

# First cluster におけるブラックホール連星の形成

藤井 通子

東京大学大学院理学系研究科

## 1. ブラックホール連星合体と大質量星

2016年にブラックホール連星合体による重力波が初めて検出されて以来、これまでに重力波観測によって数十個のブラックホール連星合体が観測的に確かめられてきた。[1]2019年の長期観測の結果は、現在、徐々に公開されており、ブラックホール連星の質量や質量比の分布といったデータが蓄積されてきている。今後も、長期間の重力波観測が計画されており、数多くのブラックホール連星のデータから、近い将来、ブラックホール連星の分布について統計的な議論が可能となっていくであろう。

ブラックホール連星の分布（質量、質量比、離心率、頻度）は、ブラックホール連星の起源を明らかにするための重要な手がかりである。ブラックホールは太陽の数十倍以上の質量を持つ大質量星が進化した最後に残される天体であると考えられている。どの程度の初期質量を持つ恒星がブラックホールになるのかは、星の金属量（星の元素組成のうち、金属が占める割合で、ここでいう金属はリチウムよりも重い元素全てを指す）や、連星による質量降着といった様々な要因に左右されると考えられているが、その過程についても、未だわかっていないことは多い。

最初に重力波によって検出されたブラックホール連星合体では、ブラックホールの質量が太陽の30倍程度と、これまで知られていた恒星質量ブラックホールの質量（太陽の10倍程度）よりはるかに重かった。その後、太陽の50倍程度の質量を持つブラックホールも検出された。それまでの標準的な恒星進化モデルでは、太陽の30倍以上の質量を持つブラックホールは形成しないと考えられていたため、重力波によるブラックホール連星の検出後、恒星進化モデルは大幅に変更されてきた。このように、重力波の観測は、それまで存在が知られていなかった太陽の数十倍の質量を持つブラックホールがこの宇宙に普遍的に存在していることを明らかにし、我々はその理由を説明できる理論モデルを考えなくてはならなくなった。

30太陽質量を超える恒星質量ブラックホールの形成には、ブラックホールに進化する前の恒星の段階において大質量の星が生まれること、また、その後の恒星の進化において、その恒星があまり質量を失わないことが必要となる。そのためには、星の金属量が重要なファクターとなる。恒星が生まれる時の、個々の質量の分布（初期質量関数）は、星の材料となる星間ガスの金属量に依存していると考えられている。金属は、星の中での元素合成によって生成されていくため、宇宙初期に生まれた星ほど、恒星の金属量低い。現在、私たちが直接観測できる近傍の宇宙で典型的な金属量の場合の初期質量関数は、様々な観測から確かめられているが、まだ宇宙初期で、金属がほとんどない環境で形成する星の初期質量関数は、私たちが近傍で観測する質量関数とは大きく異なり、大質量星の割合が非常に高いと考えられている。大質量星がブラックホールに進化するため、大質量星の分布は、ブラックホール連星合体を考える上で、非常に重要な要素となる。また、金属量が大きいほど、星は、主系列星として輝いている間に、星風によってその質量を失う。つまり、金属量が大きい星ほど、初期の質量に対し、最後に残るブラックホール質量は小さい。このように、宇宙初期に生まれた星から進化したブラックホール連星があれば、それらは、観測

されている重いブラックホール連星合体の起源を説明できるかもしれない。

## 2. 連星進化と星団

ブラックホール連星の形成・進化過程は、主に次の二つが考えられている。1つ目は、初めから近接した連星として形成した二つの大質量星が、質量降着や common envelope と呼ばれる星の外層の共有を経て、より近接した軌道へと進化した後、ブラックホールへと進化してできる形成過程である。太陽近傍の星の観測から、大質量星は連星である割合が高く、大質量星どうしの連星である割合が高い。そのため、大質量星は連星として生まれることが多いと考えられている。そのため、連星として生まれる大質量星は、合体するブラックホール連星の起源の有力な候補である。

大質量星もう一つは、星団（図1）と呼ばれる、星が密集した領域で形成した連星が、周囲の星との重力的な相互作用により、周りの星に運動エネルギーを与えることで連星間距離を縮める力学的な進化である。連星間の距離が十分小さくなると、重力波によってさらに連星間距離が短くなり、最終的に合体する。合体するまでにかかる時間は、連星の軌道長半径の他、質量、離心率によって決まり、多くのブラックホール連星の合体時間は宇宙年齢より長いため未だ合体していないが、一部のブラックホール連星は宇宙年齢以内に合体し、その重力波が検出される。



図1：実際の星団（M80）。

球状星団と呼ばれる  $10^6$  個以上の星からなる星団。年齢は 100 億年程度で、大質量星はすでにブラックホールに進化していると考えられている。NASA, The Hubble Heritage Team, STScI, AURA

現在、近傍の銀河で見られる星団の星の質量関数は、太陽近傍で観測されている星の質量関数とほぼ同じだと考えられている。その質量関数は大質量側では「べき乗」分布であり、そのべきは-2.3程度である。そのため、大質量の星ほど数が少なく、これらの星団で形成されるブラックホール連星の数は限られている。さらに、30太陽質量を超えるようなブラックホールは1つの恒星からは生まれえない。しかし、先に述べたように、宇宙初期の低金属量の星では、現在より大質量星の多い質量関数であると考えられており、また、恒星の進化過程における質量損失も少ないため、現在形成している星よりも多くの割合がブラックホールになると考えられる。その場合、ブラックホール連星の合体効率も現在の星団で見積もられるよりも高いと予想される。

そこで、本研究では、金属量の非常に少ない宇宙最初期に生まれた星「first star」によってできた星団「first cluster」で形成されるブラックホール連星の形成効率や質量分布、質量比の分布を星団進化シミュレーションによって明らかにすることを目的とする。

### 3. モデル・シミュレーションコード

本研究で用いる星団の星の空間分布のモデルには、Plummer モデルを用いた。Plummer モデルは球対称・力学平衡の分布で、星団シミュレーションの初期条件として標準的に用いられている。星団のシミュレーションでは、初期に力学平衡であった分布でも、星同士が重力相互作用によって初期の軌道からずれていくことで、星団中心の密度が上昇していくコアコラプスが起る。コアコラプスにかかる時間は質量関数、特に重い星の質量に依存する。重い星ほど、より軽い星に自身の運動エネルギーを与えることで星団中心に沈む時間が短く、コアコラプスを加速させる。

星団の質量関数は、通常の質量関数との比較を行うため、-2.35乗のべき分布とし、星の最大・最小質量はそれぞれ太陽の100倍、0.1倍とした。星の数は4万個とした。星団の初期の粒子分布の生成には、AMUSEを用いた(<https://amusecode.github.io/>) [2]。AMUSEは天文学のシミュレーションに必要なコードをPythonから呼び出し、既存の複数のコードを自由に組み合わせることができるアプリケーションである。AMUSEを用い、Plummerモデルの粒子分布を生成した。また、今回のシミュレーションでは、星の軌道を積分しつつ、星の進化(=質量や半径の変化)も同時に計算するのではなく、大質量星が進化し終わり、ブラックホールになった時点まで、星の質量を進化させ、その時点での星の質量分布(図2)を初期条件とした用いた。星の進化(質量の変化)を入れて星団シミュレーションを行った場合、計算初期に大質量星からの質量損失が起り、星団がいったん膨張するが、それが終わると、星団はその時点での力学平衡状態に落ち着き、その後の力学進化が進む。後者の方が期間としては圧倒的に長く、ブラックホール連星の力学的進化もこの期間に起るため、本研究では、大質量星がブラックホールに進化した状態を初期条件として採用する。

星の金属量( $Z$ )は $2 \times 10^{-6}$ とした。これは、太陽の金属量( $Z=0.01$ 程度)や球状星団の典型的な金属量( $Z=10^{-4}$ 程度)と比べて非常に低い。このような低金属量の星の進化のモデルとしてKinugawa et al. (2014) [3]のモデルを用いた。古くから用いられてきた星の進化モデル(Hurley et al. 2000) [4]に従って得られたブラックホールの質量関数と、本研究で用いるKinugawa et al. (2014)の超低金属量モデルで得られたブラックホールの質量関数(First clusterモデル)は図2の通りである。

また、本研究では、比較のため、金属量が球状星団程度( $Z=10^{-4}$ )の場合のブラックホール質

量分布の場合の計算も行った（球状星団モデル）。このモデルは、様々な星団進化シミュレーションモデルの比較を行うプロジェクト MIDAS (<https://github.com/astro-midas>) のために用意された共通の初期条件である。

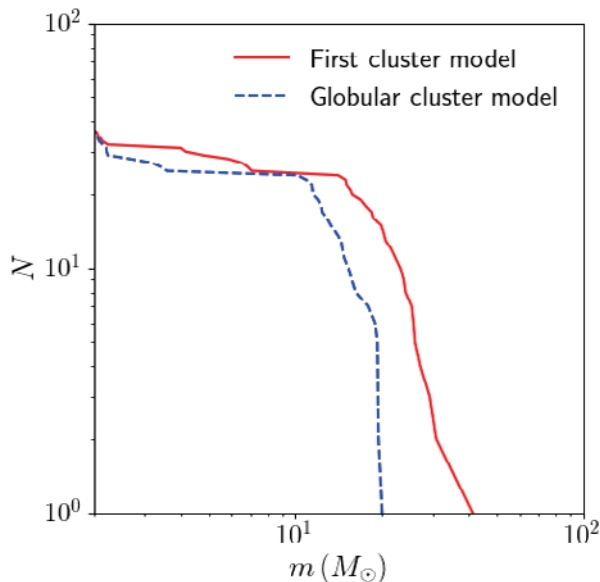


図 2 : 星団内のブラックホールの質量関数。  
赤実線 : First cluster モデル、青破線 : 球状星団モデル。

本研究課題では、GPU を用いて重力計算を高速化した重力多体問題用コード「NBODY6++GPU」[5]を用いた。NBODY6++GPU は、星団のような高密度かつ連星を含む恒星系のシミュレーション向けの重力多体問題（N 体問題）用コード「NBODY6」の GPU 拡張版であり、オープンソースであるため、世界中で利用されている。

球状星団の年齢は 100 億年程度であるのに対し、連星の軌道周期は短いもので数日である。このように時間スケールが数桁以上異なる系を同じ手法で時間積分するのは困難であるため、NBODY6 では、連星のみを取り出し、時間を含めて座標変換し、別の方法で積分する「regularization」と呼ばれるアルゴリズムが用いられている。このような連星の計算手法なしでは、ブラックホール連星を含めた星団の進化シミュレーションを行うことはできない。計算には、Reedbush-L を用いた。

#### 4. 結果

図 3 は、星団中で力学的に形成したブラックホール連星の重力波放出による合体時間である。この合体時間が宇宙年齢より短い場合、重力波観測による検出の可能性がある。今回の first cluster モデルでは、宇宙年齢以内に合体可能なブラックホール連星は 2 つであった。一方、球状星団モデルの場合では 4 つであり、first cluster モデルより多いが、サンプル数が非常に少ないため、今後、初期の分布の生成時に異なるランダムシードを用いた計算を複数回行い、統計

的に十分なサンプルを得て比較する必要がある。全体的な分布を見ると、first cluster は  $10^4$  yr (1 Gyr =  $10^9$  年) にピークがある一方、球状星団モデルでは  $10^5$  Gyr にピークがあり、First cluster の方が合体にかかる時間は短めである。しかし、ブラックホール連星の個数は first cluster モデルの方が少なかった。

図4は、ブラックホール連星の質量比の分布である。First cluster モデルは、球状星団モデルと比べてより質量に差のある連星が多い。これは、first cluster モデルでは、より大質量のブラックホールが形成するため、ブラックホール間の質量差がつきやすいためであると考えられる。

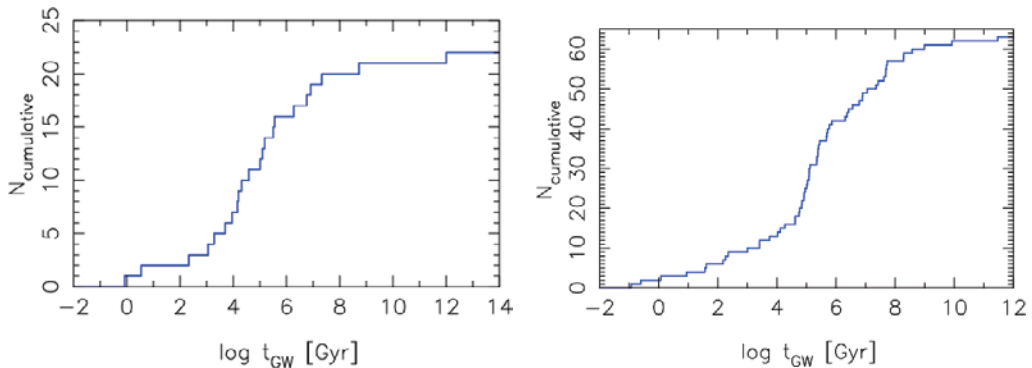


図3：星団中で力学的に形成したブラックホール連星の重力波放出による合体時間の累積個数分布。左：First cluster モデル。右：球状星団モデル。およそ  $\log t_{\text{GW}} < 1$  ( $t_{\text{GW}} < 10$  Gyr) のブラックホール連星が宇宙年齢以内に合体する。

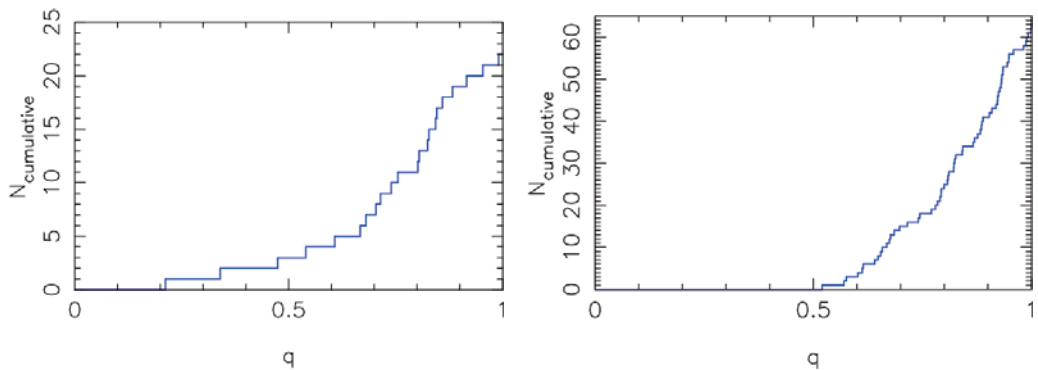


図4：ブラックホール連星の質量比 ( $q=M_2/M_1$ ,  $M_1>M_2$ )。左：First cluster モデル、右：球状星団モデル。

## 5. まとめと今後の展望

今回の研究で、first cluster から得られたブラックホール連星は予想に反して少なかった。これは、質量関数に起因している可能性がある。Wang, Fujii, and Tanikawa (2021) [6]では、質量関数のべきを変えた星団進化シミュレーションを行い、合体するブラックホール連星の数を

調べている。その結果、べきが浅い(=重い星の数が多い)ほど合体するブラックホール連星が多くなるわけではないことがわかった。それは、重いブラックホールが力学進化によって星団の中心に集まった結果、星団中心を力学的に温める(速度分散を大きくし、密度を下げる)ことによって、連星の軌道進化が進まなくなるためである。本研究でも同様の現象が起きている可能性があるが、サンプル数が少ないため、今後、ランの数を増やしてブラックホール連星のサンプル数を増やしてから議論する必要がある。

## 謝 辞

初期条件の作成に関して、衣川智也氏のご協力をいただきました。また、初期条件生成スクリプトは、Steven Rieder 氏作成の MIDAS プロジェクトの初期条件生成スクリプトを用いました([https://github.com/rieder/default\\_ics](https://github.com/rieder/default_ics))。

## 参 考 文 献

- [1] Abbott R., et al., Physical Review X, 11, 2, 2021
- [2] Portegies Z. S., et al., Computer Physics Communications, 184, 3, 2013
- [3] Kinugawa T., et al., MNRAS, 442, 4, 2014
- [4] Hurley J. R., Pols O. R., Tout C. A., MNRAS, 315, 3, 2000
- [5] Wang L., et al., MNRAS, 450, 4, 2015
- [6] Wang L., Fujii M. S., Tanikawa A., MNRAS, 504, 4, 2021