

# 散開星団での不活性コンパクト連星形成の数値研究 Numerical study of inert compact binaries in open star clusters

谷川衝

福井県立大学情報センター

## 1. 研究目的

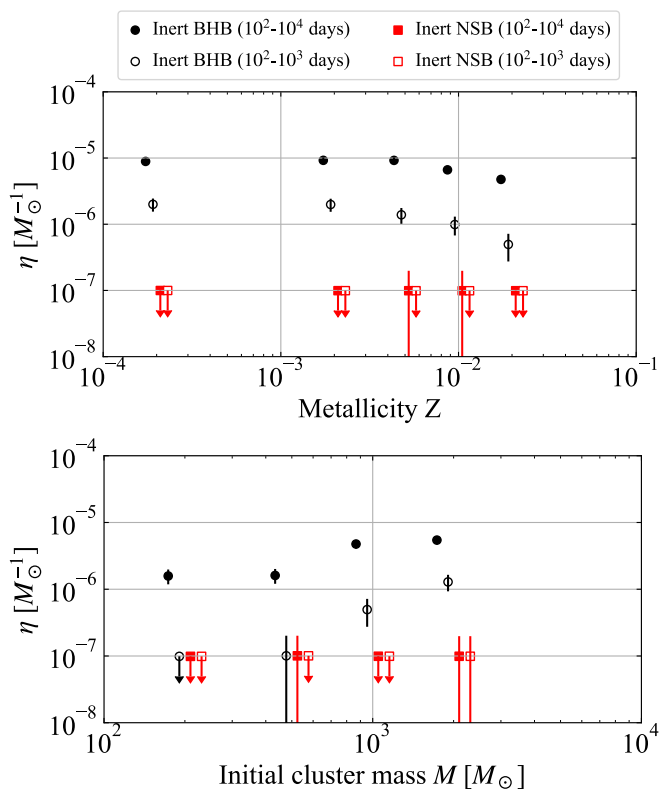
散開星団（以下、星団）は全質量で $10^2 - 10^3 M_{\odot}$ 程度の恒星が小さい領域に密集した天体である。このような天体では恒星の近接遭遇、恒星の合体、連星のメンバー交換など、星団外では起こり得ないことが起こる。星団の全体の力学進化と1つ1つの恒星の運命を追うのに強力な手法として重力N体計算がある。重力N体計算では恒星1つ1つの運動をニュートンの万有引力の法則に基づいて第一原理的に解きつつ、恒星1つ1つの内部進化をサブグリッド的に解く。

本研究における我々の目的は、星団外の孤立環境では形成しえない天体が、星団内で十分形成しえるかどうかを検証することである。特にターゲットとしているのは、近年、位置天文衛星Gaiaのデータを駆使することによって発見が相次いでいるGaia BHやGaia NSといったX線では明るくない「不活性」なブラックホール(BH)や中性子星(NS)の連星の形成である。本研究では、重力N体計算を行うことによって、大量の散開星団でのGaia BHやGaia NSの形成を調べ、それらの形成率が観測に合うかどうかを検証した。

## 2. 研究成果の内容

近年の連星探査の進展により、軌道周期が $10^2 - 10^4$ 日のブラックホール連星や中性子星連星が発見された。ここでブラックホール連星や中性子星連星というのはブラックホールまたは中性子星を1つ持つ連星のことである。これらは軌道周期が長く伴星との距離が大きいため、伴星からブラックホールや中性子星への物質降着が起こらない。それゆえにX線で明るく輝くことはない「不活性」な連星である。特筆すべきことは、これらの連星の軌道周期が非常に「中途半端な」長さであることである。従来考えられてきた孤立環境での連星進化モデルでは、このように中途半端な軌道周期のブラックホール連星や中性子星連星は存在しないはずであった。もともと軌道周期が $10^2 - 10^4$ 日の2つの恒星の連星があったとしても、片方の恒星がブラックホールや中性子星となる過程で、軌道周期が $10^2$ 日以下になると考えられてきたからである。また $10^4$ 日以上連星は、片方の恒星がブラックホールや中性子星となる過程を経ても軌道周期が変わらない、またはより長くなると考えられている。

このような中途半端に長い軌道周期を持つブラックホール連星や中性子星連星が存在する理由として2つの可能性がある。1つは従来の連星進化モデルに改訂が必要なこと、もう1つはこれらの連星が孤立環境で形成されたのではなく、星団のような高密度環境で形成された可能性である。我々は2つめの可能性を検証するために、星団内での不活性コンパクト連星の形成過程を重力N体計算で追跡した。その結果、不活性ブラックホール連星は星団において十分数多く形成できることが明らかとなった (Tanikawa et al. 2024, MNRAS, 527, 4031)。一方、不活性中性子星連星に対してはそうい



うわけにはいかなかった (Tanikawa et al. 2024, submitted)。星団で形成された不活性ブラックホール連星と不活性中性子星連星の数を比較した結果、前者のほうが10倍以上多くなった(左図参照)。これは発見された不活性ブラックホール連星の数が2個、不活性中性子星連星の数が20個という観測結果と大きく矛盾する。発見の数の比がそのまま潜在的な数の比である保証はない。しかし、一般にブラックホールのほうが中性子星よりはるかに質量が大きいため、不活性ブラックホール連星の方が発見しやすいはずである。そうだとすれば、現在発見されている不活性ブラックホール連星と不活性中性子星連星の数の比は0.1である

が、潜在的な数の比は0.1未満である

可能性がある。したがって、やはり計算結果は観測結果と矛盾する。

我々はこの結果を受けて、星団で不活性ブラックホール連星と不活性中性子星連星の両方を形成することはできない、と結論づけた。ただし、これは不活性ブラックホール連星が星団で形成されていないということの意味するわけではない。この結論の意味するところは、少なくとも不活性中性子星連星に関しては、連星進化モデルの改訂は必要である、ということである。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究では10万個以上の星団に対して重力N体計算を行った。それらの膨大な計算量を確保する上で、学際共同利用プログラムが必須であった。

### 4. 今後の展望

先に述べたように、不活性ブラックホール連星についてはまだ星団で形成された可能性が残っている。これの是非を明らかにするために、これまで発見されていないような不活性ブラックホール連星にどのようなものがあるかを予言しておく。可能性のあるものは2つあり、1つはブラックホールと白色矮星の連星である。もう1つはブラックホールを1つ含む3連星である。これらを予言して、将来の観測に備え、最終的には、不活性ブラックホール連星が星団で形成されたかどうかの是非を問うことになる。

## 5. 成果発表

### (1) 学術論文

- Tanikawa, A., L. Wang, and M. S. Fujii, "Compact binary formation in open star clusters - II. Difficulty of Gaia NS formation in low-mass star clusters" submitted to Open Journal of Astrophysics
- Tanikawa, A., S. Cary, M. Shikauchi, L. Wang, and M. S. Fujii, "Compact binary formation in open star clusters - I. High formation efficiency of Gaia BHs and their multiplicities", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 527, issue 2, page 4031, 01/2024
- Arimoto, M., H. Asada, M. L. Cherry, M. S. Fujii, Y. Fukazawa, A. Harada, K. Hayama, T. Hosokawa, K. Ioka, Y. Itoh, N. Kanda, K. S. Kawabata, K. Kawaguchi, N. Kawai, T. Kobayashi, K. Kohri, Y. Koshio, K. Kotake, J. Kumamoto, M. N. Machida, H. Matsufuru, T. Mihara, M. Mori, T. Morokuma, S. Mukohyama, H. Nakano, T. Narikawa, H. Negoro, A. Nishizawa, T. Ohgami, K. Omukai, T. Sakamoto, S. Sako, M. Sasada, Y. Sekiguchi, M. Serino, J. Soda, S. Sugita, K. Sumiyoshi, H. Susa, T. Suyama, H. Takahashi, K. Takahashi, T. Takiwaki, T. Tanaka, M. Tanaka, A. Tanikawa, N. Tominaga, N. Uchikata, Y. Utsumi, M. R. Vagins, K. Yamada, and M. Yoshida, "Gravitational wave physics and astronomy in the nascent era", Progress of Theoretical and Experimental Physics, vol. 2023, issue 10, page 10A103, 10/2023
- Shikauchi, M., D. Tsuna, A. Tanikawa, and N. Kawanaka, "Spatial and Binary Parameter Distributions of Black Hole Binaries in the Milky Way Detectable with Gaia", The Astrophysical Journal, vol. 953, issue 1, page 52, 08/2023
- Tanikawa, A., K. Hattori, N. Kawanaka, T. Kinugawa, M. Shikauchi, and D. Tsuna, "Search for a Black Hole Binary in Gaia DR3 Astrometric Binary Stars with Spectroscopic Data", The Astrophysical Journal, vol. 946, issue 2, page 79, 04/2023

### (2) 学会発表

- "Toward understanding of binary black hole formation", II SYNERGIES AT NEW FRONTIERS, Mar. 25 2024, Kashiwa, Japan
- "不活性コンパクト連星の探査と理論研究", ブラックホール大研究会, Feb. 29 2024, 御殿場
- "不活性コンパクト連星の探査", 2023年度連星系・変光星研究会, Feb. 17 2024, 相模原
- "Gaia DR3の不活性コンパクト連星候補の分光追観測", GAOES-RV研究会2023, Nov. 30 2023, 大岡山
- "Gaiaによる不活性コンパクト連星探査とその形成の理論研究", 初代星・初代銀河研究会2023, Nov. 21 2023, 札幌
- "不活性コンパクト連星のフォローアップ分光観測", 2023年度なゆたユーザーズミーティング, Sep. 14 2023, オンライン
- "不活性コンパクト連星のフォローアップ分光観測", 2023年度せいめいユーザーズミーティング, Sep. 12 2023, 京都
- "Double white dwarf mergers and type Ia supernovae", The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects VI, Sep. 8 2023, Palermo, Italy
- "Gaia BH formation in open star clusters", 3,2,1: Massive Triples, Binaries and Mergers 2023, Jul. 21 2023, Leuven, Belgium

(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	○	10,000	0
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。			