

「ひので」可視光望遠鏡が光を当てた 弱電離プラズマの物理



磯部 洋明

〈京都大学大学院総合生存学館／宇宙総合学研究ユニット 〒606-8306 京都市左京区吉田中阿達町1〉
e-mail: isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp

「ひので」可視光望遠鏡の観測は、太陽の下層大気である彩層や光球でも、コロナ中の現象とよく似た小規模な爆発やジェット現象が普遍的に起きていることを明らかにした。この発見は、弱電離かつ衝突頻度が極めて高い彩層、光球のプラズマでどのようにしてコロナと同様の磁気活動現象が起きるのか、というプラズマ物理学上の問題を浮かび上がらせた。本稿では「ひので」が光を当てた弱電離プラズマの物理について解説する。

1. 光球、彩層はほとんど中性？

太陽はプラズマ、即ち電離気体でできていると言われるが、実は太陽の下層大気、すなわち光球から彩層にかけては、電離度の低い弱電離（部分電離）プラズマである。太陽に弱電離プラズマが存在することはなにも「ひので」の発見ではなく、少し物理を考えれば明らかである。水素の電離ポテンシャル（電離するために必要なエネルギー）は13.6 eVであるが、このエネルギーは温度に直せば約10万度になる。光球の温度は約6,000度、彩層は1万度程度なので、熱運動している光球や彩層の粒子がもっているエネルギーは、水素原子を電離するには1桁ほど足らず、衝突によって水素原子が電離されることはほとんどない。同様に光球からくる可視光のエネルギーも水素を電離するには小さい。したがって、光球や彩層の現象を理解するということは、磁場があり重力成層した弱電離プラズマの振る舞いを理解するということになる。にもかかわらず、先見の明のあったいくつかの研究を除いて、「ひので」以前には弱電離プラズマの研究は太陽物理学のコミュニティでさほど重視されてこなかったと言わ

ざるをえず、理論研究者としては不明を恥じるほかない。

ところで太陽物理学に馴染みのある人であれば、ここで奇妙に思うことがあるだろう。例えばプロミネンスは、温度100万度のコロナ中に1万度の冷たくて濃い彩層ガスが磁場によって支えられて浮かんでいる現象、と説明される。しかし彩層-プロミネンスのガスのほとんどが磁場を感じない中性水素だとすると、プロミネンスは磁場からすべり落ちてしまうのではないか？ あるいはもう少し専門的な言い方をすれば、太陽研究者たちは磁気流体力学（magnetohydrodynamics; 以下MHD）を使って光球や彩層の現象の理論を作っているが、MHDはプラズマ流体と磁場の相互作用を記述する方程式なのだから、中性粒子が大半である光球や彩層の現象を記述するにはそもそも使えないのではないか？ この疑問に短く答えると、中性粒子はイオンとの衝突を介してプラズマ流体とほぼ一体化しており、観測でされているような巨視的な振る舞いを記述するにはMHDはよい近似である、ということになる。ただし、波動の散逸や磁気リコネクションなど、観測の分解能以下の小さいスケールでは中性粒子と

プラズマの異なる振る舞い、すなわち弱電離プラズマとしての性質が重要になってくる。以下ではまず太陽下層大気におけるプラズマのパラメータをもう少し詳しく解説したのち、「ひので」が観測したさまざまな現象のうち弱電離プラズマの物理がかかわってくるものを紹介する。

2. 太陽大気のパラメータ

図1は、光球からの高さを横軸にして、太陽大気の平均的な温度(実線)と密度分布(破線)をプロットしたものである。すでに述べたように光球から彩層にかけては電離度は低く、幅はあるが大体0.01-1%程度なのに対し、コロナのプラズマはほぼ完全電離である。また、光球や彩層は密度が高いため粒子の衝突時間が短く、完全衝突プラズマとして扱うことができる(一つの粒子が一度衝突してから次に衝突するまでの平均的な時間が、現象の時間スケールより十分短い)。光球、彩層では衝突頻度が高いため、中性粒子(主に水素原子)の流体と、電子とイオンからなるプラズマが、衝突を介して相互作用する。例えば、彩層を貫く磁力線が光球の対流運動の影響で一方向に動いたとしよう。プラズマ流体は磁力線に凍結しているため磁力線とともに動く。中性流体は磁場の力を感じないが、磁力線とともに動くプラズマと衝突して運動量をもらうため、プラズマと同じ方向に動き出す。彩層中の典型的な物理量を使って計算すると、プラズマと中性流体の相対速度は1 m/s程度であることがわかる。「ひので」の観

測からも明らかのように、彩層には速度数km/sから数十km/sの流れや波動が常に行き交っている。それに比べれば1 m/sの速度差は無視できる。つまりプラズマと中性流体は事実上ほぼ一体として、磁場の力を受けて運動しているように振る舞う。これが光球、彩層が弱電離であるにもかかわらずMHDでよく記述できる理由である。

では弱電離性はどこに現れてくるのだろうか? ここで弱電離性に起因する物理的な効果を少々数式を使って説明することをお許し願いたい。衝突性弱電離プラズマにおいて、磁場の誘導方程式は以下のように書ける¹⁾。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times \left[V \times B - \eta J - \frac{J \times B}{en_e} + \frac{(J \times B) \times B}{cv_{ni} \rho_n} \right]$$

ここで左辺は磁場 B の時間発展、右辺第1項は磁場が速度 V で動くプラズマに凍結して運ばれる効果(いわゆる移流項)、右辺第2項は電気抵抗 η により磁場が散逸する効果である。ここまでは通常のMHD方程式にも現れる。右辺第3項はホール効果と呼ばれ、イオン流体と電子流体が別々の運動をする(したがって電流 J が流れる)ことに伴う電場起因する項である。右辺第4項がambipolar(両極性)拡散と言われている効果で、イオンと中性粒子の衝突により磁場が拡散する効果である。この項は磁場に垂直方向の電流にのみ働くという特徴のほか、「拡散」という言葉の与える印象に反して、電流シートを薄くする(シャープな構造を作る)という著しい特徴がある。なお天文学の分野ではこの項に両極性拡散という言葉当てているが、プラズマ物理の分野で両極性拡散といえばイオンと電子の振る舞いに関連した異なる拡散現象を示すため、しばしば混乱を引き起こすので注意が必要である。地球電離圏のコミュニティでよく使われるペダーソン拡散も基本的には同じものである。

移流項を除く電気抵抗、ホール効果、両極性拡散はどれも電流 J に比例しているの、その比例係数の絶対値をオーム拡散係数、ホール係数、両

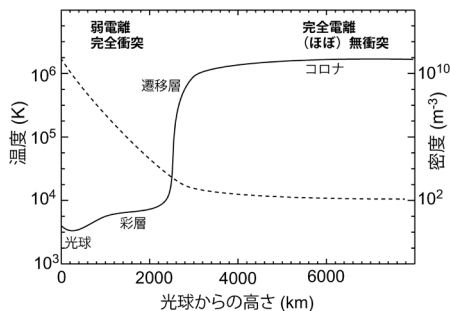


図1 太陽大気のパラメータ。

極性拡散係数と呼ぶと、それらはすべて現象のスケールに依存せず、磁場強度や密度などのローカルなプラズマのパラメータだけで決まることがわかる。特に両極性拡散は磁場強度と密度に極めて敏感なので、光球から彩層にかけて何桁も変化するが、平均的には、光球ではホール係数>オーム拡散係数>両極性拡散係数の順番になり、彩層では両極性拡散>ホール係数>オーム拡散係数という順番になる^{1), 2)}。なお宇宙の衝突性弱電離プラズマには、分子雲や原始惑星系円盤もあるが、上に示した拡散係数の相対的な大きさの関係は、分子雲や原始惑星系円盤の外側は彩層に似ており、原始惑星系円盤の内側は光球に似ている³⁾。

次に移流項とそれ以外の項を比べてみよう。移流項と J を含むそれ以外の項の比はローカルなプラズマパラメータだけでは決まらず、空間スケールに依存する。つまり空間スケールが小さければ J が大きく、したがって移流項以外の項が重要になり、磁場とプラズマの凍結の破れが見えてくる。磁場強度にも大きく依存するが、光球でホール効果、彩層で両極性拡散が重要になる空間スケールはおおよそ数km以下である。これは「ひので」可視光望遠鏡の空間分解能($\sim 0.2'' \sim 140$ km)よりも1桁以上小さく、「ひので」をもってしても弱電離の効果の直接観測することは難しい。

3. 「ひので」の観測と弱電離プラズマの物理

「ひので」の一つ前の日本の太陽観測衛星「ようこう」の最重要成果は、太陽フレアの磁気エネルギー解放(散逸)メカニズムが磁気リコネクションであることを確立したことだろう。これは磁力線がつなぎ変わることでパチンコのようにプラズマを加速、加熱する現象で、太陽を含むさまざまな天体や惑星磁気圏、実験室プラズマにおける磁気エネルギー散逸を担う物理過程として、分野を横断した研究が活発に行われている。

「ひので」可視光望遠鏡の観測は、磁気リコネ

クションに伴う磁気エネルギー散逸現象が、光球や彩層でも普遍的に起きていることを明らかにした^{4), 5)}。図2は可視光望遠鏡が観測した彩層ジェットの例である。Yの字を逆さにしたような形をしていて、下部の三角形の部分小さな磁気ループにあたり、それが縦方向に開いた磁場トリコネクションすることで、開いた磁場に沿ってプラズマのジェットが生じていると解釈されている。また多くのジェットで間欠的にプラズマの塊(プラズモイド)が見えている⁶⁾。この描像は一見コロナ中の磁気リコネクションとも共通であるが、彩層中ではまず両極性拡散の効果によって非常に薄い電流シートができ、その中でテアリング不安定というプラズモイドを作るような不安定性が成長することが重要であることが、数値シミュレーションからわかってきている⁷⁾。また、「ひので」と飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の共同観測により、非常に小さな彩層ジェットやエラーマンボムと呼ばれる現象では、磁気リコネクションが光球から彩層下部にかけて起きていることがわかっている^{8), 9)}。上述のように光球から彩層下部では両極性拡散よりもホール効果が卓越していると考えられる。完全電離・無衝突プラズマにおいては、ホール効果がリコネクションを速くすることが知られているが、弱電離・完全衝突プラズマでも同じことが起きるかどうかはあまり吟味さ

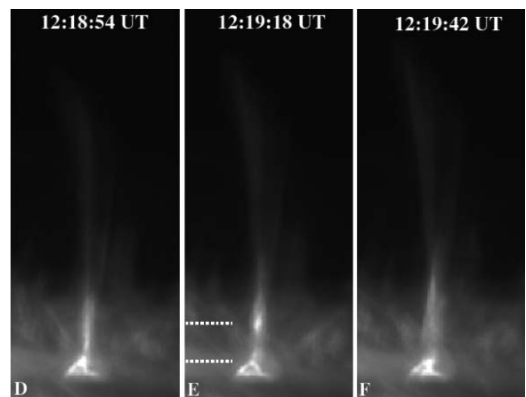


図2 可視光望遠鏡のCaH線フィルターで観測された彩層ジェット⁶⁾。

れていない。

黒点半暗部で起きるジェットは、反平行でない磁場成分(縦磁場)の強い状況での磁気リコネクションによると考えられるが⁵⁾、縦磁場の存在は両極性拡散もホール効果も抑制する方向に働く。今後、光球から彩層のさまざまな状況でのリコネクションの違いをより詳しく調べることができれば、磁気リコネクション研究への寄与は大きい。

紙面の都合で詳しく述べることはできないが、磁気リコネクション以外にも弱電離性が重要となるような現象が「ひので」により観測されている。例えば彩層やプロミネンス中での磁力線が横揺れする「横波」の観測は「ひので」の最重要成果の一つであるが(詳しくは本特集の岡本文典の記事を参照)、特に高周波数の横波の散逸や分散には弱電離性である両極性拡散やホール効果が効くはずである¹⁰⁾。また、「ひので」による意外な発見の一つにプロミネンスで見られる奇妙な鉛直方向の運動がある。その起源は磁気レイリーテラー不安定だと考えられている¹¹⁾が、弱電離の効果が磁気レイリーテラー不安定に与える影響についてはまだ僅かな研究しかない¹²⁾。

4. 終わりに

本稿でやや詳しく目に説明したように、弱電離の効果は磁場の散逸過程で特に重要であり、それが起きる空間スケールは「ひので」可視光望遠鏡の空間分解能(～0.2"～140 km)より小さい。したがって「ひので」は弱電離プラズマに起因する現象を直接観測したわけではなく、波動現象や磁気リコネクションに伴うジェット現象など、磁気エネルギーの散逸の物理が鍵を握るダイナミックな加速・加熱現象が彩層中に満ち満ちていることを明らかにすることで、弱電離プラズマの重要性を再認識させたとと言えるだろう。弱電離の効果は、恒星大気だけでなく、分子雲や原始惑星系円盤、地球惑星電離圏でも重要であり、これらの分野との連携が重要であることは論を待たないが、

とはいえ実際の共同研究というところまで進むのはそう簡単ではない。その意味で、「ひので」チームが実験室プラズマの共同研究という野心的な試みで成果を出していることは特筆に値する¹³⁾。太陽大気が弱電離プラズマの実験室としてより普遍的なプラズマ物理学へ資するような成果を出すには、「ひので」が見つけた個々の彩層活動現象のプラズマのパラメータを定量的に診断することが重要で、そのためには「ひので」にはなかった彩層の偏光分光観測が必要となる。「ひので」とIRISや地上望遠鏡の共同観測、そしてSolar-Cに期待されるテーマである。

参考文献

- 1) Khomenko E., Collados, M., 2012, ApJ 747, 87
- 2) Singh K. A. P., et al., 2011, Phys. Plasmas 18, 111210
- 3) Sano T., Stone, J. M., 2002, ApJ 570, 314
- 4) Shibata K., et al., 2007, Science 318, 1591
- 5) Katsukawa Y., et al., 2007, Science 318, 1594
- 6) Singh K. A. P., et al., 2012, ApJ 759, 33
- 7) 西塚直人, 磯部洋明, 2013, J. Plasma Fusion Res. 89, 849
- 8) Matsumoto T., et al., 2008, PASJ 60, 577
- 9) Morita S., et al., 2010, PASJ 62, 901
- 10) Singh K. A. P., Krishan, V., 2010, New Astronomy 15, 119
- 11) Hillier A., et al., 2011, ApJ 736, L1
- 12) Khomenko E., et al., 2014, A&A 565, 45
- 13) Nishizuka N., et al., 2012, ApJ 756, 152

Hinode SOT Opened Up the Field of the Physics of Weakly Ionized Plasmas

Hiroaki ISOBE

Graduate School of Advanced Integrated Studies
for Human Survivability, Kyoto University,
Sakyo-ku, Kyoto 606-8306, Japan

Abstract: The dynamic phenomena in the chromosphere and the photosphere revealed by the Solar Optical Telescope of Hinode look similar to those found in the corona. This raises the question how such phenomena are realized in the chromosphere and the photosphere where the plasma parameters are drastically different from those in the corona; fully collisional and weakly ionized. We review the physics of weakly ionized plasma to which Hinode observations provided some new insights.