

「ひので」極端紫外線分光観測から見えてきた 加熱されたコロナのプラズマ運動



原 弘 久

〈国立天文台ひので科学プロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: hirohisa.hara@nao.ac.jp

われわれは「ひので」衛星に搭載されている三つの望遠鏡の連携により、コロナがどうして 100 万度になっているのか、より具体的に言い換えれば、光球で観測される粒状斑のもつ運動エネルギーが磁場を介してどのようにコロナまで伝わり解放されて 100 万度のプラズマを作るのか、ということを観測的に理解しようとしている。その第一段階として、加熱されたコロナのプラズマがどのような運動をしているかを「ひので」の極端紫外線分光観測を通して調べており、その初期結果を紹介したい。

1. はじめに

皆既日食になると月で隠された太陽面の外側に淡く広がった模様が現れる。これが太陽コロナである。昔は不気味で忌み嫌われていた現象であったと想像するが、まれにしか起こらないこの皆既日食時のコロナを直接自分の肉眼で見るために海外まで出かけていく人は多い。また、身近な天体ショーであることから、最近ではテレビやインターネットによる中継も行われている。

コロナは可視光で見ることのできる 6,000 度の黄色い太陽面（光球：図 1（左））の数千 km 上空から始まる温度 100 万度の大気である。太陽の中心核で 1,500 万度であったガスの温度はより外層へいくに従って下がるが、光球上空 ~500 km の温度最低層を境にそれより上空では温度が上昇に転じ、1 万度弱の彩層を経て 100 万度のコロナへと至る。どうしてコロナが高温になるかといえば、100 万度にするだけのエネルギーがコロナで解放されるからだ。このエネルギーがどのようにして解放されるかがわかればコロナを理解したといえる。コロナが高温であることを説明するた

めのモデルはいろいろとあるが、実際の機構がはたしているかを観測から特定することが求められている。

2. 「ひので」の観測前の状況

コロナはリオがコロナグラフを開発¹⁾してからは、空の条件がよければ地上から常に観測できるようになった。コロナから放射される輝線が高階電離イオンからの放射であることが同定されて²⁾、コロナが 100 万度であることが判明した。これを説明するために、まずは光球面で観測される粒状斑の対流運動で音波が発生し、それが上空で衝撃波を形成して大気を加熱するという説が提唱された。しかし、この説はその後のスペースからの観測によって破棄された。一つには、1960 年から 1970 年にかけて極端紫外線や軟 X 線で太陽全体のコロナの輝度分布が取得されるようになって、太陽コロナは太陽面に一様に分布しているわけではないことが判明したこと³⁾、また光球とコロナの中間の温度にある大気の観測から、観測される音波がもつエネルギーフラックスがコロナを加熱するのに必要なエネルギーに対して不十分で

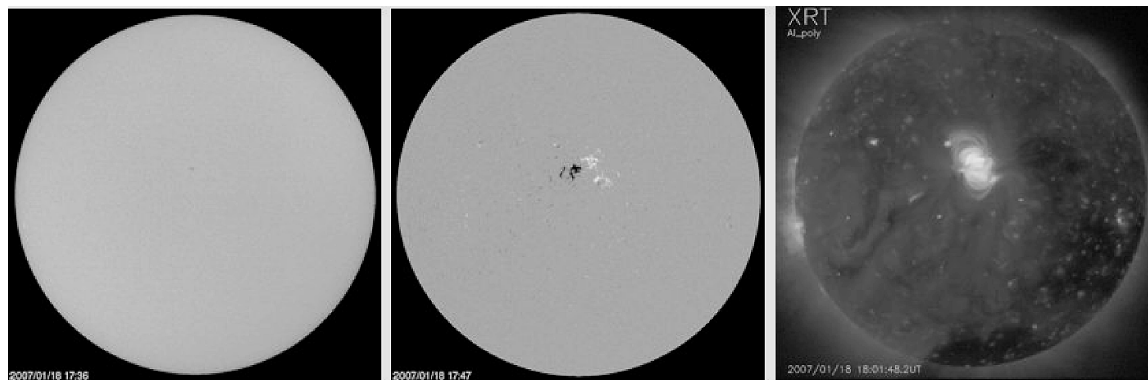


図1 2007年1月18日の活動極小期の太陽。(左) SOHO MDI により取得された可視光画像, (中央) 光球磁場像 (白: N 極, 黒: S 極), (右) 「ひので」 X 線画像. 画像中央の活動領域には微細な黒点がわずかにある.

あることがわかった^{4), 5)}からである. 同じ時期に太陽光球面での磁場強度分布が測定されるようになって, 黒点近傍に代表される磁場の強い領域ではコロナが明るくなること (図1 参照), 惑星間空間に向けて延びていく磁力線構造のところでは放射はあるが暗い場所 (「コロナホール」と呼ばれている) があることが判明した. また, 光球からコロナへ向かった磁場が光球へ戻るような閉じた磁力線構造をしたところでは, コロナでは磁力線にそった構造, コロナループ, が観測される. コロナの明るさを磁場強度に対してプロットすると, その二つの量が強い相関を示す⁶⁾. これらのことから, コロナを 100 万度まで加熱するには磁場の存在が欠かせないことがわかるだろう. 磁場を介したコロナの加熱モデルはいろいろあるが, 大きく分けて磁気流体波が介在するもの (AC 的加熱), 微小スケールでの磁気リコネクションによるもの (DC 的加熱) がある.

1990 年以降に日本の「ようこう」衛星をはじめ, SOHO, TRACE という太陽観測衛星が宇宙から太陽コロナを観測して, 新たにわかってきたことは以下のことである.

一つは, これまで達成された空間分解能 1 秒角程度の観測からは, 小フレアの重ね合わせではコロナを説明できないこと. これについては, その

意味を正しく理解しておく必要がある. というのは, 個々の小フレアはコロナの温度で観測されており, それ一つ一つでは局所的にはコロナを加熱しているからである. フレアの頻度分布 (dN/dE) はエネルギー範囲 8 桁にわたって発生エネルギー量 E のべき乗の形 ($dN/dE \propto E^{-1.8}$) を示している⁷⁾, そのべき数が 2 より小さいために, その傾向がよりエネルギーの小さいほうに延びていたとしても積分したエネルギー総量はコロナを加熱するには不十分である. 小フレアの総量でコロナを説明できないことは, 検出される小フレアではコロナを埋め尽くせないことから直感的にも理解できる. このような大小さまざまなフレアだけがコロナ温度まで加熱できる機構だとすると, 太陽を X 線で観測した場合, 真っ暗な背景に大小さまざまな輝点が現れては消えていくという現象が観測されることだろうが, 実際の太陽コロナはそうはなっていない. フレアは突発的な明るさの変動分として認識されるが, 一般的なコロナからの放射はそのような変動成分のほかに準定常的な (DC 的な) 放射成分があるということである. ただし, この DC 的な成分といっても, 空間スケールによらず DC 的な加熱機構により加熱されている可能性もあるし, 空間分解能以下のおびただしい数のフレアとは性質の異なる微小エネルギー解放現

象が見かけ上 DC 的に見えている可能性もある。

もう一つは、コロナループの加熱源がコロナ下部のかなり狭い範囲、表面から約 20,000 km 以内に集中しており、その結果としてループに沿って一様加熱された場合と比べてループ内密度が高くなることが示されたことである⁸⁾。これについては研究者間で議論が続いている。磁気流体波が下層で生成されていたとしても、このような短距離でエネルギーを失うことは難しい。磁場が光球の対流運動で動かされ、コロナ中にたくさんの微小カレントシートが形成されてそこで加熱が起こるといったアイデアが Parker により出されていたが^{9), 10)}、そのような計算が 3 次元の MHD シミュレーションにより行われるようになり^{11), 12)}、計算機内でコロナループ構造が再現できるようになってきている^{13), 14)}。それによると、コロナの下層で DC 的な加熱が集中的に起こっていることが示されており、新しい観測結果を支持している。

これらのことが本当ならば、コロナの下部で卓越したエネルギー解放が起こっているわけだから、加熱されたコロナ温度のプラズマがどのような運動をしているかに興味がわく。ここでは、筆者らが発表した「ひので」極端紫外線コロナ分光観測からの初期結果を紹介したい¹⁵⁾。

3. 「ひので」極端紫外線分光観測

「ひので」衛星¹⁶⁾には 17–21 nm と 25–29 nm 域の極端紫外線域を分光観測する装置、極端紫外線撮像分光装置 (EUV Imaging Spectrometer; EIS)¹⁷⁾、が搭載されている。この波長域には、コロナおよびコロナと彩層の中間層である遷移層から放射される 10^5 – 10^7 K の温度に対応する輝線が多数密集しており、これらの輝線を 2 秒角の空間分解能、約 4,000 程度の波長分解能で分光観測することを目的とした装置である。今回紹介する観測結果はこの EIS から得られたものである。スリット幅は 1 秒角、南北に延びたスリット面上の太陽をスキャン機構で東西方向に動かすことにより、太陽上の各点の輝線スペクトルを二次元的に取得することが可能である。そして、そのように観測された一例を図 2 に示す。

図 2 は磁場が強く活発な活動を示す太陽活動領域を 27.4 nm にある鉄の 13 階電離イオン Fe XIV で観測した例である。この輝線で観測している温度は 180 万度程度である。この図では、輝線輪郭を一つのガウス型関数でフィットすることで得られた、強度、ドップラー速度、輝線半値幅の分布を示している。この強度図の上部にあるコロナループの足元で、10–20 km/s の輝線の青方偏移、つまりコロナの上部へ向かった上昇流が卓越して

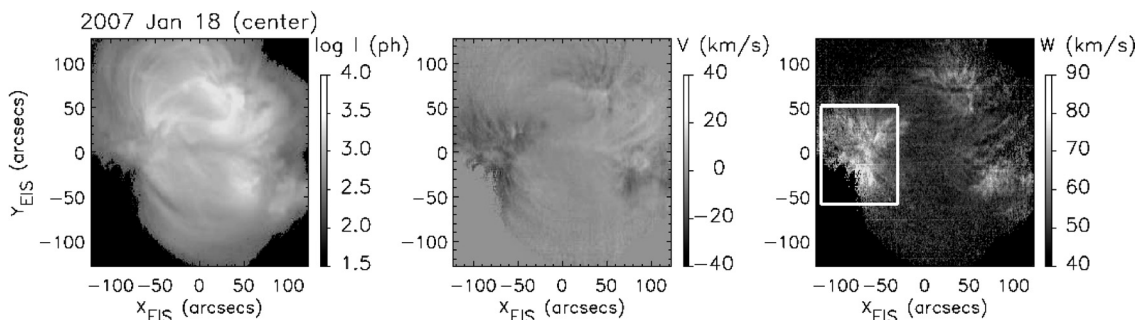


図2 2007年1月18日の太陽中央部にある活動領域を「ひので」EISにより Fe XIV 27.4 nm 極端紫外線輝線で観測したもの。左から輝線強度 I (光子数)、ドップラー速度 V 、装置起源の幅を補正した輝線半値幅 W 。ドップラー速度は正が赤方偏移、負が青方偏移。1 秒角 (arcsec) は太陽面で約 700 km の距離に相当。

いることがわかる。また、このドップラー速度の観測でもコロナループ構造を判別することができる。これはコロナ温度に加熱されたプラズマが磁力線に沿って上昇している姿がとらえられているということである。広い領域にわたって積分されたコロナ輝線スペクトルでフレアが発生していない静かな状況で上昇流が報告されたことは過去にもある¹⁸⁾⁻²⁰⁾。このようなループに沿った上昇流は、強度変化としてその存在がTRACE衛星の画像観測から指摘されていた²¹⁾が、これだけの解像度で実際にプラズマ流であることを明確に示したのは「ひので」EISによる観測が初めてである^{15), 22)}。また、この上昇流はどの活動領域を見ても存在している一般的な特徴である。一方、輝線幅を見ると、閉じたループの足元で非常に広がっていることがわかる。これは何を見ているのだろうか。

4. コロナ下部のプラズマフロー

観測される輝線幅が単純に輝線放射に関与するイオンがもつ温度起源で広がる幅と観測装置起源のものだけで構成されるだけなら、装置起源のものを引き去ってイオンの温度がわかるわけだが、この幅から求めた温度は別の方法で求められる電子温度に比べて高いことが知られており、その差

は速度単位で表現して非熱的速度（今後 V_{NT} で表現）と呼ばれている。これまでのコロナの分光観測からは V_{NT} は 20 km/s 程度になる。コロナ下部ではイオンと電子の衝突頻度は十分高く、短時間にイオンと電子の温度差はなくなってしまわずなのだが、観測すると差があるように見えるのである。この説明としては、(1) 視線方向に複数のバルクなフローがあることによる見かけの効果、(2) 乱流場があって見かけ上イオン温度が高いように観測される効果、(3) 波によって振動するプラズマ運動による効果、などがある。これらの効果はコロナを加熱する機構といろいろな関係をもっている。例えば、コロナ下部で向きの違う磁場のつなぎ換えである磁気リコネクションが多数発生していたとして、それによって発生する高速のフローが最終的にコロナループを構成する磁力線に沿って進むとすれば、磁力線に垂直方向から見ない限り輝線幅は定性的に広がるセンスとなる。コロナで乱流場が存在しても、その乱流速度場により輝線幅は広がる。また、観測時間に対して振動周期の速い波を観測しても輝線の広がりとして観測される。

図2の輝線幅の図で東側（左側）のコロナループの足元では輝線幅が顕著に広がり、40–50 km/s 程度の非熱的速度が観測されている（図3左の白

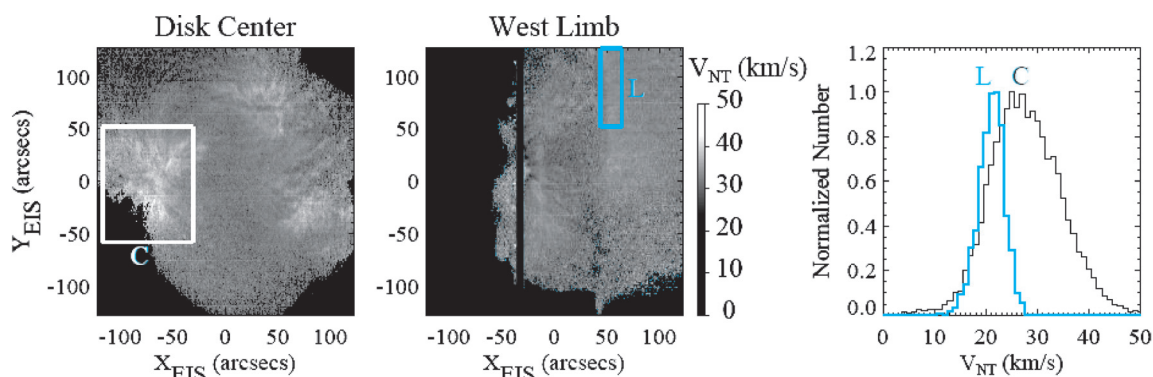


図3 (左) ディスクセンター付近、(中央) 西のリムでの Fe XIV 27.4 nm 輝線による非熱的速度 V_{NT} の分布。(右) ディスクセンター、リムでの観測のループ足元部分（四角領域 L, C 内）の非熱的速度の頻度分布。

線枠内および図3右の頻度分布黒線を参照). これまで報告されてきた値は, スペースからの低解像度の観測や足元が見えない地上コロナグラフの観測では 20 km/s 程度であるので, 今回測定されたものは非常に大きい. 図3の白線白枠内の領域が太陽のリム(緑)近くにきたときにはどのように見えるだろうか. EIS でこれを測定してみると, 図3中央の図の青線枠内や図3右の頻度分布の青線で示されるように 40–50 km/s もの幅の広い成分はなくなってしまい, 非熱的速度はコロナグラフで観測される高さから評価されるものと同様に 20 km/s 程度を中心とした狭い分布となる. このとき, リムでの観測ではドップラー速度も小さくなる. コロナのプラズマは磁力線に沿って運動し, 領域が太陽リムにあるときにはこれらの磁力線はほぼ視線方向に対し垂直方向となると考えてよい. このことから, 輝線幅に寄与する非熱的速度のうち大きな非熱的速度をもつものはドップラー速度と同様に磁力線方向に沿った運動によるものと考えるのが妥当だろう. ちなみに, リムの観測で非熱的速度が 20 km/s ということは, これだけでもアルベン波があったとしてもその速度振幅はコロナグラフで観測できないコロナの基底部分においても最大この程度であるということの意味している. ただし, 地上のコロナグラフによる観測からは, コロナループ上部においては, この 20 km/s の振幅は視線方向に対する磁力線の向きにほとんどよらない²³⁾という結果が出ていることを補足しておく.

1 秒角の空間サンプリングデータに対して, 非熱的速度 V_{NT} をドップラー速度 V に対してプロットしたものが図4(上)である. この二つの間には強い相関があり, リムの観測で非熱的速度が小さくなることを考慮すれば, ディスクセンター付近で観測される輝線幅が複数の異なるドップラー速度をもつ成分の重ね合わせでより広がっているのではないかと解釈することができる. したがって, 一つのガウス分布のフィットで代表され

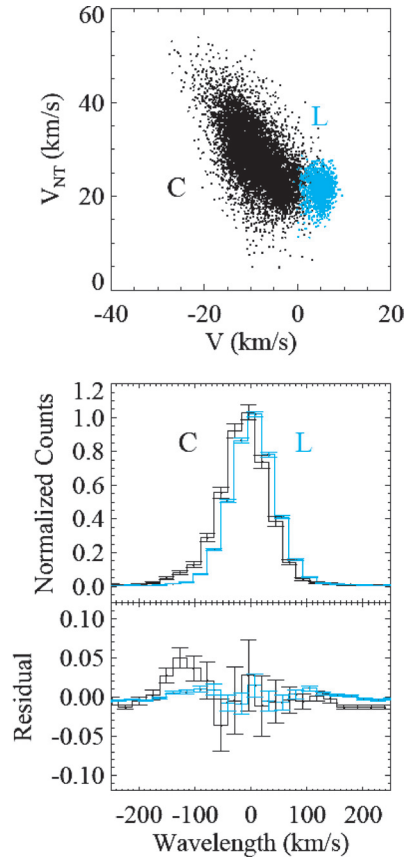


図4 (上) 図3の四角で囲んだ領域に対して, 非熱的速度 V_{NT} をドップラー速度 V に対してプロットしたもの. (下) それぞれの四角内の領域で代表的なループの足元位置の輝線プロファイルとガウスフィットからの残差 (Residual). 輝線プロファイルは強度最大値で規格化し, 波長は速度単位で表記した.

る速度よりも高速のフローがコロナループの足元には存在していることになる. 生データにはこの兆候が見えているのではないだろうか. 図4(下)では, 太陽中央付近 (C) とリム付近 (L) の観測でコロナループの足元のスペクトルを示した. それぞれをガウスフィットして, ベストフィットされた形状を観測されたスペクトルデータから引き去ったものが残差 (Residual) である. ディスクセンターで取得された観測データでは, 輝線輪郭の短波長側に有意な残差分があり, その速度はドッ

プラー速度で 100 km/s を超えている。観測されているコロナループは、太陽表面に垂直な方向に対してかなり寝たような形状をしており、幾何形状を考慮すると、磁力線に沿ってこの輝線に特徴的な温度の音速程度でコロナループ内を駆け上がっていることになる。このような高速のフローは「ひので」EIS の観測から初めて見いだされたものである。注意して欲しいのは、あたかも上昇流速の異なる 2 成分だけあるような印象をもたれるかもしれないが、青方偏移側により高速のフローをもつ成分が異なる強度で並んでいるというのがより正確であろう。その強度の小ささから、1 秒角よりも小さなスケールの上昇流をとらえた可能性がある。

図 4 (上) でもう一つ重要なことは、ディスクセンターでの観測でもリムの観測でも非熱的速度の下限値がドップラー速度によらず 20 km/s 程度になっていることである。コロナループのスケールで代表される磁力線の向きによらずに輝線幅を広げる (イオンをより激しく運動させる) 機構が働いていることを示している。コロナループの長さのスケールよりもずっと小さなスケールでは、さまざまな向きをもった乱流的な速度場が存在するのだろうか。

5. 今後の課題

今回紹介したコロナ下部の上昇流はどのようにして発生しているのだろうか。この上昇流は温度の高い輝線ほど速度が大きくなる傾向があり²⁴⁾、加熱率が高くなるとより高速流が発生する傾向がある。また、速度場の時間変化を見ると、上昇流の存在する領域は局所的には変化しながら²⁵⁾も長期間にわたって維持されている。コロナ下部の磁場がどのように変化するときコロナが加熱されてこのような流れが発生するかを今後理解していきたいと考えている。

今回はコロナループの足元に高速流があることがわかったが、これはこれまでのリムでのコロナ

分光観測を考慮すると、必ずしもすんなりと受け入れることはできない。というのは、測定精度の高い速度場観測を行っても、リムで観測されるコロナループの頂上付近で 100 km/s に達するようなものはフレアでも起こらない限り検出されないからである。つまりループ全体に発生する速度場ではないように見える。コロナループの足元でのみ発生する高速のジェットを見ているのだろうか。X 線ジェット²⁶⁾と同じ機構で発生しているのであれば、コロナループの足元で多数の磁気リコネクションが発生していることになる。加熱される場所がコロナループの足元近傍に集中するようなことがあれば、コロナループに沿った温度分布は足元からループ頂上に向けてほとんど温度が変わらないような状況になり、ループに沿った速度は特徴的な速度構造を示すだろう。コロナループに沿った速度場の決定には、ドップラー速度の観測のほか、コロナループの幾何構造を観測から決める必要がある。光球磁場による推定のほか、「ひので」と同時期に打ち上がった STEREO 衛星の 2 方向からのコロナ画像観測からコロナループの幾何構造を原理的に決めることができるので今後調べていく予定である。

今回紹介した活動領域のコロナループ足元の磁極はかなり広い領域にわたって単極性を示しており、5-10 万 km 近い長さをもっているコロナループの足元で新たに発生した微小磁気ループの浮上による異極間の磁気リコネクションによって高速のフローが発生したとは考えにくい。同じ向きの磁力線が互いにいくらか角度をもっていれば単極領域でも磁気リコネクションは可能ではある。このようなことを念頭において、「ひので」可視光望遠鏡で取得された光球ベクトル磁場のデータを見始めている。

「ひので」のデータの解析はまだ始まったばかりであり、今回紹介した内容のほかにもこれまで発表されてきた「ひので」の成果は、「ひので」のデータがもっているポテンシャルのごく一部が示

されたにすぎない。これから続々と出てくる新発見を楽しみにして欲しい。

参考文献

- 1) Lyot B., 1939, MNRAS 99, 580
- 2) Edlen B., 1942, Zs. f. Astrophys. 22, 30
- 3) Vaiana G. S., et al., 1973, Sol. Phys. 32, 81
- 4) Athay R. G., White O. R., 1978, ApJ 226, 1135
- 5) Bruner E. C. Jr., 1978, ApJ 226, 1140
- 6) Golub L., et al., 1980, ApJ 238, 343
- 7) Aschwanden M. J., et al., 2000, ApJ 535, 1047
- 8) Aschwanden M. J., Nightingale R. W., Alexander D., 2000, ApJ 541, 1059
- 9) Parker E. N., 1972, ApJ 174, 499
- 10) Parker E. N., 1983, ApJ 264, 642
- 11) Galsgaard K., Nordlund A., 1996, J. Geophys. Res. 101, 13445
- 12) Hendrix D. L., et al., 1996, ApJ 513, 969
- 13) Gudiksen B. V., Nordlund A., 2002, ApJ 572, L113
- 14) Gudiksen B. V., Nordlund A., 2005, ApJ 618, 1020
- 15) Hara H., et al., 2008, ApJ 678, L67
- 16) Kosugi T., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 3
- 17) Culhane J. L., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 19
- 18) Sandlin G. D., et al., 1977, ApJ 214, 898
- 19) Peter H., Judge P. G., 1999, ApJ 522, 1148
- 20) Teriaca L., Banerjee D., Doyle J. D., 1999, A&A 349, 636
- 21) Winebarger A., DeLuca E. E., Golub L., 2001, ApJ 553, L81
- 22) Doschek G. A., et al., 2007, ApJ 667, L109
- 23) Hara H., Ichimoto K., 1999, ApJ 513, 969
- 24) Del Zanna D., 2008, A&A 481, L49
- 25) Mariska J. T., 2007, PASJ 59, S713
- 26) 下条圭美, 2008, 天文月報 101, 310

Coronal Plasma Motions Revealed from Spectroscopic Observations with *Hinode* EIS

Hirohisa HARA

National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We try to understand why the solar corona is heated to a temperature of 10^6 K, in other words, how the energy of photospheric granular motions is transferred via magnetic fields and dissipated at the coronal height, from observations with three telescopes on the *Hinode* spacecraft. Here we briefly introduce an initial result from *Hinode* EUV spectroscopic observations on the motions of coronal plasmas near footpoints of coronal loops.