

論文審査の結果の要旨

氏名 鄭 昇明

本論文は 7 章からなる。第 1 章は、イントロダクションであり、高赤方偏移において次々と発見されている超大質量ブラックホールの形成モデルの理論的困難と本論文においてそれをどのように解決しようとするかが概観される。観測から、ほぼ全ての銀河の中心に超大質量ブラックホールが存在することが確立している。したがって、これは宇宙の構造進化における普遍的な問題である。

第 2 章は超大質量ブラックホールの形成モデルのレビューである。放射圧から決まる質量降着率であるエディントン限界のために、宇宙初期にすでにある程度大きな質量を持つブラックホールの種が存在しなくては、すでに 100 個を超える $z > 6$ での超大質量ブラックホールは、時間不足のために形成できない。提案されている形成モデルは、超大質量星を経由する経路としない経路の 2 つに分類される。水素分子によって冷却・崩壊する通常の始原的ガス雲から誕生する大質量星は $z=30$ で $100M_{\odot}$ 程度の質量だと考えられている（種族 III シナリオ）。一方で、始原的ガス雲の中でも主に水素原子準位の遷移によって冷却するものは 10^5 から $10^6 M_{\odot}$ の大質量星となると予想されている。このような星は一般相対論的な不安定のため、ほぼ同質量のブラックホールに崩壊すると考えられる（直接崩壊シナリオ）。後者の場合、初期条件となるブラックホールの質量が大きいため、 $z=6$ までに観測されている 10^8 から $10^9 M_{\odot}$ の超大質量ブラックホールに成長することが可能となる。

本論文では、この直接崩壊モデルの前提となる 10^5 から $10^6 M_{\odot}$ の大質量星が本当に形成されるかどうかを、4 つの異なる状況に分けて系統的なシミュレーションを行った。まず第 3 章では、重力のみを考慮した宇宙論的 N 体シミュレーションを用いて、大質量星形成候補となるダークマターハローを 4 2 個同定した。第 4 章では、このダークマターハローの付近を高空間分解能の流体力学シミュレーションを行い、ガスの熱的および流体力学的進化を詳細に調べることで、4 2 個中大質量星形成が起こる可能性があるのはわずか 2 個であることを見出した。これは主として、近傍銀河による潮汐破壊のためである。この 2 例はむしろ特殊な場合で、崩壊する直前のガス雲同士の衝突・合体のために、崩壊が促進させたものと解釈される。この結果、大質量星形成率は従来の研究の予想よりは桁程度小さくなる。

これらの始原的ガス雲の進化においては、電離放射の影響が重要であるため、第 5 章では、近傍の星形成銀河からの電離放射の影響についても詳しく調べた。原始冷却ガス雲が密度の低いボイド領域に存在する場合は電離放射によってガス雲が熱せられ、蒸発してしまうことがわかった。しかし実際には、ガス雲は比較的密度の高いフィラメントに沿って光源銀河に近づいて行くため、電離放射の影響は小さくほとんど無視できる。

第 6 章では、崩壊した 2 例のガス雲についてそこで形成された原始星コアがどのように成長するか、流体計算を用いて質量進化を 10 万年間計算した。その結果、光源銀河の

潮汐力が原始星の成長にも大きく影響することを見出した。2例のうち1つは強い潮汐力のためフィラメント状に引き伸ばされ、 10^3 から $10^4 M_{\odot}$ の質量を持った大質量星約10個を形成した。もう一つは潮汐力を受けずほぼ球対称崩壊して、数個の 10^4 から $10^5 M_{\odot}$ の大質量星となった。これらの大質量星は、水素燃焼中の一般相対論的不安定、あるいは水素燃焼後の崩壊によって、ブラックホールとなるであろう。

第7章は、本論文のまとめと今後の展望である。今回、直接崩壊シナリオの予言する種ブラックホール形成を宇宙論的に初めて数値計算した結果、種ブラックホールの個数密度は以前より1桁程度小さい $\sim 10^5$ 個 Gpc^{-3} となった。ただし観測されている $z > 6$ のクエーサーの数密度に比べると5桁程度大きい。種ブラックホールが、その後どのように超大質量ブラックホールに成長するか、さらにそのうちクエーサーとしての高い活動性を示す割合はいくらかなどを、今後の課題として述べている。

なお、本論文第3章と第4章は吉田直紀、細川隆史、平野信吾との、第5章は Muhammad Latif との、第6章は吉田直紀、細川隆史との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、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。