



UNIVERSITATEA DIN
BUCUREȘTI
VIRTUTE ET SAPIENTIA



FACULTATEA DE FIZICĂ

Mase de găuri negre masive în contextul observațiilor de unde gravitaționale

REZUMAT LUCRARE DE DOCTORAT

Absolvent:

Răzvan A. BALAȘOV

Conducător științific:

CS I Dr. Habil. Alexandru NICOLIN

Comisie de îndrumare:

CS III Dr. Laurențiu I. CARAMETE

CS I Dr. Ion Sorin ZGURĂ

Conf. Univ. Dr. Mircea BERCU



INSTITUTUL DE
ȘTIINȚE SPAȚIALE
www.space-science.ro

București, 2022

Mulțumiri

În primul rând, aș vrea să îi mulțumesc coordonatorului meu, Dr. Alexandru Nicolin, pentru flexibilitatea și disponibilitatea pe care le-a afișat față de mine, căci fără acest tip de ajutor nu m-aș afla în poziția de susținere a tezei.

De asemenea, țin foarte mult să îmi exprim recunoștința față de membrii Comisiei de Îndrumare.

Consider că este improbabil ca, în decursul vieții mele, să mai am parte vreodată de aceeași cantitate supraomenească de răbdare și adaptabilitate pe care le-am observat la Dr. Laurențiu Caramete. Odată ce adaug capacitatea sa de structurare și etapizare a oricărui proces de care am avut nevoie în anii de studiu, precum și să subliniez faptul că am avut acces liber la cunoștințele și resursele adunate de-a lungul carierei sale, ajung în starea duală în care pot descrie atât gratitudinea sinceră pe care o simt față de îndrumarea sa, precum și neliniștea că voi avea nevoie de mult timp ca să îl pot ajunge din urmă. Vreau să știe, pe această cale, că aprecierea mea se află în plin proces de creștere, pe măsură ce am în vedere și integrez în viața mea din ce în ce mai multe din sfaturile sale.

Vreau să continui cu mulțumirile, subliniind impactul pe care l-a avut Dr. Sorin Zgură asupra mea, încă din primele zile de activitate în cadrul Institutului de Științe Spațiale. Îi stimez extrem de mult calitățile de lider și rezonoz cu ele. Pe lângă toate acestea, trebuie să menționez că a reușit să contribuie substanțial la încrederea pe care am dezvoltat-o în deciziile proprii, prin faptul că nu îmi aduc aminte vreun moment în care să fi bătut la ușa biroului său și să nu fi primit disponibilitatea și deschiderea pe care le căutam.

Sunt extrem de îndatorat Conf. Univ. Dr. Mircea Bercu, pentru toate subiectele științifice discutate la telefon (la ore la care alte persoane mai degrabă se refac pentru eforturile zilei ce urmează). Sunt secvențe memorabile din parcursul meu academic și ele îmi aduc aminte în mod constant de ce apreciez sau, mai exact, de ce sunt fascinat de efortul și curiozitatea științifică. Cu greu mă pot gândi la o persoană care, prin explicații și analogii unice, să poată simplifica fenomene fizice de înaltă complexitate.

Mulțumesc enorm Dr. Ana Caramete, care m-a ajutat în acest parcurs cu deja prea multe situații ca să le mai pot număra. Abundența întrebărilor pe care le-am ridicat (sau a clarificărilor de care am avut nevoie), a fost întâlnită mereu cu deschidere și implicare, în ciuda numărului considerabil de responsabilități pe care știam că le are. Este evident că nu există o cantitate suficientă de apreciere care să compenseze și sper doar să pot face același lucru mai departe.

Considerând că activitatea de cercetare împreună cu redactarea tezei au necesitat un efort constant de-a lungul anilor, nu pot să nu observ că, indirect, suportul primit din partea colegilor mei de laborator a constituit o sursă regenerabilă de energie. Mulțumesc din suflet că ați fost acolo, cu bune și cu rele, Alice Păun, Florentina Pîslan, Maria Ișfan, Ieronim

Constantinescu, Florin Constantin, Georgiana Simionescu, Dr. Petruța Ștefănescu și Dr. Ovidiu Tîmțăreanu-Mircea.

În final, vreau în mod special să îi mulțumesc unui suflet aparte numit Ana Burada. Capitolul de introducere este unul din capitolele mele favorite și sunt fericit că am putut implementa împreună sugestiile apărute în acest proces de scriere. Aș vrea să pot contura în cuvinte cât mai alese senzația de plenitudine pe care o constat atunci când, în momente de răscruce, pot apela necondiționat la calitățile tale, precum intuiția, analiza critică, empatia și, mai ales, creativitatea (la care mă uit cu gelozie sinceră). În plus, realitatea este că îți voi fi mereu recunoscător că mi-ai acceptat toate cusururile reliefate în timpul redactării. Din câte știu, nu au fost create distincții destul de înalte încât să onoreze astfel de merite, dar sunt sigur că, în eventualitatea apariției lor, le-ai obține negreșit.

Cuprins

1	Introducere	1
1.1	Ce este o gaură neagră?	1
1.2	Scurt istoric al găurilor negre	4
1.3	Obiective teză	7
2	Cataloage de masă	9
2.1	Metode de determinare a maselor de găuri negre masive	9
2.1.1	Concluzii	10
2.2	Construirea catalogului	11
3	Simulări ale proceselor de creștere a găurilor negre	15
3.1	Descrierea pachetului de simulare	15
3.2	Studii preliminare ale programului de simulare	15
3.2.1	Cazul bidimensional	16
	Cazul cu găuri negre plasate într-un volum cu particule de gaz dis- tribuite uniform	16
3.2.2	Cazul tridimensional	18
3.2.3	Rezultate preliminare	18
3.3	Principalele scenarii de creștere a maselor de găuri negre	21
3.3.1	Scenarii de tip HS	24
3.3.2	Scenarii de tip LS	24
3.3.3	Scenarii de tip hibrid	26
3.4	Mecanismul de absorbție a unei stele de către o gaură neagră	26
3.4.1	Distrușgerea mareică	27
3.4.2	Condiții de producere a fenomenului de absorbție stelară	27
3.4.3	Cadru de simulare	29
4	Rezultate	33
4.1	Rate de coalescență și evoluția maselor de găuri negre	33
4.2	Extinderea volumului de simulare	38
4.3	Studii adiționale pentru populațiile de găuri negre	39
4.3.1	Găuri negre de tip Kerr	39
5	Concluzii	41
6	Listă de abstracte ale articolelor asociate cu teza de doctorat	43

CUPRINS

7	Listă de acronime și prescurtări folosite	45
8	Anexă	47
	Referințe	48

Introducere

Dacă am alege, dintre toate obiectele astrofizice cunoscute, pe acelea care *captează* cea mai mare cantitate de atenție din partea publicului larg, cu siguranță că găurile negre s-ar număra printre candidații principali.

În mod paradoxal, definirea unei găuri negre este relativ simplă, dar înțelegerea aprofundată a formării, evoluției, precum și a proceselor asociate cu ea (sau elementelor aflate sub directa ei influență), necesită un efort cerebral suplimentar. Acest fapt explică, într-o anumită măsură, diversitatea și multitudinea studiilor curente, furnizate de o comunitate științifică impulsionată atât de stimulantele descoperiri din trecutul recent, cât și de viitoarele investigații.

Descoperirea undelor gravitaționale datorate coalescențelor de găuri negre ([Abbott et al., 2016](#)) și stele neutronice ([Abbott et al., 2017](#)) a deschis o nouă fereastră în fizica modernă, similară cu descoperirea undelor electromagnetice de către Heinrich Rudolf Hertz ([Adawi, 1989](#)). În plus, experimentele viitoare, de pe sol sau din spațiu, vor împinge și mai mult granițele științei prin tatonarea evoluției găurilor negre masive până la detalii despre prima lor generație.

Acest capitol are rolul de a familiariza rapid cititorul cu noțiunile de bază legate de găurile negre, precum și de a-i actualiza cunoștințele prezentând tendințele și necunoscutele curente.

1.1 Ce este o gaură neagră?

Găurile negre (BHs - eng. *black holes*) pot fi descrise în numeroase moduri. În principiu, ele sunt obiecte atât de masive încât nici măcar lumina nu poate ignora influența gravitațională exercitată asupra ei. Găurile negre reprezintă, deci, zone din Univers atât de dense încât creează deformări adâncite în spațiu-timp (Figura 1.1). Dincolo de o anumită regiune învecinată, chiar și lumina nu poate scăpa de atracția gravitațională puternică a unei găuri negre. Și orice corp (de orice natură), care se apropie prea mult, se va alungi și contracta în dimensiuni printr-un proces cunoscut științific sub numele de spaghettificare (eng. *spaghettification* - Figura 1.2).

Cele trei caracteristici principale ale găurilor negre sunt *masa* (M), *rotația* - sau *spinul* - (S) și *sarcina* (Q). Dacă le considerăm pe toate ca deja având masă, clasificarea duce la patru mari tipuri de găuri negre:

- de tip Schwarzschild (statice) - sunt definite doar de masa lor (nu se rotesc și nu au sarcină)

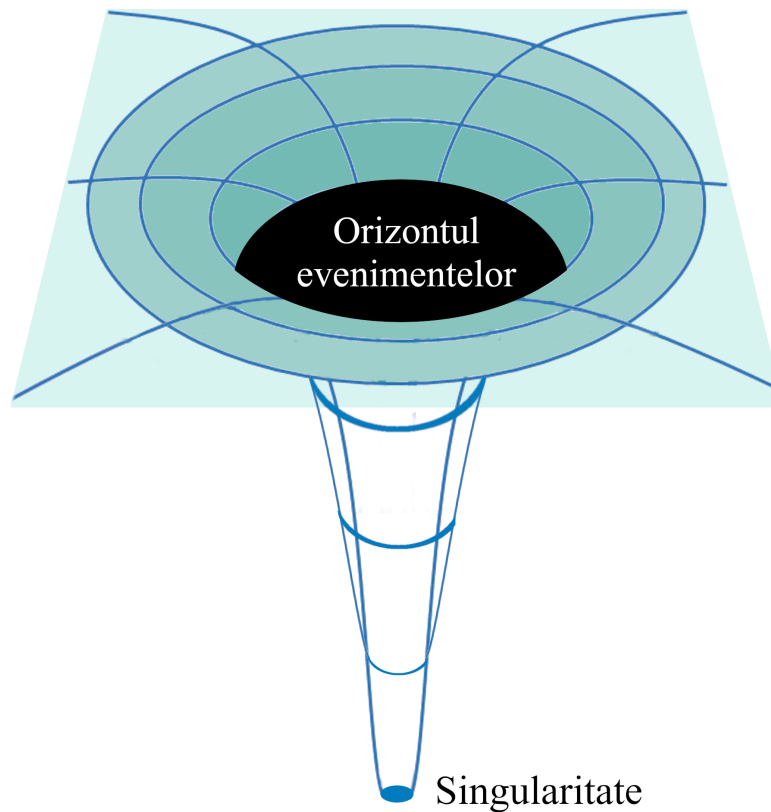


Figura 1.1: *Deformarea spațiu-timpului de către o gaură neagră*

- de tip Kerr (rotaționale) - au rotație și masă (sunt considerate cele mai apropiate de realitate)
- de tip Reissner-Nordstrom - au sarcină, dar nu se rotesc
- de tip Kerr-Newman - au sarcină și se rotesc

Dacă filtrăm obiectele în cauză doar după masă, observăm că există alte patru moduri de a diferenția găurile negre:

- stelare
- intermediare
- supermasive
- cuantice

Figura 1.3 include doar găurile negre observate până în momentul de față.

Odată ce stelele se îndreaptă către sfârșitul ciclului de viață, cele mai multe dintre ele își măresc volumul, pierd din masă și apoi se răcesc pentru a forma pitice albe. Dar cele mai mari dintre aceste corpuri au destinul de a deveni stele neutronice (NS - eng. *neutron stars*), dacă sunt de cel puțin 8 ori mai masive decât Soarele nostru ([Chevalier](#),

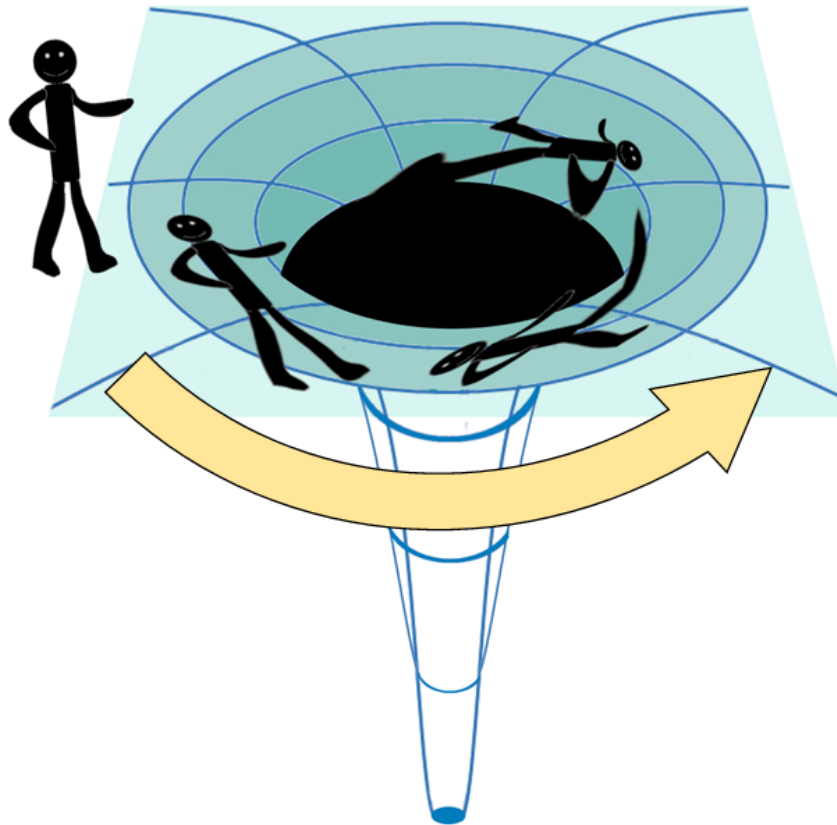


Figura 1.2: Ilustrare a procesului de spagheticare

1984; Burrows and Lattimer, 1986; Heger et al., 2003), sau așa-numitele *găuri negre de origine stelară* (SOBHs - eng. *Stellar Origin Black Holes*, pentru cele cu mase de cel puțin 20 de ori cea a Soarelui (Carroll, 2004). În situația aceasta, ele ajung să aibă câteva mase solare (notate de obicei cu M_{\odot}) și se pot forma atunci când stele mai sus menționate explodează în procese de supernove la finalul vieții lor. Steaua, pe parcursul existenței ei, pornește și întreține procesul de fuziunea nucleară. Fuziunea generează o presiune constantă spre exterior, iar forța asociată cu această presiune se contrapune în mod egal cu forța gravitațională a propriei mase stelare. Așadar, când se încheie etapele de fuziune, echilibrul stelar nu mai poate fi susținut și are loc explozia. Așa că nucleul stelei începe să se prăbușească spre interior. Această explozie ejectează material stelar în spațiu. Pe măsură ce straturile exterioare se extind, lasă în urmă un nucleu mult mai mic, dar considerabil mai dens. Când masa se prăbușește într-un punct infimezimal de mic, se naște o gaură neagră. Tasarea întregii cantități de material de câteva mase solare într-un punct atât de mic atribuie noilor corpuri formate o puternică atracție gravitațională. Din punctul de vedere al autorului, moartea unei stele se numără printre cele mai captivante fenomene astrofizice la care se adaugă faptul că reprezintă doar etapa incipientă a găurilor negre.

Găurile negre supermasive (SMBHs - eng. *Supermassive Black Holes*), a căror masă este de milioane (sau chiar miliarde) de mase solare, sunt presupuse a fi situate în centrele majorității galaxiilor.

Indiferent de dimensiunea lor inițială, găurile negre pot crește de-a lungul vieții acumulând

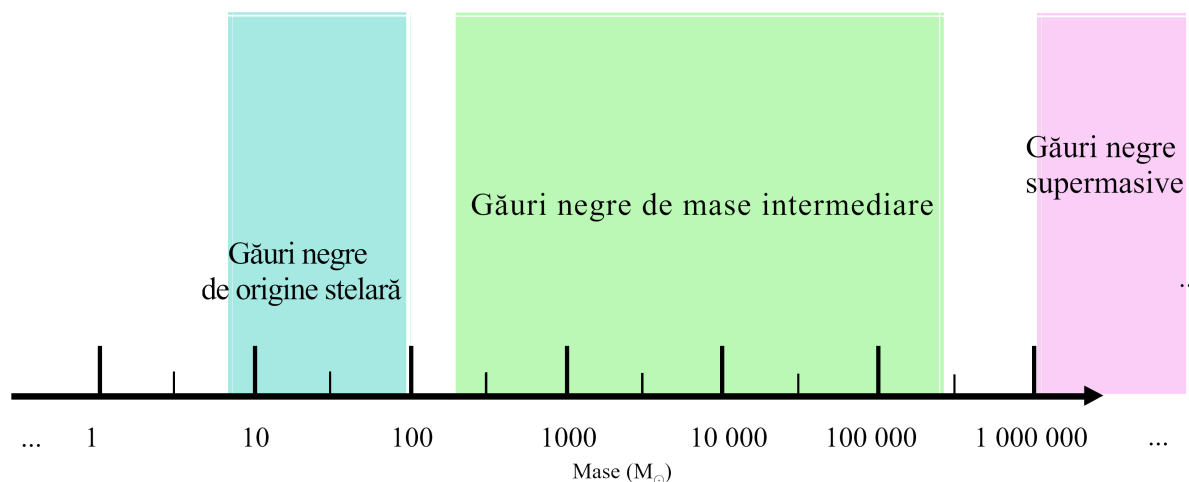


Figura 1.3: *Spectrul de mase de găuri negre din Univers*

gaz și praf de la orice obiect prins în forța mareică generată de ele. O parte din această materie luminoasă (sau radiativă) înconjoară gaura neagră într-o regiune învolburată numită disc de acreție sau de acumulare (eng. *accreting disk*). Figura 1.4 ilustrează sumar această situație.

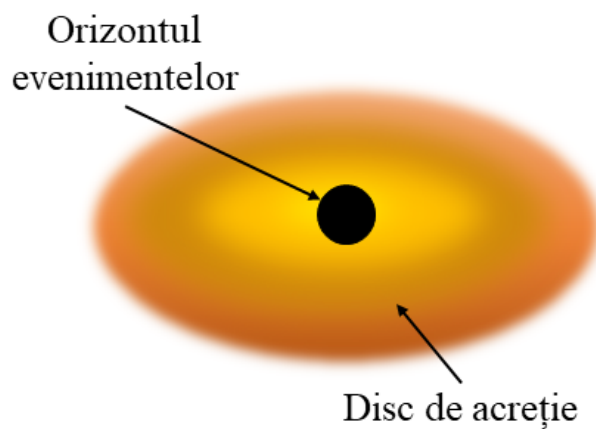


Figura 1.4: *Model disc de acreție format în jurul găurii negre*

1.2 Scurt istoric al găurilor negre

Cunoștințele actuale despre găuri negre reprezintă rezultatul a secole de eforturi manifestate prin observație, studiu și aprofundare consecventă a noțiunilor aflate (chiar și acum) într-o dinamică continuă (Figurile 1.5 și 1.6).

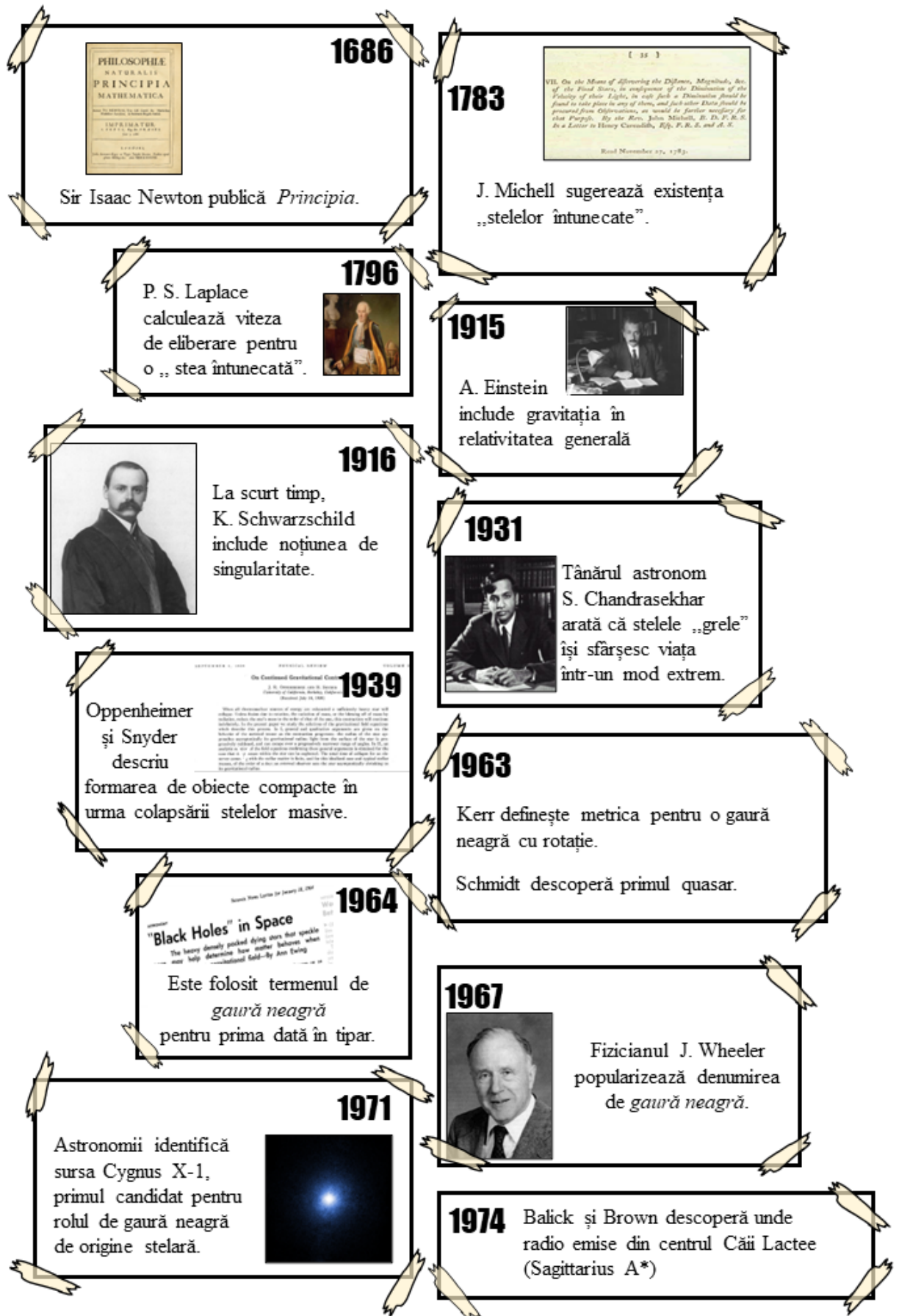


Figura 1.5: Scurt istoric al găurilor negre (Sursele imaginilor sunt detaliate în Anexă).

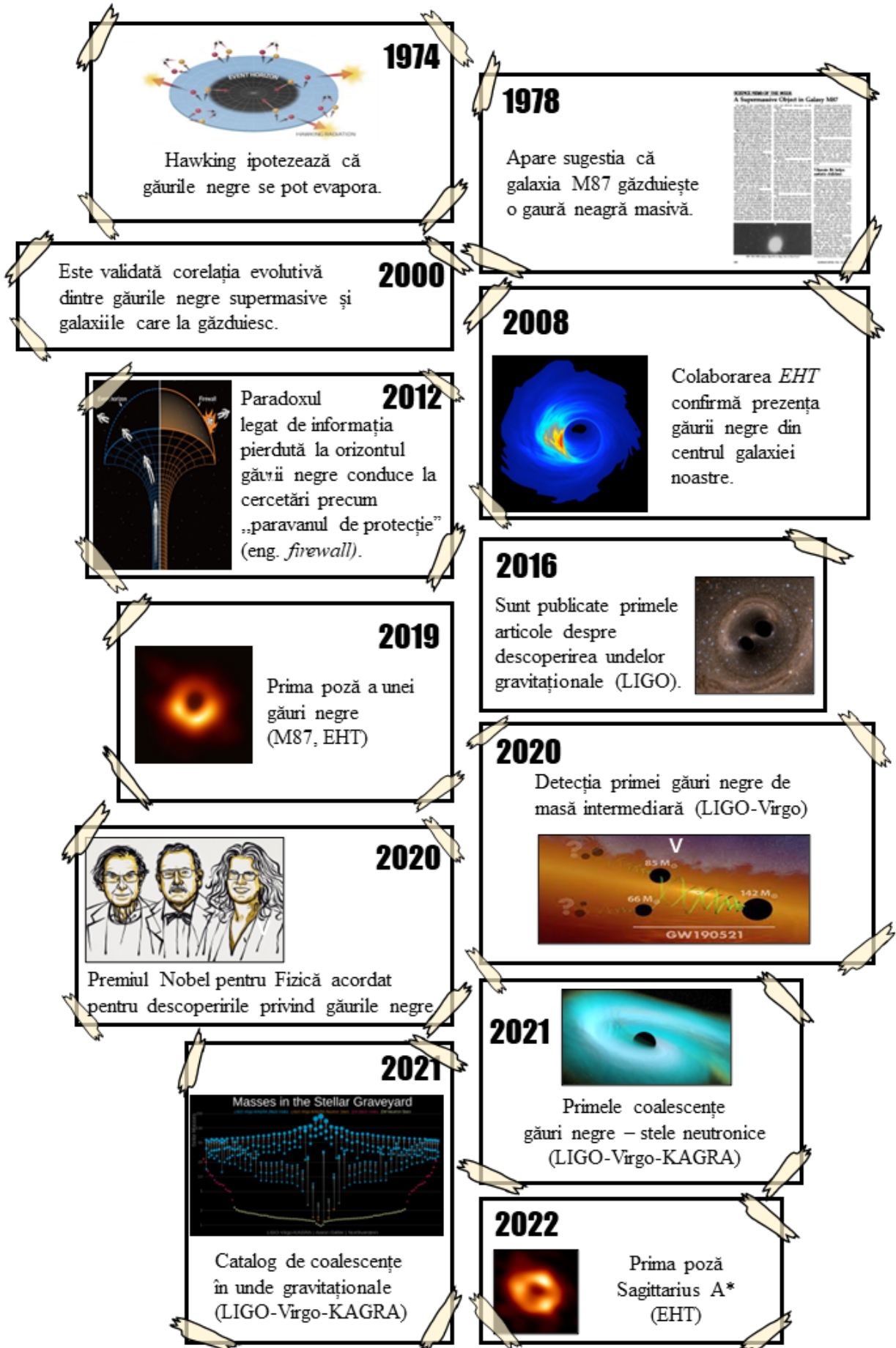


Figura 1.6: Scurt istoric al găurilor negre - continuare (Sursele imaginilor sunt detaliate în Anexă).

1.3 Obiective teză

În continuare, detaliem contextul științific actual, ce a făcut posibilă propunerea tezei în cauză.

O perspectivă importantă a acestui context o reprezintă lansarea primului detector european de unde gravitaționale plasat în spațiu: LISA (eng. *Laser Interferometer Space Antenna*). Va fi posibil studiul Universului relativ timpuriu prin lărgirea domeniului de frecvență pentru observații care, la rândul ei, va mări domeniul de frecvență al semnalelor. În consecință, se va deschide o fereastră pentru măsurători de masă ale găurile negre supermasive (astfel, extinzând spectrul de masă al detecțiilor de găuri negre).

LISA, proiect al Agenției Spațiale Europene (ESA - eng. *European Space Agency*), prin [Programul Cosmic Vision](#), va fi instrumentul care va acoperi cel mai mare interval de semnale ([Amaro-Seoane et al., 2017](#)). În consecință, va deține recordul pentru cele mai lungi brațe. Detecția de coalescențe a găurilor negre supermasive și studiul Universului timpuriu (deplasări către roșu de până la 15), vor fi posibile folosind un instrument cu totul nou în momentul actual.

Prin urmare, diferite teme din Astrofizică și Cosmologie ar putea fi dezvoltate cu scopul comun de a răspunde la câteva întrebări esențiale pentru Astrofizică:

1. Cum, când și unde s-au format primele găuri negre masive?
2. Cum influențează ele formarea galaxiilor?
3. Care este natura gravitației la orizonturile găurilor negre?

Astfel că, folosind noile instrumente puse la dispoziție de <, detecțiile coalescențelor de găuri negre supermasive și studiul Universului timpuriu vor face parte din primul val de măsurători în domeniul astronomiei de unde gravitaționale.

România este implicată activ în Consorțiumul LISA prin grupul LISA ISS-Sci, de la Institutul de Științe Spațiale (Măgurele). Funcția principală a grupului este dezvoltarea de conducte cu latență scăzută (LLP - eng. *Low-latency Pipeline*) bazate pe inteligență artificială (AI - eng. *Artificial Intelligence*) pentru procesarea și caracterizarea rapidă a semnalelor detectate de viitorul observator. LLP-urile pot fi folosite pentru a genera alerte cu latență scăzută pentru alte observatoare spațiale sau terestre, în contextul observațiilor cu mai mulți mesageri (eng. *Multimessenger Astronomy*). Echipa face parte din cel de-al patrulea pachet de lucru *Low-Latency Pipelines Working Package* (WP4) al LISA Science Working Group, iar coordonatorul LISA ISS-Sci, Laurențiu-Ioan Caramete, este și liderul acestui WP.

Alte activități de cercetare ale grupului, atât în cadrul Consorțiumului LISA, cât și pentru viitoarele observatoare de unde gravitaționale, includ:

- Simularea proceselor astrofizice care generează unde gravitaționale pentru a determina cerințele pentru echipamentul de detectare.
- Dezvoltarea cataloagelor de mase de găuri negre pentru a estima numărul de evenimente care ar putea fi detectate de misiunea LISA.

- Dezvoltarea conductelor cu latență scăzută bazate pe învățarea automată pentru LISA și alte observatoare viitoare de unde gravitaționale pe hardware calificat pentru spațiu, cum ar fi unitățile de procesare grafică (GPUs - eng. *Graphics Processing Units*) sau rețelele de porți programabile (FPGAs - eng. *Field-Programmable Gate Arrays*), pentru a testa avantajele unei posibile analize de date la bord.
- Dezvoltarea conductelor cu latență scăzută bazate pe învățarea automată cuantică pentru LISA și alte observatoare viitoare de unde gravitaționale.

Membrii ISS-Sci sunt, de asemenea, implicați în grupul de procesare a datelor LISA Data Processing Group (LDPG) - inclusiv LISA Data Challenge (LDC) - și LISA Astrophysics Working Group. De asemenea, LISA ISS-Sci include doi doctoranzi și doi absolvenți, care sunt implicați activ în grupul tinerilor cercetători din LISA (LECS - eng. *LISA Early Career Scientists*). Printre doctoranzi se numără și autorul acestei lucrări, care a deținut co-mandatul de coordonare LECS pe anul 2021.

Revenind la misiunea LISA, principalele obiective științifice (SOs – eng. *Scientific Objectives*) sunt următoarele:

- SO1** Studiul formării și evoluției stelelor binare din galaxia Calea Lactee
- SO2** Investigarea istoricului originii și creșterii găurilor negre
- SO3** Investigarea dinamicii roiurilor nucleare dense folosind EMRIs (eng. *Extreme Mass Ratio Inspirals* – Inspirale cu raport extrem de masă)
- SO4** Înțelegerea astrofizicii din spatele SOBHs
- SO5** Explorarea naturii fundamentale a gravitației și a găurilor negre
- SO6** Investigarea ratei de expansiunea a Universului
- SO7** Înțelegerea fondului stocastic de unde gravitaționale și implicațiile lor în Universul timpuriu
- SO8** Căutarea pulsurilor de unde gravitaționale și a surselor neprevăzute

Așadar, obiectivele tezei, în contextul dezvoltării misiunii LISA, pot fi enumerate ca:

- Rafinarea cataloagelor curente de mase ale găurilor negre masive și propunerea cataloagelor de surse pentru misiunea spațială LISA
- Extinderea cataloagelor la mase mai mici
- Extinderea caracterizării funcției de masă bazată pe aceste cataloage
- Prezicerea distribuțiilor de masă și de poziție relativă a primei generații de găuri negre
- Determinarea proporțiilor de masă ale găurilor negre primordiale aflate în coalescență
- Modelarea și testarea influențelor dintre găurile negre și galaxiile gazdă
- Setarea de predicții specifice pentru misiunea spațială LISA

Cataloage de masă

Teza propusă este concepută pentru încadrarea în cursivitatea etapelor misiunii spațiale LISA. Pentru a răspunde la mai sus menționatele întrebări, un catalog al maselor de găuri negre, dezvoltat în această direcție, constituie o unealtă eficientă pentru procesul de observare a undelor gravitaționale, prin implicațiile pe care le au distribuțiile obținute, rapoartele de masă din populația generată, care se finalizează în rate de coalescență.

De asemenea, măsurătorile de mase ale găurilor negre pot descrie diverse caracteristici ale mediului lor vecin în diferite etape ale Universului. Astfel că, investigarea Universului ar putea fi extinsă la deplasări mari spre roșu ($z > 20$). Răspunsurile la întrebările din capitolul 1 ar putea oferi detalii legate de formarea primelor găuri negre masive și testate legăturile acestora cu formarea primelor galaxii.

LISA va juca un rol proeminent în peisajul științific de după anul 2030. Spectrul de observații astronomice și considerații astrofizice va fi lărgit considerabil prin adăugarea investigațiilor cu unde gravitaționale. Evenimente invizibile electromagnetic devin „tangibile” la nivel gravitațional. Prin urmare, teza aceasta contribuie la expansiunea cunoașterii umane și la dezvoltarea continuă a înțelegerii noastre legate de Univers, în același mod în care chiar și cea mai mică rotiță asigură funcționarea mecanismului complex al unui ceas.

Revenind, primul pas a fost reprezentat de crearea cataloagelor de mase de găuri negre masive. Pentru a putea duce la bun sfârșit această etapă, a fost necesar un studiu al metodelor de determinare ale maselor găurilor negre masive. În continuare, este prezentat un sumar al metodelor principale.

2.1 Metode de determinare a maselor de găuri negre masive

După zeci de ani de observații extragalactice, activitatea din centrele galaxiilor masive, atât liniștite, cât și zgomotoase (din punct de vedere electromagnetic), este acceptată ca fiind datorată prezenței găurilor negre. După cum am discutat în subcapitolul 1.1, dedicat clasificării lor, aceste găuri negre pot fi de milioane sau chiar de miliarde de ori mai masive decât masa Soarelui. Pentru că găurile negre nu emit lumină pe nicio lungime de undă, ele nu pot fi observate direct. Singurele căi prin care gaura neagră devine „vizibilă” sunt acelea legate de acumularea treptată a materialului din mediul apropiat (cel mai comun exemplu fiind gazul). Acesta începe să se încălzească și să emită radiație ce poate fi apoi măsurată.

De cele mai multe ori, luminozitatea majorității galaxiilor este o simplă superpoziție a luminozităților stelelor componente. În unele cazuri însă, lumina emisă de discul astfel format este extrem de mare (chiar mai mare decât toate stelele din galaxie). Sursele de acest tip sunt chiar galaxiile aflate la deplasări către roșu (eng. *redshift*) cu valori ridicate. Înainte de această perioadă, doar galaxii *active* precum quasarii discutați anterior îndeplineau acest rol de studiu la distanțe atât de mari, datorită eliberării masive de energie de care dădeau dovadă.

Important pentru acest studiu este că în centrul majorității galaxiilor se află o gaură neagră supermasivă care poate intra în etape active, ceea ce o va cataloga drept un nucleu galactic activ (AGN – eng. *Active Galactic Nucleus*). Cele mai luminoase AGN-uri sunt quasarii și pot fi observate de-a lungul întregului Univers vizibil îndepărtat.

Există metode *directe* și *indirecte* de determinare a maselor de găuri negre. Cele directe, așa cum a fost menționat anterior, presupun ca masa să fie dedusă din elementele accelerate de gaura neagră însăși (dinamica stelelor sau a gazului). Exemple de aceste metode sunt modelarea dinamică a gazului (eng. *gas dynamical modelling*) sau maparea reverberațiilor (eng. *reverberation mapping*). Metodele indirecte sunt acelea în care masa găurii negre este determinată din observabile corelate cu componenta centrală a galaxiei. Cele mai des folosite relații sunt cele care corelează masele găurilor negre cu proprietățile galaxiei gazdă, cum ar fi cea a dispersiei de viteze a stelelor din nucleul galaxiei (sau relația gaură centrală - σ), cea a luminozității nucleului (relația gaură centrală - L_{nucleu}), ori de scalare cu alte mărimi fizice.

2.1.1 Concluzii

Această strânsă corelație dintre masa găurii negre și dispersia de viteză sugerează destul de clar o conexiune între gaura neagră cu mediul imediat vecin (nucleul galaxiei), deci poate avea implicații în formarea și evoluția găurii negre cu acest cadru. Este de urmărit această legătură și la mase mai mici, dacă datele observaționale vor putea permite acest lucru.

De asemenea, prin aprofundarea modului în care proprietățile găurilor negre relaționează cu cele ale galaxiilor gazdă, se dorește (și se preconizează) un parcurs de aflare a mai multor detalii despre formarea și evoluția amândurora.

2.2 Construirea catalogului

Catalogul a fost construit pe baza relației $M_{BH} \sim F_{2\mu} \times d^2$, din [Caramete and Biermann \(2010\)](#) și a urmărit un proces asemănător aceluia din munca lor pentru generarea cataloagelor (Figura 2.1).

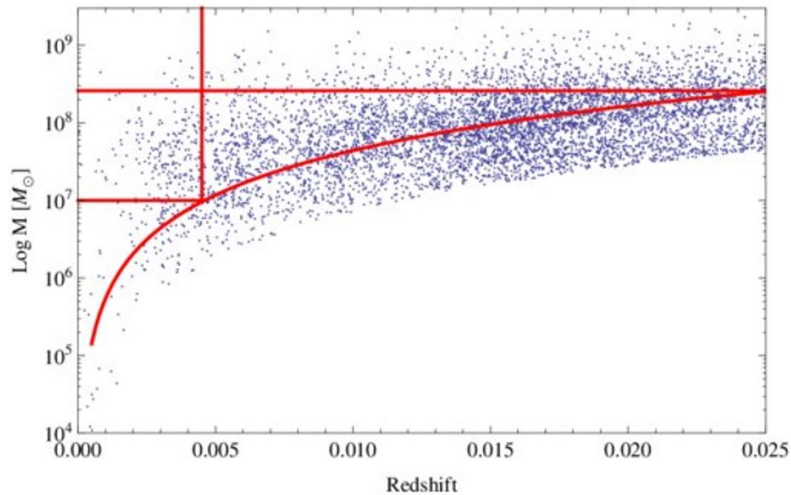


Figura 2.1: *Exemplu de distribuție folosită pentru generarea cataloagelor de mase ale găurilor negre (Caramete and Biermann, 2010)*

Astfel că două elemente sunt esențiale pentru definitivarea ei: densitatea de flux luminos emis de populația stelară la doi microni (notat cu K_S) și distanța până la sursă. Datele sunt alese în acest fel, deoarece fluxul luminos provenit de la aceasta lungime de undă este asociat cu populația stelară „veche” a unei galaxii ([van der Wel et al., 2006](#)). Catalogul 2MASS furnizează valori pentru flux, iar distanțele sunt extrase din baza de date extragalactice NASA/IPAC (NED - eng. *NASA/IPAC Extragalactic Database*). Așa cum subliniază și numele, NED este o bază de date online, ce colectează numeroase date astronomice, în urma integrării a unui număr impresionant de cataloage cu observații extragalactice ([Baza de date extragalactice NED](#)). Demn de menționat este faptul că NED are o interfață actualizată, comparativ cu cea folosită de autori în [Caramete and Biermann 2010](#) (de exemplu, metoda de accesare a datelor este diferită și acest lucru oferă avantaje și dezavantaje procesului de extragere a datelor dorite).

Pentru a putea construi catalogul și pentru a duce la bun sfârșit procesul de aflare a funcției de masă, am urmărit o serie de pași:

1. Am selectat doar sursele cu date disponibile pentru densități de flux luminos în intervalul spectral K_S . Eșantionul rezultat număra 56 936 de surse (galaxii).
2. Am limitat intrările eșantionului la cele care aveau parametrii z (deplasare către roșu) disponibili (pentru a-i transforma apoi în valori de distanță), obținând o listă de 49 411 de galaxii.
3. Am construit noua relația de scalare luând în considerare morfologiile galaxiilor și un alt eșantion, format din 716 de găuri negre massive extrase din literatură.

4. Am aplicat relația de scalare la datele extrase și am calculat valorile pentru găurile negre centrale din fiecare galaxie în parte.
5. În final, am comparat o parte din rezultate cu valorile din literatură (pentru consecvență).

Această metodă ne-a permis să obținem versiunea finală a catalogului format din datele NED, compus din 8594 de intrări.

Următorul pas a fost reconstrucția relației de scalare dintre masa găurii negre, densitatea de flux a emisiei stelare în banda K_S și pătratul distanței până la sursă. Relația, preluată din [Caramete and Biermann \(2010\)](#), după cum se poate observa, este o proporționalitate. Prin urmare, este necesară determinarea unui coeficient de proporționalitate, ce transformă relația într-o ecuație. Știind că această constantă variază odată cu morfologia galaxiei (sau, altfel spus, cu tipul Hubble), deoarece componenta sferoidă diferă în funcție de etapa în care se află galaxia, a fost determinată separat. Calculul a implicat un eșantion de 716 mase de găuri negre, extrase din literatură, ca parametri inițiali și o metodă statistică (eng. *Random Uniform Sampling*), pentru a minimiza erorile ce puteau rezulta în urma dimensiunii mici a eșantionului.

Acum vom detalia metoda pentru obținerea coeficienților de scalare, pornind de la proporționalitatea din ecuația de scalare (proces ilustrat și în Figura 2.2). Acești pași sunt identici pentru fiecare tip de galaxie considerat. Rândurile următoare descriu cazul celor eliptice.

- i. Ca prim pas, am intersectat valorile de mase extrase din literatură cu cele asociate galaxiilor eliptice (descărcate din NED). În acest fel, am obținut un tabel cu cele prezente în ambele liste.
- ii. Am generat apoi 10 tabele prin permutarea aleatoare a liniilor tabelului original.
- iii. Toate aceste 10 tabele au fost împărțite în două: eșantioanele 1 și eșantioanele 2.
- iv. Eșantioanele 1 au fost folosite pentru a calcula coeficienții relației de scalare, prin înlocuirea termenilor ecuației (cu coeficienții fiind necunoscutele) cu ajutorul maselor din literatură, plus parametrii din NED (fluxuri și distanțe).
- v. Folosind valoarea medie a coeficienților deduși, precum și eșantioanele 2, am aplicat noua relație de scalare, astfel obținând masele ce puteau fi verificate cu cele rămase din literatură.
- vi. Am reprezentat grafic masele calculate (Figura 2.3), în funcție de cele din literatură, pentru verificare.

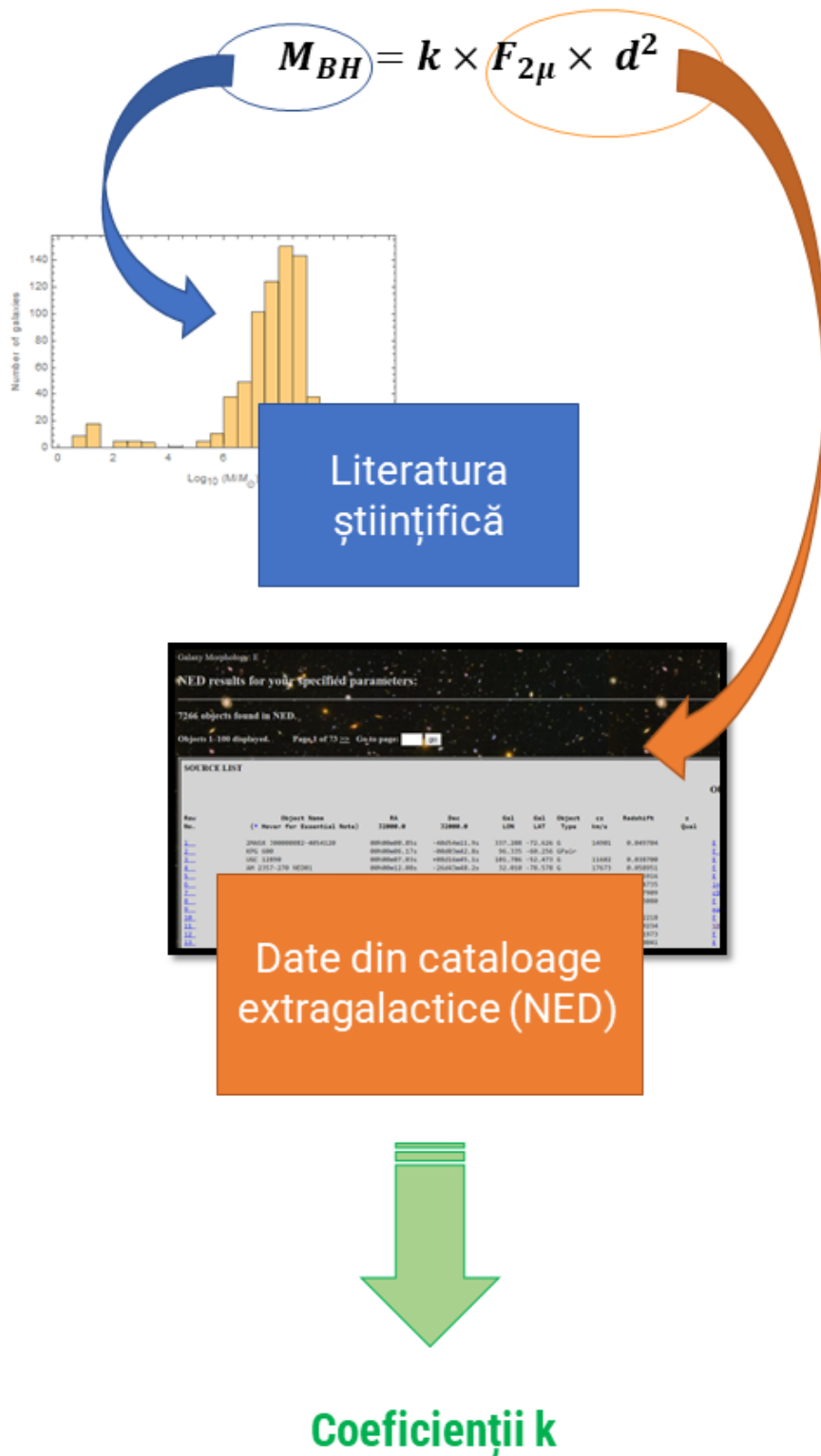


Figura 2.2: Procesul de obținere a coeficienților din relația de scalare.

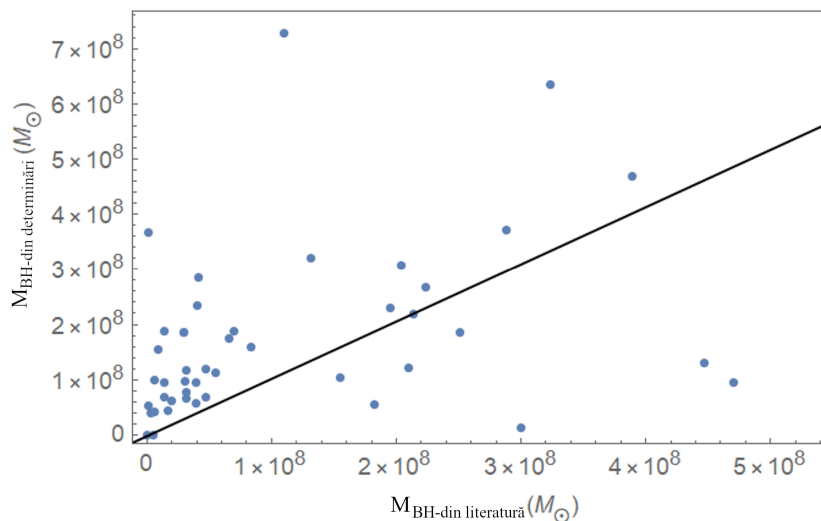


Figura 2.3: *Mase calculate vs. mase din literatură*

Funcția de masă cumulată a găurilor negre este construită pe baza minimului de masă la fiecare deplasare către roșu, pentru care lista este completă începând cu valori ale deplasărilor de 0.025 și continuând mai jos (de fiecare dată corectând pentru volume mai mici). Este evident comportamentul de lege de putere la mase mai mici, corelat cu unul similar la mase mai mare, dar cu o tranziție plată între cele două grupuri (Figura 2.4).

În final, am aplicat relația construită la întreaga populație de 8 594 de găuri negre, astfel concretizând forma catalogului.

Astfel, a fost finalizat un nou catalog (considerabil mai mare decât precedentul) cu o creștere de un ordin de mărime. Distribuția generală a găurilor negre evidențiază noi caracteristici, care vor fi investigate în continuare. Funcția de masă arată un nou indice de putere la mase mai mici. Pe baza modelelor de creștere a găurilor negre, va fi continuată investigarea distribuției de masă a populației inițiale (din universul timpuriu) și, apoi, vor putea fi calculate rapoartele de masă implicate în coalescențe pentru LISA.

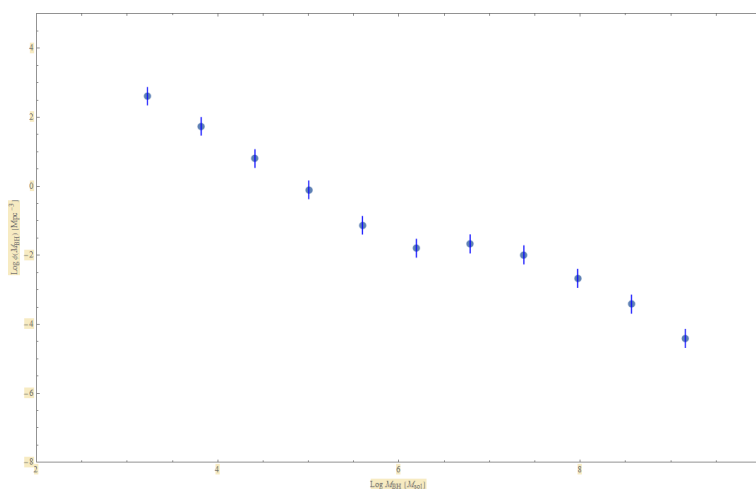


Figura 2.4: *Funcția de masă corectată în funcție de morfologia galaxiei - tipul de galaxie Hubble.*

Simulări ale proceselor de creștere a găurilor negre

Având acces la distribuțiile actuale rezultate din observații, o investigație a primei populații de găuri negre masive a devenit posibilă. Momentan, cataloagele cu noile mase nu au fost publicate, așa că am continuat cu rezultatele din (Caramete and Biermann, 2010). Pentru aceasta, a trebuit construit un cadru de lucru, prin care diferite scenarii să fie testate.

Inițial, a fost ales codul de simulare *nbody6*, folosit cu precădere în rezolvarea problemei cu n corpuri, datorită capacității lui de a lucra cu multe obiecte și cu interacțiunile dintre ele. A fost dezvoltat și administrat de Sverre Aarseth de la Universitatea din Cambridge de-a lungul deceniilor trecute (Aarseth, 1999; Nitadori et al., 2012). Apoi, din interacțiunea cu GADGET-2, care este tot un pachet software folosit în simulări ale problemei celor n corpuri, am concluzionat că oferă aceeași stabilitate, dar, în plus, o axare mai mare pe procesele astrofizice (Springel, 2005). Astfel a fost schimbat temporar cadrul de simulare la GADGET-2. În cele din urmă, a fost selecționat programul GIZMO, care este un derivat GADGET-2, în urma testării modulelor de fenomene fizice incluse.

Capitolul acesta descrie în detaliu programul folosit, mediul de simulare creat, precum și fiecare tip de scenariu executat.

3.1 Descrierea pachetului de simulare

Pentru partea de simulări, am folosit pachetul de coduri GIZMO, cu ajutorul căruia am explorat diferite scenarii pentru primele populații de găuri negre masive. Am investigat proprietățile populațiilor rezultate din mecanisme realiste de creștere a găurilor negre (acrecție de gaz și coalescențe).

Pentru mai multe informații poate fi consultat ghidul utilizatorului GIZMO (Manual GIZMO). Pe lângă toate acestea, GIZMO oferă opțiunea de rezolvator hidrodinamic non-SPH (eng. *non-SPH hydro solver*), precum și alte metode SPH ce nu sunt incluse în GADGET.

3.2 Studii preliminare ale programului de simulare

Paradigma curentă legată de mecanismele de creștere (Hawking, 1971; Carr and Hawking, 1974; Chapline, 1975; Green, 2015; Sasaki et al., 2018; Rees and Volonteri, 2006) a găurilor negre evidențiază coalescența ca fiind procesul principal de adăugare a masei, considerând diferite cazuri de interacțiune ale generațiilor anterioare în funcție de masivitatea găurilor

negre inițiale (eng. *seeds* - „semințe”): „ușoare” (eng. *light*) sau „grele” (eng. *heavy*). Astfel că și scenariile vor fi denumite în consecință: scenariu *light seeds* (LS) sau *heavy seeds* (HS). În cazul primului scenariu (cel *light* sau *LS*), sursele sunt stele din Populația III care sunt formate într-un Univers cu metalicitate joasă (eng. *low-metallicity Universe* - Bromm et al. 1999; Abel et al. 2000) ce au explodat și au dat naștere unor găuri negre cu 2/3 din masa originală, adică de ordinul a câtorva sute de mase solare (Zel'dovich and Podurets, 1965; Zeldovich and Novikov, 1971; Shapiro and Teukolsky, 1985; Quinlan and Shapiro, 1990; Madau and Rees, 2001).

În cel de-al doilea scenariu, cel *heavy* sau *HS*, găurile negre sunt deja masive și s-au format, de exemplu, prin prăbușirea discurilor protogalactice și au mase cu ordine de mărime de 10^4 până la $10^6 M_{\odot}$ (Begelman et al., 2006).

În continuare, au fost luate în considerare rezultatele ambelor scenarii, indiferent de mecanismul de formare a găurilor negre inițiale, prin prezentarea a diferite simulări construite în GIZMO. Diferențele au fost reprezentate de cadrele de condiții inițiale. Scopul acestor simulări este de a extrage o concentrație relativă a găurilor negre rezultate după aproximativ 13 miliarde de ani de evoluție și de a o compara cu distribuția actuală (urmare a observațiilor).

3.2.1 Cazul bidimensional

Motivația pentru acest pas bidimensional a fost strict legată de nevoia pentru testare preliminară a pachetului de coduri. GIZMO cuprinde un număr considerabil de metode, așadar și numărul de module este pe măsură. După configurarea cu succes a programului GIZMO în mediul Linux, am folosit această situație pentru verificare și acomodare cu codurile de simulare.

Cazul cu găuri negre plasate într-un volum cu particule de gaz distribuite uniform

În cazul acesta, în loc să generăm un număr mare de particule de gaz (cu roșu, în Figura 3.1 și Figura 3.2) cu mase relativ mici, am ales să începem cu un număr mai mic, dar cu mase comparabile cu cele ale găurilor negre (cu albastru) pentru a avea aceeași influență gravitațională. Astfel, particulele joacă un rol colectiv pentru aceleași trăsături pe care le-ar fi manifestat o distribuție cu un număr mai mare, dar mase mai mici. Fiecărei particule de gaz i-a fost atribuită câte o valoare nulă pentru componentele vitezei, în comparație cu particulele de găuri negre care, la începutul simulării, au pornit cu valori aleatorii (tot folosindu-ne de o distribuție gaussiană). Timpul de oprire a fost setat la o valoare mare ($t_{sfarsit} = 20$), pentru scopul testării, fără a avea o semnificație fizică. Apoi, am lăsat sistemul să evolueze.

Acest caz a fost simulat cu opțiunea de coalescență activată în configurația GIZMO. Valorile maselor au fost păstrate din simularea precedentă. Comportamentul observat a fost unul așteptat: în urma numărului mare de găuri negre (relativ la spațiul folosit), toate particulele de găuri negre s-au unit, respectând clasicul tipar arborescent de coalescență (eng. *merger tree*), rezultând într-o singură gaură neagră.

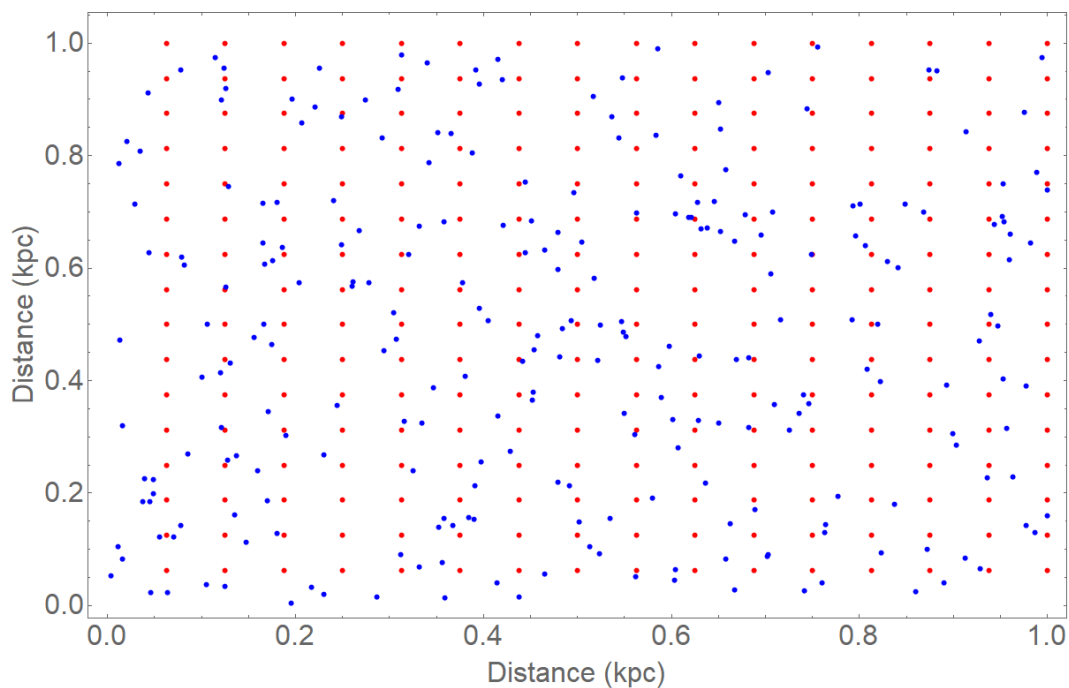


Figura 3.1: Condiții inițiale pentru cazul 2D cu găuri negre (culoarea albastră) plasate într-un volum de gaz distribuit uniform (culoare roșie)

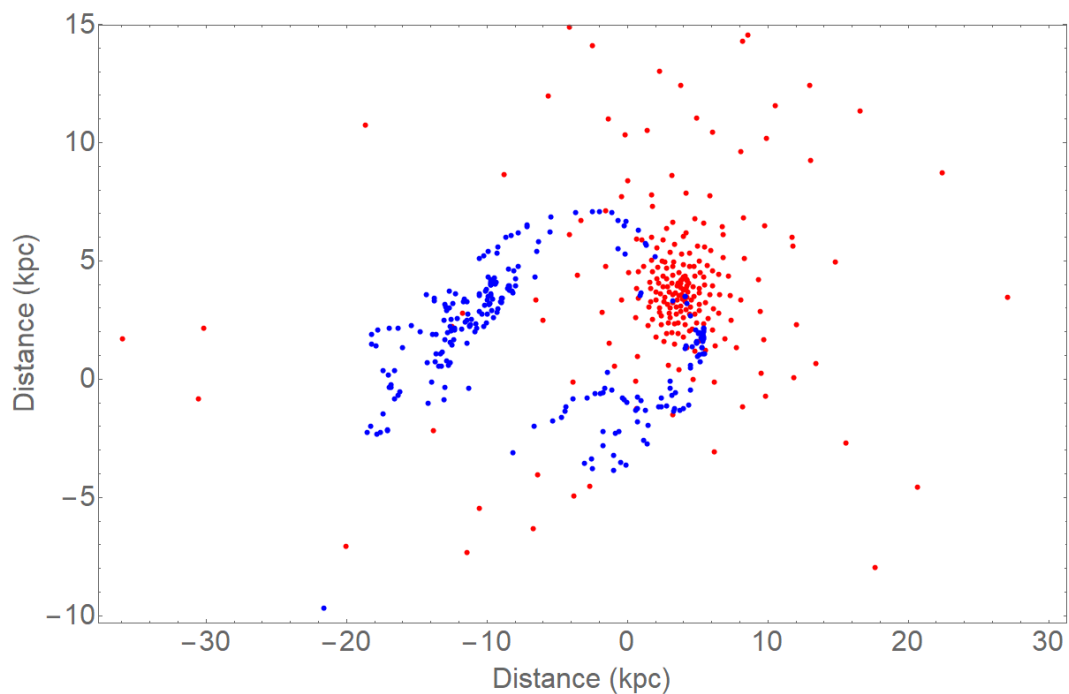


Figura 3.2: Snapshot final pentru cazul 2D cu găuri negre (culoarea albastră) plasate într-un volum de gaz distribuit uniform (culoare roșie)

3.2.2 Cazul tridimensional

Motivația din spatele cazului tridimensional este de a ajunge cât mai aproape posibil de distribuția de găuri negre sugerată de observații. Deoarece folosim rezultatele din scenariile LS/HS, valorile inițiale pentru masele de găuri negre sunt $\geq 10^4 M_\odot$ (Pacucci et al., 2017). Am decis să testăm cazul maselor de 10^5 pentru început și să observăm comportamentul numeric ulterior pe durata a celor 13 miliarde de ani (precum și rezultatele finale după acest interval de timp setat). Prin urmare, valorile obținute au fost corelate cu concentrații de 350 – 2200 găuri negre per kpc^3 (extrase din observații - Caramete and Biermann 2010), de $10^8 M_\odot$. Considerând un caz extrem, unde găurile negre cresc prin acreție la limită Eddington, un simplu calcul duce la o creștere de aproximativ un ordin de mărime per un miliard de ani. De asemenea, luând în considerare faptul că o gaură neagră nu poate crește la limită Eddington pentru mult timp (materialul de creștere este furnizat doar după unirea a două galaxii sau, altfel spus, a două componente sferoidale de galaxii) și că majoritatea efectelor gravitaționale încetează după primul miliard de ani, am plasat o limită de acreție maximă (limita Eddington) la un miliard de ani. Cu alte cuvinte, neluând în considerare acreția, simulările ar trebui să furnizeze doar o creștere de la $10^5 M_\odot$ la $10^7 M_\odot$ prin coalescențe (la care, ulterior, poate fi adăugată masa acretată rămasă și astfel obținute rezultatele așteptate).

De asemenea, am apelat la o metodă de scalare (în urma limitărilor tehnice). În continuare, este descris procesul iterativ de aflare a parametrilor inițiali potriviți pentru obținerea concentrației dorită.

Modul de investigație pentru sus-menționata concentrație este ilustrat în Figura 3.3. Am început de la o *celulă-elementară* pe care am lăsat-o să evolueze în timp și spațiu. La finalul acestor pași de timp, am calculat concentrația rezultată (incluzând doar masele cu valori de peste $10^7 M_\odot$ din volumul extins în urma evoluției). Concentrația rezultată a fost asociată cu volumul celulei-elementare (adică un cub cu o lungime a unei laturi de 10 pc) și apoi multiplicată până când umple un volum de 1 kpc^3 (Figura 3.4), astfel scalând rezultatul nostru din simulări, fără a adăuga putere computațională care ar simula exact acest caz.

După o serie variată de scenarii, generarea a 4 000 de găuri negre (Figura 3.5) în situația inițială, într-un volum egal cu $1 \times 10^{-6} \text{kpc}^3$ (adică un cub cu latura de 10 pc), a dus la o concentrație de 650 găuri negre/ kpc^3 (Figura 3.6).

Plasând inițial 17 280 de găuri negre (Figura 3.7a) am obținut o concentrație finală de 1 800 găuri negre/ kpc^3 (Figura 3.7b). Ambele rezultate se încadrează în intervalul dorit (ales în urma observațiilor).

3.2.3 Rezultate preliminare

Următoarea figură (Figura 3.8) prezintă evoluția ratei cumulative de coalescență, pentru ambele cazuri, modelată cu o funcție de putere cu panta 0.54, pentru concentrația de 650 de găuri negre/ kpc^3 (cu albastru), și cu panta 0.66, pentru cazul cu 1800 de găuri negre/ kpc^3 (cu roșu). De menționat este că, în primul caz, panta este mult mai apropiată de valoarea 0.5 (asociată cu evoluția normală a structurilor la scală cosmologică).

Deși ambele rezultate sunt clar între limitele de concentrație masică de găuri negre rezul-

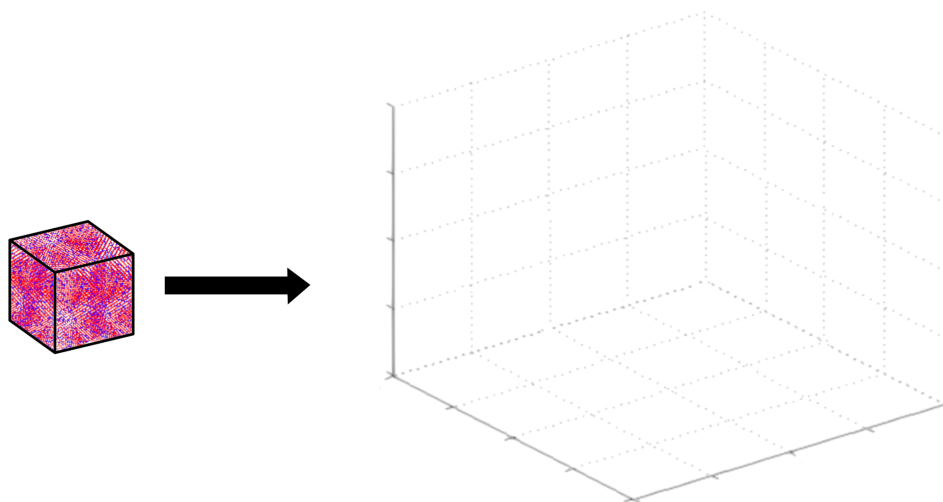


Figura 3.3: „Celula-elementară” plasată în spațiul 3D (concept). Scala diferă în funcție de volumul inițial (de start). De exemplu, un cub cu latura de 10pc , ca celulă-elementară, trebuie multiplicat până când umple spațiul generat de un cub cu latura de 1kpc (adică 10^4 celule elementare).

tate din observații, ele au fost analizate separat. Astfel că, în figurile următoare (Figura 3.9 și Figura 3.10), sunt prezentate, pentru fiecare caz în parte, distribuții de masă. Prima distribuție este cea rezultată din cazul celor 650 de găuri negre/ kpc^3 , iar a doua este evoluția pentru concentrația de 1800 de găuri negre / kpc^3 . Aceste reprezentări grafice demonstrează că primul caz este apropiat de o distribuție gaussiană, sugerând o evoluție normală, pe când cea de-a doua afișează o creștere exponențială, urmată de o descreștere rapidă, într-un interval de mase mult mai larg decât sugerează datele observaționale (astfel indicând un comportament non-fizic).

În acest mod, am reușit să determinăm concentrația inițială de găuri negre, care a generat distribuția actuală, precum și rata de coalescență pentru creștere, ceea ce reprezintă un rezultat extrem de important pentru Misiunea Spațială LISA. Acest rezultat va fi folosit în colaborarea LISA pentru estimări ale ratelor de detecție și pentru o mai bună pregătire a sistemelor de achiziție și procesare a datelor. Alte îmbunătățiri legate de simulări sunt parte din același proces.

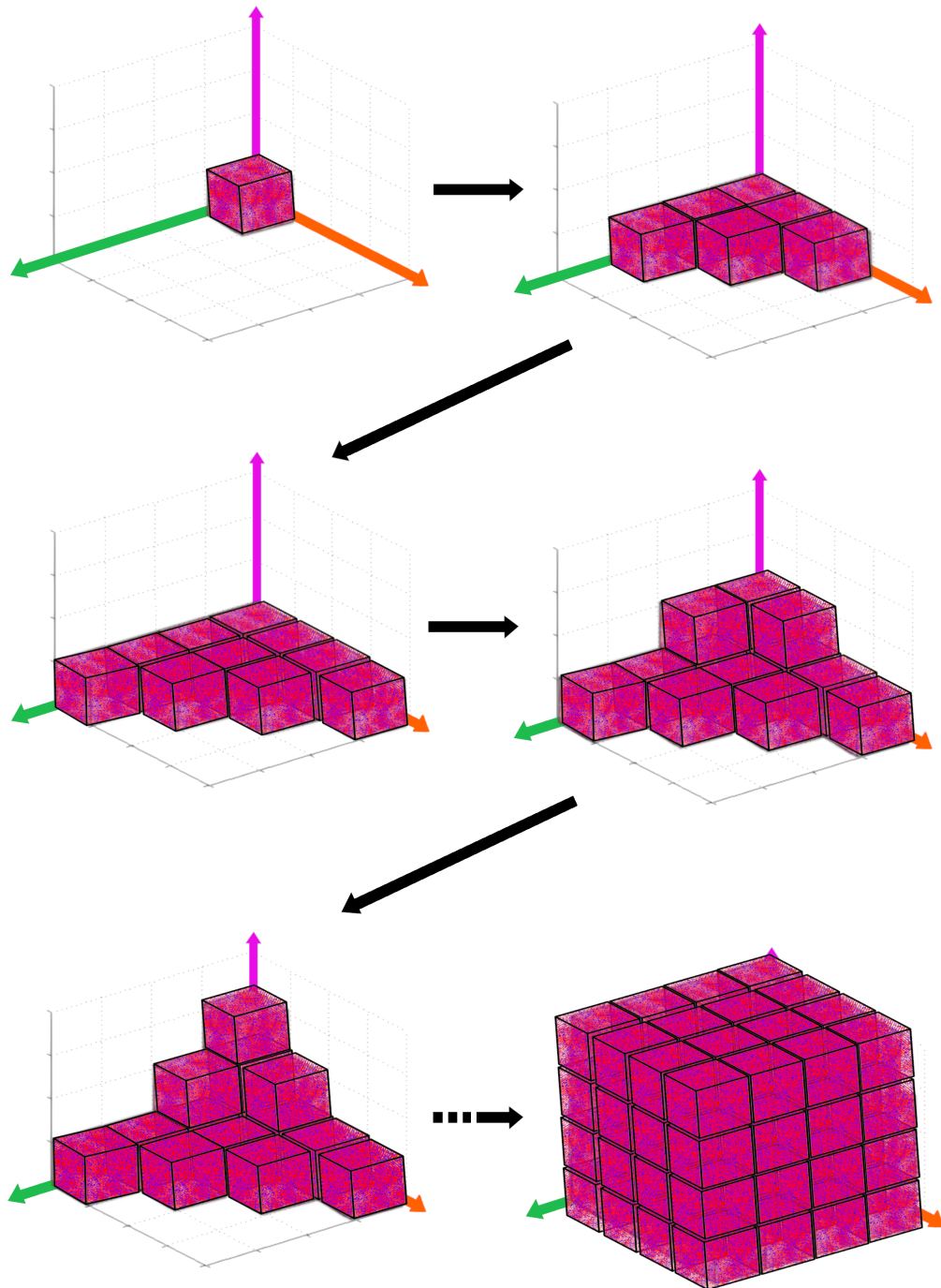


Figura 3.4: Scalarea de la celula-elementară la volumul final (concept).

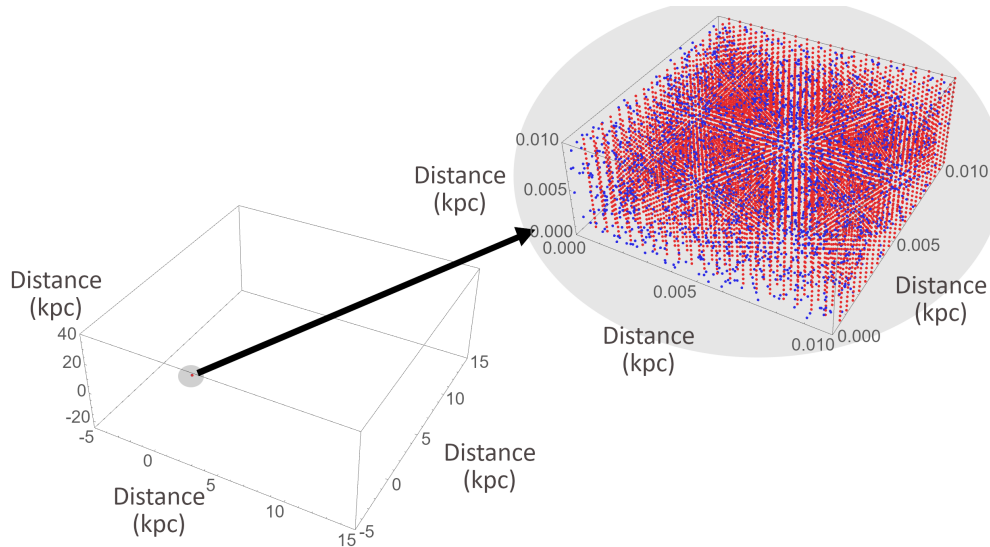


Figura 3.5: Condiții inițiale pentru 4000 de găuri negre (cu albastru), plasate într-un volum de gaz distribuit uniform (cu roșu) într-un volum cubic cu latura de 10 pc. Figura din dreapta reprezintă volumul de interes mărit.

3.3 Principalele scenarii de creștere a masei de găuri negre

Acest capitol descrie în detaliu investigarea principalelor caracteristici, inclusiv a ratei de coalescență, pentru primele populații de găuri negre, în contextul observațiilor de unde gravitaționale, atât curente, cât și viitoare. Am implementat diferite variante ale populațiilor inițiale, considerând numărul inițial al seed-urilor ca parametru liber. Această funcție de masă inițială (presupusă) este direct responsabilă pentru scenariile studiate și lăsate să evolueze în timp până în prezent, pentru compararea cu distribuțiile actuale. Rezultatele legate de aceste simulări oferă informații legate de rata de coalescență a găurilor negre, precum și de evoluția ei în funcție de masă și timp, ceea ce validează sau nu funcția de masă inițială. Aceste informații sunt vitale pentru următoarea generație de observatoare de unde gravitaționale (în special pentru Misiunea Spațială LISA), astfel reprezentând un sistem de referință pentru a mai bună dezvoltare a sistemelor și modurilor de lucru implicate în ducerea la bun sfârșit a misiunii (implicații legate de analiza și îmbunătățirea sistemelor de prelucrare a datelor, transferului de date și cerințelor de procesare.

Condițiile folosite în capitolul 3.2 au reprezentat punctul de plecare unde am plasat semințe de găuri negre pe care le-am lăsat să evolueze 13 Gyrs. Drept consecință, două situații/scenarii inițiale au fost validate din punct de vedere al concentrației de găuri negre rezultate, însă, pentru conformitate cu legile actuale ale Fizicii, cel de-al doilea caz a fost eliminat. Astfel că, una din cele două configurări a devenit un candidat real pentru un Univers relativ timpuriu, și anume cea cu 4000 de găuri negre inițiale, având mase de $10^5 M_{\odot}$, într-un volum cu latura de 10 pc (cu alte cuvinte, un spațiu de $1 \times 10^{-6} \text{ kpc}^3$).

Referindu-ne la alte detalii tehnice, în mod implicit, așa cum este specificat în manualul utilizatorului GIZMO, o unitate de timp internă este echivalentă cu $9.8 \times 10^8 \text{ yr/h}$, unde

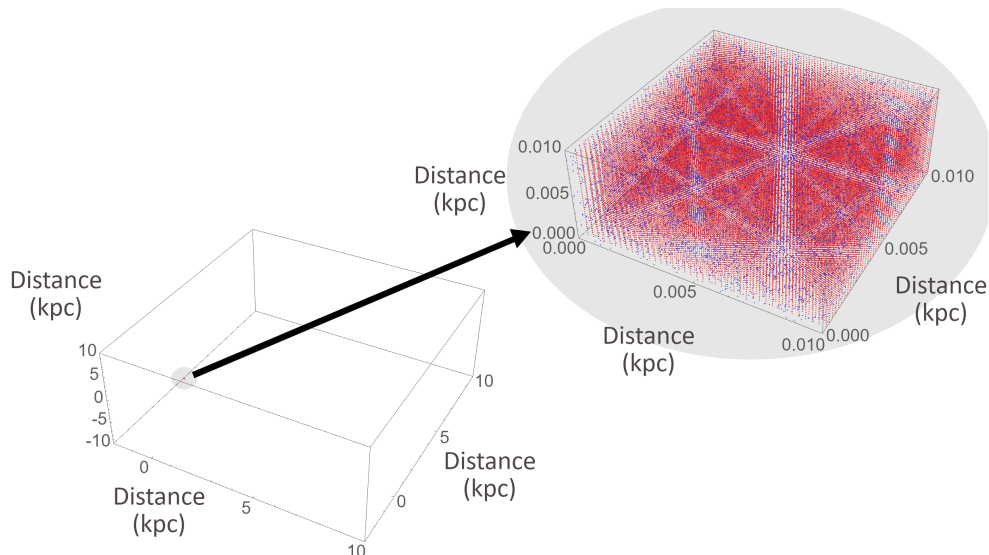


Figura 3.6: Condiții inițiale pentru 17280 de găuri negre (cu albastru), plasate într-un volum de gaz distribuit uniform (cu roșu) într-un volum cubic cu latura de 10 pc.

$h = 1$ pentru simulări non-cosmologice. Intervalul temporal de 13 Gyrs a fost ales astfel încât să ofere ocazia unor găuri negre aflate la deplasare către roșu egală cu 7 să ajungă la masele și distribuțiile observate în prezent. De asemenea, întregul interval a fost divizat în fișiere secvențe de timp (eng. *snapshots*), fiecare acoperind o durată egală cu 0.01 dintr-o unitate temporală internă (corespunzător a 9.8×10^6 ani). Este important de știut că programul interpretează cinci tipuri diferite de particule (două dintre ele fiind particule de gaz și găuri negre). Folosind o funcție gaussiană, particulelor de găuri negre le-au fost atribuite valori aleatorii pentru vitezele inițiale.

Diferența majoră a fost că în noile simulări a fost integrat procesul de acreție, prin furnizarea a diferite mase de gaz pentru procesul de hrănire. Particulele de gaz au fost distribuite uniform, pentru a nu exista o direcție preferențială de captură din parte găurilor negre, deci am creat un cadru în care fiecare gaură neagră are aceeași șansă de a acreta material. Pentru consistență, opțiunea de configurare `BH_GRAVCAPTURE_GAS` a fost folosită pentru toate simulările, ceea ce a permis ca acreția să fie exclusiv asociată cu capturarea particulelor de gaz din punct de vedere gravitațional de către găurile negre (Hopkins et al., 2016).

În activitatea anterioară am presupus acreție la limită Eddington care a compensat pentru un ordin de mărime în creșterea urmărită în cei 13 Gyrs. Așadar, prin coalescențe, aveam nevoie doar de creșteri de până la $10^7 M_{\odot}$, deoarece restul de masă ar fost asociat cu procesul de acreție ipotizat. În cazul curent al acestui capitol nu presupune un fenomen de acest tip, căci acreția devine parte din simulare prin activarea ei în fișierul de configurare premergător condițiilor inițiale. Pe scurt, de data aceasta, am căutat concentrații de găuri negre masive cu $10^8 M_{\odot}$ care s-au încadrat în condiția menționată mai sus.

Din momentul acesta, sunt prezentate noi scenarii investigate, implicând și acumularea de gaz (Springel, 2005; Di Matteo et al., 2005), pentru procesul de creștere (cu ajustarea noilor caracteristici în funcție de alegerea semințelor). Adăugarea unui caz *hibrid* a rezultat în alte modificări de asemenea. Fiecare tip de situație ipotizată, inclusiv acest al treilea

3.3. PRINCIPALELE SCENARII DE CREȘTERE A MASELOR DE GĂURI NEGRE23

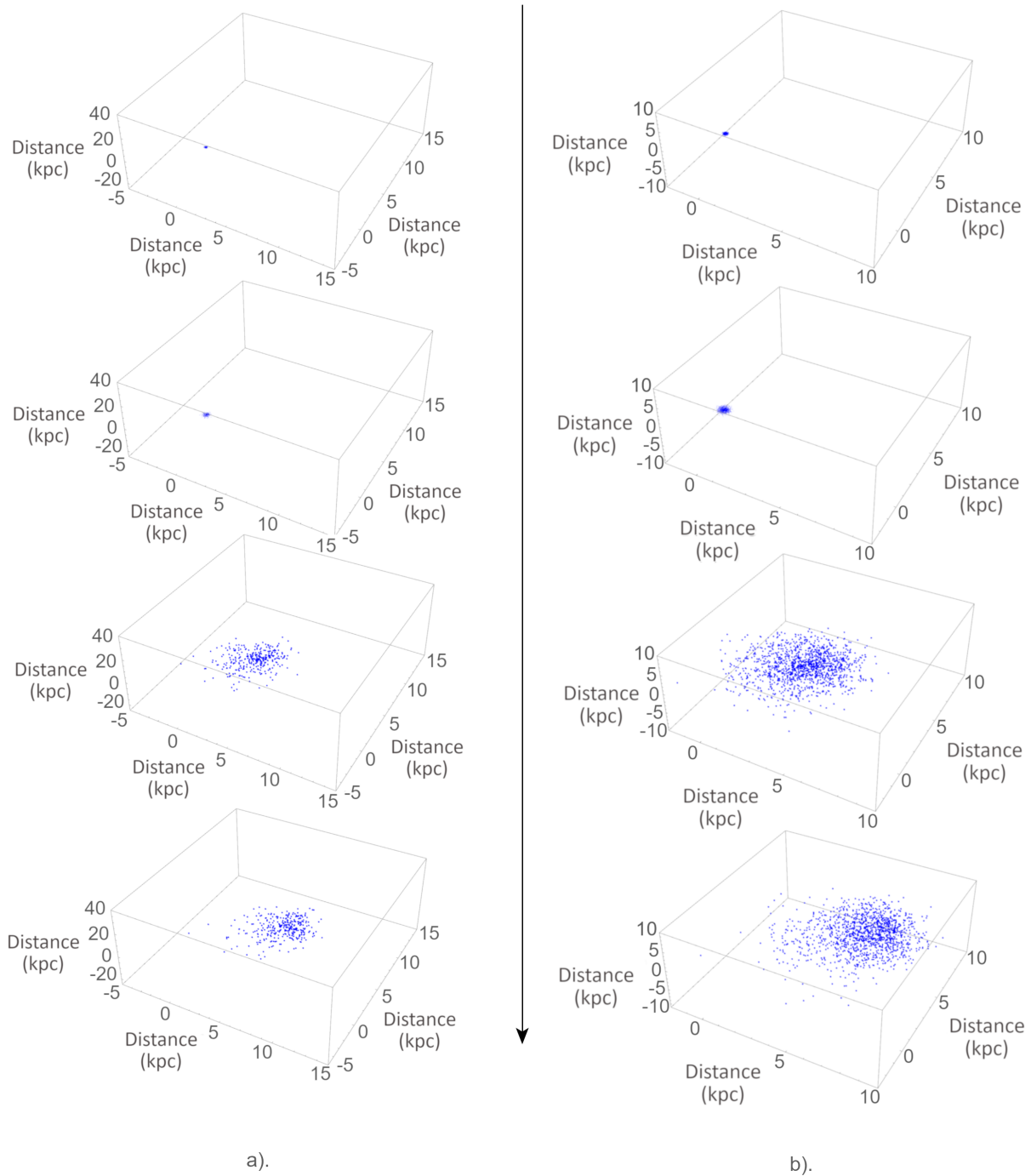


Figura 3.7: Evoluția pentru: 4000 de găuri negre (cu albastru) - stânga; 17200 de găuri negre (cu albastru) - dreapta.

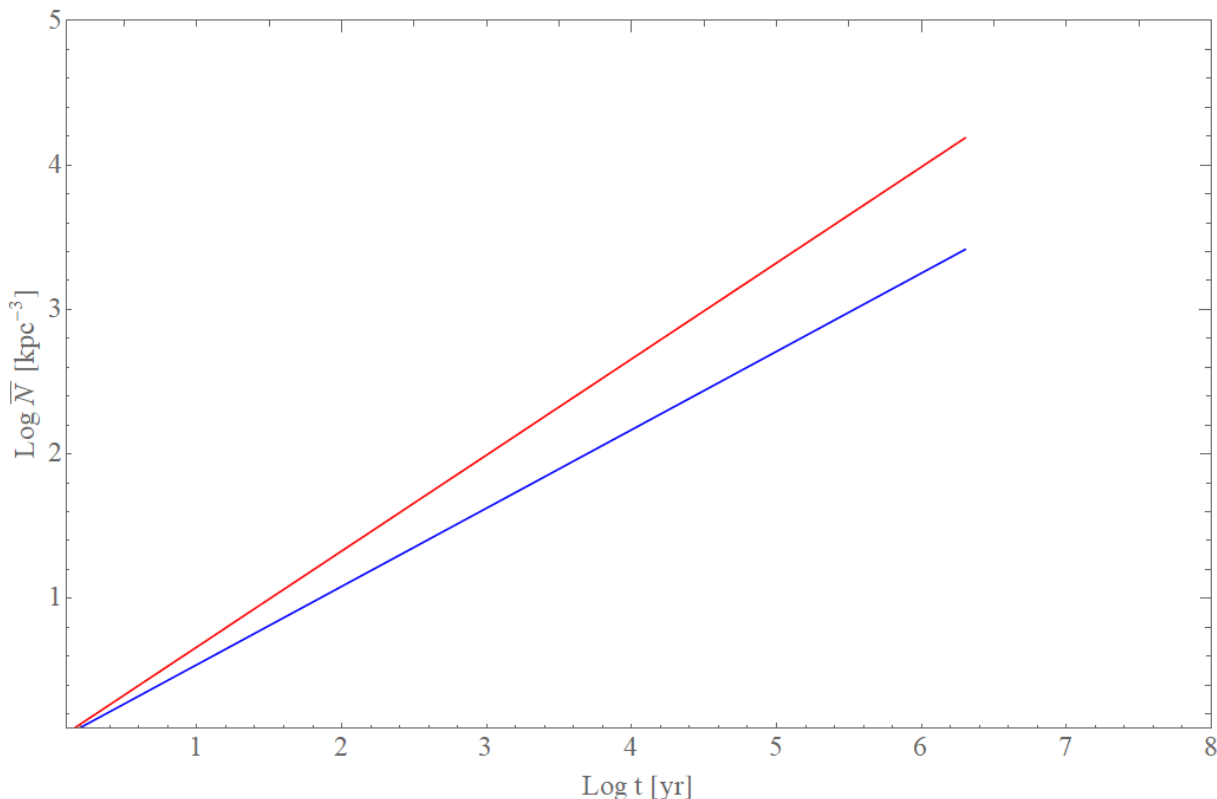


Figura 3.8: Grafice rată cumulativă de coalescență, pentru ambele cazuri: a). concentrația de 650 de găuri negre/ kpc^3 (cu albastru – panta de 0.54); b). concentrația de 1800 de găuri negre / kpc^3 (cu roșu – panta de 0.64)

hibrid, va fi motivat în secțiunile următoare, unde detaliem fiecare simulare reprezentativă în mod separat.

3.3.1 Scenarii de tip HS

Așa cum a fost menționat în introducerea capitolului 3.3, a fost o decizie firească de a porni cu parametrii cazului confirmat de datele observaționale prin stabilirea a 4000 de găuri negre în condițiile de început, ce au fost plasate aleatoriu uniform într-un volum egal cu $1 \times 10^{-6} kpc^3$ (i.e. un cub cu latura de 10 pc) ca prime situații de studiu.

Concluzia acestei etape a fost că am identificat două variante unice pentru fiecare caz propus (2000, 3000 și 4000 de semințe), cumulând la un total de 6 situații validate pentru paradigma scenariului de tip HS, ceea ce a determinat cercetarea scenariilor cu mase mai mici (LS).

3.3.2 Scenarii de tip LS

Ca primi pași, a trebuit să fie creat un mediu potrivit maselor mai mici de găuri negre inițiale, astfel încât să poată ajunge, în decurs de 13 Gyrs, la masele căutate și confirmate în scenariul HS. O decizie logică a fost de a crește numărul de găuri negre inițiale pe care le-am considerat în volumul generat. Deși am reușit generarea a 8×10^5 găuri negre LS, fiecare cu $10^3 M_{\odot}$, influența gravitațională dintre ele a fost aproape inexistentă, așa cum

3.3. PRINCIPALELE SCENARII DE CREȘTERE A MASELOR DE GĂURI NEGRE²⁵

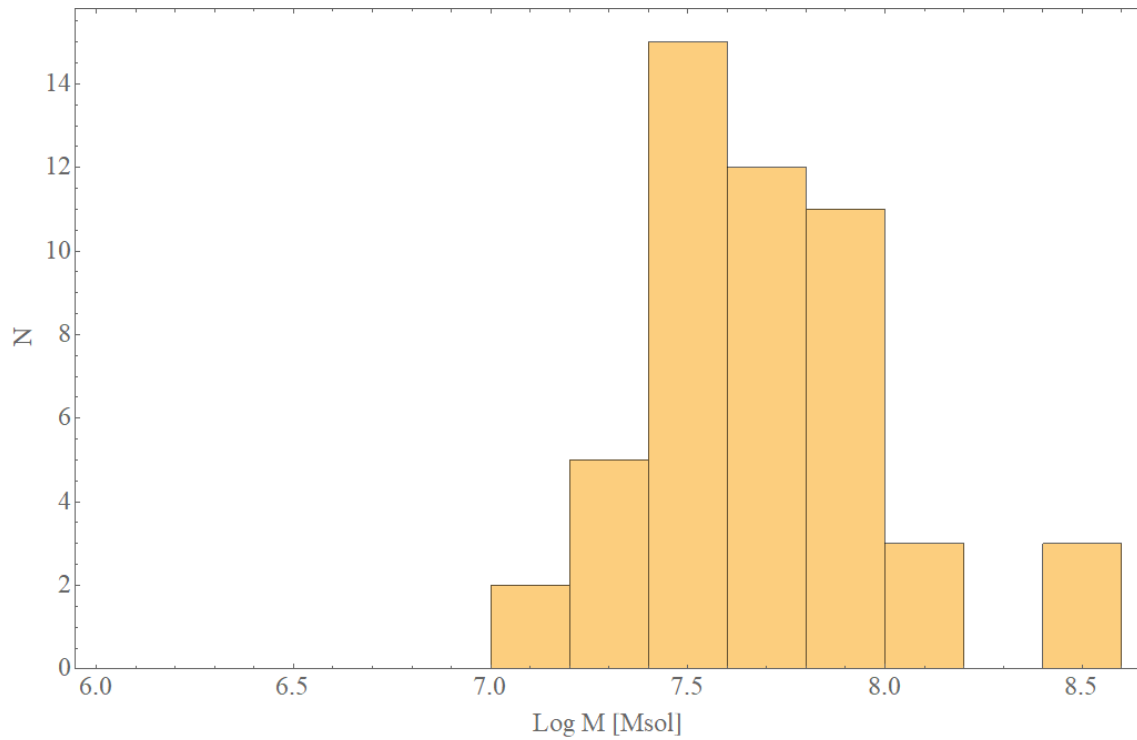


Figura 3.9: Distribuții de mase de găuri negre rezultate din concentrația de 650 de găuri negre/ kpc^3 .

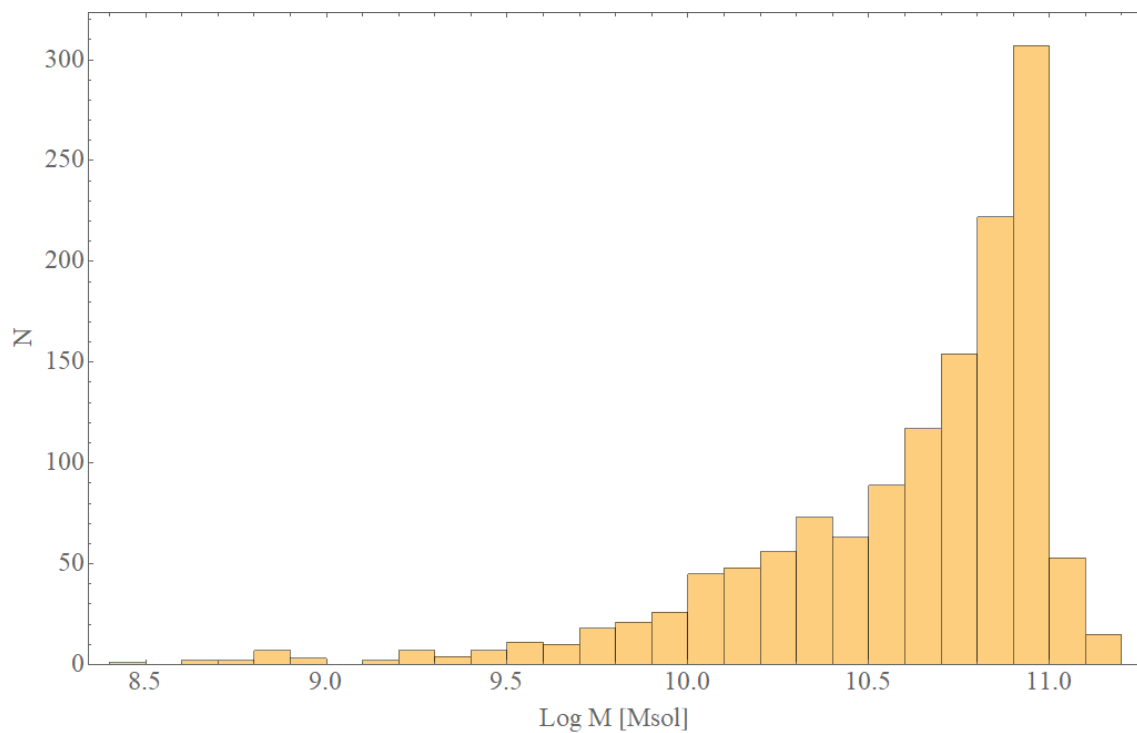


Figura 3.10: Distribuții de mase de găuri negre rezultate din concentrația de 1800 de găuri negre/ kpc^3 .

a reieșit din lipsa de coalescențe. Adăugând și mai multe găuri negre nu a fost o soluție, în urma limitărilor tehnice menționate și discutate anterior.

Concluzia acestor investigații a fost că, pentru moment, doar scenariile HS se încadrează la informațiile deduse din observații. O ultimă încercare a fost legată de modificarea distribuției inițiale de găuri negre. Și acest pas final a condus la încercări a unui nou tip de scenariu, unul pe care l-am numit *hibrid*.

3.3.3 Scenarii de tip hibrid

Deși majoritatea studiilor din literatura de specialitate includ ori LS, ori HS, am decis să luăm în considerare și o situație *hibridă*. În acest caz, semințele variază de la $10^2 M_{\odot}$ la $10^5 M_{\odot}$, iar masele sunt distribuite după o funcție Salpeter (Salpeter, 1955; Timmes et al., 1996; Kroupa and Jerabkova, 2019). De asemenea, un argument solid a fost că, având un scenariu hibrid, masele găurilor negre mici ar fi avut șansa de a crește în timpul acordat (așa cum nu au reușit în scenariile LS).

Un rezultat clar a fost faptul că simulările au condus la valori mai mari de mase pentru distribuțiile finale, comparativ cu scenariile din secțiunea 3.3.2. Totuși, acestea erau încă mai mici de $10^8 M_{\odot}$. Am încercat o varietate de alte condiții inițiale. Începând cu deja clasicul cub de $1 \times 10^{-6} \text{ kpc}^3$, am folosit un interval foarte larg de valori pentru semințe, cât și pentru particulele de gaz; de la instanțe cu un număr relativ mare de găuri negre așezate pe o distribuție cu puține particule de gaz (și viceversa), la cantități egale pentru ambele tipuri de particule și, apoi, repetând aceste corelații găuri negre-gaz pentru alte distribuții inițiale. Odată cu diversificarea acestor contexte de început, cea mai mare masă atinsă a fost de aproximativ $10^8 M_{\odot}$, dar cu o concentrație de $\sim 10^{-8}$ găuri negre/ kpc^3 . După care, volumul de început a fost minimizat cu trei ordine de mărime (am scăzut latura cubului de la 10 pc la 1 pc). Masa maximă obținută a fost de ordinul $\sim 10^6 - 10^7 M_{\odot}$. Am observat și o ușoară creștere în concentrație ($\sim 10^{-8}$ găuri negre/ kpc^3), pentru valori specifice și combinații ale parametrilor utilizați, însă nu destul pentru validarea scenariilor.

3.4 Mecanismul de absorbție a unei stele de către o gaură neagră

Viitoarele observatoare de unde gravitaționale, inclusiv Misiunea Spațială LISA a Agenției Spațiale Europene, vor putea studia în detaliu procesele de coalescențe ale găurilor negre și vor putea ajuta la o mai bună înțelegere a evoluției maselor de găuri negre. Până în acest moment am descris modul de operare pentru simulările finalizate cu scopul de a studia creșterea acestor corpuri prin cele două procese bine stabilite în literatura științifică (acumularea de materie și coalescența). Aceste investigații reprezintă punctul de referință pentru introducerea unei a treia metode exotice, *star gulping* (trad. „înghițire de stele”). Procesul de star gulping (SG) a fost descris conceptual încă de la sfârșitul anilor 80 (Hills, 1975) și prezintă o situație particulară în care stelele sunt absorbite în întregime de gaura neagră, fără a trece prin etapa de acreție (Rees, 1988).

Așa cum am menționat anterior, paradigma curentă plasează acreția și coalescența ca principalele căi de mărire a maselor găurilor negre. Ambele joacă roluri esențiale pentru încercările de modelare a proceselor de creștere a celor mai masive găuri negre de la origine până în prezent. Chiar și studiile extensive descrise în capitolele precedente, ce

presupunneau condiții duse la extrem de multe ori, arată că este dificil de a ridica valorile maselor găurilor negre la unele comparabile cu cele extrase din măsurătorile contemporane. Din cele trei seturi de scenarii (*heavy*, *light* și *hibrid*, doar cele *heavy* au putut fi validate momentan). Prin urmare, am conceput simulări detaliate, incluzând metoda SG, cu potențialul de a adăuga mai multă masă găurilor negre.

Această absorbție de stele presupune un cadru în care gaura neagră este destul de masivă încât să genereze un orizont al evenimentelor a cărui rază Schwarzschild (R_S) asociată să fie egală cu cea care delimitează forța mareică (eng. *tidal force*) a aceluiași corp. Volumul sferic de influență a forței mareice este conturat de raza mareică (eng. *tidal radius* - R_T). Dacă aceste două raze, R_S și R_T ajung să fie de aceeași valoare, atunci nu mai putem vorbi de disponibilitatea unui spațiu pentru acreția ce ar fi avut loc în urma forțelor mareice. Acest fapt este de luat în considerare, deoarece, în condiții de acreție, steaua nu este complet consumată de gaura neagră și o parte din materialul stelar devine pierdut drept consecință a efectelor radiative (eng. *radiative feedback*) și momentului cinetic (Rees, 1988). Dacă, în schimb, acreția este neglijată, steaua (sau orice corp fizic echivalent) este, cu alte cuvinte, „înghițită” de către gaura neagră.

3.4.1 Distrugerea mareică

Evenimentele de Distrugere Mareică (TDEs - eng. *Tidal Disruption Events*) sunt, în general, fenomene astrofizice care au atras des atenția comunității științifice. TDE-urile au loc atunci când o stea se află mult sub limita Roche asociată cu gaura neagră masivă centrală. Ele fac parte din rezultatele studiilor de găuri negre masive situate în centrele galaxiilor (Hills, 1975; Lidskii and Ozernoi, 1979; Gezari, 2021).

În funcție de orbita stelei și de mărimea razei mareice R_T (relativă la cea Schwarzschild), există posibilitatea ca steaua să se apropie destul de mult cât să fie distrusă sau chiar absorbită cu totul (Rees, 1988; Hills, 1975). R_T nu este altceva decât distanța minimă dintre gaură neagră și stea unde începe perturbarea obiectului luminos din traiectoria sa (Figura 3.11).

3.4.2 Condiții de producere a fenomenului de absorbție stelară

Așa cum este ilustrat și în Figura 3.11, un eveniment TDE necesită ca o stea să se apropie de gaura neagră și, de asemenea, ca forța mareică să domine propria forță gravitațională a stelei:

$$\frac{GM_{BH}R_{star}}{r^3} > G\frac{M_{star}}{R_{star}^2}, \quad (3.1)$$

unde r este distanța dintre pericentrul stelei față de gaura neagră masivă.

O stea este distrusă mareic dacă $r < R_T$. Pornind de la ecuația 3.1, putem defini raza mareică, R_T :

$$R_T = R_{star} \left(\eta^2 \frac{M_{BH}}{M_{star}} \right)^{1/3}, \quad (3.2)$$

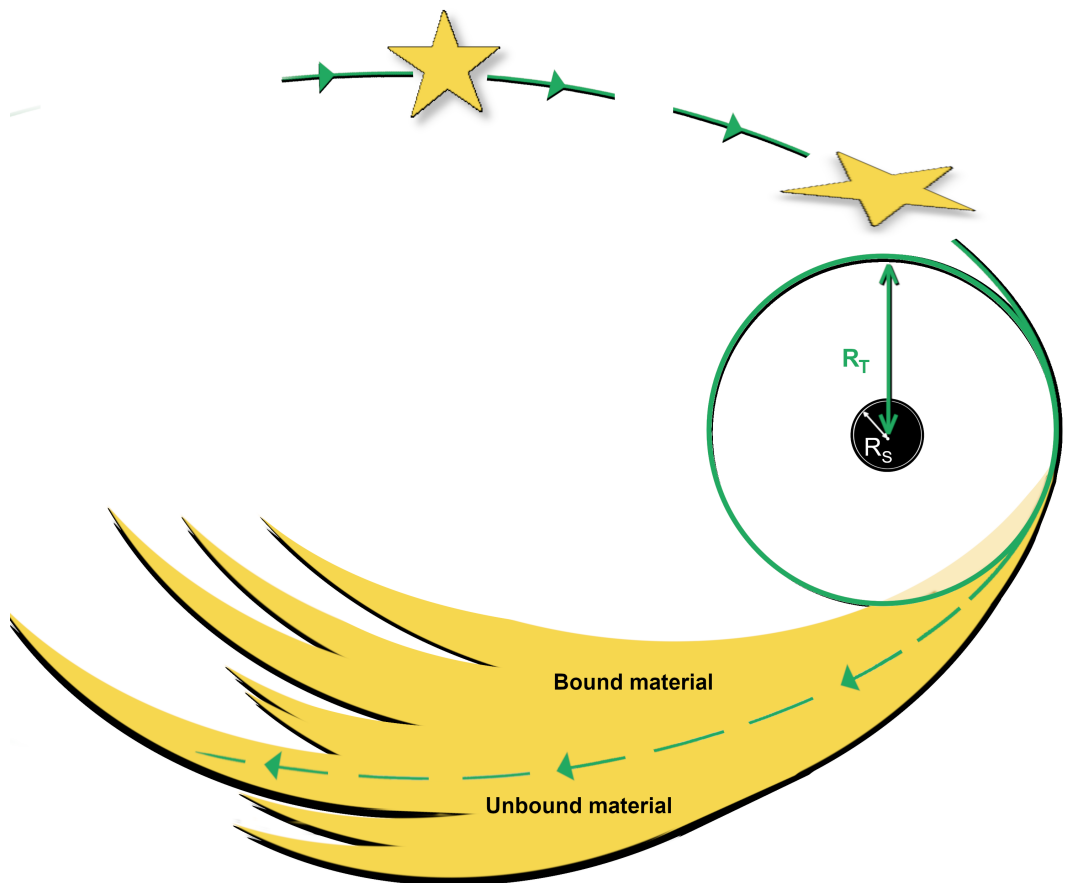


Figura 3.11: *Eveniment de distrugere mareică a unei stele.*

unde $\eta \cong 1$, cu dependențe în funcție de tipul de stea neglijabile (Phinney, 1989; Evans and Kochanek, 1989).

De asemenea, o stea poate fi capturată direct de către gaura neagră masivă în condițiile în care $r < R_S$ (pentru o gaură neagră non-rotativă). Considerând că R_T crește proporțional cu $M_{BH}^{1/3}$, este destul de clar că există situații care surprind o egalitate între R_S , care depinde doar de gaura neagră masivă, și R_T . Acestea fiind menționate, o stea este absorbită mai repede decât atunci când un proces de acreție ar fi implicat. Pe lângă toate acestea, nu există pierdere de masă.

Cu toți acești factori implicați, dacă dorim să ne referim la un eveniment TDE, putem să aproximăm că steaua trebuie să treacă printr-o zonă aflată la o distanță R_T de maxim:

$$R_T = R_{star} \left(\frac{M_{BH}}{M_{star}} \right)^{1/3}, \quad (3.3)$$

unde R_T , pentru o stea egală cu o masă solară și aflată în comparație cu influența dată de **găura neagră**, poate fi definită în funcție de R_S .

Reamintim că R_S este definită ca:

$$R_S = \frac{2GM_{BH}}{c^2}, \quad (3.4)$$

3.4. MECANISMUL DE ABSORBȚIE A UNEI STELE DE CĂTRE O GAURĂ NEAGRĂ 29

cu

- $G = 6.6743 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$,
- $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

Dacă asociem cele două distanțe (R_T și R_S) într-o ecuație, atunci putem calcula masa minimă de gaură neagră (M_{BHmin}) pentru care steaua poate fi capturată direct:

$$\begin{aligned} M_{BHmin} &\cong \frac{c^3}{M_{star}^{1/2}} \left(\frac{R_{star}}{2G} \right)^{3/2} \\ &\cong 10^8 M_{\odot} \left(\frac{M_{star}}{M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{R_{star}}{R_{\odot}} \right)^{3/2}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Figura 3.12 sugerează că, pentru o gaură neagră de $\sim 10^8 M_{\odot}$ (de multe ori numită și *masa Hills*) și un R_T a unei stele de o masă solară, este practic imposibil de a observa efectele unei distrugerii de stele, având în vedere că procesul de absorbție nu are loc în afara orizontului de evenimente al găurii negre, nefiind disponibil spațiu pentru acreție (Hills, 1975; Kesden, 2012).

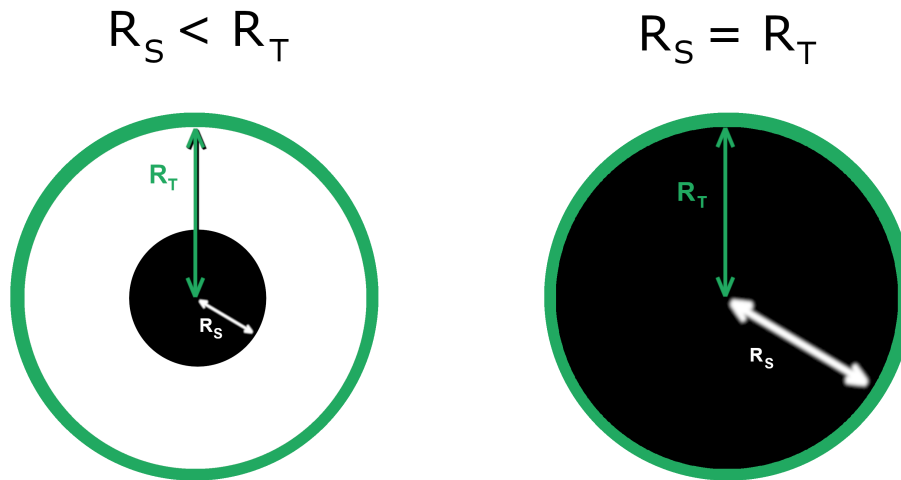


Figura 3.12: *Orizontul evenimentelor pentru două mase diferite de găuri negre (stânga - $10^6 M_{\odot}$, unde Raza Schwarzschild este mai mică decât Raza mareică; dreapta - $10^8 M_{\odot}$, unde Raza Schwarzschild este egală cu Raza mareică.)*

3.4.3 Cadru de simulare

Simulările au fost rulate pornind de la un set de distribuție stelară conturat după o funcție Plummer într-un roi stelar (SC - eng. *Star Cluster*). Prin incluziunea unei găuri negre

în simulare roiului de stele, numărul de stele scade dramatic, iar rata de creștere a găurii negre centrale devine o caracterizare directă a modului în care roiul de stele este afectat de potențialul gravitațional nou introdus.

Acest mecanism exotic de creștere poate afecta nu numai valorile de coalescențe ale găurilor negre, ci și istoricul evoluției a găurilor negre în sine, deci reprezintă un motiv semnificativ pentru studiu în detaliu.

Continuând de la cadrul de simulare stabilit în Secțiunea 3.3, am inițializat un roi global de 216 000 de stele (fiecare având o masă solară), într-un volum comparabil cu cel din simulările anterioare (Figurile 3.13. Am dorit investigarea ratei cu care stelele sunt absorbite la apropierea de gaura neagră.

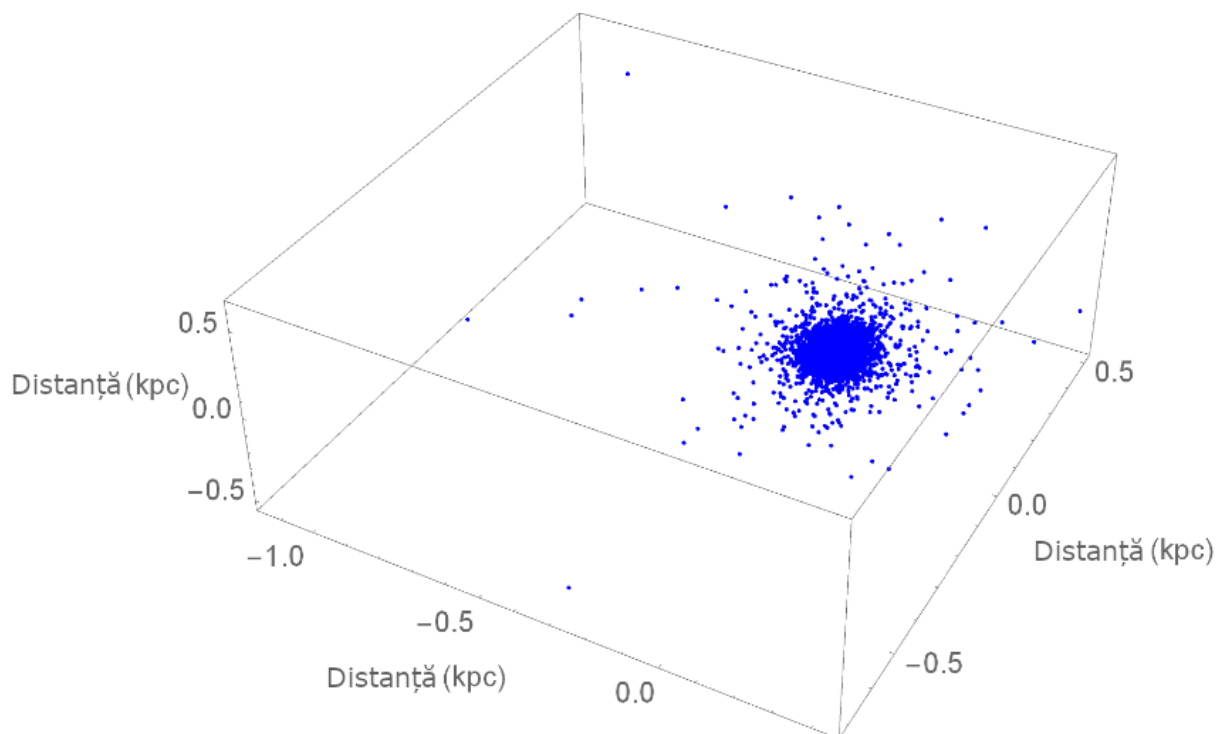


Figura 3.13: Secvența cu volumul inițial (216 000 de stele - albastru).

În consecință, figura 3.14 ilustrează scenariul în care au trecut aproximativ 13 Gyrs și cum au fost distribuite apoi stelele după acest interval de timp. Această situație prezintă o fază de echilibrare unde un procentaj mare (99%) din stele au fost absorbite. Un comportament de acest gen este de așteptat atunci când luăm în considerare studiile de coliziuni rapide, sau *runaway collisions* (Kesden, 2012). Acest lucru a oferit posibilitatea de a investiga în ce mod se comportă sistemul (după acest pas de tranziție) și de a calcula rate de SG imediat următoare acestui moment.

Comportamentul ratei a fost fitată cu o funcție de tipul $a + b \cdot x + c \cdot \log_{10}x$ (precum reiese și din figura 3.15). Parametrii de fit sunt $a \rightarrow 213962$, $b \rightarrow -2.54 \cdot 10^{-7}$, respectiv $c \rightarrow 133.0$. În plus, rezultatul este promițător (se află în acord cu rezultate anterioare - Figurile 3 și 4 din Kesden 2012) și devine un argument legat de studii în profunzime, mai ales pentru că reprezintă un caz extrem de interesant al candidatelor EMRI din Misiunea LISA. EMRI-urile sunt definite ca sisteme binare cu o diferență relativ mare între valorile

3.4. MECANISMUL DE ABSORBȚIE A UNEI STELE DE CĂTRE O GAURĂ NEAGRĂ³¹

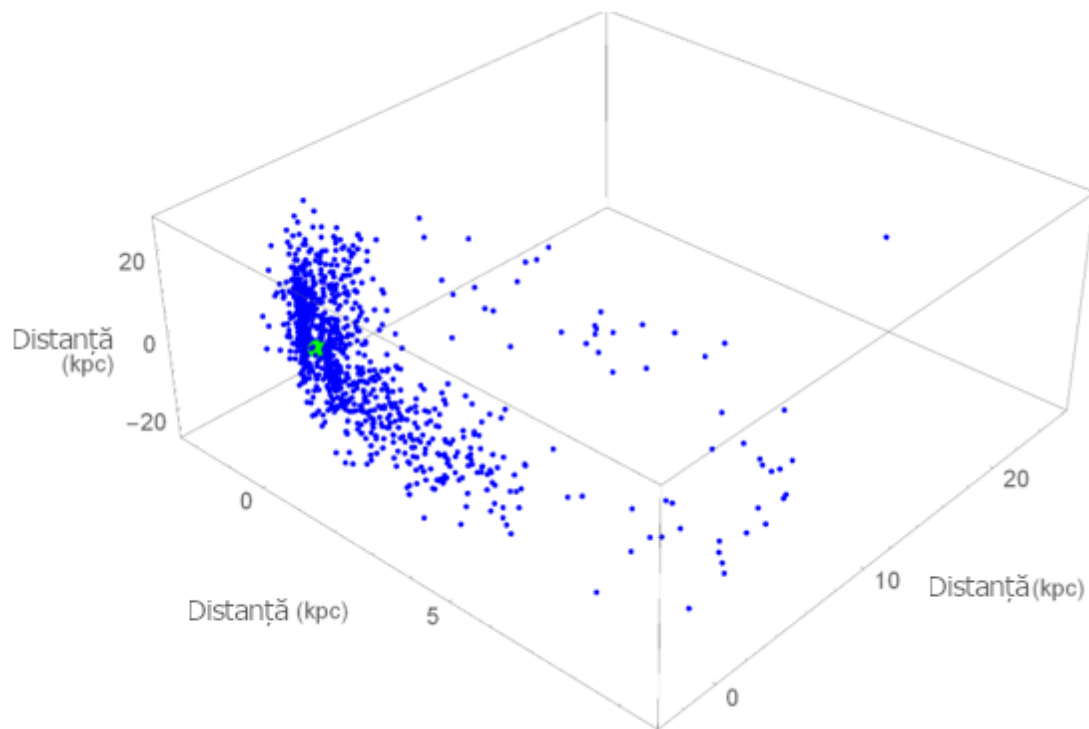


Figura 3.14: *Secvența cu volumul final (~ 1000 de stele - albastru - cu gaură neagră - verde).*

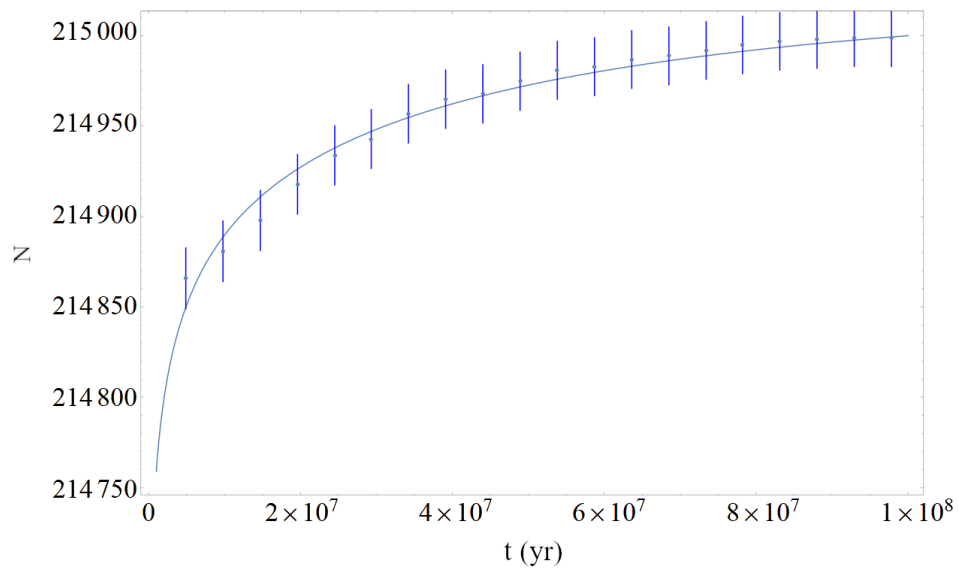


Figura 3.15: *Rata de absorbție a stelelor (rata de SG).*

de masă ale componentelor, care pot genera unde gravitaționale, adică un alt tip de surse pentru LISA.

Rezultate

4.1 Rate de coalescență și evoluția maselor de găuri negre

Precum a fost descris în detaliu în subcapitolul 3.3, scenariile LS și hibrid nu au reușit să îndeplinească cerințele necesare și, prin urmare, nu au fost obținute concentrații valide. Chiar și ridicând numărul de găuri negre inițiale la 8×10^5 , prea puține dintre ele au crescut la masele dorite, cea mai mare fiind de ordinul $\sim 10^7 M_{\odot}$, cu concentrații situate semnificativ sub limita inferioară a intervalului 350 – 2200 găuri negre/kpc³. Orice altă incrementare a numărului de semințe a fost incompatibilă cu capacitatea de calcul a pachetului de simulare. Problema nu a putut fi rezolvată prin nicio metodă de micșorare a volumului inițial disponibil pentru distribuția de masă generată, astfel încât să scalăm eventualele rezultate.

În consecință, pentru scopul acestui studiu, doar rezultatele obținute folosind scenariul HS au fost considerate. Începând de la distribuția inițială de tip gaussian pentru mase (reprezentată în Figura 4.1), se observă producerea a unui număr redus de găuri negre. Distribuția lor este bimodală, căci este o situație în care, în mod explicit, se disting două populații de mase formate în repetatele procese de coalescență (Figura 4.2). În intervalul $6.4 < \log M < 7.5$ nu există niciun eveniment, din aceleași motive de grupare după unificări.

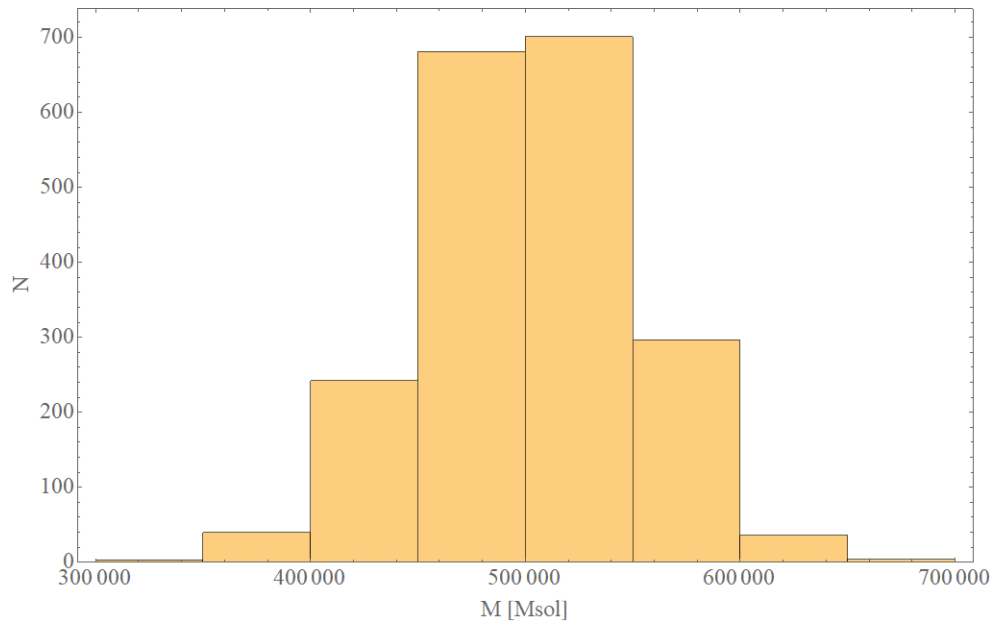


Figura 4.1: *Histogramă a distribuției inițiale de găuri negre.*

Acest comportament este în mod elocvent diferit de rezultatele preconizate, având în vedere că, printr-un simplu proces aleatoriu de coalescență, ne-am aștepta să fie păstrat comportamentul gaussian al distribuției inițiale. În același timp, rezultatele se află în acord cu funcția de masă observată (Caramete and Biermann, 2010) și distribuția de masă a două populații.

În ceea ce privește raportul de masă q al găurilor negre implicate în procesele de coalescență, rezultatele obținute de mine indică faptul că evoluează într-o manieră care este foarte dependentă de evoluția distribuției de masă totală, cu valori între 1 și mai mult de 100. Totodată, se observă o tendință de creștere a raportului pe măsură ce decalajul dintre cele două populații se mărește.

Figura 4.3 ilustrează valorile q surprinse în mai multe cadre de timp ale unui tip de simulare selectat. Tipul de simulare era unul din cele care presupun un proces de coalescență în care găurile negre se unifică două câte două.

Pentru observațiile de unde gravitaționale, coalescențele de sisteme binare de găuri negre vor reprezenta unul din cele mai importante tipuri de surse pentru extragerea datelor. Din acest motiv, este de dorit să fie estimate ratele de coalescențe nu doar într-un anumit moment de timp, ci să fie estimată evoluția ratelor odată cu evoluția maselor găurilor negre. În această etapă reușim să furnizăm estimări și interpretări ale sus-menționatei simulări pentru aceste predicții.

Calculul ratei de coalescență presupune, în primul rând, determinarea numărului de coalescențe și, în urma faptului că programul de simulare oferă opțiunea de înregistrare a secvențelor, dar nu și a identificatorilor asociați cu particulele care se unesc, vom presupune că unirea au loc doar două câte două între găuri negre. Cu alte cuvinte, procesul de unificare este, în sine, unul de interacții între două corpuri.

Din multitudinea de scenarii prezentate până acum în subcapitolul 3.3, am ales unul pentru care am analizat rezultatele a 4 cadre (sau secvențe) reprezentative din simulare.

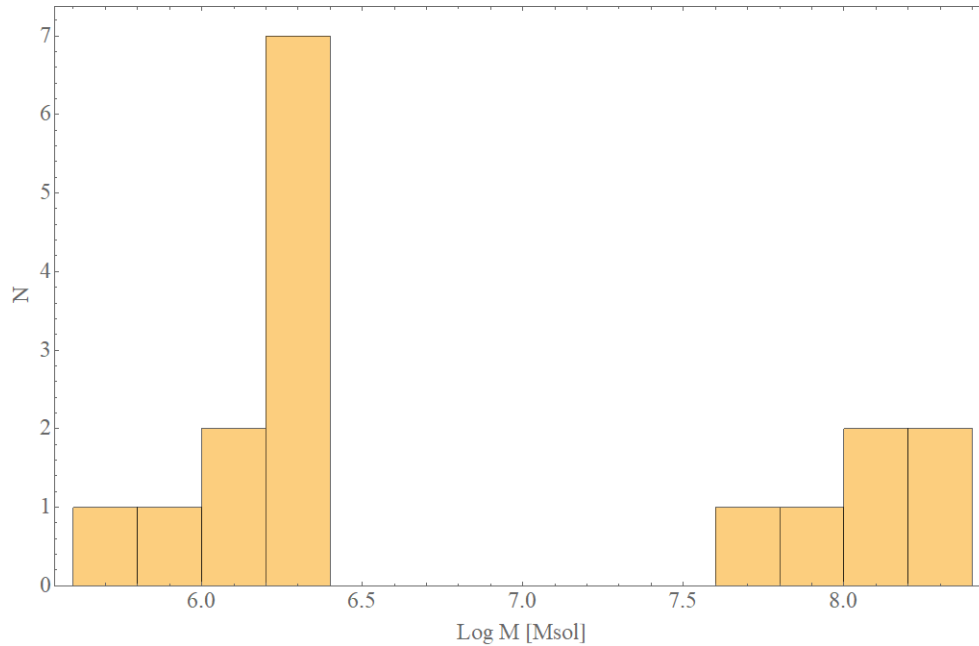


Figura 4.2: *Histogramă a distribuției finale de găuri negre.*

Cazul selectat este cel în care am pornit cu 2004 de găuri negre (Figura ??), am obținut, apoi, un număr de 125 de găuri negre în a doua secvență (adică secvența după trecerea primului pas de timp), urmate de 17 găuri negre în cea de-a treia secvență și, în final, ajungând la 9 găuri negre. Un simplu model de selecții a găurilor negre două câte două conduce la rezultate acceptabile și poate aproxima un proces de coalescență.

Rapoartele de coalescență sunt în foarte bun acord cu estimări anterioare (Portegies Zwart et al., 1999), care se situează undeva la 1.6×10^{-7} per an per Mpc^3 , ceea ce ne oferă ocazia de a estima evoluția acestui comportament al rapoartelor, în timp, pentru cadrul simulat, unde putem potrivi graficul cu o lege de putere de înclinație mare, cu un exponent de 2.69 (Figura 4.6). Observăm o descreștere abruptă a ratelor de coalescență în decursul a câteva milioane de ani. De menționat este că valorile de timp folosite pentru calculul $\text{Log}(N/\text{yr} \times \text{Mpc}^3)$ sunt diferite de cele folosite pentru abscisă ($\text{Log } t$). Primul caz face referire la durata efectivă a fiecărei secvențe temporale înregistrate de program în parte (9.8×10^6 ani, 9.8×10^6 ani și, respectiv, 49×10^6 ani), durate ce corespund celor trei secvențe de evoluție discutate mai sus. În al doilea caz facem uz de timpul măsurat de la punctul de început al simulării, ceea ce ar însemna că cele trei secvențe se termină în reperele temporale de 9.8×10^6 ani, 19.6×10^6 ani și, respectiv, 68.6×10^6 ani.

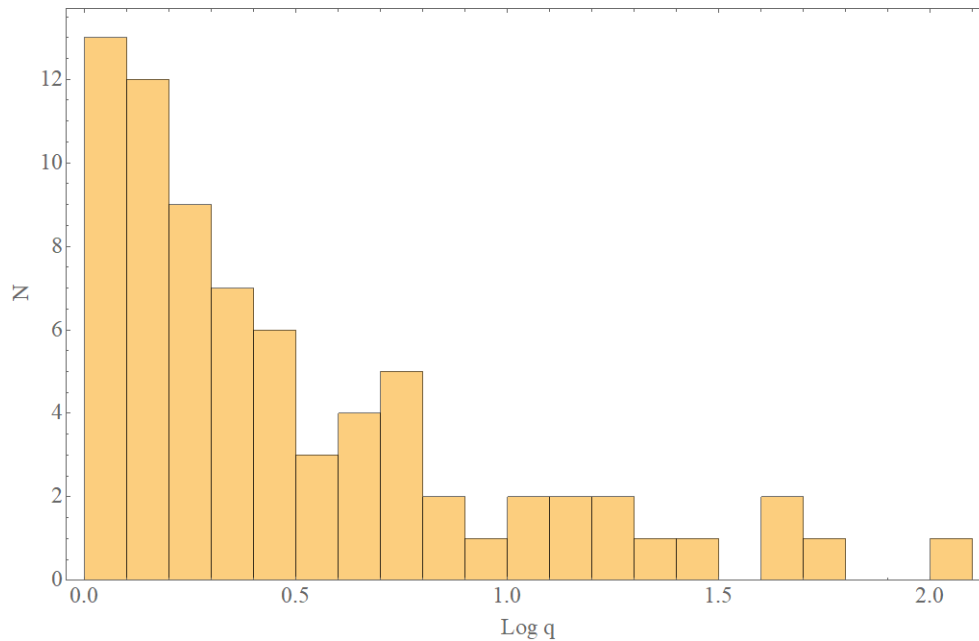


Figura 4.3: Raporturi de masă simulate pe baza distribuțiilor de mase de găuri negre în diferite momente (snapshots) ale simulării.

Pe baza modelului nostru, anticipăm valori de detecție undeva la câteva zeci până la puțin peste o mie an^{-1} . Acestea sunt considerate limite din cauza incertitudinilor legate de momentul exact în timp în care se formează prima populație de găuri negre, natura procesului fizic care le-a format și funcția de masă asociată cu prima populație de găuri negre. Rezultatele sunt similare cu aproximările precedente (Sesana et al., 2004, 2005; Rhook and Wyithe, 2005; Arun et al., 2009; Sesana et al., 2011; Klein et al., 2016; Berti et al., 2016; Bonetti et al., 2019; Barausse et al., 2020; Sesana, 2021), în funcție de raportul semnal-zgomot și limitele de masă considerate.

Pe măsură ce sistemul evoluează, evenimente externe (cum ar fi intrarea a noi găuri negre în mediul de simulare) ar putea micșora exponentul legii de putere, dar ar fi păstrat în limita impusă de erori. Evident, aceste estimări sunt extrem de folositoare, în mod special pentru viitoare experimente de unde gravitaționale, în sensul că pot oferi o predicție legată de numărul de evenimente pe an pe care le-ar putea detecta observatoarele, ceea ce, la rândul ei, poate ajuta la o proiectare sau optimizare a sistemelor de achiziție și procesare.

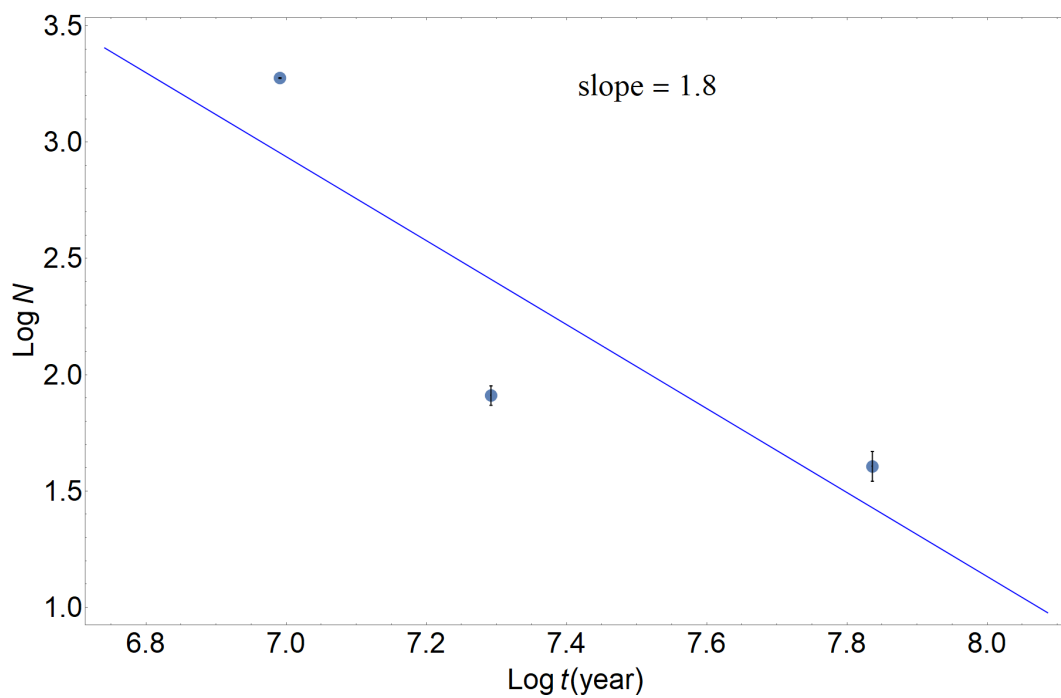


Figura 4.4: Rapoarte de coalescență în funcție de timp.

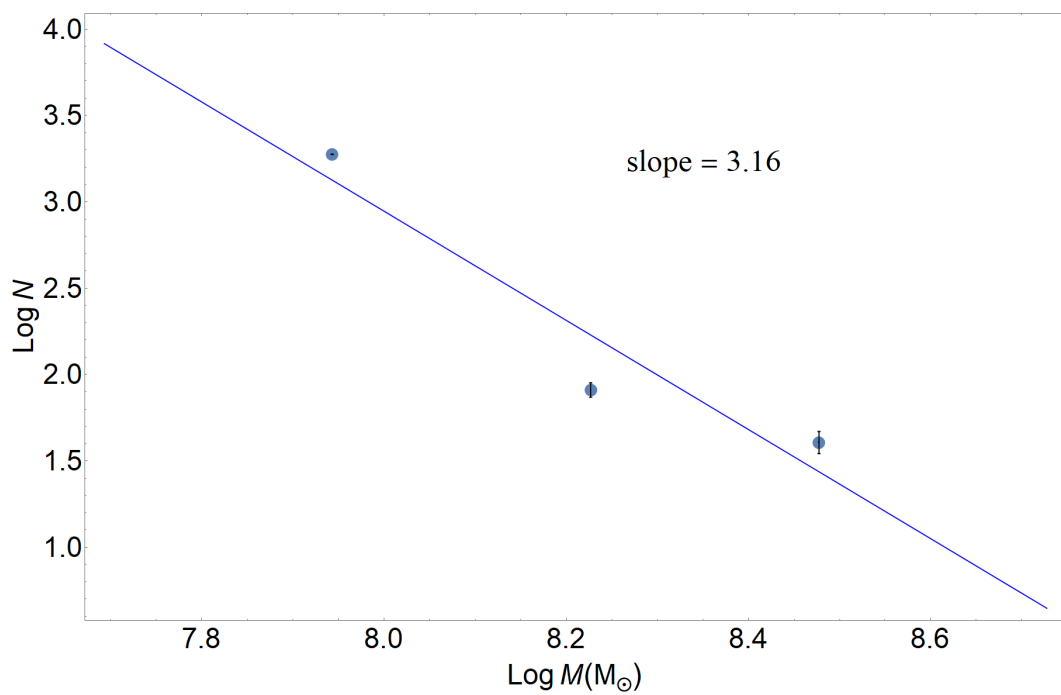


Figura 4.5: Rapoarte de coalescență în funcție de masă.

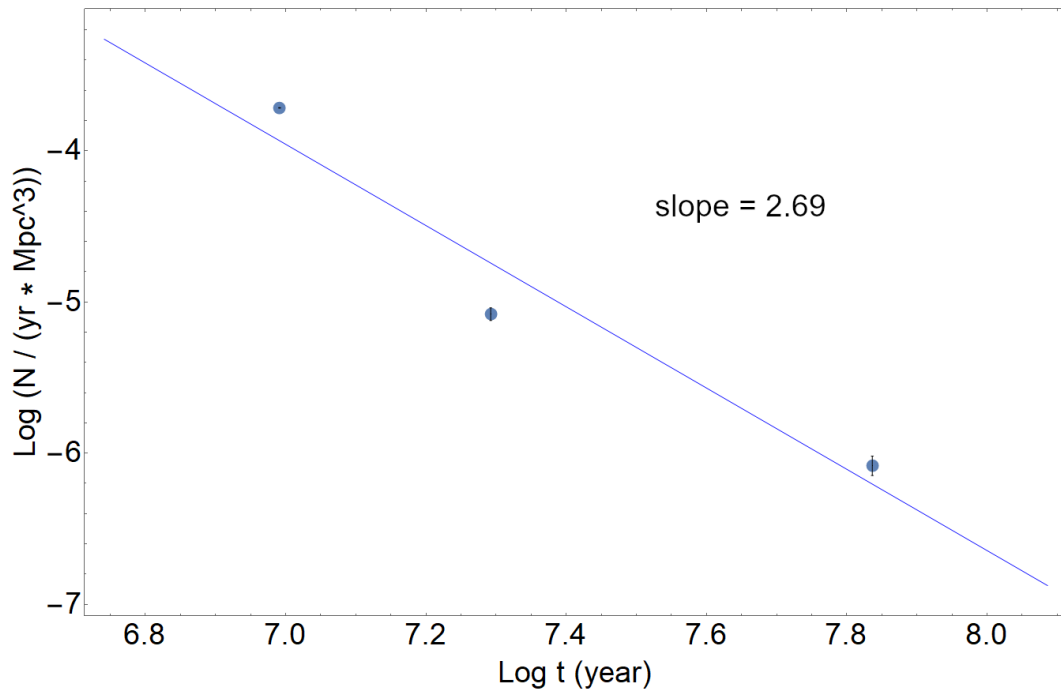


Figura 4.6: Rapoarte de coalescență în funcție de an per Mega-parsec cub.

4.2 Extinderea volumului de simulare

Ca o metodă de verificare, am conceput un scenariu prin care am mărit volumul inițial de simulare, pentru a oferi șanse cubului central să interacționeze cu particule din exterior. Un alt motiv este că, evident, cu cât este mărit volumul inițial, cu atât scad erorile legate de metoda de scalare.

Am vrut să verificăm concentrația finală, în cazul în care porneam de la mai multe cuburi și urmăream sistemul 13 Gyrs. De asemenea, am păstrat aceeași funcție de masă care genera particulele de gaz și de găuri negre, ceea ce a însemnat, pe scurt, că în loc de 4000 de găuri negre inițiale, cu mase de $10^5 M_{\odot}$, am început evoluția sistemului de la un număr de 27×4000 , adică 108000.

În locul unui singur cub, acum am lucrat cu un număr de 27 (Figura ??), care să înconjoare cubul inițial de 10 pc (deci, am adăugat unul pentru fiecare latură și muchie disponibile).

Procesul de analiză a fost identic, cu excepția faptului că, în loc să scalăm rezultatul (concentrația finală obținută) de la un volum de 10^{-6} kpc^3 (latura de 10 pc) la unul final de $1 \times \text{kpc}^3$, am calculat pentru un cub inițial de $9 \times 10^{-6} \text{ kpc}^3$ (latura de 30 pc).

De data aceasta am finalizat 20 de simulări, în loc de 100, pentru a observa calitativ concentrațiile finale. Media lor a fost de 2 372 găuri negre/ kpc^3 . Așadar, valoare medie de concentrație este puțin peste maximumul de 2 200, ceea ce furnizează un suport pentru rezultatele obținute până acum.

4.3 Studii adiționale pentru populațiile de găuri negre

4.3.1 Găuri negre de tip Kerr

Rotația este o caracteristică a materiei, în general, de la cele mai mici forme ale ei (atomi și particule subatomice) până la obiecte astrofizice la scară mare (galaxiile, de exemplu). Găurile negre care se rotesc au primit denumirea de găuri negre de tip Kerr și reprezintă una din soluțiile ecuațiilor lui Einstein. Cu alte cuvinte, mărimea fizică relevantă găurilor negre de tip Kerr este spinul.

Din metrica Kerr putem extrage un parametru \bar{a} , care poate lua valori între 0 și 1, valoarea 0 fiind asociată cu o gaură neagră staționară (de tip Schwarzschild), iar 1 se referă la una maxim rotațională (de tip Kerr extrem).

În simulările de star gulping, am obținut variații ale valorilor parametrului Kerr în limitele acestui interval:

$$5.68 \times 10^{-7} < \bar{a} < 0.4$$

cea ce se încadrează foarte bine cu limitele impuse de teorie.

Odată ce mărim numărul de găuri negre (simulările de HS), în același proces de 13 miliarde de ani, observăm că rezultatele preliminare nu sunt încurajatoare. Există o indicație a creșterii spinului de trei ordine de mărime, însă valorile sunt extrem de mici ($10^{-7} - 10^{-5}$). Un motiv ar fi legat de nevoia de a adăuga complexitate și diversitate cadrelor de simulare (formare de stele, de exemplu).

Este important de continuat acest studiu, căci ipoteza cu nivelul cel mai mare de încredere pentru explicarea modificării spinului unei găuri negre este chiar coalescența de galaxii, prin unificarea găurilor negre centrale (Liu, 2004).

Aceste situații de coalescențe explică modificarea de spin comparând axa de rotație a produsului fuziunii în raport cu direcțiile de rotire ale componentelor inițiale. Acest fenomen este întâlnit și sub numele de *spin-flip*. Spin-flipul ca proces nu necesită interacțiuni neliniare, el este o consecință directă a dobândirii din partea găurii negre finale a cea mai mare parte a momentului unghiular total atribuit sistemului binar inițial.

Dacă cele două găuri negre joacă și rolul de surse energetice ale unor nuclee galactice active, sunt șanse mari de generare a jeturilor de particule. Jeturile sunt lansate perpendicular cu discul de acreție, deci paralel cu direcțiile de spin pe care le au găurile negre. Acestea fiind spuse, modificările de spin pot fi observate în modificările jeturilor. Un număr semnificativ de galaxii prezintă modificări de direcții ale expulziei de jeturi, atât minore cât și cu salturi relativ mari (de ordinul kiloparsecilor).

Caz particular - modificare a spinului ca funcție de rapoarte de masă

Există studii de modificare de spin ale găurilor negre supermasive în funcție de diferiți parametri. Un caz interesant și compatibil cu simulările din această lucrare este acela din Gergely and Biermann (2009); Gergely et al. (2010), în care este urmărit comportamentul spinului în funcție de rapoartele de masă ale găurilor negre:

- $1/1000 < q < 1/30 \Rightarrow 40\%$ (nu are loc modificarea spinului)

- $1/30 < q < 1/3 \Rightarrow 40\%$ (șansă mare de modificare a spinului)
- $1/3 < q < 1 \Rightarrow 20\%$ (șansă mare de modificare a spinului în etapa ultimelor orbite - eng. *plunge*)

unde q reprezintă raportul de masă dintre cele două găuri negre.

În urma analizei asupra propriei populații de găuri negre (cea care pornea de la un număr de 4000), rezultatele din simulări pentru categoria de masă cu șansă mare de modificare a spinului sunt următoarele:

- $1/1000 < q < 1/30 \Rightarrow 40\%$ (nu are loc modificarea spinului)
- $1/30 < q < 1/3 \Rightarrow \text{40\%}$ (șansă mare de modificare a spinului) $\Rightarrow \text{36\%}$
- $1/3 < q < 1 \Rightarrow 20\%$ (șansă mare de modificare a spinului în etapa de plunge)

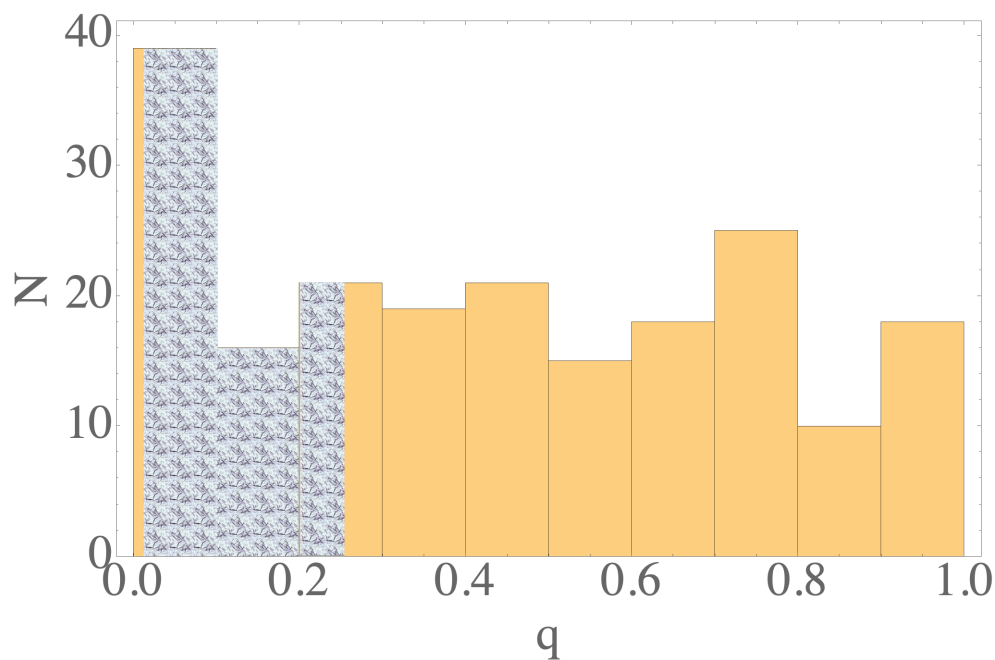


Figura 4.7: Rapoarte de masă asociate cu procesele de coalescență. Zona hașurată este cea cu probabilitatea cea mai mare de modificare de spin.

Am verificat intervalul de rapoarte cu șansă mare de modificare de spin, pentru că acesta este unul din scopurile tezei (de a studia corelații între obiectul central și galaxia gazdă). Intervalul este indicat în zona de hașură a graficului din Figura 4.7. De aceea, rezultatele mele ar trebui să fie considerate ca fiind potrivite pentru un proces de optimizare (calcul pe un număr mai mare de simulări) și de extindere. Scopul este de a putea confirma sau nu dacă probabilitățile se apropie de cele asociate cu celelalte rapoarte de masă.

Viitoare observatoare de unde gravitaționale plasate în spațiu vor măsura masele și spinurile găurilor negre masive, până la deplasări spre roșu foarte mari. Astfel că, un semnal de unde gravitaționale rezultă în multe eforturi de calcul și observație ce pot duce la detecții în fereastra de lungimi de unde electromagnetice, deci devine un candidat perfect pentru Astronomia multimesager.

Concluzii

Reluăm, pe scurt, obiectivele, modul în care au fost abordate și ce studii ar putea genera drept consecințe.

În prima parte a tezei, am construit o relație de scalare, bazată pe date din domeniul de lungimi de undă al infraroșului (2 micrometri). Folosind noua metodă de scalare, am construit pentru o populație de 8 594 de găuri negre (filtrată de la 55 000), astfel concretizând și forma catalogului.

Noul catalog se situează la o mărime aproximativ de trei ori mai mare decât cea a precedentului, fiind extins la intervalele lui inițiale. Așadar, și funcția de masă arată un nou indice de putere la mase mai mici. Pe baza modelelor de creștere a găurilor negre, a fost continuată investigarea distribuției de masă a populației inițiale (din universul timpuriu) și, apoi, au fost calculate rapoartele de masă.

Trecând la următoarea parte a studiului, am simulat populații de găuri negre masive, folosind pachetul de coduri GIZMO, atât pentru cazurile de test, cât și pentru evoluție legată de creșterea lor. Am început de la un Univers primordial și am lăsat sistemul să se dezvolte și să se extindă, luând în considerare interacții gravitaționale și procese de coalescență, pe o durată de 13 Gyrs. Am aplicat, apoi, o procedură iterativă pentru a genera concentrația de găuri negre pentru masele finale $\geq 10^7 M_\odot$, încercând să plasăm rezultatele în intervalul sugerat de observații: 350 – 2200 de găuri negre/kpc³. De menționat că acest interval observațional este legat direct de găurile negre cu mase de $10^8 M_\odot$, însă am presupus că ele au crescut și prin acreție la limită Eddington în primul Gyrs. Această presupunere specifică compensează pentru breșa în ordine de mărime.

După acest proces iterativ al simulărilor numerice (necesare în urma procesului de evoluție neliniară al sistemului), am obținut două situații candidate, una cu 4000 de găuri negre inițiale și o a doua cu 17200. Ambele au rezultat în concentrații care se situează în intervalul dorit: scenariul cu 650 de găuri negre/kpc³ și cel cu 1800 de găuri negre/kpc³.

Am arătat că evoluția ratelor de coalescență, pentru ambele cazuri, modelate cu o funcție de putere, au evidențiat pante de 0.54 (pentru cazul 650 de găuri negre/kpc³) și, respectiv, 0.66 (pentru situația cu 1800 de găuri negre/kpc³). Am subliniat faptul că panta 0.54 este foarte aproape de valoarea ideală de 0.5, asociată cu evoluție de structuri la scală cosmologică. Am eliminat cel de-al doilea scenariu, pe considerentul că reprezintă un proces non-fizic, concluzie susținută și de distribuția de mase de găuri negre care includea valori mai mari sau egale cu $10^{11} M_\odot$, un rezultat ce nu este susținut de observațiile actuale.

În concluzia secțiunii 3.2, am reușit să găsim concentrația inițială preliminară de găuri negre care, la rândul ei, ar genera distribuția prezentă.

Apoi, am conceput o metodă de verificare prin mărirea volumului inițial de simulare. Am păstrat aceeași funcție de masă care genera particulele de gaz și de găuri negre. În locul unui cub, acum am lucrat cu un număr de 27 care să înconjoare cubul inițial de 10 pc (deci, unul pentru fiecare latură și muchie disponibile). Am aplicat același proces de analiză, de data aceasta pe 20 de simulări, în loc de 100, pentru a observa calitativ concentrațiile finale. Media lor a fost de 2 372 găuri negre/kpc³. Așadar, valoare medie de concentrație este puțin peste maximumul de 2 200, ceea ce furnizează un suport pentru rezultatele obținute până acum.

Următoarea parte, secțiunea 3.3, descrie în detaliu o varietate de simulări ale primei populații de găuri negre din Universul relativ timpuriu, cu scopul nu doar de a estima rapoartele de coalescență, cât și de a urmări evoluția sistemului. Rolul cadrului de simulare a fost îndeplinit de pachetul de coduri GIZMO pentru toate cele trei tipuri de scenarii, light, heavy și hibrid. După aceeași perioadă de 13 Gyrs pentru fiecare simulare în parte, am dedus că singurul scenariu care oferea rezultate compatibile cu datele extrase din observații a fost cel HS. Apoi am evaluat rapoartele de coalescență cu ajutorul unui model simplist de unificare în perechi de particule, ceea ce a arătat că există o foarte bună corelație între model și rezultatele simulărilor. Această informație a ajutat nu numai la calculul ratei de coalescență, ci și la studiul evoluției sistemului în timp. Evoluția a fost conectată la un comportament de funcție de putere cu un exponent de 2.69.

De asemenea, pe baza modelului expus, anticipăm valori ale evenimentelor posibile unde la câteva zeci până la puțin peste o mie an⁻¹. Rezultatele sunt similare cu aproximațiile precedente din literatură, în măsura în care este luat în considerare raportul semnal-zgomot și intervalul de mase studiat. Acest rezultat va fi folosit de colaborarea științifică LISA pentru a estima cu succes rata de coalescență a găurilor negre masive, dar poate fi și inclusă în analiza necesară proiectării și optimizării noilor experimente de unde gravitaționale.

Pe lângă toate acestea, am explorat și o metodă exotică de creștere a găurilor negre (secțiunea 3.4), pe care am denumit-o *star gulping*, precum și investigat modificările de spin sub influența metodelor de creștere (secțiunea 4.3).

Mulțumiri: această activitate de cercetare a fost susținută, în parte, de bursa științifică LAPLAS VI și de programul PRODEX al ESA. Rezultatele numerice raportate aici au fost obținute în urma folosirii Clusterului Computațional Științific al Institutului de Științe Spațiale (ISS).

Listă de abstracte ale articolelor asociate cu teza de doctorat

Simulations and analysis of the first black hole populations

R. A. Balaşov, L. I. Caramete, Romanian Reports in Physics **72**, 114 (2020)

We simulate various black hole populations using the GIZMO code package for cosmological N-body/Smoothed-particle hydrodynamics (SPH) problems. The objective of this analysis is to use the results of the simulations in order to compare them with the present black hole mass distribution. In doing this, we can predict the initial population of black holes, the mass distribution and the black hole merger rate, which will be a direct contribution to the future gravitational waves observatories (such as the LISA Space Mission).

<http://www.rrp.infim.ro/2020/AN72114.pdf>

Study of the first populations of black holes in the context of gravitational wave observations

L. I. Caramete, R. A. Balaşov, Advances in Space Research **69**, 1, Pg. 438-447 (2022)

Here we have investigated the main characteristics, including the merging rate, of the first population of black holes in order to improve the current assumptions in the context of the present and future gravitational wave observations. We made several simulations with different populations of black holes that we evolve in time so we can compare them with the present population of black holes. We identified the most suitable first population of black holes and we obtained not only the merging rate of black holes, but also its evolution with mass and in time. This information is very important for the next generation of gravitational waves observatories and specially for the LISA space mission.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117721006128>

Astrophysics with the Laser Interferometer Space Antenna

P. Amaro-Seoane et al., Living Reviews in Relativity (Accepted for publication)

Laser Interferometer Space Antenna (LISA) will be a transformative experiment for gravitational wave astronomy as it will offer unique opportunities to address many key astro-

physical questions in a completely novel way. The synergy with ground-based and other space-based instruments in the electromagnetic domain, by enabling multi-messenger observations, will add further to the discovery potential of LISA. The next decade is crucial to prepare the astrophysical community for LISA's first observations. This review outlines the extensive landscape of astrophysical theory, numerical simulations, and astronomical observations that are instrumental for modeling and interpreting the upcoming LISA datastream. To this aim, the current knowledge in three main source classes for LISA is reviewed: ultra-compact stellar-mass binaries, massive black hole binaries, and extreme or intermediate mass ratio inspirals. The relevant astrophysical processes and the established modeling techniques are summarized. Likewise, open issues and gaps in our understanding of these sources are highlighted, along with an indication of how LISA could help make progress in the different areas. New research avenues that LISA itself, or its joint exploitation with studies in the electromagnetic domain, will enable, are also illustrated. Improvements in modeling and analysis approaches, such as the combination of numerical simulations and modern data science techniques, are discussed. This review is intended to be a starting point for using LISA as a new discovery tool for understanding our Universe.

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022arXiv220306016A%2F/abstract>

Growth of black holes using the star gulping mechanism

L. I. Caramete, R. A. Balaşov, A. M. Păun, Romanian Reports in Physics (Accepted for publication)

The evolution of merging black holes (BHs) and their associated processes will be the center-piece study for the upcoming gravitational waves (GWs) observatories, including the LISA Space Mission from ESA. We ran simulations specifically for studying the BH growth, in order to provide estimates regarding the detection rates for the future GW laboratories. Here, we describe the results of our investigations for a new implementation regarding the BH growth, star gulping (SG), in which stars are absorbed by BHs. The current scientific literature emphasizes two main mechanisms for the growth of BHs: accretion of surrounding material and merging with another BH. By taking into account both methods, one can begin to model the growth processes of the most massive BHs (MBHs) from the moment of their origin to current observations. Our previous work showed that even if you consider these processes at their maximum, it is very difficult to grow BHs to the masses and concentrations that we measure today. Therefore, we performed detailed simulations in order to study another growth mechanism, star gulping (SG), that has the potential to add more mass to BHs.

Listă de acronime și prescurtări folosite

2MASS - Two Micron All Sky Survey
2MASX - 2MASS Extended Source Catalog
AGN - Active Galactic Nucleus/Nuclei
AI - Artificial Intelligence
BBH - Binary Black Hole
BH - Black Hole
BHB - Black Hole Binary
BICEP - Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization
CMB - Cosmic Microwave Background
DECIGO - Deci-Hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory
EHT - Event Horizon Telescope
EMRI - Extrem Mass Ratio Inspiral
ESA - European Space Agency
FFTW - Fastest Fourier Transform in the West
FPGA - Field-Programmable Gate Array
GADGET - Galaxies with Dark Matter and Gas Interact
GNU - GNU's Not Unix
GPU - Graphics Processing Unit
GSL - GNU Scientific Library
GW - Gravitational Wave
HDF - Hierarchical Data Format
HS - Heavy Seeds
HSS - High-Soft State
IC - Initial Condition
IMBH - Intermediate-Mass Black Hole
IPAC - Infrared Processing and Analysis Center
IS - Intermediate State
ISS - Institute of Space Science / Institutul de Științe Spațiale
KAGRA - Kamioka Gravitational Wave Detector
LDC - LISA Data Challenge
LDPG - LISA Data Processing Group
LECS - LISA Early Career Scientists
LGA - Large Galaxy Atlas
LHS - Low-Hard State
LIGO - Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
LISA - Laser Interferometer Space Antenna
LLP - Low-Latency Pipeline

LS - Low Seeds
LSC - LIGO Scientific Collaboration
MBH - Massive Black Hole
MHD - Magneto-Hydrodynamics
MPI - Message Passing Interface
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NED - NASA/IPAC Extragalactic Database
NS - Neutron Star
PRODEX - Programme de Développement d'Expériences Scientifiques
QPO - Quasi-Periodic Oscillation
QSO - Quasi-Stellar Object
RC3 - Third Reference Catalog of Bright Galaxies
Sag A* - Sagittarius A*
SC - Star Cluster
SG - Star Gulping
SN - Supernova
SO - Scientific Objective
SOBH - Stellar Origin Black Hole
SMBH - Supermassive Black Hole
SPH - Smoothed Particle Hydrodynamics
TDE - Tidal Disruption Event
TDF - Tidal Disruption Flare
VHS - Very High State
WP - Working Package

Anexă

Sursele imaginilor folosite în Figurile 1.5 și 1.6 din capitolul *Introducere*:

- 1686 - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Principia-title.png>
- 1783 - <https://www.aps.org/publications/apsnews/200911/physicshistory.cfm>
- 1796 - https://ro.m.wikipedia.org/wiki/Fi%C8%99ier:Pierre-Simon,_marquis_de_Laplace_%281745-1827%29_-_Gu%C3%A9rin.jpg
- 1915 - <https://www.amnh.org/learn-teach/seminars-on-science/about/faculty/albert-einstein>
- 1916 - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schwarzschild_in_academic_robe.gif
- 1931 - https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/08/Subrahmanyan_Chandrasekhar_1910-1995
- 1939 - <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.56.455>
- 1964 - https://www.sciencenews.org/wp-content/uploads/2013/12/sciencenewsletter_blackhole.png
- 1967 - https://www.physicsoftheuniverse.com/scientists_wheeler.html
- 1971 - https://www.nasa.gov/images/content/381549main_cygX1_final_665.jpg
- 1974b - <https://www.newscientist.com/article/dn19508-hawking-radiation-glimpsed-in>
- 1978 - <https://www.sciencenews.org/archive/supermassive-object-galaxy-m87>
- 2008 - https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2014/10/aa24358-14/aa24358-14.html
- 2012 - James Provost & <https://www.sciencenews.org/article/mysterious-boundary>
- 2016 - The Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) project (<http://www.black-holes.org>)
- 2019 - <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...875L...1E/abstract>
- 2020a - LIGO/Caltech/MIT/R. Hurt (IPAC) & <https://www.ligo.org/detections/GW190521/files/GW190521MassiveMergerArtAnnotated.jpg>

- 2020b – Niklas Elmehed. Copyright Nobel Media.
- 2021a – Deborah Ferguson (UT Austin), Bhavesh Khamesra (Georgia Tech), and Karan Jani (Vanderbilt University) & <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20210629>
- 2021b – LIGO-Virgo / Aaron Geller / Northwestern University & <https://www.ligo.caltech.edu/MIT/image/ligo20211107a>
- 2022 – <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac6674>

Referințe

- Sverre J. Aarseth. From NBODY1 to NBODY6: The Growth of an Industry. , 111(765): 1333–1346, November 1999. doi: 10.1086/316455.
- B. P. Abbott et al. Properties of the binary black hole merger gw150914. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 116(24), 2016. doi: 10.1103/PhysRevLett.116.241102.
- B. P. Abbott et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817a. *The Astrophysical Journal*, 848:L13, 2017. doi: 10.3847/2041-8213/aa920c.
- Tom Abel, Greg L. Bryan, and Michael L. Norman. The Formation and Fragmentation of Primordial Molecular Clouds. , 540(1):39–44, September 2000. doi: 10.1086/309295.
- I. Adawi. Centennial of Hertz’ radio waves. *American Journal of Physics*, 57(2):125–127, February 1989. doi: 10.1119/1.16106.
- Pau Amaro-Seoane et al. Laser Interferometer Space Antenna. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1702.00786, February 2017.
- K. G. Arun, Stas Babak, Emanuele Berti, Neil Cornish, Curt Cutler, Jonathan Gair, Scott A. Hughes, Bala R. Iyer, Ryan N. Lang, Ilya Mandel, Edward K. Porter, Bangalore S. Sathyaprakash, Siddhartha Sinha, Alicia M. Sintes, Miquel Trias, Chris Van Den Broeck, and Marta Volonteri. Massive black-hole binary inspirals: results from the LISA parameter estimation taskforce. *Classical and Quantum Gravity*, 26(9):094027, May 2009. doi: 10.1088/0264-9381/26/9/094027.
- Enrico Barausse, Irina Dvorkin, Michael Tremmel, Marta Volonteri, and Matteo Bonetti. Massive Black Hole Merger Rates: The Effect of Kiloparsec Separation Wandering and Supernova Feedback. , 904(1):16, November 2020. doi: 10.3847/1538-4357/abba7f.
- Baza de date extragalactice NED. URL <https://ned.ipac.caltech.edu/>.
- Mitchell C. Begelman, Marta Volonteri, and Martin J. Rees. Formation of supermassive black holes by direct collapse in pregalactic halos. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 370: 289–298, 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10467.x.
- Emanuele Berti, Alberto Sesana, Enrico Barausse, Vitor Cardoso, and Krzysztof Belczynski. Spectroscopy of Kerr Black Holes with Earth- and Space-Based Interferometers. , 117(10):101102, September 2016. doi: 10.1103/PhysRevLett.117.101102.

- Matteo Bonetti, Alberto Sesana, Francesco Haardt, Enrico Barausse, and Monica Colpi. Post-Newtonian evolution of massive black hole triplets in galactic nuclei - IV. Implications for LISA. , 486(3):4044–4060, July 2019. doi: 10.1093/mnras/stz903.
- Volker Bromm, Paolo S. Coppi, and Richard B. Larson. Forming the First Stars in the Universe: The Fragmentation of Primordial Gas. , 527(1):L5–L8, December 1999. doi: 10.1086/312385.
- A. Burrows and J. M. Lattimer. The Birth of Neutron Stars. , 307:178, August 1986. doi: 10.1086/164405.
- L. I. Caramete and P. L. Biermann. The mass function of nearby black hole candidates. , 521:A55, October 2010. doi: 10.1051/0004-6361/200913146.
- B. J. Carr and S. W. Hawking. Black Holes in the Early Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 168(2):399–415, 08 1974. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/168.2.399. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/168.2.399>.
- Sean M. Carroll. *Spacetime and geometry. An introduction to general relativity*. 2004.
- G. F. Chapline. Cosmological effects of primordial black holes. , 253(5489):251–252, January 1975. doi: 10.1038/253251a0.
- R. Chevalier. The Origin of Neutron Stars (Review). In S. P. Reynolds and D. R. Stinebring, editors, *Birth and Evolution of Neutron Stars: Issues Raised by Millisecond Pulsars*, page 73, January 1984.
- Tiziana Di Matteo, Volker Springel, and Lars Hernquist. Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. , 433(7026):604–607, February 2005. doi: 10.1038/nature03335.
- Charles R. Evans and Christopher S. Kochanek. The Tidal Disruption of a Star by a Massive Black Hole. , 346:L13, November 1989. doi: 10.1086/185567.
- László Á. Gergely, Peter L. Biermann, and Laurențiu I. Caramete. Supermassive black hole spin-flip during the inspiral. *Classical and Quantum Gravity*, 27(19):194009, October 2010. doi: 10.1088/0264-9381/27/19/194009.
- László Árpád Gergely and Peter L. Biermann. The Spin-Flip Phenomenon in Supermassive Black hole binary mergers. , 697(2):1621–1633, June 2009. doi: 10.1088/0004-637X/697/2/1621.
- Suvi Gezari. Tidal Disruption Events. , 59:21–58, September 2021. doi: 10.1146/annurev-astro-111720-030029.
- Anne M. Green. *Primordial Black Holes: Sirens of the Early Universe*, pages 129–149. Springer International Publishing, Cham, 2015. ISBN 978-3-319-10852-0. doi: 10.1007/978-3-319-10852-0_5. URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-10852-0_5.
- Stephen Hawking. Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 152(1):75–78, 04 1971. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/152.1.75. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/152.1.75>.

- A. Heger, C. L. Fryer, S. E. Woosley, N. Langer, and D. H. Hartmann. How Massive Single Stars End Their Life. , 591(1):288–300, July 2003. doi: 10.1086/375341.
- J. G. Hills. Possible power source of Seyfert galaxies and QSOs. , 254(5498):295–298, March 1975. doi: 10.1038/254295a0.
- Philip F. Hopkins, Paul Torrey, Claude-André Faucher-Giguère, Eliot Quataert, and Norman Murray. Stellar and quasar feedback in concert: effects on AGN accretion, obscuration, and outflows. , 458(1):816–831, May 2016. doi: 10.1093/mnras/stw289.
- Michael Kesden. Tidal-disruption rate of stars by spinning supermassive black holes. , 85(2):024037, January 2012. doi: 10.1103/PhysRevD.85.024037.
- Antoine Klein, Enrico Barausse, Alberto Sesana, Antoine Petiteau, Emanuele Berti, Stanislav Babak, Jonathan Gair, Sofiane Aoudia, Ian Hinder, Frank Ohme, and Barry Wardell. Science with the space-based interferometer eLISA: Supermassive black hole binaries. , 93(2):024003, January 2016. doi: 10.1103/PhysRevD.93.024003.
- Pavel Kroupa and Tereza Jerabkova. The Salpeter IMF and its descendants. *Nature Astronomy*, 3:482–484, June 2019. doi: 10.1038/s41550-019-0793-0.
- V. V. Lidskii and L. M. Ozernoi. Tidal triggering of stellar flares by a massive black hole. *Soviet Astronomy Letters*, 5:16–19, January 1979.
- F. K. Liu. X-shaped radio galaxies as observational evidence for the interaction of supermassive binary black holes and accretion disc at parsec scale. , 347(4):1357–1369, February 2004. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.07325.x.
- Piero Madau and Martin J. Rees. Massive Black Holes as Population III Remnants. , 551(1):L27–L30, April 2001. doi: 10.1086/319848.
- Manual GIZMO. URL http://www.tapir.caltech.edu/~phopkins/Site/GIZMO_files/gizmo_documentation.html.
- Keigo Nitadori et al. Accelerating NBODY6 with graphics processing units. , 424(1):545–552, July 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21227.x.
- Fabio Pacucci, Priyamvada Natarajan, Marta Volonteri, Nico Cappelluti, and C. Megan Urry. Conditions for optimal growth of black hole seeds. *The Astrophysical Journal*, 850(2):L42, dec 2017. doi: 10.3847/2041-8213/aa9aea. URL <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9aea>.
- E. S. Phinney. Manifestations of a Massive Black Hole in the Galactic Center. In Mark Morris, editor, *The Center of the Galaxy*, volume 136, page 543, January 1989.
- S. F. Portegies Zwart, J. Makino, S. L. W. McMillan, and P. Hut. Star cluster ecology. III. Runaway collisions in young compact star clusters. , 348:117–126, August 1999.
- Programul Cosmic Vision. URL http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/ESA_s_Cosmic_Vision.
- Gerald D. Quinlan and Stuart L. Shapiro. The Dynamical Evolution of Dense Star Clusters in Galactic Nuclei. , 356:483, June 1990. doi: 10.1086/168856.

- Martin J. Rees. Tidal disruption of stars by black holes of 10^6 - 10^8 solar masses in nearby galaxies. , 333(6173):523–528, June 1988. doi: 10.1038/333523a0.
- Martin J. Rees and Marta Volonteri. Massive black holes: formation and evolution. In Vladimír Karas and Giorgio Matt, editors, *Black Holes from Stars to Galaxies – Across the Range of Masses*, volume 238, pages 51–58, April 2006. doi: 10.1017/S1743921307004681.
- Kirsty J. Rhook and J. Stuart B. Wyithe. Realistic event rates for detection of supermassive black hole coalescence by LISA. , 361(4):1145–1152, August 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.08987.x.
- Edwin E. Salpeter. The Luminosity Function and Stellar Evolution. , 121:161, January 1955. doi: 10.1086/145971.
- Misao Sasaki, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, and Shuichiro Yokoyama. Primordial black holes—perspectives in gravitational wave astronomy. *Classical and Quantum Gravity*, 35(6):063001, March 2018. doi: 10.1088/1361-6382/aaa7b4.
- Alberto Sesana. Black hole science with the Laser Interferometer Space Antenna. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8:7, February 2021. doi: 10.3389/fspas.2021.601646.
- Alberto Sesana, Francesco Haardt, Piero Madau, and Marta Volonteri. Low-Frequency Gravitational Radiation from Coalescing Massive Black Hole Binaries in Hierarchical Cosmologies. , 611(2):623–632, August 2004. doi: 10.1086/422185.
- Alberto Sesana, Francesco Haardt, Piero Madau, and Marta Volonteri. The Gravitational Wave Signal from Massive Black Hole Binaries and Its Contribution to the LISA Data Stream. , 623(1):23–30, April 2005. doi: 10.1086/428492.
- Alberto Sesana, Jonathan Gair, Emanuele Berti, and Marta Volonteri. Reconstructing the massive black hole cosmic history through gravitational waves. , 83(4):044036, February 2011. doi: 10.1103/PhysRevD.83.044036.
- S. L. Shapiro and S. A. Teukolsky. The collapse of dense star clusters to supermassive black holes : the origin of quasars and AGNs. , 292:L41–L44, May 1985. doi: 10.1086/184469.
- Volker Springel. The cosmological simulation code gadget-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364(4):1105–1134, 12 2005. ISSN 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x>.
- F. X. Timmes, S. E. Woosley, and Thomas A. Weaver. The Neutron Star and Black Hole Initial Mass Function. , 457:834, February 1996. doi: 10.1086/176778.
- A. van der Wel, M. Franx, P. G. van Dokkum, J. Huang, H. W. Rix, and G. D. Illingworth. The Evolution of Rest-Frame K-Band Properties of Early-Type Galaxies from $z = 1$ to the Present1,. , 636(1):L21–L24, January 2006. doi: 10.1086/499919.
- Ya. B. Zeldovich and Igor D. Novikov. *Relativistic astrophysics. Vol.1: Stars and relativity*. 1971.

Ya. B. Zel'dovich and M. A. Podurets. The Evolution of a System of Gravitationally Interacting Point Masses. , 42:963, January 1965.