

氏 名	まさ だ よう へい 政 田 洋 平
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3253 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	A Key Process for Magnetohydrodynamic Phenomena in Astrophysical Compact Objects (高密度天体における電磁流体现象の鍵を握る物理機構)
論文調査委員	(主 査) 教 授 柴 田 一 成 教 授 長 田 哲 也 准教授 上 田 佳 宏

論 文 内 容 の 要 旨

大質量星の重力崩壊がトリガーとなって形成される物質の超高温・高密度状態では、ニュートリノがエネルギー・運動量・レプトン輸送の本質的役割を担う。本論文は、超新星やガンマ線バーストの中心エンジンで駆動され、その力学的進化に強い影響を及ぼすと考えられる磁気回転不安定性に対するニュートリノ輸送の効果を明らかにしようとするものである。

まず申請者は、ニュートリノ輸送が磁気回転不安定性の線形成長に対して及ぼす影響について解析的研究を行った。その結果、ニュートリノ粘性が磁気回転不安定性の発現を支配し、 10^{12} ガウス以下の磁場の場合、その線形成長が強く抑制されることを発見した。この解析結果は、中性子星の典型的な値よりも強い磁場を仮定しない限りは、超高温・高密度の超新星コア内では磁気回転不安定性に起因した磁場増幅及び乱流粘性加熱が期待できないことを示唆しており、重力崩壊型超新星の爆発ダイナミクスに対する磁場の効果を考える上で無視することのできない本質的な物理を明らかにした重要な成果である (Masada et al. 2007a)。

次にこの成果を、ガンマ線バーストの中心エンジン候補である超高温・高密度降着円盤 (コラプサー円盤) に応用した。その結果、円盤内縁部にニュートリノ粘性によって磁気乱流の成長が抑制され角運動量輸送効率が著しく低下する領域 (= デッドゾーン) が形成されることを発見した。この性質は標準コラプサーモデルでは考慮されていない (Woosley 1993)。申請者は、デッドゾーン形成が降着円盤のグローバルな進化に及ぼす影響を理論的に予測し、円盤の自己重力を考慮した中心エンジンの新しい理論モデル “Episodic Disk Accretion Model” を提案した。これは標準コラプサーモデルの枠組みでは説明できない、ガンマ線バーストの中心エンジンにおける非定常なエネルギー解放の物理機構や、即時放射の典型的なエネルギー及びタイムスケール、そしてスウィフト衛星によって発見された X 線フレアの起源を統一的に説明することのできる唯一のモデルであり、今後のガンマ線バーストの中心エンジン研究の指針となるモデルである (Masada et al. 2007b)。

上記の解析的研究の結果を詳しく検証するために、局所的な 2 次元磁気流体シミュレーションを行い磁気回転不安定性の非線形成長を調べた。計算には、申請者が作成した粘性・重力入りの磁気流体コードを使用した。採用している数値計算法は空間・時間 2 次精度のゴドノフ法であり、数値流束の評価に非線形リーマン問題の厳密解を用いることで高精度な計算の実現に成功した。解析の結果、非線形段階ではレイノルズ数 ($Re = V_A^2 / \nu O$, V_A はアルフベン速度, ν は粘性係数, O は角速度) が磁気回転不安定性の飽和に対し顕著な影響を及ぼすことを発見した。これは超新星コアやコラプサー円盤で実現する超高温・高密度物質状態において、磁気回転不安定性とニュートリノ粘性が電磁流体现象の発現の鍵を握る物理機構であることを解明した重要な成果である。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

申請者の本博士論文における研究は、天体物理学の最重要課題の一つである重力崩壊型超新星とガンマ線バーストの爆発機構の解明に、理論的側面から迫るものである。これら高密度天体の力学的進化において、磁場が本質的役割を担うという

認識は、一般的な中性子星の1000倍の磁場強度を持つ超強磁場中性子星（マグネター）の発見を契機に近年徐々に広まりつつあるが、天体内部での磁場増幅の根幹を担うと考えられている磁気回転不安定性に注目した研究はこれまでほとんど行われていない。また、従来の天体電磁流体现象の研究では現象のグローバル性に興味が集中し、ダイナミックレンジの違いからミクロな物理の効果はほとんど考慮されていない。グローバルな研究が全盛の中、電磁流体现象に対するニュートリノ輻射の効果に注目した点に申請者の論文の特色がある。

申請者はまず、斬新な近似を使った線形計算で、重力崩壊型超新星のコア部分で実現する超高温・高密度状態において、ニュートリノ輻射がローカルな電磁流体现象である磁気回転不安定性に強い影響を及ぼすことを発見した。本研究が導き出した、“典型的な中性子星の磁場強度以下の磁場では磁気回転不安定性の成長がニュートリノ粘性によって強く抑制される”という結果は、重力崩壊前の磁場強度に依存して超新星の爆発ダイナミクスが異なる可能性を示唆しており、今後の爆発ダイナミクスの研究に対して強い制限を与える重要な成果と言える。

さらに、申請者が見出したニュートリノ輻射と磁気回転不安定性の相互作用の効果は、ガンマ線バーストの中心エンジン候補であるコラプサー円盤に応用され、円盤の新しい進化シナリオの提案という形で重要な成果を生むに至っている。申請者が提案したモデルのユニークな点は、ミクロな物理過程がマクロシステムの進化を決めている点である。ニュートリノ粘性による乱流輸送の抑制という物理効果を新たに取り入れることで、ガンマ線バーストの短時間変動や、スウィフト衛星によって発見されたX線フレアなど、これまで起源が謎とされてきた様々な現象を統一的に説明する理論モデルを構築することに成功した。このモデルは原始惑星系円盤とのアナロジーに着想を得たものであり、申請者の持つ知識の広さと創造力が高い次元で融合された質の高い仕事である。

本博士論文中では、上記2つの解析的研究の検証・発展のために、申請者自らが構築した電磁流体シミュレーションコードを使ってニュートリノ粘性中での磁気回転不安定性の非線形成長を調べている。非線形シミュレーションの結果得られた、磁気回転不安定性の飽和レベルが初期のレイノルズ数に強く依存するという新しい成果は、高密度天体の進化ダイナミクスに対する電磁流体现象の寄与を考える際に重要になるだけでなく、磁気回転不安定性の飽和機構の解明という基礎物理的側面でも本質的な結果になると期待される。

以上のように申請者の研究は、超新星やガンマ線バーストといった高密度天体の力学的進化の鍵となる磁気回転不安定性について、理論的側面から様々な新たな知見をもたらした独創的かつ重要な成果である。よって、本申請論文は博士(理学)の学位論文として十分に価値のあるものと認める。なお、主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これらに関連した研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。