

氏 名	井 上 剛 志
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3234 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	The Role of Thermal Instability in the Interstellar Medium (星間媒質に於ける熱的不安定性の役割について)
論文調査委員	(主 査) 准教授 犬塚修一郎 教授 中村卓史 教授 川合 光 教授 小山勝二

論 文 内 容 の 要 旨

星間媒質は輻射による加熱冷却がその熱的性質を支配する開放系であり，その中低温成分は Warm Neutral Medium (WNM) と呼ばれる温度約 8000K，数密度約 0.5個/cc の広がった水素原子ガスと Cold Neutral Medium (CNM) と呼ばれる温度 100K 以下，数密度 10個/cc 以上の水素原子・分子ガスから成る混相系であることが知られている。CNM は中性水素雲（数密度 100個/cc 以下程度）や分子雲（数密度 100個/cc 以上）として観測され，分子雲は星形成の現場であることから，その形成過程の理解は未だにシナリオが確立されていない星形成過程を明らかにする上で本質的に重要である。WNM から CNM を形成する主要メカニズムとして熱的不安定性（輝線放射によるガスの暴走的冷却凝縮）が知られているが，星間媒質における現実的な熱的不安定の成長過程を研究する為には，ガスの熱エネルギーと同程度のエネルギーを持つ磁場（磁場強度にして数 μ G）の効果や，星間媒質の弱电離性による磁気拡散の効果を熱不安定と同時に正確に計算する必要がある。本博士論文ではこれらの効果を全て考慮する為，星間媒質の電離成分と中性成分の 2 流体方程式を解く数値計算コードを開発・運用し，熱的不安定性の非線形成長過程について研究を行った。磁気拡散の効果を含めた現実的な熱的不安定性の非線形成長過程については，基礎的な研究すらなされていなかった為，まずは熱的な不安定平衡状態を初期条件とし，熱的不安定性の非線形成長過程の 1，2 次元シミュレーションを行った。その結果，媒質の磁化の有無に関わらず，熱的不安定性はその発展の結果，WNM・CNM の 2 相媒質を形成することが明らかになった。また，形成される CNM の磁場強度は初期の強度を CNM で観測される値（数 μ G）よりも小さな値としても，形成過程で増幅を受け，さらに CNM 形成終了時での磁場強度は常に数 μ G に収束することが明らかになった。また，この効果が熱的不安定による密度増幅に伴う磁場増幅の効果と，磁気拡散の効果の釣り合いとして理解できることを解析的な計算によって明らかにした。次に，現実的な初期条件に基づく CNM の形成過程を研究する為，WNM flow の衝突で生じる衝撃波圧縮によって生成された熱的不安定ガスの進化について 2 次元シミュレーションを行った。磁場の影響を考慮しない過去の研究では生成された熱的不安定ガスは WNM flow の動圧に支えられることによって，高い圧力を保ったまま熱的不安定性の成長を迎え，分子雲に相当する高密度 CNM を形成することが知られていた。このことから，分子雲は WNM から直接的に形成されるとする速い分子雲形成シナリオが結論されていた。しかしながら，磁場の影響を考慮した現実的な 2 流体 MHD シミュレーションを行った結果，WNM flow の動圧は熱的不安定ガス中の磁気圧によって支えられ，ガス圧が冷却によって減少する中で熱的不安定の成長を迎え，形成される CNM は中性水素雲に相当する低密度雲になることが明らかになった。この成果は，「分子雲は熱的不安定性により形成された中性水素雲がより長時間かけて分子雲へと進化すること」を示唆しており，このようなシナリオは近傍銀河の星間雲の観測が示唆するシナリオと無矛盾である。

論文審査の結果の要旨

井上氏の研究は星間ガスの熱的・動的進化過程の理論的研究である。この研究の動機は、銀河内の星間ガスの動的な進化過程を理論的に定量化して多くの観測結果を説明するというだけでなく、宇宙の進化を決める星形成現象の現場である分子雲の形成過程を理解し、星形成の初期条件を決めるという重大な目的である。なぜなら、乱立する星形成シナリオの妥当性を判断するためには、星形成の初期条件を決定することが必須だからである。この星形成の初期条件を決めることにつながる分子雲の形成過程はほとんど解明されていない。そのため、磁場や弱電離の効果も含めた井上氏の研究はこの分野の研究の最先端に位置する。

学位論文の具体的内容は、低密度かつ熱的に弱電離状態となる程度の温度（1万度K）で銀河円盤内の体積のほとんどを占めている中温ガス（Warm Neutral Medium）から相転移を経由して高密度・低温の中性水素ガス雲や分子雲が形成させる過程を詳しく調べたものである。その際、まず申請者らが発見した相転移波面の不安定性を詳しく調べている。この不安定性は、燃焼波面のダリウス・ランダウ不安定性と類似のものであり、星間ガスの相変化に伴って発生する乱流の駆動メカニズムとして注目されるものである。また、学位論文では、従来無視されてきた磁場の効果と弱電離の効果を含めた詳細な非線形シミュレーションを行って、現実的な低温・高密度ガスの形成過程を調べている。その実行のために、申請者は2流体MHDコードを開発しており、特に荷電粒子と中性粒子間の衝突運動量輸送を記述する高精度・無条件安定な計算法を確立している。これは今後の同種の研究において威力を発揮すると思われる。シミュレーションの結果としては、磁場が無いときに結論されていたような非常に速い分子雲形成はほぼ不可能であることを示した。この結果、分子雲は長い時間尺度で形成されるという示唆を得たことになり、近年わかってきた近傍銀河における長い分子雲進化の描像と合致するものとして非常に重要である。

なお、学位申請の際に、参考論文として添付されている中間衝撃波の存在証明の論文は、この学位論文中の相転移波面の不安定性の研究から派生した研究である。その内容は、ランダウ・リフシッツ著「連続媒質の電気力学」などの権威ある教科書においても、（構造不安定であるため）自然界での存在を否定されてきた「磁気流体力学における中間衝撃波」は現実的な散逸を考慮すると、（構造安定であり）存在可能であることを数学的に証明するものである。つまり、基礎物理の教科書を書き換えることを要請する非常に基本的かつ重要な内容である。このことも申請者の過程博士としての価値を高めるものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。