

令和 3 年 4 月 9 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860192

氏 名 杉村 和幸

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：メリーランド（国名：米国）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

初代銀河と巨大ブラックホールの共形成過程の理論的研究

3. 派遣期間：平成 31 年 2 月 20 日 ～ 令和 3 年 3 月 20 日

4. 受入機関名及び部局名

受入機関名：メリーランド大学

部局名：天文学科

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入可)

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

所期の目的

まず、本研究課題「初代銀河と巨大ブラックホールの共形成過程の理論的研究」の所期の目的についてまとめる。

宇宙初期のビッグバンから現在に至る約 138 億年後の宇宙の進化について考えた際、我々の住む天の川銀河をはじめと観測される様々な銀河がどのように形成・進化してきたかについては、未だ数多くの謎が残されている。特に、ほぼ全ての銀河の中心に存在することが観測的に知られている、太陽の約十倍以上の質量を持つ巨大ブラックホールは、輻射によるフィードバックや高速ガス放出に伴うフィードバックにより銀河の形成史に大きな影響を与えたと考えられているが、実際にどのように影響したかについての理解は非常に限られている。とりわけ、巨大ブラックホールは未だ標準形成シナリオすら確立しておらず、巨大ブラックホールの起源の謎は宇宙進化史を解明する上で大きな問題となっている。

その中で、本研究は、宇宙で最初の銀河（初代銀河）の形成に着目し、その形成過程において巨大ブラックホールがどのように形成・進化し、さらに、初代銀河と巨大ブラックホールがどのように相互作用しながら進化（共形成）していくかを明らかにすることを所期の目的に設定した。

これまでも初代銀河の過程に注目した研究は存在するが、それらの研究では、巨大ブラックホールの種となる可能性がある宇宙で最初の星（初代星）起源のブラックホールが形成する過程の取り扱いが不十分であったり、必要な物理過程が無視された単純なモデルで巨大ブラックホールのガス降着による成長を扱っていたりする。そのため、ブラックホールの形成・進化や、ガス降着に伴うブラックホールから銀河へのフィードバックについて、正しく

記述できていない可能性が高い。そこで、本研究計画では、まず種ブラックホールの形成やガス降着による成長といった各素過程についてシミュレーション結果に基づいてモデル化をおこない、さらに、そのモデルを用いて初代銀河と巨大ブラックホールの共形成過程のシミュレーションをおこなうことで、初代銀河と巨大ブラックホールの共形成過程の整合的な描像を確立することを目指した。

遂行状況及び成果

上述の目的を達成するため、以下の3つの研究課題を推し進めた。

1. 初代星形成シミュレーション
2. ブラックホールへのガス降着シミュレーション
3. 初代銀河と巨大ブラックホールの共形成シミュレーション

以下で、それぞれの課題について、遂行状況及び成果について述べる。

課題1. 初代星形成シミュレーション

宇宙で最初の世代の星である初代星は、星からの輻射や超新星による銀河間ガスへのフィードバックが宇宙全体の物理的・化学的狀態を大きく変化させるだけでなく、寿命を迎えた後に残されるブラックホールが巨大ブラックホールの種の候補であることから、宇宙の進化を理解する上で非常に重要な天体である。これまでの研究により、原始星の放射する電離光子のフィードバックにより原始星へのガス降着が止められる過程が初代星の質量を決める上で決定的な役割を果たすこと、および、初代星は典型的に数十～数百太陽質量の大質量星として誕生することが知られていた（例えば、Hosokawa et al. 2011, Science）。しかし、近傍宇宙の観測において大半の大質量星が連星や多重星として存在するにもかかわらず、先行研究では複数の星が形成する効果が整合的に取り入れられておらず、初代星の質量を始めとする諸性質について大きな不定性をもたらす原因にもなっていた。

そこで、本研究では、この謎を解明するため、新しいコードの開発とそれを用いた大規模並列シミュレーションを一貫して進めた。まず、適合格子細分化法に基づく自己重力磁気流体コード「SFUMAT0」(Matsumoto 2008) に対して、原始星進化、ガスの熱・化学進化、適合光線細分化法 (Abel and Wandelt 2002) に基づく輻射輸送の各モジュールを追加することで、初代星が連星として形成する際に重要になるガス分裂と原始星からの電離光の効果を取り扱うことのできる世界初のコード「SFUMAT0-RT」を開発した。そして、このコードを用いて 512 コア × 8 ヶ月に及ぶ大規模並列計算を実行することで (国立天文台 XC50 使用)、初代星が大質量星の連星として生まれることを世界に先駆けて明らかにした (図1 参照)。それにより、初代星形成に関して残されていた大きな謎に答えを与え、さらに、初代星の連星は近年初観測された重力波源の連星ブラックホールの起源である可能性があるため、重力波源の解明に道筋を示すことにもつながった。

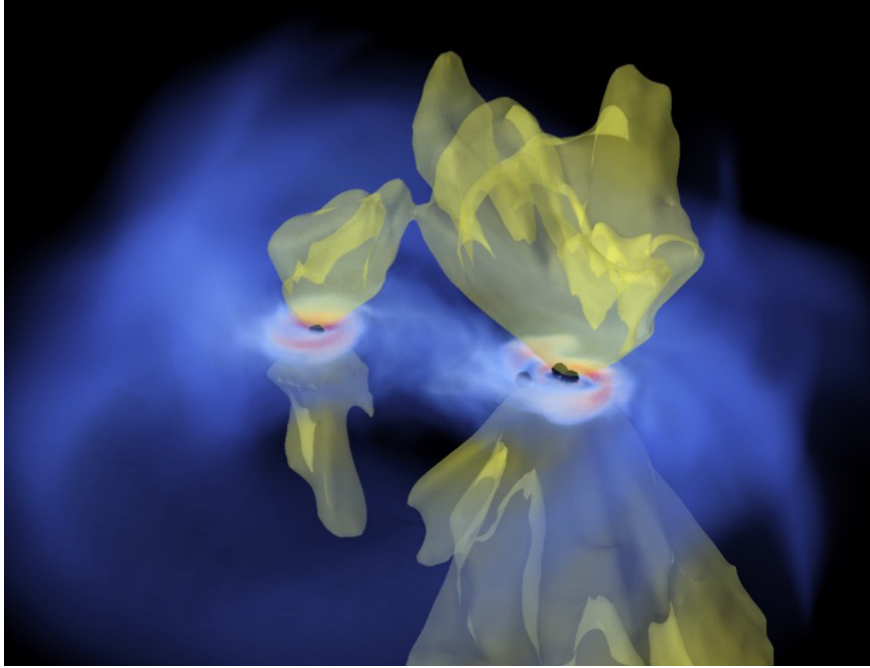


図 1: シミュレーション中で初代星が複数の大質量星からなる多重星として誕生している様子。青-白-赤はガス密度、黄は高温領域、黒点は星に対応。

本結果をまとめた論文は、学術誌「The Astrophysical Journal Letters」から出版され、さらに、アメリカ天文学会（AAS）の4つの雑誌の中から特に重要な論文がハイライトされる AAS Nova に選出されている。また、本研究成果について、オンライン上でおこなわれた国際研究会「SAZERAC presents: The First Stars」で口頭発表をおこなった。

課題 2. ブラックホールへのガス降着シミュレーション

ブラックホールへのガス降着は、種ブラックホールが巨大ブラックホールに成長する上での主要な課程と考えられている。しかし、ブラックホール近傍からの強力な光によるフィードバックを始めとする様々な物理が絡み合う複雑な現象であるために理解がなかなか進まず、種ブラックホールやその周囲のガスの性質が与えられた際にどのようなガス降着率を実現するかについての不定性が大きな問題となっていた。特に、種ブラックホールが銀河中心にとどまらずに銀河内を浮遊しているような状況では、ブラックホールは銀河内のガスに対して相対速度を持つことが予想されるため、その効果を考慮してブラックホールへのガス降着率を決めることが重要になる。先行研究の軸対称2次元シミュレーションにより、そのような場合にブラックホール周囲にできる電離バブルの境界が不安定になる可能性が示唆されていたが、軸対称2次元近似の限界から不安定性の発生条件や降着率への影響についての理解が不十分であり、本研究では3次元シミュレーションを用いてそれらの理解を進めた。

本研究のシミュレーションにより、電離バブルの外側に形成するシェルの厚みが薄い場合に不安定性が成長し、電離バブルの形が大きく変形することが明らかになった（図2参照）。また、シミュレーション結果に基づいて、シェルの厚みが相対速度の関数としてどのように決まるかについて解析的に求め、不安定性が生じる相対速度の条件を明らかにした。さらに、定常状態を仮定して降着流の構造を求め、近似的な降着率のモデルを解析的に導出した。この解析的モデルは、不安定性が成長しない場合についてはよい近似となることが期待されるが、不安定性が成長する場合については、不安定性が実際に降着率にどのような影響するかについて、今後、より広範囲なスケールに渡るシミュレーションをおこなって調べる必要がある。

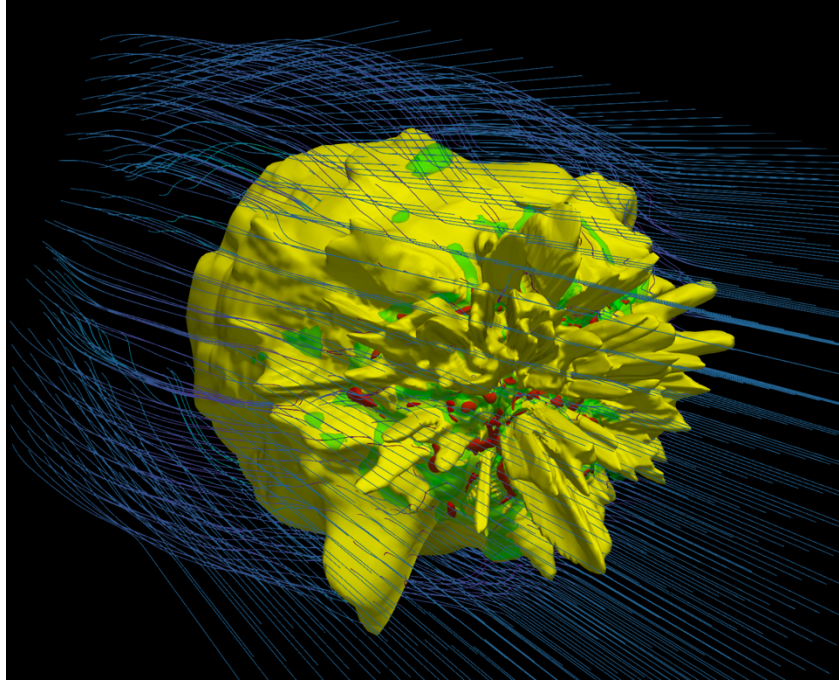


図 2: シミュレーション中でブラックホール周りの電離バブルが不安定になって形状が複雑になっている様子。黄は電離バブルの境界、緑は少し密度の高い領域、赤は密度が大幅に高い領域、線はガスの流線。

本研究結果をまとめた論文は、学術誌「Monthly Notices of the Royal Astronomical Society」から出版されている。さらに、本研究成果について、オンライン上でおこなわれた日本天文学会 2020 年秋季年会において口頭発表をおこなった。

課題 3. 初代銀河と巨大ブラックホールの共形成シミュレーション

本課題では、宇宙で最初の世代の銀河と巨大ブラックホールが互いに影響を及ぼしながら形成する過程（初代銀河と巨大ブラックホールの共形成過程）について、大規模輻射隆替シミュレーションを用いて調べた。その際、上記過程において重要になる初代星形成、および、ブラックホール降着という銀河より十分小さなスケールで起こる現象について、課題 1、2 で培った理解に基づくモデルをシミュレーションに組み込み、広範なスケールにおいて整合的な記述を実現した。

これまでに、公開輻射流体シミュレーションコード「RAMSES」(Teyssier, 2002) に、「初代星形成」と「ブラックホール降着」のモデルを新たに組み込み、初代銀河と巨大ブラックホールの共形成シミュレーションに必要なコードを完成させた。さらに、国立天文台 XC50 を用いて大規模輻射流体シミュレーションをおこない、これまでにない現実的な設定で初代銀河と巨大ブラックホールの共形成過程を計算機の中で再現することに成功した。その結果によると、特に、形成初期の低質量銀河においては、初代星起源のブラックホールも、あまり成長せず低質量のまま銀河中心ブラックホールではなく銀河内を浮遊するブラックホールとして存在した。まもなく最終結果が得られるので、その成果を論文にまとめて学術誌「Monthly Notices of the Royal Astronomical Society」に投稿予定である。

さらに、計画段階では構想されていなかったテーマであるが、初代星の次の世代の星は低金属星団として形成すると考えられているため、初代銀河と巨大ブラックホールの共形成シミュレーションに、受け入れ教員の Ricotti 氏らのシミュレーション結果に基づく低金属星団形成のモデルを組み込むというプロジェクトが新たに始まっている。これにより、これまで以上に現実に近い設定で初代銀河と巨大ブラックホールの共形成過程について調べることが可能になり、研究分

野に新たな展開がもたらされると期待される。このように、本研究は、所期の目的の達成にとどまらず、当初は考えられていなかった新たな研究テーマへとつながることになった。