

位置天文観測による銀河系内 ブラックホール探査



鹿内 みのり^{1,2}

¹ 東京大学理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

² 東京大学理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

e-mail: shikauchi@resceu.s.u-tokyo.ac.jp

恒星質量ブラックホールは、大質量星の寿命が尽きた際に形成される高密度天体である。天の川銀河内の大質量星の多くは連星系を成している可能性があり、恒星質量ブラックホールも連星系に含まれている可能性が高い。ゆえに、銀河内ブラックホール探査によって、ブラックホールの形成過程のみならず連星進化に関する重要な示唆が得られる可能性がある。特に、位置天文観測では、X線観測や重力波観測よりも長周期のブラックホール連星にも感度があるため、これまでと異なるブラックホール分布を明らかにしうると期待されている。本稿では、位置天文観測衛星 Gaia によるブラックホール連星の観測可能性を理論的に予想した我々の研究について紹介しながら、位置天文観測によるブラックホール連星探査の可能性を明らかにしていく。最後に、直近の Gaia からのデータ公開を受けて報告されたブラックホール連星の候補についてまとめ、今後の展望を述べる。

1. 研究背景：位置天文観測による ブラックホール探査の意義

恒星質量ブラックホールは、 ≥ 20 太陽質量（以下、 M_{\odot} ）を持つような大質量星の成れの果ての姿である。天の川銀河内の O 型星（15-90 M_{\odot} 程度）の 70% 近くが連星系を成しており、もう一方の星と相互作用している可能性がある [1]。ことから、天の川銀河内のブラックホールも連星系に含まれている可能性が高い。ゆえに、天の川銀河内のブラックホール探査によってブラックホールを含む連星（以下、ブラックホール連星）が観測できれば、ブラックホールの形成過程だけでなく連星進化に関する示唆も得られるだろう。

これまで、銀河系内のブラックホール連星は、X線観測によって 100 個ほど観測されている [2]。系外銀河では、重力波観測によって 90 個ほどのブラックホール-ブラックホール連星合体、また

はブラックホール-中性子星連星合体からの重力波が観測されている [3]。上記のブラックホール連星の特徴として、連星軌道周期が数時間から数日以内と非常に短周期であることが挙げられる。X線連星が伴星からの質量降着で明るく輝くことや、宇宙年齢以内に重力波を放出して合体するような連星であることを考慮すると、理解しやすい。

X線連星や重力波源よりも長周期なブラックホール連星が観測できれば、これまでと異なるブラックホール分布が明らかになるかもしれない。より長周期なブラックホール連星を観測する方法として注目されているのが、視線速度変化による観測と位置天文観測である。すでに、分光観測を用いた視線速度変化の様子から、連星軌道周期が数十日以上ブラックホールと明るい伴星からなる連星も検出されている [4, 5]。3 M_{\odot} 程度の“明るい伴星を振り回す見えない星”を含む連星も検出されている [6, 7]。これらが軽いブラックホー

ルなのか、重い中性子星であるかは非常に興味深い。

もう一つの観測手段である位置天文観測では、分光観測と測光観測を組み合わせ得られる、明るい星の三次元位置情報や速度成分をもとに、明るい星の質量、連星軌道周期や連星までの距離といった連星パラメータ、ひいては明るい星が連星系を成す他方の星の質量を推定することができる。位置天文観測衛星 Gaia [8] は2013年に打ち上げられて以来、200億個もの星の固有運動を10マイクロ秒角以下という精密さで観測している。観測期間は5年の予定であったが、延長されることが決定している。これまで Data Release (DR) 1, 2, Early DR3 とデータが公開されてきたが、2022年6月に行われた DR3 では、遂に“単独星ではない”、すなわち連星系を成す星のデータが公開された [9, 10]。そのようなデータは約80万個にもものぼる。これを受けて、ブラックホール連星の候補（うち、二つは確定済み）も報告されている。詳細については最終章で触れるが、その内の一つは連星軌道周期が1,300日近くの長周期のブラックホール連星である [11, 12]。DR3 では34ヶ月分の観測データが公開されており、Gaia の平均の観測頻度が数十日程度であることから、およそ20回分の観測データで数年単位の連星を検出できることを示している。すなわち、周期が年単位の長周期であるような、ブラックホールと明るい伴星からなる連星系の探査が可能である。

DR3 に至るまで、数個から数万個程度のブラックホールと明るい伴星からなる連星が Gaia によって観測可能であると理論的に予想されてきた [13–19]。以降の章では、先行研究について簡潔にまとめながら、我々が行ってきた理論予想について紹介したいと思う。

2. 散開星団起源のブラックホール —主系列星連星の観測可能性

2.1 先行研究：孤立連星起源のブラックホール連星の観測可能性

これまでの先行研究 [13–18] では、ブラックホール連星の起源として、“孤立連星起源”を仮定していた。孤立連星起源では、連星として生まれ、ブラックホール連星に進化するまでに、連星を組む相手以外の星と相互作用しないと仮定する。このような仮定は、銀河ディスク内のように周辺の星の数密度が低い環境で生まれた連星で成り立つ。

一方、銀河中心や星団のような星の密度が高い環境では、ブラックホール連星に進化するまでに他の星との動的相互作用は無視できない。そこで、動的相互作用によって形成されるブラックホール–主系列星連星の観測可能性を理論的に見積もり、孤立連星起源のブラックホール連星との区別がつけられるか予想することにした [20]。

2.2 散開星団モデルと N 体シミュレーション

今回は動的相互作用が無視できない環境として、散開星団に注目した。球状星団に比べて、散開星団は若い星の集団（年齢が数億年未満程度）であるので、重い（＝明るい）主系列星を持つブラックホール連星が多く形成され Gaia でも観測しやすいと考えられる。散開星団内のすべての星は、初めに零歳主系列星の単独星として存在していると仮定した。動的相互作用のみによって形成されるブラックホール連星の性質を調べるためである。

動的相互作用による連星–連星、連星–単独星の組み換えのほか、個々の星の進化や連星進化も追うことができる N 体シミュレーションコード NBODY6++GPU [21] を用いて、1,000個の散開星団モデルをシミュレーションし、散開星団起源のブラックホール–主系列星連星の分布を得た。ただし、散開星団で形成されたブラックホール連

星のうち、散開星団外に飛び出したもののみが観測可能であるとみなす。散開星団内にとどまっていると、星の数密度が高く、その他の星から分解できないと考えられるためである。

2.3 天の川銀河内の分布と観測条件

得られたブラックホール連星分布をもとに観測可能性を見積もるため、散開星団を脱出したブラックホール連星が天の川銀河内でどのように分布しているかを以下のように仮定した。

全シミュレーションで得られたブラックホール-主系列星連星の数を、散開星団の初期質量 $1 M_{\odot}$ あたりのブラックホール連星の個数に変換した。そこへ天の川銀河内のある地点で形成される散開星団由来の星の質量をかけることで、空間分布を得た。天の川銀河のある地点での星形成密度は現在の星の数密度に比例すると仮定し、現在の星の数密度分布はディスクのみを考慮した。Gaiaの観測波長は可視光であり、星間減光が強くなるバルジ領域は観測が難しいと考えられるためである。

得られた散開星団起源のブラックホール連星の空間分布に基づいて、それぞれのブラックホール連星が観測できる最大距離を以下の条件から求め、その範囲内にある連星の個数を数え上げることで観測可能性を見積もった。これらの条件は、観測可能性に関する先行研究の一つである [15] に従っている。

- 1) 連星軌道周期が3年以内である。
- 2) 星間減光を考慮した、主系列星の見かけの明るさがGaiaの限界等級よりも明るい。
- 3) 主系列星の年周視差が誤差に比べて十分に大きい。
- 4) 主系列星の天球面上での動きが誤差に比べて十分に大きい。

上記の条件は、伴星である主系列星の観測から推定される“伴星を振り回している見えない星”がブラックホールであるかを判別するために、見えない星の質量の下限値が $3 M_{\odot}$ よりも大きくなる

よう要請することで導出される。

2.4 結果：散開星団起源のブラックホール連星の観測可能性

シミュレーションの結果より、5年間の観測によって8.9個の散開星団起源由来のブラックホール-主系列星連星が観測可能であると見積もった。先行研究 [13–18] で見積もられている孤立連星起源のブラックホール連星に比べるとわずかであるが、次章で紹介する我々の見積もり [22] には匹敵する数であり、散開星団起源のブラックホール連星の寄与は無視できない可能性がある。以下では、観測可能な連星がどのように形成されたのかについてまとめ、形成過程の違いから孤立連星起源のブラックホール連星と区別しうることについて述べる。

図1は、散開星団を脱出したブラックホール-主系列星連星の連星軌道周期 P と主系列星の質量 m_{MS} の関係を示している。各点は、全シミュレーションで得られた連星のうち、観測可能な軌道周期を持つ連星のみを示している。連星軌道周期以外の制限は課しておらず、点の数は観測可能数に対応していない。図中に見られる空隙に沿って、

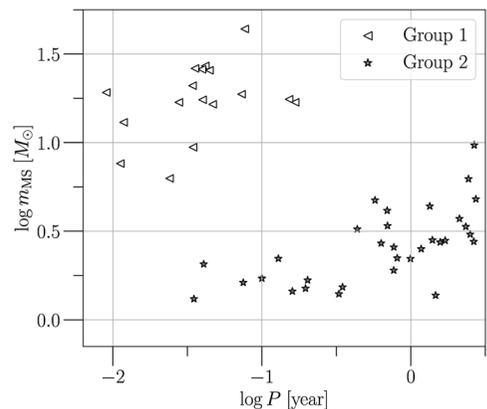


図1 1,000回の散開星団のシミュレーションのうち、散開星団を脱出したブラックホール-主系列星連星の連星軌道周期 P と主系列星の質量 m_{MS} の関係。連星軌道周期が3年以内の連星のみを示している。各グループの点の数は、観測可能性には比例しない。

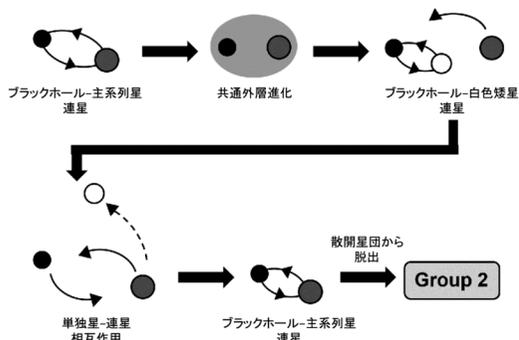


図2 観測可能なブラックホール連星の形成過程.

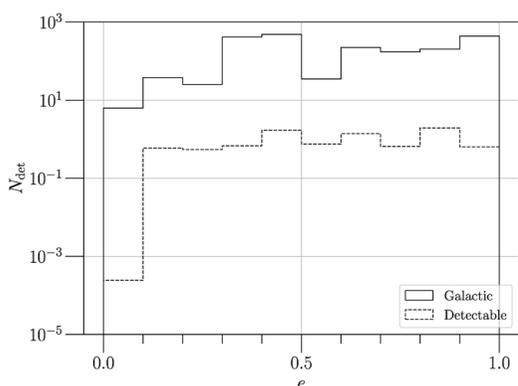


図3 離心率 e 分布. 縦軸は離心率ごとの観測可能性 N_{det} を表す. 実線が太陽から10 kpc以内に存在するGroup 1と2の連星の分布, 点線が観測可能な連星の分布を表す.

(1) 重い主系列星 ($m_{MS} \geq 5.6 M_{\odot}$) を持ち, 短い軌道周期 ($P \leq 40$ 日) の連星, (2) 軽い主系列星 ($m_{MS} \sim 1.8-5.6 M_{\odot}$) を持ち, 長い軌道周期 ($P \geq 40$ 日) の連星に分けることができる. それぞれを “Group 1”, “Group 2” と呼ぶ. 両グループの連星に関して, 連星軌道周期以外の観測条件も課すと, Group 1の観測可能数は 5.6×10^{-4} 個, Group 2は8.9個より, 観測可能なものうちのほとんどはGroup 2由来であることが分かる. 観測数に大きな差がある要因として, Group 1の方がより短い軌道周期を持つことが挙げられる. 軌道周期が短いと天球面上での動きが分解しにくくなり, 観測条件(4)による制限を大きく受ける.

観測可能性に大きく寄与するGroup 2の連星の

うち多くは, 図2のような形成過程を辿る. まず, ブラックホールが単独星進化によって形成される. その後, 動的相互作用によって主系列星を獲得し, 連星系を形成する. その後, 共通外層進化を経て, ブラックホール-白色矮星連星のような, ブラックホールと高密度天体からなる連星系へと進化する. 最後に, 単独星として存在していた主系列星と, 単独星-連星相互作用によって, 高密度天体から主系列星へと伴星を入れ替え, 散開星団の外へ脱出する.

一方, Group 1の連星は, 動的相互作用によって主系列星同士からなる連星を形成した後, 共通外層進化を経てブラックホール-主系列星連星へと進化する. 連星を形成した後はその他の星と動的相互作用を起こさないで, 一種の孤立連星にもみなせることだろう.

Group 1とGroup 2の大きな違いは, “ブラックホールへと進化した後に, 伴星を交換しているかどうか” という点である. いずれも共通外層進化を経ているものの, Group 2ではその後に伴星を交換することで共通外層進化で縮まった軌道が広がる. そのため, Group 2の連星はGroup 1に比べて大幅に観測しやすいと考えられる.

最後に, Group 2の形成過程をもとに, 孤立連星起源のブラックホール連星と区別するための手がかりとなりそうな点についてまとめた.

まず, 連星軌道の離心率である. 図3は, 太陽から10 kpc以内に存在するGroup 1と2の連星の離心率 e 分布 (“Galactic”, 実線)と, 観測可能な連星の分布 (“Detectable”, 点線)を示している. 縦軸は離心率ごとの観測可能性 N_{det} を表す. 一般的に, 動的相互作用によって形成された連星の離心率は0よりも大きい傾向にあるが, 太陽から10 kpc以内には円軌道に近い連星も存在することが分かる. しかし, これらは共通外層進化によって離心率を失っており連星軌道も狭いため, ほとんど観測できない. ゆえに, 離心率 ~ 0 のブラックホール連星が検出された場合は孤立連星起

源である可能性が高いだろう。孤立連星起源では、離心率 ≤ 0.1 の連星も観測しようと予想されている [18, 22, 23].

次に、主系列星の外層の元素構成比のパターンである。図2で見たように、観測可能なブラックホール連星はブラックホール形成後に動的相互作用によって伴星を獲得している。すなわち、伴星はブラックホールの親星によって汚染されていない可能性が高いということである。孤立連星起源のブラックホール連星であれば、生まれてからブラックホール形成後まで伴星を入れ替えておらず、伴星の外層の元素構成比に何らかの偏りが見られる可能性がある。すでに低質量X線連星では、伴星の外層の元素構成比に偏りが見られており [24], Gaiaで観測できるような連星軌道周期を持つような連星も同様に考えることができる。ゆえに、伴星を追観測（分光観測）し元素構成比を調べることで、連星の起源に迫れるかもしれない。

3. ブラックホール連星の観測可能性の連星進化パラメータ依存性

ここからは、動的相互作用を考慮しない孤立連星起源のブラックホール連星に注目する。

ブラックホール連星の観測可能性は、観測条件だけではなく連星進化パラメータにも大きく依存する。超新星モデルは、形成されるブラックホールの質量や数に影響する。共通外層進化では、共通外層をどれほど効率よく吹き飛ばせるかによって、進化後の連星数が左右される。また、超新星爆発の非対称性によってブラックホールが運動量を受けることがある。これは“キック”と呼ばれているが、キックの強さによっては、軌道の長いブラックホール連星が壊されたり、軌道が大きく変化する可能性がある。

そこで、これらの連星進化パラメータを変えた複数のモデルについて連星進化を追い、観測可能性がどのように変化するかを初めて体系的に調べ

た [22].

3.1 連星種族合成コードと連星進化パラメータ

今回は、高速連星種族合成コード BSE [25, 26] を用いて連星進化を追った。連星種族合成では、膨大な連星データを生成して連星進化を追うことで、ブラックホール連星の性質やパラメータ分布について予想することができる。特に、BSEでは、単独星進化から得られた近似的な物理モデルを用いることで、多数の連星データを高速で処理することができる。

次に、それぞれの連星進化パラメータで用いたモデルについて紹介する。まず、超新星モデルでは、[27] で提唱されている二つのモデルを用いた。それぞれ、“rapid”、“delayed”と呼ばれている。大きな違いは、 $5 M_{\odot}$ 未満の軽いブラックホールを形成するかどうかである。rapidモデルでは、そのような軽いブラックホールは形成されない。観測されているX線連星の中には $2-5 M_{\odot}$ のブラックホールが極端に少なく [28, 29], “ブラックホール質量のギャップ”と呼ばれている。ゆえに、rapidモデルによるブラックホール質量分布は、“ブラックホール質量のギャップ”に合致する。一方、delayedモデルでは、超新星爆発の際に吹き飛ばした物質のうち、わずかしき降り返ってこないため、rapidモデルよりも軽いブラックホールを形成する。“ブラックホール質量のギャップ”が観測バイアスによるものなのか、超新星モデルの違いによるものなのか議論の余地があるため、両方のモデルを用いた。

共通外層進化の効率 (α) では、0.1, 1, 10 という三つの値を用いた。 α が大きいほど、軌道エネルギーをあまり消費せずに共通外層を吹き飛ばすことができ、連星が進化後も生き残りやすくなる。軌道エネルギーを消費し続けても共通外層を吹き飛ばしきれなかった場合は、進化の途中で合体してしまう。

最後に、キックでは、“fallback”キックを含むモデルと含まないモデルでシミュレーションし

た。fallbackキックは、超新星爆発の際に吹き飛ばした物質のうち、降り返ってきた質量の割合にキックの大きさが反比例するモデルである。特に、delayedモデルで生成されるような $5 M_{\odot}$ 未満程度の軽いブラックホールは大きなキックを受けやすく、そのようなブラックホールを含む連星は壊されやすい。fallbackキックを含まないモデルでも、ブラックホール形成時の質量損失によるキック（Blaauwキック）は受ける。

以上より、2個の超新星モデル、3個の共通外層進化の効率、2個のキックモデルを考慮した、合計12個の連星進化パラメータの組み合わせについて、それぞれ100万個の連星データを用意し連星進化を追った。それぞれの連星は零歳主系列星から進化するものと仮定し、金属量はすべて太陽金属量であるものとした。

得られたブラックホールと伴星の連星の分布は、2.3節と同様に天の川銀河内の分布へと変換し、観測制限（同章の箇条書きを参照）をもとに観測可能性を見積もった。ただし、見えない星の下限値は $2 M_{\odot}$ まで引き下げた。重力波観測において、 $2-3 M_{\odot}$ の高密度天体が検出されており [30]、これらが軽いブラックホールであるか興味深いためである。また、[31, 32] より、連星軌道の40%程度を観測することで連星パラメータを推定できるかもしれないため、軌道周期の上限を10年に延長した。今回は、伴星を主系列星だけに限定せず、高密度天体以外の星を伴星として持つブラックホール連星の分布を用いて調べた。

3.2 結果：ブラックホール連星の観測可能性の連星進化パラメータ依存性

表1と2に、それぞれのモデルで生成されるブラックホール連星の観測可能性を示す。連星進化モデルによって、観測可能性は1.1個から46個まで変化することがわかった。見積もった個数は、同じ観測条件を用いている [15] に比べて少なくなったが、[15] では初期質量とブラックホール質量の関係式として近似式を用いたり、今回

表1 それぞれのモデルごとに生成されるブラックホール連星の観測可能性 $N_{\text{det,tot}}$ 。“...”は直上と同じモデルであることを表す。

超新星	α	キック	$N_{\text{det,tot}}$ [個]
rapid	0.1	なし	27
...	1.0	...	28
...	10	...	40
...	0.1	あり	17
...	1.0	...	18
...	10	...	31

表2 表1の続き。

超新星	α	キック	$N_{\text{det,tot}}$ [個]
delayed	0.1	なし	15
...	1.0	...	22
...	10	...	46
...	0.1	あり	1.5
...	1.0	...	1.1
...	10	...	9.4

考慮したもの以外の連星進化パラメータが異なるためであると考えられる。

各モデルで観測可能性を比較してみると、超新星モデル間では大きく変わらないことがわかる。いずれの超新星モデルでも、 α が大きい方が観測可能性も大きい傾向にある。これは、共通外層進化後に生き残る連星の数が増えたことに起因する。さらに、delayedモデルでは、fallbackキックがあると大幅に観測数が減る。キックによって多くの連星が壊されるためである。rapidモデルでは、降り返ってくる質量の割合が大きいいため、同じ零歳主系列星から進化した場合に形成されるブラックホール質量がdelayedモデルに比べて大きく、キックが小さい。ゆえに、キックの有無によって観測可能性に大きな差は見られないと考えられる。

また、以下に示す連星パラメータ分布から、連星進化パラメータに関する制限を得られるかもしれない。図4は、超新星モデルごとのブラックホール質量分布を示している。縦軸は観測可能数 N_{det} を表しており、 N_{det} を足し上げると $N_{\text{det,tot}}$ に

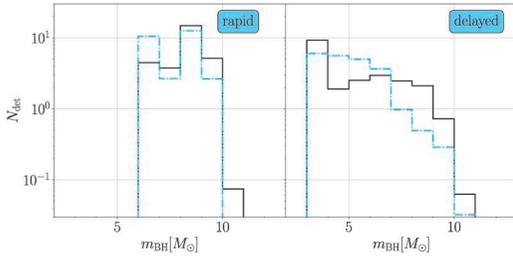


図4 超新星モデルごとのブラックホール質量 m_{BH} 分布。縦軸は観測可能数 N_{det} を表し、 N_{det} を足し上げると $N_{\text{det,tot}}$ になる。それぞれ、 $\alpha=1$ で、fallbackキックは含んでいない。青点線は単独星進化から得られたブラックホール質量分布、黒実線は観測可能な連星の分布を表す。単独星進化から得られたブラックホール質量分布に関しては、ヒストグラムを足しあげれば $N_{\text{det,tot}}$ になるよう規格化している。

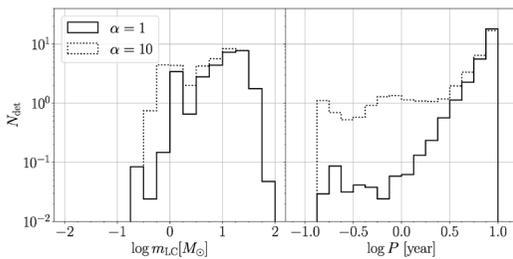


図5 共通外層進化の効率ごとの伴星質量 m_{LC} 分布と連星軌道周期 P 分布。縦軸は観測可能数 N_{det} を表し、 N_{det} を足し上げると $N_{\text{det,tot}}$ になる。いずれも、超新星モデルはrapid, fallbackキックを含んでおらず、観測可能なブラックホール連星分布を表している。黒実線は $\alpha=1$ 、黒点線は $\alpha=10$ に対応している。

なる。いずれのモデルも、 $\alpha=1$ で、fallbackキックを考慮していない。黒点線が観測可能なブラックホール連星を表している。青点線は単独星進化より得られたブラックホール連星の分布に対応し、ヒストグラムを足し上げると $N_{\text{det,tot}}$ になるように規格化している。いずれの超新星モデルでも、観測可能な連星のブラックホール質量分布と単独星進化から得られる分布に大きな差が見られない。金属量が太陽金属量であるために、星風が強く連星進化による質量移動の影響が見えにくい

ためであると考えられる。rapidモデルでは $\lesssim 5 M_{\odot}$ 未満のブラックホールが形成されないことから、そのようなブラックホール連星は観測されない。一方、delayedモデルではそのような質量のブラックホールが形成されかつ観測されうるため、“ブラックホール質量のギャップが観測バイアスによるものであれば、軽いブラックホールを持つ連星はGaiaで観測できる”ということを表している。

さらに、伴星質量 m_{LC} 分布と連星軌道周期 P 分布より、共通外層進化の効率に関する示唆を得られる可能性がある。図5では、異なる効率を用いた場合に観測しうる連星の伴星質量と連星軌道周期分布を示している。黒実線が $\alpha=1$ 、黒点線は $\alpha=10$ に対応し、いずれも超新星モデルはrapidでfallbackキックは考慮していない。 $\alpha=1$ に比べて、 $\alpha=10$ では軽い伴星($\lesssim 1 M_{\odot}$)を持つ、短周期($\lesssim 1$ 年)のブラックホール連星を観測しうると予想している。共通外層進化の効率が高いおかげで、軽い伴星を持つ連星も効率よく共通外層を吹き飛ばし、短周期の連星として多く生き残るためであると考えられる。ゆえに、軽い伴星を持つ短周期のブラックホール連星が観測できれば、共通外層進化の効率は高い可能性がある。

4. まとめと今後の展望

本稿では、位置天文観測衛星Gaiaによるブラックホール連星の観測可能性に関する理論予想[20, 22]を紹介した。散開星団起源と孤立連星起源のブラックホール連星の形成過程の違いから、ブラックホール連星の起源に関する示唆が観測から得られる可能性があることがわかった。また、孤立連星起源のブラックホール連星に関しては、観測される連星パラメータ分布によってブラックホール連星の形成過程に制限を課す可能性がある。

連星データの公開(DR3)を受けて、今後はこれまでの理論予想と観測結果を比較する段階に入

ることだろう。すでにいくつかの論文で、ブラックホール連星の候補が報告されている。分光観測のデータより、[9, 10] では、ブラックホール-主系列星、または主系列以降の星からなる連星の候補が報告されている。[9] のブラックホール-主系列星連星の候補は、[33] によってブラックホールを含む可能性はないと示されている。ブラックホール-主系列以降の星からなる連星についてはブラックホール連星である可能性は否定されていないが、現時点では伴星の質量を推定するのが困難なため、ブラックホールの候補に関しては下限値しか得られていない。今後、詳細な分光観測を行うことで、その正体が明らかになることだろう。

位置天文観測のデータからもブラックホール連星の候補が報告されている [34, 35]。その中には、 $5 M_{\odot}$ 未満の高密度天体が含まれる可能性も示唆されている。これらが真のブラックホールであるかどうかは明らかになれば、“ブラックホール質量のギャップ”が観測バイアスによるものか、超新星モデルに起因するものかについても明らかになることだろう。

特に、Gaiaの位置天文観測データと他の望遠鏡のデータを組み合わせて、Gaia DR3 4373465352415301632の正体がブラックホールとG型矮星の連星であること [36]、Gaia DR3 5870569352746779008がブラックホールと赤色巨星の連星であること [11, 12] が明らかになっている。今後より多くのブラックホール連星が同定されていくと、ブラックホール連星の空間分布からも連星進化パラメータに関する示唆が得られるだろう。例えば、X線連星では、ブラックホール質量や連星軌道周期が銀河面からの高さで反相関の関係にあることが明らかになっており [37, 38]、これらの相関にはブラックホール連星がどこで生まれたかや、キックの大きさに関する情報が含まれている可能性がある。我々の直近の研究 [39] では、連星種族合成で得られたブラックホール連

星を用いて、天の川銀河内の運動の様子を追い、Gaiaで観測しようとするようなブラックホール連星の空間情報と連星パラメータに相関があるかを調べている。今後の観測に向けた重要な示唆を含む結果が得られ、Gaiaにさらなる期待を寄せる内容となっている。

また、Gaiaが不得意とするであろうバルジ領域の観測では、日本初の位置天文観測衛星であるJASMINEが活躍できるかもしれない。星間減光の影響が少ない赤外線での観測することで、バルジ領域のブラックホール分布を明らかにしようと期待する。100分に1回という高観測頻度によって、連星パラメータをより正確に推定できる可能性もある。

最後に、位置天文観測でのブラックホール連星の検出数が蓄積されていけば、重力波やX線観測で検出されたブラックホール連星を含めた統一的な連星進化モデルを議論できるようになると考える。重力波観測では、X線観測よりも重いブラックホールの連星が観測されており、位置天文観測ではより長い連星軌道周期のブラックホール連星に感度があることから、今後はより広範な連星パラメータ領域でブラックホール連星の進化経路について議論できるようになるだろう。

謝辞

本研究は、変革を駆動する先端物理・数学プログラム (FoPM)、東京大学国際卓越大学院教育プログラム (WINGS)、(独)日本学術振興会特別研究員事業 (DC)、若手研究者海外挑戦プログラムの支援を受けております。本稿で紹介した論文の共同研究者の熊本淳様、藤井通子様、谷川衝様に感謝の意を述べたいと思います。

また、本稿を作成するにあたり、共同研究者であり天文月報編集委員の川中宣太様、校閲委員の西澤淳様、事務の今井三緒様に大変お世話になりました。また、本稿をより良くするために助言してくれた夫にも、感謝しております。

参考文献

- [1] Sana, H., et al., 2012, *Science*, 337, 444
- [2] Corral-Santana, J. M., et al., 2016, *A&A*, 587, A61
- [3] The LIGO Scientific Collaboration, et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2111.03606
- [4] Giesers, B., et al., 2018, *MNRAS*, 475, L15
- [5] Liu, J., et al., 2019, *Nature*, 575, 618
- [6] Thompson, T. A., et al., 2019, *Science*, 366, 637
- [7] Jayasinghe, T., et al., 2021, *MNRAS*, 504, 2577
- [8] Gaia Collaboration, et al., 2016, *A&A*, 595, A1
- [9] Gaia Collaboration, et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2206.05595
- [10] Gomel, R., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2206.06032
- [11] Tanikawa, A., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2209.05632
- [12] El-Badry, K., et al., 2023a, arXiv e-prints, arXiv:2302.07880
- [13] Mashian, N., & Loeb, A., 2017, *MNRAS*, 470, 2611
- [14] Breivik, K., et al., 2017a, *ApJ*, 850, L13
- [15] Yamaguchi, M. S., et al., 2018, *ApJ*, 861, 21
- [16] Yalinewich, A., et al., 2018, *MNRAS*, 481, 930
- [17] Kinugawa, T., & Yamaguchi, M. S., 2018, arXiv e-prints, arXiv:1810.09721
- [18] Shao, Y., & Li, X.-D., 2019, *ApJ*, 885, 151
- [19] Chawla, C., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2110.05979
- [20] Shikauchi, M., et al., 2020, *PASJ*, 72, 45
- [21] Wang, L., et al., 2015, *MNRAS*, 450, 4070
- [22] Shikauchi, M., et al., 2022, *ApJ*, 928, 13
- [23] Breivik, K., et al., 2017b, *ApJ*, 850, L13
- [24] Casares, J., Jonker, P. G., & Israelian, G., 2017, in *Handbook of Supernovae*, Alsabti, A. W., & Murdin, P. eds. 1499 (Springer, Switzerland)
- [25] Hurley, J. R., et al., 2000, *MNRAS*, 315, 543
- [26] Hurley, J. R., et al., 2002, *MNRAS*, 329, 897
- [27] Fryer, C. L., et al., 2012, *ApJ*, 749, 91
- [28] Özel, F., et al., 2010, *ApJ*, 725, 1918
- [29] Farr, W. M., et al., 2011, *ApJ*, 741, 103
- [30] Abbott, R., et al., 2020, *ApJ*, 896, L44
- [31] O'Neil, K. K., et al., 2019, *AJ*, 158, 4
- [32] Lucy, L. B., 2014, *A&A*, 563, A126
- [33] El-Badry, K., & Rix, H.-W., 2022, *MNRAS*, 515, 1266
- [34] Andrews, J. J., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2207.00680
- [35] Shahaf, S., et al., 2022, *MNRAS*, 518, 2991
- [36] El-Badry, K., et al., 2023b, *MNRAS*, 518, 1057
- [37] Gandhi, P., et al., 2020, *MNRAS*, 496, L22
- [38] Jonker, P. G., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2104.03596
- [39] Shikauchi, M., et al., 2023, arXiv e-prints, arXiv:2301.07207

Prospects for The Astrometric Survey of Stellar Mass Black Holes in the Milky Way

Minori SHIKAUCHI

Department of Physics, the University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan, Research Center for the Early Universe (RESCEU), the University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Stellar mass black holes (BHs) are compact objects formed at massive stars' deaths. Most of the massive stars are supposed to form binary systems, thus searching for binaries harboring BHs would provide important clues for the formation process of BHs as well as binary evolution. The astrometric satellite Gaia is supposed to detect longer orbital period binaries than X-ray binaries and gravitational wave sources and may reveal a different BH population. Here, I show the feasibility of BH binary observations with Gaia by reviewing our theoretical work. In conclusion, I also summarize some BH candidates and one confirmed reported in the latest Gaia data release and provide future prospects for BH binary surveys with astrometric observations.