

カイラル電磁流体シミュレーションで探るカイラルプラズマ不安定性の性質

Chiral MHD simulations for chiral plasma instability

松本仁

福岡大学理学部物理科学科

1. 研究目的

本研究では、カイラル電磁流体 (chiral magnetohydrodynamics; chiral MHD) に基づく三次元数値シミュレーションを実施し、カイラルプラズマ不安定性 (chiral plasma instability; CPI) の基礎的な性質を明らかにすることを目的とした。特に、重力崩壊型超新星爆発における gain region を想定した物理条件のもとで、ニュートリノ駆動により実効的に誘起されるカイラル磁気効果がプラズマのダイナミクスおよび磁場増幅に与える影響を調べた。

2. 研究の背景および手法

カイラル磁気効果とは、フェルミ粒子 (電子やクォーク) においてスピンと運動量の相対的な向きにより定義される右巻き粒子と左巻き粒子の数に差 (カイラル不均衡) が存在する場合に、磁場方向に沿った異常電流が誘起される現象である。

本研究では、ニュートリノとの相互作用によるバックリアクションを通じて生じる「実効的なカイラル磁気効果」に着目した。この機構では、電子のカイラル不均衡が初期にゼロであっても、ニュートリノ輸送に起因してカイラル不均衡が生成される。そのため、電子の有限質量によるカイラル不均衡の減衰の影響を受けにくいという特徴を持つ。

従来の研究ではカイラル不均衡が初期値として与えられる静的モデルが主流であった。一方、本研究では、従来の静的モデルに加え、ニュートリノ効果を模擬する形でカイラル不均衡が時間とともに継続的に注入される動的モデルを構築し、三次元カイラル電磁流体シミュレーションを実行した。

3. 計算条件

計算領域は重力崩壊型超新星爆発における gain region を想定し、典型的な密度・圧力・温度を反映したパラメータ設定を採用した。初期の速度場はゼロとし、初期磁場は、微小なランダム磁場を与えた。また、初期のカイラル不均衡はゼロとし、カイラル不均衡の時間的注入率を制御パラメータとして導入し、その値を変化させた系統的なパラメータスタディを行った。数値計算は三方向に周期境界条件を課した三次元格子上で実施し、chiral MHD 方程式を保存系で解いた。

4. 研究成果の内容

本研究により、以下の知見が得られた。

- カイラルプラズマ不安定性は、ある臨界時刻を境に顕著に成長を開始し、それとともに磁場の指数関数的増幅が生じることを確認した。
- この臨界時刻は、時間とともに注入・蓄積されるカイラル不均衡によって特徴付けられる CPI の成長タイムスケールと、カイラル不均衡の注入時間スケールが同程度となる時刻として理解できる。

すなわち、カイラル不均衡の供給と不安定性の成長が競合することにより、明確な遷移点が現れることが示された。

5. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究では、ニュートリノ駆動による実効的カイラル磁気効果を取り入れた三次元カイラル電磁流体シミュレーションを実施した。カイラルプラズマ不安定性の非線形発展を三次元かつ高解像度で追跡するためには大規模計算資源が必要不可欠であり、筑波大学計算科学研究センターの学際共同利用プログラムによるスパコン環境は本研究遂行において重要な役割を果たした。

特に本研究では、カイラル不均衡が時間発展とともに継続的に注入される動的モデルを構築し、複数の注入率パラメータに対する三次元シミュレーションを実施した。そのため、長時間・高解像度の大规模並列計算が必要となり、本プログラムによる計算資源提供によって初めて効率的なパラメータスタディが可能となった。

また、本研究は、重力崩壊型超新星という高エネルギー天体现象を対象として、素粒子論的起源を持つカイラル輸送現象をプラズマ・磁気流体ダイナミクスへ取り込むものであり、高エネルギー天体物理、プラズマ物理、素粒子論、計算科学にまたがる学際的研究である。このような異分野融合型研究は、筑波大学計算科学研究センターが推進する「学際計算科学」の理念とも強く整合している。

6. 今後の展望

本研究では、ニュートリノ駆動による実効的カイラル磁気効果を取り入れた三次元カイラル電磁流体シミュレーションを行った。今後は、より現実的な重力崩壊型超新星環境を取り入れたシミュレーションへ発展させる予定である。特に、カイラルプラズマ不安定性が本質的にはフェムトメートル (fm) スケールの微視的現象である一方、重力崩壊型超新星爆発はおよそ 100 km スケールで進行する巨視的現象であり、両者の間には極めて大きなスケールギャップが存在する。今後は微視的輸送過程と大域的ダイナミクスをどのように接続するかが重要な課題となる。

7. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

Jin Matsumoto, Naoki Yamamoto, Di-Lun Yang, Tomoya Takiwaki, “Magnetic field amplification in chiral magnetohydrodynamic simulation”, AAPPS-DPP2023 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, September 2025, Fukuoka, Japan

(3) その他

| 使用計算機 | 使用計算機に○ | 配分リソース※ | | |
|--|---------|---------|-----|-----------|
| | | 当初配分 | 移行* | 一般利用による追加 |
| Pegasus | ○ | 1600 | | |
| Miyabi-G | | | | |
| Miyabi-C | ○ | 6400 | | |
| ※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入 | | | | |