

# 太陽多波長フレアデータ解析研究会 NSRO-CDAW10

増田 智 (名大STE研)

Group 1:

ループトップ電波源(2周波)の位置(高度)の時間変化 (イベント解析)

Group 3:

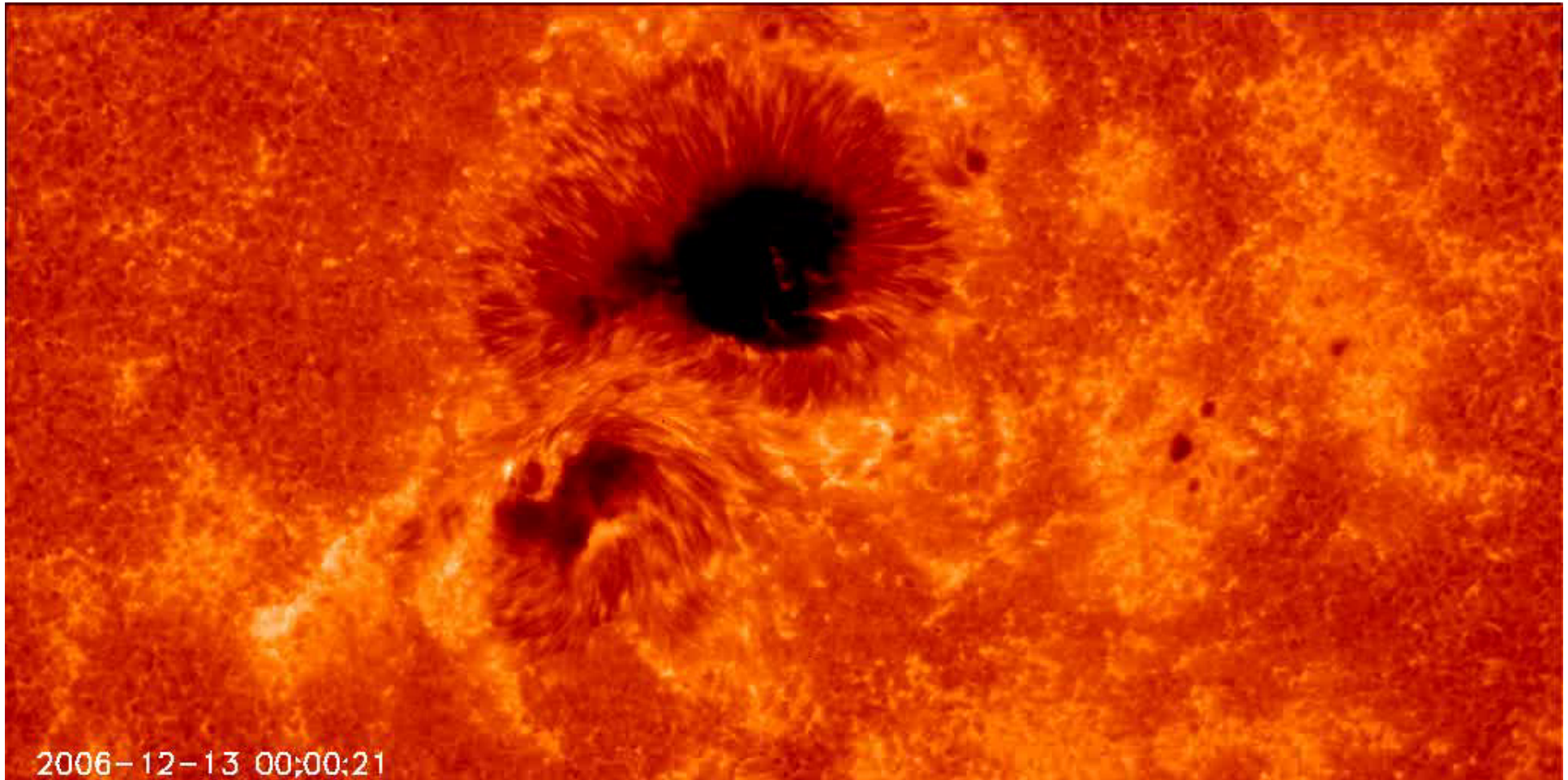
ピーク時のループトップ電波源(2周波)の高さ (統計解析)

## 動機

太陽フレアにおける粒子加速モデルに関して、観測的に強い制限を与えたい。

コロナ中の磁気リコネクションに基づくフレアモデルにおいて、特にループトップ付近の領域は、リコネクション領域からの輸送における加速・加熱過程とtrap+precipitation過程に関わっており、高エネルギー電子の高さ(時間)方向の分布を知ることは重要である。

## Solar Flare (X-class) on 13 Dec 2006

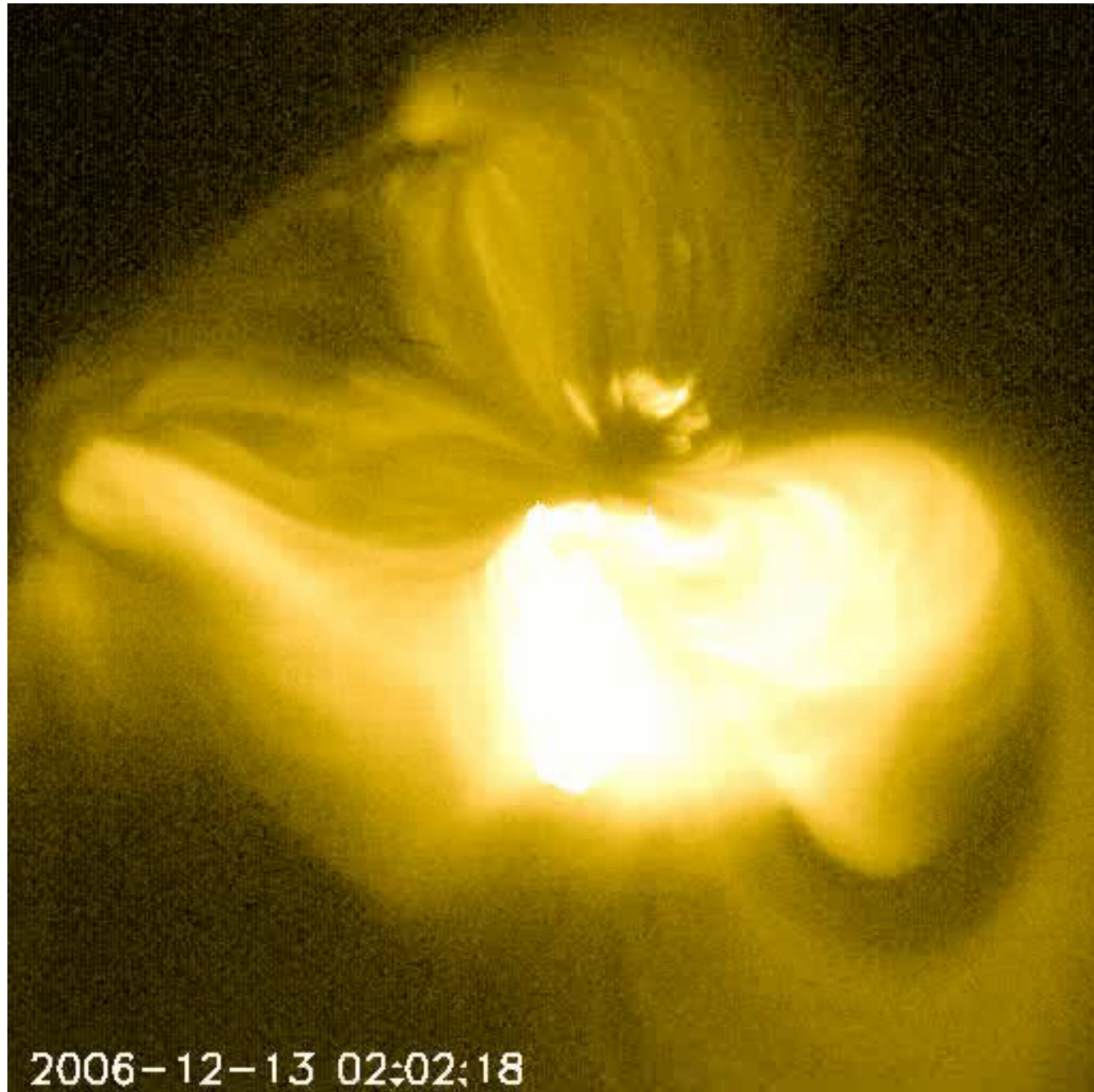


Chromosphere

Observed with Hinode/SOT

Observed with  
Hinode/XRT

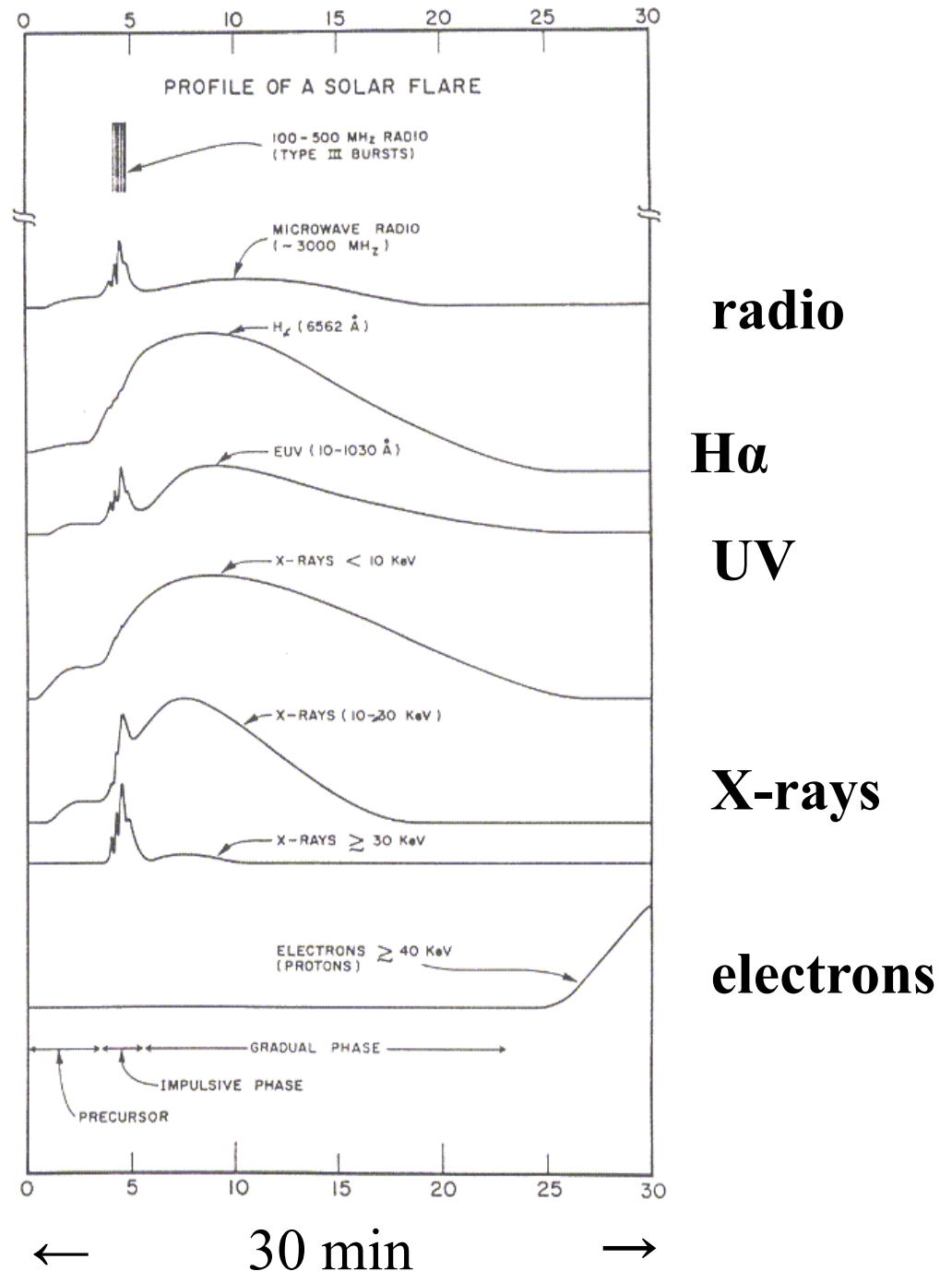
Corona



# Characteristics of Solar Flare

- Increase in intensity of electromagnetic waves in various wavelengths (Observational definition)
- Duration  
**A few minutes – a few hours**
- Temperature  
**> 10 MK**
- Energy  
 **$10^{27}$ - $10^{33}$  ergs**

Energy release mechanism:  
magnetic reconnection

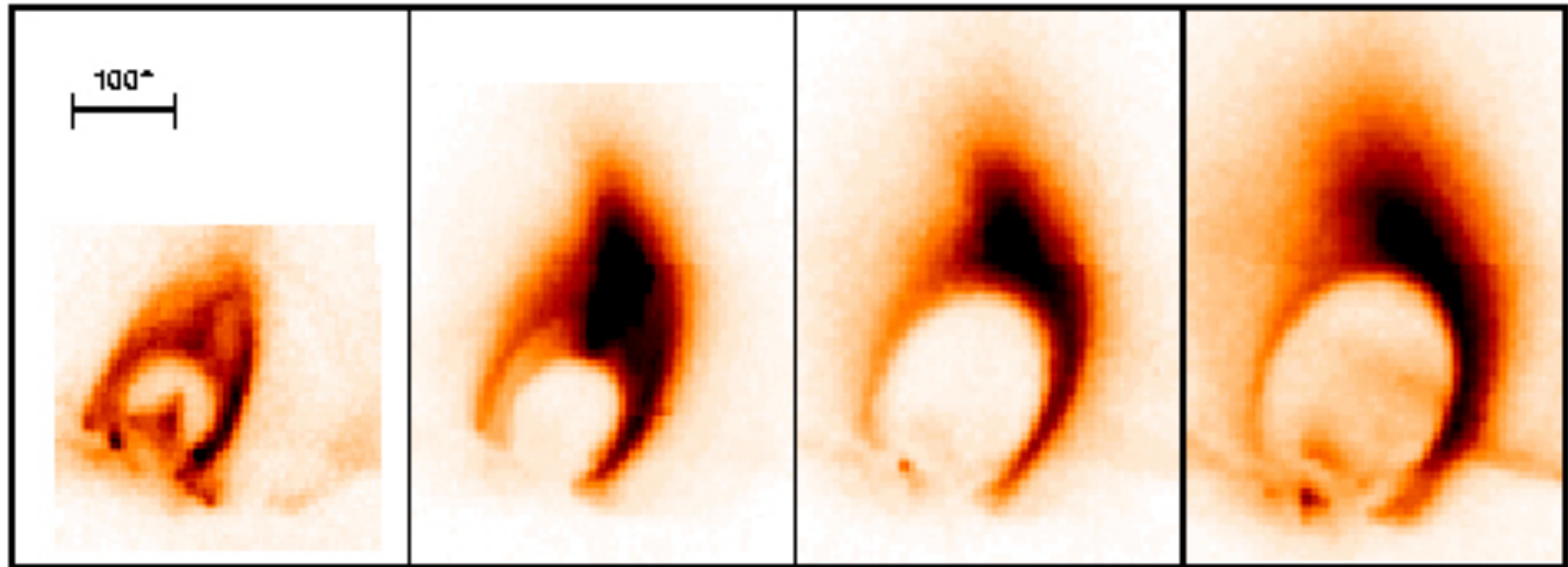


# Time-series of SXR observations

Increasing in width and in height with time

→ continuous energy release (reconnection)

21-FEB-1992 Flare SXT Image Filter : AL1



03:10:30 UT

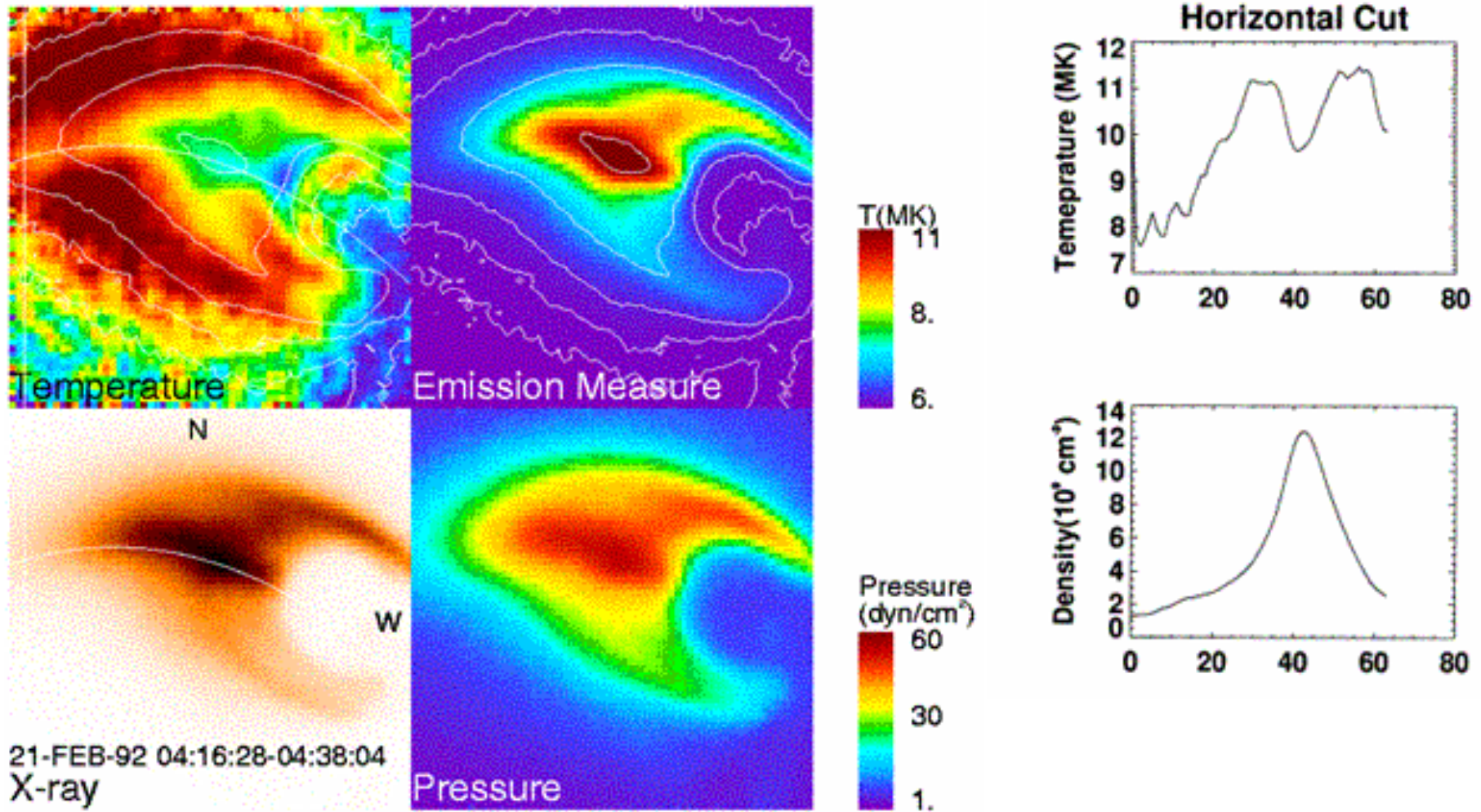
04:52:22 UT

06:35:30 UT

09:06:42 UT

# Temperature structure of SXR flare loop

Outside region of the bright loop shows higher temperature.



Tsuneta 1996

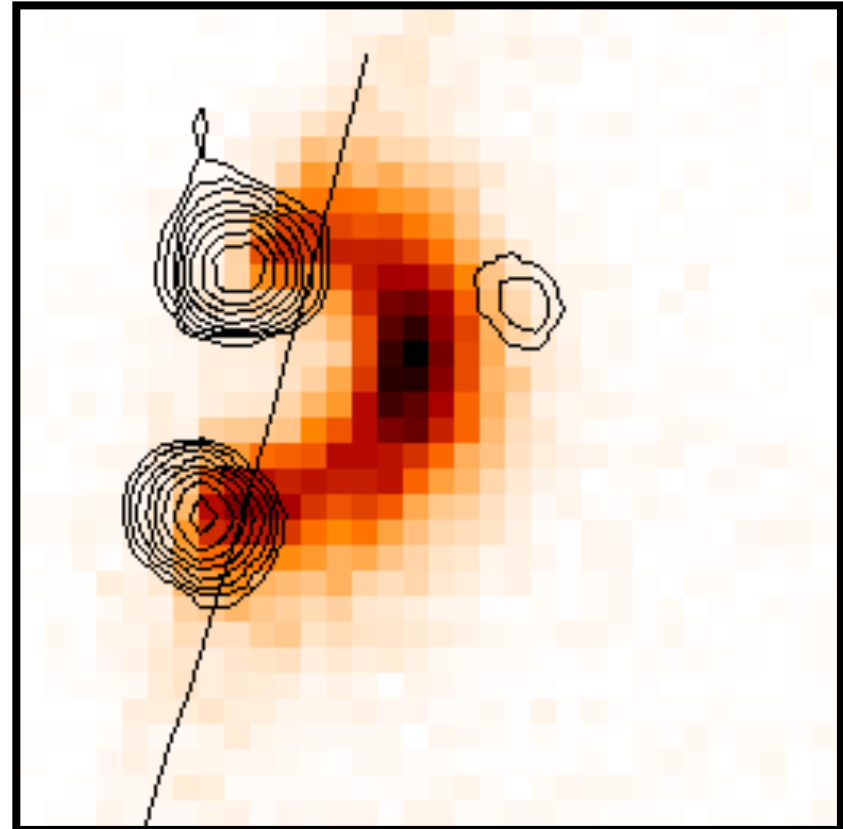
# Discovery of a hard X-ray source above the flare loop

Color: soft X-rays  
= thermal plasma

Contours: hard X-rays  
= nonthermal electrons

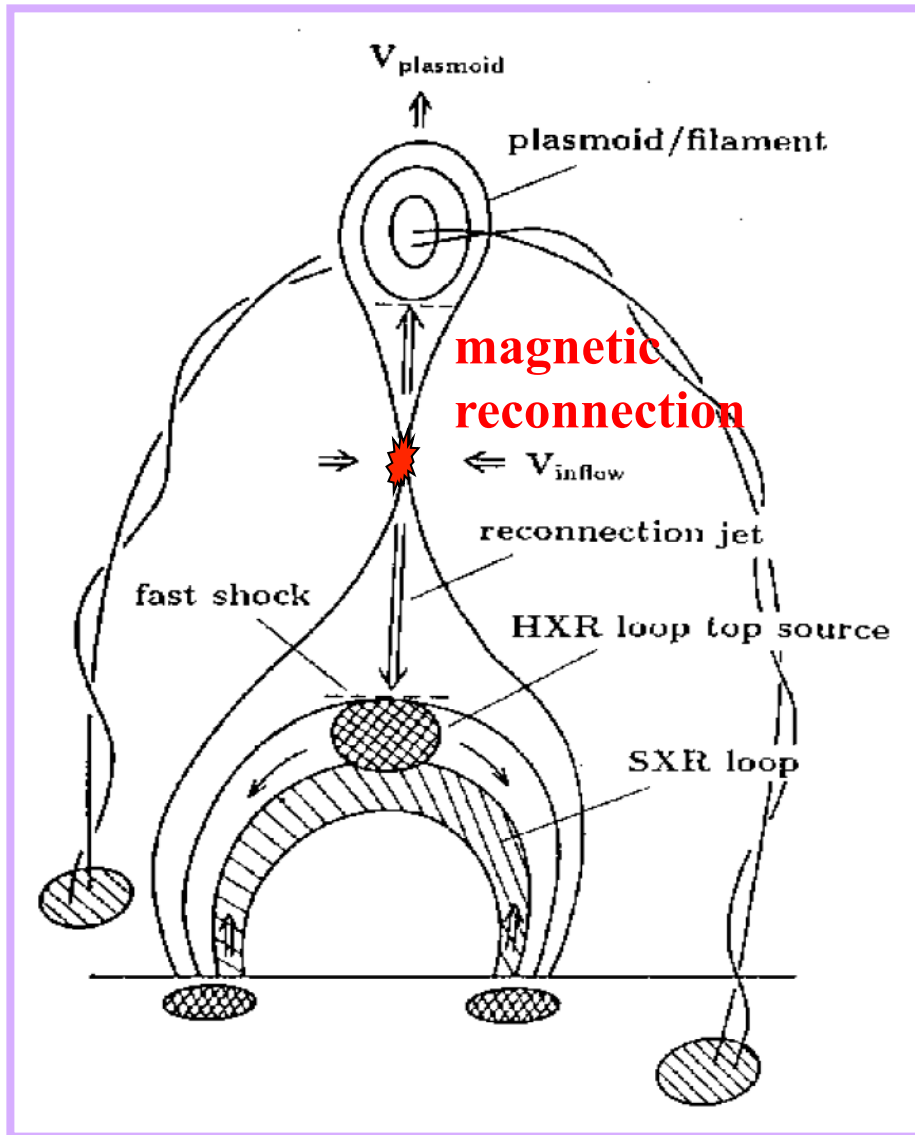
→ Energy release takes place  
above the loop

→ Magnetic reconnection



(Masuda et al. 1994)

# “Standard flare model”

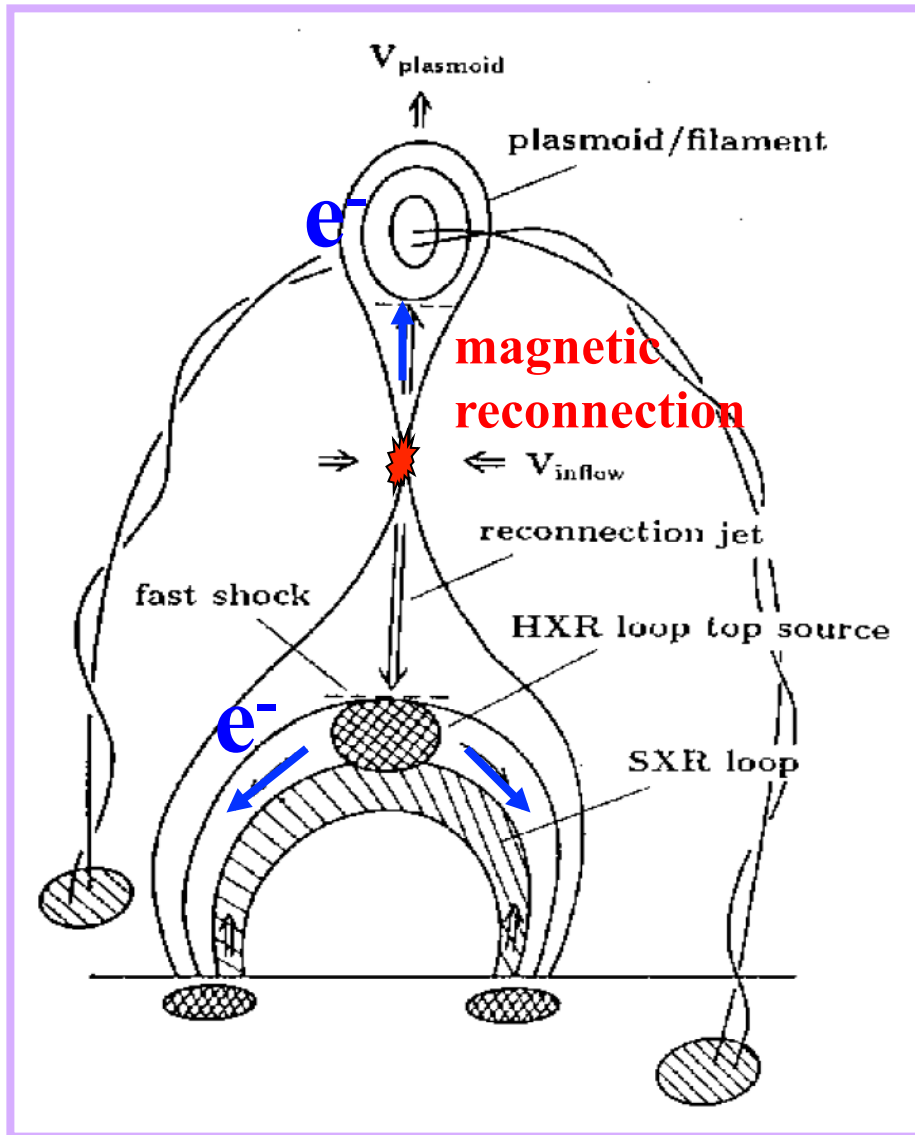


- 1) Release of magnetic energy

from Shibata



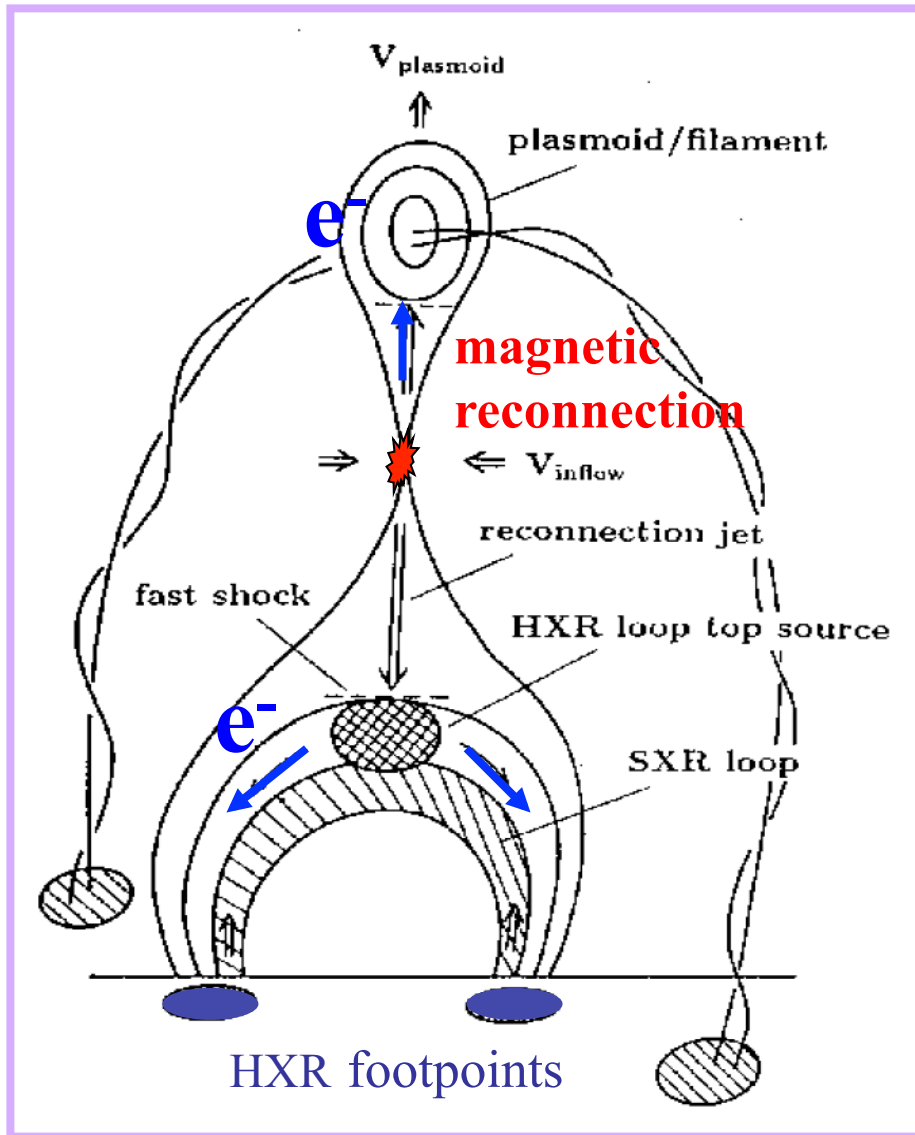
# “Standard flare model”



- 1) Release of magnetic energy
- 2) particles are accelerated (not understood)

from Shibata

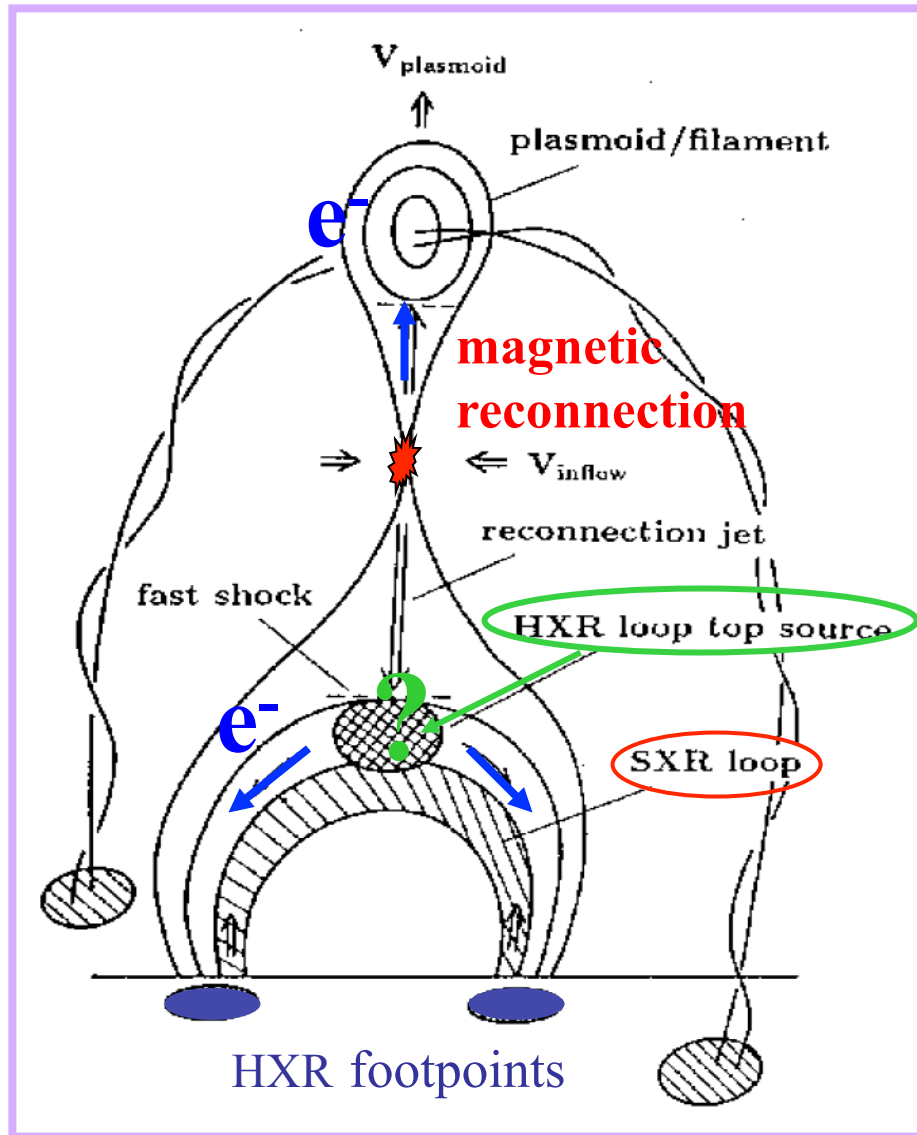
# “Standard flare model”



- 1) Release of magnetic energy
- 2) particles are accelerated (not understood)
- 3) Acc. electrons produce HXR emission (mostly footpoints)

from Shibata

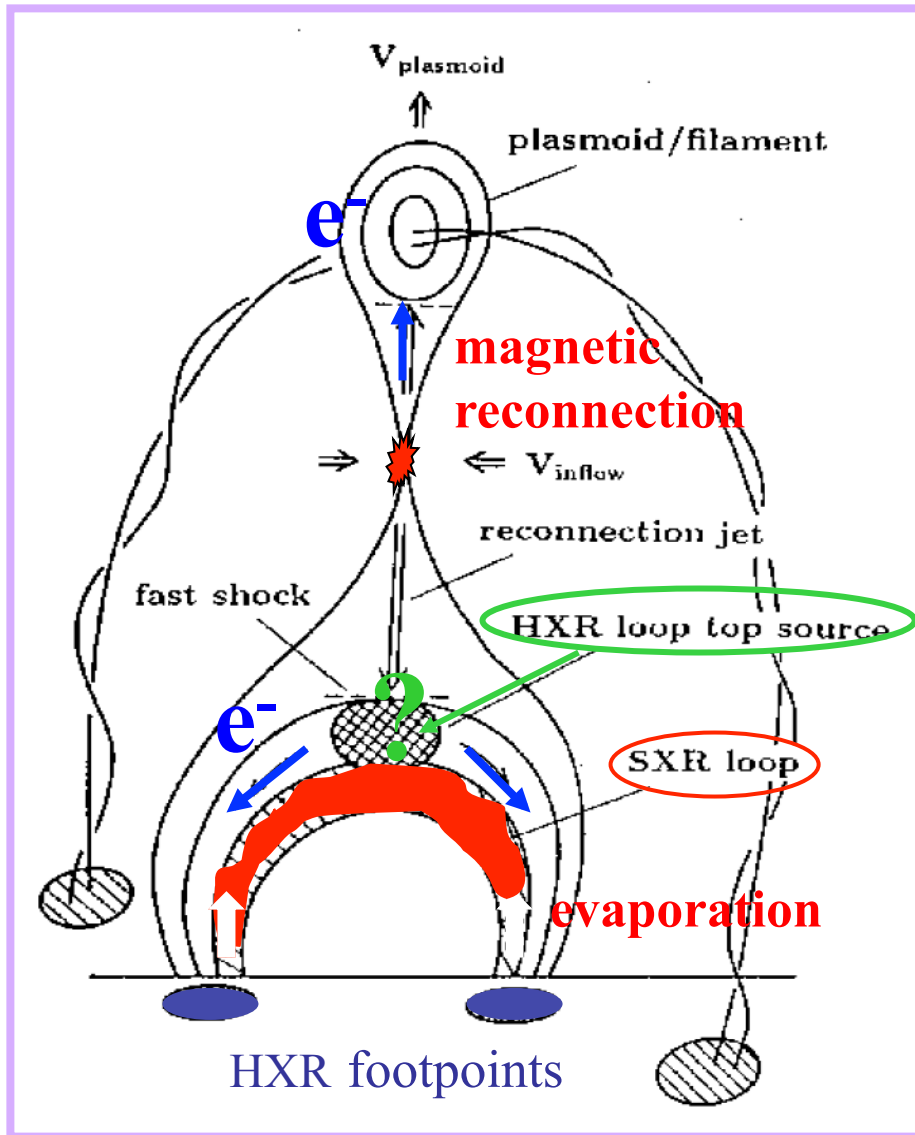
# “Standard flare model”



- 1) Release of magnetic energy
- 2) particles are accelerated (not understood)
- 3) Acc. electrons produce HXR emission (mostly footpoints)
- 4) Above loop top HXR source not understood

from Shibata

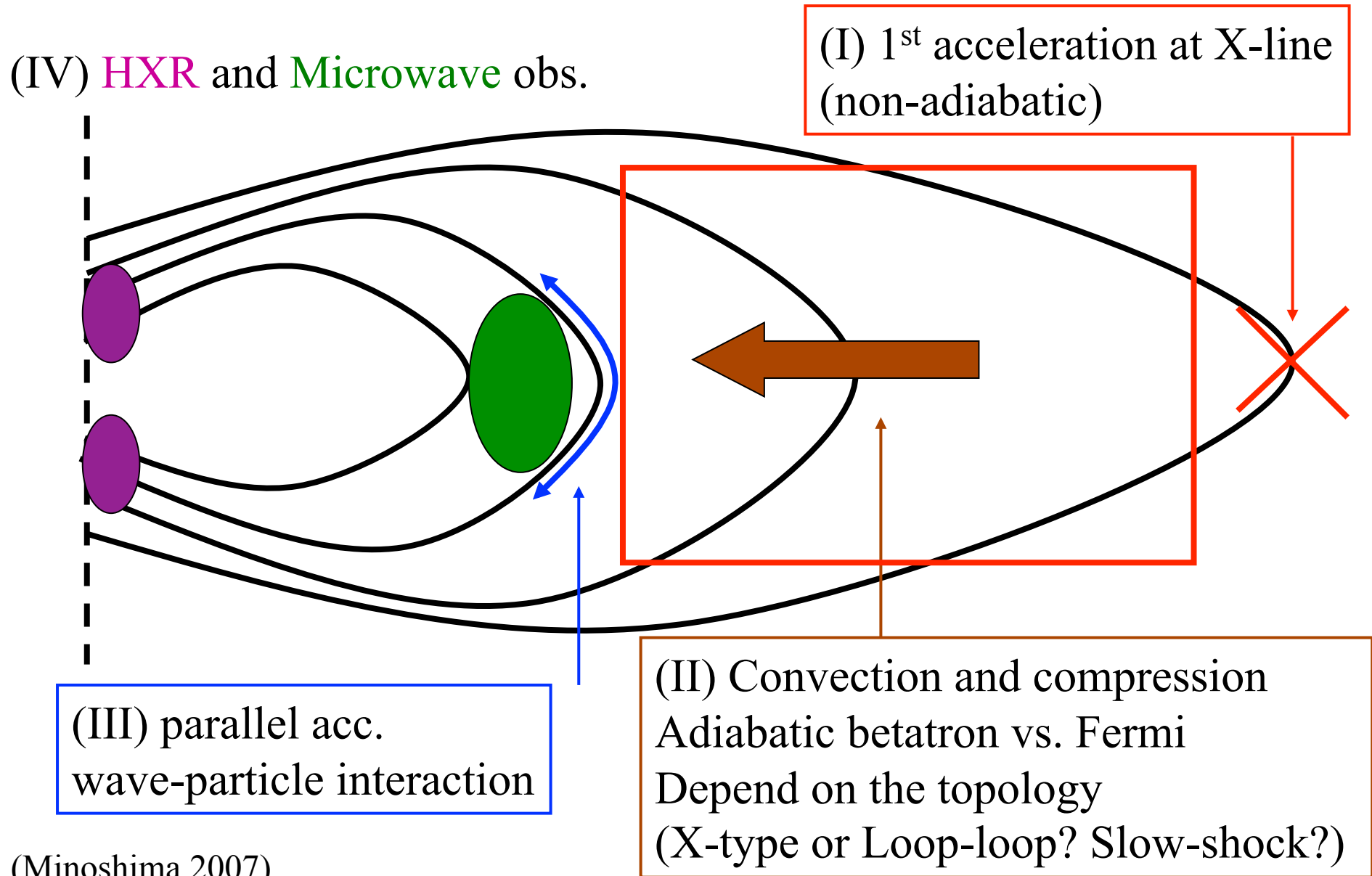
# “Standard flare model”



- 1) Release of magnetic energy
- 2) particles are accelerated (not understood)
- 3) Acc. electrons produce HXR emission (mostly footpoints)
- 4) Above loop top HXR source not understood
- 5) collisional losses of acc. electrons heat plasma
- 6) “evaporation” fills loop

from Shibata

# Particle Acceleration in the magnetic reconnection scenario



The acceleration/heating process in the convection/compression phase is important.

- (1) Correlation between acceleration (hard X-rays) and electric field is very good.
- (2) Large amount of energy might be converted for particle acceleration.

Say, 10% or more , not 1% or less

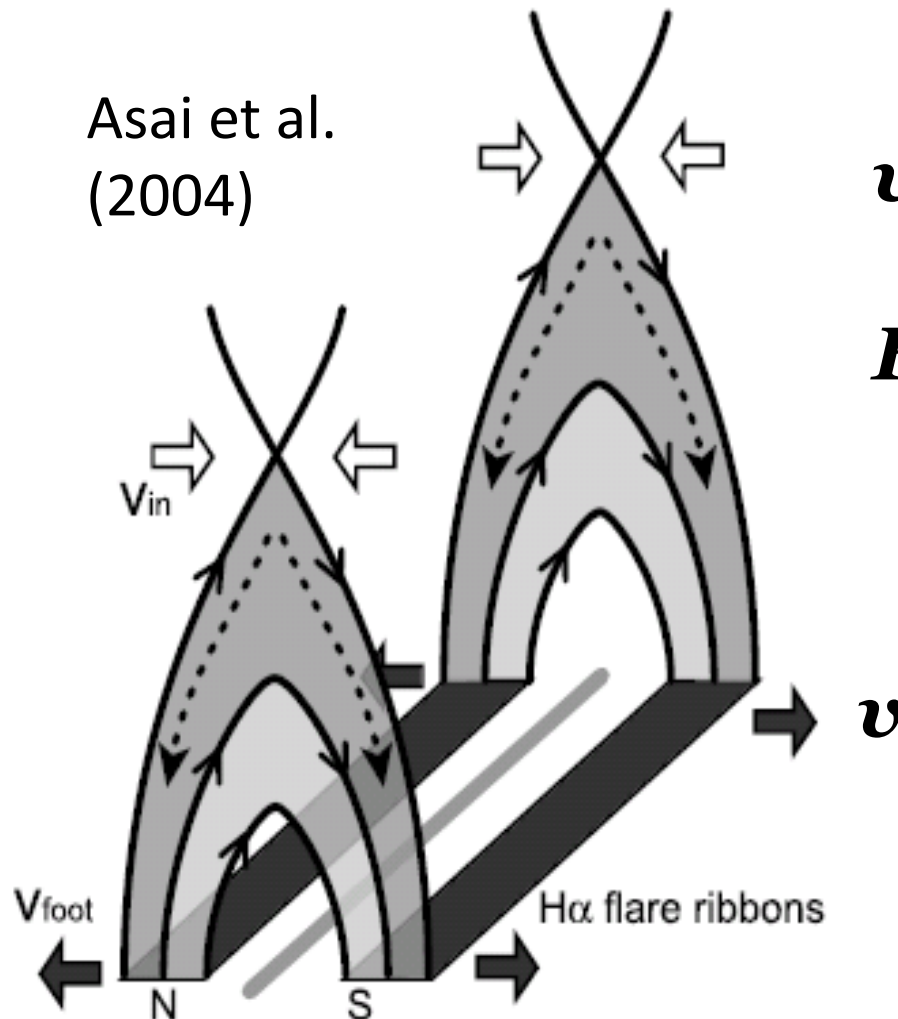
Neupart effect

$$\int(\text{HXR}) dt = \text{SXR light curve}$$

$$\int(\text{energy of accelerated electrons}) dt \\ = \text{thermal energy}$$

## Relationships between electric field and particle acceleration

$E_{\text{rec}} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  is estimated from observations.



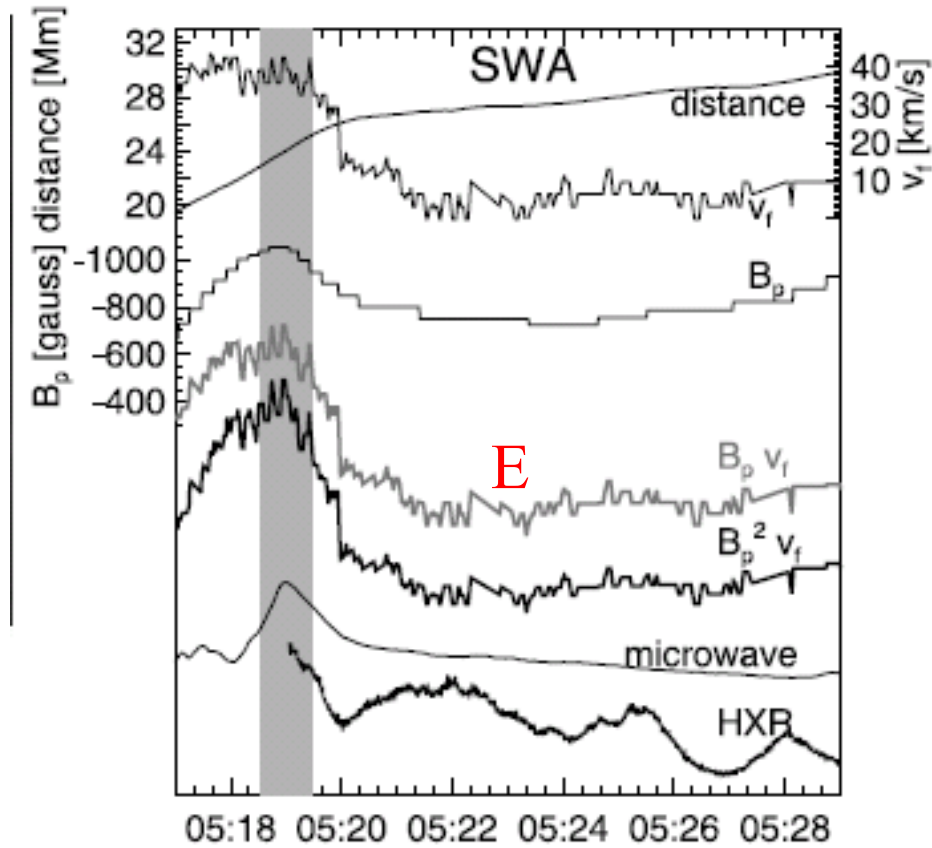
$\mathbf{v}$ : ribbon expansion

$\mathbf{B}$ : photospheric  
magnetic field

Flare ribbon  
(or footpoint HXR source)  
= frontline of continuous  
reconnection in the corona

# Relationships between electric field and particle acceleration

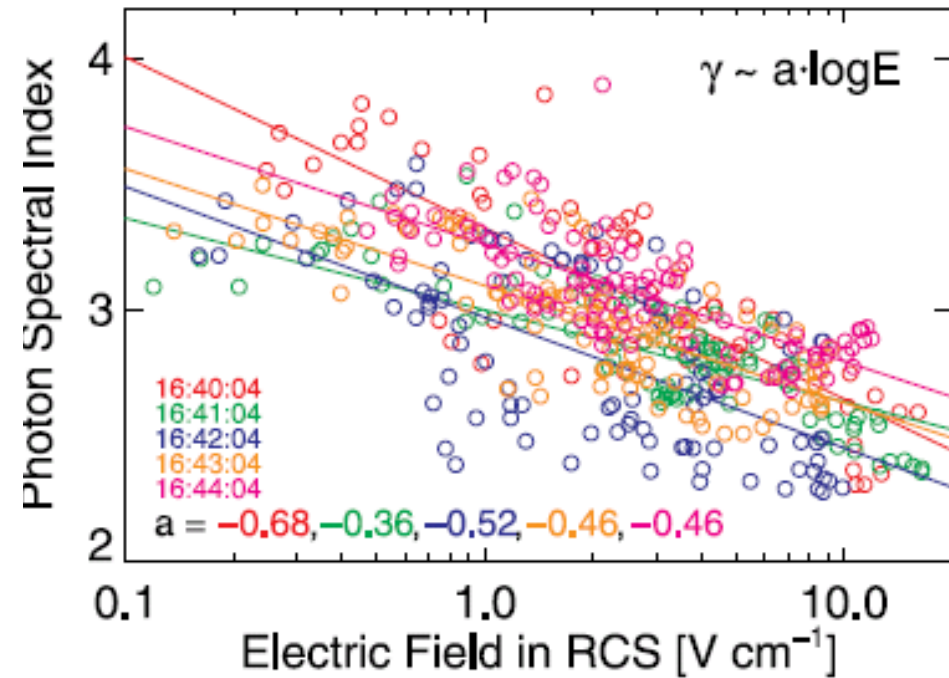
## Electric field vs HXR intensity



↑  
HXR/microwave peak

(Asai et al. 2004)

## Electric field vs HXR spectral index



(Liu et al. 2008)



The acceleration/heating process in the convection/compression phase is important.

- (1) Correlation between acceleration (hard X-rays) and electric field is very good.
- (2) Large amount of energy might be converted for particle acceleration.

Say, 10% or more , not 1% or less

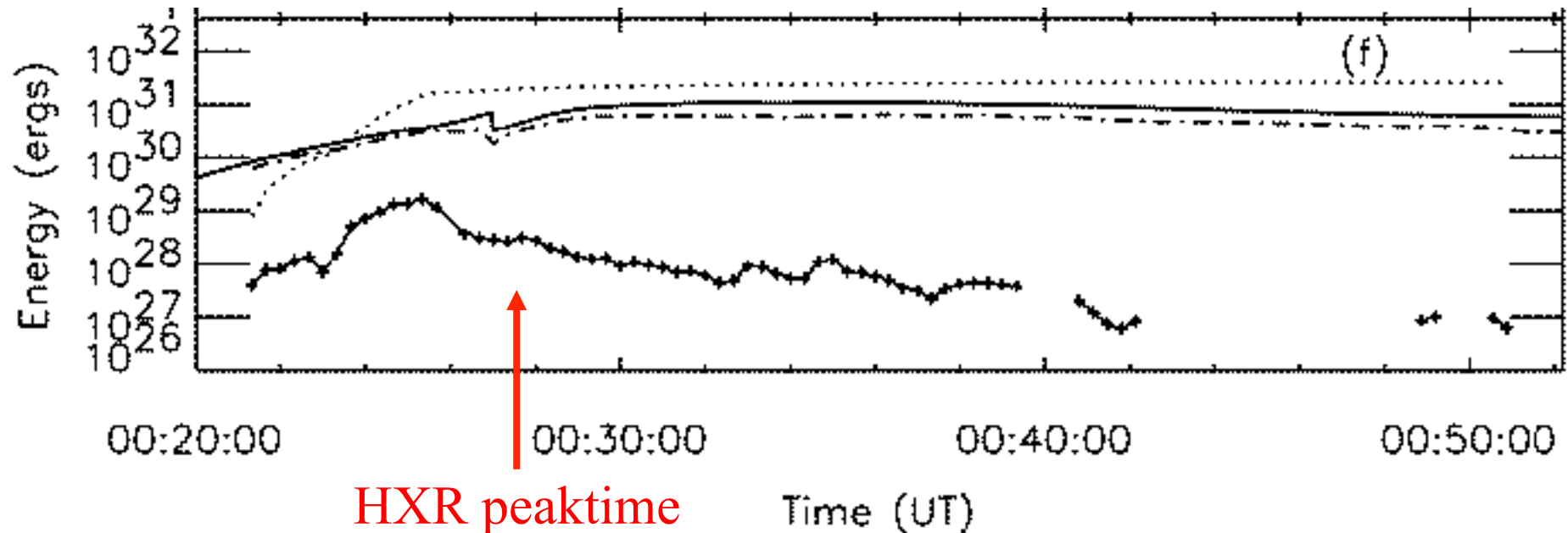
Neupart effect

$$\int(\text{HXR}) dt = \text{SXR light curve}$$

$$\int(\text{energy of accelerated electrons}) dt \\ = \text{thermal energy}$$

## nonthermal energy vs thermal energy

(Holman *et al.* 2003)



**Solid: thermal energy derived from GOES**

**Dotted: time-integrated nonthermal energy**

**Dot-dashed: thermal energy derived from RHESSI**

**+ : injection rate of nonthermal energy**

**most of nonthermal energy input in the rise phase**  
**integrated nonthermal energy  $\sim$  thermal energy**

# 太陽多波長フレアデータ解析研究会 NSRO-CDAW10

増田 智 (名大STE研)

Group 1:

ループトップ電波源(2周波)の位置(高度)の時間変化 (イベント解析)

Group 3:

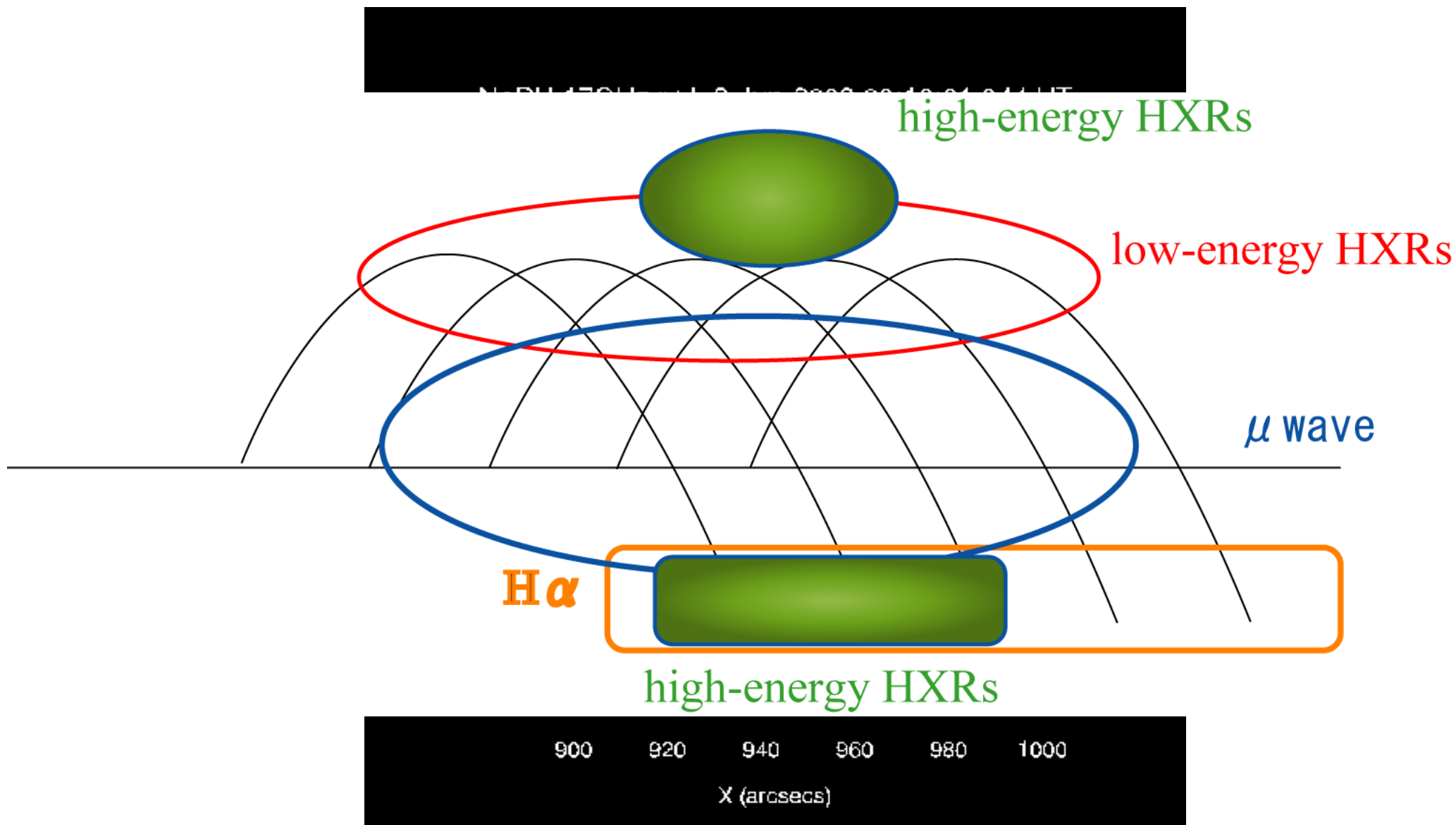
ピーク時のループトップ電波源(2周波)の高さ (統計解析)

## 動機

太陽フレアにおける粒子加速モデルに関して、観測的に強い制限を与えたい。

コロナ中の磁気リコネクションに基づくフレアモデルにおいて、特にループトップ付近の領域は、リコネクション領域からの輸送における加速・加熱過程とtrap+precipitation過程に関わっており、高エネルギー電子の高さ(時間)方向の分布を知ることは重要である。

# 過去の結果 (例1) 2003年6月2日のフレア @野辺山CDAW2005

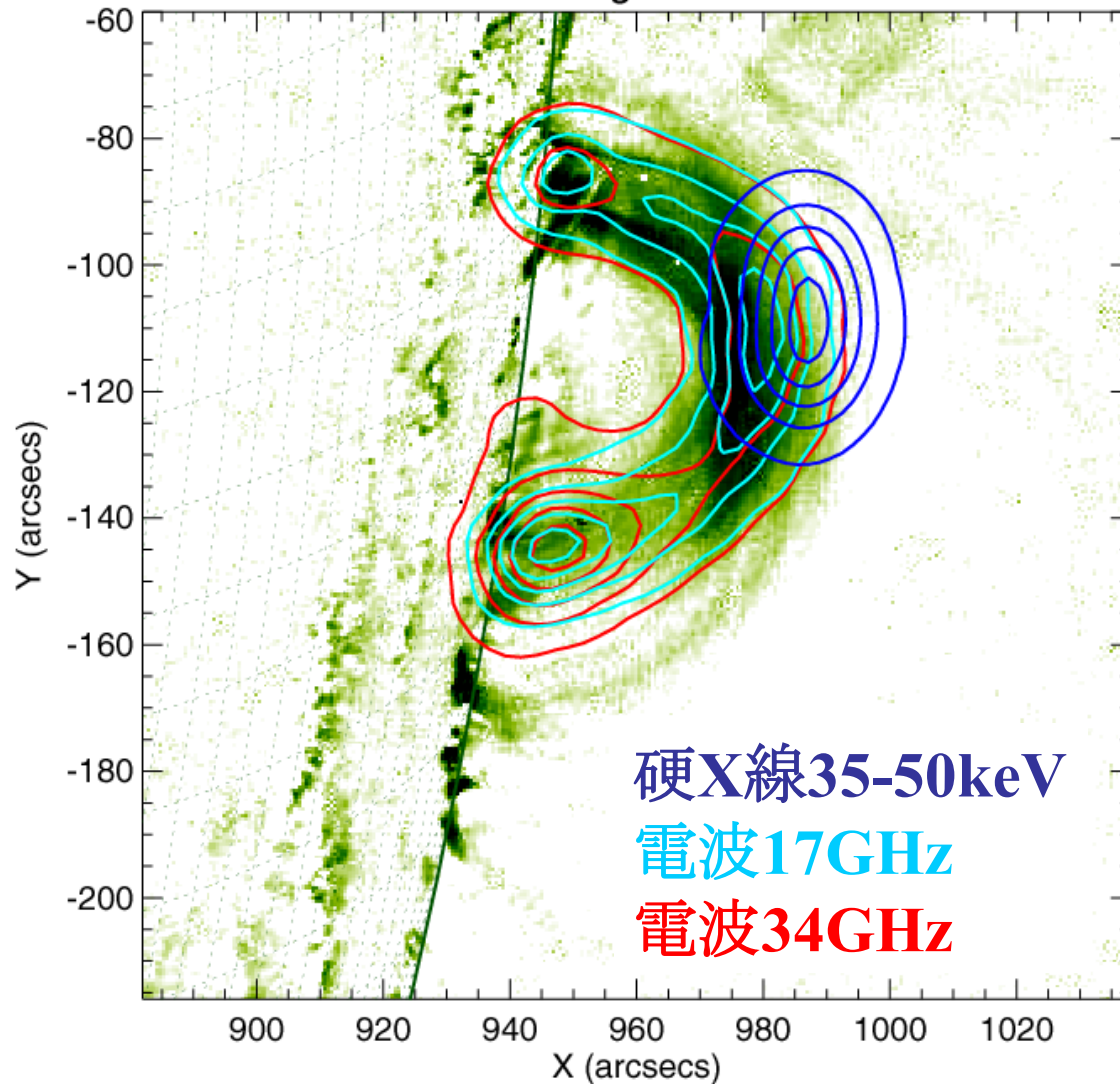


過去の結果 (例2)

Krucker氏作成

太陽フレアの多波長観測の例  
(紫外線+硬X線+電波2波長)

TRACE 195A: 24-Aug-2002 00:56:50.259 UT



紫外線:

1-2MK程度の  
熱的なプラズマの分布

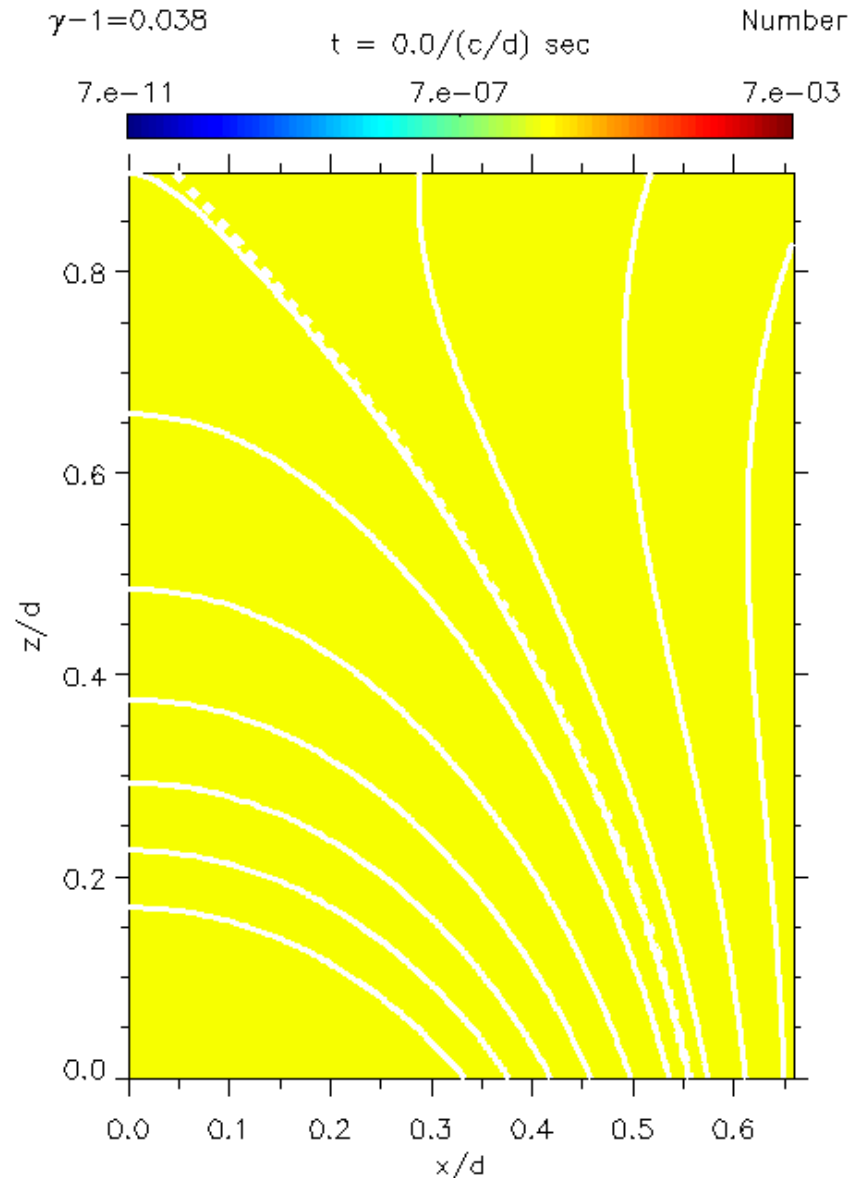
電波:

MeV電子  
(+磁場強度など)

硬X線:

50-100keV程度の  
加速電子  
(+まわりのプラズマ密度)

# Modeling of particle acceleration



Minoshima *et al.*, ApJ, 2010

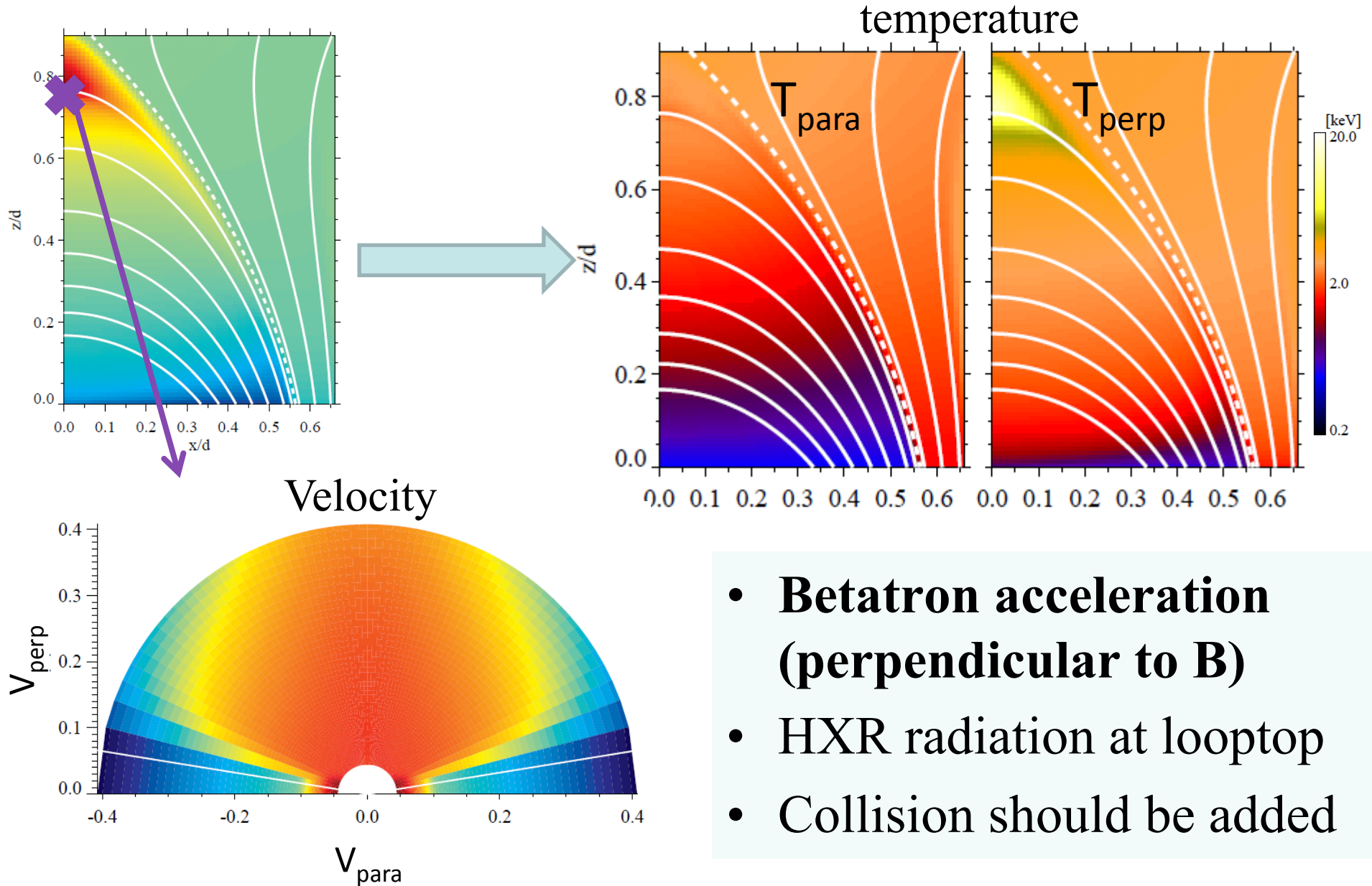
- **Modeling based on drift-kinetic theory**
- **Particle acceleration and time evolution of distribution function of electrons due to inductive electric field ( $-\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ )**
- **Direct comparison with observations**
  - spatial size:  $1 \times 1.3 \text{ Mm}^2$
  - time: 10 seconds

Number density of 20 keV electrons

Solid line: magnetic field

Dashed line: separatrix

# Distribution function in a reconnected loop



- **Betatron acceleration (perpendicular to B)**
- HXR radiation at looptop
- Collision should be added

## 観測装置

野辺山電波ヘリオグラフ (1992 - )  
ようこう硬X線望遠鏡 (1991 - 2001)  
RHESSI (2002 - )

## イベント抽出条件

- リム付近で発生したフレア (太陽半径の95%以上)
- 電波ヘリオグラフと硬X線の同時観測有り
- 電波ヘリオグラフで空間的に分解可能  
(電波源のサイズがビームサイズの4倍以上)
- 33 – 53 keV (HXTのM2-band)で像合成可能なphoton数



## 抽出されたイベント数: 23イベント

硬X線のlooptop sourceが無い: 9イベント

硬X線で像合成が収束しない: 2イベント

impulsive phaseの観測が無い: 1イベント

硬X線源はeruptionからの放射: 1イベント

複数のループが混在していてlooptopが特定できない: 1イベント

ループの角度が悪く高さの計測不能: 1イベント

電波でじゅうぶん構造を分解できない: 2イベント

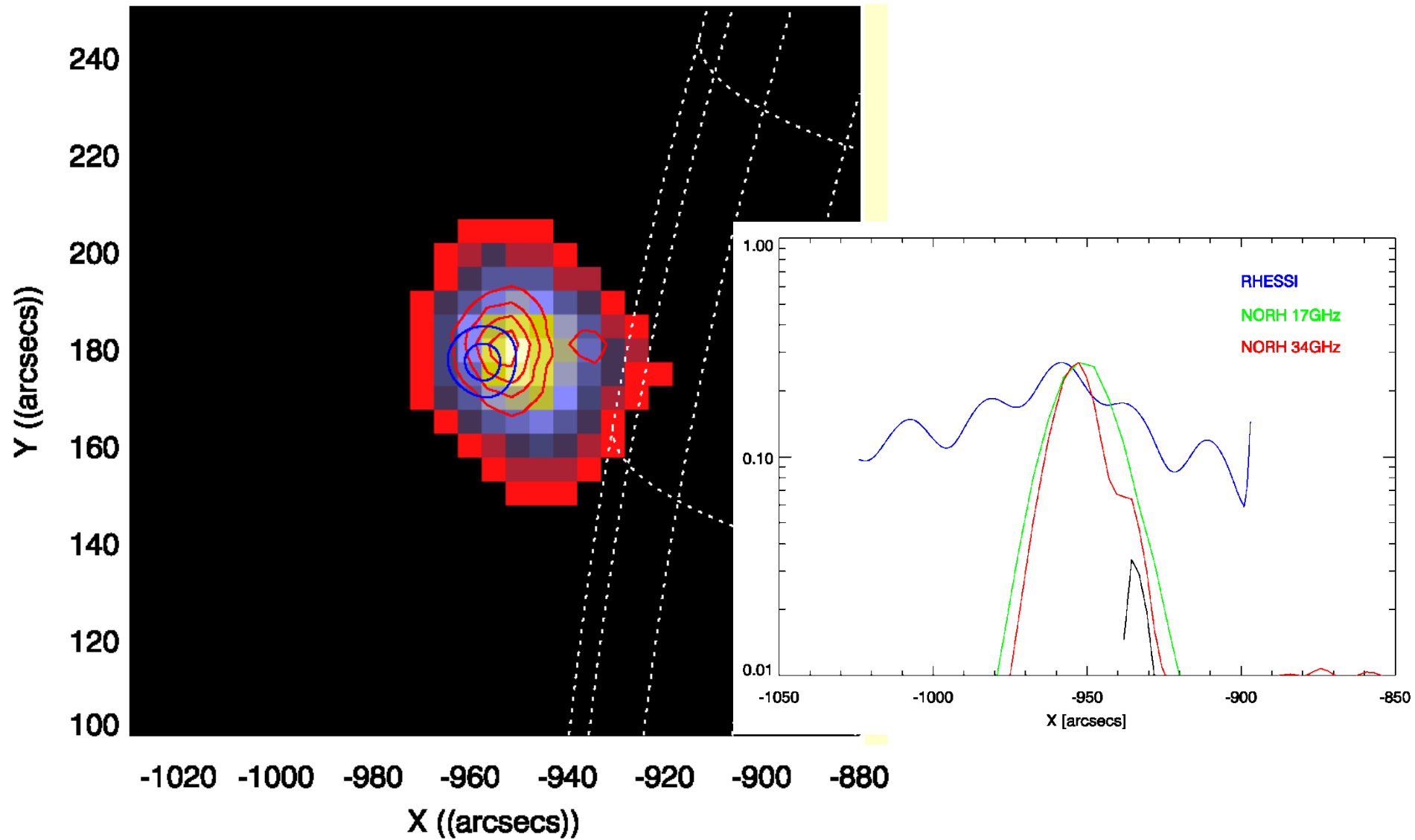
残りの7イベントについて、マイクロ波と硬X線のlooptop sourceの重心位置を比較する。RHESSIの硬X線像のエネルギー域もYohkoh/HXTのM2-band (33-53keV)に合わせる。

RHESSI: 20050727\_0457 (M3.7), 20031024\_0246 (M7.6),  
20020824\_0100 (X3.1), 20020723\_0030 (X4.8)

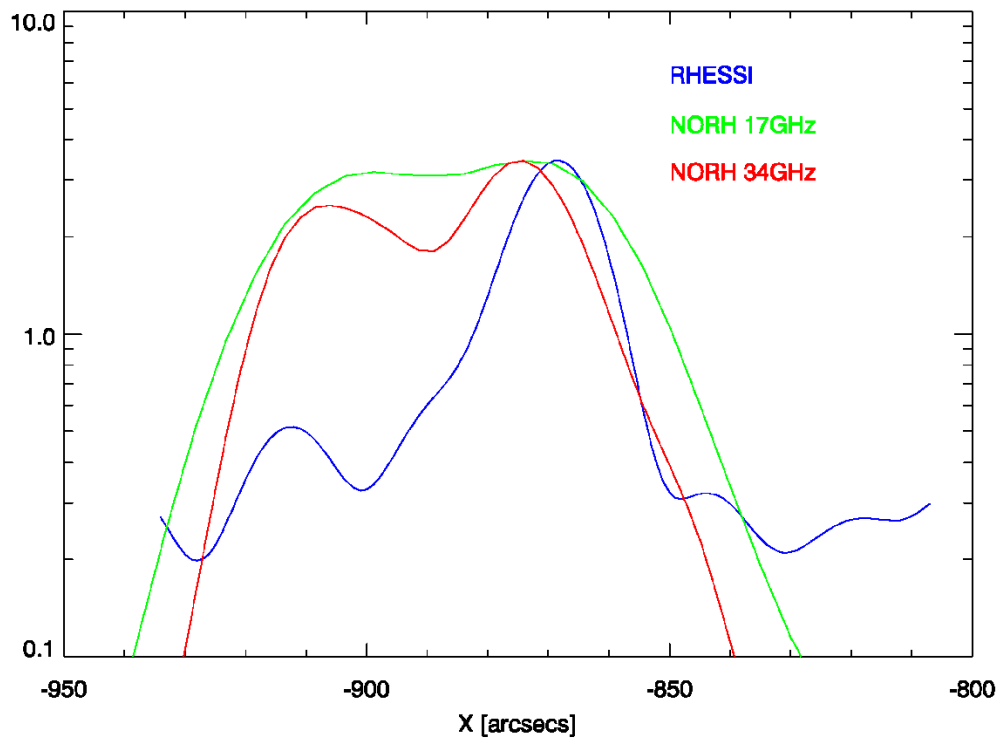
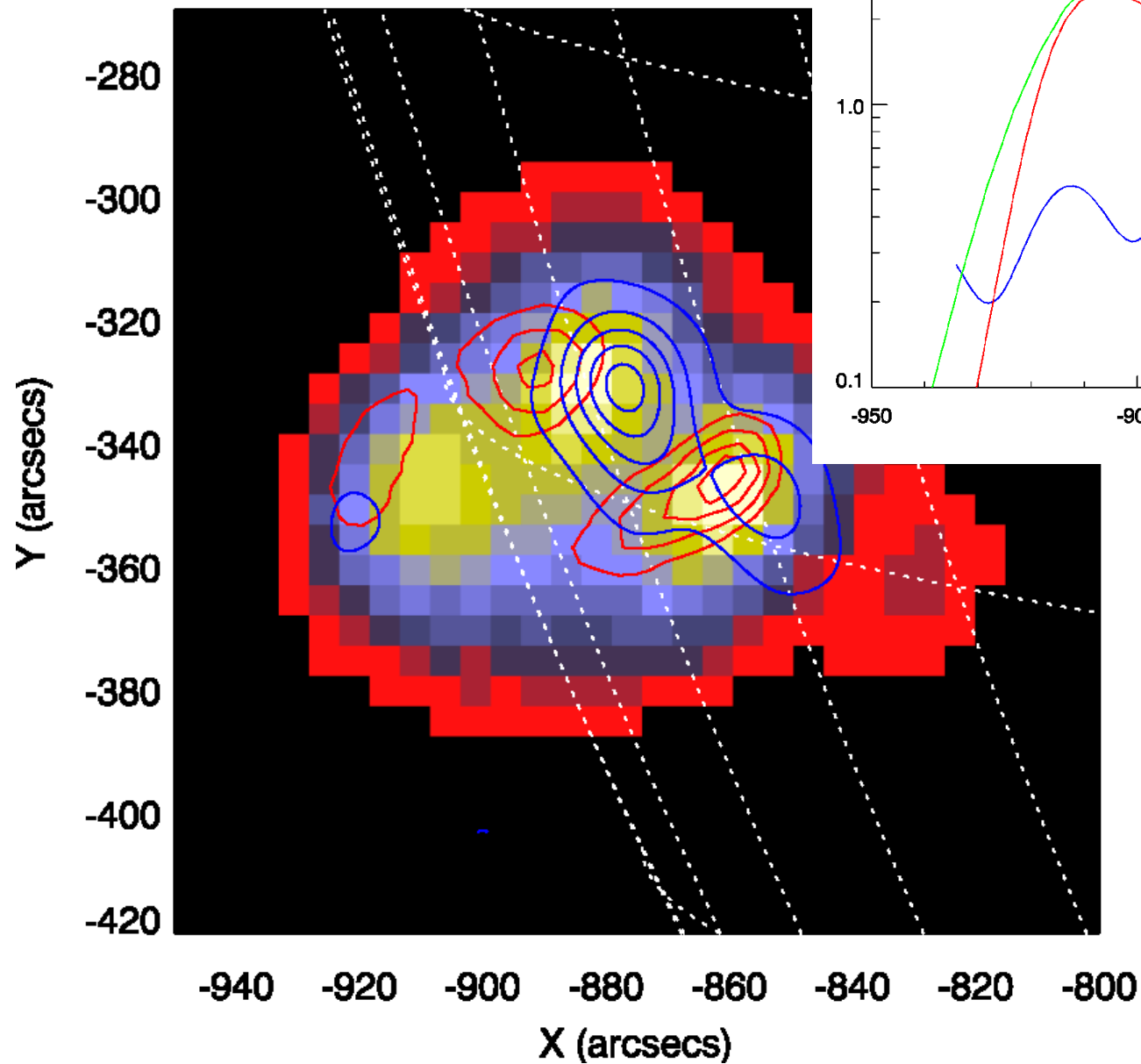
HXT: 20010520\_0602 (M6.4), 19980423\_0541 (X1.2),  
19931130\_0603 (C9.2)\*

\*: マイクロ波は17GHzのみ

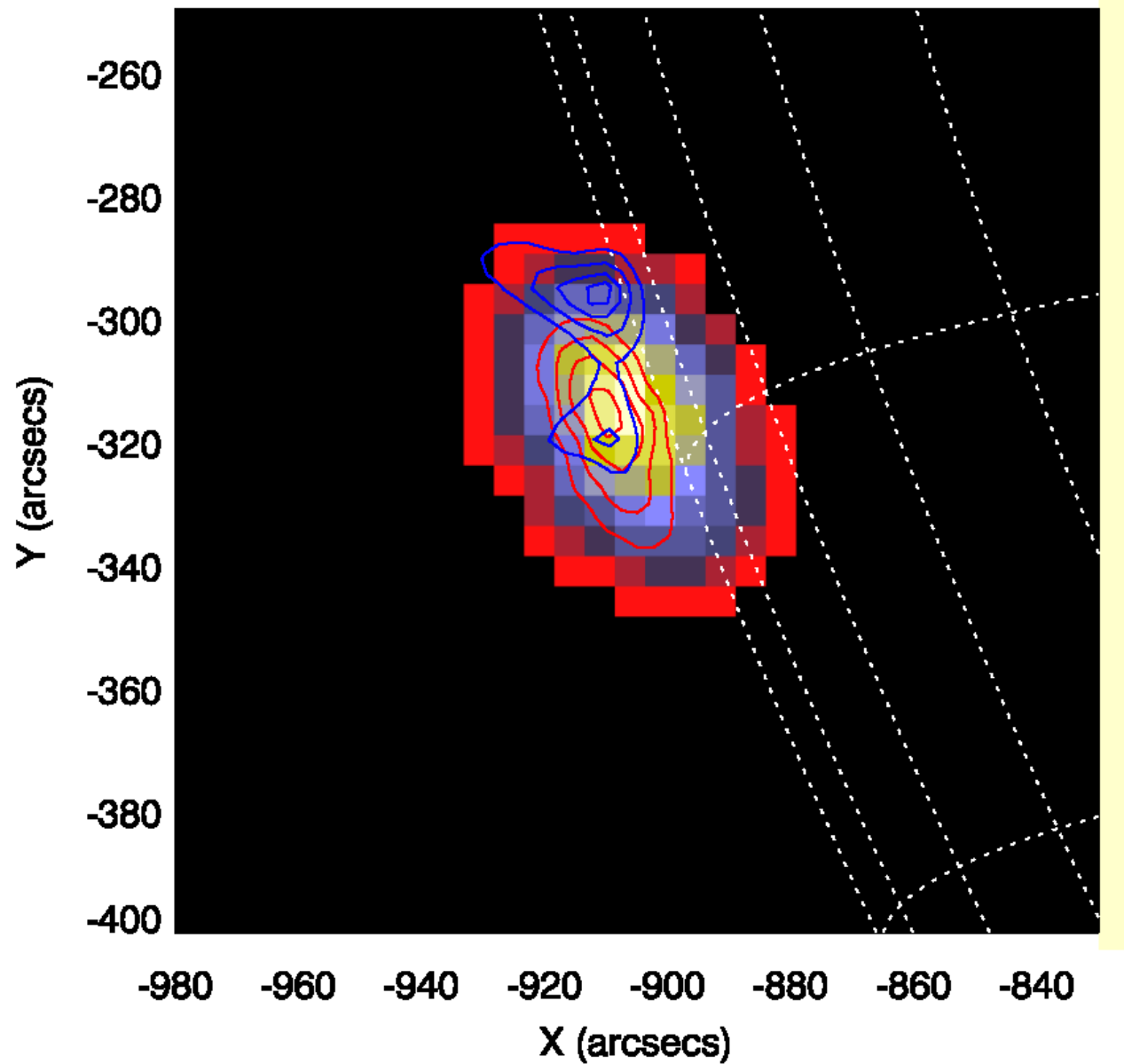
# NoRH 17GHz r+i 27-Jul-2005 04:54:20.956 UT



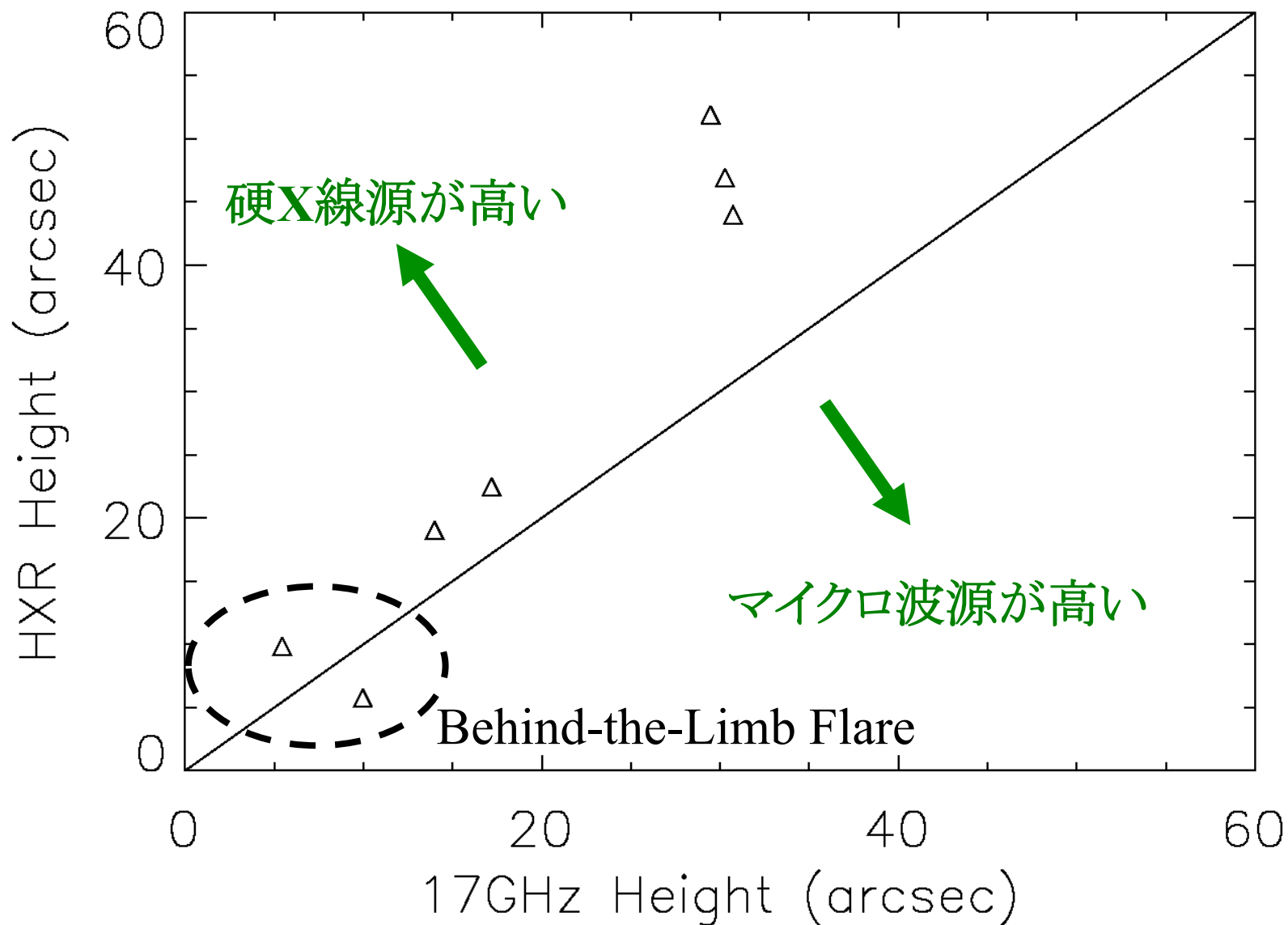
# NoRH 17GHz r+l 24-Oct-2003 0



NoRH 17GHz r+l 23-Apr-1998 05:41:01.320 UT



ループトップ付近の硬X線源 (33-53keV)  
とマイクロ波源 (17GHz) の高さの比較



## 結果

- 7イベントにおいて、フレアループトッ付近の硬X線源(33-53keV)とマイクロ波源(17GHz, 34GHz)の高さの比較を行った。
- 7イベント中6イベントにおいて、硬X線源のほうが高い位置に存在しており、ループのスケールが大きな(> 30 arcsec)のイベントでは、両者の差も明らか(> 10 arcsec)であった。

## 提起される問題

硬X線源を作る高エネルギー電子(50 – 500keV)が、マイクロ波を作る高エネルギー電子(500keV-5MeV)に対して、フレアループシステムの上方(リコネクション領域に近い領域)に存在している？

## 議論と今後

### ・高さの差を生む要因は？

(1) 下方のループ = 古いループ

○ 高いエネルギーの電子ほど寿命が長い。トラップ効果。

(2) 硬X線放射のターゲットの密度構造

× 下方のほうが高密度

(3) 下方のループ = 磁場強度大

○ マイクロ波放射強度は磁場強度に敏感

(4) 輸送過程の差

○ 下方ほど断熱加速・加熱

17GHzと34GHzのマイクロ波源の差は？  
エネルギーの異なる硬X線源では？

### ・高さの差の絶対値の意味は？

→ パラメータ(磁場、寿命、電場など)依存性のチェック

→ モデリング計算で定量的に検証が必要

## 結果

- 7イベントにおいて、フレアループトッ付近の硬X線源(33-53keV)とマイクロ波源(17GHz, 34GHz)の高さの比較を行った。
- 7イベント中6イベントにおいて、硬X線源のほうが高い位置に存在しており、ループのスケールが大きな(> 30 arcsec)のイベントでは、両者の差も明らか(> 10 arcsec)であった。

## 提起される問題

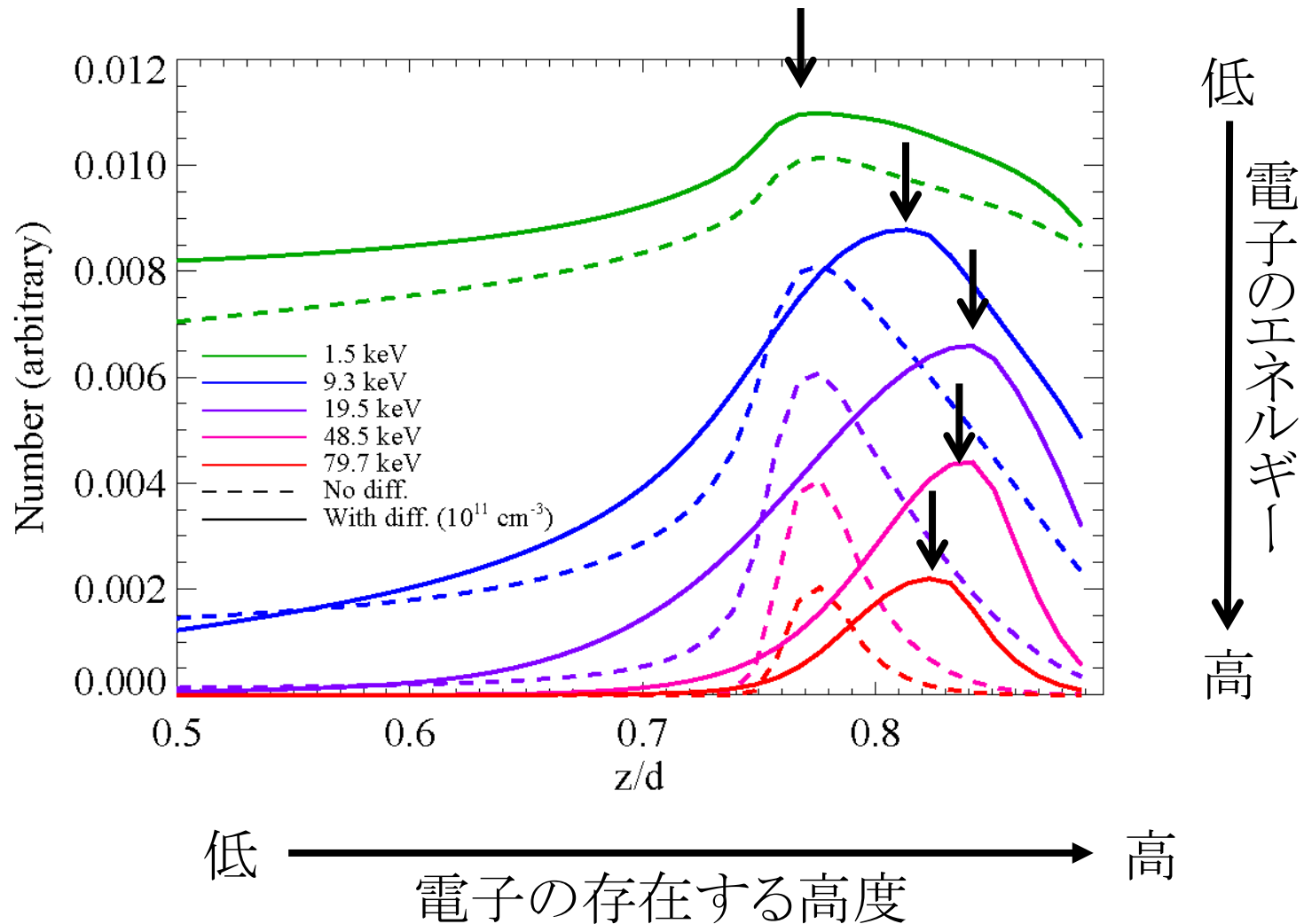
硬X線源を作る高エネルギー電子(50 – 500keV)が、マイクロ波を作る高エネルギー電子(500keV-5MeV)に対して、フレアループシステムの上方(リコネクション領域に近い領域)に存在している？

散乱過程を含む粒子加速シミュレーションで再現された！



ドリフト運動論を用いた太陽フレア粒子加速モデル  
(Minoshima, Masuda, Miyoshi, and Kusano, ApJ submitted)

電子のエネルギーによる粒子数ピークになる高度の違い



低エネルギー硬X線

低高度

高エネルギー硬X線

高高度

マイクロ波 (17GHz)

低高度

この観測事実は、  
説明可能かもしれない。

34GHz (もっと高エネルギー電子に対応)は？

## 17GHzと34GHzのループトップ電波源の高度の比較

	17GHz (arcsec)	34GHz (arcsec)
19980423_0541 (X1.2)	5.4	8.5
20010520_0602 (M6.4)	9.7	4.6
20020723_0030 (X4.8)	14.0	11.5
20020824_0100 (X3.1)	29.5	39.3
20031024_0246 (M7.6)	30.7	38.1
20050727_0457 (M3.7)	17.2	17.2

有意に34GHz電波源のほうが高いイベントがある

## 議論

- 34GHz電波源高度付近で、別の加速機構が働いている。
- 17GHz電波源の重心が、ループ構造からの放射の影響を受け、低めに見積もられている。
- 3次元的な(視線方向の)複数のループの重なり方の影響。
- ???

## 今後

- イベント数を増やす (硬X線観測が無いイベントも使う) → group 3
- 特定のイベントの時系列詳細解析 → group 1

# 太陽多波長フレアデータ解析研究会 NSRO-CDAW10

増田 智 (名大STE研)

Group 1:

ループトップ電波源(2周波)の位置(高度)の時間変化 (イベント解析)

Group 3:

ピーク時のループトップ電波源(2周波)の高さ (統計解析)

## 動機

太陽フレアにおける粒子加速モデルに関して、観測的に強い制限を与えたい。

コロナ中の磁気リコネクションに基づくフレアモデルにおいて、特にループトップ付近の領域は、リコネクション領域からの輸送における加速・加熱過程とtrap+precipitation過程に関わっており、高エネルギー電子の高さ(時間)方向の分布を知ることは重要である。