

令和 6 年 5 月 18 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13915

研究課題名（和文）連星進化理論を用いた重力波天体起源の解明

研究課題名（英文）Elucidating the Origin of Gravitational Wave Sources Using Binary Evolution Theory

研究代表者

衣川 智弥（Kinugawa, Tomoya）

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：90779159

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究期間中に計10本の論文を出版した。これらの研究は重力波検出器LIGOらによる重力波観測結果の母天体についての考察だけでなく、重力波観測の将来計画におけるサイエンスターゲットに対する研究、重力波観測と電波観測を組み合わせることでブラックホールの形成理論に制限を与えようとする論文、連星形成についての研究と多岐にわたっている。研究発表においても国際学会での招待講演を本研究期間中に計2件行った。これは本研究成果が世界的に認知され重要視されている証左である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の初期に存在した星々（初代星）を理解するための重要な一歩です。初代星は、宇宙が誕生してから最初に形成された星々であり、その性質や進化を知ることは、宇宙の歴史を解明する上で極めて重要です。初代星は、宇宙の最初期に存在したため、現在は直接観測することが困難です。しかし、これらの星が残したブラックホールの観測を通じて、その存在を間接的に確認することができます。ブラックホールはブラックホール同士が合体する際に放出する重力波によって観測することができます。重力波を用いて初代星のブラックホール連星系を観測し、それらの形成過程や質量分布を明らかにすることを目指しています。

研究成果の概要（英文）：During this research period, a total of 10 papers were published. These studies cover a wide range of topics, including investigations into the progenitors of gravitational wave detections by the LIGO collaboration, research on science targets for future gravitational wave observations, papers aiming to constrain black hole formation theories by combining gravitational wave and radio observations, as well as studies on binary formation. Additionally, I delivered two invited talks at international conferences during this research period, indicating the global recognition and significance of our research findings.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：連星進化 重力波 マルチメッセンジャー天文学 ブラックホール 中性子星 大質量星

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2015年9月14日、世界で初めて重力波(GW150914)が直接観測された。重力波という新しい耳を手に入れたことによって、今までできなかった天文学が行えると注目されている。特に連星ブラックホールの合体は重力波以外では観測できないため、大質量星の進化をたどるうえで貴重な情報となる。申請者は重力波の観測以前から30太陽質量の重いブラックホールが初代星から形成され、重力波観測で発見されると予言していた。実際に、GW150914をはじめ、重力波観測によって示された30太陽質量の重いブラックホールの存在は研究者に衝撃を与えた。重力波の存在が直接証明されたことにより、今後の重力波研究は、重力波を用いてどの様に天体の物理を解明していくかというフェイズに切り替わりつつある。重力波観測のメインターゲットはコンパクト連星の合体である。コンパクト連星は重力波放出により軌道が縮まり、いずれ合体する。重力波による合体までのタイムスケールは数億年から宇宙年齢以上と非常に長いため、重力波源として宇宙初期からのコンパクト連星の累積が有力視されている。したがって、宇宙初期から現在までの各時代でのコンパクト連星の特徴を明らかにし、重力波観測結果からどのような星の進化、形成情報が得られるかの考察が重力波天文学を行う上で急務である。

2. 研究の目的

今後、KAGRA, LIGO, VIRGO によるコンパクト連星合体の観測例が増えていくことが期待されている。コンパクト連星合体の重力波観測と理論比較にて大質量星進化の物理的性質の解明を目指す、今後の重力波天文学を切り開いていくことを目的としている。

3. 研究の方法

本研究においては連星進化計算によく使われる手法である Population synthesis による計算を用いる。連星進化は連星の初期条件(二つの星の質量、軌道長半径、離心率)によって連星相互作用による進化への影響が大きく変わってくる。そのため、初期値を乱数でふった多くの連星を用意し、どのような初期値でどのような連星進化を行うかを統計的に数値計算で調査する必要がある。これを Population synthesis という。初代星を含めた極低金属量星の連星進化について Population synthesis で計算できるようなプログラムを作成する。

重力波観測後の連星進化の研究において、初代星を含め少なくとも金属量が極めて少ない宇宙初期の環境下でできた大質量星がブラックホールの起源として注目されている。そこで、超低金属下で生まれた大質量星による連星形成を系統的に調べることで重力波から超低金属下での連星の進化についての情報を引き出すための基盤を作る。さらに、今後観測が増えると考えられる中間質量ブラックホールについても連星進化計算を行う予定である。LIGO による GW190521 という合体後のブラックホール質量が約150太陽質量となる中間質量ブラックホールの初観測結果を皮切りに今後の重力波観測で星質量ブラックホール(～数十太陽質量のブラックホール)と銀河中心の超巨大ブラックホール(～数億-数千億太陽質量のブラックホール)の間となる中間質量ブラックホールの発見も増えていくことが期待されている。初代星のうち一部はこのような中間質量ブラックホールの種となるような重い星(～数百-千太陽質量)の星として生まれてくるといふ形成シミュレーションがあるので中間質量ブラックホール連星の形成及び重力波での観測可能性についても計算を行い、議論していく。中間質量ブラックホールの合体は低周波なので KAGRA などより、将来計画である LISA や DECIGO のほうが観測しやすい。そのため、本研究により、将来計画に対する観測提案も行う。

4. 研究成果

主に以下の内容の論文を研究期間中に出版した。

- ・初代星の連星進化により、合計150太陽質量となる重い連星ブラックホール合体イベント GW190521 を再現する連星ブラックホールを形成できることを示した。また、初代星起源の GW190521 に似た連星ブラックホールの合体率は LIGO の観測からまとめられた合体率を説明できることも示した。

- ・LIGO により観測された連星ブラックホールのうち合体する連星ブラックホールの典型的な質量が20太陽質量以上のもの合体率について、初代星起源の連星起源のモデルでよく再現できるということも本研究により示している。

- ・重力波観測で見つかったブラックホール-中性子星連星について孤立連星系での形成が可能かを検証し、形成可能であることを示した。また、ブラックホール-中性子星連星は形成当初は中性子星がパルサーとして電波放射をすることが予想されている。しかし、いまだ電波による観測はできていない。本研究では、ブラックホール-中性子星連星発見とブラックホール-パルサー連星の未発見は無矛盾かどうかを検証した。現時点での電波観測においては未発見であることは無矛盾だが将来計画によりブラックホール-パルサー連星が観測されるであろうことを示した。電波での将来観測によりブラックホール-パルサー連星が

観測されることにより、重力観測と電波観測を組み合わせることでブラックホールの形成理論に制限を与えることができることを示した。

- ・大質量な初代星の連星進化計算を行い、このような連星がどのようなコンパクト連星として宇宙空間に残るかを見積もった。また、これら大質量な初代星起源のコンパクト連星が今後の重力波観測によって発見されうるかを検討し、十分にその可能性があることを示した。また、発見された場合、初代星の初期質量及び連星の進化パラメータへの制限を行えることを示した。

- ・重力波の将来観測計画において、白色矮星同士の連星合体をどの程度の頻度及び精度で観測可能かを見積もり、白色矮星の連星合体が有力な起源候補と考えられている Ia 型超新星爆発の起源天体への制限及び同定にどの程度寄与できるかを見積もった。DECIGO といったデシ Hz 帯の重力波観測が動き出すことで、Ia 型超新星の期限に迫ることができると示した。

- ・Gaia DR3 のデータを用いて、ブラックホールと赤色巨星からなるブラックホール連星の候補を発見したことを報告した。この天体は追観測によって Gaia BH2 というブラックホール連星として認定された。

- ・原始星の降着段階において、等質量連星の初期軌道長半径が異なる場合の進化を調査するために SPH シミュレーションを実施した。Population III (初代星) 原始星モデルを使用し、合併に至るかどうかの初期軌道長半径の条件を調査した。

これらの研究は LIGO らによる重力波観測結果の母天体についての考察だけでなく、重力波観測の将来計画におけるサイエンスターゲットに対する研究、重力波観測と電波観測を組み合わせることでブラックホールの形成理論に制限を与えようとする論文、連星形成についての研究と多岐にわたっている。研究発表においても国際学会での招待講演を本研究期間中に計 2 件行った。これは本研究成果が世界的に認知され重要視されている証左である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tanikawa Ataru, Chiaki Gen, Kinugawa Tomoya, Suwa Yudai, Tominaga Nozomu	4. 巻 74
2. 論文標題 Can Population III stars be major origins of both merging binary black holes and extremely metal poor stars?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 521 ~ 532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kinugawa Tomoya, Nakamura Takashi, Nakano Hiroyuki	4. 巻 515
2. 論文標題 Constraints on population I/II neutron star-black hole binary formation by gravitational wave and radio observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L78 ~ L83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slac073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kinugawa Tomoya, Takeda Hiroki, Tanikawa Ataru, Yamaguchi Hiroya	4. 巻 938
2. 論文標題 Probe for Type Ia Supernova Progenitor in Decihertz Gravitational Wave Astronomy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 52 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kinugawa Tomoya, Nakamura Takashi, Nakano Hiroyuki	4. 巻 504
2. 論文標題 Gravitational waves from Population III binary black holes are consistent with LIGO/Virgo O3a data for the chirp mass larger than $\sim 20 M_{\text{sun}}$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L28 ~ L33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slab032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hijikawa Kotaro, Tanikawa Ataru, Kinugawa Tomoya, Yoshida Takashi, Umeda Hideyuki	4. 巻 505
2. 論文標題 On the population III binary black hole mergers beyond the pair-instability mass gap	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L69 ~ L73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slab052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanikawa Ataru, Kinugawa Tomoya, Yoshida Takashi, Hijikawa Kotaro, Umeda Hideyuki	4. 巻 505
2. 論文標題 Population III binary black holes: effects of convective overshooting on formation of GW190521	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2170 ~ 2176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1421	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanikawa Ataru, Yoshida Takashi, Kinugawa Tomoya, Trani Alessandro A., Hosokawa Takashi, Susa Hajime, Omukai Kazuyuki	4. 巻 926
2. 論文標題 Merger Rate Density of Binary Black Holes through Isolated Population I, II, III and Extremely Metal-poor Binary Star Evolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 83 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tanikawa Ataru, Chiaki Gen, Kinugawa Tomoya, Suwa Yudai, Tominaga Nozomu	4. 巻 -
2. 論文標題 Can Population III stars be major origins of both merging binary black holes and extremely metal poor stars?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kirihara Takanobu, Susa Hajime, Hosokawa Takashi, Kinugawa Tomoya	4. 巻 950
2. 論文標題 Merger Conditions of Population III Protostar Binaries	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 188 ~ 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acd1e0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tanikawa Ataru, Hattori Kohei, Kawanaka Norita, Kinugawa Tomoya, Shikauchi Minori, Tsuna Daichi	4. 巻 946
2. 論文標題 Search for a Black Hole Binary in Gaia DR3 Astrometric Binary Stars with Spectroscopic Data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 79 ~ 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acbf36	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Tomoya Kinugawa
2. 発表標題 Remnants of first stars for gravitational wave sources
3. 学会等名 nuclear burning in massive stars (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Kinugawa
2. 発表標題 Impact of binary interactions on the diffuse supernova neutrino background
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------