

地球バウショックにおける電子加速：計算機実験と MMS 衛星観測による研究
 Electron acceleration at Earth's bow shock: PIC simulation and MMS observation

大塚史子, 松清修一 (九州大学)
 岡光夫(UC Berkeley), 梅田隆行 (名古屋大学)

概要

本研究は、従来と比べ圧倒的な高時間分解能を誇る MMS 衛星との比較に耐える高精度の衝撃波シミュレーションを行い、MMS 衛星で得られる電子分布関数や電磁場微細構造を計算データと直接比較することで、地球バウショックにおける電子加速機構を解明することを目的としている。今年度は衝撃波リフォーメーションに伴い、衝撃波遷移層前面に突発的に生成される高エネルギー電子の詳細な軌道解析を行い、種々の加速メカニズムの寄与を定量的に評価した。また、電子加速機構の体系的な理解を目指し、異なる衝撃波角(衝撃波法線方向と上流磁場のなす角)とマッハ数のパラメータセットに対して、複数の衝撃波シミュレーションを行い、ホイッスラー臨界マッハ数に対して計算データの整理を行った。

1つのパラメータセットに対して利用した計算資源は、ノード数 16、総コア数 768、総メモリ量 20GB 程度である。計算パラメータは、衝撃波のマッハ数 $M_A=3.5\sim 7$ 程度、衝撃波角 $\Theta_{Bn}=65\sim 85$ 度に対し、複数の計算を行った(図 3 参照)。その他のパラメータは、プラズマベータ値 (=プラズマの熱的圧力と磁気圧の比) = 0.3、イオン/電子温度比=1、イオン電子間質量比=625、電子プラズマ/サイクロトロン周波数比 = 10 と固定した。run あたり総超粒子数は $\sim 10^8$ 、時間ステップ数は 3.0×10^6 である。

成果内容

図 1 は衝撃波リフォーメーションに伴って加速された電子の軌道解析の結果である。太陽風と共に上流から伝搬してきた電子は、磁場オーバーシュート(磁場増幅)が形成されつつある衝撃波遷移層内部の狭い領域に捕捉される(中図)。遷移層内部の微細構造はホイッスラー定在波に起因する。この微細構造に捕捉されている間に、電子は垂直方向に加速する(左図)。そして磁場の急減少に伴い、磁場に垂直方向の運動エネルギーが平行方向の運動エネルギーに変換され、電子ビームとして上流へ逆伝搬する。右図はこの電子が感じる電場と速度の内積からエネルギー増分 $\Delta\gamma_{HT}$ を計算した結果である。速度と電場ともに、衝撃波ホフマン・テラー系(HT 系)へローレンツ変換した値を用いた。加速過程を分離するため、速度を旋回成分とドリフト成分に分離し、それぞれの速度に対してエネルギー増分を評価した。その結果、磁場増幅に伴い、旋回運動のエネルギーを獲得するベータトロン加速の効果(右図の赤線)がもっとも大きいことを明らかにした。次に、衝撃波ポテンシャルによる効果(ピンク)と付加的な衝撃波ドリフト加速(SDA)の効果(青線)が同程度加速に寄与している結果を得た。ここで、付加的な SDA について述べる。SDA とは衝撃波接線方向へドリフトすることで対流電場によって運動エネルギーを獲得する過程である。通常、理想 MHD

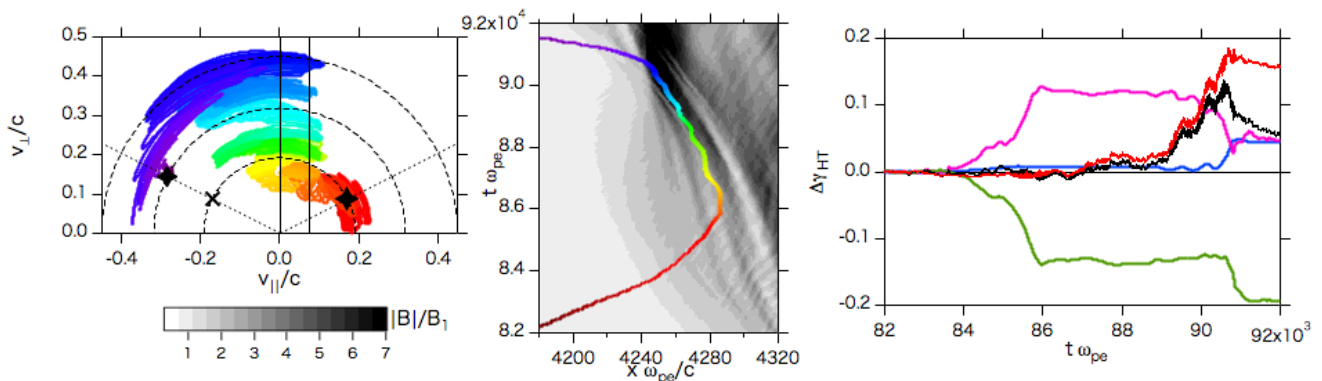


図 1. 衝撃波リフォーメーションに伴って加速された電子ビーム(run 4) (左図) 速度空間および(中図)実空間における電子軌道. 軌道のカラーは時間($t\omega_{pe}$)に対応している。(右図) 衝撃波ホフマン・テラー系で評価した電子のエネルギー増分. 全エネルギー増分(黒線)を分離した結果をカラー線で示す。[赤]ラーマ運動による効果(ベータトロン効果) [青]付加的な衝撃波ドリフト加速の効果 [桃] 衝撃波ポテンシャルの効果 [緑] ほぼ磁力線方向に沿った電場の効果

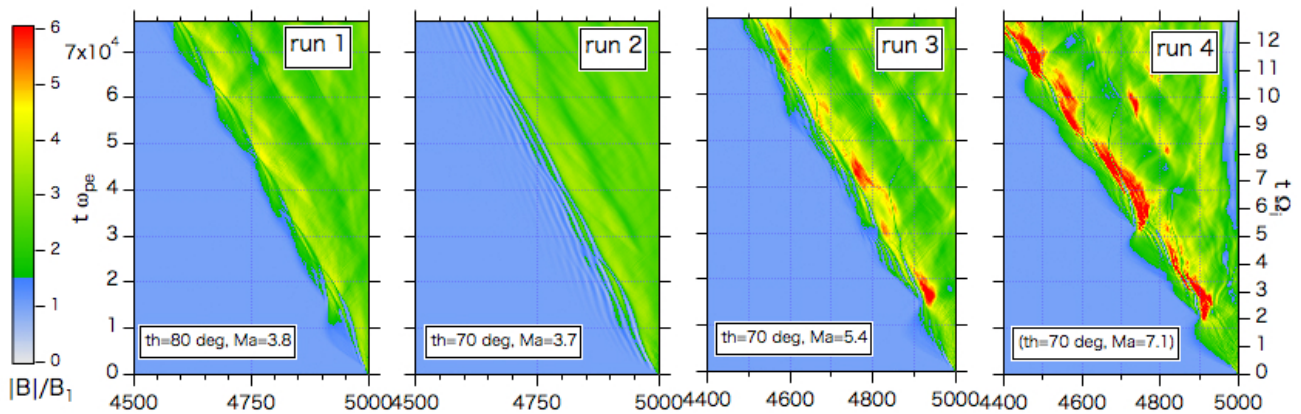


図 2. 磁場強度の時間発展

(run 1) $M_A=3.8$, $\Theta_{Bn}=80$ 度, (run 2) $M_A=3.7$, $\Theta_{Bn}=70$ 度, (run 3) $M_A=5.4$, $\Theta_{Bn}=70$ 度, (run 4) $M_A=7.1$, $\Theta_{Bn}=70$ 度

系の範囲内では HT 系において対流電場がなくなるので、SDA は働かない。図 1 で示した付加的な SDA は理想 MHD 系では記述できない衝撃波遷移層の微細構造を反映した加速過程と言える。最終的にベータトロン加速と衝撃波ポテンシャルによる加速効果が磁力線方向の電場による減速(緑線)と釣り合い、付加的な SDA による加速効果が正味のエネルギー増分に寄与することを明らかにした。本成果は第 37 回宇宙線国際会議で発表した(成果 2,3)。本加速メカニズムの定量的な報告は論文として準備中である。

図 3 は計算を実施したアルフヴェンマッハ数と衝撃波角のパラメータセットを示す(未完了の run 含む)。図中の実線は電磁ホイッスラー波に対して定義した臨界マッハ数を示し、このホイッスラー臨界マッハ数を境に、電子加速効率が明らかに異なることが、これまでの衛星観測で報告されている[1]。亜臨界の場合(実線より下の領域)には、ホイッスラー波動が衝撃波上流へ伝搬できることを示す。図 2 は 4 つの run の磁場強度の時間発展を示し、対応するパラメータは図 3 の赤マークで示す。亜臨界の領域である run2 ではホイッスラー波動が上流へ染み出していることが確認できる。一方、超臨界の領域では、ホイッスラー波動はフットやオーバーシュートなどの衝撃波遷移層内部に定在波として閉じ込められる(run3, run4)。本プロジェクトにおいて定在ホイッスラー波動が電子加速に重要な役割を果たすことを見出しており、今後は本成果をもと、衝撃波パラメータの違いによって支配的となる加速機構を明らかにする等、科研費・基盤 C(22K03703)において、発展的な研究を進める予定である。

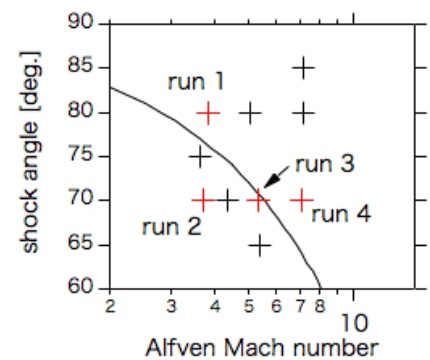


図 3. 計算を実施した衝撃波角とアルフヴェンマッハ数のパラメータセット。実線はホイッスラー臨界マッハ数を示す。

引用文献

[1] Oka et al., Whistler critical Mach number and electron acceleration at the bow shock: Geotail observation, Geophys. Res. Lett., 33, L24104 (2006)

成果発表

1. F. Otsuka, S. Matsukiyo, M. Oka 「Trajectory analysis of energetic electrons in quasi-perpendicular shock structure」 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 5 月
2. F. Otsuka, M. Oka, S. Matsukiyo 「Electron acceleration parallel and perpendicular to overshoot magnetic field in quasi-perpendicular collisionless shock」 37th International Cosmic Ray Conference, 12-23 July 2021, #744
3. F. Otsuka, Oka, M., S. Matsukiyo, 「Bursty betatron acceleration of electrons at nonstationary quasi-perpendicular shocks」 Proceedings of International Cosmic Ray Conference, 2021, PoS(ICRC2021)1344
4. 大塚史子, 松清修一, 岡光夫, 「非定常な準垂直衝撃波における電子のベータトロン加速」, 令和 3 年度 ISEE 研究集会「宇宙および実験室プラズマ中の非線形波動と粒子加速に関する研究集会」, 九州大学筑紫キャンパス, 2022 年 3 月 11 日