

# Bow shock にて観測された 電子加速の太陽風パラメータ依存性 Dependance of electrons acceleration observed at bow shock on the solar wind parameters

関 克隆

要旨

## 1 Introduction

太陽風プラズマは、その密度が非常に希薄なため、構成する粒子間の衝突がほとんど無視できる無衝突プラズマである。太陽風が無衝突プラズマであるにもかかわらず、地球磁気圏の前面には bow shock が形成される。こうした bow shock に代表されるような無衝突衝撃波形成における散逸機構の詳細は完全には理解されていない。本研究の目的は、異なる太陽風パラメータの条件下で衝撃波遷移層中における電子の振る舞いがどのように変化するか、を調べることを通して、衝撃波における電子加速機構を理解することである。最近の衝撃波での粒子加速に関する計算機シミュレーションによると、同じ衝撃波角でも、上流の Alfvén Mach 数 ( $M_A$ )、プラズマ  $\beta$ 、プラズマ周波数とサイクロトロン周波数の比 ( $\omega_p/\Omega_e$ )、の 3 つのパラメータに依存して衝撃波遷移層が変化することが明らかになりつつある [Scholer et al., 2003]。そこで我々は、これらの 3 つの太陽風パラメータ  $M_A$ 、 $\beta$ 、 $\omega_p/\Omega_e$  に注目して、GEOTAIL 衛星による衝撃波観測データの解析を行った。GEOTAIL 衛星は、1992 年に打ち上げられて以来磁気圏を観測しているので、変化に富む 1 太陽周期をカバーするような長期間観測によって得られた豊富な in-situ 観測データの利点を活かすことによって、衝撃波遷移層で起こる電子加速に関して統計的・定量的な議論が可能となる。

## 2 太陽風パラメータの変動

WIND 衛星のデータを使用した太陽風の統計解析の結果、 $M_A$  の変動に対して磁場の変動が強く影響していることもわかった。例えば、 $M_A$  数が 20 を超えるような大きな  $M_A$  数の条件であっても速度の絶対値としては、300 ~ 400 km/s 程度の流れであって、磁場が小さいことによって太陽風の Alfvén 速度が非常に遅くなったことで  $M_A$  数が大きくなっていることがわかる。そして、太陽活動の変化に伴い磁場強度が変化している。その影響により、 $M_A$ 、 $\beta$ 、 $\omega_p/\Omega_e$  も活動期の違いに伴ってパラメータの分布が変化する。さらに 1995-96 年には 2001-02 年と比較して、数多くの高  $M_A$  数イベント ( $M_A > 15$ ) を観測していることもわかった。また、サンプル数はすくないが、非常に高い ( $M_A > 20$ ) にもなる太陽風が観測されていることもわかった。

## 3 電子加速の発見

そこで、この時の高  $M_A$  数条件下で GEOTAIL 衛星が衝撃波を通過した時の低エネルギー粒子観測器 (LEP) の電子データに注目して解析した。その結果、無衝突衝撃波での散逸過程の一つで

ある、電子が強く加速されているイベントを発見した。この時のエネルギースペクトルは、冪型の関数で近似できる分布をしており、40keV を超えて伸びている。以下の Fig.1 がその時のエネルギースペクトルである。+は GEOTAIL 衛星により得られたデータを表し、× は観測限界値である 1count level を示している。

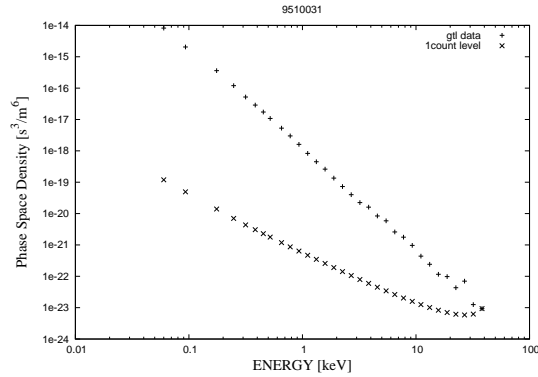


図 1: 1995 年 10 月 3 日 1940UT でのエネルギースペクトル。

#### 4 Bow shock 統計解析の概要と結果

以上の解析結果をふまえ、準垂直衝撃波において太陽風の 3 パラメータ  $M_A$ 、 $\beta$ 、 $\omega_p/\Omega_c$  が変化することにより、どのように電子加速の有無が決定されているかどうかを調べた。衝撃波解析に必要な物理量の決定は非常に難しいが、過去に使用された様々な手法を用いて比較・検討し、決定精度の向上に努めた。厳しいイベント選別と準垂直衝撃波のイベントに限った結果、最終的なイベント数は 41 であった。観測された電子加速の激しさを、電子分布関数を冪乗型関数で fitting して冪指数で評価した。スペクトルも高エネルギー側、低エネルギー側との二本の直線で fitting し、二つの冪 ( $\alpha_{high}$ 、 $\alpha_{low}$ ) で評価した。そして、その二本の直線の接点を最高エネルギー  $E_{max}$  とし評価した。その結果、以下のことがわかった。

- $\alpha_{low}$  には  $\theta_{Bn}$  依存性がある
- $\alpha_{low}$  には  $M_A$  数の依存性もある。
- 上記の二つの値が大きいほど (右上ほど) スペクトルはハードになる。Fig.2

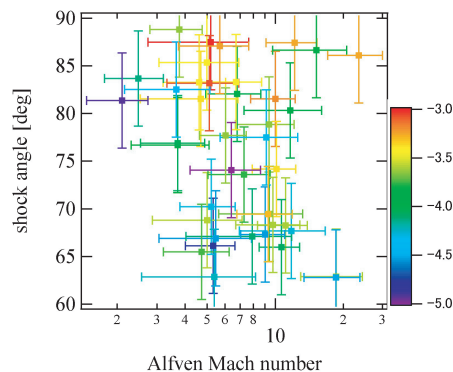


図 2:  $\theta_{Bn}$  vs  $M_A$  散布図、カラー  $\alpha_{low}$

## 5 既存理論との考察

現在、衝撃波での電子加速の有力な加速機構としてあげられている、以下の二つに関して考察した。

- Diffusive Shock 加速 (フェルミ加速) (DSA)
- Shock Drift 加速 (SDA)

これらの理論と解析結果を考察をした。ここで、フェルミ加速、Shock Drift 加速では、磁場の乱れが重要であることが示唆されているので、衝撃波遷移層における磁場の乱れを  $\sigma_{|B|}/|\bar{B}|$  で評価し、スペクトルとの関係を見た。その結果、 $\sigma_{|B|}/|\bar{B}|$  と  $\alpha_{low}$  に依存性がみられ、磁場の乱れが激しいほど電子が加速されていることがわかった。Fig.3 がその結果である

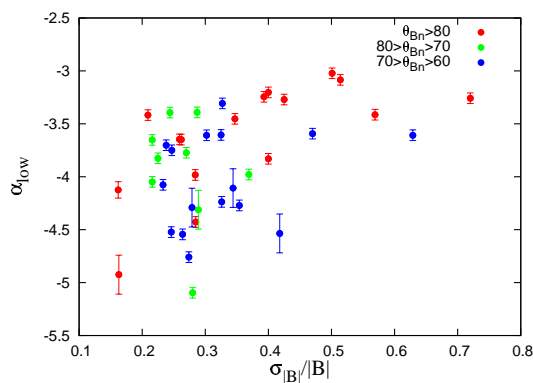


図 3:  $\alpha_{low}$  vs  $\sigma_{|B|}/|\bar{B}|$  散布図

フェルミ加速と Shock Drift 加速機構での説明に有利である、磁場の乱れとスペクトルに関係性が見られたが、フェルミ加速では、理論で予想されている冪指数、分布関数の違いなどから、古典的な理論だけでは観測事実を十分に説明できない。一方、Shock Drift 加速でも、既存の理論の枠組みだけではうまく説明できず、これらの議論から、観測された衝撃波遷移層中での電子加速は、現在有力である加速理論だけで説明することは難しいことが明らかになった。

## 6 まとめ

GEOTAIL 衛星を用いた bowshock 統計解析より、電子加速の太陽風パラメータ依存性に関して以下のことがわかった

- $\alpha_{low}$  の  $\theta_{Bn}$ 、 $M_A$  依存性
- $\alpha_{low}$  の  $\sigma_{|B|}/|\bar{B}|$  依存性

$\theta_{Bn}$  と  $M_A$  が大きくなるほど、1[keV] 未満のスペクトルはハードになっている傾向があることが示唆できる。

$\sigma_{|B|}/|\bar{B}|$  で評価した磁場の乱れが激しいほど、1[keV] 未満のスペクトルはハードになる傾向がある。

これらの結果と既存の理論との考察を行った結果、既存の理論だけで、bowshock での電子加速をきれいに説明することは難しいことがわかる。今後は本研究で得られた解析結果を説明できるよう、加速理論を修正していかなければならないだろう。