

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01933

研究課題名（和文）銀河シミュレーションで探る星団起源ブラックホール連星の宇宙史

研究課題名（英文）Binary black holes originating from star clusters in galaxy simulations

研究代表者

藤井 通子 (Fujii, Michiko)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：90722330

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、銀河中での星団形成シミュレーションを行い、得られた星団の分布と、星団進化シミュレーションから得られた星団での連星ブラックホールの合体率を用いて、宇宙全体における星団起源の連星ブラックホール合体による重力波放出率を理論的に求めることを目的とする。そのために、本研究では、星団の星一つ一つを分解でき、星の軌道をこれまでより高精度で計算できる流体/N体シミュレーションコードの開発を行い、それを用いて星団形成シミュレーションを行った。様々な質量、密度の分子雲での星団形成シミュレーションを行い、それぞれについて、形成する星団の質量分布を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力波が検出されるようになって以来、ブラックホール連星の合体を起源とする重力波が数多く検出されてきた。ブラックホール連星の形成過程として有力な仮説の一つが、星団内での星の力学的な相互作用である。本研究では、星団の母体となる分子雲とそこから生まれる星団の関係を明らかにしてきた。これまで盛んに行われてきた星団内でのブラックホール連星の形成率や合体率と組み合わせることで、宇宙全体でどの程度の星団起源のブラックホール連星の合体が重力波観測装置で検出されると期待されるか見積もることができる。

研究成果の概要（英文）：We aimed to understand the merger rate of binary black holes originated from star clusters in the universe. For this purpose, we have developed a new N-body/hydrodynamics code, in which we can calculate the motion of individual stars more accurately than previous studies. Using this code, we performed star-cluster formation simulations starting from molecular clouds, in which stars and star clusters form. We performed a series of simulations by changing the initial mass and density of the molecular clouds and obtained the mass function of star clusters formed in turbulent molecular clouds.

研究分野：天文学

キーワード：シミュレーション ブラックホール連星 星団

1. 研究開始当初の背景

2015年、LIGOによって初めて重力波が観測されて以来、数多くのブラックホール(BH)連星起源の重力波が検出され、重力波天文学の時代が始まった。観測されたBH連星の質量分布等から、BH連星の形成過程や大質量星の形成・進化史が明らかになると期待されている。BH連星の形成過程としては、連星の恒星進化と星団中での力学的進化の2つが有力であるが、それぞれ形成するBH連星の質量や離心率分布が異なり、特に星団では離心率の高い合体が増えると予想されている。これらの分布を理論的に求めることで観測されたBH連星のうち、どのくらいの割合がどちらの形成過程を経ているのかを明らかにすることができる。そのためには、各形成過程で合体するBH連星の分布をいかに正確に推定するかが重要となる。

恒星進化の場合、連星の分布を仮定して、連星の進化計算を行えばよいが、星団中での力学的進化の場合、星団全体をモデル化して、星団全体の力学的進化のシミュレーションを行う必要がある。さらに、宇宙の歴史の中で、いつ頃、どのような質量を持つ星団がどの程度生まれたのかも見積もる必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、星団形成シミュレーションを行い、どのような分子雲(質量、密度、金属量など)から、どのような質量、密度を持つ星団が生まれるのかを、シミュレーションを使って調べる。その結果を基に、これまで行われてきた星団の力学的進化シミュレーションの結果と組み合わせることで、星団を起源とするBH連星の形成史や、現在の観測で検出されるBH連星合体の頻度を見積もる。

3. 研究の方法

本研究では、星一つ一つを分解した星団・銀河形成シミュレーションを行えるコードを新規開発し、それを用いて、星団・銀河形成シミュレーションを行い、質量、密度、金属量といったパラメータとその条件下で生まれる星団の質量や質量関数について調べる。

4. 研究成果

(1) 新規開発コード「ASURA+BRIDGE」

本研究のために、これまで銀河形成シミュレーションに用いられてきたN体/流体計算コード「ASURA」(Saitoh et al. 2009)に、「BRIDGE」(Fujii et al. 2007)という手法を用いて、星粒子間の相互作用のみを近似なしで計算するコードを組み込んだ「ASURA+BRIDGE」コードを新規開発した。星粒子は、時に、非常にコンパクトな連星を形成し、その結果、時間刻みが短くなり計算を困難にするため、連星計算用のアルゴリズムを含むN体計算コード「PeTar」(Wang et al. 2020)を使用したバージョンも開発した(Fujii et al. 2021a)。また、星形成部分も銀河形成でよく用いられる、ガスの密度に応じた確率的な星形成を星一つ一つがある与えられた質量関数を満たすように形成するよう改良した(Hirai et al. 2021)。さらに、大質量星からのフィードバックについて、大質量星周りのガスの密度に合うStrömgren半径を決め、その中のガス粒子に温度と速度のフィードバックを与えるようなアルゴリズムを実装した(Fujii et al. 2021b)。テスト計算として、他の同様の計算を行うことができるコードを用いた結果と比較し、星形成効率や星形成のタイムスケールが変わらないことを確認した。

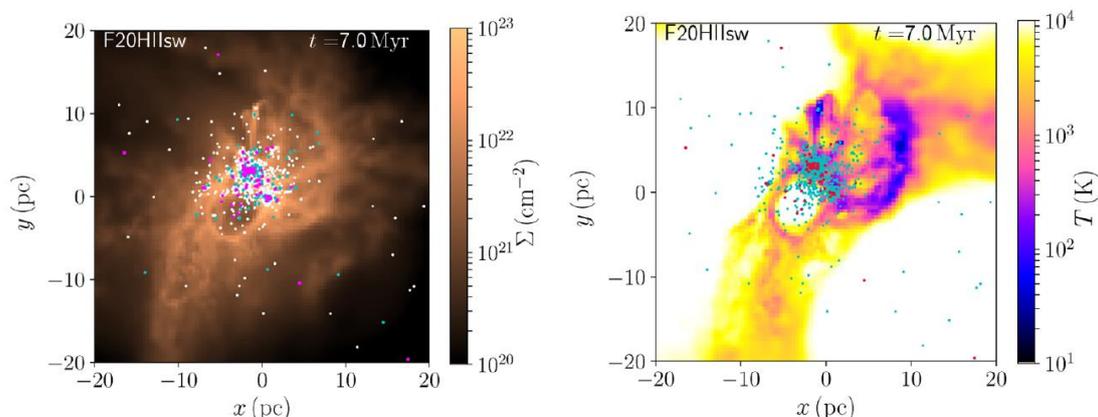


図1: シミュレーションで得られた星団形成の様子。左: ガスの面密度分布と星の分布。ピンクは20太陽質量以上、水色は10-20太陽質量、白はそれ以外の星。右: ガスの温度と星の分布。赤は20太陽質量以上、水色はそれ以外の質量の星。Michiko S. FUJII, Takayuki R. SAITOH, Yutaka HIRAI, and Long WANG, Publ. Astron. Soc. Japan (2021) 73 (4), 1074-109, Fig. 13

星の運動を精度良く計算できるようになった結果、星団中心で形成した大質量星が強い重力散乱によって星団中心部から弾き出されることによって、速度分散の低い分子雲モデルでは星形成効率が高くなり、速度分散の高い分子雲モデルでは星形成率が低くなることがわかった。

(2) オリオン大星雲の形成過程

オリオン大星雲は、今まさに形成中の星団とそこに複数の大質量星を含み、半分は分子雲にまだ埋もれており星形成を続けている一方、大質量星によるガスの電離が進みつつある領域である。上記の新規開発コード「ASURA+BRIDGE」を用いて、オリオン大星雲にある星団程度の質量の星団形成シミュレーションを行い、オリオン大星雲とその星団との比較を行った。オリオン大星雲の星団は、3つの年齢分布を持つと観測から示唆されているが、シミュレーションの結果、それは星団形成時のクラump合体によるものであることがわかった(図2:左)。シミュレーションから、クラumpが合体する際に星団へ低温・高密度ガスを持ち込み、それによって星団内での星形成が一時的に活発となることで、ある年齢の星の分布のピークが作られることが示された。オリオン大星雲の星団では、過去3回、クラump合体が起こったと考えられる。

また、オリオン大星雲の中心から大質量星が弾き出される時に中心部の低温高密度の分子ガスの壁に穴を開け、その結果、大質量星によって作られる電離領域が、星団の片側に広がることがわかった。これは、星の軌道を高精度で計算することができるシミュレーションによって初めて得られた結果である。オリオン大星雲の領域の星の速度とシミュレーションで得られた星の速度の分布は一致しており、オリオン大星雲で形成中の星団では、星形成と星団内での星同士の力学相互作用による大質量星の周囲への弾き出しが実際に起こっていることを示している。

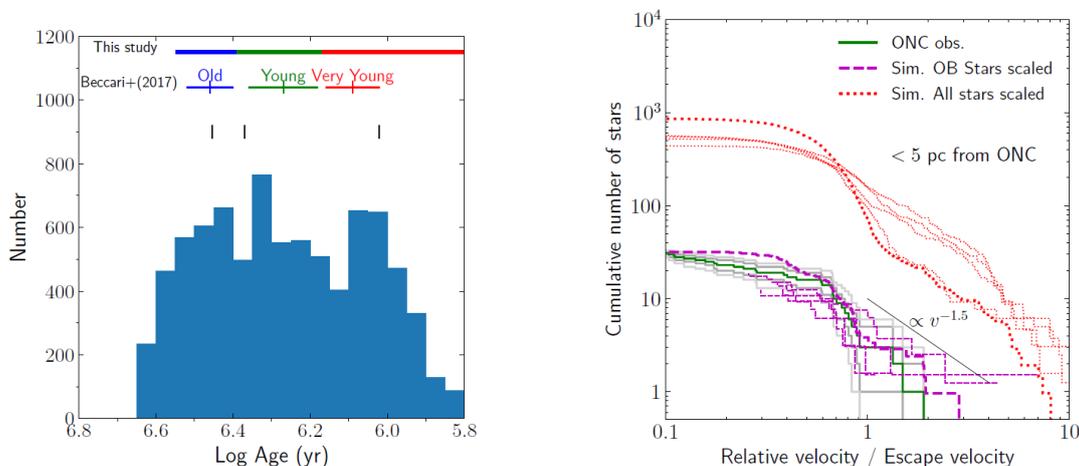


図2: 左: 形成した星の年齢分布。上部の「Old」「Young」「Very Young」は観測から示唆されているオリオン大星雲の星団の星の3つの年齢分布の位置を示す。右: 観測から得られたオリオン大星雲の大質量星の速度分布(緑)とその分散(灰色)。マゼンタはシミュレーションで得られた同様の分布。赤線はシミュレーションで得られた全ての質量の星の速度分布。右側のべき乗分布は、星団内での力学相互作用で弾き出された星が作る速度分布を示している。Fujii et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (2022a, b)、受理済み、印刷中より

(3) 分子雲の金属量と形成する星団の構造

分子雲とそこから形成する星団の関係がわかれば、観測や理論で得られる銀河のパラメータから、そこで形成する星団の質量や密度といった「星団の初期条件」を推定することができる。前述の新規開発コード「ASURA+BRIDGE」を用いて、分子雲の質量、密度、ビリアル比、金属量を変えたシミュレーションを行い、そこで形成する星団の質量、密度、複数の星団が形成する場合はその質量関数を調べた。特に、乱流を持つ分子雲を初期条件とする場合、初期の乱流速度の分布のランダムさによっても結果が変わるため、各条件につき、複数の計算を行った。

金属量によって、星団の密度が大きく変わることがわかった。また、分子雲の初期のビリアル比と星団の質量の関係は弱く、分子雲の質量や密度の方の影響が大きいことがわかった。今後、解析を進めて、具体的な関係を調べていく予定である。また、形成した星団を初期条件として、銀河内での潮汐破壊も含めた星団進化シミュレーションを行っていく予定である。

(4) SIRIUS Project

本研究で開発した「ASURA+BRIDGE」コードを用いて、星一つ一つを再現した星団形成・銀河形成シミュレーションを行っていくプロジェクト「SIRIUS Project」を立ち上げた(<https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/sirius-project/>)。現在、星団形成シミュレーションの他に、矮小銀河形成シミュレーションを実行中である。現在の大規模な銀河形成シミュレーション

ュレーションプロジェクトでは、シミュレーションデータの公開によって、より幅の広い研究へと繋げることが多い。本プロジェクトでも、将来的にシミュレーションデータの公開・活用ができるよう、データ活用プラットフォーム「mdx」(<https://mdx.jp/>)を利用してデータ公開の準備を進めている(<http://galaxies.astron.s.u-tokyo.ac.jp/>)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujii Michiko S, Saitoh Takayuki R, Hirai Yutaka, Wang Long	4. 巻 73
2. 論文標題 SIRIUS project. III. Star-by-star simulations of star cluster formation using a direct <i>N</i> -body integrator with stellar feedback	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1074 ~ 1099
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab061	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 Fujii Michiko S, Saitoh Takayuki R, Wang Long, Hirai Yutaka	4. 巻 73
2. 論文標題 SIRIUS project. II. A new tree-direct hybrid code for smoothed particle hydrodynamics/ <i>N</i> -body simulations of star clusters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1057 ~ 1073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab037	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 Wang Long, Tanikawa Ataru, Fujii Michiko S	4. 巻 509
2. 論文標題 The impact of primordial binary on the dynamical evolution of intermediate massive star clusters	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 4713 ~ 4722
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab3255	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 Wang Long, Fujii Michiko S, Tanikawa Ataru	4. 巻 504
2. 論文標題 Impact of initial mass functions on the dynamical channel of gravitational wave sources	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 5778 ~ 5787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1157	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 Arimoto Makoto, Asada Hideki, Cherry Michael L, Fujii Michiko S, 他	4. 巻 ptab042
2. 論文標題 Gravitational wave physics and astronomy in the nascent era	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab042	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 該当する

1. 著者名 Trani A A, Tanikawa A, Fujii M S, Leigh N W C, Kumamoto J	4. 巻 504
2. 論文標題 Spin misalignment of black hole binaries from young star clusters: implications for the origin of gravitational waves events	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 910 ~ 919
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab967	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 該当する

1. 著者名 Matsuno T., Hirai Y., Tarumi Y., Hotokezaka K., Tanaka M., Helmi A.	4. 巻 650
2. 論文標題 R-process enhancements of Gaia-Enceladus in GALAH DR3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202040227	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 該当する

1. 著者名 Wanajo Shinya, Hirai Yutaka, Prantzos Nikos	4. 巻 505
2. 論文標題 Neutron star mergers as the astrophysical site of the r-process in the Milky Way and its satellite galaxies	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 5862 ~ 5883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1655	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 該当する

1. 著者名 Tanikawa Ataru, Kinugawa Tomoya, Kumamoto Jun, Fujii Michiko S	4. 巻 72
2. 論文標題 Formation rate of LB-1-like systems through dynamical interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa021	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 Kumamoto Jun, Fujii Michiko S, Tanikawa Ataru	4. 巻 495
2. 論文標題 Merger rate density of binary black holes formed in open clusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4268 ~ 4278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1440	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 Baba Junichi, Kawata Daisuke	4. 巻 492
2. 論文標題 Age dating the Galactic bar with the nuclear stellar disc	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4500 ~ 4511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa140	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 該当する

1. 著者名 Fujii M S	4. 巻 486
2. 論文標題 Kinematics of subclusters in star cluster complexes: imprint of their parental molecular clouds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3019 ~ 3026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1056	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 Fujii Michiko S.	4. 巻 14
2. 論文標題 Inter-cluster velocity structures of star cluster complexes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 197 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921319007634	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 藤井通子
2. 発表標題 銀河系中心でのIMBHの検出可能性
3. 学会等名 JASMINE Consortium Meeting 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井通子
2. 発表標題 星団形成シミュレーションコード「ASURA+BRIDGE」
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井通子
2. 発表標題 ASURA+BRIDGEを用いた星団形成シミュレーション
3. 学会等名 新学術領域「星惑星形成」2020年度大研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井通子
2. 発表標題 Toward simulations of globular cluster formation
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Michiko Fujii
2. 発表標題 Simulations of massive star cluster formations using a new N-body/SPH code ASURA + BRIDGE
3. 学会等名 StarFormMapper (European H2020 RIA project): A scientific study into the formation and evolution of massive stars and their natal clusters (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michiko Fujii
2. 発表標題 Formation and dynamical evolution of star clusters and associations
3. 学会等名 Challenges and innovations in computational astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michiko Fujii
2. 発表標題 Inter-cluster velocity structure of star cluster complexes
3. 学会等名 tar Clusters: from the Milky Way to the Early Universe, IAU Symposium 351 & MODEST-19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michiko Fujii
2. 発表標題 N-body simulations of star clusters
3. 学会等名 Lorentz center workshop; The Origins of Black Hole Mergers and Gravitational waves, Leiden University
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michiko Fujii
2. 発表標題 Binary black hole mergers originated from star clusters; from open to globular clusters
3. 学会等名 Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 84. 藤井通子
2. 発表標題 ASURA+BRIDGEを用いた星団形成シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会 2019年 秋季年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人のWebサイト http://groups.astron.s.u-tokyo.ac.jp/fujii/ プロジェクトのWebサイト https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/sirius-project/ データ公開サイト http://galaxies.astron.s.u-tokyo.ac.jp/

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
研究分担者	齋藤 貴之 (Saitoh Takayuki) (40399291)	神戸大学・理学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	平居 悠 (Hirai Yutaka) (60824232)	東北大学・理学研究科・JSPS特別研究員(PD) (11301)	
研究分担者	馬場 淳一 (Baba Junichi) (90569914)	国立天文台・JASMINEプロジェクト・特任助教 (62616)	

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