

# 論文審査の結果の要旨

氏名 田川 寛通

本論文は、三つ以上の多重ブラックホール(BH)がガス中で運動しながら合体する過程を数値シミュレーションで系統的に調べたものである。

本論文は6章からなる。第1章は序章であり、本論文の背景や研究動機などがまとめられている。恒星質量 BH の合体過程は、超巨大 BH の形成過程や、ガンマ線バーストや重力波源などの問題と関係しているため、天文学的に重要である。これまでの研究では、恒星質量 BH の合体は、連星として生まれた星からの進化がもっぱら想定されていた。一方で本研究では、ガスの豊富な環境における、多数の孤立 BH からの合体という新しい合体経路を提案し、その過程を詳しく調べるために多くの数値シミュレーション実験を包括的に行った。特に、ガスの効果を考慮して BH が三体以上存在する場合の合体過程を数値シミュレーションで追ったのは本研究が世界で初めてである。

第2章は、数値シミュレーションモデルの説明である。基本は BH 系の重力多体シミュレーションであるが、一般相対性理論、ガスとの力学的摩擦、ガス降着の効果が考慮されている。特に力学的摩擦の効果については、これを正確に取り入れるためには広い空間範囲にわたるガス分布を正確に解く必要があり、計算コストが高くなる。そこで、本研究ではガス分布を固定し、力学的摩擦を近似的な解析解で与えることで、現実的な計算時間の中で力学的摩擦の効果を実装する工夫を行った。

第3章は本論文の主要な結果がまとめられている。まず、BH 間の典型的距離が大きく、BH の重力だけでは合体できない多重孤立 BH が、ガス密度  $10^6 \text{ cm}^{-3}$  程度の環境においては、三体相互作用とガスの力学的摩擦の効果によって合体できることが明らかになった。これにより、初代天体で期待される高ガス密度環境において、短い時間で BH の合体が連続して起こる可能性が示された。また、孤立 BH の合体過程を4つのタイプに分類し、それぞれの特徴を調べた。さらに、BH 質量の成長において、ガスの BH への降着と BH 同士の合体のどちらが支配的になるか、そのパラメータ領域の境界を導出した。その結果、エディントン降着率のおよそ1~10倍程度がその境界となることが明らかとなった。また、重力波放出の異方性による反跳の効果についても調べ、高ガス密度領域において合体時間を増加させる効果があることが明らかになった。

第4章では、近年初めて発見された重力波イベント GW150914 として観測された BH 合体が、本論文で提唱した多重 BH の合体によって発生した可能性が検討されている。その結果、多重 BH の合体によって GW150914 を説明するために必要なガス密度( $>10^5 \text{ cm}^{-3}$ )や、BH の初期質量( $\geq 25$  太陽質量)が明らかになった。このことは、GW150914 で観測されたような BH 合体は銀河中心領域や星間雲コアにおいて高頻度で起こることを示唆する。GW150914 は連星の進化によって生まれたとする説が主流であるが、本研究によって新たなシナリオが提案されたことになる。

第5章はさらに本研究から得られた示唆が議論されている。鉄よりも重い r 過程元素の

起源は中性子星の合体が有力な候補である。しかしながら、連星の進化理論に基づく中性子星合体にかかる時間の予想値は、金属欠乏星の観測から示唆される時間より大きいという問題がある。本研究で調べた豊富なガスによる速い合体過程は、この問題を解決する可能性があることが議論されている。また、多重星から進化した中性子星の合体によって、短いガンマ線バーストの頻度を説明可能かが検討されており、このシナリオで短いガンマ線バーストを説明することは難しいことが結論されている。最後に、高赤方偏移に存在する超巨大 BH の形成過程に関して、本研究で議論された原始銀河の中心領域における多重 BH 合体が有望な環境になりうることが議論されている。

第6章は論文のまとめである。

本論文で議論されているガス中での多重 BH の合体過程は、宇宙にあまねく存在する様々な質量の BH の起源を考察するうえで大変重要な対象であり、それについて初めて現実的な数値シミュレーションを行い、様々な合体過程の分類をまとめ、それらを分けるパラメータ領域などを系統的に調べたという学術的価値は高い。また、いくつかの天文学上の重要問題への示唆を幅広く議論した点も評価できる。

なお、本研究は梅村雅之・郷田直輝・矢野太平・山井勇樹との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。