

論文審査の結果の要旨

氏名 櫻井 祐也

本論文は 6 章からなり、1 章では銀河中心に存在する超大質量ブラックホールについて、その遠方宇宙における観測結果と生成機構に関する現在の理解が示される。その生成機構について、強い輻射場により水素分子が分解し、水素原子輝線でしか冷却の起こらない水素原子冷却ハローでの間欠的な質量降着量により超大質量星が生成する過程を、2 章では一次元の半解析的手法で、3 章では 2 次元の流体シミュレーションに基づいて論ずる。4 章では、中間質量ブラックホールにたいし、エディントン限界を越える質量降着が起きる条件を論じ、5 章では、宇宙初期の星団において衝突合体で大質量星が形成される可能性を調べ、6 章では結論が述べられる。

現在の宇宙の観測により、ほとんどの銀河の中心部に活動銀河核すなわち超大質量ブラックホールが存在すること、また過去に遡った場合、赤方偏移 >6 、宇宙開闢から 10 億年以内において、 10^9 太陽質量以上の超大質量ブラックホールが生成されていたことが明らかになっている。また、これらは単純に放射圧が重力とつりあうエディントン光度とほぼ同等の光度をもっている。このことから、宇宙開闢 1 億年程度で、100~10000 太陽質量の大質量ブラックホールが生成されたと考えられるが、現在の宇宙ではそのような大質量ブラックホールは形成されていない。したがって、初期宇宙に特異的なブラックホール形成・成長過程があり、それが銀河形成と密接に関わっていると推定されているが、その過程は明らかではない。本論文では、現実的な物理過程を想定した数値計算により、現在提唱されている有力なシナリオ 3 つについて、その成立性の検証を試みている。

最初のシナリオは、"Direct Collapse"モデルと呼ばれるもので、原初ガス雲は、重元素を含まず、また強い輻射場により H_2 分子の形成が抑制されて、重力収縮中は水素原子による放射冷却しか寄与せず、8000K 程度の"Atomic-Cooling"ハローとする。質量降着率が音速によって決まる 0.1 太陽質量/年程度を保つことができれば 100 万年程度で 10^5 太陽質量に達する。それが重力崩壊によりブラックホールとなり、その後エディントン限界程度の質量降着により超大質量ブラックホールを形成する。降着が連続的でなく、一度降着が止まると、星の半径は収縮し、温度上昇による強い紫外線放射がさらに降着を妨げるフィードバック機構が働く可能性がある。本論文では、まず一次元で星の内部状態を解き、人為的に 1000 年以上降着を止めた場合、このフィードバックが無視できないことをしめした。さらに 2 次元の流体シミュレーションにより降着円盤を再現し、重力不安定によるガスの分裂がもたらす間欠的な降着がフィードバック機構の発現しうるかを調べた。平均的に 0.1 太陽質量/年程度の降着率の場合にはフィードバックは働かず、Direct Collapse は可能であることを示した。

次に、重元素を含まないガスハローから最初にできた Population III の星のうち、大質量のものが 100 太陽質量程度のブラックホールを形成し、それが超大質量ブラックホ

ールの種となることを考える。この場合には、初期ブラックホールはエディントン限界を越えた質量降着を継続せねばならない。本論文では、先行研究(Inayoshi, Haiman and Ostriker 2016)を発展させ、一次元の物質降着と放射をシミュレーションおよび解析的に解くことで、降着ガスがラム圧と重力で落下するなどの条件を満たした場合に、エディントン限界の 10000 倍程度の“Hyper Eddington”降着率が安定解として存在しうることを示した。

最後に宇宙初期の星団規模のガス雲の中で星形成が行われ、さらに星同士がランダム運動により衝突合体し巨大星ができるという”Runaway Collision”の検証を行なった。SPH 法による構造形成シミュレーションから赤方偏移 10~20 の時代に星団規模の Atomic Cooling ハローを抜き出し、星形成率と初期質量関数を仮定して初期星の質量、空間、速度分布を生成した。適切な星形成率により、大質量星の寿命である 300 万年程度以内に 1000 太陽質量程度的大型星ができうるという結果を得、これは観測されている銀河質量と超大質量ブラックホールの質量比を良く説明する。Atomic Cooling ハローでの、具体的な星の誕生時の分布を仮定したシミュレーションは初めてである。

本論文により、宇宙初期における超大質量ブラックホールの形成について、3つのシナリオがいずれも成立しうるということがわかった。どのような過程であるかを決定はしていないが、それぞれについて、成立しうる物理的な条件を制限したことの意義は大きい。

なお、本論文は共同研究であるが、論文提出者が主体となって計算・解析を行ったもので、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。