

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20378

研究課題名（和文）原始銀河内における中間質量ブラックホールへの質量降着過程に関する研究

研究課題名（英文）Research for mass accretion process onto intermediate-mass black holes in protogalaxies

研究代表者

豊内 大輔 (Toyouchi, Daisuke)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任研究員

研究者番号：30907374

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000 円

研究成果の概要（和文）：銀河中心に普遍的に存在する超巨大ブラックホール(Black Hole; BH)の形成過程解明に向けて、種となるBHがどのように生まれ、その後どのように質量を獲得していくのか明らかにすることが極めて重要である。そこで本研究では3次元輻射流体シミュレーションを行い、金属量を含まない初代星形成過程、及びその死後残される残骸BHへのガス降着過程について調べた。シミュレーション結果に基づき初代星を起源とするBHの質量分布を予言し、さらに初期宇宙において急速に質量を増やすBHの存在、およびその観測可能性について言及した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

初期宇宙で許される様々な星形成環境でシミュレーションを実施した結果、形成する初代星の質量は100太陽質量から10万太陽質量まで幅広い範囲に分布し、星質量と母体となるガス雲の密度、温度の間には密接な相関関係が存在するが明らかになった。私はこの関係と宇宙論的構造形成モデルを掛け合わせて初代星の質量分布を予言した。さらに星がBHへと進化した後もシミュレーションを続け、一部のBHが非常に急速な質量成長を経験することを示した。このように急速成長するBHはジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡などで観測できる可能性がある。これらの研究成果は超巨大BH形成の全貌解明に向けた大きな前進と言える。

研究成果の概要（英文）：The formation mechanism of supermassive black holes (BHs) is still a big mystery, and the main bottleneck is uncertainty in how the seed black holes form and how rapidly they acquire mass via gas accretion. In this study, we have performed three-dimensional radiative hydrodynamic simulations to investigate the formation process of massive stars in the early universe and the gas accretion process onto BHs left after the progenitor star died. Our simulation results have enabled us to predict the mass distribution of remnant BHs and estimate the detectability of rapidly growing BHs in the early universe with the ongoing JWST observations.

研究分野：天文学

キーワード：大質量星 ブラックホール ガス降着 輻射流体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

中間質量BHの形成・進化の過程は、恒星質量BH ($10\text{--}100 M_{\text{sun}}$) と銀河中心超巨大BH ($> 10^6 M_{\text{sun}}$) を繋ぐミッシングリンクである。重元素を含まない初代星は近傍よりも重い星が多くできると考えられており、その中で $10^4 M_{\text{sun}}$ を超える超大質量星も誕生し、その死後に中間質量BHを残すと期待されている。このような超大質量星の形成過程は宇宙論的構造形成シミュレーションによって精力的に調べられており、超大質量星形成を促すプロセスは非常に多様で、原始星を育む自己重力ガス雲の性質はホストハローの合体史、伴銀河の存在などを反映して大きく異なることが知られている。一方で、宇宙論的大規模計算ではそれぞれの原始星が最終的にどれだけ重くなるかまでは示せていない。そのため、超大質量星形成環境の多様性を反映して、その死後残る中間質量BHがどのような質量分布に従うのか明らかにすることが重要課題であった。

一方、BH進化後のガス降着過程も盛んに調べられており、私もこれまでに輻射流体シミュレーションを用いて研究を行ってきた。これまでの成果として、BHからの輻射フィードバック下における降着流の性質がガス密度や金属量に応じて大きく変化することを明らかにし、BH重力半径 (~ 1 pc スケール) から中間質量BHへ超臨界降着率でガスが流れ込む解が存在することを示した。しかし、現実のガス降着過程はBH周辺の局所的な物理だけでなく、ホストする原始銀河 (> 10 pc スケール) の性質が関与する極めてダイナミックレンジの広い問題である。よって、実際に原始銀河の中で中間質量BHへの急速な質量降着が起きるかどうかなを確認することが高赤方偏移超巨大BH形成への道筋を示すために重要であった。

2. 研究の目的

上述の研究背景を踏まえ、本研究では3次元輻射流体シミュレーションを実施し、原始銀河内における $10^3\text{--}10^5 M_{\text{sun}}$ の超大質量星形成過程、及びその死後残される中間質量BHへのガス降着過程について包括的に調べた。銀河中心超巨大BH形成の解明に向けて、種となる中間質量BHがどのような質量分布で生まれ、その後どのように質量を獲得していくのか明らかにし、さらに初期宇宙における超大質量星及び中間質量BHの将来観測の可能性について検証することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では宇宙論的構造形成シミュレーションで見つかる原始星周辺のズームイン輻射流体シミュレーションを実施した。典型的な初代星の寿命であるおよそ100万年までにどれだけ原始星が成長できるか調べた。さまざまな初期条件で計算を行い、星形成環境と誕生する星質量の相関関係について議論した。

シミュレーションで誕生した初代星のうち質量が $30M_{\text{sun}}$ を超えるものに関しては寿命が尽きると重力崩壊によってほとんどの質量を保ったままBHへと進化すると仮定して輻射流体シミュレーションを継続した。BHへの質量降着過程は様々な初期条件で調べられているが、前段階の星形成過程を統合的に考慮した研究は行われておらず、本研究を通して初めて、超大質量星形成から中間質量BH成長への過程が一筆書きに示されることになった。

4. 研究成果

星形成シミュレーションの結果、初代星の質量は $100 \sim 10^5 M_{\text{sun}}$ まで幅広い範囲に分布することがわかった。このとき $1000 M_{\text{sun}}$ より軽い星は自身の UV 放射による星周円盤の光蒸発によって質量成長が終了することが明らかになった。一方で、母体となるガス雲の温度が高く、星周円盤への質量供給が光蒸発による質量損失を上回るときは $10^4 M_{\text{sun}}$ を超える超大質量星が誕生することもわかった。一連のシミュレーション結果は誕生する星質量と母体となるガス雲の密度、温度の間に密接な相関関係が存在することを示している。私はこの関係と宇宙論的構造形成モデルを掛け合わせて初代星の質量分布を予言した(図 1)。これは初代星の死後残される残骸 BH の質量分布を示したことと概ね同義であり、本研究成果は超巨大 BH 形成に向けた初期条件を提示したという意味で極めて重要である。

続いて、先述の星形成シミュレーションで形成した星が寿命を全うし、BH へ進化した後の計算を実施した。BH は星と異なり自発的に光ることがないため、BH の形成前後で周囲に対する放射フィードバックの影響が大きく変化すると期待された。シミュレーションを実施した結果、BH 形成直後、これまで星からの安定した放射加熱によって降着が妨げられていたガスが BH に向かって落ちるようになり、一部の BH は非常に急速な質量成長を経験することが明らかになった(図 2)。このような急激な降着過程はこれまで報告されておらず、本研究で初めて星形成と BH の進化を一筆書きに調べた最大の恩恵と言える。また、このシミュレーション結果に基づいて、急速成長段階にある BH の降着円盤からの放射スペクトルと光度を計算したところ、現在運用中のジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡で観測できる可能性があることがわかった。実際に、これまでジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡によって急速成長中の中間質量 BH の候補がいくつか発見されており、本研究はこれらの観測事実に理論的妥当性を付加している。

このように本研究では初代星形成と BH 質量成長の最初期段階に関して複数の重要な成果を与え、超巨大 BH 形成の全貌解明に向けた大きな前進をもたらした。

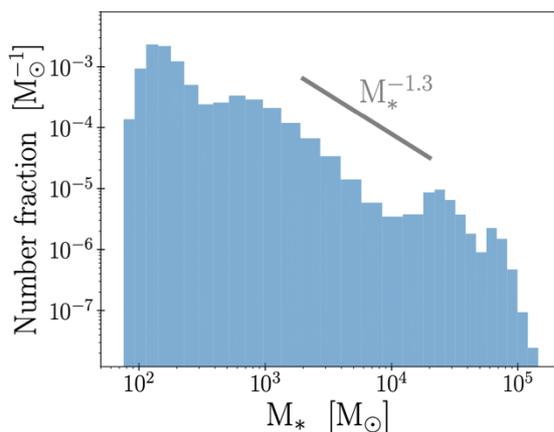


図 1 : 本研究で予言した初代星の初期質量関数。100~10万太陽質量の幅広い質量範囲で初代星が形成することを示した。

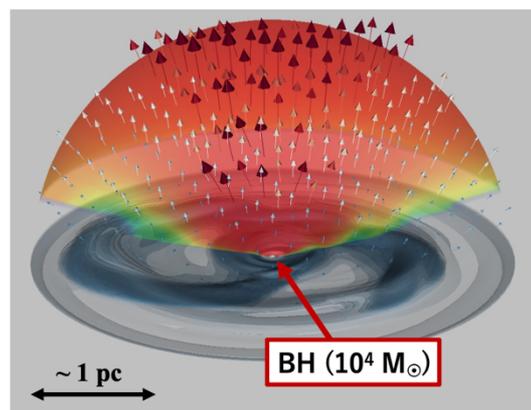


図 2 : BH へのガス降着過程を調べた 3次元放射流体シミュレーション。円盤上空に向け高温のアウトフローが発生する一方、円盤赤道面付近を通過して低温・高密度のガスが急速に中心 BH へと降着することがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Toyouchi, Daisuke; Inayoshi, Kohei; Ishigaki, Miho N.; Tominaga, Nozomu	4. 巻 512
2. 論文標題 Top-heavy stellar mass distribution in galactic nuclei inferred from the universally high abundance ratio of [Fe/Mg]	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2573-2583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toyouchi, Daisuke; Inayoshi, Kohei; Li, Wenxiu; Haiman, Zoltan; Kuiper, Rolf	4. 巻 518
2. 論文標題 Radiative feedback on supermassive star formation: the massive end of the Population III initial mass function	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1601-1616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac3191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 豊内大輔
2. 発表標題 Formation of intermediate-mass BHs in metal-free clouds experiencing violent dynamical heating
3. 学会等名 East-Asia AGN workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊内大輔
2. 発表標題 原始銀河中の種ブラックホール形成および急速成長
3. 学会等名 超巨大ブラックホール研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊内大輔
2. 発表標題 Radiative feedback on supermassive star formation: Implication for the massive end of the PopIII IMF
3. 学会等名 Star formation in different environment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊内大輔
2. 発表標題 Radiative feedback on supermassive star formation: Implication for the massive end of the PopIII IMF
3. 学会等名 EANAM9 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊内大輔
2. 発表標題 原始銀河中の大質量星形成および種ブラックホールの成長
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊内大輔
2. 発表標題 原始銀河中の大質量星形成および種ブラックホールの成長
3. 学会等名 Formation and mass growth of seed black holes in protogalaxies (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------