

## 地球バウショックにおける電子加速: 計算機実験とMMS観測による研究

## 大塚 史子 九州大学大学院総合理工学研究院

JHPCN第12回シンポジウム, July 09, 2020

研究概要

**宇宙線**は宇宙空間を飛び交う高エネルギー荷電粒子である。宇宙線の加速源として宇宙に普遍的に存在する**無衝突衝撃波**が有力視されているが、加速過程の詳細は不明である。地球磁気圏前面にはバウショックと呼ばれる無衝突衝撃波が常に存在し、特に衝撃波面の法線と上流背景磁場のなす角が90度に近い準垂直衝撃波側では、ベキ型のエネルギースペクトルを持つ**非熱的電子**が観測されている。 人工衛星は地球バウショックの波動と粒子の両方をその場で**直接観測**することができるため、粒子加速に至る過程を詳しく調べることができる。2015年に打ち上げられたMMS衛星は従来と比べ圧倒的な高時間分解能を誇り、地球バウショックにおける非熱的電子の加速メカニズム解明へ向け期待が高まっている。

本研究では、MMS衛星データと直接比較することを念頭に、準垂直衝撃波の計 算機実験を行い、衝撃波加速への電子注入からベキ型のエネルギースペクトルが 形成されるに至る電子加速機構の解明を目指す。高精度の数値実験として、多数 の荷電粒子(イオン・電子)の運動と電磁場の時空間発展を第一原理的に解く全粒 子(Particle-in-cell: PIC)シミュレーションを用いる。

1



超新星残骸の衝撃波からは、加速した電子が放射するX線が観測されている (左図,文献[1])。また、地球バウショックでは非熱的電子が観測されており (右図)、宇宙空間に普遍的に存在する無衝突衝撃波が電子の加速源と考えら れている。 研究背景 -- 衝撃波フェルミ加速モデル --



Particle gains net energy with  $\Delta v=2(u_1-u_2)$  per one cycle of shock crossing.

無衝突衝撃波を介したフェルミ加 速モデルは、ベキ型の粒子エネル ギースペクトルを再現できること から、宇宙線加速の最も有力な候 補の一つである。

しかしフェルミ加速実現のため には以下の過程が必要である。

(1)衝撃波上流へ逆走するだけのエ ネルギーを予め獲得(**注入問題**)

(2)衝撃波面を何度も横切るために 衝撃波上流・下流域の**電磁波動によ** る散乱

(3) そのための電磁波動励起

## 研究目的

- 本研究では、高解像度のMMS観測データとの直接比較に堪える高精度の数 値実験を行い、準垂直衝撃波での電子注入から電磁波動励起、波動によ る電子散乱、加速に至る過程を理解することを目的とする。
- 準垂直衝撃波では、アルフヴェン マッハ数が3を越えると、衝撃波ポ テンシャルの上昇に伴い、太陽風イ オンの一部が反射し、新たな衝撃波 面が形成される(**衝撃波リフォーメー** ション)(文献[3])。
- 本研究では、衝撃波リフォーメー ションに伴う高エネルギー電子の生成 過程を議論する。



計算パラメータ 下流静止系 衝撃波角:θ<sub>Bn</sub> = 70° 上流 下流 電子/イオン旋回周波数= $\Omega_{i}/\Omega_{i}$  = 625 電子プラズマ周波数: ω<sub>pe</sub>= 10Ω<sub>e</sub> shock: v<sub>sh</sub> プラズマ圧/磁気圧 = 0.3 →X vall **Plasma flow:** v<sub>in</sub> 入射プラズマ速度: V<sub>in</sub>=0.02 c 入射イオン旋回半径: ρ<sub>i</sub>=125 c/ω<sub>ne</sub> L(グリッド数=20万) アルフヴェン速度: V<sub>Δ</sub>=0.004 c  $B_1$ 計算系のサイズ:L=5000 c/ω<sub>pe</sub>=40 ρ<sub>i</sub> 背景磁場はx-z面 'Bn X 対流電場Evあり アルフヴェン マッハ数:  $M_{\rm A} = \frac{{\bf v}_{\rm in} - {\bf v}_{\rm sh}}{V_{\rm c}} \approx 7$  $E_v = v_{in} B_1 \sin \theta$ 

計算モデル

衝撃波生成には1次元のインジェクション法を用い、入射プラズマと右側の壁で反射したプラズマが混合し下流が形成され、衝撃波面が上流左側へ $V_{sh}$ で伝搬する。(cは光速、 $\rho_i=V_{in}/\Omega_i$ は入射イオン旋回半径,各粒子数/セル=128個,ステップ数=640万)

磁場エネルギーの時空間分布



図(b)は時間 $\omega_{pe}$ t=1.6×10<sup>5</sup>まで計算した磁場エネルギーの時空発展である。衝撃波面の 増幅磁場(オーバーシュート)が $\Omega_{i}$ t~2の周期で出現しており、衝撃波リフォーメーショ ンが確認できる。第1オーバーシュートがピークに達した時間( $\Omega_{i}$ t=21.2)と最小になった 時間( $\Omega_{i}$ t=22.4)での電子分布を比較する(p.8)。また、破線で囲った領域の電磁波動を解 析する(p.9,10)。(同様な結果は衝撃波静止系の計算でも得られている[4]。) MMS衛星観測との比較



ラー効果に起因する下流の増幅磁場間の電子ホール)を得た。

7

## 電子分布の時間変化





衝撃波リフォメーションに伴い、 下流磁場が増すと(a)、高エネル ギーの電子バーストが現れ(b)、 衝撃波遷移層近傍のエネルギー スペクトル(c)はベキ型とガウス 型を、また速度分布は磁力線方 向への伸び(d)縮み(e)を周期的 に繰り返す。





電磁波動 –上流-

0.02

0.01

0.00

-0.01

- -0.02





- 上流プラズマ静止系での磁場変動(B<sub>v</sub>成分)を示 • す(a)。背景磁場に対して変動磁場は0.02%と微 小である。
- この磁場変動のフーリエ解析(c)の結果、衝撃 • 波上流へ伝搬するホイッスラー波が確認できる。 (白破線は冷たいプラズマの分散関係)。
- また、波形(b)から波数20Ω。/c(波長にして ٠ 0.025ρ<sub>i</sub>)の短波長の電磁波も確認できる。

電磁波動 -下流-



11

被加速粒子の軌道



特徴的な振る舞いをする非熱的電子の軌道(x-t空間)と対応する電子エネルギーの時間発展を示す。衝撃波近傍での電子加速プロセスとして以下が考えられる。

- 1. **衝撃波リフォーメーション**と連動して、強い磁場が出現したときに電子が**ミラー反射**して 加速(赤、紫の粒子)
- 2. 衝撃波遷移層の微細構造に捕捉されて加速(青の粒子)
- 3. 下流の第1・第2オーバーシュートに挟まれて加速(オレンジの粒子)
- 4. 下流で何らかのプロセスで加速(緑、赤の粒子)

まとめ

- 準垂直衝撃波(衝撃波角70度,アルフヴェンマッハ数7.1)を全粒子シミュレーションで再現し、MMS観測(Oka et.al.[5])と類似する結果(衝撃波上流の電子バーストや衝撃波下流のピッチ角分布の電子ホール)を得た。
- 衝撃波リフォーメーションに起因した衝撃波面の磁場変動と連動し、磁場が 増大したときに、ミラー反射によって電子バーストが起こり、ベキ型の 電子エネルギースペクトルが周期的に現れることを明らかにした。
- このとき、電子速度分布は磁力線方向に伸び非等方性が強くなる。古典的な衝撃波フェルミ加速では上流波動によるピッチ角散乱によって等方な電子速度分布となるため、本研究で得られた電子加速は古典的なフェルミ加速とは異なると言える。
- また、下流の大振幅非線形波動や第1・第2オーバーシュート間での磁気
  ミラー反射に関係して、下流で加速した電子が上流へ電子ビームとして抜け出す様子も観測された。
- 電子注入過程として、衝撃波ドリフト加速や電子波乗り加速[6,7]が提唱 されており、今後は粒子軌道をより詳しく解析し、これらの加速過程との関連を議論する。



[1] A. Bamba et al., Small-scale structure of the SN 1006 shock with CHANDRA observations, Astrophys. J., 589:827-837, 2003

[2] Y. Kasaba et al., Statistical studies of plasma waves and backstreaming electrons in the terrestrical electron foreshock observed by Geotail, J. Geophys. Res., 105, A1, 79-103, 2003

[3] 松清修一,無衝突衝撃波における宇宙線加速と磁場増幅の観測・理論・シ ミュレーション(小特集宇宙と実験室の無衝突衝撃波-粒子加速と磁場生成・ 増幅-), J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.2 (2016)87-92

[4] T. Umeda and R. Yamazaki, Full particle simulation of a perpendicular collisionless shock: A shock-rest-frame model, Earth Planets Space, 58, e41–e44, 2006

[5] M.Oka et al., Electron scattering by high-frequency whistler waves at Earth's bow shock, Astrophys. J. Lett., 842, L11 (7pp) 2017

[6] 星野真弘, 天野孝伸, 宇宙における衝撃波粒子加速機構の新展開, 日本物理学 会誌 64(6), 421-429, 2009

[7] T. Amano and M. Hoshino,Electron injection at high mach number quasiperpendicular shocks: Surfing and drift acceleration, Astrophys. J., 661:190 – 202, 2007