

モンテカルロ法による衝撃波遷移層での非熱的電子加速のモデリング

加藤 拓馬 [1]; 天野 孝伸 [1]
[1] 東大・理

Monte-Carlo modeling of nonthermal electron acceleration within the shock transition region

Takuma Kato[1]; Takanobu Amano[1]
[1] University of Tokyo

The acceleration of non-thermal particles is one of the most important problems in space physics and astrophysics. Galactic cosmic rays with energies below 10^{15} eV are believed to be accelerated by the 1st order Fermi acceleration at supernova remnant (SNR) shocks as it naturally reproduces a power law energy spectrum roughly consistent with observations. However, it is well known that the Fermi acceleration is not efficient for non-relativistic electrons. Non-thermal radio and X-ray synchrotron emissions from relativistic electrons at SNR shocks imply that there exists a pre-acceleration mechanism that injects sub-relativistic electrons to the 1st order Fermi acceleration. This is called the injection problem and has been one of the unresolved issues in the shock acceleration theory.

One of the important electron acceleration mechanisms is the shock drift acceleration (SDA) [Wu 1984, Leroy and Mangeney 1984]. SDA occurs when an electron interacts with the shock transition region in an adiabatic manner. During the interaction, the electron travels anti-parallel to the motional electric field due to the gradient-B drift and thus gains energy. However, it is well known that the SDA alone cannot reproduce a power-law type spectrum and also the acceleration efficiency is not necessarily sufficient to explain observations of energetic electrons at the bow shock.

We here propose a new acceleration mechanism that takes into account the effect of pitch-angle scattering via wave-particle interaction during the course of SDA. This means that we essentially abandon the adiabatic approximation and introduce the stochasticity into the acceleration process. To simplify the analysis, we employ a box model in which only the dependence on the energy and pitch-angle of the distribution function is considered. We use the Monte-Carlo method for modeling the pitch-angle scattering. The Monte-Carlo simulations have been performed to investigate the dependence on model parameters such as Mach numbers, shock angles, and pitch-angle scattering coefficients. We find that, for a limiting case where an analytic estimate on the accelerated particle spectra is possible, the simulation results agree with the theoretical prediction. Based on the simulation results, we discuss the properties of the proposed acceleration mechanism in this report.

非熱的粒子の加速は、宇宙空間物理学や天体物理学における重要な問題の一つである。エネルギーが 10^{15} eV 以下の銀河宇宙線については、超新星残骸における Fermi 加速によって生成されていると広く信じられている。実際、この加速過程は、観測で得られるべき型のエネルギースペクトルを自然に再現することができる。しかし、Fermi 加速は非相対論的な電子に関しては非効率であることが分かっている。しかし、超新星残骸における非熱的電子からの電波や X 線領域でのシンクロトロン放射の観測結果から、Fermi 加速の起こる相対論的なエネルギーまで非相対論的な電子を加速する過程が存在することが示唆されている。この過程についてはよくわかっておらず注入問題と呼ばれている。

この問題を考えるうえで重要とされている加速過程の一つに衝撃波ドリフト加速 (SDA) [Wu 1984, Leroy and Mangeney 1984] がある。この加速過程は電子の運動が断熱的な場合に、衝撃波遷移層と電子の相互作用によって起こる過程である。電子は衝撃波の遷移層中で、磁場勾配ドリフトによって対流電場方向に運動することで加速される。しかし、SDA 単独ではべき型のスペクトルや、地球バウ・ショックで観測されているような加速効率を再現できないという問題があった。

本研究では、新しい加速機構として、SDA の途中で波動粒子相互作用によるピッチ角散乱を取り入れた統計的な加速機構を考える。ここでは簡単のために、電子分布関数のエネルギーとピッチ角依存性のみを考慮したボックス・モデルを考えた。さらに、解析関数で表されたピッチ角散乱係数を仮定し、モンテカルロ法を用いて電子分布関数を計算した。これを行うことで、電子のエネルギー分布やピッチ角分布のパラメーター (衝撃波のマッハ数、磁場配位、ピッチ角散乱係数) 依存性を調べた。その結果、解析的な計算が可能な条件では、シミュレーション結果が理論と一致した。本発表では、シミュレーション結果を基にこの加速機構の性質について議論する。