

Nicolae Sfetcu

**Singularitățile
ca limite ontologice ale
relativității generale**

Colecția ESEURI

MultiMedia Publishing

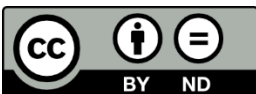
Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale

Nicolae Sfetcu

1 iunie 2018

Sfetcu, Nicolae, "Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale", SetThings (1 iunie 2018), MultiMedia Publishing (ed.), DOI: 10.13140/RG.2.2.17470.18242, ISBN: 978-606-033-198-8, URL = <https://www.telework.ro/ro/e-books/singularitatile-ca-limite-ontologice-ale-relativitatii-generale/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Această lucrare este publicată sub licență Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pentru a vedea o copie a acestei licențe, vizitați <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

Aceasta este o traducere a lucrării:

Sfetcu, Nicolae, " The singularities as ontological limits of the general relativity ", SetThings (June 1, 2018), MultiMedia (ed.), DOI: 10.13140/RG.2.2.14521.06241/1, ISBN: 978-606-033-136-0, URL = <https://www.telework.ro/en/e-books/the-singularities-as-ontological-limits-of-the-general-relativity/>

Abstract

Singularitățile la care se ajunge în relativitatea generală prin rezolvarea ecuațiilor lui Einstein au fost și încă mai sunt subiectul a numeroase dezbateri științifice: Există sau nu, singularități? Big Bang a fost o singularitate inițială? Dacă singularitățile există, care este ontologia acestora? Este teoria generală a relativității o teorie care și-a arătat limitele în acest caz?

În acest eseu argumentez faptul că există singularități, iar teoria generală a relativității, ca de altfel oricare altă teorie științifică din prezent, nu este valabilă în interiorul orizontului evenimentelor. Dar asta nu presupune, așa cum consideră unii oameni de știință, că ea trebuie considerată ca fiind perimată.

După o scurtă prezentare a aspectelor specifice din teoria clasică newtoniană și teoria specială a relativității, și o scurtă prezentare a teoriei generale a relativității, în capitolul *Ontologia relativității generale* prezint aspectele ontologice specifice relativității generale. Următorul capitol, *Singularități*, este dedicat prezentării singularităților care rezultă în relativitatea generală, a aspectelor specifice ale găurilor negre și orizontul evenimentelor, inclusiv dezbaterea despre Big Bang ca singularitate inițială, și argumentele în favoarea existenței singularităților. În *Ontologia singularităților* vorbesc despre posibilitățile de încadrare ontologică a singularităților în general și a găurilor negre în special, despre argumentul găurii pus în evidență de Einstein, și argumentele prezentate de oamenii de știință că nu există singularități și deci că teoria generală a relativității este în impas. Închei cu *Concluziile* în care expun și reiau pe scurt argumentele care ămi susțin opiniile prezentate mai sus.

Cuvinte cheie: relativitatea generală, teoria general a relativității, Albert Einstein, singularități, găuri negre, orizontul evenimentelor, Big Bang, cosmologie, gravitație.

Introducere

Singularitățile la care se ajunge în relativitatea generală prin rezolvarea ecuațiilor lui Einstein au fost și încă mai sunt subiectul a numeroase dezbateri științifice: Există sau nu, singularități? Big Bang a fost o singularitate inițială? Dacă singularitățile există, care este ontologia acestora? Este teoria generală a relativității o teorie care și-a arătat limitele în acest caz?

În acest eseu argumentez faptul că există singularități, iar teoria generală a relativității, ca de altfel oricare altă teorie științifică din prezent, nu este valabilă în interiorul orizontului evenimentelor. Dar asta nu presupune, așa cum consideră unii oameni de știință, că ea trebuie considerată ca fiind perimată. În acest scop m-am folosit de studiile mai multor fizicieni și filosofi: Thomas A. Ryckman, *Early Philosophical Interpretations of General Relativity* (Ryckman 2018), Don A. Howard, *Einstein's Philosophy of Science* (D. A. Howard 2017), John D. Norton, *What Can We Learn about the ontology of Space and Time from the Theory of Relativity?* (Norton 2012), Robert Weingard, *On the ontological Status of the Metric in General Relativity* (Weingard 1976), Vincent Lam și Michael Esfeld, *The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity* (Lam and Esfeld 2012), Erik Curiel și Peter Bokulich, *Singularities and Black Holes* (Curiel and Bokulich 2018), Gustavo E. Romero, *The ontology of General Relativity* (Romero 2013c), *Philosophical Issues of Black Holes* (Romero 2014) and *Adversus singularities: The ontology of space-time singularities* (Romero 2013a), Nick Huggett și Carl Hoefer, *Absolute and Relational Theories of Space and Motion* (Huggett and Hoefer 2018), Christopher Smeenk și George Ellis, *Philosophy of Cosmology* (Smeenk and Ellis 2017), Alan D. Rendall, *The nature of spacetime singularities* (Rendall 2005), Erik Curiel, *The Analysis of Singular Spacetimes* (Curiel 1999) și C. J. S. Clarke, *Space-Time singularities* (Clarke 1976).

După o scurtă prezentare a aspectelor specifice din teoria clasică newtoniană și teoria specială a relativității, și o scurtă prezentare a teoriei generale a relativității, în capitolul *Ontologia*

relativității generale prezintă aspectele ontologice specifice relativității generale. Următorul capitol, *Singularități*, este dedicat prezentării singularităților care rezultă în relativitatea generală, a aspectelor specifice ale găurilor negre și orizontul evenimentelor, inclusiv dezbaterile despre Big Bang ca singularitate inițială, și argumentele în favoarea existenței singularităților. În *Ontologia singularităților* vorbesc despre posibilitățile de încadrare ontologică a singularităților în general și a găurilor negre în special, despre argumentul găurii pus în evidență de Einstein, și argumentele prezentate de oamenii de știință că nu există singularități și deci că teoria generală a relativității este în impas. Închei cu *Concluziile* în care expun și reiau pe scurt argumentele care ămi susțin opiniile prezentate mai sus.

Teoria clasică și relativitatea specială

Gravitația clasică newtoniană admite o descriere geometrică. Împreună cu relativitatea specială, aceasta permite o descriere euristică a teoriei relativității generale (RG). Mișcarea inerțială din mecanica clasică este legată de geometria spațiului și timpului, practic de-a lungul unor geodezice în care liniile de univers sunt linii drepte în spațiu-timpul relativist. (Ehlers 1973) Datorită principiului echivalenței între masele inerțială și gravitațională, când se ia în considerare și gravitația nu este observată o distincție între mișcarea inerțială și cea sub influența gravitației. Aceasta permite definirea unei noi clase, a corpurilor în cădere liberă, definind o geometrie a spațiului și timpului prin o mișcare geodezică care depinde de gradientul potențialului gravitațional. De aici s-a dedus teoria Newton-Cartan, o formula geometrică a gravitației newtoniene în spațiu-timp curbat folosind numai concepte covariante. (Ehlers 1973) (Havas 1964)

Gravitația geometrică newtoniană este un caz limită a mecanicii relativiste speciale. Acolo unde gravitația poate fi neglijată, fizica este lorentzian invariantă ca în relativitatea specială, mai degrabă decât galileian invariantă ca în mecanica clasică. (Giulini 2006)

Simetria lui Lorentz implică structuri suplimentare prin conuri luminoase care definesc o structură cauzală.¹ Împreună cu liniile de univers pentru corpurile în cădere liberă, conurile de lumină pot fi folosite pentru a reconstrui metrica semi-riemanniană a spațiu-timpului, cel puțin până la un factor scalar pozitiv, rezultând o structură (sau o geometrie) conformă.

Dacă se ia în considerare gravitația, liniile temporale drepte care definesc un cadru inerțial fără gravitație sunt curbate, rezultând o schimbare în geometria spațiu-timp. (Schutz and Schutz 1985)

Timpul propriu măsurat cu ceasuri într-un câmp gravitațional nu respectă regulile relativității speciale (nu se măsoară prin metrica Minkowski), fiind necesară o geometrie mai generală, curbă, a spațiului, cu o metrică pseudo-riemanniană asociată în mod firesc cu un anumit tip de conexiune, conexiunea Levi-Civita, care satisface principiul echivalenței și face spațiul local minkowskian. (Ehlers 1973)

În noiembrie 1915, la Academia de Științe din Prusia, Einstein a prezentat ecuațiile de câmp ² care includ gravitația, care specifică modul în care geometria spațiului și a timpului este influențată de materie și radiație.

¹ Pentru fiecare eveniment A, există un set de evenimente independente de observatori, care pot, în principiu, să influențeze sau să fie influențate de A prin intermediul unor semnale sau interacțiuni care nu trebuie să călătorească mai repede decât lumina și un set de evenimente pentru care o astfel de influență este imposibilă.

² Ecuațiile de câmp Einstein:

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - (1/2)Rg_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}$$

unde $G_{\mu\nu}$ este tensorul Einstein, o combinație specifică fără divergențe a tensorului Ricci $R_{\mu\nu}$ și a metricii, iar $T_{\mu\nu}$ este tensorul energie-impuls. Constanta de proporționalitate poate fi fixată drept $k = 8\pi G/c^4$, cu G constanta gravitațională și c viteza luminii. În vid, $R_{\mu\nu} = 0$.

Relativitatea generală (RG)

Conform RG, forța de gravitație este o manifestare a geometriei locale spațiu-timp. RG este o teorie metrică a gravitației. La baza ei sunt ecuațiile lui Einstein (b2), care descriu relația dintre geometria unei varietăți patrudimensionale, pseudo-Riemanniene, reprezentând spațiu-timpul și energia-impulsul conținut în acel spațiu-timp. Gravitația corespunde schimbărilor în proprietățile spațiului și timpului, care, la rândul lor, modifică traseele obiectelor. Curbura este cauzată de energia-impulsul materiei. Conform lui John Archibald Wheeler, spațiu-timpul spune materiei cum să se miște iar materia spune spațiu-timpului cum să se curbeze. (Wheeler 1990) Pentru câmpuri gravitaționale slabe și viteze mici în raport cu viteza luminii, previziunile teoriei converg spre cele ale legii gravitației universale a lui Newton.

RG prezintă covarianță generală (legile au aceeași formă în toate sistemele de coordonate) și nu conține structuri geometrice invariabile (este independentă de diferitele câmpuri din spațiu-timp). Practic, în plan local este valabil principiul echivalenței, spațiu-timpul este Minkowskian, iar legile fizicii manifestă invarianța locală Lorentz. (Weinberg 1972)

În RG, materia și geometria trebuie să satisfacă ecuațiile lui Einstein. O soluție a acestor ecuații este un model de univers cu eventuale legi suplimentare care reglementează materia. Cele mai cunoscute soluții exacte sunt cele care corespund unui anumit tip de gaură neagră (GN) într-un univers altfel gol (Chandrasekhar 1998) (soluția Schwarzschild, soluția Reissner-Nordström și metrica Kerr), cele care descriu un univers în expansiune (universurile Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker și de Sitter), universul Gödel (cu posibilitatea de a călători în timp), soluția Taub-NUT (un model de univers omogen dar anizotrop) și spațiul anti-de Sitter (evidențiat recent în contextul conjecturii Maldacena). (S. W. Hawking and Ellis 2008)

În gravitația newtoniană sursa gravitației este masa, iar în relativitatea specială masa face parte dintr-o cantitate mai generală numită tensor energie-impuls care include atât densitatea

energiei cât și a impulsului și stresul (presiunea și forfecarea). În RG, ecuația câmpului de gravitație se referă la acest tensor și la tensorul Ricci care descrie o anumită clasă de efecte de maree.

Există teorii alternative la RG construite pe aceleași premise, cu reguli și/sau constrângeri suplimentare, care conduc la ecuații de câmp diferite (teoria lui Whitehead, teoria Brans-Dicke, teleparalelismul, gravitația $f(R)$, teoria Einstein-Cartan, etc.). (Brans and Dicke 1961)

1 Ontologia relativității generale

În viziunea clasică, spațiul și timpul sunt containerele; materie este conținutul. Proprietatea distinctivă a materiei este că ea poartă energie și impuls, conservate în timp, rezultând că energia și impulsul sunt fundamentale ontologic. (Norton 2012)

RG a generat diverse interpretări filosofice timpurii. Adepții lui au evidențiat "relativizarea inerției" și conceptul de simultaneitate, kantienii și neo-kantienii au subliniat abordarea anumitor "forme intelectuale" sintetice (în special principiul covarianței generale, iar empiriștii logici au accentuat semnificația filozofică metodologică a teoriei.

Reichenbach a abordat RG prin prisma tezei "relativității geometriei", încercând o "axiomatizare constructivă" (Rendall 2005) a teoriei relativității pe baza "problemelor elementare de fapt" (Elementarbestand) cu privire la comportamentul observabil al razelor de lumină, a tijelor și a ceasurilor.

Matematicianul Hermann Weyl a încercat o reconstituire a teoriei lui Einstein pe baza epistemologiei unei "geometrie infinitezimale pure", o geometrie extinsă cu termeni suplimentari care se identificau formal cu potențialul câmpului electromagnetic. (Weyl and Weyl 1993, 115–16)

Thomas Ryckman afirmă că programul de teorie a câmpului unificat geometric pare a fi încadrat în mod inseparabil într-o formă de realism științific, denumită "realism structural", cu o posibilă tendință inspirată față de platonism. (Ryckman 2018) În forma sa contemporană, realismul structural are atât o formă epistemică, cât și o formă "ontică", acesta din urmă susținând în esență că teoriile fizice actuale justifică faptul că trăsăturile structurale ale lumii fizice sunt fundamentale ontologice (Ladyman and Ross 2007), subscriind la ideea că singura continuitate ontologică în ceea ce privește schimbările teoriei fizice fundamentale este continuitatea structurii. Realismul structural ontic este un cadru metafizic care oferă o înțelegere adecvată a caracteristicilor teoriilor fizice fundamentale. Potrivit acestuia, există structuri în domeniul fizicii fundamentale în sensul rețelilor de relații fizice concrete, fără ca aceste relații să depindă de obiecte fizice fundamentale care posedă o identitate intrinsecă, adică o identitate constituită din proprietăți intrinseci sau o primitivitate (heecție). Această poziție poate lua în considerare în mod semnificativ caracteristicile RG fundamentale ale invarianței difeomorfismului și independenței de fond. (Esfeld and Lam 2008).

Unii filosofi văd o opoziție dintre metafizica tradițională angajată într-o prioritate ontologică a obiectelor asupra relațiilor, și realismul structural ontic care se dedică unei priorități ontologice a relațiilor asupra obiectelor. Suporterii realismului structural ontic consideră că greșeala care duce la această concluzie se află în presupunerea existenței unei distincții ontologice între obiecte, pe de o parte, și proprietăți, inclusiv relațiile, pe de altă parte (Esfeld and Lam 2011). Ei consideră că nu există o distincție ontologică între obiecte și proprietăți, inclusiv relațiile și, astfel, nici o relație de dependență ontologică între obiecte și proprietăți, inclusiv relațiile, astfel încât nu există o problema a unei priorități ontologice. Distincția este doar una conceptuală, (Lam and Esfeld 2012) ar ar fi o greșeală să deducem din acest mod de reprezentare că există puncte spațio-

temporale în lume ca entități distincte din punct de vedere ontologic de proprietățile câmpului metric. Ar rezulta că trebuie să se renunțe la presupunerea existenței unei distincții ontologice între obiecte și proprietăți, inclusiv relații. Nu există o distincție ontologică între obiecte și căile lor de a fi, ci doar una conceptuală.

Empiriștii logici anti-metafizici, precum Carnap și neo-kantieni precum Cassirer (care considera teoria ca fiind un test crucial pentru Erkenntniskritik, termenul preferat pentru epistemologia științelor fizice ale idealismului transcendental al lui Marburg), au jucat un rol important în dezbaterile despre ontologia relativității generale și dezvoltarea conceptului modern de categoricitate în semantica formală (D. Howard 1996). Cassirer a concluzionat că RG prezintă "cea mai determinată aplicație și realizare în cadrul științei empirice a poziției idealismului critic". (Cassirer 1921)

Einstein, împreună cu Schlick și Reichenbach, a dezvoltat o nouă formă de empirism, adecvat argumentării relativității generale împotriva criticii neo-kantiene. (Schlick 1921) (H. Reichenbach 1928)

Ideea lui Mach, că masa și mișcarea inerțială a corpului rezultă din influența tuturor celorlalte mase înconjurătoare (eliminând conceptul spațiului absolut) l-a influențat puternic pe Einstein în încercarea epistemologică de a generaliza principiul relativității, combinând un principiu valid al invarianței formelor legilor naturii (covarianța generală) cu un "principiu de relativitate generală" falsă a mișcărilor accelerate. (Ryckman 2018)

Einstein nu a fost un realist științific, dar credea că există conținut teoretic dincolo de conținutul empiric, că știința teoretică ne oferă o fereastră asupra naturii, chiar dacă, în principiu, nu va exista o explicație unică corectă la nivelul ontologiei profunde. (D. A. Howard 2017)

În acest context, a existat o discuție permanentă asupra naturii și rolului convențiilor în știință a continuat până la sfârșitul vieții lui Einstein, (Schilpp and Schilpp 1959) dacă alegerea unei geometrii este empirică, convențională sau *a priori*. Duhem (Duhem, Vuillemin, and Broglie 1991) consideră că, în fizică, ipotezele nu sunt testate izolat, ci doar ca parte a teoriei ca un întreg (holismul teoretic și subdeterminarea alegerii teoriei prin dovezi empirice). Într-o adresă din 1918 către Max Planck, Einstein a abordat problema subdeterminării:

”Sarcina supremă a fizicianului este ... căutarea celor mai generale legi elementare din care imaginea lumii trebuie obținută prin deducție pură. Nici o cale logică nu duce la aceste legi elementare; este doar intuiția care se bazează pe o înțelegere empatică a experienței. În această stare de incertitudine metodologică, se poate crede că sunt posibile în mod arbitrar multe, în sine, sisteme echivalente de principii teoretice; iar această opinie este, în principiu, cu siguranță corectă. Dar dezvoltarea fizicii a arătat că, din toate construcțiile teoretice imaginabile, una singură, în orice moment, s-a dovedit superioară necondiționat față de toate celelalte. Nimeni din cei care au aprofundat acest subiect nu va nega faptul că, în practică, lumea percepțiilor determină fără echivoc sistemul teoretic, chiar dacă nicio cale logică nu conduce din percepții la principiile de bază ale teoriei.” (A. (Author) Einstein 1918, 31)

Einstein a argumentat de ce este alegerea teoretică determinată empiric într-o scrisoare adresată lui Schlick, unde a folosit argumentul lui Schlick referitor la elementele unei ontologii teoretice:

”Mi se pare că cuvântul "real" este luat în sensuri diferite, în funcție de faptul că se vorbește despre impresii sau evenimente, adică despre stările afacerilor în sensul fizic.

Dacă doi oameni diferiți vor urmări fizica independent unul de celălalt, vor crea sisteme care sunt de acord cu impresiile ("elementele" în sensul lui Mach). Construcțiile mentale pe care le realizează cei doi pentru conectarea acestor "elemente" pot fi foarte diferite. Și cele două construcții nu trebuie să fie de acord în ceea ce privește "evenimentele"; pentru că acestea aparțin, cu siguranță, construcțiilor conceptuale. Desigur, cu privire la "elemente", dar nu la "evenimente", sunt reale în sensul de a fi "date în mod inevitabil în experiență.

"Dar dacă desemnează ca fiind "real" ceea ce aranjăm în schema spațiu-timp, așa cum ați făcut în teoria cunoașterii, atunci fără îndoială "evenimentele" sunt, mai presus de toate, reale ... Aș dori să recomand o distincție conceptuală curată aici.” (D. A. Howard 2017)

Punctul de vedere al lui Einstein, conform căruia realul fizic constă exclusiv din ceea ce se poate construi pe baza coincidențelor spațiu-timp, punctele spațiu-timp, de exemplu, fiind

considerate ca intersecții ale liniilor de univers, este acum cunoscut sub numele de "argument punct-coincidență". (D. A. Howard 2017) Coincidențele au astfel un rol ontic privilegiat deoarece sunt invariabile și deci determinate în mod univoc.

Noua perspectivă a lui Einstein asupra ontologiei spațiu-timpului l-au determinat pe Schlick să afirme că Mach a considerat în mod eronat doar elementele senzației ca fiind reale, evenimentele spațio-temporale individualizate invariabil ca coincidențe în spațiu având de asemenea dreptul de a fi considerate reale datorită modului univoc al determinării lor. (D. A. Howard 2017) Einstein a fost de acord, cu condiția să de facă distincția între cele două tipuri de realitate, a elementelor și a evenimentelor spațio-temporale, că "doi oameni diferiți" care au urmărit fizica în mod independent, vor fi de acord asupra elementelor, dar ar fi în dezacord la nivelul ontologiei evenimentului spațio-temporal.

Imediat după apariția RG, s-a discutat despre o reducere a fizicii la geometrie: "fizica este o pseudogeometrie în patru dimensiuni [adică o geometrie care distinge dimensiunile spațiale și temporale] a căror determinare metrică $g_{\mu\nu}$ este legată, conform ecuațiilor fundamentale ... din prima mea contribuție [1915], la cantitățile electromagnetice, adică la materie. (Hilbert 1917, 63)

În RG, densitatea energiei și impulsului non-gravitațional pentru un eveniment este reprezentată de tensorul stres-energie al materiei (T), fiind structura care codifică densitățile energiei totale și impulsurilor datorate tuturor formelor nongravitationale. Einstein a definit o cantitate analogă, tensorul stres-energie pentru câmpul gravitațional (t). T este un tensor adevărat, dar t este un pseudotensor, ceea ce înseamnă că T poate fi reprezentat independent de un anumit sistem de coordonate, spre deosebire de t . Astfel, nicio schimbare a sistemului de coordonate nu poate face ca T să dispară, spre deosebire de t care poate fi făcut nul pentru un anumit eveniment. (Norton 2012) Energia și impulsul total al sistemului nu mai sunt bine definite.

În RG, "energia câmpului gravitațional nu poate fi localizată". Putem vorbi numai despre energia gravitațională și despre impulsul unui sistem extins, nu și despre densitatea energiei și impulsului gravitațional la un anumit eveniment. (Misner et al. 2017, §20.3-20.4)

De asemenea, RG nu mai oferă o noțiune precisă a forței gravitaționale, aceasta fiind "geometrizată". Restaurarea spațiului temporal Minkowski în regiunile asimptotic plate ale spațiului ne permite să folosim resursele relativității speciale pentru a reintroduce noțiunea de forță gravitațională, identificată cu perturbațiile geometrice ale structurii metrice de planeitatea exactă cerută de un spațiu-timp Minkowski. (Norton 2012)

Metrica (structura metrică) materială a spațiu-timpului în RG este reductibilă la comportamentul entităților materiale (ceasuri, raze luminoase, geodezice, etc.) din spațiu-timp. (Grünbaum 2012) Respectiv, măsurarea spațiu-timpului depinde întotdeauna de instrumentele de măsurare alese ca standarde de măsurare, iar relațiile metrice implică standardele alese. Rezultă că relațiile metrice dintre conținutul material al spațiu-timpului nu sunt explicate de metrica spațio-temporală, ci mai degrabă constitutive. În același timp, în metrica câmpului fizic, relațiile metrice ale unui spațiu-timp sunt determinate de un câmp fizic ireductibil, câmpul de tensori metric al doilea ordin, care, deși separat de entitățile materiale ale spațiului-timp, explică relațiile metrice dintre acele entități. (Weingard 1976)

Din acest punct de vedere, statutul epistemologic al credinței noastre că există un câmp metric tensor este la fel ca și convingerile noastre despre alte entități teoretice, cum ar fi neutrinii. Așa cum am postula existența neutrino-ului pentru a explica deficitul energetic observat în decăderea beta, vom postula câmpul metric, conform PMF, pentru a explica diferitele fenomene observate, cum ar fi de ce particulele libere dintr-un câmp gravitațional au traiectoriile pe care le au. Și în acest proces, câmpul de tensori metrici ajută la explicarea relațiilor metrice observate

între entitățile materiale. Robert Weingard afirmă că există un dezacord ontologic între cele două metrici, prima fiind constituită de relațiile dintre entitățile materiale în spațiu-timp, în timp ce a doua este un câmp fizic de sine stătător, distinct și ireductibil la conținutul material al spațiu-timpului.

Robert Weingard susține că metrica câmpului fizic oferă un raport mai adecvat al stării ontologice a metricii în spațiu-timpul RG. Potrivit acestei teze, un spațiu-timp gol, cu o metrică bine definită, este perfect inteligibil. Această idee a fost contrazisă de Grünbaum:

”Dacă nu există entități fizice extra-geocronometrice care să specifice (individualizeze) elementele omogene ale spațiu-timpului. . . atunci de unde derică acele elemente de constituție punctuală echivalentă, altfel, identitatea lor individuală? Trebuie ca punctele lumii să nu fie individualizate înainte ca manifestarea spațiu-timpului să poată fi chiar înțeleasă să aibă o anumită valoare? Nu văd niciun răspuns la această întrebare cu privire la principiul individualizării aici în cadrul ontologiei identității leibnizice a indiscernabilelor. Nici nu cunosc nicio altă ontologie care să ofere un răspuns inteligibil la această problemă particulară de individualizare a individualilor omogeni.” (Grünbaum 1970)

Începând cu anul 2000 a apărut o nouă abordare a problemei naturii structurilor spațio-temporale, în special în lucrările lui Oliver Pooley (Pooley 2012) și Harvey Brown. (Brown 2015) Abordarea dinamică afirmă că structura spațio-temporală a lumii noastre se datorează legilor dinamice (fundamentale) ale naturii și simetriei lor, structura spațiu-timp fiind derivată. O geometrie dată pentru spațiu-timp constrânge în mod formal teoriile admisibile la cele cu simetrie dreaptă. O presupunere a multor substantiviști a fost că această constrângere nu era doar formală, ci ontologică: că geometria (de aici și manifestarea însăși) este mai fundamentală decât legile, sau că geometria oferă o explicație "reală" a formei legilor. (John Earman 1992, 125). Dar simetria ar putea fi inversată, astfel încât simetria să fie determinată ontologic de către legile teoriei, rezultând că geometria însăși este o expresie a dinamicii materiei. (Huggett and Hofer 2018)

Gustavo E. Romero afirmă că RG este o "teorie a spațiului și a timpului". (Misner et al. 2017) Spațiu-timpul este emergența compoziției ontologice a tuturor evenimentelor, (Romero 2013c) putând fi reprezentat de un concept, cu o reprezentare 4-dimensională a unui câmp metric.

2 Singularități

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.³ (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"

³ 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)

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, coniuenctura 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)

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 gravitationale (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 (BB)

Teoria 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 (B. 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. (Grünbaum 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 începerii universului, sau ca o stare în care "orice două 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 (B. 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 curbilor spațiu-timp datorită obiectelor aflate în mișcare accelerată). (A. 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)

3 Ontologia singularităților

Peter Bokulich și Erik Curiel (Curiel and Bokulich 2018) afirmă că RG permite singularități, și că trebuie să înțelegem ontologia singularităților dacă vrem să înțelegem natura spațiului și a timpului în universul actual. Deși unii fizicieni consideră că singularitățile indică un eșec al RG, alții cred că singularitățile deschid în fapt un orizont nou în cosmologie, cu fenomene fizice reale care pot ajuta la un progres profund în înțelegerea noastră a lumii.

Dintre definițiile singularităților se evidențiază posibilitatea ca unele spațiu-timpuri să conțină căi incomplete (cea mai acceptată), cea a lipsei punctelor și a patologiei curbării. O *cale* în spațiu-timp este un lanț continuu de evenimente. Căile din cele mai importante teoreme de singularitate reprezintă posibilele traiectorii ale particulelor și ale observatorilor ("linii de

univers"). O cale incompletă și inextensibilă presupune că, după o perioadă finită de timp, subiectul acelei căi "iese în afara lumii" dispărând; sau invers, poate apare din neant. (Curiel and Bokulich 2018) Deși nu există nicio contradicție logică sau fizică în aceste situații (NS, Bucle cauzale), dispariția sau apariția bruscă a unei entități în spațiu-timp este o "singularitate". Este ceea ce se poate întâmpla în situația unei căi incomplete și inextensibile de o lungime finită și un interval de existență finit. Peter Bokulich și Erik Curiel propun ca, pentru a obține rezultate concludente, va trebui să limităm clasa de spațiu-timpuri în discuție, la spațiu-timpul care este *maxim extins* (sau doar *maxim*).

În privința tipului de incompletentă a căii relevantă pentru singularități, există o mulțime de controverse. Geroch (Geroch 1968) demonstrează că un spațiu-timp poate fi complet geodezic și să posede totuși o cale incompletă temporală a unei accelerații totale limitate - adică o cale inextensibilă în spațiu-timp, traversabilă, de-a lungul căreia un observator ar putea experimenta doar o cantitate finită de timp propriu. Exploatând această idee, Earman (J. Earman 1995, 36) o combină cu noțiunea de "lungime afină generalizată" pentru a da o *definiție semioficială* a singularităților: "Un spațiu-timp maximal este singular dacă și numai dacă conține o cale inextensibilă de lungime afină generalizată finită."

Multe discuții despre structura singulară a spațiu-timpurilor relativiste pornesc de la ideea că o singularitate reprezintă un punct sau un set de puncte care într-un anumit sens sau altul "lipsesc" din spațiu-timp, acel spațiu-timp are o "gaură" în el. Astfel, Peter Bokulich și Erik Curiel sugerează să definim un spațiu-timp cu puncte care lipsesc din el dacă și numai dacă acesta conține căi incomplete și inextensibile, și apoi să încercăm să folosim aceste căi incomplete pentru a construi puncte situate în mod corespunzător în spațiu-timp, făcând astfel căile extensibile. Aceste puncte ar fi atunci singularitățile noastre.

Mulți fizicieni și filosofi consideră că THR are nevoie de o astfel de construcție, și în prezent se caută o construcție pentru a conferi un statut ontologic clar singularităților ca entități.

Ontologia găurilor negre

Gustavo E. Romero consideră spațiu-timpul ca emergența compoziției ontologice a tuturor evenimentelor, putând fi reprezentat de un concept. Sursa câmpului gravitațional din ecuațiile RG, câmpul tensorului T_{ab} , reprezintă proprietățile fizice ale lucrurilor materiale, energia și impulsul tuturor sistemelor non-gravitaționale. În cazul unei mase punctuale M și presupunând simetria sferică, soluția ecuației reprezintă o gaură neagră Schwarzschild. O gaură neagră este concepută ca o zonă spațio-temporală causal deconectat de restul spațiu-timpului; ceea ce caracterizează gaura neagră este măsura sa și, prin urmare, curbura ei. Niciun eveniment din această regiune nu poate influența evenimentele din afara regiunii. Evenimentele din gaura neagră sunt, totuși, causal determinate de evenimentele trecute, deci o gaură neagră nu reprezintă o abatere de la cauzalitățile clasice.

Determinismul este o presupunere ontologică că toate evenimentele sunt date. Determinismul nu necesită cauzalitate și nu implică predictibilitate. Starea actuală a Universului este efectul trecutului său și cauza viitorului său. Romero consideră că RG presupune existența tuturor evenimentelor reprezentate de o varietate, deci este o teorie deterministă din punct de vedere ontologic, dar totuși epistemologic nedeterminată. Existența unor singularități în spațiu-timp nu implică un eșec al determinismului ontologic, doar un eșec în previzibilitate, dar ele nu sunt elementele spațiu-timpului în sine.

Prezentismul susține că viitorul și trecutul există doar ca schimbări care au avut loc sau vor avea loc în prezent și nu au o existență reală a lor. Eeternalismul presupune că trecutul și viitorul există într-un sens real, nu numai ca schimbări care au avut loc sau vor avea loc față de prezent.

Prezentismul este incompatibil cu existența singularităților. (Romero 2014) În acest sens, Romero argumentează că găurile negre pot fi folosite pentru a arăta că prezentismul oferă o imagine defectuoasă a substratului ontologic al lumii.

Argumentul găurii

Argumentul găurii ⁴ a apărut pentru prima oară în lucrarea lui Einstein despre relativitatea generală în 1913. Argumentul găurii exploatează o proprietate a relativității generale, covarianța ei generală. Substantiviștii consideră că varietatea evenimentelor are o existență independentă de câmpurile definite pe ele; evenimentele își au identități indiferent de proprietățile metrice, deci diferența dintre spațiu-timpuri este o diferență fizică reală, deși nimic observabil nu distinge cele două spațiu-timpuri. Mai mult, toate diferențele apar doar în interior. Acesta este considerată de John D. Norton (Norton 2012) un eșec grav al determinismului; gaura poate fi specificată a fi cât de mică, și nicio specificație a spațiu-timpului în afara găurii nu poate fixa proprietățile în interior. Ar rezulta că diferențele dintre cele două spațiu-timpuri sunt doar diferențe în descrierea matematică, ambele descriind aceeași realitate fizică. Norton deduce că un substantivalism al varietății este de neconceput.

Nu există singularități

Singularitățile sunt de obicei considerată a fi un defect profund al RG. Singularitățile pot duce la eșecuri ale determinismului, deoarece legile "se descompun" într-un anumit sens. Christopher Smeenk și George Ellis (Smeenk and Ellis 2017) afirmă că această preocupare se

⁴ Într-o ecuație obișnuită a câmpului, cunoașterea sursei câmpului și a condițiilor limită determină câmpul peste tot. Ele nu determină însă potențialul vectorial. Einstein a constatat că dacă ecuațiile gravitației sunt general covariante, atunci metrica nu poate fi determinată în mod unic de către sursele sale ca o funcție a coordonatelor spațiu-timpului. Unii filozofi ai fizicii fac apel la argument pentru a ridica o problemă a substanțialismului varietăților, conform căreia manifestarea evenimentelor din spațiu este o "substanță" care există independent de câmpul metric definit pe el sau de materia din el. Alții consideră argumentul drept o confuzie în ceea ce privește ecartamentul.

aplică numai anumitor tipuri de singularități. Spațiu-timpurile relativiste care sunt hiperbolice la nivel global au suprafețe Cauchy, iar datele inițiale corespunzătoare pe aceste suprafețe fixează o soluție unică în spațiu-timp. Amenințarea la adresa determinismului este mai calificată: legile nu se aplică "singularității însăși", chiar dacă evoluția ulterioară este complet deterministă și există câteva tipuri de singularități care amenință mai grav determinismul. Prezența singularităților stabilește că RG este incompletă. Prezența unei singularități într-un model cosmologic indică faptul că "spațiu-timp, așa cum este descris de RG, se termină: nu există nici o modalitate de a extinde timpul spațial prin singularitate, fără a încălca condițiile matematice necesare asigurării că ecuațiile câmpului sunt bine definite. Orice descriere a condițiilor fizice "înainte de Big Bang" trebuie să se bazeze pe o teorie care înlocuiește GR și permite o extindere prin singularitate."

Gustavo E. Romero susține că nu există singularități fizice în spațiu-timp. Modelele singulare cu spațiu-timp nu aparțin ontologiei lumii, pentru că soluții defective ale ecuațiilor câmpului lui Einstein. Complexitatea ecuațiilor neliniare ale câmpului, și interpretarea câmpului tensorial metric, au dus la preocupări cu privire la ipotezele ontologice ale teoriei. Conceptul de spațiu-timp a fost introdus de Minkowski (1908), și aparține mai mult ontologiei decât fizicii. O construcție formală a spațiu-timpului poate fi obținută pornind de la o bază ontologică a fiecărui lucru (Bergliaffa, Romero, and Vucetich 1997) sau evenimente. (Romero 2013b). Romero pornește de la ipoteza ontologică de bază că spațiu-timpul este compoziția ontologică a tuturor evenimentelor, deci o entitate emergentă reprezentabilă de un concept.

Concluzii

Hawking și Ellis sunt în consens cu eternalismul, afirmând că fiecare soluție a ecuației lui Einstein cuprinde întreaga istorie a unui univers - nu este doar o imagine a modului în care sunt lucrurile, ci un spațiu-timp întreg, eventual materializat. (S. W. Hawking and Ellis 2008)

În argumentarea lui Romero, ontologia este o clasă a entităților acceptate de o anumită teorie. Quine consideră ontologia ca fiind domeniul variabilelor legate de o teorie, deci clasa de referință a teoriei. Iar relativitatea generală nu este o teorie despre spațiu-timp, ci despre câmpul gravitațional și interacțiunile determinate de acesta. ”Spațiul-timp este o proprietate emergentă ontologică a sistemului format de toți existenții, oricare ar fi ei. Din cauza universalității unice a gravitației, modelele de spațiu-timp pot fi folosite pentru a reprezenta câmpul gravitațional în relativitatea generală. Mai precis, conexiunea afine a spațiului-timp reprezintă puterea câmpului, iar metrica reprezintă potențialul gravitațional.” (Romero 2013c)

Singularitățile din RG au declanșat numeroase probleme filosofice, inclusiv legate de definirea lor (în termeni de căi incomplete, puncte lipsă sau patologice de curbura) și semnificația lor. Dacă singularitățile au ontologie, sau este vorba de limite ale modelelor noastre, respectiv RG.

O gaură neagră transformă materia într-o entitate pur gravitațională. Invers, când se evaporă, curbura spațială este transformată în materie obișnuită. (Curiel and Bokulich 2018) Astfel, găurile negre sunt o sursă importantă pentru investigarea ontologiei spațiu-timpului și a materiei obișnuite, și a problemelor conceptuale care stau la baza relativității generale. Sau dacă spațiu-timpul este dinamic abstract (spațiul Hilbert) sau mai fundamental, posibil o entitate emergentă aparținând doar unei teorii fizice.

Gustavo E. Romero (Romero 2013c) afirmă că existența unor soluții singulare într-o teorie independentă de fundal precum RG, este o consecință a unor contradicții la nivelul bazei axiomatice a teoriei. Această contradicție apare din aproximația continuumului adoptată pentru a modela câmpul gravitațional. Ar trebui să se dezvolte o teorie discretă, din care relativitatea generală (și noțiunile obișnuite de spațiu și timp) să poată apărea ca un fel de medii. Aceasta

implică o **schimbare ontologică majoră**. Gravitatea cuantică este considerată de el o teorie despre relațiile dintre evenimentele de bază și emergența ontologică a spațiului-timp și a gravitației. Gravitatea cuantică ar fi o teorie atât de fundamentală încât ar putea fi considerată mai degrabă o ontologie decât fizică. Natura discretă a substratului ontologic spațiu-timp poate fi formată de evenimente atomice. Ontologia gravitației cuantice, și a lumii, în această perspectivă, ar fi un șir de evenimente de bază.

În ultimii ani cercetările s-au extins de la singularitățile clasice din teoriile lui Penrose și Hawking la noua paradigmă a singularităților slabe, și teoria lui Choptuik privind colapsul critic. (Rendall 2005) Accelerarea cosmologică implică încălcări ale stării energetice și impune o revizuire a teoremelor de singularitate. Împreună cu materia și energia întunecată, presupune un model cosmologic în expansiune care se transformă într-o singularitate "big rip". (Starobinsky 1999)

Studiul singularităților din spațiu-timp în RG clasică este încă la început. Fizica găurilor negre și filosofia singularităților cosmologice sunt domenii încă neexplorate. În fața singularităților, știința își recunoaște limitele. Aici poate ajuta foarte mult filosofia.

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/lrr-2002-1>.
- Bergliaffa, Santiago E. Perez, Gustavo E. Romero, and Hector Vucetich. 1997. "Steps towards an Axiomatic Pregeometry of Space-Time." *ArXiv:Gr-Qc/9710064*.
<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9710064>.
- Brans, C., and R. H. Dicke. 1961. "Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation." *Physical Review* 124 (3): 925–35. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.
- Brown, Harvey R. 2015. *Physical Relativity: Space-Time Structure from a Dynamical Perspective*. Oxford University Press.
<http://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/0199275831.001.0001/acprof-9780199275830>.
- Carroll, Sean, and Sean M. Carroll. 2004. *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Addison Wesley.
- Cassirer, Ernst. 1921. "Zur Einstein'schen Relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische Betrachtungen." 1921.
https://books.google.ro/books/about/Zur_Einstein_schen_Relativit%C3%A4tstheorie.htm?id=I60-AAAAYAAJ&redir_esc=y.
- Chandrasekhar, Subrahmanyan. 1998. *The Mathematical Theory of Black Holes*. Clarendon Press.
- Clarke, C. J. S. 1976. "Space-Time Singularities." *Communications in Mathematical Physics* 49 (1): 17–23. <https://doi.org/10.1007/BF01608632>.
- Curiel, Erik. 1999. "The Analysis of Singular Spacetimes." *Philosophy of Science* 66: S119–45.
<https://doi.org/10.1086/392720>.
- 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>.
- Duhem, Pierre, Jules Vuillemin, and Louis de Broglie. 1991. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Translated by Philip Wiener. 9932nd edition. Princeton: Princeton University Press.
- Earman, J. 1995. "Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks." ResearchGate. 1995.
https://www.researchgate.net/publication/272771355_Bangs_Crunches_Whimpers_and_Shrieks.
- Earman, John. 1992. *World Enough and Space-Time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. Cambridge, Mass.: A Bradford Book.
- Ehlers, Jürgen. 1973. "Survey of General Relativity Theory." 1973.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-010-2639-0_1.
- Einstein, Albert. 1918. *Über Gravitationswellen*. Akademie der Wissenschaften.
- Einstein, Albert (Author). 1918. "Motive des Forschens." 1918.

- 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>.
- Esfeld, Michael, and Vincent Lam. 2008. "Moderate Structural Realism about Space-Time." *Synthese* 160 (1): 27–46. <https://doi.org/10.1007/s11229-006-9076-2>.
- . 2011. "Ontic Structural Realism as a Metaphysics of Objects." In *Scientific Structuralism*, edited by Alisa Bokulich and Peter Bokulich, 143–159. Springer Science+Business Media.
- 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>.
- Geroch, R. 1968. "Local Characterization of Singularities in General Relativity." *Journal of Mathematical Physics* 9: 450–65. <https://doi.org/10.1063/1.1664599>.
- Giulini, D. 2006. "Algebraic and Geometric Structures in Special Relativity." In *Special Relativity*, 45–111. Lecture Notes in Physics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-34523-X_4.
- Goswami, Rituparno, Pankaj S. Joshi, and Parampreet Singh. 2005. "Quantum Evaporation of a Naked Singularity." <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.031302>.
- Grünbaum, Adolf. 1970. "Space, Time and Falsifiability Critical Exposition and Reply to 'A Panel Discussion of Grünbaum's Philosophy of Science.'" *Philosophy of Science* 37 (4): 469–588.
- Grünbaum, Adolf. 1994. "Some Comments on William Craig's 'Creation and Big Bang Cosmology'." *Philosophia Naturalis* 31 (2): 225–236.
- Grünbaum, Adolf. 2012. *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition*. Springer Science & Business Media.
- Havas, Peter. 1964. "Four-Dimensional Formulations of Newtonian Mechanics and Their Relation to the Special and the General Theory of Relativity." *Reviews of Modern Physics* 36 (4): 938–65. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.36.938>.
- 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.
- Hilbert, D. 1917. "Die Grundlagen der Physik. (Zweite Mitteilung)." *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse* 1917: 53–76. <https://eudml.org/doc/58973>.
- Howard, Don. 1996. "Relativity, Eindeutigkeit, and Monomorphism: Rudolf Carnap and the Development of the Categoricity Concept in Formal Semantics." *Origins of Logical Empiricism* 16.
- Howard, Don A. 2017. "Einstein's Philosophy of Science." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Fall 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philsience/>.

- Huggett, Nick, and Carl Hoefer. 2018. "Absolute and Relational Theories of Space and Motion." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Spring 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/spacetime-theories/>.
- 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>.
- Ladyman, James, and Don Ross. 2007. *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford University Press.
- Lam, Vincent, and Michael Esfeld. 2012. "The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity." *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43 (2): 243–258.
- 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>.
- Misner, Charles, Kip S. Thorne, John Wheeler, and David Kaiser. 2017. *Gravitation*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Moulay, Emmanuel. 2012. *The Universe and Photons*. FQXi Foundational Questions Institute. http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/Moulay_Photon_2.pdf.
- Norton, John D. 2012. "What Can We Learn About the Ontology of Space and Time From the Theory of Relativity?"
- 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>.
- Pooley, Oliver. 2012. "Substantivalist and Relationalist Approaches to Spacetime." Preprint. 2012. <http://philsci-archive.pitt.edu/9055/>.
- 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/>.
- Reichenbach, Hans. 1928. *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. Walter de Gruyter.
- Rendall, Alan D. 2005. "The Nature of Spacetime Singularities." *ArXiv:Gr-Qc/0503112*, 76–92. https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003.
- Romero, Gustavo E. 2013a. "Adversus Singularitates: The Ontology of Space–Time Singularities." *Foundations of Science* 18 (2): 297–306.
- . 2013b. "From Change to Spacetime: An Eleatic Journey." *Foundations of Science* 18 (1): 139–48. <https://doi.org/10.1007/s10699-012-9297-4>.
- . 2013c. "The Ontology of General Relativity." *ArXiv:1301.7330 [Gr-Qc, Physics:Physics]*. <http://arxiv.org/abs/1301.7330>.
- . 2014. "Philosophical Issues of Black Holes." *ArXiv:1409.3318 [Astro-Ph, Physics:Gr-Qc, Physics:Physics]*. <http://arxiv.org/abs/1409.3318>.
- 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>.
- Ryckman, Thomas A. 2018. "Early Philosophical Interpretations of General Relativity." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Spring 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/>.
- Schilpp, Paul Arthur, and Paul Arthur Schilpp. 1959. *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*. 1st Harper Torchbook ed. New York : Harper. <https://trove.nla.gov.au/work/10548922>.
- Schlick, Moritz. 1921. "Kritizistische Oder Empiristische Deutung Der Neuen Physik?" *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26 (n/a): 96.
- Schutz, Bernard F., and Director Bernard F. Schutz. 1985. *A First Course in General Relativity*. Cambridge University Press.
- Sfetcu, Nicolae. 2018. "Buclele Cauzale În Călătoria În Timp." ResearchGate. 2018. 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/>.
- Starobinsky, A. A. 1999. "Future and Origin of Our Universe: Modern View." *ArXiv:Astro-Ph/9912054*. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9912054>.
- 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>.
- Weinberg, Steven. 1972. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. Wiley.
- Weingard, Robert. 1976. "On the Ontological Status of the Metric in General Relativity." *The Journal of Philosophy*. 1976. <https://doi.org/10.2307/2025012>.

- Weyl, Hermann, and H. Weyl. 1993. *Raum, Zeit, Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*. Edited by Jürgen Ehlers. 8th edition. Berlin: Springer.
- Wheeler, John Archibald. 1990. *A Journey Into Gravity and Spacetime*. Scientific American Library.
- Wright, E. L. 2009. "Frequently Asked Questions in Cosmology." 2009.
http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence.