



ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

დოქტორანტურის საგანმანათლებლო პროგრამა: ფიზიკა

რევაზ ბერაძე

**სარკული სამყაროს მოდელის ზოგიერთი
კოსმოლოგიური და ასტროფიზიკური გამოვლინება**

**ფიზიკის დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი დისერტაცია**

სამეცნიერო ხელმძღვანელები:

მერაბ გოგბერაშვილი
ასოც. პროფესორი

ზურაბ ბერეჟიანი
პროფესორი

თბილისი, 2022

აბსტრაქტი

ლაზერული ინტერფერომეტრის გრავიტაციული ტალღების ობსერვატორიის (LIGO) მეშვეობით გრავიტაციული ტალღების პირდაპირი გზით დაკვირვებამ სათავე დაუდო ახალ ერას მულტი-მესენჯერულ ასტრონომიაში. დაკვირვების სამი სეზონის შემდეგ, გრავიტაციული ტალღების მე-3 კატალოგში (GWTC-3) შეჯამებულია 90 დადასტურებული გრავიტაციული ტალღა, რომლებიც წარმოიქმნა კომპაქტური ობიექტების ორმაგი სისტემების შერწყმის შედეგად. მიუხედავად იმისა, რომ აღმოჩენილი გრავიტაციული გამოსხივების ძირითადი თვისებები შესაბამისობაშია ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ვარაუდებთან, მასიური ვარსკვლავების ევოლუციის მოდელებს უჭირთ ზოგიერთი მახასიათებლის ახსნა. მაგალითად: მოვლენების უმეტესობას არ ახლავს თანმდევი ელექტრომაგნიტური გამოსხივება, შერწყმების სიხშირე ნაწინასწარმეტყველევზე მაღალია, ზოგიერთი კომპაქტური ობიექტის მასა მდებარეობს ე. წ. მასურ ღრეჩოში.

წარმოდგენილი თეზისის საკვლევი თემაა, მოძებნოს შესაძლო კავშირი ზემოთხსენებულ პრობლემებსა და ბნელი მატერიის კონკრეტული მოდელის - სარკული სამყაროს თეორიის შორის. სარკული მატერიის მოდელის თანახმად, ყველა ელემენტარულ ნაწილაკს ჰყავს თავისი ტყუპი სარკული პარტნიორი, რომლებიც იმავე მიკროფიზიკურ კანონებს ექვემდებარებიან. სარკული და ჩვეულებრივი ნაწილაკები ერთმანეთისთვის უხილავები არიან, თუმცა მათ შეუძლიათ ურთიერთქმედება გრავიტაციის მეშვეობით. ითვლება, რომ სარკული მატერია უფრო ცივია და მასში დომინირებს ჰელიუმი. ეს იწვევს მასიური ვარსკვლავების წარმოქმნას, რომელთა სიცოცხლის ხანგრძლივობა გაცილებით ნაკლებია. ამგვარად, სარკულ სამყაროში მოსალოდნელია დიდი რაოდენობით მასიური კომპაქტური ობიექტების ჩამოყალიბება მულტი-სამყაროს განვითარების ადრეულ ეტაპზე.

ჩვენი ვარაუდით, თუ დაკვირვებული გრავიტაციული ტალღები წარმოიქმნება სარკული კომპაქტური ორმაგი სისტემების მიერ, მაშინ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ნაკლებობა ბუნებრივია, რადგან სარკული ფოტონები შეუმჩნეველი დარჩება ჩვენი დეტექტორებისთვის. გარდა ამისა, რადგანაც სარკული მატერია ბნელი მატერიის კანდიდატია, მისი რაოდენობა შეიძლება ხუთჯერ აღემატებოდეს ჩვეულებრივ მატერიის რაოდენობას. მთლიანობაში, მასიური კომპაქტური ობიექტების დიდი რაოდენობა გაზრდის ორმაგი სისტემების შერწყმის სიხშირეს, რაც თავსებადია დაკვირვებებთან. გარდა ამისა, უცნაური, მასურ ღრეჩოში მდებარე მოვლენების არსებობა, შეიძლება უკეთესად აიხსნას სარკული სამყაროს სამუალებით.

მინდა მადლობა გადავუხადო ჩემს ხელმძღვანელს თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ასოც. პროფესორ მერაბ გოგბერაშვილს გაწეული დახმარებისთვის იმ ნაშრომებზე მუშაობისას, რომლებზეც დაფუძნებულია თეზისი. მსურს მადლობა გადავუხადო ჩემს თანა-ხელმძღვანელს, ლაკვილას უნივერსიტეტის პროფესორ ზურაბ ბერეჟიანს, აღნიშნულ თემაზე მუშაობის პროცესში მოცემული რჩევებისთვის. დისერტაცია შესრულდა საქართველოს შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის საგრანტო პროექტის #48/04 და Volkswagenstiftung 93562 გრანტის მხარდაჭერით. 6-თვიანი ვიზიტი ლაკვილას უნივერსიტეტში განხორციელდა Erasmus+ სტიპენდიის მეშვეობით. 3-თვიანი ვიზიტი პარი-საკლეს უნივერსიტეტსა და IJCLab-ში დაფინანსებული იყო ფრანგულ-ქართული უნივერსიტეტის მიერ, რომლის მადლიერიც ვარ. მინდა მადლობა გადავუხადო ორსვეს თეორიული ფიზიკის ლაბორატორიის უფროს მკვლევარს ადამ ფალკოვსკის პარი-საკლეს უნივერსიტეტში სტაჟირებისას გაწეული ზედამხედველობისთვის.

სარჩევი

1 შესავალი	1
2 ფარდობითობის თეორია	7
2.1 ფარდობითობის სპეციალური თეორია	7
2.2 ფარდობითობის ზოგადი თეორია	9
3 გრავიტაციული ტალღების თეორია	11
4 გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენა	14
4.1 გრავიტაციული ტალღების დეტექტორები	14
4.2 გრავიტაციული ტალღების მონაცემები	15
4.2.1 LIGO-Virgo-KAGRA-ს აღმოჩენები	15
4.2.2 შერწყმის სიხშირეები	16
4.3 ორმაგი შავი ხვრელები	16
4.3.1 პირველადი შავი ხვრელები	17
4.3.2 ასტროფიზიკური შავი ხვრელები	18
4.3.3 ობიექტები ზედა მასურ ღრეჩოში	19
4.4 ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავის და ნეიტრონული ვარსკვლავი - შავი ხვრე- ლის სისტემები	21
4.4.1 თანმხლები ელექტრომაგნიტური გამოსხივება	21
4.4.2 ობიექტები ქვედა მასურ ღრეჩოსთან	23
4.5 პრობლემები და ჩვენი იდეა	25
5 სარკული სამყაროს მოდელი	27
6 გრავიტაციული ტალღები სარკული სამყაროდან	32
6.1 მულტი-მესენჯერული მოვლენების ნაკლებობა	33
6.2 შერწყმის სიხშირეები	33
6.2.1 ორმაგი შავი ხვრელები	33
6.2.2 ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავები	36
6.3 მასური ღრეჩოს ობიექტები	36
6.3.1 ზედა მასური ღრეჩოს ობიექტები	37
6.3.2 ქვედა მასური ღრეჩოს ობიექტები	37
6.4 სამომავლო ხედვები	38
7 დასკვნა	40
Bibliography	43

თავი 1

შესავალი

საუკუნეზე მეტი ხნის წინ, თავის ცნობილ ნაშრომში „მოძრავი სხეულების ელექტროდინამიკის შესახებ“, რომელიც 1905 წელს გამოქვეყნდა, ალბერტ აინშტაინმა შემოგვთავაზა ფარდობითობის სპეციალური თეორია და სათავე დაუდო სრულიად ახალ თავს ფიზიკის ისტორიაში. აინშტაინმა ჩამოაყალიბა ორი პოსტულატი: 1. ფიზიკის კანონები ინვარიანტულია ყველა ინერციულ ათვლის სისტემაში; 2. სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში ყველა დამკვირვებლისთვის ერთნაირია, მიუხედავად დამკვირვებლის ან სინათლის წყაროს მოძრაობისა. თეორია ვარაუდობდა, რომ ობიექტებს შორის ურთიერთქმედების სიჩქარე არის სასრული და ის სწორად აღწერდა ობიექტების მოძრაობას, იმ შემთხვევაშიც, როდესაც მათი სიჩქარე სადარია სინათლის სიჩქარის. ამ პოსტულატებიდან გამომდინარეობდა ამბიციური განცხადება, რომ დრო არ არის აბსოლუტური! კოორდინატთა სხვადასხვა სისტემაში დრო შეიძლება სხვადასხვანაირად გადიოდეს! ნიუტონის ფიზიკა აღარ იყო ისეთი ხელშეუხებელი, როგორც ადრე. სივრცე და დრო არ იყო ისეთივე განსხვავებული და ისინი გაერთიანდნენ ახალ სივრცე-დროის ცნებაში, რომელიც აღიწერებოდა ლორენცის გარდაქმნებით, რომლებმაც ჩაანაცვლა გალილეის გარდაქმნის წესები. სამგანზომილებიანი ევკლიდური სივრცე შეიცვალა ოთხგანზომილებიანი მინკოვსკის სივრცით, რომელიც გახდა ფარდობითობის სპეციალური თეორიის მოქმედების მთავარი არე.

სინამდვილეში, იმ დროისთვის ნიუტონის მექანიკამ უკვე აჩვენა შეუთავსებლობა მაქსველის ელექტრომაგნიტიზმის განტოლებებთან. მაიკლსონ-მორლის ექსპერიმენტის ნულოვანმა შედეგმა საბოლოოდ გამორიცხა უხილავი ეთერის იდეა. ჰენდრიკ ლორენცისა და ჰენრი პოინკარეს ადრინდელ ნაშრომებზე დაყრდნობით, აინშტაინის ფარდობითობის სპეც თეორია ყველა ამ პრობლემას შეეხო. მის თანახმად, არ არსებობს გამორჩეული ათვლის სისტემა, შესაბამისად არც ეთერი არ უნდა არსებობდეს; გარდა ამისა, ნიუტონის მექანიკა შეთავსებულია ელექტრომაგნიტიზმის თეორიასთან, რომელშიც ურთიერთქმედების სიჩქარე სასრულია. ამასთან ერთად, ზღვარში, როდესაც ობიექტების სიჩქარე სინათლის სიჩქარესთან შედარებით მცირეა, ან თუ ვივარაუდებთ, რომ ობიექტებს შორის ურთიერთქმედება მყისიერია, ფარდობითობის სპეც თეორია აღადგენს ნიუტონის ფიზიკას.

მაგრამ ეს არ იყო ყველაფერი. ფარდობითობის სპეც თეორია არაფერს ამბობს აჩქარებასა და გრავიტაციაზე - ორი მნიშვნელოვანი სიდიდეზე ნიუტონის ფიზიკაში. აინშტაინი ამაზე არ გაჩერდა და 1915 წელს გამოაქვეყნა ფარდობითობის ზოგადი თეორია, სადაც მან განაზოგადა ფარდობითობის სპეციალური თეორია და ნიუტონის გრავიტაციის უნივერსალური კანონი წარმოადგინა როგორც ოთხგანზომილებიანი სივრცის გეომეტრია. აინშტაინმა თქვა, რომ რასაც ჩვენ ვაკვირდებით როგორც გრავიტაციულ ძალას, არის სივრცის გამრუდება, რომელიც გამოწვეულია მატერიის ენერგია-იმპულსით. ზოგადი ფარდობითობის თეორია იყენებს

რიმანის გეომეტრიას და მისი მთავარი ფორმულა მოცემულია აინშტაინის განტოლებით

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} , \quad (1.1)$$

სადაც $g_{\mu\nu}$ არის მეტრიკული ტენზორი, R და $R_{\mu\nu}$ არის, შესაბამისად, რიჩის სკალარი და რიჩის ტენზორი და ორივე მეტრიკული ტენზორის ფუნქციაა, ამიტომ (1.1) განტოლების მარცხენა მხარე მთლიანად გეომეტრიულია. $T_{\mu\nu}$ განტოლების მარჯვენა მხარეს არის ენერგია-იმპულსის ტენზორი და G არის ნიუტონის გრავიტაციული მუდმივა. ამგვარად, აინშტაინის განტოლება (1.1) აღწერს მატერიისა და ენერგიის არსებობის გამო სივრცე-დროის გამრუდებას.

აინშტაინმა თავის თეორიაში გამოიყენა კიდევ ერთი ქვაკუთხედი - ექვივალენტობის პრინციპი. მსგავსი კონცეფცია შემოიტანა გალილეიმაც, როცა შეამჩნია, რომ დედამიწაზე სხვადასხვა მასის ობიექტები ერთდროულად ეცემა. სხვაგვარად, პროპორციულობის პარამეტრი ნიუტონის მიზიდულობის კანონში

$$F = -m_g \nabla \phi , \quad (1.2)$$

- სხეულის გრავიტაციული მასა m_g (F არის გრავიტაციული ძალა და ϕ გრავიტაციული პოტენციალი) და პროპორციულობის პარამეტრი F ძალასა და a აჩქარებას შორის ნიუტონის მეორე კანონში

$$F = m_i a , \quad (1.3)$$

- სხეულის ინერციული მასა m_i , არის მოცემული ობიექტის ერთიდაიგივე მახასიათებელი

$$m_g = m_i \quad (1.4)$$

და, შესაბამისად

$$a = -\nabla \phi . \quad (1.5)$$

ამ ყველაფერს მივყავართ აინშტაინის ცნობილ აზრობრივ ექსპერიმენტთან: დამკვირვებელს საკმარისად მცირე ზომის დახურულ ლიფტში არ აქვს საშუალება გაარჩიოს ლიფტი გრავიტირებადი სხეულის თავზეა ჩამოკიდებული თუ აჩქარებით მოძრაობს ცარიელ სივრცეში.

ახლა განვიხილოთ საცდელი ნაწილაკების მოძრაობა, ანუ მატერიის პასუხი სივრცე-დროის გამრუდებაზე. თავისუფალი ნაწილაკები მოძრაობენ უმოკლესი შესაძლო მანძილის მქონე ტრაექტორიაზე, რომელსაც გეოდეზიური წირი ეწოდება. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ნაწილაკები მოძრაობენ სწორ ხაზებზე, თუმცა გამრუდებულ სივრცეში სწორი ხაზების გაგება არ არის ისეთი, როგორსაც მიჩვეულები ვართ ევკლიდურ გეომეტრიაში. აქ შემოდის პარამეტრული წირის განმარტება $x^\mu(\lambda)$, რომელიც აკმაყოფილებს გეოდეზიური წირის განტოლებას

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma_{\sigma\rho}^\mu \frac{dx^\sigma}{d\lambda} \frac{dx^\rho}{d\lambda} = 0, \quad (1.6)$$

($\Gamma_{\sigma\rho}^\mu$ კრისტოფელის სიმბოლოა) რომელიც აღწერს უმოკლეს შესაძლო მანძილს, რომელსაც ნაწილაკი გადის სივრცე-დროში. ნიუტონის მექანიკაში ნაწილაკების აჩქარება აღიწერება გარე ძალით (1.3), კონკრეტულ შემთხვევაში გრავიტაციული ძალით (1.5). ზოგად ფარდობითობაში გრავიტაცია რეალურად არ არის „ძალა“; სივრცის გამრუდება არის ის, რასაც ნაწილაკი გრძნობს როგორც გრავიტაციულ ძალას და მისი მოძრაობა აღიწერება გეოდეზიური წირის განტოლებით (1.6). ამგვარად, ზოგადი ფარდობითობის ფარგლებში, თავისუფალ ვარდნაში მყოფი ბურთი უფრო ჭეშმარიტად არის „აჩქარებული“, ვიდრე ბურთი, რომელსაც დევს მაგიდაზე; მაგიდაზე მდებარე ბურთი გადახრილია იმ გეოდეზიური წირიდან, რომელზეც

ისურვებდა ყოფნას - სწორედ ამიტომ, ის გრძნობს სივრცის სიმრუდეს, როგორც გრავიტაციულ ძალას.

ფარდობითობის ზოგადმა თეორიამ იწინასწარმეტყველა მერკურის პერიჰელიის ანომალიური ბრუნვა, რაც იყო კარგი მინიმუმ იმაზე, რომ ეს იყო გრავიტაციის სწორი თეორია. თუმცა, უფრო ძლიერი მტკიცებულება ზოგადი ფარდობითობის სასარგებლოდ მოვიდა 1919 წლის 29 მაისის მზის სრული დაბნელების დროს, როდესაც ედინგტონმა გაზომა მზის მიერ ვარსკვლავიდან მომავალი სინათლის გადახრა. ექსპერიმენტმა დაადასტურა, რომ მზე ნამდვილად ამრუდებს სივრცე-დროს და ვარსკვლავიდან მომავალი სინათლე მიჰყვება ამ გამრუდებული სივრცის გეოდეზიურ წირს. მოგვიანებით, ზოგადი ფარდობითობა არაერთხელ დადასტურდა ისეთი დაკვირვებებით, როგორებიცაა სინათლის გრავიტაციული წითელი წანაცვლების გაზომვა, შაპიროს მიერ სინათლის სხივის მოგზაურობის დროის დაყოვნება, გრავიტაციული ლინზირება, სამყაროს კოსმოლოგიური გაფართოება და მრავალი სხვა.

ზოგადი ფარდობითობის გამოქვეყნებიდან მალევე, კარლ შვარცშილდმა იპოვა აინშტაინის განტოლებების პირველი არატრივიალური ზუსტი ამონახსნი. სფერულ სიმეტრიულმა მეტრიკამ, ცნობილმა როგორც შვარცშილდის მეტრიკა, რომელმაც ამოხსნა აინშტაინის განტოლებები, იწინასწარმეტყველა უცნაური ობიექტის - შავი ხვრელის არსებობა, რომელიც წარმოადგენს სინგულარულ წერტილს სივრცე-დროის ქსოვილში. ევოლუციის ბოლო სტადიაზე, მასიური ვარსკვლავები განიცდიან კოლაფსს საკუთარი გრავიტაციის ქვეშ და წარმოქმნიან ისეთ კომპაქტურ ობიექტებს, რომ სინათლეს კი ვერ ახერხებს მისგან თავის დაღწევას. შავი ხვრელები ფიზიკოსებისთვის მაშინვე იქცა ძალიან მიმზიდველ ობიექტებად და ისინი დღემდე ასეთებად რჩება.

ზოგადი ფარდობითობის კიდევ ერთი შედეგი იყო გრავიტაციული ტალღების არსებობა. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, მასა ამრუდებს სივრცე-დროს; მოძრავი მასა წარმოქმნის სიმრუდის ცვლილებას და, ზოგიერთ შემთხვევაში, ეს გამრუდება შეიძლება გაგრცელდეს ტალღის მსგავსი სახით. ეს ფენომენი ცნობილია როგორც გრავიტაციული ტალღა, მაგრამ ის ვერ წარმოიქმნება თანაბარი ან სფერულად სიმეტრიული მოძრაობის შედეგად. გრავიტაციული ტალღების წარმოქმნისთვის საჭიროა მასიური სხეულის კვადრუპოლური მომენტის ცვლილება. გრავიტაციული ტალღების წარმოქმნის ყველაზე გაგრცელებული მექანიზმია ორმაგი ვარსკვლავის სისტემა - ორი მასიური ობიექტი, რომლებიც ბრუნავენ ერთმანეთის გარშემო. ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებას ასევე შეუძლია გრავიტაციული ტალღების გამოსხივება, თუ დაგუშვებთ, რომ აფეთქება არ არის იდეალურად სიმეტრიული პროცესი. ასევე, სამყაროს ადრეულ ეტაპზე კოსმოსურ ინფლაციას შესაძლოა შეექმნა გრავიტაციული ტალღების ფონი.

გრავიტაციულ ტალღებს გააჩნიათ ენერჯია და მათი წყაროს მიერ ენერჯიის კარგვა იყო ტალღების არსებობის პირველი არაპირდაპირი მტკიცებულება. ჰულს-ტეილორის ორმაგი სისტემა - ვარსკვლავების წყვილი, რომელთაგან ერთ-ერთი პულსარია, გამოიყენებოდა იმის გამოსათვლელად, თუ რამდენი ენერჯია უნდა იყოს გამოსხივებული გრავიტაციული ტალღების მეშვეობით. ენერჯიის დაკარგვა იწვევს სისტემის ორბიტალური პერიოდის შემცირებას და მისი გაზომვით, გრავიტაციული ტალღების არსებობა არაპირდაპირი გზით დადასტურებული იქნა.

თუმცა, უფრო მნიშვნელოვანი აღმოჩენა მოხდა 2015 წელს, როდესაც ლაზერული ინტერფერომეტრის გრავიტაციული ტალღების ობსერვატორიამ (LIGO), რომელიც მდებარეობს ჰენფორდსა და ლივინგსტონში (ორივე აშშ-ში), პირველად აღმოაჩინა გრავიტაციული ტალღები, რომლებიც გამოსხივდება შავი ხვრელების ორმაგი სისტემის შერწყმის შედეგად. ჰულს-ტეილორის ბინარული შემთხვევისგან განსხვავებით, რომელიც ბინარების თვისებებს იყენებდა გრავიტაციული ტალღების შესახებ ინფორმაციის მისაღებად, LIGO-ს აღმოჩენამ გრავიტაციული ტალღები გამოიყენა მათი წყაროს თვისებების შესასწავლად. ამან გახსნა სრულიად ახალი ფანჯარა ფიზიკოსებისთვის და კაცობრიობამ შეიძინა სრულიად ახალი ინ-

სტრუმენტი სამყაროზე დასაკვირვებლად და მის შესასწავლად. LIGO-ს მიერ BBH-ის შერწყმების შედეგად გაჩენილი გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენას მოჰყვა LIGO-ს და VIRGO-ს (მდებარეობს კასინაში, იტალია) მიერ ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავის (BNS) შერწყმის შედეგად წარმოქმნილი გრავიტაციული ტალღების დამზერა. ამ უზარმაზარმა აღმოჩენამ დაიწყო ახალი ერა მულტიმესენჯერული ასტრონომიაში.

ბევრ თეორიას შეუძლია შექმნას BBH და BNS სისტემები, რომლებიც ასხივებენ LIGO-Virgo-ს მიერ აღმოჩენილ გრავიტაციულ ტალღებს. ყველაზე ცნობილი ასეთი მოდელებია: იზოლირებული ორმაგი სისტემები, რომლებიც წარმოიქმნება ერთიანი გარსის განვითარების მეშვეობით ან ქიმიურად ერთგვაროვანი ევოლუციის გზით; ასევე დინამიური პროცესები მკვირივ ვარსკვლავურ კლასტერებში. თუმცა, LIGO-ს მიერ დაკვირვებული ორმაგი სისტემების შერწყმის მაღალი სიხშირეების ახსნა, მოითხოვს გარკვეული დაშვებების გაკეთებას ყველა არსებულ მოდელში. გარდა ამისა, რამდენიმე მოვლენა შეიცავდა კომპაქტურ ობიექტებს მასის ისეთ დიაპაზონში, რომელიც აკრძალულია მასიური ვარსკვლავების ევოლუციის ამჟამად მიღებულ თეორიებში. ამგვარად, LIGO-ს მიერ აღმოჩენილი მრავალი კომპაქტური ობიექტის წარმომავლობა ჯერ კიდევ გაურკვეველი რჩება. ამიტომ, საჭიროა ისეთი ახალი მოდელების გამოგონება, რომლებიც შეძლებენ ახსნან LIGO-ს მიერ დაფიქსირებული სიგნალები.

თანამედროვე ფიზიკა ეფუძნება ფარდობითობის სპეციალურ თეორიას. მაგრამ არის შეუთავსებლობა ფარდობითობის ზოგად თეორიას, რომელიც აღწერს გრავიტაციულ ძალას და მოიცავს ფარდობითობის სპეც თეორიას, და კვანტურ თეორიას შორის, რომელიც აღწერს სხვა სამ ფუნდამენტურ ძალას - ელექტრომაგნიტურს, სუსტ და ძლიერ ბირთვულ ურთიერთქმედებებს - გაერთიანებულებს ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტულ მოდელში (SM), რომელიც ასევე რელატივისტური თეორიაა. SM ემყარება ველის კვანტურ თეორიას და ყველა ფუნდამენტური ნაწილაკი წარმოდგენილია როგორც რხევები შესაბამის კვანტურ ველებში. ნახევარის ჯერადი სპინის მქონე ნაწილაკები - ფერმიონები - მატერიის ნაწილაკებია; ყალიბური ბოზონები მთელი სპინით, ურთიერთქმედების მატარებლები არიან და ერთადერთი სკალარული ნაწილაკი არის ჰიგსის ბოზონი. კვანტური ქრომოდინამიკა (QCD) $SU(3)$ სიმეტრიის ჯგუფით, განსაზღვრავს ძლიერ ურთიერთქმედებას კვარკებსა და გლუონებს შორის. მაშინ როცა ელექტროსუსტი (EW) თეორია აერთიანებს კვანტურ ელექტროდინამიკას (QED) და სუსტ ძალას $SU(2) \times U(1)$ სიმეტრიით. ჰიგსის მექანიზმი ანიჭებს მასას ყველა ფუნდამენტურ ნაწილაკს.

თუმცა, არ არსებობს გრავიტაციის კარგად განსაზღვრული კვანტური აღწერა. ყველა კვანტური ველი, რომელიც შეესაბამება SM-ის ფუნდამენტურ ნაწილაკებს, აგებულია სივრცე-დროში. მაგრამ, რადგან ზოგადი ფარდობითობის მიხედვით, გრავიტაცია არ არის რეალური „ძალა“, არამედ არის თავად სივრცე-დროის გამრუდება, ძნელია სათანადოდ განსაზღვროს შესაბამისი კვანტური ველი. ჰიპოთეტური უმასო 2-სპინის მქონე ბოზონი, რომელსაც გრავიტონი ეწოდება, მიჩნეულია, რომ არის გრავიტაციის კვანტი. თუმცა, ზოგად ფარდობითობაში რენორმალიზაციის მათემატიკური პრობლემის გამო, ჯერ კიდევ არ არსებობს გრავიტონების ველის სრული კვანტური თეორია.

გარდა ზოგადი ფარდობითობის შეუთავსებლობისა ველის კვანტურ თეორიასთან, ასევე არსებობს კოსმოლოგიური დაკვირვებები, რომელთა ახსნა ჯერ კიდევ შეუძლებელია ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტულ მოდელში. ფართოდ მიღებული სტანდარტული კოსმოლოგიური მოდელი სახელწოდებით ლამბდა ცივი ბნელი მატერია, მოკლედ Λ CDM, ეფუძნება ზოგად ფარდობითობას და ამბობს, რომ სამყარო დიდი აფეთქების შედეგად გაჩნდა სინგულარული წერტილიდან და მას შემდეგ განუწყვეტლივ ფართოვდება. Λ CDM-ისა და კოსმოლოგიური დაკვირვებების მიხედვით, სამყაროს მთლიანი ენერგიის სიმკვრივის დაახლოებით 68% შედგება ბნელი ენერგიისგან (DE), რომელიც დაკავშირებულია Λ კოსმოლოგიურ

მუდმივასთან. დაახლოებით 27% მოდის ბნელ მატერიაზე (DM) და ჩვენი ჩვეულებრივი ბარიონული მატერია შეადგენს მხოლოდ 5%-ს. DE და DM-ის ნამდვილი ბუნება გაურკვეველია. DE გაიგივებულია ვაკუუმის ენერჯიასთან და ითვლება, რომ პასუხისმგებელია სამყაროს გაფართოებაზე. მაგრამ დიდი განსხვავებაა ვაკუუმის ენერჯიის გაზომილ მნიშვნელობასა და მის თეორიულ პროგნოზს შორის. ითვლება, რომ DM შედგება სუსტად ურთიერთქმედი მასიური ნაწილაკებისგან, მაგრამ არცერთ ექსპერიმენტს ჯერ არ შეუძლია ბნელი მატერიის რომელიმე მოდელის დადასტურება. მაშასადამე, ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტული მოდელი ნამდვილად არასრულია, რადგან ის აღწერს მხოლოდ ჩვეულებრივ მატერიას და არ ითვალისწინებს სამყაროს დანარჩენ 95%-ს.

სწორედ ამიტომ, ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტული მოდელი შეიძლება განზოგადდეს სხვა უფრო ფართო თეორიებში, როგორებიცაა, სუპერსიმეტრია, დიდი გაერთიანების თეორია, სიმების თეორია და სხვა. ერთ-ერთი შესაძლო განზოგადება არის მარცხენა-მარჯვენა სიმეტრიის მოდელების კლასი. SM არის ლორენც ინვარიანტული თეორია და დენების წევრები ნებადართულია ჩაიწეროს ისე, რომ უცვლელი დარჩეს ლორენცის გარდაქმნების დროს. წევრები, რომლებიც აკმაყოფილებენ ასეთ ინვარიანტობას შეიძლება იყოს სკალარული, ფსევდოსკალარული, ვექტორული, აქსიალური ან ტენზორული ტიპის. სუსტი ურთიერთქმედება არღვევს ლუწობას და SM ექსპერიმენტულად დადასტურებულია, რომ არის ქირალური თეორია, სადაც დენებს აქვთ "ვექტორს გამოკლებული აქსიალური ვექტორის"(V-A) ტიპი. ეს ნიშნავს, რომ სუსტ ურთიერთქმედებაში მონაწილეობენ მხოლოდ მარცხენა ნაწილაკები და მარჯვენა ანტინაწილაკები. ეს კი გულისხმობს, რომ ლუწობა ჩვენი სამყაროს სიმეტრია არ არის. თუმცა, შეიძლება შემოვიტანოთ ნაწილაკების სარკული სექტორი, რომლებსაც აქვთ მარჯვენა ტიპის ურთიერთქმედება და აღადგინენ ლუწობის შენახვას გლობალურად. მაგრამ სარკული სექტორი უხილავი უნდა იყოს ან გააჩნდეს ძალიან სუსტი ურთიერთქმედება ჩვეულებრივ მატერიასთან, რადგან ნაწილაკების ექსპერიმენტებში ჩვენ მათ ვერ ვხედავთ.

სარკული მატერიის ან სარკული სამყაროს მოდელის მიხედვით, სტანდარტული მოდელის თითოეულ ნაწილაკს ჰყავს თავისი სარკული პარტნიორი საპირისპირო ქირალიობით. სარკული სექტორის ნაწილაკების ფიზიკა სტანდარტული მოდელის მსგავსია, იმ განსხვავებით, რომ ქირალობა საპირისპიროა; მარჯვენა ნაწილაკები მონაწილეობენ სარკულ სუსტ ურთიერთქმედებაში და დენებს აქვთ (V+A) სახე. სარკული ნაწილაკები უხილავია ჩვეულებრივი დამკვირვებლისთვის და პირიქით. სხვაგვარად, შეიძლება წარმოვიდგინოთ თეორია ორი იდენტური ყალიბური ჯგუფით $G \times G'$ და ნაწილაკების იდენტური სტრუქტურით. ასე რომ, თუ G არის ჩვეულებრივი სამყაროს სიმეტრიის ჯგუფი, მაგ., $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ სტანდარტულ მოდელში, სიმეტრიის ჯგუფი $G' = SU(3)' \times SU(2)' \times U(1)'$ შეესაბამება სარკულ სამყაროს. სარკული ნაწილაკები ჩვეულებრივი მატერიის მიმართ სინგლეტებია და პირიქით, ჩვეულებრივი ნაწილაკები სარკული ნაწილაკების მიმართაა სინგლეტები.

მაგრამ, რადგან გრავიტაცია ნაწილაკების ფიზიკის თეორიაში არ შედის, ის შეიძლება თანაბრად აღიქმებოდეს ჩვეულებრივი და სარკული ნაწილაკებისთვის. ამგვარად, ამ ორ სამყაროს შორის ურთიერთქმედების ერთადერთი საშუალება შეიძლება იყოს გრავიტაცია და შესაძლოა სხვა უცნობი სუსტი ძალები. ალტერნატიულად, სარკული სამყაროს მოდელი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ხუთგანზომილებიანი თეორია პარალელური 3D-ბრანებით, რომლებიც განლაგებულია ორ ფიქსირებულ წერტილში; ჩვეულებრივი მატერია ლოკალიზებულია მარცხენა ბრანაზე და სარკული მატერია ლოკალიზებულია მარჯვენა ბრანაზე, ხოლო გრავიტაციას შეუძლია თავისუფლად გაიაროს ამ ორ ბრანას შორის.

თუ სარკული სექტორი მართლაც არსებობს, ისიც, ჩვეულებრივ მატერიასთან ერთად, ასევე შეიქმნა დიდი აფეთქების შედეგად. თუმცა, სარკულ სამყაროს უფრო დაბალი ტემპერატურა უნდა ჰქონდეს, რადგან დიდი აფეთქების ნუკლეოსინთეზი ადებს შეზღუდვას ჩვეულებრივი და სარკული ნაწილაკების რაოდენობას. ამრიგად, ამ ორი სამყაროს კოსმოლოგიური

ევოლუცია არ შეიძლება იყოს იდენტური. სარკული სამყაროს დაბალი ტემპერატურა შეიძლება მიუთითებდეს, რომ ბარიონული ასიმეტრია იქ უფრო მაღალია, ვიდრე ჩვეულებრივ სამყაროში. ბარიონ-ლექტოგენეზის გარკვეულ მექანიზმს შეუძლია მოგვცეს ~ 5 -ჯერ უფრო დიდი ბარიონების რაოდენობის სიმკვრივე სარკულ სამყაროში ჩვეულებრივ სამყაროსთან შედარებით. თუ გავიხსენებთ განსხვავებას ბნელი მატერიისა და ჩვეულებრივი მატერიის ენერგიების სიმკვრივეებს შორის, სარკული მატერია შეიძლება გამოდგეს ბნელ მატერიადა და სრულად ახსნას იგი.

დაბალი საწყისი ტემპერატურა გავლენას მოახდენს სარკული სამყაროს კოსმოლოგიურ ევოლუციაზე. რეალურად, სარკულ სექტორში, სავარაუდოდ, დომინირებს ჰელიუმი. დაბალი ტემპერატურის გამო ყველა კოსმოლოგიური პროცესი უფრო ადრე ხდება. მატერია-რადიაციის გამოყოფა ხდება ადრეულ პერიოდში და ვარსკვლავების ფორმირებაც უფრო ადრე იწყება. გარდა ამისა, ვარსკვლავი იბადება მაღალი საწყისი მასით და, შესაბამისად, უფრო სწრაფად ვითარდება. შედეგად, სარკულ სამყაროში მასიური ვარსკვლავების ევოლუციის საბოლოო პროდუქტები - ნეიტრონული ვარსკვლავები და შავი ხვრელები უფრო დიდი რაოდენობით უნდა იყოს.

ამ ნაშრომში განვიხილავთ შესაძლებლობებს, რომ LIGO-Virgo დეტექტორების მიერ დაფიქსირებული გრავიტაციული ტალღები შესაძლოა სარკული სამყაროდან მოდიოდეს. როგორც ზემოთ აღინიშნა, ორმაგი კომპაქტური ობიექტების შერწყმის სიხშირე, რომელიც გამოითვლება LIGO-ს დაკვირვებებზე დაყრდნობით, უფრო მაღალია, ვიდრე იყო ნაწინასწარმეტყველები არსებული მოდელების უმრავლესობაში. სარკული სამყარო, კომპაქტური ობიექტების დიდი სიმრავლით, შეიძლება იყოს კარგი კანდიდატი შერწყმის მაღალი მაჩვენებლების ასახსნელად. მაგრამ რაც უფრო მნიშვნელოვანია, აქამდე გამოვლენილი 90 გრავიტაციული ტალღიდან მხოლოდ ერთს ახლდა ელექტრომაგნიტური გამოსხივება - გამა-გამოსხივების აფეთქება. ეს უცნაურია შედეგია, რადგან მოსალოდნელია, რომ ასეთი კატაკლიზმური მოვლენები სხვა ტიპის რადიაციასაც უნდა ასხივებდეს. თუმცა, თუ კომპაქტური ობიექტების შერწყმა სარკულ სამყაროში მოხდება, გრავიტაციის გარდა ნებისმიერი ტიპის გამოსხივება ჩვენთვის უხილავი დარჩება. სარკული ფოტონები და ნეიტრინოები აი იურთიერთქმედებს ჩვენს დეტექტორებთან, ხოლო გრავიტაციული ტალღების დაკვირვება შესაძლებელი იქნება. გარდა ამისა, მასიური ვარსკვლავების ევოლუციის მოდელები წინასწარმეტყველებენ მასური ღრეჩოს არსებობას; ზეახალის აფეთქებები ვერ წარმოქმნიან გარკვეული მასის მქონე შავ ხვრელებს. თუმცა, LIGO-ს მონაცემები შეიცავს ბევრ ობიექტს, რომელთა მასა ამ აკრძალულ რეგიონებში მდებარეობს, რისი ახსნაც სტანდარტული მოდელების მეშვეობით რთულია. სარკული სამყაროს მოდელი შესაძლოა ხსნიდეს ამ საკითხსაც.

მომდევნო თავებში უფრო დეტალურად განვიხილავთ ფარდობითობის თეორიას (2), გრავიტაციული ტალღების თეორიულ ასპექტებს (3), მათ აღმოჩენასა და არსებულ მონაცემებს (4); შემდეგ ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტულ მოდელს და მის განზოგადოებას სარკული სამყაროს მოდელში (5). და ბოლოს, წარმოდგენილია ანალიზი იმის შესახებ, თუ როგორ შეიძლება იყოს დაკავშირებული LIGO-ს აღმოჩენები სარკულ სამყაროსთან (6). შეჯამება და დასკვნა მოცემულია მე-(7) თავში.

ნაშრომი ეფუძნება შრომებს, რომლებიც გამოქვეყნდა დოქტორანტურაზე სწავლის პერიოდში: [1-5].

თავი 2

ფარდობითობის თეორია

ამ თავში განხილულია აინშტაინის ფარდობითობის თეორია. მსჯელობა მიჰყვება შონ კეროლის წიგნს *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity* [8]. ყველგან სადაც სხვაგვარად არ არის მითითებული, იგულისხმება, რომ $\hbar = c = 1$.

2.1 ფარდობითობის სპეციალური თეორია

ნიუტონის მექანიკა მოქმედებს ევკლიდურ გეომეტრიაში, სადაც გვაქვს ერთი დროითი t და სამი სივრცული კოორდინატი (x, y, z) . ახალ კოორდინატთა სისტემაზე გადასვლისას, რომელიც მოძრაობს V სიჩქარით x მიმართულებით, კოორდინატები ტრანსფორმირდებიან გალილეის გარდაქმნის წესების მიხედვით:

$$\begin{aligned}t' &= t \\x' &= x - Vt \\y' &= y \\z' &= z\end{aligned}\tag{2.1}$$

ორ სივრცულ წერტილს შორის მანძილი არის ინვარიანტი,

$$\Delta l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 .\tag{2.2}$$

ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში, ობიექტებს გააჩნიათ მაქსიმალური დასაშვები სიჩქარე - სინათლის სიჩქარე c . ევკლიდური გეომეტრიის ნაცვლად, გამოყენებულია ოთხ-განზომილებიანი მინკოვსკის სივრცე-დრო, სიგნატურით $(-1, 1, 1, 1)$ და ახალ ინვარიანტს ჰქვია ინტერვალი:

$$(\Delta s)^2 = -(c\Delta t)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 .\tag{2.3}$$

ინტერვალი შეიძლება იყოს უარყოფითი, ნულის ტოლი და დადებითი, რაც შეესაბამება, შესაბამისად, დროისმაგვარ, სინათლისმაგვარ და სივრცისმაგვარ ტრაექტორიებს. გალილეის გარდაქმნები შეცვლილია ლორენცის გარდაქმნებით:

$$\begin{aligned}t' &= \gamma(t - vx/c^2) \\x' &= \gamma(x - vt) \\y' &= y \\z' &= z ,\end{aligned}\tag{2.4}$$

სადაც

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \quad (2.5)$$

სივცრე-დროის ოთხ-ვექტორები ჩაიწერება როგორც:

$$x^\mu : \begin{cases} x^0 = ct \\ x^1 = x \\ x^2 = y \\ x^3 = z . \end{cases} \quad (2.6)$$

და მეტრიკა მოცემულია ტენზორით:

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \quad (2.7)$$

მისი მეშვეობით ინტერვალი მოიცემა როგორც:

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu . \quad (2.8)$$

საკუთარი დრო, ოთხ-სიჩქარე და ოთხ-იმპულსი ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$d\tau = \int \sqrt{-\eta_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\lambda} \frac{dx^\nu}{d\lambda}} d\lambda , \quad (2.9)$$

$$U^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau} , \quad (2.10)$$

$$p^\mu = mU^\mu , \quad (2.11)$$

და ენერგია უდრის

$$E = \sqrt{m^2 + \mathbf{p}^2} , \quad (2.12)$$

სადაც m ობიექტის მასაა და $\mathbf{p}^2 = \delta_{ij} p^i p^j$ ჩვეულებრივი 3-იმპულსი. სისტემა, რომელიც შედგება მრავალი ნაწილაკისაგან ასტროფიზიკაში განიხილება როგორც იდეალური სითხე, რომელიც აღიწერება ენერგია-იმპულსის ტენზორით:

$$T_{\text{dust}}^{\mu\nu} = p^\mu N^\nu = mnU^\mu U^\nu = \rho U^\mu U^\nu , \quad (2.13)$$

სადაც ρ და p , შესაბამისად, ენერგიის სიმკვრივე და წნევაა. უძრავ სისტემაში იგი ჩაიწერება როგორც:

$$T^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

და ის არის შენახვადი სიდიდე

$$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0 . \quad (2.15)$$

2.2 ფარდობითობის ზოგადი თეორია

ფარდობითობის ზოგადი თეორიის თანხმად, გრავიტაცია არის სივრცე-დროის გამრუდება და ინტერვალი ჩაიწერება როგორც:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad (2.16)$$

სადაც $g_{\mu\nu}$ არის გამრუდებული სივრცე-დროის მეტრიკული ტენზორი. კერძო წარმოებულის ცნება განზოგადოებულია კოვარიანტული წარმოებულის სახით:

$$\nabla_\mu V^\nu = \partial_\mu V^\nu + \Gamma_{\mu\lambda}^\nu V^\lambda. \quad (2.17)$$

სადაც V^ν რაიმე ვექტორია და კრისტოფელის სიმბოლოს აქვს სახე:

$$\Gamma_{\mu\nu}^\sigma = \frac{1}{2} g^{\sigma\lambda} (\partial_\mu g_{\nu\lambda} + \partial_\nu g_{\lambda\mu} - \partial_\lambda g_{\mu\nu}). \quad (2.18)$$

გოდებშიური წირის განტოლება პარამეტრული წირის $x^\mu(\lambda)$ მიმართ ჩაიწერება როგორც:

$$\frac{dx^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma_{\nu\sigma}^\mu \frac{dx^\nu}{d\lambda} \frac{dx^\sigma}{d\lambda} = 0. \quad (2.19)$$

აინშტაინის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}. \quad (2.20)$$

$R_{\mu\nu} = R^\sigma_{\mu\sigma\nu}$ არის რიჩის ტენზორი, რომელიც მიიღება რიჩანის ტენზორისგან

$$R^\mu_{\alpha\nu\beta} = \partial_\nu \Gamma_{\alpha\beta}^\mu - \partial_\beta \Gamma_{\alpha\nu}^\mu + \Gamma_{\alpha\beta}^\sigma \Gamma_{\sigma\nu}^\mu - \Gamma_{\alpha\nu}^\sigma \Gamma_{\sigma\beta}^\mu \quad (2.21)$$

და რიჩის სკალარი უდრის $R = R^\mu_{\mu} = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$. Λ კოსმოლოგიური მუდმივაა, რომელიც სამყაროს გაფართოებას უზრუნველყოფს.

აინშტაინის განტოლების ყველაზე ცნობილი არატრივიალური ამონახსნი არის სფერული სიმეტრიის სტატიკური ვაკუუმური ამონახსნი - შვარშილდის მეტრიკა:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2, \quad (2.22)$$

სადაც

$$d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2, \quad (2.23)$$

და $r_s = 2GM$ შვარშილდის რადიუსია. ამ მეტრიკას გააჩნია ორი სინგულარული წერტილი. $r = 0$ წერტილში ჭეშმარიტი სინგულარობაა, სადაც გამრუდება უსასრულო ხდება. $r_s = 2GM$ წერტილი კოორდინატის სინგულარობაა და მისი გაქრობა შეიძლება, თუმცა იგი მაინც რჩება საინტერესო წერტილად. შვარშილდის მეტრიკა ვარაუდობს კომპაქტური ობიექტის, შავი ხვრელის არსებობას, რომლის შვარშილდის რადიუსი ამ ობიექტის გარეთ მდებარეობს. მას მოვლენათა ჰორიზონტი ეწოდება და ეს არის არე, რომლის შიგნითაც სივრცე-დროის გამრუდება იმდენად დიდია, რომ სინათლიც კი ვერ აღწევს გარეთ. შავი ხვრელების არსებობა საბოლოოდ დადასტურდა M87 გალაქტიკის ცენტრალური ზემასიური შავი ხვრელის ფოტოს გადაღებით.

აინშტაინის განტოლების მეორე მნიშვნელოვანი ამონახსნია რობერტსონ-ვოკერის მეტრიკა

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right], \quad (2.24)$$

რომელიც აღწერს იზოტროპულ და ერთგვარობან სამყაროს. $a(t)$ უგანზომილებო მასშტაბური ფაქტორია, k სიმრუდის მუდმივა, რომელიც იღებს მნიშვნელობებს $+1, -1, 0$, შესაბამისად ჩატეკიტი, ღია და ბრტყელი გეომეტრიებისთვის. აინშტაინის განტოლებებიდან გამომდინარეობს ფრიდმანის განტოლებები:

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.25)$$

და

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p), \quad (2.26)$$

სადაც H ჰაბლის პარამეტრია. სამყაროს კრიტიკული სიმკვრივე განსაზღვრული როგორც სიდიდე, რომლისთვისაც $k = 0$ როცა $\Lambda = 0$, და უდრის

$$\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (2.27)$$

კოსმოლოგიური სიმკვრივის პარამეტრი Ω_{tot} განმარტებულია როგორც ენერჯის სიმკვრივის ფარდობა კრიტიკულ სიმკვრივესთან

$$\Omega_{\text{tot}} = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (2.28)$$

და ფრიდმანის განტოლება (2.25) გადაიწერება როგორც

$$\Omega_{\text{tot}} - 1 = \frac{k}{H^2 a^2}. \quad (2.29)$$

ვხედავთ, რომ როცა $\Omega_{\text{tot}} > 1$, $k = +1$ და სამყარო ჩაკეტილია, როცა $\Omega_{\text{tot}} < 1$, $k = -1$ და სამყარო ღიაა, და როცა $\Omega_{\text{tot}} = 1$, $k = 0$, და სამყარო ბრტყელია.

ხშირად საჭიროა სიმკვრივის პარამეტრში განსხვავებული წვლილის გამოყოფა. აქედან გამომდინარე, მოსახერხებელია დღევანდელი სიმკვრივის პარამეტრების განსაზღვრა წნევის არმქონე მატერიისთვის Ω_m , რომელიც შედგება ბარიონული მატერიისგან Ω_b და ბნელი მატერიისგან Ω_{DM} , რელატივისტური ნაწილაკები Ω_r - ფოტონები და ნეიტრინოები და ვაკუუმის ენერჯის წვლილი $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H^2$. ფრიდმანის განტოლება (2.29) იღებს სახეს:

$$\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda - 1 = \frac{k}{H_0^2 a_0^2}, \quad (2.30)$$

სადაც 0 მიუთითებს სიდიდის დღევანდელ მნიშვნელობებზე. ამრიგად, მატერიის, რელატივისტური ნაწილაკების და ვაკუუმის სიმკვრივეების ჯამი განსაზღვრავს გამრუდების საერთო ნიშანს.

თავი 3

გრავიტაციული ტალღების თეორია

ფარდობითობის ზოგადი თეორია ასევე ვარაუდობს გრავიტაციული გამოსხივების არსებობას. აინშტაინის განტოლებები, იმ დაშვებით, რომ ველი სუსტი და სტატიკურია (ანუ ყველა დროთი წარმოებულები ნულია) და ნაწილაკები ნელა მოძრაობენ, აღადგენს ნიუტონის ფიზიკას. თუმცა, თუ განვიხილავთ სუსტ ველს, რომელიც შეიძლება დროში იცვლებოდეს, ზოგადი ფარდობითობა პროგნოზირებს ფენომენს, რომელიც არ არის ნიუტონის ფიზიკაში: გრავიტაციული ტალღებს.

გრავიტაციული ტალღების განტოლებების მისაღებად, უნდა დავუშვათ, რომ ველი სუსტია, ჩავწეროთ აინშტაინის განტოლებები ამ ზღვარში და ამოხსნათ იგი სათანადო ყალიბში. გრავიტაციული ველის სისუსტე ნიშნავს, რომ მეტრიკა შეიძლება დაიშალოს როგორც მინკოვსკის ბრტყელი მეტრიკას პლუს მცირე შემფოთება,

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1. \quad (3.1)$$

თუ დავითვლით ამ მიახლოებაში კრისტოფელის სიმბოლოს, რიჩის ტენზორს და რიჩის სკალარს, აინშტაინის ტენზორს ექნება სახე:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}R = \frac{1}{2}(\partial_\sigma\partial_\nu h^\sigma_\mu + \partial_\sigma\partial_\mu h^\sigma_\nu - \partial_\mu\partial_\nu h - \square h_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu}\partial_\lambda\partial_\sigma h^{\lambda\sigma} + \eta_{\mu\nu}\square h). \quad (3.2)$$

მეტრიკა შეიძლება დაიშალოს კვალის შემცველ და კვალის არ მქონდე ნაწილებად

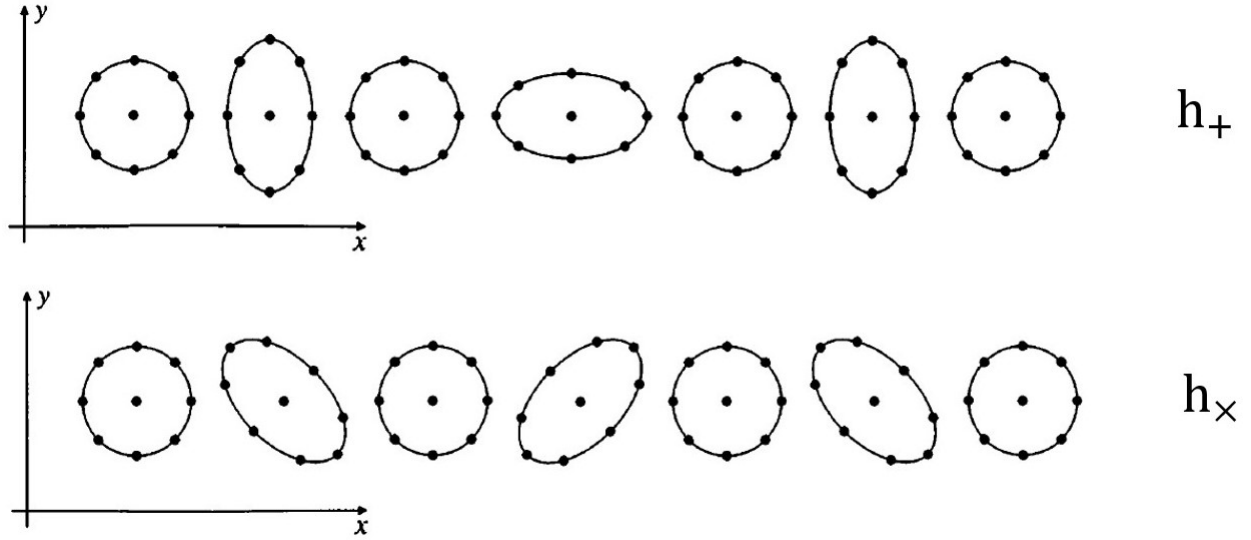
$$\begin{aligned} \Psi &= -\frac{1}{6}\delta^{ij}h_{ij} \\ s_{ij} &= \frac{1}{2}\left(h_{ij} - \frac{1}{3}\delta^{kl}h_{kl}\delta_{ij}\right). \end{aligned} \quad (3.3)$$

სათანადო გარდაქმნებით და განვი, კვალის არმქონე ყალიბში გადასვლით (transverse-traceless gauge), მეტრიკის შემფოთება მიიღებს ფორმას:

$$h_{\mu\nu}^{\text{TT}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & \\ 0 & & 2s_{ij} & \\ 0 & & & \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

და მოძრაობის განტოლებას ექნება სახე:

$$\square h_{\mu\nu}^{\text{TT}} = 0. \quad (3.5)$$



სურ 3.1: z მიმართულებით მოძრავი გრავიტაციული ტალღის "+" და " \times " პოლარიზაციების ეფექტი წრიულად განლაგებულ ნაწილაკებზე.

ბრტყელი ტალღის ამონახსნის ჩაწერით

$$h_{\mu\nu}^{\text{TT}} = C_{\mu\nu} e^{ik_\sigma x^\sigma}, \quad (3.6)$$

და ყალიბის განვივების პირობის გათვალისწინებით

$$k_\mu C^{\mu\nu} = 0, \quad (3.7)$$

მივიღებთ,

$$C_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{11} & C_{12} & 0 \\ 0 & C_{12} & -C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

ამგვარად, გრავიტაციულ ტალღას გააჩნია ორი პოლარიზაცია და მისი მოქმედება საცდელ ნაწილაკებზე იწვევს ოსცილაციებს "+" და " \times " ფორმით, რაც მოცემულია (3.1) სურათზე.

გრავიტაციული ტალღის გამოსხივების ყველაზე გავრცელებული წყაროა ვარსკვლავების ორმაგი სისტემა, მასებით m_1 და m_2 , რომლებიც ბრუნავენ ერთმანეთის გარშემო $X - Y$ სიბრტყეში [21] (როგორც არის ნაჩვენები სურათ (3.2)-ზე). თუ დავუშვებთ, რომ ვარსკვლავების რადიუსი მცირეა ვარსკვლავებს შორის მანძილთან (r) შედარებით, მაშინ სისტემის მასის განაწილების ფუნქცია მოიცემა დირაკის ფუნქციით

$$\rho(x, y, z) = m_1 \delta(x - x_1) \delta(y - y_1) \delta(z) + m_2 \delta(x - x_2) \delta(y - y_2) \delta(z). \quad (3.9)$$

და კვადრუპოლურ მომენტს აქვს ასეთი სახე:

$$Q_{ij} = \int d^3x \rho(\mathbf{x}) \left(x^i x^j - \frac{1}{3} r^2 \delta_{ij} \right). \quad (3.10)$$

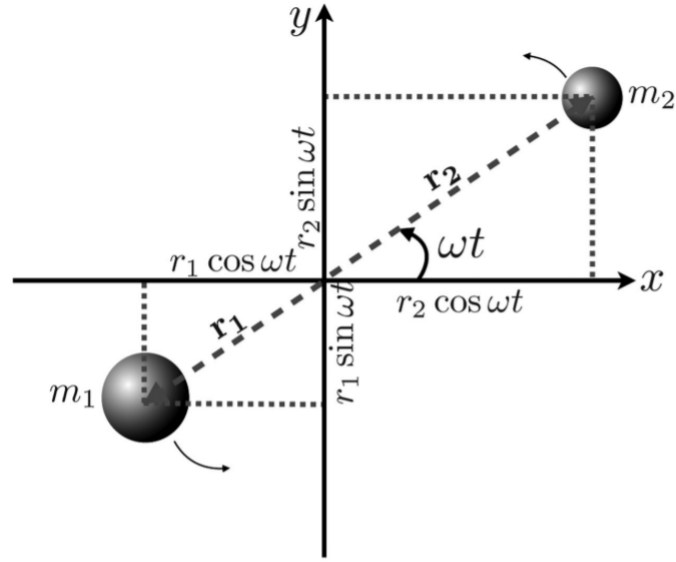


Figure A1 A two-body system, m_1 and m_2 orbiting in the xy -plane around their C.O.M.

სურ 3.2: სურათი აღებულია [21]-დან

გრავიტაციული ტალღის დაძაბულობის ტენზორი მოიცემა როგორც:

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4 d_L} \frac{d^2 Q_{ij}}{dt^2} = \frac{4G\mu}{c^4 d_L} r^2 \omega^2 \begin{pmatrix} -\cos 2\omega t & -\sin 2\omega t & 0 \\ -\sin 2\omega t & \cos 2\omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.11)$$

საბოლოოდ, გრავიტაციული ტალღის სიხშირის ცვლილება დროში ჩაიწერე შემდეგი სახით:

$$\dot{\omega} = \frac{96}{5} \frac{G^{5/3}}{c^5} \mu M^{2/3} \omega^{11/3} = \frac{96}{5} (G\mathcal{M}_c)^{5/3} \omega^{11/3}, \quad (3.12)$$

სადაც $\mathcal{M}_c = (\mu^3 M^2)^{1/5}$ არის ე.წ. ჩირპ-მასა (chirp-mass) და μ სისტემის დაყვანილი მასა. (3.12)-ის ამონახსნი გვაძლევს გრავიტაციული ტალღის ფორმას.

თავი 4

გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენა

4.1 გრავიტაციული ტალღების დეტექტორები

გრავიტაციული ტალღები (GW) პირველად 2015 წელს დაფიქსირდა. მას შემდეგ დაახლოებით 100 მოვლენა იქნა დამზერილი LIGO, Virgo და KAGRA ობსერვატორიების მიერ, რომლებიც მუშაობდნენ საკმარისი მგრძობელობით.

ლაზერული ინტერფერომეტრის გრავიტაციული ტალღების ობსერვატორია (LIGO) არის ორი დეტექტორის სისტემა აშშ-ში, რომელიც შექმნილია GW-ების გამოსავლენად. ერთი დეტექტორი მდებარეობს ჰენფორდში, ვაშინგტონი, ხოლო მეორე ლივინგსტონში, ლუიზიანაში. მათ დაიწყო დაკვირვება 2002 წელს, მაგრამ მხოლოდ 2015 წელს განახლების შემდეგ (Advanced LIGO) მიაღწიეს საკმარის მგრძობელობას რათა დაეფიქსირებინათ გრავიტაციული ტალღები. VIRGO არის ასევე GW ობსერვატორია, რომელიც მდებარეობს იტალიაში ქალაქ კასშინაში. Advanced Virgo-ზე განახლების შემდეგ იგი შეუერთდა Advanced LIGO-ს, რათა 2017 წელს გაეკეთებინა მისი პირველი აღმოჩენა. Kamioka Gravitational Wave Detector (KAGRA) აშენდა მიწისქვეშეთში იაპონიაში, კამიოკას ობსერვატორიაში. იგი ამოქმედდა 2020 წლის თებერვალში, მაგრამ პანდემიის გამო ორ თვეში შეაჩერა მუშაობა.

სამივე ობსერვატორია არის ინტერფერომეტრი და ისინი დაფუძნებულია მუშაობის ერთნაირ პრინციპზე. თითოეული დეტექტორი შედგება რამდენიმე კილომეტრიანი ორი პერპენდიკულარული მკლავისგან. ლაზერის ერთი სხივი იყოფა ორი მკლავის გადაკვეთაზე, სინათლე აირეკლება მკლავების ბოლო წერტილებიდან და ბრუნდება გადაკვეთის ადგილზე, სადაც ისინი განიცდიან ინტერფერენციას. თუ ორივე მკლავის სიგრძე უცვლელი დარჩა, მაშინ ორი გაერთიანებული სინათლის ტალღა დესტრუქციულად ერევა ერთმანეთს და დეტექტორის გამომავალზე სინათლე არ შეინიშნება. თუმცა, თუ GW გაივლის დეტექტორში, აინშტაინის ფარდობითობის ზოგადი თეორიის მიხედვით, მკლავის შიგნით სივრცე დრო მრუდდება; ერთი მკლავი იქნება გაჭიმული, მეორე შეკუმშული და სინათლის ორი სხივი სრულად აღარ აბათილებს ერთმანეთს, რაც იძლევა სინათლეს დეტექტორის გამოსასვლელზე. ეს სინათლე შეიცავს ინფორმაციას დეტექტორის მკლავების სიგრძის ფარდობითი ცვლილების შესახებ და იძლევა გრავიტაციული ტალღის ფორმის რეკონსტრუქციის საშუალებას.

თუმცა, GW-ის გამოვლენა ტექნიკურად ძალიან რთულია. მოსალოდნელია, რომ GW-ის გავლა შეცვლის მკლავის სიგრძეს პროტონის დიამეტრის დაახლოებით 1/1000-ით. ექვივალენტურად, ეს არის მანძილის ფარდობითი ცვლილება დაახლოებით ერთი ნაწილით 10^{21} -ში. დედამიწაზე ბევრმა რამემ შეიძლება გამოიწვიოს ასეთი მცირე ცვლილება, ამიტომ უნდა შეგვეძლოს გამოვაცალკეოთ ყველა ხმაური, რომელიც ამახინჯებს GW სიგნალს. დეტექტორების ოპტიკური კომპონენტები იმყოფება ულტრამაღალი ვაკუუმის პირობებში, რათა უზრუნველყოს, რომ სინათლის სხივი მოძრაობდეს სწორ ხაზზე და არ არის იქნას გადახრი-

ლი მკლავში ტემპერატურის მცირე განსხვავებების გამო. სარკეების მდებარეობა ადაპტირებულია ისე, რომ გაითვალისწინოს ხმელეთის ხმაური, ადგილობრივი ვიბრაციები, სეისმური აქტივობები და შხისა და მთვარის მოქცევის ძალის ცვლილებები. წლების განმავლობაში ხმაურის გამოცალკევების და სიგნალის ანალიზის ტექნოლოგიები განვითარებამ, საბოლოოდ დეტექტორები მიიყვანა იმ მგრძობელობამდე, რომელიც საკმარისი აღმოჩნდა გრავიტაციული ტალღების დასაკვირვებლად.

4.2 გრავიტაციული ტალღების მონაცემები

4.2.1 LIGO-Virgo-KAGRA-ს აღმოჩენები

განახლების შემდეგ, ობსერვატორია LIGO-მ შეასრულა სამი სამეცნიერო დაკვირვება სამ ეტაპად. პირველი დაკვირვება (O1) დაიწყო 2015 წლის 12 სექტემბერს და დასრულდა 2016 წლის 19 იანვარს და მიმდინარეობდა 4,26 თვე. ამ პერიოდში დააფიქსირა ორმაგი შავი ხვრელის (BBH) შერწყმის შედეგად გამოსხივებული ორი სიგნალი GW150914 [22], GW151226 [23].

მეორე დაკვირვების დროს (O2) (2016 წლის 30 ნოემბერი - 2017 წლის 25 აგვისტო), რომელსაც VIRGO შეუერთდა 1 აგვისტოს, დაიშორა კიდევ სამი მოვლენა GW170104 [24], GW170814 [25], GW170608 [26] BBH სისტემიდან და ერთი სიგნალი ნეიტრონული ვარსკვლავების შერწყმიდან GW170817 [27]. მოგვიანებით, პირველი ორი გაშვების ხელახალი ანალიზმა გამოავლინა კიდევ ხუთი GW სიგნალი BBH-ებიდან (GW170729, GW170809, GW170818, GW170823 და GW151012 [28]). საერთო ჯამში, O1&O2-ის განმავლობაში LIGO-მ დააფიქსირა 10 გრავიტაციული ტალღა BBH შერწყმიდან და ერთი სიგნალი ბინარული ნეიტრონული ვარსკვლავებიდან და შედეგები შეჯამდა გრავიტაციულ-ტალღების პირველ კატალოგში [28]. მნიშვნელოვანია, რომ ნეიტრონული ვარსკვლავის მოვლენა და ორი BBH სიგნალი (GW170814 და GW170818) იყო სამმაგი დაფიქსირებული მოვლენები, რომლებსაც აკვირდებოდა LIGO-ს ორი ობსერვატორია და VIRGO.

მესამე დაკვირვება (O3) დაიწყო 2019 წლის 1 აპრილს და დაიყო ორ ნაწილად; O3a, 2019 წლის 1 აპრილიდან 30 სექტემბრამდე და O3b, 2019 წლის 1 ნოემბრიდან 2020 წლის 27 მარტამდე. დაკვირვები შეჩერდა 2019 წლის ოქტომბერში ინსტრუმენტების განახლებისთვის და 2020 წლის მარტში შეწყდა COVID-19 პანდემიის გამო.

O3a-მ უკვე გამოავლინა რამდენიმე მოულოდნელი აღმოჩენა. ვარსკვლავების ევოლუციის თეორია პროგნოზირებს კომპაქტური ობიექტების არარსებობას ყველაზე მასიურ ნეიტრონულ ვარსკვლავებსა და ყველაზე მსუბუქ შავ ხვრელებს შორის, დაახლოებით $3 - 5M_{\odot}$; მას ექოდება მასური ქვედა ღრეჩო და მისი არსებობა დადასტურებულია ელექტრომაგნიტური დაკვირვებებით. ასევე, ბევრი მოდელი ვარაუდობს ეგრეთ წოდებული ზედა მასური ღრეჩოს არსებობას, შავი ხვრელები მასით დაახლოებით $\sim 50 - 120M_{\odot}$ დიაპაზონში არ უნდა არსებობდეს ზეახალის წყვილების წარმოქმნით გამოწვეული არასტაბილურობის გამო (pair-instability supernovae). მასური ღრეჩოების არსებობის მიზეზებს უფრო დეტალურად ქვემოთ განვმარტავთ.

პირველი უცნაური მოვლენა O3a-ში იყო GW190425, კომპაქტური ორმაგი სისტემის შერწყმა საერთო მასით $\sim 3.4M_{\odot}$ [29]. ბინარის კომპონენტებისა და საბოლოო ობიექტის მასები ქვედა მასური ღრეჩოს საზღვარზეა. მოვლენა GW190521, ორმაგი შავი ხვრელის შერწყმა, საერთო მასით $150M_{\odot}$, სავარაუდოდ, ხვდება ზედა მასურ ღრეჩოში [30]. ასევე იყო მოვლენები ძალიან ასიმეტრიული მასებით [31, 32]. O3a-ს შედეგები გამოიცა გრავიტაციული ტალღის მეორე კატალოგში (GWTC-2) [33], რომელიც მოიცავდა 39 მოვლენას. მოგვიანებით,

GWTC-2 გაფართოვდა GWTC-2.1-ად, [34] 8 დამატებითი მოვლენით. მესამე დაკვირვების მეორე ნახევარმა ასევე გამოავლინა ორი საინტერესო მოვლენა - ნეიტრონული ვარსკვლავის და შავი ხვრელის შერწყმა [35]. O3b-ის შედეგები 35 ახალი მოვლენით წარმოდგენილი იყო GWTC-3-ში [36]. შეჯამებისთვის, აქამდე ჩატარებული სამი დაკვირვების ანალიზმა საერთო ჯამში გამოავლინა 90 ისეთი მოვლენა, რომლის ალბათობაც რომ არის ასტროფიზიკური წარმომავლობის უდრის $P_{\text{astro}} > 0.5$ [36]. ამ 90 მოვლენას შორის უმრავლესობა არის BH-BH შერწყმა, მათგან რამდენიმე შეიცავს შავ ხვრელებს ზედა მასური ღრეჩოდან. ორი მოვლენა არის BH-ის შერწყმა ქვედა მასური ღრეჩოს ობიექტთან. ორი მოვლენა NS-BH შერწყმა და ორიც NS-NS-ის. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ორმაგი NS შერწყმის მოვლენა GW170817 კვლავ რჩება ერთადერთ აღმოჩენად, რომელსაც თან ახლავს გამა გამოსხივება [37, 38]. გრავიტაციულ ტალღებთან ასოცირებული სხვა ელექტრომაგნიტური გამოსხივება ჯერ არ არის ნაპოვნი [39, 40].

მეოთხე გაშვება, O4, დაგეგმილია, რომ უნდა დაიწყო 2023 წლის მარტში.

4.2.2 შერწყმის სიხშირეები

სამი დაკვირვების ანალიზის შედეგად შეფასდა სხვადასხვა სისტემის შერწყმის სიხშირე [43]. BBH სისტემების შერწყმის სიხშირე, იმის გათვალისწინებით, რომ ის ვითარდება წითელ წანაცვლებასთან ერთად, გამოითვალა რომ $z = 0.2$ -ზე არის

$$\mathcal{R}_{\text{BBH}} = 17.9 - 44 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}. \quad (4.1)$$

BH-NS და BH-მასური ღრეჩოს შერწყმის სიხშირეები ნავარაუდებია რომ უდრის შესაბამისად

$$\mathcal{R}_{\text{BH-NS}} = 7.8 - 140 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1} \quad (4.2)$$

და

$$\mathcal{R}_{\text{BH-mass gap}} = 9.4 \times 10^{-5} - 25 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1} \quad (4.3)$$

შეფასებულია, რომ BNS შერწყმის სიხშირეა

$$\mathcal{R}_{\text{BNS}} = 10 - 1700 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1} \quad (4.4)$$

და NS-მასური ღრეჩოს ობიექტების შერწყმა მოსალოდნელია სიხშირით

$$\mathcal{R}_{\text{NS-massgap}} = 0.02 - 39 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}. \quad (4.5)$$

იმის გათვალისწინებით, რომ შერწყმის სიხშირეებს საკმაოდ დიდი განუზღვრელობა აქვთ, კომპაქტური ორმაგი სისტემების ფორმირებისა და განვითარების მრავალი მოდელი შეიძლება მოერგოს დაკვირვებებს.

4.3 ორმაგი შავი ხვრელები

LIGO-Virgo-Kagra-ს (LVK) მიერ დამზერილი კომპაქტური ობიექტების თვისებები და მათი ასტროფიზიკური ინტერპრეტაციები განხილულია გრავიტაციული ტალღების კატალოგების თანმხლებ ნაშრომებში: [41-43]. დავიწყოთ ორმაგი შავი ხვრელების წარმოქმნისა და შერწყმის შესაძლო სცენარების განხილვით.

BH-ის შექმნის ყველაზე გავრცელებული გზა არის მასიური ვარსკვლავის გრავიტაციული კოლაფსი. ვარსკვლავების ევოლუციის ბოლო საფეხური ჯერ კიდევ საკამათოა [44], მაგრამ

ყველაზე გავრცელებული აღწერილობის მიხედვით, მაშინ როდესაც ვარსკვლავი ამოწურავს საწვავს, თუ მისი ბირთვის მასა ჯერ კიდევ საკმარისად მძიმეა, ის ფეთქდება და ზეახალად და წარმოქმნის შავ ხვრელს. თუმცა, გაჩენილი BH-ის მასა არ ემთხვევა წინამორბედი ვარსკვლავის მასას. ვარსკვლავური ქარი არის მთავარი მიზეზი, რის გამოც ვარსკვლავი კარგავს თავის მასას და მისი სიდიერე დამოკიდებულია ვარსკვლავის მეტალურობაზე. დაბალი მეტალურობა ამცირებს გამჭვირვალობას, რადიაციული ტრანსპორტი უფრო ადვილი ხდება და ამცირებს ქარის ძალას. ასე რომ, მხოლოდ ვარსკვლავებს მეტალების გარკვეული რაოდენობის შემცველობით ($\lesssim 1/2 Z_{\odot}$) შეუძლიათ შექმნან შავი ხვრელები $\gtrsim 25M_{\odot}$.

ორმაგი შავი ხვრელის სისტემები შეიძლება შეიქმნას სხვადასხვა მექანიზმით. მიუხედავად BBH-ის შერწყმის მზარდი რაოდენობისა, მათი წარმოშობა მკაფიოდ არ არის გასაგები, მაგრამ შეისწავლება ფორმირების რამდენიმე გზა. გალაქტიკურ ველში იზოლირებულმა მასიურმა ბინარებმა შეიძლება შექმნან BBH ერთიანი გარსის მექანიზმის (common-envelope) მეშვეობით [45, 46], სტაბილური Roche-lobe გზით (Roche-lobe overflow) [47, 48] ან ქიმიურად ერთგვაროვანი განვითარებით (chemically homogeneous evolution) [49, 50]. BBH ასევე შეიძლება შეიქმნას მკვრივ ვარსკვლავურ კლასტერში ზოგიერთი დინამიური პროცესის შედეგად [51]. ალტერნატიულად, სამმაგ ან ოთხმაგ სისტემებს ასევე შეუძლიათ BBH-ის წარმოქმნა [52, 53]. დაბოლოს, BBH-ებს შეიძლება იყოს პირველადი წარმომავლობის (primordial black holes) [54-58].

4.3.1 პირველადი შავი ხვრელები

ზოგიერთმა ავტორმა წამოაყენა შემოთავაზება, რომ GW სიგნალების წყაროები შესაძლოა პირველადი შავი ხვრელებია (Primordial Black Hole) [54-58]. PBH არის BH-ები, რომლებიც შეიძლებოდა ჩამოყალიბებულიყო ადრეულ სამყაროში, როდესაც ჯერ არ არსებობდა ასტროფიზიკური ობიექტები. PBH ფორმირების ყველაზე პოპულარული მექანიზმი არის პირველადი სიმკვრივის არაერთგვაროვნების პირდაპირი გრავიტაციული კოლაფსი. რადგან ადრეულ დროში დომინირებდა რადიაცია და ჩვეულებრივი მატერია ჯერ არ იყო ჩამოყალიბებული, PBH შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ, როგორც ბნელი მატერიის (DM) სიმკვრივის ფლუქტუაციის პირდაპირი კოლაფსი, და მიღებულია DM-ში PBH-ების ფარდობით განსაზღვრა.

$$f_{\text{PBH}} = \frac{\Omega_{\text{PBH}}}{\Omega_{\text{DM}}}, \quad (4.6)$$

სადაც Ω_{PBH} და Ω_{DM} არის, შესაბამისად, PBH და DM სიმკვრივის პარამეტრები.

მასის სხვადასხვა ინტერვალში f_{PBH} -ზე არსებული შეზღუდვები სხვადასხვა ექსპერიმენტებიდან განხილულია [56]-ში. LVK-თვის საინტერესო მასის ინტერვალში

$$1 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}. \quad (4.7)$$

თუმცა, მიკროლინზირების ექსპერიმენტი ამბობს, რომ PBH-ები ინტერვალში

$$10^{-7} M_{\odot} < M < 30 M_{\odot} \quad (4.8)$$

ვერ შეავსებენ Ω_{DM} -ის ძირითად ნაწილს [59, 60]; უფრო მასიური PBH-ების ($43M_{\odot} \lesssim$) არსებობა გამორიცხებულია განიერი ორმაგი სისტემების (wide binaries) მიერ [61] და ინტერვალში $1 - 100 M_{\odot}$ შეზღუდულია ფონური მიკროტალღური გამოსხივების (CMB) სპექტრალური დამახინჯების არარსებობით [62]. აქედან გამომდინარე, ზედა ზღვარი f_{PBH} -ზე (4.7) ინტერვალში არის $10^{-4}-10^{-3}$. რამდენიმე მოდელი შეიძლება იყოს პასუხისმგებელი LVK სიგნალების ახსნაზე PBH-ების გამოყენებით. თუმცა, მეტი მონაცემია საჭირო იმისათვის, რომ LVK მოვლენების PBH-თან კავშირი დადასტურდეს.

4.3.2 ასტროფიზიკური შავი ხვრელები

ამჟამად, მოდულების უმეტესობა ძირითადად დაკავშირებულია LVK ორმაგი შავი ხვრელების ასტროფიზიკურ წარმოშობასთან. ეს მოდულები აფასებენ BBH შერწყმის სიხშირეს, როგორც BBH შერწყმის ეფექტურობის ϵ -ის ფუნქციას, ორმაგი სისტემის შექმნასა და შერწყმას შორის გასული დროის განაწილების P -ის ფუნქციას და BH-ის რაოდენობის სიმკვრივის ფუნქციას N_{BH} [64],

$$\mathcal{R} = \frac{1}{2} \epsilon P(\tau) N_{\text{BH}} . \quad (4.9)$$

უგანზომილებო კოეფიციენტი

$$\epsilon \equiv f_{\text{bin}} \times f_{m_1/m_2} \times f_{\text{surv}} \times f_t < 1 \quad (4.10)$$

განსაზღვრავს BBH შერწყმის ეფექტურობას [64]. თანამედროვე მოდულების მიხედვით, ვარსკვლავების ნახევარი ორმაგი სისტემების სახითაა $f_{\text{bin}} \sim 0.5$ [65], $f_{m_1/m_2} \sim 0.1$ არის ორმაგი სისტემების იმ რაოდენობის ფარდობა, რომლებშიც მასების შეფარდება ერთთან ახლოსაა $m_1/m_2 \sim 1$ [65], რაც შეესაბამება LVK-ს მონაცემებს, და $f_{\text{surv}} \sim 0.1$ არის მასიური ვარსკვლავების ის ფარდობა, რომლებიც ევოლუციის შედეგად ახერხებს შავ ხვრელად ჩამოყალიბებას. და ბოლოს, $f_t < 1$ არის BBH-ის ის ფარდობა, რომელთა ორბიტალური კონფიგურაცია აძლევდა მათ საშუალებას, რომ შერწყმოდნენ დღევანდელ დღემდე. როგორც ვხედავთ, ϵ დამოკიდებულია ბევრ ფაქტორზე და შეიძლება შეიცვალოს მნიშვნელოვნად ინტერვალში

$$\epsilon \simeq 0.01 - 0.001 . \quad (4.11)$$

დაყოვნების დრო $P(\tau)$ ასევე საკმაოდ სადავოა და დამოკიდებულია მასაზე, მეტალობაზე, ორბიტალურ კონფიგურაციაზე და შეიძლება აჭარბებდეს კიდევ ჰაბლის დროს. შავი ხვრელების რაოდენობის სიმკვრივე შეიძლება ჩაიწეროს როგორც [64]

$$N_{\text{BH}} = \text{SFR}(z) \int \phi(m) N(m) \int f(Z, m) \int \xi(M) dM dZ dm . \quad (4.12)$$

$\xi(M)$ არის ვარსკვლავების საწყისი მასის ფუნქცია (რომელიც როგორც წესი ინტეგრირდება ინტერვალში $5 M_{\odot} < M < 150 M_{\odot}$ რათა დაემთხვეს LVK-ს მონაცემებს), $f(Z, m)$ არის m მასის გალაქტიკის მეტალობის განაწილების ფუნქცია (უმეტესად მდებარეობს $0.0002 < Z < 0.02$ ზღვრებში), $N(m)$ არის m მასის გალაქტიკაში ვარსკვლავების სრული რაოდენობა, რომელიც ნორმირებულია როგორც

$$N(m) = \frac{m}{\int M \xi(M) dM} , \quad (4.13)$$

$\phi(m)$ არის გალაქტიკის ვარსკვლავური მასის ფუნქცია და $\text{SFR}(z)$ არის ვარსკვლავების ფორმირების სიხშირე, რომელიც, როგორც წესი აღებულია ექსპერიმენტული მონაცემების ფიტინგების შედეგად [66],

$$\text{SFR}(z) = 0.015 \frac{(1+z)^{2.7}}{1 + [(1+z)/2.9]^{5.6}} M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} . \quad (4.14)$$

ამ ფუნქციას აქვს პიკი $z \sim 2$ -ზე, რაც შეესაბამება წარსულში გახედვის დროს (lookback time) ~ 10 Gyr.

ერთიანი გარსის მექანიზმით ჩამოყალიბებული იზოლირებული ორმაგი სისტემებისთვის [46], გაკეთდა სიმულაციები სხვადასხვა მეტალობის პირობებში. მიღებული BBH-ის შერწყმის ლოკალური სიხშირე მერყეობს $\sim 10^{-1} - 7 \times 10^3 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ ინტერვალში. ასეთი დიდი

განუზღვრელობა მომდინარეობს მეტალობაზე დამოკიდებულობის გამო. იმისათვის, რომ მივიღოთ რიცხვები LVK-ს მიერ ნავარაუდებ არეში, მეტალობის დაბალი მნიშვნელობები უნდა გამოვიყენოთ.

ქიმიურად ერთგვაროვანი ბინარებისათვის გაკეთებულმა სიმულაციებმა [49] მიიღეს $\mathcal{R} \approx 10 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$. მათ იპოვეს, რომ $P(\tau)$ იცვლება 4-11 Gyr არეში და შერწყმა $z \gtrsim 1.6$ -ის მიღმა არ ხდება, რადგან სამყარო ზედმეტად ახალგაზრდა არის. მათ დაასკვნეს, რომ შერწყმის სიხშირე კოსმიურ დროსთან ერთად იზრდება, რადგან დაყოვნების დიდი დროის მქონე მოვლენები იწყებენ წვლილის შეტანას, მაგრამ თანამედროვე სამყაროში ის მცირდება, რადგან დაბალი მეტალობის SFR მცირდება და გვაძლევს პიკს $\sim 20 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ $z \lesssim 0.5$ -ზე.

[51]-ში ათასობით მკვრივი კლასტერული მოდელი სხვადასხვა საწყისი პირობებით იქნა სიმულირებული და BBH-ები რომლებიც შეერწყა კლასტერებში იქნა განხილული. შერწყმის ლოკალური სიხშირე გამოვიდა რომ უდრის $5.4 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$.

ყველა ეს მოდელი [46, 49, 51] იღებს ორმაგი შავი ხვრელების შერწყმის თეორიულ სიხშირეს

$$\mathcal{R}_{\text{BBH}}^{\text{theor}} \sim 5 - 10 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}, \quad (4.15)$$

რომელიც ახლოსაა LVK-ს ქვედა ზღვართან (4.1).

4.3.3 ობიექტები ზედა მასურ ღრეჩოში

LVK მონაცემების რამდენიმე მოვლენა შეიცავს უჩვეულოდ მძიმე შავ ხვრელებს, რომლებიც ხვდებიან ეგრეთ წოდებულ ზედა მასურ ღრეჩოში, რომელიც წარმოიქმნება ზეახალის წყვილების არასტაბილურობის გამო. მძიმე ვარსკვლავების ევოლუციის ამჟამინდელი მოდელები პროგნოზირებენ, რომ He-ის ბირთვში ტემპერატურა აღწევს იმ დონეს, როდესაც დაშვებულია ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილების წარმოქმნა. ამგვარად, ფოტონების ენერჯის ნაწილი, რომელიც ქმნიდა წნევას გრავიტაციის წინააღმდეგ, ხმარდება წყვილების წარმოქმნას და ვარსკვლავი ხდება არასტაბილური. ვარსკვლავები He-ის ბირთვის მასით $\sim 32 - 64 M_{\odot}$ ექვემდებარებიან პულსაციურ წყვილის არასტაბილურობას (pulsational pair instability), რომლის დროსაც ვარსკვლავის მასა მცირდება მატერიის გარკვეული რაოდენობის პერიოდულად გამოფრქვევით და რჩება კომპაქტური ობიექტი $\sim 65 M_{\odot}$ -ზე ნაკლები მასით. ვარსკვლავები, რომელთა მასა $\sim 65 - 135 M_{\odot}$ -ია, ექვემდებარებიან წყვილების არასტაბილურობას, რის დროსაც ვარსკვლავი ფეთქდება და არ ტოვებს კომპაქტურ ობიექტს. ვარსკვლავები He ბირთვით $\gtrsim 135 M_{\odot}$ განიცდიან პირდაპირ კოლაფსს საშუალო მასის შავ ხვრელად [67, 68]. ასე რომ, მძიმე ვარსკვლავის კოლაფსი ვერ უნდა წარმოქმნიდეს BH-ებს $\sim 65 - 150 M_{\odot}$ -ის მასის დიაპაზონში.

მიუხედავად ამისა, LVK-მ შეძლო დაეფიქსირებინა გრავიტაციული ტალღები, რომლებიც გამოსხივდნენ სისტემებიდან, რომლებშიც ერთი ან ორივე კომპონენტი არის BH მასით $50 - 107 M_{\odot}$ ინტერვალში. ყველაზე მასიური ბინარი GW190426.190642 შეიცავდა ობიექტებს მასებით $107 M_{\odot}$ და $77 M_{\odot}$, შერწყმის შედეგად წარმოქმნა საბოლოო შავი ხვრელი მასით $175 M_{\odot}$ და გამოასხივა $11 M_{\odot}$ ენერჯია გრავიტაციული ტალღების მეშვეობით [36]. მეორე ყველაზე მასიური სისტემა GW190521 შედგებოდა BH-ებისგან, რომელთა მასები იყო $95 M_{\odot}$ და $69 M_{\odot}$, გამოასხივა $8 M_{\odot}$ ენერჯია და გააჩინა საბოლოო შავი ხვრელი მასით $156 M_{\odot}$ [30].

ასეთი მასიური შავი ხვრელები ამჟამად ითვლება, რომ რომლებიც ყალიბდებიან უფრო მცირე BH-ების იერარქიული შერწყმით [69-71]. იმისათვის, რომ მეორედ მოხდეს შერწყმა, საწყისი პირველი თაობის BH-ები უნდა ჩამოყალიბდეს სამმაგ ან მულტიპოლურ სისტემებში, ან ასეთი სისტემები უნდა იყოს აწყობილი მკვრივ ვარსკვლავურ კლასტერებში. თუმცა, შერწყმის პროდუქტი იღებს უკუცემის დარტყმას ანიზოტროპული GW ემისიისგან [72, 73]

და შესაძლოა გამოდევნოს ისინი კლასტერებიდან და ვეღარ მოახერხოს ბინარული BH-ების ახალი თაობების შექმნა [74]. ასევე, მაშინაც კი, თუ ორმაგი BH სისტემის ეფექტური სპინის პარამეტრი თითქმის ნული იყო, მათი შერწყმის შემდეგ წარმოქმნილი BH ხასიათდება დიდი სპინით; ასე რომ, სპინის მნიშვნელობა შეიძლება იყოს კარგი ინდიკატორი BH-ების გენეალოგიისთვის [75, 76]. [69]-ში გაკეთდა ათი BH-ების შერწყმის მოვლენის ანალიზი LIGO-Virgo დეტექტორების პირველი ორი დაკვირვებიდან და არ იქნა ნაპოვნი იერარქიული შერწყმის კონკრეტული მტკიცებულება.

ისეთი მოვლენების შერწყმის სიხშირე, რომლებშიც ერთ-ერთი კომპონენტის მასა მდებარეობს $50 - 100M_{\odot}$ ინტერვალში, შეფასებულია, რომ უდრის

$$\mathcal{R}_{50-100M_{\odot}} = 0.099 - 0.4 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1} \quad (4.16)$$

(ცხრილი IV [43]-ში). ბირთვული ვარსკვლავური კლასტერებისათვის გაკეთებული სიმულაციები (სადაც იერარქიული შერწყმა უფრო ხშირია, ვიდრე გლობულურ და ახალგაზრდა ვარსკვლავურ კლასტერებში) დაბალი ბრუნვითა და გაქცევის სიჩქარის ფართო განაწილებით, იძლევა $10^{-2} - 0.2 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ [70]. იმისათვის, რომ მივიღოთ შერწყმის ასეთი დიდი სიხშირე, საჭიროა საკმაოდ ოპტიმისტური დაშვებების გაკეთება. უფრო ზუსტად, [71]-ში, GW190521-ის მსგავსი ობიექტების შერწყმის სიხშირე ნავარაუდებია, რომ უდრის

$$\mathcal{R}_{\text{GW190521}} = \mathcal{R}_{\text{IG}} \times f_{\text{triple}} \times f_{\text{survival}} \times f_{\text{merger}} , \quad (4.17)$$

სადაც $\mathcal{R}_{\text{IG}} \sim 10 - 100 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ არის პირველი თაობის შავი ხვრელების შერწყმის სიხშირე და გამოყენებული იქნა პირველი ორი დაკვირვების შედეგად მიღებული რიცხვი [28]. თუ დავუშვებთ სისტემის არ დანგრევის მაღალ კოეფიციენტს, $f_{\text{survival}} \simeq 60\%$, და შერწყმის დიდ ფარდობით რიცხვს, $f_{\text{merger}} \simeq 20\%$, იმასთან ერთად, რომ სამმაგი სისტემების ფორმირების ფარდობა არის $f_{\text{triple}} \simeq 50\%$, GW190521-ის მსგავსი მოვლენების შერწყმის სიხშირე გამოთვლილი იქნა რომ უდრის [71]

$$\mathcal{R}_{\text{GW190521}} = 0.6 - 6 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1} . \quad (4.18)$$

ჩვენ განვაახლეთ ეს რიცხვი და გამოვიყენეთ სიდიდე მესამე კატალოგიდან, $\mathcal{R}_{\text{IG}} \sim 2.5 - 6.3 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ (ცხრილი IV [43]-ში), რომელიც მიღებული იქნა სისტემებისთვის, რომლებშიც პირველი ობიექტის მასაა $20 - 50M_{\odot}$ და მეორე კომპონენტის $5 - 50M_{\odot}$, ანუ სისტემები, რომლებსაც შეუძლიათ იერარქიული შერწყმებით 'მძიმე' სისტემების შექმნა. (4.17)-ში \mathcal{R}_{IG} -ის ახალი რიცხვის გამოყენებით, ვიღებთ

$$\mathcal{R}_{\text{GW190521}} = 0.15 - 0.38 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1} , \quad (4.19)$$

რაც თანხვედრაშია LVK-ს შეფასებებთან (4.16), თუმცა ექსტრემალური დაშვებების ხარჯზე.

ასევე განიხილება შესაძლებლობა, რომ GW190521-ის BH-ები პირველადი შავი ხვრელებია [77]. მაგრამ, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, არსებობს მჭიდრო შეზღუდვები პირველადი BH-ების მასის განაწილებაზე [56] და პირველადი BH წარმოქმნის ზოგიერთი თეორია პროგნოზირებს კომპონენტების მცირე სპინებს [78], რაც არ შეესაბამება GW190521-ს. PBH მასა შეიძლება გაიზარდოს მისი კოსმოლოგიური ევოლუციის დროს აკრეციის გამო [79]. თუ დავუშვებთ, რომ PBH-ები ახერხებენ ეფექტურ აკრეციას რეიონიზაციის ეპოქამდე, ყველაზე მასიური მოვლენაც კი GW190521 შეიძლება მოერგოს PBH სცენარს [80]. ასევე განხილული იყო გალაქტიკების ან გალაქტიკათა კლასტერების ძლიერი გრავიტაციული ლინზირების შესაძლებლობა GW190521 სიგნალისთვის. თუმცა, ლინზირების მოსალოდნელი დაბალი სიხშირე და ოპტიკური სიღრმე, და მრავალ-გამოსახულებიანი სურათის არარსებობა, უარყოფს ძლიერი ლინზირების ჰიპოთეზას [77].

4.4 ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავის და ნეიტრონული ვარსკვლავი - შავი ხვრელის სისტემები

ამ განყოფილებაში განვიხილავთ BNS და BH-NS სისტემებს, რომლებიც ყალიბდებიან და ერწყმიან ჰაბლის დროში. ვარსკვლავები მასის დიაპაზონში $\simeq 8M_{\odot}$ -დან $\simeq 50M_{\odot}$ -მდე ასრულებენ სიცოცხლეს ბირთვის კოლაფსითა და ზეახალის აფეთქებით. აფეთქების შედეგად დარჩენილი ობიექტი იქნება NS, თუ წინამორბედი ვარსკვლავის მასა $20M_{\odot}$ -ზე ნაკლები იყო, წინააღმდეგ შემთხვევაში წარმოიქმნება შავი ხვრელი. ასეთი მძიმე ვარსკვლავები სიცოცხლის ბოლოს უნდა მივიდნენ სუპერგიგანტების ეტაპამდე, რომელთა ზომაა დაახლოებით $30R_{\odot}$. თუ BNS-ში კომპონენტების საწყისი დაშორება აღემატება წინამორბედი სუპერგიგანტების ზომას, GW-ების გამოსხივების გამო დაკარგული ენერჯის შედეგად შერწყმის დრო იქნება სამყაროს ასაკზე რამდენიმე რიგით მეტი. იმისათვის, რომ შერწყმა მოესწროს სამყაროს დღევანდელ ასაკში (ჰაბლის დრო), კანონიკური BNS სისტემის საწყისი დაშორება უნდა იყოს მზის ხუთ რადიუსზე ნაკლები, $\lesssim 5R_{\odot}$, იმ შემთხვევაში, თუ შერწყმის პროცესს განაპირობებს გრავიტაციული გამოსხივება [81–83]. ეს გულისხმობს, რომ BNS სისტემა ფორმირდება საერთო გარსის სტადიის მემგობით, სადაც ან ორივე მასიური ვარსკვლავი ერთნაირია, ან პირველი ქმნის კომპაქტურ ობიექტს მანამდე, სანამ მეორე მოეხვევა მას სუპერგიგანტის ფაზის დროს. ამრიგად, ინსპირალი ბევრად უფრო სწრაფად მიმდინარეობს და იწვევს ორი კომპაქტური ობიექტის უფრო მჭიდრო საწყის განლაგებას. ასევე, NS-ები და BH-ები გლობულურ კლასტერებში შეიძლება გადაინაცვლონ მისი ცენტრისკენ დინამიური ხახუნის გამო, რაც იწვევს დინამიური ჩაჭერის უფრო მაღალ ალბათობას და აჩქარებულ ინსპირალს, რომელსაც ხელს უწყობს მესამე სხეულთან ურთიერთქმედება [84]. BNS და BH-NS სისტემების კომპაქტური ობიექტები კარგავენ ენერჯიას GW-ის გამოსხივების შედეგად, რაც იწვევს ობიექტების დაახლოებას ერთმანეთთან. ინსპირაციული დროის შკალა მერყეობს $\simeq 85$ Myr-დან ჰაბლის დრომდე. ამრიგად, დიდი ხნის ინსპირალის შემდეგ, კომპაქტური ობიექტების შერწყმა ათავისუფლებს დიდი ენერჯიის გრავიტაციულ ტალღებს ($\simeq 10^{53}$ erg/s [85]). ორმაგი სისტემის მიერ გამოსხივებული GW-ები არის მიმართული ყველა მხარეს, თუმცა არა იზოტროპულად [86]. კერძოდ, ის ყველაზე ძლიერია სისტემის სრული კუთხური მომენტის ღერძის გასწვრივ (დახრილობის კუთხეებისთვის $l = 0^{\circ}, 180^{\circ}$) და ყველაზე სუსტია ორბიტალური სიბრტყის გასწვრივ ($l = 90^{\circ}$).

4.4.1 თანმხლები ელექტრომაგნიტური გამოსხივება

შერწყმიდან რამდენიმე წამში, ნეიტრონული ვარსკვლავები (BH-NS შერწყმის შემთხვევაში ნეიტრონული ვარსკვლავი) ნადგურდება და გამოიტყორცნის მატერია, რომელიც აკრეციას განიცდის დარჩენილ ობიექტზე, რის შედეგადაც ძლიერდება კოლიმირებული ულტრა-რელატივისტური პოლარული ჭავლები [83, 87] და ნაკლებად რელატივისტური კვაზი იზოტროპული ნაკადი [88–90], რომელიც წარმოქმნის ცნობილ ელექტრომაგნიტურ და თუნდაც ნეიტრინოების გამოსხივებას. ჭავლი იწვევს გამა სხივების ხანმოკლე აფეთქებას (SGRB), რომელიც არის MeV ენერჯიამდე ცვალებადი გამა გამოსხივების მანათობელი აფეთქება, რომელიც გრძელდება 2 წამზე ნაკლები. კოლიმირებული ულტრა-რელატივისტური ჭავლიდან ემისიების აღმოჩენა შესაძლებელია მხოლოდ დამკვირვებლის მიერ ჭავლის გახსნის კუთხით, θ_i . გამოსხივების შემდეგ, ჭავლმა უნდა გამოაღწიოს გარეთ თითქმის სინათლის სიჩქარით. ჭავლი აღწევს ფოტომეტრულ რადიუსს, სადაც სინათლე პირველად შეიძლება გამოთავისუფლდეს და გამოასხივოს SGRB-ები შიდა დარტყმით ტალღებთან შეჯახების გამო. სწრაფი ემისიის შემდეგ, ჭავლი კვლავ სწრაფად შორდება და ურთიერთქმედებს გარემომ-

ცველ მატერიასთან [91]. ურთიერთმოქმედი ჭავლის ლორენცის ფაქტორი ნელდება, დაკვირვებადი კუთხე იზრდება, ჭავლი იწყებს სინქროტრონის გამოსხივებას თითქმის მთელ ელექტრომაგნიტურ სპექტრში, რომელიც შეიძლება დაფიქსირდეს რადიოდან GeV ენერჯიზამდე [91] როგორც SGRB ნათება.

შერწყმის შედეგად მიღებული მატერია განსხვავებულად იქცევა და აძლიერებს ულტრა-რელატივისტურ ჭავლს, რომელიც იწყებს SGRB-ს. ამ შემთხვევაში, ნეიტრონით მდიდარი ამოფრქვევა, რომელიც შეიცავს $10^{-3}M_{\odot}$ -დან $0.1M_{\odot}$ -მდე, მოძრაობს გარეთ სიჩქარით $\sim 0.1 - 0.3 c$. ამოფრქვევა ფართოვდება და სწრაფად კლებულობს და კარგავს ენერჯიას თერმული ნეიტრონების ემისიის გამო. საბოლოოდ, $\sim 0 - 100 ms$ -ში ის შედის შედარებით ნელ ჰომოლოგიურ გაფართოებაში და მძიმე ელემენტების სინთეზის პერიოდში, ე.წ. r-პროცესში. r-პროცესით ახლად სინთეზირებული ბირთვები რადიოაქტიურია და იშლება სტაბილურ ელემენტებამდე. β -ის დაშლის შედეგად გამოთავისუფლებულ ენერჯიას შეუძლია მოამარაგოს თერმული გამოსხივება დღეებიდან კვირებამდე, რაც ცნობილი როგორც კილონოვა [88-90]. კილონოვა არის BNS და BH-NS შერწყმის პერსპექტიული თანმხლები ელექტრომაგნიტური გამოსხივება, რადგან მათი ემისია თითქმის იზოტროპულია (განსხვავებით სხივური SGRB-ებისგან) და შეუძლია პიკს მიაღწიოს ოპტიკურ, ულტრაიისფერ და ინფრაწითელ ტალღის სიგრძეებში. კილონოვების სიკაშკაშე, ხანგრძლივობა და ფერები შეიძლება გამოყენებულ იქნას შერწყმის პროცესების ფიზიკის დიაგნოსტიკებისათვის [83, 88-90]. როდესაც ენერჯია ამოიწურება, კილონოვა კლებულობს და ქრება. კვაზი იზოტროპული ამოფრქვევა აგრძელებს მოძრაობას და მომდევნო რამდენიმე თვესა და წლებში გადადის ნისლეულის ფაზაში. შენელების რადიუსში, სადაც ამოფრქვევამ მთანთქა მასალის საკმაო რაოდენობა გარემოდან, ის გარდაიქმნება აფეთქების ტალღად, რომელიც ათავისუფლებს სინქროტრონის გამოსხივებას რადიო ზოლებში [92-94] და ის ცნობილია კილონოვას შემდგომი ნათების სახელით (kilonova afterglow).

ყველაზე ადრეული დაკვირვებადი სიგნალი BNS და BH-NS შერწყმებიდან არის გრავიტაციული ტალღა. ისინი გამოიყენება როგორც ამ მოვლენების გამოვლენისა და დახასიათებისას, ასევე სხვა ინსტრუმენტებისათვის ლოკალიზაციის ინფორმაციის მისაწოდებლად. BNS და BH-NS სისტემების შერწყმის სიხშირე, მიღებული LVK მონაცემებიდან მოცემული იყო შესაბამისად განტოლებებით (4.4) და (4.2). როგორც ზემოთ აღვწერეთ, NS-ების შერწყმას თან უნდა ახლდეს სხვადასხვა ტალღის სიგრძის ელექტრომაგნიტური სიგნალები. პირველ რიგში, ჩვენ ფოკუსირებას ვაკეთებთ GW-ების ერთობლივ ძიებაზე და სწრაფ SGRB ემისიაზე. SGRB-ების ჯამური სიხშირე დამოკიდებულია ჭავლის ნახევრად გახსნის კუთხის განაწილებაზე, რომელიც, თავის მხრივ, შეიძლება შეფასდეს შემდგომი სინათლის მრუდში გაზომილი ჭავლის რღვევით [95]. იმის გამო, რომ ჭავლის რღვევები იშვიათად არის გამოვლენილი, SGRB-ების საერთო სიხშირე საკმაოდ განუზღვრელია და უდრის $1109_{-657}^{+1432} \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ [96]. ეს რიცხვი ხვდება LVK-ის მიერ მიღებულ დიაპაზონში (4.4). მყარი კუთხის ეფექტის გამო, SGRB-ების მხოლოდ მცირე ნაწილი შეიძლება იყოს ორიენტირებული დედამიწისკენ. ვინაიდან გრავიტაციული ტალღების ყველა მიმართულებით ვრცელდება, მოსალოდნელია, რომ SGRB-ების ეს ფრაქცია დაკავშირებული იქნება გრავიტაციულად გამოვლენილ BNS ან BH-BNS შერწყმებთან. შეგახსენებთ, რომ გრავიტაციული ემისია უფრო ძლიერია, როდესაც ორმაგი სისტემა სახით ჩვენსკენაა. მაშასადამე, ულტრარელატივისტური ჭავლი, რომელიც მიჩნეულია, რომ ობიექტის პოლარულ ღერძის გასწვრივ უნდა იყოს მიმართული, უნდა იყოს კორელირებული GW სიგნალის სიძლიერესთან. დახრილობის კუთხის ალბათობის სიმჭიდროვე გრავიტაციულად გამოვლენილი NS შერწყმებისთვის მაქსიმალურია $l \simeq 30^{\circ}$ [86]. აღმოჩნდა, რომ [83] დამზერილი დახრილობის კუთხის განაწილება შემთხვევებისთვის, რომლებიც გამოვლენილია GW-ით [86], შემთხვევებთან, რომლებიც ნანახია SGRB-ის [91] მეშვეობით გვეუბნება, რომ დაახლოებით 8-დან 1 შემთხვევაში, როდესაც დაიმზირა BNS-დან გამოს-

ხივებული გრავიტაციული ტალღა, შეიძლება დედამიწა მოხვდეს ჭავლის კუთხეში კუთხით. თუ ჩვენ შემოვიფარგლებით მხოლოდ უფრო ჩვენსკენ დამიზნებული სისტემებით, როგორცაა GW170817, სადაც $l < 55^\circ$ [27], GW და SGRB სიგნალების ერთობლივი დაკვირვების სიხშირე შეიძლება გარკვეულწილად უფრო მაღალი გახდეს, კერძოდ 5-დან დაახლოებით 1. და ბოლოს, თუ განვიხილავთ, რომ NS სისტემების გრავიტაციულ გაზომვებში სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა გაუმჯობესდება, რაც სავარაუდოდ მიგვცემს $l < 27^\circ$ -ს GW170817-ისთვის [97], შეიძლება ველოდოთ, რომ თანხვედრ იქნება ერთი ერთში სისტემებისთვის, რომლებიც მომართულია 30° -ზე ნაკლები კუთხით.

იმ ვარაუდით, რომ ყველა BNS (BH-NS) სისტემა, რომელიც აქვს ტრიგერი GW-ებში, უნდა გააჩნდეს დაკვირვებადი ელექტრომაგნიტური სიგნალები ენერჯისა და დროის ფართო დიაპაზონში. ჩვენ განსაკუთრებულ ყურადღებას ვაქცევთ რადიაციის კანონიკურ ტიპებს, როგორცაა SGRBs, SGRB შემდგომი ნათება და კილონოვა. ზემოაღნიშნულ განხილვაზე დაყრდნობით, ჩვენ ვთანხმდებით, რომ ძალიან სავარაუდოა, რომ მინიმუმ ერთი ტიპის გამოსხივება უნდა იყოს აღდგენილი სწრაფი და შემდგომი დაკვირვებით. ვინაიდან ყველა გაანალიზებული კანონიკური სიგნალი NS შერწყმებიდან უფრო კაშკაშა პოლარული პოზიციიდან დაკვირვებისას, ვიდრე ეკვატორულიდან, განსაკუთრებით სავარაუდოა, რომ აღდგენა მოსალოდნელია იმ BNS (BH-NS) შერწყმებისთვის, რომლებიც აღმოჩენილია არც თუ ისე შორს (ეს ნიშნავს $\sim 30^\circ$) GW-ის დაკვირვებების კუთხიდან.

როგორც უკვე აღინიშნა, ელექტრომაგნიტური თანმხლები გამოსხივება არ არის მოხსენებული O3 მონაცემებში და GW170817 რჩება ერთადერთ მულტიმესენჯერად. რა თქმა უნდა, თითოეული პოტენციური მულტიმესენჯერული მოვლენა არ არის კარგად ლოკალიზებული, სამი დეტექტორიდან ერთ-ერთში ტრიგერების ნაკლებობის გამო. ასევე, დახრილობის კუთხეების შეფასების შესახებ ინფორმაციის ნაკლებობის გამო, არ შეიძლება დარწმუნებით ითქვას, რომ ყოველი ულტრარელატივისტური ჭავლი, რომელიც სავარაუდოდ აწარმოებს SGRB-ს, გარკვეულწილად შეესაბამება ობიექტის პოლარულ ღერძს და, შესაბამისად, კარგად არის ორიენტირებული SGRB-ის ან მისი შემდგომი ნათების აღდგენისთვის. კილონოვა ასევე შეიძლება დარჩეს შეუმჩნეველი, რადგან გააჩნია დაბალი სიკაშკაშე BNS-ის დიაპაზონში $\simeq 200$ Mpc, რომელიც ხელმისაწვდომია LVK-ს არსებული მგრძობელობისთვის. თუმცა, ერთობლივი GW-კილონოვაების გამოვლენის სიხშირემ შეიძლება მიაღწიოს წელიწადში 21-ს, LVK ქსელის BNS ჰორიზონტის ფარგლებში, როგორც შეფასებულია [83]-ში.

4.4.2 ობიექტები ქვედა მასურ ღრეჩოსთან

გრავიტაციული ტალღების უახლესი კატალოგი [36] შეიცავს რამდენიმე ყურადსაღებ მოვლენას ქვედა მასურ ღრეჩოსთან:

- GW190425 არის სავარაუდოდ BNS სისტემის შერწყმა მასებით $2.0_{-0.3}^{+0.6} M_\odot$ და $1.4_{-0.3}^{+0.3} M_\odot$ [29];
- GW200105 მასებით $8.9_{-1.5}^{+1.2} M_\odot$ და $1.9_{-0.2}^{+0.3} M_\odot$ და GW200115 მასებით $5.9_{-2.5}^{+2.0} M_\odot$ და $1.44_{-0.29}^{+0.85} M_\odot$ არის ისტორიაში პირველი BH-NS სისტემის შერწყმა [35];
- GW190814 არის $23.2_{-1.0}^{+1.1} M_\odot$ შახი ხვრელის შერწყმა $2.59_{-0.09}^{+0.08} M_\odot$ მასის კომპაქტურ ობიექტთან [32] და GW200210_092254 არის $24.2_{-4.7}^{+7.5} M_\odot$ BH-ის და $2.83_{-0.43}^{+0.48} M_\odot$ კომპაქტური ობიექტის შერწყმა.

განუზღვრელობები მოცემული 90% სანდოობით. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ არცერთ ამ მოვლენას არ ჰქონია თანმხლები ელექტრომაგნიტური გამოსხივება, მაშინ როცა მოსალოდნელია, რომ ასეთი კატაკლიზმური მოვლენები უნდა ასხივებდეს GRB-ებს.

უფრო მეტიც, მნიშვნელოვანია ის, რომ რენტგენულმა დაკვირვებებმა ორმაგ სისტემებზე გამოავლინა ე.წ. ქვედა მასური ღრეჩო $2.5 - 5M_{\odot}$ NS-ებსა და BH-ებს შორის [102, 103]. LVK მოვლენების შემოთხსენებული კომპონენტები ხვდება ამ მასური ღრეჩოს საზღვარზე. სუპერნოვას აფეთქებების ზოგიერთი თეორიული მოდელი პროგნოზირებს დაკვირვებული მასური ღრეჩოს არსებობას [104, 105]. მიუხედავად ამისა, ზოგიერთი მოდელი გვთავაზობს გლუვ გადასვლას NS-დან BH მასებზე [106, 107].

პრინციპში, GW190425-ის ორივე კომპონენტი შეესაბამება NS-ს. მიუხედავად იმისა, რომ ერთი კომპონენტის მასა, $1.4_{-0.3}^{+0.3}M_{\odot}$, ხვდება დაკვირვებული პულსარების ტიპიურ დიაპაზონში, უფრო მძიმე კომპონენტის მასით $2.0_{-0.3}^{+0.6}M_{\odot}$ ასევე შეიძლება იყოს NS, რამდენადაც $\sim 2M_{\odot}$ მასის მქონე პულსარების არსებობა დადასტურებულია დაკვირვებებით [108, 109]. თუმცა, GW190425-ს არ ახლდა ელექტრომაგნიტური თანმხლები გამოსხივება, განსხვავებით ცნობილი NS-NS მოვლენისგან GW170817. წყაროს სისტემის ჩირფ-მასით $1.44M_{\odot}$ და საერთო მასით $3.4M_{\odot}$, GW190425 სისტემა მნიშვნელოვნად უფრო მასიურია, ვიდრე ნებისმიერი ორმაგი NS სისტემა, რომელიც აქამდე დაფიქსირებულია ელექტრომაგნიტური გამოსხივების საშუალებით.

ორმაგი NS სისტემების ფორმირების ყველაზე გავრცელებული მექანიზმი არის იზოლირებული ორმაგი სისტემის ევოლუციის არხი (მიმოხილვისთვის იხილეთ [110]). ამ სცენარის მიხედვით, GW190425 შეიძლება მიუთითებდეს ბინარული NS-ების პოპულაციაზე, რომლებიც წარმოიქმნება ულტრაძვიდრო ორბიტებში [29]. ასეთი სისტემის მისაღწევად საჭიროა მასის გადაცემის ფაზა პოსტჰელიუმის მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავიდან NS-ზე. თუ მასის თანაფარდობა He-star-სა და NS-ს შორის საკმარისად მაღალია, წარმოიქმნება ერთიანი გარსის ფაზა, რომელიც შეამცირებს ბინარის ორბიტას საათობრივ პერიოდებამდე [111]. თუ ბინარი გადაურჩება ამ ერთიანი გარსის ფაზას, შემდგომი სუპერნოვას დარტყმა შეიძლება ჩახშობილი იყოს, რადგან მეორე ობიექტი სავარაუდოდ ულტრა-სთრიფდ იქნება [112]. სუპერნოვას მცირე დარტყმა, ძალიან მჭიდრო ორბიტალურ განცალკევებასთან ერთად, ზრდის შანსს, რომ ბინარი გადარჩეს სუპერნოვას შემდეგ. NS-ების იერარქიული შერწყმა ან მასის აკრეცია აქტიურ გალაქტიკის ბირთვების დისკებში, შესაძლოა ასევე იყოს პასუხისმგებელი კომპაქტური ობიექტების შექმნაზე ქვედა მასურ ღრეჩოში [113]. სხვა შესაძლო სცენარები, როგორცაა დინამიური ფორმირების არხები სფერულ კლასტერებში ან GW190425 წყაროს გრავიტაციული ლინზირება, ასევე განხილულია [29]. თუმცა მოცემული თვისებებით აღმოჩენილი ობიექტების ნაკლებობა ჯერ არ იძლევა მათი ფორმირების მექანიზმის მკაფიო თეორიის ჩამოყალიბების საშუალებას.

GW190814-ისა და GW200210_092254-ის შემთხვევაში, პირველი კომპონენტები ნამდვილად არის BH-ები. მაგრამ მეორე ობიექტები ხვდება ქვედა მასურ ღრეჩოში, თუ ასეთი ნამდვილად არსებობს. ისინი უფრო მძიმეა ვიდრე ყველაზე მასიური ცნობილი პულსარი და მსუბუქია ვიდრე ნებისმიერი BH აქამდე აღმოჩენილი. მეორადი კომპონენტების მასები $2.59_{-0.09}^{+0.08}$ და $2.83_{-0.43}^{+0.48}M_{\odot}$ აღემატება სტაბილური NS-ისთვის დაშვებულ შესაძლო მაქსიმალურ მასას უმეტეს მოდელებში [114, 115]. თუმცა, თეორიული განუზღვრელობის გამო, NS-BH სცენარი არ არის გამორიცხული, მაგალითად, მეორე კომპონენტები შეიძლება იყოს NS, მკვირივი ბირთვული კლასტერის უფრო მკაცრი მდგომარეობის განტოლების გათვალისწინებით [116]. ასევე შესაძლებელია, რომ ისინი იყვნენ კვარკული ვარსკვლავები, რომლებშიც თავდაპირველი NS გარდაიქმნა მატერიის დაცემის გამო, წინამორბედი ვარსკვლავის გრავიტაციული კოლაფსის შემდეგ [117]. ამრიგად, GW190814 და GW200210_092254 შეიძლება ჩაითვალოს, როგორც BH-NS (ან კვარკის ვარსკვლავი) შერწყმა, რომელსაც პრინციპში შეიძლება ჰქონდეს ასოცირებული GRB და ოპტიკური ანალოგი. GW190814-ისა და GW200210_092254-ის მეორადი კომპონენტის ასევე განხილვა, რომ შეიძლება იყოს ეგზოტიკური კომპაქტური ობიექტი, როგორცაა ბოზონური ვარსკვლავი [118], gravastar [119], s-კვარკის ვარსკვლა-

ვი [120], ან u-d-კვარკული ვარსკვლავი [121].

სისრულისთვის, გავითვალისწინოთ, რომ LVK-ს GW190814 და GW200210_092254 მოვლენების მეორე ობიექტები სავარაუდოდ შავი ხვრელებია, რომლებიც შეიძლება წარმოიქმნას NS-ების შერწყმით; მაგალითად, GW170817-ის საბოლოო ობიექტს აქვს მსგავსი მასა [27]. მაგრამ ხელახლა შერწყმის მიზნით, გასათვალისწინებელია იერარქიული სამმაგი სისტემის არსებობა ველში [52, 122] ან გალაქტიკის ცენტრში [123, 124].

4.5 პრობლემები და ჩვენი იდეა

GW-ების LVK მონაცემების შეჯამებით, ჩვენ გამოვყოფთ რამდენიმე ძირითად უთანხმოებას არსებულ მოდელებსა და დაკვირვებებს შორის:

- **მულტი-მესინჯერული მოვლენების ნაკლებობა:** როგორც ვნახეთ (4.4.1) თავში, NS-ის შერწყმა NS-თან ან BH-თან უნდა ახლდეს სხვადასხვა ტიპის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება და კონფიგურაციის უმეტესობაში ეს სიგნალები უნდა იყოს დაკვირვებადი დედამიწაზე. თუმცა, NS-ებთან დაკავშირებული რამდენიმე მოვლენის გამოვლენის მიუხედავად, ერთადერთი მოვლენას GW170817 ახლდა SGRB. BBH-ის შერწყმის შემთხვევაშიც კი, თუ მათზე მატერია განიცდის აკრეციას, მათაც შეუძლიათ გამოასხივონ ელექტრომაგნიტური რადიაცია.
- **ზედა მასური ღრეჩო ობიექტები:** ვარსკვლავების ევოლუციის თეორიები ვარაუდობენ, რომ თუ ვარსკვლავის ბირთვი საკმარისად მძიმე გახდება, წყვილების წარმოქმნის არასტაბილურობის გამო, ვარსკვლავიდან გარკვეულ მასა გამოიფრქვევა ან ვარსკვლავი მთლიანად ფეთქდება (თავი 4.3.3). ამიტომ, გარკვეული მასის ზემოთ BH-ების არსებობა არ იყო მოსალოდნელი. თუმცა, LVK მონაცემები შეიცავს მრავალ მოვლენას, რომლებიც მოიცავს BH-ებს ამ აკრძალული მასის დიაპაზონში.
- **ქვედა მასური ღრეჩო ობიექტები:** მრავალი მოდელის მიხედვით, NS-სა და BH-ების მასის განაწილებას შორის გადასვლა არ შეიძლება იყოს გლუვი. ამრიგად, უნდა არსებობდეს მასური ღრეჩო $\sim 2.5 - 5M_{\odot}$ -ს შორის, რასაც ზურგს უმაგრებს ორმაგი სისტემების რენტგენული დაკვირვები (თავი 4.4.2). მიუხედავად ამისა, LVK მონაცემები მოიცავს კომპაქტურ ობიექტებს, რომლებიც მიეკუთვნება ამ მასის დიაპაზონს.
- **შერწყმის სიხშირეები:** შერწყმის სიხშირეები სხვადასხვა ტიპის სისტემებისთვის, რომლებიც დათვლილია LVK მონაცემებიდან (თავი 4.2.2) შეიძლება მიღებულ იქნას ზოგიერთ თეორიაში, ოღონდ უკიდურესი დაშვებების ფასად (თავი 4.3.2).

იმ განზრახვით, რომ გადავჭრათ არსებული უთანხმოებები LVK მონაცემებსა და თეორიებს შორის, ჩვენ შეთავაზებთ, რომ ეს გრავიტაციული ტალღები წარმოიშვა ფარული პარალელური სექტორიდან - სარკული სამყაროდან. სარკული სამყარო ბნელი მატერიის კანდიდატია და იგი ვარაუდობს, რომ ყველა ელემენტარულ ნაწილაკს ჰყავს თავისი ტყუპი სარკული პარტნიორი, რომელიც ჩვენთვის უხილავია. ჩვეულებრივი და სარკული სამყაროს ურთიერთქმედების ერთადერთი გზა არის გრავიტაციული ძალა (და შესაძლოა სხვა სუსტი ძალა). ამრიგად, გრავიტაციულ ტალღებს შეუძლიათ გაიარონ სამყაროებს შორის, ხოლო ელექტრომაგნიტური გამოსხივება შეუმჩნეველი იქნება ჩვენი დეტექტორებისთვის. გარდა ამისა, სარკული სექტორი უფრო ცივია ვიდრე ჩვეულებრივი სამყარო და მასში დომინირებს ჰელიუმი. ეს იმაზე მეტყველებს, რომ სარკული ვარსკვლავები უფრო დიდი საწყისი მასით იბადებიან და უფრო სწრაფად ვითარდებიან, რაც პოტენციურად ხსნის ობიექტებს მასურ

დრენოში და შერწყმის მაღალ სიხშირეებს. შემდეგ თავში მიმოვიხილავთ სარკული სამყაროს მოდელს.

თავი 5

სარკული სამყაროს მოდელი

წინა თავებში განვიხილეთ აინშტაინის ფარდობითობის ზოგადი თეორია, რომელიც შესანიშნავად აღწერს გრავიტაციულ ურთიერთქმედებებს მასიურ ობიექტებს შორის. პრინციპში, სამყაროს ფარული სექტორი, ანუ ბნელი მატერია და ბნელი ენერჯია ასევე შეიძლება ექვემდებარებოდეს ზოგადი ფარდობითობის კანონებს. თუმცა, გარდა გრავიტაციული ძალისა, ბუნებაში არსებობს კიდევ სამი ფუნდამენტური ურთიერთქმედება. ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტული მოდელი (SM) აღწერს ყველა ცნობილ ელემენტარულ ნაწილაკს და მათ ურთიერთქმედებას ელექტრომაგნიტური და სუსტი და ძლიერი ბირთვული ძალების მეშვეობით. იმის გამო, რომ DM ნაწილაკი ჯერჯერობით არ არის აღმოჩენილი, ნაწილაკების ფიზიკის თეორიას არ აქვს ჩამოყალიბებული ხედვა მათი ბუნების შესახებ. ფენომენოლოგიურად, ნაწილაკების ფიზიკის სრული ლაგრანჟიანი შეიძლება წარმოდგენილი იყოს როგორც

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_{\text{dark}} + \mathcal{L}_{\text{mix}} , \quad (5.1)$$

სადაც \mathcal{L}_{SM} აღწერს სტანდარტულ მოდელს, $\mathcal{L}_{\text{dark}}$ აღნიშნავს ბნელი მატერიის ნაწილაკების თეორიას და \mathcal{L}_{mix} შეიძლება იყოს შესაძლო ურთიერთქმედება ამ ორ სექტორს შორის. შერევის ნაწილის არარსებობის შემთხვევაში, ნაწილაკების ფიზიკის არცერთ ექსპერიმენტს არ შეუძლია დაადასტუროს ფარული სექტორის არსებობა.

სარკული სამყაროს თეორია ვარაუდობს, რომ $\mathcal{L}_{\text{dark}}$ არის SM-ის ზუსტი ასლი, მაგრამ ძალიან სუსტი შერევის ნაწილით. ამრიგად, ყველა ელემენტარულ ნაწილაკს ჰყავს თავისი ტყუპი სარკული პარტნიორი, რომელიც თითქმის უხილავია, მაგრამ რადგან მათ შეუძლიათ აგრეთვე შექმნან (სარკული) მატერია, მათი არსებობის შეგრძნება შესაძლებელია გრავიტაციული ეფექტების საშუალებით. ეს თავი ეძღვნება სარკის სამყაროს თეორიის მიმოხილვას. დეტალური ანალიზისათვის იხილეთ [129–134].

სტანდარტულ მოდელში ირღვევა C , P , T და კომბინირებული CP ინვარიანტობა, თუმცა მიჩნეულია, რომ CPT უნდა იყოს სამყაროს შენახვადი სიმეტრია. მარცხენა-მარჯვენა სიმეტრიის მოდელები, აღადგენენ P და CP სიმეტრიას და, ამგვარად, გაფართოებული სტანდარტული მოდელი არის P -ინვარიანტული. სარკული სამყაროს მოდელი სწორედ ასეთ თეორიას განეკუთვნება და, მის თანახმად, სარკული ნაწილაკები არიან სტანდარტული მოდელის ნაწილაკების ზუსტი ანალოგები, იმ განსხვავებით, რომ მათ აქვთ საპირისპირო ქირალობა და სუსტი ურთიერთქმედება სარკულ სექტორში მარჯვენა ტიპისაა. ამრიგად, სტანდარტული მოდელის ფერმიონებს

$$f_L : q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}_i , \quad l_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}_i ; \quad f_R : u_R, d_R, e_R, \quad (5.2)$$

და ანტიფერმიონებს

$$\bar{f}_R : \bar{q}_R = \begin{pmatrix} \bar{u}_R \\ \bar{d}_R \end{pmatrix}_i, \quad \bar{l}_R = \begin{pmatrix} \bar{\nu}_R \\ \bar{e}_R \end{pmatrix}_i; \quad \bar{f}_L : \bar{u}_L, \bar{d}_L, \bar{e}_L. \quad (5.3)$$

ჰყავთ სარკული პარტნიორი სარკული ფერმიონები

$$f'_L : q'_L = \begin{pmatrix} u'_L \\ d'_L \end{pmatrix}_i, \quad l'_L = \begin{pmatrix} \nu'_L \\ e'_L \end{pmatrix}_i; \quad f'_R : u'_R, d'_R, e'_R, \quad (5.4)$$

და სარკული ანტიფერმიონები

$$\bar{f}'_R : \bar{q}'_R = \begin{pmatrix} \bar{u}'_R \\ \bar{d}'_R \end{pmatrix}_i, \quad \bar{l}'_R = \begin{pmatrix} \bar{\nu}'_R \\ \bar{e}'_R \end{pmatrix}_i; \quad \bar{f}'_L : \bar{u}'_L, \bar{d}'_L, \bar{e}'_L. \quad (5.5)$$

ამიერიდან, სარკული სამყაროს სიდიდეებს აღვნიშნავთ პრიმებით $'$, რომ განვასხვაოთ ისინი ჩვეულებრივი სამყაროს სიდიდეებისგან.

თუ სარკული სექტორი არსებობს, ის ასევე შეიქმნა დიდი აფეთქების შედეგად, ჩვეულებრივ მატერიასთან ერთად. შეიძლება ვიფიქროთ, რომ ჩვეულებრივ და სარკული სამყაროს ნაწილაკები ერთნაირი რაოდენობით უნდა გაჩენილიყვნენ და მათი კოსმოლოგიური ევოლუცია იდენტური უნდა იყოს. თუმცა, ეს ვერ მოხდებოდა. სარკული სექტორის ევოლუციას მართავს ორი ძირითადი მაკროსკოპული პარამეტრი, რომლებიც სარკული სამყაროს მოდელის თავისუფალი პარამეტრია. ეს არის სარკული და ჩვეულებრივი ფოტონის ტემპერატურის ფარდობა:

$$x \equiv \frac{T'_R}{T} \quad (5.6)$$

და სარკული და ჩვეულებრივი ბარიონების სიმკვრივების ფარდობა:

$$\beta \equiv \frac{\Omega'_b}{\Omega_b}. \quad (5.7)$$

დიდი აფეთქების ნუკლეოსინთეზი (BBN) შეზღუდვას ადებს დამატებითი მსუბუქი ნეიტრონების ეფექტურ რაოდენობას [141]

$$\Delta N_\nu < 1. \quad (5.8)$$

სარკული ფოტონები, ელექტრონები და ნეიტრონები, ჰაბლის გაფართოების სიხშირეში ასევე შეიტანდა წვლილს $\Delta N_\nu \simeq 6.14$ [136], რაც მომენტალურად წინააღმდეგობაში მოვიდოდა (5.8)-თან. თუმცა, ამ პრობლემის თავიდან აცილება შესაძლებელია, თუ ადრეულ სამყაროში სარკულ მატერიას აქვს ჩვეულებრივისაზე უფრო დავალი ტემპერატურა

$$T' < T. \quad (5.9)$$

ეს კი შესაძლებელია, თუ სრულდება შემდეგი პირობები:

(i) პოსტინფლაციური ეპოქაში ორი სექტორი თბება სხვადასხვა ტემპერატურაზე, ანუ (5.9), რაც ბუნებრივად შეიძლება მიღწეული იყოს ზოგიერთ ინფლაციურ მოდელში [135];

(ii) ორი სისტემა ძალიან სუსტად ურთიერთქმედებს, ამიტომ ისინი არ მოდიან ერთმანეთთან თერმულ წონასწორობაში სამყაროს გაფართოების დროს. თუ სისტემები ურთიერთქმედებენ გრავიტაციის საშუალებით, ეს მდგომარეობა ავტომატურად მიიღწევა;

(iii) ორივე სისტემა ფართოვდება ადიაბატურად, მნიშვნელოვანი ენტროპიის წარმოების გარეშე.

თუ ეს პირობები შესრულებულია, ორი სექტორი განსხვავებული საწყისი ტემპერატურით, რომლებიც დამოუკიდებლად ვითარდებიან კოსმოლოგიური გაფართოების დროს, მოგვიანებით ეტაპებზე ინარჩუნებენ თავიანთი ტემპერატურის თითქმის მუდმივ თანაფარდობას (5.6). ამგვარად, თუ $x \ll 1$, სარკული სექტორი არ იმოქმედებს ნუკლეოსინთეზზე ჩვეულებრივ სამყაროში.

სარკულ სექტორში ნეიტრინოების ეფექტური რაოდენობისთვის ვიღებთ:

$$\Delta N_\nu = 6.14 \cdot x^4 \quad (5.10)$$

და (5.8) პირობის გათვალისწინება გვაძლევს

$$x < 0.64 . \quad (5.11)$$

რამდენადაც $x^4 \ll 1$, რელატივისტურ ეპოქაში ჰაბლის გაფართოების სიხშირეში დომინირებს O-მატერიის სიმკვრივე და M- სექტორის არსებობა პრაქტიკულად არ მოქმედებს ადრეული ჩვეულებრივი სამყაროს სტანდარტულ კოსმოლოგიაზე. თუმცა, მაშინაც კი, თუ ორი სექტორს აქვს ერთი და იგივე მიკროფიზიკა, ადრეული სარკული სამყაროს კოსმოლოგია შეიძლება ძალიან განსხვავებული იყოს სტანდარტული საგან, რამდენადაც საქმე ეხება ისეთ გადამწყვეტ ეპოქებს როგორცაა ბარიოგენეზი, ნუკლეოსინთეზი და ა.შ.

ბარიო-ლეპტოგენეზისი გარკვეულ მექანიზმს, რომელიც განხილულია [137]-ში, შეუძლია შექმნას ბარიონული ასიმეტრია ორივე სექტორში ერთდროულად, თანაც ისე, რომ შესაძლოა $\Omega'_b \approx 5\Omega_b$ და ამ შემთხვევაში სარკული ნაწილაკები მთლიანად შეადგენენ ბნელ მატერიას.

ასევე ნაჩვენებია ისიც, რომ სარკულ სამყაროში BBN ეპოქა ჩვეულებრივისგან განსხვავებულად მიმდინარეობს და იგი წინასწარმეტყველებს პირველყოფილი ელემენტების სხვადასხვა რაოდენობას [136, 142]. ცნობილია, რომ მსუბუქი ელემენტების პირველადი სიმრავლე დამოკიდებულია ბარიონისა და ფოტონის სიმკვრივის თანაფარდობაზე $\eta = n_B/n_\gamma$, და დამზერილი მონაცემები კარგად ეთანხმება WMAP შედეგს $\eta \simeq 6 \times 10^{-10}$. რამდენადაც $T' \ll T$, სამყაროს გაფართოების სიჩქარე ჩვეულებრივ BBN ეპოქაში ($T \sim 1 \text{ MeV}$) განისაზღვრება თავად O-მატერიის სიმკვრივით და, შესაბამისად, ჩვეულებრივი დამკვირვებლისთვის ძალიან რთული იქნება M-სექტორის წვლილის დანახვა; ეს უკანასკნელი $\Delta N_\nu \approx 6.14x^4$ -ის ექვივალენტურია და, შესაბამისად, ის უმნიშვნელოა $x \ll 1$ -ისთვის. რაც შეეხება ნუკლეოსინთეზის ეპოქას M-სექტორში, O-სამყაროს წვლილი სამაგიეროდ დრამატულია: ის $\Delta N'_\nu \approx 6,14x^4 \gg 1$ -ის ექვივალენტურია. ამიტომ, სარკულმა დამკვირვებელმა, რომელიც ზომავს სარკული მსუბუქი ელემენტების სიმრავლეს, დაუყოვნებლივ უნდა შეამჩნიოს შეუსაბამობა სამყაროს გაფართოების სიჩქარესა და M-მატერიის სიმკვრივეს შორის მის BBN ეპოქაში ($T' \sim 1 \text{ MeV}$), რამდენადაც პირველი მათგანი განისაზღვრება O-მატერიის სიმკვრივით, რომელიც მისთვის უხილავია. სარკული ${}^4\text{He}$ -ის რაოდენობა ასევე დამოკიდებულია სარკული ბარიონისა და ფოტონის სიმკვრივის თანაფარდობაზე $\eta' = n'_B/n'_\gamma$. თუ დავწერთ, რომ $\beta = n'_B/n_B$ და $\eta' = (\beta/x^3)\eta$, ვხედავთ, რომ $\eta' \gg \eta$, თუ $\beta \ll x^3$. თუმცა, თუ $\beta > 1$, ჩვენ ველით, რომ სარკული ჰელიუმის მასის ფრაქცია Y'_4 იქნება საგრძნობლად დიდი ვიდრე დაკვირვებადი $Y_4 \simeq 0.24$. კერძოდ, პირდაპირი გამოთვლები აჩვენებს, რომ x -ისთვის, რომელიც მერყეობს 0.6-დან 0.1-მდე, Y'_4 იცვლება $Y'_4 = 0.5 - 0.8$ დიაპაზონში. მაშასადამე, თუ M-ბარიონები შეადგენენ ბნელ მატერიას ან მის დიდ ნაწილს მაინც, M-სამყარო არის დომინირებული ჰელიუმით.

ყველაზე ზოგად კონტექსტში, დღევანდელი სამყაროს ენერჯის სიმკვრივე შეიცავს რელატივისტურ (რადიაციულ) კომპონენტს Ω_r , არარელატივისტურ (მატერიის) კომპონენტს Ω_m და ვაკუუმის ენერჯის სიმკვრივეს Ω_Λ (კოსმოლოგიური წევრი). ინფლაციური პარადიგმის მიხედვით, სამყარო უნდა იყოს თითქმის ბრტყელი, $\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda \approx 1$, რაც თანხვედრაშია კოსმოსური მიკროტალღური ფონური გამოსხივების (CMB) ანიზოტროპიისა და

დიდი მასშტაბის სტრუქტურების (LSS) სიმძლავრის სპექტრის ბოლო შედეგებთან. ჰაბლის პარამეტრი უდრის $H_0 = 100h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, სადაც $h \approx 0.7$, და კოსმოლოგიური სიდიდის წითელი წანაცვლებისათვის, $1 + z = T/T_0 \gg 1$, ხდება

$$H(z) = H_0 [\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda]^{1/2}. \quad (5.12)$$

სარკული სამყაროს მოდელის კონტექსტში, რელატივისტური ნაწილი წარმოდგენილია ჩვეულებრივი და სარკული ფოტონებითა და ნეიტრინოებით, $\Omega_r h^2 = 4.2 \times 10^{-5} (1+x^4)$ და სარკული სახეობის წვლილი უმნიშვნელოა BBN შეზღუდვის $x < 0.6$ -ის გათვალისწინებით. რაც შეეხება არარელატივისტურ კომპონენტს, ის შეიცავს O-ბარიონულ ნაწილს Ω_b და M-ბარიონულ ნაწილს $\Omega'_b = \beta \Omega_b$, ხოლო ბნელი მატერიის სხვა ტიპები, მაგ. CDM ასევე შეიძლება იყოს წარმოდგენილი. ამიტომ, ზოგადად, $\Omega_m = \Omega_b + \Omega'_b + \Omega_{\text{cdm}}$.

რადიაცია გამოყოფა მატერიისგან მას შემდეგ, რაც თითქმის ყველა ელექტრონი და პროტონი გაერთიანდება ნეიტრალურ წყალბადად და თავისუფალი ელექტრონების რიცხვის სიმკვრივე მკვეთრად მცირდება, ისე, რომ ფოტონ-ელექტრონის გაფანტვის სიხშირე დაეცემა ჰაბლის გაფართოების სიხშირეზე დაბლა. ჩვეულებრივ სამყაროში MRD ხდება მატერიის დომინირების პერიოდში, ტემპერატურაზე $T_{\text{dec}} \simeq 0.26 \text{ eV}$, რაც შეესაბამება წითელ წანაცვლებას $1 + z_{\text{dec}} = T_{\text{dec}}/T_0 \simeq 1100$.

M-სექტორში MRD ტემპერატურა T'_{dec} შეიძლება გამოითვალოს იმავე სქემის მიხედვით, როგორც ჩვეულებრივში [136]. გამომდინარე იქიდან, რომ ორივე შემთხვევაში ფოტონების გამოყოფა ხდება მაშინ, როდესაც ექსპონენციალური ფაქტორი საჭას განტოლებებში ხდება ძალიან მცირე, გვაქვს $T'_{\text{dec}} \simeq T_{\text{dec}}$, დაკავშირებული მცირე ლოგარითმულ შესწორებამდე. B' -მდე განსხვავდება B -ისგან. აქედან გამომდინარე

$$1 + z'_{\text{dec}} \simeq x^{-1}(1 + z_{\text{dec}}) \simeq 1100 x^{-1} \quad (5.13)$$

ისე, რომ M-სექტორში MRD ხდება უფრო ადრე, ვიდრე ჩვეულებრივში. უფრო მეტიც, x -ისათვის, რომელიც ნაკლებია $x_{\text{eq}} = 0.045\omega_m^{-1} \simeq 0.3$ -ზე, სარკული ფოტონები გამოეყოფიან ჯერ კიდევ რადიაციის დომინირებულ პერიოდში.

რადგანაც სარკული სამყაროს მიკროფიზიკა იგივეა, მათაც უნდა შექმნან ვარსკვლავები და გალაქტიკები [140]. ვარსკვლავების ევოლუციური და სტრუქტურული თვისებები ძლიერ არის დამოკიდებული საწყის ქიმიურ შემადგენლობაზე, რომელიც განპირობებულია ჰელიუმის სიმრავლით და მძიმე ელემენტების გლობალური რაოდენობით. ჰელიუმზე მძიმე ჩვეულებრივი ბირთვების საწყისი სიმრავლე შეფასებულია, როგორც ძალიან მცირე ($Z \sim 10^{-10}$). ეს შეტალურება დამახასიათებელი იქნებოდა პირველი ვარსკვლავური დასახლების, ე.წ. III პოპულაციის ვარსკვლავებისთვის. რაც შეეხება სარკული მატერიის პირველყოფილ მეტალურობას, ის შეიძლება იყოს რამდენიმე რიგით მეტი სიდიდის.

ვარსკვლავებისა და გალაქტიკების ფორმირება მჭიდრო კავშირშია. გალაქტიკების წარმოქმნის ფიზიკის სირთულის გათვალისწინებით (ეს პროცესი ჯერ კიდევ კარგად არის გასაგები), ჩვენ შეგვიძლია გავაკეთოთ ზოგადი მოსაზრებები. პროტოგალაქტიკის გრავიტაციული კოლაფსის პროცესის ეტაპზე ის ფრაგმენტდება წყალბადის ღრუბლებში ტიპური ჯინსის მასით (სარკული მატერიისთვის ეს გაზის ღრუბლები უფრო მეტად წყალბად-ჰელიუმის ღრუბლებია). ღრუბლები აგრძელებენ გაციებას და იშლება მანამ, სანამ სისტემის გამჭვირვალობა არ გახდება იმდენად მაღალი, რომ გაზი ამჯობინებს პროტოვარსკვლავებად დაშლას. ეს რთული ფენომენი უბიძგებს პროტოგალაქტიკური აირის ნაწილს პირველი ვარსკვლავების ჩამოყალიბებამდე. იმ დროისთვის სამყაროში ლითონების ნაკლებობამ უნდა გახადოს ნაკლებად ეფექტური გაციების პროცესები პირველყოფილ ღრუბლებში, ასე რომ, მათი ფრაგმენტაცია მხოლოდ მაღალი მასის ვარსკვლავებს წარმოქმნის (ალბათ $M \sim 10^2\text{-}10^3 M_\odot$ და

მათი ევოლუციური სიცოცხლე იმდენად ხანმოკლეა, რომ აღარ არის დაკვირვებადი). გაგრილების სიჩქარე ძირითადად განისაზღვრება წყალბადის ატომებით და მოლეკულებით, ხოლო ჰელიუმი გაცილებით ნაკლებად ეფექტურია. თუმცა, სარკულ სექტორშიც კი, თუ x არ არის ძალიან მცირე, წყალბადის სიმკვრივე რჩება მნიშვნელოვანი და პირველყოფილი ღრუბლების შიგნით გაგრილების პროცესებს ასევე უფრო დაბალი ეფექტურობა უნდა ჰქონდეს, ამიტომ მხოლოდ ძალიან მასიური M -ვარსკვლავები უნდა ჩამოყალიბდეს.

შეჯამებისათვის, შეიძლება ითქვას, რომ სარკული ვარსკვლავები ჩვეულებრივი ვარსკვლავების ექვივალენტურია, როდესაც ამ უკანასკნელებმა წყალბადის უმეტესი ნაწილი ჰელიუმად გადააკეთეს და ჰელიუმის ბირთვი შექმნეს. M ვარსკვლავები უფრო მასიური იბადებიან და მათი ევოლუციის ვადები უფრო მოკლეა, რადგან ისინი უფრო სწრაფად წვავენ საწვავს. ვარსკვლავის საწყისი ჰელიუმის რაოდენობის გაზრდა შეესაბამება საშუალო მოლეკულური წონის ზრდას და, შესაბამისად, სიკაშკაშისა და ეფექტურ ტემპერატურას, რაც იწვევს სიცოცხლის ხანმოკლე პერიოდს. [140]-ში, ევოლუციური გზები იქნა სიმულირებული ვარსკვლავებისთვის, რომელთა საწყისი ჰელიუმის შემცველობა 0, 24 – 0, 8 დიაპაზონშია, განსხვავებული საწყისი მასით და დაბალი მეტალობით. შედეგების გაანალიზების შედეგად დადგინდა, რომ სარკული ვარსკვლავის სიცოცხლის ხანგრძლივობა შეიძლება იყოს 30-ჯერ უფრო მოკლე ვიდრე ჩვეულებრივის, თუ განვიხილავთ ჰელიუმით მდიდარ ვარსკვლავებს. დადგინდა, რომ ზოგადად, დიდი მასის დიაპაზონში და სხვადასხვა სასაზღვრო პირობებში, სარკული ვარსკვლავების სიცოცხლის ხანგრძლივობა დაახლოებით ერთი რიგით უფრო მცირეა, ვიდრე ხილული ვარსკვლავების. მაგალითად, $10M_{\odot}$ ვარსკვლავი 70% საწყისი He შემადგენლობით აქვს ევოლუცია ვადები ~ 10 -ჯერ უფრო სწრაფი ვიდრე ვარსკვლავს ჰელიუმის ჩვეულებრივი რაოდენობით.

გალაქტიკის ევოლუციის მკვეთრად უნდა იყოს დამოკიდებული სარკული ვარსკვლავის ფორმირებასა და ევოლუციის მახასიათებლებზე. ცნობილია, რომ ბნელი მატერია ადგენს სფერულ ჰალოს, ჩვეულებრივი მატერიისგან განსხვავებით, რომელსაც დისკის ფორმა აქვს. რადგან ჩვეულებრივი და სარკული მატერიის თვისებები ერთნაირია, დიდი ალბათობით, სარკული გალაქტიკაც დისკის ფორმას უნდა იღებდეს. თუმცა რადგანაც სარკული მატერია უფრო ცივია, ვარსკვლავები ფორმირდებიან უფრო ადრე და სარკული ბარიონები აღარ ადგენენ დისკს და ინარჩუნებენ სფერულ ფორმას.

თუ სარკული ვარსკვლავები მართლაც არსებობენ, ისინი შეიძლება შევამჩნიოთ როგორც მასიური კომპაქტური ჰალო-ობიექტები (MACHO) გრავიტაციული მიკროლინზირების ექსპერიმენტებში. კოლაბორაცია MACHO-მ ასეთი ობიექტები დააფიქსირა [143], თუმცა მოგვიანებით, კოლაბორაცია Eros-2-მა მისი შედეგები ვერ გაიმეორა [60]. ამგვარად, MACHO-ების არსებობა ჯერ კვლავ კითხვის ნიშნის ქვეშ დგას.

საინტერესოა ასევე სარკულ ნეიტრონს და ჩვეულებრივ ნეიტრონს შორის ოსცილაციის $n - n'$ შესაძლებლობა [152]. ნეიტრონის სიცოცხლის ხანგრძლივობის პრობლემა, რომელიც გამოწვეულია ორი განსხვავებული ტიპის ექსპერიმენტების შედეგების ერთმანეთთან შეუთავსებლობით, შესაძლოა გადაიჭრას, თუ დავუშვებთ, რომ ნეიტრონი, ძლიერი მაგნიტური ველის პირობებში ოსცილირებს სარკულ ნეიტრონში. საინტერესოა ასევე ისიც, რომ ჩვეულებრივი ნეიტრონული ვარსკვლავი შესაძლოა თანდათან გარდაიქმნას შერეულ ვარსკვლავად, რომელიც შედგება 50% – 50% ჩვეულებრივი და სარკული ნეიტრონებისგან [153].

სარკული სამყაროს გამოვლინების კიდევ ერთი გზა შესაძლოა იყოს გრავიტაციული ტალღები და შემდეგი თავი სწორედ მის მიმოხილვას ეთმობა.

თავი 6

გრავიტაციული ტალღები სარკული სამყაროდან

მე-(4) თავში განვიხილეთ გრავიტაციული ტალღების მონაცემები, რომლებიც დაფიქსირებულია LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) დეტექტორების მიერ და ვნახეთ, რა ძირითად პრობლემებს აწყდებიან არსებული მოდელები (4.5). წინა თავში (5) მიმოვიხილეთ სარკული სამყაროს მოდელი და აღვნიშნეთ, რომ თუ M-სექტორი არსებობს, მან უნდა შექმნას ვარსკვლავები და გალაქტიკებიც. ამრიგად, სარკულ ვარსკვლავებს ასევე შეუძლიათ შერწყმა და გრავიტაციული ტალღების წარმოქმნა. ვინაიდან გრავიტაცია თავისუფლად გადის სარკულ და ჩვეულებრივ სამყაროს შორის, სარკული GW სიგნალი შეიძლება დაფიქსირდეს ჩვენი დეტექტორებით და ის არ იქნება განსხვავებული სიგნალისგან, რომელიც მოდის ჩვეულებრივი ვარსკვლავების შერწყმადან. თუმცა, თუ მასიური კომპაქტური ობიექტების შერწყმა ასევე წარმოქმნის სხვა ტიპის გამოსხივებას, როგორცაა გამა-სხივების აფეთქება, კილონოვა, ნეიტრონო და სხვა, მაშინ ის მკაფიოდ განასხვავებს O- და M- შერწყმას, რადგან სარკული ნაწილაკები შეუმჩნეველი იქნება ჩვენი დეტექტორებისთვის. ამგვარად, პრინციპში, ნებისმიერი GW მოვლენა თანმხლები გამოსხივების გარეშე შეიძლება ასოცირდეს M- სამყაროსთან. სინამდვილეში, მოვლენების 98.9% მსგავსია; 90 შერწყმიდან მხოლოდ 1 იყო მულტიმესენჯერული მოვლენა.

როგორც უკვე განვიხილეთ, M-სამყარო უფრო ცივია და მისი კოსმოლოგიური ევოლუცია ჩვენს სამყაროსთან შედარებით განსხვავებული გზით მიმდინარეობს. თუ M-სექტორი წარმოადგენს DM-ის დომინანტურ ნაწილს, მაშინ M-ვარსკვლავების რაოდენობა უფრო მეტია, ვიდრე ჩვეულებრივების. ვინაიდან ჰელიუმით დომინირებული ვარსკვლავების ევოლუციის დრო უფრო ნაკლებია, ეს იწვევს კომპაქტური ობიექტების - ნეიტრონული ვარსკვლავების და შავი ხვრელების უფრო დიდი რაოდენობით წარმოქმნას. ამრიგად, M-სექტორში შერწყმის სიხშირე შეიძლება იყოს უფრო მაღალი. ჩვენს ნაშრომებში [1, 2], ჩვენ გამოვთქვით ვარაუდი, რომ LIGO-ს მიერ შეფასებული კომპაქტური ობიექტების შერწყმის სიხშირე შეიძლება უკეთ იყოს ინტერპრეტირებული სარკული სამყაროს სცენარში. [3]-ში ჩვენ შევისწავლეთ ბინარული ნეიტრონული ვარსკვლავის შერწყმა ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გარეშე, როგორც სარკული სამყაროს გამოვლინება. გარდა ამისა, ნაშრომებში [4, 5], ვივარაუდეთ, რომ LVK კატალოგში უცნაური მასური ღრეჩოს მოვლენები შეიძლება უკეთესად აიხსნას, თუ შერწყმა ხდება M- სექტორში. მომდევნო სექციებში ჩვენ დეტალურად აღვწერთ ამ სქემებს.

6.1 მულტი-მესენჯერული მოვლენების ნაკლებობა

როგორც აღწერილ იქნა მე-(4.4.1) თავში, ბინარული ნეიტრონული ვარსკვლავების ან ნეიტრონული ვარსკვლავის - შავი ხვრელის სისტემების შერწყმას უნდა მოჰყვეს ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ჭავლები. თუ დედამიწა ექცევა ჭავლის გახსნის კუთხეში - და უმეტეს შემთხვევაში ეს ასეც უნდა იყოს, მაშინ ჩვენ უნდა შევძლოთ დავაკვირდეთ გამა-გამოსხივების მოკლე აფეთქებებს და კილონოვას შემდგომ ნათებას, რომელიც თან ახლავს გრავიტაციულ ტალღას. LVK მონაცემებმა, სამი დაკვირვების დასრულების შემდეგ, დააფიქსირა ორი NS-NS შერწყმის სიგნალი, ორი მოვლენა BH-NS შერწყმიდან და ორიც შავი ხვრელის შერწყმა ქვედა მასური ღრეჩოს ობიექტთან, რომელიც შეიძლება იყოს ნეიტრონული ვარსკვლავი. თუმცა, ამ ექვსი მოვლენიდან მხოლოდ ერთს ჰქონდა თანმხლები EM გამოსხივება.

ზოგადად, BBH სისტემის ვაკუუმში შერწყმას არ არის მოსალოდნელი, რომ ახლდეს EM სიგნალი. თუმცა, თუ BH-ები ჯერ კიდევ ახდენენ გარკვეული გაზის აკრეციას შერწყმის დროს, მაშინ შერწყმამ შეიძლება გამოასხივოს რაიმე სახის მაღალი ენერგიის მქონე EM გამოსხივება. რეალურად, ფერმის თანამგზავრმა დააფიქსირა ფოტონების სიგნალი ენერგიით > 50 კეე, რომელიც გაგრძელდა 1 წამი და გამოჩნდა 0.4 წამის შემდეგ BBH GW150914 მოვლენიდან, ცის ლოკალიზაციის 70%-იანი გადაფარვით [154]. გამოკვლეულია რამდენიმე მექანიზმი, რომელსაც შეუძლია პოტენციურად გამოასხივოს GRB BBH შერწყმის დროს [155-157] და ა.შ. თუმცა, იმის გამო, რომ არ არის საკმარისი მტკიცებულება, რომ ეს GRB რეალურად ასოცირდება GW150914-თან, მიხნეულია, რომ BBH-ების მიერ აქამდე გამოვლენილი არცერთი GW არ არის მულტი-მესენჯერული მოვლენა.

ამგვარად, LVK კატალოგში 90 მოვლენიდან მხოლოდ ერთს ჰქონდა თანმხლები ელექტრომაგნიტური გამოსხივება. ამან გვაფიქრებინა, რომ ამ გრავიტაციული ტალღების წყაროები სარკულ სამყაროშია [1,2]. კომპაქტური ობიექტების შერწყმა წარმოქმნის GW და EM გამოსხივებას - სარკულ ფოტონებს. მიუხედავად იმისა, რომ GW-ებს ჩვენი ინტერფერომეტრები აკვირდებიან, სარკული ფოტონები გადაიან ჩვენს დეტექტორებში და შეუმჩნეველი რჩებიან.

სარკისებური ნეიტრონული ვარსკვლავების შერწყმის შედეგად წარმოქმნილი GW-ების აღმოჩენის შესაძლებლობა დამოუკიდებლად იყო შემოთავაზებული [159]-ში. ნაშრომის ავტორებმა ჩაწერეს სარკული ნეიტრონული ვარსკვლავების მდგომარეობის განტოლება და შეამოწმეს, რომ სარკული BNS შერწყმის შედეგად გამოსხივებული სიგნალი ზუსტად ისეთივე უნდა იყოს, როგორც ჩვეულებრივი ვარსკვლავებისთვის. მათ დაასკვნეს, რომ ნებისმიერი BNS-დან მომავალი GW ელექტრომაგნიტურ სიგნალთან კორელაციის გარეშე, შეიძლება იყოს არაპირდაპირი მინიშნება სარკული ნეიტრონული ვარსკვლავების არსებობის შესახებ.

6.2 შერწყმის სიხშირეები

EM გამოსხივების ნაკლებობა არ არის ერთადერთი მითითება GW-ების შესაძლო სარკული წარმოშობის შესახებ. სარკული ვარსკვლავების სიმრავლემ უნდა იმოქმედოს კომპაქტური ობიექტების შერწყმის სიხშირეზე, რასაც განვიხილავთ ამ ნაწილში.

6.2.1 ორმაგი შავი ხვრელები

როგორც (4.3.1) სექციაში ვნახეთ, პირველადი BH-ების არსებობა LVK-სთვის რელევანტურ მასის ინტერვალებში მკაცრად შეზღუდულია. ამიტომ, ჩვენ უნდა გავამახვილოთ ყურადღება ასტროფიზიკურ BH-ზე (4.3.2). ჩვეულებრივი BH-ების შერწყმის მაჩვენებლების ფორმულის მსგავსად, სარკული ვარსკვლავების კოლაფსის შედეგად წარმოქმნილი BH-ების შერწყმის

სიხშირე შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\mathcal{R}'_{\text{BBH}} = \frac{1}{2} \epsilon P(\tau) N'_{\text{BH}} . \quad (6.1)$$

მიგვაჩნია, რომ უგანზომილებიანი კოეფიციენტი $\epsilon < 1$ (4.10), რომელიც განსაზღვრავს BBH შერწყმის ეფექტურობას და დაყოვნების დრო $P(\tau)$ (ორმაგი სისტემის ჩამოყალიბებასა და შერწყმას შორის გასული დრო) იგივეა ჩვეულებრივი და სარკული სისტემებისთვის. განსხვავება მოდის BH-ების რაოდენობის სიმკვრივიდან, რომელსაც, (4.12)-ის მსგავსად, M-სექტორში ექნება ფორმა:

$$N'_{\text{BH}} = \text{SFR}(z') \int \phi(m) N'(m) \int f(Z, m) \int \xi(M) dM dZ dm . \quad (6.2)$$

ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ ვარსკვლავის საწყისი მასის ფუნქცია $\xi(M)$, მეტალობის განაწილების ფუნქცია $f(Z, m)$ და გალაქტიკის ვარსკვლავური მასის ფუნქცია $\phi(m)$ იგივეა O- და M-სექტორებისთვის და ისინი ინტეგრირებულია იმავე ინტერვალში. მაგრამ, ვარსკვლავის წარმოქმნის სიხშირე $\text{SFR}(z')$ და m მასის გალაქტიკაში ვარსკვლავების რაოდენობა $N(m)$, სარკულ სამყაროში განსხვავებული უნდა იყოს.

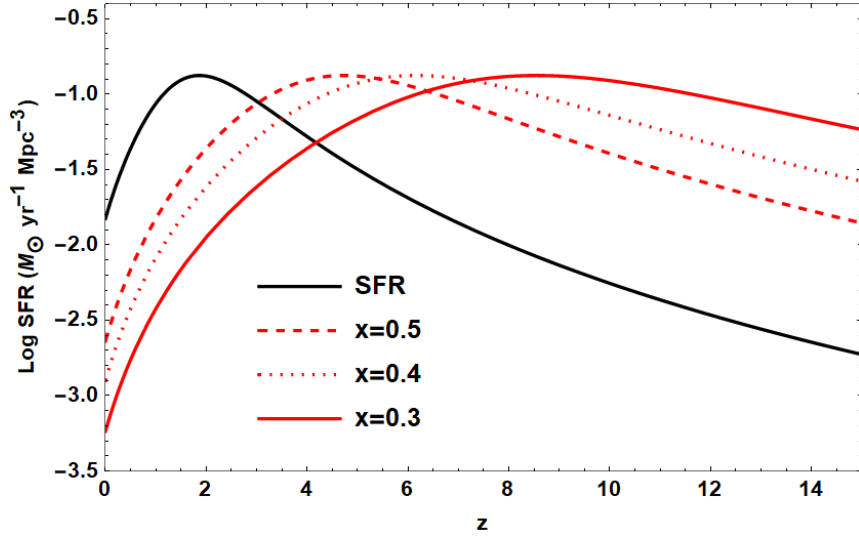
SFR ჩვეულებრივ აღებულია ექსპერიმენტული მონაცემების ფიტირებიდან (4.14) და ის არის წითელი წანაცვლების ფუნქცია. როგორც ნაჩვენებია მე-(5) თავში, სარკული სამყაროს დაბალი ტემპერატურის შედეგი არის ის, რომ მნიშვნელოვანი კოსმოლოგიური პროცესები, როგორცაა მატერია-რადიაციის თანასწორობა, მატერია-რადიაციის განცალკევება, რეკომბინაცია, უფრო ადრე ხდება. შედეგად, ნეიტრალური ატომები და მოლეკულები წარმოიქმნება ადრეულ დროში და ვარსკვლავები იწყებენ ფორმირებას M- სამყაროში ჩვეულებრივ სამყაროსთან შედარებით უფრო ადრე. ამგვარად, ვარსკვლავის ფორმირების სიხშირის ფორმულა (4.14) შეცვლილია (5.13)-ის მსგავსად და ახლა აქვს ფორმა:

$$\begin{aligned} \text{SFR}(z') &= 0.015 \frac{(1+z')^{2.7}}{1 + [(1+z')/2.9]^{5.6}} \text{M}_{\odot} \text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1} \\ &= 0.015 \frac{[x(1+z)]^{2.7}}{1 + [x(1+z)/2.9]^{5.6}} \text{M}_{\odot} \text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1} . \end{aligned} \quad (6.3)$$

ამან შეიძლება მნიშვნელოვანი გავლენა იქონიოს ვარსკვლავების მთლიან რაოდენობაზე და, შესაბამისად, BH-ების რაოდენობაზე M- სამყაროში. მე-(6.1) გრაფიკზე ნაჩვენებია, თუ როგორ იცვლება SFR ფუნქციის მრუდი $x = T'/T$ -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, SFR ჩვეულებრივ სამყაროში პიკს აღწევს $z \sim 2$, რაც შეესაბამება წარსულში გახედვის დროს (lookback time) ~ 10 Gyr-ს. M- სამყაროში, რაც უფრო დაბალია მისი ტემპერატურა, უფრო მაღალი z -ისთვის აქვს SFR-ს პიკი. $0,3 < x < 0,5$ -ისთვის SFR-ს აქვს პიკი დაახლოებით $4 < z < 8$ -ზე, რაც შეესაბამება უკან გახედვის დროს $12 \text{ Gyr} \lesssim t_{\text{lookback}} \lesssim 13 \text{ Gyr}$. გარდა ამისა, როგორც გრაფიკიდან ვხედავთ (6.1), რაც უფრო დაბალია x -ის მნიშვნელობა, მეტადაა მრუდის ფორმა შეცვლილი და მრუდის ქვეშ ფართობი არსებითად იზრდება. მაგალითად, $x = 0.3$ -ისთვის, შეფარდება

$$\frac{\int_0^{14} \text{SFR}' dz}{\int_0^{14} \text{SFR} dz} = 2.3 , \quad (6.4)$$

შეიძლება განიმარტოს, როგორც ფაქტი, რომ $0 < z < 14$ პერიოდში სარკულ სამყაროში ~ 2.3 -ჯერ მეტი ვარსკვლავი ჩამოყალიბდა ვიდრე ჩვეულებრივში. ეს გამოიწვევს BH-ების რაოდენობის გაზრდას (6.2) იმავე ფაქტორით (6.4).



სურ 6.1: შავი მრუდი გვიჩვენებს ვარსკვლავის ფორმირების სიხშირის ფორმულას (4.14) როგორც წითელი წანაცვლების ფუნქციას, როგორც ეს მოცემულია [66]-ში. წითელი მრუდები აჩვენებს SFR-ს სარკულ სამყაროში (6.3) x -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის.

გარდა ამისა, როგორც განხილულია მე-(5) თავში, სარკული მატერია არის ბნელი მატერიის კანდიდატი და გარკვეული ბარიოგენეზის მექანიზმს ბუნებრივად შეუძლია მიგვცეს $\beta = \Omega'/\Omega \sim 5$. ეს ნიშნავს, რომ სარკული მატერიის, შესაბამისად სარკული ვარსკვლავების რაოდენობა ~ 5 -ჯერ აღემატება ჩვეულებრივისას.

$$N' \sim 5 \times N. \quad (6.5)$$

(6.3) და (6.5)-ის გაერთიანებით, მივიღებთ, რომ BH-ების რაოდენობა სარკულ სექტორში (6.2) დაახლოებით ერთი რიგით მეტია ჩვეულებრივ სამყაროსთან შედარებით,

$$N'_{\text{BH}} \sim 10 \times N_{\text{BH}}. \quad (6.6)$$

შედეგად, შერწყმის სიხშირე სარკულ სამყაროში (6.1) გაძლიერებული იმავე ფაქტორით

$$\mathcal{R}'_{\text{BBH}} \sim 10 \times \mathcal{R}_{\text{BBH}}^{\text{theor}}. \quad (6.7)$$

რა თქმა უნდა, შერწყმის სრული სიხშირე, რომელიც დაიძირება გრავიტაციული ტალღების საშუალებით, არის

$$\mathcal{R}_{\text{BBH}}^{\text{total}} = \mathcal{R}_{\text{BBH}}^{\text{theor}} + \mathcal{R}'_{\text{BBH}}, \quad (6.8)$$

მაგრამ, როდესაც $x = 0.3$ და $\beta = 5$, $\mathcal{R}_{\text{BBH}}^{\text{total}} \approx \mathcal{R}'_{\text{BBH}}$. თუმცა, ეს უკიდურესი შემთხვევაა, სინამდვილეში სარკული მატერიის სიმკვრივე შეიძლება იყოს უფრო მცირე $\beta < 5$. ასე რომ, ვასკვნით, რომ სარკულ სექტორში BBH შერწყმის მაჩვენებელი შეიძლება იყოს 10-ჯერ მეტი. გავიხსენოთ, რომ მოდულების უმეტესობაში შერწყმის სიხშირე მოცემულია განტოლებით (4.15) და უდრის $\mathcal{R}_{\text{BBH}}^{\text{theor}} \sim 5 - 10 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$. მისი ჩასმით (6.7) განტოლებაში, მივიღებთ:

$$\mathcal{R}'_{\text{BBH}} \sim 50 - 100 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}, \quad (6.9)$$

იმ შემთხვევაში, თუ DM სრულად წარმოდგენილია სარკული მატერიით. თუ მას შევადარებთ LVK-ს მიერ მიღებულ შეფასებებს (განტოლება (4.1)), $\mathcal{R}_{\text{BBH}} = 17.9 - 44 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$, დავინახავთ, რომ (6.9) მდებარეობს LVK ზედა ზღვართან ახლოს. იმ კონფიგურაციაში, როდესაც

DM მთლიანად არ შედგება M-მატერიისგან, ან SFR' არ არის ისეთი ეფექტური, როგორც ჩვენ მივიჩნით, მაშინ ჩვენ შეგვიძლია შევამციროთ გაძლიერების ფაქტორი 2-ით და მივიღებთ:

$$\mathcal{R}'_{\text{BBH}} \sim 25 - 50 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} , \quad (6.10)$$

რაც იდეალურად ესადაგება LVK-ს მონაცემებს (4.1).

6.2.2 ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავები

ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავების შერწყმისათვის, (6.1)-ის მსგავსად, შეგვიძლია გამოვიყენოთ ფორმულა:

$$\mathcal{R} = \frac{1}{2} \epsilon \int P(\tau) N_{\text{NS}} d\tau , \quad (6.11)$$

სადაც ახლა N_{NS} არის ნეიტრონული ვარსკვლავების რაოდენობის სიმკვრივე და ის მიიღება (4.12) განტოლებაში IMF-ის ინტეგრირებით $5 M_{\odot} < M < 25 M_{\odot}$ ინტერვალში. წინა სექციაში გამოთქმულ არგუმენტებზე დაყრდნობით და (6.4) და (6.5)-ის შედეგების გამოყენებით, სარკული BNS-ების შერწყმის სიხშირე გაძლიერდება იმავე 10-ის ტოლი ფაქტორით,

$$\mathcal{R}'_{\text{BNS}} \sim 10 \times \mathcal{R}_{\text{BNS}}^{\text{theor}} . \quad (6.12)$$

თუმცა, გაანგარიშებული შერწყმის სიხშირეების განუზღვრელობა (4.4) გაცილებით დიდია, კერძოდ, $\mathcal{R}_{\text{BNS}} = 10 - 1700 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ და ის მოიცავს ერთ რიგზე მეტს. ასე რომ, თითქმის ნებისმიერი გონივრული თეორიული შეფასება შეიძლება კარგად იყოს შეჯერებული LVK-ის შედეგებთან BNS შერწყმის მაჩვენებლებზე. მომავალი დაკვირვებები გაზრდილი მგრძობელობით შეამცირებს დაშვებულ ინტერვალს, რაც მოდელს, რომლებიც ეყრდნობიან სიხშირეების პროგნოზირებას უფრო ადვილად შესამოწმებელს გახდის. თუმცა, ჩვენს სცენარში, ჩვენ შეგვიძლია დარწმუნებით ვიწინასწარმეტყველოთ, რომ აღმოჩენილი GW მოვლენების უმეტესობას, კლასიფიცირებული როგორც BNS ან BH-NS შერწყმა, არ ექნება ელექტრომაგნიტური ანალოგი. უფრო ზუსტად, ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ დაახლოებით ათი BNS შერწყმადან მხოლოდ ერთი იქნება გამოვლენილი, როგორც მულტი-მესინჯერული მოვლენა, რომელიც ჩანს როგორც GW-ში, ასევე ზემოთ განხილულ ერთ-ერთ მაინც კანონიკურ ელექტრომაგნიტურ თანმხლებ გამოსხივებაში. ჰიპოთეზის დასადასტურებლად საჭირო სტატისტიკის რაოდენობა არსებითად უნდა გაიზარდოს. იმ შემთხვევაში, თუ სარკულ სამყაროს წვლილი შეაქვს ბნელი მატერიის მთლიან რაოდენობაზე ნაკლებში, ერთობლივი GW ელექტრომაგნიტური დაკვირვების სიხშირე გაიზრდება $\Omega_{B'}/\Omega_B$ თანაფარდობის უკუპროპორციით. აქედან გამომდინარე, ერთობლივი გამოვლენის სიხშირის გაზომვები შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც დამოუკიდებელი შეზღუდვა ბნელი მატერიის სარკული სამყაროს კოსმოლოგიაზე.

ჩვენი პროგნოზი შეიძლება გამოიხატოს სხვაგვარადაც, კერძოდ, NS შერწყმის სიხშირე, რომელიც მიღებულია GW სიგნალების გაზომვით, იქნება ~ 10 -ჯერ მეტი, ვიდრე SGRB მონაცემებიდან მიღებული. იგივე არგუმენტები ესადაგება BH-NS შერწყმებსაც, თუმცა ასეთი ორმაგი სისტემების კომპონენტების მასების თანაფარდობა, ისევე როგორც კუთხური პარამეტრების კონფიგურაცია შეიძლება უფრო კრიტიკულ როლს ასრულებდეს ასეთი სახის შეფასებების გაკეთებისას.

6.3 მასური ღრეჩოს ობიექტები

სექციებში (4.3.3) და (4.4.2) განვიხილეთ, რომ შეიძლება არსებობდეს ე.წ. ზედა და ქვედა მასური ღრეჩოები კომპაქტური ობიექტებისთვის. წყვილების არასტაბილურობა კრძალავს

BH-ების წარმოქმნას $\sim 65 - 150M_{\odot}$ მასის ინტერვალში. ვარსკვლავების ევოლუციის მრავალი მოდელი პროგნოზირებს, რომ NS და BH მასებს შორის გადასვლა არ შეიძლება იყოს გლუვი და უნდა იყოს ღრეჩო $2.5 - 5M_{\odot}$ მასის დიაპაზონში, რაც მხარდაჭერილია ორმაგს სისტემებზე რენტგენული დაკვირვებებით. მიუხედავად ამისა, LVK მონაცემები შეიცავს მოვლენების საკმაოდ რაოდენობას მასებით ამ დაუშვებელ ინტერვალში (4.3.3, 4.4.2). [4, 5]-ში ჩვენ ვივარაუდებთ, რომ ასეთი მოულოდნელი მოვლენები შეიძლება უკეთ აიხსნას, თუ დავუშვებთ, რომ ისინი წარმოიშვა სარკულ სამყაროდან.

6.3.1 ზედა მასური ღრეჩოს ობიექტები

პირველ რიგში, ჩვენ განვიხილავთ LVK კატალოგის ზედა მასური ღრეჩოს BH-ების შესაძლო M-წარმოშობას. პრინციპში, BH-BH შერწყმას, რომელიც მოიცავს LVK მოვლენების ყველაზე დიდ რაოდენობას, არ უნდა ჰქონდეთ ოპტიკური ანალოგები, ამიტომ ისინი შეიძლება წარმოიშვას როგორც ჩვეულებრივი, ასევე სარკული ვარსკვლავებისგან. თუმცა, როგორც ზემოთ განვიხილეთ, სარკული წარმოშობის BH ბინარები აძლიერებს BH-BH შერწყმის შანსს. ვინაიდან სარკული ვარსკვლავების მიკროფიზიკა ჩვეულებრივი ვარსკვლავების მსგავსია, ისინი ასევე ექვემდებარებიან წყვილების არასტაბილურობას და წარმოქმნიან მასურ ღრეჩოს შუალედური მასის BH-ებისთვის. თუმცა, როგორც უკვე დავინახეთ, M-სამყაროში ვარსკვლავები ჩვეულებრივ ვარსკვლავებთან შედარებით უფრო დიდი საწყისი მასით იბადებიან და ისინი უფრო სწრაფად ვითარდებიან. შედეგად, M-სექტორში SFR-ის გათვალისწინებით (გრაფიკი (6.1)), მოკლე დროში წარმოიქმნება მასიური BH-ების უფრო დიდი რაოდენობა. ასევე, თუ დავამატებთ იმ ფაქტს, რომ სარკული მატერიის სიმკვრივე შეიძლება იყოს ~ 5 -ჯერ მეტი ჩვეულებრივი მატერიის სიმკვრივეზე, BH-ები, რომლებიც წარმოიქმნება სარკული მატერიის გარემოში, შეიძლება გაიზარდოს მასაში სარკული მატერიის აკრეციით. საერთო ჯამში, სარკული ვარსკვლავების მიერ წარმოქმნილი BH-ების შეჯახება უფრო ხშირია, რაც ბუნებრივად ზრდის შერწყმის სიხშირეს.

შედეგად, იერარქიულმა შერწყმამ შეიძლება უფრო ადვილად შექმნას შუალედური მასის BH-ები M-სამყაროში. რამდენადაც შერწყმის სიხშირეები გაძლიერებულია M-სექტორში, [71]-ის მიერ განტოლება (4.17)-ში გაკეთებული უკიდურესი დაშვებები შეიძლება შემსუბუქდეს და GW190521-ის მსგავსი სისტემების შერწყმის სიხშირის მიღება მაინც შესაძლებელია LVK ინტერვალში (4.16). უფრო კონკრეტულად რომ ვთქვათ, რადგან BH-ების ფორმირება არის ~ 10 -ჯერ უფრო ეფექტური (6.2) M-სამყაროში, შეიძლება შემცირდეს ნამრავლი $f \equiv f_{\text{triple}} \times f_{\text{survival}} \times f_{\text{merger}}$ განტოლებაში (4.17) ერთი რიგით და მიღებული მნიშვნელობა (4.19) დარჩება უცვლელი. f -ის ასეთი შემცირებული მნიშვნელობა აღარ არის ისეთი ექსტრემალური და უფრო დამაჯერებლად გამოიყურება. ამგვარად, მიღებული შერწყმის მაჩვენებელი პირველი თაობის BH-ებისთვის, რომლებმაც შექმნეს GW190426_190642 და GW190521 მძიმე კომპონენტები, უფრო ბუნებრივად გამოიყურება. ასე რომ, BBH-ის იერარქიული შერწყმის განხილვა M-სამყაროს სცენარის ფარგლებში შეიძლება იყოს კარგი ინტერპრეტაცია LVK-ის ზედა მასური ღრეჩოს მოვლენებისთვის.

6.3.2 ქვედა მასური ღრეჩოს ობიექტები

M-სამყაროს სცენარის კიდევ ერთი შედეგი შეიძლება იყოს კომპაქტური ობიექტების ახსნა, რომლებიც ზვდებიან LVK კატალოგში ქვედა მასური ღრეჩოს შიგნით ან მის გვერდით. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, NS-NS ან BH-NS შერწყმა, იმ შემთხვევაში, თუ ისინი შეიცავს ნორმალურ NS-ებს, ჩვეულებრივ უნდა ახლდეს GRB და ოპტიკური შემდგომი ნათება. თუმცა, არც NS-NS მოვლენას GW190425, ან BH-NS შერწყმას GW200105 და GW200115, და არც

BH-მასური ღრეხოს მოვლენებს GW190814 და GW200210_092254 არ ჰქონიათ ისეთი ანალოგები, რომლებიც პოტენციურად შეიძლება მიუთითებდეს მათ სარკულ წარმომავლობაზე. ასე რომ, ის ფაქტი, რომ მძიმე NS-ები არ არის აღმოჩენილი ელექტრომაგნიტური სპექტრის საშუალებით, მაგრამ შეინიშნება გრავიტაციული გამოსხივების საშუალებით, შეიძლება იყოს იმის მანიშნებელი, რომ ისინი არსებობენ სარკულ სამყაროში. როგორც ზემოთ განვიხილეთ, ორმაგი NS სისტემის შესაქმნელად, როგორცაა GW190425, საჭიროა ულტრა მჭიდრო ორმაგი NS და მასიური He-ვარსკვლავის სისტემა. იმის გამო, რომ M-სამყარო დომინირებს ჰელიუმით და ამიტომ იგი დასახლებულია ძირითადად He-ვარსკვლავებით, ასეთი კონფიგურაციის მიღწევა მარტივად შეიძლება. GW190814-ის მსგავსი სისტემების ფორმირება ასევე რთულია მიმდინარე თეორიებისთვის და მათი სიმრავლე, სავარაუდოდ, უკიდურესად დაბალი იქნება. თუმცა, რადგან M-სამყაროში მატერიის რაოდენობა ~ 5 -ჯერ აღემატება ჩვეულებრივი მატერიის რაოდენობას და M-სექტორში ვარსკვლავები უფრო სწრაფად ვითარდებიან, იერარქიული შერწყმის ალბათობა იზრდება ერთი რიგით და GW190814-ის მსგავსი სისტემები უფრო გავრცელებული უნდა იყოს.

6.4 სამომავლო ხედვები

LVK-ის მეოთხე დაკვირვების დაწყება იგეგმება 2023 წლის მარტში. LIGO India (IndIGO) აპირებს შეუერთდეს 2024 წელს. დეტექტორების სენსიტიურობა იგივე დარჩება, თუმცა მათი მუშაობის გაუმჯობესება და ახალი ობსერვატორიების დამატება გაზრდის აღმოჩენილი მოვლენების რაოდენობას მნიშვნელოვნად. მესამე თაობის მიწაზე განთავსებული GW ობსერვატორიების, Einstein Telescope და Cosmic explorer მშენებლობა დაწყებულია და ისინი ამუშავდებიან 2030-იან წლებში. ასევე, პირველი თანამგზავრული დეტექტორის LISA (Laser Interferometer Space Antenna) პროექტი დამტკიცებულია, ის ევროპის კოსმოსური სააგენტოს ერთ-ერთი მთავარი კვლევითი მიხია.

GW მონაცემების მკვეთრი ზრდა, რომელიც მოსალოდნელია უახლოეს მომავალში, საშუალებას მიგვცემს დავადასტუროთ ან უარვყოთ ბევრი წინადადება. ჩვენი ვარაუდი, რომ სარკულ ობიექტებს შეუძლიათ GW-ების გამოსხივება, არის იმ თეორიებს შორის, რომლებიც შეიძლება შემოწმდეს ამ გზით. აღმოჩენილი GW-ების რაოდენობის გაზრდა გაამარტივებს ასოცირებული ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ძიებას და გაზრდის მულტი-მესინჯერთა რიცხვს. ეს ხელს შეუწყობს მრავალი არსებული პრობლემის გარკვევას. თუმცა, M-სცენარის მთავარი პროგნოზი არის ის, რომ მულტი-მესინჯერული მოვლენის რაოდენობა დაბალი იქნება, რადგან შერწყმის უმეტესობას თან ახლავს ჩვენთვის უხილავი სარკული ფოტონები.

ამ სფეროში მომავალი კვლევების ერთ-ერთი საინტერესო პერსპექტივაა GW-ები იმ ობიექტებიდან, რომლებიც აერთიანებენ როგორც ჩვეულებრივ, ისე სარკულ მატერიას. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ვარაუდობენ, რომ $n \rightarrow n'$ ოსცილაციები შეიძლება მოხდეს ნეიტრონული ვარსკვლავის შიგნით, ამიტომ ჩვეულებრივი NS შეიძლება თანდათან გარდაიქმნას შერეულ ვარსკვლავად, რომელიც შედგება 50% – 50% ჩვეულებრივი და სარკული მატერიისგან [153]. ამ შემთხვევაში, ვარსკვლავის მასის და რადიუსის ფარდობა იცვლება და ეს შეცვლის GW სიგნალსაც.

კიდევ ერთი დამაინტრიგებელი შემთხვევა შეიძლება იყოს ჩვეულებრივი და სარკული NS-ების შერწყმა. პრინციპში, შესაძლებელია ჩვეულებრივი და სარკული ვარსკვლავების ბინარის ფორმირება. მიუხედავად იმისა, რომ ისინი ერთმანეთს ვერ ხედავენ, გრავიტაციული მიზიდულობა აიძულებს მათ შერწყმას. შერწყმისას, მიუხედავად იმისა, რომ ორივე ნეიტრონული ვარსკვლავია და უნდა ქონდეთ გავლენა ერთმანეთის თაიდალ ველებზე, ისინი რეალურად „ეხებიან“ ერთმანეთს, ჩვეულებრივ შემთხვევასთან შედარებით, დაგვიანებით. ამან

უნდა დატოვოს ანაბეჭდი წარმოქმნილი გრაფიტაციული ტალღის ფორმაზე.

ამ შემთხვევების შესწავლის შემდეგ და იმის ცოდნით, თუ რა სახის კორექტივები უნდა იყოს მოსალოდნელი გრაფიტაციული ტალღის ფორმაში, შეიძლება შესწავლილ იქნას გრაფიტაციული ტალღების მონაცემებში და მოიძებნოს მათი შესაძლო კვალი.

თავი 7

დასკვნა

გრავიტაციული ტალღები, რომლებიც დიდი ხნის წინ იწინასწარმეტყველა ალბერტ აინშტაინმა ფარდობითობის ზოგად თეორიაში, პირველად 2015 წელს პირდაპირი გზით აღმოაჩინა LIGO-მ. ეს იყო სრულიად ახალი ეპოქის დასაწყისი მულტი-მესენჯერულ ასტრონომიაში. GWTC-3-ში 90 დადასტურებულმა მოვლენამ გახსნა ახალი ფანჯარა ბინარული ვარსკვლავების ევოლუციის მოდელისთვის. მიუხედავად იმისა, რომ დაკვირვებული გრავიტაციული ტალღების ძირითადი თვისებები ემთხვევა GR-ის პროგნოზებს, ზოგიერთი მახასიათებელი ჯერ კიდევ ძნელი ასახსნელია არსებული მოდელის გამოყენებით. ასეთ მახასიათებლებს შორისაა: თანმხლები ელექტრომაგნიტური გამოსხივების არარსებობა ყველა მოვლენაში გარდა ერთისა; შერწყმის მაღალი მაჩვენებლები, ნავარაუდებთან შედარებით; მოვლენები, რომლებიც შეიცავს ობიექტებს, რომლებსაც აქვთ მასა აკრძალულ ინტერვალში, სადაც მოდელის უმრავლესობა ვარაუდობს მასური ღრეჩოების არსებობას.

ამ უთანხმოებებთან გამკლავების მიზნით, ჩვენ წარმოვადგინეთ სარკული სამყაროს სცენარი. სამყაროს მთლიანი ენერგეტიკული ბიუჯეტიდან დაახლოებით 27%-ს, სავარაუდოდ, იკავებს ბნელ მატერიას, რომლის შემადგენლობა ჯერ კიდევ უცნობია. სარკული მატერია არის DM-ის დიდი ხნის კანდიდატი და შეიძლება შეადგენდეს მას მთლიანად ან მხოლოდ მის ნაწილს. M-სამყაროს თეორიის მიხედვით, არსებობს ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტული მოდელის ზუსტი სარკული ასლი, რომელსაც აქვს მარჯვენა ტიპის სუსტი ურთიერთქმედება. სარკულ ნაწილაკებს აქვთ ჩვეულებრივი ნაწილაკების მსგავსი თვისებები: ზუსტად იგივე მასები, მუხტები, ურთიერთქმედების კანონები და ა.შ. ამგვარად განზოგადოებულ გლობალურ თეორიას აქვს მარცხენა-მარჯვენა სიმეტრია, რომელიც დარღვეულია SM-ში.

თუ M-სექტორი არსებობს, ის შეიქმნა დიდი აფეთქების მიერ, ჩვეულებრივ მატერიასთან ერთად. თუმცა M-სამყაროს კოსმოლოგიური ევოლუცია არ შეიძლება იყოს ჩვეულებრივის იდენტური, რადგან ის უშუალო კონფლიქტში იქნებოდა BBN-ის საზღვრებთან. ამის თავიდან ასაცილებლად M-სექტორს უნდა ჰქონდეს დაბალი საწყისი ტემპერატურა. მაშინ, თუ ორი სექტორი სუსტად ურთიერთქმედებს, მხოლოდ გრავიტაციის მეშვეობით, ისინი არ მოდიან თერმულ წონასწორობაში ერთმანეთთან და ინარჩუნებენ მუდმივ ტემპერატურულ თანაფარდობას $x = T'/T (< 0,65 \text{ BBN-დან})$. ლეპტო-ბარიოგენეზის გარკვეულ მექანიზმს შეუძლია წარმოქმნას ბარიონული ასიმეტრია ორივე სექტორში ერთდროულად. გარკვეულ გარემოებებში შესაძლებელია გვქონდეს $\beta = \Omega'_b/\Omega_b \approx 5$ და სარკულ მატერიას შეუძლია მთლიანად ახსნას ბნელი მატერია.

დაბალი ტემპერატურის ერთ-ერთი შედეგია ის ფაქტი, რომ M-სამყაროში უნდა დომინირებდეს ჰელიუმი. ეს გავლენას მოახდენს ვარსკვლავებისა და გალაქტიკების ფორმირებისა და ევოლუციაზე. ნაჩვენებია, რომ სარკული გაზის ადრეულ ფრაგმენტაციას ვარსკვლავებად შეუძლია უზრუნველყოს სარკული მატერიისათვის სფერული ფორმის შენარჩუნება და იგი

არ კოლაფსირდეს დისკად, როგორც ამას ჩვეულებრივი მატერია აკეთებს. ამგვარად, M-მატერიას შეუძლია შექმნას ბნელი მატერიის სფერული ჰალოები, რომლებიც ფიქსირდება გალაქტიკებში.

ჩვეულებრივი მატერიის მსგავსი მიკროფიზიკის მქონე სარკული სექტორი ხელსაყრელია ვარსკვლავების, კომპაქტური ობიექტების, როგორცაა NS და BH, ასევე მათი ორმაგი სისტემების შესაქმნელად, რომლებსაც შეუძლიათ შერწყმა და გრავიტაციული ტალღების წარმოქმნა. ჩვენს ნაშრომებში [1-5], ჩვენ შევქმენით მოდელი, რომელიც განიხილავს LVK-ის მიერ გამოვლენილ GW-ებს სარკული მატერიის კონტექსტში. ამ დისერტაციაში ჩვენ შევაჯამეთ ჩვენი მოდელი და ვახვეწეთ, რომ LVK მონაცემებში წარმოქმნილი ზოგიერთი შეუსაბამობა შეიძლება მოგვარდეს M-სამყაროს სცენარში.

კერძოდ, ჩვენს მოდელში ბუნებრივია მულტი-მესინჯერების არარსებობა. თუ LVK-ის მიერ აღმოჩენილი GW-ები წარმოიქმნებოდა სარკული ორმაგი სისტემების შერწყმით, მაშინ სარკული ფოტონების სახით გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური გამოსხივება შეუმჩნეველი დარჩებოდა ჩვენი დეტექტორებისთვის, რადგან ისინი დამზადებულია ჩვეულებრივი მატერიისგან. გარდა ამისა, He-ით მდიდარი ვარსკვლავები, რომლებიც ადრეულ პერიოდში ჩამოყალიბდნენ სარკულ სექტორში, უფრო სწრაფად ვითარდებიან და მათი გზა საბოლოო კომპაქტური ობიექტებისკენ უფრო ხანმოკლეა. გარდა ამისა, ვარსკვლავების ფორმირების სიხშირის ფორმულა, რომელსაც აქვს პიკი $z \approx 2$ -ზე ჩვეულებრივ სამყაროში, პიკს აღწევს M- სექტორში უფრო ადრე, დაახლოებით $4 < z < 8$ -ზე. ეს ყველაფერი ერთად, აძლიერებს შერწყმის სიხშირეს M-სექტორში ~ 10 -ით. ორმაგი კომპაქტური ობიექტების ფორმირებისა და გაერთიანების არსებული მოდელები ვარაუდობდნენ შერწყმის სიხშირეზე იმაზე დაბალს, ვიდრე LVK-ის მიერ იქნა დაფიქსირებული. ჩვენ იდეის მიხედვით, თუ გავითვალისწინებთ სარკული მატერიიდან გამოსხივებულ GW-ების, შერწყმის მთლიანი სიხშირე გაძლიერდება ~ 10 -ით, რაც თანხვედრაში მოვა დაკვირვებებთან.

გარდა ამისა, მოვლენები, რომლებიც ხვდება მასურ ღრეჩოებში და ძნელია აღიწეროს ტიპური მოდელების გამოყენებით, შეიძლება უკეთ იყოს ინტერპრეტირებული M-სცენარში. ვინაიდან ჰელიუმით მდიდარი ვარსკვლავები უფრო სწრაფად ვითარდებიან და მათი რაოდენობა უფრო დიდია, ისინი ადრეულ ეტაპზე ქმნიან NS-ს და BH-ებს უფრო დიდი რაოდენობით. შედეგად, M- სამყაროში იერარქიული შერწყმის შესაძლებლობა იზრდება და ობიექტები, რომელთა მასა ღრეჩოში ხვდება, უფრო ადვილად ყალიბდება.

აბრევიატურები:

BBH	Binary Black Hole - ორმაგი შავი ხვრელი
BBN	Big Bang Nucleosynthesis - დიდი აფეთქების ნუკლეოსინთეზი
BH	Black Hole - შავი ხვრელი
BNS	Binary Neutron Star - ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავი
CDM	Cold Dark Matter - ცივი ბნელი მატერია
CMB	Cosmic Microwave Background - ფონური მიკროტალღური გამოსხივება
CP	Charge-Parity - მუხტი-ლუწობა
CPT	Charge-Parity-Time - მუხტი-ლუწობა-დრო
DE	Dark Energy - ბნელი ენერჯია
DM	Dark Matter - ბნელი მატერია
EM	ElectroMagnetic - ელექტრომაგნიტური
GRB	Gamma Ray Burst - გამა-გამოსხივების აფეთქება
GW	Gravitational Wave - გრავიტაციული ტალღა
GWTC	Gravitational-Wave Transient Catalog - გრავიტაციული ტალღების კატალოგი
KAGRA	Kamioka Gravitational Wave Detector
LIGO	The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory -
LVK	LIGO-Virgo-KAGRA
MACHO	Massive Compact Halo Object - მასიური კომპაქტური ჰალო-ობიექტი
MRD	Matter-Radiation Decoupling - მატერია-რადიაციის გამოყოფა
MRE	Matter-Radiation Equality - მატერია-რადიაციის თანასწორობა
M-World	Mirror World - სარკული სამყარო
NS	Neutron Star - ნეიტრონული ვარსკვლავი
O1(2,3)	Observing run 1(2,3) - დაკვირვების სეზონი 1(2,3)
O-World	Ordinary World - ჩვეულებრივი სამყარო
PBH	Primordial Black Hole - პირველადი შავი ხვრელი
QCD	Quantum ChromoDynamics - კვანტური ქრომოდინამიკა
QED	Quantum ElectroDynamics - კვანტური ელექტროდინამიკა
QFT	Quantum Field Theory - ველის კვანტური თეორია
SFR	Star Formation Rate - ვარსკვლავების ფორმირების სიხშირე
SGRB	Short Gamma Ray Burst - გამა-გამოსხივების მოკლე აფეთქება
SM	Standard Model - სტანდარტული მოდელი
Λ CDM	Lambda Cold Dark Matter - ლამბდა ცივი ბნელი მატერია

ბიბლიოგრაფია

- [1] R. Beradze and M. Gogberashvili, "LIGO Signals from the Mirror World," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **487** (2019) no.1, 650-652 doi:10.1093/mnras/stz1295 [arXiv:1902.05425 [gr-qc]].
- [2] R. Beradze and M. Gogberashvili, "Gravitational Waves from Mirror World," *MDPI Physics* **1** (2019) no.1, 67-75 doi:10.3390/physics1010007 [arXiv:1905.02787 [gr-qc]].
- [3] R. Beradze, M. Gogberashvili and A. S. Sakharov, "Binary Neutron Star Mergers with Missing Electromagnetic Counterparts as Manifestations of Mirror World," *Phys. Lett. B* **804** (2020), 135402 doi:10.1016/j.physletb.2020.135402 [arXiv:1910.04567 [astro-ph.HE]].
- [4] R. Beradze and M. Gogberashvili, "Unexpected LIGO events and the Mirror World," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **503** (2021) no.2, 2882-2886 doi:10.1093/mnras/stab685 [arXiv:2101.12532 [astro-ph.CO]].
- [5] R. Beradze and M. Gogberashvili, "LIGO signals from mirror world," *PoS Regio2021* (2022), 029 doi:10.22323/1.412.0029
- [6] B. Belfatto, R. Beradze and Z. Berezhiani, "The CKM unitarity problem: A trace of new physics at the TeV scale?," *Eur. Phys. J. C* **80** (2020) no.2, 149 doi:10.1140/epjc/s10052-020-7691-6 [arXiv:1906.02714 [hep-ph]].
- [7] R. Beradze and M. Gogberashvili, "Can the quasi-molecular mechanism of recombination decrease the Hubble tension?," *Phys. Dark Univ.* **32** (2021), 100841 doi:10.1016/j.dark.2021.100841 [arXiv:2001.05874 [astro-ph.CO]].
- [8] S. Carroll, "Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity," Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108770385
- [9] P. A. Zyla *et al.* [Particle Data Group], "Review of Particle Physics," *PTEP* **2020** (2020) no.8, 083C01 doi:10.1093/ptep/ptaa104
- [10] N. Aghanim *et al.* [Planck], "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters," *Astron. Astrophys.* **641** (2020), A6 [erratum: *Astron. Astrophys.* **652** (2021), C4] doi:10.1051/0004-6361/201833910 [arXiv:1807.06209 [astro-ph.CO]].
- [11] T. Kereselidze, I. Noselidze and J. F. Ogilvie, "Influence of a quasi-molecular mechanism of recombination on the formation of hydrogen in the early universe," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **501** (2021) no.1, 1160-1167

- doi:10.1093/mnras/staa3622 [arXiv:2008.01660 [physics.atom-ph]], T. Kereselidze and I. Noselidze, "A quasi-molecular mechanism of formation of hydrogen in the early Universe - a scheme of calculation," [arXiv:2104.11584 [astro-ph.CO]].
- [12] G. Bertone, D. Hooper and J. Silk, "Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints," *Phys. Rept.* **405** (2005), 279-390 doi:10.1016/j.physrep.2004.08.031 [arXiv:hep-ph/0404175 [hep-ph]].
- [13] J. L. Feng, "Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection," *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **48** (2010), 495-545 doi:10.1146/annurev-astro-082708-101659 [arXiv:1003.0904 [astro-ph.CO]].
- [14] G. Arcadi, M. Dutra, P. Ghosh, M. Lindner, Y. Mambrini, M. Pierre, S. Profumo and F. S. Queiroz, "The waning of the WIMP? A review of models, searches, and constraints," *Eur. Phys. J. C* **78** (2018) no.3, 203 doi:10.1140/epjc/s10052-018-5662-y [arXiv:1703.07364 [hep-ph]].
- [15] L. Roszkowski, E. M. Sessolo and S. Trojanowski, "WIMP dark matter candidates and searches—current status and future prospects," *Rept. Prog. Phys.* **81** (2018) no.6, 066201 doi:10.1088/1361-6633/aab913 [arXiv:1707.06277 [hep-ph]].
- [16] J. Preskill, M. B. Wise and F. Wilczek, "Cosmology of the Invisible Axion," *Phys. Lett. B* **120** (1983), 127-132 doi:10.1016/0370-2693(83)90637-8
- [17] D. J. E. Marsh, "Axion Cosmology," *Phys. Rept.* **643** (2016), 1-79 doi:10.1016/j.physrep.2016.06.005 [arXiv:1510.07633 [astro-ph.CO]].
- [18] S. Dodelson and L. M. Widrow, "Sterile-neutrinos as dark matter," *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994), 17-20 doi:10.1103/PhysRevLett.72.17 [arXiv:hep-ph/9303287 [hep-ph]].
- [19] G. Jungman, M. Kamionkowski and K. Griest, "Supersymmetric dark matter," *Phys. Rept.* **267** (1996), 195-373 doi:10.1016/0370-1573(95)00058-5 [arXiv:hep-ph/9506380 [hep-ph]].
- [20] S. L. Dubovsky, P. G. Tinyakov and I. I. Tkachev, "Massive graviton as a testable cold dark matter candidate," *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005), 181102 doi:10.1103/PhysRevLett.94.181102 [arXiv:hep-th/0411158 [hep-th]].
- [21] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], "The basic physics of the binary black hole merger GW150914," *Annalen Phys.* **529** (2017) no.1-2, 1600209 doi:10.1002/andp.201600209 [arXiv:1608.01940 [gr-qc]].
- [22] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger," *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) no.6, 061102 doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102 [arXiv:1602.03837 [gr-qc]].
- [23] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], "GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence," *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) no.24, 241103 doi:10.1103/PhysRevLett.116.241103 [arXiv:1606.04855 [gr-qc]].

- [24] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and VIRGO], ``GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2," Phys. Rev. Lett. **118** (2017) no.22, 221101 [erratum: Phys. Rev. Lett. **121** (2018) no.12, 129901] doi:10.1103/PhysRevLett.118.221101 [arXiv:1706.01812 [gr-qc]].
- [25] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence," Phys. Rev. Lett. **119** (2017) no.14, 141101 doi:10.1103/PhysRevLett.119.141101 [arXiv:1709.09660 [gr-qc]].
- [26] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GW170608: Observation of a 19-solar-mass Binary Black Hole Coalescence," Astrophys. J. Lett. **851** (2017), L35 doi:10.3847/2041-8213/aa9f0c [arXiv:1711.05578 [astro-ph.HE]].
- [27] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral," Phys. Rev. Lett. **119** (2017) no.16, 161101 doi:10.1103/PhysRevLett.119.161101 [arXiv:1710.05832 [gr-qc]].
- [28] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs," Phys. Rev. X **9** (2019) no.3, 031040 doi:10.1103/PhysRevX.9.031040 [arXiv:1811.12907 [astro-ph.HE]].
- [29] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GW190425: Observation of a Compact Binary Coalescence with Total Mass $\sim 3.4M_{\odot}$," Astrophys. J. Lett. **892** (2020) no.1, L3 doi:10.3847/2041-8213/ab75f5 [arXiv:2001.01761 [astro-ph.HE]].
- [30] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of $150M_{\odot}$," Phys. Rev. Lett. **125** (2020) no.10, 101102 doi:10.1103/PhysRevLett.125.101102 [arXiv:2009.01075 [gr-qc]].
- [31] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GW190412: Observation of a Binary-Black-Hole Coalescence with Asymmetric Masses," Phys. Rev. D **102** (2020) no.4, 043015 doi:10.1103/PhysRevD.102.043015 [arXiv:2004.08342 [astro-ph.HE]].
- [32] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 Solar Mass Black Hole with a 2.6 Solar Mass Compact Object," Astrophys. J. Lett. **896** (2020) no.2, L44 doi:10.3847/2041-8213/ab960f [arXiv:2006.12611 [astro-ph.HE]].
- [33] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run," Phys. Rev. X **11** (2021), 021053 doi:10.1103/PhysRevX.11.021053 [arXiv:2010.14527 [gr-qc]].
- [34] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and VIRGO], ``GWTC-2.1: Deep Extended Catalog of Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run," [arXiv:2108.01045 [gr-qc]].

- [35] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific, KAGRA and VIRGO], ``Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star–Black Hole Coalescences," *Astrophys. J. Lett.* **915** (2021) no.1, L5 doi:10.3847/2041-8213/ac082e [arXiv:2106.15163 [astro-ph.HE]].
- [36] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific, VIRGO and KAGRA], ``GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the Second Part of the Third Observing Run," [arXiv:2111.03606 [gr-qc]].
- [37] A. Goldstein *et al.*, ``An ordinary short gamma-ray burst with extraordinary implications: Fermi-GBM detection of GRB 170817A," *Astrophys. J. Lett.* **848** (2017) L14 doi: 10.3847/2041-8213/aa8f41 [arXiv: 1710.05446 [astro-ph.HE]].
- [38] V. Savchenko *et al.*, ``INTEGRAL detection of the first prompt gamma-ray signal coincident with the gravitational-wave event GW170817," *Astrophys. J. Lett.* **848** (2017) L15 doi: 10.3847/2041-8213/aa8f94 [arXiv: 1710.05449 [astro-ph.HE]].
- [39] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Detected by Fermi and Swift During the LIGO–Virgo Run O3a," *Astrophys. J.* **915** (2021) 86, doi: 10.3847/1538-4357/abee15 [arXiv: 2010.14550 [astro-ph.HE]].
- [40] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific, KAGRA and VIRGO], ``Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Detected by Fermi and Swift during the LIGO–Virgo Run O3b," *Astrophys. J.* **928** (2022) no.2, 186 doi:10.3847/1538-4357/ac532b [arXiv:2111.03608 [astro-ph.HE]].
- [41] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``Binary Black Hole Population Properties Inferred from the First and Second Observing Runs of Advanced LIGO and Advanced Virgo," *Astrophys. J. Lett.* **882** (2019) no.2, L24 doi:10.3847/2041-8213/ab3800 [arXiv:1811.12940 [astro-ph.HE]].
- [42] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``Population Properties of Compact Objects from the Second LIGO–Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog," *Astrophys. J. Lett.* **913** (2021) no.1, L7 doi:10.3847/2041-8213/abe949 [arXiv:2010.14533 [astro-ph.HE]].
- [43] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific, VIRGO and KAGRA], ``The population of merging compact binaries inferred using gravitational waves through GWTC-3," [arXiv:2111.03634 [astro-ph.HE]].
- [44] A. Heger, C. L. Fryer, S. E. Woosley, N. Langer and D. H. Hartmann, ``How massive single stars end their life," *Astrophys. J.* **591** (2003), 288-300 doi:10.1086/375341 [arXiv:astro-ph/0212469 [astro-ph]].
- [45] K. Belczynski, D. E. Holz, T. Bulik and R. O’Shaughnessy, ``The first gravitational-wave source from the isolated evolution of two 40-100 Msun stars," *Nature* **534** (2016), 512 doi:10.1038/nature18322 [arXiv:1602.04531 [astro-ph.HE]].
- [46] N. Giacobbo and M. Mapelli, ``The progenitors of compact-object binaries: impact of metallicity, common envelope and natal kicks," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*

- 480** (2018) no.2, 2011-2030 doi:10.1093/mnras/sty1999 [arXiv:1806.00001 [astro-ph.HE]].
- [47] E. P. J. van den Heuvel, S. F. Portegies Zwart and S. E. de Mink, "Forming short-period Wolf-Rayet X-ray binaries and double black holes through stable mass transfer," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **471** (2017) no.4, 4256-4264 doi:10.1093/mnras/stx1430 [arXiv:1701.02355 [astro-ph.SR]].
- [48] A. Olejak, K. Belczynski and N. Ivanova, "Impact of common envelope development criteria on the formation of LIGO/Virgo sources," *Astron. Astrophys.* **651** (2021), A100 doi:10.1051/0004-6361/202140520 [arXiv:2102.05649 [astro-ph.HE]].
- [49] I. Mandel and S. E. de Mink, "Merging binary black holes formed through chemically homogeneous evolution in short-period stellar binaries," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **458** (2016) no.3, 2634-2647 doi:10.1093/mnras/stw379 [arXiv:1601.00007 [astro-ph.HE]].
- [50] P. Marchant, N. Langer, P. Podsiadlowski, T. M. Tauris and T. J. Moriya, "A new route towards merging massive black holes," *Astron. Astrophys.* **588** (2016), A50 doi:10.1051/0004-6361/201628133 [arXiv:1601.03718 [astro-ph.SR]].
- [51] A. Askar, M. Szkudlarek, D. Gondek-Rosińska, M. Giersz and T. Bulik, "MOCCA-SURVEY Database – I. Coalescing binary black holes originating from globular clusters," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **464** (2017) no.1, L36-L40 doi:10.1093/mnrasl/slw177 [arXiv:1608.02520 [astro-ph.HE]].
- [52] F. Antonini, S. Toonen and A. S. Hamers, "Binary black hole mergers from field triples: properties, rates and the impact of stellar evolution," *Astrophys. J.* **841** (2017) no.2, 77 doi:10.3847/1538-4357/aa6f5e [arXiv:1703.06614 [astro-ph.GA]].
- [53] G. Fragione and B. Kocsis, "Black hole mergers from quadruples," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **486** (2019) no.4, 4781-4789 doi:10.1093/mnras/stz1175 [arXiv:1903.03112 [astro-ph.GA]].
- [54] T. Nakamura, M. Sasaki, T. Tanaka and K. S. Thorne, "Gravitational waves from coalescing black hole MACHO binaries," *Astrophys. J. Lett.* **487** (1997), L139-L142 doi:10.1086/310886 [arXiv:astro-ph/9708060 [astro-ph]].
- [55] M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka and S. Yokoyama, "Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914," *Phys. Rev. Lett.* **117** (2016) no.6, 061101 [erratum: *Phys. Rev. Lett.* **121** (2018) no.5, 059901] doi:10.1103/PhysRevLett.117.061101 [arXiv:1603.08338 [astro-ph.CO]].
- [56] M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka and S. Yokoyama, "Primordial black holes—perspectives in gravitational wave astronomy," *Class. Quant. Grav.* **35** (2018) no.6, 063001 doi: 10.1088/1361-6382/aaa7b4 [arXiv:1801.05235 [astro-ph.CO]].
- [57] A. Dolgov and K. Postnov, "Why the mean mass of primordial black hole distribution is close to $10M_{\odot}$," *JCAP* **07** (2020), 063 doi:10.1088/1475-7516/2020/07/063 [arXiv:2004.11669 [astro-ph.CO]].

- [58] A. D. Dolgov, A. G. Kuranov, N. A. Mitichkin, S. Porey, K. A. Postnov, O. S. Sazhina and I. V. Simkin, ``On mass distribution of coalescing black holes," JCAP **12** (2020), 017 doi:10.1088/1475-7516/2020/12/017 [arXiv:2005.00892 [astro-ph.CO]].
- [59] R. A. Allsman *et al.* [Macho], ``MACHO project limits on black hole dark matter in the 1-30 solar mass range," Astrophys. J. Lett. **550** (2001), L169 doi:10.1086/319636 [arXiv:astro-ph/0011506 [astro-ph]].
- [60] P. Tisserand *et al.* [EROS-2], ``Limits on the Macho Content of the Galactic Halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic Clouds," Astron. Astrophys. **469** (2007), 387-404 doi:10.1051/0004-6361:20066017 [arXiv:astro-ph/0607207 [astro-ph]].
- [61] J. Yoo, J. Chaname and A. Gould, ``The end of the MACHO era: limits on halo dark matter from stellar halo wide binaries," Astrophys. J. **601** (2004), 311-318 doi:10.1086/380562 [arXiv:astro-ph/0307437 [astro-ph]].
- [62] M. Ricotti, J. P. Ostriker and K. J. Mack, ``Effect of Primordial Black Holes on the Cosmic Microwave Background and Cosmological Parameter Estimates," Astrophys. J. **680** (2008), 829 doi:10.1086/587831 [arXiv:0709.0524 [astro-ph]].
- [63] S. Bird, I. Cholis, J. B. Muñoz, Y. Ali-Haïmoud, M. Kamionkowski, E. D. Kovetz, A. Raccanelli and A. G. Riess, ``Did LIGO detect dark matter?," Phys. Rev. Lett. **116** (2016) no.20, 201301 doi:10.1103/PhysRevLett.116.201301 [arXiv:1603.00464 [astro-ph.CO]].
- [64] O. D. Elbert, J. S. Bullock and M. Kaplinghat, ``Counting Black Holes: The Cosmic Stellar Remnant Population and Implications for LIGO," Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **473** (2018) no.1, 1186-1194 doi:10.1093/mnras/stx1959 [arXiv:1703.02551 [astro-ph.GA]].
- [65] H. Sana, S. E. de Mink, A. de Koter, N. Langer, C. J. Evans, M. Gieles, E. Gosset, R. G. Izzard, J. B. L. Bouquin and F. R. N. Schneider, ``Binary interaction dominates the evolution of massive stars," Science **337** (2012), 444 doi:10.1126/science.1223344 [arXiv:1207.6397 [astro-ph.SR]].
- [66] P. Madau and M. Dickinson, ``Cosmic Star Formation History," Ann. Rev. Astron. Astrophys. **52** (2014), 415-486 doi:10.1146/annurev-astro-081811-125615 [arXiv:1403.0007 [astro-ph.CO]].
- [67] S. E. Woosley, S. Blinnikov and A. Heger, ``Pulsational pair instability as an explanation for the most luminous supernovae," Nature **450** (2007) 390 doi:10.1038/nature06333 [arXiv:0710.3314 [astro-ph]].
- [68] S. E. Woosley, ``Pulsational pair-instability supernovae," Astrophys. J. **836** (2017) 244 doi:10.3847/1538-4357/836/2/244 [arXiv:1608.08939 [astro-ph.HE]].
- [69] C. Kimball *et al.*, ``Black hole genealogy: Identifying hierarchical mergers with gravitational waves," Astrophys. J. **900** (2020) 177 doi:10.3847/1538-4357/aba518 [arXiv:2005.00023 [astro-ph.HE]].

- [70] M. Mapelli *et al.*, ``Hierarchical mergers in young, globular and nuclear star clusters: black hole masses and merger rates," *Symmetry* **13** (2021) 1678 [arXiv: 2007.15022 [astro-ph.HE]].
- [71] B. Liu and D. Lai, ``Hierarchical black-hole mergers in multiple systems: Constrain the formation of GW190412, GW190814 and GW190521-like events," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **502** (2021) 2049 doi: 10.1093/mnras/stab178 [arXiv: 2009.10068 [astro-ph.HE]].
- [72] C. O. Lousto and Y. Zlochower, ``Hangup kicks: Still larger recoils by partial spin/orbit alignment of black-hole binaries," *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 231102 doi: 10.1103/PhysRevLett.107.231102 [arXiv: 1108.2009 [gr-qc]].
- [73] B. Bruegmann, J. A. Gonzalez, M. Hannam, S. Husa and U. Sperhake, ``Exploring black hole superkicks," *Phys. Rev. D* **77** (2008) 124047 doi: 10.1103/PhysRevD.77.124047 [arXiv: 0707.0135 [gr-qc]].
- [74] V. Varma, M. Isi and S. Biscoveanu, ``Extracting the gravitational recoil from black hole merger signals," *Phys. Rev. Lett.* **124** (2020) 101104 doi: 10.1103/PhysRevLett.124.101104 [arXiv: 2002.00296 [gr-qc]].
- [75] M. A. Sedda, M. Mapelli, M. Spera, M. Benacquista and N. Giacobbo, ``Fingerprints of binary black hole formation channels encoded in the mass and spin of merger remnants," *Astrophys. J.* **894** (2020) 133 doi: 10.3847/1538-4357/ab88b2 [arXiv: 2003.07409 [astro-ph.GA]].
- [76] V. Baibhav *et al.*, ``The mass gap, the spin gap, and the origin of merging binary black holes," *Phys. Rev. D* **102** (2020) 043002 doi: 10.1103/PhysRevD.102.043002 [arXiv: 2004.00650 [astro-ph.HE]].
- [77] R. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], ``Properties and Astrophysical Implications of the 150 M_{\odot} Binary Black Hole Merger GW190521," *Astrophys. J. Lett.* **900** (2020) no.1, L13 doi:10.3847/2041-8213/aba493 [arXiv:2009.01190 [astro-ph.HE]].
- [78] T. Chiba and S. Yokoyama, ``Spin Distribution of Primordial Black Holes," *PTEP* **2017** (2017) no.8, 083E01 doi:10.1093/ptep/ptx087 [arXiv:1704.06573 [gr-qc]].
- [79] V. De Luca, G. Franciolini, P. Pani and A. Riotto, ``The evolution of primordial black holes and their final observable spins," *JCAP* **04** (2020), 052 doi:10.1088/1475-7516/2020/04/052 [arXiv:2003.02778 [astro-ph.CO]].
- [80] V. De Luca, V. Desjacques, G. Franciolini, P. Pani and A. Riotto, ``GW190521 Mass Gap Event and the Primordial Black Hole Scenario," *Phys. Rev. Lett.* **126** (2021) no.5, 051101 doi:10.1103/PhysRevLett.126.051101 [arXiv:2009.01728 [astro-ph.CO]].
- [81] A. Sadowski, K. Belczynski, T. Bulik, N. Ivanova, F. A. Rasio and R. W. O'Shaughnessy, ``The Total Merger Rate of Compact Object Binaries In The Local Universe," *Astrophys. J.* **676** (2008) 1162 doi: 10.1086/528932 [arXiv: 0710.0878 [astro-ph]].

- [82] J. A. Faber and F. A. Rasio, ``Binary Neutron Star Mergers," *Living Rev. Rel.* **15** (2012) 8 doi: 10.12942/lrr-2012-8 [arXiv:1204.3858 [gr-qc]].
- [83] E. Burns, ``Neutron Star Mergers and How to Study Them," *Living Rev. Rel.* **23** (2020) no.1, 4 doi:10.1007/s41114-020-00028-7 [arXiv:1909.06085 [astro-ph.HE]].
- [84] K. Belczynski, V. Kalogera and T. Bulik, ``A Comprehensive study of binary compact objects as gravitational wave sources: Evolutionary channels, rates, and physical properties," *Astrophys. J.* **572** (2001) 407 doi: 10.1086/340304 [astro-ph/0111452].
- [85] F. Zappa, S. Bernuzzi, D. Radice, A. Perego and T. Dietrich, ``Gravitational-wave luminosity of binary neutron stars mergers," *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018) 111101 doi: 10.1103/PhysRevLett.120.111101 [arXiv:1712.04267 [gr-qc]].
- [86] B. F. Schutz, ``Networks of gravitational wave detectors and three figures of merit," *Class. Quant. Grav.* **28** (2011) 125023 doi: 10.1088/0264-9381/28/12/125023 [arXiv:1102.5421 [astro-ph.IM]].
- [87] R. Fernández and B. D. Metzger, ``Electromagnetic Signatures of Neutron Star Mergers in the Advanced LIGO Era," *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **66** (2016) 23 doi: 10.1146/annurev-nucl-102115-044819 [arXiv: 1512.05435 [astro-ph.HE]].
- [88] B. D. Metzger and R. Fernández, ``Red or blue? A potential kilonova imprint of the delay until black hole formation following a neutron star merger," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **441** (2014) 3444 doi: 10.1093/mnras/stu802 [arXiv: 1402.4803 [astro-ph.HE]].
- [89] B. D. Metzger, ``Kilonovae," *Living Rev. Rel.* **23** (2020) 1 doi:10.1007/s41114-019-0024-0 [arXiv: 1910.01617 [astro-ph.HE]].
- [90] M. Tanaka, ``Kilonova/Macronova Emission from Compact Binary Mergers," *Adv. Astron.* **2016** (2016) 6341974 doi: 10.1155/2016/6341974 [arXiv: 1605.07235 [astro-ph.HE]].
- [91] W. f. Fong, E. Berger, R. Margutti and B. A. Zauderer, ``A Decade of Short-duration Gamma-ray Burst Broadband Afterglows: Energetics, Circumburst Densities, and jet Opening Angles," *Astrophys. J.* **815** (2015) 102 doi: 10.1088/0004-637X/815/2/102 [arXiv: 1509.02922 [astro-ph.HE]].
- [92] E. Nakar and T. Piran, ``Radio Remnants of Compact Binary Mergers - the Electromagnetic Signal that will follow the Gravitational Waves," *Nature* **478** (2011) 82 doi: 10.1038/nature10365 [arXiv:1102.1020 [astro-ph.HE]].
- [93] T. Piran, E. Nakar and S. Rosswog, ``The Electromagnetic Signals of Compact Binary Mergers," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **430** (2013) 2121 doi: 10.1093/mnras/stt037 [arXiv: 1204.6242 [astro-ph.HE]].
- [94] K. Hotokezaka and T. Piran, ``Mass ejection from neutron star mergers: different components and expected radio signals," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **450** (2015) 1430 doi: 10.1093/mnras/stv620 [arXiv: 1501.01986 [astro-ph.HE]].

- [95] R. Sari, T. Piran and J. Halpern, ``Jets in GRBs," *Astrophys. J.* **519** (1999) L17 doi: 10.1086/312109 [astro-ph/9903339].
- [96] Z. P. Jin *et al.*, ``Short GRBs: opening angles, local neutron star merger rate and off-axis events for GRB/GW association," *Astrophys. J.* **857** (2018) 128 doi: 10.3847/1538-4357/aab76d [arXiv: 1708.07008 [astro-ph.HE]].
- [97] I. Mandel, ``The Orbit of GW170817 Was Inclined by Less Than 28° to the Line of Sight," *Astrophys. J.* **853** (2018) L12 doi: 10.3847/2041-8213/aaa6c1 [arXiv: 1712.03958 [astro-ph.HE]].
- [98] O. D. Elbert, J. S. Bullock and M. Kaplinghat, ``Counting Black Holes: The Cosmic Stellar Remnant Population and Implications for LIGO," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **473** (2018) 1186 doi: 10.1093/mnras/stx1959 [arXiv: 1703.02551 [astro-ph.GA]].
- [99] D. Guetta and T. Piran, ``The batse-swift luminosity and redshift distributions of short-duration grbs," *Astron. Astrophys.* **453** (2006) 823 doi: 10.1051/0004-6361:20054498 [astro-ph/0511239].
- [100] P. D'Avanzo, ``Short gamma-ray bursts: A review," *JHEAp* **7** (2015) 73 doi:10.1016/j.jheap.2015.07.002
- [101] M. Mapelli and N. Giacobbo, ``The cosmic merger rate of neutron stars and black holes," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **479** (2018) 4391 doi: 10.1093/mnras/sty1613 [arXiv: 1806.04866 [astro-ph.HE]].
- [102] F. Ozel, D. Psaltis, R. Narayan and A. S. Villarreal, ``On the mass distribution and birth masses of neutron stars," *Astrophys. J.* **757** (2012) 55 doi: 10.1088/0004-637X/757/1/55 [arXiv: 1201.1006 [astro-ph.HE]].
- [103] W. M. Farr *et al.*, ``The mass distribution of stellar-mass black holes," *Astrophys. J.* **741** (2011) 103 doi: 10.1088/0004-637X/741/2/103 [arXiv: 1011.1459 [astro-ph.GA]].
- [104] C. S. Kochanek, ``Failed supernovae explain the compact remnant mass function," *Astrophys. J.* **785** (2014) 28 doi: 10.1088/0004-637X/785/1/28 [arXiv: 1308.0013 [astro-ph.HE]].
- [105] O. Pejcha and T. A. Thompson, ``The landscape of the neutrino mechanism of core-collapse supernovae: Neutron star and black hole mass functions, explosion energies and nickel yields," *Astrophys. J.* **801** (2015) 90 doi: 10.1088/0004-637X/801/2/90 [arXiv: 1409.0540 [astro-ph.HE]].
- [106] S. E. Woosley, A. Heger and T. A. Weaver, ``The evolution and explosion of massive stars," *Rev. Mod. Phys.* **74** (2002) 1015. doi: 10.1103/RevModPhys.74.1015.
- [107] T. Ertl, S. E. Woosley, T. Sukhbold and H. T. Janka, ``The explosion of helium stars evolved with mass loss," *Astrophys. J.* **890** (2020) 51 doi: 10.3847/1538-4357/ab6458 [arXiv: 1910.01641 [astro-ph.HE]].

- [108] P. Demorest, T. Pennucci, S. Ransom, M. Roberts and J. Hessels, "Shapiro Delay Measurement of A Two Solar Mass Neutron Star," *Nature* **467** (2010) 1081 doi: 10.1038/nature09466 [arXiv: 1010.5788 [astro-ph.HE]].
- [109] J. Antoniadis *et al.*, "A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary," *Science* **340** (2013) 6131 doi: 10.1126/science.1233232 [arXiv: 1304.6875 [astro-ph.HE]].
- [110] V. Kalogera, K. Belczynski, C. Kim, R. W. O'Shaughnessy and B. Willems, "Formation of double compact objects," *Phys. Rept.* **442** (2007) 75 doi: 10.1016/j.physrep.2007.02.008 [arXiv: astro-ph/0612144 [astro-ph]].
- [111] T. M. Tauris *et al.*, "Formation of double neutron star systems," *Astrophys. J.* **846** (2017) 170 doi:10.3847/1538-4357/aa7e89 [arXiv: 1706.09438 [astro-ph.HE]].
- [112] T. M. Tauris, N. Langer and P. Podsiadlowski, "Ultra-stripped supernovae: progenitors and fate," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **451** (2015) 2123 doi:10.1093/mnras/stv990 [arXiv: 1505.00270 [astro-ph.SR]].
- [113] Y. Yang *et al.*, "Black hole formation in the lower mass gap through mergers and accretion in AGN disks," *Astrophys. J.* **901** (2020) L34 doi: 10.3847/2041-8213/abb940 [arXiv: 2007.04781 [astro-ph.HE]].
- [114] Y. Lim and J. W. Holt, "Bayesian modeling of the nuclear equation of state for neutron star tidal deformabilities and GW170817," *Eur. Phys. J. A* **55** (2019) 209 doi:10.1140/epja/i2019-12917-9 [arXiv: 1902.05502 [nucl-th]].
- [115] R. Essick, P. Landry and D. E. Holz, "Nonparametric inference of neutron star composition, equation of state, and maximum mass with GW170817," *Phys. Rev. D* **101** (2020) 063007 doi: 10.1103/PhysRevD.101.063007 [arXiv: 1910.09740 [astro-ph.HE]].
- [116] H. Mueller and B. D. Serot, "Relativistic mean field theory and the high density nuclear equation of state," *Nucl. Phys. A* **606** (1996) 508 doi:10.1016/0375-9474(96)00187-X [arXiv: nucl-th/9603037].
- [117] Z. Berezhiani, I. Bombaci, A. Drago, F. Frontera and A. Lavagno, "Gamma-ray bursts from delayed collapse of neutron stars to quark matter stars," *Astrophys. J.* **586** (2003) 1250 doi: 10.1086/367756 [arXiv: astro-ph/0209257].
- [118] D. J. Kaup, "Klein-Gordon geon," *Phys. Rev.* **172** (1968) 1331. doi: 10.1103/PhysRev.172.1331
- [119] P. O. Mazur and E. Mottola, "Gravitational vacuum condensate stars," *Proc. Nat. Acad. Sci.* **101** (2004) 9545 doi:10.1073/pnas.0402717101 [arXiv: gr-qc/0407075 [gr-qc]].
- [120] I. Bombaci, A. Drago, D. Logoteta, G. Pagliara and I. Vidaña, "Was GW190814 a Black Hole–Strange Quark Star System?," *Phys. Rev. Lett.* **126** (2021) 162702, doi: 10.1103/PhysRevLett.126.162702 [arXiv: 2010.01509 [nucl-th]].
- [121] Z. Cao, L. W. Chen, P. C. Chu and Y. Zhou, "GW190814: Circumstantial evidence for up-down quark star," arXiv: 2009.00942 [astro-ph.HE].

- [122] G. Fragione and A. Loeb, ``Black hole-neutron star mergers from triples," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **486** (2019) 4443 doi:10.1093/mnras/stz1131 [arXiv:1903.10511 [astro-ph.GA]].
- [123] F. Antonini and H. B. Perets, ``Secular evolution of compact binaries near massive black holes: Gravitational wave sources and other exotica," *Astrophys. J.* **757** (2012) 27 doi:10.1088/0004-637X/757/1/27 [arXiv:1203.2938 [astro-ph.GA]].
- [124] G. Fragione, E. Grishin, N. W. C. Leigh, H. B. Perets and R. Perna, ``Black hole and neutron star mergers in galactic nuclei," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **488** (2019) 47 doi:10.1093/mnras/stz1651 [arXiv:1811.10627 [astro-ph.GA]].
- [125] M. E. Peskin and D. V. Schroeder, ``An Introduction to quantum field theory,"
- [126] T. D. Lee and C. N. Yang, ``Question of Parity Conservation in Weak Interactions," *Phys. Rev.* **104** (1956), 254-258 doi:10.1103/PhysRev.104.254
- [127] C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes and R. P. Hudson, ``Experimental Test of Parity Conservation in β Decay," *Phys. Rev.* **105** (1957), 1413-1414 doi:10.1103/PhysRev.105.1413
- [128] A. D. Sakharov, ``Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe," *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **5** (1967), 32-35 doi:10.1070/PU1991v034n05ABEH002497
- [129] I. Y. Kobzarev, L. B. Okun and I. Y. Pomeranchuk, ``On the possibility of experimental observation of mirror particles," *Sov. J. Nucl. Phys.* **3** (1966) no.6, 837-841
- [130] E. W. Kolb, D. Seckel and M. S. Turner, ``The Shadow World," *Nature* **314** (1985), 415-419 doi:10.1038/314415a0
- [131] Z. Berezhiani, ``Through the looking-glass: Alice's adventures in mirror world," doi:10.1142/9789812775344_0055 [arXiv:hep-ph/0508233 [hep-ph]].
- [132] L. B. Okun, ``Mirror particles and mirror matter: 50 years of speculations and search," *Phys. Usp.* **50** (2007), 380-389 doi:10.1070/PU2007v050n04ABEH006227 [arXiv:hep-ph/0606202 [hep-ph]].
- [133] M. Khlopov, ``Fundamentals of Cosmic Particle Physics," doi:10.1007/978-1-907343-72-8
- [134] R. Foot, ``Mirror dark matter: Cosmology, galaxy structure and direct detection," *Int. J. Mod. Phys. A* **29** (2014), 1430013 doi:10.1142/S0217751X14300130 [arXiv:1401.3965 [astro-ph.CO]].
- [135] Z. G. Berezhiani, A. D. Dolgov and R. N. Mohapatra, ``Asymmetric inflationary reheating and the nature of mirror universe," *Phys. Lett. B* **375** (1996), 26-36 doi:10.1016/0370-2693(96)00219-5 [arXiv:hep-ph/9511221 [hep-ph]].

- [136] Z. Berezhiani, D. Comelli and F. L. Villante, "The Early mirror universe: Inflation, baryogenesis, nucleosynthesis and dark matter," *Phys. Lett. B* **503** (2001), 362-375 doi:10.1016/S0370-2693(01)00217-9 [arXiv:hep-ph/0008105 [hep-ph]].
- [137] L. Bento and Z. Berezhiani, "Leptogenesis via collisions: The Lepton number leaking to the hidden sector," *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001), 231304 doi:10.1103/PhysRevLett.87.231304 [arXiv:hep-ph/0107281 [hep-ph]].
- [138] Z. Berezhiani, "Mirror world and its cosmological consequences," *Int. J. Mod. Phys. A* **19** (2004), 3775-3806 doi:10.1142/S0217751X04020075 [arXiv:hep-ph/0312335 [hep-ph]].
- [139] Z. Berezhiani, P. Ciarcelluti, D. Comelli and F. L. Villante, "Structure formation with mirror dark matter: CMB and LSS," *Int. J. Mod. Phys. D* **14** (2005), 107-120 doi:10.1142/S0218271805005165 [arXiv:astro-ph/0312605 [astro-ph]].
- [140] Z. Berezhiani, S. Cassisi, P. Ciarcelluti and A. Pietrinferni, "Evolutionary and structural properties of mirror star MACHOs," *Astropart. Phys.* **24** (2006), 495-510 doi:10.1016/j.astropartphys.2005.10.002 [arXiv:astro-ph/0507153 [astro-ph]].
- [141] E. Lisi, S. Sarkar and F. L. Villante, "The big bang nucleosynthesis limit on $N(\text{neutrino})$," *Phys. Rev. D* **59** (1999), 123520 doi:10.1103/PhysRevD.59.123520 [arXiv:hep-ph/9901404 [hep-ph]].
- [142] A. Y. Ignatiev and R. R. Volkas, "Mirror dark matter and large scale structure," *Phys. Rev. D* **68** (2003), 023518 doi:10.1103/PhysRevD.68.023518 [arXiv:hep-ph/0304260 [hep-ph]].
- [143] C. Alcock *et al.* [MACHO], "The MACHO project: Microlensing results from 5.7 years of LMC observations," *Astrophys. J.* **542** (2000), 281-307 doi:10.1086/309512 [arXiv:astro-ph/0001272 [astro-ph]].
- [144] A. K. Drukier, K. Freese and D. N. Spergel, "Detecting Cold Dark Matter Candidates," *Phys. Rev. D* **33** (1986), 3495-3508 doi:10.1103/PhysRevD.33.3495
- [145] K. Freese, J. A. Frieman and A. Gould, "Signal Modulation in Cold Dark Matter Detection," *Phys. Rev. D* **37** (1988), 3388-3405 doi:10.1103/PhysRevD.37.3388
- [146] R. Bernabei, P. Belli, F. Cappella, V. Caracciolo, S. Castellano, R. Cerulli, C. J. Dai, A. d'Angelo, S. d'Angelo and A. Di Marco, *et al.* "Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1," *Eur. Phys. J. C* **73** (2013), 2648 doi:10.1140/epjc/s10052-013-2648-7 [arXiv:1308.5109 [astro-ph.GA]].
- [147] A. Addazi, Z. Berezhiani, R. Bernabei, P. Belli, F. Cappella, R. Cerulli and A. Incicchitti, "DAMA annual modulation effect and asymmetric mirror matter," *Eur. Phys. J. C* **75** (2015) no.8, 400 doi:10.1140/epjc/s10052-015-3634-z [arXiv:1507.04317 [hep-ex]].
- [148] R. Cerulli, P. Villar, F. Cappella, R. Bernabei, P. Belli, A. Incicchitti, A. Addazi and Z. Berezhiani, "DAMA annual modulation and mirror Dark Matter," *Eur. Phys. J. C* **77** (2017) no.2, 83 doi:10.1140/epjc/s10052-017-4658-3 [arXiv:1701.08590 [hep-ex]].

- [149] G. Adhikari, P. Adhikari, E. Barbosa de Souza, N. Carlin, S. Choi, M. Djama, A. C. Ezeribe, C. H. Ha, I. Hahn and A. J. F. Hubbard, *et al.* "An experiment to search for dark-matter interactions using sodium iodide detectors," *Nature* **564** (2018) no.7734, 83-86 [erratum: *Nature* **566** (2019) no.7742, E2] doi:10.1038/s41586-018-0739-1 [arXiv:1906.01791 [astro-ph.IM]].
- [150] J. Amare, S. Cebrian, D. Cintas, I. Coarasa, E. Garcia, M. Martinez, M. A. Olivan, Y. Ortigoza, A. O. de Solorzano and J. Puimedon, *et al.* "Annual Modulation Results from Three Years Exposure of ANAIS-112," *Phys. Rev. D* **103** (2021) no.10, 102005 doi:10.1103/PhysRevD.103.102005 [arXiv:2103.01175 [astro-ph.IM]].
- [151] Z. Berezhiani and L. Bento, "Neutron - mirror neutron oscillations: How fast might they be?," *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006), 081801 doi:10.1103/PhysRevLett.96.081801 [arXiv:hep-ph/0507031 [hep-ph]].
- [152] Z. Berezhiani, "Neutron lifetime puzzle and neutron-mirror neutron oscillation," *Eur. Phys. J. C* **79** (2019) no.6, 484 doi:10.1140/epjc/s10052-019-6995-x [arXiv:1807.07906 [hep-ph]].
- [153] Z. Berezhiani, R. Biondi, M. Mannarelli and F. Tonelli, "Neutron-mirror neutron mixing and neutron stars," *Eur. Phys. J. C* **81** (2021) no.11, 1036 doi:10.1140/epjc/s10052-021-09806-1 [arXiv:2012.15233 [astro-ph.HE]].
- [154] V. Connaughton, E. Burns, A. Goldstein, M. S. Briggs, B. B. Zhang, C. M. Hui, P. Jenke, J. Racusin, C. A. Wilson-Hodge and P. N. Bhat, *et al.* "Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914," *Astrophys. J. Lett.* **826** (2016) no.1, L6 doi:10.3847/2041-8205/826/1/L6 [arXiv:1602.03920 [astro-ph.HE]].
- [155] A. Loeb, "Electromagnetic Counterparts to Black Hole Mergers Detected by LIGO," *Astrophys. J. Lett.* **819** (2016) no.2, L21 doi:10.3847/2041-8205/819/2/L21 [arXiv:1602.04735 [astro-ph.HE]].
- [156] R. Perna, D. Lazzati and B. Giacomazzo, "Short Gamma-Ray Bursts from the Merger of Two Black Holes," *Astrophys. J. Lett.* **821** (2016) no.1, L18 doi:10.3847/2041-8205/821/1/L18 [arXiv:1602.05140 [astro-ph.HE]].
- [157] K. Murase, K. Kashiyama, P. Mészáros, I. Shoemaker and N. Senno, "Ultrafast Outflows from Black Hole Mergers with a Minidisk," *Astrophys. J. Lett.* **822** (2016) no.1, L9 doi:10.3847/2041-8205/822/1/L9 [arXiv:1602.06938 [astro-ph.HE]].
- [158] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. R. Dvali and N. Kaloper, "Many fold universe," *JHEP* **12** (2000), 010 doi:10.1088/1126-6708/2000/12/010 [arXiv:hep-ph/9911386 [hep-ph]].
- [159] A. Addazi and A. Marciano, "Testing merging of Dark Exotic Stars from Gravitational Waves in the Multi-messenger approach," *Int. J. Mod. Phys. A* **33** (2018) no.29, 1850167 doi:10.1142/S0217751X18501671 [arXiv:1710.08822 [hep-ph]].