

令和 2 年 4 月 1 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 H30

受付番号 201860043

氏 名

櫻井 祐也

(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： ジョージア工科大学 （国名： アメリカ合衆国 ）

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。

初期宇宙の超巨大ブラックホール起源：星団内での種 BH 形成と成長3. 派遣期間：平成 30 年 4 月 1 日 ～ 令和 2 年 3 月 31 日

4. 受入機関名及び部局名

ジョージア工科大学、School of Physics5. 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、英語で記入も可)

(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。

研究成果 1：初代星団中での星の潮汐破壊現象による中間質量 BH 成長

背景・目的 Sakurai et al. (2017)では、宇宙論的初期条件から形成された星団中で、星の暴走的衝突により中間質量ブラックホール（BH）が形成される可能性を、N 体シミュレーションを使って示した。今回の研究（Sakurai, Yoshida & Fujii 2019、以下 SYF19）では、この中間質量 BH が形成した後の BH と星団の進化を明らかにする目的で、星団中での星の力学的運動について N 体シミュレーションを使った研究を行った。特に BH による星の潮汐破壊現象と BH の質量成長、星団とダークマター（DM）の相互作用に着目して研究を行った。

手法 N 体シミュレーションの初期条件として、Sakurai et al. (2017)の 8 つの星団の最終状態データ群を使った。このデータ群は、星団中の最も重い星の重力崩壊により中間質量 BH が形成した直後の、星団中の星分布と DM 分布のデータ群である。これらの初期条件から、N 体シミュレーションコードの BRIDGE (Fujii et al. 2007) を使って、動的に動く DM 中での星団の進化を追った。

結果 このシミュレーションで、星団中での mass segregation（重い星ほど星団の中心に集中する現象）によって、中心の中間質量 BH による大質量星の捕獲が効率よく起き、中間質量 BH による星の潮汐破壊が引き起こされる様子が明らかになった。潮汐破壊現象の発生率が中間質量 BH の 2 乗に比例し、1000 太陽質量の BH に対し 100 万年に 0.3 回の頻度であることが示された（図 1）。

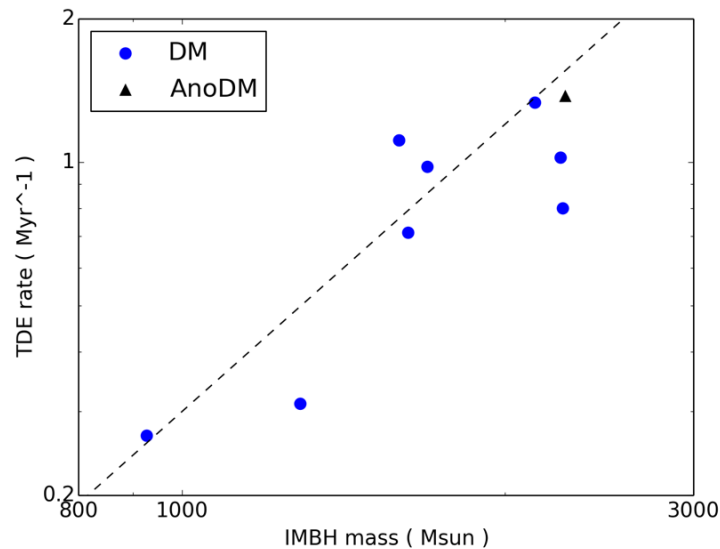


図 1 中間質量 BH 質量（横軸）と潮汐破壊現象発生率（縦軸）の関係。青丸と黒三角はそれぞれ DM あり・なしのシミュレーション結果を表す。破線は中間質量 BH 質量の 2 乗によるフィッティング。

また、DM が星団外部にある星を剥ぎ取ることによって、星団質量が減少し、星団の寿命が縮まる可能性があることが明らかになった。さらに、星団内部の DM 密度が上がると、星の速度分散が大きくなり、潮汐破壊現象の発生率が小さくなることも分かった。

星の潮汐破壊現象によって、中間質量 BH は 1500 万年以内に 700-2500 太陽質量まで成長する（図 2）。これらの星団中の中間質量 BH は、その後銀河との合体で誘起されるガス降着や大規模構造からのガス降着によって、赤方偏移 6-7 以遠に観測されている超巨大 BH に成長する可能性がある。ガス降着がその後起こらない場合には、現在の宇宙に中間質量 BH そのままの姿で残ると考えられる。

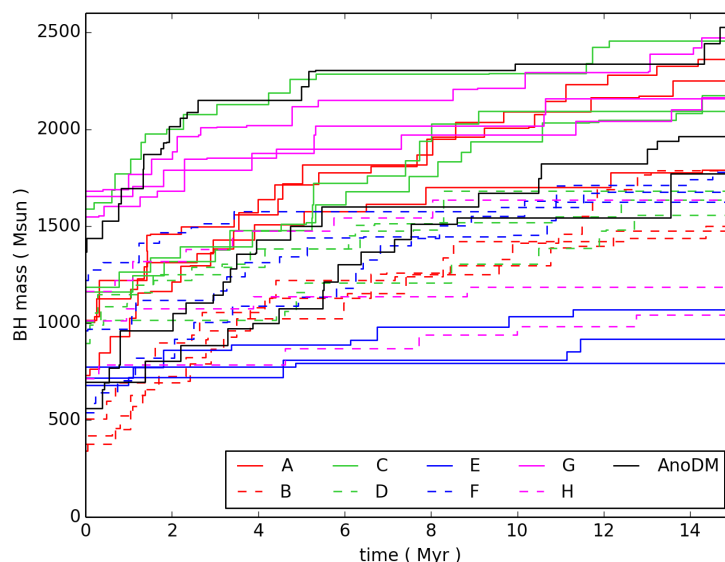


図 2 星の潮汐破壊による中間質量 BH の質量成長。

成果 以上の研究結果を、英文学術論文としてまとめ、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society に投稿し、受理・出版された (SYF19)。また以上の研究結果を、国際研究会 Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars、Star Clusters: from the Milky Way to the Early Universe にて口頭発表、Challenges and Innovations in Computational Astrophysics にてポスター発表した。

研究遂行状況 1：大規模宇宙論的シミュレーションによる超大質量星形成

背景・目的 超大質量星形成は、強い Lyman-Werner 輻射（11.2-13.6 電子ボルト）が照射されることで水素分子が解離され、水素分子冷却が抑制されている、温度1万度程度と高い原子冷却ハローのような特殊な環境下でのみ、起きると考えられていた。John et al. (2019)は、大規模な宇宙論的シミュレーションを行い、ガスの乱流による力学的加熱を考慮に入れると、超大質量星形成がこれまで予想されていた以上に頻繁に起きる可能性を示した。これにより、赤方偏移 6-7 以遠に観測されている超巨大 BH の種が従来予想されていたよりも多く形成される可能性が示された。

この研究では、数値的な困難のため、超大質量星の種となりうる原始星形成の直前で計算を止めた。しかし、このような原始星前駆体が周囲のガス降着により質量を増して超大質量星まで成長するか否かまでは明らかではない。原始星からの輻射による電離加熱（輻射フィードバック）によって、周囲から降り注いでくるガスの落下運動が妨げられ、ガス降着が止められてしまう可能性がある。超大質量星形成を直接的に示すためには、原始星がガス降着で成長する段階の進化を流体シミュレーションにより追う必要がある。本研究では John et al. (2019)で得られた原始星前駆体のシミュレーションデータを使って、超大質量星形成が起きるか否かを直接的に示す。

手法 3次元流体 AMR (adaptive mesh refinement) 法シミュレーションコード Enzo (Bryan et al. 2014) を使い、原始星前駆体のデータである John et al. (2019)の出力データを初期条件として、星へのガス降着段階のシミュレーションを行う。

原始星が生まれて密度が高くなると、シミュレーションの時間幅が短くなりすぎて計算が進まなくなる。この困難を回避するために、高密度な原始星周辺領域をシンク粒子に置き換える。原始星はサブグリッドでその進化をモデル化する。すなわちシンク粒子に流入するガスの質量降着率をもとに星の質量・半径・表面温度・光度を計算し、原始星から放出される輻射の量とスペクトルを見積もる。

結果の予想・今後の予定 原始星への質量降着率が平均的に高く成長が速い場合には、星の半径が大きく表面温度が低くなるために、電離光子放出量が小さく原始星による輻射フィードバックは弱く、ガス降着は妨げられないと予想される (Hosokawa et al. 2013, Sakurai et al. 2015)。この場合、ガス降着が続き、超大質量星形成が実現される。逆に原始星への質量降着率が平均的に低い場合、星の半径が小さく表面温度が高くなるために電離光子が大量に放出され、輻射フィードバックによりガス降着が妨げられてしまうと考えられる。この場合には超大質量星は形成されない。

今後の計算では、原始星が超大質量星まで成長できるか否かを議論していく。特に質量降着率が超大質量星形成の可否を決める重要な量であることから、この降着率が原始星周辺ガスの性質と原始星からの輻射フィードバックの強さの兼ね合いによってどのように決まるのかについて議論を行う。

研究遂行状況 2：DM が重力相互作用により星集団に与える影響の精査

背景・目的 近年の観測技術の目覚ましい向上により、局所銀河群における、星団や暗くて星質量が低い伴銀河（以下矮小銀河と呼ぶ）の観測が増えている (Laevens et al. 2015)。このような観測から指摘されているように、星団と矮小銀河の性質は類似している。これら2つの天体の区別は曖昧である。

従来の研究の多くでは、着目する天体を星団として扱うか、矮小銀河として扱うか

によって、研究アプローチが異なる。星団として扱う場合、星団の構造や運動力学的性質の起源、星団形成・進化の過程について、研究の焦点が当てられる。矮小銀河として扱う場合、付随するダークマター (DM) の性質や、ミッシングサテライト問題のような銀河形成モデルにおける未解決の問題に、焦点が当てられる。

N 体シミュレーションを用いた研究においても、星団を扱うか矮小銀河を扱うかによって、研究アプローチが2分されている。星団を扱う場合には、DM がない、2 体緩和が無視できない衝突系が考えられる。矮小銀河を扱う場合、DM 重力が重要となる無衝突系が考えられる。

しかし、これら2天体の区別が曖昧であることを考慮すると、衝突系である“星集団”と同時に DM を考慮することが望ましい。実際、DM の存在を考慮した星集団の進化の N 体シミュレーションによると、最初に星団とみなされていた星集団が、進化によって矮小銀河とみなされる可能性があることが指摘されている (Varri, AL., private communication)。これは、DM 重力が星集団の速度分散や半径のような性質を変化させるためである (SYF19)。

現在、星集団と DM の相互作用についての N 体シミュレーション研究は少ない。特に、DM を背景重力場として考慮した計算はあるが、DM が動的に動く場合の計算で、DM の性質 (特に全質量) によって星集団への影響がどのように変化するかを系統だって明らかにした例はない。

本研究の目的は、①DM の動的な運動を考慮した星集団進化の N 体シミュレーションを行い、DM 全質量によって星集団進化がどのように変化するかを明らかにすること、②星団と矮小銀河の既存の観測結果と比較して、これらの天体に付随する DM の性質について明らかにすること、である。

手法 星粒子と DM 粒子を同時に扱える N 体シミュレーションコード、BRIDGE (Fujii et al. 2007) を使う。このコードは、星の重力計算を6次のエルミート積分法 (Nitadori & Makino 2008) で直接的に正確に解く。また、DM の重力計算をツリー法 (着目粒子から遠い粒子の重力をまとめて計算して計算速度を上げる手法) により解く。このコードによって、星と DM の重力相互作用を整合的に計算することができる。

星集団と DM の系の初期条件を、多成分の場合に整合的に初期条件を生成することができるコード、MAGI (Miki & Umemura 2018) により生成する。星集団の分布としてスケール半径 1 パーセクの Plummer モデルを採用する。また、DM の分布としてはスケール半径 100 パーセクの Hernquist モデルを採用する。星粒子の質量分布として、一定 (1 太陽質量) の場合と、Kroupa 初期質量関数に従う場合 (0.5-100 太陽質量) を考える。ここで後者の場合の星の最低質量は、非物理的な振る舞いが起こらないように、DM 粒子の質量 (0.01 太陽質量) より十分大きくとった。星の数として $N=1000$ を考える。星の全質量は 1000 太陽質量程度となる。DM 粒子の質量は 0.01 太陽質量に固定する。DM の全質量が $0, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7$ 太陽質量 (DM 粒子数 $0, 10^6, 10^7, 10^8, 10^9$) のモデルを考える。まとめると、等質量と Kroupa 初期質量関数の2種の星分布モデルと、異なる質量を持つ5種の DM モデルの組み合わせで、計 10 個のモデルを考える。結果の統計誤差を小さくするために、各 10 個のモデルそれぞれについて、異なる乱数を使って 5 個の初期条件を生成し、5 回シミュ

レーションを行う。合計 50 回のシミュレーションを行う。

結果の予想・今後の予定 計算の解析で、星集団の half-mass 半径と平均速度分散を見積もる。平均速度分散が half-mass 半径の $-1/2$ 乗に比例し、half-mass 半径内の星+DM の質量の $1/2$ 乗に比例するので、half-mass 半径を横軸、速度分散を縦軸に図を作成すると、DM の質量が大きいほど速度分散が大きい様子が見られると予想される。この図に、シミュレーションの結果得られた星集団の進化をプロットし、解析的な式による予想と合致するか否かを示す。

星集団の平均速度分散は、DM の動きによって影響を受けることが予想される (SYF19)。固定半径内や球殻内における DM 量の進化 (例えば 10pc 以内、10-30pc の間など、SYF19 図 13 参照) を調べることにより、DM がどのように動くかを示し、星集団の速度分散にどのように影響するかを示す。特に DM が内側領域で質量を増すように動いた場合には、星集団の速度分散が大きくなり、half-mass 半径-速度分散図の上において DM の全質量が見かけ上大きく見えるようになると予想される。

Half-mass 半径-速度分散図上に、観測されている星団や矮小銀河のデータ (Harris 2010, McConnachie 2012, Mieske et al. 2013, Norris et al. 2014) をプロットし、シミュレーション結果・解析的な式と比較する。この比較により、観測天体に付随する DM 質量を見積もることができる。