

# Singularități gravitaționale

Nicolae Sfetcu

22.05.2018

Sfetcu, Nicolae, "Singularități gravitaționale", SetThings (22 mai 2019), MultiMedia Publishing (ed.), URL = <https://www.setthings.com/ro/singularitati-gravitationale-gauri-negre/>

Email: [nicolae@sfetcu.com](mailto: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/>.

Extras din lucrarea:

Sfetcu, Nicolae, "Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale", SetThings (1 iunie 2018), MultiMedia (ed.), DOI: 10.13140/RG.2.2.17470.18242, URL = <https://www.setthings.com/ro/e-books/singularitatile-ca-limite-ontologice-ale-relativitatii-generale/>

## Singularități gravitaționale

În teoria clasică a gravitației lui Newton există posibilitatea fundamentală a unei singularități. Niciun semnal nu se poate propaga din interiorul unei singularități, dar influența gravitațională a acesteia este permanent prezentă în exterior și depinde numai de cantitatea totală de masă, de impulsul unghiular și de sarcina electrică din componența singularității. Singularitățile pot fi detectate prin influența gravitației lor puternice în imediata vecinătate.

În teoria clasică a gravitației lui Newton, un argument energetic ne spune că există o viteză de evadare la suprafața oricărui obiect.

În teoria Newtoniană, gravitația este descrisă de potențial. Similar, în RG soluția exterioară simetrică (independentă de timp), numită spațiu-timpul Schwarzschild, depinde numai de masa

obiectului interior. Raza Schwarzschild în RG este raza maximă a unei suprafețe sub care lumina nu mai poate scăpa în afară. Această "rază a orizontului" este, coincidentă, aceeași ca raza critică pentru obiectele din "singularitățile" newtoniene.

Singularitățile gravitaționale în RG sunt locații în spațiu-timp unde câmpul gravitațional devine infinit. Curburile invariabile scalare ale spațiu-timpului includ o măsură a densității materiei. Unii fizicieni și filosofi consideră că, deoarece densitatea materiei tinde spre infinit în singularitate, legile spațiu-timpului nu mai sunt valabile acolo.

O singularitate gravitațională aproape unanim acceptată în astrofizică și cosmologie, ca cea mai timpurie stare a universului, este Big Bang (BB). (Wald 1984) Nici în acest caz legile cunoscute ale fizicii nu mai sunt valabile. (S. Hawking 2012)

Relativitatea generală prezice că orice obiect care colapsează dincolo de un anumit punct (pentru stele, raza Schwarzschild) formează o GN cu o singularitate, cu o limită de acțiune definită de un orizont al evenimentelor (OE). (Curiel and Bokulich 2018) Teoremele de singularitate ale lui Penrose-Hawking afirmă că în acest caz geodezicele se termină în singularitate. (Moulay 2012)

Teoria gravitației cuantice în buclă sugerează că singularitățile nu pot exista (Gambini, Olmedo, and Pullin 2013) pentru că, datorită efectelor gravitației cuantice, există o distanță minimă dincolo de care forța de gravitație nu mai crește.

Soluția Schwarzschild la ecuațiile din RG descrie o GN ne-rotitoare, neîncărcată. În sistemele de coordonate convenabile, o parte a metricii devine infinită la OE. Într-o GN rotativă (GN Kerr) singularitatea apare pe un inel, putând să devină, teoretic, o "gaură de vierme". (Wald 1984)

Un tip special de singularitate este "singularitatea goală" care, deși este interzisă de *ipoteza cenzurii cosmice*, în 1991 fizicienii Stuart Shapiro și Saul Teukolsky au efectuat simulări pe

calculator ale unui plan de rotație a prafului cosmic rezultând că RG ar putea permite singularități "goale". (Goswami, Joshi, and Singh 2005) De altfel, ipoteza cenzurii cosmice afirmă că pot exista singularități realiste (fără simetrii perfecte, materie cu proprietăți realiste) dar sunt ascunse în siguranță în spatele orizontului și astfel invizibile.<sup>1</sup> (Wald 1984).

Stephen Hawking a sugerat că GN pot radia energia, conservând astfel entropia și rezolvând problemele de incompatibilitate cu a doua lege a termodinamicii. Aceasta înseamnă că GN au o viață cosmică limitată”

Paul Townsend afirmă că singularitățile sunt o caracteristică generică a RG și inevitabile în cazul în care unui corp a trecut de-o anumită etapă (Townsend 1997) și, de asemenea, la începutul unei clase largi de universuri în expansiune. (S. W. Hawking 1966) În prezent se cercetează structura generică a acestor entități (de exemplu, conjunctura BKL). (Berger 2002) Ipoteza cenzurii cosmice afirmă că toate singularitățile viitoare realiste (fără simetrii perfecte, materie cu proprietăți realiste) sunt ascunse în siguranță în spatele orizontului și astfel invizibile

În privința definiției singularităților există un dezacord net: deși modifică geometria locală, apar dificultăți în a vorbi de ele ca despre un lucru care se găsește într-o anumită locație în spațiu-timp, motiv pentru care unii fizicieni și filosofi propun să se vorbească de ”spațiu-timpuri singulare” în loc de ”singularități”. Cele mai importante definiții se referă fie la căi incomplete, fie la ideea ”punctelor lipsă” din spațiu-timp, fie o idee care combină cele două concepte de mai sus, respectiv a unei structuri singulare cu comportament ”patologic” (deformarea spațiu-timpului care se manifestă el însuși ca un câmp gravitațional). (Curiel and Bokulich 2018)

---

<sup>1</sup> Restricțiile singularităților din viitor exclud singularitățile inițiale, precum Big Bang, care, în principiu, sunt vizibile observatorilor la un moment cosmic ulterior. Conjectura cenzurii cosmice a fost prezentată pentru prima oară de Penrose în o lucrare din 1969. (Penrose 1969)

## Găuri negre

GN ridică unele aspecte conceptuale. Deși sunt regiuni ale spațiu-timpului, GN sunt și entități termodinamice, cu o temperatură și o entropie; iar evoluția GN este aparent în conflict cu fizica cuantică standard, deoarece exclude creșterea entropiei. (Curiel and Bokulich 2018)

În centrul unei GN din RG se află o singularitate gravitațională, o regiune în care curbura spațiu-timp devine infinită. Singularitatea conține toată masa GN, rezultând o densitate infinită. (Carroll and Carroll 2004) În cazul unei găuri negre încărcate (Reissner-Nordström) sau rotative (Kerr), este posibilă evitarea singularității, dar apare posibilitatea ipotetică de a ieși din GN într-un spațiu-timp diferit, GN acționând ca o gaură de vierme, și deci posibilitatea de a călători într-un alt univers sau în timp. Droz consideră această posibilitate doar teoretică, deoarece orice perturbare ar distruge această posibilitate. (Droz, Israel, and Morsink 1996) Posibilitatea existenței curbele închise în timp în jurul singularității Kerr duce la probleme de cauzalitatea precum paradoxul bunicului. (Sfetcu 2018)

Conform lui Kerr, în prezent majoritatea cercetătorilor din domeniu consideră că nu există niciun obstacol în calea formării unui OE al GN. (Kerr 2007) Penrose a demonstrat inevitabilitatea singularităților în anumite condiții. (Penrose 1965) Soluția Kerr, teorema fără păr și legile termodinamicii GN au arătat că proprietățile fizice ale GN erau simple și inteligibile. (S. W. Hawking and Penrose 1970)

GN de masă stelară se formează din colapsul gravitațional al stelelor grele. O altă teorie este a GN timpurii după colapsul stelelor în universul timpuriu, iar GN supermasive s-ar fi putut forma din prăbușirea directă a norilor de gaz din universul timpuriu. (Pacucci et al. 2016)

Pe 14 septembrie 2015, observatorul LIGO a observat existența undelor gravitaționale (LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration 2016) din fuziunea a două GN, aceasta fiind cea mai concretă dovadă a existenței GN până în prezent. La 15 iunie 2016, a fost

anunțată o a doua detectare a unui eveniment de undă gravitațională din GN care se ciocnesc. (Overbye 2018) În aprilie 2018, LIGO a observat șase evenimente de undă gravitațională care au provenit din fuzionarea GN.

### **Orizontul evenimentelor (OE)**

Caracteristica definitorie a unei GN este apariția unui OE - o limită în spațiu prin care materia și lumina pot trece numai într-un singur sens, spre interior spre masa găurii negre. (Arnowitt, Deser, and Misner 1962).

Suprafața OE se găsește la raza Schwarzschild pentru un corp care nu se rotește, care este proporțională cu masa sa. Masa minimă necesară pentru ca o stea să se poată prăbuși dincolo OE este limita Tolman-Oppenheimer-Volkoff, care este de aproximativ trei mase solare. Astronomii pot detecta numai discurile de acumulare în jurul găurilor negre, unde materia se mișcă cu o viteză atât de mare încât fricțiunea creează radiații de înaltă energie care pot fi detectate. De asemenea, unele materii din aceste discuri de acumulare sunt forțate să curgă de-a lungul axelor spinului GN, creând jeturi vizibile când acestea interacționează cu materia.

Conceptul de masă în RG este o problemă, întrucât teoria nu oferă o definiție unică a termenului, ci mai multe definiții diferite (energia Hawking, energia Geroch, impulsul energetic cvasi-local Penrose, etc.) aplicabile în circumstanțe diferite. Practic, este imposibil să se găsească o definiție generală a masei totale a sistemului (sau energiei) în RG, întrucât "energia câmpului gravitațional" nu face parte din tensorul energie-impuls. Se speră ca pe viitor să se folosească o masă cvasi-locală definită adecvat pentru a da o formulare mai precisă inegalității Penrose pentru găurile negre (care leagă masa GN cu orizontul) și pentru a găsi o versiune cvasi-locală a legilor mecanicii găurilor negre. (Szabados 2004)

## Big Bang

Teoria Big Bang (BB) în cosmologie explică formarea universului (Overbye 2017), și expansiunea acestuia dintr-o stare inițială de densitate și temperatură foarte ridicate. BB explică o gamă largă de fenomene, inclusiv abundența elementelor ușoare, fondul cosmic de microunde, structura la scară largă și legea lui Hubble (Wright 2009). Practic BB este o singularitate inițială, (Roos 2008), "nașterea" universului.

Problema este că, deși aceste rezultate stabilesc existența unei singularități inițiale, ele nu oferă prea multe informații despre structura sa. Există rezultate parțiale pentru clasele restricționate de soluții, de exemplu simulările numerice, dar imaginea rezultată a singularității inițiale contrastează cu cea din modelele FLRW. De asemenea, este posibil să existe singularități non-scalare (Ellis and King 1974).

Referitor la momentul zero al Big Bang, John Heil întreabă: "Ce anume nu este nimic? Ce nu ar fi nimic?" (Heil 2013, 174). Heil sugerează că răspunsul depinde de modul în care înțelegem Big Bang-ul. Bruce Reichenbach (Reichenbach 2017) afirmă că, dacă inversăm direcția vederii noastre și privim înapoi în timp, descoperim că universul atinge o stare de compresie unde densitatea și forța gravitațională sunt infinite. Această singularitate unică constituie începutul universului - materie, energie, spațiu, timp și toate legile fizice. Devreme ce Big Bang-ul inițiază însăși legile fizicii, nu se poate aștepta nici o explicație științifică sau fizică a acestei singularități. Având în vedere RG, Big Bang-ul nu este un eveniment. Un eveniment are loc într-un context spațiu-timp. Dar Big Bang nu are acest context. Prin urmare, Big Bang-ul nu poate fi considerat un eveniment fizic care apare la un moment dat. Grünbaum susține această poziție argumentând că evenimentele pot rezulta numai din alte evenimente: "Deoarece singularitatea Big Bang este din punct de vedere tehnic non-event, și  $t = 0$  nu este un moment *bona fide* de apariție a acestuia,

singularitatea nu poate fi efectul niciunei cauze în caz de cauzalitate a evenimentului sau de cauzalitate a agentului ... singularitatea  $t = 0$  nu poate avea o cauză. (Grunbaum 1994)

Silk (Silk 2001, 456) propune eliminarea obiecției lui Grünbaum prin extinderea noțiunii de "eveniment" eliminând cerința că trebuie să fie relațională, într-un context spațiu-timp. În Big Bang, universul spațiu-timp începe și continuă să existe în timp măsurabil după singularitate inițială. Astfel, se poate considera Big Bang fie ca fiind evenimentul inceperii universului, sau ca o stare în care "orice doua puncte din universul observabil au fost în mod arbitrar apropiate împreună".

Pe baza logicii lui Grünbaum că singularitatea Big Bang nu este un eveniment, Bruce Reichenbach (Reichenbach 2017) raționează că, întrucât evenimentele apar numai din alte evenimente, evenimente ulterioare Big Bang-ului nu pot fi efectul acelei singularități, rezultândcă nu există evenimente, ceea ce este absurd.

### Există singularități?

Nu există o definiție larg acceptată a singularității. Fizica ar trebui să dicteze ce definiție a singularității să se folosească, deși pot co-exista fără probleme multiple definiții.

Erik Curiel, și Peter Bokulich pun problema a ceea ce ar însemna să se atribuie "existență" unei structuri singulare sub oricare dintre posibilitățile disponibile. (Curiel and Bokulich 2018) Ei analizează posibilitatea existenței căilor incomplete într-un spațiu-timp maximal relativist în un punct al spațiului, unde calea ar putea fi extinsă prin trecerea prin acel punct. Oricum ei iau în considerare faptul că, dacă e vorba de un eșec în concepțiilor noastre despre o singularitate spațială, eșecul nu se află în spațiul cosmic al lumii actuale, ci mai degrabă în descrierea teoretică a spațiu-timpului.

Undele gravitaționale sunt perturbații în curbura spațiu-timpului generate de masele accelerate, prezise de Einstein (propagarea cu viteza luminii a schimbărilor curbelor spațiu-timp datorită obiectelor aflate în mișcare accelerată). (Einstein 1918) Distanțele dintre obiecte cresc și scad ritmic, pe măsură ce trece unda, la o frecvență corespunzătoare celei a undei. Undele gravitaționale transportă energia ca radiație gravitațională. Sistemele de stele neutronice binare, se presupune a fi o sursă puternică de unde gravitaționale în timpul fuzionării lor, datorită accelerației foarte mari a maselor lor. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration et al. 2017)

Undele gravitaționale permit observarea fuziunii GN și, eventual, a altor obiecte exotice în Universul îndepărtat. (Krauss, Dodelson, and Meyer 2010)

În geometria spațiu-timp, modelele FLRW cu materie obișnuită au o singularitate într-un timp finit în trecut. Teoremele de singularitate (S. W. Hawking and Ellis 2008) stabilesc că existența unei singularități inițiale este robustă: mai degrabă decât să fie caracteristici specifice modelelor FLRW sau alte modele extrem de simetrice, singularitățile sunt generice în modele care satisfac ipoteze fizice plauzibile. (Smeenk and Ellis 2017)

Teoremele de singularitate dovedite în anii '60 (S. W. Hawking and Ellis 2008) arată că universul este finit în trecut într-o clasă largă de modele cosmologice. Singularitățile trecute, semnalate de existența unor geodezii inextensibile cu lungime limitată, trebuie să fie prezente în modele cu un număr de caracteristici plauzibile. Intuitiv, extrapolând înapoi de la prezent, o geodezică inextensibilă ajunge, într-o distanță finită, la o margine dincolo de care nu poate fi extinsă. Nu există un "timp cosmic" definit în mod unic, dar lungimea maximă a acestor curbe reflectă epoca finită a universului. Teoremele de singularitate se aplică plauzibil universului observat, în domeniul aplicabilității relativității generale. (Smeenk and Ellis 2017)



## Bibliografie

- Arnowitt, Richard, Stanley Deser, and Charles W. Misner. 1962. "The Dynamics of General Relativity." *General Relativity and Gravitation* 40 (9): 1997–2027. <https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1>.
- Berger, Beverly K. 2002. "Numerical Approaches to Spacetime Singularities." <https://doi.org/10.12942/Irr-2002-1>.
- Carroll, Sean, and Sean M. Carroll. 2004. *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Addison Wesley.
- Curiel, Erik, and Peter Bokulich. 2018. "Singularities and Black Holes." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Summer 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/spacetime-singularities/>.
- Droz, S., W. Israel, and S. M. Morsink. 1996. "Black Holes: The inside Story." *Physics World* 9: 34–37. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996PhyW....9...34D>.
- Einstein, Albert. 1918. *Über Gravitationswellen*. Akademie der Wissenschaften.
- Ellis, G. F. R., and A. R. King. 1974. "Was the Big Bang a Whimper?" *Communications in Mathematical Physics* 38 (2): 119–56. <https://doi.org/10.1007/BF01651508>.
- Gambini, Rodolfo, Javier Olmedo, and Jorge Pullin. 2013. "Quantum Black Holes in Loop Quantum Gravity." <https://doi.org/10.1088/0264-9381/31/9/095009>.
- Goswami, Rituparno, Pankaj S. Joshi, and Parampreet Singh. 2005. "Quantum Evaporation of a Naked Singularity." <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.031302>.
- Grunbaum, Adolf. 1994. "'Some Comments on William Craig's' Creation and Big Bang Cosmology'." *Philosophia Naturalis* 31 (2): 225–236.
- Hawking, S. W. 1966. "The Occurrence of Singularities in Cosmology." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 294 (1439): 511–21. <http://www.jstor.org/stable/2415489>.
- Hawking, S. W., and G. F. R. Ellis. 2008. *The Large Scale Structure of Space-Time*. 21. printing. Cambridge Monographs on Mathematical Physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Hawking, S. W., and R. Penrose. 1970. "The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 314 (1519): 529–48. <http://www.jstor.org/stable/2416467>.
- Hawking, Stephen. 2012. "The Beginning of Time." Stephen Hawking. 2012. <http://www.hawking.org.uk/the-beginning-of-time.html>.
- Heil, John. 2013. "Contingency." *Goldschmidt* 2013.
- Kerr, Roy P. 2007. "Discovering the Kerr and Kerr-Schild Metrics." *ArXiv E-Prints* 0706: arXiv:0706.1109. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007arXiv0706.1109K>.
- Krauss, Lawrence M., Scott Dodelson, and Stephan Meyer. 2010. "Primordial Gravitational Waves and Cosmology." *Science (New York, N.Y.)* 328 (5981): 989–92. <https://doi.org/10.1126/science.1179541>.
- LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, et al. 2017. "GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral." *Physical Review Letters* 119 (16): 161101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>.
- LIGO Scientific Collaboration, and the Virgo Collaboration. 2016. "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters* 116 (6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.

- Moulay, Emmanuel. 2012. *The Universe and Photons*. FQXi Foundational Questions Institute. [http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/Moulay\\_Photon\\_2.pdf](http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/Moulay_Photon_2.pdf).
- Overbye, Dennis. 2017. "Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast?" *The New York Times*, 2017, sec. Science. <https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html>.
- . 2018. "Scientists Hear a Second Chirp From Colliding Black Holes." *The New York Times*, 2018, sec. Science. <https://www.nytimes.com/2016/06/16/science/ligo-gravitational-waves-einstein.html>.
- Pacucci, Fabio, Andrea Ferrara, Andrea Grazian, Fabrizio Fiore, Emanuele Giallongo, and Simonetta Puccetti. 2016. "First Identification of Direct Collapse Black Hole Candidates in the Early Universe in CANDELS/GOODS-S." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459 (2): 1432–39. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw725>.
- Penrose, Roger. 1965. "Gravitational Collapse and Space-Time Singularities." *Physical Review Letters* 14: 57–59. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.14.57>.
- . 1969. "Gravitational Collapse: The Role of General Relativity." *Nuovo Cimento Rivista Serie* 1. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969NCimR...1..252P>.
- Reichenbach, Bruce. 2017. "Cosmological Argument." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmological-argument/>.
- Roos, Matts. 2008. "Expansion of the Universe - Standard Big Bang Model." *ArXiv E-Prints* 0802: arXiv:0802.2005. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008arXiv0802.2005R>.
- Sfetcu, Nicolae. 2018. "Buclele Cauzale În Călătoria În Timp." ResearchGate. 2018. [https://www.researchgate.net/publication/324601633\\_Buclele\\_cauzale\\_in\\_calatoria\\_in\\_timp](https://www.researchgate.net/publication/324601633_Buclele_cauzale_in_calatoria_in_timp).
- Silk, Joseph. 2001. *The Big Bang, Third Edition*. Subsequent edition. New York, NY: W H Freeman & Co.
- Smeenk, Christopher, and George Ellis. 2017. "Philosophy of Cosmology." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/>.
- Szabados, László B. 2004. "Quasi-Local Energy-Momentum and Angular Momentum in GR: A Review Article." *Living Reviews in Relativity* 7: 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2004-4>.
- Townsend, P. K. 1997. "Black Holes." <https://arxiv.org/abs/gr-qc/9707012>.
- Wald, Robert M. 1984. "General Relativity, Wald." 1984. <http://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/G/bo5952261.html>.
- Wright, E. L. 2009. "Frequently Asked Questions in Cosmology." 2009. [http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology\\_faq.html#BBevidence](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence).