

宇宙線変性衝撃波の運動論モデルにおける定常解

阿部 愛 [1]; 星野 真弘 [1]; 天野 孝伸 [1]
[1] 東大・理

The steady-state solution of the cosmic ray modified shock by kinetic model

Megumi Abe[1]; Masahiro Hoshino[1]; Takanobu Amano[1]
[1] University of Tokyo

Cosmic rays (CRs) with energies less than $10^{15.5}$ eV are believed to be produced at supernova remnant (SNR) shocks in our galaxy. The most plausible mechanism for the particle acceleration at the shock front is known as the Diffusive Shock Acceleration (DSA) process, in which the particles gain energy by bouncing back and forth across the shock front due to scattering by magnetic irregularities such as Alfvén waves. One of the most prominent features of DSA is that the energy spectrum of CRs may be written by a power law with its index solely determined by the compression ratio. In the limit of a strong shock such as those of SNRs, the compression ratio approaches to a constant value, predicting a universal power-law index -2 as the CR source spectrum. The theory has been widely accepted mainly because the predicted spectrum is consistent with observations. On the other hand, recent observations of young SNRs indicate that the CR pressure may be substantial as compared with the background plasma. In such a situation, the theory initially formulated in the test-particle limit must take into account the nonlinear back reaction from CRs. It has been known that the shock structure itself may substantially be modified by the pressure gradient exerted by CRs, which is known as a cosmic-ray modified shock (CRMS). The energy spectrum of CRs will also be changed due to the nonlinear effect that is important in modeling the observed nonthermal spectra.

Drury & Volk (1981) discussed analytic solutions of steady-state CRMSs by using a two-fluid model in which both CRs and the background plasma are approximated by fluids. On the other hand, the nonlinearity of the modified shock makes it difficult to construct an analytic solution in the kinetic regime which deals with the energy-dependent diffusion-convection equation. Although the two-fluid model may describe qualitative features of the nonlinear system, the kinetic effect must be taken into account to discuss, e.g., the resulting CR energy spectrum. The primary purpose of this study is to construct a steady-state solution of the CRMS in the kinetic regime using a numerical approach based on Reville et al (2009). Based on the constructed solution, we also discuss the roles of instabilities excited by CRs.

$10^{15.5}$ eV 以下のエネルギーをもつ宇宙線は、我々の銀河系内の超新星爆発の際に発生する衝撃波で加速されていると考えられている。衝撃波での加速機構として、宇宙線粒子が Alfvén 波等により散乱されながら衝撃波面の前後を往復することによりエネルギーを得る Diffusive Shock Acceleration(DSA) 機構が最も有力視されている。DSA 機構の特徴として宇宙線のエネルギースペクトルが冪型分布で表され、その冪指数が衝撃波の圧縮比にのみ依存する点が挙げられる。超新星残骸衝撃波のような強い衝撃波の極限では圧縮比が一定値となるため、対応するエネルギースペクトルの冪指数は-2に漸近する。この冪指数が観測から得られる宇宙線のエネルギースペクトルをよく説明することが、このモデルが受け入れられている大きな理由である。一方で最近の超新星残骸の観測によって、宇宙線の圧力は背景プラズマに対して無視することができない可能性が示唆されている。DSA 機構は宇宙線をテスト粒子として近似したモデルであり、宇宙線のエネルギー密度が無視できないほど大きい場合には宇宙線から背景プラズマへの反作用を考慮しなければならない。このとき衝撃波構造が宇宙線加速の非線形反作用の結果として変性を受けると考えられており、このような衝撃波は宇宙線変性衝撃波と呼ばれている。この時、衝撃波の圧縮率が変化することにより宇宙線のエネルギースペクトルも修正されると考えられており、観測結果との比較という観点においても高エネルギー宇宙線の反作用を考えることは重要である。

Drury & Volk(1981) は宇宙線および背景プラズマをそれぞれ流体で近似した 2 流体モデルを用いて宇宙線変性衝撃波の解析解を議論した。一方で、宇宙線の輸送を(エネルギー依存性まで含めた)移流拡散方程式で扱う運動論モデルにおいては、衝撃波の非線形性のため解析解の構築が困難である。2 流体モデルは定性的には系の特徴をよく記述するものの、エネルギースペクトル等の議論には運動論効果の考慮は必須である。本研究では Reville et al(2009) を基に、宇宙線の移流拡散方程式と宇宙線の圧力を考慮した背景プラズマの流体方程式を連立させた運動論モデルを用いて宇宙線変性衝撃波の定常解を数値的に構築する。また、得られた解を基に宇宙線が励起する不安定性についても議論したい。