

## 論文審査の結果の要旨

氏名 千秋 元

本論文は6章からなり、1章では低金属星の宇宙進化に置ける意義と、これまでの低質量低金属星の形成過程に関する研究のレビュー、本論文の目的が示される。2章では低金属ガスの冷却で重要な役割を果たす反応と冷却効率、3章では初期宇宙でのガスの収縮と、そこに水素ヘリウム以外の重元素が含まれ、ダストが形成された場合の冷却過程の役割と低質量星の元となるガスの分裂がおきる条件が示される。4章では、ガスの収縮のシミュレーションにおいて、より詳細な構造を再現するための新たな手法が提示される。5章では、2から4章の結果を組み込んだ3次元シミュレーションによって、ガスの収縮による低質量低質量星の生成について、特にガスの冷却による分裂がおきる条件が詳しく調べられ、単純化した解析計算により冷却過程の効果が評価される。そして6章では結論が述べられる。

宇宙初期の化学組成はほぼ水素とヘリウムのみであり、それより原子番号の大きい重元素（宇宙物理学では「金属」と称される）は星による核反応で形成されたと考えられている。宇宙初期の最初の銀河では、重元素を含まないガスから大質量星が生成され、超新星爆発により重元素を生成して消滅したと考えられるが、このような星は寿命も短く観測されていない。現在観測される最も古い星は、太陽組成の1/1000以下しか重元素を含まない低質量低金属星である。本論文では、この低質量低金属星が実際に初期宇宙でどのように形成されるのか、そのための条件は何か、を明らかにしようと試みている。

これまでの研究により、太陽質量程度の小さなガス雲を生成するには、初期密度ゆらぎを種としてガスが収縮し、密度が上がるほど放射冷却でより収縮する、ことでガスを非対称につぶす elongation とある密度以上では温度が上昇することで、引き伸ばされたガスを分裂させる fragmentation が必要であると考えられている。すなわち、ガス雲の熱化学進化における放射冷却効率のガス密度による違いが重要である。本論文では、放射冷却過程として、分子の遷移による輝線放射、ダストの生成と成長による大きさの変化を考慮した放射、水素原子と分子の3体過程による放射と加熱を考慮した。また、初期条件として、宇宙初期大質量星 (Pop III) による最新の超新星爆発のモデルに基づき、太陽組成の1000分の1から100万分の1の範囲で元素・ダスト量  $Z_{\odot}$  を仮定し、ダストの成長を評価した。

このようなガスの収縮を SPH 法でシミュレーションを行う場合、大きなガス雲から低質量星に相当する小さな質量まで追うには、同じ質量の粒子を仮定するのではなく、高密度になるにしたがって粒子質量を分裂させることが必要となる。本論文では、親粒子から娘粒子を生成する際に、等間隔に配置するのではなく、ポロノイ図に基づいて密度を保って配置することとした。これにより、高密度コアにおいて粒子分割により密度ピークがなまされることが無くなり、より現実にちかい非対称構造が現れる。

これらの手法を組み合わせ、さらに初期状態のガス分布として、球対称だけではなく、宇宙論シミュレーションに基づく赤方偏移 15-20 の 10 万太陽質量程度のミニハローを 3 個仮定し、様々な重元素量において 3 次元 SPH 法により低質量星の生成される境界条件を探した。初期のガス分布により収縮のタイムスケールは異なるが、それを単純な自己相似解との比により定量化し、パラメータ  $f_0$  とした。 $f_0$ - $Z_{\odot}$  平面上で fragmentation が起こる条件をプロットすると、複数の場所に散らばる。fragmentation としては disk 状と filament 状の 2 通りがあるが、これまで単純な例でしか考察されてこなかった filament 状について特に着目し、寄与する素過程と低質量星形成の条件を考察した。ガス収縮の各段階を支配する放射過程を調べると、最後の elongation にはダストによる放射冷却が寄与し、それ以前に OH からの冷却による elongation が水素分子形成の加熱により一様化されるか、という拮抗過程が重要であることがわかった。さらに単純化したワンゾーン計算で分裂条件を求めると、 $f_0$ - $Z_{\odot}$  平面上でダストによる冷却と水素分子形成の加熱過程のバランスで決まる領域と、OH による冷却効率が高く水素分子による加熱効果を打ち消せる領域の 2 つが現れ、SPH シミュレーションによる結果を説明することができた。

本論文により、初期宇宙におけるガス分布のゆらぎ、大質量星による最初の重元素を取り込んだ 3 次元シミュレーションにより、収縮ガス雲の熱化学進化を追い、低質量低金属星の形成条件が示され、その物理過程の理解がなされた。これは初期宇宙での星形成の具体的な過程を再現し、理解する試みであり意義は大きい。

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。