

非相対論的高マッハ垂直衝撃波における電子サーフィン加速効率の上流速度依存性について

#永井 健也¹⁾, 松本 洋介²⁾

(¹ 千葉大学融合理工学府, (² 千葉大高等研究基幹

Upstream velocity dependence of the electron surfing acceleration efficiency in non-relativistic high Mach perpendicular shocks

#Kenya Nagai¹⁾, Yosuke Matsumoto²⁾

(¹ Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, (² Institute for Advanced Academic Research, Chiba University

One of the most important problems with cosmic rays is the electron injection problem. This problem is that an unresolved acceleration mechanism for electrons to gain energy to enter the diffusive shock acceleration (DSA) is needed. Currently, the mechanism combining the shock drift acceleration (SDA) and the shock-surfing acceleration (SSA) is proposed. In particular, the Buneman instability is the key mechanism in the SSA. This is an electrostatic two-stream instability of cold electrons and ions, which excites a coherent electrostatic field in the shock transition region, leading to the electron acceleration.

The supernova remnant shocks, which are considered to be the main source of the galactic cosmic rays, have speeds of several thousands km/s (about 1% of the speed of light). However, current Particle-In-Cell (PIC) simulations have been conducted with the parameters of several tens of percent of the speed of light due to computational resource limitations. Under a fixed Alfvén Mach number, decreasing the shock wave speed to the speed of light (V/c) corresponds to increasing the ratio of the electron plasma to gyro frequencies. This ratio is known to affect the saturation process of the Buneman instability. The Debye length consequently becomes small for large frequency ratios ($=V/c \ll 1$), increasing computational resources. Therefore, the simulations of high Mach number shocks have not been conducted with such large frequency ratios.

We have examined 1D PIC simulations of high Mach number shocks and found that lowering V/c tends to make the Buneman instability grow at higher amplitudes and result in higher electron acceleration efficiencies. In this study, we also examine 2D PIC simulations of high Mach non-relativistic perpendicular shock using the supercomputer Fugaku. We report the results of the Buneman instability growth under various frequency ratios. We discuss electron heating and acceleration efficiencies under such high frequency ratios, and resulting electron reflection ratio at the shock front in quasi-perpendicular shocks, which are recently actively studied by 2D PIC simulations.

超新星残骸における無衝突衝撃波は銀河宇宙線の加速源として考えられているが、その加速メカニズムについては解明されていない。大きな問題の一つとして電子の注入問題があるが、現在では電子が衝撃波統計加速 (DSA) に入るエネルギーを得るために、衝撃波ドリフト加速 (SDA) と衝撃波サーフィン加速 (SSA) を組み合わせた電子加速機構が考えられている。このうち SSA での電子加速に大きく関わるのが Buneman 不安定性である。これは電子・イオンの 2 流体不安定性で、衝撃波遷移領域にコヒーレントな電場を励起し、電子の加速へと繋げる。一方、超新星残骸衝撃波速度はおおよそ数千 km/s (光速の 1% 程度) であると考えられているのに対し、これまでの Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションでは計算資源の制約により光速の数%程度のパラメータで行われている。マッハ数一定の下で光速に対する衝撃波速度 (V/c) を小さくすることは電子プラズマ/ジャイロ振動数比を大きくすることに相当し、この振動数比の大きさは Buneman 不安定性の飽和過程に対し影響を及ぼすことが知られている。また、大きな振動数比 ($= V/c \ll 1$) ではデバイ長が相対的に小さくなり、その結果計算量は増大する。そのため大きな振動数比の下での高マッハ衝撃波での計算は行われていなかった。

これまで我々が行った 1 次元 PIC 計算により、 V/c を下げることによって Buneman 不安定性がより大振幅へと成長し、コヒーレントな電子ホール、及び高い電子加速効率が見られた。そこで、本発表ではスーパーコンピューター「富岳」を用いた高マッハ数垂直衝撃波の 2 次元 PIC シミュレーションを行った結果を報告する。これまで行われていない非相対論的衝撃波速度での Buneman 不安定性について、そのパラメータ依存性や多次元性の効果を含めた解析結果を報告する。現在、無衝突衝撃波による電子加速について斜め衝撃波の研究が盛んに行われており、この垂直衝撃波での結果を元に斜め衝撃波における電子の反射効率について議論を行う。