

氏名・本籍	東 翔 (大阪府)
学位の種類	博士 (理学)
報告番号	甲第 129 号
学位授与の日付	令和 6 年 3 月 31 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
論文題目	収縮する始原ガス雲における乱流と磁場の 増幅と飽和
審査委員	(主査) 教授 須 佐 元 (副査) 教授 井 上 剛 志 (副査) 教授 田 中 孝 明

論文内容の要旨

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った。

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によるコア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ップ指数 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崩壊を、ポリトロップ指数 γ_{eff} を持つポリトロピックな状態方程式を仮定し、様々な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、様々なポリトロッ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唆している。

本論文で行われた一連の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。

審査結果の要旨

近年のジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡による初期宇宙の観測によって、単純な理論的予測よりもずっと明るい天体の数が多いことが明らかとなってきた。理由は未だ論争の途上にあるが、一つの有力な説明は、宇宙初期には非常に明るい星（重い星）が選択的に多く誕生したと考えるというものである。そのため「初代星形成理論」は現代宇宙論の中心的課題の一つと考えられており、世界的に多くの研究者が取り組んでいる問題である。本論文は初代星形成が起きる母天体（ミニハロー）中で乱流および磁場が成長していく物理過程を明快に説明している。星形成環境における乱流や磁場は誕生する星の質量や数（すなわち天体の明るさ）を決める重要なパラメータであることが知られており、その解明は一つの大きな課題であった。

本研究の特徴は種々の条件下で高精度数値シミュレーションによって数値実験を行い、その結果を非常に良く説明する物理的（解析的）解釈を与えることに成功している点である。ほとんどの先行研究は数値シミュレーションを行い、乱流や磁場の増幅が起きることは報告しているが、本論文のレベルで物理的理由を明らかにした研究は存在しなかった。その意味で非常に意義のある研究であると言える。本研究の結果によって初代星形成環境で期待される乱流や磁場の強度が明らかとなり、初代星形成理論がさらに発展・深化していくことが期待される。

本論文の内容はすでに宇宙物理学分野で最も権威のある雑誌の一つである The Astrophysical Journal (アメリカ天文学会誌)において、3篇の欧文論文として掲載/掲載決定となっている。

本申請については 2023 年 12 月 19 日に物理学専攻において予備審査を行ない、2024 年 2 月 7 日に公開講演会が行われた。申請者は明快に論文の内容を説明し、質

疑応答に関しても問題なく行われた。

以上により下記審査委員は本論文提出者（東翔）が、博士課程の修了に必要な所定の単位を修得し、かつ、必要な研究指導を受け、博士論文の審査及び最終試験に合格したので、博士（理学）の学位を授与せられるに充分なる資格をもつものであると認める。