

## 無衝突垂直衝撃波遷移層におけるイオンスケール不安定性の上流パラメータ依存性

# 西貝 拓朗 [1]; 天野 孝伸 [2]  
[1] 東大・理・地惑; [2] 東大・理

## Ion scale instabilities in the transition layer of collisionless perpendicular shock: Dependence on upstream parameters

# Takuro Nishigai[1]; Takanobu Amano[2]  
[1] Earth and Planetary Science, Tokyo Univ.; [2] University of Tokyo

The acceleration of cosmic rays (high-energy charged particles) is one of the most important problems in the space physics. The collisionless shock waves in plasmas have been studied over half a century because they are believed to be the major source of cosmic rays. In this study, we investigate plasma instabilities in the collisionless shock transition layer and associated particle acceleration and heating processes. In the transition layer, there are three electromagnetic field structures called foot, ramp and overshoot that are generated by the ions reflected by a potential barrier in the shock (reflected ion). In the regions, various kinds of instabilities are excited and energy exchange proceeds between three plasma species, i.e., upstream ions, electrons and reflected ions.

Low-frequency and long-wavelength instabilities generated in the transition layer strongly affect the global electromagnetic structure of the shock. In particular, we focus on Mirror instability, Alfvén Ion Cyclotron (AIC) instability and Weibel instability, all of which are excited by an effective temperature anisotropy generated by the reflected ions. It is well known that Mirror and AIC instabilities generate a rippled shock surface (Winske & Quest, 1988). On the other hand, it has been found that the Weibel instability dominates at very high Mach number shocks. The magnetic field amplified by the Weibel instability eventually dissipates via spontaneous turbulent magnetic reconnection that produces high-energy electrons (Matsumoto et al., 2015). This means that a fraction of the reflected ions' kinetic energy is converted into the upstream electrons and ions through magnetic field amplification. It is a very hot topic that requires further investigation. Qualitatively, the Weibel instability will be the dominant mode at very high Mach numbers (or weak magnetic field), and otherwise, the rippling mode (Mirror and AIC) should be dominant. However, the parameter dependence of the transition between the two regimes has not been understood.

In this study, we adopt an idealized model for describing the dynamics in the shock transition layer. We consider a homogeneous plasma in the upstream rest frame, which consists of three particle species: the upstream ions, upstream electrons, and reflected ions. The initial velocity distributions are assumed to be Maxwellian distributions for the upstream ions and electrons while the reflected ions form a ring distribution in the direction perpendicular to the ambient magnetic field. An initial result of two-dimensional Particle-in-Cell (PIC) simulation shows that the upstream electrons are mainly heated in the perpendicular direction by electrostatic waves in the initial phase. On the other hand, almost no change was observed in the ion velocity distribution at this stage. In the subsequent phase, we observed a growth of the AIC instability and pitch-angle scattering of the reflected ions by the generated waves. In this presentation, we will report simulation results on the transition between different regimes that will happen depending on upstream physical parameters such as the Alfvén Mach number, plasma-to-cyclotron frequency ratio, and ion-to-electron mass ratio.

プラズマ中の無衝突衝撃波が半世紀以上にわたり、多様なアプローチによって研究が行われているのは、無衝突衝撃波が宇宙物理学の最も重要な課題の一つである宇宙線（高エネルギー粒子）の生成に大きく関与しているためである。本研究では無衝突衝撃波の遷移層領域におけるプラズマ不安定性およびそれに伴う粒子の加熱・加速過程を調べる。衝撃波上流から下流に流入するイオンのうち、衝撃波面のポテンシャル障壁を越えられない一部の粒子は衝撃波面で跳ね返り（反射イオン）、上流から流入するイオンと相互作用する。この反射イオンの効果によって遷移層に foot, ramp, overshoot と呼ばれる構造が形成される。この衝撃波遷移層では様々な時間スケール、空間スケールで不安定性が進行し、それに伴い上流電子、上流イオン、反射イオンの3粒子種間でのエネルギーのやりとりが行われる。

遷移層で発生する不安定性の中で、低周波、長波長領域のものは衝撃波全体の電磁場構造に大きな影響を与えることになるが、その中でも特に本研究で着目するのは、反射イオンがもたらす実効的な温度異方性を自由エネルギーとして成長する Mirror 不安定性、Alfvén Ion Cyclotron (AIC) 不安定性、Weibel 不安定性の3種である。Mirror、AIC 不安定はリップルと呼ばれる衝撃波面が波打つような構造を作り出すことが知られている (Winske & Quest, 1988)。また最近では、衝撃波のマッハ数が大きい場合には Weibel 不安定が励起され、これに伴う磁場増幅、さらには増幅された磁場の自発的な磁気再結合による散逸を介した電子加速過程が議論されている (Matsumoto et al., 2015)。これは反射イオンのエネルギー（衝撃波の運動エネルギー）の一部が、磁場増幅を介して上流電子やイオンに輸送されていることを意味し、さらなる解析が求められるホットなトピックとなっている。定性的には Weibel 不安定性は、マッハ数が高い（磁場が弱い）衝撃波において支配的になり、そうでない場合にはリップル（AIC/Mirror）が支配的になると考えられているものの、両者の切り替わりのパラメータ依存性は理解されていない。

本研究では、衝撃波の遷移層を理想化したモデルとして、上流静止系で、空間一様性を仮定し、上流電子、上流イオン、反射イオンの3成分からなる系を考える。ここで上流電子・上流イオンの初期速度分布としてはマクスウェル分布を、反射イオンについては磁力線垂直方向にリング状に分布する速度分布（リング分布）を仮定した。この条件下で二次元PICシミュレーションを行った初期結果では、初期フェーズでは静電波動により上流電子のみが磁場に垂直方向に大きく加熱されたものの、その段階ではイオンの速度分布にほとんど変化は見られなかった。その後のフェーズにおいてAIC不安定が支配的な構造が現れ、反射イオンがピッチ角散乱される様子が見られた。本発表ではアルフベンマッハ数やサイクロトロン周波数とプラズマ周波数の比、電子・イオンの質量比といった物理パラメータに対する不安定性の性質の遷移を調べた結果を報告する。