

Tests cosmologiques gravitationnels : l'univers en expansion

Nicolae Sfetcu

25.01.2020

Sfetcu, Nicolae, « Tests cosmologiques gravitationnels : l'univers en expansion », SetThings (25 janvier 2020), URL = <https://www.setthings.com/fr/tests-cosmologiques-gravitationnels-lunivers-en-expansion/>

Email: 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/>

L'UNIVERS EN EXPANSION.....4

BIBLIOGRAPHIE.....8

Les modèles cosmologiques actuels sont construits sur la base de la relativité générale. Les solutions des équations spécifiques, Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker,¹ permettent de modéliser l'évolution de l'univers à partir du Big Bang². Certains paramètres de l'univers ont été établis par des observations. Sur la base de ces données et d'autres données d'observation, les modèles peuvent être testés³. Les prédictions incluent l'abondance initiale d'éléments chimiques formés dans une période de nucléosynthèse pendant la période du Big Bang, la structure subséquente de l'univers⁴, le rayonnement de fond cosmique⁵, etc.

Les observations sur la vitesse d'expansion de l'univers permettent d'estimer la quantité totale de matière, dont certaines théories prédisent que 90% sont de la matière noire, avec de masse mais sans interactions électromagnétiques, et ne peuvent pas être directement observées. Le décalage gravitationnel vers le rouge des supernovae et les mesures du rayonnement cosmique de fond montrent une dépendance de l'évolution de l'univers à une constante cosmologique avec une accélération de l'expansion cosmique ou, alternativement, une forme d'énergie appelée « noire ».⁶

À partir des mesures du rayonnement de fond cosmique⁷, en 1980, l'existence initiale d'une phase d'inflation a été déduite, suivie d'une phase d'expansion fortement accélérée après environ 10^{-33} secondes, expliquant ainsi l'homogénéité presque parfaite du rayonnement de fond cosmique.

Les phénomènes dans le domaine des trous noirs remettent en question nos concepts fondamentaux d'espace, de temps, de déterminisme, d'irréversibilité, d'information et de causalité. Normalement, nous pouvons considérer l'état actuel de l'Univers comme l'effet de son passé et la cause de son avenir. Chaque état de l'Univers est déterminé par un ensemble de

¹ Sean M. Carroll, « The Cosmological Constant », *Living Reviews in Relativity* 4, n° 1 (7 février 2001): 4 (1): 1, <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1>.

² La scări mari de aproximativ o sută de milioane de ani-lumină și mai mult, universul pare într-adevăr izotrop și omogen, deci modelele simplificate sunt justificate.

³ Sarah L. Bridle et al., « Precision Cosmology? Not Just Yet . . . », *Science* 299, n° 5612 (7 mars 2003): 299 (5612): 1532–1533, <https://doi.org/10.1126/science.1082158>.

⁴ Volker Springel et al., « Simulations of the Formation, Evolution and Clustering of Galaxies and Quasars », *Nature* 435, n° 7042 (juin 2005): 435 (7042): 629–636, <https://doi.org/10.1038/nature03597>.

⁵ Uroš Seljak et Matias Zaldarriaga, « Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background », *Physical Review Letters* 78, n° 11 (17 mars 1997): 78 (11): 2054–2057, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2054>.

⁶ Thomas Buchert, « Dark Energy from Structure: A Status Report », *General Relativity and Gravitation* 40, n° 2 (1 février 2008): 40 (2–3): 467–527, <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0554-8>.

⁷ D. N. Spergel et al., « Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology », *The Astrophysical Journal Supplement Series* 170, n° 2 (juin 2007): 170 (2): 377–408, <https://doi.org/10.1086/513700>.

conditions initiales et les lois de la physique. Les théorèmes ne s'appliquent qu'aux objets mathématiques, pas à la réalité. L'existence de solutions à certaines équations de lois physiques n'implique pas l'existence physique, celle-ci étant indépendante de nos conceptions. Les solutions d'équations dynamiques ne peuvent pas prédire tous les événements futurs. La relativité générale implique l'existence de tous les événements représentés par une variété topologique, c'est donc une théorie déterministe ontologique. Mais l'impossibilité de déterminer les horizons des trous noirs démontre que la relativité générale est un exemple de théorie qui peut être déterministe ontologiquement, mais néanmoins indéterminée épistémologiquement.⁸

⁸ Gustavo E. Romero, « Philosophical Issues of Black Holes », *arXiv:1409.3318 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:physics]*, 10 septembre 2014, <http://arxiv.org/abs/1409.3318>.

L'univers en expansion

La théorie du Big Bang est le principal modèle cosmologique⁹ de la première histoire de l'univers et de son évolution ultérieure. Il fournit une explication pour un large éventail de phénomènes, y compris l'abondance des éléments légers, le fond diffus cosmologique, la structure de l'univers et la loi de Hubble¹⁰. Les physiciens n'étaient pas d'accord pour dire que l'univers est parti d'une singularité ou que nos connaissances actuelles sont insuffisantes pour en déduire l'état initial. Les mesures du taux d'expansion de l'univers montrent que l'univers est né il y a 13,8 milliards d'années. Après l'expansion initiale, l'univers s'est refroidi en particules subatomiques puis en atomes. La coagulation de ces éléments primordiaux par gravité a conduit à la formation des étoiles et des galaxies actuelles.

À partir de plusieurs théories alternatives, la communauté scientifique a préféré la théorie du Big Bang en raison de sa puissance heuristique beaucoup plus grande, couplée à un large éventail de preuves empiriques, telles que le décalage vers le rouge analysé par Edwin Hubble en 1929 et la découverte du rayonnement de fond cosmique en 1964¹¹. L'évolution de l'univers se déduit à partir de la situation actuelle, vers un état initial de densité et de température énormes.

Les accélérateurs de particules peuvent reproduire les conditions après les premiers instants de l'univers, confirmant et affinant les détails du modèle Big Bang. La théorie du Big Bang explique de nombreux phénomènes observés. Le modèle du Big Bang est basé sur la théorie de la relativité générale et des hypothèses simplificatrices, telles que l'homogénéité et l'isotropie de l'espace. Les équations du modèle ont été formulées par Alexander Friedmann et des solutions similaires ont été trouvées par Willem de Sitter. La paramétrisation du modèle Big Bang en tant que modèle standard, appelé modèle Lambda-CDM, permet des recherches actuelles sur la cosmologie théorique.

Les déductions théoriques des phénomènes observés nous conduisent à une singularité initiale (au temps $t = 0$), à densité et température infinies¹². La relativité générale n'est pas en mesure de décrire ce régime, ni aucune autre loi physique, et ces lois ne peuvent pas être extrapolées au-delà de la fin de la période de Planck (10^{-37} secondes à partir du début de l'expansion). Les mesures d'expansion en observant les supernovae et en mesurant les fluctuations de température

⁹ Dennis Overbye, « Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast? », *The New York Times*, 20 février 2017, sect. Science, <https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html>.

¹⁰ E. L. Wright, « What is the evidence for the Big Bang? », in *Frequently Asked Questions in Cosmology*, 2009, http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence.

¹¹ R. B. Partridge, *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation* (Cambridge University Press, 2007), xvii.

¹² Tai L. Chow, *Gravity, Black Holes, and the Very Early Universe: An Introduction to General Relativity and Cosmology* (Springer Science & Business Media, 2007), 211.

dans l'environnement cosmique à micro-ondes montrent que « l'âge de l'univers » est de 13,799 ± 0,021 milliard d'années¹³, ce résultat favorisant le modèle cosmologique LCDM.

Les mesures de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) montrent la conformité avec le modèle Lambda-CDM où la matière noire est supposée froide¹⁴ et représente environ 23% de la matière / énergie de l'univers, tandis que la matière baryonique représente environ 4,6%. Un « modèle étendu » comprend la matière neutrino chaude et sombre.

Les preuves de l'observation de la supernova et du rayonnement de fond cosmique montrent un univers dominé par une forme d'énergie connue sous le nom d'énergie noire, qui imprègne tout l'espace, représentant 73% de la densité d'énergie totale dans l'univers d'aujourd'hui. Sa composition et son mécanisme sont inconnus.¹⁵

Le cœur du programme de recherche du Big Bang comprend deux hypothèses majeures : l'universalité des lois physiques et le principe cosmologique (selon lequel l'univers est largement homogène et isotrope). Actuellement il y a des tentatives pour les tester en dehors du programme de recherche Big Bang. La première hypothèse a été testée en tenant compte de la plus grande déviation possible de la structure fine constante pour l'âge de l'univers¹⁶. Le principe cosmologique a été confirmé à un niveau de 10^{-5} par les observations du rayonnement cosmique de fond.¹⁷

La preuve observationnelle la plus ancienne et la plus directe du Big Bang est l'expansion de l'univers selon la loi de Hubble (déduite du décalage vers le rouge des galaxies), la découverte et la mesure du rayonnement de fond cosmique et les quantités relatives d'éléments légers produits par la nucléosynthèse du Big Bang. Des observations récentes sur la formation des galaxies et l'évolution et la distribution des structures cosmiques à grande échelle confirment également cette théorie.¹⁸

¹³ P. a. R. Ade et al., « Planck 2015 Results - XIII. Cosmological Parameters », *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octobre 2016): 594: A13, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830>.

¹⁴ D. N. Spergel et al., « First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters », *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148, n° 1 (septembre 2003): 148 (1): 175–194, <https://doi.org/10.1086/377226>.

¹⁵ 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>.

¹⁶ A. V. Ivanchik, A. Y. Potekhin, et D. A. Varshalovich, « The fine-structure constant: a new observational limit on its cosmological variation and some theoretical consequences », *arXiv:astro-ph/9810166*, 10 octobre 1998, 343: 459, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9810166>.

¹⁷ Jeremy Goodman, « Geocentrism reexamined », *Physical Review D* 52, n° 4 (15 août 1995): 52 (4): 1821–1827, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821>.

¹⁸ Michael D. Gladders et al., « Cosmological Constraints from the Red-Sequence Cluster Survey », *The Astrophysical Journal* 655, n° 1 (janvier 2007): 655 (1): 128–134, <https://doi.org/10.1086/509909>.

Les modèles actuels du Big Bang introduisent diverses hypothèses *ad hoc* pour des phénomènes physiques exotiques qui n'ont pas été observés lors d'expériences ou incorporés dans le modèle standard du physique des particules. Parmi ceux-ci, l'hypothèse de la matière noire est actuellement à l'étude au niveau du laboratoire¹⁹. Pour l'énergie noire, aucune méthode de détection directe ou indirecte n'a encore été trouvée.²⁰

La loi de Hubble et l'expansion de l'espace sont vérifiées par des observations de décalages vers le rouge des galaxies et des quasars. L'expansion de l'univers a été prédite par la relativité générale d'Alexander Friedmann en 1922²¹ et de Georges Lemaître en 1927²², confirmant la théorie du Big Bang développée par Friedmann, Lemaître, Robertson et Walker.

Le rayonnement du fond cosmique micro-ondes a été découvert en 1964 par Arno Penzias et Robert Wilson, comme un signal omnidirectionnel dans la bande micro-ondes. Cela a confirmé les prévisions du Big Bang pour Alpher, Herman et Gamow en 1950.

En 1989, la NASA a lancé le satellite Cosmic Background Explorer (COBE) qui, en 1990, par des mesures de spectre de haute précision, a montré que le spectre de fréquence du fond diffus cosmologique est un corps noir presque parfait ; puis en 1992, d'autres ont trouvé de minuscules fluctuations (anisotropies) à la température du fond diffus cosmologique le long du ciel. Au cours des années 2000-2001, plusieurs expériences, telles que BOOMERanG, ont conclu que la forme de l'univers est presque un plan spatial, en mesurant la dimension angulaire typique des anisotropies²³. En 2003, les résultats de la sonde Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) ont rejeté certains modèles spécifiques d'inflation cosmique, mais étaient conformes à la théorie de l'inflation en général.²⁴

Les abondances relatives des éléments dépendent du rapport photons / baryons. Les mesures sont en accord avec celles prédites à partir d'une seule valeur du rapport baryon-photon, confirmant pleinement le deutérium, environ 4He, et une plus grande différence pour 7Li. Mais

¹⁹ Bernard Sadoulet, « The Direct Detection of Dark Matter », ResearchGate, 1998, https://www.researchgate.net/publication/260854303_The_Direct_Detection_of_Dark_Matter.

²⁰ Partridge, *3K*, xvii.

²¹ A. Friedman, « On the Curvature of Space », *General Relativity and Gravitation* 31, n° 12 (1 décembre 1999): 10 (1): 377–386, <https://doi.org/10.1023/A:1026751225741>.

²² 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): 47A: 41, <https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>.

²³ A. Melchiorri et al., « A measurement of Omega from the North American test flight of BOOMERANG », *The Astrophysical Journal* 536, n° 2 (20 juin 2000): 536(2): L63–L66, <https://doi.org/10.1086/312744>.

²⁴ Spergel et al., « Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results », 170 (2): 377–408.

l'identité générale avec les abondances prédites par la nucléosynthèse du Big Bang confirme ce modèle.²⁵

L'évolution et la distribution des galaxies et des quasars sont en accord avec le Big Bang. Les observations et la théorie suggèrent que les premiers quasars et galaxies se sont formés environ un milliard d'années après le Big Bang, après quoi les clusters de galaxies et les superclusters se sont formés. Les différences entre les galaxies relativement récemment formées et celles formées peu après le Big Bang confirment ce modèle et réfutent le modèle stationnaire.²⁶

Les nuages de gaz primordiaux ont été confirmés en 2011, en analysant les raies d'absorption dans les spectres de quasars éloignés. Ils ne contiennent pas d'éléments plus lourds, juste de l'hydrogène et du deutérium.²⁷

L'âge de l'univers, estimé à partir de l'expansion de Hubble et le fond diffus cosmologique, est en accord avec les mesures de l'évolution stellaire dans les groupes globulaires et la datation radiométrique des étoiles individuelles.

La prédiction selon laquelle *la température du fond diffus cosmologique* était plus élevée dans le passé a été prouvée expérimentalement par les observations des raies d'absorption à très basse température dans les nuages de gaz lors du décalage vers le rouge.²⁸

²⁵ Barbara Ryden, *Introduction to cosmology*, 2003, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003itc..book.....R>.

²⁶ Edmund Bertschinger, « Cosmological Perturbation Theory and Structure Formation », *arXiv:astro-ph/0101009*, 31 décembre 2000, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101009>.

²⁷ Michele Fumagalli, John M. O'Meara, et J. Xavier Prochaska, « Detection of Pristine Gas Two Billion Years After the Big Bang », *Science* 334, n° 6060 (2 décembre 2011): 334 (6060): 1245–9, <https://doi.org/10.1126/science.1213581>.

²⁸ A. Avgoustidis et al., « Constraints on the CMB Temperature-Redshift Dependence from SZ and Distance Measurements », *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, n° 02 (février 2012): 2012 (2): 013, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/013>.

Bibliographie

- Ade, P. a. R., N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, et al. « Planck 2015 Results - XIII. Cosmological Parameters ». *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octobre 2016): A13. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830>.
- Avgoustidis, A., G. Luzzi, C. J. A. P. Martins, et A. M. R. V. L. Monteiro. « Constraints on the CMB Temperature-Redshift Dependence from SZ and Distance Measurements ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, n° 02 (février 2012): 013–013. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/013>.
- Bertschinger, Edmund. « Cosmological Perturbation Theory and Structure Formation ». *arXiv:astro-ph/0101009*, 31 décembre 2000. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101009>.
- Bridle, Sarah L., Ofer Lahav, Jeremiah P. Ostriker, et Paul J. Steinhardt. « Precision Cosmology? Not Just Yet . . . » *Science* 299, n° 5612 (7 mars 2003): 1532-33. <https://doi.org/10.1126/science.1082158>.
- Buchert, Thomas. « Dark Energy from Structure: A Status Report ». *General Relativity and Gravitation* 40, n° 2 (1 février 2008): 467-527. <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0554-8>.
- Carroll, Sean M. « The Cosmological Constant ». *Living Reviews in Relativity* 4, n° 1 (7 février 2001): 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1>.
- Chow, Tai L. *Gravity, Black Holes, and the Very Early Universe: An Introduction to General Relativity and Cosmology*. Springer Science & Business Media, 2007.
- Friedman, A. « On the Curvature of Space ». *General Relativity and Gravitation* 31, n° 12 (1 décembre 1999): 1991-2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026751225741>.
- Fumagalli, Michele, John M. O’Meara, et J. Xavier Prochaska. « Detection of Pristine Gas Two Billion Years After the Big Bang ». *Science* 334, n° 6060 (2 décembre 2011): 1245-49. <https://doi.org/10.1126/science.1213581>.
- Gladders, Michael D., H. K. C. Yee, Subhabrata Majumdar, L. Felipe Barrientos, Henk Hoekstra, Patrick B. Hall, et Leopoldo Infante. « Cosmological Constraints from the Red-Sequence Cluster Survey ». *The Astrophysical Journal* 655, n° 1 (janvier 2007): 128–134. <https://doi.org/10.1086/509909>.
- Goodman, Jeremy. « Geocentrism reexamined ». *Physical Review D* 52, n° 4 (15 août 1995): 1821-27. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821>.
- Ivanchik, A. V., A. Y. Potekhin, et D. A. Varshalovich. « The fine-structure constant: a new observational limit on its cosmological variation and some theoretical consequences ». *arXiv:astro-ph/9810166*, 10 octobre 1998. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9810166>.
- 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>.
- Melchiorri, A., P. A. R. Ade, P. de Bernardis, J. J. Bock, J. Borrill, A. Boscaleri, B. P. Crill, et al. « A measurement of Omega from the North American test flight of BOOMERANG ». *The Astrophysical Journal* 536, n° 2 (20 juin 2000): L63-66. <https://doi.org/10.1086/312744>.
- Overbye, Dennis. « Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast? » *The New York Times*, 20 février 2017, sect. Science. <https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html>.

- Partridge, R. B. *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation*. Cambridge University Press, 2007.
- 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>.
- Romero, Gustavo E. « Philosophical Issues of Black Holes ». *arXiv:1409.3318 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:physics]*, 10 septembre 2014. <http://arxiv.org/abs/1409.3318>.
- Ryden, Barbara. *Introduction to cosmology*, 2003. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003itc..book.....R>.
- Sadoulet, Bernard. « The Direct Detection of Dark Matter ». ResearchGate, 1998. https://www.researchgate.net/publication/260854303_The_Direct_Detection_of_Dark_Matter.
- Seljak, Uroš, et Matias Zaldarriaga. « Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background ». *Physical Review Letters* 78, n° 11 (17 mars 1997): 2054-57. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2054>.
- Spergel, D. N., R. Bean, O. Doré, M. R.olta, C. L. Bennett, J. Dunkley, G. Hinshaw, et al. « Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology ». *The Astrophysical Journal Supplement Series* 170, n° 2 (juin 2007): 377-408. <https://doi.org/10.1086/513700>.
- Spergel, D. N., L. Verde, H. V. Peiris, E. Komatsu, M. R. Nolta, C. L. Bennett, M. Halpern, et al. « First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters ». *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148, n° 1 (septembre 2003): 175–194. <https://doi.org/10.1086/377226>.
- Springel, Volker, Simon D. M. White, Adrian Jenkins, Carlos S. Frenk, Naoki Yoshida, Liang Gao, Julio Navarro, et al. « Simulations of the Formation, Evolution and Clustering of Galaxies and Quasars ». *Nature* 435, n° 7042 (juin 2005): 629. <https://doi.org/10.1038/nature03597>.
- Wright, E. L. « What is the evidence for the Big Bang?, in Frequently Asked Questions in Cosmology », 2009. http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence.