

高密度星団でのコンパクト連星形成の数値研究

Numerical study of compact binary stars in dense star clusters

谷川 衝

東京大学大学院総合文化研究科

1. 研究目的

高密度星団（以下、星団）は多くの恒星が小さい領域に密集した天体である。このような天体では恒星の近接遭遇、恒星の合体、連星のメンバー交換など、星団外では起こり得ないことが起こる。星団の全体の力学進化と1つ1つの恒星の運命を追うのに強力な手法として重力N体計算がある。重力N体計算では恒星1つ1つの運動をニュートンの万有引力の法則に基づいて第一原理的に解きつつ、恒星1つ1つの内部進化をサブグリットの的に解く。

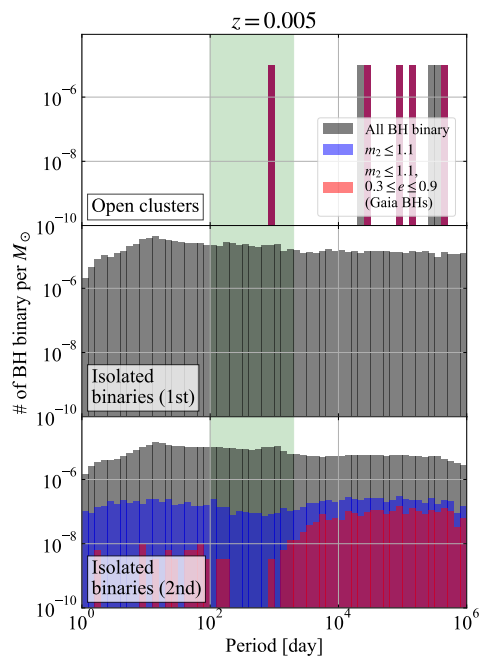
今研究における我々の目的の2つある。1つ目は近年谷川が開発した恒星の内部進化モデルBSEEMP(Tanikawa et al. 2020, MNRAS, 495, 4170)を重力N体計算コードPeTarとNBODY6++GPUに搭載することである。2つ目は恒星の合体や連星のメンバー交換によって星団で形成される特異な天体があるのかの観測を説明できるかを探ることである。

2. 研究成果の内容

まず1つ目の目的について述べる。我々はBSEEMPを重力N体計算コードPeTarとNBODY6++GPUに搭載することに成功した。PeTarについてはすでにコードを使用した論文(Wang et al. MNRAS, 515, 5106)が出版されており、これによって初代星団における中間質量ブラックホール形成の可能性が明らかとなった。またNBODY6++GPUについてはコードを使用した論文(Kamlah et al.

2023)を準備中である。そこでは初代星団で形成される二重ブラックホールの合体率、質量分布などが明らかとなっている。1つ目の研究目的は達成されたと言える。

次に2つ目の目的について述べる。近年、位置天文衛星Gaiaによってブラックホールと恒星の連星（ブラックホール連星）が複数発見されている。このようなブラックホール連星は、ブラックホール質量10太陽質量、恒星質量1太陽質量、軌道周期100から1000日、離心率0.5程度となっている。このようなブラックホール連星は、孤立連星から作るの非常に難しい。そこで星団での形成が期待されているが、定量的な評価が行われていなかった。そこで我々はPeTarを用いて散開星団におけるブ



ブラックホール連星の形成を調べた。その結果が図である。一番上の赤いヒストグラムが散開星団における形成効率、一番下の赤いヒストグラムが孤立連星による形成効率である。また緑の領域はGaiaで発見されているブラックホール連星のパラメータ領域である。図から明らかなように、散開星団におけるブラックホール連星の形成効率は孤立連星に比べて1000倍大きい。この結果はGaiaによって発見されているブラックホール連星が散開星団で形成されていることを示唆するだけでなく、このブラックホール連星自体が散開星団の進化史のプローブになりうることを示している。この結果はTanikawa et al. (2023, arXiv:2303.05743)として査読誌に投稿されている。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

1つ目の研究について述べる。重力N体計算コードPetarとNBODY6++GPUはどちらもGPU上での動作をマルチMPIプロセスでサポートしている。従って、そのような計算機が必要であり、Cygnusはコードテストに最適であった。

2つ目の研究について述べる。この研究は1つ目の研究によってBSEEMPがPeTarに搭載されたことに基づいている。従って、学際共同利用プログラムの意義は大きい。

4. 今後の展望

2つ目の研究は、まだ計算規模が小さくブラックホール連星のブラックホール質量分布、恒星質量分布、軌道周期分布、離心率分布を求めるには至っていない。今後は計算規模を100倍にしてそれらを求めていく。このような計算は現在Pegasusで進行中である。さらにこのような大規模な計算によって、他の天体の散開星団における形成も明らかになるであろう。今回扱っているブラックホール連星の軌道周期は100-1000日であるが、ブラックホールX線連星のような軌道周期10日以下の天体の形成過程も実は明らかになっていない。これらの形成も散開星団で説明できるかもしれないので、その可能性を探っていく。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- "Search for a Black Hole Binary in Gaia DR3 Astrometric Binary Stars with Spectroscopic Data", Tanikawa, A., K. Hattori, N. Kawanaka, T. Kinugawa, M. Shikauchi, and D. Tsuna 2023, *The Astrophysical Journal*, 946, 79
- "Compact Binary Formation in Open Star Clusters I: High Formation Efficiency of Gaia BHs and Their Multiplicities", Tanikawa, A., S. Cary, M. Shikauchi, L. Wang, and M. S. Fujii 2023, arXiv e-prints, arXiv:2303.05743
- "Euclid detectability of pair instability supernovae in binary population synthesis models consistent with merging binary black holes", Tanikawa, A., T. J. Moriya, N. Tominaga, and N. Yoshida 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519, L32
- "The impact of stellar evolution on rotating star clusters: the gravothermal-gravogyro catastrophe and the formation of a bar of black holes", Kamlah, A. W. H., R. Spurzem, P. Berczik, M. Arca Sedda, F. Flammini Dotti, N. Neumayer, X. Pang, Q. Shu, A. Tanikawa, and M. Giersz 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516, 3266
- "Gravitational wave of intermediate-mass black holes in Population III star clusters", Wang, L., A. Tanikawa, and M. Fujii 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515, 5106

- "Probe for Type Ia Supernova Progenitor in Decihertz Gravitational Wave Astronomy", Kinugawa, T., H. Takeda, A. Tanikawa, and H. Yamaguchi 2022, The Astrophysical Journal, 938, 52
 - "MOCCA-SURVEY Database I: tidal disruption events of white dwarfs in globular clusters and young mass clusters", Tanikawa, A., M. Giersz, and M. Arca Sedda 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 515, 4038
 - "Revisiting the common envelope evolution in binary stars: A new semianalytic model for N -body and population synthesis codes", Trani, A. A., S. Rieder, A. Tanikawa, G. Iorio, R. Martini, G. Karelin, H. Glanz, and S. Portegies Zwart 2022, Physical Review D, 106, 043014
 - "Can Population III stars be major origins of both merging binary black holes and extremely metal poor stars?", Tanikawa, A., G. Chiaki, T. Kinugawa, Y. Suwa, and N. Tominaga 2022, Publications of the Astronomical Society of Japan, 74, 521
 - "The Double Detonation of a Double-degenerate System, from Type Ia Supernova Explosion to its Supernova Remnant", Ferrand, G., A. Tanikawa, D. C. Warren, S. Nagataki, S. Safi-Harb, and A. Decourchelle 2022, The Astrophysical Journal, 930, 92
- (2) 学会発表
- “位置天文衛星Gaiaによるブラックホール連星探査とその候補天体”, 日本天文学会 2023年春季年会, Mar. 14, 2023, 東京
 - “Gaia DR3におけるブラックホール連星探査”, 連星系・変光星研究会2022, Dec. 17, 2022, 岡山
 - "Binary white dwarf merger simulations", Exploring the Transient Universe, Dec. 15, 2022, Tokyo
 - “Formation mechanisms of GW190521-like an GW190412-like events from Population III binary stars”, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop, Dec. 6, 2022, Melbourne
 - "連星ブラックホール形成過程の理論研究", 初代星・初代銀河研究会2022, Nov. 10, 2022, 徳島
 - "Population III binary black holes: filling the pair instability mass gap", AAPPS-DPP2021 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics, Oct. 14 2022, online
 - “Binary population synthesis for merging binary black hole formation”, EANAM9, Sep. 28, 2022, Naha
 - “地下からの重力波観測と連星ブラックホールの軌道離心率”, 日本天文学会2022年秋季年会, Sep. 13, 2022, に井川
 - “Population III binary black holes and pair instability supernovae”, The 15th Asia Pacific Physics Conference, Aug. 23, 2022, Online
 - “Merging binary black holes formed through isolated binary stars with all the metallicities”, 23rd International conference on general relativity and gravitation, Jul. 5, 2022, Online
 - "SMS radius evolution after collisions in BSE(EMP)", VMW - Multiple population star cluster & supermassive stars, Apr. 4, 2022, Online
- (3) その他

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	3600	0

筑波大学計算科学研究センター 2022年度学際共同プログラム利用報告書

Wisteria/BDEC-01			
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			