui appartient au contexte classique de cette théorie. Une théorie quantique de la gravité devrait être évitée, mais on peut essayer de développer une « théorie quantique de l'espace et du temps ».¹

La vision « littéraliste » implique l'interprétation de la théorie quantique « au plus près » du formalisme quantique. Cela implique deux versions, une d'Everett et une basée sur la logique quantique. Le littéralisme d'Everett a été discuté en relation avec la gravité quantique (en particulier la cosmologie quantique). Son objectif est de résoudre le « problème de mesure »: lorsque la fonction d'onde s'effondre par rapport aux objets macroscopiques (tels que les instruments).

Les théories des valeurs supplémentaires visent à interpréter la théorie quantique, notamment dans le problème de mesure, sans recourir à l'effondrement du vecteur d'état, en postulant des valeurs supplémentaires pour une certaine « quantité préférée », ainsi qu'une règle d'évolution de ces valeurs. Mais, par rapport à la théorie d'Everett, les « valeurs supplémentaires » n'impliquent pas d'autres mondes physiques réels; ils essaient simplement d'être plus précis sur la quantité préférée et la dynamique de ses valeurs. Ces théories sont l'interprétation de DeBroglie-Bohm de « l'onde pilote » de la théorie quantique, et les différents types d'interprétation modale². Fondamentalement, les « valeurs supplémentaires » préservent la dynamique unitaire ordinaire (équation de Schrodinger) de la théorie quantique, mais ajoutent des équations qui décrivent l'évolution temporelle de ses valeurs supplémentaires. L'interprétation des ondes pilotes n'a été appliquée qu'au programme de recherche sur la gravité quantique basé sur la géométrie quantique.³

Selon Jeremy Butterfield et Christopher Isham, la nouvelle dynamique est plus radicale que les « valeurs supplémentaires ». Il remplace la dynamique habituelle pour résoudre le problème de mesure en supprimant dynamiquement les superpositions. Au cours des dernières années, la nouvelle dynamique, en particulier à la suite des théories de « localisation spontanée » de Ghirardi, Rimini et Weber⁴ et Pearle⁵, s'est considérablement développée. Penrose a été particulièrement active dans le soutien de cette idée.

¹ Jeremy Butterfield et Chris Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity », in *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale* (Cambridge University Press, 2001).

² Jeffrey Bub, *Interpreting the Quantum World*, 1st edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1999).

³ Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ».

⁴ G. C. Ghirardi, A. Rimini, et T. Weber, « Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems », *Physical Review D* 34, n° 2 (15 juillet 1986): D34:470–491, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>.

⁵ null Pearle, « Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization », *Physical Review. A, General Physics* 39, n° 5 (1 mars 1989): A39:2277–2289.

Motivations pour une théorie de la gravité quantique, du point de vue de la physique des particules élémentaires et de la théorie quantique des champs:

1. La matière est constituée de particules élémentaires décrites quantiques et interagissant gravitationnellement.
2. La théorie relativiste du champ quantique ne pouvait avoir de sens qu'en incluant la gravité.
3. La gravité quantique aidera à unifier les trois forces fondamentales non gravitationnelles.

Motivations pour une théorie de la gravité quantique, du point de vue de la relativité générale:

1. L'espoir d'éliminer les singularités en introduisant des effets quantiques.
2. L'explication quantique de la nature finale des trous noirs par perte de masse par rayonnement Hawking.
3. La gravité quantique peut aider à expliquer l'univers très précoce, en déduisant d'ici la 4-dimensionnalité de l'espace-temps, et l'origine de l'évolution inflationniste.
4. On espère qu'une théorie de la gravité quantique fournira la cosmologie quantique.

J. Butterfield énumère quatre types d'approches à la recherche d'une théorie de la gravité:⁶

1. *Relativité générale quantifiée*: elle commence par la relativité générale à laquelle un certain type d'algorithme de quantification est appliqué. Deux types de techniques sont utilisés à cet effet: une approche spatio-temporelle à 4 dimensions de la théorie des champs quantiques et une approche canonique à 3 dimensions de l'espace physique. C'était le premier type d'approche.
2. *La relativité générale comme limite à la basse énergie d'une quantification d'une théorie classique différente*. Un algorithme de quantification est appliqué à une certaine théorie classique, récupéré comme limite classique de la nouvelle théorie quantique. Ce type d'approche est illustré par le principal programme de recherche actuel: la théorie des supercordes. Il y a eu plusieurs tentatives pour construire des théories quantiques de la topologie et des structures causales.
3. *La relativité générale en tant que limite de basse énergie d'une théorie quantique qui n'est pas une quantification d'une théorie classique*: il est envisagé de construire une théorie quantique à partir de zéro sans référence à une théorie classique, sans une certaine limite classique.
4. *Partir de zéro avec une nouvelle théorie radicale*: une théorie qui diffère à la fois de la relativité générale et de la théorie quantique se développe.

Les principes fondamentaux de la relativité générale et de la théorie quantique sont si incompatibles que toute réconciliation nécessitera de repenser les catégories d'espace, de temps et de matière. Actuellement, le programme dominant est celui des supercordes, du second type. La gravité quantique canonique dans l'approche Ashtekar est du premier type.

La construction d'une théorie de la gravité quantique est associée à deux *hypothèses*: les notions classiques d'espace et de temps ne sont que des concepts approximativement valables, résultant

⁶ Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ».

de la nature « réelle » quantique de l'espace et du temps⁷, et la gravité quantique fournira la physique classique à un niveau plus profond.^{8 9}

Le *problème de mesure* implique que la théorie quantique ne peut, en elle-même, expliquer aucun phénomène classique - comme les résultats de mesure définis avec un espace bien défini - les propriétés temporelles et énergétiques¹⁰. Le besoin de relativité générale pour la gravité quantique est quelque peu analogue au besoin de mécanique classique pour la mécanique quantique, le rôle de la relativité générale dans le premier cas étant de préciser la portée de la théorie quantique. Mais la gravité quantique peut contourner le besoin d'une théorie classique en choisissant une interprétation différente de la mécanique quantique.

Une première tentative pour développer une théorie de la gravité quantique a été le couplage de la relativité générale (RG) et la théorie quantique des champs (TCC), formant les soi-disant théories semi-classiques¹¹. Dans ces théories, les domaines de la matière sont des structures théoriques quantiques fondamentales, et la gravité, c'est-à-dire l'espace-temps, est fondamentalement classique (non quantique). Fondamentalement, une telle théorie réécrit les équations d'Einstein.

Actuellement, la « gravité quantique » (GC) est un rapprochement plus substantiel de la quantification de la gravité¹², construisant une théorie quantique dont la limite classique est en accord avec la théorie classique. La quantification n'implique pas nécessairement la discrétion de tous les observables, comme dans le cas des opérateurs de position et de la quantité de mouvement. Par conséquent, la quantification de la RG n'implique pas de discrétion d'espace.

Selon Kiefer¹³, les théories de la gravité quantique peuvent être regroupées en théories primaires et secondaires. Les premiers utilisent des procédures de quantification standard (canoniques ou covariantes) comme dans le cas de l'électrodynamique quantique. Le second inclut GC comme limite d'un cadre théorique quantique fondamental, par ex. théorie des cordes. Il convient de

⁷ J. Butterfield et C. J. Isham, « On the Emergence of Time in Quantum Gravity », *arXiv:gr-qc/9901024*, 8 janvier 1999, 111-68, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901024>.

⁸ Steven Weinberg, *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature* (Random House, 2010).

⁹ Max Tegmark et John Archibald Wheeler, « 100 Years of the Quantum », *arXiv:quant-ph/0101077*, 17 janvier 2001, 68-75, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077>.

¹⁰ Henrik Zinkernagel, « The Philosophy Behind Quantum Gravity », *Theoria : An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 21, n° 3 (2010): 295–312.

¹¹ S. Carlip, « Is Quantum Gravity Necessary? », *Classical and Quantum Gravity* 25, n° 15 (7 août 2008): 154010, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/15/154010>.

¹² Christian Wuthrich, « To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity », Published Article or Volume, *Philosophy of Science*, 2005, 777–788, <http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946>.

¹³ C. Kiefer, « Quantum gravity: general introduction and recent developments », *Annalen der Physik* 518 (1 janvier 2006): 15(12), 129148, <https://doi.org/10.1002/andp.200510175>.

noter que cette classification est basée sur la façon dont les approches sont menées. D'un point de vue systémique, cependant, ces approches peuvent être corrélées.¹⁴

On espère que la gravité quantique résoudra le caractère incomplet de la physique actuelle liée au problème de GC, ayant comme motivations des considérations cosmologiques, l'évolution des trous noirs, les problèmes théoriques en TCC et l'unification^{15 16}. Mais il n'y a aucun besoin empirique de construire la théorie. Les deux théories (la théorie quantique et la RG) sont en parfait accord avec toutes les données disponibles. L'échelle (ou longueur) d'énergie typique dans laquelle les effets gravitationnels quantiques deviennent pertinents est d'environ 16 ordres de grandeur plus grande que celle actuelle¹⁷. Donc, de façon pragmatique, nous ne pouvons pas vraiment espérer de données expérimentales directes.¹⁸

En gravité quantique, la dimension de la longueur de Planck est si petite qu'elle suggère que les aspects de la réalité qui nécessitent une théorie de la gravité quantique pour les décrire ne devraient pas être appelés, par exemple, « aspect », « phénomène » ou « empirique ». Les kantien affirment que « l'émergence » n'est pas seulement ce qui est pratiquement accessible, mais tout ce qui se trouve dans l'espace fait partie de la réalité empirique. Mais J. Butterfield considère qu'il est inacceptable que ces échelles de longueur, d'énergie, etc., étant si petites, existent vraiment « en principe »¹⁹. Il déclare que ces éléments ou leurs aspects localisés ne sont pas empiriques, bien que nous pourrions encore les appeler « physiques » et « réels ». Si cela est accepté, les différentes affirmations kantien selon lesquelles l'espace et le temps peuvent avoir certaines caractéristiques - par exemple, la continuité - *à priori* aux allégations de ces programmes de gravité quantique qui nient l'espace et le temps doivent être réconciliées. « La contradiction apparente serait un artefact d'une ambiguïté dans « l'espace et le temps »: les programmes de gravité quantique ne concerneraient pas l'espace et le temps au sens kantien. »²⁰

L'interprétation de Copenhague peut être comprise non seulement comme une interprétation statistique minimale du formalisme quantique pour la fréquence des résultats de mesure, mais aussi comme mettant l'accent sur un domaine classique du système quantique, avec une séparation ferme de celui-ci et une description quantique de la première interprétation. Si le domaine classique comprend l'espace et le temps classiques, en termes de « gravité quantique », on nous tromperons en appliquant la théorie quantique à quelque chose qui est lié au contexte classique de cette théorie. Pour construire une « théorie quantique de l'espace et du temps », un

¹⁴ Steven Weinberg, « What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is? », *arXiv:hep-th/9702027*, 3 février 1997, 241–251, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9702027>.

¹⁵ Wuthrich, « To quantize or not to quantize », 777–788.

¹⁶ Kiefer, « Quantum gravity », 15(12), 129148.

¹⁷ Nima Arkani-Hamed, « The Future of Fundamental Physics », 2012, 141(3), 53–66.

¹⁸ Kian Salimkhani, « Quantum Gravity: A Dogma of Unification? », in *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science, vol 9.*, éd. par Alexander Christian et al. (Cham: Springer, 2018), 23–41.

¹⁹ Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ».

²⁰ Butterfield et Isham.

changement radical d'interprétation, peut-être du formalisme mathématique, et de la théorie quantique elle-même, est nécessaire.²¹

Une vision instrumentiste spécifique à la théorie quantique devrait soit nier que l'état quantique décrit des systèmes individuels, au moins entre les mesures (de même, soyez prudent dans la description quantique de ces systèmes), soit postuler un domaine « non quantique » dont la description il peut être pris à la lettre (pas instrumentiste comme dans la première condition), le domaine respectif étant postulé comme « domaine classique » entendu comme macroscopique et/ou le domaine des « mesures » et/ou décrit par la physique classique²². Mais les applications récentes de la théorie quantique rendent ces conditions difficiles à remplir. Il s'ensuit que nous devons rechercher une interprétation dans laquelle aucun rôle fondamental n'est attribué à la « mesure », entendue comme une opération hors du domaine du formalisme.

Si l'interprétation instrumentiste de la théorie quantique est « aussi proche que possible » du formalisme quantique (« littéralisme »), on peut rejeter l'utilisation d'idées telles que la mesure, le « domaine classique » ou « l'observateur externe » auquel une description quantique-théorique est refusée, on recherche plutôt une interprétation du formalisme.

La question se pose maintenant de savoir si les déclarations théoriques peuvent aborder n'importe quel sujet au-delà des données d'observation. Les anti-réalistes scientifiques nient cette possibilité, contrairement aux réalistes scientifiques. Le réaliste scientifique donne à l'électron et au quark le même état ontologique que les chaises et les tables. L'antiréaliste considère les concepts d'objets invisibles comme de simples outils techniques pour décrire et prédire des phénomènes visibles, utiles mais sans valeur de vérité. L'instrumentiste nie également la possibilité des véritables déclarations sur des objets théoriques invisibles. Bas van Fraassen considère une manière moins radicale de rejeter le réalisme scientifique. Son empirisme constructif estime que les déclarations sur les objets théoriques peuvent en principe avoir une valeur de vérité, mais il est impossible de rassembler des preuves suffisantes pour la vérité d'une déclaration particulière. Richard Dawid déclare qu'en évitant la qualité ontologique de la revendication instrumentiste, l'empirisme constructif reste à un niveau épistémologique.

²³

En raison de la multitude des données empiriques, les scientifiques doivent construire des structures théoriques pour aider à manipuler et analyser ces données. Il peut exister plusieurs ensembles de ces structures théoriques qui se font concurrence et se remplacent au fil du temps. Même les éléments essentiels des théories scientifiques ne sont pas déterminés de manière unique par des données empiriques (principe de sous-détermination des théories scientifiques par des données expérimentales). Il n'y a donc pas de déclarations scientifiques qui doivent être considérées comme incontestables (méta-induction pessimiste). Les théories scientifiques semblent trop sous-déterminées pour s'inscrire dans un schéma réaliste, mais elles ne sont pas suffisamment sous-déterminées pour permettre l'empirisme, ce dilemme étant difficile à éviter.

²⁴

²¹ Butterfield et Isham.

²² Butterfield et Isham.

²³ Richard Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory », *Physics and Philosophy*, 2007.

²⁴ Dawid.

Une généralisation de l'hypothèse de sous-détermination adoptée par Quine soutient qu'aucune description théorique idéale hypothétique, qui couvrirait systématiquement toutes les données expérimentales possibles, ne serait pas unique. Il admet l'existence de théories aux conséquences phénoménologiques identiques, mais toujours « logiquement incompatibles » en raison de leurs ensembles d'objets ontologiques incompatibles. Qui est ainsi contraint de distinguer les différentes théories par des moyens purement conceptuels et sur une base ontologique.

Richard Dawid estime que l'instrumentalisme est le plus plausible dans le contexte d'une théorie sous-développée, car l'ascension de la théorie peut ouvrir « de nouvelles frontières du visible dont l'identification avec les frontières de l'existence semble moins plausible que dans le cas classique », et parce que « une fois le déséquilibre entre l'effort théoriquement et la conséquence observationnelle étant devenue trop grande, il devient assez problématique de supposer que les motivations saines de l'activité du physicien théorique sont exclusivement dans le régime visible. »²⁵ Sa conclusion est que les physiciens travaillant sur la théorie des cordes ne sont pas intéressés par des expériences pour prédire des phénomènes visibles. Leur théorie n'est pas encore capable d'une telle chose. Mais l'observation est une condition préalable pour attribuer le sens des concepts et de la théorie des cordes. Une motivation pour d'éventuelles conséquences visibles futures ne semble pas convaincante.

Steven Weinstein considère la GC comme une « théorie physique qui décrit les interactions gravitationnelles de la matière et de l'énergie dans lesquelles la matière et l'énergie sont également décrites par la théorie quantique »²⁶. De nombreuses théories de la gravité quantique sont des quantifications de la gravité mais, comme le soulignent Callender et Huggett, il s'agit d'un choix empirique plutôt que logique²⁷. Enfin, une quantification de la gravité par la RG suggère davantage, en particulier ceux du camp de la gravité quantique canonique (GCC), qu'une certaine méthode de quantification est nécessaire pour l'espace.

L'une des premières tentatives de réconciliation du quantique avec la gravité est apparue dans les années 1960 et est connue sous le nom de théorie semi-classique. Bien que la théorie semi-classique ait rapidement été considérée comme défectueuse, elle a été considérée comme un excellent appareil heuristique pour résoudre le problème de la gravité quantique. Cette théorie, ainsi que d'autres dilemmes, tels que le débat sur la quantification, a conduit à la nécessité de théories plus robustes sur la gravité quantique.

Contrairement à d'autres théories modernes de la physique, où un consensus a été atteint en théorie, la gravité quantique a un certain nombre de programmes de recherche alternatifs qui développent une hypothèse de base à travers les hypothèses auxiliaires. Trois des programmes de recherche sur la gravité quantique les plus populaires de sa courte histoire incluent la théorie semi-classique, la théorie des cordes et la gravité quantique canonique. Mais jusqu'à présent, aucun n'a de support expérimental. Certaines expériences ont été réalisées, mais toutes étaient

²⁵ Dawid.

²⁶ 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/>.

²⁷ Craig Callender et Nick Huggett, *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity* (Cambridge University Press, 2001).

négatives. Les expériences ont été développées de telle manière que la théorie ne prédit que ce qui pourrait se produire selon un certain scénario spécifique, qui n'est pas le seul possible, donc elles ne sont pas potentiellement réfutables.

Étant donné le manque de progrès empiriques, une stratégie pluraliste pour le développement théorique est recommandée dans toutes les approches de gravité quantique. Dans la théorie des cordes, il existe différentes formulations théoriques, ou dualités physiquement équivalentes, ce qui est pertinent pour le problème de la sous-détermination des théories par les données. On soutient qu'une perspective plus empirique sur la sémantique des théories devrait être adoptée, afin de comprendre ce que les théories de l'espace et du temps nous disent.

En théorie des cordes, contrairement à d'autres approches, il existe une véritable unification de différentes forces, pas seulement une description quantique de la gravité, mais certains scientifiques critiquent cette théorie pour l'utilisation de trop de ressources au détriment d'autres approches de la gravité quantique.

Les expériences de pensée peuvent être importantes à des fins heuristiques, mais dans le cas de la gravité quantique, les conclusions basées sur des expériences de pensée ne sont pas très fiables. L'absence des résultats empiriques a conduit certains scientifiques et philosophes à affirmer que ces théories ne sont pas vraiment scientifiques.

Simonluca Pinna et Simone Pinna proposent un « test conceptuel » pour évaluer si le contenu mathématique de la théorie de la gravité quantique fait référence à un éventuel modèle empirique vérifiable²⁸. Les meilleures observations empiriques sont celles astrophysiques pour la gravité forte, il y a donc deux options: (1) le développement de nouveaux cadres expérimentaux appropriés²⁹, et (2) la possibilité de remplacer les critères de vérification scientifique standard par les critères les moins empiriquement réglementés³⁰. Il y a deux opinions de scientifiques: ceux qui considèrent que l'espace-temps n'est pas une structure physique fondamentale³¹, et ceux qui le considèrent comme fondamental dans n'importe quel domaine physique³² qui présupposent l'approche conservatrice épistémologique exprimée par (1). Ceux qui soutiennent la disparition de l'espace-temps semblent suivre la perspective (2).

Certains méthodologistes affirment que la thèse de la disparition de l'espace-temps aux hautes énergies nécessite un changement des critères de vérification scientifique, afin d'adapter la

²⁸ S. Pinna et Simone Pinna, « A Conceptual Test for Cognitively Coherent Quantum Gravity Models », 2017, <https://doi.org/10.3390/technologies5030051>.

²⁹ Sabine Hossenfelder et Lee Smolin, « Phenomenological Quantum Gravity », *arXiv:0911.2761 [gr-qc, physics:physics]*, 14 novembre 2009, 66, 99–102, <http://arxiv.org/abs/0911.2761>.

³⁰ Richard Dawid, *String Theory and the Scientific Method*, 1 édition (Cambridge: Cambridge University Press, 2013).

³¹ Carlo Rovelli, « Quantum Gravity », Cambridge Core, novembre 2004, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755804>.

³² Amit Hagar et Meir Hemmo, « The Primacy of Geometry », ResearchGate, 2013, 44, 357–364, https://www.researchgate.net/publication/259158226_The_primacy_of_geometry.

cohérence empirique à ces thèses en gravité quantique. Cela impliquerait des changements dans les concepts d'« observateur » et leur lien avec les observations et les mesures.

La géométrodynamique³³ a été la première tentative de quantifier la gravité à partir de la formulation canonique (hamiltonienne) de la théorie générale de la relativité interprétée comme une théorie indépendante du fond³⁴. Par la suite, les adeptes de la gravité quantique à boucles (GCB), une approche canonique, affirment que l'espace relativiste disparaît à la limite des hautes énergies. Cela pourrait impliquer l'absence d'un cadre spatio-temporel³⁵. Il y a des soupçons sur la disparition de l'espace-temps et d'autres approches³⁶, y compris la théorie des cordes qui est généralement interprétée comme dépendante du fond.

Hagar et Hemmo déclarent la nécessité d'un certain type d'espace-temps même au niveau du GC; la physique consiste non seulement en théories dynamiques, mais aussi en expériences et mesures par lesquelles les modèles doivent être testés. Donc, il doit y avoir quelque chose d'observable avec des caractéristiques géométriques ou qui peut être traduit en termes géométriques³⁷. Ils affirment que l'interprétation des théories de GC comme théories sans espace contredirait la base épistémique de la physique expérimentale, respectivement avec la primauté des observations et des mesures géométriques.

Les partisans de la disparition de l'espace-temps suivent une approche leibnizienne, selon Earman, voire pythagoricienne, de la réalité, selon laquelle le sens de la réalité physique peut être directement dérivé de la théorie mathématique en utilisant des critères *a priori* plus « raisonnables »³⁸. La perspective opérationnaliste définit la réalité physique par rapport à sa mesurabilité, respectivement tout concept n'est « rien de plus qu'un ensemble d'opérations, le concept est synonyme de l'ensemble approprié d'opérations »³⁹. La détection de quantités mesurables en gravité quantique est l'objectif principal des expérimentateurs, car la mesurabilité est une caractéristique essentielle pour identifier les quantités physiquement pertinentes.

Il n'a pas encore été possible d'inclure la gravité dans le cadre théorique du champ quantique du modèle standard, car les interactions gravitationnelles ne répondent pas aux principes de renormalisation.

³³ Karel Kuchar, « Canonical Quantum Gravity », *arXiv:gr-qc/9304012*, 8 avril 1993, 119–150, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304012>.

³⁴ C. Kiefer, « Time in Quantum Gravity », in *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, éd. par Craig Callender (Oxford University Press, 2011), 663–678.

³⁵ Carlo Rovelli, « The Disappearance of Space and Time », in *The Disappearance of Space and Time*, éd. par Dennis Dieks (Elsevier, 2007), 25–36.

³⁶ Nick Huggett, Tiziana Vistarini, et Christian Wuthrich, « Time in quantum gravity », *arXiv:1207.1635 [gr-qc, physics:physics]*, 3 juillet 2012, 242–261, <http://arxiv.org/abs/1207.1635>.

³⁷ Hagar et Hemmo, « The Primacy of Geometry », 44, 357–364.

³⁸ John Earman, « Thoroughly Modern Mctaggart: Or, What Mctaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity », *Philosophers' Imprint* 2 (2002): 2, 1–28.

³⁹ Richard Feldman, « Naturalized Epistemology », 5 juillet 2001, 5, <https://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/epistemology-naturalized/>.

La première approche de l'interprétation de la théorie quantique était « instrumentiste ». Jeremy Butterfield et Christopher Isham affirment que l'interprétation de la théorie quantique à Copenhague n'est pas seulement comme une interprétation statistique minimale du formalisme quantique en termes de fréquence des résultats de mesure, mais comme insistant sur un domaine classique qui, s'il comprend l'espace et le temps classiques, implique le fait que, en parlant de « gravité quantique », nous avons tort d'essayer d'appliquer la théorie quantique à quelque chose qui appartient au contexte classique de cette théorie. Une théorie quantique de la gravité devrait être évitée, mais on peut essayer de développer une « théorie quantique de l'espace et du temps ».

La vision « littéraliste » implique l'interprétation de la théorie quantique « au plus près » du formalisme quantique. Cela implique deux versions, une d'Everett et une basée sur la logique quantique. Le littéralisme d'Everett a été discuté en relation avec la gravité quantique (en particulier la cosmologie quantique). Son objectif est de résoudre le « problème de mesure »: lorsque la fonction d'onde s'effondre par rapport aux objets macroscopiques (tels que les instruments).

Les théories des valeurs supplémentaires visent à interpréter la théorie quantique, notamment dans le problème de mesure, sans recourir à l'effondrement du vecteur d'état, en postulant des valeurs supplémentaires pour une certaine « quantité préférée », ainsi qu'une règle d'évolution de ces valeurs. Mais, par rapport à la théorie d'Everett, les « valeurs supplémentaires » n'impliquent pas d'autres mondes physiques réels; ils essaient simplement d'être plus précis sur la quantité préférée et la dynamique de ses valeurs. Ces théories sont l'interprétation de DeBroglie-Bohm de « l'onde pilote » de la théorie quantique, et les différents types d'interprétation modale. Fondamentalement, les « valeurs supplémentaires » préservent la dynamique unitaire ordinaire (équation de Schrodinger) de la théorie quantique, mais ajoutent des équations qui décrivent l'évolution temporelle de ses valeurs supplémentaires. L'interprétation des ondes pilotes n'a été appliquée qu'au programme de recherche sur la gravité quantique basé sur la géométrie quantique.

Selon Jeremy Butterfield et Christopher Isham, la nouvelle dynamique est plus radicale que les « valeurs supplémentaires ». Il remplace la dynamique habituelle pour résoudre le problème de mesure en supprimant dynamiquement les superpositions. Au cours des dernières années, la nouvelle dynamique, en particulier à la suite des théories de « localisation spontanée » de Ghirardi, Rimini et Weber et Pearle, s'est considérablement développée. Penrose a été particulièrement active dans le soutien de cette idée.

Motivations pour une théorie de la gravité quantique, du point de vue de la physique des particules élémentaires et de la théorie quantique des champs:

1. La matière est constituée de particules élémentaires décrites quantiques et interagissant gravitationnellement.
2. La théorie relativiste du champ quantique ne pouvait avoir de sens qu'en incluant la gravité.
3. La gravité quantique aidera à unifier les trois forces fondamentales non gravitationnelles.

Motivations pour une théorie de la gravité quantique, du point de vue de la relativité générale:

1. L'espoir d'éliminer les singularités en introduisant des effets quantiques.

2. L'explication quantique de la nature finale des trous noirs par perte de masse par rayonnement Hawking.
3. La gravité quantique peut aider à expliquer l'univers très précoce, en déduisant d'ici la 4-dimensionnalité de l'espace-temps, et l'origine de l'évolution inflationniste.
4. On espère qu'une théorie de la gravité quantique fournira la cosmologie quantique.

J. Butterfield énumère quatre types d'approches à la recherche d'une théorie de la gravité:

1. *Relativité générale quantifiée*: elle commence par la relativité générale à laquelle un certain type d'algorithme de quantification est appliqué. Deux types de techniques sont utilisés à cet effet: une approche spatio-temporelle à 4 dimensions de la théorie des champs quantiques et une approche canonique à 3 dimensions de l'espace physique. C'était le premier type d'approche.
2. *La relativité générale comme limite à la basse énergie d'une quantification d'une théorie classique différente*. Un algorithme de quantification est appliqué à une certaine théorie classique, récupéré comme limite classique de la nouvelle théorie quantique. Ce type d'approche est illustré par le principal programme de recherche actuel: la théorie des supercordes. Il y a eu plusieurs tentatives pour construire des théories quantiques de la topologie et des structures causales.
3. *La relativité générale en tant que limite de basse énergie d'une théorie quantique qui n'est pas une quantification d'une théorie classique*: il est envisagé de construire une théorie quantique à partir de zéro sans référence à une théorie classique, sans une certaine limite classique.
4. *Partir de zéro avec une nouvelle théorie radicale*: une théorie qui diffère à la fois de la relativité générale et de la théorie quantique se développe.

Les principes fondamentaux de la relativité générale et de la théorie quantique sont si incompatibles que toute réconciliation nécessitera de repenser les catégories d'espace, de temps et de matière. Actuellement, le programme dominant est celui des supercordes, du second type. La gravité quantique canonique dans l'approche Ashtekar est du premier type.

La construction d'une théorie de la gravité quantique est associée à deux *hypothèses*: les notions classiques d'espace et de temps ne sont que des concepts approximativement valables, résultant de la nature « réelle » quantique de l'espace et du temps, et la gravité quantique fournira la physique classique à un niveau plus profond.

Le *problème de mesure* implique que la théorie quantique ne peut, en elle-même, expliquer aucun phénomène classique - comme les résultats de mesure définis avec un espace bien défini - les propriétés temporelles et énergétiques. Le besoin de relativité générale pour la gravité quantique est quelque peu analogue au besoin de mécanique classique pour la mécanique quantique, le rôle de la relativité générale dans le premier cas étant de préciser la portée de la théorie quantique. Mais la gravité quantique peut contourner le besoin d'une théorie classique en choisissant une interprétation différente de la mécanique quantique.

Une première tentative pour développer une théorie de la gravité quantique a été le couplage de la relativité générale (RG) et la théorie quantique des champs (TCC), formant les soi-disant théories semi-classiques. Dans ces théories, les domaines de la matière sont des structures théoriques quantiques fondamentales, et la gravité, c'est-à-dire l'espace-temps, est fondamentalement classique (non quantique). Fondamentalement, une telle théorie réécrit les équations d'Einstein.

Actuellement, la « gravité quantique » (GC) est un rapprochement plus substantiel de la quantification de la gravité, construisant une théorie quantique dont la limite classique est en accord avec la théorie classique. La quantification n'implique pas nécessairement la discrétion de tous les observables, comme dans le cas des opérateurs de position et de la quantité de mouvement. Par conséquent, la quantification de la RG n'implique pas de discrétion d'espace.

Selon Kiefer, les théories de la gravité quantique peuvent être regroupées en théories primaires et secondaires. Les premiers utilisent des procédures de quantification standard (canoniques ou covariantes) comme dans le cas de l'électrodynamique quantique. Le second inclut GC comme limite d'un cadre théorique quantique fondamental, par ex. théorie des cordes. Il convient de noter que cette classification est basée sur la façon dont les approches sont menées. D'un point de vue systémique, cependant, ces approches peuvent être corrélées.

On espère que la gravité quantique résoudra le caractère incomplet de la physique actuelle liée au problème de GC, ayant comme motivations des considérations cosmologiques, l'évolution des trous noirs, les problèmes théoriques en TCC et l'unification. Mais il n'y a aucun besoin empirique de construire la théorie. Les deux théories (la théorie quantique et la RG) sont en parfait accord avec toutes les données disponibles. L'échelle (ou longueur) d'énergie typique dans laquelle les effets gravitationnels quantiques deviennent pertinents est d'environ 16 ordres de grandeur plus grande que celle actuelle. Donc, de façon pragmatique, nous ne pouvons pas vraiment espérer de données expérimentales directes.

En gravité quantique, la dimension de la longueur de Planck est si petite qu'elle suggère que les aspects de la réalité qui nécessitent une théorie de la gravité quantique pour les décrire ne devraient pas être appelés, par exemple, « aspect », « phénomène » ou « empirique ». Les kantien affirment que « l'émergence » n'est pas seulement ce qui est pratiquement accessible, mais tout ce qui se trouve dans l'espace fait partie de la réalité empirique. Mais J. Butterfield considère qu'il est inacceptable que ces échelles de longueur, d'énergie, etc., étant si petites, existent vraiment « en principe ». Il déclare que ces éléments ou leurs aspects localisés ne sont pas empiriques, bien que nous pourrions encore les appeler « physiques » et « réels ». Si cela est accepté, les différentes affirmations kantien selon lesquelles l'espace et le temps peuvent avoir certaines caractéristiques - par exemple, la continuité - *à priori* aux allégations de ces programmes de gravité quantique qui nient l'espace et le temps doivent être réconciliées. « La contradiction apparente serait un artefact d'une ambiguïté dans « l'espace et le temps »: les programmes de gravité quantique ne concerneraient pas l'espace et le temps au sens kantien. »

L'interprétation de Copenhague peut être comprise non seulement comme une interprétation statistique minimale du formalisme quantique pour la fréquence des résultats de mesure, mais aussi comme mettant l'accent sur un domaine classique du système quantique, avec une séparation ferme de celui-ci et une description quantique de la première interprétation. Si le domaine classique comprend l'espace et le temps classiques, en termes de « gravité quantique », on nous tromperons en appliquant la théorie quantique à quelque chose qui est lié au contexte classique de cette théorie. Pour construire une « théorie quantique de l'espace et du temps », un changement radical d'interprétation, peut-être du formalisme mathématique, et de la théorie quantique elle-même, est nécessaire.

Une vision instrumentiste spécifique à la théorie quantique devrait soit nier que l'état quantique décrit des systèmes individuels, au moins entre les mesures (de même, soyez prudent dans la description quantique de ces systèmes), soit postuler un domaine « non quantique » dont la description il peut être pris à la lettre (pas instrumentiste comme dans la première condition),

le domaine respectif étant postulé comme « domaine classique » entendu comme macroscopique et/ou le domaine des « mesures » et/ou décrit par la physique classique. Mais les applications récentes de la théorie quantique rendent ces conditions difficiles à remplir. Il s'ensuit que nous devons rechercher une interprétation dans laquelle aucun rôle fondamental n'est attribué à la « mesure », entendue comme une opération hors du domaine du formalisme.

Si l'interprétation instrumentiste de la théorie quantique est « aussi proche que possible » du formalisme quantique (« littéralisme »), on peut rejeter l'utilisation d'idées telles que la mesure, le « domaine classique » ou « l'observateur externe » auquel une description quantique-théorique est refusée, on recherche plutôt une interprétation du formalisme.

La question se pose maintenant de savoir si les déclarations théoriques peuvent aborder n'importe quel sujet au-delà des données d'observation. Les anti-réalistes scientifiques nient cette possibilité, contrairement aux réalistes scientifiques. Le réaliste scientifique donne à l'électron et au quark le même état ontologique que les chaises et les tables. L'antiréaliste considère les concepts d'objets invisibles comme de simples outils techniques pour décrire et prédire des phénomènes visibles, utiles mais sans valeur de vérité. L'instrumentiste nie également la possibilité des véritables déclarations sur des objets théoriques invisibles. Bas van Fraassen considère une manière moins radicale de rejeter le réalisme scientifique. Son empirisme constructif estime que les déclarations sur les objets théoriques peuvent en principe avoir une valeur de vérité, mais il est impossible de rassembler des preuves suffisantes pour la vérité d'une déclaration particulière. Richard Dawid déclare qu'en évitant la qualité ontologique de la revendication instrumentiste, l'empirisme constructif reste à un niveau épistémologique.

En raison de la multitude des données empiriques, les scientifiques doivent construire des structures théoriques pour aider à manipuler et analyser ces données. Il peut exister plusieurs ensembles de ces structures théoriques qui se font concurrence et se remplacent au fil du temps. Même les éléments essentiels des théories scientifiques ne sont pas déterminés de manière unique par des données empiriques (principe de sous-détermination des théories scientifiques par des données expérimentales). Il n'y a donc pas de déclarations scientifiques qui doivent être considérées comme incontestables (méta-induction pessimiste). Les théories scientifiques semblent trop sous-déterminées pour s'inscrire dans un schéma réaliste, mais elles ne sont pas suffisamment sous-déterminées pour permettre l'empirisme, ce dilemme étant difficile à éviter.

Une généralisation de l'hypothèse de sous-détermination adoptée par Quine soutient qu'aucune description théorique idéale hypothétique, qui couvrirait systématiquement toutes les données expérimentales possibles, ne serait pas unique. Il admet l'existence de théories aux conséquences phénoménologiques identiques, mais toujours « logiquement incompatibles » en raison de leurs ensembles d'objets ontologiques incompatibles. Qui est ainsi contraint de distinguer les différentes théories par des moyens purement conceptuels et sur une base ontologique.

Richard Dawid estime que l'instrumentalisme est le plus plausible dans le contexte d'une théorie sous-développée, car l'ascension de la théorie peut ouvrir « de nouvelles frontières du visible dont l'identification avec les frontières de l'existence semble moins plausible que dans le cas classique », et parce que « une fois le déséquilibre entre l'effort théoriquement et la conséquence observationnelle étant devenue trop grande, il devient assez problématique de supposer que les motivations saines de l'activité du physicien théorique sont exclusivement dans le régime visible. » Sa conclusion est que les physiciens travaillant sur la théorie des cordes ne sont pas intéressés par des expériences pour prédire des phénomènes visibles. Leur théorie n'est pas

encore capable d'une telle chose. Mais l'observation est une condition préalable pour attribuer le sens des concepts et de la théorie des cordes. Une motivation pour d'éventuelles conséquences visibles futures ne semble pas convaincante.

Steven Weinstein considère la GC comme une « théorie physique qui décrit les interactions gravitationnelles de la matière et de l'énergie dans lesquelles la matière et l'énergie sont également décrites par la théorie quantique ». De nombreuses théories de la gravité quantique sont des quantifications de la gravité mais, comme le soulignent Callender et Huggett, il s'agit d'un choix empirique plutôt que logique. Enfin, une quantification de la gravité par la RG suggère davantage, en particulier ceux du camp de la gravité quantique canonique (GCC), qu'une certaine méthode de quantification est nécessaire pour l'espace.

L'une des premières tentatives de réconciliation du quantique avec la gravité est apparue dans les années 1960 et est connue sous le nom de théorie semi-classique. Bien que la théorie semi-classique ait rapidement été considérée comme défectueuse, elle a été considérée comme un excellent appareil heuristique pour résoudre le problème de la gravité quantique. Cette théorie, ainsi que d'autres dilemmes, tels que le débat sur la quantification, a conduit à la nécessité de théories plus robustes sur la gravité quantique.

Contrairement à d'autres théories modernes de la physique, où un consensus a été atteint en théorie, la gravité quantique a un certain nombre de programmes de recherche alternatifs qui développent une hypothèse de base à travers les hypothèses auxiliaires. Trois des programmes de recherche sur la gravité quantique les plus populaires de sa courte histoire incluent la théorie semi-classique, la théorie des cordes et la gravité quantique canonique. Mais jusqu'à présent, aucun n'a de support expérimental. Certaines expériences ont été réalisées, mais toutes étaient négatives. Les expériences ont été développées de telle manière que la théorie ne prédit que ce qui pourrait se produire selon un certain scénario spécifique, qui n'est pas le seul possible, donc elles ne sont pas potentiellement réfutables.

Étant donné le manque de progrès empiriques, une stratégie pluraliste pour le développement théorique est recommandée dans toutes les approches de gravité quantique. Dans la théorie des cordes, il existe différentes formulations théoriques, ou dualités physiquement équivalentes, ce qui est pertinent pour le problème de la sous-détermination des théories par les données. On soutient qu'une perspective plus empirique sur la sémantique des théories devrait être adoptée, afin de comprendre ce que les théories de l'espace et du temps nous disent.

En théorie des cordes, contrairement à d'autres approches, il existe une véritable unification de différentes forces, pas seulement une description quantique de la gravité, mais certains scientifiques critiquent cette théorie pour l'utilisation de trop de ressources au détriment d'autres approches de la gravité quantique.

Les expériences de pensée peuvent être importantes à des fins heuristiques, mais dans le cas de la gravité quantique, les conclusions basées sur des expériences de pensée ne sont pas très fiables. L'absence des résultats empiriques a conduit certains scientifiques et philosophes à affirmer que ces théories ne sont pas vraiment scientifiques.

Simonluca Pinna et Simone Pinna proposent un « test conceptuel » pour évaluer si le contenu mathématique de la théorie de la gravité quantique fait référence à un éventuel modèle empirique vérifiable. Les meilleures observations empiriques sont celles astrophysiques pour la gravité forte, il y a donc deux options: (1) le développement de nouveaux cadres

expérimentaux appropriés, et (2) la possibilité de remplacer les critères de vérification scientifique standard par les critères les moins empiriquement réglementés. Il y a deux opinions de scientifiques: ceux qui considèrent que l'espace-temps n'est pas une structure physique fondamentale, et ceux qui le considèrent comme fondamental dans n'importe quel domaine physique qui présupposent l'approche conservatrice épistémologique exprimée par (1). Ceux qui soutiennent la disparition de l'espace-temps semblent suivre la perspective (2).

Certains méthodologistes affirment que la thèse de la disparition de l'espace-temps aux hautes énergies nécessite un changement des critères de vérification scientifique, afin d'adapter la cohérence empirique à ces thèses en gravité quantique. Cela impliquerait des changements dans les concepts d'« observateur » et leur lien avec les observations et les mesures.

La géométrodynamique a été la première tentative de quantifier la gravité à partir de la formulation canonique (hamiltonienne) de la théorie générale de la relativité interprétée comme une théorie indépendante du fond. Par la suite, les adeptes de la gravité quantique à boucles (GCB), une approche canonique, affirment que l'espace relativiste disparaît à la limite des hautes énergies. Cela pourrait impliquer l'absence d'un cadre spatio-temporel. Il y a des soupçons sur la disparition de l'espace-temps et d'autres approches, y compris la théorie des cordes qui est généralement interprétée comme dépendante du fond.

Hagar et Hemmo déclarent la nécessité d'un certain type d'espace-temps même au niveau du GC; la physique consiste non seulement en théories dynamiques, mais aussi en expériences et mesures par lesquelles les modèles doivent être testés. Donc, il doit y avoir quelque chose d'observable avec des caractéristiques géométriques ou qui peut être traduit en termes géométriques. Ils affirment que l'interprétation des théories de GC comme théories sans espace contredirait la base épistémique de la physique expérimentale, respectivement avec la primauté des observations et des mesures géométriques.

Les partisans de la disparition de l'espace-temps suivent une approche leibnizienne, selon Earman, voire pythagoricienne, de la réalité, selon laquelle le sens de la réalité physique peut être directement dérivé de la théorie mathématique en utilisant des critères *a priori* plus « raisonnables ». La perspective opérationnaliste définit la réalité physique par rapport à sa mesurabilité, respectivement tout concept n'est « rien de plus qu'un ensemble d'opérations, le concept est synonyme de l'ensemble approprié d'opérations ». La détection de quantités mesurables en gravité quantique est l'objectif principal des expérimentateurs, car la mesurabilité est une caractéristique essentielle pour identifier les quantités physiquement pertinentes.

Il n'a pas encore été possible d'inclure la gravité dans le cadre théorique du champ quantique du modèle standard, car les interactions gravitationnelles ne répondent pas aux principes de renormalisation.

Bibliographie

- Arkani-Hamed, Nima. « The Future of Fundamental Physics », 2012, 14.
- Bub, Jeffrey. *Interpreting the Quantum World*. 1st edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- Butterfield, J., et C. J. Isham. « On the Emergence of Time in Quantum Gravity ». *arXiv:gr-qc/9901024*, 8 janvier 1999. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901024>.
- Butterfield, Jeremy, et Chris Isham. « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ». In *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*. Cambridge University Press, 2001.
- Callender, Craig, et Nick Huggett. *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*. Cambridge University Press, 2001.
- Carlip, S. « Is Quantum Gravity Necessary? » *Classical and Quantum Gravity* 25, n° 15 (7 août 2008): 154010. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/15/154010>.
- Dawid, Richard. « Scientific Realism in the Age of String Theory ». *Physics and Philosophy*, 2007.
- . *String Theory and the Scientific Method*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- Earman, John. « Thoroughly Modern McTaggart: Or, What McTaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity ». *Philosophers' Imprint* 2 (2002): 1–28.
- Feldman, Richard. « Naturalized Epistemology », 5 juillet 2001. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/epistemology-naturalized/>.
- Ghirardi, G. C., A. Rimini, et T. Weber. « Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems ». *Physical Review D* 34, n° 2 (15 juillet 1986): 470-91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>.
- Hagar, Amit, et Meir Hemmo. « The Primacy of Geometry ». ResearchGate, 2013. https://www.researchgate.net/publication/259158226_The_primacy_of_geometry.
- Hossenfelder, Sabine, et Lee Smolin. « Phenomenological Quantum Gravity ». *arXiv:0911.2761 [gr-qc, physics:physics]*, 14 novembre 2009. <http://arxiv.org/abs/0911.2761>.
- Huggett, Nick, Tiziana Vistarini, et Christian Wuthrich. « Time in quantum gravity ». *arXiv:1207.1635 [gr-qc, physics:physics]*, 3 juillet 2012. <http://arxiv.org/abs/1207.1635>.
- Kiefer, C. « Quantum gravity: general introduction and recent developments ». *Annalen der Physik* 518 (1 janvier 2006): 129-48. <https://doi.org/10.1002/andp.200510175>.
- . « Time in Quantum Gravity ». In *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, édité par Craig Callender, 667. Oxford University Press, 2011.
- Kuchar, Karel. « Canonical Quantum Gravity ». *arXiv:gr-qc/9304012*, 8 avril 1993. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304012>.
- Pearle, null. « Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization ». *Physical Review. A, General Physics* 39, n° 5 (1 mars 1989): 2277-89.
- Pinna, S., et Simone Pinna. « A Conceptual Test for Cognitively Coherent Quantum Gravity Models », 2017. <https://doi.org/10.3390/technologies5030051>.
- Rovelli, Carlo. « Quantum Gravity ». Cambridge Core, novembre 2004. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755804>.
- . « The Disappearance of Space and Time ». In *The Disappearance of Space and Time*, édité par Dennis Dieks. Elsevier, 2007.

- Salimkhani, Kian. « Quantum Gravity: A Dogma of Unification? » In *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science*, vol 9., édité par Alexander Christian, David Hommen, Nina Retzlaff, et Gerhard Schurz, 23–41. Cham: Springer, 2018.
- Tegmark, Max, et John Archibald Wheeler. « 100 Years of the Quantum ». *arXiv:quant-ph/0101077*, 17 janvier 2001. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077>.
- Weinberg, Steven. *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature*. Random House, 2010.
- . « What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is? » *arXiv:hep-th/9702027*, 3 février 1997. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9702027>.
- 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/>.
- Wuthrich, Christian. « To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity ». Published Article or Volume. *Philosophy of Science*, 2005. <http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946>.
- Zinkernagel, Henrik. « The Philosophy Behind Quantum Gravity ». *Theoria : An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 21, n° 3 (2010): 295–312.