「ひので」極端紫外線分光観測による磁気リコネクション中の電子加熱と双方向リコネクションジェットの解明

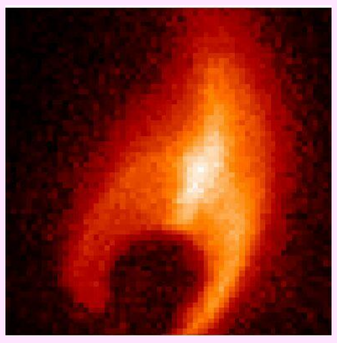
西塚直人(ISAS/JAXA)、原弘久(NAOJ)、David Brooks (George Mason University; ISAS駐在)

Abstract.

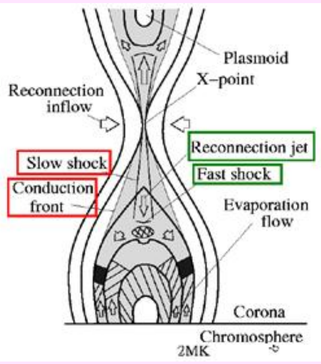
「ひので」の極端紫外線望遠鏡により、太陽フレア中の磁気リコネクションの多波長分光観測が可能になった。これにより磁気リコネクションの速度場や加熱を定量的に直接観測で確かめることができる。ここでは2011年2月14日のイベントの解析結果について報告する。このフレアはひので衛星の3望遠鏡で同時観測され、多波長・多温度のダイナミクスを調べることができる。フレアのカスプ構造中では、噴出現象や電子加熱(10^7 K)、硬X線放射、リコネクション双方向ジェット(~100km/s)に彩層蒸発流(~400 km/s)などの時間発展と空間構造が、初めて「ひので」の分光観測により明らかになった。

1. はじめに

90年代の「ようこう」軟X線観測により、多様な太陽磁気活動が明らかになってきた。特に「ようこう」による太陽フレアのカスプ構造(ろうそくの炎のような形状)の観測は、それまで実験室や理論的に考えられてきた磁気リコネクションが、エネルギー解放の際に起きていることを明らかにした。このカスプ構造は、磁気リコネクションに伴うスローショックの存在を示唆しており、この存在の証明は、太陽物理だけでなく地球磁気圏物理やプラズマ物理にとっても非常に重要である。スローショックの存在は、リコネクションX点を通らないプラズマの加熱と加速の役割を果たし、一方でインフローとアウトフローの不連続面、かつ密度・圧力の不連続面として観測されると予測される。本研究では、「ひので」による分光観測により、フレア近傍の速度場と温度・密度を直接計測することによって、フレアの物理機構の解明を試みる。



「ようこう」によるカスプ型フレアの軟X線観測 [Tsuneta 1992]

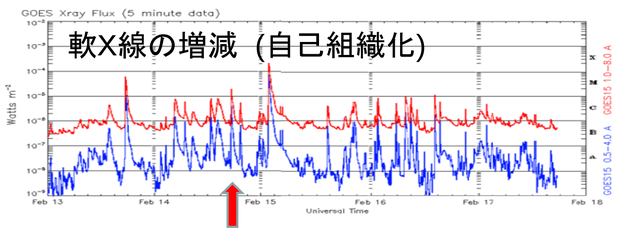


スローショックでの加速と加熱 [Shimada, Terasawa & Jokipii 1997, Tsuneta & Naito 1997]

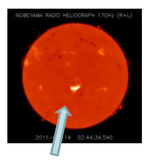
2. 解析イベントの選定

継続的な太陽活動:
活動領域NOAA11158 (2011年2月13-17日)

フレア活動度(軟X線放射量)の時間変化
(GOES Xクラス:1, Mクラス:2, Cクラス:14)



フレアの位置



NOAA11158
野辺山ヘリオグ

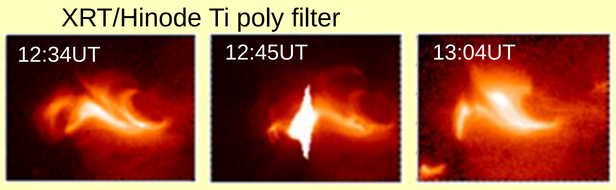
●データセット

- EIS/Hinode 紫外線分光
- XRT/Hinode 軟X線撮像
- AIA/SDO 紫外線撮像
- RHESSI 硬X線

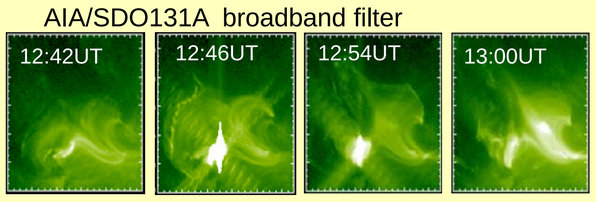
3. 噴出現象とカスプ構造の形成

着目している領域は小規模なフレアを繰り返している領域である。硬X線放射のピーク時(インパルシブ時)の30分前(12:00UT)でも加熱された2重のループ構造が軟X線で観測されている。ここで、左下から磁気ループが成長して大きくなり、12:45UTでフレアを起こしている(1つ目の硬X線ピークに対応)。さらにその領域からは紫外線では散乱光に加えて左上方向への高速の噴出現象が確認された(下図SDO131A filter参照)。さらにこれをきっかけとして数分後から隣に薄い高温のカスプ構造が形成され(下図SDO12:54UT)、さらに彩層蒸発高温プラズマ流によって13:00UT頃にはやや縮んだ明るいカスプ構造が、13:10UT以降はポストフレアループとして観測されるように変化していく様子が観測された。

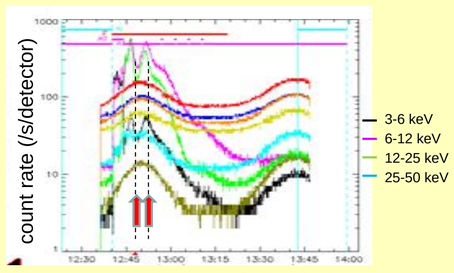
XRT/Hinode Ti poly filter



AIA/SDO131A broadband filter



RHESSI(硬X線放射量)の時間変動

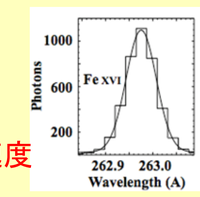


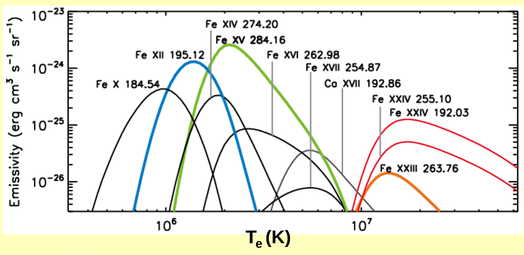
(↑)12:45UT、12:47UTにダブルピーク

4. 電子温度とドップラー速度計測

「ひので」極端紫外線分光装置により、カスプ型フレアの分光観測に成功した。インパルシブ時にはFe23階/22階電離の超高温(1千万度以上) の輝線が観測された。

輝線スペクトルの示す物理量
①面積:強度(密度)
②波長方向のずれ:
Doppler 速度
③ライン幅:
イオン温度+非熱的速度
(+装置幅)
④何階電離しているか:
電子温度(ただし電離平衡を仮定)

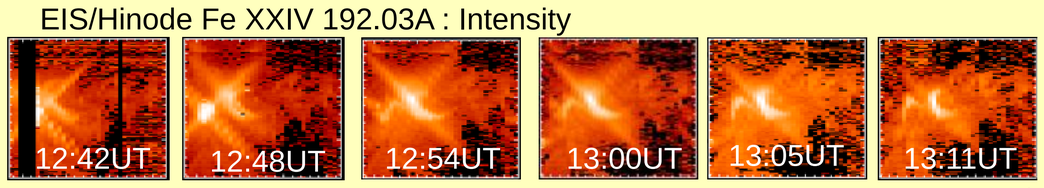




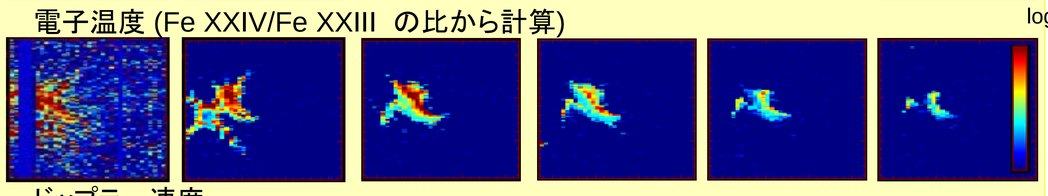
電離度と輝線量の温度依存性

輝線強度(比)、輝線中心部のシフト、輝線の広がりから電子温度、速度場、非熱的速度を求め比較すると以下のようになる。

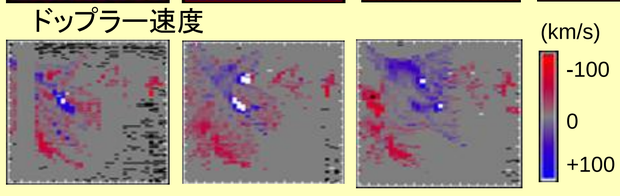
EIS/Hinode Fe XXIV 192.03A : Intensity



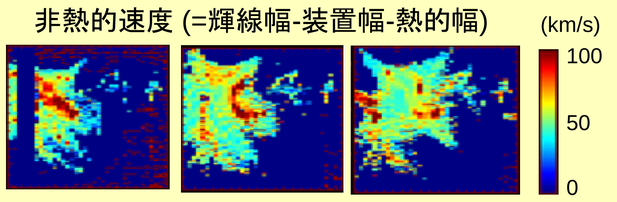
電子温度 (Fe XXIV/Fe XXIII の比から計算)



ドップラー速度



非熱的速度 (=輝線幅-装置幅-熱的幅)

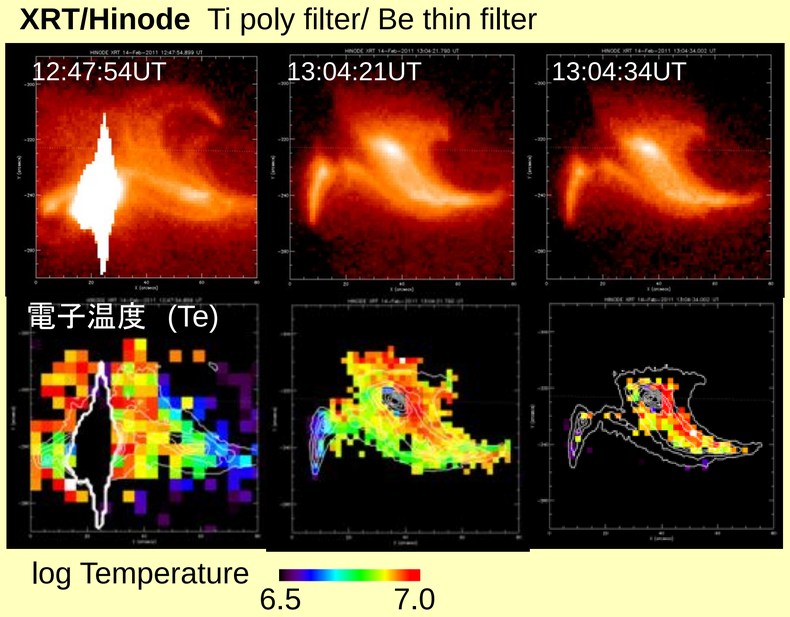


- **電子温度**: Impulsive phase で $T_e > 2\times10^7$ K まで加熱。カスプの中心部分ほど熱い。(outflow regionに対応?) decay phaseで冷却
- **Doppler速度**、カスプの先端、およびループの足元でblueshift
- **非熱的速度**、Doppler速度の大きな足元、カスプ中心部で増幅

5. XRT/Hinode filter比法による電子温度の推定(別方法)

分光観測による方法とは独立に、「ひので」軟X線望遠鏡XRTによる2フィルター観測から電子温度を見積もることができる。この結果と分光観測による電子温度とを比較する。

XRT/Hinode Ti poly filter/ Be thin filter



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_1(T)\cdot EM}{f_2(T)\cdot EM} = f_{12}(T)$$

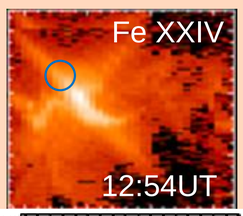
電子温度 $T_e > 10^7$ K 加熱
電子密度 $n_e=10^{12}$ cm^{-3}
Eth= 10^27 erg

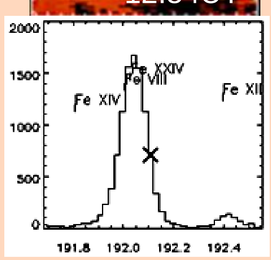
: **Filter ratio method → T_e → EM → n_e**

XRTのフィルター比法で求めた電子温度も、EIS分光観測(輝線比)から求めた電子温度もだいたい同程度であり、カスプ構造内で温度が$10^{7.0}$-$10^{7.2}$ Kである。

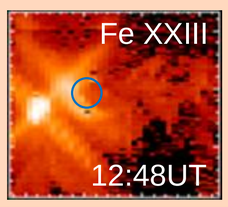
12:47UTのインパルシブ時が一番高温で、減衰時には高温領域は小さくなっている。カスプの外縁(スローショック)部分が一番高温かどうかは、はっきりとはわからない。カスプ中心部分の黒い箇所は、データがサチってしまっている箇所で除外している。

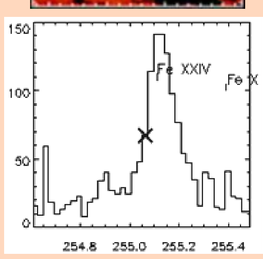
6. 双方向リコネクションジェットと彩層蒸発ジェット





ループトップUpflow
(Blue asymmetry)

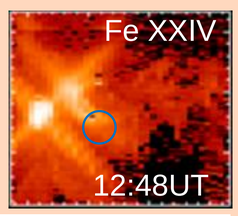


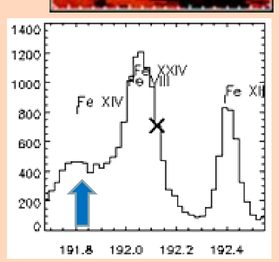


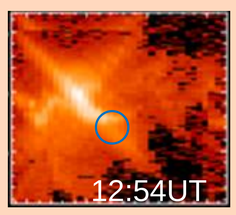
ループトップdownflow
(Red asymmetry)

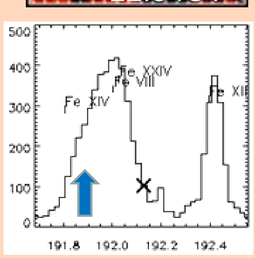
輝線図と輝線スペクトル(○印)

Double Gaussian成分:
~100 km/s









彩層蒸発ジェットの時間発展
ループ足元のupflow >400km/s

カスプループ頂上付近では、Fe XXIVとFe XXIIIとでそれぞれ上向きジェットと下向きジェット(~100km/s)が観測された。これら双方向ジェットはアルフヴェン速度よりもは小さいが、X点からのリコネクション・ジェットを観測している可能性がある。またループ足元からは彩層蒸発が観測され、400km/s以上(~音速程度)の高速プラズマ流の時間変化を捉えることに成功した。彩層蒸発は非常に強いBlueshiftを示している(右上図)。