

Observations cosmologiques pour la vérification de la relativité générale

Nicolae Sfetcu

27.01.2020

Sfetcu, Nicolae, « Observations cosmologiques pour la vérification de la relativité générale », SetThings (27 janvier 2020), URL = <https://www.setthings.com/fr/observations-cosmologiques-pour-la-verification-de-la-relativite-generale/>

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/>

SURVEILLANCE DES LENTILLES FAIBLES 10

BIBLIOGRAPHIE..... 11

Stephen Hawking a introduit le concept de rayonnement Hawkin selon lequel les trous noirs ont une entropie. Ce concept stipule que les trous noirs peuvent rayonner de l'énergie, conserver l'entropie et résoudre les problèmes d'incompatibilité avec la deuxième loi de la thermodynamique. La perte d'énergie suggère que les trous noirs « s'évaporent » avec le temps.

Un trou noir agit comme un corps noir idéal car il ne réfléchit pas la lumière. La théorie du champ quantique dans l'espace courbe prédit que les horizons de l'événement émettent un rayonnement Hawking avec le même spectre qu'un corps noir¹, avec une température inversement proportionnelle à sa masse, de l'ordre de milliards de kelvins, les rendant essentiellement inobservables.

La présence d'un trou noir peut être déduite indirectement par son interaction avec d'autres matériaux et le rayonnement électromagnétique. La matière qui tombe sur un trou noir peut former un disque d'accrétion externe, l'un des objets les plus brillants de l'univers. S'il y a d'autres étoiles en orbite autour d'un trou noir, leurs orbites peuvent être utilisées pour déterminer la masse et l'emplacement du trou noir, après avoir exclu des alternatives telles que les étoiles à neutrons. De cette façon, il a été établi que la source radio Sagittaire A*, au centre de la galaxie Voie lactée, contient un trou noir supermassif d'environ 4,3 millions de masses solaires. Le 11 février 2016, LIGO a annoncé la première observation d'ondes gravitationnelles qui auraient été générées à partir d'une fusion de trous noirs², et en décembre 2018, une autre détection d'un événement des ondes gravitationnelles résultant de l'union d'un trou noir avec une étoile à neutrons a été annoncée³. Le 10 avril 2019, la première image d'un trou noir a été capturée à l'aide des observations du télescope Event Horizon 2017 du trou noir supermassif dans le centre galactique de Messier 87.⁴

Le théorème « de calvitie » déclare qu'un trou noir stable n'a que trois propriétés physiques indépendantes : la masse, la charge et le moment angulaire⁵. Deux trous noirs qui ont les mêmes valeurs pour ces propriétés ne peuvent pas être distingués selon la mécanique classique (non quantique). Ces propriétés sont visibles de l'extérieur d'un trou noir et peuvent être mesurées.

¹ P. C. W. Davies, « Thermodynamics of Black Holes », *Reports on Progress in Physics* 41, n° 8 (août 1978): 41 (8): 1313–1355, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/004>.

² B. P. Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration, « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger », *Physical Review Letters* 116, n° 6 (11 février 2016): 116 (6): 061102, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.

³ LIGO Scientific Collaboration, « Detection of gravitational waves », 2019, <https://www.ligo.org/detections.php>.

⁴ K. L. Bouman et al., « Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction », in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, 913–922, <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.105>.

⁵ Markus Heusler, Piotr T. Chruściel, et João Lopes Costa, « Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond », *Living Reviews in Relativity* 15, n° 1 (décembre 2012): 15 (7): 7, <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-7>.

L'horizon des événements est similaire à un système dissipatif qui est presque analogue à celui d'une membrane conductrice élastique avec résistance électrique et frottement - le paradigme de la membrane⁶. Il n'y a aucun moyen d'éviter de perdre des informations sur les conditions initiales, y compris les paramètres quantiques⁷. Ce comportement a été appelé le *paradoxe de la perte d'informations* sur les trous noirs.⁸

L'existence des trous noirs est déduite par des observations indirectes, basées sur des interactions gravitationnelles avec leur voisinage.⁹

L'observation des *orbites des étoiles autour du Sagittaire A** au centre de la Voie lactée a fourni des preuves solides de l'existence d'un trou noir supermassif¹⁰. De plus, il existe des preuves d'observation que ce corps cosmique pourrait avoir un horizon d'événements, une caractéristique claire des trous noirs.¹¹

En préservant le moment angulaire, le gaz dans le puits gravitationnel d'un trou noir forme une structure en forme de disque autour de l'objet (*disque d'accrétion*)¹², émettant un rayonnement électromagnétique (principalement des rayons X) qui peut être détecté par les télescopes. Dans certains cas, les disques d'accrétion peuvent être accompagnés de jets relativistes émis le long des pôles, qui éliminent une grande partie de l'énergie. Beaucoup de phénomènes énergétiques de l'univers sont l'accumulation de matière des trous noirs, en particulier les noyaux galactiques actifs et les quasars, considérés comme les disques d'accumulation des trous noirs supermassifs.

⁶ Kip S. Thorne, Richard H. Price, et Douglas A. MacDonald, *Black holes: The membrane paradigm*, 1986, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1986bhmp.book.....T>.

⁷ Les composants d'un champ quantique à l'intérieur et à l'extérieur du trou noir seront généralement séparés, mais la micro-causalité implique que les degrés de liberté du trou noir ne peuvent pas être recombinaés de manière cohérente avec ceux de l'univers extérieur. Ainsi, lorsque le trou noir se sera complètement évaporé, ces séparations disparaîtront et l'entropie de l'univers augmentera.

⁸ Warren G. Anderson, « Black Hole Information Loss », 1996, http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html.

⁹ NASA, « Black Holes | Science Mission Directorate », 2019, <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes>.

¹⁰ S. Gillessen et al., « Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center », *The Astrophysical Journal* 692, n° 2 (20 février 2009): 692 (2): 1075–1109, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.

¹¹ Avery E. Broderick, Abraham Loeb, et Ramesh Narayan, « The Event Horizon of Sagittarius A* », *The Astrophysical Journal* 701, n° 2 (20 août 2009): 701(2): 1357–1366, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1357>.

¹² J. A. Marck, « Shortcut method of solution of geodesic equations for schwarzschild black hole », *Classical and Quantum Gravity* 13, n° 3 (1 mars 1996): 13 (3): 393–402, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/007>.

En novembre 2011, la première observation directe d'un disque d'accrétion d'un quasar autour d'un trou noir supermassif a été rapportée.¹³

Les systèmes à rayons X binaires émettent une grande partie de leur rayonnement lorsque l'une des étoiles prend la masse d'une autre étoile, permettant ainsi d'étudier un trou noir¹⁴. Dans ce but, le Cygnus X-1, découvert par Charles Thomas Bolton, Louise Webster et Paul Murdin en 1972, a été étudié, les résultats n'étant pas certains car l'étoile qui l'accompagne est beaucoup plus lourde que le trou noir candidat. Par la suite, d'autres meilleurs candidats ont été trouvés. L'absence du disque d'accrétion d'un tel système est due à un flux massique d'accumulation dominé par l'advection qui, s'il est confirmé par observation, est une preuve solide de la présence d'un horizon d'événement¹⁵. Les émissions de rayons X des disques d'accrétion se comportent parfois comme des oscillations quasi-périodiques, la fréquence dépendant de la masse de l'objet compact. Ce phénomène peut être utilisé pour déterminer la masse des trous noirs.

Les astronomes ont observé certaines galaxies, dites « actives », aux caractéristiques inhabituelles, telles que l'émission inhabituelle de raies spectrales et de très fortes émissions radio. Ils peuvent s'expliquer par la présence de trous noirs supermassifs¹⁶. La corrélation observationnelle entre la masse de ce trou et la vitesse de dispersion de la galaxie hôte, connue sous le nom de relation M-sigma, suggère un lien entre la formation du trou noir et la galaxie elle-même.¹⁷

Les scientifiques espèrent qu'à l'avenir ils pourront tester des trous noirs en observant les effets causés par un fort champ gravitationnel à proximité, comme la lentille gravitationnelle. Il existe déjà des observations sur les lentilles gravitationnelles faibles, dans lesquelles les rayons

¹³ José A. Muñoz et al., « A Study of Gravitational Lens Chromaticity with the Hubble Space Telescope », *The Astrophysical Journal* 742, n° 2 (1 décembre 2011): 742 (2): 67, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/67>.

¹⁴ Annalisa Celotti, John C. Miller, et Dennis W. Sciama, « Astrophysical evidence for the existence of black holes », *Classical and Quantum Gravity* 16, n° 12A (1 décembre 1999): 16 (12A): A3–A21, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.

¹⁵ Ramesh Narayan et Jeffrey E. McClintock, « Advection-dominated accretion and the black hole event horizon », *New Astronomy Reviews*, Jean-Pierre Lasota, X-ray Binaries, Accretion Disks and Compact Stars, 51, n° 10 (1 mai 2008): 51 (10–12): 733–751, <https://doi.org/10.1016/j.newar.2008.03.002>.

¹⁶ Julian Henry Krolik, *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment* (Princeton University Press, 1999).

¹⁷ Laura Ferrarese et David Merritt, « A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies », *The Astrophysical Journal* 539, n° 1 (10 août 2000): 539 (1): 9–12, <https://doi.org/10.1086/312838>.

lumineux sont déviés en quelques secondes seulement, mais jamais directement pour un trou noir. Il existe plusieurs candidats à cet effet, en orbite autour du Sagittaire A*.¹⁸

Plusieurs conjectures *ad hoc* ont été introduites pour mieux expliquer les observations de candidats de trous noirs astronomiques identiques, mais avec des mécanismes de fonctionnement différents : gravastar, étoile noire (gravité semi-classique)¹⁹, étoile à énergie noire, etc.²⁰

La cosmologie, en tant qu'étude de l'univers physique, a commencé comme une branche de la physique théorique à travers le modèle statique de l'univers d'Einstein de 1917, développé plus tard par Lemaître²¹. Depuis 1960, la cosmologie est considérée comme une branche de la philosophie. Le modèle standard de la cosmologie est basé sur des extrapolations de théories existantes, en particulier la relativité générale. Il est basé sur un ensemble de solutions de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) avec une géométrie symétrique uniforme et tridimensionnelle avec trois courbes possibles : positive (espace sphérique), zéro (espace euclidien) et négative (espace hyperbolique).

Les caractéristiques de base des modèles basés sur les solutions FLRW, qui peuvent être considérées comme le noyau dur du programme de recherche cosmologique connexe, sont : les modèles sont dynamiques (univers en constante évolution), le taux d'expansion de l'univers varie selon les différents types de matériau dominant, et les modèles FLRW ont une singularité dans un temps fini dans le passé (Big Bang).

Dans le cas des modèles FLRW, il existe deux types de tests d'observation pour leur vérification : sont étudiées la géométrie de l'espace de fond et son évolution en utilisant la matière et le rayonnement dans l'univers, ou est étudié le mode de formation de la structure du modèle qui décrit l'évolution des petites perturbations.

L'étude observationnelle de la géométrie de l'univers montre qu'il est isotrope à des échelles suffisamment grandes, selon les données résultant du fond diffus cosmologique (FDC) et de sources discrètes (galaxies, etc.). L'étude de la formation de la structure du modèle utilise un petit nombre de paramètres pour des observations de différentes périodes, en utilisant des

¹⁸ Valerio Bozza, « Gravitational Lensing by Black Holes », *General Relativity and Gravitation* 42, n° 9 (1 septembre 2010): 42 (9): 2269–2300, <https://doi.org/10.1007/s10714-010-0988-2>.

¹⁹ Charles Q. Choi, « Black Hole Pretenders Could Really Be Bizarre Quantum Stars », *Scientific American*, 2018, <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-pretenders-could-really-be-bizarre-quantum-stars/>.

²⁰ Philip Ball, « Black Holes “Do Not Exist” », *Nature*, 31 mars 2005, news050328-8, <https://doi.org/10.1038/news050328-8>.

²¹ Abbé G. Lemaître, « A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, n° 5 (13 mars 1931): 483-90, <https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>.

anisotropies de température dans le FDC et le spectre de puissance de la matière en observant les galaxies comme contraintes indépendantes de ces paramètres et des paramètres de fond.²²

Le modèle cosmologique standard comprend plusieurs périodes de l'évolution de l'univers traitées séparément dans les vérifications expérimentales et observationnelles :²³

- *Gravité quantique* : la période de début, où les effets quantiques étaient essentiels pour décrire les phénomènes
- *Inflation* : une période d'expansion exponentielle de l'univers, au cours de laquelle les substances et les rayonnements préexistants sont rapidement dilués, puis l'univers est repeuplé en matière et en énergie en dégradant le champ dans d'autres zones à la fin de l'inflation (« réchauffage »).
- *Nucléosynthèse du Big Bang* : la période au cours de laquelle les constituants de l'univers comprennent les neutrons, les protons, les électrons, les photons et les neutrinos, étroitement couplés dans l'équilibre thermique local et les éléments légers apparaissent.
- *Découplage* : les électrons se lient dans des atomes stables et les photons se découplent avec la matière ; au fur et à mesure que l'univers se dilate, les photons se refroidissent adiabiquement mais conservent un spectre du rayonnement cosmique de fond du corps noir qui contient beaucoup d'informations sur l'état de l'univers au découplage.²⁴
- *Période noire* : après découplage, la matière baryonique formée d'hydrogène neutre et d'hélium coagule en étoiles ; l'âge noire se termine avec l'apparition de la lumière des étoiles.
- *Formation de structure* : la première génération d'étoiles s'agrège en galaxies et les galaxies en clusters ; Les étoiles massives se retrouvent dans des explosions de supernovae et propagent un espace lourd créé à l'intérieur, formant la deuxième génération d'étoiles entourées de planètes.
- *Domination de l'énergie noire* : l'énergie noire (ou une constante cosmologique non nulle) domine l'expansion de l'univers, entraînant une expansion accélérée ; l'expansion se poursuivra indéfiniment si l'énergie noire est en fait une constante cosmologique²⁵.

Le modèle cosmologique standard comprend plusieurs paramètres libres, tels que la densité d'abondance de différents types de matière, qui peuvent être mesurés de plusieurs manières avec des hypothèses théoriques distinctes et des sources d'erreur. À l'heure actuelle, il existe de

²² Christopher Smeenk et George Ellis, « Philosophy of Cosmology », 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/cosmology/>.

²³ Smeenk et Ellis.

²⁴ P. a. R. Ade et al., « Planck 2015 Results - XX. Constraints on Inflation », *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octobre 2016): 594: A20, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525898>.

²⁵ Une autre explication, selon la théorie des cordes, est que l'univers a plusieurs dimensions et que la gravité perd de gravitons se déplaçant d'une dimension à l'autre.

grandes différences entre les différentes méthodes de mesure, et l'importance et les implications de ces différences ne sont pas encore claires.

Le modèle standard de nucléosynthèse est confirmé par plusieurs preuves indépendantes pour éliminer les erreurs théoriques isolées ou les sources d'erreurs systématiques.

Bien qu'il soit le plus complet, le modèle cosmologique standard rencontre trois problèmes qui impliquent la nécessité d'une nouvelle physique²⁶ : il n'y a pas de description complète de la nature ou de la dynamique de la matière noire²⁷, de l'énergie noire²⁸ et du champ inflationniste²⁹ ; la formation de galaxies³⁰ ; et la possible réfutation du modèle si des objets dans l'univers avec un âge supérieur à celui déterminé de l'univers étaient découverts, par env. 13,7 milliards d'années.³¹

Il existe une opinion selon laquelle les preuves cosmologiques actuelles ne sont pas suffisantes pour déterminer la théorie scientifique à choisir, et chaque théorie selon un nombre donné de données offre des descriptions très différentes du monde. Duhem³² a caractérisé la difficulté de choisir les théories physiques, et Quine³³ a plaidé pour la sous-détermination. La difficulté réside dans la caractérisation du contenu empirique des théories. Van Fraassen (1980) définit une théorie comme « empiriquement appropriée » si ce qui est dit sur les phénomènes observables est vrai. En cosmologie, les caractéristiques de base du modèle standard imposent deux limites fondamentales : la finitude de la vitesse de la lumière et le fait que les théories qui

²⁶ Smeenk et Ellis, « Philosophy of Cosmology ».

²⁷ Gianfranco Bertone, Dan Hooper, et Joseph Silk, « Particle dark matter: evidence, candidates and constraints », *Physics Reports* 405, n° 5 (1 janvier 2005): 405(5–6): 279–390, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>.

²⁸ P. J. E. Peebles et Bharat Ratra, « The cosmological constant and dark energy », *Reviews of Modern Physics* 75, n° 2 (22 avril 2003): 75(2): 559–606, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.559>.

²⁹ David H. Lyth et Antonio Riotto, « Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbation », *Physics Reports* 314, n° 1 (1 juin 1999): 314(1–2): 1–146, [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(98\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00128-8).

³⁰ Joseph Silk, « Formation of Galaxies », *The Philosophy of Cosmology*, avril 2017, 161–178, <https://doi.org/10.1017/9781316535783.009>.

³¹ G. F. R. Ellis et J. E. Baldwin, « On the Expected Anisotropy of Radio Source Counts », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 206, n° 2 (1 janvier 1984): 206(2): 377–381, <https://doi.org/10.1093/mnras/206.2.377>.

³² Pierre Maurice Marie Duhem, Jules Vuillemin, et Louis de Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*, trad. par Philip P. Wiener, 9932nd edition (Princeton: Princeton University Press, 1991).

³³ W. V. Quine, « On the Reasons for Indeterminacy of Translation », *The Journal of Philosophy*, 1 janvier 1970, 67(6): 178–183, <https://doi.org/10.2307/2023887>.

peuvent être testées par leurs implications pour la cosmologie impliquent des énergies trop grandes pour être testées sur Terre.

Le programme de recherche de la cosmologie observationnelle³⁴ ³⁵ montre dans quelle mesure un ensemble idéal d'observations peut déterminer la géométrie spatio-temporelle à partir d'un minimum d'hypothèses cosmologiques. L'ensemble de données idéal comprend des objets astrophysiques qui peuvent être utilisés comme normes pour déterminer les propriétés et l'évolution de certaines sources. Dans la pratique, les observateurs n'ont pas accès à l'ensemble de données idéal, de sorte qu'ils ont du mal à comprendre la nature des sources et leur évolution.

Selon Christopher Smeenk et George Ellis, le problème en cosmologie est la discrimination entre les modèles d'une théorie donnée, plutôt que le choix entre des théories concurrentes. Ils donnent comme exemple la symétrie globale supposée dans la dérivation des modèles FLRW. Toutes les preuves existantes sont également compatibles avec les modèles où cette symétrie n'est pas valide. Une possibilité serait qu'elle soit considérée *a priori*, ou comme une condition préalable à la théorisation cosmologique³⁶. Récemment, la justification des modèles FLRW a été essayée, en utilisant un autre principe général plus faible, en conjonction avec des théorèmes liés à l'homogénéité et à l'isotropie. Le théorème d'Ehlers-Geren-Sachs³⁷ montre que si tous les observateurs géodésiques dans un modèle où l'expansion est acceptée déterminent que le rayonnement de fond se propageant librement est exactement isotrope, alors le modèle FLRW est confirmé. Si le passé causal est « typique », les observations le long de la ligne de notre univers contraindront ce que les autres observateurs peuvent voir (le principe copernicien). Ce principe peut être testé indirectement, en vérifiant l'isotropie grâce à l'effet Sunyaev-Zel'dovich. D'autres tests sont directs avec un ensemble de normes suffisamment bon et un test indirect basé sur le temps écoulé de redirection cosmologique. Cette façon de travailler offre un argument empirique selon lequel l'univers observé est bien approximé par un modèle FLRW, transformant ainsi l'hypothèse philosophique initiale en une base testée par observation.³⁸

Le physicien soviétique Yakov Zeldovici a appelé l'ère électrofaible comme « l'accélérateur du pauvre », car en observant l'ère électrofaible il est possible d'étudier les phénomènes de l'univers

³⁴ J. Kristian et R. K. Sachs, « Observations in Cosmology », *The Astrophysical Journal* 143 (1 février 1966): 143: 379-399, <https://doi.org/10.1086/148522>.

³⁵ G. F. R. Ellis et al., « Ideal observational cosmology », *Physics Reports* 124, n° 5 (1 juillet 1985): 124(5-6): 315-417, [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(85\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(85)90030-4).

³⁶ Claus Beisbart, « Can We Justifiably Assume the Cosmological Principle in Order to Break Model Underdetermination in Cosmology? », *Journal for General Philosophy of Science* 40, n° 2 (1 décembre 2009): 40(2): 175-205, <https://doi.org/10.1007/s10838-009-9098-9>.

³⁷ J. Ehlers, P. Geren, et R. K. Sachs, « Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations », *Journal of Mathematical Physics* 9, n° 9 (1 septembre 1968): 9(9): 1344-1349, <https://doi.org/10.1063/1.1664720>.

³⁸ Smeenk et Ellis, « Philosophy of Cosmology ».

à partir de la physique des hautes énergies. Pour la gravité quantique, la cosmologie offre le seul moyen pratique d'évaluer des idées concurrentes.

Actuellement, il y a des débats sur la légitimité des différents programmes de recherche en cosmologie. Une réponse consiste à recourir à des modèles hypothético-déductivistes (HD): une hypothèse devient plus fiable à mesure que l'une de ses conséquences est vérifiée, et vice versa. Mais le modèle d'identification a plusieurs aspects contestés (il est souvent appelé « HD naïf », similaire à la contrefaçon naïve de Popper). Le point de vue naïf ne permet pas de distinguer les théories rivales sous-déterminées qui font les mêmes prédictions³⁹. Les scientifiques distinguent les théories qui « cadrent tout simplement avec les données », par opposition à celles qui capturent avec précision les lois et évaluent certaines prédictions réussies comme plus révélatrices que d'autres.

Une méthodologie plus sophistiquée peut reconnaître explicitement les critères que les scientifiques utilisent pour évaluer les théories scientifiques⁴⁰, qui incluent le pouvoir explicatif et la cohérence avec d'autres théories, en plus de la compatibilité avec les preuves. Ces facteurs doivent être clairs et discriminatoires. Alternativement, certaines des caractéristiques souhaitables peuvent être considérées comme faisant partie de ce qui constitue un succès empirique.

³⁹ Vincenzo Crupi, « Confirmation », 30 mai 2013, <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/confirmation/>.

⁴⁰ George F R Ellis, « Issues in the philosophy of cosmology », in *Philosophy of Physics*, éd. par Jeremy Butterfield et John Earman, Handbook of the Philosophy of Science (Amsterdam: North-Holland, 2007), 1183–1286, <https://doi.org/10.1016/B978-044451560-5/50014-2>.

Surveillance des lentilles faibles

À l'aide du télescope spatial Hubble et du Very Large Telescope, des tests de relativité générale à l'échelle galactique ont été effectués. La galaxie ESO 325-G004 agit comme une lentille gravitationnelle puissante, déformant la lumière d'une galaxie plus éloignée et créant un anneau d'Einstein autour de son centre. En comparant la masse ESO 325-G004, par des mesures du mouvement des étoiles à l'intérieur de cette galaxie, avec la courbure de l'espace qui l'entoure, la gravité s'est comportée selon la relativité générale.⁴¹

Les études sur les lentilles faibles en sont à leurs débuts. Les lentilles faibles produisent des distorsions dans l'image apparente de la taille, de la forme et des flux de l'objet astrophysique utilisé comme lentille cosmique. L'étude des lentilles faibles est une bonne méthode pour les tests de la relativité générale et une preuve solide de l'existence de l'énergie noire et de la matière noire.⁴²

Reyes et d'autres ont mesuré le « glissement gravitationnel » comme la différence entre deux potentiels gravitationnels différents qui définissent les perturbations de la matière. Dans la relativité générale, cette valeur est nulle ou très petite, mais dans d'autres théories, elle est différente de zéro et conduit à des différences substantielles dans la puissance des lentilles gravitationnelles.⁴³

Plus récemment, Blake et al.⁴⁴ ont effectué des tests de relativité générale similaires sur des distances cosmologiques, en utilisant des données spectroscopiques et l'imagerie. Ils ont constaté que les résultats valident la relativité générale.

⁴¹ Thomas E. Collett et al., « A Precise Extragalactic Test of General Relativity », *Science* 360, n° 6395 (22 juin 2018): 360 (6395): 1342–1346, <https://doi.org/10.1126/science.aao2469>.

⁴² Yong-Seon Song et Olivier Doré, « A step towards testing general relativity using weak gravitational lensing and redshift surveys », *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2009, n° 03 (23 mars 2009): 025, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/03/025>.

⁴³ Reinabelle Reyes et al., « Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities », *Nature* 464, n° 7286 (mars 2010): 464(7286): 256–258, <https://doi.org/10.1038/nature08857>.

⁴⁴ Chris Blake et al., « RCSLenS: Testing Gravitational Physics through the Cross-Correlation of Weak Lensing and Large-Scale Structure », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, n° 3 (1 mars 2016): 456(3): 2806–2828, <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2875>.

Bibliographie

- Abbott, B. P., The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration. « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger ». *Physical Review Letters* 116, n° 6 (11 février 2016): 061102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- Ade, P. a. R., N. Aghanim, M. Arnaud, F. Arroja, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, et al. « Planck 2015 Results - XX. Constraints on Inflation ». *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octobre 2016): A20. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525898>.
- Anderson, Warren G. « Black Hole Information Loss », 1996. http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html.
- Ball, Philip. « Black Holes “Do Not Exist” ». *Nature*, 31 mars 2005, news050328-8. <https://doi.org/10.1038/news050328-8>.
- Beisbart, Claus. « Can We Justifiably Assume the Cosmological Principle in Order to Break Model Underdetermination in Cosmology? » *Journal for General Philosophy of Science* 40, n° 2 (1 décembre 2009): 175-205. <https://doi.org/10.1007/s10838-009-9098-9>.
- Bertone, Gianfranco, Dan Hooper, et Joseph Silk. « Particle dark matter: evidence, candidates and constraints ». *Physics Reports* 405, n° 5 (1 janvier 2005): 279-390. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>.
- Blake, Chris, Shahab Joudaki, Catherine Heymans, Ami Choi, Thomas Erben, Joachim Harnois-Deraps, Hendrik Hildebrandt, et al. « RCSLenS: Testing Gravitational Physics through the Cross-Correlation of Weak Lensing and Large-Scale Structure ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, n° 3 (1 mars 2016): 2806-28. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2875>.
- Bouman, K. L., M. D. Johnson, D. Zoran, V. L. Fish, S. S. Doeleman, et W. T. Freeman. « Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction ». In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 913-22, 2016. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.105>.
- Bozza, Valerio. « Gravitational Lensing by Black Holes ». *General Relativity and Gravitation* 42, n° 9 (1 septembre 2010): 2269-2300. <https://doi.org/10.1007/s10714-010-0988-2>.
- Broderick, Avery E., Abraham Loeb, et Ramesh Narayan. « The Event Horizon of Sagittarius A* ». *The Astrophysical Journal* 701, n° 2 (20 août 2009): 1357-66. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1357>.
- Celotti, Annalisa, John C. Miller, et Dennis W. Sciama. « Astrophysical evidence for the existence of black holes ». *Classical and Quantum Gravity* 16, n° 12A (1 décembre 1999): A3-21. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.
- Choi, Charles Q. « Black Hole Pretenders Could Really Be Bizarre Quantum Stars ». *Scientific American*, 2018. <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-pretenders-could-really-be-bizarre-quantum-stars/>.
- Collett, Thomas E., Lindsay J. Oldham, Russell J. Smith, Matthew W. Auger, Kyle B. Westfall, David Bacon, Robert C. Nichol, Karen L. Masters, Kazuya Koyama, et Remco van den Bosch. « A Precise Extragalactic Test of General Relativity ». *Science* 360, n° 6395 (22 juin 2018): 1342-46. <https://doi.org/10.1126/science.aao2469>.
- Crupi, Vincenzo. « Confirmation », 30 mai 2013. <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/confirmation/>.
- Davies, P. C. W. « Thermodynamics of Black Holes ». *Reports on Progress in Physics* 41, n° 8 (août 1978): 1313–1355. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/004>.

- Duhem, Pierre Maurice Marie, Jules Vuillemin, et Louis de Broglie. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Traduit par Philip P. Wiener. 9932nd edition. Princeton: Princeton University Press, 1991.
- Ehlers, J., P. Geren, et R. K. Sachs. « Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations ». *Journal of Mathematical Physics* 9, n° 9 (1 septembre 1968): 1344-49. <https://doi.org/10.1063/1.1664720>.
- Ellis, G. F. R., et J. E. Baldwin. « On the Expected Anisotropy of Radio Source Counts ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 206, n° 2 (1 janvier 1984): 377-81. <https://doi.org/10.1093/mnras/206.2.377>.
- Ellis, G. F. R., S. D. Nel, R. Maartens, W. R. Stoeger, et A. P. Whitman. « Ideal observational cosmology ». *Physics Reports* 124, n° 5 (1 juillet 1985): 315-417. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(85\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(85)90030-4).
- Ellis, George F R. « Issues in the philosophy of cosmology ». In *Philosophy of Physics*, édité par Jeremy Butterfield et John Earman, 1183-1285. Handbook of the Philosophy of Science. Amsterdam: North-Holland, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-044451560-5/50014-2>.
- Ferrarese, Laura, et David Merritt. « A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies ». *The Astrophysical Journal* 539, n° 1 (10 août 2000): L9-12. <https://doi.org/10.1086/312838>.
- Gillessen, S., F. Eisenhauer, S. Trippe, T. Alexander, R. Genzel, F. Martins, et T. Ott. « Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center ». *The Astrophysical Journal* 692, n° 2 (20 février 2009): 1075-1109. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.
- Heusler, Markus, Piotr T. Chruściel, et João Lopes Costa. « Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond ». *Living Reviews in Relativity* 15, n° 1 (décembre 2012): 7. <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-7>.
- Kristian, J., et R. K. Sachs. « Observations in Cosmology ». *The Astrophysical Journal* 143 (1 février 1966): 379. <https://doi.org/10.1086/148522>.
- Krolik, Julian Henry. *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*. Princeton University Press, 1999.
- Lemaître, Abbé G. « A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, n° 5 (13 mars 1931): 483-90. <https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>.
- LIGO Scientific Collaboration. « Detection of gravitational waves », 2019. <https://www.ligo.org/detections.php>.
- Lyth, David H., et Antonio Riotto. « Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbation ». *Physics Reports* 314, n° 1 (1 juin 1999): 1-146. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(98\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00128-8).
- Marck, J. A. « Shortcut method of solution of geodesic equations for schwarzschild black hole ». *Classical and Quantum Gravity* 13, n° 3 (1 mars 1996): 393-402. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/007>.
- Muñoz, José A., Evencio Mediavilla, Christopher S. Kochanek, Emilio Falco, et Ana María Mosquera. « A Study of Gravitational Lens Chromaticity with the Hubble Space Telescope ». *The Astrophysical Journal* 742, n° 2 (1 décembre 2011): 67. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/67>.
- Narayan, Ramesh, et Jeffrey E. McClintock. « Advection-dominated accretion and the black hole event horizon ». *New Astronomy Reviews, Jean-Pierre Lasota, X-ray Binaries, Accretion Disks and Compact Stars*, 51, n° 10 (1 mai 2008): 733-51. <https://doi.org/10.1016/j.newar.2008.03.002>.

- NASA. « Black Holes | Science Mission Directorate », 2019. <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes>.
- Peebles, P. J. E., et Bharat Ratra. « The cosmological constant and dark energy ». *Reviews of Modern Physics* 75, n° 2 (22 avril 2003): 559-606. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.559>.
- Quine, W. V. « On the Reasons for Indeterminacy of Translation ». *The Journal of Philosophy*, 1 janvier 1970. <https://doi.org/10.2307/2023887>.
- Reyes, Reinabelle, Rachel Mandelbaum, Uros Seljak, Tobias Baldauf, James E. Gunn, Lucas Lombriser, et Robert E. Smith. « Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities ». *Nature* 464, n° 7286 (mars 2010): 256-58. <https://doi.org/10.1038/nature08857>.
- Silk, Joseph. « Formation of Galaxies ». *The Philosophy of Cosmology*, avril 2017. <https://doi.org/10.1017/9781316535783.009>.
- Smeenk, Christopher, et George Ellis. « Philosophy of Cosmology ». 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/cosmology/>.
- Song, Yong-Seon, et Olivier Doré. « A step towards testing general relativity using weak gravitational lensing and redshift surveys ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2009, n° 03 (23 mars 2009): 025-025. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/03/025>.
- Thorne, Kip S., Richard H. Price, et Douglas A. MacDonald. *Black holes: The membrane paradigm*, 1986. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1986bhmp.book.....T>.