

本論文はビッグバン後の最初の天体である始原星（種族 III）の形成、とりわけその質量分布についての新たな知見を示したものである。

第1章はイントロダクションであり、本研究が目標とする始原星の質量分布の導出は、宇宙の再電離や化学進化の研究にとって本質的に重要であることが述べられている。始原星からの紫外線放射や爆発的元素合成は星質量に強く依存するため、宇宙初期の研究には始原星の典型的な質量を求めるだけでは不十分で、質量分布を導出する必要があることが強調されている。最近、 $\Lambda$ CDM 宇宙における始原的星形成ガス雲の中で形成される原始星進化の数値計算に注目が集まっているが、始原星の質量の導出についてはまだ数例の先行研究しか無く、質量分布の導出についての先行研究は無い現状が紹介されている。この現状に鑑みて、本研究では $\Lambda$ CDM 宇宙論的シミュレーションを用いて多数の始原的星形成ガス雲をサンプルとし、それを初期条件として雲の熱進化を3次元流体計算で追跡する。原始星コアが形成された後は、2次元放射流体計算に切り替え、降着円盤からの質量降着で成長する原始星の進化を計算する。始原的星形成ガス雲の多様性を反映して、星の最終質量は広い範囲にわたり、それによって始原星の質量分布を具体的に求めるという本研究の一貫した方針が表明されている。

第2章では、まず110個の始原ガス雲をサンプルとし、外部放射を考慮しない場合のガス雲の熱進化とそれに続く原始星の進化の計算結果が述べられている。その結果、原始星の進化は質量降着率の大きさに応じて三種類に分類されることが明らかにされた。降着率が低い場合、質量増加に伴ってヘルムホルツ・ケルビン収縮が進み、星の表面温度が上昇すると電離領域が膨張して降着ガス円盤が蒸発して降着が止まる。降着率が大きくなると降着ガスの重力エネルギー解放により星の収縮が止まり膨張に転ずるが、膨張でエネルギーを失うと再び収縮する。降着率が更に大きくなると、星の内側が収縮する一方で外側は膨張し表面温度が下がるため、放射フィードバックは効かず、原始星は大質量星にまで成長する。このような質量降着率の大きさの違いによって、星の最終質量は $10 M_{\odot}$  から  $1600 M_{\odot}$  の範囲に及ぶとの結果を得た。この場合、星の最終質量は、始原ガス雲が重力不安定になった時点でのガス質量落下率と非常に良い相関があることを見出した。また、外部放射として高い強度の紫外線放射を仮定し、主要な冷却源である水素分子 ( $H_2$ ) や重水素化水素 (HD) の一部が光解離される場合でも、星の最終質量とガス質量落下率には同様の相関があることを見出した。この結果に基づいて、外部放射の有無にかかわらず、始原的星形成ガス雲の質量落下率を求めさえすれば、星の最終質量を見積もることができるという重要な提案がなされた。

第3章では、大規模の $\Lambda$ CDM 宇宙論的シミュレーション領域内に存在する全ての始原的星形成ガス雲を取り出し、空間的にバイアスの無いサンプルを構築する手順が詳細に説明されている。全サンプルは1540個からなり、赤方偏移は30から10の範囲（ピークは約20）に分布し、質量は $2 \times 10^5 M_{\odot}$  から  $1 \times 10^6 M_{\odot}$  の範囲（ピークは約 $3 \times 10^5 M_{\odot}$ ）に分布している。このサンプルに対し、外部放射を考慮しない場合の計算を行った結果、ガス雲が重力不安定になった時点でのガス質量落下率の分布には $3 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{年}$  と  $1 \times 10^{-4} M_{\odot}/\text{年}$  にピークが現れることを見出した。高落下率側の分布は $H_2$  冷却が効いて熱進

化するガス雲の寄与であり、低落下率側の分布は HD 冷却が効いて比較的低温の状態での熱進化するガス雲の寄与である。前章で求めた星質量とガス質量落下率の関係式を使うと、これらのピークはそれぞれ星質量が  $264 M_{\odot}$  と  $24 M_{\odot}$  に対応する。この結果に基づいて、宇宙論的サンプルでは HD 冷却によって数十  $M_{\odot}$  の始原星が数多く形成されていることが示された。

第 4 章では、前章の計算を発展させ、外部放射を考慮した場合のガス雲の熱進化の計算結果が述べられている。まず、前章で構築した全サンプルの位置と赤方偏移、その位置で形成される始原星からの紫外線放射に基づいて、宇宙空間における局所的な紫外線放射強度を赤方偏移の関数で求めている。それを外部放射として各ガス雲の熱進化を計算し、重力不安定になった時点でのガス質量落下率を求めている。このようにして全サンプルに対するガス質量落下率の分布を求め、それを質量に対応付けて、最終的に、始原星の質量分布を赤方偏移の関数として導出することができた。外部からの紫外線放射強度が高く、その影響を受けて形成された始原星は  $z > 15$  の高赤方偏移側に限定され、その質量分布は約  $400 M_{\odot}$  に鋭いピークを持つことが示された。他方、外部からの紫外線放射強度が低く、その影響をほとんど受けないで形成された始原星の質量分布は約  $250 M_{\odot}$  と約  $25 M_{\odot}$  を中心とする二つの部分からなることが示された。前者の大質量星の赤方偏移は  $30 > z > 10$  の全範囲にわたるが、後者の比較的low質量星の赤方偏移は  $z < 15$  に限定されるという注目すべき結果が得られた。

第 5 章は本論文のまとめと将来への展望である。

以上に述べたように、本論文は始原的星形成ガス雲の多様性を反映して、従来考えられていたよりも遥かに広い質量範囲で始原星が生まれることを数値計算で明らかにしたもので、今後の宇宙進化研究に重要な示唆を与えたものとして、高く評価できる。なお、本論文は細川隆史氏、吉田直紀氏、梅田秀之氏、大向一行氏、千秋元氏、Harold W. Yorke 氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析・結果のまとめを行ったもので、論文提出者の寄与は十分である。

従って博士（理学）の学位を授与できると認める。

## 最終試験の結果の要旨

氏名 平野 信吾

成績 合格

本委員会は、論文提出者に対し平成 27 年 1 月 16 日、学位論文の内容及び関連事項について、口頭試験を行った。

その結果、論文提出者は、天文学特に理論天文学について博士（理学）の学位を受けるにふさわしい十分な学識をもつものと認め、審査委員全員により合格と判定した。