

R007-12

Zoom meeting D : 11/3 AM1 (9:00-10:30)

9:45~10:00

地球バウショックにおけるホイッスラー波と電子加速効率の関係性

#増田 未希¹⁾, 天野 孝伸²⁾

(¹⁾ 東京大学 地球惑星科学専攻, (²⁾ 東大・理

Relation between whistler waves and electron acceleration efficiency at Earth's bow shock

#Miki Masuda¹⁾, Takanobu Amano²⁾

(¹⁾ Department of Earth and Planetary Science, Univ., (²⁾ University of Tokyo

Non-thermal high-energy particles are frequently observed in space. Collisionless shock waves are one of the sources of acceleration of these particles. In fact, non-thermal particles with a power-law energy spectrum have been observed around collisionless shock waves in some events. However, how and when particle acceleration occurs at collisionless shock is not yet fully understood. For example, the first-order Fermi acceleration is a promising candidate for the acceleration process of particles with a power-law energy spectrum. In this mechanism, particles in the vicinity of the shock are trapped around the shock due to pitch-angle scattering by MHD waves. However, low-energy electrons cannot resonate with MHD waves. Other mechanisms are necessary to accelerate electrons to intermediate energies where the Fermi acceleration becomes efficient. To solve this problem, Katou & Amano (2019) proposed stochastic shock drift acceleration. The cyclotron resonant scattering with higher frequency waves plays an important role in this mechanism. The most promising candidate for the scatterer is whistler waves, which have frequencies from 10% to 50% of the electron cyclotron frequency. In this study, we consider the relation between whistler waves and electron acceleration in collisionless shock.

Oka et al. (2006) statistically investigated the relationship between the shock parameters and electron acceleration efficiency. They showed that the ratio between Alfvén Mach number to the whistler critical Mach number (M_A/M_{crit}^w) correlates very well with the electron acceleration efficiency. Note that M_{crit}^w is defined with respect to the group velocity of the whistler wave normal to the shock, which leads to $M_{crit}^w \propto \cos \theta_{Bn}$. Oka et al. (2006) showed that harder energy spectra were found only at supercritical shocks with respect to the whistler critical Mach number ($M_A/M_{crit}^w > 1$). That suggests that the whistler wave plays a significant role in electron acceleration, but the specific mechanism has not yet been understood.

Katou & Amano (2019) and Amano et al. (2020) predicted that electron acceleration occurs only when the intensity of the whistler wave exceeds a certain threshold which depends on frequency. This threshold is strongly dependent on $M_A^{\Delta} = M_A / \cos \theta_{Bn}$, and qualitatively consistent with Oka et al. (2006). However, since the wave intensity may generally vary with Mach number or θ_{Bn} , more detailed investigation is necessary to confirm the theory.

The purpose of this study is to investigate the validity of this threshold statistically at Earth's bow shock. We use the data of shock crossing events observed by Magnetospheric MultiScale (MMS) spacecraft in burst mode. First, we confirmed that particles around the shock have a power-law energy spectrum. We integrate the data observed by Fast Plasma Investigation (FPI) integrated over 1s and calculated the time variation of the spectral index by fitting. To investigate the changes in the index between upstream and downstream we used the fast survey mode data as well. We also calculate the time variation of the wave power spectrum in the frequency band of the whistler wave by using Search Coil Magnetometers (SCM) at a 1s interval. Using these high time resolution data, we can resolve the internal structure of the shock. Based on the above data, we will discuss the relation between the whistler wave intensity (both absolute and relative to the theoretical threshold) and the electron acceleration efficiency.

宇宙空間には非熱的な高エネルギー荷電粒子が存在している。それらの粒子の加速源の一つとして無衝突衝撃波が挙げられ、実際に一部のイベントで無衝突衝撃波の周辺でベキ型のエネルギースペクトルを持つ非熱的粒子が観測されている。しかし、無衝突衝撃波における具体的な粒子の加速メカニズムや加速が起こる条件などについては未解明の点も残されている。例えば、ベキ型のスペクトルを持つ粒子の加速過程の候補として一次フェルミ加速がある。このメカニズムでは衝撃波近傍の粒子がMHD波動のピッチ角散乱により衝撃波周辺に捕捉される。しかし、低エネルギー電子はMHD波動と共鳴できないためフェルミ加速が効率的になる中間エネルギーまでの加速には他のメカニズムが必要であると考えられている。この課題に対してより高周波の波動とサイクロトロン共鳴散乱を考える統計的衝撃波ドリフト加速が提唱された (Katou & Amano, 2019)。散乱体として一番有力な候補が、サイクロトロン周波数の10%から50%程度の周波数を持つホイッスラー波である。本研究ではこのホイッスラー波と無衝突衝撃波における電子加速の関係性について考える。

衝撃波パラメータと電子加速効率の関係性を統計的に調べた先行研究として Oka et al. (2006) が挙げられる。Oka et al. (2006) ではパラメータの一つとしてホイッスラー臨界マッハ数 (M_{crit}^w) とマッハ数 (M_A) との比 M_A/M_{crit}^w と電子加速効率に良い相関があることが示された。 M_{crit}^w はホイッスラー波の群速度の衝撃波面に垂直な成分で定義され、衝撃波面と上流の磁場方向の成す角を θ_{Bn} とした時、 $M_{crit}^w \propto \cos \theta_{Bn}$ となる。Oka et al. (2006) では超臨界の時にのみベキ指数が小さい、すなわち加速効率がよくなることを示した。これはホイッスラー波が電子加速に大きく関わっていることを示唆する結果であるが、その具体的なメカニズムはまだ理解されていない。

これを受けて Katou & Amano (2019) や Amano et al. (2020) では電子加速はホイッスラー波の強度がある閾値を超えた時のみに起こると予想し、その理論曲線を導いた。この閾値は $M_A^\Lambda = M_A / \cos \theta_{Bn}$ に強く依存しており、定性的には Oka et al. (2006) と整合的である。しかし波の強度も一般にはマッハ数や θ_{Bn} の関数として変動することが考えられるため、より詳細な調査が必要である。

本研究では地球バウショックの場合においてこの閾値の妥当性について統計的に調べることを目的とする。そのために Magnetospheric Multiscale(MMS) 衛星の burst mode で観測された衝撃はイベントのデータを用いる。まず、上で述べたように衝撃波付近でのエネルギー Spektrum がベキ型になっていることを確認した。この際 Fast Plasma Investigation(FPI) で観測されたデータを 1s 積分したものを用い、フィッティングによってベキ指数の時間変化を求めた。衝撃波前後での変化を調べるため、上流および下流でも同様にベキ指数を求め、さらに同様に 1s 間隔で Search Coil Magnetometers(SCM) を用いてホイッスラー波の周波数帯におけるパワースpektrum の時間変化を求めた。これら高時間分解能のデータを用いることで衝撃波の内部構造を分解することが可能である。以上のデータをもとに、ホイッスラー波の絶対強度および理論閾値に対する相対強度と電子加速効率の関係性を議論する。