

# 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地球惑星科学専攻)  
amano@eps.s.u-toyo.ac.jp

**研究分担者：** 加藤拓馬 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)  
t.kato@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：** 寺境太樹 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)  
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、それにともなう粒子の加熱・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。

## 計算手法 (Computational Aspects):

本研究では2次元のプラズマ電磁粒子シミュレーションコードを用いた数値シミュレーションを主に実施した。コードはMPIライブラリを用いて領域分割によって並列化されている。

## 研究成果 (Accomplishments) :

準垂直無衝突衝撃波では、反射されたイオンによって実効的な温度異方性 ( $T_{\perp} > T_{\parallel}$ ) が発生し、これがプラズマ不安定性の励起源となる。不安定性の候補としては古くから Alfvén Ion Cyclotron (AIC) 不安定性やミラー不安定性が知られており、rippling と呼ばれる衝撃波面の揺らぎ (表面波) との関連性が議論されてきた。一方で、近年になってマッハ数が非常に大きな場合には同じ反射イオンが Weibel 不安定性を励起することが指摘された。Weibel 不安定性の非線形発展の結果として、電流シートが生成され、自発的な磁気リコネクションが衝撃波遷移層で起こることが分かり、大きな注目を集めている。一方で、古典的な AIC 不安定性およびミラー不安定性との関係性は理解されていなかった。本研究では反射イオンの速度分布関数でリング分布で

モデル化した一様系モデルを用い、幅広いパラメータ範囲で数値シミュレーションを実施することでこの関係性を調べた。この結果、マッハ数が大きい場合には斜め伝播のミラー不安定性の顕著な発展は見られず、平行伝播のモード支配的となり、その性質は Weibel 不安定性と一致することが分かった。これは高マッハ数で見られる Weibel 不安定性は低マッハ数における AIC 不安定性と連続的につながっていることを示唆する。なお、この結果は線形理論においても確認された。

Fig.1 は数値シミュレーションによって得られた様々なパラメータにおける飽和レベルと、粒子捕捉から見積もられる理論的な飽和レベルを比較したものである。この図から明らかなように、AIC/Weibel 不安定性の線形成長は粒子捕捉によって止まり、波動強度が飽和することが確かめられた。マッハ数が十分に大きい Weibel 不安定性の場合は飽和したモード同士の非線形相互作用によってより長波長のモードが成長し、磁気リコネクションが発生することも確かめられた。

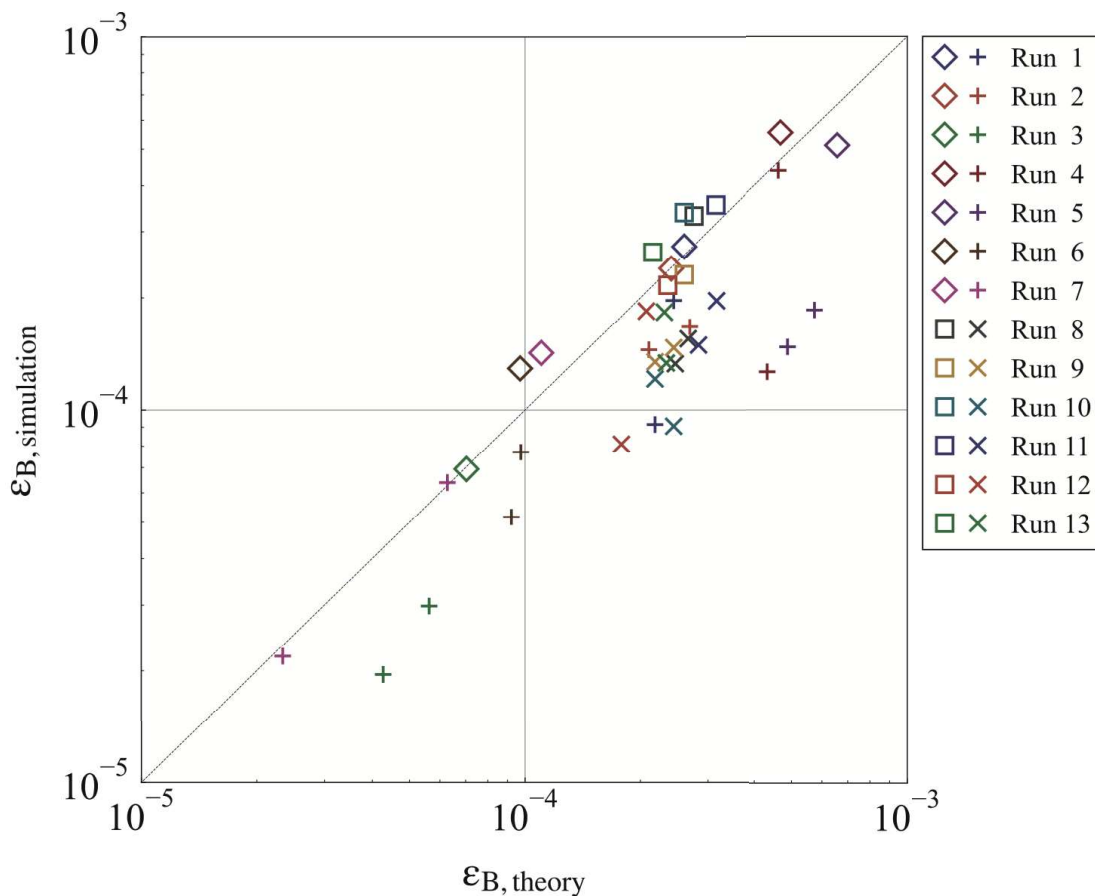


Fig.1 数値シミュレーション(縦軸)と理論(横軸)の飽和レベルの比較. 様々なパラメータで理論の飽和レベルが数値シミュレーション結果をよく説明することが見て取れる. [Nishigai & Amano 2021]

本研究で AIC 不安定性と Weibel 不安定性の関係が明らかになったが、一方で Weibel 不安定性はイオンジャイロ周期に対して非常に速く成長するモードであり、このパラ

メータ領域ではリング分布による扱いに疑問が残ることが分かった。磁気リコネクションはこのようなパラメータ領域で起こることから、磁気リコネクションが発生する条件を理解するには本モデルでは必ずしも十分でないことが示唆される。今後は磁気リコネクションの発生条件を調べるために異なるモデルを採用した数値シミュレーションを実施する予定である。

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

1. Nishigai, T., & Amano, T. (2021). Mach number dependence of ion-scale kinetic instability at collisionless perpendicular shock: Condition for Weibel-dominated shock. *Phys. Plasmas*, 28(7), 072903. <https://doi.org/10.1063/5.0051269>

### (口頭)

1. Nishigai, T., & Amano, T., Mach number dependence of ion-scale kinetic instabilities at collisionless perpendicular shocks, JpGU Meeting 2021, オンライン, 2021年6月