

# Anomalies de la relativité générale

Nicolae Sfetcu

02.02.2020

Sfetcu, Nicolae, « Anomalies de la relativité générale », SetThings (2 février 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/anomalies-de-la-relativite-generale/>

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/>

**LE POINT DE SATURATION DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE..... 4**

**BIBLIOGRAPHIE..... 11**

Au fil du temps, la théorie de la relativité générale a accumulé plusieurs anomalies, indiquant la nécessité de meilleures théories sur la gravité ou d'autres approches :

- Les étoiles dans les galaxies ont une distribution de vitesses croissantes du centre vers la périphérie, avec une plus grande variation que prévu. Il en va de même pour les galaxies dans les clusters de galaxies. L'hypothèse de la matière noire, qui interagirait par gravité mais pas électromagnétiquement, pourrait expliquer la différence. Il existe également divers changements dans la dynamique newtonienne qui peuvent expliquer cette anomalie, comme la théorie MOND.
- Les vaisseaux spatiaux ont connu une accélération supérieure à celle prévue lors des manœuvres gravitationnelles.
- L'expansion métrique de l'espace semble s'accélérer. L'énergie noire a été introduite comme hypothèse pour expliquer cela. Une explication récente est que la géométrie spatiale n'est pas homogène en raison des clusters de galaxies, mais cette hypothèse est contestée.<sup>1</sup>
- Des mesures récentes montrent que les orbites planétaires croissent plus vite que prévu par la perte de la masse du Soleil par l'énergie radiative.
- Les photons du rayonnement cosmique devraient gagner de l'énergie puis la perdre en cours de route, mais en réalité ils gagnent deux fois plus d'énergie que prévu par la théorie. Une hypothèse serait que la gravité diminue plus rapidement que le carré inverse à certaines distances.
- Nuages d'hydrogène massifs supplémentaires : les raies spectrales Lyman-alpha suggèrent que les nuages d'hydrogène sont plus encombrés à certaines échelles que prévu et, comme le flux noire, peuvent indiquer que la gravité diminue plus lentement que les carrés inverses à certaines échelles de distance.<sup>2</sup>

Les hypothèses *ad hoc* introduites en relativité générale pour expliquer les singularités gravitationnelles basées sur les conditions énergétiques ne sont pas très efficaces. Des hypothèses plus détaillées sur le contenu du sujet sont nécessaires<sup>3</sup>. De nombreux scientifiques et philosophes sont parvenus à la conclusion que les singularités doivent être associées à l'atteinte des limites de la validité physique de la relativité générale et qu'une nouvelle théorie, la gravité quantique, doit être développée.

Une singularité qui peut influencer causalement certaines parties de l'espace est appelée *singularité nue*. Penrose a proposé l'élimination des singularités nues en utilisant l'hypothèse de

---

<sup>1</sup> Anil Ananthaswamy, « Swiss-Cheese Model of the Cosmos Is Full of Holes », New Scientist, 2008, <https://www.newscientist.com/article/mg20026783-800-swiss-cheese-model-of-the-cosmos-is-full-of-holes/>.

<sup>2</sup> Marcus Chown, « Gravity May Venture Where Matter Fears to Tread », New Scientist, consulté le 3 mai 2019, <https://www.newscientist.com/article/mg20126990-400-gravity-may-venture-where-matter-fears-to-tread/>.

<sup>3</sup> Alan D. Rendall, « The nature of spacetime singularities », *arXiv:gr-qc/0503112*, novembre 2005, 76-92, [https://doi.org/10.1142/9789812700988\\_0003](https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003).

censure cosmique<sup>4</sup>. La démonstration de l'hypothèse de la censure cosmique est l'un des problèmes mathématiques centraux de la relativité générale.

Selon certains scientifiques, la relativité générale contient les germes de sa propre destruction, car la théorie n'est pas en mesure de prédire la physique à l'échelle de Planck, et des problèmes tels que la non-renormalisation et les singularités sont des « inconnus connus ».<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> R. Penrose, « Singularities and time-asymmetry. », 1979, 581-638, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1979grec.conf..581P>.

<sup>5</sup> David Tong, *String Theory* (University of Cambridge, 2009), <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.

## Le point de saturation de la relativité générale

Selon la méthodologie des programmes de recherche de Lakatos, la relativité générale peut être divisée en plusieurs périodes : la période initiale, la période de stagnation, la période de maturité et le point de saturation. La période initiale (1887-1919) comprend les deux grandes expériences de physique relativiste, l'expérience Michelson-Morley et l'expérience Eotvos, et les deux confirmations, la déformation de la lumière et l'avance du périhélie de Mercure. Il s'ensuit une période de stagnation (1920-1960) au cours de laquelle la théorie a progressé plus vite que les possibilités technologiques et expérimentales, étant même retirée des manuels de physique et d'astronomie.

La maturité de la théorie commence en 1960, lorsque des découvertes astronomiques et de nouvelles expériences ont attiré l'attention sur la RG. Cette période (1960 - 1980) a été désignée par Will comme un « âge d'or »<sup>6</sup>, dans lequel les prévisions observables de la RG ont été comparées par rapport à d'autres théories alternatives, et de nouvelles expériences ont été proposées pour les tests. La première expérience de cette période a été développée pour confirmer le changement de fréquence gravitationnelle de la lumière (1960) et s'est terminée par la confirmation de la prédiction de la RG de la perte d'énergie des ondes gravitationnelles (1979) en observant le pulsar binaire Hulse-Taylor.

A partir de 1980 commença la zone de saturation de la RG, appelée par Will « la recherche d'une gravité forte ». Certaines des nouvelles prédictions de la théorie sont insignifiantes et difficiles à vérifier, nécessitant dans certains cas des technologies encore sous-développées. La théorie a commencé à être attaquée par de nouvelles théories ou techniques expérimentales, telles que l'utilisation d'atomes et de pièges d'ions refroidis par laser pour effectuer des tests ultra-précis, proposant une « cinquième » force, ou des dimensions supplémentaires pour tester la loi carrée inverse de la gravité. De plus en plus d'attention a commencé à être portée aux effets des champs gravitationnels forts, près de l'horizon de l'événement d'un trou noir non tournant, dans les étoiles à neutrons ou, pour l'univers étendu, aux champs gravitationnels associés à l'échelle de Planck.

Dans les équations d'Einstein de la relativité générale classique, il reste une asymétrie fondamentale entre les champs gravitationnel et non gravitationnel: à gauche, un objet géométrique ( $g_{\mu\nu}$ , le tenseur d'Einstein), représentant la courbure de l'espace-temps, est identique à la représentation phénoménologique du tenseur, mais pas -géométrique, de la matière du côté droit.

$$(1) G_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}, \text{ unde } G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R$$

---

<sup>6</sup> Clifford M. Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment », *Living Reviews in Relativity* 17, n° 1 (décembre 2014): 4, <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

Ainsi, dans sa conférence pour le prix Nobel en juillet 1923, Einstein a déclaré :

« Ceux qui recherchent l'unification de la théorie ne peuvent se contenter de l'existence de deux domaines qui, de par leur nature, sont assez indépendants. Une théorie mathématique unifiée des champs est recherchée, dans laquelle le champ gravitationnel et le champ électromagnétique sont interprétés comme des composants ou des manifestations du même champ uniforme. La théorie gravitationnelle, considérée en termes de formalisme mathématique, c'est-à-dire la géométrie riemannienne, doit être généralisée comme suit pour inclure les lois du champ électromagnétique. »<sup>7</sup>

Il existe des preuves théoriques qui ne tiennent pas compte du PEE dans certains cas, à travers des effets gravitationnels quantiques, des effets dérivés de la théorie des cordes, ou à travers d'autres interactions non détectées jusqu'à présent. Dans la théorie des cordes, il existe de tels domaines qui violent le principe d'équivalence d'Einstein (PEE), mais la théorie n'est pas encore suffisamment mûre pour matérialiser une telle réfutation. Clifford M. Will déclare que l'observation d'effets qui semblent violer le PEE est, dans une certaine mesure, sémantique. Les champs impliqués dans la théorie des cordes peuvent être de longues distances et peuvent imiter les champs gravitationnels, mais aucun moyen n'a été trouvé pour le faire<sup>8</sup>. L'idée d'utiliser les tests PEE de cette manière est apparue dans les années 1980, à la recherche d'une « cinquième » force<sup>9</sup> comme une force d'environ un pour cent de la gravité mais avec une portée de plusieurs centaines de mètres, impliquant une déviation de la loi du carré inverse de la gravité newtonienne. L'idée est née de l'utilisation de mesures du profil de gravité des mines profondes en Australie et de nouvelles idées en physique des particules, suggérant la présence possible de très petites particules de gravité. De nombreuses expériences ont cherché des preuves de cette force en mesurant les différences d'accélération par composition, mais les résultats n'ont pas été concluants, le consensus étant qu'il n'y a aucune preuve expérimentale crédible pour une cinquième force.<sup>10</sup>

La possibilité que la loi du carré inverse soit violée à des intervalles très courts lors des contrôles en laboratoire<sup>11</sup> prévoyait que certaines des dimensions spatiales supplémentaires de la théorie des cordes puissent s'étendre au-delà des échelles macroscopiques. À petite échelle, la gravité s'écarte de la loi connue. De nombreuses méthodes de haute précision et à faible bruit ont été

---

<sup>7</sup> Albert Einstein, *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity: Lecture Delivered to the Nordic Assembly of Naturalists at Göteborg on July 11, 1923* (Nobel Museum, 2009), 489.

<sup>8</sup> Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

<sup>9</sup> E. Fischbach et al., « Reanalysis of the Eotvos experiment », *Physical Review Letters* 56 (1 janvier 1986): 56, 3–6, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.

<sup>10</sup> C. M. Will, « Twilight time for the fifth force? », 1990, 80, 472–479, <http://connection.ebscohost.com/c/articles/9011192203/twilight-time-fifth-force>.

<sup>11</sup> Lisa Randall et Raman Sundrum, « An Alternative to Compactification », *Physical Review Letters* 83, n° 23 (6 décembre 1999): 83, 4690–4693, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.

développées, adaptées aux tests de laboratoire. Aucun écart par rapport à la loi du carré inverse n'a été trouvé.<sup>12</sup>

Les singularités gravitationnelles sont considérées comme une limite d'espace-temps. La relativité générale permet l'existence de singularités, mais elle ne peut rien dire sur ce qui se passe à l'intérieur, et les scientifiques ne se sont pas encore mis d'accord sur une définition de celles-ci, prenant également en compte le fait que sans une géométrie conforme aux lois, les physiciens ne peuvent pas avoir de localisation spatio-temporelle. En conclusion, disent-ils, on ne peut parler de singularités, mais plutôt d'espaces-temps singuliers, bien qu'en principe ces termes soient équivalents<sup>13</sup>. Clarke<sup>14</sup> et Earman<sup>15</sup>, ainsi que Geroch, Can-bin et Wald<sup>16</sup> et Curiel<sup>17</sup>, soutiennent qu'une définition précise, rigoureuse et univoque de la singularité est nécessaire pour une meilleure approche et une modélisation plus précise des aspects spatio-temporels<sup>18</sup>. Il est communément admis que la relativité générale, considérant l'espace-temps comme singulier, prédit sa propre incapacité à limiter les singularités des trous noirs et du Big Bang, en niant leur réalité. On espère qu'une théorie plus fondamentale, peut-être la gravité quantique, résoudra ce problème.<sup>19</sup>

Les trous noirs apparaissent, selon la relativité générale, lorsque le corps cosmique s'effondre sous le soi-disant rayon de Schwarzschild, proportionnel à la masse corporelle. L'« horizon des événements » d'un trou noir est le point où il n'y a pas de retour en arrière, dans lequel l'attraction gravitationnelle est plus grande que toute tentative de sortie de cette zone, y compris

---

<sup>12</sup> Joshua C. Long et al., « Upper Limits to Submillimetre-Range Forces from Extra Space-Time Dimensions », *Nature* 421, n° 6926 (février 2003): 421, 922–925, <https://doi.org/10.1038/nature01432>.

<sup>13</sup> Erik Curiel, « Singularities and Black Holes », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Spring 2019 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/spacetime-singularities/>.

<sup>14</sup> C. J. S. Clarke, « The Analysis of Space-Time Singularities by C. J. S. Clarke », Cambridge Core, mai 1994, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608155>.

<sup>15</sup> John Earman, « Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes », *British Journal for the Philosophy of Science* 49, n° 2 (1998): 338–347.

<sup>16</sup> Robert Geroch, Liang Can-bin, et Robert M. Wald, « Singular boundaries of space-times », *Journal of Mathematical Physics* 23, n° 3 (1 mars 1982): 23(3): 432–435, <https://doi.org/10.1063/1.525365>.

<sup>17</sup> Erik Curiel, « The Analysis of Singular Spacetimes », *Philosophy of Science* 66, n° 3 (1999): 66(S1): S119–S145.

<sup>18</sup> Nicolae Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale* (MultiMedia Publishing, 2018), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242>.

<sup>19</sup> Abhay Ashtekar et Martin Bojowald, « Quantum geometry and the Schwarzschild singularity », *Classical and Quantum Gravity* 23, n° 2 (21 janvier 2006): 23(2): 391–411, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/2/008>.

pour la lumière<sup>20</sup>. Pour un trou noir standard (non chargé, non rotatif), l'horizon de l'événement se situe dans le rayon de Schwarzschild. Du point de vue d'une personne en dehors de l'horizon des événements, le temps près d'un trou noir est retardé en raison de la gravité forte, jusqu'à ce que les intervalles de temps atteignent infiniment grand dans les horizons des événements. Du point de vue de la personne entrant dans l'horizon des événements, rien d'inhabituel ne se produit. Le temps passe de la même manière et il ne se rend pas compte qu'il est entré dans l'horizon des événements.

Les trous noirs relativistes sont des entités purement gravitationnelles. Ce sont des solutions de « vide » des équations de champ d'Einstein. Dans le contexte de la relativité générale, Erik Curiel déclare que la gravité est abandonnée et qu'une géométrie courbe de l'espace-temps est postulée qui produit tous les effets de la gravité, le trou noir n'est pas une « chose » dans l'espace, mais une caractéristique de l'espace-temps lui-même<sup>21</sup>. La matière de l'étoile qui s'effondre disparaît dans l'unicité du trou noir, ne restant que les propriétés géométriques du trou noir (masse, charge et moment angulaire), selon les théorèmes appelés « de calvitie », quelles que soient les propriétés physiques antérieures des objets qui s'effondrent dans un trou noir.

Une singularité « nue » n'a pas d'horizon des événements. Cela implique une rupture fondamentale dans la structure de l'espace-temps.<sup>22 23</sup> Une version d'une singularité nue est le « trou blanc », un trou noir inversé dans le temps, d'où la matière et les objets du néant pourraient apparaître. Étant donné que les équations du domaine de la relativité générale ne sélectionnent pas une direction du temps préférée et que la formation d'un trou noir est autorisée, les trous blancs seront autorisés par ces lois<sup>24</sup>. Roger Penrose affirme que des singularités nues ne se formeront jamais, introduisant une hypothèse *ad hoc* appelée « hypothèse de censure cosmique »: une singularité sera toujours dans un trou noir entouré par l'horizon des événements. En raison de contre-exemples, cette hypothèse a été abandonnée au fil du temps. Plusieurs hypothèses alternatives ont été proposées pour éliminer la possibilité des singularités nues qui violent le principe de causalité<sup>25 26</sup>, mais aucune n'est jugée satisfaisante à ce jour.

Les trous noirs constituent un terrain d'essai essentiel pour les problèmes conceptuels qui sous-tendent la gravité quantique et la relativité générale, concernant la violation de la conservation

---

<sup>20</sup> Une description plus précise distingue d'autres types d'horizon, tels que les horizons apparents, cf. Stephen W. Hawking et al., *The Large Scale Structure of Space-Time*, New Ed edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1975).

<sup>21</sup> Curiel, « Singularities and Black Holes ».

<sup>22</sup> Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale*.

<sup>23</sup> Earman, « Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks », 65-66.

<sup>24</sup> Curiel, « Singularities and Black Holes ».

<sup>25</sup> Pankaj S. Joshi, « Cosmic Censorship: A Current Perspective », *arXiv:gr-qc/0206087*, 28 juin 2002, 17(15): 1067–1079, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0206087>.

<sup>26</sup> Earman, « Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks », chap. 3.

de l'énergie et de la micro-causalité, et le paradoxe de la perte d'informations. La gravité quantique semble être le meilleur candidat pour modéliser ces phénomènes.

En 1971, Hawking a introduit la conjecture que la surface totale des horizons d'événements dans tout groupe de trous noirs ne diminue pas, même s'ils s'unissent (la deuxième loi de la mécanique des trous noirs, par similitude avec l'entropie en thermodynamique) <sup>27</sup>. Pour empêcher les trous noirs d'avoir une entropie nulle, Bekenstein a proposé qu'un trou noir ait une entropie proportionnelle à la surface de son horizon<sup>28</sup>. Hawking a découvert que la théorie des champs quantiques prédit qu'un trou noir se comporte comme un corps noir rayonnant à température constante, violant ainsi la deuxième loi de la mécanique des trous noirs en raison de la perte d'énergie et donc du rétrécissement. Mais le rayonnement supprime également l'entropie, et donc la quantité d'entropie de la matière augmente. Cela permet la formulation de la première loi de la mécanique des trous noirs similaire à la première loi de la thermodynamique, avec la masse agissant comme énergie, la gravité de la surface comme température et l'aire comme entropie<sup>29</sup>. Dans cette interprétation du trou noir, la relativité générale n'est pas satisfaisante et une meilleure théorie de la gravité quantique est nécessaire.  
30

Un trou noir contient uniquement des informations sur la masse totale, la charge et le moment angulaire. La théorie des trous noirs stables affirme que cette perte n'est pas un problème, car l'information peut être considérée comme étant présente dans le trou noir, inaccessible de l'extérieur mais représentée à l'horizon de l'événement selon le principe holographique. Mais dans la théorie selon laquelle les trous noirs s'évaporent lentement sous le rayonnement de Hawking, les informations sur la matière qui a formé le trou noir sont irrémédiablement perdues. En mécanique quantique, la perte d'information correspond à la violation de l'unité, liée à la conservation de la probabilité, entraînant la violation de la conservation de l'énergie<sup>31</sup>. Des études récentes montrent que l'information et l'unité sont néanmoins préservées dans un traitement quantique du problème. <sup>32</sup>

---

<sup>27</sup> S. W. Hawking, « Gravitational Radiation from Colliding Black Holes », *Physical Review Letters* 26, n° 21 (24 mai 1971): 26 (21): 1344–1346, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1344>.

<sup>28</sup> Robert M. Wald, « The Thermodynamics of Black Holes », *Living Reviews in Relativity* 4, n° 1 (9 juillet 2001): 4 (1): 6, <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-6>.

<sup>29</sup> Wald, 4 (1): 6.

<sup>30</sup> S. Carlip, « Black Hole Thermodynamics and Statistical Mechanics », in *Physics of Black Holes: A Guided Tour*, éd. par Eleftherios Papantonopoulos, Lecture Notes in Physics (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009), 769: 89–123, [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6_3).

<sup>31</sup> Steven B. Giddings, « The black hole information paradox », *arXiv:hep-th/9508151*, 28 août 1995, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9508151>.

<sup>32</sup> Samir D. Mathur, « The Information Paradox: Conflicts and Resolutions », *Pramana* 79, n° 5 (1 novembre 2012): 1059-73, <https://doi.org/10.1007/s12043-012-0417-z>.

Dans le cas d'un corps tombant dans un trou noir, la théorie du champ quantique dans l'espace courbe implique des quantités de rayonnement Hawking, y compris seulement une quantité finie d'informations codées dans le rayonnement Hawking. Mais l'inséparabilité de la particule à la sortie de tout le rayonnement de Hawking que le trou noir a précédemment émis crée un paradoxe appelé « la monogamie de l'inséparabilité »<sup>33</sup>. Pour résoudre le paradoxe, l'une des trois théories testées au fil du temps doit être écartée : le principe d'équivalence d'Einstein, l'unitarité, ou la théorie du champ quantique existant. La renonciation au principe d'équivalence implique un « écran » qui détruit les particules d'entrée à l'horizon de l'événement<sup>34</sup>. Les données LIGO 2016 montrent des signaux d'écho possibles dus à un horizon flou des événements, possibles dans les théories de l'écran, mais impossibles en relativité classique générale.<sup>35</sup>

Le besoin de cohérence entre la théorie quantique et la relativité générale<sup>36</sup>, et l'existence des singularités, nécessitent l'émergence d'une théorie complète de la gravité quantique<sup>37</sup>. Jusqu'à présent, une théorie aussi complète et cohérente n'a pas réussi à se développer, bien qu'il existe plusieurs candidats.<sup>38</sup>

La généralisation de la théorie du champ quantique de la physique des particules élémentaires pour inclure la gravité a échoué<sup>39</sup>. Aux basses énergies, la théorie est acceptable, mais aux très hautes énergies, les résultats sont très divergents et conduisent à des modèles sans pouvoir prédictif.<sup>40</sup>

Une tentative d'éliminer ces limitations est la théorie des cordes, une théorie quantique. La théorie promet une unification de la gravité avec les autres forces, complétant les trois

---

<sup>33</sup> Zeeya Merali, « Astrophysics: Fire in the Hole! », *Nature News* 496, n° 7443 (4 avril 2013): 20–23, <https://doi.org/10.1038/496020a>.

<sup>34</sup> Jennifer Ouellette, « Black Hole Firewalls Confound Theoretical Physicists », *Scientific American*, 2012, <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-firewalls-confound-theoretical-physicists/>.

<sup>35</sup> Zeeya Merali, « LIGO Black Hole Echoes Hint at General-Relativity Breakdown », *Nature News*, 2016, 540, <https://doi.org/10.1038/nature.2016.21135>.

<sup>36</sup> S. Carlip, « Quantum Gravity: a Progress Report », *Reports on Progress in Physics* 64, n° 8 (1 août 2001): sect. 2, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>.

<sup>37</sup> Bernard Schutz, « Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz », Cambridge Core, décembre 2003, 407, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.

<sup>38</sup> Herbert W. Hamber, *Quantum Gravitation: The Feynman Path Integral Approach* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009), <https://www.springer.com/gp/book/9783540852926>.

<sup>39</sup> G. 't Hooft et M. Veltman, « One-loop divergencies in the theory of gravitation », *Annales de L'Institut Henri Poincaré Section (A) Physique Théorique* 20 (1974): 20 (1): 69, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AIHPA..20...69T>.

<sup>40</sup> Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume 2: Modern Applications*, 1 édition (Cambridge: Cambridge University Press, 2005).

dimensions spatiales par six autres<sup>41</sup>. Une nouvelle version de la théorie, la théorie des supercordes, tente d'unifier la relativité générale et la supersymétrie, sous le nom de supergravité<sup>42</sup>, et un modèle unificateur hypothétique à onze dimensions, connu sous le nom de théorie M. <sup>43</sup>

Une autre approche utilise la quantification canonique de la théorie quantique dans laquelle, à partir de la relativité générale, on atteint l'équation de Wheeler-deWitt, un analogue de l'équation de Schrödinger, mais qui a été mal défini<sup>44</sup>. En introduisant des hypothèses *ad hoc* (variables) d'Ashtekar, il a développé la théorie de la gravité quantique à boucles. <sup>45</sup>

Il existe de nombreuses autres tentatives pour arriver à une théorie viable de la gravitation quantique, basée sur l'approche de Feynman et le calcul de Regge, des triangulations dynamiques, des ensembles de causalité, des modèles à twistor<sup>46</sup> ou des modèles à trajectoire intégrale de la cosmologie quantique<sup>47</sup>. Toutes les théories candidates ont encore des problèmes formels et conceptuels majeurs qui sont difficiles à surmonter jusqu'à présent, notamment l'impossibilité de vérifier les prédictions par des tests expérimentaux. <sup>48</sup>

---

<sup>41</sup> M. B. Green, J. H. Schwarz, et E. Witten, « Superstring Theory. Vol. 1: Introduction », *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik* 68, n° 6 (1988): 258-258, <https://doi.org/10.1002/zamm.19880680630>.

<sup>42</sup> Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume 3: Supersymmetry*, 1st Edition edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2005).

<sup>43</sup> P. K. Townsend, « Four Lectures on M-theory », *arXiv:hep-th/9612121*, 11 décembre 1996, 13: 385, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.

<sup>44</sup> Karel Kuchař, « Canonical Quantization of Gravity », *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237–288, [https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5).

<sup>45</sup> Abhay Ashtekar et Jerzy Lewandowski, « Background Independent Quantum Gravity: A Status Report », *Classical and Quantum Gravity* 21, n° 15 (7 août 2004): 21 (15): R53–R152, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01>.

<sup>46</sup> Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007).

<sup>47</sup> S. W. Hawking et W. Israel, *Quantum Cosmology, in Three Hundred Years of Gravitation* (Cambridge University Press, 1989), 631–651.

<sup>48</sup> John H. Schwarz, « String Theory: Progress and Problems », *Progress of Theoretical Physics Supplement* 170 (1 mai 2007): 170: 214–226, <https://doi.org/10.1143/PTPS.170.214>.

## Bibliographie

- Ananthaswamy, Anil. « Swiss-Cheese Model of the Cosmos Is Full of Holes ». *New Scientist*, 2008. <https://www.newscientist.com/article/mg20026783-800-swiss-cheese-model-of-the-cosmos-is-full-of-holes/>.
- Ashtekar, Abhay, et Martin Bojowald. « Quantum geometry and the Schwarzschild singularity ». *Classical and Quantum Gravity* 23, n° 2 (21 janvier 2006): 391-411. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/2/008>.
- Ashtekar, Abhay, et Jerzy Lewandowski. « Background Independent Quantum Gravity: A Status Report ». *Classical and Quantum Gravity* 21, n° 15 (7 août 2004): R53-152. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01>.
- Carlip, S. « Black Hole Thermodynamics and Statistical Mechanics ». In *Physics of Black Holes: A Guided Tour*, édité par Eleftherios Papantonopoulos, 89-123. Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6_3).
- . « Quantum Gravity: a Progress Report ». *Reports on Progress in Physics* 64, n° 8 (1 août 2001): 885-942. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>.
- Chown, Marcus. « Gravity May Venture Where Matter Fears to Tread ». *New Scientist*. Consulté le 3 mai 2019. <https://www.newscientist.com/article/mg20126990-400-gravity-may-venture-where-matter-fears-to-tread/>.
- Clarke, C. J. S. « The Analysis of Space-Time Singularities by C. J. S. Clarke ». Cambridge Core, mai 1994. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608155>.
- Curiel, Erik. « Singularities and Black Holes ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Spring 2019. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/spacetime-singularities/>.
- . « The Analysis of Singular Spacetimes ». *Philosophy of Science* 66, n° 3 (1999): 145.
- Earman, John. « Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes ». *British Journal for the Philosophy of Science* 49, n° 2 (1998): 338–347.
- Einstein, Albert. *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity: Lecture Delivered to the Nordic Assembly of Naturalists at Göteborg on July 11, 1923*. Nobel Museum, 2009.
- Fischbach, E., D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, et S. H. Aronson. « Reanalysis of the Eotvos experiment ». *Physical Review Letters* 56 (1 janvier 1986): 3-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.
- Geroch, Robert, Liang Can-bin, et Robert M. Wald. « Singular boundaries of space-times ». *Journal of Mathematical Physics* 23, n° 3 (1 mars 1982): 432-35. <https://doi.org/10.1063/1.525365>.
- Giddings, Steven B. « The black hole information paradox ». *arXiv:hep-th/9508151*, 28 août 1995. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9508151>.
- Green, M. B., J. H. Schwarz, et E. Witten. « Superstring Theory. Vol. 1: Introduction ». *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik* 68, n° 6 (1988): 258-258. <https://doi.org/10.1002/zamm.19880680630>.
- Hamber, Herbert W. *Quantum Gravitation: The Feynman Path Integral Approach*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. <https://www.springer.com/gp/book/9783540852926>.

- Hawking, S. W. « Gravitational Radiation from Colliding Black Holes ». *Physical Review Letters* 26, n° 21 (24 mai 1971): 1344-46. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1344>.
- Hawking, S. W., et W. Israel. *Quantum Cosmology, in Three Hundred Years of Gravitation*. Cambridge University Press, 1989.
- Hawking, Stephen W., G. F. R. Ellis, P. V. Landshoff, D. R. Nelson, D. W. Sciama, et S. Weinberg. *The Large Scale Structure of Space-Time*. New Ed edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1975.
- Hoof, G. 't, et M. Veltman. « One-loop divergencies in the theory of gravitation ». *Annales de L'Institut Henri Poincaré Section (A) Physique Théorique* 20 (1974): 69-94. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AIHPA..20...69T>.
- Joshi, Pankaj S. « Cosmic Censorship: A Current Perspective ». *arXiv:gr-qc/0206087*, 28 juin 2002. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0206087>.
- Kuchař, Karel. « Canonical Quantization of Gravity ». *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237-88. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5).
- Long, Joshua C., Hilton W. Chan, Allison B. Churnside, Eric A. Gulbis, Michael C. M. Varney, et John C. Price. « Upper Limits to Submillimetre-Range Forces from Extra Space-Time Dimensions ». *Nature* 421, n° 6926 (février 2003): 922. <https://doi.org/10.1038/nature01432>.
- Mathur, Samir D. « The Information Paradox: Conflicts and Resolutions ». *Pramana* 79, n° 5 (1 novembre 2012): 1059-73. <https://doi.org/10.1007/s12043-012-0417-z>.
- Merali, Zeeya. « Astrophysics: Fire in the Hole! » *Nature News* 496, n° 7443 (4 avril 2013): 20. <https://doi.org/10.1038/496020a>.
- . « LIGO Black Hole Echoes Hint at General-Relativity Breakdown ». *Nature News*, 2016. <https://doi.org/10.1038/nature.2016.21135>.
- Ouellette, Jennifer. « Black Hole Firewalls Confound Theoretical Physicists ». *Scientific American*, 2012. <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-firewalls-confound-theoretical-physicists/>.
- Penrose, R. « Singularities and time-asymmetry. », 581-638, 1979. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1979grec.conf..581P>.
- Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.
- Randall, Lisa, et Raman Sundrum. « An Alternative to Compactification ». *Physical Review Letters* 83, n° 23 (6 décembre 1999): 4690-93. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.
- Rendall, Alan D. « The nature of spacetime singularities ». *arXiv:gr-qc/0503112*, novembre 2005, 76-92. [https://doi.org/10.1142/9789812700988\\_0003](https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003).
- Schutz, Bernard. « Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz ». Cambridge Core, décembre 2003. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.
- Schwarz, John H. « String Theory: Progress and Problems ». *Progress of Theoretical Physics Supplement* 170 (1 mai 2007): 214-26. <https://doi.org/10.1143/PTPS.170.214>.
- Sfetcu, Nicolae. *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale*. MultiMedia Publishing, 2018. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242>.
- Tong, David. *String Theory*. University of Cambridge, 2009. <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.
- Townsend, P. K. « Four Lectures on M-theory ». *arXiv:hep-th/9612121*, 11 décembre 1996. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.
- Wald, Robert M. « The Thermodynamics of Black Holes ». *Living Reviews in Relativity* 4, n° 1 (9 juillet 2001): 6. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-6>.
- Weinberg, Steven. *The Quantum Theory of Fields, Volume 2: Modern Applications*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

- . *The Quantum Theory of Fields, Volume 3: Supersymmetry*. 1st Edition edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Will, C. M. « Twilight time for the fifth force? », 1990. <http://connection.ebscohost.com/c/articles/9011192203/twilight-time-fifth-force>.
- 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>.