

強磁場環境下における大振幅アルフベン波による 多段階粒子加速

Multistage Particle Acceleration Driven by Large-Amplitude Alfvén Waves
in Strong Magnetic Fields

研究代表者：諫山 翔伍

(九州大学総合理工学研究院)

研究目的 (Research Objective):

本研究では、宇宙プラズマ物理学における重要な未解決問題の一つである高エネルギー宇宙線の生成機構の理解に資する、新たな粒子加速モデルを提案する。近年、我々は、対向する磁気流体波が存在する系において、波動振幅がある閾値を超えると、粒子が磁気流体波の波束に捕捉され、共鳴加速によって初期エネルギーによらず非常に高いエネルギーに到達し得ることを明らかにした。そこで本研究では、単一の波からパラメトリック不安定性を介して励起される対向伝搬波に着目し、それを利用した加速過程の物理を明らかにする。具体的には、理論解析および一次元 Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションを用いて、単一波動からパラメトリック不安定性を通じて形成される対向伝搬波が、どのように粒子の高エネルギー化をもたらすのかを検証する。こうした加速過程は、宇宙の多様なプラズマ環境において普遍的に機能し得ると考えられ、高エネルギー宇宙線の生成機構の理解に新たな視点を与えることが期待される。

計算手法 (Computational Aspects):

周期境界の1次元 PIC 計算を行う。初期条件として、背景磁場に対する波動磁場振幅が $b_w/b_0 = 0.8$ である大振幅右回りホイッスラー波を与える (図1)。周期領域の系長 $L_x = 1832$ (c/ω_{pe}) とし、負方向に伝搬する波が計算結果に影響を及ぼさないよう、十分大きく設定する。さらに、波束の群速度が光速に近づくようにするため ($v_g \sim c$)、電子の磁化パラメータを $\sigma_0 = \Omega_{ce}^2/\omega_{pe}^2 = 6.4 \times 10^3$ に設定する。キャリア波の波数および周波数は、分散関係に基づき、それぞれ $k \sim 4.0 \omega_{pe}/c$, $\omega \sim 3.99 \omega_{pe}$ とする。波束中の電子およびイオンの横方向バルク速度は、Walén 関係を用いて見積もる。

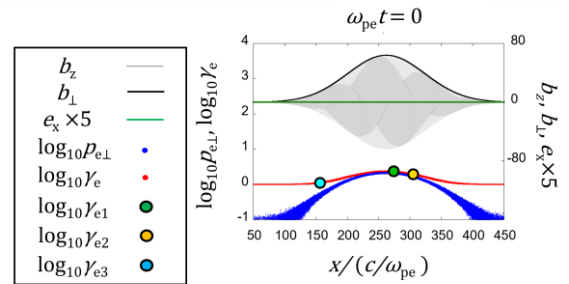


図1 初期状態における波のエンベロープ（黒線）およびキャリア波（灰色）を示す。あわせて、電子の垂直方向運動量 $P_{e\perp}$ （青丸）とエネルギー γ_e （赤丸）を示している。色分けした粒子は、トレースした電子のエネルギーを表す。

研究成果（Accomplishments）：

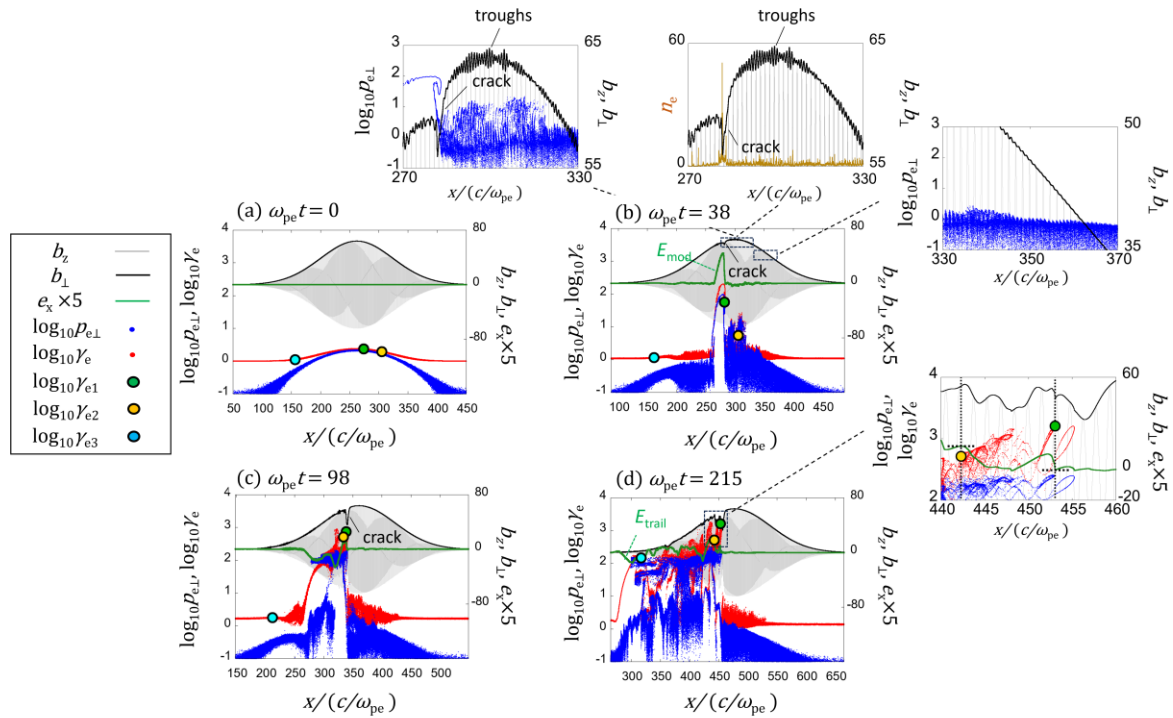


図 2 (a) $\omega_{pe} t = 0$ 、(b) $\omega_{pe} t = 38$ 、(c) $\omega_{pe} t = 98$ 、(d) $\omega_{pe} t = 215$ における結果を示す。(b)～(d)では、大振幅の変調静電場 E_{mod} と、誘起された後続電場 E_{trail} を示している。3つの粒子はエネルギーに応じて、緑 (γ_{e1})、黄 (γ_{e2})、水色 (γ_{e3}) で色分けしている。(b)の挿入図は、電子密度分布、電子の横方向運動量 $p_{e\perp}$ 、および磁場エンベロープの拡大図である。(d)の挿入図も同じ物理量の拡大図であり、黒の縦点線と横点線は、それぞれ緑色および黄色の電子の位置と、その位置での e_x の強度を表す。

初期段階の $\omega_{pe} t = 38$ [図 1(b)] では、拡大図に示すように、 $270 < x/(c/\omega_{pe}) < 330$ の領域で磁場エンベロープに小さなくぼみが形成されており、ここでは崩壊不安定性により対向伝搬波が励起されている。この領域では、電子は磁場エンベロープの谷部において、対向伝搬波による共鳴加速 counterpropagating wave-particle resonant acceleration (CWRA) によって背景磁場に垂直な方向へ加速される。 $x/(c/\omega_{pe}) \sim 280$ に見られるアルヴェン波束の大きな裂け目は、局在した静電場 $E_{mod} > 0$ を伴う変調不安定性によって生じたものである。アルヴェン波束のポンデロモータビリティ力は電子バンチの形成を促し、それによって E_{mod} を局所的に増幅する。この電場がある閾値を超えると、gyroresonant surfing acceleration (GRSA) を介した共鳴加速を助長し、さらに電子バンチの蓄積を進めることで、最終的に裂け目構造の形成につながる。さらに時間が進んだ $\omega_{pe} t = 98$ および 215 [図 1(c), (d)] では、

電子は一層加速される。この段階では、粒子は親波に捕捉されたまま、single wave resonant acceleration (SWRA) によってさらにエネルギーを獲得する。 $\omega_{pe} t = 215$ では、変調静電場 E_{mod} の後方に、静電的な後続電場 E_{trail} が生成されている [図 1(d)]。以上より、電子加速は、対向伝搬波による共鳴加速 (CWRA)、変調電場を介した GRSA、親波に捕捉された SWRA が順次働く多段階過程として理解される。また、変調電場の後方に形成される後続電場 による加速も生じるが、電子の大きなエネルギー利得は主としてこれらの段階的な共鳴加速によって支配される。

本研究で得られた知見は、大振幅アルヴェン波が存在する多様な宇宙プラズマ環境に応用可能である。高エネルギー宇宙線の起源としては、磁気リコネクション、相対論的衝撃波、相対論的ジェット中の対流電場などが提案されているが、本研究はこれらに関連し得る新たな描像として、アルヴェン波に駆動された多段階共鳴加速の重要性を示す。今後は、放射効果、波のコヒーレンス・偏波、多次元効果を取り入れ、より現実的な宇宙条件のもとで加速効率と最大エネルギーを評価することが重要である。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. S. Isayama, S. Matsukiyo, T. Sano and S. H. Chen, *Relativistic multistage resonant and trailing-field acceleration induced by large-amplitude Alfvén waves in a strong magnetic field*, Physical Review E 112, 055201 (2025). *Editors' Suggestion*. DOI: <https://doi.org/10.1103/nccj-mw1y>

(口頭)

1. S. Isayama, S. Matsukiyo, T. Sano, and S. H. Chen, *Relativistic resonant and trailing field acceleration induced by large-amplitude Alfvén waves in a strong magnetic field*, 9th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2025), Fukuoka, September (2025).