

コロナ加熱・太陽風加速問題の理論的展望

庄田 宗人 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

太陽風は太陽から惑星間空間へ恒常的に放出されるプラズマ流であり、太陽活動は太陽風を介して惑星磁気圏に影響を与えると考えられている。1958 年に Parker により理論的にその存在が予言された太陽風はその後衛星の「その場観測」によって存在が確認され、現在に至るまで継続的な観測が続いている。もともと太陽風は高温の太陽コロナがもつ熱エネルギーにより加速、放出されるものと考えられていたが、この理論では説明できない観測事実が得られたことにより太陽風モデルの修正が求められた。元来高温のコロナを形成するコロナ加熱問題と太陽風形成・加速問題は別々に扱われてきたが、現在では波動の散逸によるエネルギー供給の結果として両者が自然に形成されるというモデルが提唱されている。本講演では太陽風の観測事実、Parker による最初のモデルを紹介し、それらを踏まえたうえで現在提唱されているモデルについて考察する。

1 Introduction

太陽からは恒常的にプラズマが放出されており、その現象は太陽風と呼ばれている。太陽風は太陽活動によるプラズマの擾乱を地球まで輸送し地球磁気圏に影響を及ぼすので、現在では宇宙天気予報のための重要なファクターとして考えられている。

元来太陽風は高温の太陽大気（コロナ）のもつ熱エネルギーが作り出す自然な流れとして解釈されてきた。しかし Ulysses の観測などにより比較的温度の低いコロナホールから速度およそ 700km/sec の速い太陽風が、温度の高い活動領域から速度およそ 400km/sec の遅い太陽風が流出していると分かり、熱エネルギーだけでは太陽風の形成、加速を説明できないことが分かった。

現在ではコロナの熱エネルギーに加えて太陽表面で励起される波動により太陽風にエネルギーを供給するという考えが広く受け入れられている。さらにコロナへの熱エネルギーの供給も波動からの寄与が大きいというモデルも広まっており、コロナ加熱と太陽風加速問題は別々の問題ではなく波動エネルギーの散逸という観点のもとに統一的に扱われるようになってきている。

波動のエネルギーの散逸には非線形効果が大きく影響していると考えられている。流体はその非線形項の効果により高波数（短波長）側へエネルギーを輸送し、エネルギーの散逸を効率的にするという性

質があるからである。しかし非線形効果を扱うのは解析的にも数値的にも難しく、波動の非線形散逸を統一的に説明するモデルは完成には至っていない。

本講演ではまず太陽風の観測事実と古典モデルを説明し、現在提唱されているモデルの説明、考察を行う。

2 Observational Results

太陽風の観測は主に衛星によるその場観測とリモートセンシングによるものの二種類に分けられる。衛星による観測はさらに地球近傍を周回する人工衛星によるものと太陽極軌道を周回する「人工惑星」(Ulysses)によるものに分けられる。リモートセンシングによる太陽風観測は IPS(InterPlanetary Scintillation) と呼ばれ、現在ではトモグラフィーを用いた 3D 構造の解析が可能である。

図 1 に Ulysses による太陽風の観測結果を示した。上側の二枚のグラフは太陽風の速度分布と磁場の極性の分布を、下側の二枚は観測時期の太陽活動の強さ（黒点数）を表す。左側の二枚のグラフは Ulysses の一度目の太陽周回の際の観測データを、右側の二枚のグラフは二度目の周回の際のデータを表す。背景にはそれぞれの周回の間典型的なコロナの画像を示した。図からわかるように太陽風の大域的構造（緯度分布）は太陽活動に大きく影響される。特に太

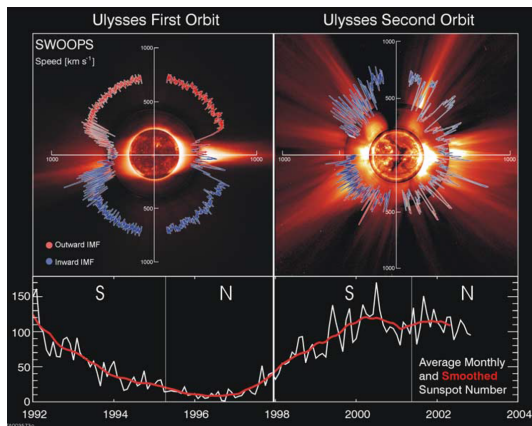


図 1: Ulysses による観測結果のまとめ。上図は太陽風の大局的な（全緯度方向の）構造。背景の画像は SOHO および Mauna Loa K-coronameter による。図中の線の中心からの距離は観測された太陽風の速度、色は観測された磁場の極性を表す。下図は黒点の数（太陽活動の強さ）を表す。左側の二枚のグラフは Ulysses の最初の周回での観測、右側の二枚のグラフは二回目の周回での観測を表す。図は McComas et al. (2003) より引用した。

陽活動静穏期（Ulysses の一回目の周回期間、図 1 の左側）での速度分布は低緯度に一樣な低速成分、中緯度から高緯度に一樣な高速成分という二極構造となっていることがわかる。太陽活動静穏期には低緯度側のコロナが高温の活動領域、高緯度側が低温のコロナホールとなるので、この観測結果は低温領域から高速の太陽風が、高温の領域から低速の太陽風が流出していることを表している。

3 Theoretical Models

太陽風の理論モデルは Parker(1958) に始まり、現在では非常に多くの理論モデルが提唱されている。そのすべてを紹介することは出来ないので、本講演では Parker(1958) および Matsumoto&Suzuki (2012,2014) の成果を紹介しその物理的解釈について述べることにする。

さきにも述べたとおり、太陽風の理論モデルは Parker(1958) に始まる。Parker はコロナの熱エネルギーによるプラズマ流の放出、加速を理論的に予言

した。図 2 に等温大気を仮定した場合の解の様子を示した。

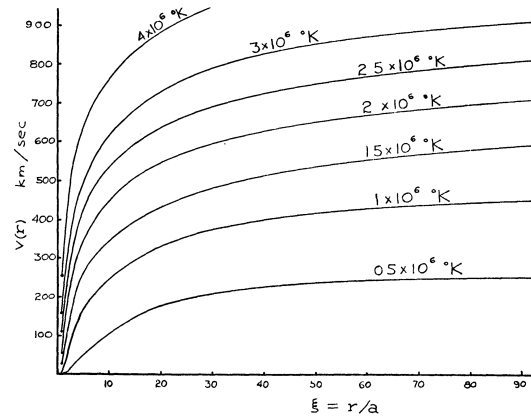


図 2: 等温大気を仮定した場合の放出流の解の様子 (Parker 1958)。

図から明らかな通り、コロナの典型的な温度 (10^6K) を想定したときほぼ観測に合致するおよそ 400km/sec の太陽風が理論的に説明される。しかしながらこのモデルでは温度の低い領域から速い太陽風が、温度の高い領域から遅い太陽風が流出する理由が説明できず、磁場の効果を考慮に入れたより正確なモデルの提唱が求められた。

現在ではコロナ加熱と太陽風加速を同時に扱うモデルが提唱されている。太陽表面で波動を励起し、そのエネルギーの散逸によりコロナ加熱と太陽風加速のエネルギーを供給するというモデルである。その一例として Matsumoto&Suzuki (2012,2014) が挙げられる。このモデルは磁気流体波動（アルフベン波）のエネルギーの散逸により等温、成層大気からコロナと速い太陽風が同時に形成されることを説明する。この研究では磁束管が開いた領域（コロナホール）に光球で励起したアルフベン波を伝播させ、そのエネルギーが散逸する様子を 2.5 次元のシミュレーションを用いて再現、考察している。

図 3 にシミュレーション結果を示した。各々のグラフは物理量の動径方向の変化を示し、上から動径方向の速度成分、方位角方向の速度成分、温度、電子数密度を表す。またグラフ中の赤線はシミュレーション結果、プロットは観測結果を表す。シミュレーション結果がよく観測結果を再現することが分かる。

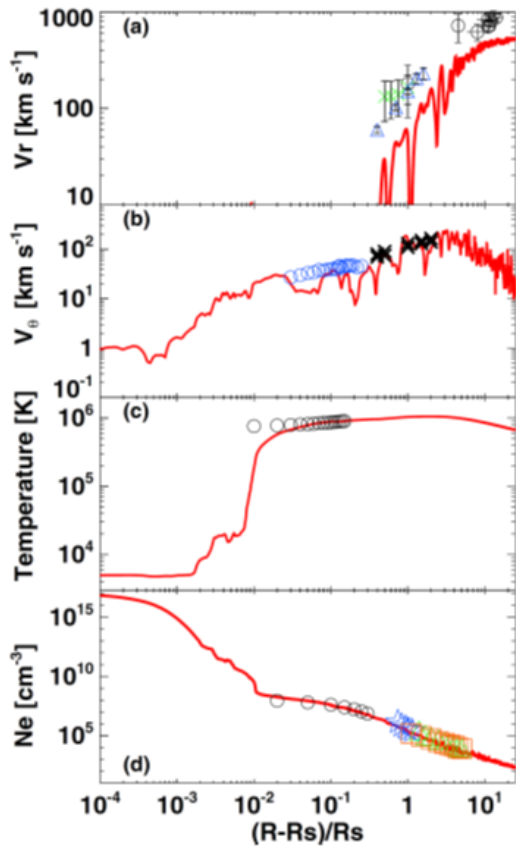


図 3: Matsumoto & Suzuki (2012) の結果。図中の赤線は動径方向の距離に対する各物理量のシミュレーション結果で、上から動径方向の速度成分、方位角方向の速度成分、温度、電子数密度のグラフを表す。プロットはそれぞれの観測結果を表す。

図 4 にはアルフベン波の散逸プロセスの寄与の大きさが示されている。アルフベン波の散逸には主に、横波であるアルフベン波が非線形効果により別の縦波を励起し衝撃波を形成することで散逸する「縦波的散逸」と互いに逆行する二つのアルフベン波が波動間相互作用により高波数側にエネルギーを輸送することによる「横波的散逸」の二種類が挙げられる。この研究ではどちらの寄与がどの程度働いているか数値的に見積もっており、図 4 に、横波的散逸によるものが赤色の斜線部分に対応する。黒色、青色の実線はそれぞれ放射冷却、断熱膨張による冷却の割合を表す。また黒色の斜線部は遷移層（コロナと彩層の境界）に対応する。図からわかるように、領域によって主要な散逸過程が異なることが分かる。

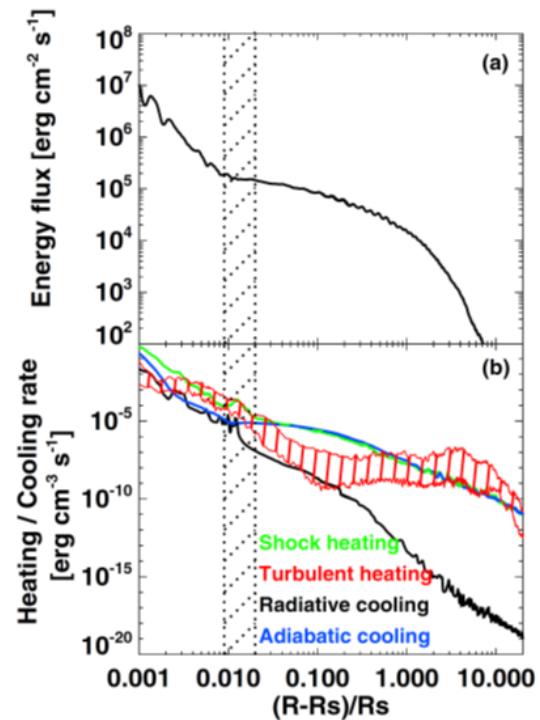


図 4: アルフベン波のエネルギーフラックスとその散逸過程。上図 (a): アルフベン波の持つエネルギーフラックスの動径方向の距離に関するグラフ 下図 (b): アルフベン波の散逸によるエネルギー供給率と放射、断熱膨張による冷却率のグラフ。緑色の線が縦波が衝撃波を形成することによるエネルギー供給、赤の領域が横波のカスケードによるエネルギー供給に対応する。一方黒色の線は放射による冷却、青線は断熱膨張による冷却を表す。

この研究に問題点がないわけではない。まず第一にシミュレーションの結果が数値計算の解像度に強く依存してしまうという問題点が挙げられる。したがって数値計算の精度が十分良く、計算結果が現実の系を十分正しく反映していることを示すのは容易ではない。また数値計算の資源の問題上、この研究をそのまま現実の太陽の磁場に適用したり、大域的構造の計算に拡張するのもまた容易ではない。

現在では乱流を適当にモデル化し、計算の負担を軽くすることでより複雑な系での計算を試みる研究も多い。今後の研究の進展のためには第一原理の数値計算とモデル化（経験的モデル化、半解析的モデル

化) による系の簡単化の両者が必要となるだろう。

4 Summary and Conclusions

Matsumoto&Suzuki(2012,2014)をはじめとする現在の太陽風理論の多くでは、加速のエネルギーは太陽表面で励起される磁気流体波動の散逸で補われていると考えられている。波動エネルギーの散逸には波動の非線形発展が重要な役割を果たしていると考えられており、その詳細な物理過程は未だに不明確である。今後の研究の方針として、数値シミュレーションの高精度化に加えて解析的手法等による非線形効果のモデル化、その定量的見積もりなども重要になるであろう。

Reference

- [1] E. N. Parker, *Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields.*, ApJ 1958
- [2] D. J. McComas, H. A. Elliott, N. A. Schwadron, J. T. Gosling, R. M. Skoug, B. E. Goldstein, *The three-dimensional solar wind around solar maximum* Geophys. Res. Lett. 2003
- [3] T. Matsumoto and T. K. Suzuki *Connecting the Sun and the Solar Wind: The First 2.5-dimensional Self-consistent MHD Simulation under the Alfvén Wave Scenario* ApJ 2012
- [4] T. Matsumoto and T. K. Suzuki *Connecting the Sun and the solar wind: the self-consistent transition of heating mechanisms* MNRAS 2014