

極域コロナホールでの Alfvén wave による エネルギー散逸の観測的定量化

藤下祐人 (名古屋大学 太陽地球環境研究所)

Abstract

太陽に関する未解決問題としてコロナ加熱問題がある。これらに対する理論モデルはいくつか提唱されているが、その中でも波動によるエネルギー散逸に起因するものを 'wave-driven モデル' と呼ぶ。特に太陽大気の広範囲 (彩層~コロナ) における Alfvén wave の観測によって、このようなモデルはサポートされている。そこで今回は、これに関する論文 Hahn,Savin(2013) を紹介し、Alfvén wave が運搬・散逸するエネルギーと理論モデルの関係について定量的な議論を目指す。

1 Introduction

コロナ加熱や太陽風加速の理論モデルはいくつかあるが、その中でも wave にエネルギー輸送に起因するものを 'wave-driven モデル' と呼ぶ。特に今回は Alfvén wave のエネルギー散逸を扱う。最近の研究で、open field line の磁場領域において、Alfvén wave が比較的低高度で散逸しているクリアな観測結果が得られ (Hahn et al.2012, Bemporad,Abbo2012)、wave によるエネルギー散逸がコロナ加熱に寄与していることがより強く示唆されている。そこで、実際に wave がこれら 2 つの現象を担っているかを検証するために、波動により損失されるエネルギーを定量化することが必要となる。しかし、データとして測定される line widths には熱的な broadening と非熱的な broadening が含まれるという問題がある。これらがそれぞれイオン温度とプラズマの運動という異なる物理過程に依存するため、二つの寄与を分けて考えなければならない。これに伴い、Hahn,Savin(2013) では、 v_{nt} と T_i を分離して line widths を検証する方法を提案し、wave が初期エネルギー、エネルギーフラックスの変化、damping の距離・時間スケールを数値的に見積もっている。

2 Observations, Analysis Method

ひのでの EIS による分光観測から 4 つのデータを用いる。(2009 April 23 at 12:42, 13:16, 13:50, 15:17) EIS は極紫外線波長領域において分光観測を行い、太陽大気の診断を行う観測装置である。遷移層やコロナにおけるプラズマの温度、密度、速度といった情報を得るのが役割であり、幅 1-2 秒角のスリットをずらしていくことでマップを作成する。EIS のスリット幅は 2 秒角で、height range は 0.95~1.45 太陽半径をカバーしている。分光観測されるスペクトル線はある line width を持ち、その半値幅は以下のように 3 つの成分で表される。

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = \left[\Delta\lambda_{\text{inst}}^2 + 4 \ln(2) \left(\frac{\lambda}{c} \right)^2 \left(\frac{2k_B T_i}{M} + v_{nt}^2 \right) \right]^{1/2}$$

この式を基に、独立して calibration される観測装置の broadening を差し引き、いくつかの仮定 (静水圧平衡, エネルギー保存, etc) をおくことで、実際の解析に用いる有効速度に関する式を得る。

3 Results

図 1 は太陽中心からの距離に対する non-thermal velocity の変化を表している。点線が減衰しない場合で、データ点は 1.15R(sun) より遠方になると、この

振舞いからずれ始め、wave damping が起こっていることが見てとれる。

次に、エネルギーフラックスの変化を図 2 に示す。Alfvén wave が輸送する energy flux density は以下の式で表される。[Moran 2001]

$$F = 2\rho v_{[d]}^2 V_{[A]}$$

図 2 は、この F の値にフラックスチューブの area expansion の寄与をかけたものをプロットしており、horizontal line が undamped の場合を表している。図 1 と同様に、比較的 low 高度でエネルギーフラックスが減少し始め、十分なエネルギー散逸が見られた。

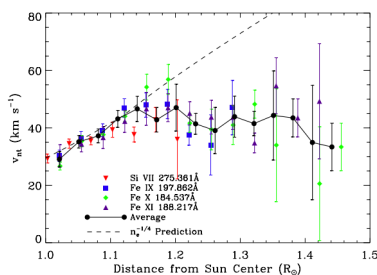


図 1: $v_{[d]}$ の damping

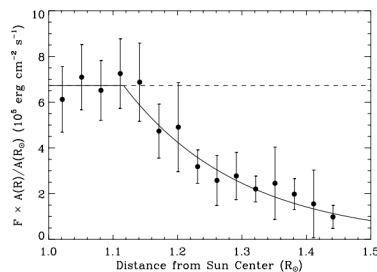


図 2: エネルギーフラックスの damping

熱や太陽風加速を説明するのに十分なものであると考えることができる。また、得られたデータ点に対し exponential でフィッティング (solid line) することで、damping の距離・時間スケールは以下のように見積もられている。

$$L_{[d]} = 0.18 \pm 0.04 R(\text{sun})$$

$$T_{[d]} = 68 \pm 15 [s]$$

以上のような議論から、

- 極域コロナホールにおいて Alfvén wave はコロナ加熱や太陽風加速を担うのに十分な初期エネルギーがあり、そしてこのエネルギーは伝播の過程で、実際にコロナ過熱が行われるのに十分な低高度で散逸される。
- さらに、見積もられた damping スケールから、sonic point での太陽風加熱を生み出すために必要なエネルギーも保持していると考えられる。

4 Conclusion, Discussion

図 2 から、上述した物理量を見積もることができる。まず、Alfvén wave のもつ初期エネルギーは $F_{[i]} = 6.7 \pm 0.7 \times 10^5 [erg/cm^2/s]$ となり、これは観測時の太陽活動極小期におけるコロナホールにおいて必要なトータルエネルギー (6.0×10^5) に対して十分な量となっている。つまり、wave によって運搬されるエネルギー量は、極域コロナホールにおけるコロナ加