

無衝突プラズマ中の運動論的不安定性に伴う 粒子の加熱・加速の研究

Particle acceleration and heating associated with kinetic instabilities in collisionless plasmas

研究代表者：天野孝伸 (東京大学大学院理学系研究科)
amano@eps.s.u-tokyo.ac.jp

研究分担者：寺境太樹 (東京大学理学系研究科)
jikei@eps.s.u-tokyo.ac.jp
担当：シミュレーション実施・データ解析

研究分担者：福田悠斗 (東京大学理学系研究科)
jikei@eps.s.u-tokyo.ac.jp
担当：シミュレーション実施・データ解析

研究分担者：Wang Ruolin (東京大学理学系研究科)
jikei@eps.s.u-tokyo.ac.jp
担当：シミュレーション実施・データ解析

研究目的 (Research Objective):

宇宙空間に存在するプラズマは高温・希薄であるため、粒子間の衝突が無視できる無衝突プラズマの状態にある。無衝突プラズマにおけるエネルギー・運動量交換はプラズマ波動を介して行われるため、プラズマ波動の励起過程および波動粒子相互作用の理解は極めて重要である。実際に無衝突衝撃波や磁気リコネクションなどに伴い多種多様なプラズマ波動が励起され、それにとまなう粒子の加熱・加速が起きている。本研究では特に無衝突衝撃波近傍において重要となる運動論的不安定性の数値シミュレーションを行い、不安定性に伴う粒子の加熱・加速効率を調べる。また、上記の物理課題と並行して現在新規開発中の運動論的シミュレーションコードの性能評価および最適化にも取り組む。

計算手法 (Computational Aspects):

電子・イオン共に運動論的に扱うプラズマ粒子計算 Particle-In-Cell (PIC) 法を用いた。主に2次元の MPI-OpenMP ハイブリッド並列計算を行い無衝突衝撃波の遷移層をモデル化した周期系でイオン Weibel 不安定性の線形・非線形発展を調べた。また、新規開発中の動的負荷分散を実装した PIC コードのテスト計算を進め、負荷分散効率のテストや高速化を行った。

研究成果 (Accomplishments) :

これまで衝撃波の文脈でイオン Weibel 不安定性の議論は盛んに行われてきたが、その性質は必ずしもよく分かっていなかった。通常は Weibel 不安定性を考える状況

では磁場が非常に弱いため、その効果は無視されることが多いのに対して、本研究では弱くても有限な一様背景磁場が存在することに Weibel 不安定性のダイナミクスが大きく変貌することを明らかにした。図 1 に示すのは有限の背景磁場があるケースの 2 次元 PIC シミュレーション結果である。この図で見られるように、Weibel 不安定性の発展に伴い、初期に一様だった磁力線が引き伸ばされることによって、自発的に電流層が形成され、最終的には磁気リコネクションによって散逸する。本研究では理論的にもこのような磁力線の引き伸ばしが起こる条件を議論し、数値シミュレーション結果と整合的であることを確認した。その結果、このような磁気リコネクションは超新星残骸衝撃波のような非常に強い衝撃波において重要なプロセスとなり得ることが分かった。

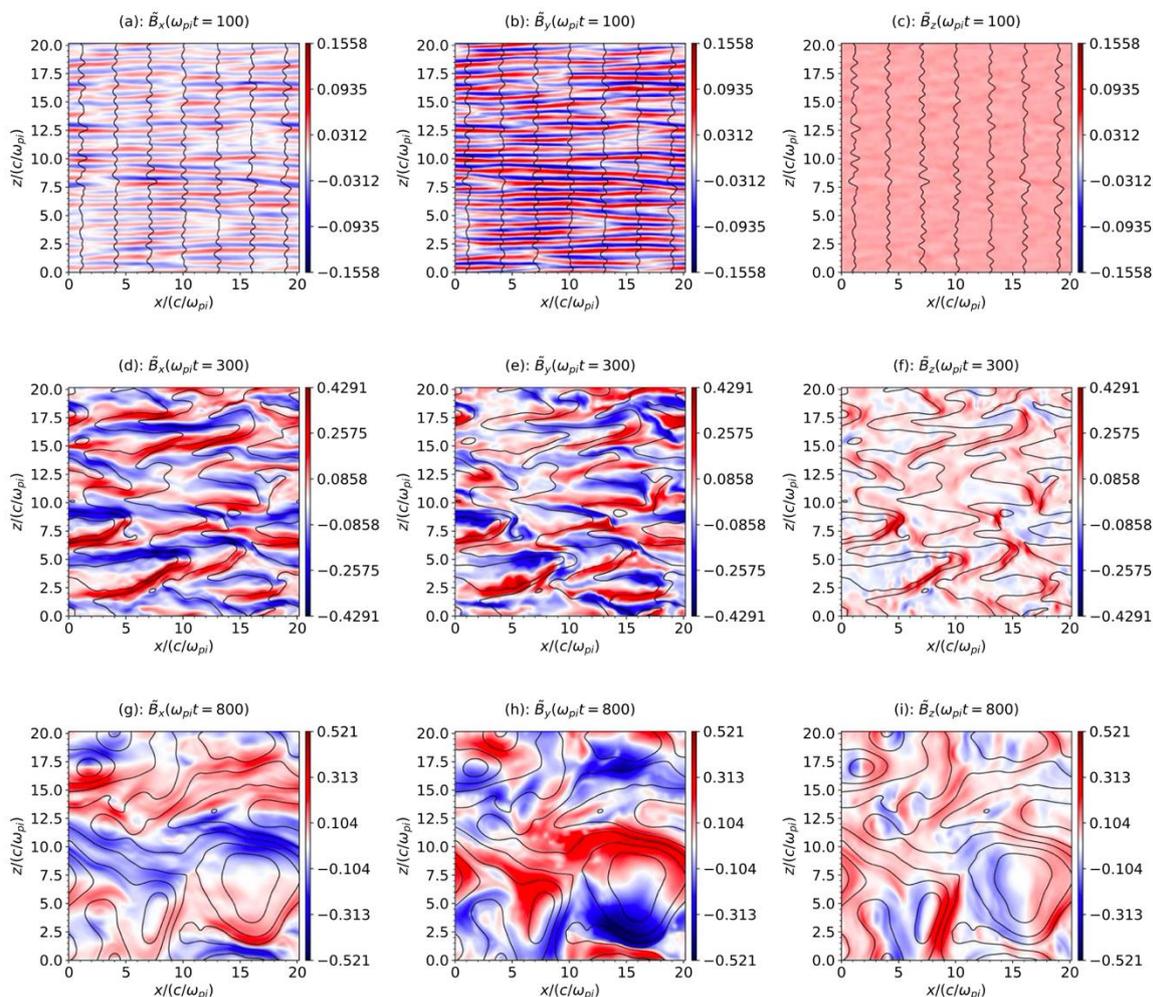


Fig.1 イオン Weibel 不安定性に伴う磁場 3 成分の時間発展

また、動的負荷分散を用いた PIC シミュレーションコードの開発を進めた。図 2 には 2 次元の無衝突衝撃波の計算結果の密度分布を示す。この図で見られるように、このアルゴリズムでは密度の大小によって各プロセスが担当する領域の面積が動的に変動するようになっている。現在までに、この計算のように中規模の計算で動的負荷分散の効率を評価しており、大きな問題がないことを確認している。

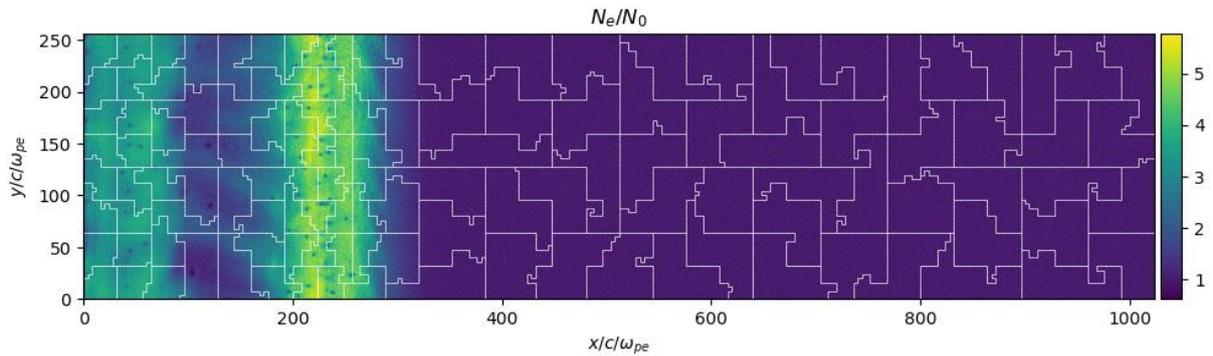


Fig.2 動的負荷分散を用いた無衝突衝撃波の PIC シミュレーション

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Jikei, T., T. Amano, and Y. Matsumoto, Enhanced Magnetic Field Amplification by Ion-Beam Weibel Instability in Weakly Magnetized Astrophysical Shocks, *The Astrophysical Journal*, 961, 157, 2024.

(口頭)

1. 寺境太樹, 天野孝伸, 松本洋介, Simulation of Weibel instability in weakly magnetized plasmas, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, 2023 年 5 月
2. 寺境太樹, 天野孝伸, 松本洋介, Electron pre-acceleration in shock transition regions of weakly magnetized perpendicular shocks, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2023 年秋季年会(第 154 回講演会・総会), 2023 年 09 月