

国立天文台 天文学データ解析計算センター
成果報告書 (平成17年度)

提出期限：平成18年3月20日(月)17:00 必着

応募カテゴリ（いずれかを選択） B

システム（いずれかを選択） VPP

プロジェクト ID: wds11b

研究代表者（現在のユーザ ID : ）

氏名	塩田 大幸 (shiotadk)	
所属機関名	京都大学大学院理学研究科	
連絡先住所	〒 607-8471 京都市山科区北花山大峰町 17 京都大学花山天文台	
電話番号	075-581-1235	
E-mail	shiota@kwasan.kyoto-u.ac.jp	
職または学年	D2	
研究代表者が学生の場合には指導教官の氏名	柴田一成	

研究課題名

(和文)	コロナ質量放出の発生についての数値的研究
(英文)	Numerical Studies of Initiation of Coronal Mass Ejection

研究分担者

[illegible]

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

The Astrophysical Journal, 2005, vol. 634, p663-678

"SELF-CONSISTENT MAGNETOHYDRODYNAMIC MODELING OF A CORONAL MASS EJECTION, CORONAL DIMMING, AND A GIANT CUSP-SHAPED ARCADE FORMATION"

D. Shiota, H. Isobe, P. F. Chen, T. T. Yamamoto, T. Sakajiri, and K. Shibata

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

※ 評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。

日本天文学会 2005 年春季年会 （明星大学）

B12a "Solar-B によるリコネクションモデルの検証 1 inflow について" 成影ら

B13a "Solar-B によるリコネクションモデルの検証 2 slow shock について" 塩田ら

International Workshop The 6th Solar-B Science Meeting 2005 Nov. 8-11

"XRT and EIS Observations of Reconnection associated Phenomena"

D. Shiota, H. Isobe, D. H. Brooks, P. F. Chen, and K. Shibata

成果の概要

(必要に応じてページを加えて下さい。)

本年度は球座標 3 次元磁気流体コードの開発、テストを主に行っており、現在改良中である。また、これと平行して、フレア・コロナ質量放出の 2.5 次元磁気流体シミュレーションを用いて、次期太陽観測衛星「Solar-B」の観測について研究を行った。

本報告書では次頁以降、後者の内容について記述する。

磁気リコネクションにともなう現象の Solar-B による観測について

近年の衛星観測により、太陽フレアにおいて蓄えられていた磁気エネルギーを解放する主な物理プロセスは磁気リコネクションであると広く受け入れられるようになった。また、磁気リコネクションは、太陽フレアだけではなく、コロナ質量放出、 $H\alpha$ サージなどのジェット現象など、多くの太陽活動現象においても重要な役割を果たしていると考えられている。

しかし、わが国の太陽観測衛星「ようこう」で観測されたカスプ型フレアループやフレアループ上空の硬 X 線源、「SOHO」で観測されたインフローモーションなど、太陽フレアの磁気リコネクションモデルを支持する証拠のほとんどが、見かけのもの、間接的なものである。磁気リコネクションの物理モデルから予言されているリコネクションインフローやアウトフロー、衝撃波などの現象は未だ観測されておらず、磁気リコネクションの詳細な物理的理解を進めるまでには至っていない。

本年打ち上げ予定のわが国の次期太陽観測衛星「Solar-B」衛星には、極紫外域の分光観測が行える極紫外線分光撮像装置(EIS)と、軟 X 線の撮像を行う X 線望遠鏡(XRT)が搭載される。太陽フレアにおける磁気リコネクションモデル(図 1)で予言されている磁気リコネクションに伴うインフローやアウトフロー、スロー衝撃波などの現象を検出するためには、異なる温度のプラズマの物理量と空間的な構造の情報を得ることができるこれら 2 つの観測機器は大いに有効な機器である。

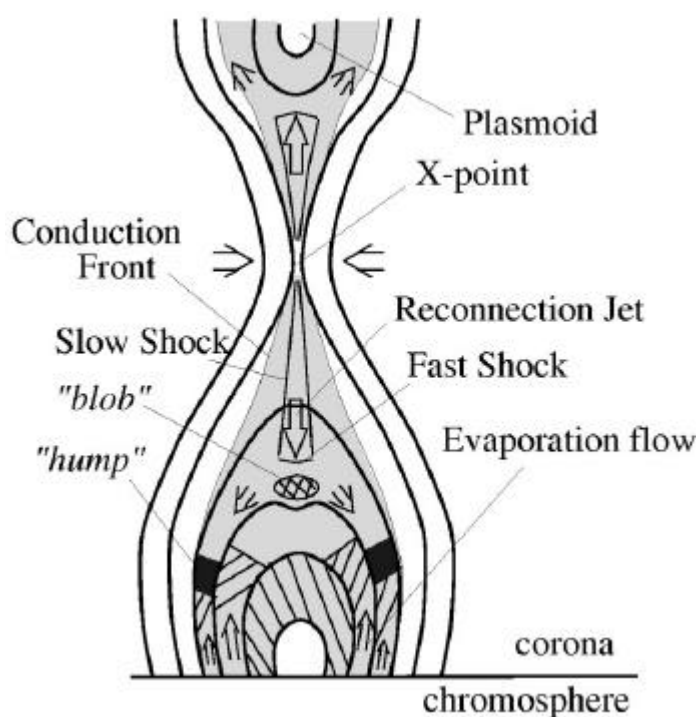


図 1 太陽フレアにおける磁気リコネクションモデル(Yokoyama & Shibata 1998)

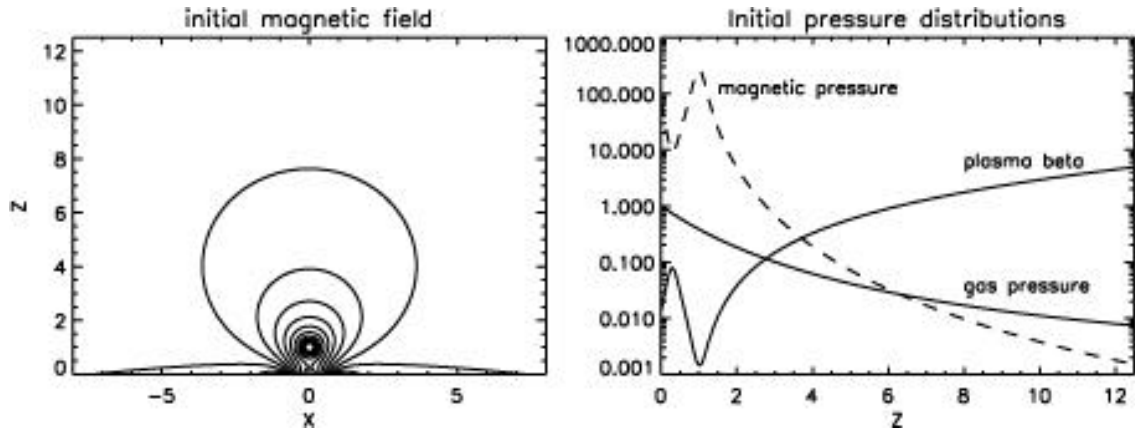


図2 (左) 初期条件の磁場構造。実線は磁力線を示す。(右) 初期条件の $x=0.2$ におけるガス圧、磁気圧の分布(鉛直方向)。

本研究では、磁気リコネクションによるフレアの磁気流体(MHD)シミュレーションの結果をもとに Solar-B/XRT、EIS の観測画像を合成し、リコネクションに伴う諸現象の予想される観測結果について議論する。

本研究で行ったシミュレーションは、Shiota et al. (2005)の熱伝導を含む磁気流体モデルに重力を加えて発展させたもので、時間発展させた MHD 方程式は以下で表される。

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \nabla \cdot (r\mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \frac{1}{r} \nabla p - \frac{1}{r} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \nabla \times (h \nabla \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + (g-1)T \cdot \nabla \mathbf{v} - \frac{2(g-1)h}{b_0} \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{j}}{r} + Q = 0$$

ここで Q は熱伝導関数で次のように表される。

$$Q = \frac{2(g-1)k_0 T_0^{\frac{7}{2}}}{r_0 v_0^3 L_0} \frac{1}{r} \nabla \cdot \left(T^{\frac{5}{2}} \frac{\mathbf{B}(\mathbf{B} \cdot \nabla T)}{B^2} \right)$$

計算領域は、空間スケール $L_0=10^{10}\text{cm}$ として、 $-8<x<8$ 、 $0<z<12.5$ 、グリッド数は $(n_x, n_z)=(321, 501)$ 。初期条件として、温度分布は $T_0=1.5\text{MK}$ で一様、密度分布は静水圧平衡を仮定して底面境界で $n_0=10^9\text{cm}^{-3}$ とした。磁場構造は力学的に平衡にあるフラックスロープを $(x, z)=(0, 1)$ においた。図 2 にその初期条件の磁場構造および鉛直方向の圧力分布を示す。

Feynman & Martin(1995)は、浮上磁場に伴ってコロナ質量放出(CME)が発生していることが示した。この観測に基づき Chen & Shibata (2000)底面境界からの浮上磁場によってフラックスロープの平衡が失われて飛び出していき、CME/フレアが引き起こされるモデルを提唱した。このモデルでは、平衡が失われてフラックスロープの下磁気中性点 (X ポイント) でリコネクションが始まり、そのリコネクションアウトフローによってフラックスロープが上方に加速される。リコネクション領域の下方では、つなぎ変わった磁力線がカスプ型の(フレア)ループを形成する。本研究では、現象を引き起こすためにこのモデルを適用した。

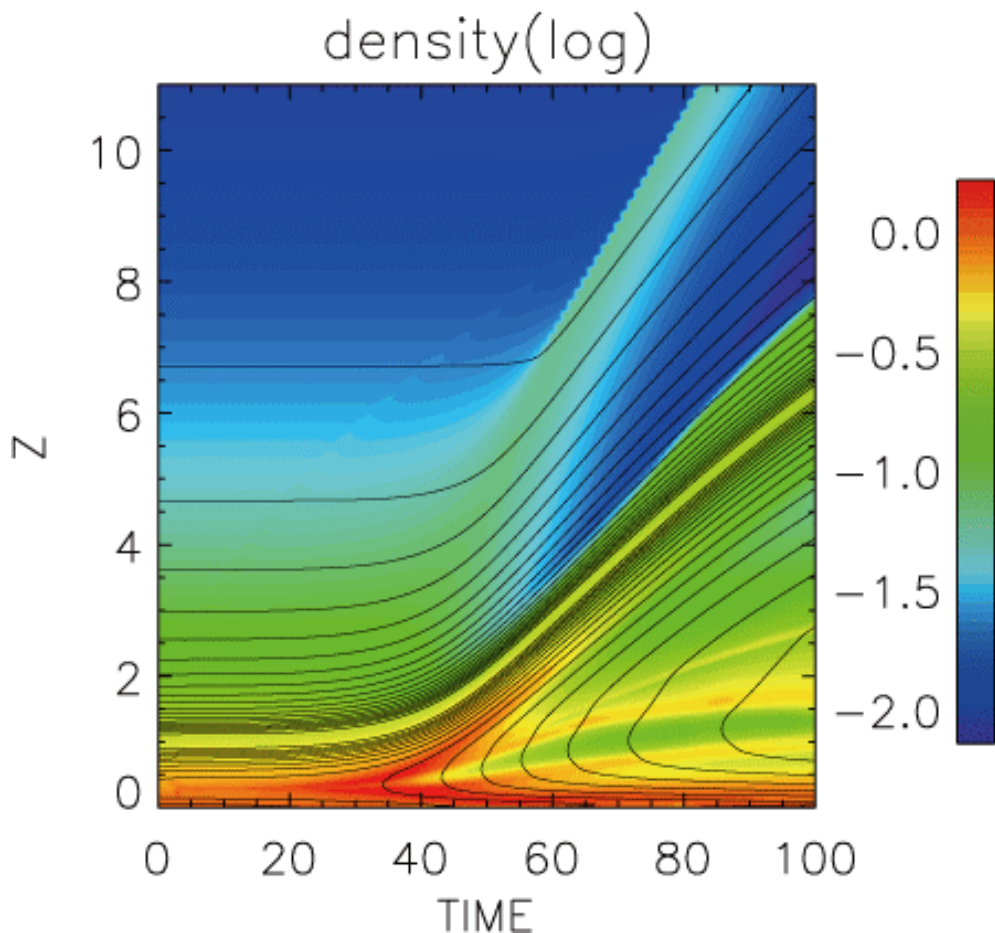


図 3 $x=0$ における密度分布 (log) の時間進化。実線は同じ磁力線の軌道を表す。

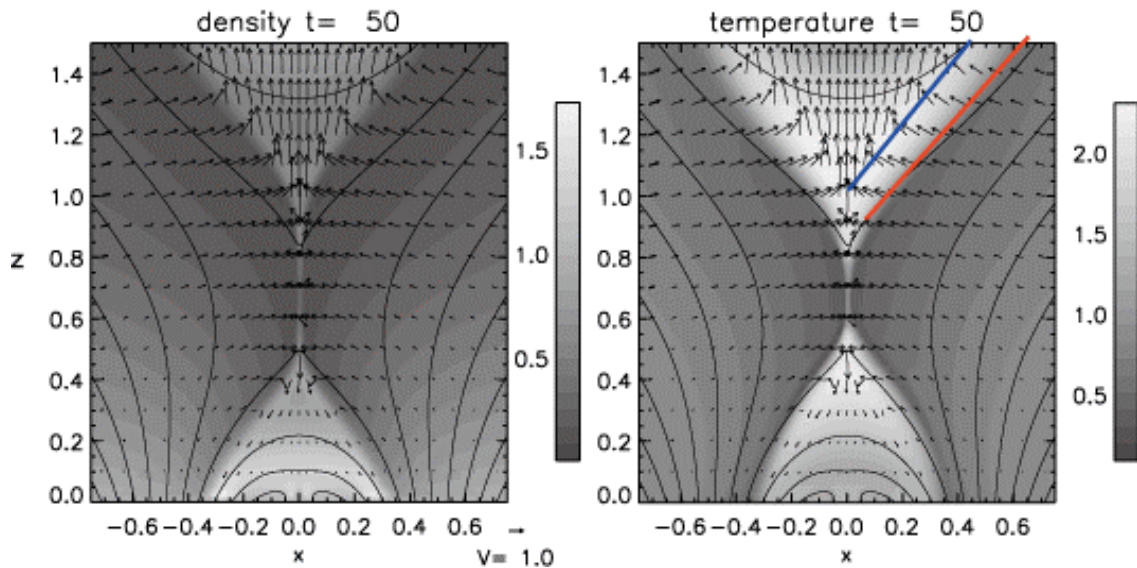


図4 $t=50$ における密度分布 (log、左) と温度分布 (右) 黒実線は磁力線、矢印は速度場を表す。右図の赤線は温度の不連続面、青線は速度の不連続面を示す。左図から、速度の不連続面は密度の不連続面に一致することがわかる。

シミュレーション結果を図3、4に示す。図3はフラックスロープの中心がある $x=0$ における鉛直方向の密度分布の時間発展をカラーで示したものである。実線は $x=0$ における x 方向の磁力線の高さの時間変化で、各線は同じ磁力線に凍結したプラズマの軌道を表している。初期に $z=1$ にある、磁力線がない部分がフラックスロープの中心をしめしており、これが最終的に $z=6$ あたりまで上昇している。そのフラックスロープの下方に、新たにつなぎ替わって生じた x 方向の磁力線が上下に分かれていくのが確認できる。図4は $t=50$ における密度分布と温度分布を示す。 $(x, z)=(0, 0.65)$ 付近のXポイントでリコネクションが起き、水平方向にインフロー、上下方向にアウトフローが発生していることがわかる。

リコネクションが始まるとアウトフローによってリコネクション領域の磁束が上下に吐き出されるため、リコネクション領域の磁気圧が下がる。リコネクション領域の水平方向に磁気圧勾配ができ、この勾配によってインフローが引き起こされる。インフローはリコネクション領域に近づくに従って加速されるため、インフロー領域には水平方向に速度勾配が生じる。これによりインフロー領域のプラズマは膨張、加速されながら流れ込む。その結果、内側にあるプラズマほど速度が大きく、温度が低い分布が形成されている。このメカニズムは Shiota et al. (2005)の中でリコネクションインフローによる Dimming の発生メカニズムとして述べられている。

太陽フレアでは、リコネクション領域内のプラズマが非常に高温に加熱されるため、熱伝導のタイムスケールは非常に短くなり、その結果磁気リコネクションに付随するスロー

衝撃波後面からの熱伝導フラックスが衝撃波前面へ伝わり、衝撃波すぐ前面のプラズマが加熱されることが知られている(Forbes et al. 1989; Yokoyama & Shibata 1997、図 1)。これにより、スロー衝撃波が形成されるインフロー領域とアウトフロー領域の境界は、低温インフローと高温アウトフローの境界ではなく、低温インフロー、高温インフロー、高温アウトフローの境界となっていることがわかる(図 4 右)。低温インフロー、高温インフローの境界が熱伝導前面(図 4 右赤線)、高温インフローと高温アウトフローの境界の不連続面(図 4 右青線)がスロー衝撃波であることがわかる。

次に観測画像の合成法を示す。図 5 に示してあるように、ある時刻の 2.5 次元シミュレーション結果を垂直方向 (y 方向) に一様に並べて模擬的な 3 次元データを作成する。このとき、両端には周囲のコロナの影響も考慮するために $t=0$ のデータを y 方向の両端に付け加えた。擬似 3 次元データの各点における密度から emission measure を求め、速度から視線方向(θ, ϕ)の速度成分を求める。これらと、温度 XRT のフィルターの感度関数及び輝線 G function から各点の輝度及びその波長情報を計算し視線方向に積分した。

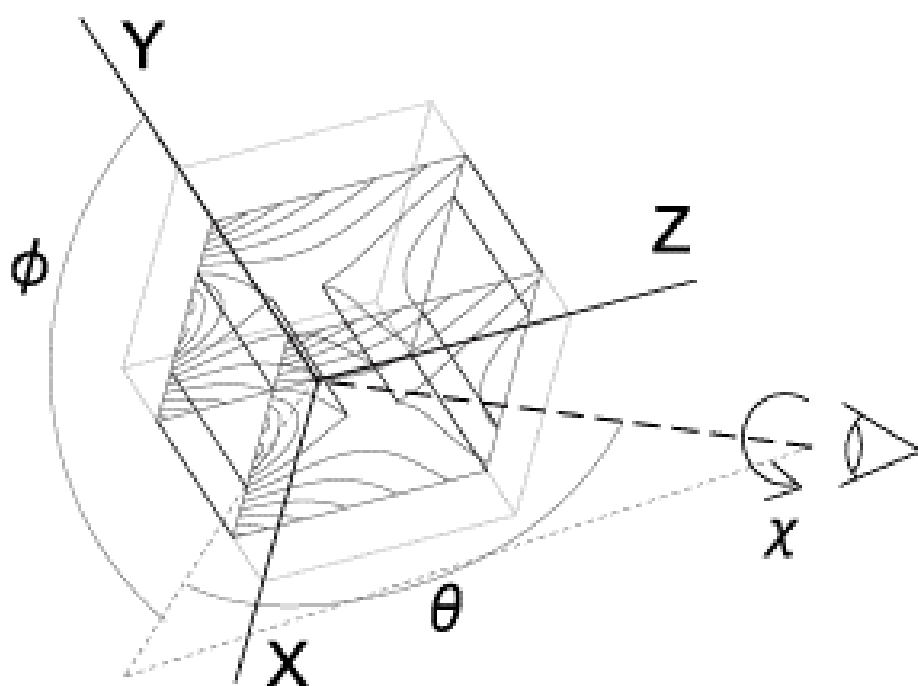


図 5 画像合成の概念図。

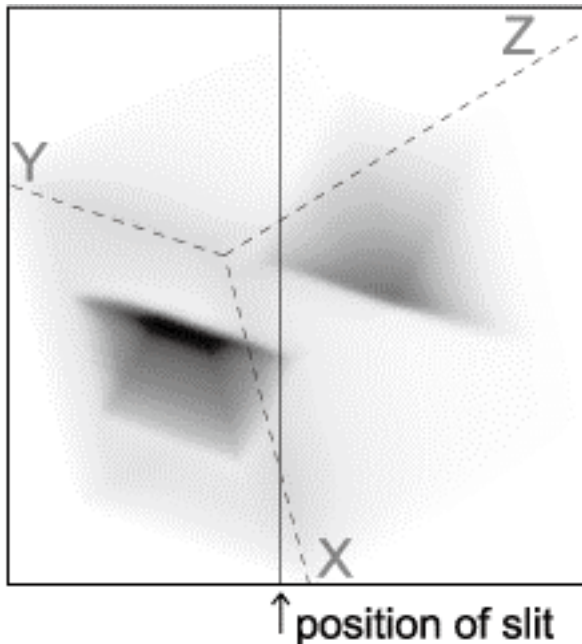


図6 X線望遠鏡(XRT) Thin Al poly filter を用いてシミュレーション結果を観測した場合の合成画像（ネガ）。視線方向は($\theta=30^\circ$ $\phi=30^\circ$)。破線は図5に示してあるデータ領域の境界を表す。

得られた XRT 画像が図6である。この画像は($\theta=30^\circ$ $\phi=30^\circ$)から観測した画像で、左下にある明るい部分がフレアアーケード、右上にある明るい部分がフラックスロープ下部（プラズモイド）を観測している。磁気リコネクションはこれらの中で起きているので、その部分にスリットを当てて EIS で分光観測した場合に得られると結果を合成した（図7）。このとき、温度の異なるプラズマの振る舞いを調べるために、EIS の波長範囲にある温度感度の異なる4種の輝線のデータを合成した。図7(a)-(d)に示した4輝線のイオンと波長は、Ca XVII 192.82、Fe XV 284.147、Fe XII 195.119、Si VII 275.361 で、ピークの温度はそれぞれ $\log(T)=6.70$ 、6.30、6.15、5.75。

図7とシミュレーションの結果を比較することで、以下のことが明らかになった。

リコネクションアウトフローは、リコネクション領域で加熱されたプラズマが高速で双方向に噴出している。そのため、Ca XVII 192.82（5MK）などの高温プラズマからの輝線で、リコネクション領域をはさんだ双方向に red-shift した成分と blue-shift した成分が観測されると予想される。

一方、リコネクションインフローは、リコネクション領域に向かって双方向から流れ込んでいる。このとき、その温度分布は内側ほど低く、速度分布は内側ほど速くなっている。これにより、リコネクションインフローは Fe XV 284.147（2MK）、Fe XII 195.119（1.5MK）、Si VII 275.361（0.56MK）などの低温プラズマからの輝線で、アウトフローと同様にリコネクション領域をはさんだ双方向に red-shift した成分と

blue-shift した成分として観測される。さらに、それぞれの輝線で観測される red-shift, blue-shift 成分の平均速度は低い温度のものほど大きくなっていることが予想される。図 7 (b)、(c) から Fe XV 284.147 (2MK)、Fe XII 195.119 (1.5MK) では、インフローやアウトフローとは別の成分が観測されていることがわかる。これはスロー衝撃波前面のインフロープラズマが熱伝導により加熱されている高温インフロー(図 4 右)であることがわかる。今回計算した角度では、アウトフローと高温インフローの視線方向速度ほぼ等しいため重なってしまっているが、別の角度からの観測でこれらがこれらの速度に差ができて、それぞれの速度を得ることができると考えられ、今後の課題である。これらの速度が得られれば、衝撃波の存在を議論できると考えられる。

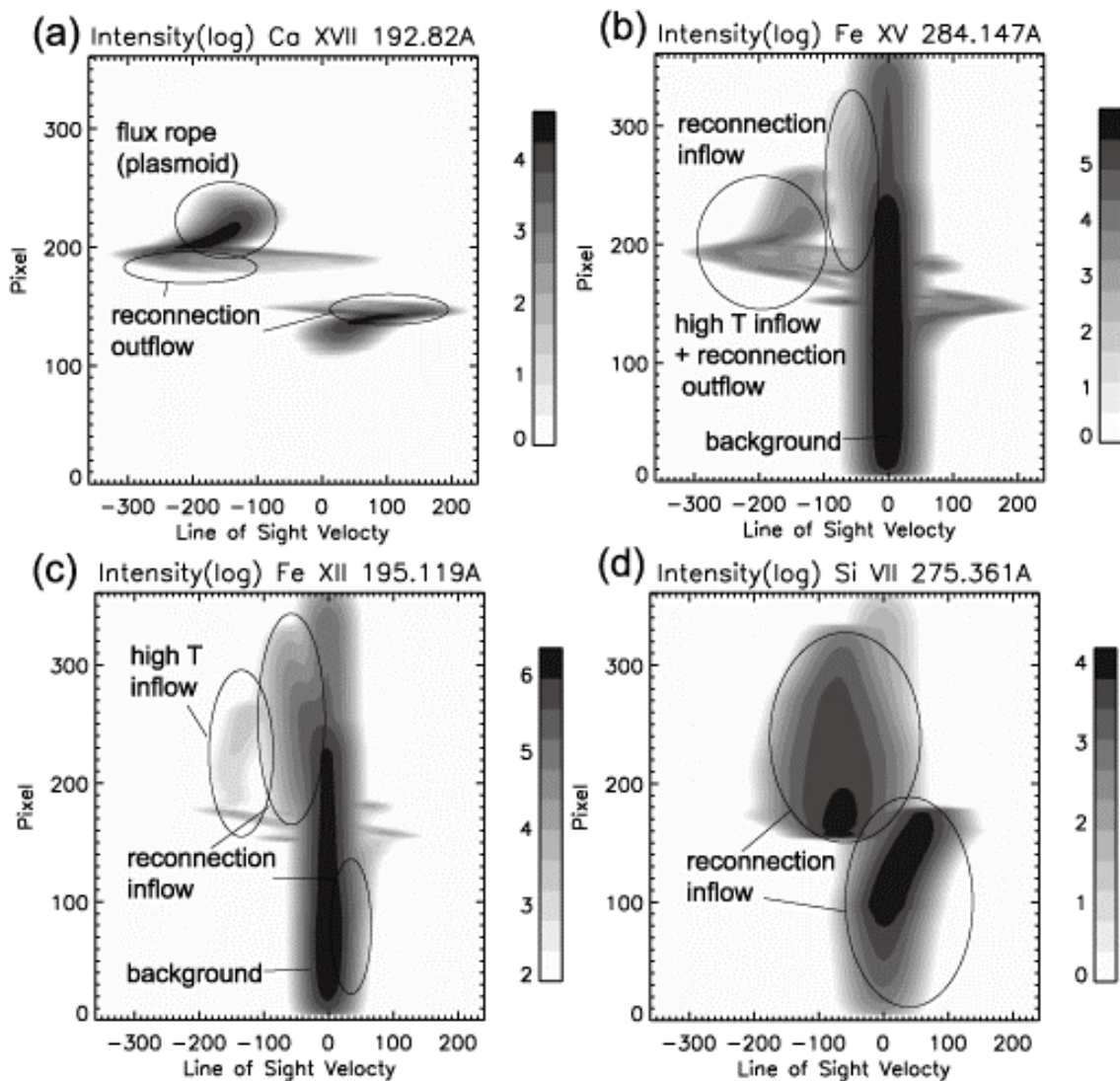


図 7 図 5 にあるスリット部分を分光観測した場合の合成データ (Ca XVII 192.82 、 Fe XV 284.147 、 Fe XII 195.119 、 Si VII 275.361)。縦軸がスリット方向、横軸が波長方向、コントラストが輝度を示す (ネガ)。

