

# S1-3

## 衝撃波電子加速におけるホイッスラー波の役割

### The role of whistler waves in the shock acceleration of nonthermal electrons

天野 孝伸

Takanobu Amano

東京大学 地球惑星科学専攻

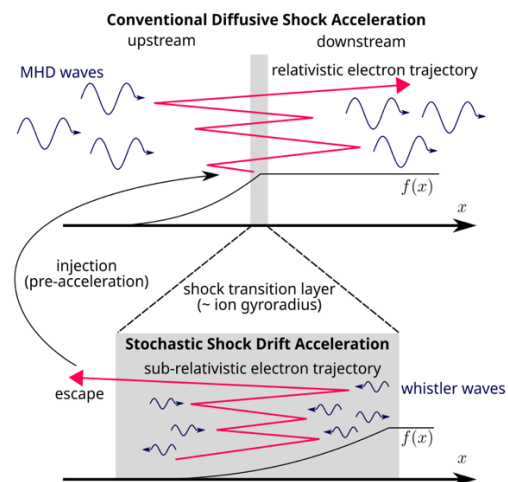
Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

高エネルギー宇宙線の起源については、必要とされるエネルギーの観点から古くから銀河系内の超新星爆発が有力な候補として考えられてきた。現在はフェルミ加速（衝撃波統計加速）と呼ばれる理論モデルが確立されたこと、また電波からガンマ線にいたる幅広い波長帯で超新星残骸からの非熱的放射が観測されていることから、超新星爆発に伴い生成される衝撃波（超新星残骸衝撃波）が銀河宇宙線 ( $< 10^{15.5}$  eV) の起源であるとするのが最も広く受け入れられた考え方となっている。超新星残骸衝撃波からの非熱的放射は電子起源の放射と陽子起源の放射に大別されるが、通常は質量が軽く放射効率の良い宇宙線電子からの放射からより多くの情報が得られる。宇宙線の大部分が陽子であり、宇宙線電子は微小成分にしか過ぎないが、観測的には宇宙線電子加速の理解は非常に重要である。

標準理論モデルとして受け入れられているフェルミ加速であるが、いわゆる「注入問題」が未解決のまま残されている。すなわち、熱的エネルギーからフェルミ加速が効率的となる中間エネルギーまで粒子を加速する何らかのメカニズムが必要とされる。特に電子については、典型的には熱的エネルギーよりも3桁程度大きなエネルギーが必要とされ、その大きな隔たりを埋めることは困難とされてきた。観測的には、宇宙線電子からの非熱的放射が観測される超新星残骸衝撃波とは異なり、太陽圏内の衝撃波においては一般に電子加速の効率が良くないことが人工衛星による直接観測から知られており、電子の注入効率が必ずしも高くないことが示唆される。

本講演ではこの電子注入問題の解決策として有望な機構である統計的衝撃波ドリフト加速 (Stochastic Shock Drift Acceleration; SSDA) につ

いて、特にホイッスラー波の役割に着目して議論する。SSDA機構は古典的な衝撃波ドリフト加速 (Shock Drift Acceleration; SDA) にピッチ角散乱の効果を考慮した粒子加速モデルであるが、ピッチ角散乱は被加速粒子を衝撃波遷移層内部に閉じ込めるために必須の要素である。地球のバウショックの直接観測では衝撃波遷移層において高強度のホイッスラー波が観測されており、ピッチ角散乱の最有力候補と考えられる。我々はSSDA理論の予言とNASA MMS (Magnetospheric MultiScale) 衛星による観測結果の詳細比較を行い、このことを実際に確認した。特に比較的高周波 ( $f/f_{ce} \sim 0.1-0.5$ ) のホイッスラー波は熱的から非熱的エネルギーへの切り替わりにあたるエネルギー領域の粒子の散乱に寄与し、電子注入に最も重要となることが示唆された。また、この結果をよりマッハ数の大きな超新星残骸衝撃波にも応用することで、電子注入問題の解決が可能であることを示す。



SSDA 機構の概念図[Amano et al. 2020]