

散開星団でのコンパクト連星形成過程の理論研究

Theoretical study of compact binary formation in open clusters

谷川 衡

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。また、二つのブラックホールからなる連星（連星ブラックホール）の周りを明るい恒星が公転するような三重星系がどの程度形成されるのかについても調べ、その観測可能性について議論した。

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

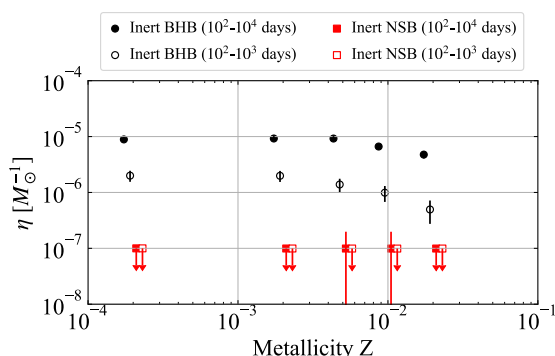


図 1

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。

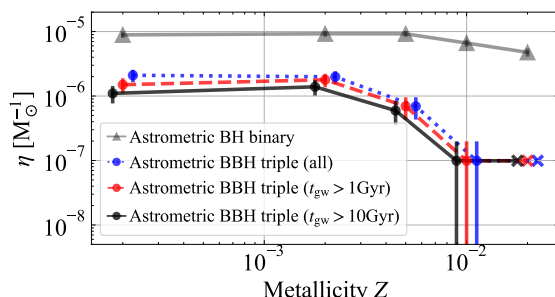


図 2

明らかとなった。もしこのような三重星が発見されれば、発見以来10年間未解明である連星ブラックホールの形成過程を解くことができる。我々の結果はこのような三重星の探査に大きな動機を与えるものとなった。

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

連星ブラックホールの周りを明るい恒星が公転する三重星は将来の重力波望遠鏡LISAの観測ターゲットである可能性がある。これらがLISAのターゲットとしてどれだけ有望であるかを調べる。

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, 23年度の成果)。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, OJAp, 7, 39)。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(図1参

さらに我々は連星ブラックホールの周りを明るい恒星が公転する三重星の形成率を調べた (Tanikawa et al. 2024,

arXiv:2407.03662, submitted to OJAp)。その結果、このような三重星は低金属量であれば、不活性ブラックホール連星の10%は存在することが明らかとなった(図2参

照)。また不活性ブラックホールが30-40個程度発見されたときには、このような三重星で検出可能なものが1個はあることが

5. 成果発表

(1) 学術論文

- Tanikawa A., Wang L., Fujii M. S., Trani A. A., Hayashi T., Suto Y. 2024, “COMPACT BINARY FORMATION IN OPEN STAR CLUSTERS III: PROBABILITY OF BINARY BLACK HOLES HIDDEN IN GAIA BLACK HOLE BINARY”, arXiv:2407.03662, submitted to The Open Journal of Astrophysics”
- Tanikawa, A., L. Wang, and M. S. Fujii 2024, “Compact binary formation in open star clusters - II. Difficulty of Gaia NS formation in low-mass star clusters” The Open Journal of Astrophysics, 7, 39
- Tanikawa A. 2024, “Contribution of population III stars to merging binary black holes”, Reviews of Modern Plasma Physics, 8, 13

(2) 学会発表

- “Inert compact binary formation in open clusters”, MODEST-24, Aug. 22 2024, Warsaw, Poland
- “位置天文衛星Gaiaによるコンパクト天体探索とその形成過程の理論研究”, 第 37 回理論懇シンポジウム, Dec. 24 2024, 三鷹
- “散開星団におけるGaia BH・Gaia NSの力学的捕獲による形成”, YITP Workshop “Exploring Extreme Transients: Emerging Frontier and Challenges”, Aug. 6 2024, 京都
- “Search for Gaia BH/NS and theoretical study of their formation process”, Aug. 5 2024, 三鷹

(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	移行*	追加配分
Cygnus				
Pegasus	○	2500		
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。 ※バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				