

近接・衝突する二つの斜め衝撃波の数値実験

中野谷 賢 [1]; 松清 修一 [2]; 羽田 亨 [3]
[1] 九大総理工; [2] 九大・総理工; [3] 九大総理工

Numerical Experiment of Two Colliding Oblique Shocks

Masaru Nakanotani[1]; Shuichi Matsukiyo[2]; Tohru Hada[3]
[1] ESST, Kyushu Univ.; [2] ESST Kyushu Univ.; [3] ESST, Kyushu Univ

Mechanisms of the particle acceleration at a collisionless shock have been intensively studied analytically, numerically, and observationally. Most of the previous studies assume that energetic particles interact with a single shock. However, shock waves are ubiquitous in space, and two shocks frequently come close to or even collide with each other. For instance, it is observed that a CME (coronal mass ejection) driven shock collides with the earth's bow shock [H. Hietala et al., 2011], or interplanetary shocks pass through the heliospheric termination shock [J. Y. Lu et al., 1999]. Colliding shocks are observed also in high power laser experiments [T. Morita et al., 2013]. The energy of self-emission from a plasma is increased during the shock-shock interactions. However, detailed structures of such colliding shocks and the accompanied particle heating/acceleration processes are still not clear.

Here, we perform one dimensional full Particle-in-Cell (PIC) simulations to examine colliding two oblique shocks. In particular, the following three points are discussed in detail.

1. Energetic electrons are observed upstream of the two shocks before their collision. These energetic electrons are efficiently accelerated through multiple reflections at the two shocks (Fermi acceleration). Moreover, a part of the accelerated electrons are further energized by interacting with increasing magnetic field during the collision, or as they continue to be trapped at the shock surface after the collision.

2. Before the two shocks collide, large amplitude waves are excited by electrons flowing into the upstream via the electron fire hose instability [X. Li et al., 2000]. The waves scatter the electrons in such a way that the average pitch angle increase. Those electrons can be easily reflected when they encounter the shock, leading to even more enhanced abundance of the energetic electrons upstream. This implies that the self-generated waves give a positive feedback to electron acceleration in converging two shocks.

3. After the two shocks collide, we find that downstream plasma density and pressure are lower than the values estimated from MHD theory. The reason is that energetic electrons upstream affect the shock structures. Fluid quantities of the shocks obtained from the PIC simulation are compared with MHD theory to discuss the effect of the back-reaction of accelerated electrons to the collision of the shocks.

プラズマ中に発生する無衝突衝撃波（以下、衝撃波）は高エネルギー粒子を効率よく生成すると考えられている。その加速機構を明らかにするために多くの研究がなされてきたが、従来の議論はどれも単一の衝撃波を仮定しており、複数の衝撃波による加速はほとんど考えられてこなかった。実際、宇宙には衝撃波が普遍的に存在しており、衝撃波同士が接近・衝突することは頻繁に起こる。例えば、コロナ質量放出により生じた衝撃波と地球磁気圏衝撃波の衝突 [H. Hietala et al., 2011]、惑星間空間衝撃波が太陽圏終端衝撃波を横切ることが報告されている [J. Y. Lu et al., 1999]。また、室内レーザー実験においても衝撃波同士の衝突が観測されており、衝突の際に放射エネルギー（熱制動放射）が強まることが報告されている [T. Morita et al., 2013]。これらの衝撃波-衝撃波相互作用は宇宙高エネルギー現象を正しく理解するうえで重要となると考えられるが、相互作用による衝撃波構造の変化や粒子の加速・加熱などの物理過程は未解明である。

本研究では、1次元 Full-Particle-in-Cell シミュレーションを用いて二つの衝撃波の近接・衝突過程を調べる。特に、斜め衝撃波同士の衝突において次の3点の結果に注目する。

1. シミュレーションでは、接近しつつある2つの斜め衝撃波上流域で高エネルギー電子の存在が確認された。これらは、二つの衝撃波による反射を繰り返して効率的に加速（フェルミ加速）されており、被加速粒子の一部は、衝撃波衝突時に増幅される磁場や衝突後の衝撃波によってさらに加速されることが分かった。

2. 衝突前において、上流に染み出した電子によって大振幅波動が励起されることが分かった。この波動は電子 fire hose instability [X. Li et al., 2000] によって励起されたものと考えられる。また、この波動は被加速電子のピッチ角を変化させ、衝撃波による反射（衝撃波ドリフト加速 [L. Ball et al., 2001]）の効率を高めることが分かった。これは波動が加速に対して正のフィードバックを与えることを示唆している。そして波動の影響も含めた二つの衝撃波による加速機構を議論する。

3. 衝撃波衝突後の下流域でのプラズマの密度や圧力が磁気流体力学 (MHD) により求められる値よりも低いことが分かった。その原因としては上流に流出した高エネルギー電子が衝撃波構造に影響を与えたためであると考えられる。磁気流体力学で求められる衝突後の衝撃波の物理量（磁場の大きさ、衝撃波の速度 etc.）と PIC シミュレーションの結果との比較を行い、運動論的效果の影響を議論する。