

概要

本論文では、宇宙初期に形成される第一世代の星（初代星）の形成過程で重要な要素である乱流と磁場に関する理論的研究を行う。解析的推定と数値シミュレーションの結果を比較することにより、乱流と磁場の詳細な増幅・飽和メカニズムを明らかにすることを目指す。

Λ CDM パラダイムにおける理論的研究では、初代星は赤方偏移 $z \gtrsim 10$ のダークマターミニハローで形成されると予測されている。このような始原環境において、初代星は天の川銀河のような現在の星形成環境よりも質量で 2-3 桁、温度で 2 桁高いガス雲内で生まれると考えられている。結果として、初代星の初期質量関数 (IMF) は現在の星形成領域の観測から得られる IMF に比べて大質量にピークを持つ、top-heavy な分布をしていると予想される。近年の JWST などの高解像度観測機器による超高赤方偏移の観測では、この初代星起源と考えられる top-heavy な IMF を支持するような明るい銀河が多数観測されている。一方で、もし 0.8 太陽質量以下の低質量初代星が存在すれば、その星の寿命は宇宙年齢よりも長い場合、現在の天の川銀河系内で直接観測可能であると考えられているが、そのような初代星も現在観測されておらず、低質量初代星が存在しないことを示唆している。また、初代星の残骸から生まれる超金属欠乏星 (EMP 星) の元素組成比は、ソースとなる初代星が主に数十太陽質量であったことを示唆している。さらに、近年観測されたブラックホール連星からの重力波は、これらのブラックホールが数十太陽質量であることを示しており、初代星連星が有力な起源であると考えられている。したがって、これらの観測結果を説明する IMF の詳細な理論的予測が切望されている。

近年の数値シミュレーションを用いた多くの理論的研究では、初代星は原始星形成後の初期に起こる降着円盤の分裂によって連星や 3 重連星などの多重星として生まれることが示されている。これらの結果は、この分裂過程によって IMF が決定され、また天の川銀河系内に生き残っている低質量初代星が形成され得ることも示唆しているが、そこで重要となる乱流や磁場に関しての物理的理解は未だ不十分である。本論文では、そのような初代星の IMF を理論的に明らかにする上で重要となる乱流と磁場に焦点を当てた研究を行う。

ダークマターミニハローにおける始原的ガス雲中の乱流は、例えば、分裂を促進したり、間接的に磁場の増幅に寄与して分裂を抑制するなど、初代星の形成に重要な役割を果たしている。分裂が乱流の強さにどの程度依存するかを調べた先行研究では、一般に乱流の程度が高いほど分裂によって形成される分裂片の数が増えることが示されている。その結果、これまで予想されていたよりも多くの質量の低い星が形成され、初代星の IMF が変化する。そのため、原始星形成後の質量降着期の始まりにおける乱流の強さを正確に見積もることは非常に重要である。いくつかの先行研究では、コア収縮時に乱流速度と渦度が増大することが示されている。また、コア収縮末期には乱流速度は音速を超えることも示されている。しかし、コア収縮期における乱流の駆動メカニズムの詳細は明らかになっていない。さらに、増幅された乱流の最終的な強度やそれを決定する飽和メカニズムに関しても詳細は不明である。

他方で、初代星が形成されたと考えられている赤方偏移 $z \gtrsim 10$ の初期宇宙では、ハロー形成時のビリアルショックによって電子密度と圧力の間に非平行勾配が生じ、電場を介して発生する微弱なシード磁場 ($\sim 10^{-18}$ G) しか存在せず、磁場は初代星の形成には力学的に重要ではないと考えられていた。しかしながら、近年の解析的・数値的アプローチによる研究から、ガスの乱流運動が磁力線をランダムに伸ばす、ねじる、折りたたむなどの一連の過程を繰り返す small-scale dynamo 効果によって、運動エネルギーを磁気エネルギーに変換し、強磁場を発生させることが可能であることが示された。これらの研究は、星形成過程における磁場強度を理論的に推定することを可能にしたが、現在の星形成過程の現場での状態方程式（等温）を仮定しており、さらに収縮過程における乱流の増幅を考慮していないなどの問題点がある。

上記の背景を踏まえて、本論文では、初代星形成環境における乱流の増幅・飽和のメカニズムを明らかにし、そしてそれらを考慮した一般化された磁場の増幅メカニズムや詳細な進化を明らかにする包括的な研究を行うことを目標とする。

まずはじめに、乱流の駆動メカニズムを詳細に調べるため、ポリトロピックな状態方程式を仮定した初代星形成雲の重力収縮を追う数値シミュレーションを初期乱流マッハ数と解像度を変えて行った。その結果、初期乱流マッハ数が小さい場合でも、乱流速度は重力収縮のみによって増幅され、最終的には音速に匹敵する速度になることがわかった。また、密度の増加に伴う乱流速度の増幅に関する解析的表式を導出し、数値計算結果がその式と一致することを示した。

次に、重力収縮するガス雲における乱流の飽和レベルを決定する物理的メカニズムを調べた。より多くの有効ポリトロプ指数 γ_{eff} 、初期マッハ数、初期乱流シード値を用いて、乱流ガス雲の重力収縮を追うための一連の高分解能数値シミュレーションを行った。乱流が飽和した時には、重力収縮によるエネルギー注入率と乱流の散逸率が等しくなると考え、乱流の飽和レベルを解析的に求め、数値計算結果と比較した。その結果、数値計算結果は解析モデルによって非常によく説明され、重力収縮するガス雲の乱流駆動スケールが重力収縮するガス雲コアの典型的な長さである Jeans 長の 3 分の 1 であることがわかった。

最後に、重力収縮する始原ガス雲の乱流を伴う磁場の時間発展を調べた。磁化された乱流的な始原ガス雲の重力収縮について、様々なポリトロプ指数 γ_{eff} 、解像度で磁気流体数値シミュレーションを行った。さらに、磁場成長/飽和の解析的理論を一般化し、様々なポリトロプ指数と乱流エネルギースペクトルに対応できるようにした。その結果、初代星形成時の収縮期まで、さまざまな γ_{eff} に対して、数値計算結果が理論によってよく再現されることがわかった。磁場は運動論的ダイナモと非線形ダイナモによって最終的に $10^{12} - 10^{15}$ 倍に増幅され、 γ_{eff} に依存して Equipartition level の 3% – 100% に達する。また、運動論的段階と非線形段階の間の遷移が起きる時期を解析的に見積もることができた。これらの結果は、超音速乱流を伴う強い磁場が一般的な性質であることを示し、初代星の形成に重要な役割を果たす可能性を示している。

本論文で行われた研究により、初代星形成過程において超音速乱流を伴う乱流的な分布を持つ強磁場が必ず存在することが示された。これら一連の研究は、初代星形成過程における乱流と磁場の詳細な増幅過程を明らかにした最初の研究である。