

散開星団起源ブラックホール連星の形成と特徴

熊本 淳

東京大学理学系研究科

1. はじめに

近年、LIGO と Virgo による重力波イベントの検出が続いている[1]。これまでに検出された連星ブラックホールの合体イベントにより、近傍宇宙における連星ブラックホールの合体率や質量分布等が推定されている。さらに、連星ブラックホールの観測から得られるパラメータの一つに有効スピンパラメータ χ_{eff} がある。連星ブラックホールの有効スピンパラメータの分布についても推定が行われており、 $\chi_{\text{eff}} \sim 0$ 付近に小さな正負の値を持って分布していることが予想されている。このようなスピン分布の理解が連星ブラックホールの起源を考える上で重要な要素の一つとなる。

我々はこれまでの研究において、散開星団における連星ブラックホール形成について研究を行って来た。金属量が異なる散開星団について、重力 N 体シミュレーションコード NBODY6++GPU[2] を用いて計算を行い、散開星団内における連星ブラックホールの形成過程について調べてきた。今回は、4つの異なる金属度を持つ散開星団について重力 N 体シミュレーションを行い、それぞれの星団で形成される連星ブラックホールの前駆体について、金属量に依存した恒星の質量損失・スピン損失を仮定し、スピン進化を計算した。

2. シミュレーションの方法と星団モデル

本研究では数千個の星からなる星団を重力多体系として扱うシミュレーションを行う。本研究で扱う星団は高密度であり、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ため、多くの計算コストが必要となる。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ため、これらの過程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。そこで、重力 N 体シミュレーションコード NBODY6++GPU[2] を用いて、Reedbush-L にて計算を行った。

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。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う。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。

2. 1. 初期条件

本研究で扱う星団の初期条件として、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。また、星団を構成する各星の初期質量は0.08から150太陽質量として、質量分布はKroupaの初期質量関数[3]に従うように乱数で与えた。

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。

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

2. 2. 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。 $Z=0.02$ 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。

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:[4],[5])。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:[6])。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。

3. スピン進化

N 体シミュレーションの結果形成された連星ブラックホールについてスピン進化の計算を行う。本研究ではスピンを形成する要因として common envelope 後の Wolf-Rayet 星が伴星からの潮汐力によってスピニアップする過程を考える[7]。この過程の概念図を図1に示す。

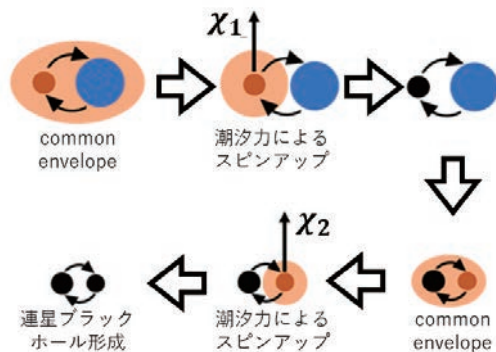


図1：連星進化過程における星のスピニアップの概念図

伴星からの潮汐力によるスピニアップによって得られる各星のスピン χ_1, χ_2 は以下の式によつ

て計算する。

$$\frac{d\chi_{1,2}}{dt} = \frac{\chi_{syn} - \chi_{1,2}}{t_{syn}} - \frac{\chi_{1,2}}{t_w}$$

ここで、 t_{syn}, t_w はそれぞれスピナップのタイムスケールと質量損失のタイムスケールである。また、完全にスピナップした時のスピパラメータが χ_{syn} である。これらのパラメータは以下の式で与えられる。

$$t_{syn} \sim 10q^{-\frac{1}{8}} \left(\frac{1+q}{2q}\right)^{\frac{31}{24}} \left(\frac{t_c}{1\text{Gyr}}\right)^{\frac{17}{8}} \text{ Myr}$$

$$\chi_{syn} \sim 0.5q^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1+q}{2}\right)^{\frac{1}{8}} \left(\frac{\epsilon}{0.075}\right) \left(\frac{R_{2,1}}{R_{sun}}\right)^2 \left(\frac{m_{2,1}}{30M_{sun}}\right)^{\frac{13}{8}} \left(\frac{t_c}{1\text{Gyr}}\right)^{-\frac{3}{8}}$$

$$t_w \propto Z^{-0.86}$$

ここで、 q, t_c は連星を構成する星の質量比と連星の合体時間であり、 R_*, m_* は連星を構成する各星の半径と質量である。

4. 結果

シミュレーションで形成された連星について、スピパラメータを計算した結果、軌道長半径の小さい連星は、伴星からの強い潮汐力によって、より大きな有効スピンを持つ連星ブラックホールに進化することがわかった。図2は各金属量のモデルについて得られた連星ブラックホールの有効スピンの累積規分布を示す。

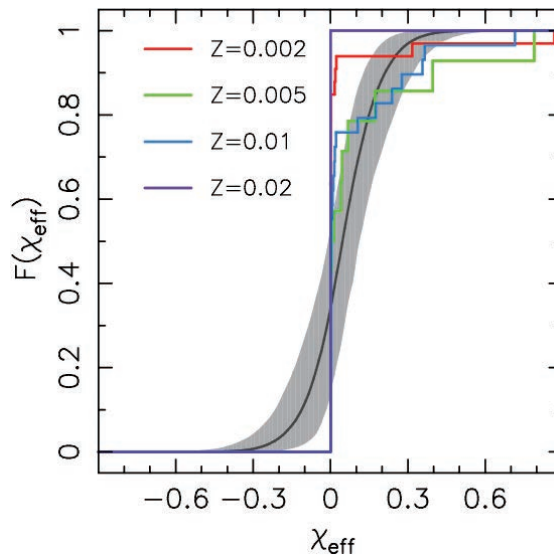


図2：各金属量のモデルについて得られた連星ブラックホールの有効スピンの累積規分布

これらの結果は、ブラックホールやその前駆体が伴星からの潮汐力以外にスピン角運動量を得ていなくても、合体する BBH の約 16% は有効スピンの 0.1 以上になることを意味する。Wolf-Rayet 星が common envelope の直後には、無次元のスピン分布が平坦で等方的であると仮定すると、合体する BBH の有効スピン分布は、LIGO や Virgo による重力波観測から推測されるものと似ていることを発見した。

参 考 文 献

- [1] Abbott R., et al., 2021 Physical Review X, 11, 2
- [2] 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
- [3] Kroupa P., 2001, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 322, 231
- [4] Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., 2000, Astrophysical Journal, 528, L17
- [5] Fujii M. S., Tanikawa A., Makino J., 2017, Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 94
- [6] Ziosi B. M., Mapelli M., Branchesi M., Tormen G., 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 441, 3703
- [7] Piran Z., Piran T., 2020, Astrophysical Journal, Volume 892, 64