

宇宙線の反作用を考慮した非線形衝撃波の性質

斎藤 達彦 [1]; 星野 真弘 [2]

[1] 東大・理; [2] 東大・理

Nonlinear modified shock including effect of cosmic rays feedback

Tatsuhiko Saito[1]; Masahiro Hoshino[2]

[1] EPS, Univ. of Tokyo; [2] University of Tokyo

It is believed that cosmic rays, whose energy is less than about $10^{15.5}$ eV, originate in our galaxy, particularly in the shocks at supernova remnants.

Fermi proposed first idea about acceleration mechanism of cosmic rays in 1949. His idea was statistical acceleration, and was called Fermi acceleration.

Diffusive shock acceleration (DSA) theory was proposed Bell (1978), Blandford and Ostriker (1978), in the end of 1970's. It solved an issue of Fermi's theory that acceleration time was too long, and predicted that resulting energy spectrum of cosmic rays was power law and its power index was about 2, which approximately corresponded to value of observations. So, DSA theory is accepted as a standard acceleration mechanism of acceleration.

However, DSA theory predicts that maximum energy of cosmic rays at the supernova remnants is about 10^{14} eV, which is one order of magnitude less than observation's value. This issue is unsolved.

Nonlinear shock acceleration is one approach to this issue. In this mechanism, high-energy particles accelerated by DSA modify shock and enhance acceleration rate.

This idea was proposed at early 1980's, and frequently discussed through numerical simulations in recent years.

In this research, we consider two-fluid model of background plasma and cosmic rays by defining cosmic ray pressure, and obtain modified Rankine-Hugoniot relation by considering diffusion of cosmic rays around the shock. From this, we can confirm that shock structure is changed as fraction of upstream cosmic rays increases in time asymptotic states. Additionally, at a certain fraction, there are a few possible shock structures, so, we discuss stability of these structures by solving time-dependent fluid equations numerically.

エネルギーが約 $10^{15.5}$ eV 以下の宇宙線は銀河系内起源の宇宙線であると考えられており、その加速起源はエネルギー論的に超新星爆発で発生した衝撃波が考えられている。衝撃波での加速メカニズムは 1949 年に Fermi によって提案された統計的な Fermi 加速がある。

1970 年代末に Bell(1978)、Blandford and Ostriker (1978) 等によって提案された、Diffusive Shock Acceleration (DSA) 理論は Fermi のモデルで問題であった、加速時間が長すぎるという問題を解消し、宇宙線のエネルギースペクトルが実際の観測結果とほぼ一致するべき指数約 2 のべき乗分布を再現できるとして、宇宙線加速の標準的なモデルとして、受け入れられている。

しかし、DSA 理論から予測される超新星残骸における宇宙線の最高エネルギーはおよそ 10^{14} eV にとどまり、観測結果に比べて 1 桁小さく、未説明の問題である。

この問題を解明する手法の 1 つとして、衝撃波における粒子の非線形的加速機構が考えるというものがある。非線形加速では宇宙線の加速過程において衝撃波近傍での高エネルギー粒子の割合が増すにつれて、衝撃波へのフィードバックによって衝撃波が変形を受け、圧縮率が増し、粒子の加速率がさらに上昇するというものである。

このモデル自体は DSA 理論が登場した直後の 1980 年代初頭には提唱されていたが、近年、数値シミュレーションなどにより、盛んに議論されている。

本研究では Drury(1983) に基づいて背景のプラズマに加えて、宇宙線の圧力を定義し、宇宙線と背景プラズマの 2 流体モデルを考えた。これより、宇宙線の衝撃波近傍での拡散も考慮した、ランキン-ユゴニオ関係が得られ、時間定常モデルで、宇宙線の割合が増すと、衝撃波の構造が変化すること確かめられた。そして、先行研究に加えて、磁場の効果をいれた、垂直衝撃波での時間定常な衝撃波の構造を導いた。さらに、衝撃波の構造が複数存在する場合の解の安定性を、流体方程式から時間発展を解くことによって、議論した。