

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)

研究分担者：寺境 太樹 (東京大学大学院理学系研究科)
担当：計算機実験実施・データ解析

研究分担者：福田 悠斗 (東京大学大学院理学系研究科)
担当：計算機実験実施・データ解析

研究分担者：Wang Ruolin (東京大学大学院理学系研究科)
担当：計算機実験実施・データ解析

研究目的 (Research Objective):

宇宙空間プラズマ中の無衝突衝撃波のダイナミクスはプラズマ波動と荷電粒子の極度に非線形な相互作用に支配されている。波動の時空間スケールは多岐にわたり、広いエネルギー帯の荷電粒子の加熱・加速に重要な役割を果たす。高エネルギー粒子は電磁流体波動との相互作用により衝撃波前後を拡散しながら往復運動することでさらなる加速を受け、ベキ型のエネルギースペクトルを持つ宇宙線が形成される。低エネルギー粒子はより高周波・短波長の運動論スケールの波動によって加熱されると同時に、一部の粒子が中間エネルギーに加速され、高エネルギー宇宙線の種となると考えられている。これらの加熱・加速に重要な役割を果たす波動はそれぞれのスケールで異なる運動論的不安定性によって励起される。したがって、ミクロからマクロまで、多スケールのプラズマ運動論的不安定性の励起過程およびその非線形発展の理解は、衝撃波における粒子の加熱・加速の問題に本質的に重要な課題である。

その中でも 2024 年度は特に宇宙物理学において超新星残骸衝撃波やガンマ線バースト衝撃波など、高マッハ数の衝撃波の散逸メカニズムとして注目されているイオンの Weibel 不安定性について、その非線形ダイナミクスを理解することを目的とした。また、これに加えて動的負荷分散を実装した粒子シミュレーションコードの高速化・最適化についても目的の一つとした。

計算手法 (Computational Aspects):

プラズマ中の電子・イオンをいずれも粒子として運動論的に扱う Particle-In-Cell (PIC) 法を用いて主として 1 次元および 2 次元の周期系での数値シミュレーションを実施した。また一部は開放系を用いて無衝突衝撃波の数値シミュレーションも行った。

研究成果（Accomplishments）：

（１）イオン Weibel 不安定性は相対論的衝撃波の形成を司る不安定性として 2000 年頃から研究が本格化したが，現在でもその非線形ダイナミクスは完全には理解されていない．本研究は PIC シミュレーションを用いて，非相対論的および相対論的な状況下でのイオンビーム速度，電子温度，質量比などの広範なパラメータ範囲で Weibel 不安定性の性質を調査した．これまではイオンビームの運動エネルギーによって不安定性の飽和レベルが決定されると考えられていたのに対して，数値シミュレーションの結果からは電子のダイナミクスが飽和レベルを決定していることが明確に示された．具体的には，飽和レベルは電子・イオンの質量比に線形に依存し，現実的な質量比のもとでは，これまで考えられてきたよりも極めて小さな飽和レベルしか持たないことがわかった．ただし，電子が相対論的な温度を持つときには相対論効果で有効質量が重くなるため，飽和レベルはこれまでの見積もりと整合的となる．さらに，この結果は理論的な飽和レベルの見積もりとも整合的である．（図 1 参照）

これらの結果は，典型的な星間空間を伝播する衝撃波を考える場合には，Weibel 不安定性が衝撃波形成の主役となるためには衝撃波速度が光速に近い場合に限られ，若い超新星残骸衝撃波などの非相対論的衝撃波では背景磁場が主役となる磁化衝撃波として振る舞うことが確認された．また，実験室における無衝突衝撃波の形成実験では理想的な一様対向流を考えた場合には，これまでの実験設定では十分な空間スケールがとれていないこと，したがって非一様性や背景磁場の効果が重要となることも指摘した．以上の成果は，高エネルギー天体现象の理解や衝撃波の実験室再現実験へ重要な示唆を含んでいる．

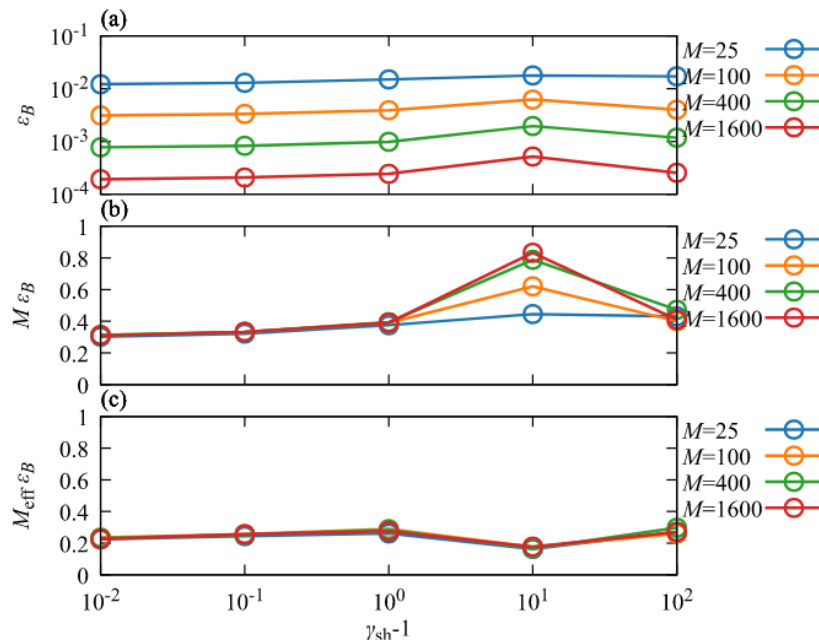


Fig.1 数値シミュレーションから得られた不安定性の飽和レベル(縦軸)と衝撃波速度(横軸)の関係. 最下段は相対論効果を考慮した有効質量比によって飽和レベルが決定されることを示している. (Jikei and Amano, 2024)

(2) 動的負荷分散を実装した数値シミュレーションコードの新規開発を継続して行っており、図2左に示すように粒子分布の変化に伴って動的な領域分割を実現できている。このコードに対してSIMD化やスレッド並列化の最適化を施した。図2右はC++のライブラリXSIMDを用いたSIMD化後の性能向上をセルあたりの粒子数の関数として示している。赤が京都大学での結果であり、特に粒子数が十分に多い場合には大きな性能向上が確認できた。理論的な性能は最大で8倍であることを考えると、十分な性能向上が得られている。同様のベンチマークを富岳(A64FX)でも行っており、やはりSIMD化による性能向上の効果が見られることを確認した。

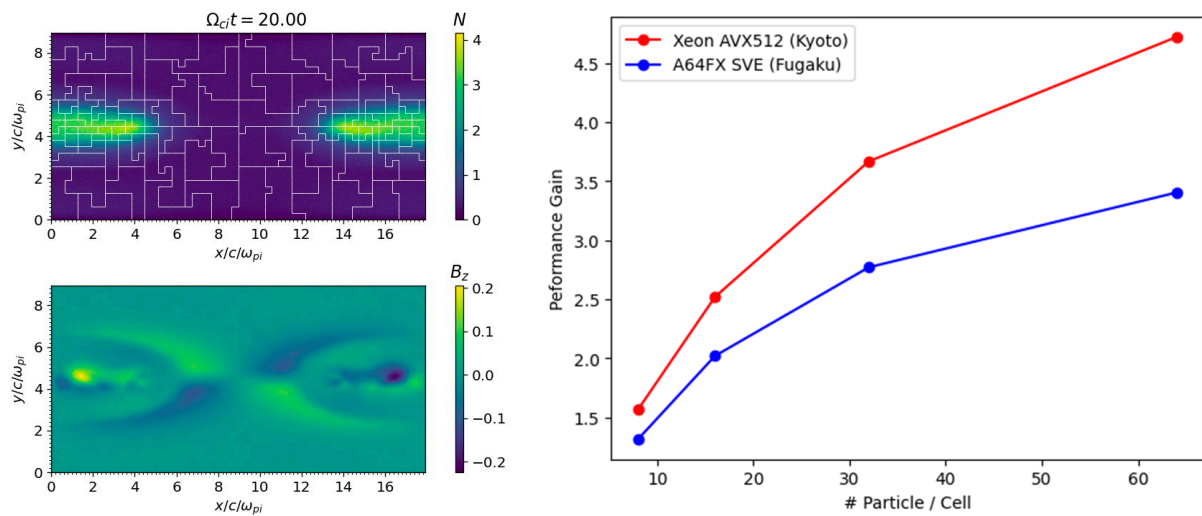


Fig.2 (左)開発中のコードによる数値シミュレーション例。白が並列化の領域分割の境界を示しており、密度の濃淡によって担当領域のサイズが変動していることがわかる。(右)SIMD化による性能向上率のセルあたりの粒子数依存性。赤が京都大学、青が富岳の結果を示しており、いずれも粒子数が多いときには大きな性能向上が確認できる。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Jikei, T., & Amano, T. (2024). Saturation level of ion Weibel instability and isotropization length-scale in electron-ion Weibel-mediated shocks. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 531(1), 219- 229. doi:10.1093/mnras/stae1187.

(口頭)

1. Jikei, T., Amano, T., Matsumoto, Y., Kuramitsu, Y., Electron Heating by Ion-Weibel Instability in the Presence of Finite Beam-Perpendicular Background Magnetic Field, HEDS2024, Yokohama, April 2024
2. Jikei, T., Amano, T., Matsumoto, Y., Kuramitsu, Y., Magnetic Amplification by the Weibel Instability in Weakly Magnetized Astrophysical Shocks and Laboratory Laser Experiments, HEDLA2024, Florida, May 2024