

IRIS + ひので

- ▶ NASA 小型衛星ミッション (SMEX)
- ▶ 2013年6月27日打ち上げ
- ▶ ひのでの観測を踏まえて提案・開発
- ▶ 紫外線分光観測 → 物理量の取得

Interface Region Imaging Spectrograph

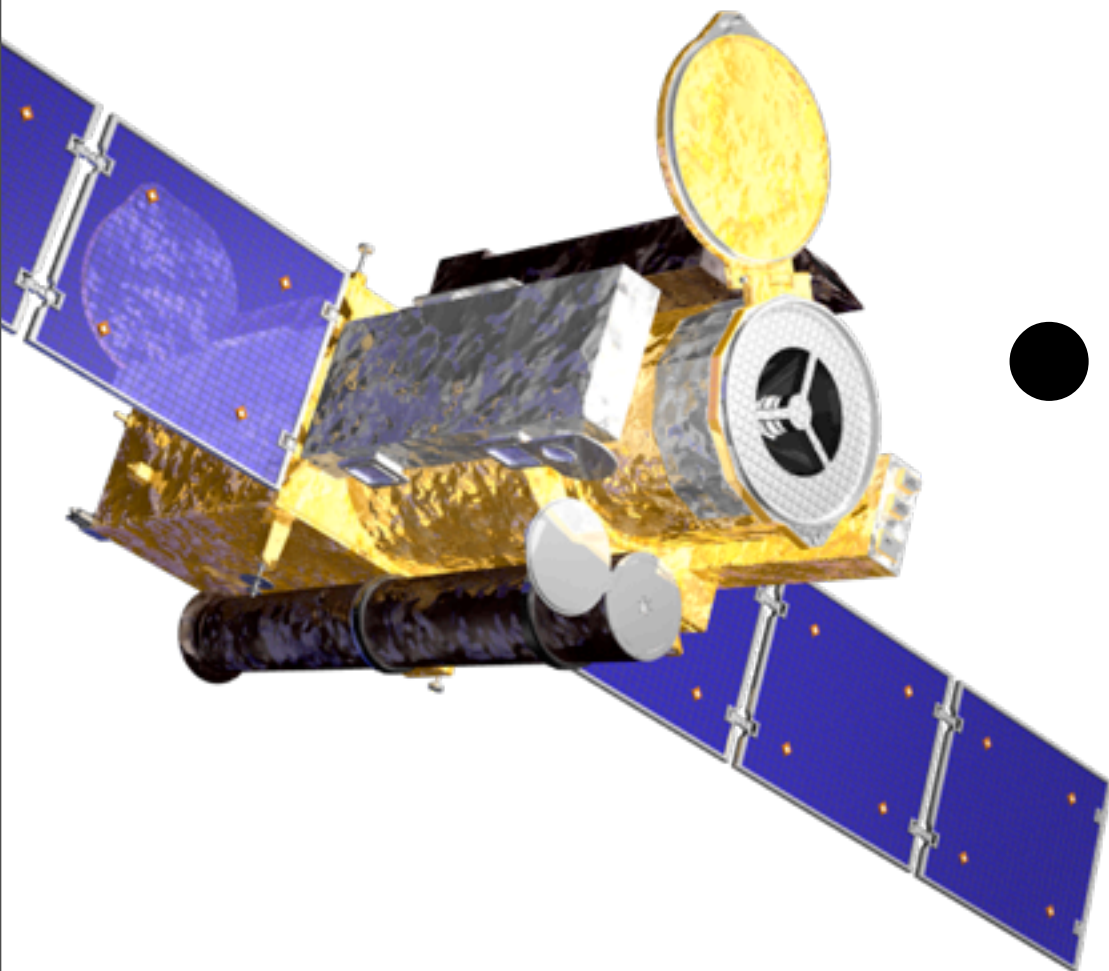


(高空間分解能)

● 2次元面運動 +

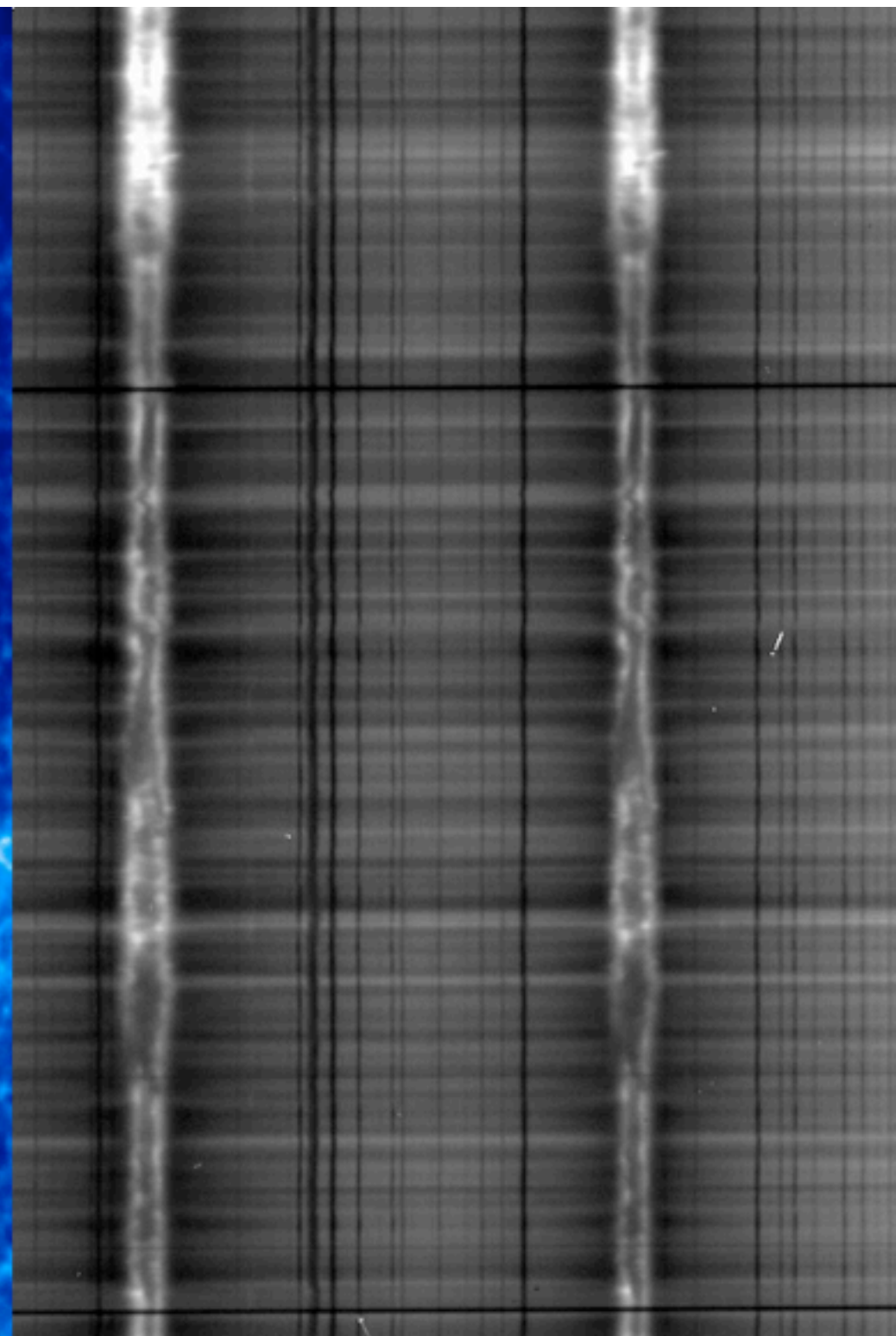
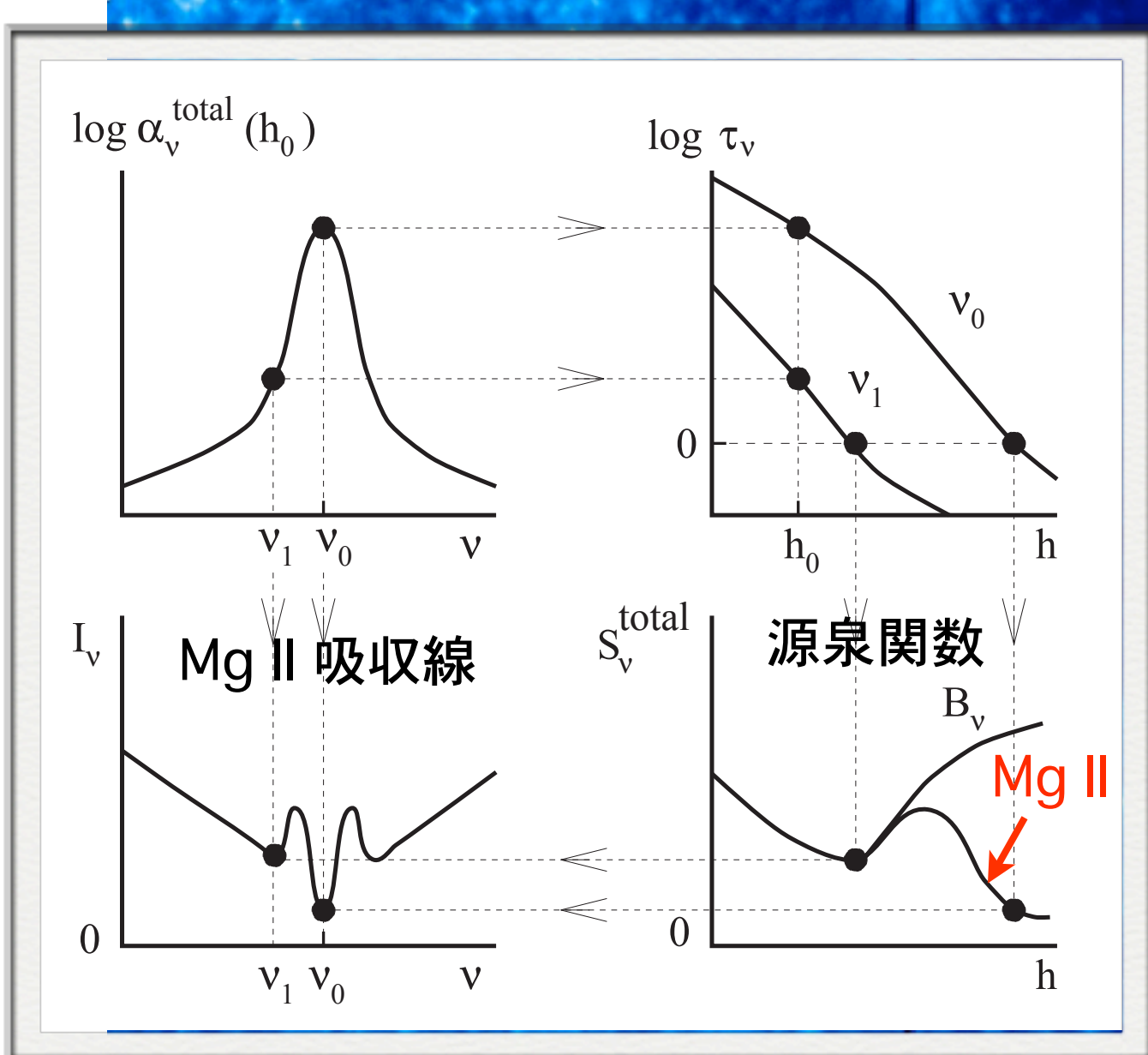
- 視線方向速度
- 非熱的速度
- 多温度観測

彩層の役割を理解する



IRIS 観測波長と観測例

太陽表面



4-Aug-2013
22:52:04 UT

スリットジョー動画
(Mg II k)

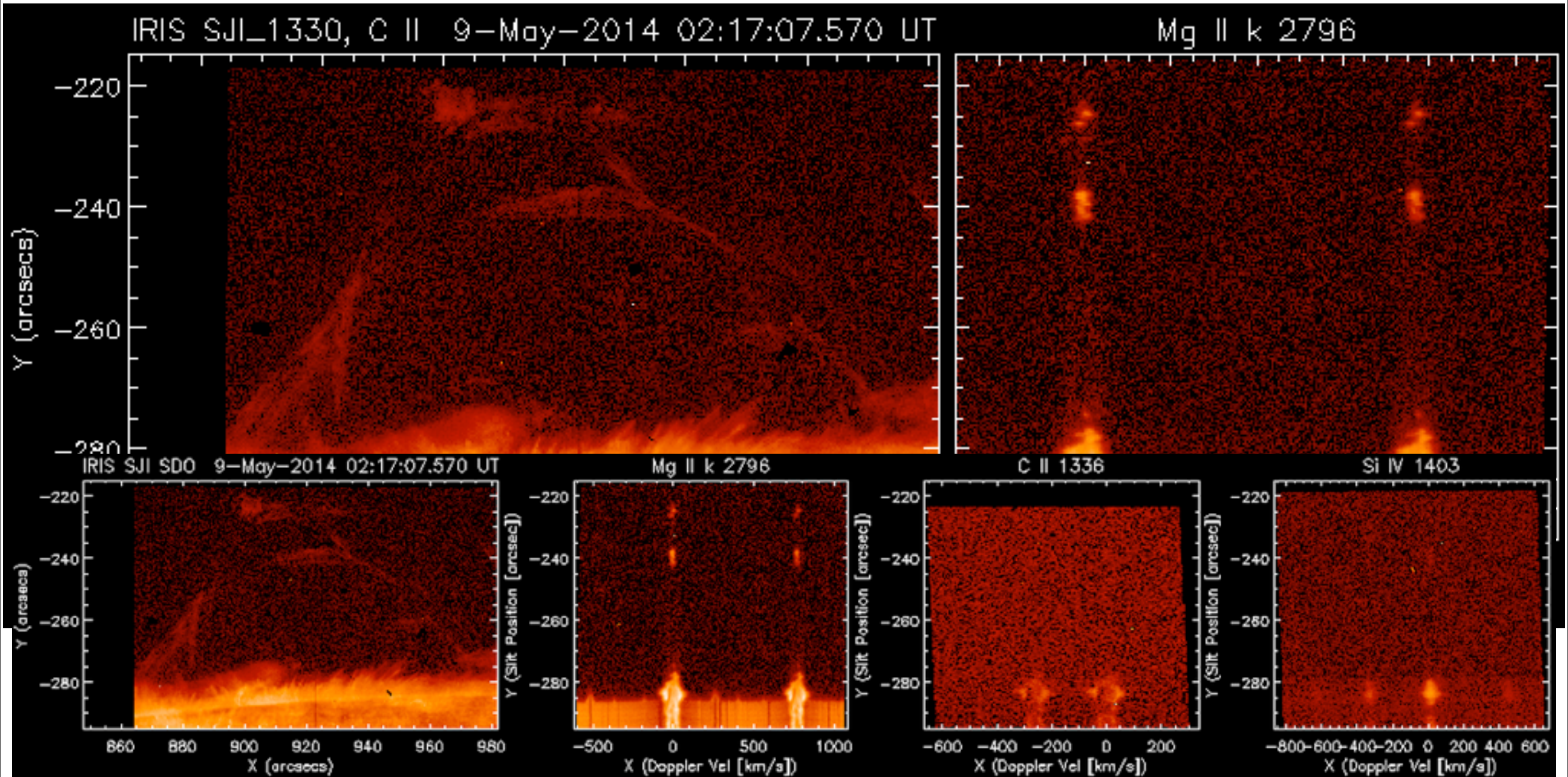
スリット位置

Mg II k

Mg II h

→ 波長

フレアと噴出



スリットジョー
(C II)

Mg II (2796A)
10,000 K

C II (1336A)
20,000 K

Si IV (1403A)
80,000 K

Science IRIS 特集号



5本の論文
(10月17日号)

B. De Pontieu → 馬場

On the prevalence of small-scale twist in the solar chromosphere and transition region

H. Peter → 勝川

Hot explosions in the cool atmosphere of the Sun

V. Hansteen

The unresolved fine structure resolved: IRIS observations of the solar transition region

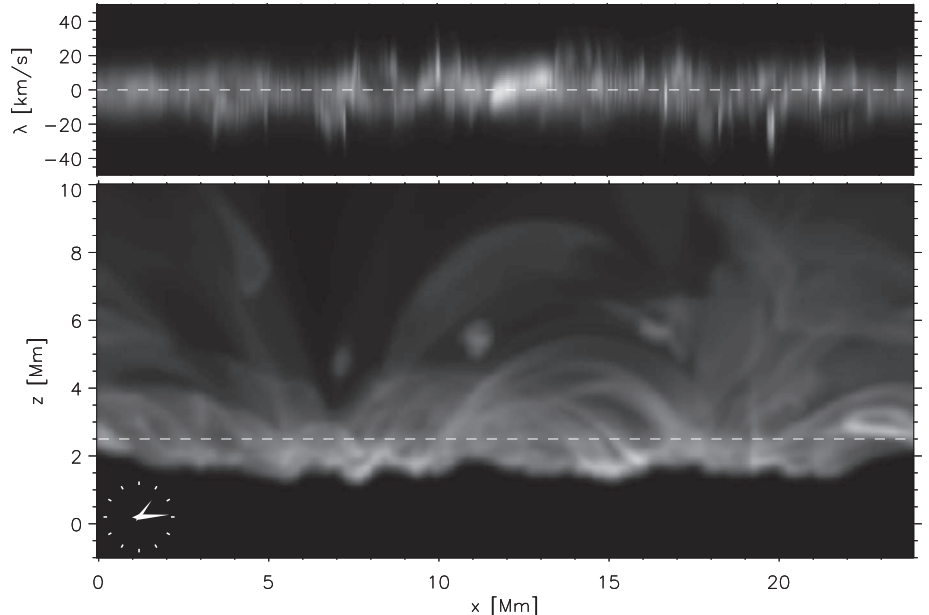
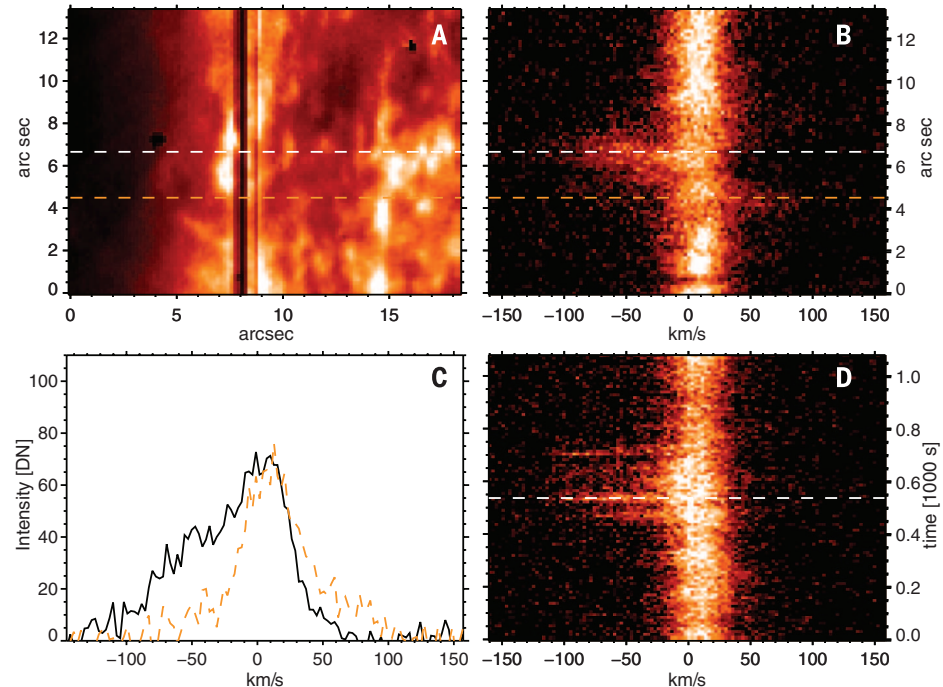
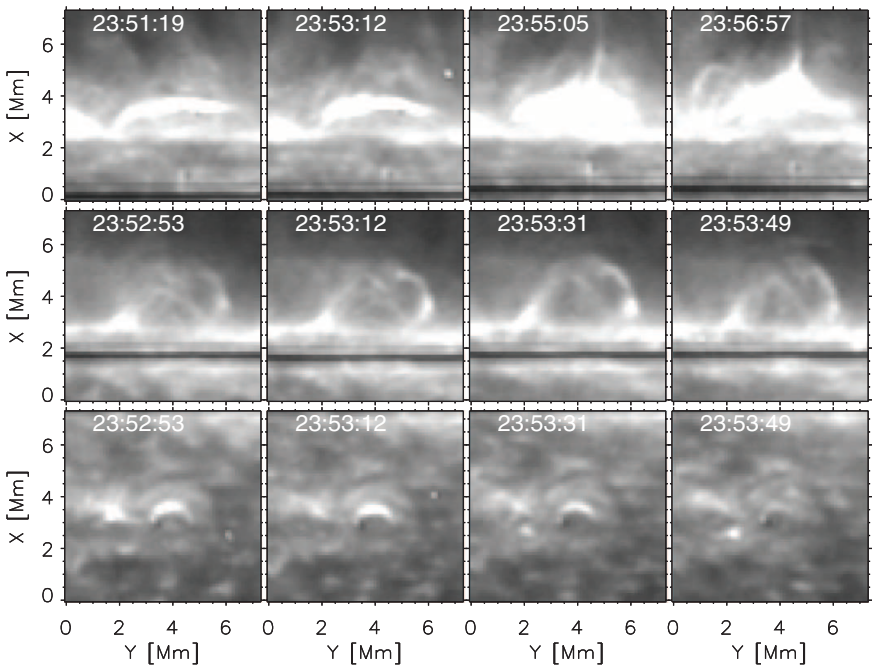
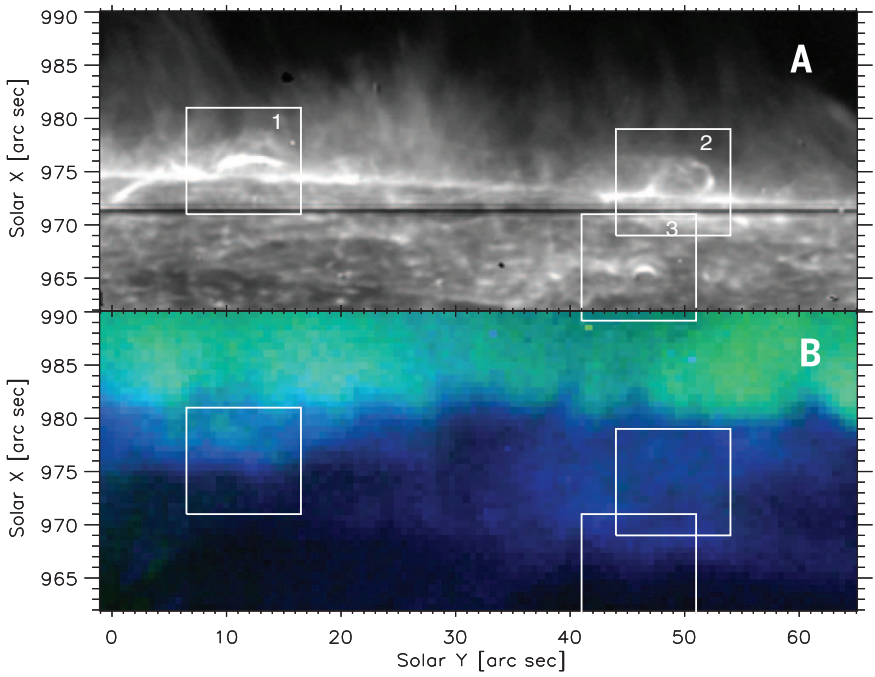
P. Testa

Evidence of nonthermal particles in coronal loops heated impulsively by nanoflares

H. Tian

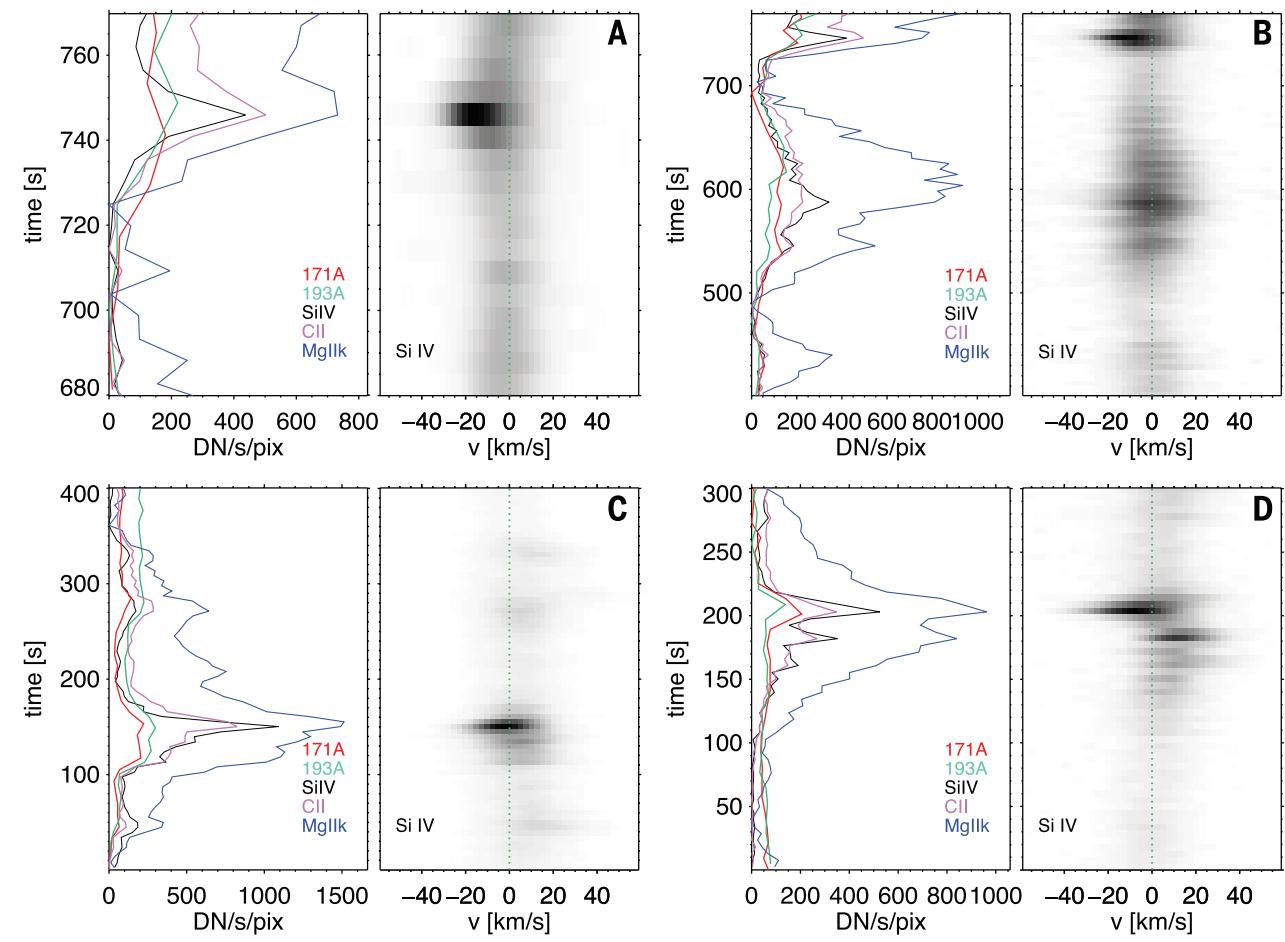
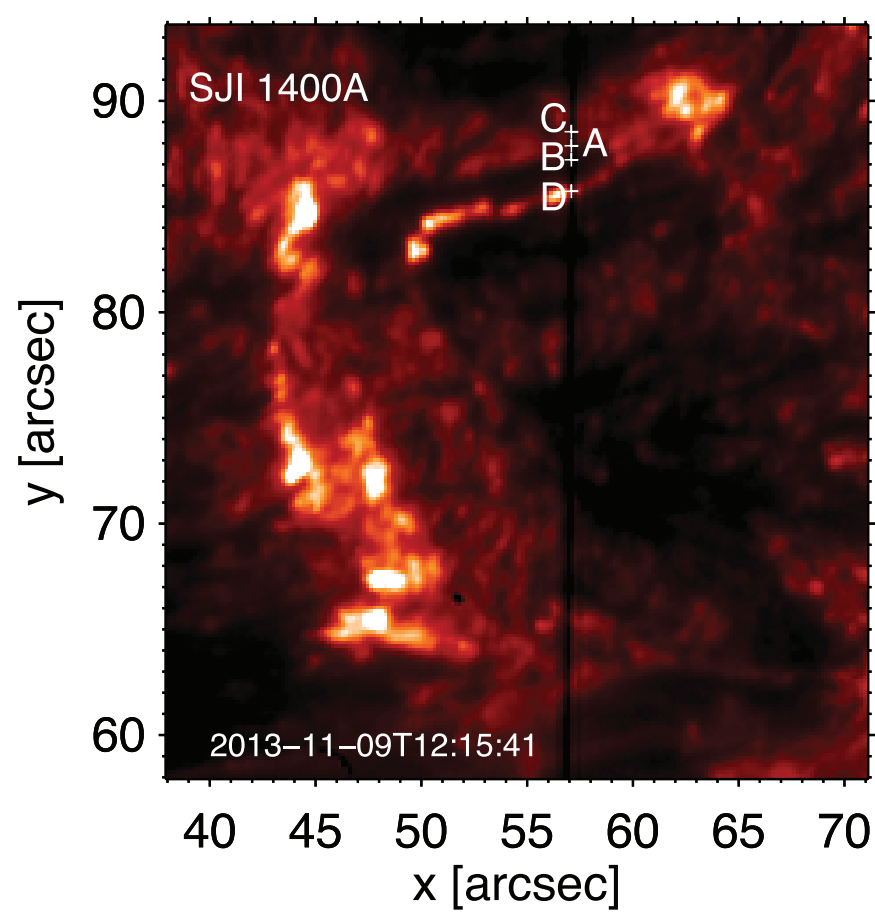
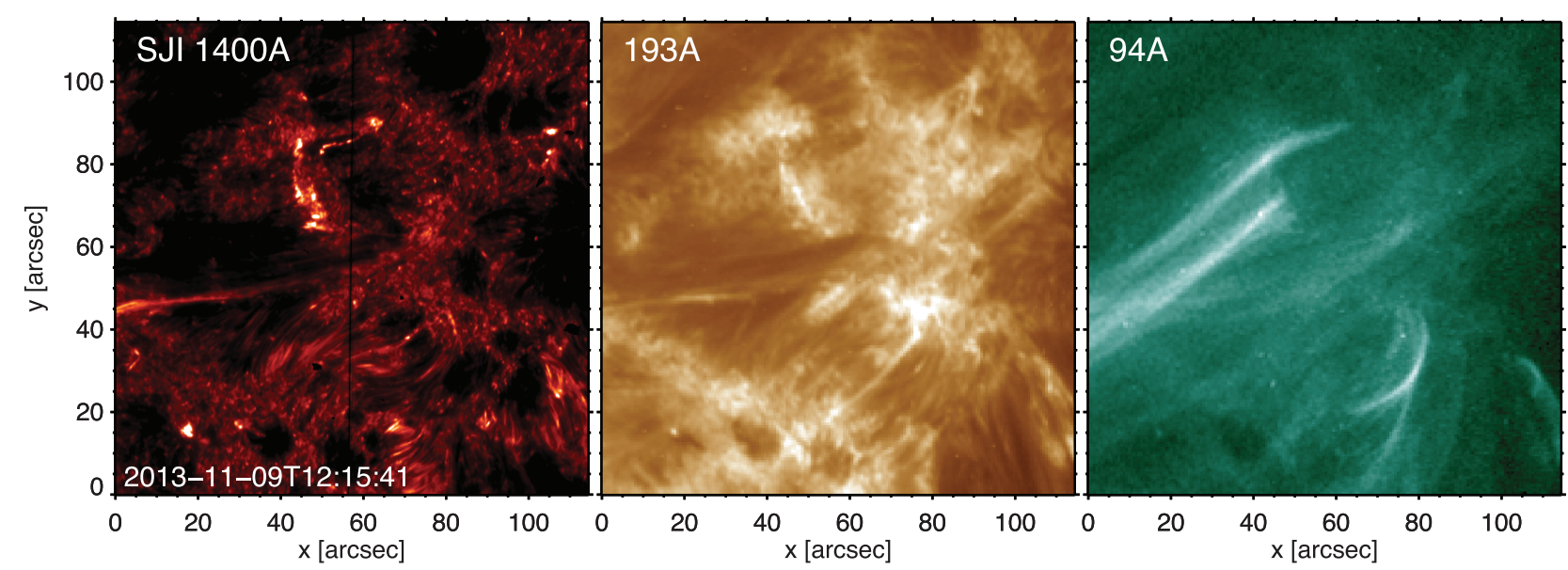
Prevalence of small-scale jets from the networks of the solar transition region and chromosphere

いまままで空間分解されていなかった微小ループ構造が初めて分解された
→ 短いループの急激な加熱・冷却が効きすぎるためコロナ温度に達しない・
3次元モデルで再現できていない高速成分(70 km/s)がある



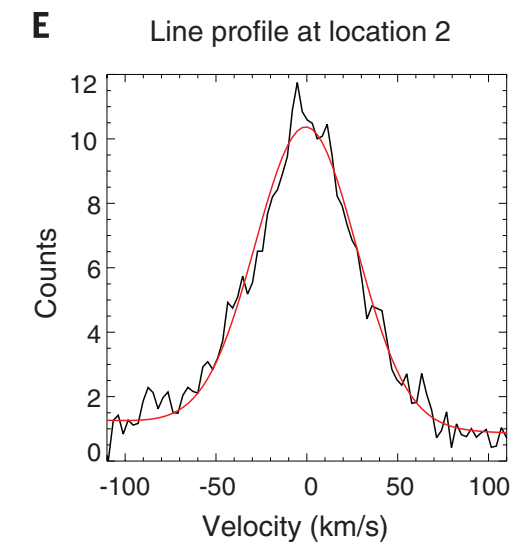
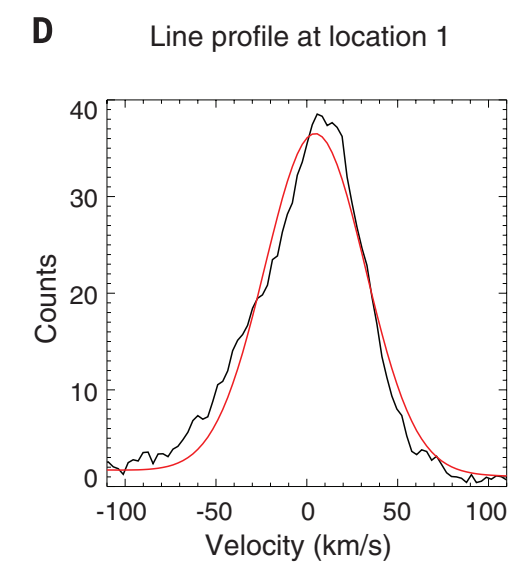
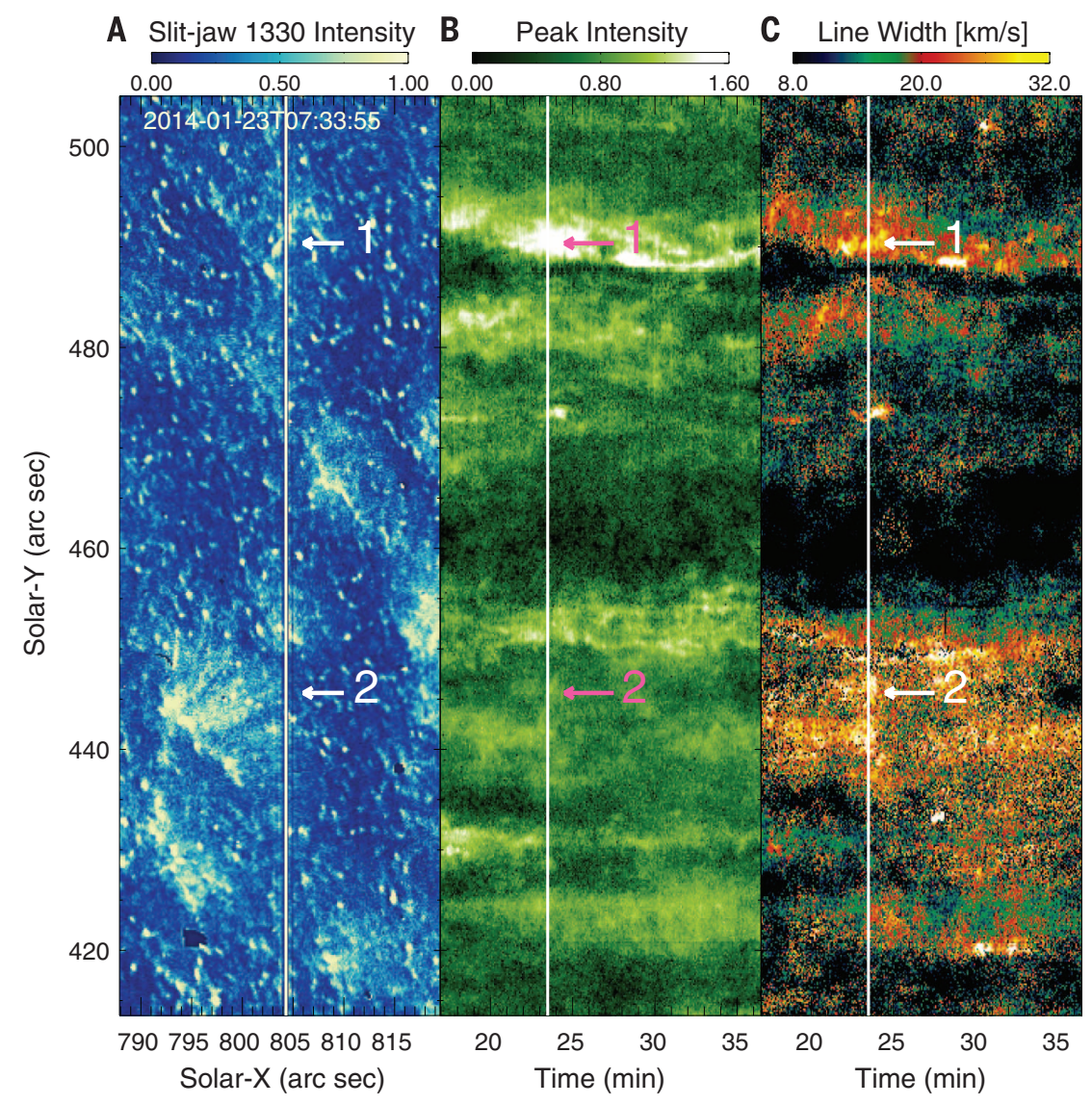
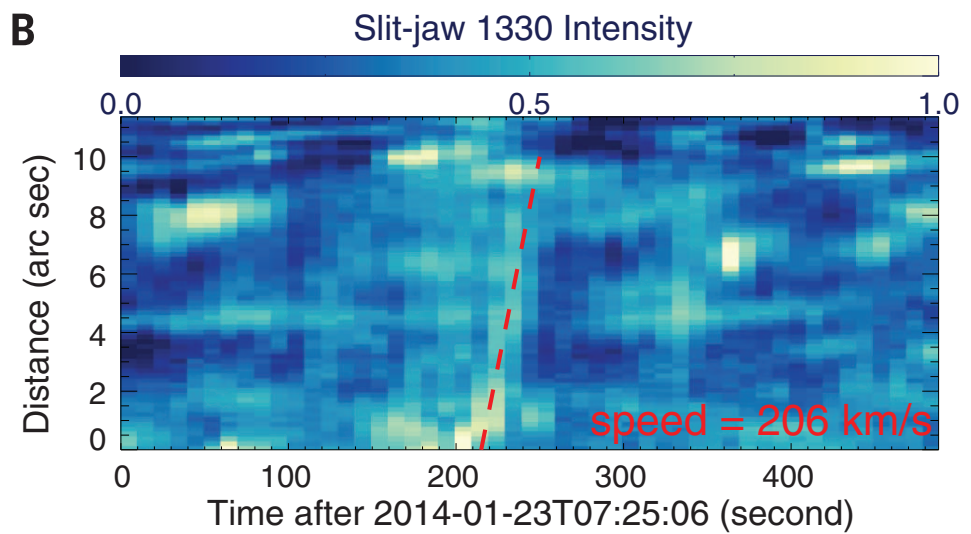
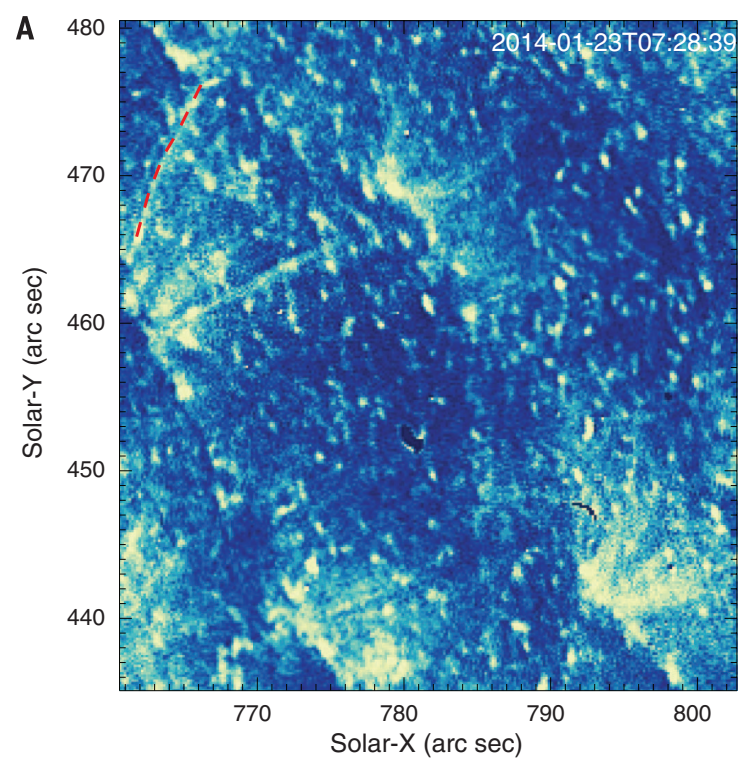
ナノフレアによるコロナループの加熱の証拠

→ 電子ビームによる下層の加熱により上昇流が発生・数十秒から数分の短時間現象



ネットワークから高速のジェットが発生

→ これまでに観測されたものよりずっと速い(250 km/s)・ネットワーク輝点の増光後に発生



● IRIS データの紹介

ー イントロ (7)

岡本

ー 日本人による解析進捗と IRIS 論文紹介 (33)

勝川・加納・馬場・今田・Antolin

ー ALMA 進捗 (10)

下条

● 輻射輸送の複雑さ

ー マグネシウム線は有用か (26)

川手・岡本・Antolin

ー 解析に何が必要か (10)

飯島

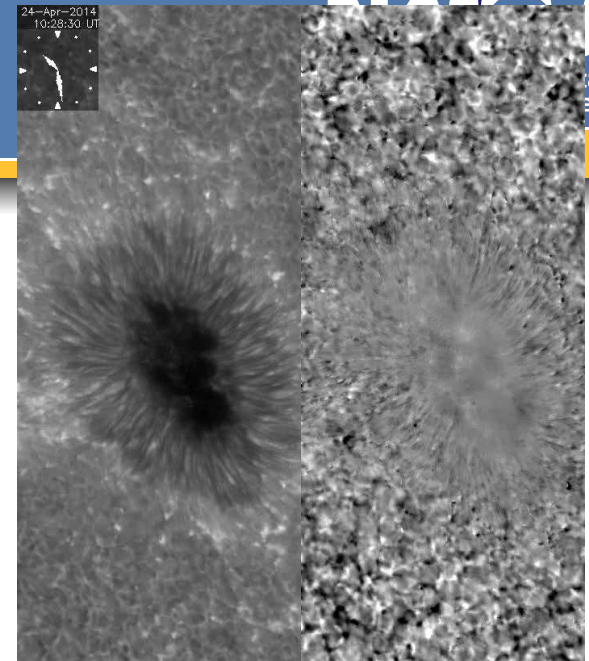
黒点周辺で発生する短寿命・高速現象の 探査のためのIRIS-Hinode共同観測

勝川 行雄 (国立天文台)

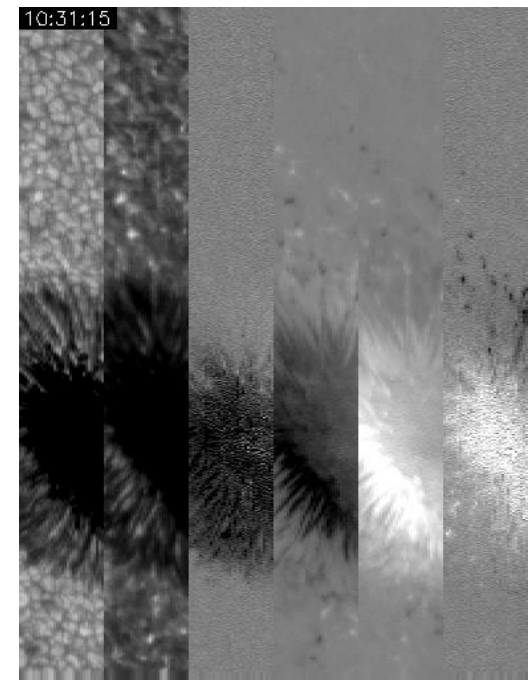
概要

- 黒点内外で短時間・高速現象の宝庫。光球・彩層・遷移層の因果関係を探る。
 - 対象
 - 半暗部マイクロジェット、逆エバーシェッド流
 - ライトブリッジ高速流 → 加納さん
 - 彩層ジェット、エラーマンボム
 - 知りたいこと
 - 高速流を駆動するメカニズムは何か。エネルギー解放がどの高さで起こっているか。周囲・上空へのエネルギー輸送、加熱に効いているか。
- IRIS・Hinodeで高時間分解能・狭視野の観測を計画
 - IRIS:
 - 分光観測 (Mg II h&k, Si IV, C II) 5.6secおきスリット固定
 - Silt-Jaw撮像観測 (2796 Å, 1400 Å)
 - Hinode-SOT
 - SP: 10"視野 (IRISスリットとオーバーラップ)を1minでスキャンする (no summing dynamics modeの間引き観測)
 - FG: Ca II H 1.6 sec 観測
 - 暗部・半暗部や浮上領域など複数の領域で観測を実施

Hinode-FG Ca II H

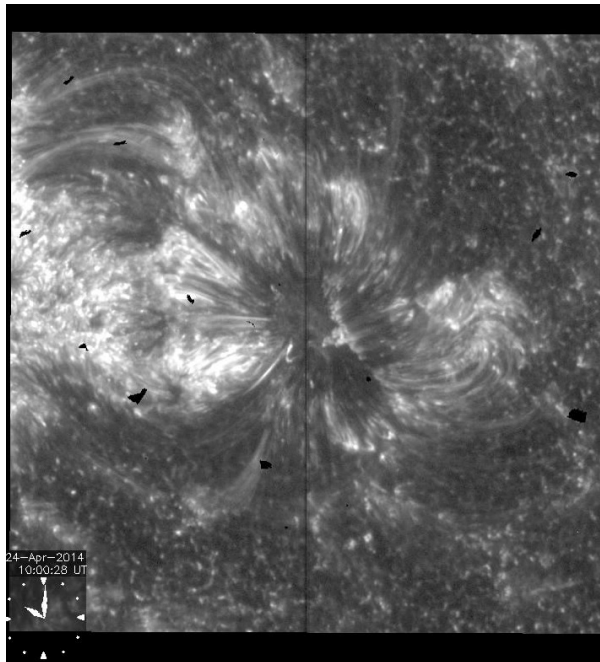


Hinode SP



IRISで見た黒点

IRIS SJ1400



Hinode SP

I

Q

U

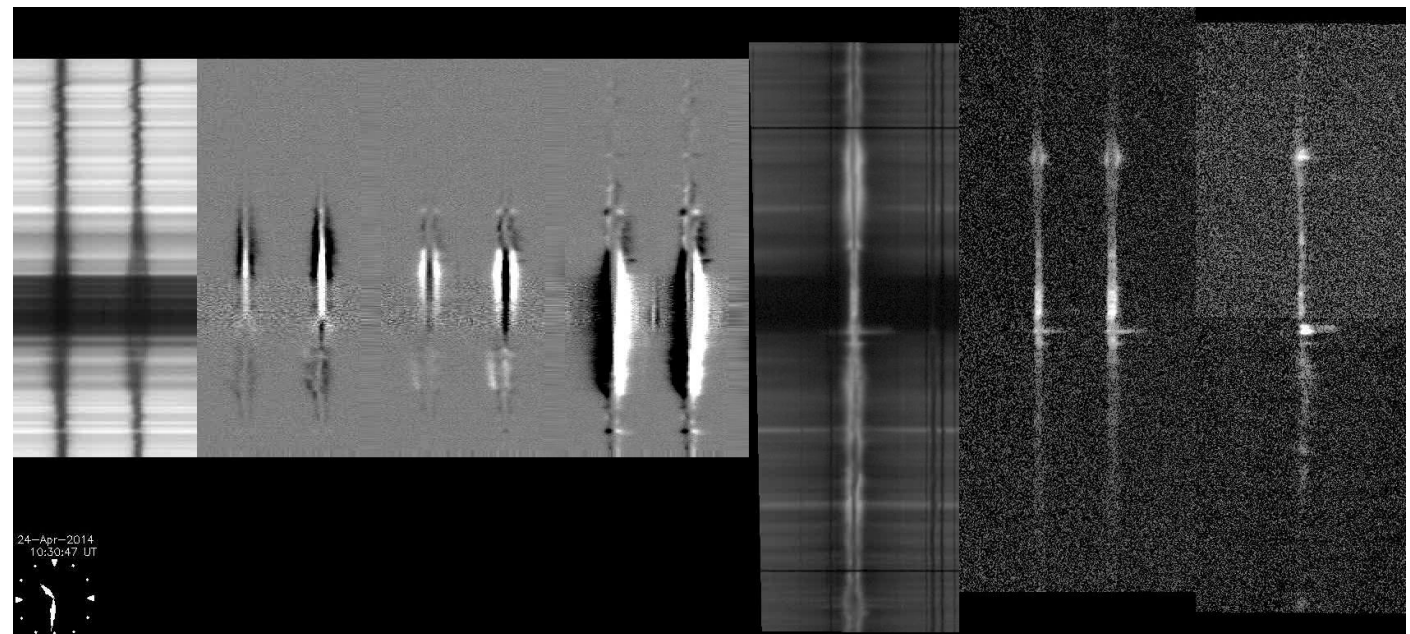
V

Mg II k

IRIS

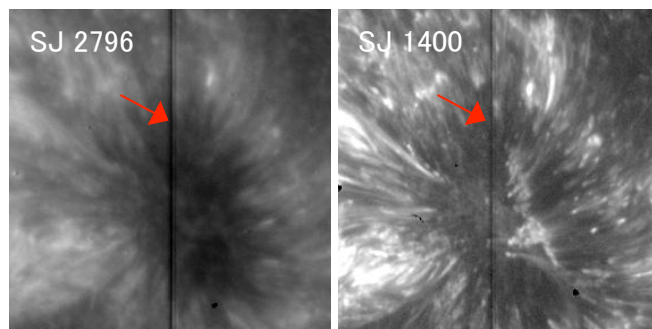
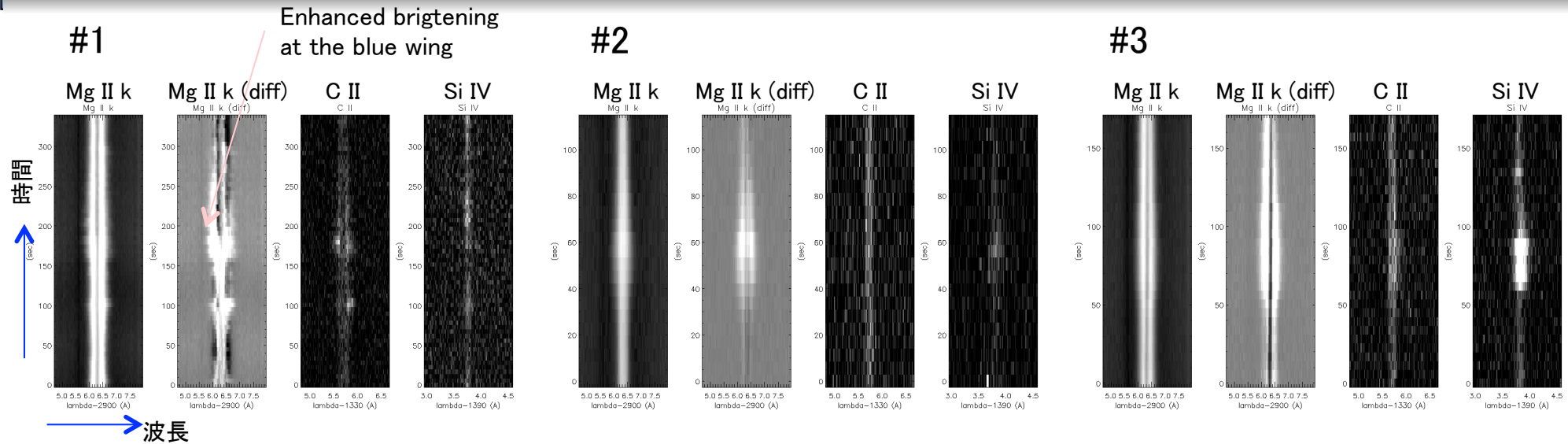
C II

Si IV

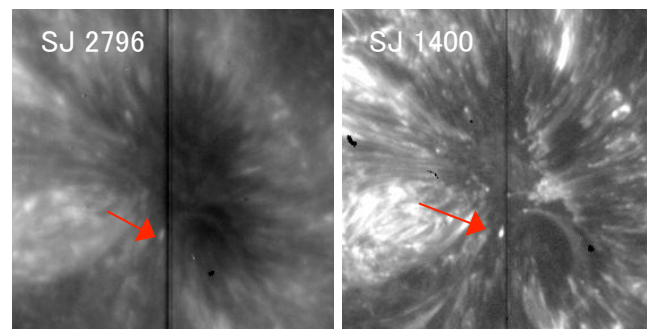


- 光球(Hinode-SP, Fe I)、彩層 (Mg II, C II)、遷移層 (Si IV)をカバーする分光データを取得
- この黒点観測データでは、暗部においてIRISスリットの位置に高速下降流(~ 100 km/s)の付け根が存在。coronal rainの終端が見えている(Kleint et al. 2014, ApJにて報告されている現象)。
- 黒点半暗部上でMg II k、Si IVで見られる短時間増光現象をピックアップ

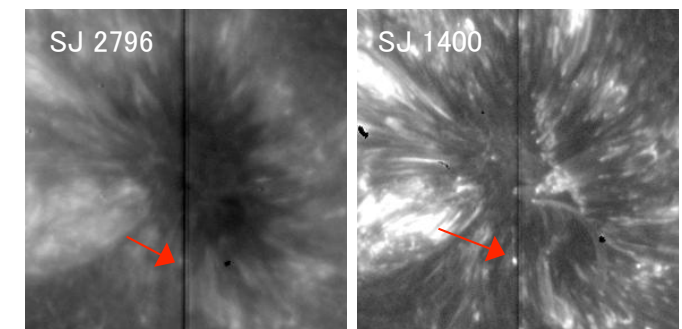
短時間増光時のスペクトル時間発展



半暗部マイクロジェット (と思われるもの)。Si IVの増光は弱い(or 遅れて増光)。SJ画像ではスリットが重なっている場所はよくわからない。

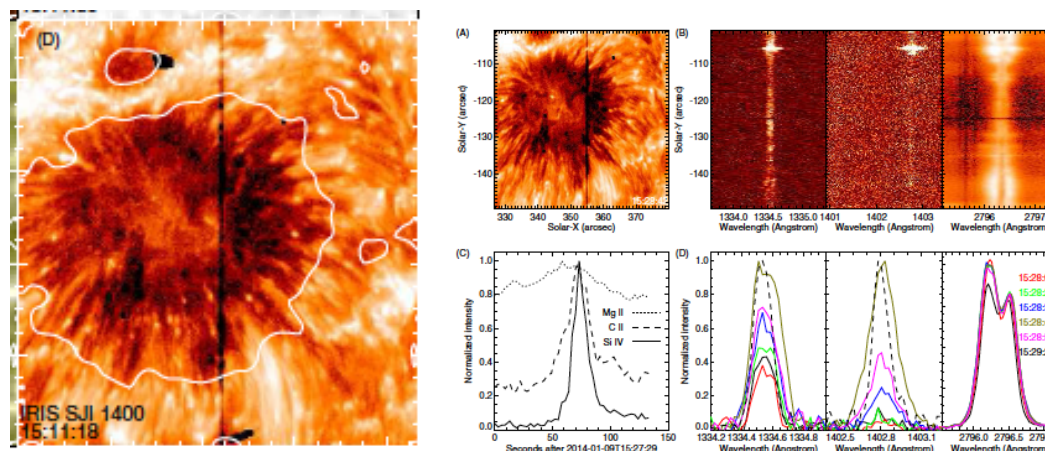


分光データではMg IIのみ増光が顕著だが、SJでは2796でも1400でもどちらでも増光が見える。スリットが増光の端を観測している



Si IVの増光、30-40sec程度の寿命。SJで点状の増光。Mg IIやC IIIにもゆるやかな増光があるように見える。

- 半暗部内の増光現象は、IRIS(彩層・遷移層)でどう見えるか
 - Mg II (C II) と Si IVの増光を比較することで、起源が上層(遷移層・コロナ)か下層(光球・彩層)かを推測することができそう。もう少し観測例を増やしたい。
 - 上層起源: Si IVで短時間の増光。Mg II/C IIは弱く時間スケールの長い増光Tian et al. (2014) “Observations of subarcsecond bright dots …”で報告されている輝点と共通のものだろう。



Tian et al. (2014)より

Energy: $10^{22} - 10^{23}$ erg
TRでのナノフレア?

Falling materialによる加熱?

- 下層起源: Mg IIで短時間の増光。Si IVはほとんど増光しない(or 遅れてわずかに増光)。半暗部マイクロジェットと対応しているだろう。

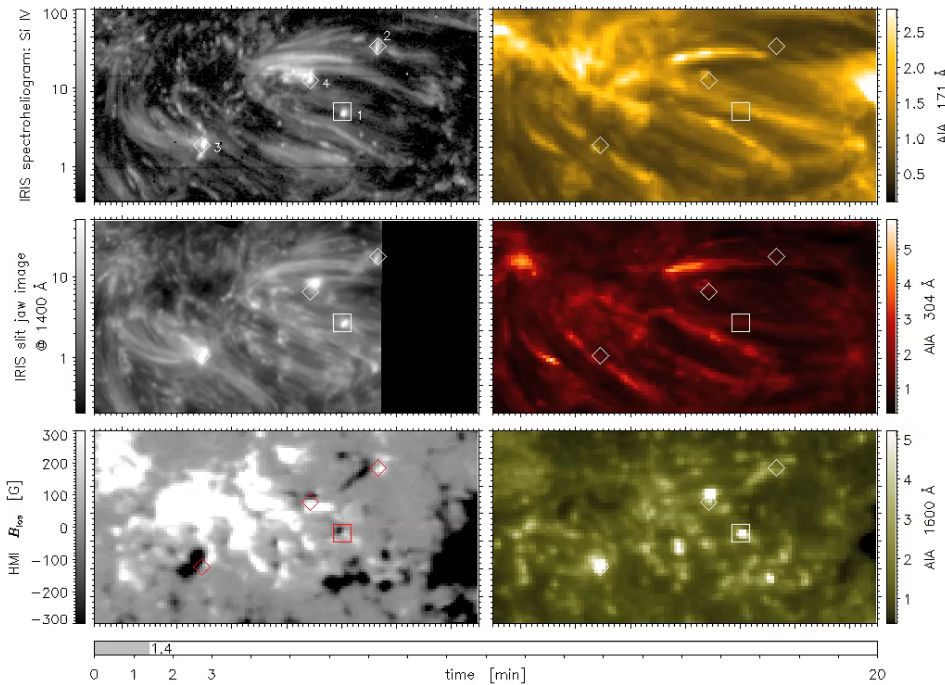
感想

- 10”視野, 1minケーデンスのSP観測でIRISでアライメントできる。
- Hinode-SOTの観測は高時間分解能観測を目指したため、テレメ量の制限のため観測時間は1時間程度。スリット上によいイベントが見えるのはそれほど多くない。欲を言えば、2次元分光観測の方がよい。

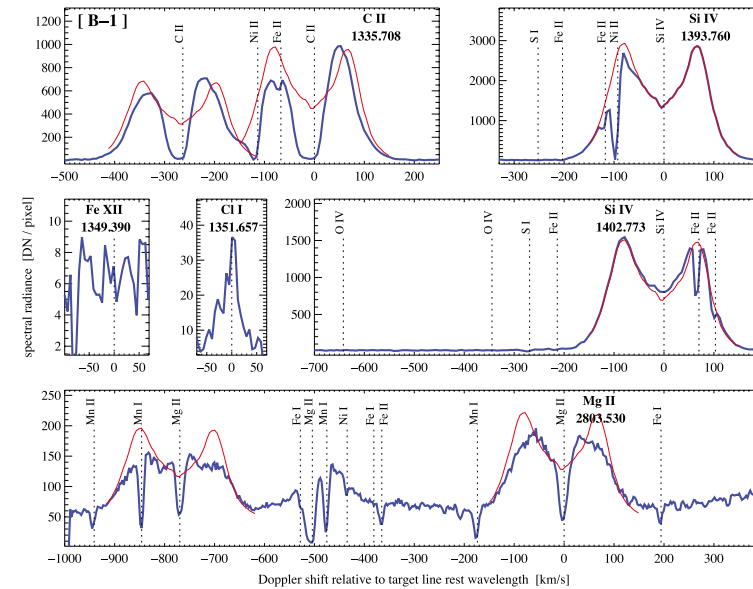
IRISによるEllerman bombの観測

H. Peter et al., Science (2014)

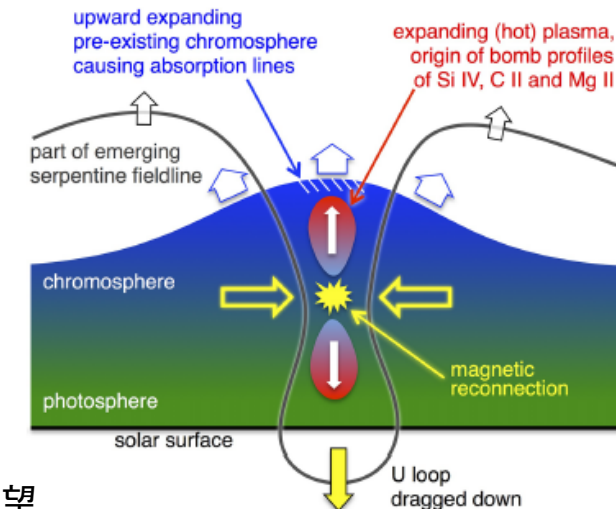
IRIS Si IV spectroheliogram + IRIS SJ + HMI +AIA



Spectra observed with IRIS



- IRISで浮上領域のEllerman bombを観測
 - Si IV, C II, Mg IIでbidirectional flow (self absorptionではない)
 - > reconnection outflow
 - Si IVとO IVの比から、densityの下限值 10^{13} cm^{-3}
 - > 光球でエネルギー解放、 10^5 K まで加熱
 - エネルギー $\sim 10^{29} \text{ erg}$ が数分間で解放



ひので-IRIS共同観測で迫る 高速流の彩層への影響

東京大学大学院

地球惑星科学専攻修士課程1年

加納龍一

INTRO

IRISとひのでの共同観測により、光球磁場と彩層の活動性の関係について更なる理解が進むとされている。

だが現在、IRISの使われた論文15本で、ひので/SPを利用したものは**ひとつもない**。

今回の講演では、自分が行っている

IRISとひので/SPを利用した

黒点ライトブリッジの高速流に関する研究紹介と、

共同観測を利用した研究をして感じた、将来への期待について述べる。

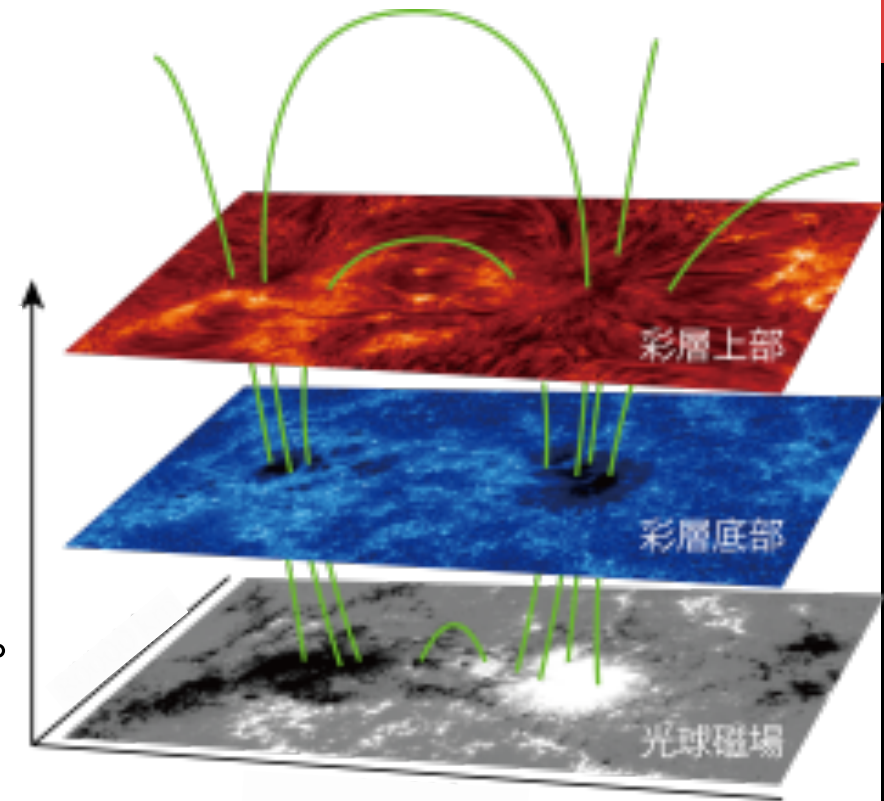


図:国立天文台

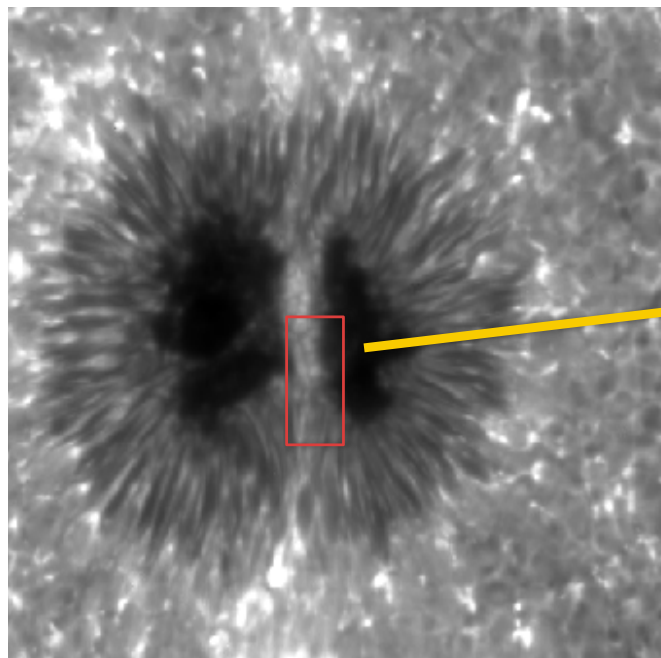
ひので/SPによる光球磁場の観測

連続光での画像

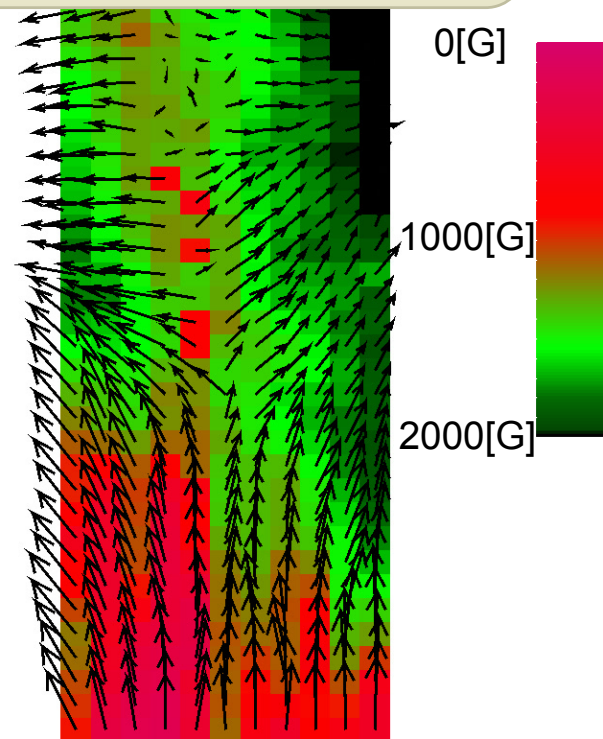
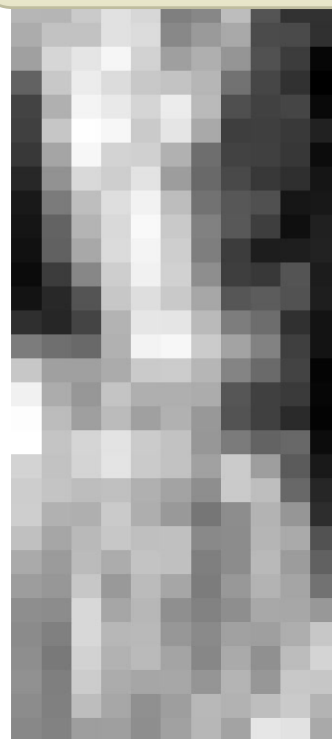
磁場

2013-09-01T16:01:46,

水平磁場が発生している



拡大



ひので、Ca II H

日時：2013年9月1日16:01-18:01

NOAA Active Region 11836

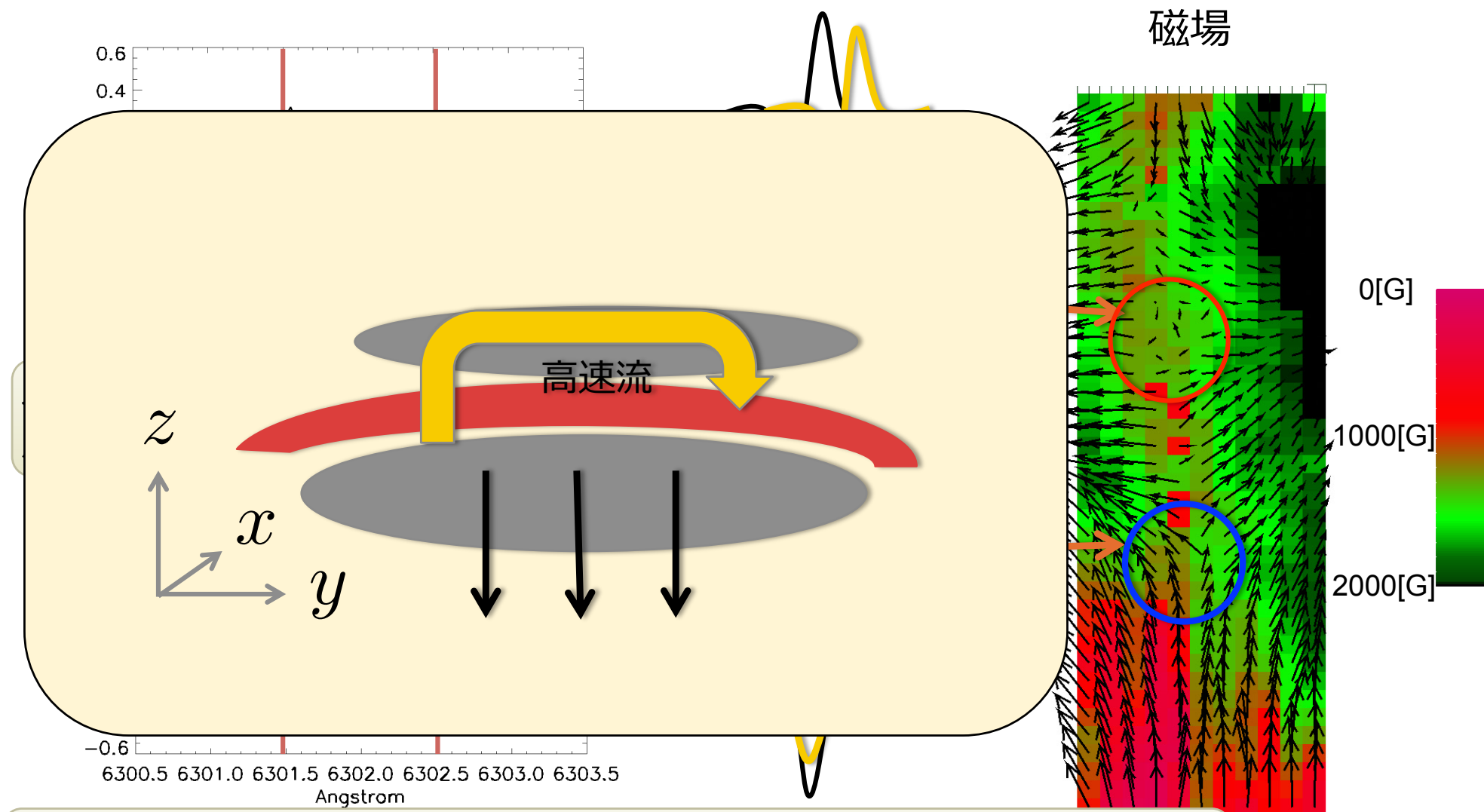
座標：(-112",39")

時間分解能：1分

磁場の導出：Milne Eddington Inversion

矢印：磁場の水平方向の値
色：磁場の垂直方向の値

ひので/SPによる光球速度場の観測



水平磁場のもう片側の先端に、短波長側へドップラーシフトした
周囲と逆極性の上昇流が存在。

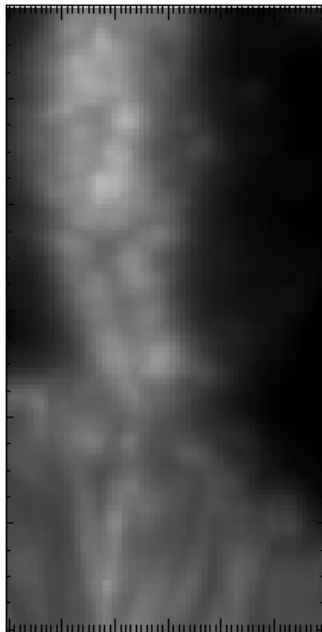
高速流とひので/FG、IRIS/SJIの対応

高速流を、ひので/FGとIRIS/SJIに重ねてプロットした。
高速流に沿って明るい構造が存在。加熱と考えられる。

〔青:上昇流
赤:下降流〕

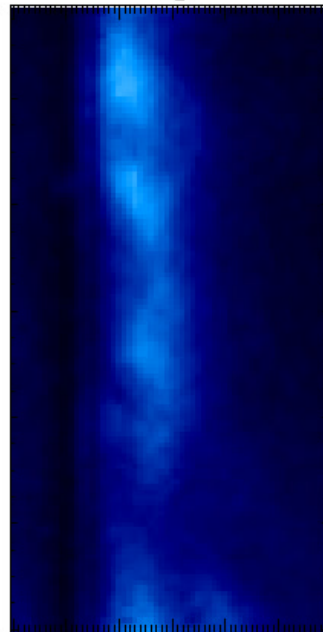
Ca II H

09-01T16:00:32



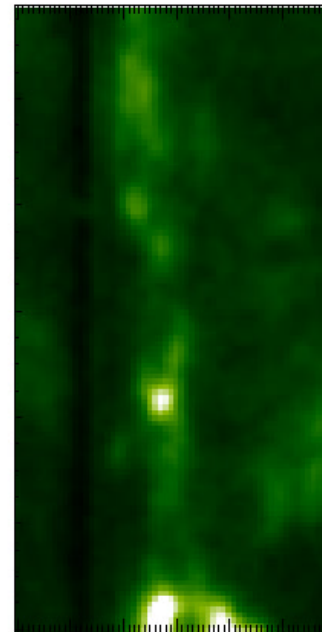
6000K

Mg II k 2796



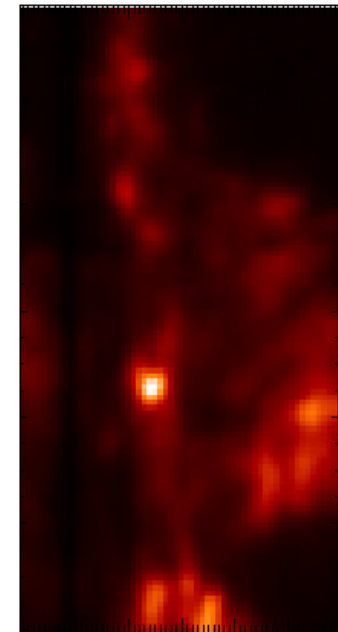
10000K

C II 1336



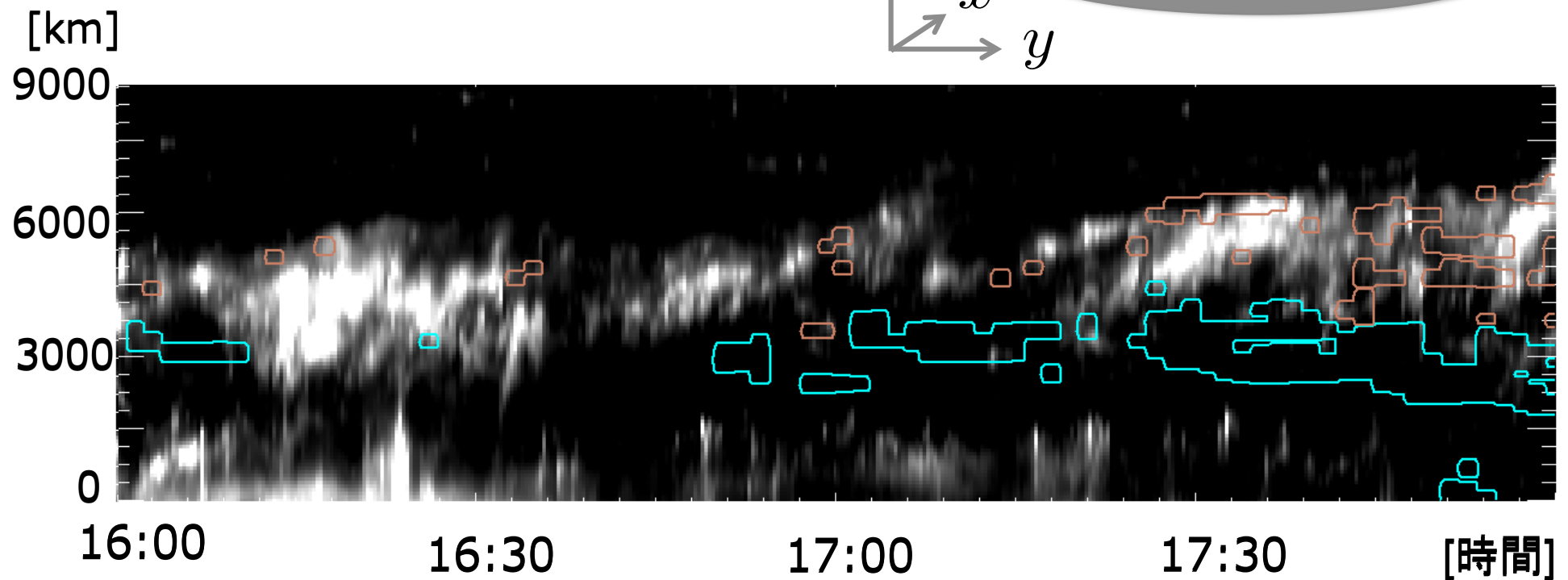
20000K

Si IV 1394



80000K

時間-空間プロット



時間-空間プロットに、上昇流(青)と下降流(赤)の位置を重ねた。

明るい構造の両端に上昇流と下降流が存在しているのがわかる。

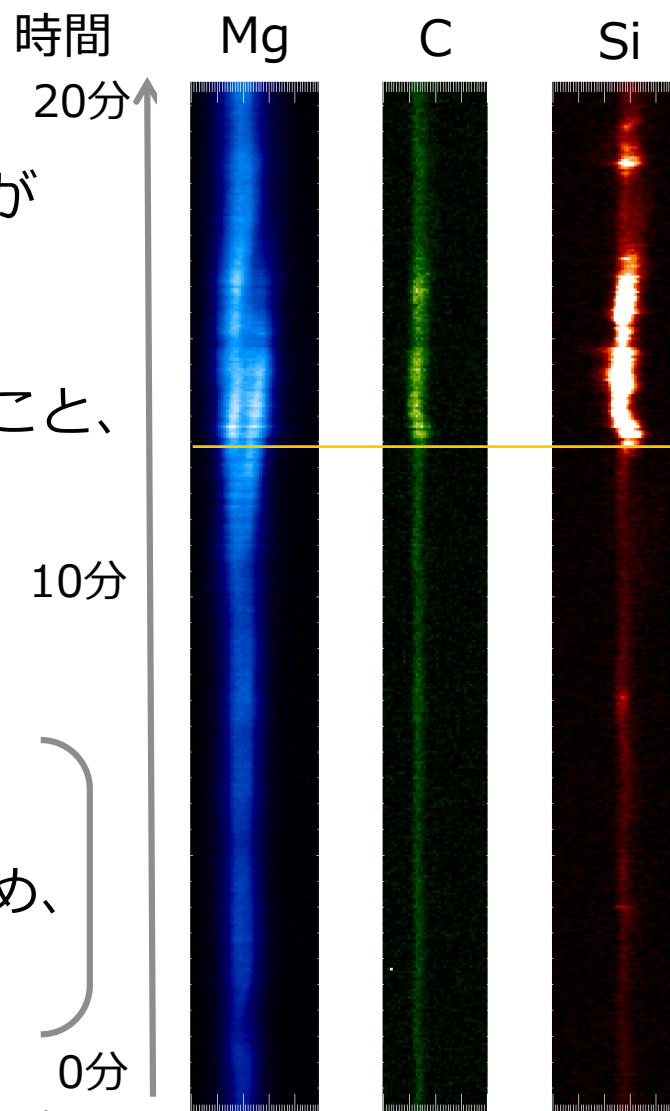
→ひのでの観測で得られた考察の妥当性が得られた。

IRISで得られた、 高速流に伴うスペクトルの特徴

ひので/SPで得られた下降流とIRISのスリットが
幸い重なっていた。

光球面における高速流に伴い彩層が明るく輝くこと、
Mgのラインにk3の山が現れて彩層が
Non-LTEになっていることなどが示唆される。

Mgのラインは形成が複雑で、
さらに黒点振動の影響も考慮する必要があるため、
ラインの考察には注意が必要。



まとめ

ひので-IRISの共同観測で、以下の二点を新たに知ることができた。

- ・ ライトブリッジに発生する高速流は、水平磁場に沿って駆動されている
- ・ 光球で高速流が発生すると彩層は加熱され、さらにNon-LTEになる

今までできなかつたいろんなことができると、素直に感じた。

将来への期待

- ・ テレメトリの制限による観測時間の制限
- ・ 分光観測の視野の狭さ

これら2点が研究をする際に壁を作っていると感じた。

ひので/SPの高時間分解能の観測とIRISとの共同観測例はごくわずか。

Solar-Cでは、これら二つともが解決されることを期待する。

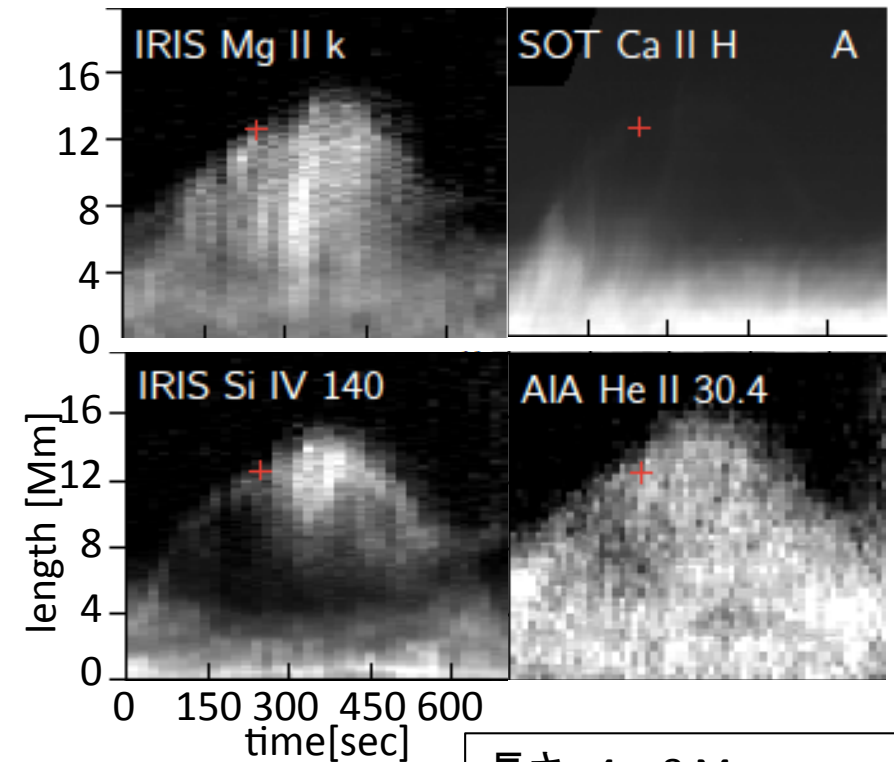
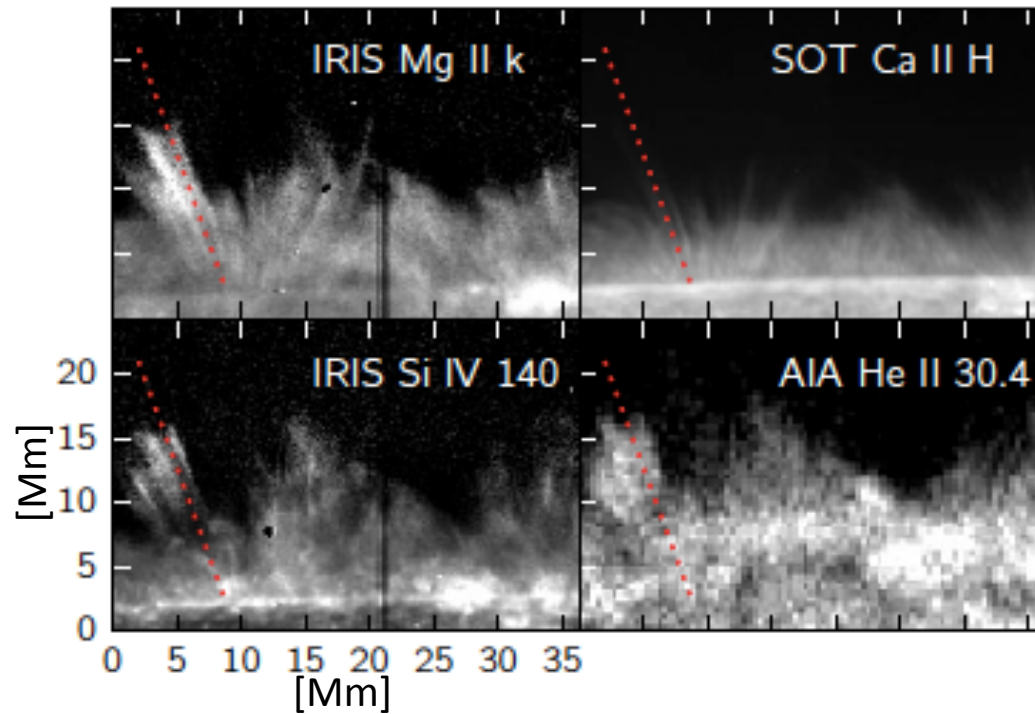
IRISで進行中の研究と問題点

- スピキュール with SOT -

馬場

IRISで見たspiculeの論文①

[Pereira et al., 2014, ApJ 792, L15]

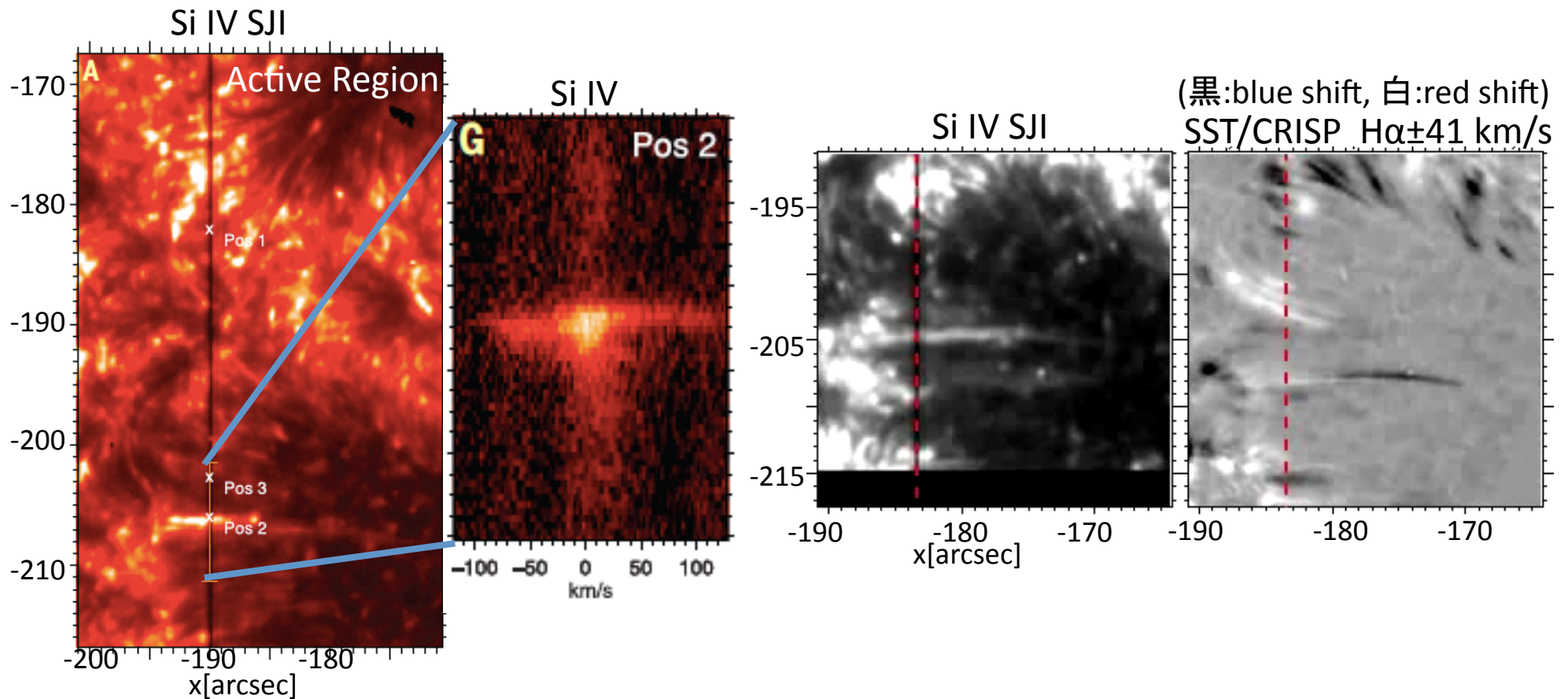


長さ: 4~8 Mm
寿命: 500~800 sec
上昇速度: >50 km

- IRISとひので/SOT、SDO/AIAでスピキュールを比較。
- Ca II Hで見られるスピキュールが、IRIS(Mg II kやSi IV)では更に上まで伸び、その後下降している様子が見られる。

IRISで見たspiculeの論文②

[De Pontieu et al., 2014, Science 346]



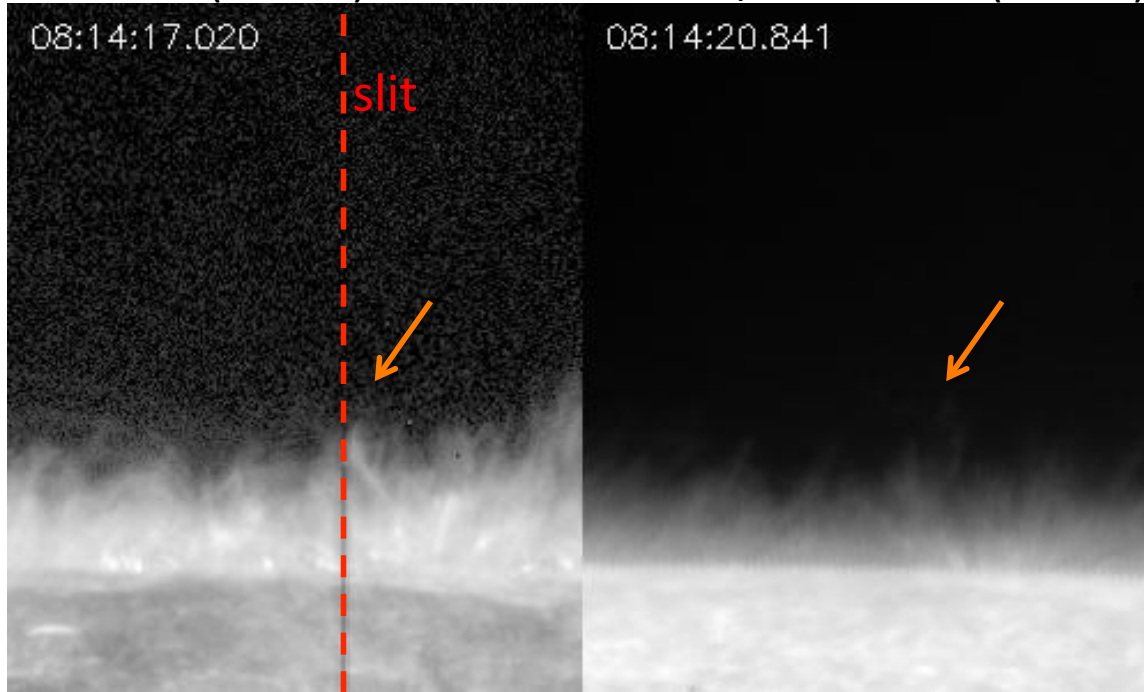
- AR、QS、CHの領域で、細く伸びた構造について見た。
⇒どの領域でもtwistしている。
⇒彩層下部～遷移層で見られる。

IRIS Si IV (1400A)

08:14:17.020

ひので/SOT Ca II H (3968A)

08:14:20.841



- slitに沿って伸びるスピキュールについて詳しく解析
- ひので/SOTのCa II Hと比較
 - Si IVで見えない根元の部分がCa II Hだと見える。
 - Ca II Hでスピキュールが伸びきった後も、Si IVでは更に上に伸び、その後下降している様子が見られる。

活動領域 (AR12144)

2014/8/21 07:44-10:25UT

FOV : 120" × 128"

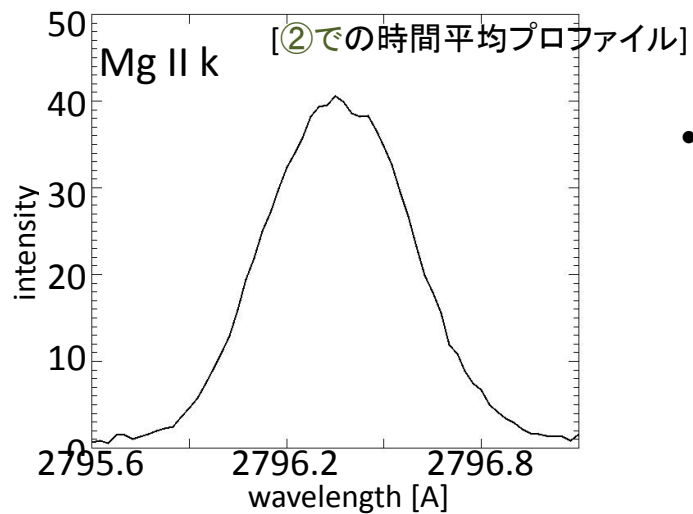
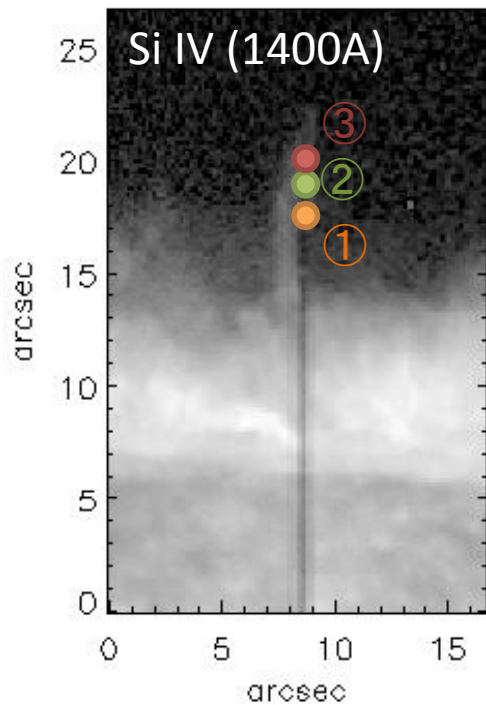
空間分解能: 0.1663"/pixel

FOV center : x=950",y= -288"

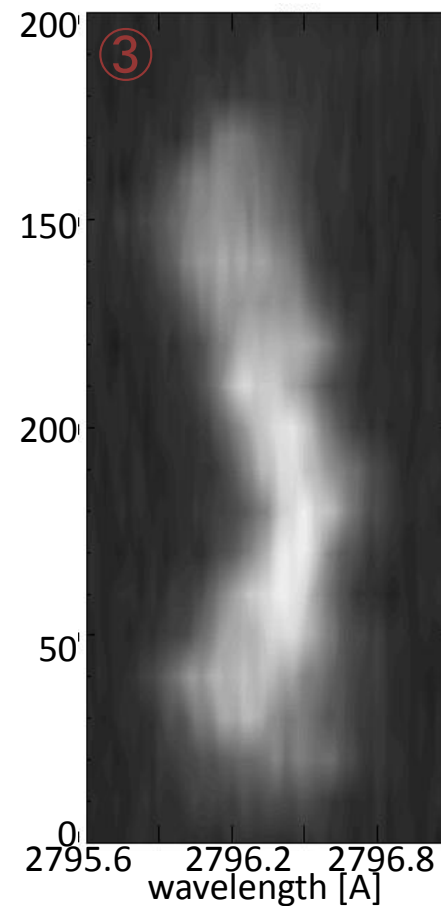
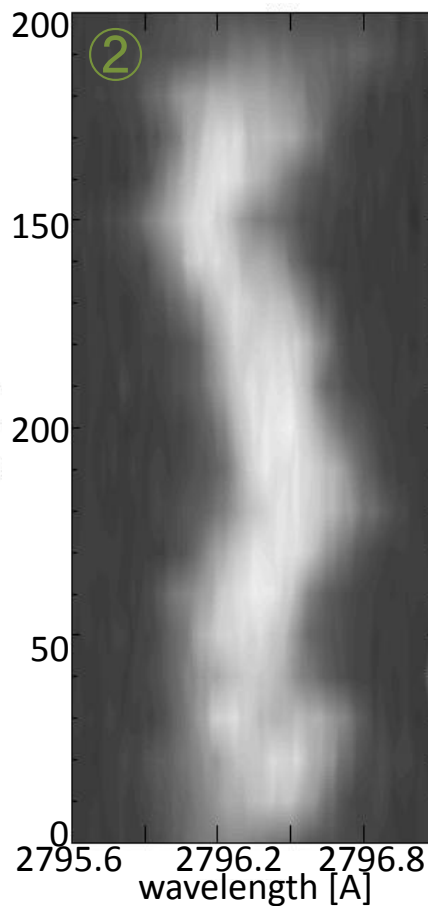
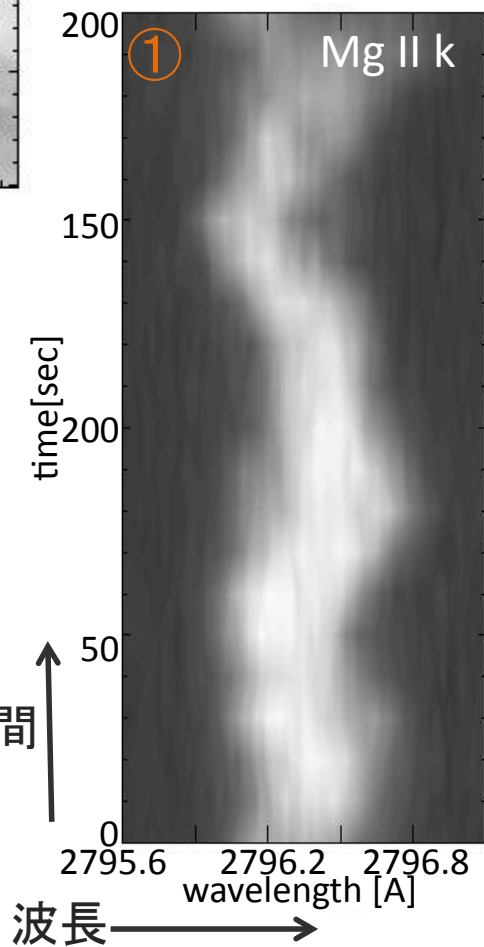
cadence : 20 s (SJI) , 10 s (raster)

sit-and-stare

2014-08-21T08:18:47



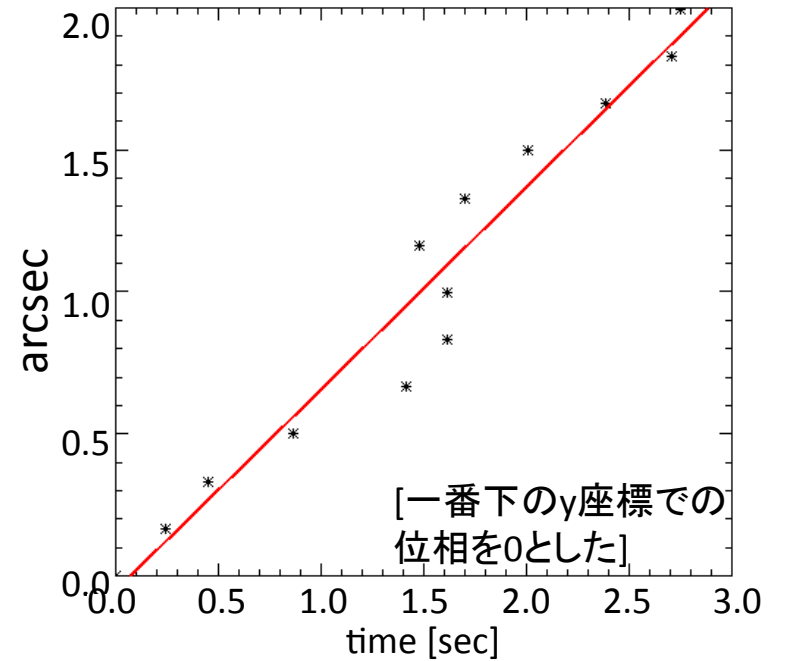
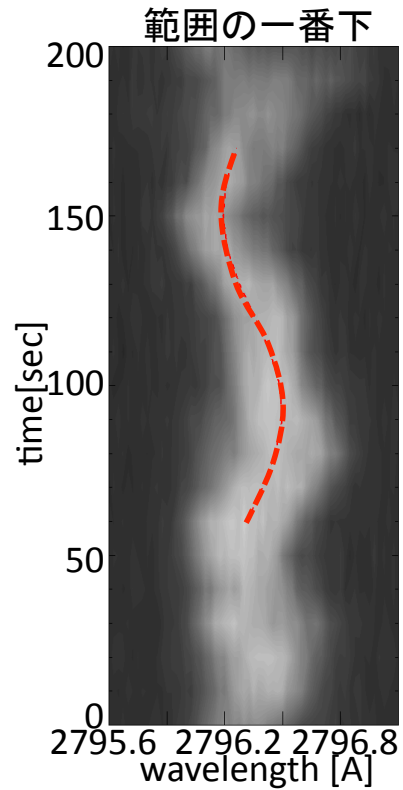
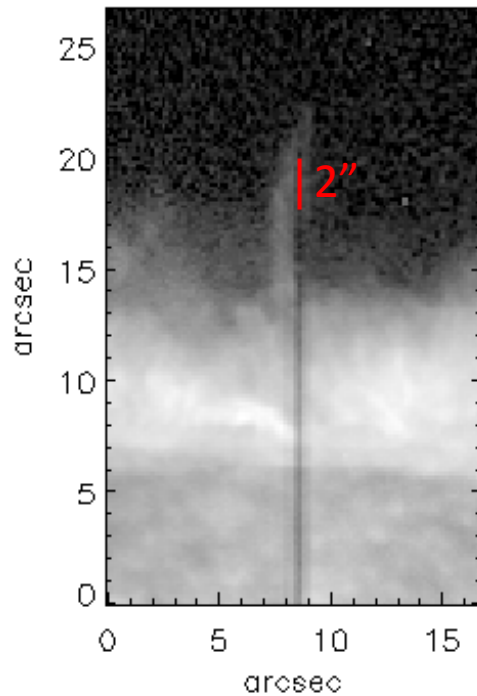
- スピキュールに沿って、Mg II kのプロファイルの時間変化を見ると、波と思われる変動が見られた。



cadence : 10 s

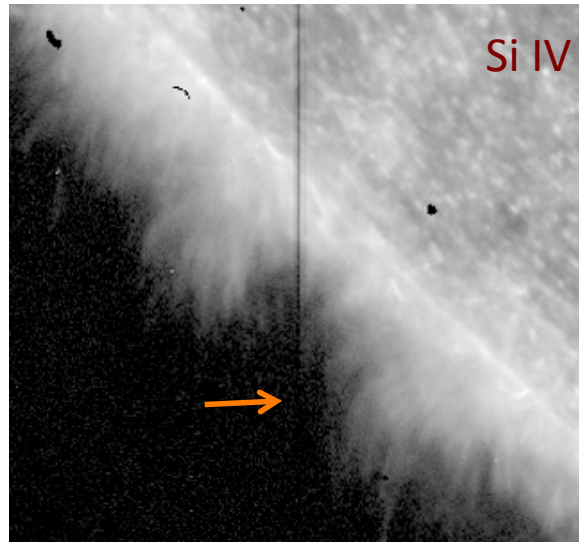
波長分解能: 0.025 A/pixel

2014-08-21T08:18:47



- 各高さでline centerの時間変化に対してsin波でfittingを行った。
⇒周期は 113~125 秒、速度振幅は16.1~17.5 km/s
- 周期が120秒の波が下から上まで伝わっていると想定
⇒ 位相速度は500 km/s
⇒ スピキュールに沿って進行波が伝わっている。
- この波は彩層加熱に必要なエネルギーを運んでいる。

まとめ

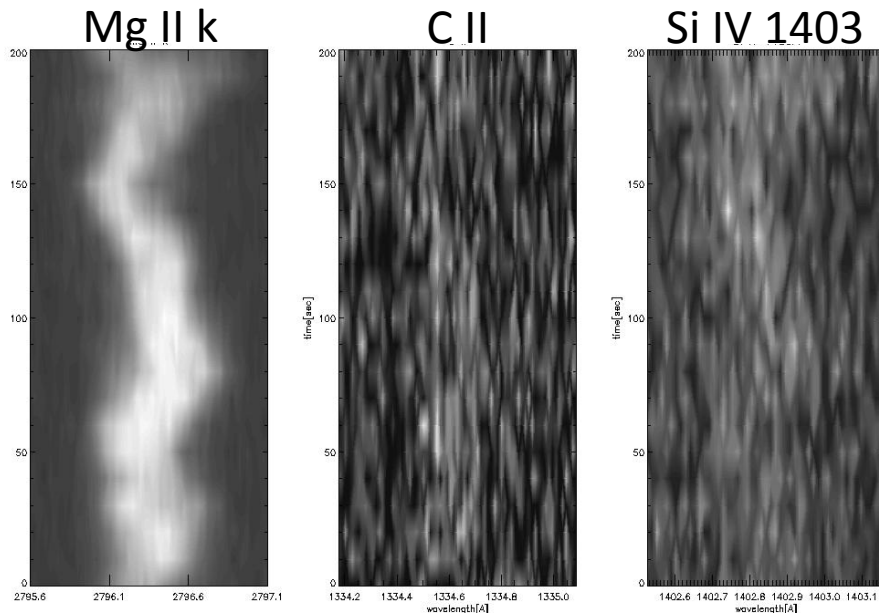


IRISの解析で見た事

- Ca II Hより更に上にスピキュールが伸びている。
- 彩層上部～遷移層でもtwistしている。
- スピキュール中でのAlfven波の伝播。

IRISによるspicule解析の問題点？

- 異なる高さでのスピキュールの分光データが見るのが難しい。
 - slitに沿って真っすぐスピキュールが伸びていない。リムに対して曲がって伸びていることが多い。
 - sit-and-stareで使えるデータは非常に少ない。2 or 4 step rasterでやるべき？
- Mg II 以外のラインはS/Nが悪い。

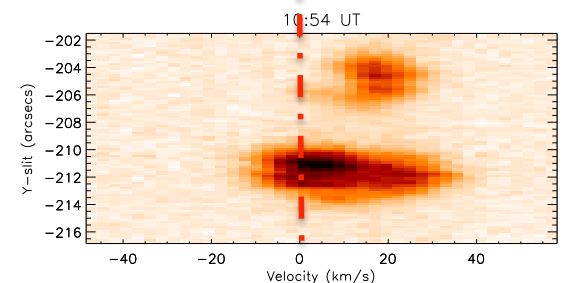
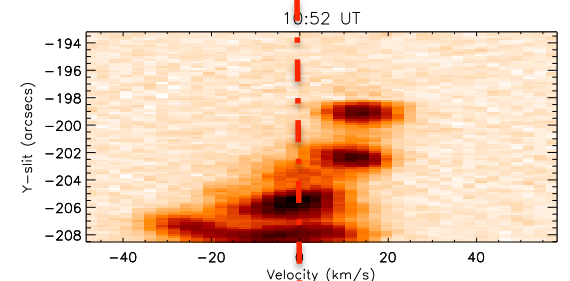
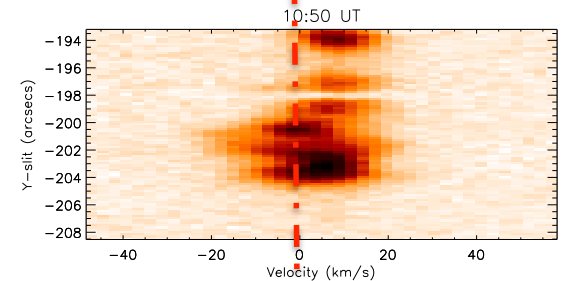
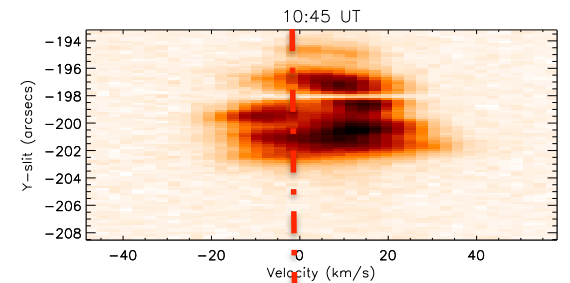
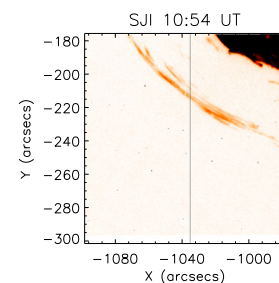
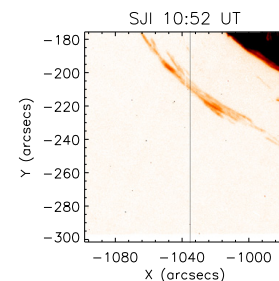
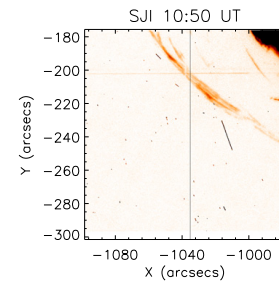
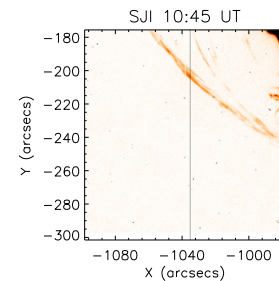
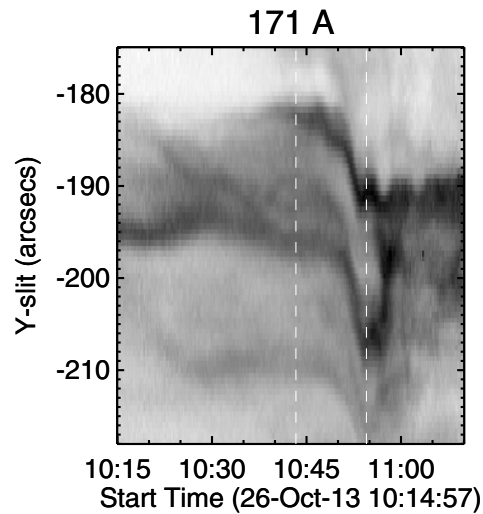
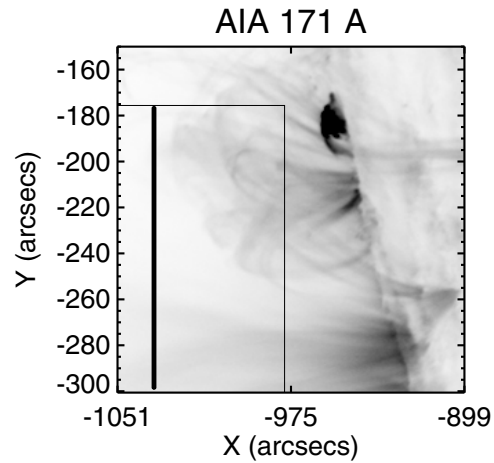
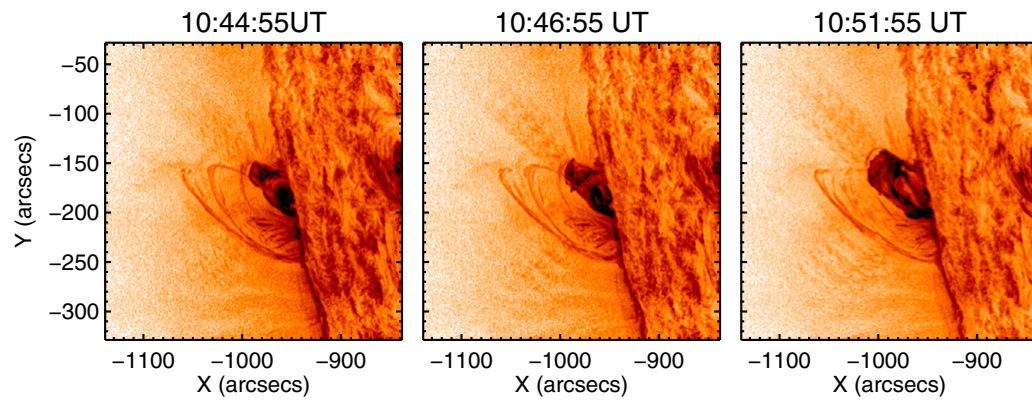




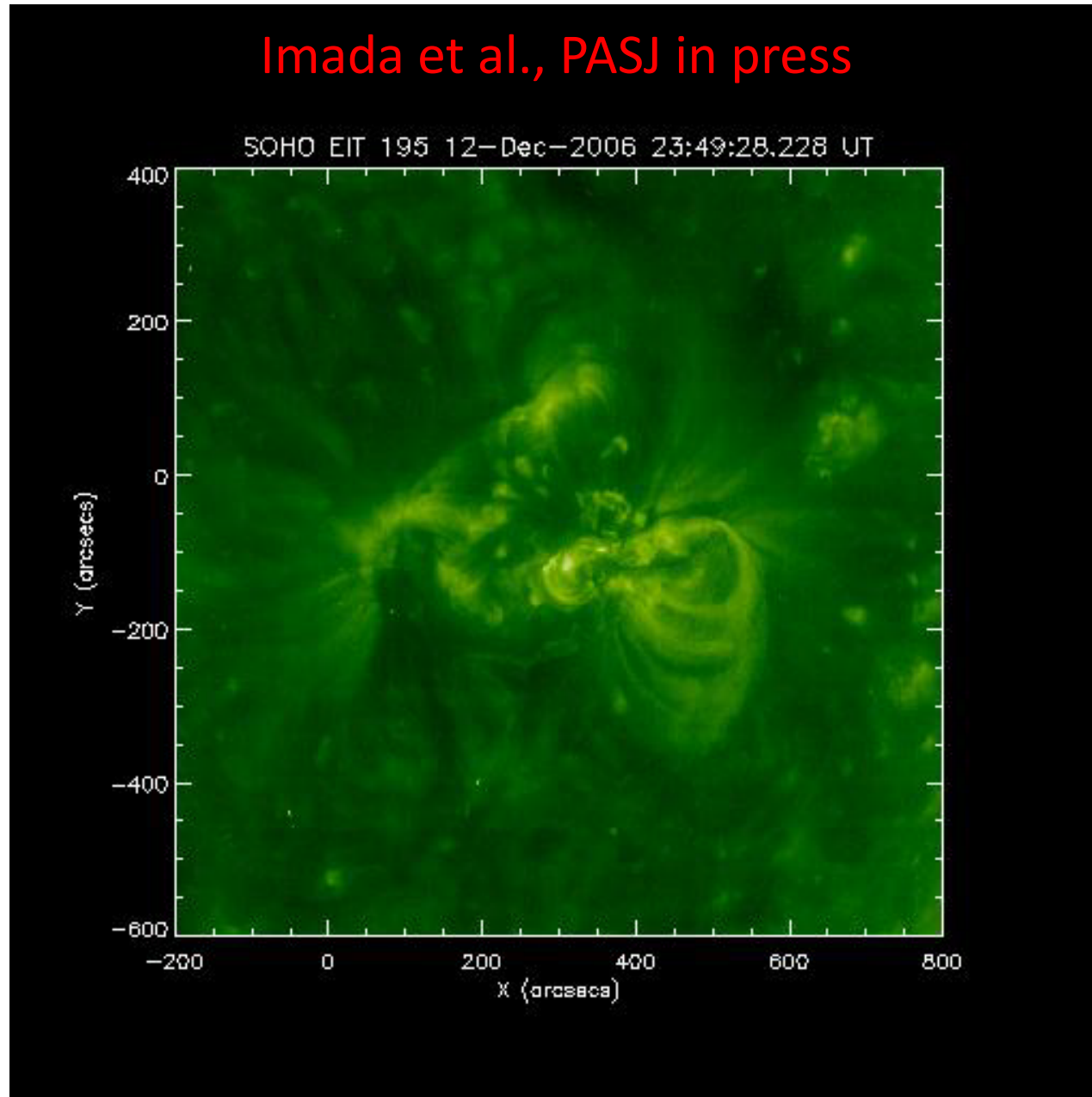
彩層分光衛星IRISをふまえた将来 展望(Hinode EISとの共同観測)

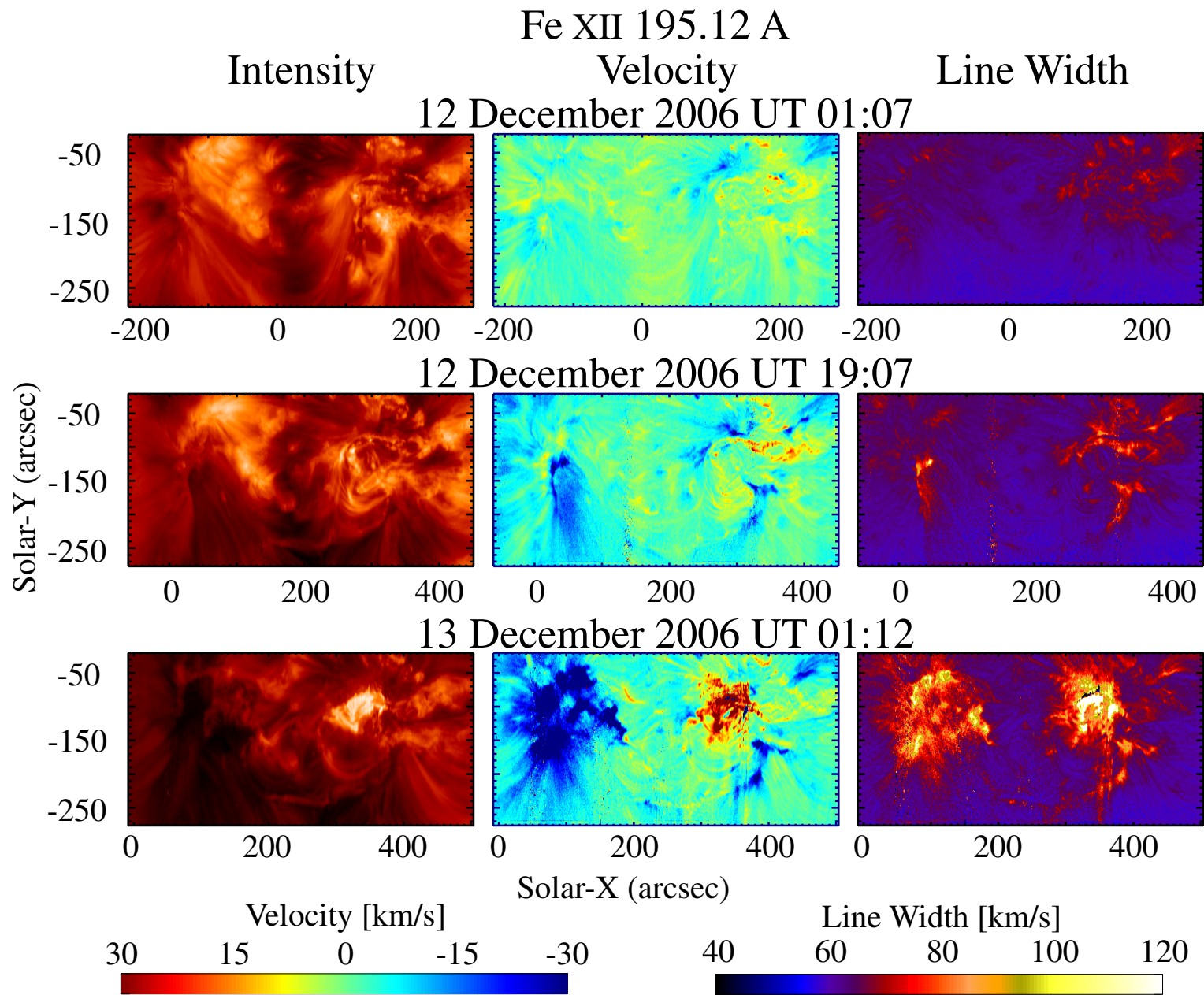
Shinsuke Imada

Filament eruption Harra et al. 2014



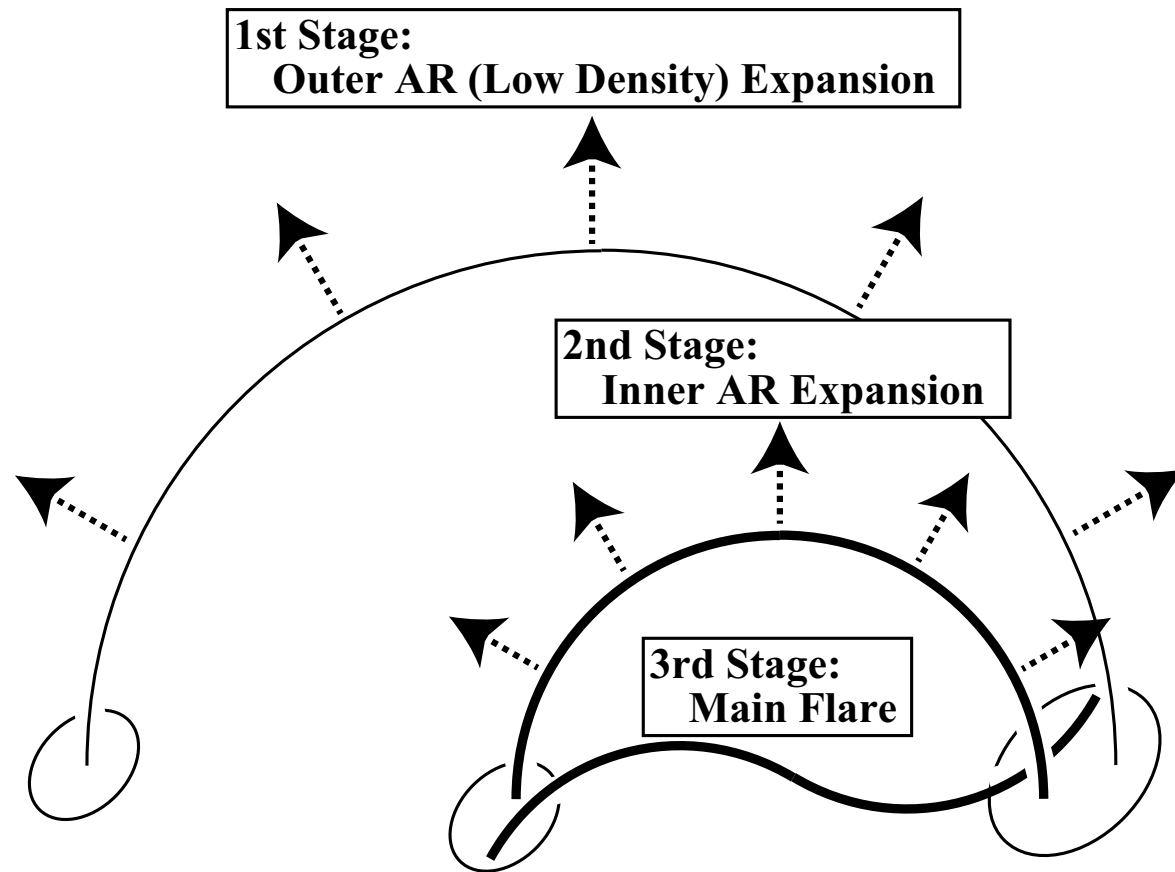
EIT Movie: Expanding Loops





EIS observation before the large flare (2006 Dec 13). Flare occurred 02:13 UT. The left/middle/right panel shows the FeXII intensity/velocity/line width, respectively. Blueshift component was observed 5 hours before the flare onset.

Imada et al. 2014 PASJ



First stage

(a day before) :

low dense outer shell expands

Origin of non-thermal vel.

Spectroscopic obs only

Second stage

(a few hours before):

high dense core region expands

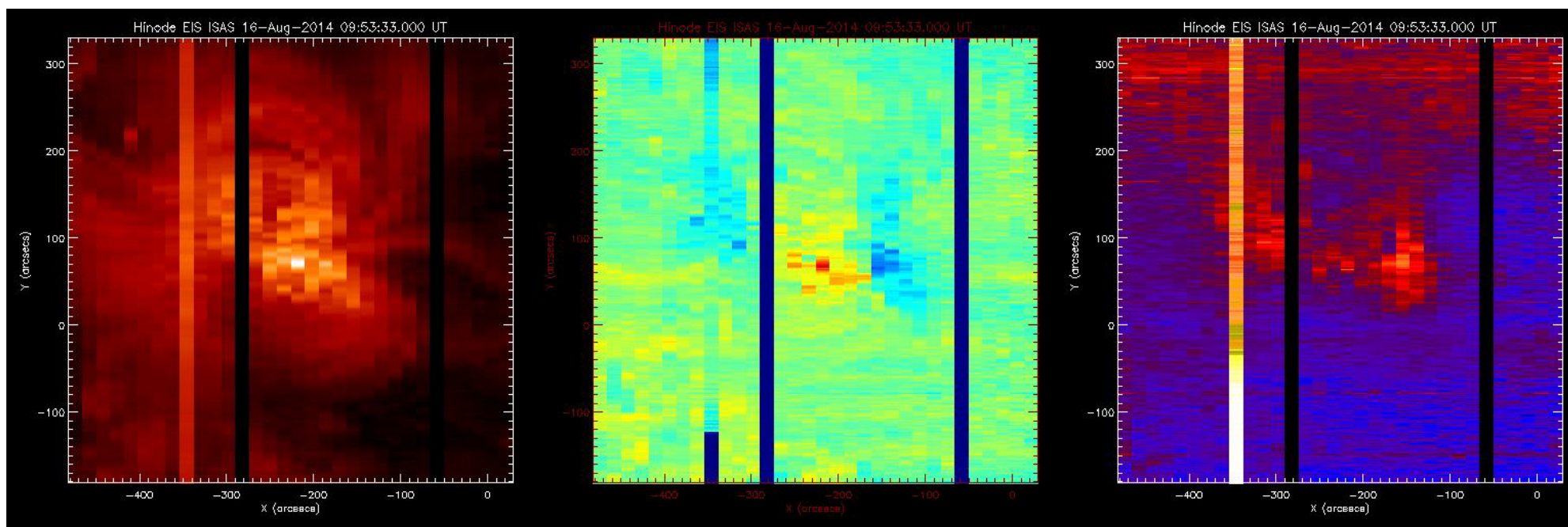
Imaging obs also

Flare occur!

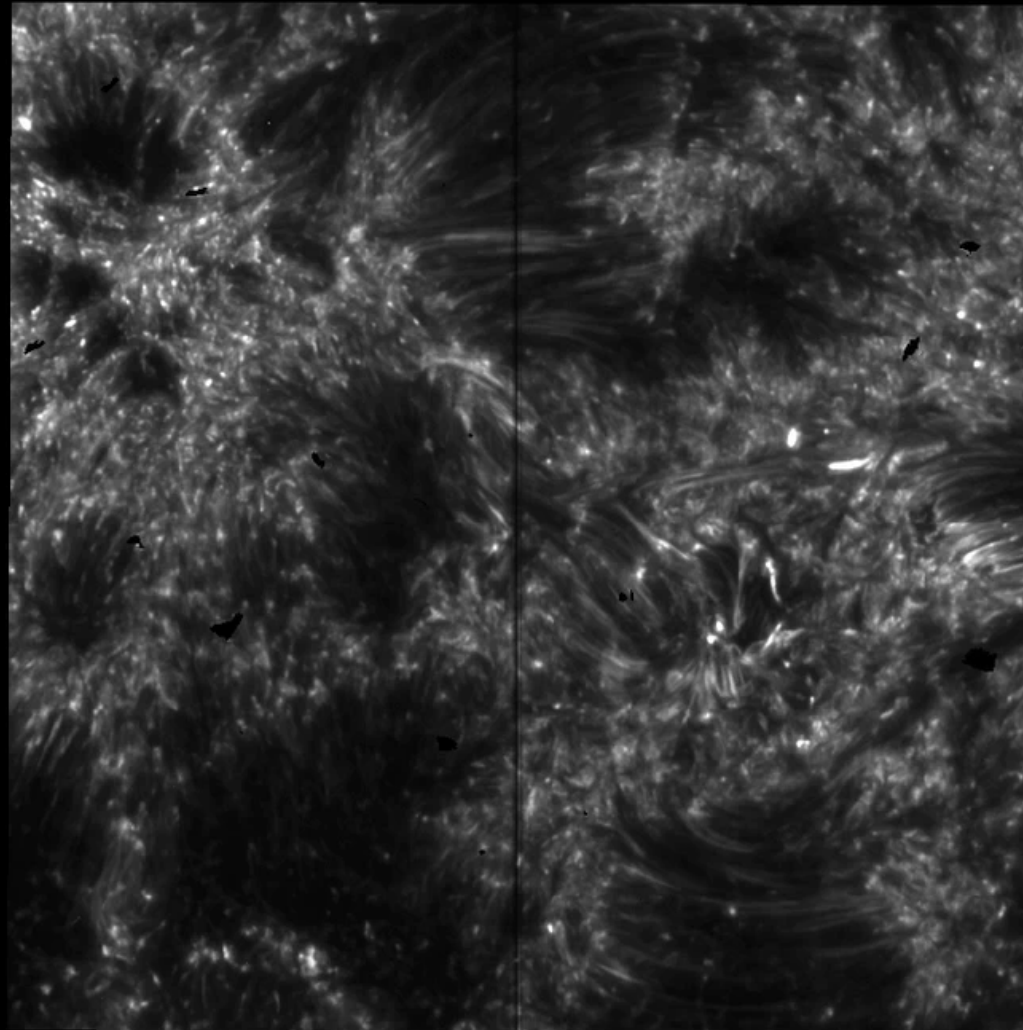
13 Dec 2006 event is opposite polarity event.

Hinode/EIS observation

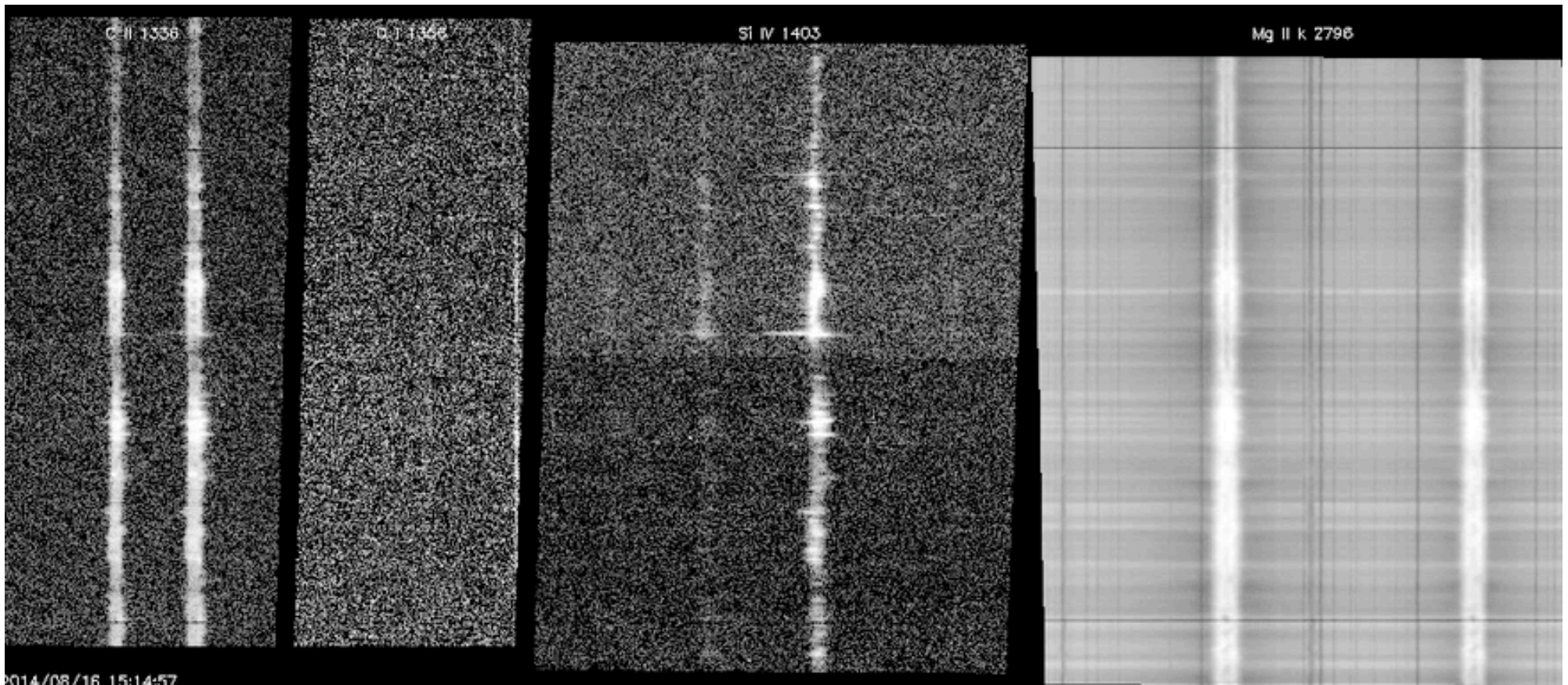
2014年08月16日～19日の3日間
大きい視野で連続観測した
～10分ケーデンス



IRIS (iris) and stare SiV



前兆現象：スペクトル



まとめ

- 彩層、遷移層で起こる現象とコロナの爆発現象の因果関係をしりたい
- 活動領域の時間発展に彩層、遷移層で起こる現象がどの位貢献してるのだろうか？

Small-scale structure & dynamics in the corona

—

Insights from coronal rain observations with Hinode & IRIS

Patrick Antolin

国立天文台

Importance of small-scale structure?

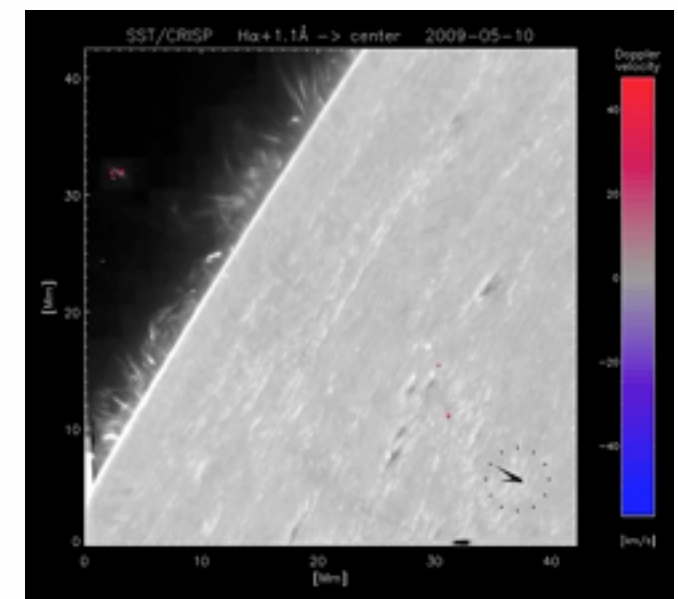
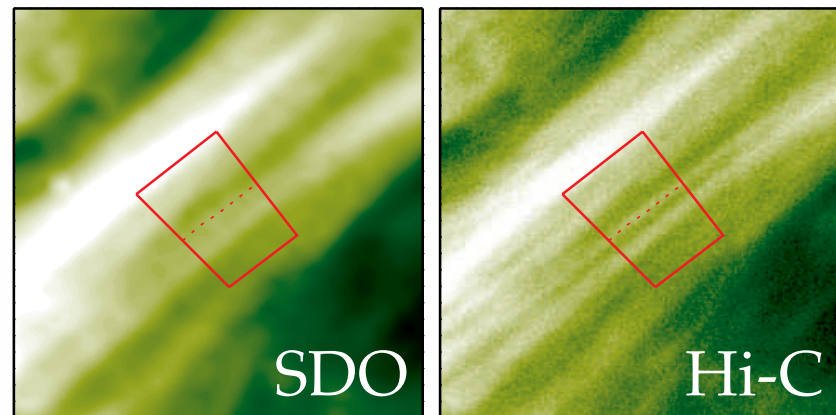
- High Reynolds numbers in corona -> need for fine structure for effective dissipation of waves, magnetic fields (currents) and turbulence

How is the magnetic field organised in the solar corona?

- Coronal loops evolve on timescales much longer than a radiative cooling time (Reale & Peres 2000; Warren et al. 2003, Brooks et al. 2012)
- ➔ ensemble of unresolved independently heated strands? (Klimchuk 2006, Reale 2010, Brooks et al. 2013, Peter et al. 2013, Cirtain et al. 2013, Winebarger et al. 2013)
- Strands \longleftrightarrow current sheets, nanoflares? (Parker 1988, Vekstein 2009)
- Clear tendency for finer widths at higher spatial resolution



~ 1000 Mm $\xrightarrow{\text{widths}}$ ~ 100 km

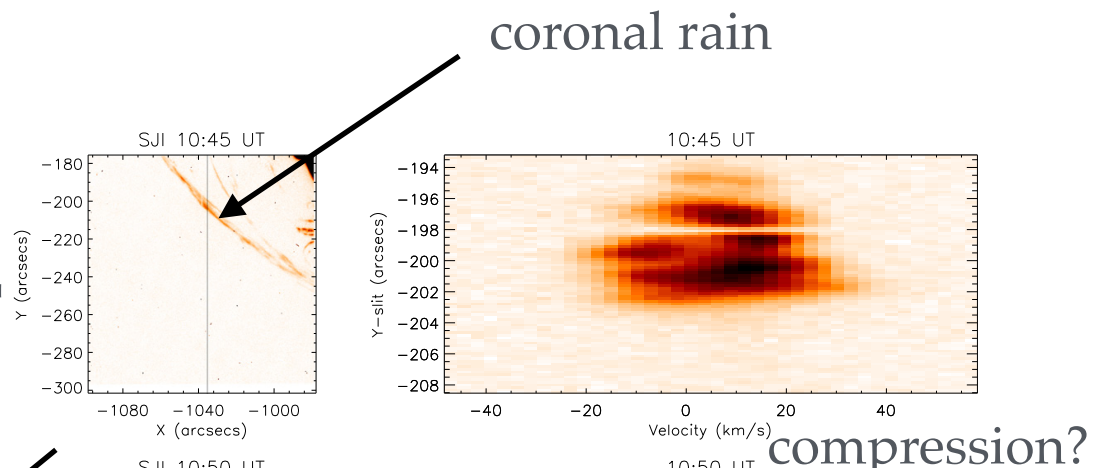


(Aschwanden & Nightingale 2005, Reale 2010, Peter et al. 2010, Brooks et al. 2012, 2013)

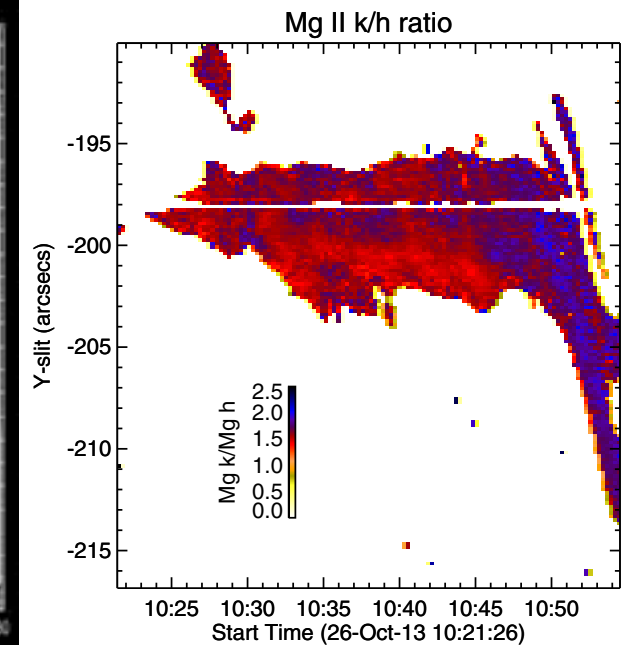
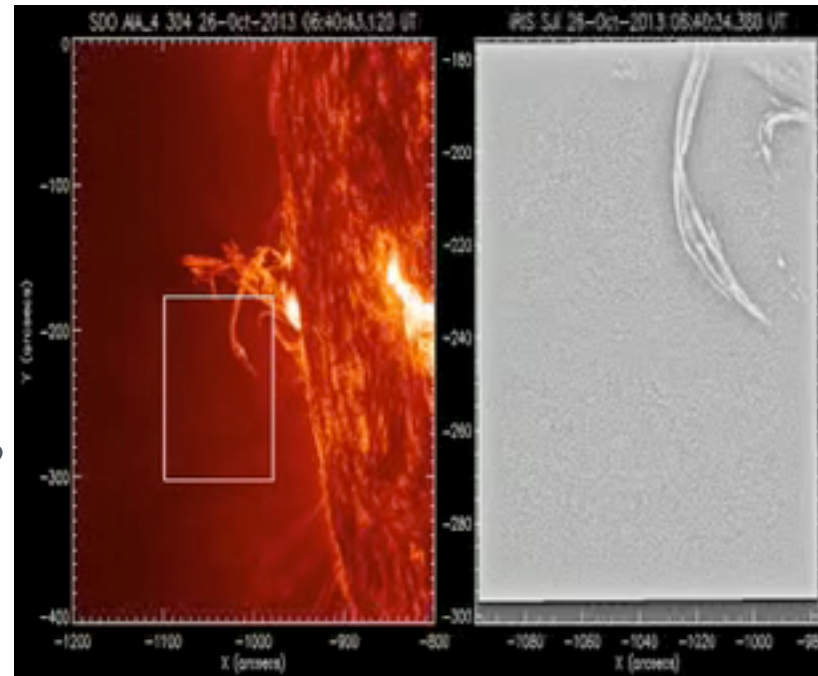
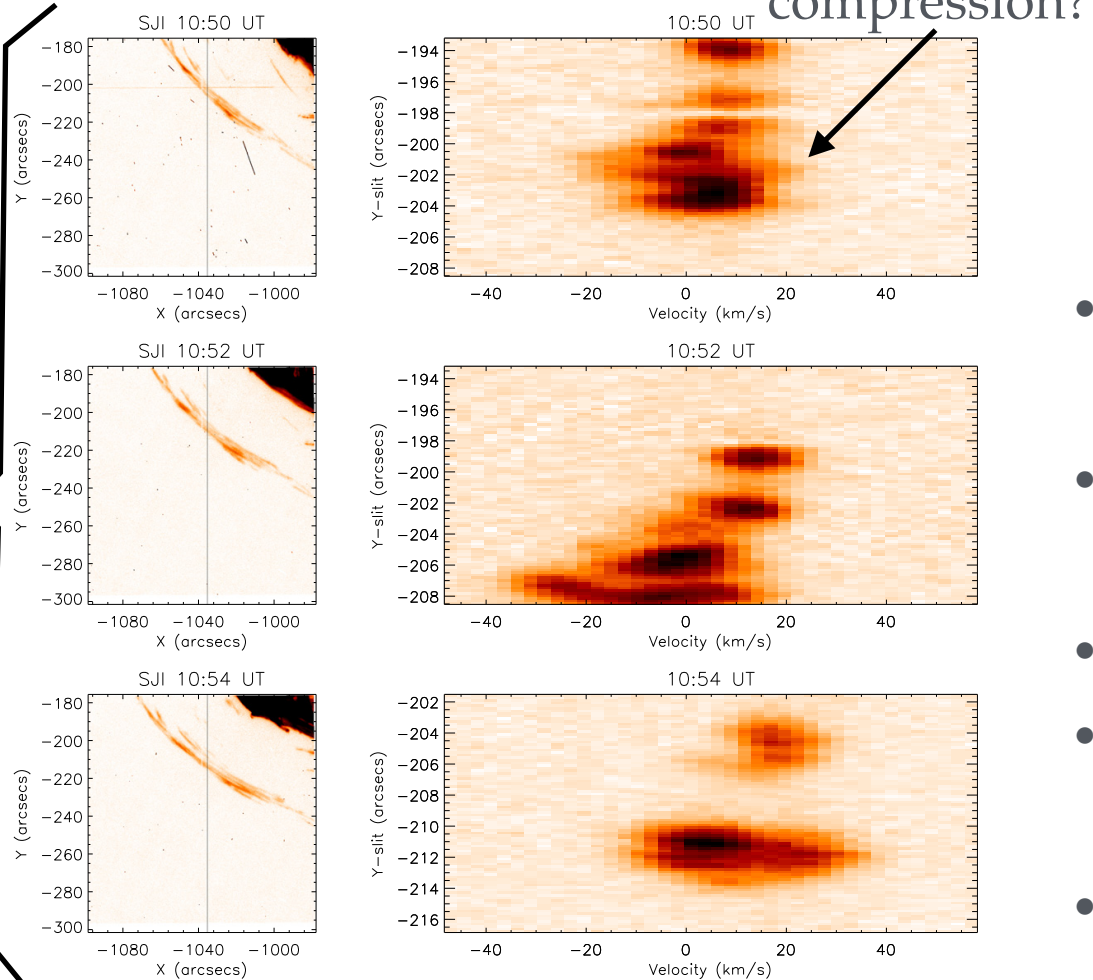
(Lin et al. 2005, Antolin & Rouppe van der Voort 2012)

Tracer of coronal turbulence

before impact of eruption

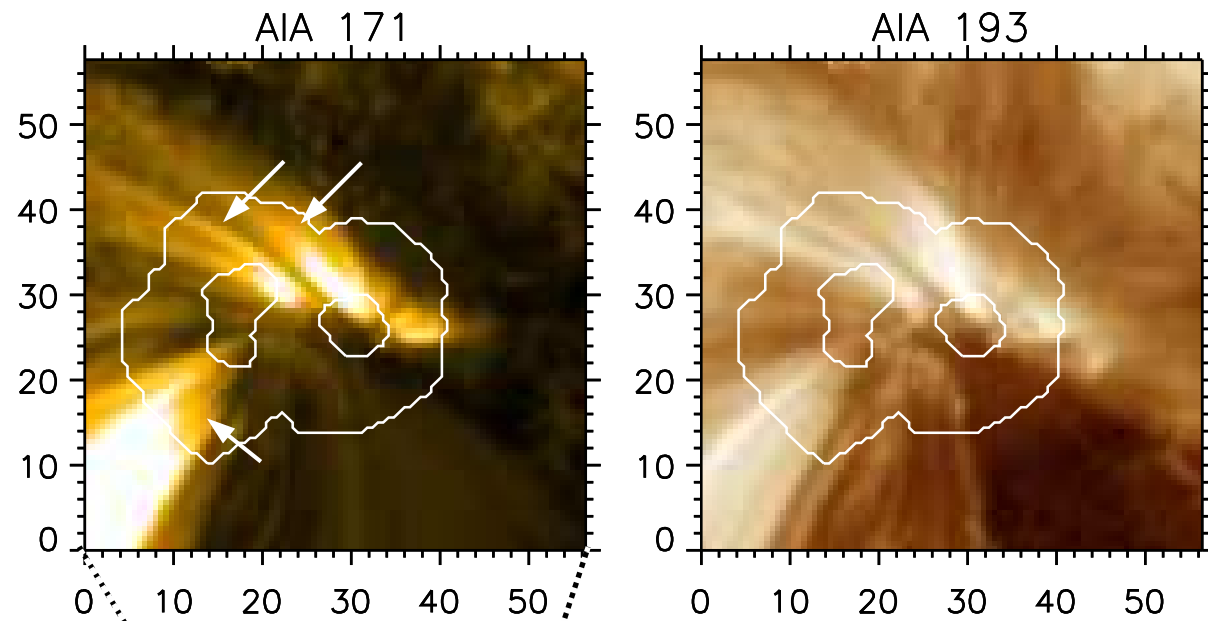


during impact

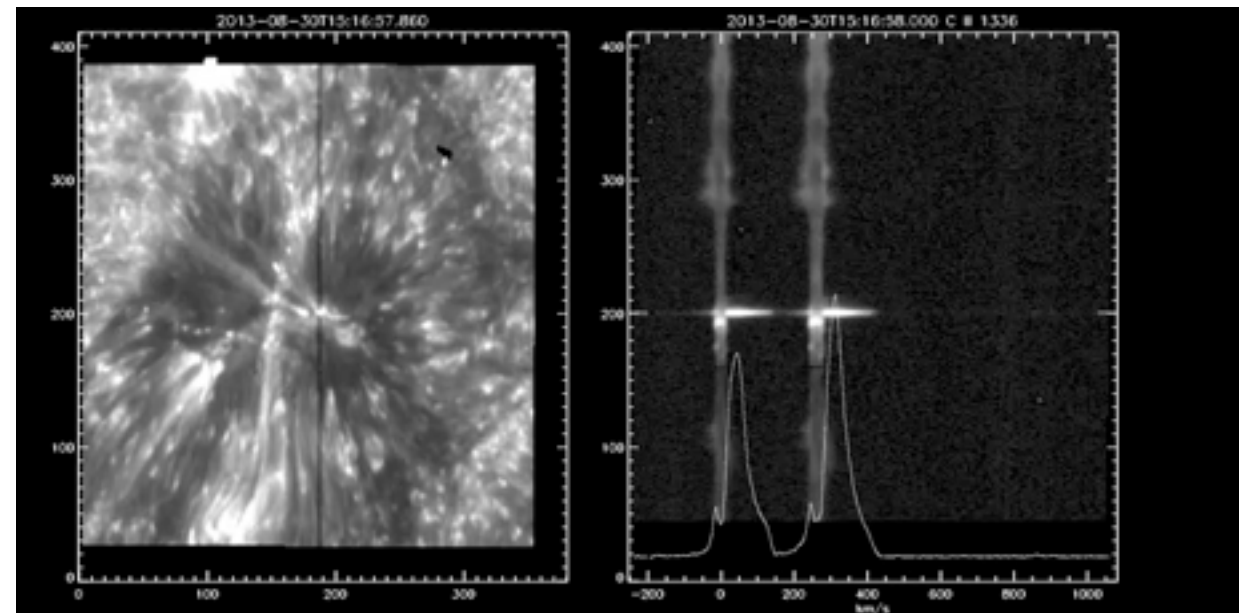


- Complex spectral evolution, mostly due to dynamics
- During impact of eruption: complexity momentarily reduced (compression?).
- h/k ratio increases 1.5->2.
- Significant plasma reorganisation occurs within loops during eruption
- Rain can serve as a probe for turbulence

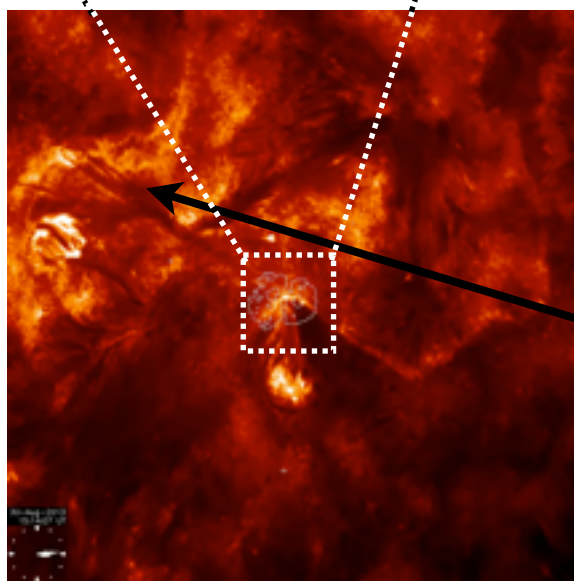
Supersonic heating events



IRIS SJI + SG



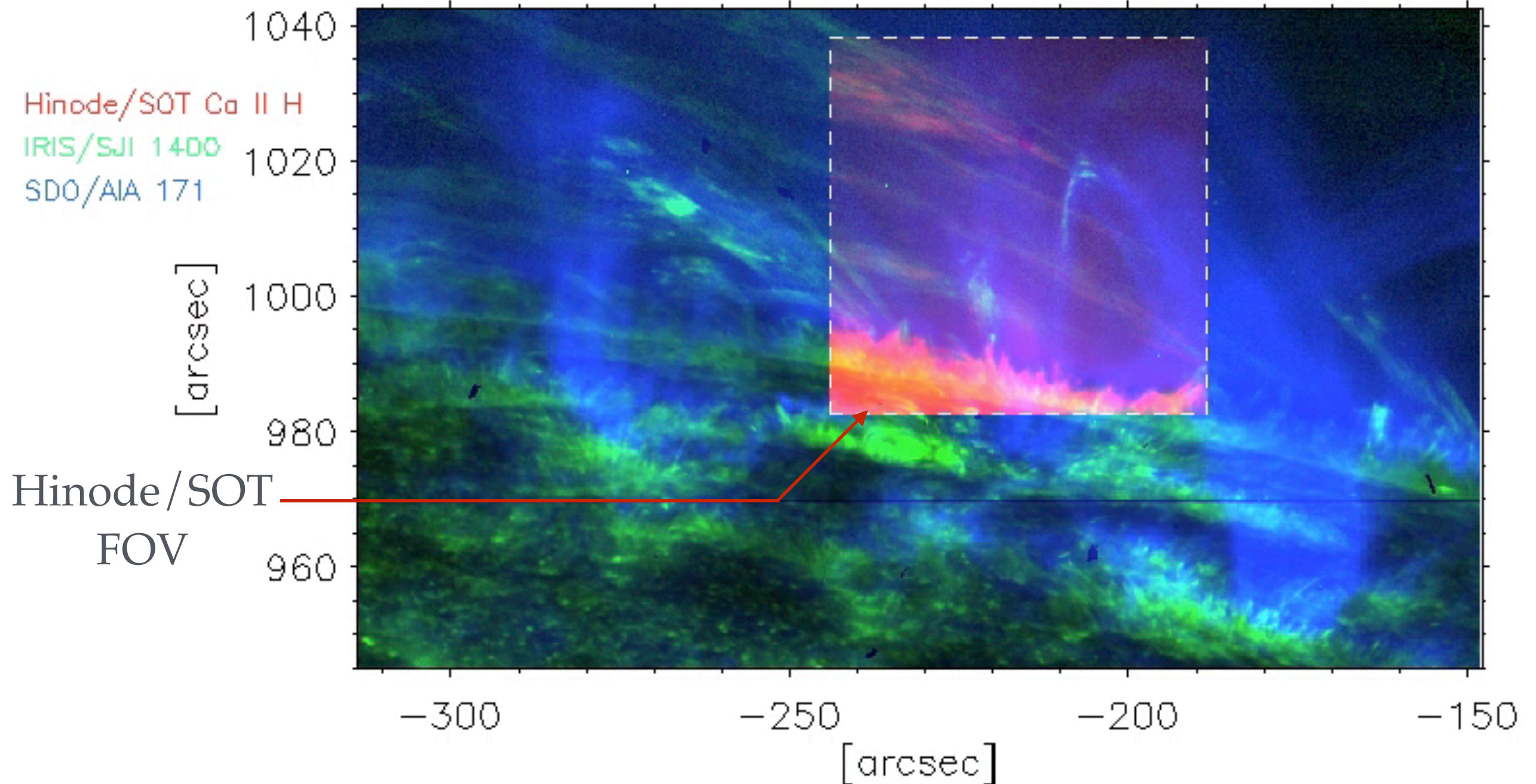
AIA 304



- High red shifts (up to 200 km/s) observed in (E)UV bright points accompanied by 50-100 km/s upflows
- Strongly supersonic: $c_s = \sqrt{\gamma RT} \approx 50$ km/s
- Bright dots are footpoints of thermally unstable coronal loops: downflows in 304 correlated to Doppler shifts
- May appear anywhere in sunspot (within umbra or penumbra) & last for more than 2 hours

Hinode-IRIS co-observing campaign

2013-11-29 23:17:24 UT

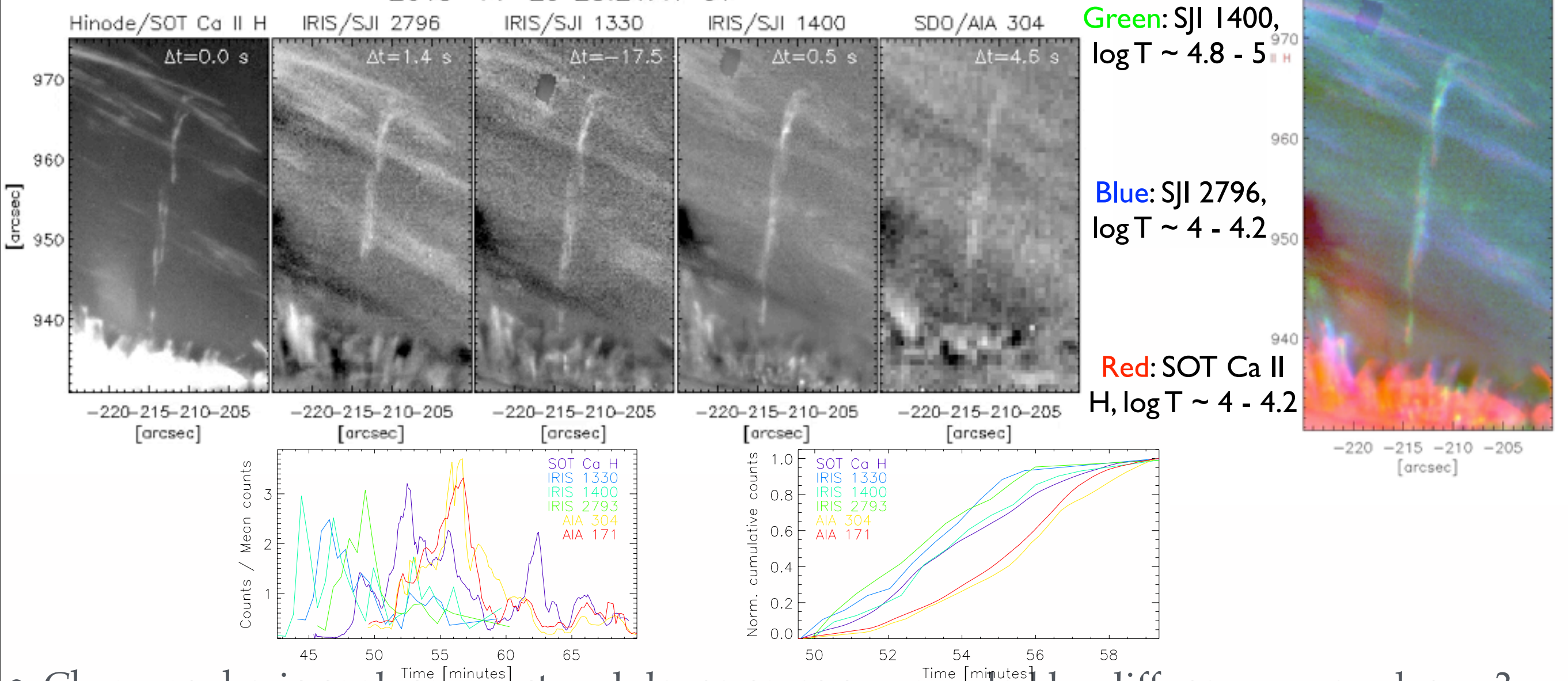


Antolin+ (2014a, in prep.)

Multi-temperature structure

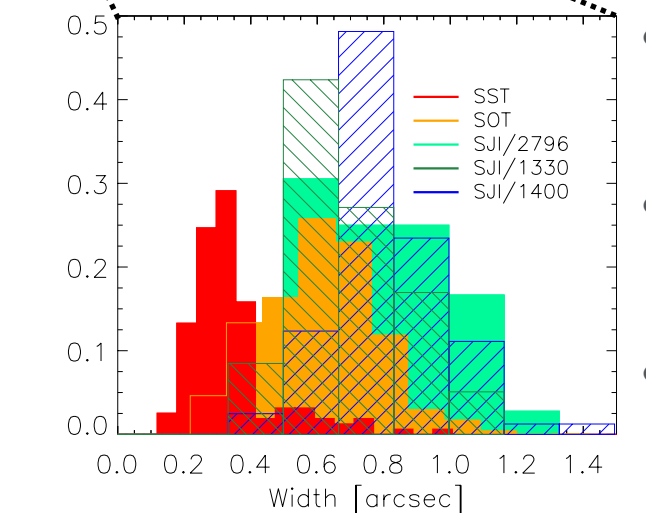
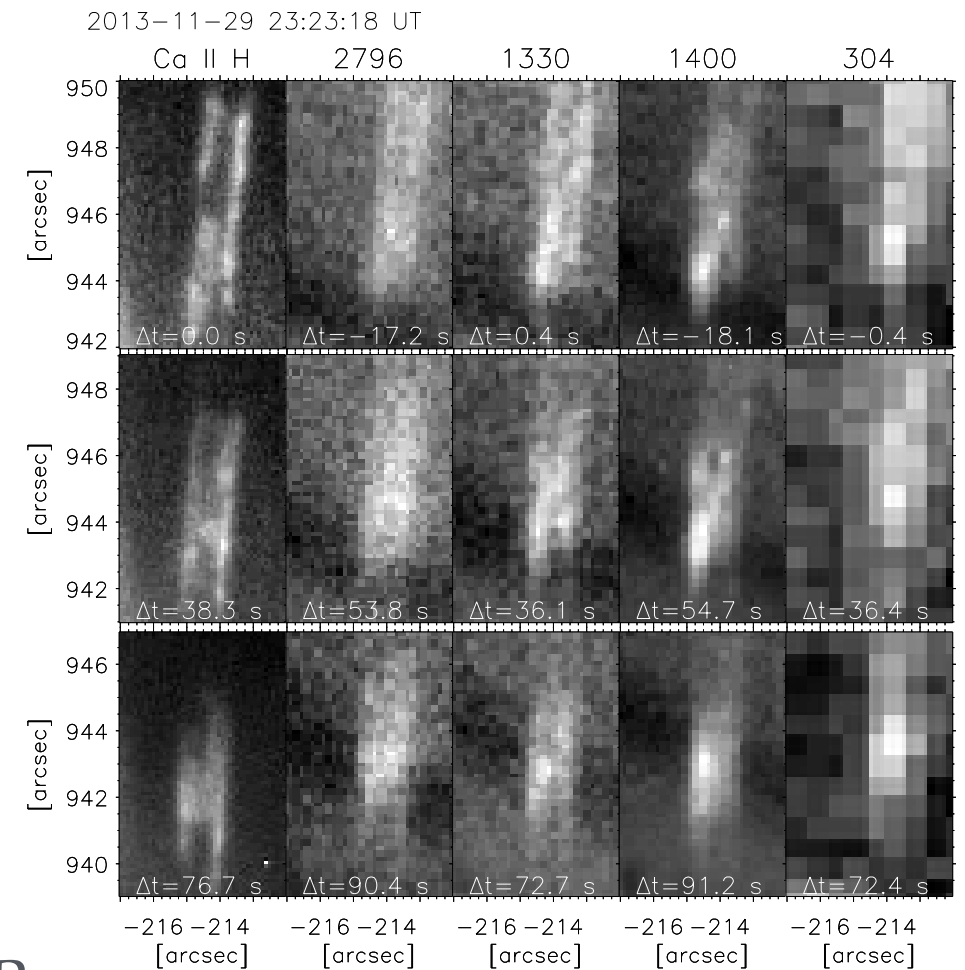
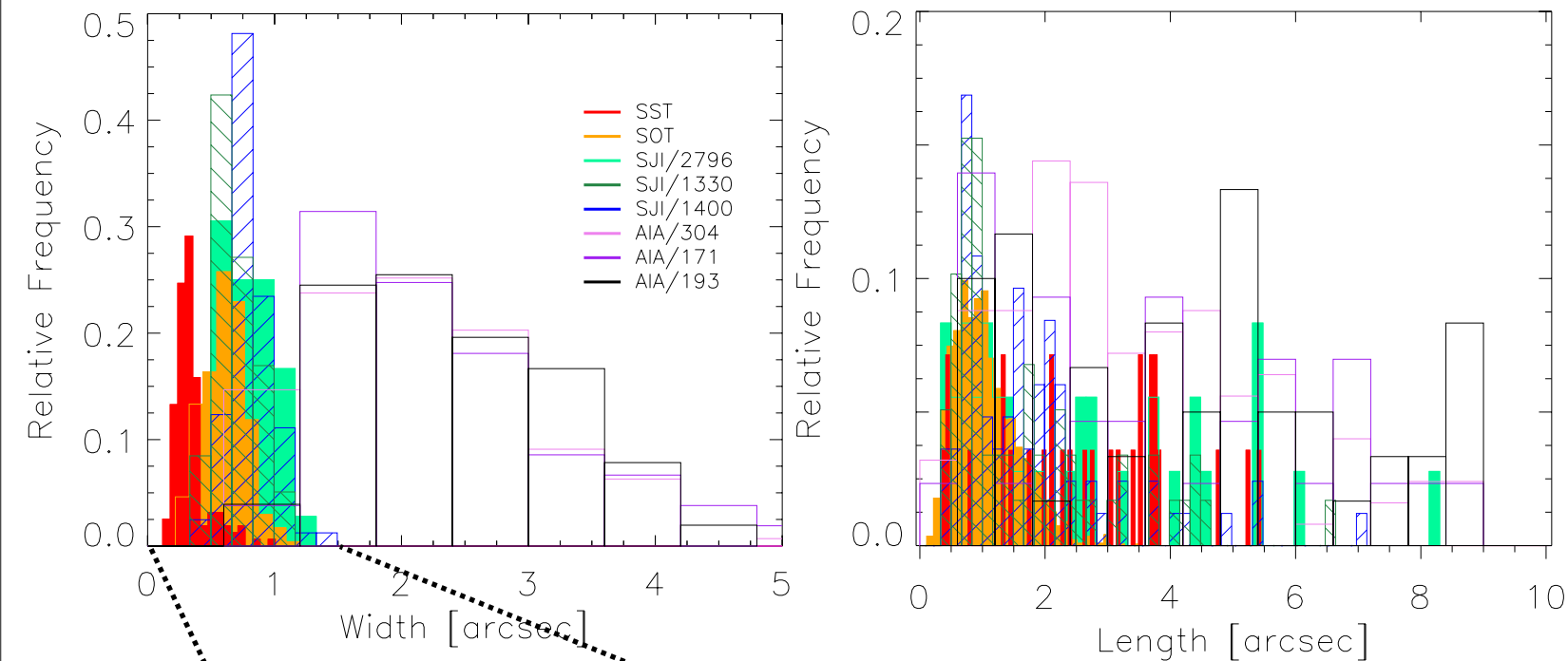
Hinode/SOT + IRIS/SJI + SDO/AIA

2013-11-29 23:21:47 UT

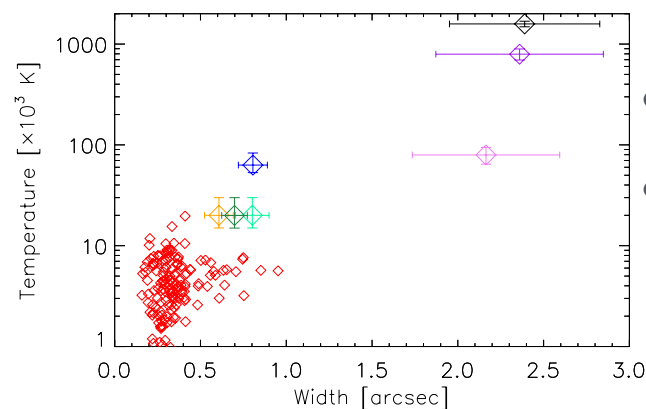


- Chromospheric cool, compact and dense cores surrounded by diffuse warmer plasma?
- Emission time delays from TR to chromospheric emission observed. Very fast evolution: catastrophic cooling
- Exception: SDO 171 & 304: low T contribution? (In contrast with Kamio+2011, Peter+ 2011)

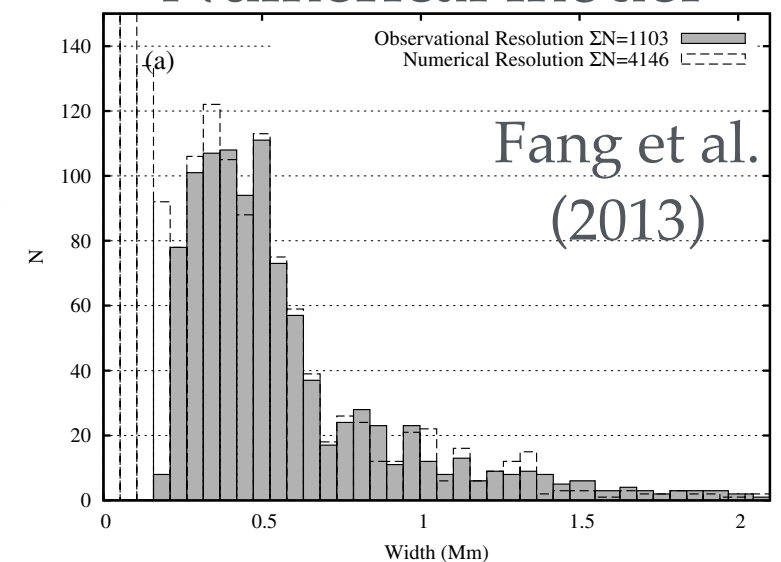
Multi-stranded structure: tip of the iceberg?



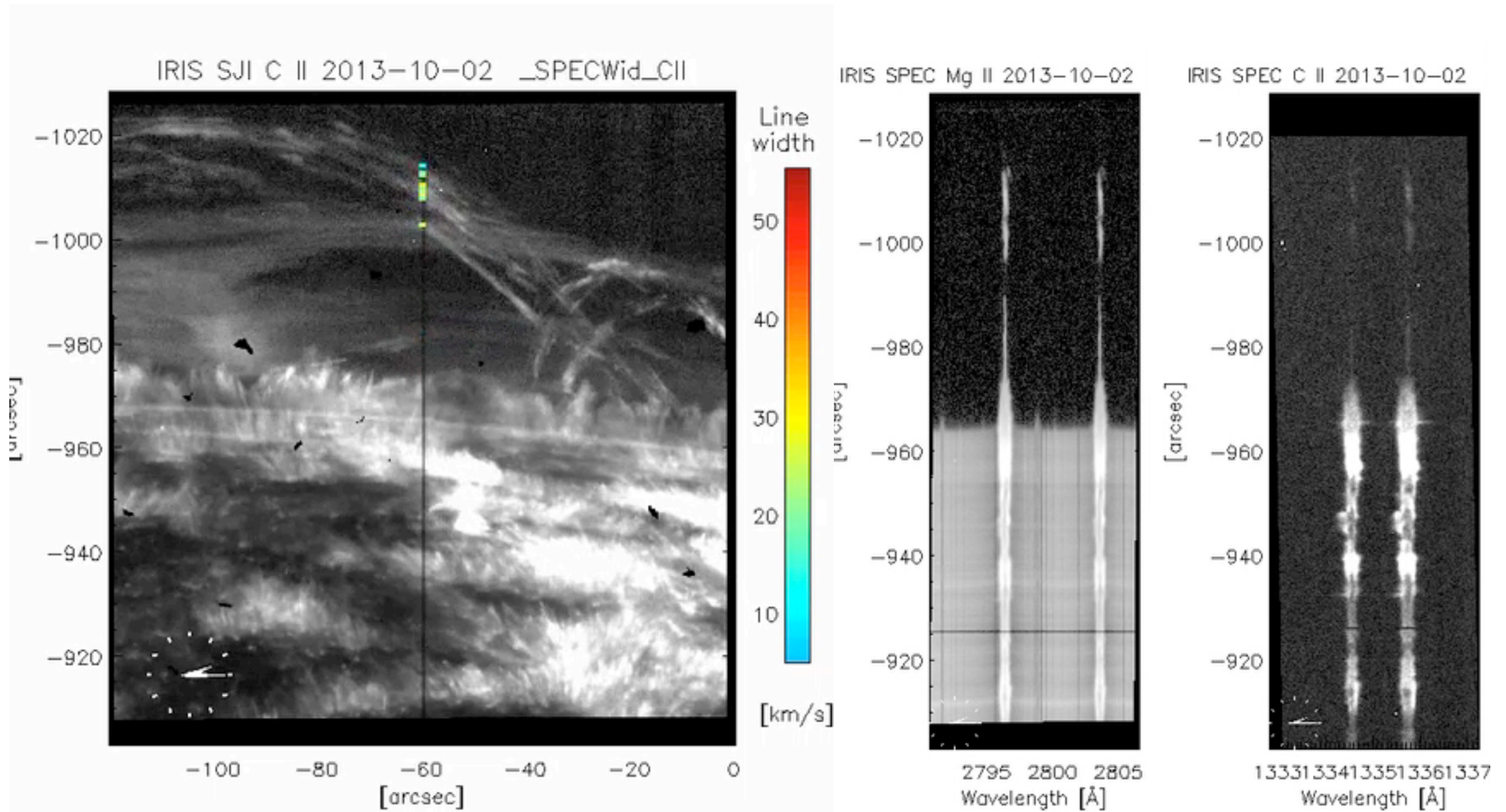
- Structural differences with temperature
- Co-spatial chromospheric & TR emission
- Peak of distribution at very low spatial scales: tip of the iceberg scenario? (Fang+'13, Scullion+'14)
- Less uniformity for lengths
- Effect from temperature? Interaction with magnetic field? (Sharma+2010)



Numerical model



Estimates of non-thermal line broadening



Semi-automatic detection of rain/ prominence plasma for statistical analysis

Antolin+ (2014b, in prep.)

Estimates of non-thermal line broadening

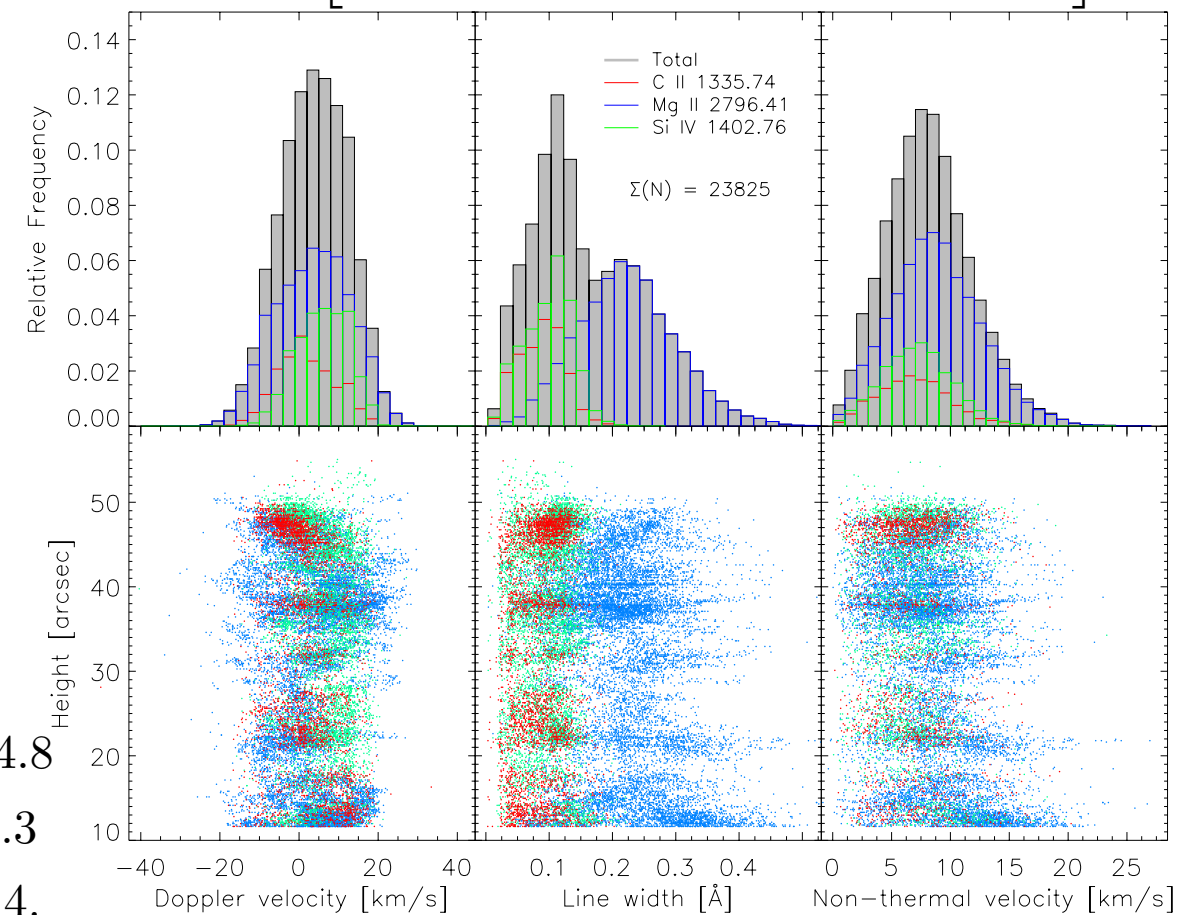
- Mostly single emission peaks
- Gaussian-like distribution of non-thermal broadening with values < 25 km/s and a peak ≈ 10 km/s (consistent with Parenti & Vial 2007)
- Increase of non-thermal broadening with height (consistent with Okamoto+ 2014, submitted)

$$\log(T_{\text{Si IV}}) = 4.8$$

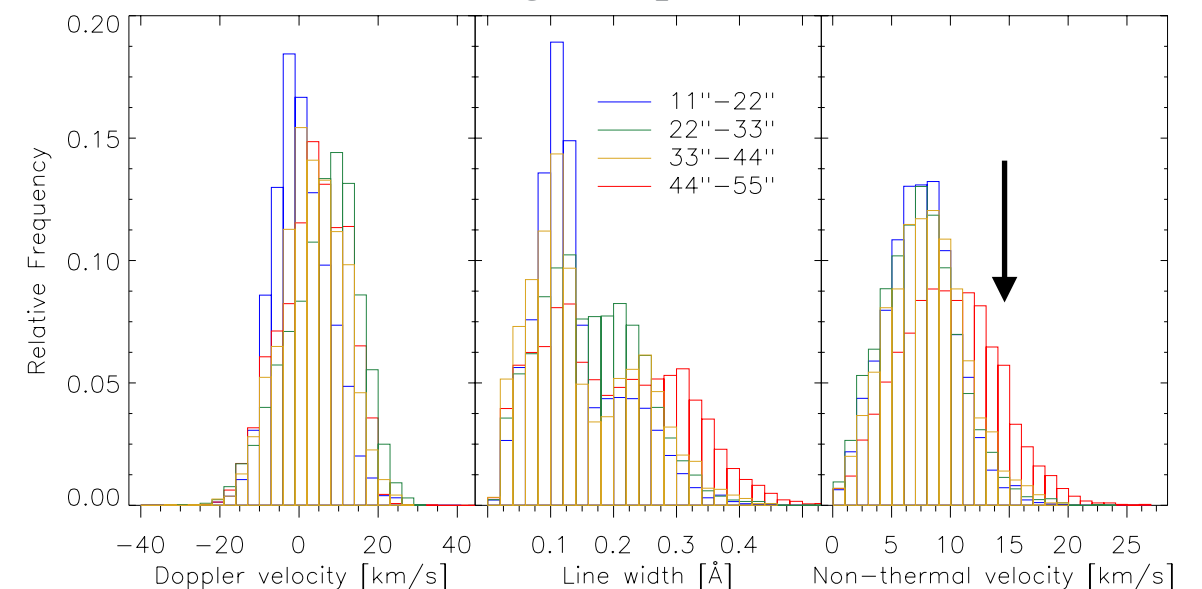
$$\log(T_{\text{C II}}) = 4.3$$

$$\log(T_{\text{Mg II}}) = 4.$$

$$\text{FWHM} = \left[\left(2\sqrt{2\log 2} \frac{\lambda_0}{c} \right)^2 \left(\frac{2k_B T}{m} + \xi_{\text{nth}}^2 \right) + \xi_{\text{inst}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$



Height dependence



Mg II と Ca II の比較と Mg II の有用性についての議論

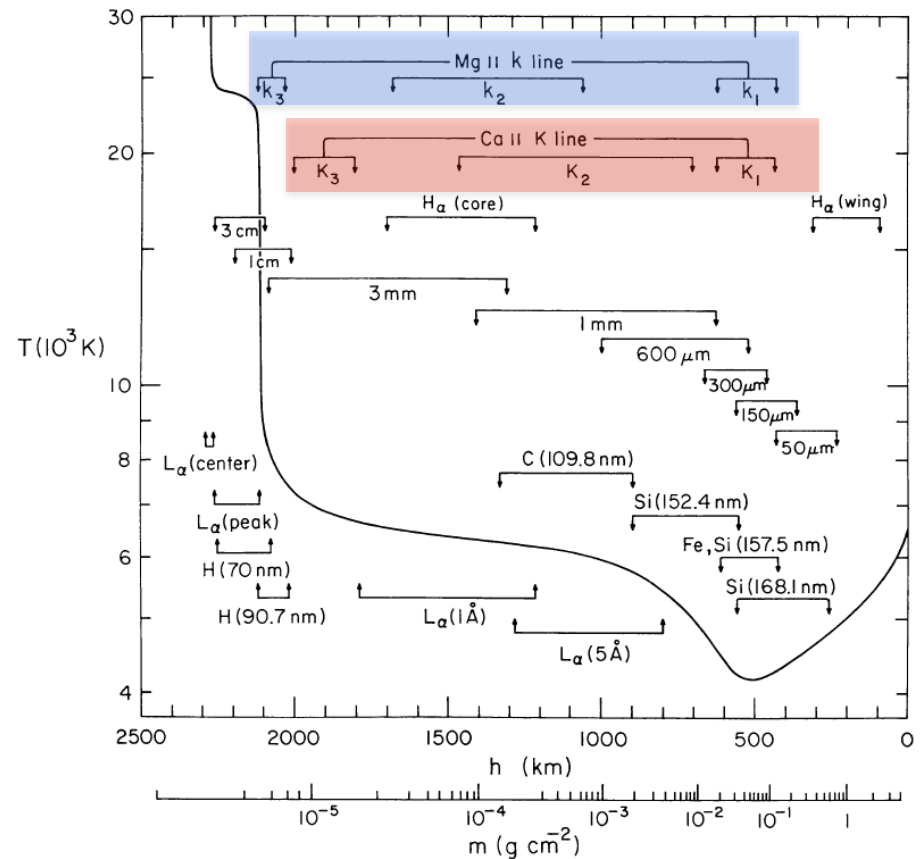
21 Oct 2014

川手朋子(Queen's University Belfast)

共同研究者: 一本潔、上野悟(京都大学)、大辻賢一(国立天文台)

イントロダクション・動機

- 近紫外線の分光撮像は先行研究が少なく、IRISで得られているスペクトルの解釈が難しい
 - まずは地上その他で先行研究が豊富で、かつ形成層が似たような位置であるとされているCa IIと比較することで、Mg IIのスペクトルの理解を深めたい
- Solar-CでMg IIの観測を行う意義はあるのか
 - 紫外～赤外と幅広い観測を目標にしているが、そもそもMg IIを観測してCa II以上の情報が得られるのか

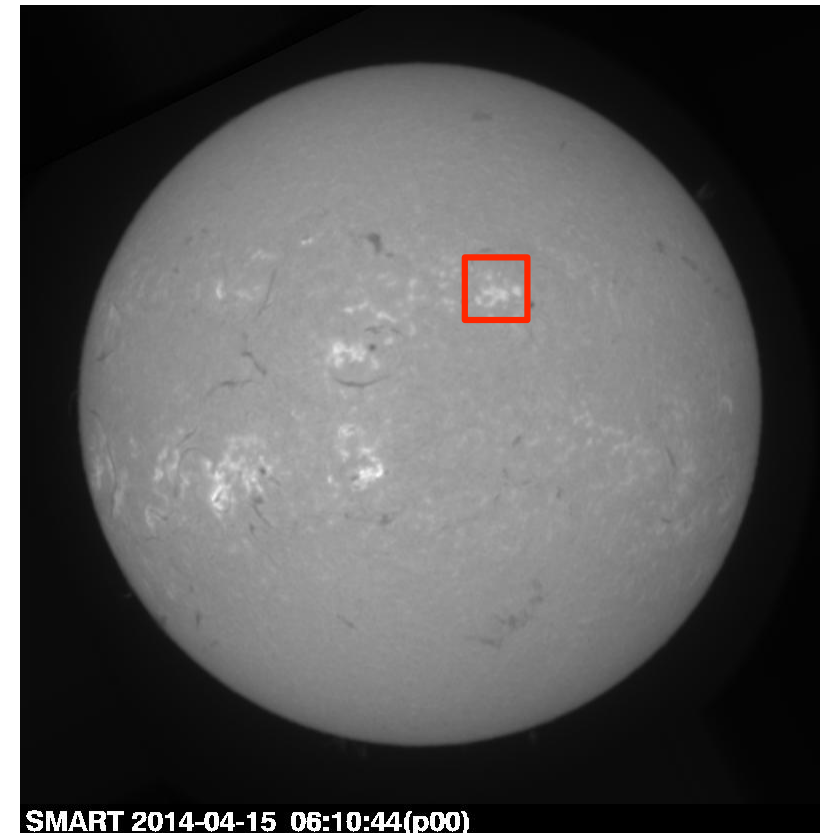


Vernazza et al. 1981

→地上Ca II分光観測データとIRIS観測データの比較

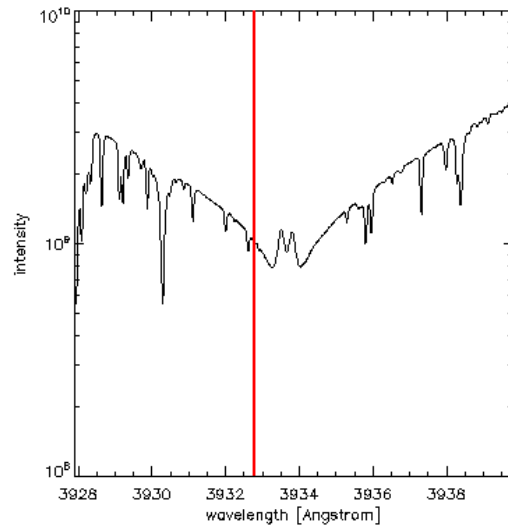
観測

- position: (236,311)
- target: plage region
- Time: 2014-04-15 06:09-06:29 UT
- Domeless Solar Telescope @ Hida Obs.
 - Horizontal Spectrograph
 - continuous raster scan
 - cadence: ~ 8 s / raster, dead time ~ 4 s
 - spatial scale: $0.38''/\text{pix}$, $0.68''/\text{step}$
 - spectral scale: $0.0149 \text{ \AA}/\text{pix}$
 - Call K 3934, H-alpha 6563, Call 8542
 - observers: Kawate, Ueno, Ichimoto
- IRIS
 - Large sparse 64-step raster
 - cadence: 9.2 s /step, 587 s /raster
 - spatial scale: $0.33''/\text{pix}$, $1.00''/\text{step}$ (NUV)
 - spactral scale: $0.051 \text{ \AA}/\text{pix}$

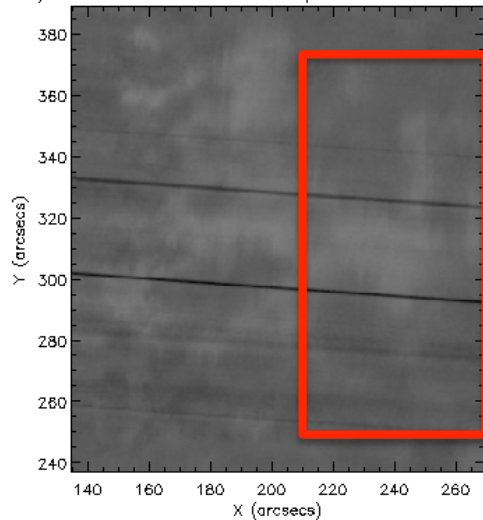


スペクトロヘリオグラムの例

DST Ca II K

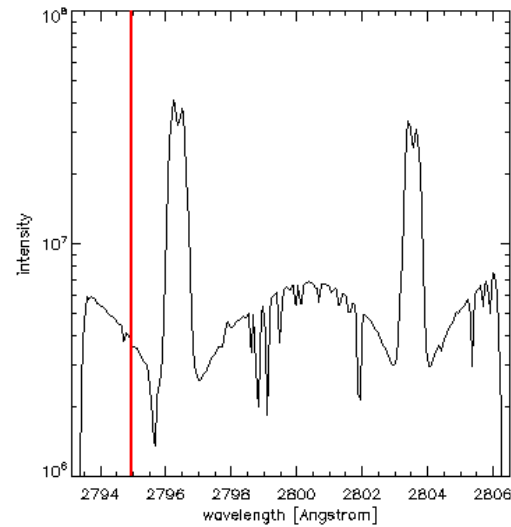


Hida/DST HS Call K 3934 15-Apr-2014 06:11:02.446

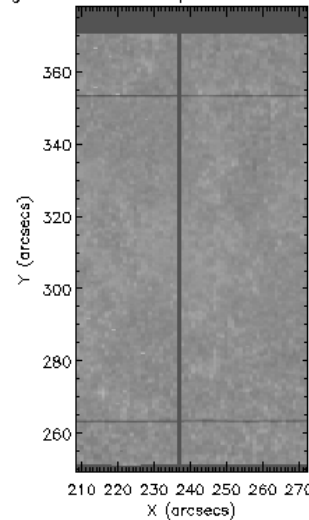


IRIS視野

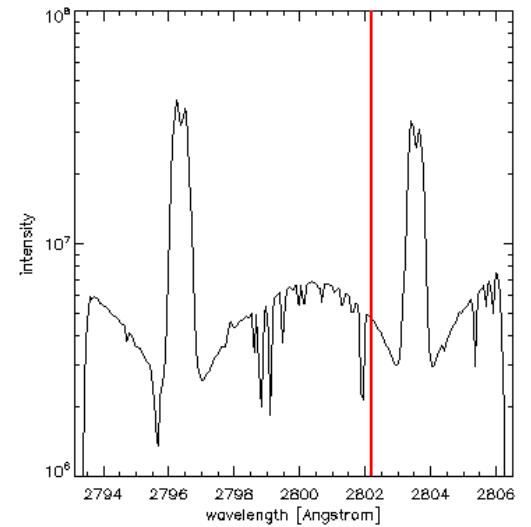
IRIS Mg II k



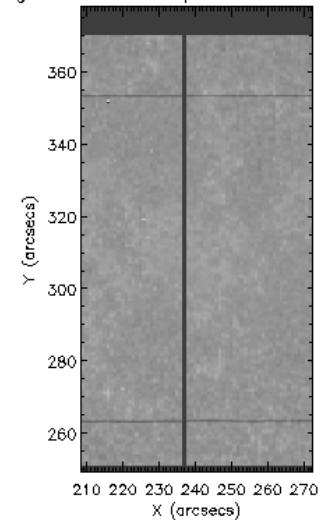
IRIS Mg II 2796.2 15-Apr-2014 06:09:22.070 UT



IRIS Mg II h



IRIS Mg II 2796.2 15-Apr-2014 06:09:22.070 UT



キャリブレーションと事前処理

DSTデータ処理

- dark subtraction & flat fielding calibration
- スキャン毎にデータ分割
- CCD向き修正
- 分散方向alignment
- スリット方向alignment
- スキャン方向alignment
- 波長キャリブレーション
- シーイング補正のための空間サンプリング調整(スリット方向10、スキャン方向7binning)

IRISデータ処理

- level-2 データ使用
- 波長キャリブレーション

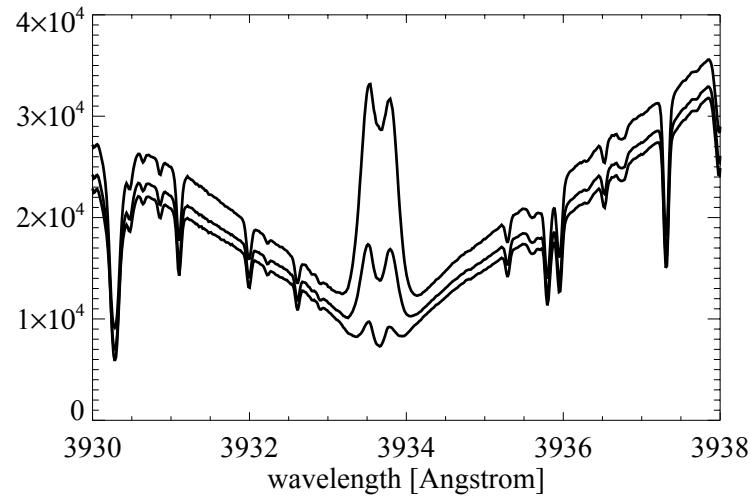
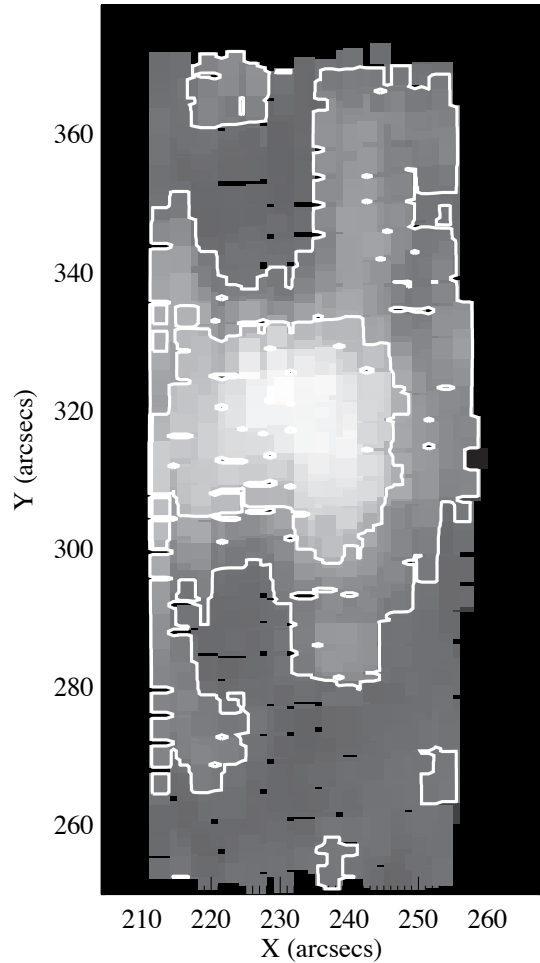
共通処理

- DST-IRIS 空間位置co-alignment
- DST-IRIS 各位置・各時刻の対応付けと同時刻・同位置のスペクトル抽出
- 重複位置におけるスペクトルの平均化

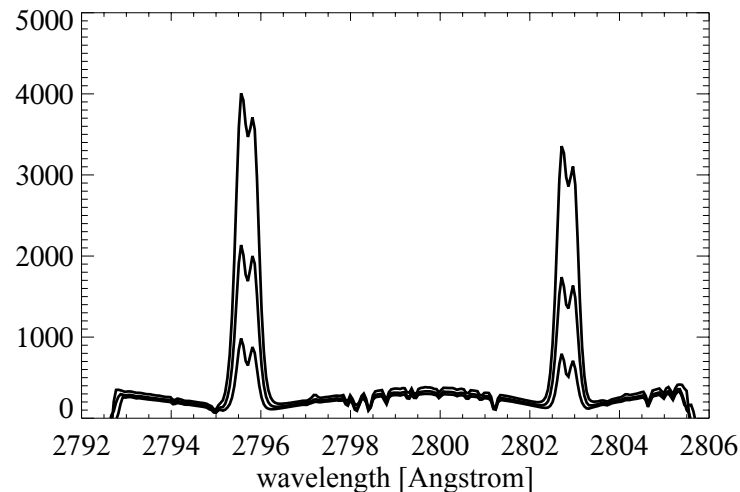
→ プラージュと静穏領域のスペクトル 計3571点 (2ラスター分)

プラージュ・静穏領域・その境界の 平均スペクトル

Ca II K intensity 15-Apr-2014 06:09:22.000 UT



- 左図の白い線で区分けされた3領域 (プラージュ・静穏領域・その境界) の平均スペクトル



- プラージュ: 温度高
- 静穏領域: 温度低
- 静穏領域では、Ca II KはK1成分が大きい

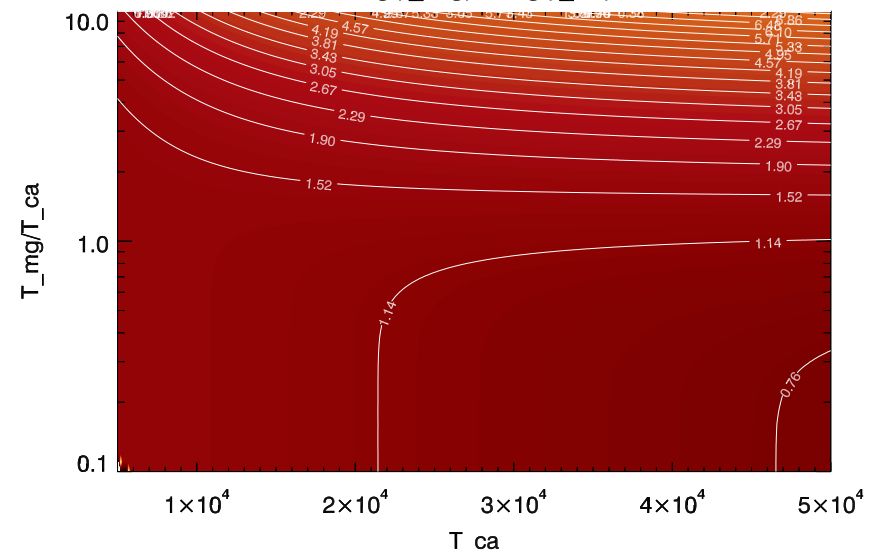
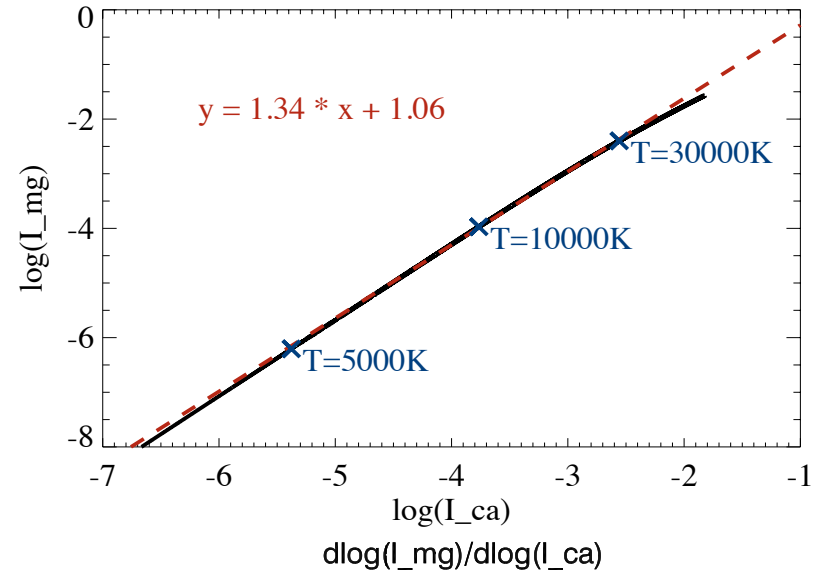
intensityの解釈

- LTEかつoptically thickの仮定のもとでは、輝度は

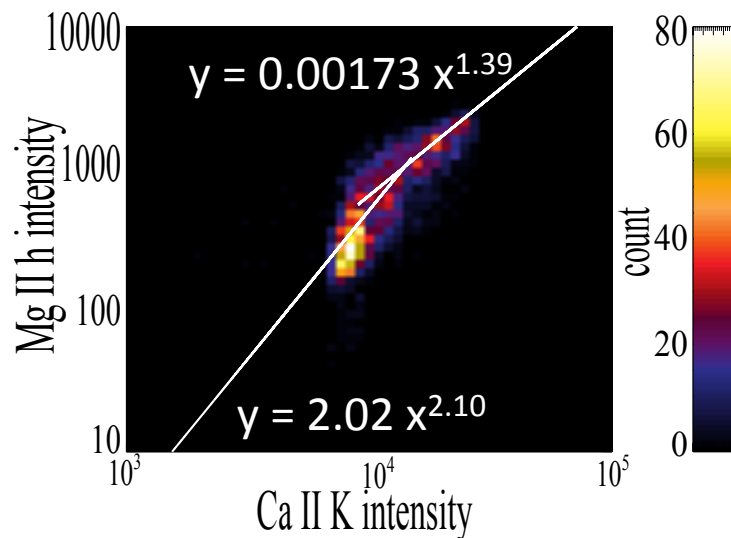
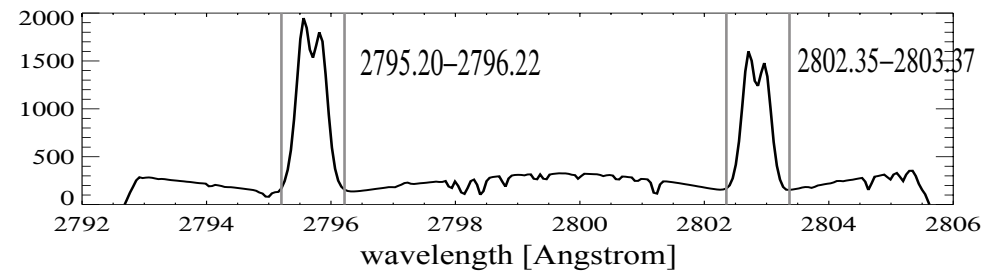
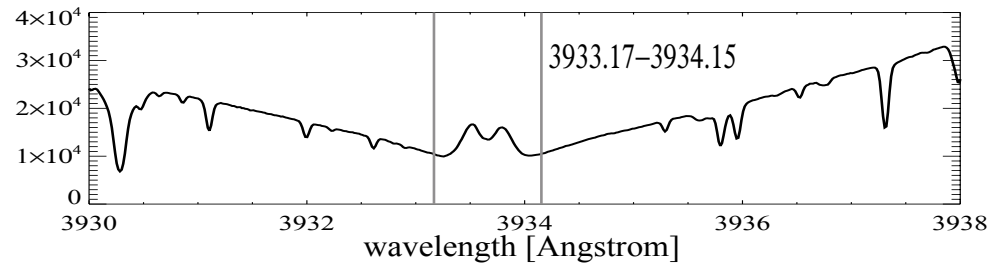
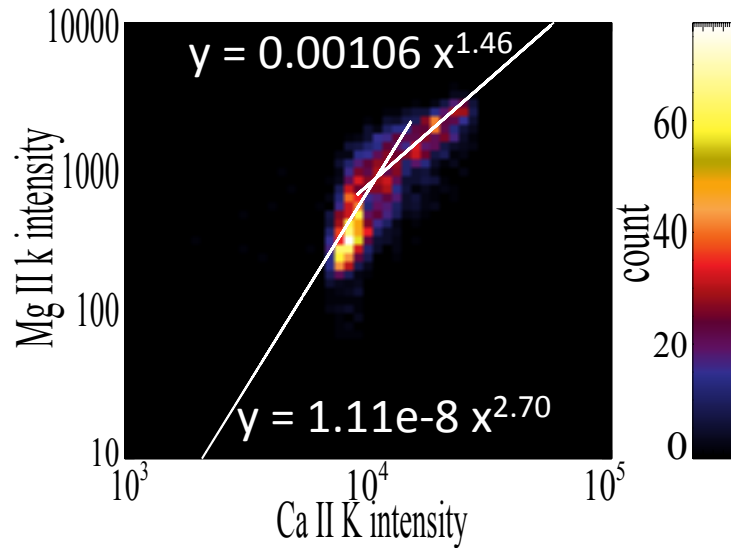
$$I(\nu) \simeq \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

- であり、もしCa II K (3900Å)とMg II (2800Å)が同じ温度の層で形成されていたとすると、輝度はlog-logで右上図の黒線のように分布し、5000K ~ 30000Kで傾きはだいたい**1.34**

- 同様に $d(\log I_{Mg})/d(\log I_{Ca})$ の微分係数をCaの温度、Mgの温度について求めたものが右下図であり、**温度上昇に対して微分係数が下がる→Mgの相対高度がCaより小さいまたは相対的に減少**

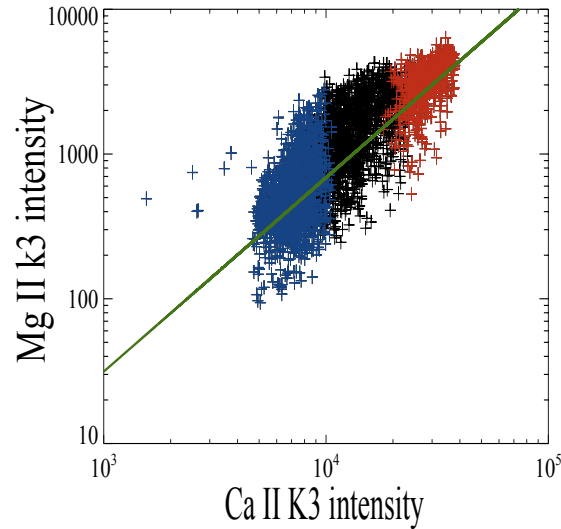
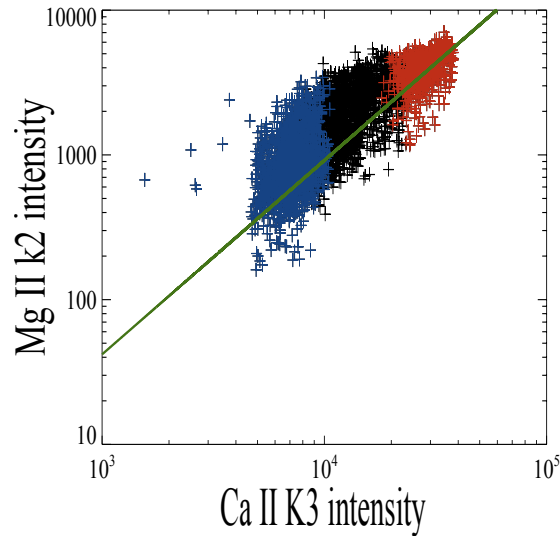


1Å pass bandによる輝度の比較



- プラージュと静穏領域で相対的な形成高度が変化
 - 1Å幅では*1/*2成分(LTE)が主
 - プラージュにおいてはMg II hとCa II Kの温度=形成高度はほぼ同じであり、Mg II kはそれよりやや上
 - 静穏領域においてはCa II KはK1成分が主に寄与するようになり、積分強度の変化が小さくなる(Ca II K2がoptically thinになる)

Ca II K2/K3 vs Mg II k2/k3

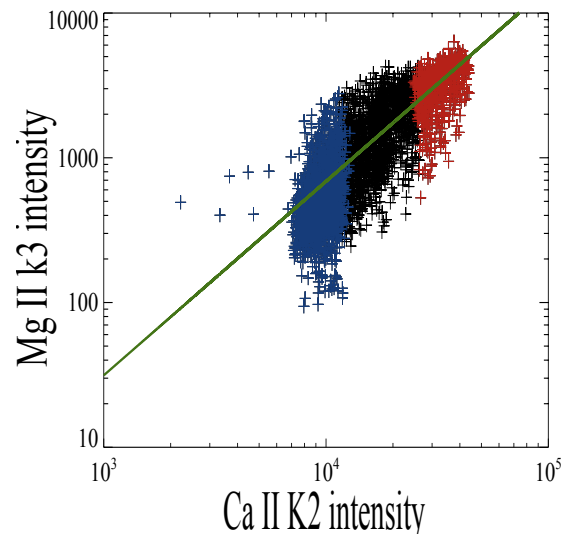
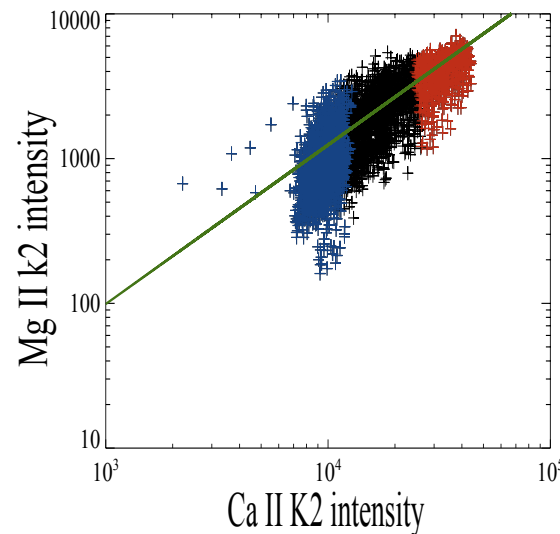


- 赤: プラージュ
- 青: 静穏領域
- 緑線: $y \propto x^{1.34}$

- プラージュと静穏領域で傾きが異なるような傾向あり

- 全体的にプラージュではCa II K2/K3の方が温度(形成高度)が高く、静穏領域ではMg II k2/k3の方が高い?

- Ca II K / Mg II k互いに分散が大きい



議論

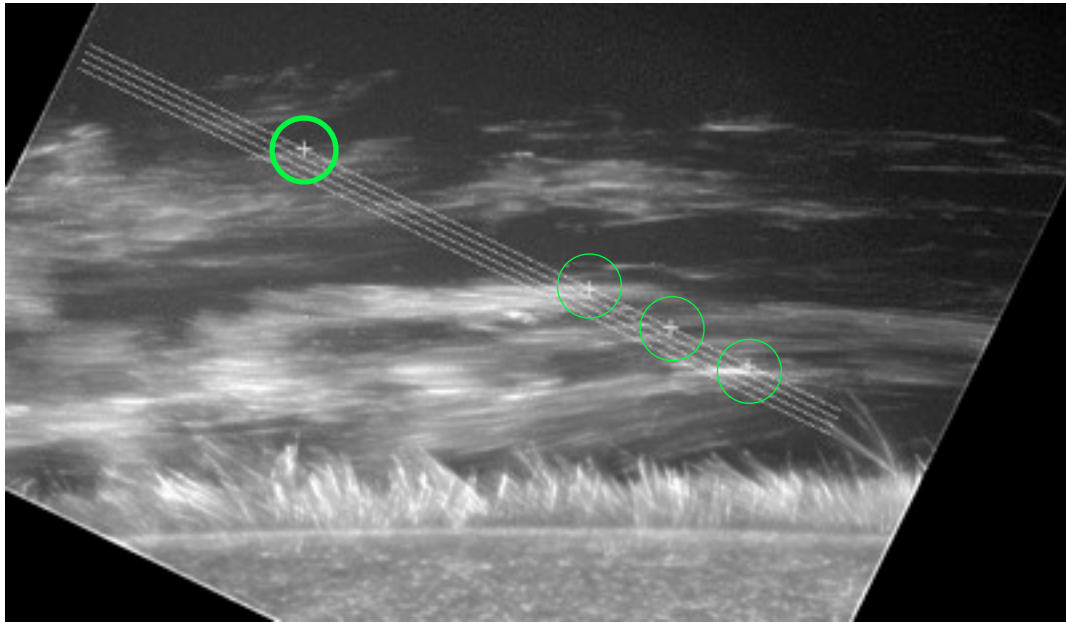
- optically thickかつLTEの仮定の元では形成高度は
 - プラージュ・・・ $\text{Mg k2} < \text{Mg k3} \doteq \text{Ca K2} < \text{Ca K3}$
 - 静穏領域・・・ $\text{Ca K2} < \text{Ca K3} \doteq \text{Mg k2} < \text{Mg k3}$
- ただし、Ca II K3やMg II k3の上層になるとNLTEの効果により、上記の仮定は破れる
 - 静穏領域における彩層上部の高空間分解という点では、SUVITでMg IIを観測する事により新たな知見が得られる？
- 散布図の分散がCa II / Mg II 互いに大きい
 - Ca II / Mg II互いに異なる情報を含んでいる可能性がある
- 本観測ではデータが得られなかった黒点やフレア領域におけるCa II K/Mg II kの比較については、さらなる観測・考察が必要となる

Mg II の例

～ リム外のプロミネンス ～

岡本

Mg II の例1



SOT 画像

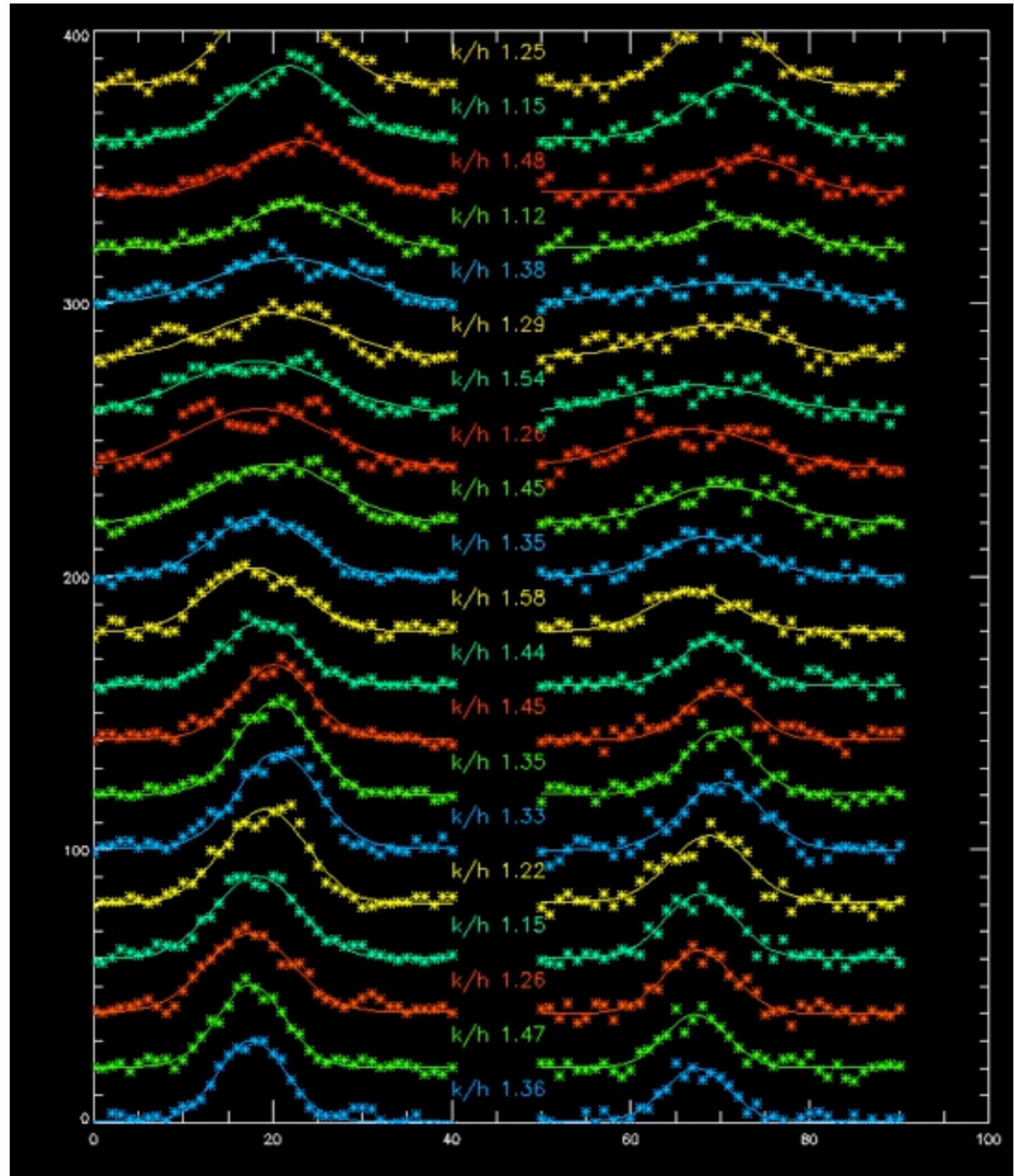
上部は視線方向の
重なりが少ない

(20秒間隔)
時間

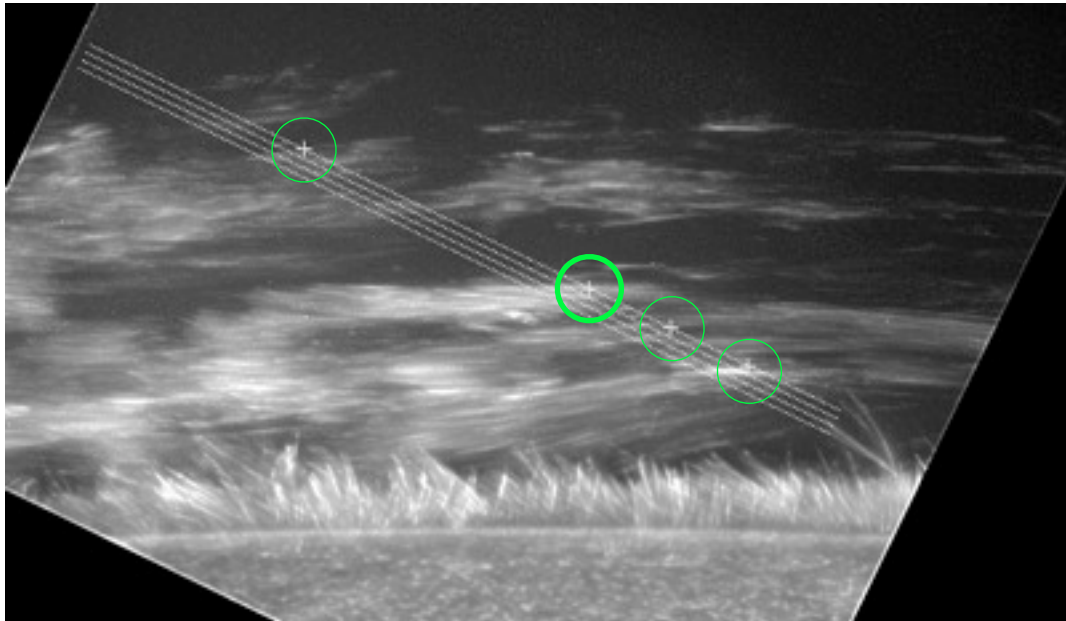


波長

Mg II k (k/h 比) Mg II h



Mg II の例2

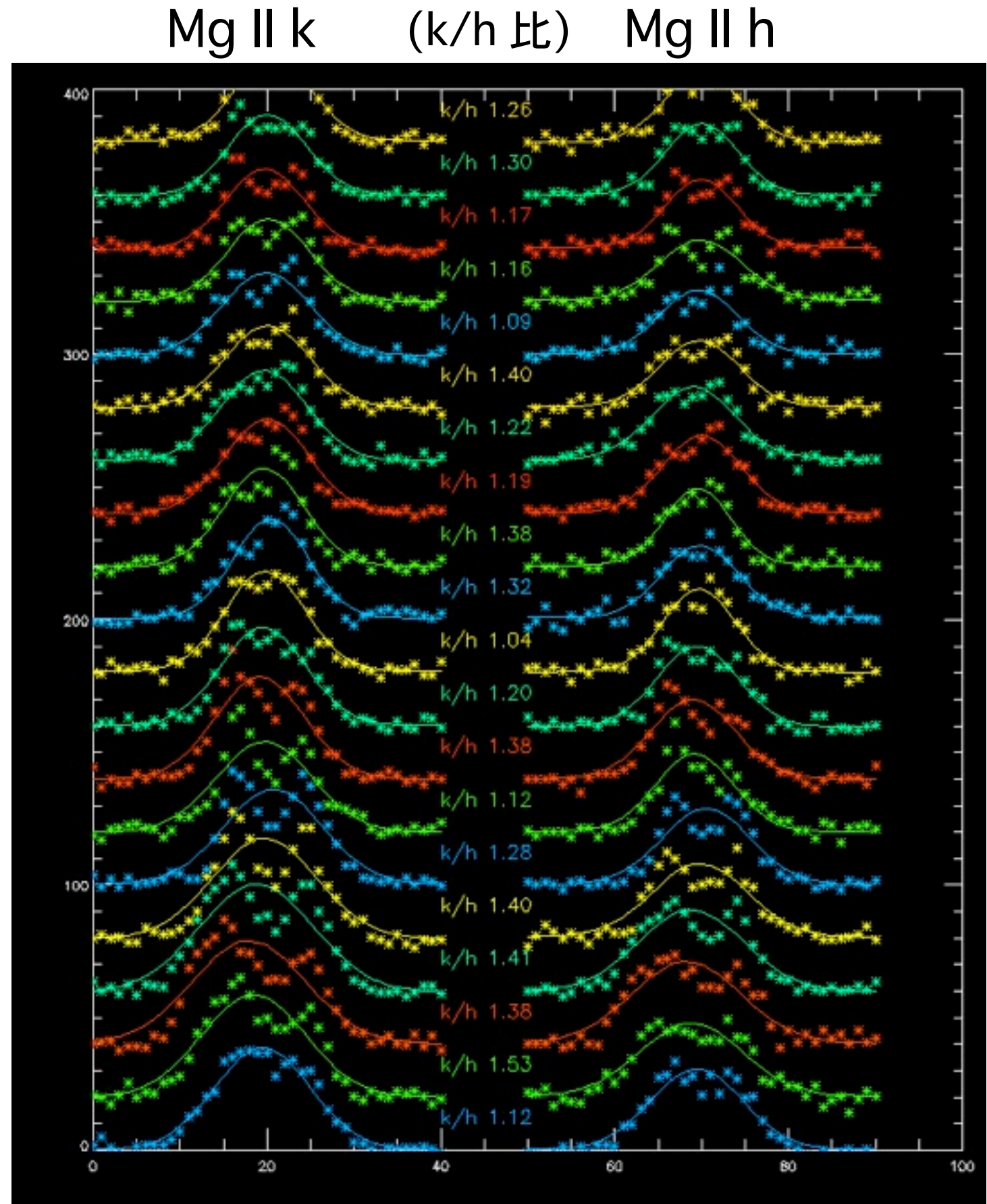


SOT 画像

重なりは比較的少ないものの、
central reversal が見られる

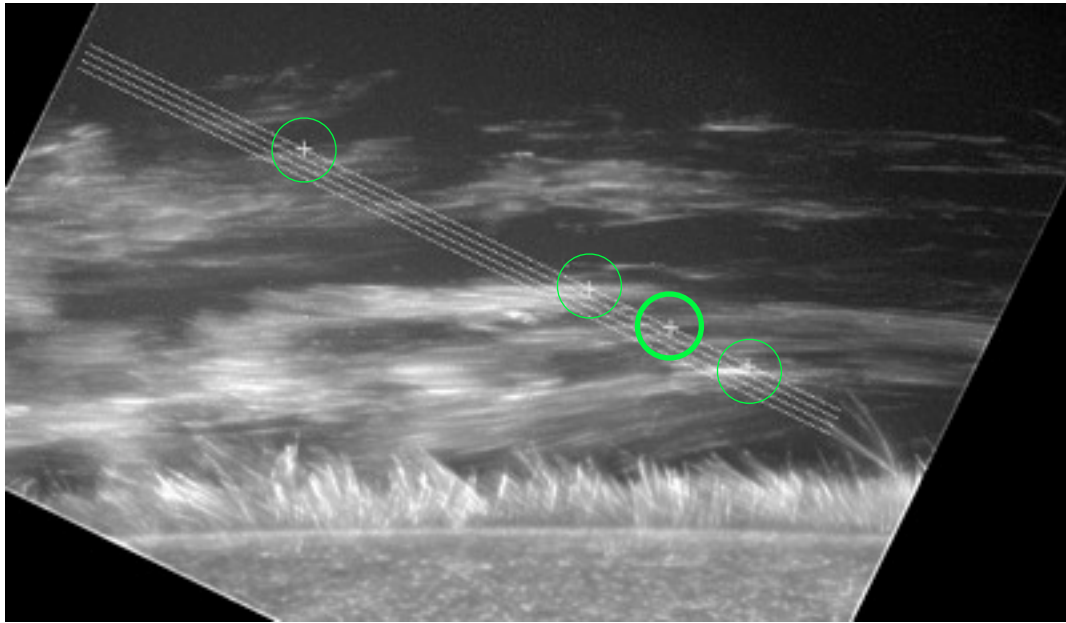
これは multi-component
か、optical effect か?

(20秒間隔)
時間



波長

Mg II の例3



SOT 画像

複数のスレッドが視線方向に重なっていると考えられるが、プロファイルはシンプル

ライン幅も狭い

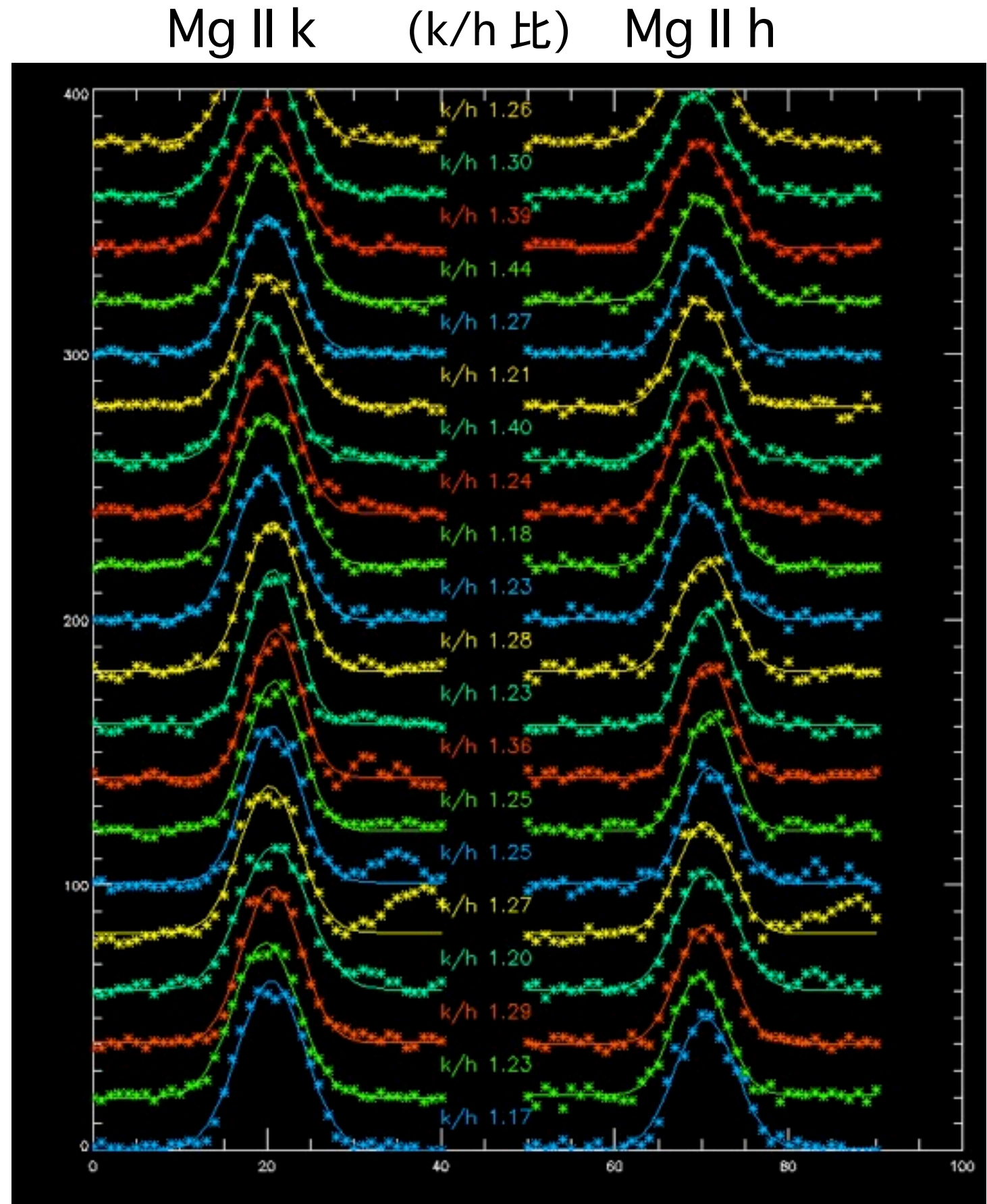
シングルのもものが小 k/h かという、そうでもない

(20秒間隔)

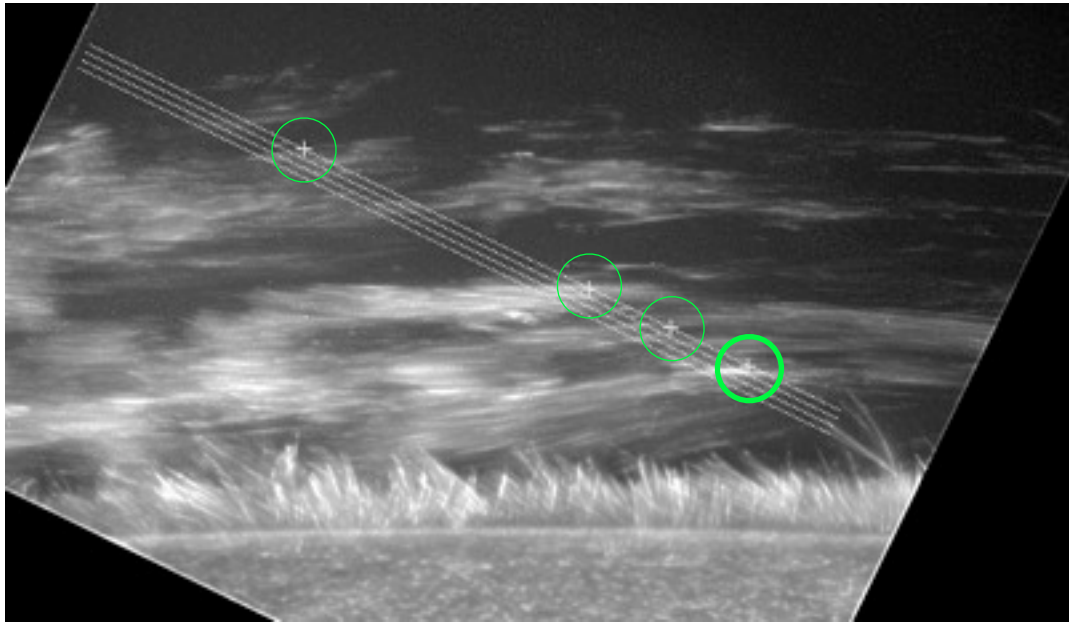
時間



波長



Mg II の例4



SOT 画像

重なりは多い

central reversal が見られる

ライン幅は広い

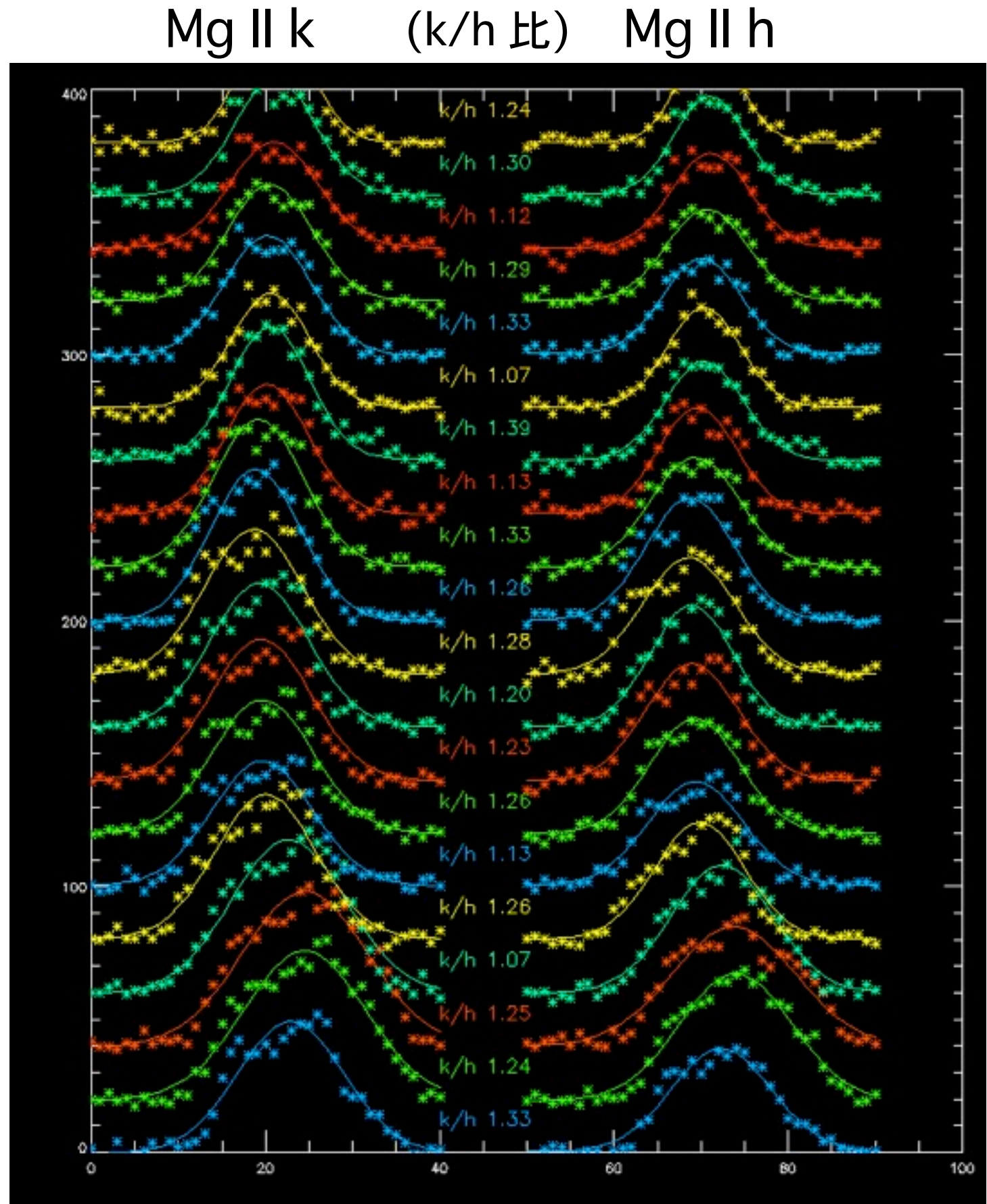
どの効果が一番効いているのか?

(20秒間隔)

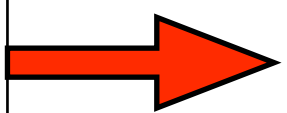
時間



波長



マグネシウム線は
不透明度が高い

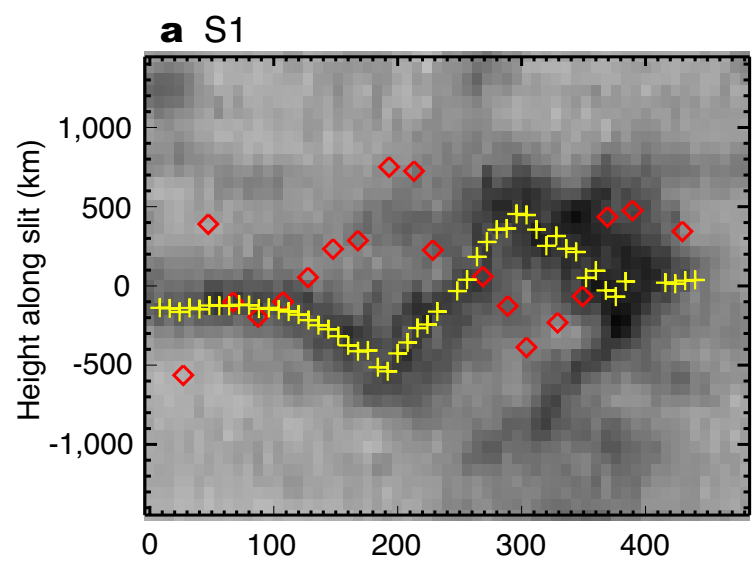


背景: カルシウム線 (ひので) 画像の x-t プロット

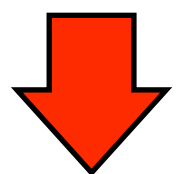
黄点: 微細構造 (ひので) の中心位置

赤点: マグネシウム線 (IRIS) の視線速度

微細構造表面の
運動を反映



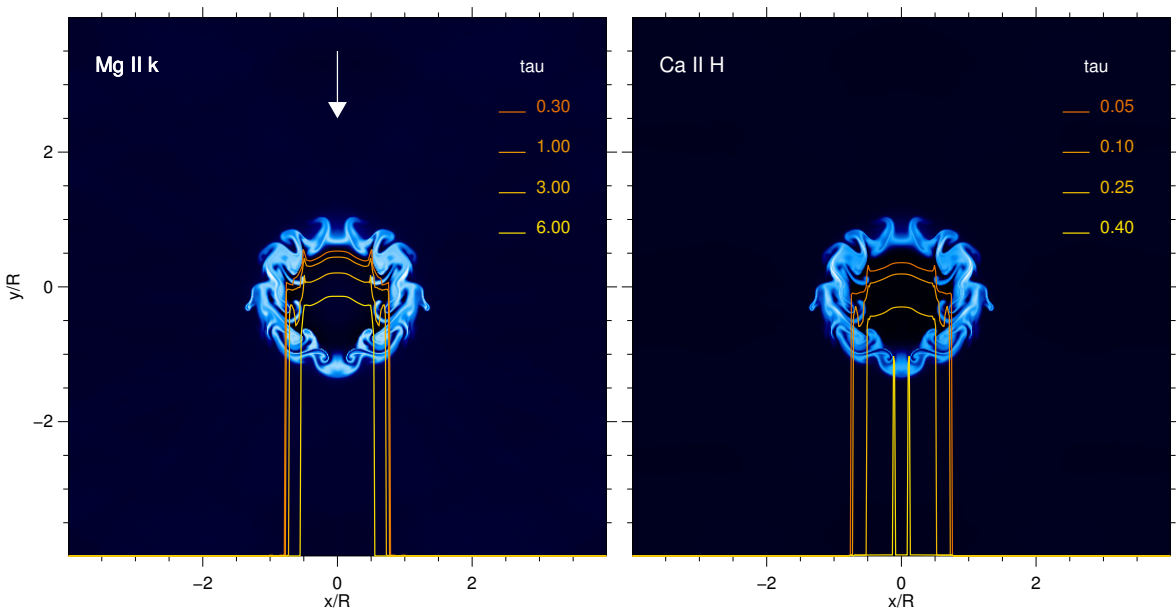
鉛直振動と視線方向の振動が 180度ずれている

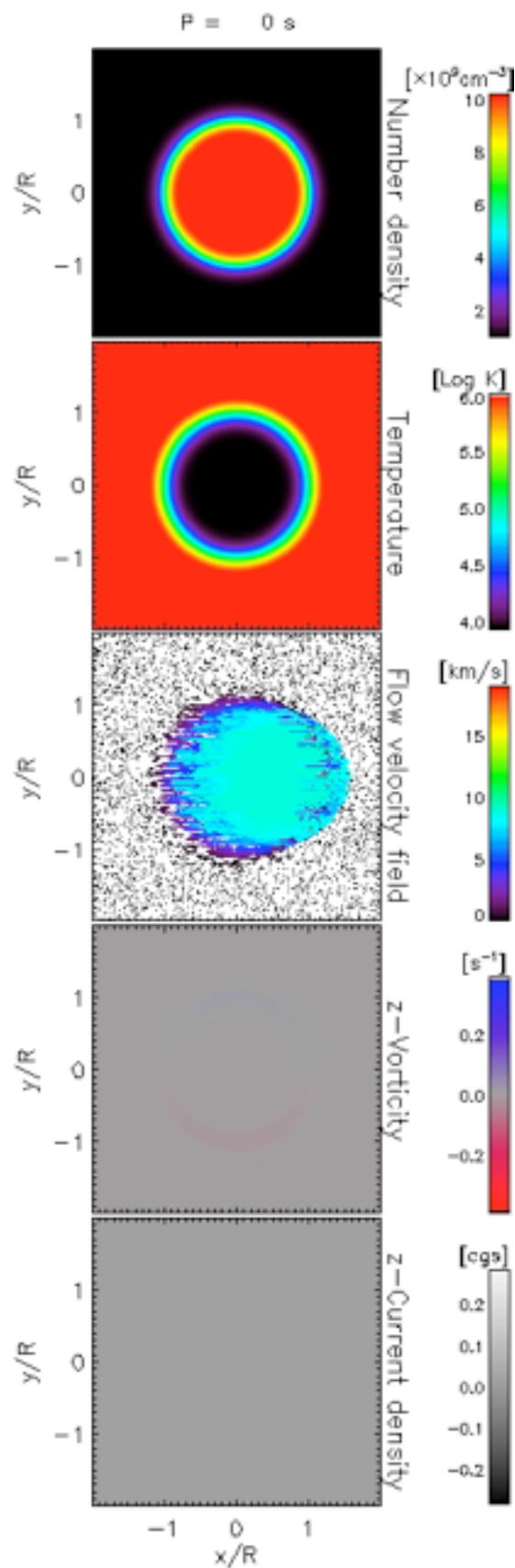


共鳴吸収

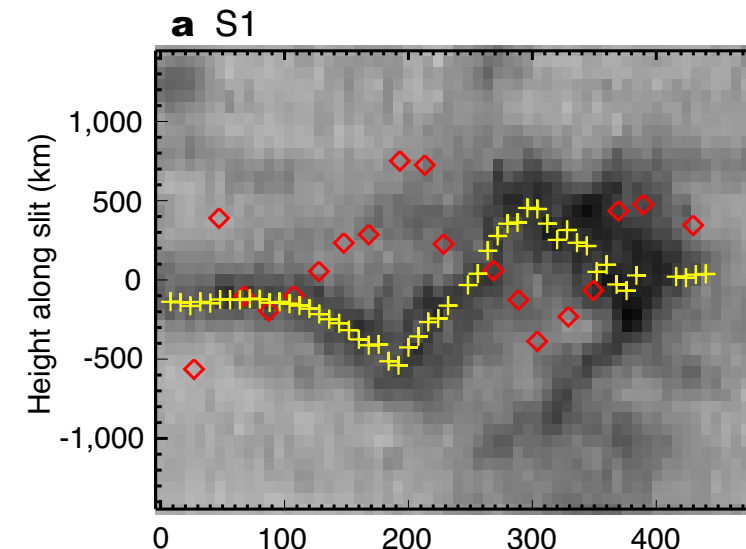
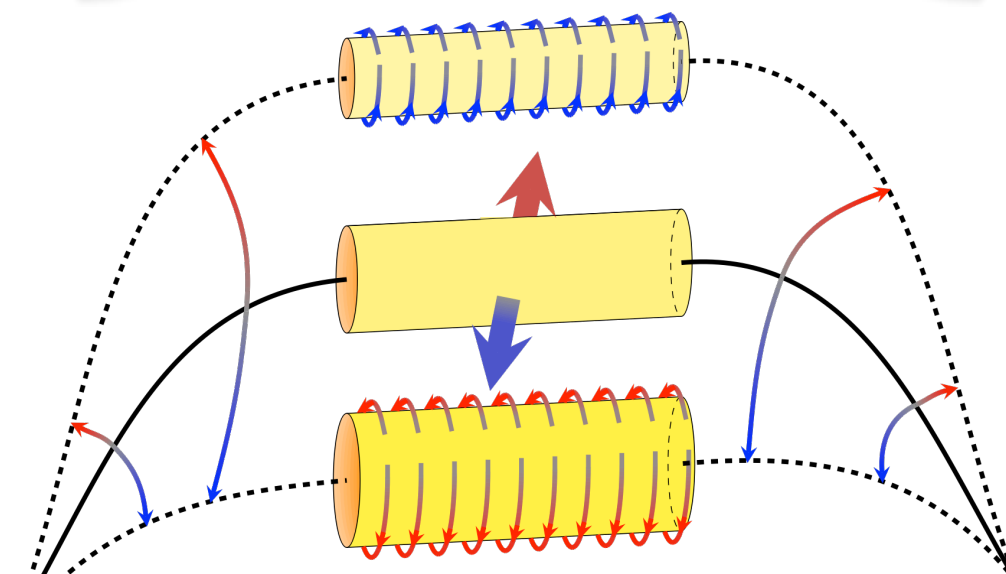
resonant absorption

(e.g., Sakurai+1991, Goossens+2002)





共鳴吸収



鉛直振動と視線方向の振動が 180度ずれている

- 微細磁束管の密度成層により、表面で振動周期が減少
- 微細構造表面で Kelvin-Helmholtz 不安定性を誘発

振動のエネルギー → 表面運動のエネルギー

微小な電流層を生成し、振動のエネルギーを散逸

Alfvénic wave detection in the solar atmosphere

—

Possibilities for Solar-C

Patrick Antolin

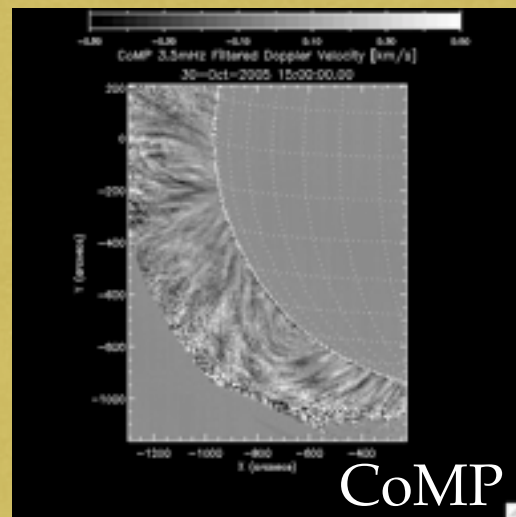
国立天文台

Observations of Alfvénic MHD waves in the solar atmosphere

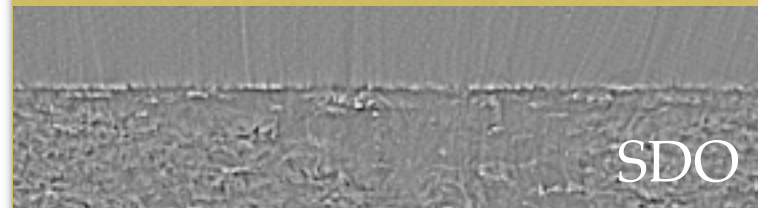
Transverse MHD waves ubiquitous in the solar atmosphere

(Tomczyk+ 2007, Okamoto+ 2007, Terradas+ 2008, De Pontieu+ 2007, Lin 2011, McIntosh+ 2011, Morton+ 2011, Antolin & Verwichte 2011, Okamoto & De Pontieu 2012, Hillier+ 2013, Schmieder+ 2013, Morton & McLaughlin 2014, De Pontieu+ 2014) → small amplitude (\sim km/s), periods of few min

Large-scale corona

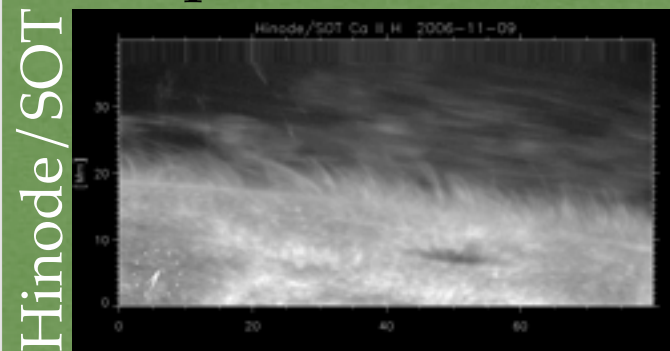


Tomczyk et al. 2007

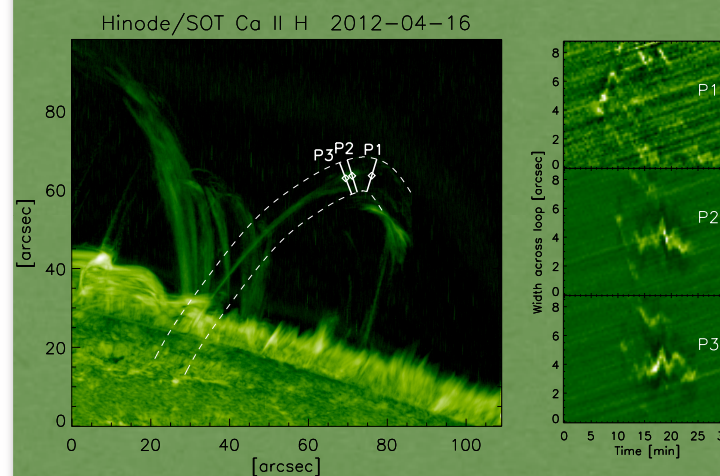


McIntosh et al. 2011

Coronal loops & prominences

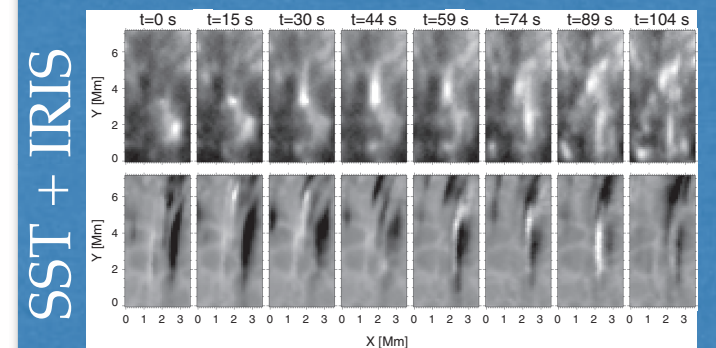
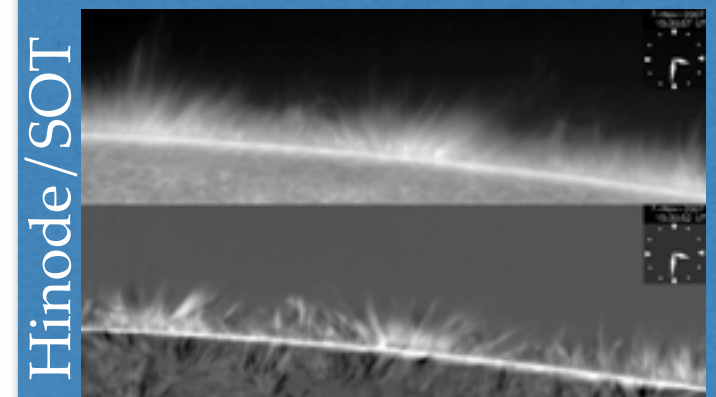


Okamoto et al. 2007



Antolin & Verwichte 2011

Chromosphere



De Pontieu et al. 2014

Significance of MHD wave identification

Alfvénic waves can deliver sufficient energy fluxes in order to heat and maintain a corona

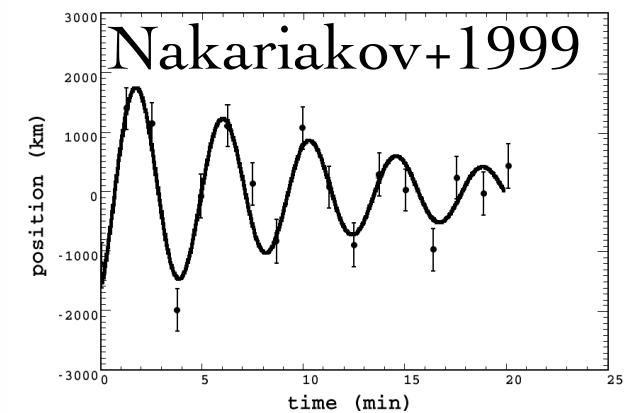
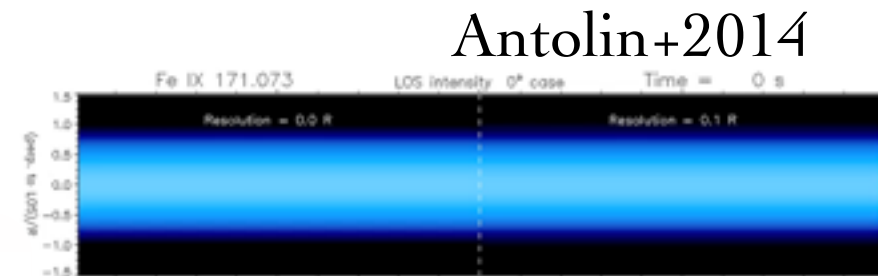
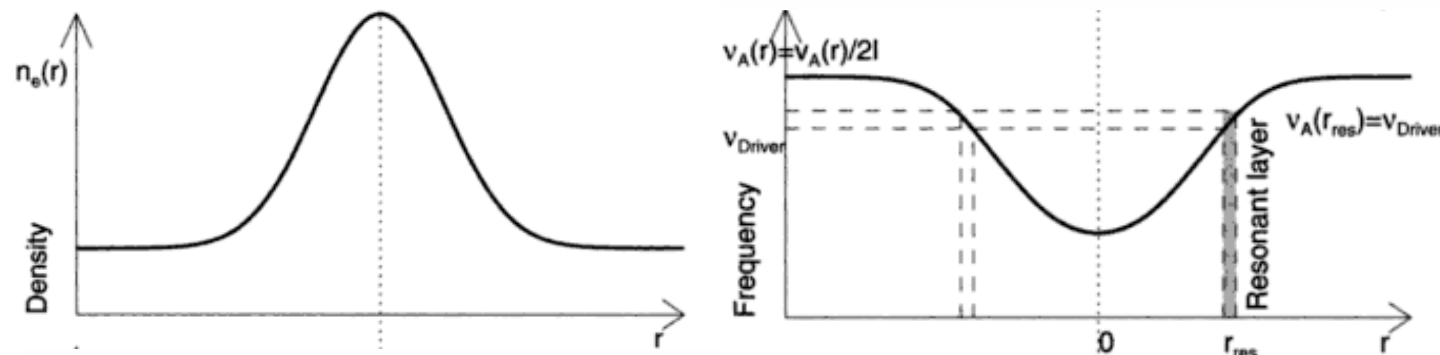
Uchida & Kaburaki 1974, Wenzel 1974, Hollweg+ 1982, Poedts+ 1989, Ruderman+ 1997, Kudoh & Shibata 1999, Suzuki & Inutsuka 2006, Cranmer 2007, Antolin & Shibata 2010, Matsumoto & Suzuki 2014

- **Energetically significant:** Alfvénic
 - ➔ Trapped / non trapped; Torsional, Kink, Sausage / Fast, Alfvén
- **Energetics & dynamics:** each mode carries different amounts of energy & involves different plasma motions
- **MHD Seismology:** each mode has different dependence on the physical properties of medium

Requirements for wave identification?

Transverse MHD wave (kink mode)

1. Resonant absorption

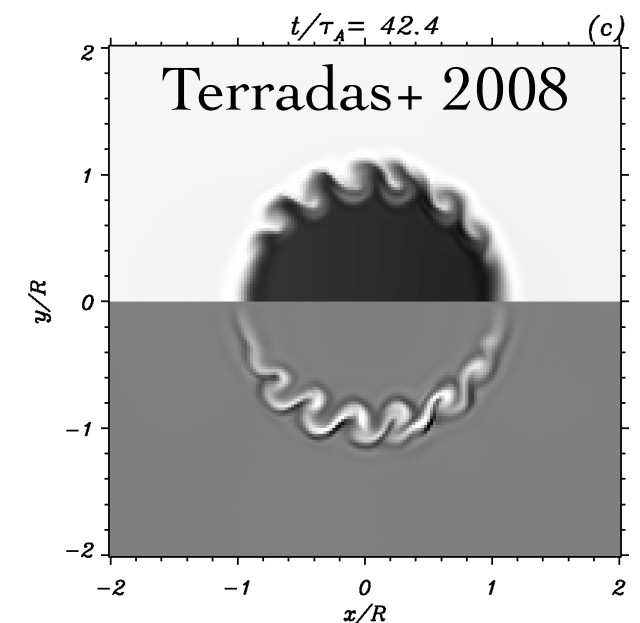


- ▶ Conversion of a global kink oscillation into local Alfvénic oscillations (Hollweg & Yang 1988, Goossens+1992, 2002, Ruderman & Roberts 2002, Terradas+2010, Pascoe+2010).

- ▶ Very successful in explaining observed fast damping (Nakariakov+1999, Verth+ 2010, Arregui & Ballester 2011)

2. Kelvin-Helmholtz instability (transverse to main field)

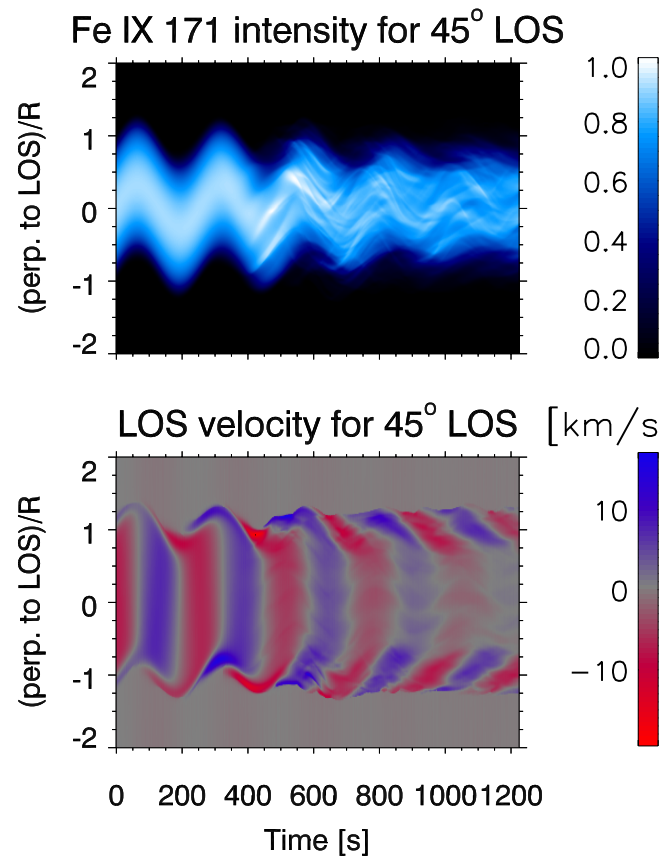
- ▶ Deformation of cross-section: strand-like structure in intensity images (Antolin, Yokoyama, Van Doorselaere 2014)



Model: Uchimoto+. 1991; Karpen+ 1993, Ofman+ 1994; Ziegler & Ulmschneider 1997; Terradas+ 2008, Soler+ 2010; **Obs:** Foullon+ 2011; Ofman & Thompson 2011, Berger+ 2010

Spectral and imaging signatures of the transverse MHD wave

Coronal model



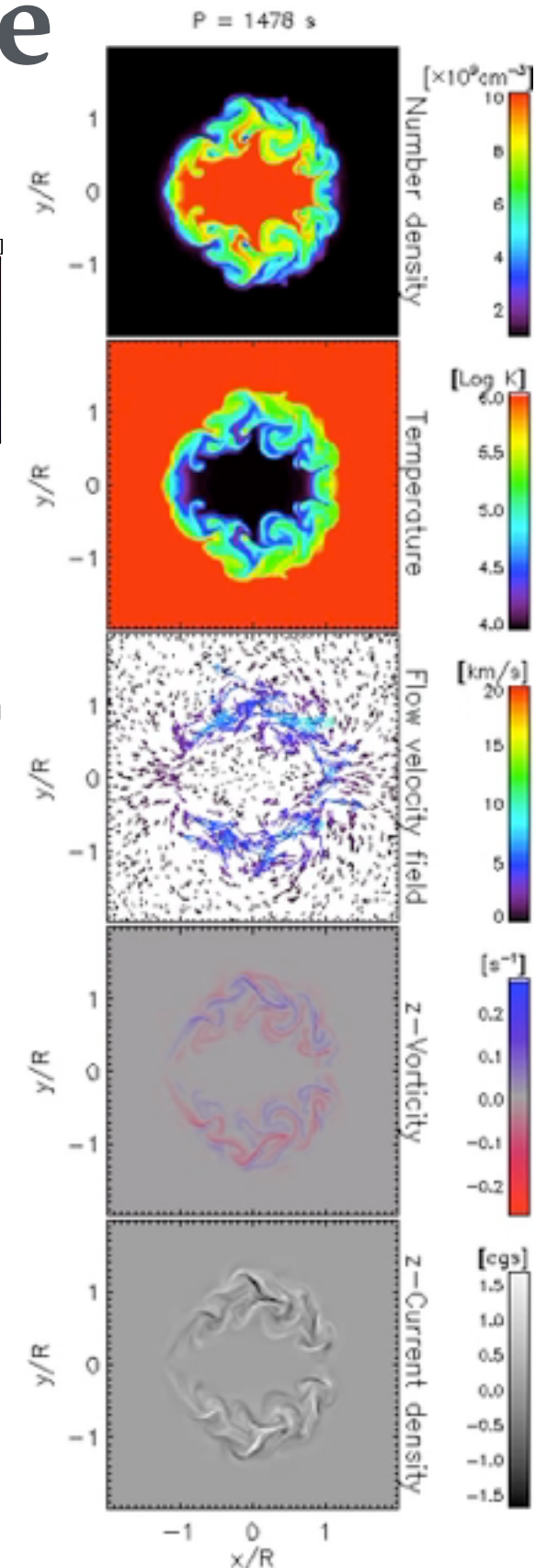
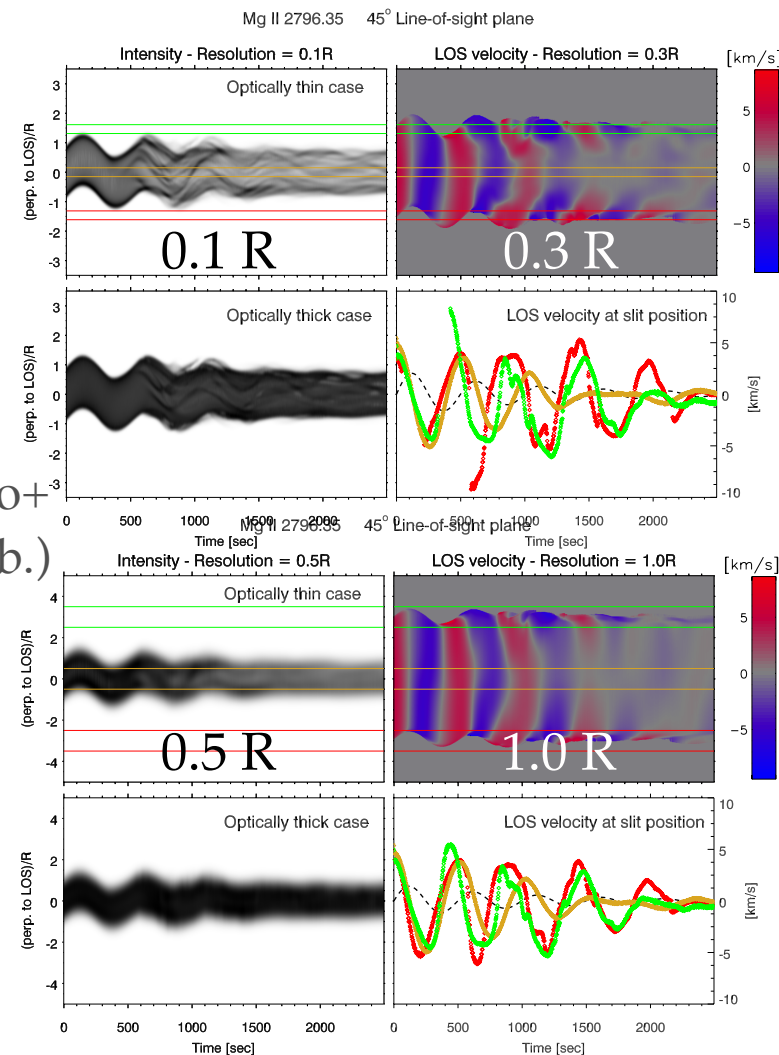
Possible with
SOT+IRIS

Antolin+
(2014)

Okamoto+
(2014,sub.)

Possible for
Solar-C

Prominence model

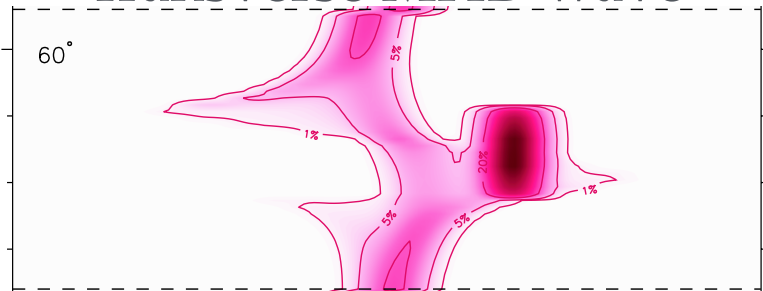


- ☑ Transverse motion observable with resolution of 0.2 R
- ☑ Spectroscopic resolution of 0.5 R resolves azimuthal flow
- ➡ Strand-like structure in intensity images (scales $\sim 0.1 R$)
- ➡ Phase difference between displacement in POS and LOS velocity due to higher propagation speeds of Alfvénic waves in resonant layer

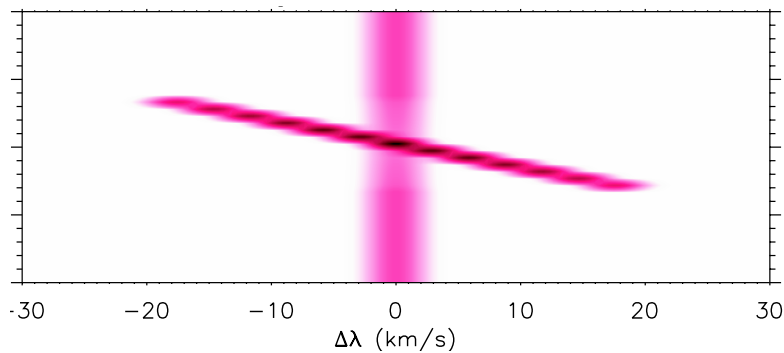
Importance of forward modelling: opacity effects

Assuming thick cylinder
(simplistic approach)

Transverse MHD wave



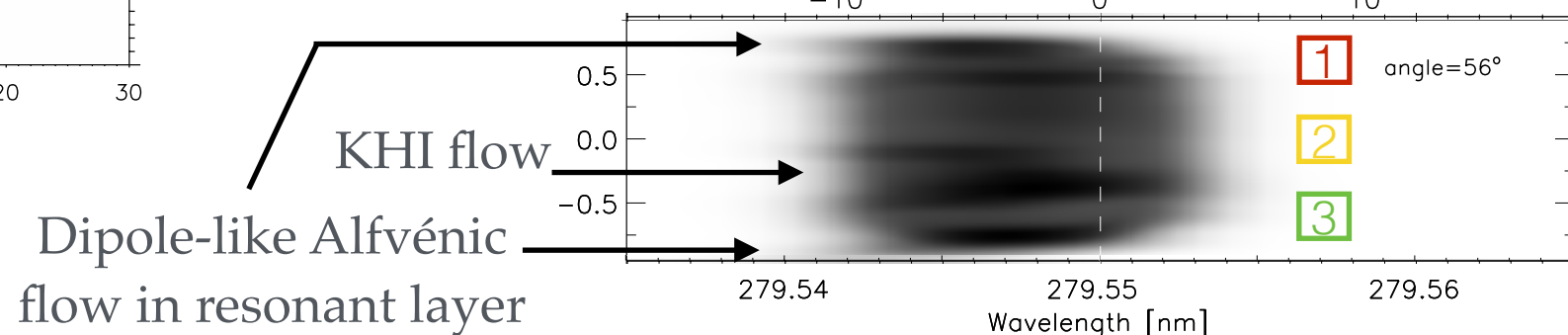
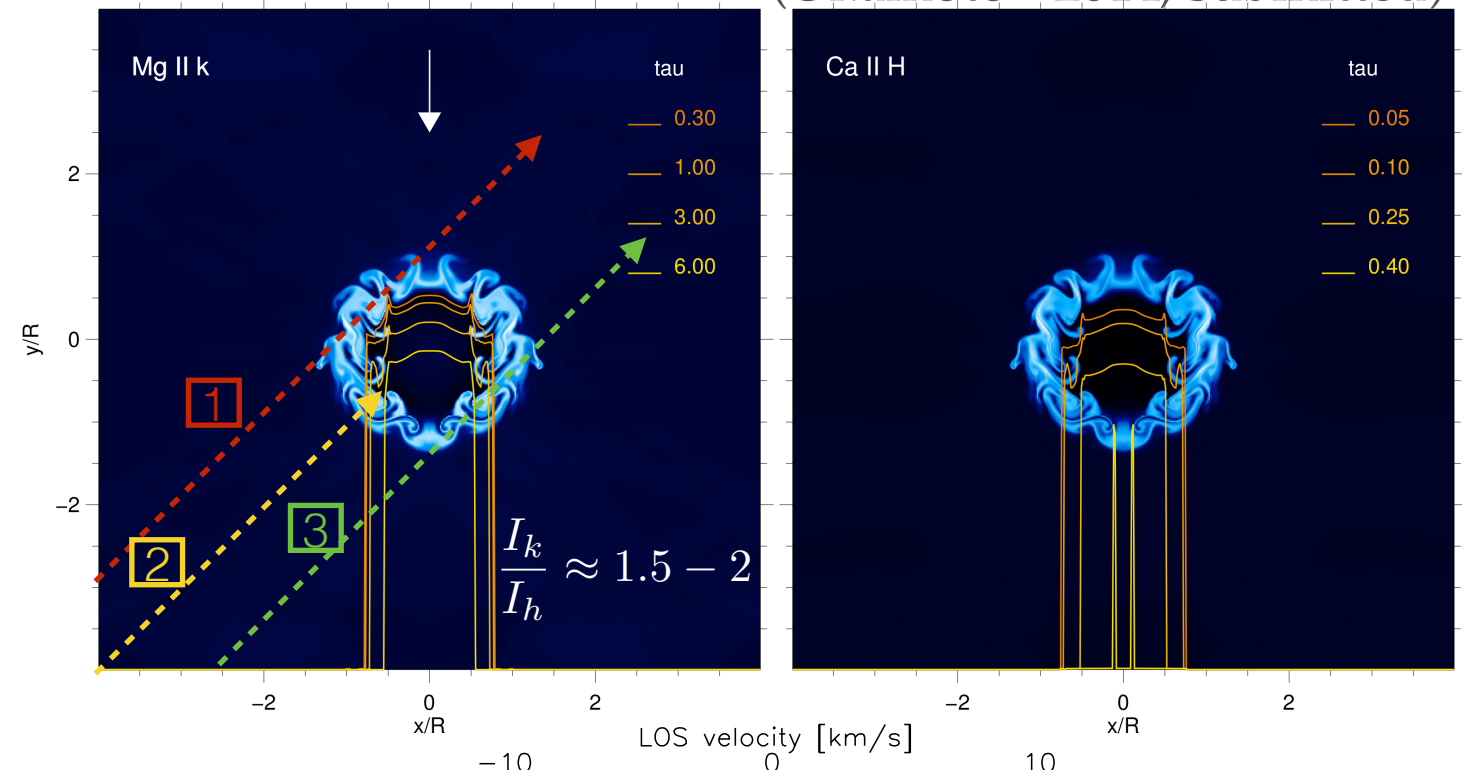
Torsional Alfvén wave



(Goossens+2014)

3D MHD simulations + RH

(Okamoto+ 2014, submitted)



- Emission comes mostly from ring, mostly optically thin. The prominence core is optically thick in Mg II h&k, not in Ca II H&K: **advantage of Mg II**
- Proper dynamics only recovered with proper forward modelling

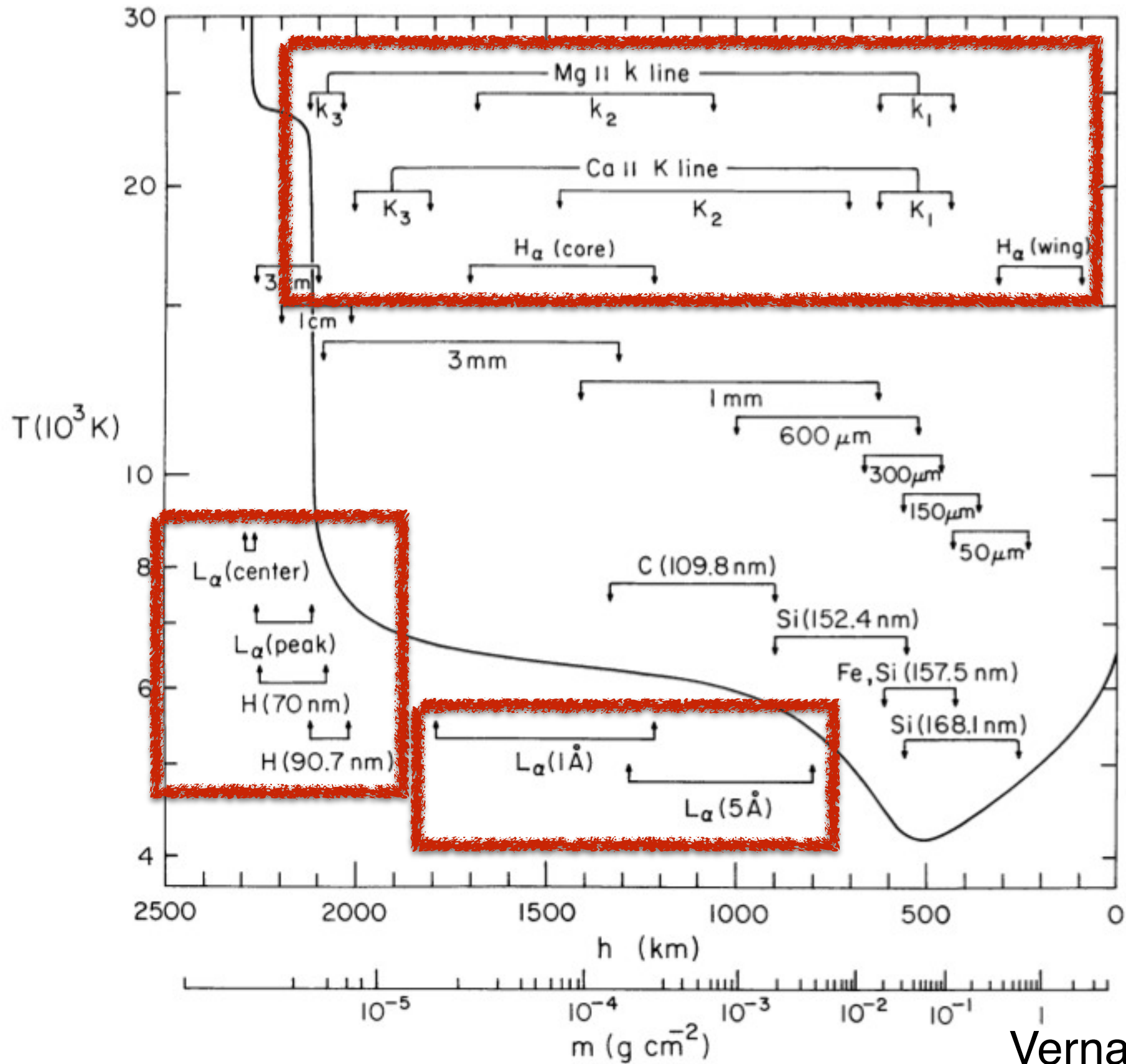
輻射流体計算を用いた 太陽彩層研究について

飯島陽久
東大・地惑

内容

- 数値計算におけるH, Ca, Mgのモデリング
- 輻射流体計算と観測との比較
- 現在の輻射流体計算における制限

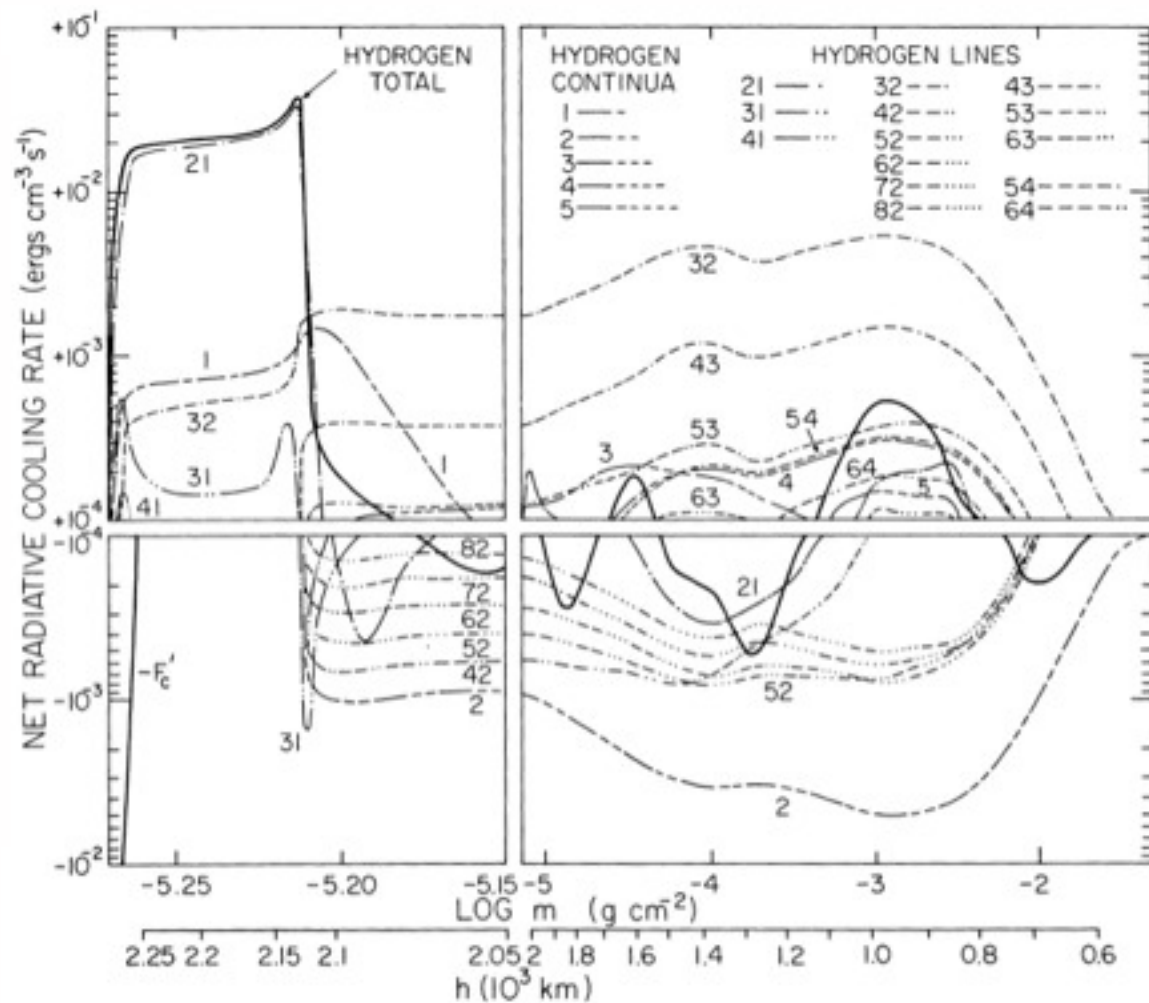
彩層のダイナミクスに関わる元素



水素の取り扱いについて

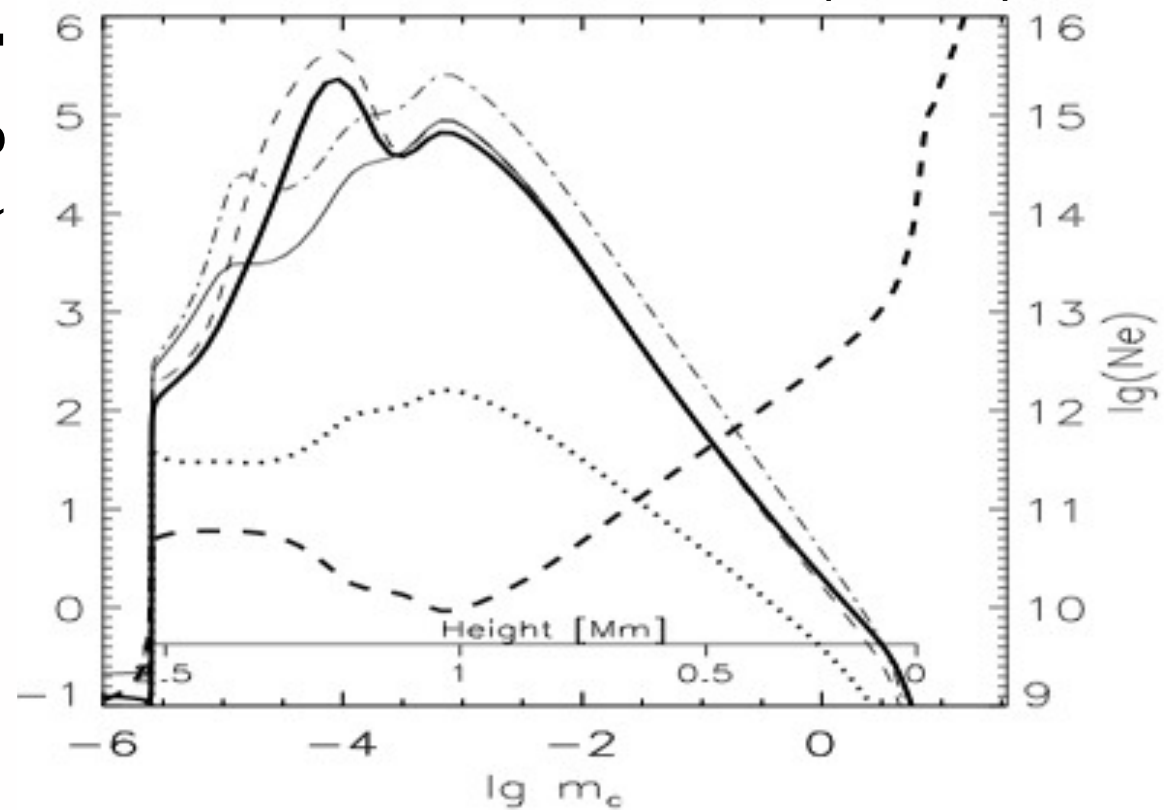
- 水素の電離平衡までの時間スケールは彩層で**数分から数時間**と長い。非平衡電離の効果はダイナミクスにもポストプロセスでの輻射輸送計算にも重要。

水素原子由来の輻射冷却率



電離平衡までの時間(log10[sec])

Carlsson & Stein (2002)

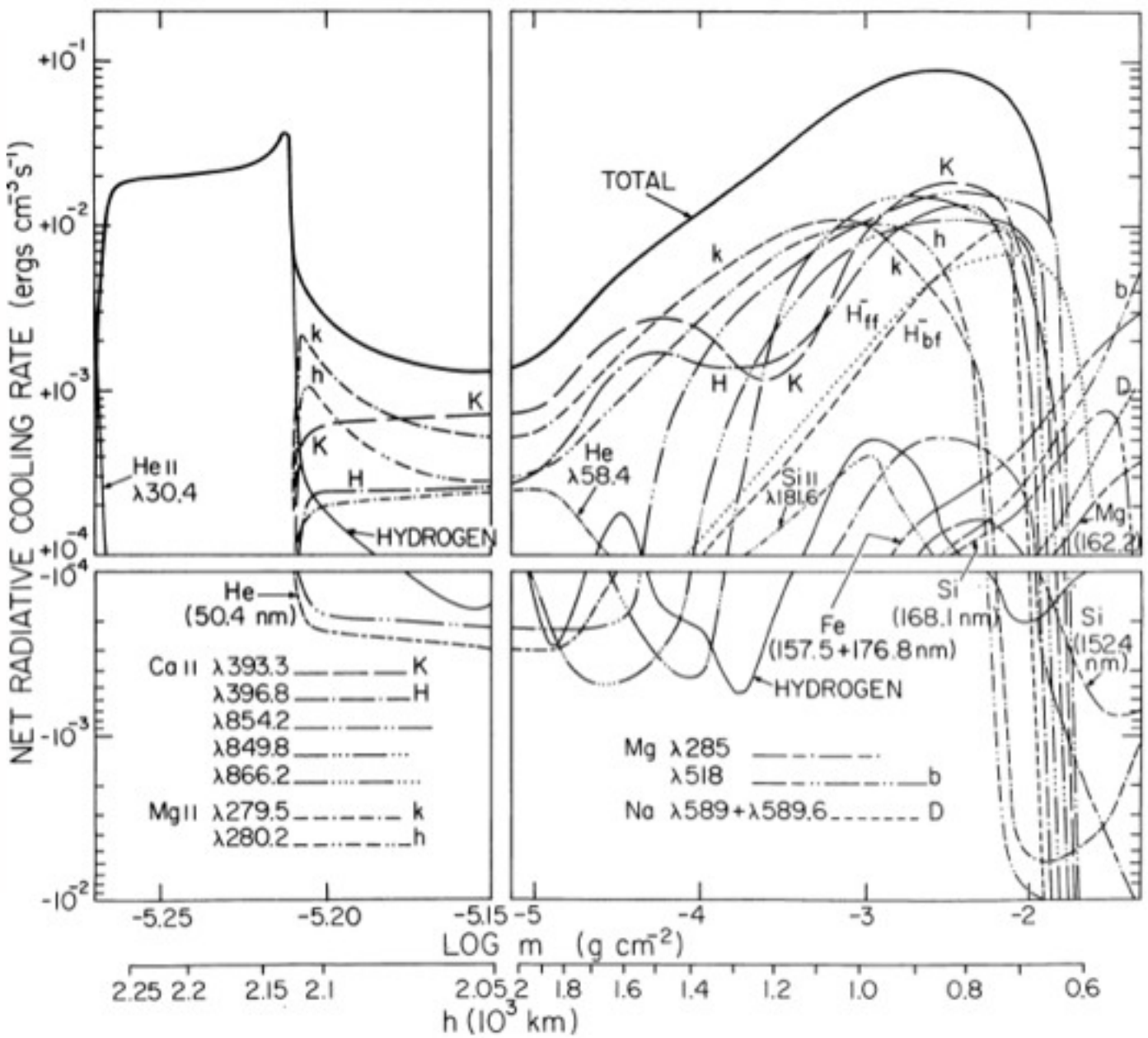


- H α やLyman線、コンティニューウム等は彩層における輻射冷却に大きく寄与する。

Vernazza et al. (1981)

Ca, Mgの取り扱いについて

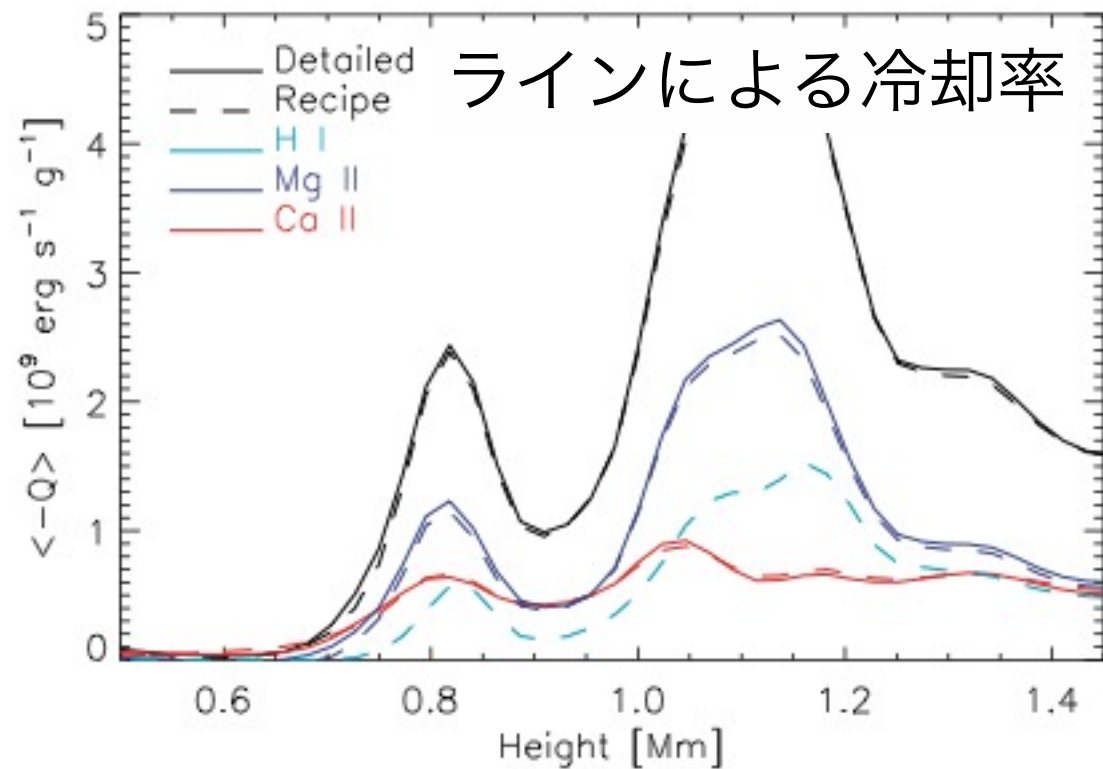
彩層における全輻射冷却率への寄与



Vernazza et al. (1981)

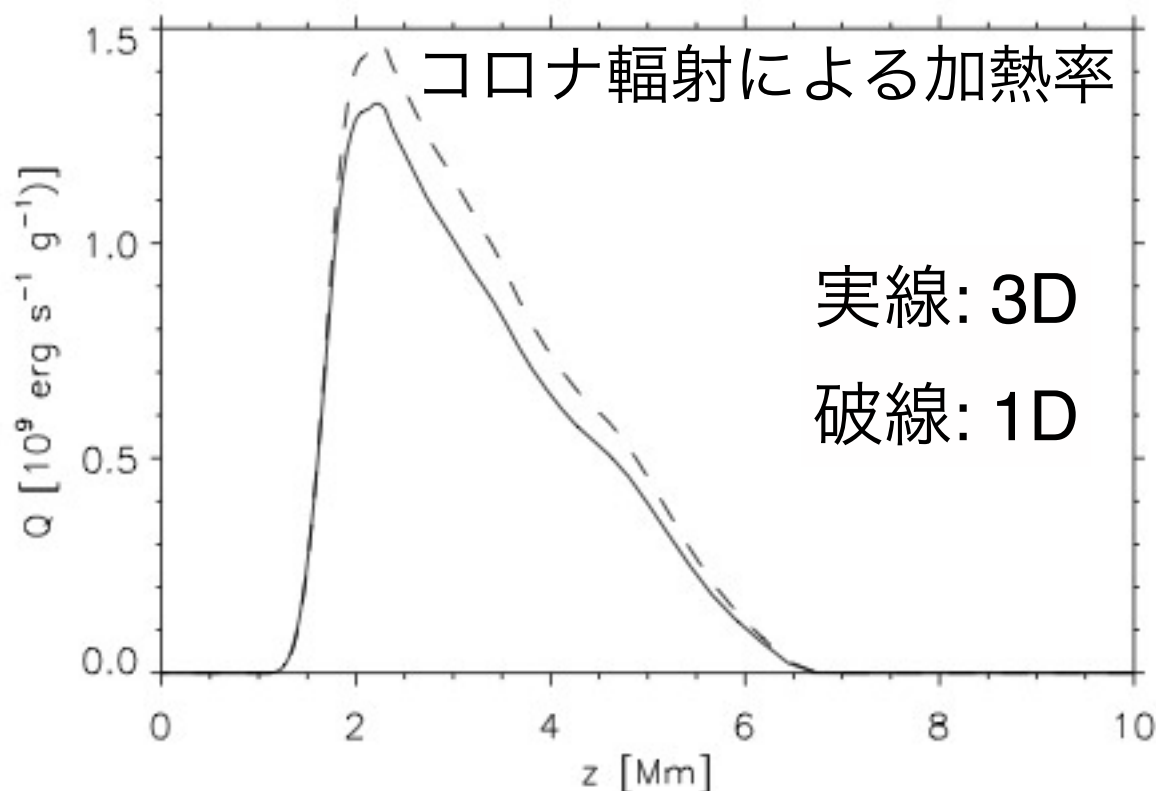
- CaやMgの取り扱いは状態方程式としてはそれほど大きな影響は無い。
- しかし、Ca II K&H、Mg II h&kは彩層の輻射冷却率において重要。
- ポストプロセスの輻射輸送計算においては(水素の非平衡電離が考慮されていれば)統計平衡がかなり良い近似になる(Wedemeyer-Bohm & Carlsson, 2012; Leenaarts et al., 2013a)。

彩層輻射冷却のモデル化(Carlsson & Leenaarts, 2012)



$$Q_X = -L_{X_m}(T) E_{X_m}(\tau) \frac{N_{X_m}(T)}{N_X} A_X \frac{N_H}{\rho} n_e \rho$$

- H, Mg, Caからの輻射冷却を温度、密度、光学的深さの関数としてモデル化。
- 静穏領域の1次元RHD計算からフィッティング。



$$Q_{\text{chr}}(z) = 2\pi \chi(z) \int_{-1}^1 I(z, \mu) d\mu = 4\pi \chi J_{1D},$$

- コロナから放射による彩層の加熱は1次元(カラムbyカラム)輻射輸送を解いてモデル化。
- 多次元性を考慮していないこと (局所的には正しくないこと)、放射「加熱」の近似精度等に問題点。

BIFROST

Hansteen 2004, Hansteen, Carlsson, Gudiksen 2007, Sykora, Hansteen, Carlsson 2008, Gudiksen et al 2011

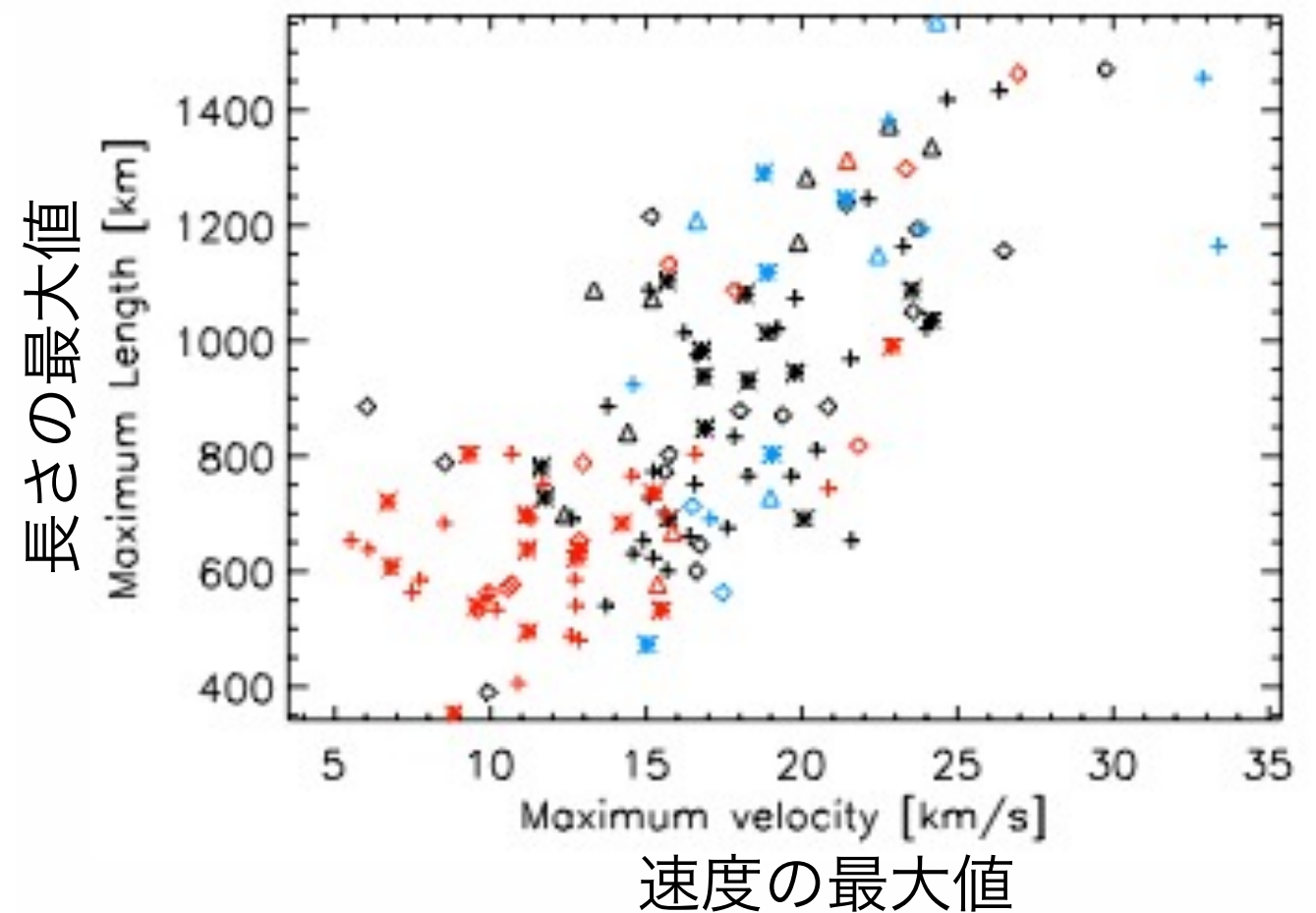
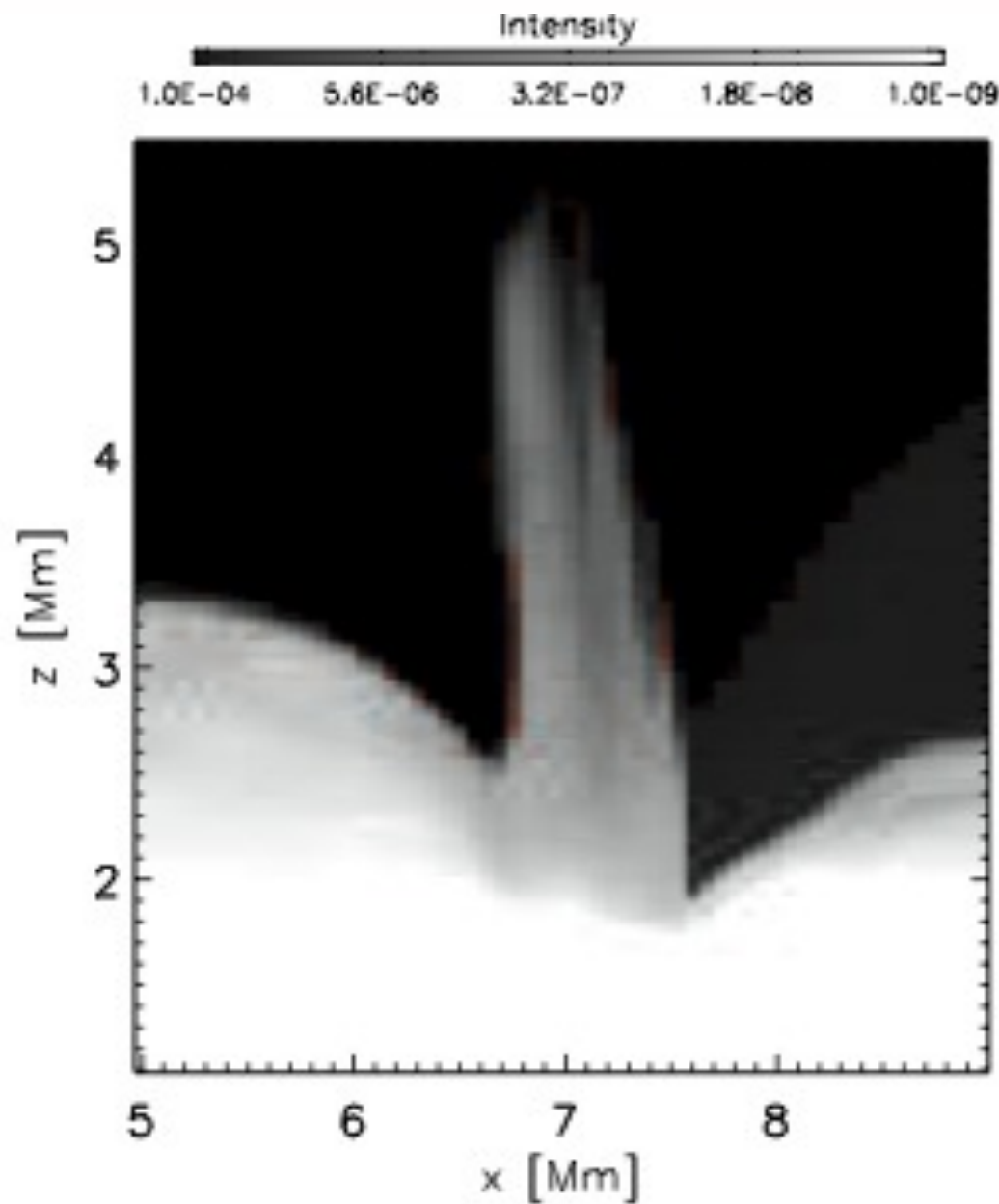
- 6th order scheme, with “artificial viscosity/diffusion”
- Open vertical boundaries, horizontally periodic
- Possible to introduce field through bottom boundary

- “Realistic” EOS
- Detailed radiative transfer along 48 rays
 - Multi group opacities (4 bins) with scattering
- NLTE radiative losses in the chromosphere, optically thin in corona

- Conduction along field lines
 - Operator split and solved by using multi grid method

- Time dependent Hydrogen ionization
- Generalized Ohm's Law

スピキュール(Martinez-Sykora et al., 2009/2013)

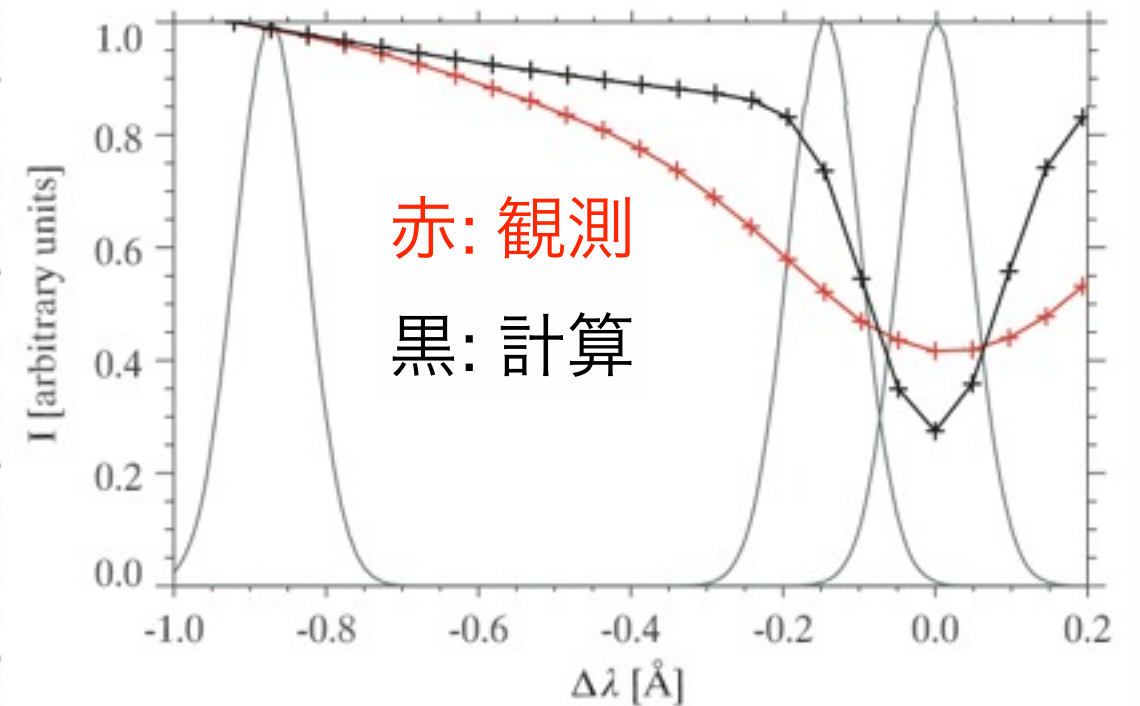
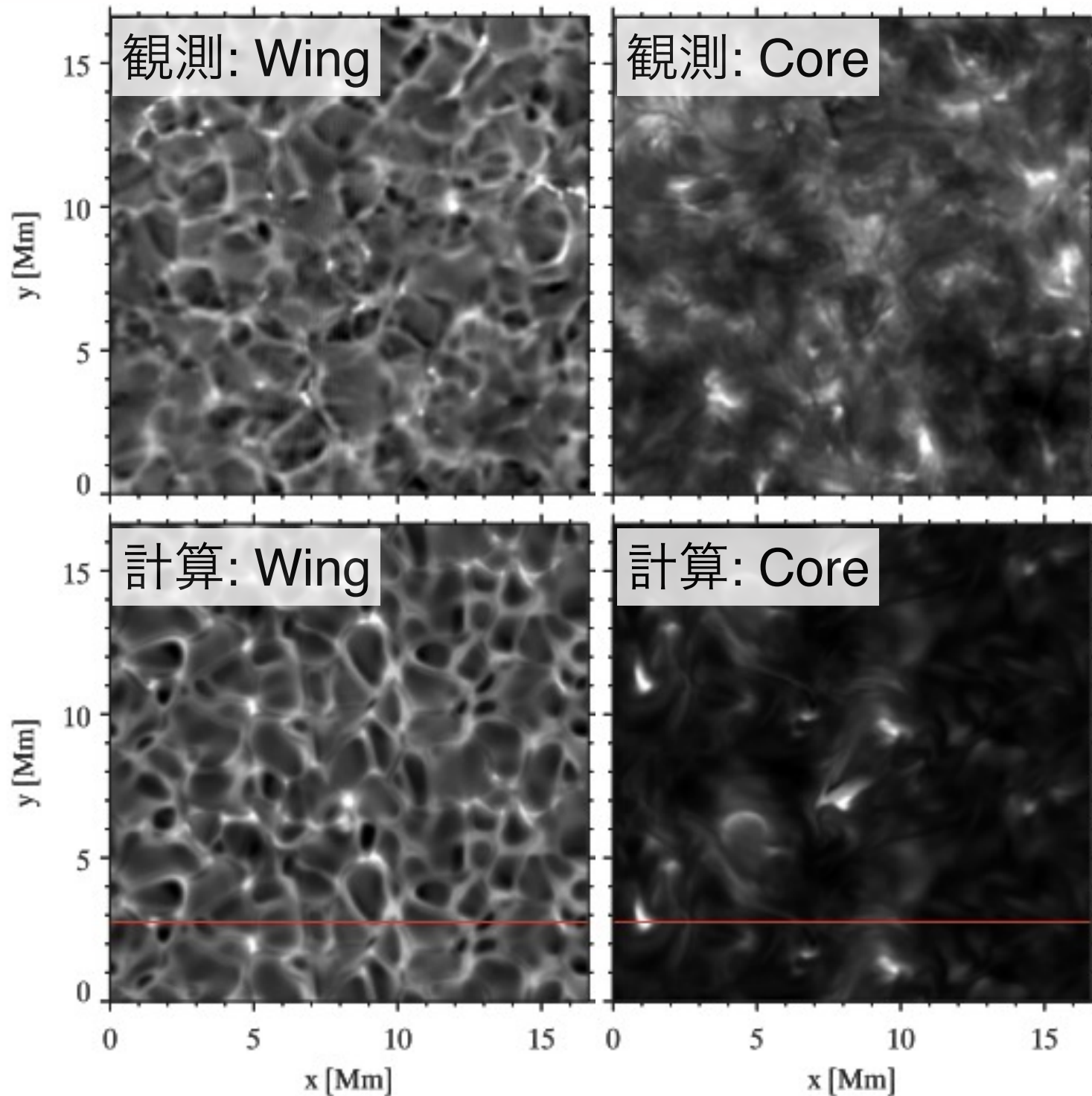


左図: 横から見たHa強度

右図: スピキュールの長さ
と速度の相関。

- **スピキュールが短い。**
- 左図のような背の高い構造は非常にまれ。また観測されるII型スピキュールより密度が小さい。

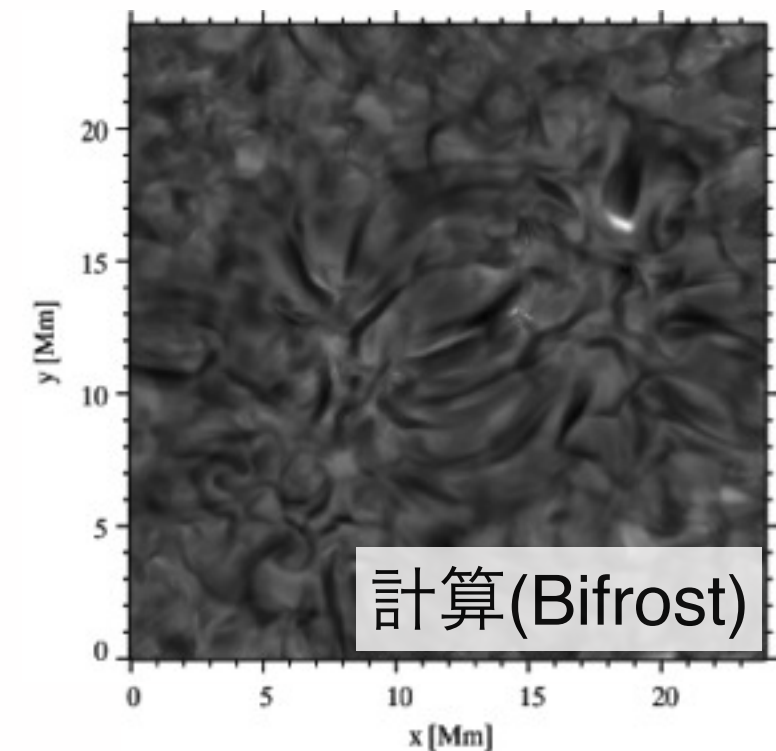
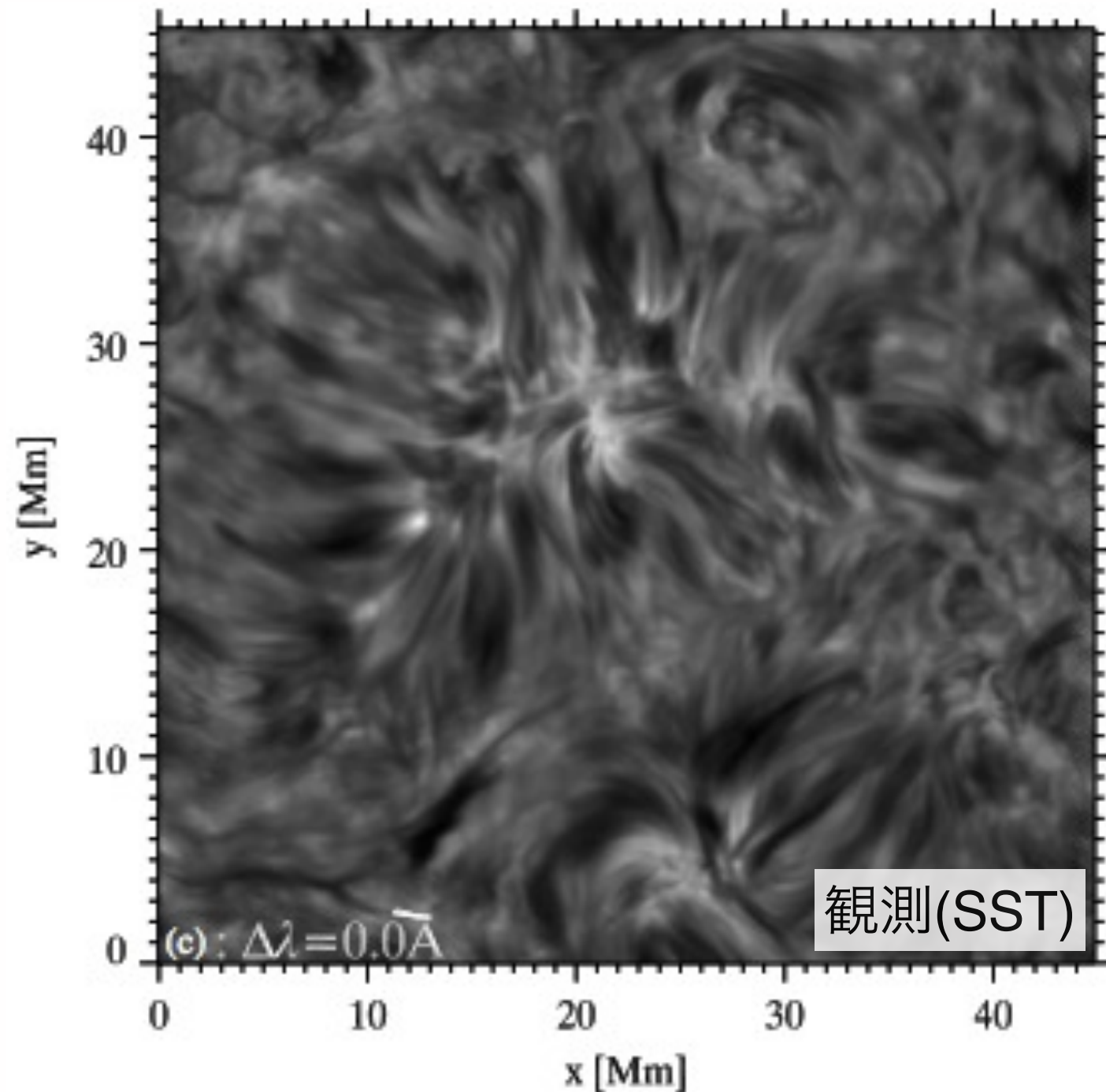
Ca II 854.2 nm スペクトル (Leenaarts et al., 2009)



- 空間平均した**ライン幅は観測より狭い**。グリッド数不足により解像されていない、細かいダイナミックな構造の存在を示唆。
- ラインウイングのイメージは観測とよく似ているが、ラインコアは細かい構造が消えている。

図: CRISPによる観測とBifrostによる数値計算の比較。

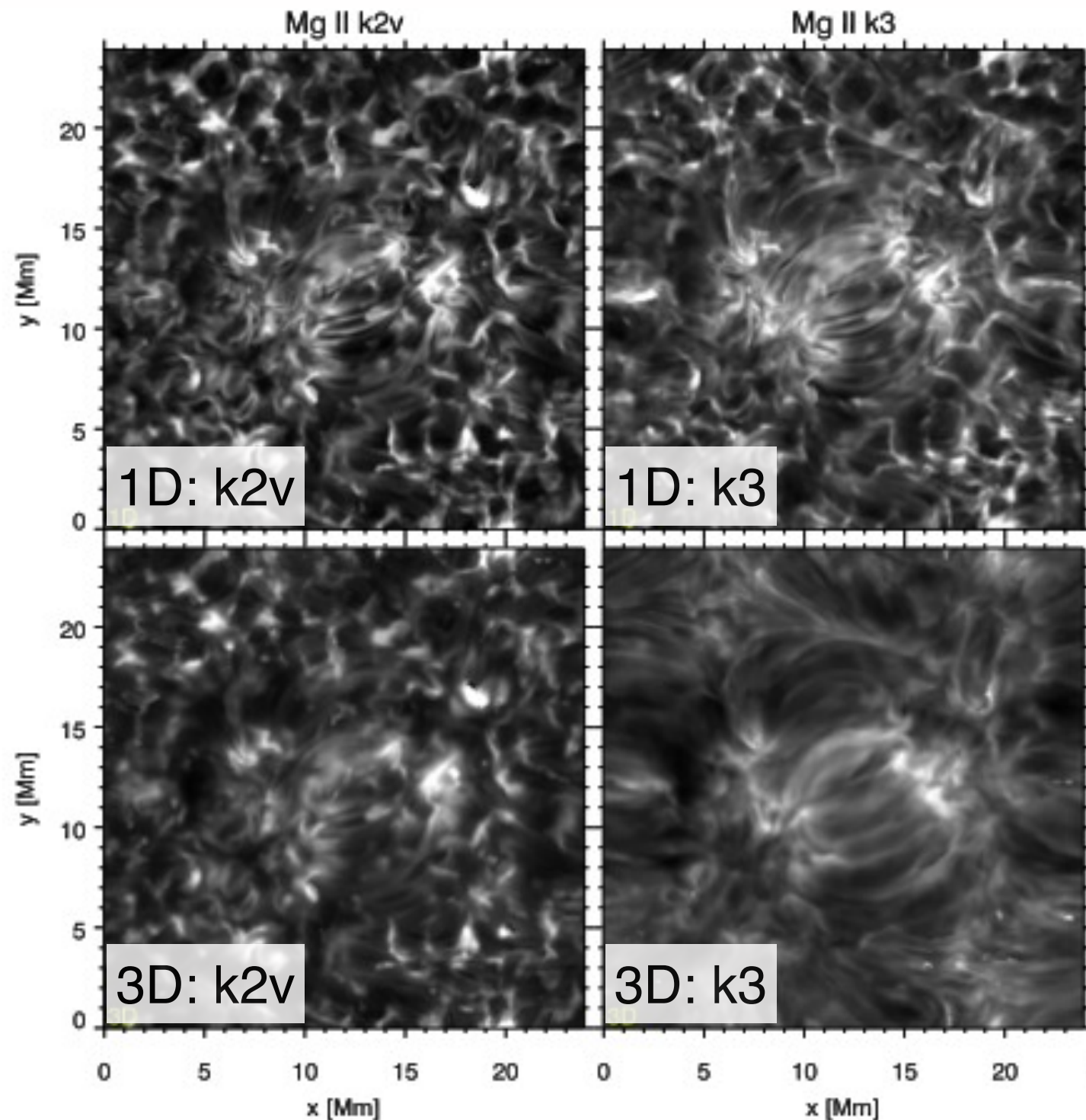
H α フィブリル様構造(Leenaarts et al., 2012)



- 3次元RMHD計算の**H α でフィブリル様構造**を初めて再現。
- 3次元散乱が重要(1次元輻射輸送計算では見えない)。
- フィブリルは観測より**まばらで長さも短い**。また、**ライン幅もずっと小さい**。

図: H α 線コアの強度。SST(左)とBifrostによる計算(右上)。

Mg II h&kの形成(Leenaarts et al., 2012/2013ab)



- 完全な3次元PRD計算はポストプロセスであっても難しい。
- k1, k2についてはカラムbyカラムの1次元PRD計算、k3に関しては散乱の効果が強いので3次元CRD計算が良い近似。
- モデル大気において水素の非平衡電離が考慮されていれば、得られたTとNeを用いて統計平衡を仮定してMg IIのラインを計算してもかなり正確。

図: CRDを仮定した場合の1Dと3Dの比較

計算コストの問題

- Bifrostコードの1コア辺りの性能は 3×10^4 grid*step/sec程度。
 - 例えば**500³グリッド**(24x24x15Mm³, 48x48x30km³)、時間幅が**0.01秒**の計算を**1太陽時間**行うには**3000コアで2ヶ月**かかる。相当大変な計算。
- グリッドサイズへの制限
 - 粒状斑の分解(~100km)、彩層のスケールハイトの分解(~30km)、ローカルダイナモ(~10km)、遷移層の厚みの分解(~数km)など。Ca II 8542等のライン幅不足(Leenaarts+, 2009)もグリッドサイズ不足が考えられる。
- 領域サイズへの制限
 - より大きい対流構造の影響を取り入れようとするすると下部境界を深くする必要がある。
- 磁場強度への制限
 - 黒点や活動領域付近の大気ではアルフベン速度が非常に早くなるため、シミュレーションの時間幅を強く制限される(10^{-3} 秒以下)。また、計算が壊れやすくなる。

輻射流体計算の課題

- 観測との比較
 - 静穏領域 Ca II 854.2 nm: ライン幅が狭い。**グリッド数不足**が推測される。
 - 静穏領域 H α : フィブリル様構造が再現され始めている。密度や長さなどは足りない。
 - 活動領域、Ca II H&K, Mg II h&k等: (多次元の) 詳細な比較研究なし。
- 計算コスト
 - すでに計算コストはかなり大きい。これ以上大きい計算や活動領域の計算は難しい。
- 考慮されていない物理過程
 - Hall効果、Ambipolar拡散
 - Ca, Mg, Heの非平衡電離
 - 3次元効果を取り入れた彩層の輻射冷却率

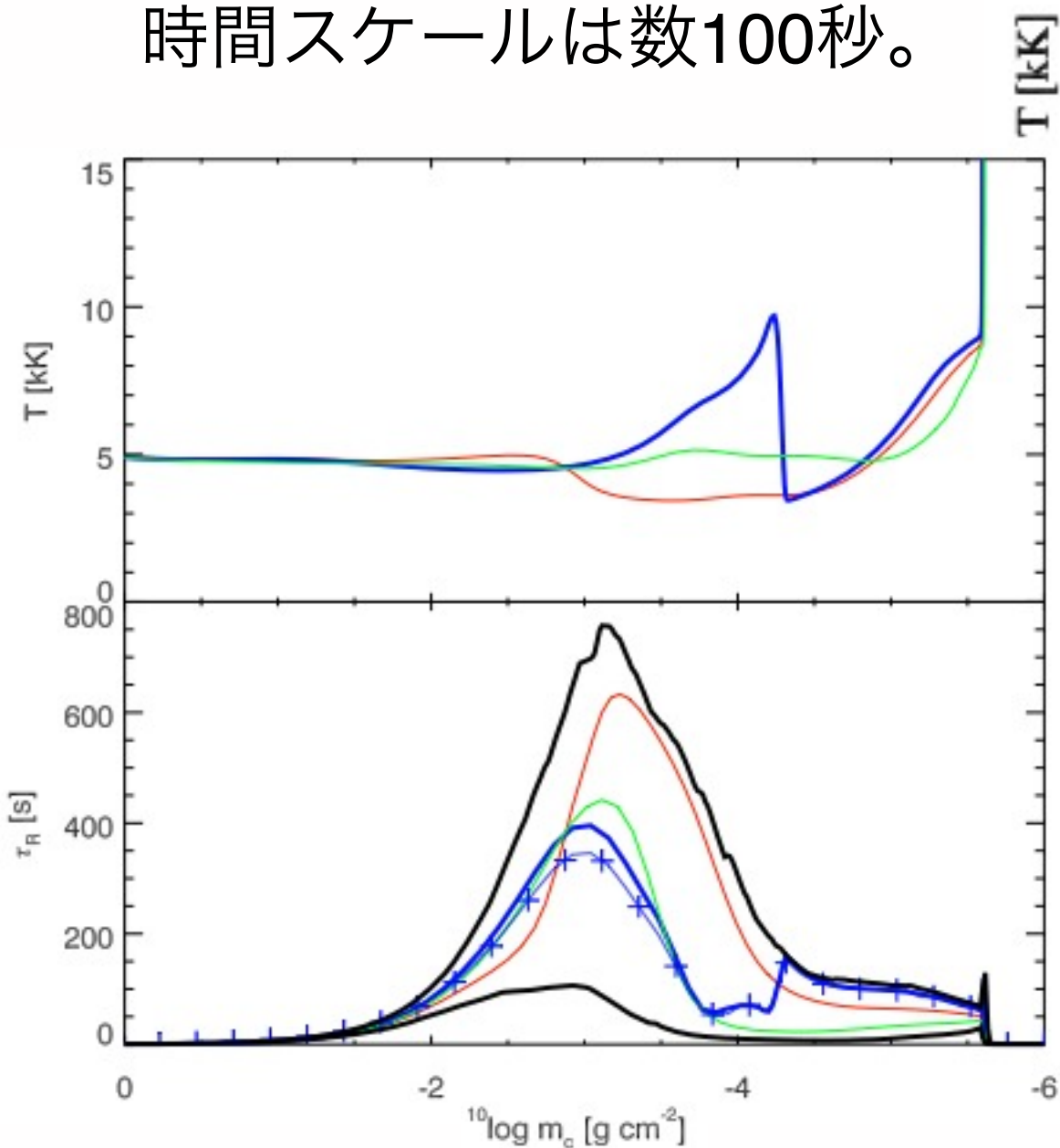
Appendix

数値計算による彩層スペクトル研究

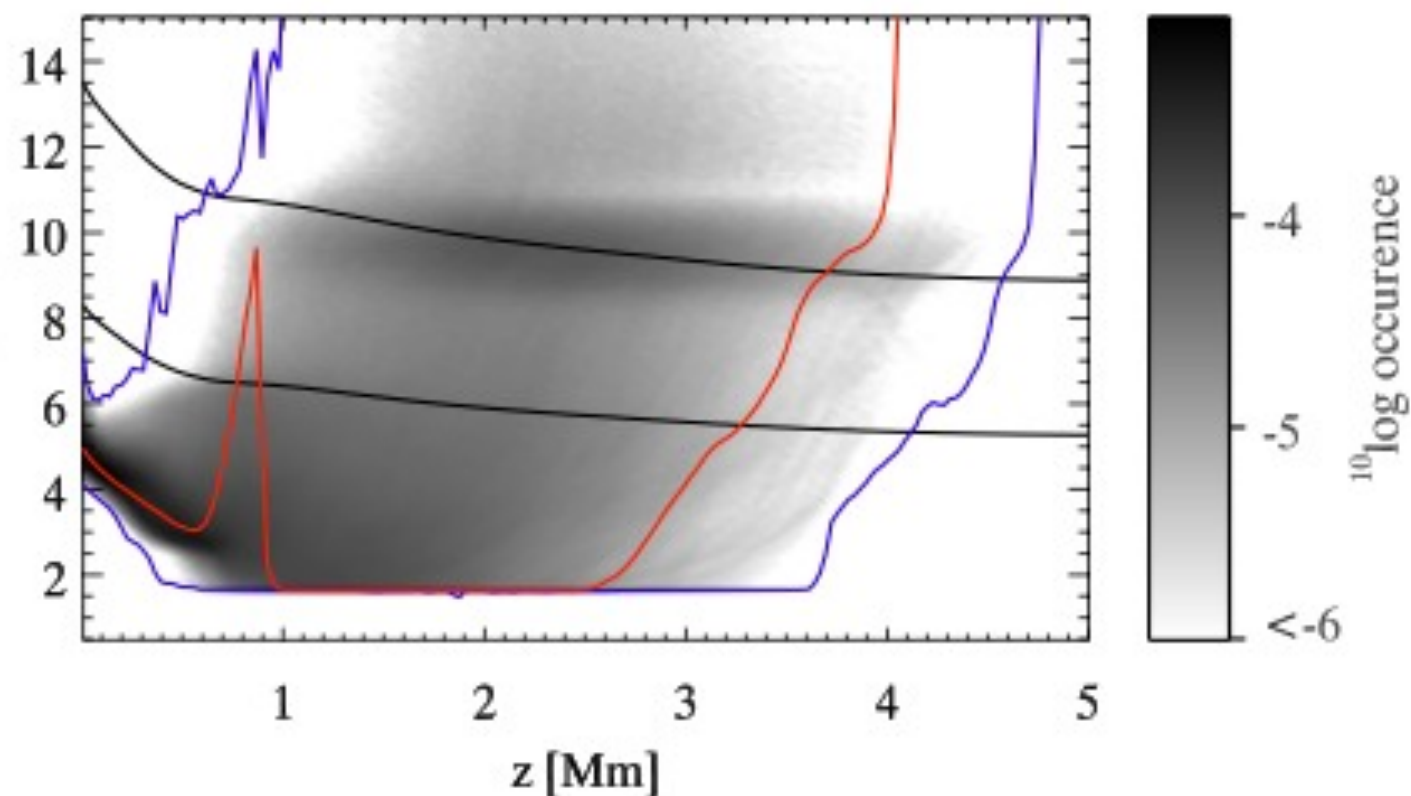
- Leenaarts et al., 2009: Ca II IRT (SSTとの比較あり)
 - 注：モデル大気はLTE(水素の非平衡電離は考慮されていない)。
- Leenaarts et al., 2012: H α (比較あり)
- Leenaarts et al., 2013ab: Mg II h&k
- Cruz-Rodriguez et al., 2013: Ca II IRT (SSTとの比較あり)
 - 彩層加熱とCa II 8542
- Riethmuller et al., 2013: Ca II H, Mg II k (Sunriseの観測。Mg II kは計算との比較あり)
 - Leenaarts+13と比較。ただし、SuFIフィルターの幅が大きいため詳細な比較には至っていない。
- Leenaarts et al., 2014: Ca II IRT
 - 同位体の効果

未考慮の物理過程: ヘリウムの非平衡電離

- ヘリウムの電離平衡までの時間スケールは数100秒。



Golding et al. (2014)

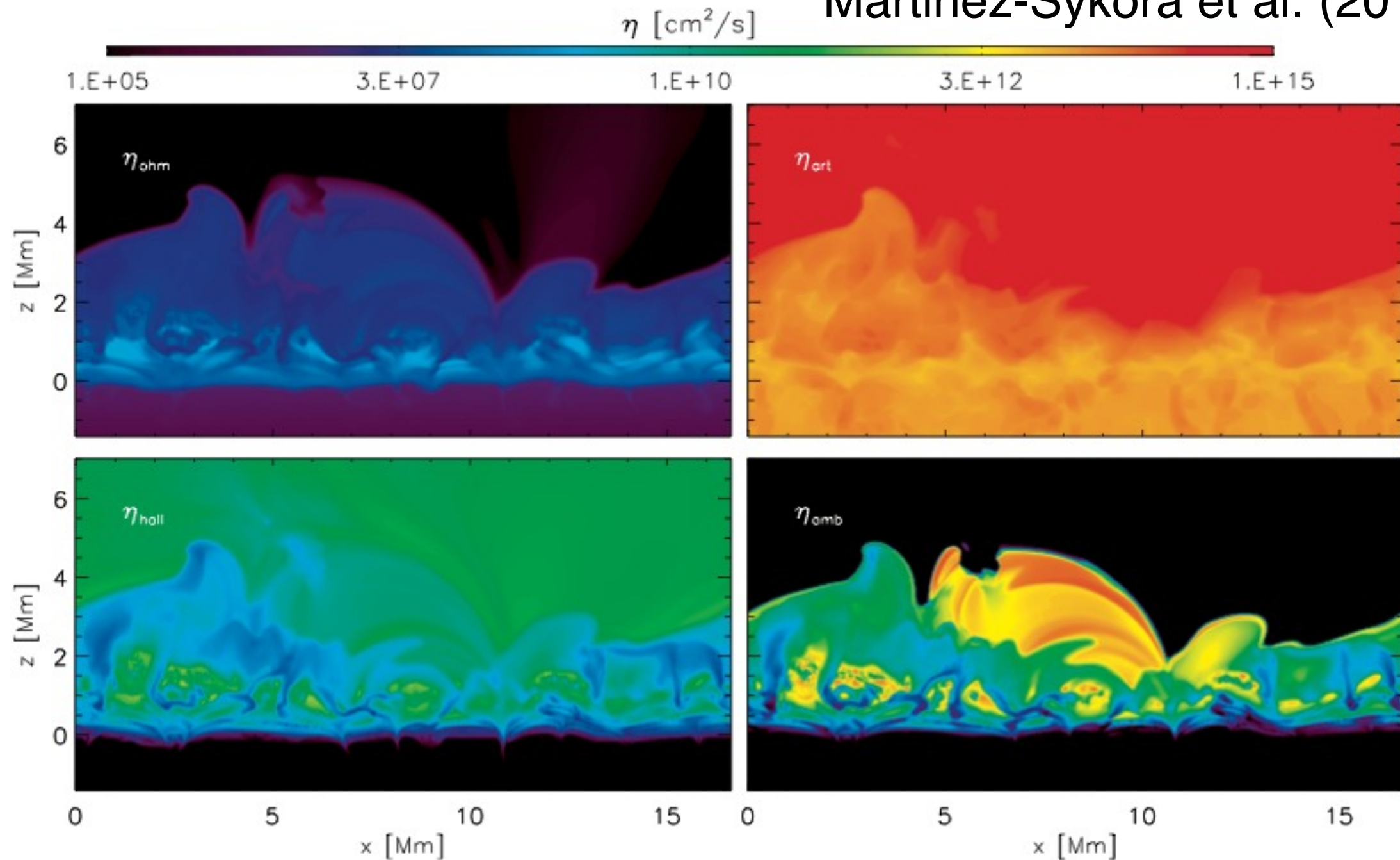


Leenaarts et al. (2011)

- 1万度付近でHe IIがHe Iに変わる時に潜熱を開放するため、温度が変わりにくくなる。
- この効果は電離非平衡を取り入れると小さくなる。

未考慮の物理過程: Hall効果, Ambipolar拡散

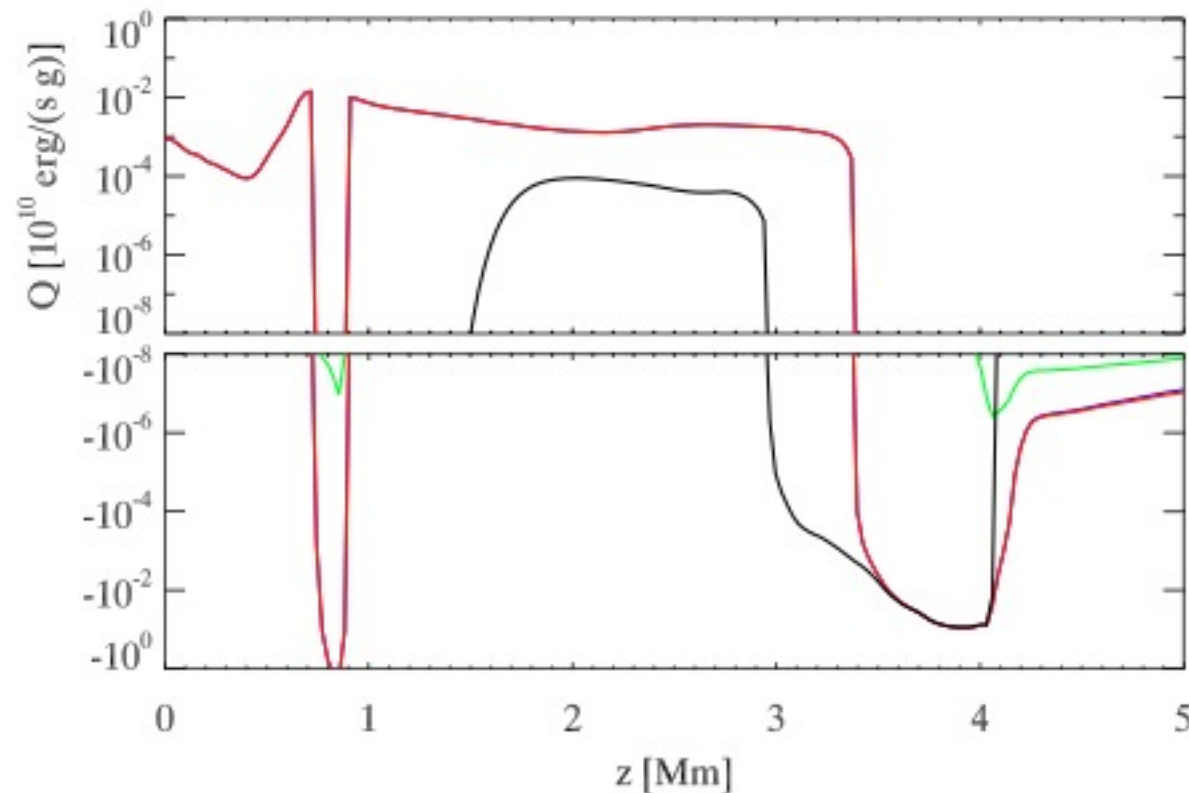
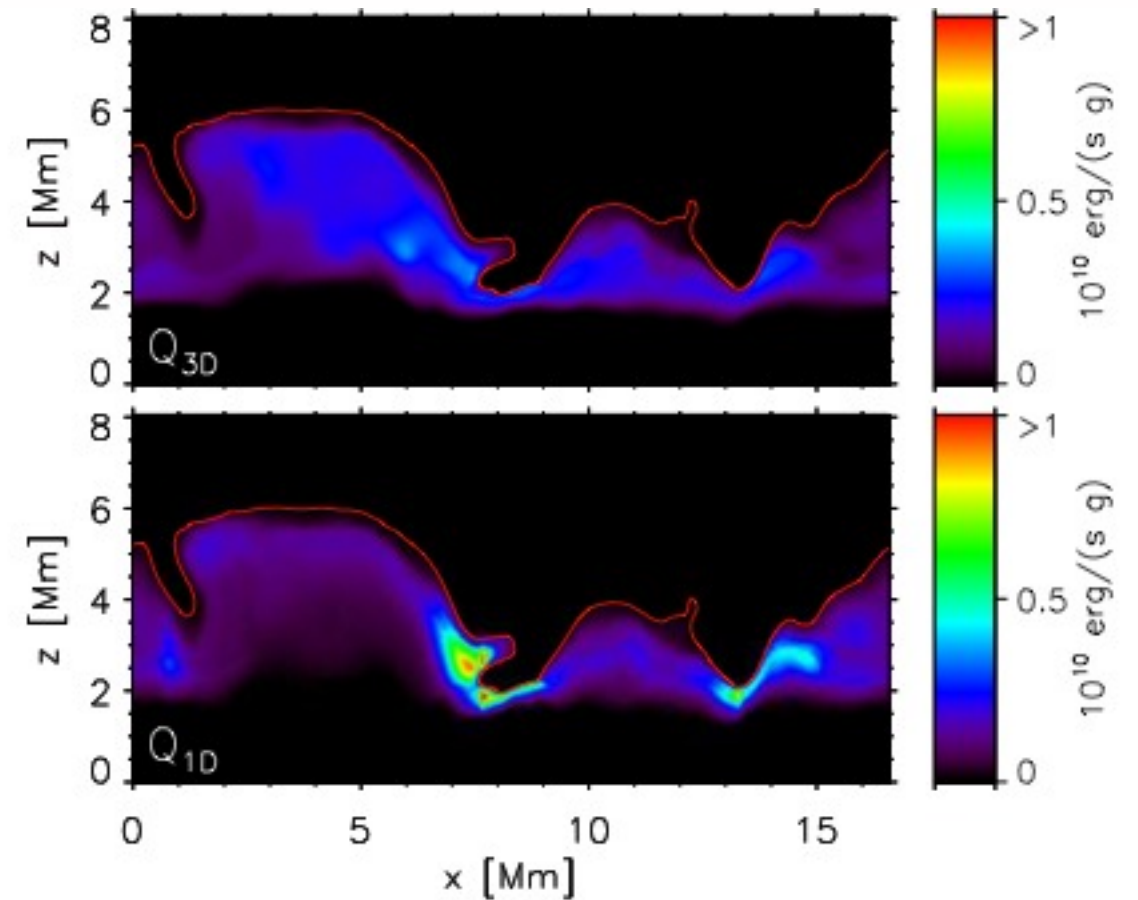
Martinez-Sykora et al. (2012)



- 磁場が強く温度が低い場所で、磁場のダイナミクスやエネルギー的に重要になる。

未考慮の物理過程: 多次元性を取り入れた輻射冷却率

- Escape probabilityの形でモデル化されたMg II線の輻射冷却は、平均成層は良く再現するが、局所的にはかなり差異がある。
- また、輻射による加熱についてはモデリングが難しく、考慮されていない。



- 1次元でモデル化されたコロナからの輻射の吸収も、3次元の場合はよりスムーズな加熱になっている。