

低質量星団におけるブラックホール連星形成とその金属量依存性

熊本 淳
東京大学

1. まえがき

本稿では平成 31 年度（後期）若手・女性利用課題へ採択された「低質量星団におけるブラックホール連星形成とその金属量依存性」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成功したと発表された[2]。この検出された重力波の波形を解析した結果、ブラックホール同士の合体起源の重力波であると推定された。また、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。

その後も世界的な重力波の観測プロジェクトは継続され、複数のブラックホール連星の合体イベントを起源とすると考えられる重力波が検出された。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結果であった。これらの結果は、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。現在も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ブラックホール連星に進化するシナリオである。若くて重い主系列星の多くが連星として観測されていることから、多くの主系列星は生まれながらにして連星として形成されると考えられることがしばしばある。このような連星について、特に重い大質量星連星が進化する際に、common-envelope を起こし軌道が縮むことがある。この効果の結果として、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、星の高密度な領域で複数の星が力学相互作用を行うことで連星が形成されるシナリオである。特に高密度な星団のコア内には大質量星から進化したブラックホールが多く存在する。これらのブラックホール同士が力学相互作用を繰り返すことにより、軌道長半径の小さいブラックホール連星が形成される[5]。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、我々はこれまでの研究で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 [7]。その結果、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 1 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 300 万年であるのに対して、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。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 1 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 1 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。このことから、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。

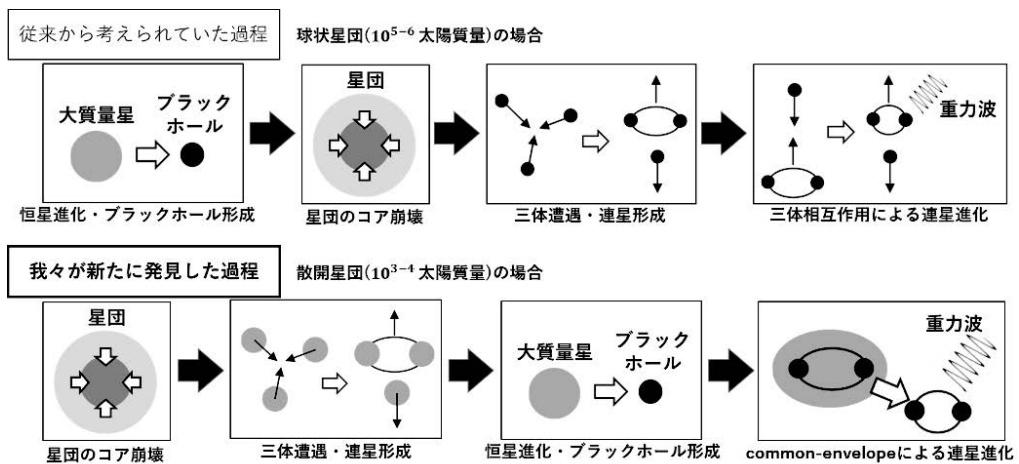


図 1 : 球状星団と散開星団でのブラックホール連星形成過程の違い

球状星団の大部分が 120 億年以上前に形成されたと考えられるのに対し、散開星団はあらゆる時代に形成されることが期待される。一方で、金属量が大きい星団では恒星風の影響で大質量ブラックホールの形成が難しく、連星ブラックホールの合体率が小さくなる。そこで我々は、近傍での散開星団起源の連星ブラックホール合体の合体率を求めるために、金属量が異なる星団について、星団の進化を計算した。本研究では散開星団程度の星団について 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 太陽金属量のモデルについて計算を行った。これらの計算結果から、各金属量の星団が形成される典

型的な宇宙年齢における星形成率密度を考慮し、近傍での連星ブラックホールの合体率密度を推定する。

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り、このような重力多体系の力学進化の計算には多くの計算コストが必要なる。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。また、連星進化と星団全体の進化ではタイムスケールが大きく異なる。これらの物理を同時に計算するために、大規模な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。

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[8]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1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 太陽質量の星団について金属量の異なる4つのモデルについて計算を行った。

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とし、質量分布は Kroupa の初期質量関数[9]に従うように乱数で与えた。図2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1：シミュレーションモデル

	星団質量 [太陽質量]	金属量 [太陽金属量]	ラン数
Model A	2500	0.1	360
Model B	2500	0.025	500
Model C	2500	0.5	1000
Model D	2500	1	1000

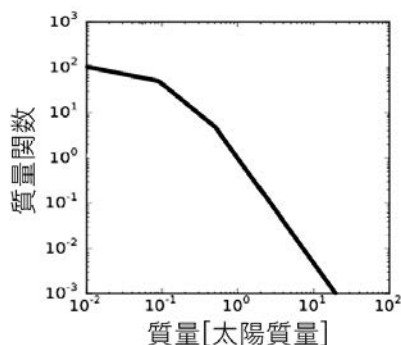


図2：Kroupaの初期質量関数

星団のモデルとしてPlummer modelを採用した。このモデルの密度分布 $\rho(r)$ は以下の式で与えられる。

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

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。本研究ではスケール半径は、0.31pcとした。この時、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。

3. 2. N体シミュレーション

重力N体シミュレーションコードNBODY6++GPU[8]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。

個々の星の運動については4次のエルミート法を用いて計算する。今回のシミュレーションでは、初期に連星は存在しないが星の重力三体相互作用により連星を形成する。これらの連星の運動を計算するためのタイムステップは星団全体の計算のためのタイムステップよりもかなり短くなってしまふ。そこで、連星の軌道計算のためにKS法と呼ばれる方法が本シミュレーションコードには実装されている。

3. 3. 星の進化

今回用いたシミュレーションコードには星の進化モデル[9]が実装されている。このモデルでは、初期質量、金属量の関数として恒星の質量や半径の時間進化を計算する。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。Z=0.02が太陽金属量に相当する。金属量が大きいモデルでは恒星が進化する時に星風によって多くの質量が失われる。そのため、最終的に形成されるブラックホールの質量は小さくなる。

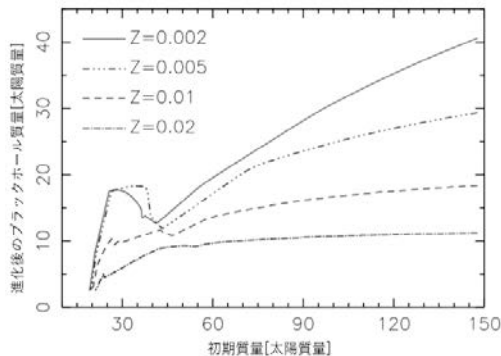


図2：各金属量における恒星の初期質量と進化後に形成されるブラックホール質量の関係。

$Z=0.02$ が 1 太陽金属量に相当する。

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], [10])。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: [11])。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。

4. ブラックホール連星形成

シミュレーションの結果、各金属量の散開星団モデルでブラックホール連星が形成された。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星の質量を表し、 q は連星を構成する2つの星の質量比である。

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内で形成された各ブラックホール連星について合体までの時間を調べ、140億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2は今回のシミュレーションの結果から得られたブラックホール連星の数と、それらの連星の中でも140億年以内に合体する連星の数を示す。

表2: 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

	ラン数	ブラックホール連星数	140億年以内に合体する ブラックホール連星数
Model A	360	338	37
Model B	500	487	17
Model C	1000	988	32
Model D	1000	877	7

各モデルで金属量の違いはあるが、いずれのモデルでもひとつの星団当たり約1個のブラックホール連星が形成されていることがわかる。しかし、宇宙年齢以内に合体するようなブラックホール連星の数はモデルによって顕著な差が見られた。金属量が大きいモデルほど星団ひとつあたりに得られるブラックホール連星数は少ないという結果が得られた。この結果は、質量が大きいブラックホールを含む連星ほど合体時間が短くなるという傾向が反映された結果であると考えられる。

5. 近傍宇宙におけるブラックホール連星の合体率密度

上述の結果から各金属量の星団一つ当たりによりの程度のブラックホール連星が形成され、現在のどのくらいの割合で重力波が検出されるか見積もることができる。近傍宇宙におけるブラックホール連星の合体率密度を計算するためには、これらの結果に加え、それぞれの金属量の星団がいつどのくらい形成されるかの情報を加味して計算する必要がある。一般的な傾向としては、昔の宇宙ほど金属量の小さい星団がより多く形成される。

本研究では、各金属量の星団が形成される星形成率密度として、銀河の観測から示唆される結果[12]を用いた。その結果としてブラックホール連星の近傍での合体率密度は約 $70 \text{ yr}^{-1}\text{Gpc}^{-3}$ と推測された。この値は、これまでの重力波の観測から示唆される値とよく一致する[13]。

さらに、連星の主星質量ごとの合体率密度を推定した。図3のヒストグラムは我々のシミュレーションから予想される連星ブラックホールの合体率密度を表す。この結果は重力波の観測から予期される結果とよく一致していることがわかる。

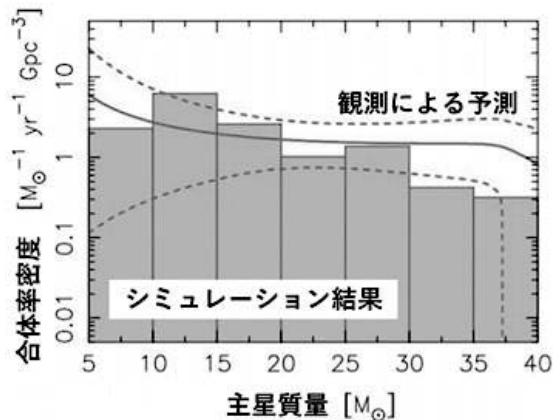


図3：連星ブラックホールの近傍での合体率密度の主星質量依存性
シミュレーション結果(ヒストグラム)と観測による予測
(実線:平均値, 破線:90%信頼区間の両端)の比較。

6. まとめ

近傍での散開星団起源の連星ブラックホール合体の合体率を求めるために、金属量が異なる星団について、重力N体シミュレーションコードNBODY6++GPUを用いて、Kroupaの初期質量関数に従う0.08から150太陽質量の主系列星からなる星団の進化を計算した。本研究では散開星団程度の星団について0.1, 0.25, 0.5, 1.0太陽金属量のモデルについて計算を行った。さらに、銀河の金属量進化史を考慮することで、近傍での合体率への寄与を推定した。その結果、散開星団起源の連星ブラックホールの近傍での合体率密度は約 $70 \text{ yr}^{-1}\text{Gpc}^{-3}$ と推測され、重力波の観測から示唆される連星ブラックホール合体率密度とよく一致することが分かった。

参 考 文 献

- [1] Kumamoto J., Fujii M. S., Tanikawa A., 2020, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 495, 4268
- [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] Kumamoto J., Fujii M. S., Tanikawa A., 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 486, 3942
- [8] 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
- [9] Kroupa P., 2001, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 322, 231
- [10] Fujii M. S., Tanikawa A., Makino J., 2017, Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 94
- [11] Ziosi B. M., Mapelli M., Branchesi M., Tormen G., 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 441, 3703
- [12] Chruslinska M., Nelemans G., 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 488, 5300
- [13] Abbott B. P., et al., 2019, Astrophysical Journal, 882, L24