

低質量星団内におけるブラックホール連星形成と 重力波放射可能性

熊本 淳
東京大学

1. まえがき

本稿では平成 30 年度（後期）若手・女性利用課題へ採択された「低質量星団内におけるブラックホール連星形成と重力波放射」の成果報告を行う。また、本稿の内容は Monthly Notices of the Royal Astronomical Society にて発表した論文[1]の概要である。

2. はじめに

2. 1. ブラックホール連星の合体による重力波の検出

2016 年 2 月、LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) による初の重力波直接検出が発表[2]された。この検出された重力波は地球から 13 億光年離れた 2 個のブラックホール同士の衝突合体により放出したものであると推定された。さらに、合体したブラックホールの質量は、それぞれ太陽質量の約 36 倍、約 29 倍と推定された。

その後も重力波の検出は続き、2015 年と 2017 年に行われた観測から 11 件のブラックホール同士の合体と思われる重力波が検出された。表 1 にこれらの観測結果を示す。表 1 から明らかなように、これらの観測結果は数十太陽質量のブラックホール連星が多数存在することを示唆するものであり、なぜこのような大質量のブラックホール連星が多く存在するのかという疑問を引き起こした。また、2019 年現在も重力波の観測が行われており、ブラックホールの合体起源と思われる重力波も多く検出されており、これらの観測を説明するような理論モデルを考えることが

表 1：重力波検出から推定されるブラックホール連星の合体イベントの概要

イベント名	ブラックホール 1 の 質量[太陽質量]	ブラックホール 2 の 質量[太陽質量]	距離[Mpc]
GW150914	35.6	28.6	430
GW151012	23.3	15.2	1060
GW151226	13.7	8.9	440
GW170104	31.0	21.5	960
GW170608	10.9	7.9	320
GW170729	50.6	35.7	2750
GW170809	35.2	25.0	990
GW170814	30.7	24.2	580
GW170817	1.46	1.27	40
GW170818	35.5	26.8	1020
GW170823	39.6	29.4	1850

極めて重要である。

2. 2. ブラックホール連星の形成過程

重力波を放出して合体するようなブラックホール連星の形成過程は主に2つの有力なシナリオが提案されている。1つは大質量星同士の連星が進化する際に、質量転移を起こし軌道が縮んだ結果として、軌道長半径の小さいブラックホール連星が形成されると考えられている[3, 4]。もう1つのシナリオは、星団の高密度なコア内で複数の星が力学相互作用を行うことで、軌道長半径の小さいブラックホール連星が形成されるというものである[5]。今回は後者の星団内で形成されるブラックホール連星に着目する。

星団内におけるブラックホール連星の形成過程では、球状星団(10^5 – 10^6 太陽質量)が重力波を放出するような軌道長半径の小さいブラックホール連星の形成の場となると考えられてきた。その理由には、ブラックホールになるような大質量星が多く存在すること、重力ポテンシャルが深く、ブラックホールが星団内に留まり易いことなどが挙げられる。一方、散開星団(10^3 – 10^4 太陽質量)では、形成されるブラックホールの数も限られており、重力ポテンシャルも浅いことから、合体して重力波を放出するようなブラックホール連星の形成は難しいと考えられてきた。

しかしながら、星団の数は球状星団よりも散開星団の方が数多く形成されている[6]。そのため、個々の星団で形成されるブラックホール連星は少なくとも、全体としては有力なブラックホール連星形成の場になりうる。そこで、我々は重力波源天体であるブラックホール連星の起源として散開星団内でのブラックホール連星の形成に着目し、重力多体シミュレーションを用いて、ブラックホール連星の特徴を解明するための研究を行った。

3. シミュレーションの方法と星団モデル

今回の計算では星団を数千から数万個の星からなる重力多体系として扱う。星団は初期に高密度であるため、このような重力多体系の力学進化の計算にはスーパーコンピューター等の計算機が必要なる。また、それぞれの星の進化に伴う半径の変化や質量放出等の非線形な物理過程が複雑に絡み合う。そのため計算機を用いた数値シミュレーションによる研究が必要不可欠となる。また、ひとつの星団モデル内で形成されるブラックホール連星は数個程度と予想される。さらに、そのうち重力波放射し得るブラックホール連星は数十個に1個程度である。重力波放射について統計的に議論を行うためには複数の星団について計算を行う必要がある。そのため、重力N体シミュレーションコードNBODY6++GPU[7]を用いて、Reedbush-Lにて計算を行った。以下に今回の計算についての要点をまとめる。

3. 1. 初期条件

表2に今回用いた星団モデルの初期条件について、主なパラメータをまとめる。2500太陽質量、10000太陽質量の2モデル(model A, model B)の星団についてその進化を調べた。初期条件として、星団を構成する星は0.08から150太陽質量の主系列星(0.1太陽金属量)とし、質量分布はKroupaの初期質量関数[8]に従うように乱数で与えた。図1はKroupaの初期質量関数を示す。この条件の時、期待される星の平均質量は0.586太陽質量である。

表 2 : シミュレーションモデル

	星団質量 [太陽質量]	初期粒子数 N_{ini}	ラン数	r_p [pc]	コア崩壊時間 t_{cc} [Myr]
Model A	2500	4266	360	0.24	0.7
Model B	10000	17064	90	0.38	2

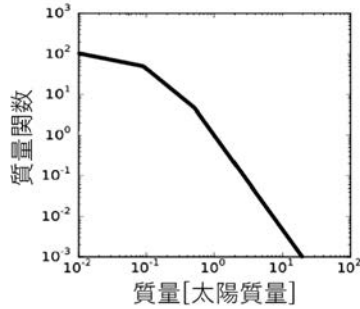


図 1 : Kroupa の初期質量関数

星団の密度分布 $\rho(r)$ は Plummer model;

$$\rho(r) \propto \left(1 + \frac{r^2}{r_p^2}\right)^{-5/2}$$

を採用した。ここで, r および r_p は星団中心からの半径およびスケール半径である。スケール半径については, 星団の全質量の半分が含まれる半径 (Half-Mass Radius) 内の平均密度が

$$\rho_{hm} = 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$$

となるように決定した。

星団が重力崩壊を起こし中心部で高密度なコアを作るまでの時間であるコア崩壊時間 t_{cc} は以下の式で表される。

$$t_{cc} = \frac{3.3 \times N_{ini}}{(G\rho_{hm})^{1/2} \log(0.4N_{ini})}$$

高密度なコアが形成されるとコア内では三体相互作用により連星形成が起こる。

3. 2. シミュレーションコード

重力 N 体シミュレーションコード NBODY6++GPU [7]を用いて, 星団進化のシミュレーションを行った。NBODY6++GPU は星団計算用の重力多体計算コード NBODY6 を並列計算機, GPU 計算機対応にアップデートしたもので, より高速に計算ができる。また, 重力多体計算に加えて, 星の進化ライブラリや連星計算が可能なパッケージが含まれており, 星団に関する先行研究でも多く使用されている。

3. 3. 星の進化

星の進化モデル [8]を用いることで, 初期質量, 金属量に応じた質量放出や恒星進化等の計算も行った。図 2 は初期の恒星質量と損後に形成されるブラックホール質量の関係を示す。このよ

うなシミュレーションを複数モデル計算することで、ブラックホール連星の形成過程を調べた。類似の先行研究では球状星団に着目したものが大多数である(例:[5],[9])。散開星団に着目した先行研究も存在するが初期から連星を加え、その後の連星進化を調べている(例:[10])。我々の研究の特色は散開星団に着目し、連星形成過程から調べた点である。

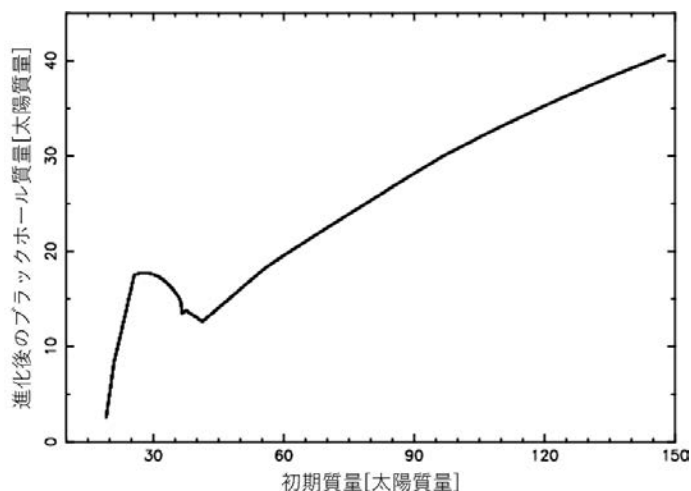


図2：恒星の初期質量と進化後に形成されるブラックホール質量の関係

4. ブラックホール連星の合体時間

シミュレーションの結果、散開星団程度の質量でもブラックホール連星が形成されることを発見した。このようなブラックホール連星が実際に観測で発見されているような重力波を放出するか調べる必要がある。ブラックホール連星は重力波放出しながら少しずつ軌道を縮めていき最終的に合体する。観測で見つかるような重力波はこの合体の時に放出されるものである。ある連星が合体するまでの時間は以下の式で表される。

$$t_{GW} \sim 1.2 \times 10^4 \left[\frac{M_1}{30M_{\odot}} \right]^{-3} \left[\frac{a}{1\text{AU}} \right]^4 \frac{g(e)}{q(1+q)} \text{Gyr},$$

$$g(e) \equiv \frac{(1-e^2)^{3.5}}{1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4}$$

ここで、 a と e はそれぞれ連星の軌道長半径と軌道離心率を表す。 M_1 は連星を構成する星のうち重い方の星の質量を表し、 q は M_1 に対する軽い星の質量比である。

上記の式から得られる時間が宇宙年齢よりも短くなければ、現在の観測で重力波として検出されない。ここではシミュレーションで形成されたブラックホール連星について合体までの時間を調べ、100億年以内に合体するようなブラックホール連星の数を調べた。表3は今回の結果と、より重い星団について計算した先行研究[11]の結果を示す。今回のシミュレーションでは、質量の異なる二つのモデルともに300個以上のブラックホール連星が形成された。そのうち、model Aでは36個、model Bでは15個のブラックホール連星が100億年以内に合体するようなブラックホール連星であった。一方、 6×10^5 太陽質量の星団については、65-81個のブラックホール連星が100億年以内に合体することが先行研究から示唆されている。今回の結果は合体して重力波を放出するようなブラックホール連星が 10^3 から 10^4 太陽質量の散開星団程度の質量の星団でも

形成され、その割合は球状星団程度の質量を持った星団の数10%に相当し、重力波を放出するブラックホール連星合体の起源として散開星団も無視できないことを意味する。

表 3 : シミュレーション内で形成されたブラックホール連星の数

	モデル A	モデル B	先行研究[11]
1 星団の質量[太陽質量]	2.5×10^3	1.0×10^4	6×10^5
総質量 9×10^5 太陽質量当たりの ブラックホール連星数	323	335	182 - 210
総質量 9×10^5 太陽質量当たりの 100 億年以内に合体するブラックホール連星数	36	15	65 - 81
星団1 太陽質量当たりの100 億年以内に 合体するブラックホール連星数 $[M_{\odot}^{-1}]$	4.0×10^{-5}	1.7×10^{-5}	$7.2 - 9.2 \times 10^{-5}$

5. 散開星団内での連星形成過程

今回の結果は、従来の想定以上のブラックホール連星が散開星団で形成されることを示した。その後の解析により、散開星団では球状星団とは異なる形成過程でブラックホール連星を形成していることを発見した。

図3は球状星団と散開星団でのブラックホール連星形成過程の違いを示す。100 太陽質量の星がブラックホールに進化する時間が約 3Myr であるのに対して、今回用いた星団では、コア崩壊時間がより短いものになっている (表 2 参照)。また、質量が重い星団ほどコア崩壊時間は長くなる傾向にあり、球状星団ではコア崩壊時間がブラックホール形成時間よりも長くなる。その結果として、球状星団(図3 上段) ではブラックホールが形成された後に、星団のコア崩壊が起こる。その後、高密度なコア内での三体相互作用により、連星の形成進化が起こる。一方、散開星団(図3 下段) では大質量星がブラックホールへ進化する前にコア崩壊が起こる。その結果、大質量星がブラックホールへ進化する前に連星を形成する。この大質量星連星が進化する時に common-envelope を経てコンパクトなブラックホール連星を形成する。

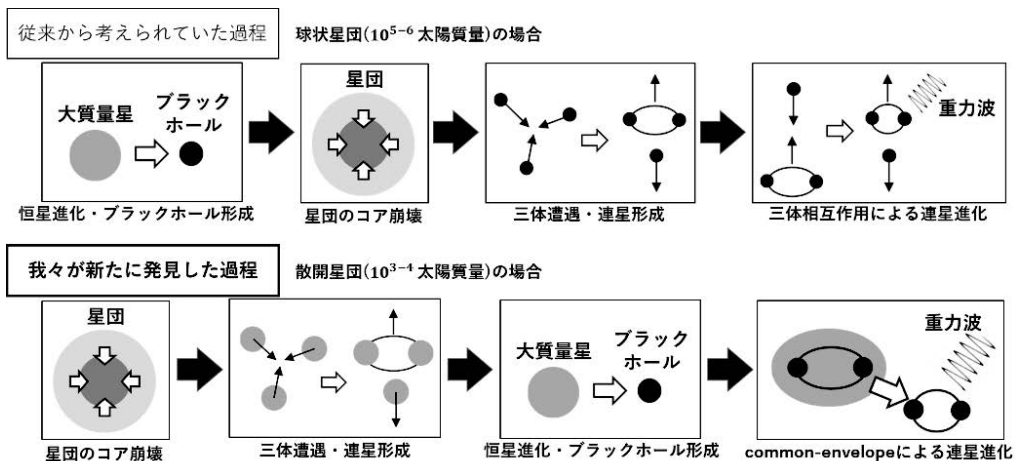


図 3 : 球状星団と散開星団でのブラックホール連星形成過程の違い

6. まとめ

2500, 10000 太陽質量の星団について N 体シミュレーションを行い, ブラックホール連星形成とその合体可能性について調べた。ブラックホール連星の有力な形成シナリオのひとつでは, 球状星団が有望なブラックホール連星の形成領域であると考えられてきた一方で, 散開星団については, 球状星団と比較して重力ポテンシャルが浅く, 合体するようなブラックホール連星の形成は難しいと考えられていた。しかしながら, 我々は散開星団におけるブラックホール連星形成の新しいメカニズムを発見した。散開星団では, コア崩壊時間が球状星団よりも短いため, 大量の主系列星がブラックホールに進化する前に連星を形成する可能性がある。これらの連星は, mass transfer を経験し, ハードなブラックホール連星に進化する。我々のシミュレーションから得られた単位質量 (太陽質量) あたりのブラックホール連星の合体数は, 球状星団のその 20-50% に達する。これは, 散開星団がブラックホール連星の主要な形成領域のひとつとなり得ることを示唆する結果である。

参考文献

- [1] Kumamoto J., Fujii M. S., Tanikawa A., 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 486, 3942
- [2] Abbott B. P., et al., 2016, Physical Review Letters, 116, 241103
- [3] Kinugawa T., Inayoshi K., Hotokezaka K., Nakauchi D., Nakamura T., 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 442, 2963
- [4] Belczynski K., Holz D. E., Bulik T., O’Shaughnessy R., 2016, Nature, 534, 512
- [5] Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., 2000, Astrophysical Journal, 528, L17
- [6] Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gieles M., 2010, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 48, 431
- [7] Wang L., Spurzem R., Aarseth S., Nitadori K., Berczik P., Kouwenhoven M. B. N., Naab T., 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 450, 4070
- [8] Kroupa P., 2001, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 322, 231
- [9] Fujii M. S., Tanikawa A., Makino J., 2017, Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 94
- [10] Ziosi B. M., Mapelli M., Branchesi M., Tormen G., 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 441, 3703
- [11] Rodriguez C. L., Chatterjee S., Rasio F. A., 2016, Physical Review, 93, 084029