

論文審査の結果の要旨

氏名 長 倉 隆 徳

本論文は5章からなる。第1章は、イントロダクションであり、初期宇宙における星形成過程の解明の重要性、なかでも第二世代星の形成に対する第一世代星の影響をあきらかにしようとする本研究の動機と目的が述べられている。

第2章では、初期宇宙での星形成を示唆する観測的証拠を述べたあと、膨張宇宙の中で暗黒物質のハローが形成されその中から第一世代の星が形成される過程をこれまでの研究を引用しつつ物理的考察を加えて説明している。第一世代の星が形成されたことによる次世代の星形成への影響には、星からの輻射の影響、爆発や星風などの力学的効果、および星で作られた重元素による化学的効果があり、本研究の目的がこれらの影響を考慮した第二世代星形成の可能性とその条件を調べるものであることが示されている。

近年の3次元シミュレーションから第一世代星は非常に重く100–1000太陽質量であったと考えられている。それらの第一世代星は数百万年で寿命を迎えるが、その質量によって直接ブラックホールになる場合と超新星爆発を起こす場合に分けられると考えられるので、それぞれの場合についてその後の星形成の条件が調べられた。

第3章では、直接ブラックホールになる場合に後に取り残された電離領域中で星形成が可能かどうか調べられた。先行研究では、ハロー中の水素分子が星からの輻射で完全解離されており、ブラックホール形成後もガスは高温のまますべてハローの外に流出してしまうため、星形成は起こらないとされていた。本研究では、非平衡化学反応を考慮した球対称流体のシミュレーションを行って、 10^6 太陽質量以上のハローでは中心部で電離ガス中の自由電子が触媒となって水素分子が形成され、その冷却効果で温度が低下したガス中でHD分子が作られることでさらに温度が100K以下に下がる。そのため第一世代の星と組成は同じだが第一世代星よりは質量の小さい星が形成されることが示された。また、これらのガスはHD分子で温度が下がるとは言え、宇宙背景放射の温度以下には下がりえないため、作られる次世代星は現在の典型的な質量(~ 1 太陽質量)に比べかなり大きく、数十太陽質量となる可能性があることが示された。

第4章では、超新星爆発が起こる場合に爆発によって形成されるシエルの力学的・熱的進化を爆発エネルギー $E_{\text{SN}} (= 10^{51}, 10^{52} \text{ erg})$ と周囲の数密度 $n_0 (= 0.1, 1, 10 \text{ cm}^{-3})$ および重元素量 $Z (= 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2} Z_{\odot})$ をパラメータとして調べ、膨

張減速シエルの線形解析を用いて重力不安定によるシエルの分裂の条件が議論された。その結果、すべての重元素量にたいして $(E_{\text{SN}}, n_0) = (10^{52} \text{ erg}, 10 \text{ cm}^{-3})$ と $(E_{\text{SN}}, n_0) = (10^{51} \text{ erg}, 10^3 \text{ cm}^{-3})$ のときにシエルが分裂することが分かった。

この条件はシエルを一層で近似した先行研究に比べれば高い周囲の数密度を要求するものである。重力不安定を起こすためにはシエルの温度が十分に冷えることが必要で、爆発のエネルギーと周囲の密度が高いほど、シエルに取り込まれるガスの質量が大きくなりシエルの密度も高くなるため放射冷却が効いて分裂しやすい。先行研究ではシエルの温度は水素分子と HD 分子による放射冷却によって下がると考えられていたが、シエルの構造変化を詳細に調べた本研究によって、シエルの周縁部では放射冷却が効くがシエルの中央部はシエル自体の断熱膨張による冷却効果が支配的なことが分かった。シエル周縁部での冷却は周囲の密度が高くシエルの密度も高くないと効かないため、周囲の密度が低いときにはシエルを一層で近似した場合よりも温度が高く分裂しにくい。

重元素量の影響も詳しく議論され、太陽組成の1%程度以上に多い場合には炭素と酸素の微細構造遷移による放射冷却が有効に働く一方で、宇宙背景放射による加熱も効くため、ガスの温度は背景放射温度程度になる。一方、重元素量が少ないときは背景放射による加熱は効かず、断熱膨張による冷却で10K近くまで下がる。どちらの場合でも重力不安定による分裂が起こりうる温度まで下がるために、シエルの分裂条件としては、重元素量はほとんど関係なく、周囲の密度と爆発のエネルギーがより重要であることが示された。

第5章でこれらの結果が簡潔にまとめられており、補遺として超新星シエルの古典的モデルや膨張減速シエルの不安定性の線形解析、さまざまな放射冷却過程と計算で使用した化学反応のリストが付けられている。

以上、本論文は、大質量の第一世代星の影響、すなわち、星からの輻射と非平衡化学反応による冷却の効果、爆発によって形成されるシエルの温度や密度変化について、詳細な研究を行ない、第二世代星の質量について、新たな定量的な結果を得た。このような、本論文の結果は、宇宙初期での星形成、特に、第二世代星形成の研究に新しい知見をあたえる重要な貢献であると高く評価できる。

なお、本論文第3章は大向一行との共同研究であり、第4章は大向一行・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計算及び結果の検討と考察を行ったもので、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ものと認める。