

Teste gravitaționale cosmologice

Nicolae Sfetcu

12.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Teste gravitaționale cosmologice", SetThings (12 iulie 2019), URL = [https://www.setthings.com/ro/teste-gravitazionale-cosmologice/](https://www.setthings.com/ro/teste-gravitationale-cosmologice/)

Email: nicolae@sfetcu.com



Acest articol este licențiat Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pentru a vedea o copie a acestei licențe, vizitați <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

UNIVERSUL ÎN EXPANSIUNE	4
OBSERVAȚII COSMOLOGICE.....	8
MONITORIZĂRI ALE LENTILELOR SLABE	16
BIBLIOGRAFIE	17

Modelele cosmologice actuale sunt construite pe baza relativității generale. Soluțiile ecuațiilor specifice, Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker¹ permit modelarea evoluției universului pornind de la Big Bang.² O parte din parametrii universului au fost stabiliți prin observații. Pe baza acestora, și altor date observaționale, se pot testa modelele.³ Predicțiile includ abundența inițială de elemente chimice formate într-o perioadă de nucleosinteză în perioada Big Bang, structura ulterioară a universului,⁴ radiația cosmică de fond,⁵ etc.

Observațiile privind viteza de expansiune a universului permit estimarea cantității totale de materie, dintre care unele teorii prevăd că 90% este materie întunecată, cu masă dar fără interacțiuni electromagnetice, și nu poate fi observată direct. Deplasarea gravitațională spre roșu a supernovelor și măsurătorile radiației cosmice de fond arată o dependență a evoluției universului de o constantă cosmologică cu o accelerare a expansiunii cosmice sau, alternativ, o formă de energie numită ”întunecată”.⁶

Din măsurătorile radiațiilor de fond cosmice,⁷ în 1980 s-a dedus existența inițială a unei faze inflaționiste, urmată de o fază de expansiune puternic accelerată după aproximativ 10^{-33} secunde, explicând astfel omogenitatea aproape perfectă a radiației cosmice de fond.

Fenomenele din zona găurilor negre pun în discuție concepțiile noastre fundamentale despre spațiu, timp, determinism, ireversibilitate, informație și cauzalitate. În mod normal, putem considera starea actuală a Universului ca fiind efectul trecutului său și cauza viitorului său. Fiecare stare a Universului este determinată de un set de condiții inițiale și de legile fizicii. Teoremele se aplică doar obiectelor matematice, nu realității. Existența unor soluții la unele ecuații ale legilor

¹ Sean M. Carroll, „The Cosmological Constant”, *Living Reviews in Relativity* 4, nr. 1 (7 februarie 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, nr. 5612 (7 martie 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, nr. 7042 (iunie 2005): 435 (7042): 629–636, <https://doi.org/10.1038/nature03597>.

⁵ Uroš Seljak și Matias Zaldarriaga, „Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background”, *Physical Review Letters* 78, nr. 11 (17 martie 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, nr. 2 (1 februarie 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, nr. 2 (iunie 2007): 170 (2): 377–408, <https://doi.org/10.1086/513700>.

fizice nu implică existența fizică, aceasta fiind independentă de concepțiile noastre. Soluțiile ecuațiilor dinamice nu pot prezice toate evenimentele viitoare. Relativitatea generală presupune existența tuturor evenimentelor reprezentate de o varietate topologică, deci este o teorie deterministă ontologic. Dar imposibilitatea determinării orizonturilor găurilor negre demonstrează că relativitatea generală este un exemplu de teorie care poate fi deterministă ontologic, dar totuși epistemologic nedeterminată.⁸

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

Universul în expansiune

Teoria Big Bang este principalul model cosmologic⁹ pentru istoria timpurie a universului și evoluția lui ulterioară. El oferă o explicație pentru o gamă largă de fenomene, inclusiv abundența elementelor luminoase, fondul cosmic de microunde, structura universului și legea lui Hubble.¹⁰ Fizicienii nu s-au pus de acord dacă că universul a început de la o singularitate sau cunoașterea noastră actuală este insuficientă pentru a deduce starea inițială. Măsurători ratei de expansiune a universului arată că universul s-a născut cu 13,8 miliarde de ani în urmă. După expansiunea inițială, universul s-a răcit formând particule subatomice și apoi atomi. Coagularea acestor elemente primordiale prin gravitație a dus la formarea stelelor și galaxiilor actuale.

Din mai multe teorii alternativă, comunitatea științifică a preferat teoria Big Bang datorită puterii sale euristice mult mai mari, coroborate cu o gamă largă de dovezi empirice, precum deplasarea spre roșu galactică analizată de Edwin Hubble în 1929, și descoperirea radiației cosmice de fundal în 1964.¹¹ Evoluția universului este dedusă pornind înapoi din situația actuală, către o stare inițială de densitate și temperatură uriașe.

Acceleratoarele de particule pot replica condițiile de după primele momente ale universului, confirmând și rafinând detaliilor modelului Big Bang. Teoria Big Bang explică multe fenomene observate. Modelul Big Bang se bazează pe teoria relativității generale și pe ipoteze simplificatoare, precum omogenitatea și izotropia spațiului. Ecuțiile modelului au fost formulate de Alexander Friedmann, iar soluții similare au fost găsite de Willem de Sitter. Parametrizarea modelului Big Bang sa ca model standard, denumit modelul Lambda-CDM permite investigațiile curente ale cosmologiei teoretice.

Deducerile teoretice din fenomenele observate ne conduc la o singularitate inițială (la momentul $t = 0$), cu densitate și temperatură infinite.¹² Relativitatea generală nu este în stare să descriere acest regim, și nici alte legi fizice, și nici nu se pot extrapola

⁹ Dennis Overbye, „Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast?”, *The New York Times*, 20 februarie 2017, sec. 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.

aceste legi dincolo de sfârșitul perioada Planck (10^{-37} secunde de la începutul expansiunii). Măsurătorile expansiunii prin observarea supernovelor și măsurarea fluctuațiilor de temperatură în mediul cosmic cu microunde arată că "vârsta universului" este de $13,799 \pm 0,021$ miliarde de ani,¹³ acest rezultat favorizând modelul cosmologic LCDM.

Măsurătorile de la Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) arată conformitatea cu modelul Lambda-CDM în care se presupune că materia întunecată este rece¹⁴ și reprezintă aproximativ 23% din materia/energia universului, în timp ce materia barionică reprezintă aproximativ 4,6%. Un "model extins" include materia fierbinte întunecată sub formă de neutrini.

Dovezile provenind din observarea supernovelor și radiația cosmică de fundal arată un univers dominat de o formă de energie cunoscută sub numele de energie întunecată, care permează tot spațiu, reprezentând 73% din densitatea totală a energiei din universul de astăzi. Compoziția și mecanismul său sunt necunoscute.¹⁵

Nucleul programului de cercetare Big Bang include două ipoteze majore: universalitatea legilor fizice și principiul cosmologic (conform căruia pe scară largă universul este omogen și izotrop). În prezent se încearcă testarea acestora din afara programului de cercetare Big Bang. Prima ipoteză a fost testată luând în considerare cea mai mare deviere posibilă a structurii fine constante pentru vârstă a universului de ordinul 10^{-5} .¹⁶ Principiul cosmologic a fost confirmat la un nivel de 10^{-5} prin observațiile radiației cosmice de fundal.¹⁷

Cele mai vechi și mai directe dovezi observaționale ale Big Bang sunt expansiunea universului în conformitate cu legea lui Hubble (dedusă din deplasarea spre roșu a galaxiilor), descoperirea și măsurarea radiației cosmice de fond, și cantitățile relative ale elementelor ușoare produse de nucleosinteza Big Bang.

¹³ P. a. R. Ade et al., „Planck 2015 Results - XIII. Cosmological Parameters”, *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octombrie 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, nr. 1 (septembrie 2003): 148 (1): 175–194, <https://doi.org/10.1086/377226>.

¹⁵ P. J. E. Peebles și Bharat Ratra, „The cosmological constant and dark energy”, *Reviews of Modern Physics* 75, nr. 2 (22 aprilie 2003): 75 (2): 559–606, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.559>.

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

¹⁷ Jeremy Goodman, „Geocentrism reexamined”, *Physical Review D* 52, nr. 4 (15 august 1995): 52 (4): 1821–1827, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821>.

Observațiile recente privind formarea galaxiei și evoluția și distribuția structurilor cosmice la scară largă confirmă de asemenea această teorie.¹⁸

Modelele actuale ale Big Bang introduc diverse ipoteze ad-hoc pentru fenomene fizice exotice care nu au fost observate în experimente sau încorporate în modelul standard al fizicii particulelor. Dintre acestea, ipoteza materiei întunecate este în prezent investigată la nivel de laborator.¹⁹ Pentru energia întunecată încă nu s-a găsit o modalitate de detectare, directă sau indirectă.²⁰

Legea lui Hubble și expansiunea spațiului sunt verificate prin observații ale deplasării spre roșu ale galaxiilor și quasarelor. Expansiunea universului a fost prezisă din relativitatea generală de Alexander Friedmann în 1922²¹ și Georges Lemaître în 1927,²² confirmând teoria Big Bang dezvoltată de Friedmann, Lemaître, Robertson și Walker.

Radiația fundalului cosmic cu microunde a fost descoperită în 1964 de Arno Penzias și Robert Wilson, ca un semnal omnidirecțional în banda de microunde. Aceasta a confirmat previziunile Big Bang de Alpher, Herman și Gamow în 1950.

În 1989, NASA a lansat satelitul Cosmic Background Explorer (COBE) care, în 1990, prin măsurătorile spectrului de înaltă precizie au arătat că spectrul de frecvență CMB este un corp negru aproape perfect; apoi în 1992, alte s-au descoperit fluctuații minuscule (anizotropii) la temperatura CMB de-a lungul cerului. În anii 2000-2001, mai multe experimente, precum BOOMERanG, au ajuns la concluzia că forma universului este aproape plan spațială, prin măsurarea dimensiunii unghiulare tipice ale anizotropiilor.²³ În 2003, rezultatele Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) au respins unele modele specifice de inflație cosmică, dar au fost în concordanță cu teoria inflației în general.²⁴

Abundențele relative ale elementelor depind de raportul dintre fotoni și barioni. Măsurătorile sunt în acord cu cele prognozate dintr-o singură valoare a raportului

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

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, nr. 12 (1 decembrie 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, nr. 5 (13 martie 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, nr. 2 (20 iunie 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.

barion-foton, confirmând deplin deuteriul, aproximativ ${}^4\text{He}$, și o diferență mai mare pentru ${}^7\text{Li}$. Dar identitatea în general cu abundențele prezise de nucleosinteza Big Bang confirmă acest model.²⁵

Evoluția și distribuția galaxiilor și quasarilor sunt în acord cu Big Bang. Observațiile și teoria sugerează că primii quasari și galaxii s-au format la aproximativ un miliard de ani după Big Bang, după care s-au format clusterelor de galaxii și superclusterelor. Diferențele dintre galaxiile formate relativ recent și cele formate la scurt timp după Big Bang confirmă acest model și infirmă modelul staționar.²⁶

Norii de gaze primordiale au fost confirmați în 2011, prin analizarea liniilor de absorbție în spectrele quasarilor îndepărtați. Ei nu conțin elemente mai grele, doar hidrogen și deuteriu.²⁷

Vârsta universului estimată din expansiunea Hubble și CMB este în acord cu măsurătorile evoluției stelare în grupurile globulare și datarea radiometrică a stelelor individuale.

Predicția că *temperatura CMB* a fost mai mare în trecut a fost dovedită experimental de observațiile liniilor de absorbție foarte scăzută a temperaturii în nori de gaz la deplasare spre roșu.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 decembrie 2000, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101009>.

²⁷ Michele Fumagalli, John M. O’Meara, și J. Xavier Prochaska, „Detection of Pristine Gas Two Billion Years After the Big Bang”, *Science* 334, nr. 6060 (2 decembrie 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, nr. 02 (februarie 2012): 2012 (2): 013, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/013>.

Observații cosmologice

Stephen Hawking a introdus conceptul de radiație Hawkin conform căruia găurilor negre care au entropie. Acest concept afirmă că găurile negre pot radia energia, conservând entropia și rezolvă problemele de incompatibilitate cu a doua lege a termodinamicii. Pierderea energiei sugerează că găurile negre "se evaporă" în timp.

O gaură neagră acționează ca un corp negru ideal, deoarece nu reflectă lumină. Teoria câmpului cuantic în spațiu curbat prezice faptul că orizonturile evenimentului emit radiație Hawking cu același spectru ca un corp negru,²⁹ cu o temperatură invers proporțională cu masa sa, ordinul a miliarde de grade kelvin, făcându-le în esență imposibil de observat.

Prezența unei găuri negre poate fi dedusă indirect, prin interacțiunea sa cu alte materii și radiațiile electromagnetice. Materia care cade pe o gaură neagră poate forma un disc extern de acreție, unul dintre cele mai strălucitoare obiecte din univers. Dacă există alte stele care orbitează o gaură neagră, orbitele lor pot fi folosite pentru a determina masa și locația găurii negre, după excluderea unor alternative precum stelele neutronice. În acest fel s-a stabilit că sursa radio Sagittarius A*, din centrul galaxiei Calea Laptelui, conține o gaură neagră supermasivă de aproximativ 4,3 milioane de mase solare. La 11 februarie 2016, LIGO a anunțat prima observație a undelor gravitaționale care se presupune că au fost generate dintr-o fuziune cu gaura neagră,³⁰ iar în decembrie 2018, a fost anunțată o a altă detectare a unui eveniment de unde gravitaționale rezultate din unirea unei găuri negre cu o stea neutronică.³¹ Pe 10 aprilie 2019 a fost captată prima imagine a unei găuri negre cu ajutorul observațiilor Event Horizon Telescope din 2017 a găurii negre supermasive din centrul galactic al lui Messier 87.³²

Teorema "fără păr" afirmă că o gaură neagră stabilă are doar trei proprietăți fizice independente: masa, sarcina și momentul unghiular.³³ Orice două găuri negre care cu aceleași valori pentru aceste proprietăți nu se pot distinge conform mecanicii

²⁹ P. C. W. Davies, „Thermodynamics of Black Holes”, *Reports on Progress in Physics* 41, nr. 8 (august 1978): 41 (8): 1313–1355, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/004>.

³⁰ B. P. Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration, „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, *Physical Review Letters* 116, nr. 6 (11 februarie 2016): 116 (6): 061102, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.

³¹ LIGO Scientific Collaboration, „Detection of gravitational waves”, 2019, <https://www.ligo.org/detections.php>.

³² K. L. Bouman et al., „Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction”, în *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, 913–922, <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.105>.

³³ Markus Heusler, Piotr T. Chruściel, și João Lopes Costa, „Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond”, *Living Reviews in Relativity* 15, nr. 1 (decembrie 2012): 15 (7): 7, <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-7>.

clasice (non-cuantică). Aceste proprietăți sunt vizibile din afara unei găuri negre, putând fi măsurate.

Orizontul evenimentelor este asemănat un sistem disipativ care este aproape analog cu cel al unei membrane conductoare elastice cu frecare și rezistență electrică - paradigma membranei.³⁴ Nu există nicio modalitate de a evita pierderea informațiilor despre condițiile inițiale, inclusiv parametrii cuantici.³⁵ Acest comportament a fost numit *paradoxul pierderii informațiilor* de gaura neagră.³⁶

Existența găurilor negre sunt deduse prin observații indirecte, pe baza interacțiunilor gravitaționale cu vecinătățile acesteia.³⁷

Observarea *orbitelor stelelor în jurul Sagetator A** din centrul Căi Lactee, a oferit dovezi puternice a existenței unei găuri negre supermasive.³⁸ În plus, există unele dovezi observaționale că acest corp cosmic ar putea avea un orizont de eveniment, o caracteristică clară a găurilor negre.³⁹

Prin conservarea momentului unghiular, gazul din puțul gravitațional al unei găuri negre formează structură asemănătoare discului în jurul obiectului (*disc de acreție*),⁴⁰ emițându-se radiații electromagnetice (în principal raze X) care pot fi detectate de telescoape. În unele cazuri, discurile de acreție pot fi însoțite de jeturi relativiste emise de-a lungul poliilor, prin care se îndepărtează o mare parte din energie. Multe din fenomenele energetice ale universului sunt acumulării de materie de găurile negre, în special nucleeele galactice active și quasarii, considerate a fi discuri de acumulare a găurilor negre supermasive. În noiembrie 2011, a fost raportată prima

³⁴ Kip S. Thorne, Richard H. Price, și Douglas A. MacDonald, *Black holes: The membrane paradigm*, 1986, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1986bhmp.book.....T>.

³⁵ Componentele unui câmp cuantic din interiorul și exteriorul găurii negre vor fi în general inseparabile, dar microcausalitatea implică faptul că gradele inseparabile de libertate din gaura neagră nu se pot recombinare coerent cu cele din universul exterior. Astfel, când gaura neagră s-a evaporat complet, aceste inseparări vor dispărea, iar entropia universului va crește.

³⁶ Warren G. Anderson, „Black Hole Information Loss”, 1996, http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html.

³⁷ NASA, „Black Holes | Science Mission Directorate”, 2019, <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes>.

³⁸ S. Gillessen et al., „Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center”, *The Astrophysical Journal* 692, nr. 2 (20 februarie 2009): 692 (2): 1075–1109, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.

³⁹ Avery E. Broderick, Abraham Loeb, și Ramesh Narayan, „The Event Horizon of Sagittarius A*”, *The Astrophysical Journal* 701, nr. 2 (20 august 2009): 701(2): 1357–1366, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1357>.

⁴⁰ J. A. Marck, „Shortcut method of solution of geodesic equations for schwarzschild black hole”, *Classical and Quantum Gravity* 13, nr. 3 (1 martie 1996): 13 (3): 393–402, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/007>.

observație directă a unui disc de acreție pentru un quasar în jurul unei găuri negre supermasive.⁴¹

Sisteme binare de stele cu raze X emit o mare parte din radiațiile lor atunci când una dintre stele preia masă de la o altă stea, existând astfel posibilitatea studierii existenței unei găuri negre.⁴² În acest scop a fost studiată Cygnus X-1, descoperită de Charles Thomas Bolton, Louise Webster și Paul Murdin în 1972, rezultatele nefiind certe întrucât steaua însoțitoare este mult mai grea decât gaura neagră candidată. Ulterior s-au găsit alți candidați mai buni. Lipsa discului de acreție a unui astfel de sistem se datorează unui fluxul de masă de acumulare dominat de advecție care, dacă e confirmat prin observație, este o dovadă puternică pentru prezența unui orizont al evenimentului.⁴³ Emisiile de raze X de pe discurile de acreție ajung uneori să se comporte ca oscilații cvasi-periodice, cu frecvență dependentă de masa obiectului compact. Acest fenomen poate fi folosit pentru a determina masa găurilor negre.

Astronomii au observat anumite galaxii, denumite "active", cu caracteristici neobișnuite, precum emisia neobișnuită de linii spectrale și emisiile radio foarte puternice. Ele pot fi explicate prin prezența găurilor negre supermasive.⁴⁴ Corelația observațională între masa acestei găuri și viteza de dispersie a galaxiei gazdă, cunoscută ca relația M-sigma, sugerează o legătură între formarea găurii negre și galaxia înșăși.⁴⁵

Oamenii de știință speră ca în viitor să poată testa găurile negre prin observarea efectelor cauzate de un câmp gravitațional puternic în vecinătatea lor, precum lentila gravitațională. Există deja observații privind lentilele gravitaționale slabe, în care razele de lumină sunt deflectate cu numai câteva secunde, dar niciodată direct pentru o gaură neagră. Există mai mulți candidați în acest scop, aflați pe orbită în jurul Săgetătorului A*.⁴⁶

⁴¹ José A. Muñoz et al., „A Study of Gravitational Lens Chromaticity with the Hubble Space Telescope”, *The Astrophysical Journal* 742, nr. 2 (1 decembrie 2011): 742 (2): 67, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/67>.

⁴² Annalisa Celotti, John C. Miller, și Dennis W. Sciama, „Astrophysical evidence for the existence of black holes”, *Classical and Quantum Gravity* 16, nr. 12A (1 decembrie 1999): 16 (12A): A3–A21, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.

⁴³ Ramesh Narayan și 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, nr. 10 (1 mai 2008): 51 (10–12): 733–751, <https://doi.org/10.1016/j.newar.2008.03.002>.

⁴⁴ Julian Henry Krolik, *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment* (Princeton University Press, 1999).

⁴⁵ Laura Ferrarese și David Merritt, „A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies”, *The Astrophysical Journal* 539, nr. 1 (10 august 2000): 539 (1): 9–12, <https://doi.org/10.1086/312838>.

⁴⁶ Valerio Bozza, „Gravitational Lensing by Black Holes”, *General Relativity and Gravitation* 42, nr. 9 (1 septembrie 2010): 42 (9): 2269–2300, <https://doi.org/10.1007/s10714-010-0988-2>.

Există mai multe conjecturi ad-hoc care au fost introduse pentru a explica mai bine observațiile candidaților de gaură neagră astronomică identici, dar cu mecanisme de funcționare diferite: gravastar, steaua neagră (gravitația semiclassical),⁴⁷ steaua energiei întunecate, etc.⁴⁸

Cosmologia, ca studiul universului fizic, a început ca ramură a fizicii teoretice prin modelul static al universului din 1917 al lui Einstein, dezvoltată apoi de Lemaître.⁴⁹ Din 1960 cosmologia este considerată o ramură a filosofiei. Modelul standard al cosmologiei se bazează pe extrapolări ale teoriilor existente, în special relativitatea generală. Ea se bazează pe un set de soluții Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) cu o geometrie uniformă și simetrică tridimensională cu trei curburi posibile: pozitivă (spațiu sferic), zero (spațiu euclidian), și negativă (spațiu hiperbolic).

Caracteristicile de bază ale modelelor care se bazează pe soluțiile FLRW, care pot fi considerate drept nucleul dur pentru programul de cercetare cosmologic aferent, sunt: modelele sunt dinamice (univers în continuă schimbare), rata de expansiune a universului variază în funcție de diferitele tipuri de materie dominante, și modelele FLRW au o singularitate într-un timp finit în trecut (Big Bang).

În cazul modelelor FLRW există două tipuri de teste observaționale pentru verificarea lor: se studiază geometria spațiului de fundal și evoluția sa cu ajutorul materiei și radiației în univers, sau se studiază modul de formare a structurii modelului care descrie evoluția perturbațiilor mici.

Studiul observațional al geometriei universului arată că acesta este izotrop la scări suficient de mari, conform datelor rezultate din radiația cosmică a fundalului de microunde (CMB) și din surse discrete (galaxii, etc.). Studiul modul de formare a structurii modelului folosește un număr mic de parametri pentru observații din diferite perioade, folosind anizotropiile de temperatură în CMB și spectrul de putere al materiei prin observarea galaxiilor drept constrângeri independente ale acestor parametri, și ale parametrilor de fond.⁵⁰

⁴⁷ 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/>.

⁴⁸ Philip Ball, „Black Holes «Do Not Exist»”, *Nature*, 31 martie 2005, news050328-8, <https://doi.org/10.1038/news050328-8>.

⁴⁹ Lemaître, „A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae”.

⁵⁰ Christopher Smeenk și George Ellis, „Philosophy of Cosmology”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/>.

Modelul cosmologic standard include câteva perioade în evoluția universului tratate distinct în verificări experimentale și observaționale:⁵¹

- *Gravitația cuantică*: perioada de început, când efectele cuantice au fost esențiale în descrierea fenomenelor
- *Inflația*: o perioadă de expansiune exponențială a universului, în timpul căreia substanțele preexistente și radiațiile sunt diluate rapid, iar apoi universul este repopulat cu materie și energie prin degradarea câmpului în alte zone la sfârșitul inflației ("reîncălzirea").
- *Nucleosinteza Big Bang*: perioada în care constituenții universului includ neutronii, protonii, electronii, fotonii și neutrinii, cuplați strâns și în echilibrul termic local și apar elementele ușoare.
- *Decuplarea*: electronii devin legați în atomi stabili iar fotonii se decuplează de materie; pe măsură ce universul se expandează, fotonii se răcesc adiabatic dar păstrează un spectru al corpului negru - radiație cosmică de fundal care conține multe informații despre starea universului la decuplare.⁵²
- *Perioada întunecată*: după decuplare, materia barionică formată din hidrogen neutru și heliu se coagulează formând stele; epoca întunecată se termină odată cu apariția luminii de la stele.
- *Formarea structurilor*: prima generație de stele se agregă în galaxii, iar galaxiile în clustere; stelele masive sfârșesc în explozii supernova și răspândesc în spațiu elemente grele create în interiorul lor, formându-se a doua generație de stele înconjurată de planete.
- *Dominația energiei întunecate*: energia întunecată (sau o constantă cosmologică non-zero) ajunge să domine expansiunea universului, ducând la o expansiune accelerată; expansiunea va continua la nesfârșit dacă energia întunecată este în fapt o constantă cosmologică.⁵³

Modelul cosmologic standard include câțiva parametri liberi, precum densitatea abundenței diferitelor tipuri de materie, care pot fi măsurați în mai multe moduri cu ipoteze teoretice distincte și surse de eroare. În prezent există diferențe mari între

⁵¹ Smeenk și Ellis.

⁵² P. a. R. Ade et al., „Planck 2015 Results - XX. Constraints on Inflation”, *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octombrie 2016): 594: A20, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525898>.

⁵³ O explicație alternativă, în conformitate cu teoria corzilor, este că universul are dimensiuni multiple și gravitația se pierdecând gravitonii trec de la o dimensiune la alta.

diferitele metode de măsurare, iar semnificația și implicațiile acestor diferențe încă nu sunt clare.

Modelul standard al nucleosintezei este confirmat de mai multe dovezi independente, pentru a elimina erorile teoretice izolate sau sursele de erori sistematice.

Deși este cel mai complet, modelul cosmologic standard se lovește de trei probleme care implică necesitatea unei noi fizici:⁵⁴ nu există o descriere completă a naturii sau dinamicii materiei întunecate,⁵⁵ energiei întunecate⁵⁶ și câmpului inflaționist;⁵⁷ formarea galaxiilor,⁵⁸ și posibilă refutare a modelului în cazul în care s-ar descoperi obiecte în univers cu o vârstă mai mare decât cea determinată a universului, de cca. 13,7 miliarde de ani.⁵⁹

Există opinia că actualele dovezi cosmologice nu sunt suficiente pentru a determina ce teorie științifică să alegem, iar fiecare teorie conformă cu un anumit număr de date oferă descrieri destul de diferite ale lumii. Duhem⁶⁰ a caracterizat dificultatea alegerii teoriilor fizice, iar Quine⁶¹ a pledat pentru subdeterminare. Dificultatea constă în modul de caracterizare a conținutului empiric al teoriilor. Van Fraassen (1980) definește o teorie ca fiind „empiric adecvată“ dacă ceea ce se spune despre fenomene observabile este adevărat. În cosmologie caracteristicile de bază ale modelului standard impun două limite fundamentale: finitudinea vitezei luminii, și faptul că teoriile care pot fi testate prin implicațiile lor pentru cosmologie implică energii prea mari pentru a fi testate pe Pamant. Ellis (2007)

Programul de cercetare al cosmologiei observaționale⁶² ⁶³ arată în ce măsuri un set de observații ideale poate determina geometria spațiu-timp pe baza unui minim de

⁵⁴ Smeenk și Ellis, „Philosophy of Cosmology”.

⁵⁵ Gianfranco Bertone, Dan Hooper, și Joseph Silk, „Particle dark matter: evidence, candidates and constraints”, *Physics Reports* 405, nr. 5 (1 ianuarie 2005): 405(5–6): 279–390, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>.

⁵⁶ Peebles și Ratra, „The cosmological constant and dark energy”, *75*(2): 559–606.

⁵⁷ David H. Lyth și Antonio Riotto, „Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbation”, *Physics Reports* 314, nr. 1 (1 iunie 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).

⁵⁸ Joseph Silk, „Formation of Galaxies”, *The Philosophy of Cosmology*, aprilie 2017, 161–178, <https://doi.org/10.1017/9781316535783.009>.

⁵⁹ G. F. R. Ellis și J. E. Baldwin, „On the Expected Anisotropy of Radio Source Counts”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 206, nr. 2 (1 ianuarie 1984): 206(2): 377–381, <https://doi.org/10.1093/mnras/206.2.377>.

⁶⁰ Pierre Maurice Marie Duhem, Jules Vuillemin, și Louis de Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*, trad. Philip P. Wiener, 9932nd edition (Princeton: Princeton University Press, 1991).

⁶¹ W. V. Quine, „On the Reasons for Indeterminacy of Translation”, *The Journal of Philosophy*, 1 ianuarie 1970, 67(6): 178–183, <https://doi.org/10.2307/2023887>.

⁶² J. Kristian și R. K. Sachs, „Observations in Cosmology”, *The Astrophysical Journal* 143 (1 februarie 1966): 143: 379–399, <https://doi.org/10.1086/148522>.

⁶³ G. F. R. Ellis et al., „Ideal observational cosmology”, *Physics Reports* 124, nr. 5 (1 iulie 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).

ipoteze cosmologice. Setul de date ideal presupune obiecte astrofizice care pot fi folosite ca etaloane pentru determinarea proprietăților și evoluției unor surse. În practică observatorii nu au acces la setului de date ideal, astfel încât se confruntă cu provocări în înțelegerea naturii surselor și a evoluției lor.

Conform lui Christopher Smeenk și George Ellis, problema în cosmologie este discriminarea între modelele unei teorii date, mai degrabă decât o alegere între teorii concurente. Ei dau ca exemplu simetria globală asumată în derivarea modelelor FLRW. Toate dovezile existente sunt la fel de compatibile cu modelele în care această simetrie nu este valabilă. O posibilitate ar fi ca ea să fie considerată *a priori*, sau ca o condiție prealabilă pentru teoretizarea cosmologică⁶⁴. recent s-a încercat justificarea modelelor FLRW apelând la un alt principiu general mai slab, coroborat cu teoreme legate de omogenitate și izotropie. Teorema Ehlers-Geren-Sachs⁶⁵ arată că, dacă toți observatorii geodezici dintr-un model în care se acceptă expansiunea determină radiația de fond care se propagă liber este exact izotropă, atunci se confirmă modelul FLRW. Dacă trecutul cauzal este "tipic", observațiile de-a lungul liniei noastre de univers vor constrânge ce pot vedea ceilalți observatori (principiul copernican). Acest principiu se poate testa indirect, prin verificarea izotropiei prin efectul Sunyaev-Zel'dovici. Alte teste sunt directe cu un set suficient de bun de etaloane, și un test indirect bazat pe scurgerea timpului de redirectionare cosmologică. Această modalitate de lucru oferă un argument empiric conform căruia universul observat este bine aproximat de un model FLRW, transformând astfel ipoteza inițială filosofică în o bază testată observațional.⁶⁶

Fizicianul sovietic Yakov Zeldovici a numit universul timpuriu ca fiind "acceleratorul omului sărac", pentru că prin observarea universului timpuriu se pot studia fenomene din fizica energiei înalte. Pentru gravitația cuantică, cosmologia oferă singura modalitate practică de a evalua ideile concurente.

În prezent există dezbateri privind legitimitatea diferitelor programe de cercetare în cosmologie. Un răspuns este să se recurgă la modele ipotetico-deductiviste (ID): o ipoteză devine mai de încredere cu cât una dintre consecințele ei este verificată, și invers. Dar modelul ID prezintă mai multe aspecte contestate (este adesea numit "ID

⁶⁴ Claus Beisbart, „Can We Justifiably Assume the Cosmological Principle in Order to Break Model Underdetermination in Cosmology?”, *Journal for General Philosophy of Science* 40, nr. 2 (1 decembrie 2009): 40(2): 175–205, <https://doi.org/10.1007/s10838-009-9098-9>.

⁶⁵ J. Ehlers, P. Geren, și R. K. Sachs, „Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations”, *Journal of Mathematical Physics* 9, nr. 9 (1 septembrie 1968): 9(9): 1344–1349, <https://doi.org/10.1063/1.1664720>.

⁶⁶ Smeenk și Ellis, „Philosophy of Cosmology”.

naiv", similar cu falsificaționismul naiv al lui Popper). Viziunea naivă nu permite distingerea între teoriile rivale subdeterminate care fac aceleași predicții.⁶⁷ Oamenii de știință disting între teoriile care pur și simplu "se potrivesc cu datele", spre deosebire de cele care captează cu precizie legile și evaluează unele predicții de succes ca fiind mai revelatoare decât altele.

O metodologie mai sofisticată poate recunoaște explicit criteriile pe care oamenii de știință le folosesc pentru a evalua teoriile științifice,⁶⁸ care includ puterea explicativă, și coerența cu alte teorii , pe lângă compatibilitatea cu dovezile. Acești factori ar trebui să fie clari și discriminatorii. Alternativ, se pot considera unele dintre caracteristicile dezirabile ca parte a ceea ce constituie un succes empiric.

⁶⁷ Vincenzo Crupi, „Confirmation”, 30 mai 2013,
<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/confirmation/>.

⁶⁸ George F R Ellis, „Issues in the philosophy of cosmology”, în *Philosophy of Physics*, ed. Jeremy Butterfield și John Earman, Handbook of the Philosophy of Science (Amsterdam: North-Holland, 2007), 1183–1286,
<https://doi.org/10.1016/B978-044451560-5/50014-2>.

Monitorizări ale lentilelor slabe

Cu ajutorul telescopului spațial Hubble și Very Large Telescope s-au făcut teste ale relativității generale la scară galactică. Galaxia ESO 325-G004 acționează ca o lentilă gravitațională puternică, distorsionând lumina de la o galaxie mai îndepărtată și creând un inel Einstein în jurul centrului său. Comparând masa ESO 325-G004, prin măsurători ale mișcării stelelor din interiorul acestei galaxii, cu curbura spațiului din jurul ei, gravitația s-a comportat conform relativității generale.⁶⁹

Studiile privind lentilele slabe sunt în fază incipientă. Lentilele slabe produc denaturări în imaginea aparentă a dimensiunii, formei și fluxurilor obiectului astrofizic folosit ca lentilă cosmică. Studiul lentilelor slabe este o metodă bună pentru testarea TGR, și o dovadă puternică a existenței energiei întunecate și materiei întunecate.⁷⁰

Reyes și alții au măsurat "alunecarea gravitațională", ca diferența dintre două potențiale gravitaționale diferite care definesc perturbațiile materiei. În TGR această valoare este zero sau foarte mică, dar în alte teorii este diferită de zero și conduce la diferențe substanțiale în puterea lentilelor gravitaționale.⁷¹

Mai recent, Blake și colab.,⁷² au efectuat teste asemănătoare TGR pe distanțe cosmologice, folosind date spectroscopice și imagistica. Ei au descoperit că rezultatele validează TGR.

⁶⁹ Thomas E. Collett et al., „A Precise Extragalactic Test of General Relativity”, *Science* 360, nr. 6395 (22 iunie 2018): 360 (6395): 1342–1346, <https://doi.org/10.1126/science.aao2469>.

⁷⁰ Yong-Seon Song și Olivier Doré, „A step towards testing general relativity using weak gravitational lensing and redshift surveys”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2009, nr. 03 (23 martie 2009): 025, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/03/025>.

⁷¹ Reinabelle Reyes et al., „Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities”, *Nature* 464, nr. 7286 (martie 2010): 464(7286): 256–258, <https://doi.org/10.1038/nature08857>.

⁷² 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, nr. 3 (1 martie 2016): 456(3): 2806–2828, <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2875>.

Bibliografie

- Abbott, B. P., The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration. „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”. *Physical Review Letters* 116, nr. 6 (11 februarie 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 octombrie 2016): A20. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525898>.
- 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 octombrie 2016): A13. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830>.
- Anderson, Warren G. „Black Hole Information Loss”, 1996. http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html.
- Avgoustidis, A., G. Luzzi, C. J. A. P. Martins, și 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, nr. 02 (februarie 2012): 013–013. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/013>.
- Ball, Philip. „Black Holes «Do Not Exist»”. *Nature*, 31 martie 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, nr. 2 (1 decembrie 2009): 175–205. <https://doi.org/10.1007/s10838-009-9098-9>.
- Bertone, Gianfranco, Dan Hooper, și Joseph Silk. „Particle dark matter: evidence, candidates and constraints”. *Physics Reports* 405, nr. 5 (1 ianuarie 2005): 279–390. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>.
- Bertschinger, Edmund. „Cosmological Perturbation Theory and Structure Formation”. *arXiv:astro-ph/0101009*, 31 decembrie 2000. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101009>.
- 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, nr. 3 (1 martie 2016): 2806–28. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2875>.
- Bouman, K. L., M. D. Johnson, D. Zoran, V. L. Fish, S. S. Doeleman, și W. T. Freeman. „Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction”. În *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, nr. 9 (1 septembrie 2010): 2269–2300. <https://doi.org/10.1007/s10714-010-0988-2>.
- Bridle, Sarah L., Ofer Lahav, Jeremiah P. Ostriker, și Paul J. Steinhardt. „Precision Cosmology? Not Just Yet . . .” *Science* 299, nr. 5612 (7 martie 2003): 1532–33. <https://doi.org/10.1126/science.1082158>.
- Broderick, Avery E., Abraham Loeb, și Ramesh Narayan. „The Event Horizon of Sagittarius A*”. *The Astrophysical Journal* 701, nr. 2 (20 august 2009): 1357–66. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1357>.
- Buchert, Thomas. „Dark Energy from Structure: A Status Report”. *General Relativity and Gravitation* 40, nr. 2 (1 februarie 2008): 467–527. <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0554-8>.

- Carroll, Sean M. „The Cosmological Constant”. *Living Reviews in Relativity* 4, nr. 1 (7 februarie 2001): 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1>.
- Celotti, Annalisa, John C. Miller, și Dennis W. Sciama. „Astrophysical evidence for the existence of black holes”. *Classical and Quantum Gravity* 16, nr. 12A (1 decembrie 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/>.
- Chow, Tai L. *Gravity, Black Holes, and the Very Early Universe: An Introduction to General Relativity and Cosmology*. Springer Science & Business Media, 2007.
- 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, și Remco van den Bosch. „A Precise Extragalactic Test of General Relativity”. *Science* 360, nr. 6395 (22 iunie 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, nr. 8 (august 1978): 1313–1355. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/004>.
- Duhem, Pierre Maurice Marie, Jules Vuillemin, și Louis de Broglie. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Traducere de Philip P. Wiener. 9932nd edition. Princeton: Princeton University Press, 1991.
- Ehlers, J., P. Geren, și R. K. Sachs. „Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations”. *Journal of Mathematical Physics* 9, nr. 9 (1 septembrie 1968): 1344–49. <https://doi.org/10.1063/1.1664720>.
- Ellis, G. F. R., și J. E. Baldwin. „On the Expected Anisotropy of Radio Source Counts”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 206, nr. 2 (1 ianuarie 1984): 377–81. <https://doi.org/10.1093/mnras/206.2.377>.
- Ellis, G. F. R., S. D. Nel, R. Maartens, W. R. Stoeger, și A. P. Whitman. „Ideal observational cosmology”. *Physics Reports* 124, nr. 5 (1 iulie 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”. În *Philosophy of Physics*, ediție de Jeremy Butterfield și 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, și David Merritt. „A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies”. *The Astrophysical Journal* 539, nr. 1 (10 august 2000): L9–12. <https://doi.org/10.1086/312838>.
- Friedman, A. „On the Curvature of Space”. *General Relativity and Gravitation* 31, nr. 12 (1 decembrie 1999): 1991–2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026751225741>.
- Fumagalli, Michele, John M. O’Meara, și J. Xavier Prochaska. „Detection of Pristine Gas Two Billion Years After the Big Bang”. *Science* 334, nr. 6060 (2 decembrie 2011): 1245–49. <https://doi.org/10.1126/science.1213581>.
- Gillessen, S., F. Eisenhauer, S. Trippe, T. Alexander, R. Genzel, F. Martins, și T. Ott. „Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center”. *The Astrophysical Journal* 692, nr. 2 (20 februarie 2009): 1075–1109. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.
- Gladders, Michael D., H. K. C. Yee, Subhabrata Majumdar, L. Felipe Barrientos, Henk Hoekstra, Patrick B. Hall, și Leopoldo Infante. „Cosmological Constraints from the Red-Sequence Cluster Survey”. *The Astrophysical Journal* 655, nr. 1 (ianuarie 2007): 128–134. <https://doi.org/10.1086/509909>.

- Goodman, Jeremy. „Geocentrism reexamined”. *Physical Review D* 52, nr. 4 (15 august 1995): 1821–27. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821>.
- Heusler, Markus, Piotr T. Chruściel, și João Lopes Costa. „Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond”. *Living Reviews in Relativity* 15, nr. 1 (decembrie 2012): 7. <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-7>.
- Ivanchik, A. V., A. Y. Potekhin, și D. A. Varshalovich. „The fine-structure constant: a new observational limit on its cosmological variation and some theoretical consequences”. *arXiv:astro-ph/9810166*, 10 octombrie 1998. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9810166>.
- Kristian, J., și R. K. Sachs. „Observations in Cosmology”. *The Astrophysical Journal* 143 (1 februarie 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, nr. 5 (13 martie 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., și Antonio Riotto. „Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbation”. *Physics Reports* 314, nr. 1 (1 iunie 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, nr. 3 (1 martie 1996): 393–402. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/007>.
- 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, nr. 2 (20 iunie 2000): L63–66. <https://doi.org/10.1086/312744>.
- Muñoz, José A., Evencio Mediavilla, Christopher S. Kochanek, Emilio Falco, și Ana María Mosquera. „A Study of Gravitational Lens Chromaticity with the Hubble Space Telescope”. *The Astrophysical Journal* 742, nr. 2 (1 decembrie 2011): 67. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/67>.
- Narayan, Ramesh, și 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, nr. 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>.
- Overbye, Dennis. „Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast?” *The New York Times*, 20 februarie 2017, sec. 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., și Bharat Ratra. „The cosmological constant and dark energy”. *Reviews of Modern Physics* 75, nr. 2 (22 aprilie 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 ianuarie 1970. <https://doi.org/10.2307/2023887>.

- Reyes, Reinabelle, Rachel Mandelbaum, Uros Seljak, Tobias Baldauf, James E. Gunn, Lucas Lombriser, și Robert E. Smith. „Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities”. *Nature* 464, nr. 7286 (martie 2010): 256–58. <https://doi.org/10.1038/nature08857>.
- Romero, Gustavo E. „Philosophical Issues of Black Holes”. *arXiv:1409.3318 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:physics]*, 10 septembrie 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, și Matias Zaldarriaga. „Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background”. *Physical Review Letters* 78, nr. 11 (17 martie 1997): 2054–57. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2054>.
- Silk, Joseph. „Formation of Galaxies”. *The Philosophy of Cosmology*, aprilie 2017. <https://doi.org/10.1017/9781316535783.009>.
- Smeenk, Christopher, și George Ellis. „Philosophy of Cosmology”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/>.
- Song, Yong-Seon, și Olivier Doré. „A step towards testing general relativity using weak gravitational lensing and redshift surveys”. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2009, nr. 03 (23 martie 2009): 025–025. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/03/025>.
- Spergel, D. N., R. Bean, O. Doré, M. R. Nolta, 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, nr. 2 (iunie 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, nr. 1 (septembrie 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, nr. 7042 (iunie 2005): 629. <https://doi.org/10.1038/nature03597>.
- Thorne, Kip S., Richard H. Price, și Douglas A. MacDonald. *Black holes: The membrane paradigm*, 1986. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1986bhmp.book.....T>.
- 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.