

# 太陽フレアにおける粒子加速

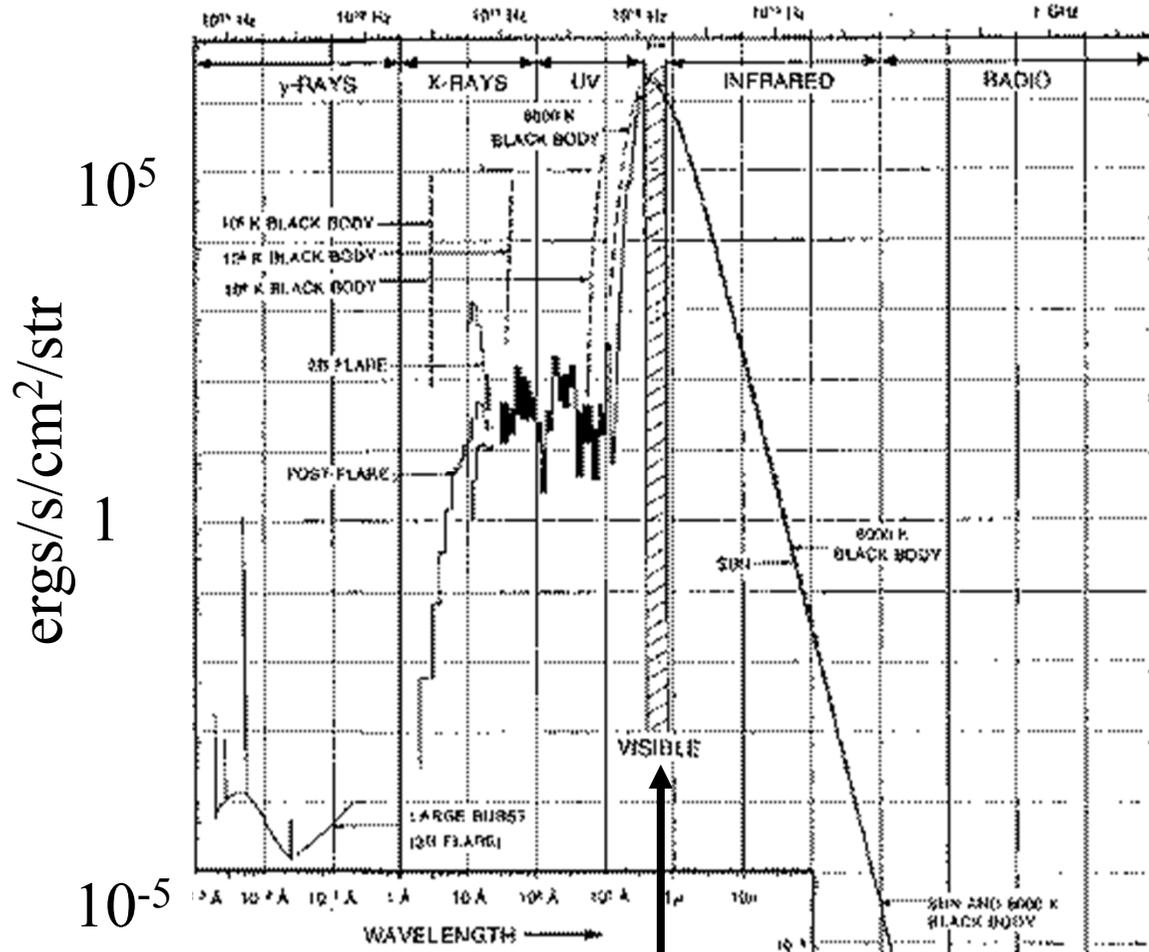
名古屋大学太陽地球環境研究所総合解析部門  
名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻SSt研

准教授 増田 智

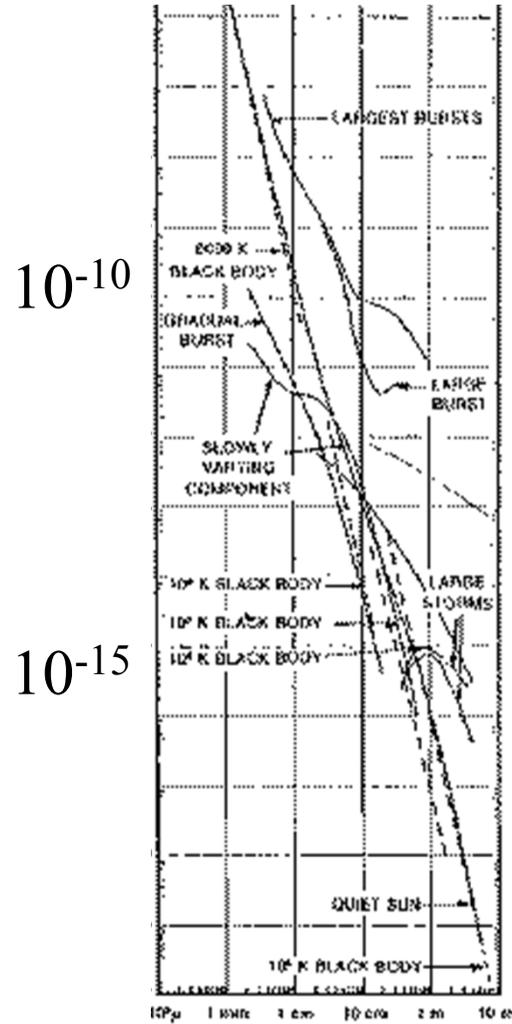
1. 硬X線放射と観測装置
2. 太陽フレアの硬X線観測
3. 太陽フレアにおける粒子加速問題

# 1. 硬X線放射と観測装置

# 太陽からの電磁波放射



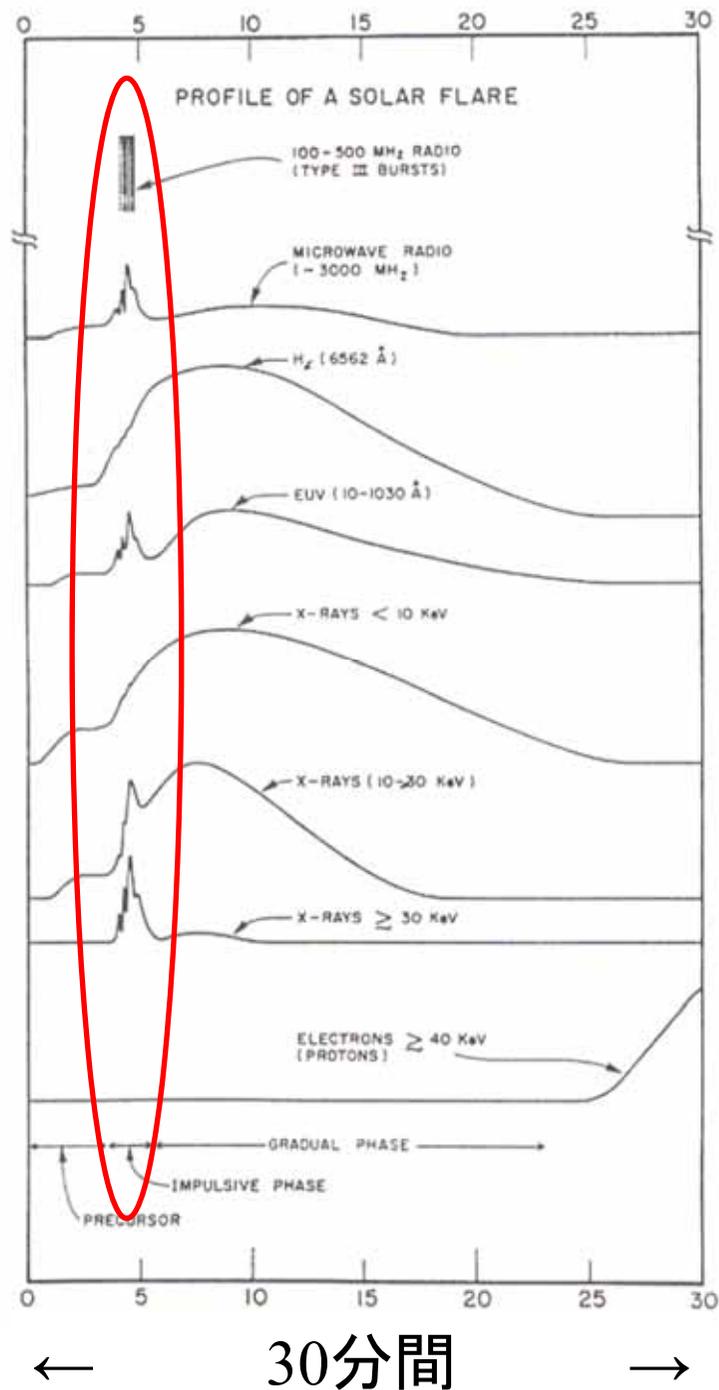
γ線 X線 UV 赤外線 電波  
可視光



電波

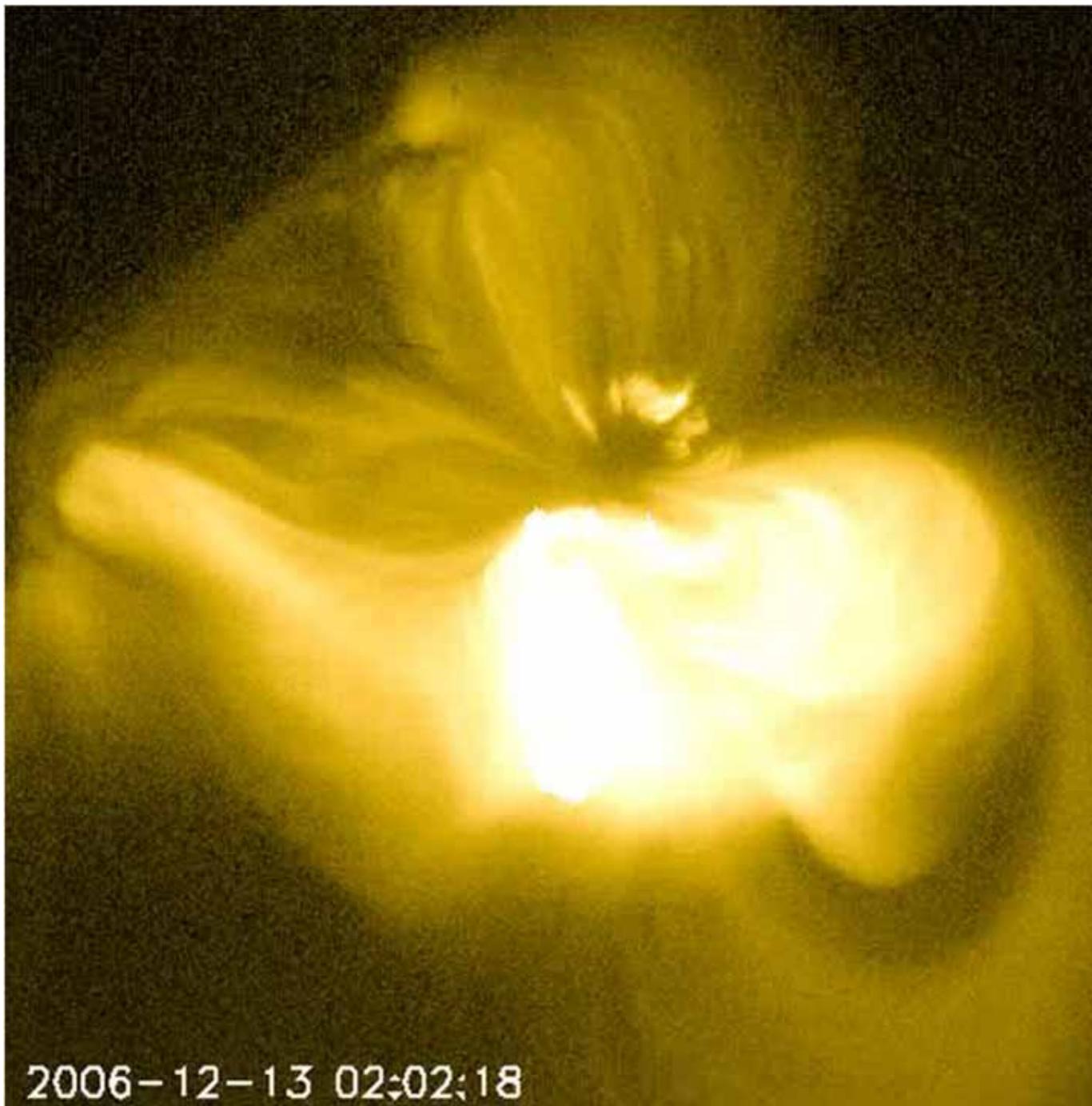
# フレアの性質

- **さまざまな波長の電磁波で増光**
- **継続時間**  
**数分から数時間**
- **温度**  
**1千万度以上**
- **エネルギー**  
 **$10^{27}$ - $10^{33}$  ergs**

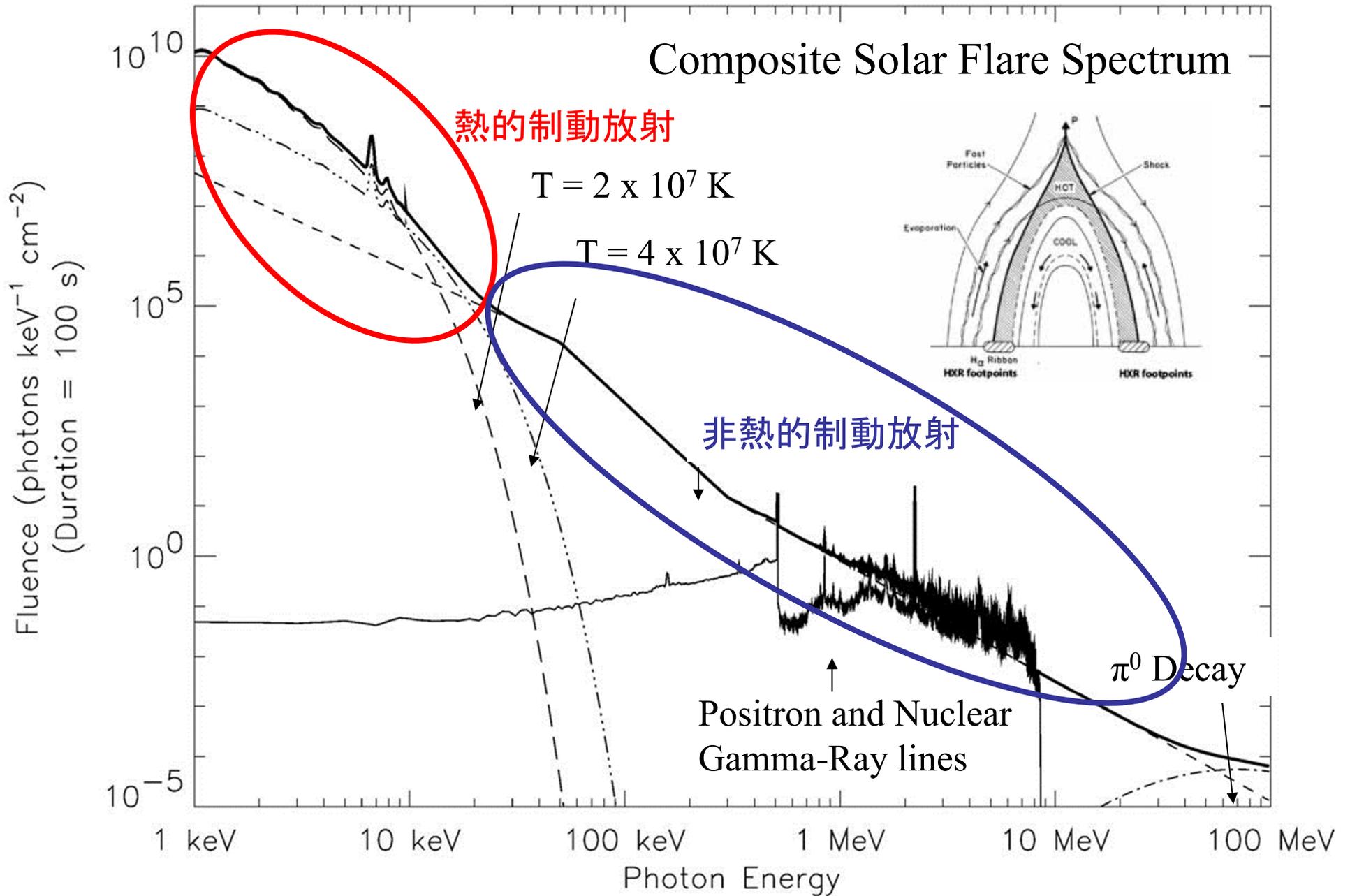


Hinodeによる  
フレアの  
X線観測

フレアの急激な  
増光に伴い、  
観測の露出時間  
が短くなり、  
フレア以前に  
見えていた  
明るいコロナが  
見えなくなる。



# Composite Solar Flare Spectrum



熱的制動放射

$T = 2 \times 10^7 \text{ K}$

$T = 4 \times 10^7 \text{ K}$

非熱的制動放射

Positron and Nuclear  
Gamma-Ray lines

$\pi^0$  Decay

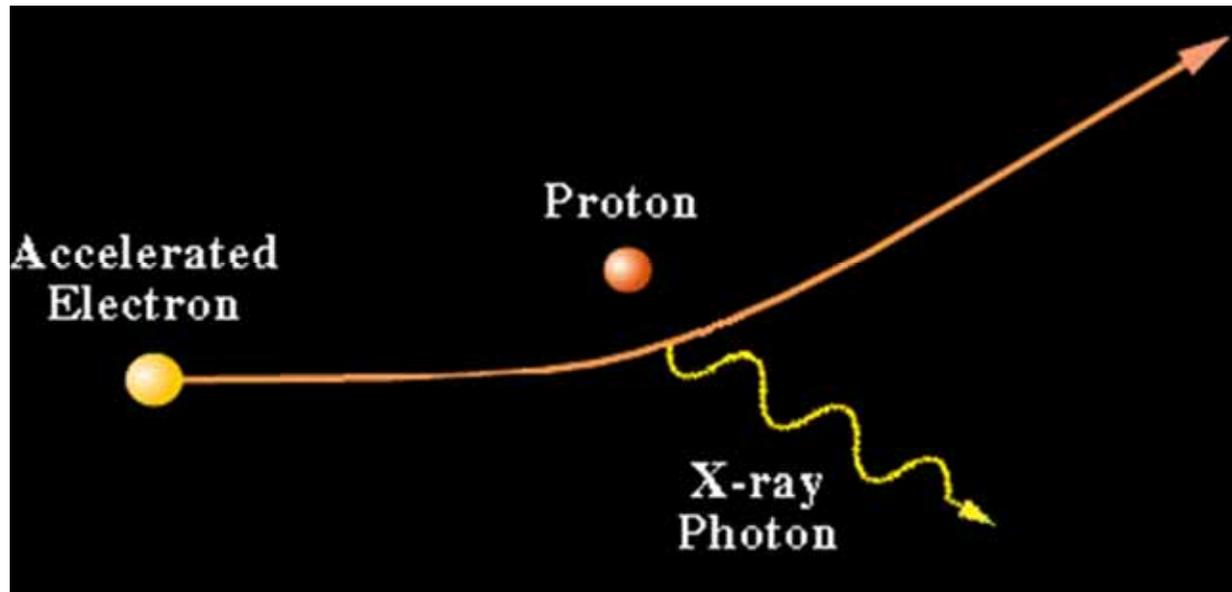
軟X線

硬X線

ガンマ線

# 制動放射 Bremsstrahlung emission

フレアで加速された電子は周囲のプラズマ(イオン)と衝突



加速電子と周囲のイオン・陽子の衝突 → 硬X線放射  
加速電子と周囲の電子の衝突 → エネルギーロス、熱化

太陽フレアで粒子加速現象を観測するには、

硬X線(エネルギーの高いX線)、ガンマ線を用いる。

どのようにして観測するか？

硬X線は、

鏡を使って集光することはできない  
透過性が高いため

直進性が高い

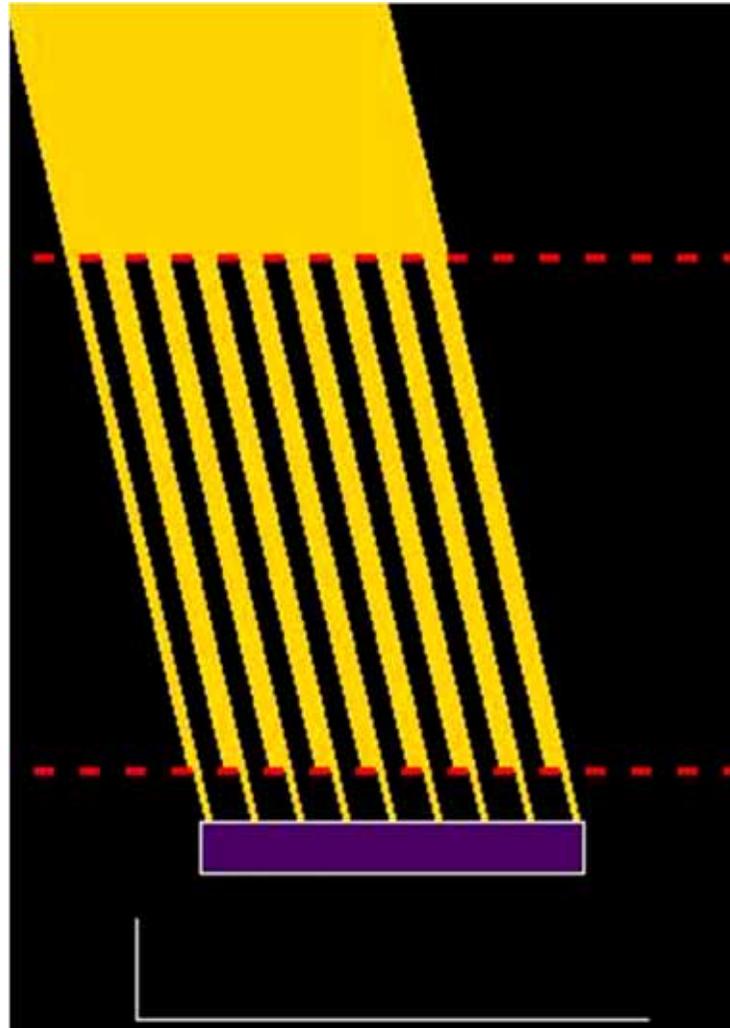
→ すだれコリメータ型望遠鏡

# すだれコリメータ型望遠鏡

入射X線

すだれ  
(重金属)

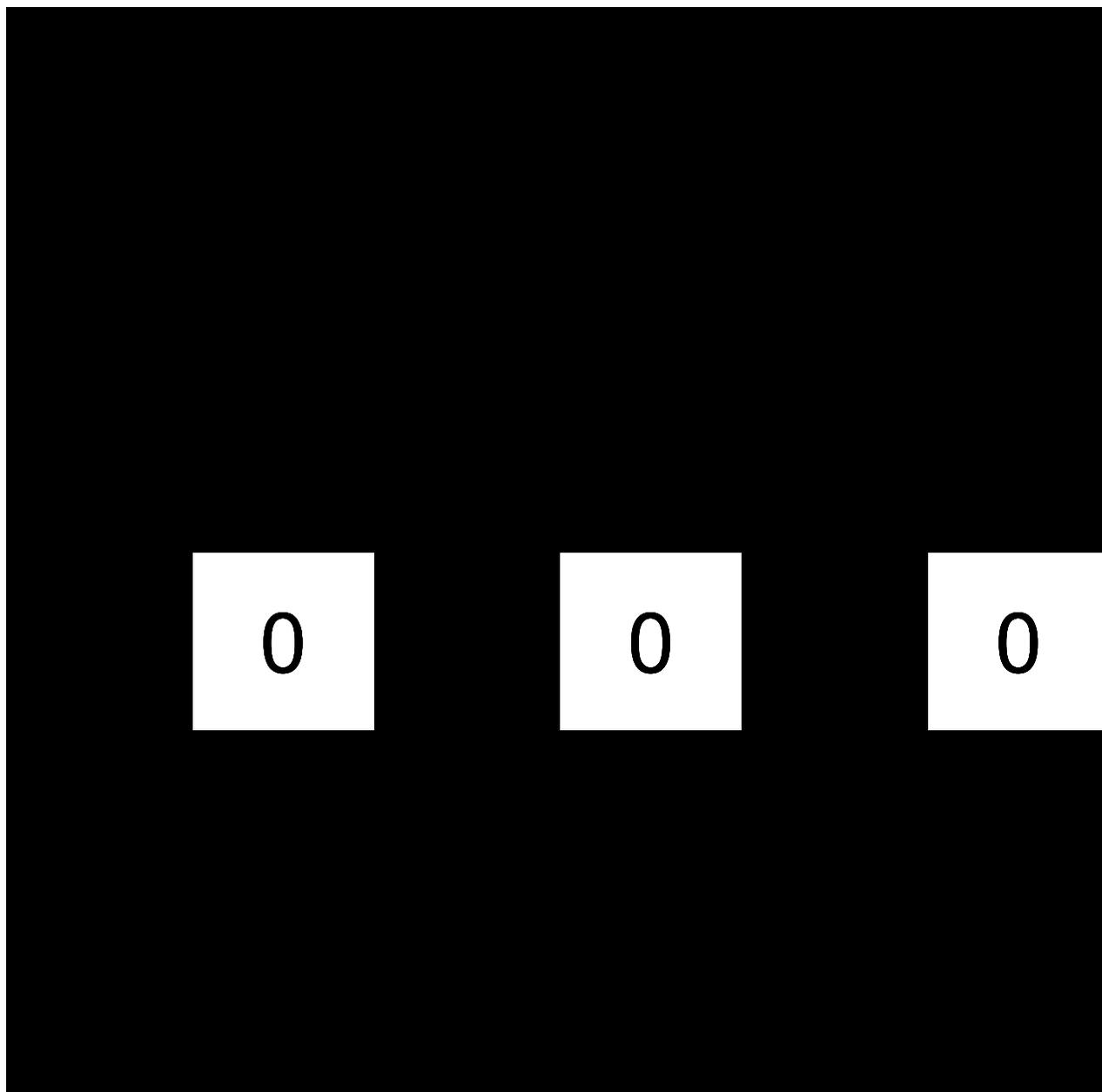
すだれ  
(重金属)



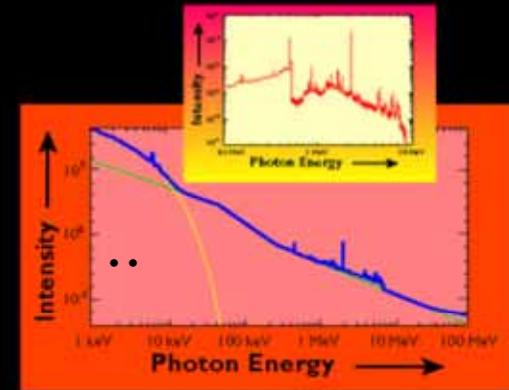
検出器

検出率(透過率)  
角度依存性がある。

# 天空上の硬X線放射源の分布

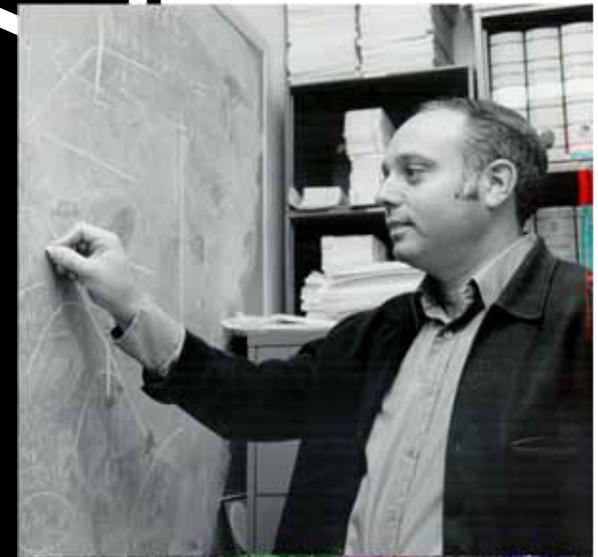
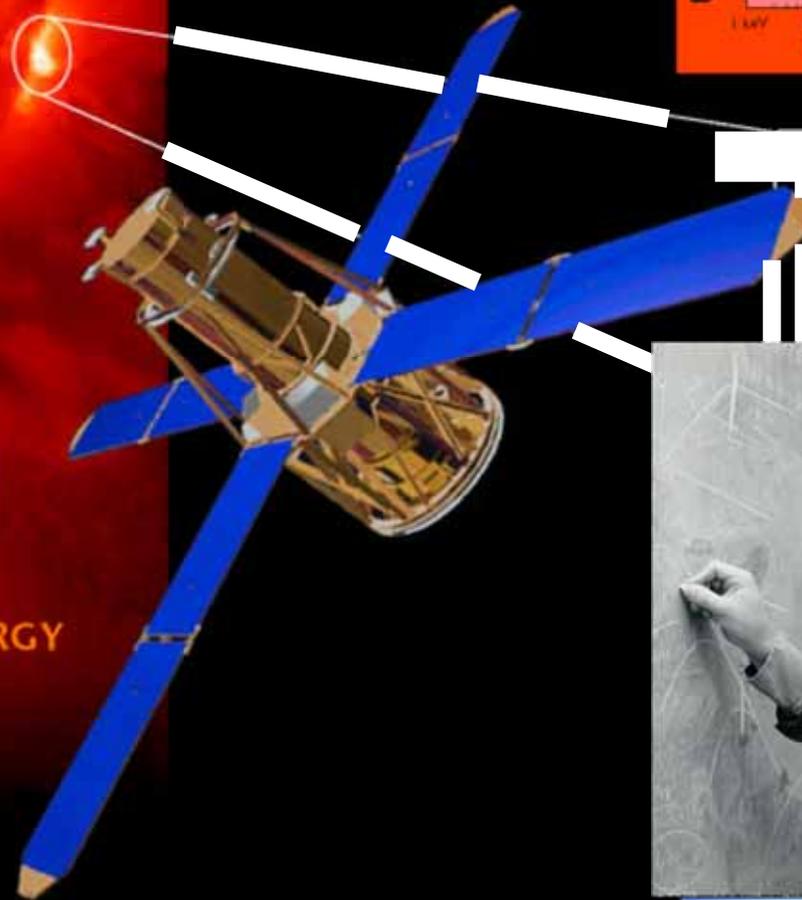


High-Resolution Spectroscopic Imaging of Solar Flares in X Rays and Gamma Rays



# RHESSI

THE REUVEN RAMATY HIGH ENERGY SOLAR SPECTROSCOPIC IMAGER



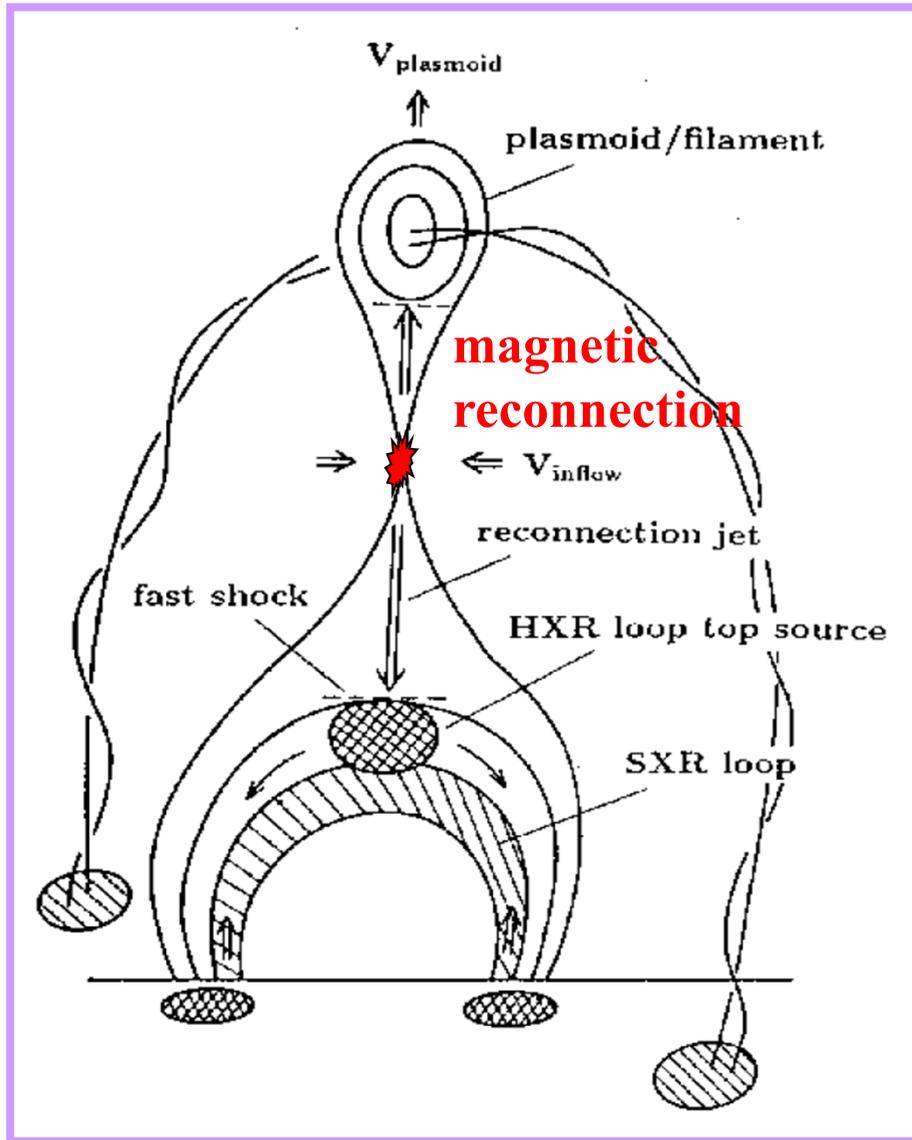
Reuven Ramaty  
1937 – 2001



*To explore the basic physics of particle acceleration and explosive energy release in solar flares*

## 2. 太陽フレアの硬X線観測

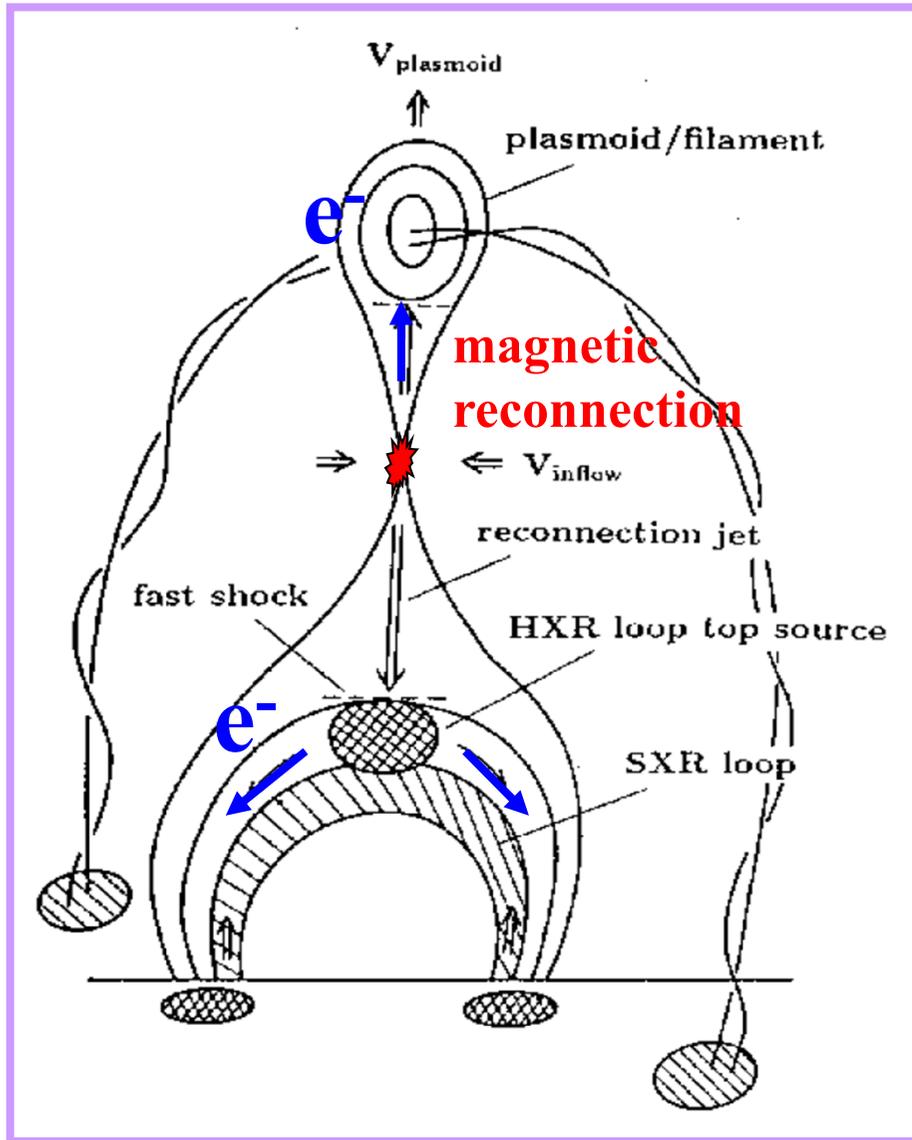
# 太陽フレアモデル



- 1) 磁気再結合によるエネルギー解放

From Shibata + Krucker

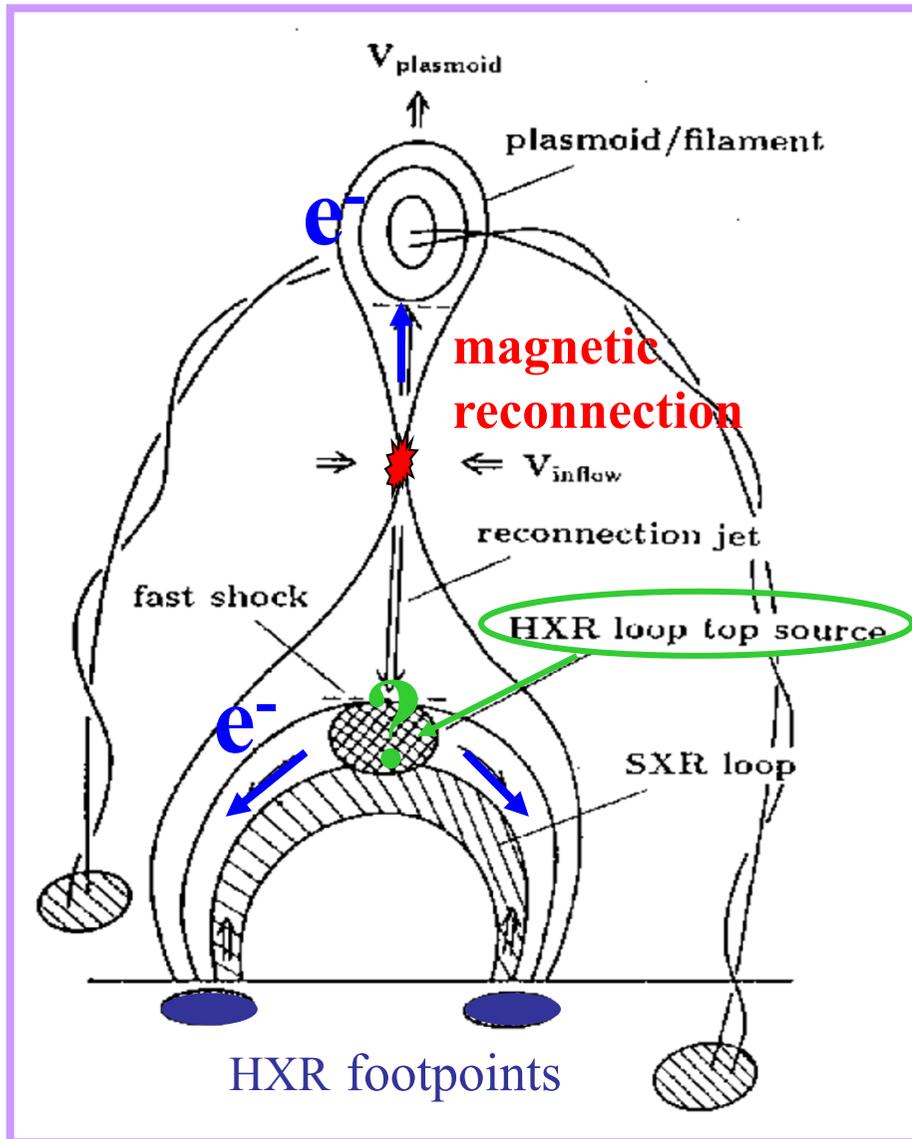
# 太陽フレアモデル



- 1) 磁気再結合によるエネルギー解放
- 2) 粒子加速 (機構は不明)

From Shibata + Krucker

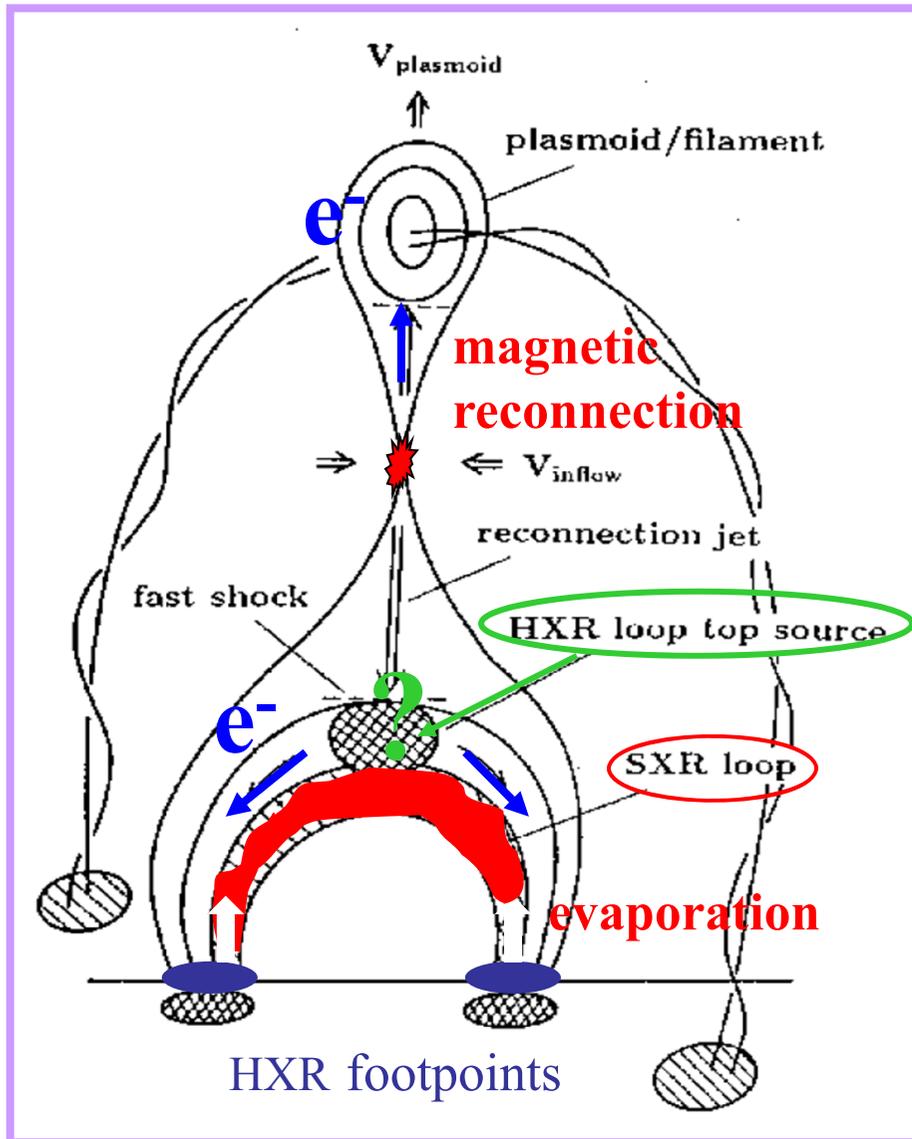
# 太陽フレアモデル



- 1) 磁気再結合によるエネルギー解放
- 2) 粒子加速 (機構は不明)
- 3) 加速された粒子がループ足元に降り込み、硬X線を放射。ループ上空の硬X線源の生成機構は不明

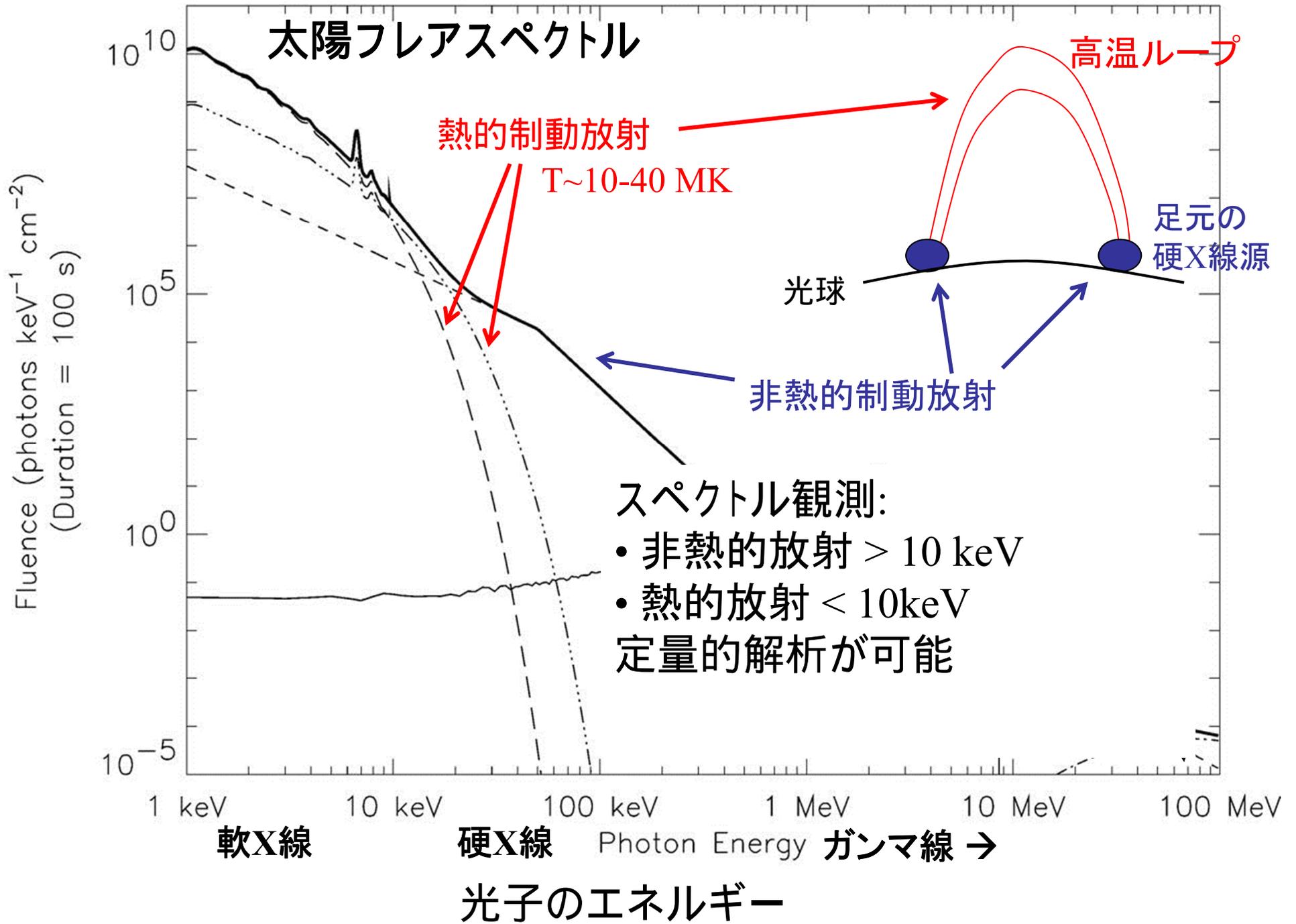
From Shibata + Krucker

# 太陽フレアモデル



- 1) 磁気再結合によるエネルギー解放
- 2) 粒子加速 (機構は不明)
- 3) 加速された粒子がループ足元に降り込み、硬X線を放射。ループ上空の硬X線源の生成機構は不明
- 4) ループ足元での彩層加熱。彩層蒸発により、高温高密度のフレアループの形成

From Shibata + Krucker

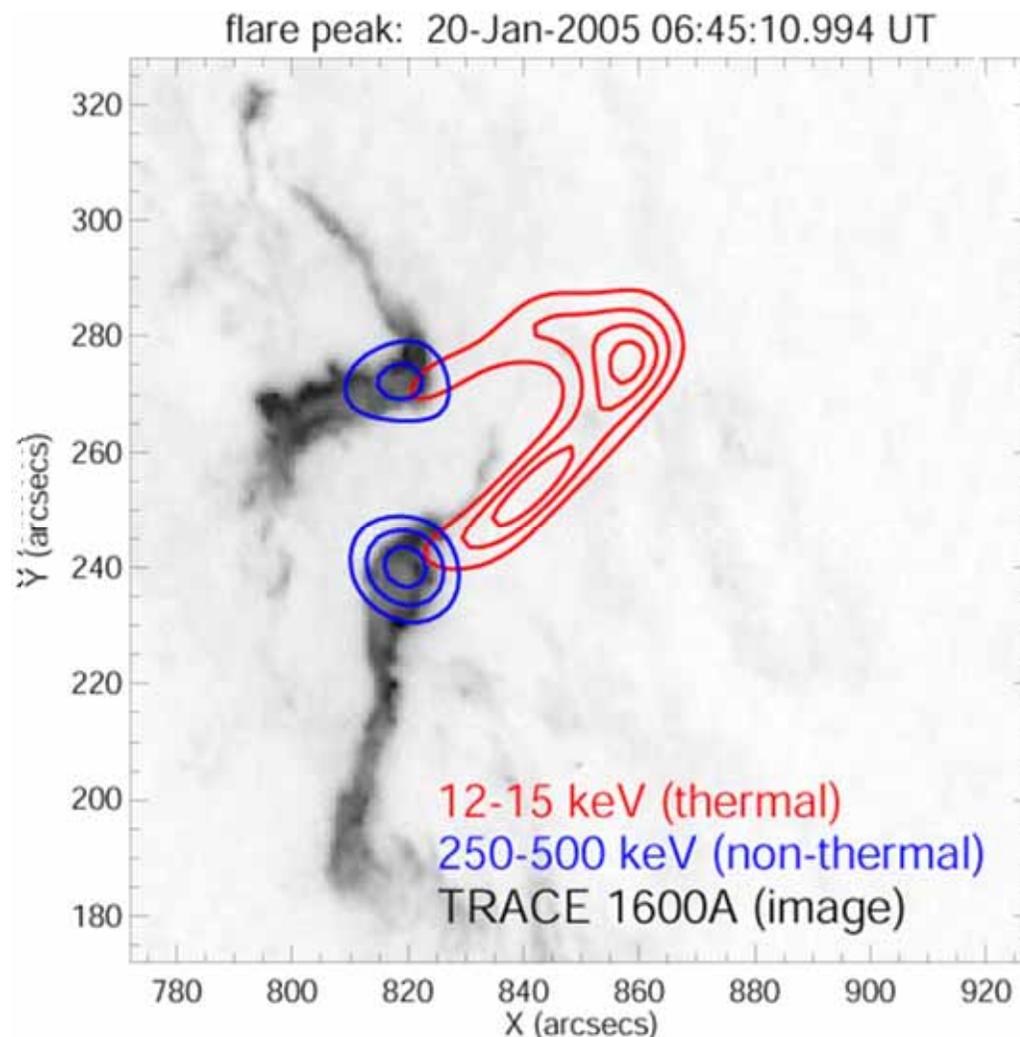
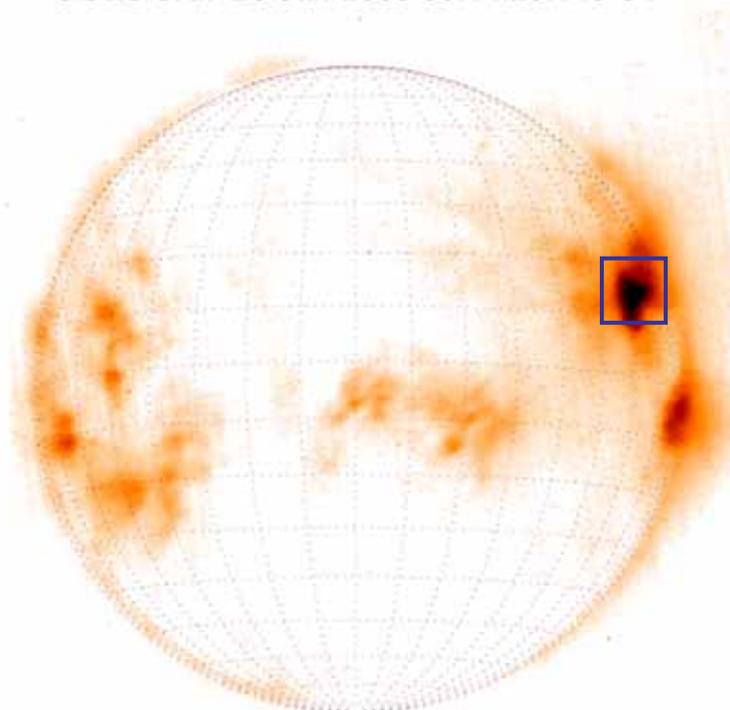


# X線撮像観測

例:

リム近くで起きたひじょうに  
大きなフレア (side view)

GOES SXI: 20-Jan-2005 06:44:29.148 UT

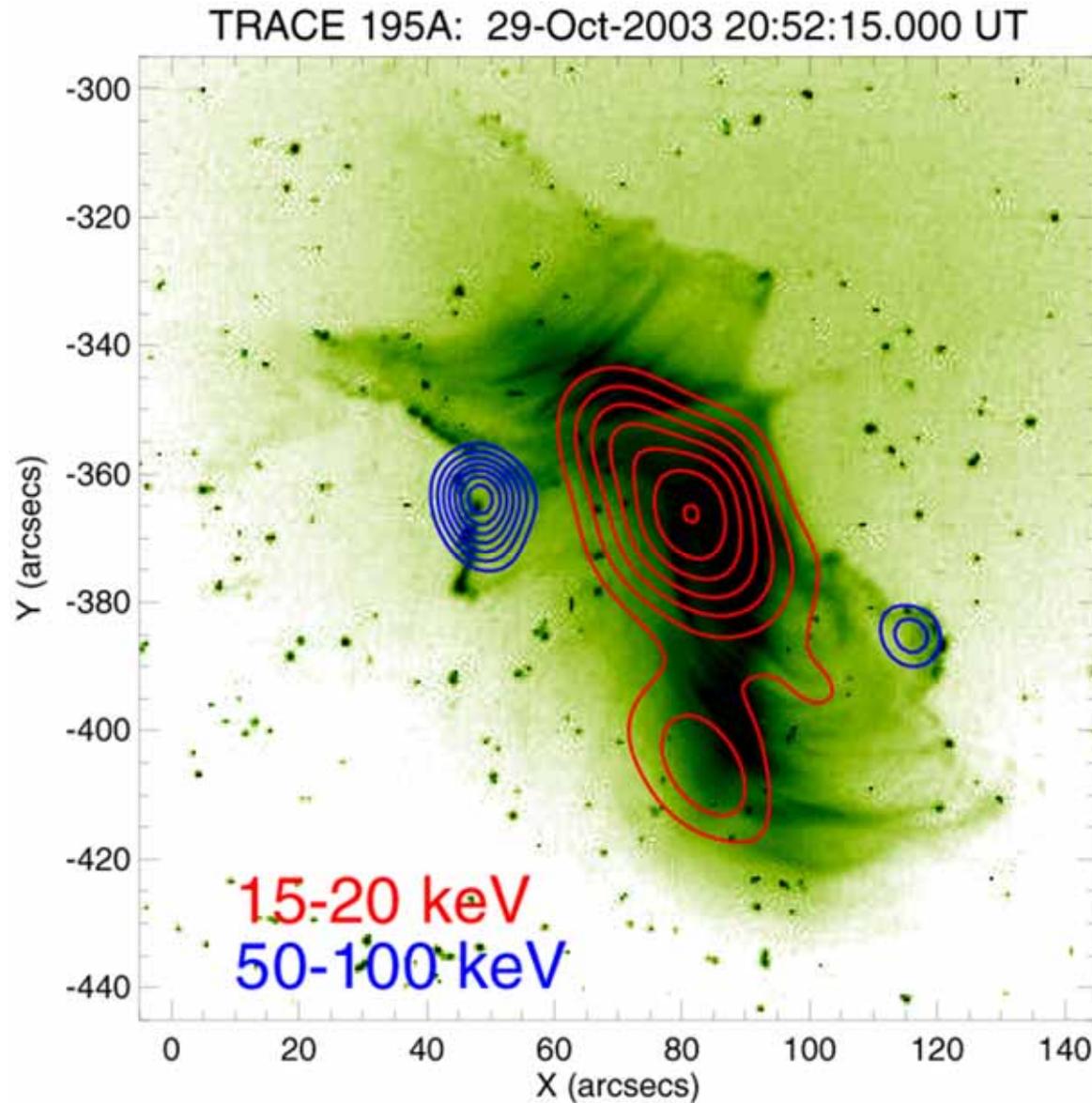


Two-ribbon flare

足元の硬X線源 (青)

超高温ループ 30-40 MK (赤)

例: 太陽中心付近で起きたひじょうに  
大きなフレア (top view)



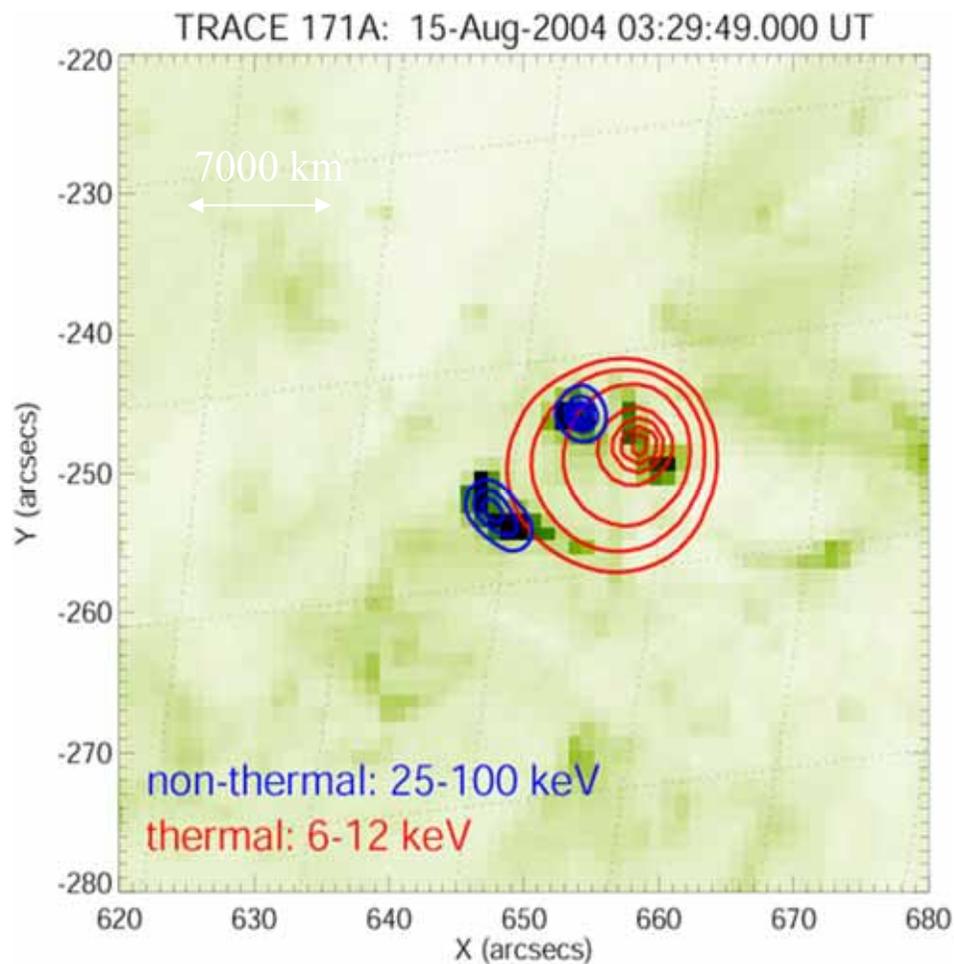
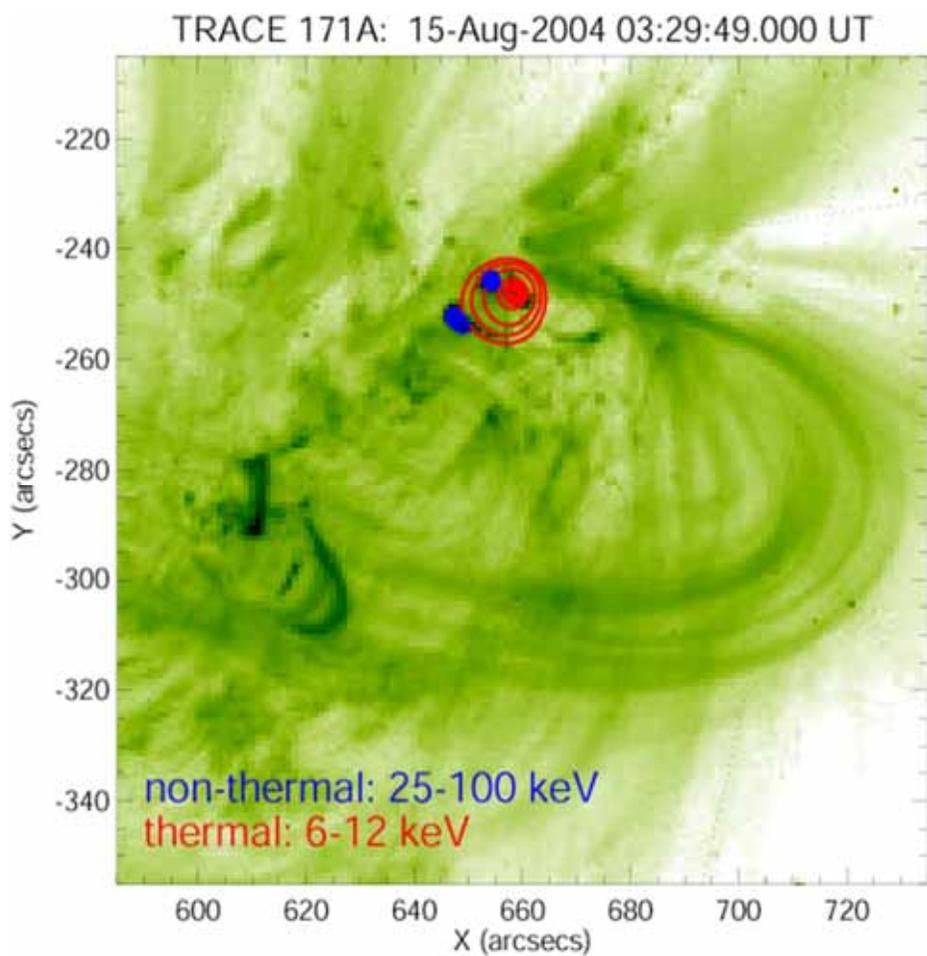
カラー画像:  
TRACE 紫外線  
温度  $\sim 1.5$  MK

青等高線:  
ループ足元の硬X  
線源(非熱的な放  
射)

赤等高線:  
熱的な放射  
温度  $\sim 30-40$  MK

# X線撮像観測

例: ひじょうにコンパクトなフレア



10秒角 ~ 7千 km

### 3. 太陽フレアにおける 粒子加速問題

**粒子加速**は、宇宙のいたるところで見られる現象

超新星残骸、パルサー、地球放射線帯、  
惑星間空間、木星磁気圏、、、

太陽フレアにおける粒子加速に関する研究テーマ

- ・多量の電子は、どのように加速されているのか？
- ・電子を高いエネルギー(>MeV)に加速する機構は？
- ・電子とイオンで加速場所や加速機構は違うのか？
- ・磁気リコネクションと粒子加速の関係は？
- ・小さなフレアでも粒子加速が起きている？

# 太陽における粒子加速研究の難しさ

**加速粒子そのものの観測データが無い。**

→ すべての情報はリモートセンシングで得ることになる。

**電磁波観測から粒子の情報に戻す際にモデルが必要。**

→ モデルの精度の問題

→ 「放射無し = 粒子無し」ではない

→ 磁力線に対する運動方向の情報を得ることは困難

**粒子の運動する場の情報も直接観測無し。**

→ コロナ磁場は光球面磁場から推測

→ プラズマ密度・温度の導出も仮定が必要

# 太陽フレアにおける粒子加速研究の有利な点

現象の起きているシステムの全体像を把握できる

- 空間スケールやトポロジー
- 時間変動と空間変動を同時に観測可能
- エネルギー収支の考察が可能  
(熱 / 加速粒子 / 運動エネルギー)

ただし、全体像を把握するには、さまざまな波長での観測が必要。

- 多波長観測 (電波、可視光、紫外線、軟X線、硬X線、 $\gamma$ 線)

逆に、太陽フレアのモデルには、すべての波長での観測結果を同時に説明可能であることが要求される。

# GEMSIS-Sun



## GEMSISとは

**Geospace Environment Modeling System  
for Integrated Studies**

3つのグループ: Sun, Magnetosphere, Ionosphere

GEMSIS-Sun メンバー:

名大: 増田智, 草野完也, 松原豊,  
三好由純, 山本哲也

他機関: 簗島敬, 井上諭, 塩田大幸, 浅井歩,  
渡邊恭子

# GEMSIS-Sun



目的:

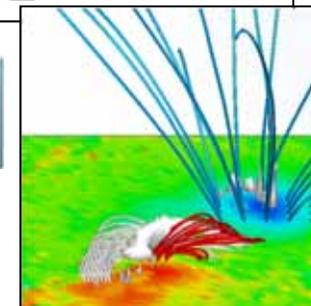
**太陽フレアの全ての過程を理解する**

磁気浮上、光球面運動

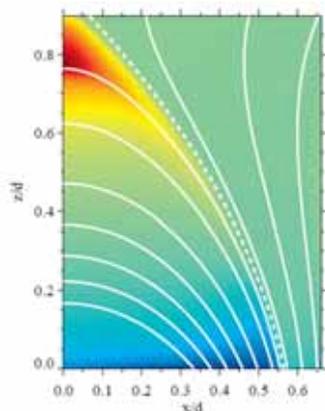
トリガー機構

エネルギー解放  
粒子加速

コロナ磁場モデル

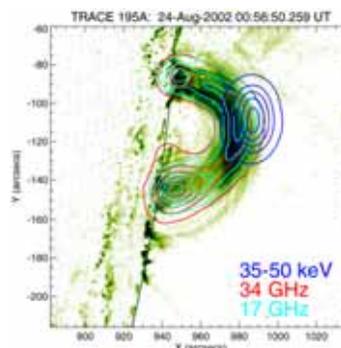


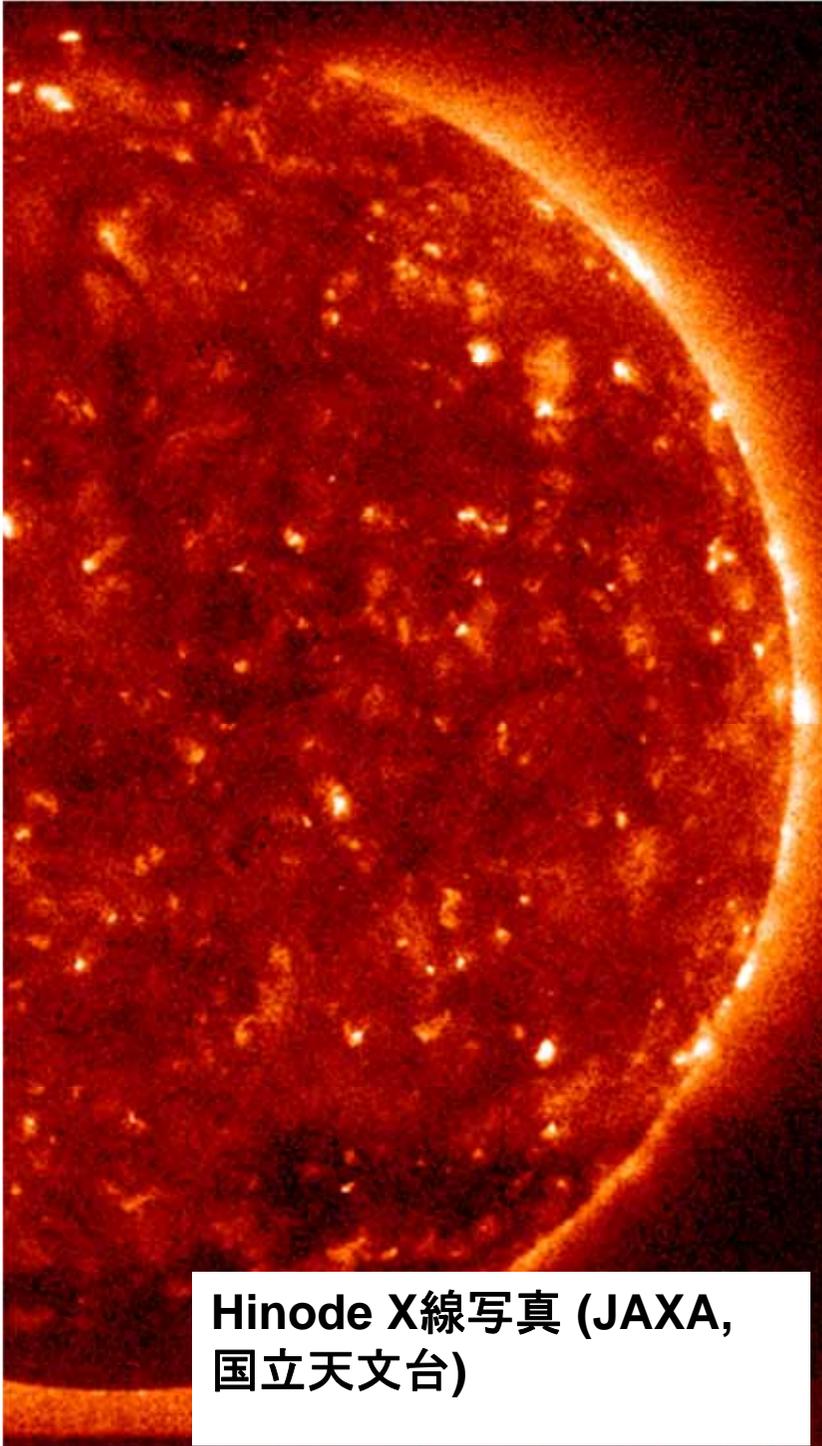
モデリング・シミュレーション



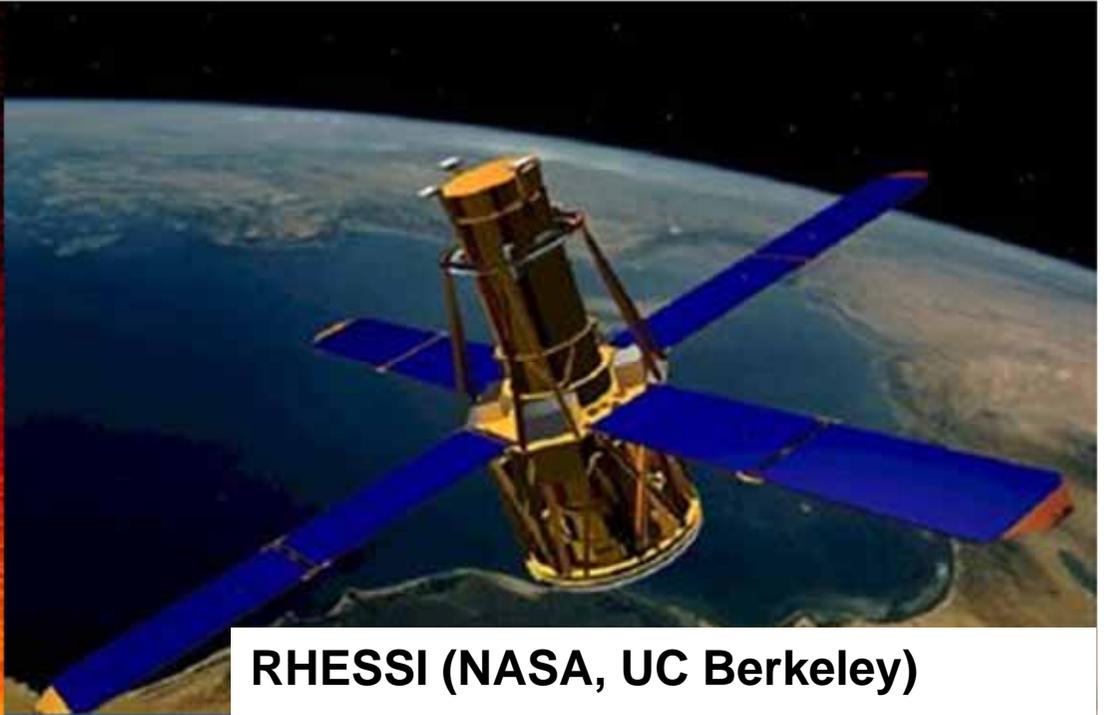
Hinode  
フレアカタログ

多波長データ解析





Hinode X線写真 (JAXA,  
国立天文台)



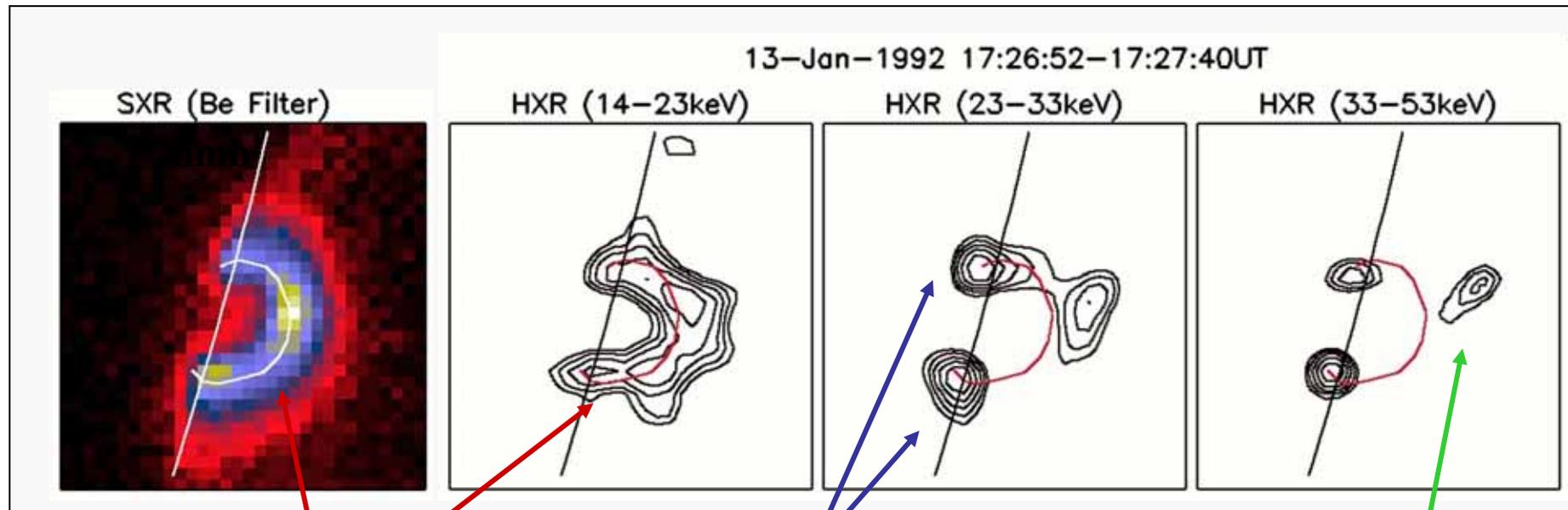
RHESSI (NASA, UC Berkeley)



野辺山電波ヘリオグラフ(国立天文台)

# 太陽フレアの粒子加速問題の鍵を握る フレアループ上空の硬X線源

ようこう衛星の硬X線望遠鏡)による観測  
観測が困難： 10年間の観測で10個程度



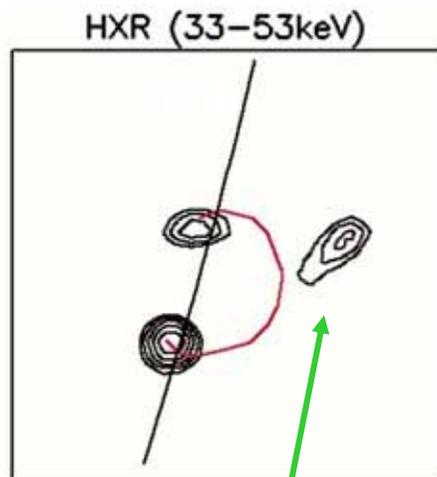
高温ループ

足元の硬X線源

ループ上空の  
硬X線源

(Masuda et al. 1994)

# フレアループ上空の硬X線源

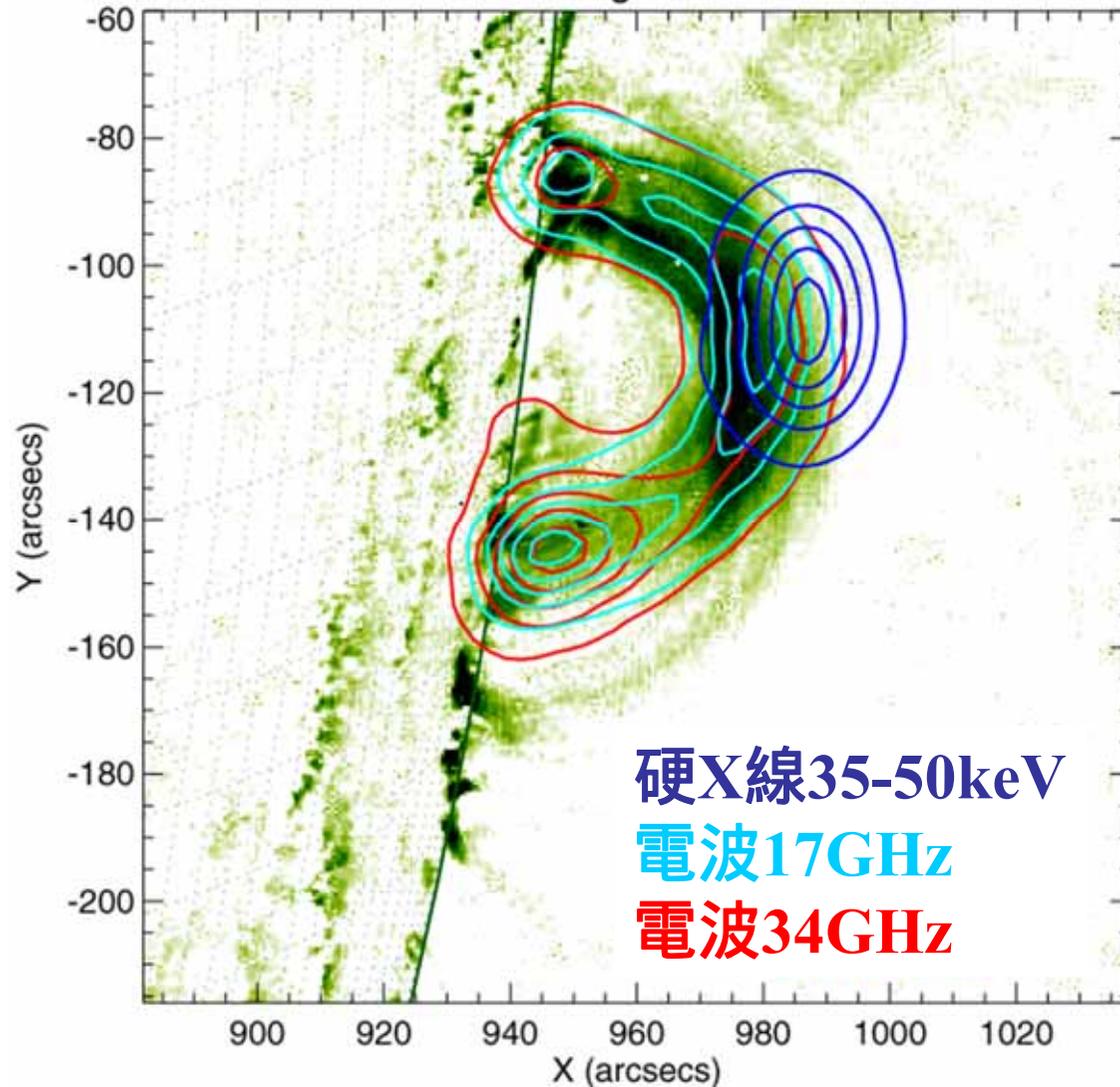


ループ上空の  
硬X線源

- ・すべてのフレアがこの硬X線源を持っているのか。  
(数が少ないのは、観測装置の問題?)
- ・放射機構は何？  
熱的制動放射？  
非熱的制動放射？

# 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)

ループトップ電波源は、ループトップ硬X線源より下方にある

硬X線 = 制動放射

~ 50 keV の硬X線 ← ~ 100 keV 電子

電波 – ジャイロシンクロトン放射

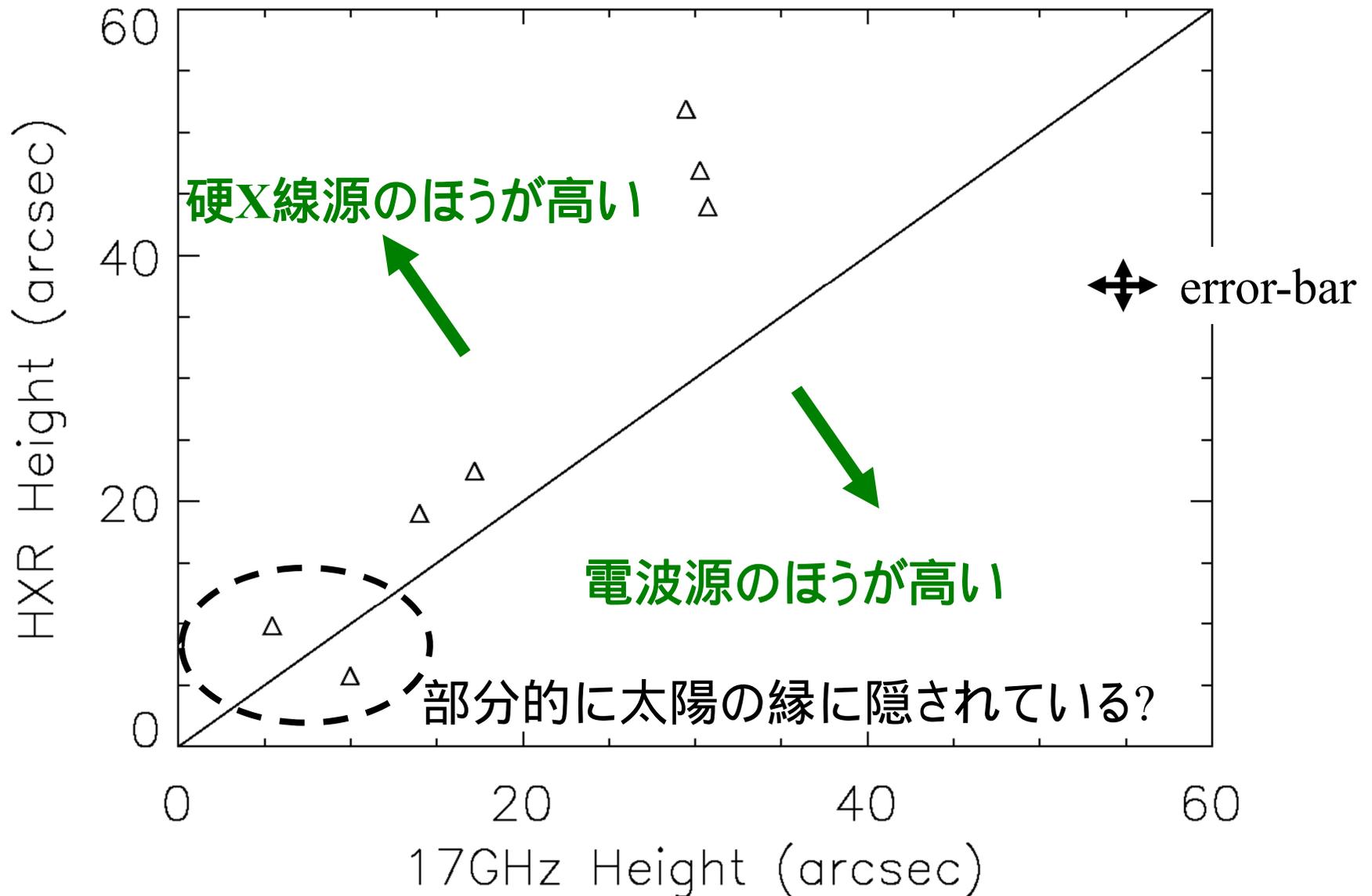
17GHz の電波 ← ~ 1 MeV 電子

~ 1 MeV 電子は ~ 100 keV 電子より下方に存在している

これは、どのフレアでも成り立つか？

→ バイアスのかかっていないサンプルで統計解析

# 硬X線源(33-53keV)と電波源 (17GHz)の高さの比較



## 観測結果のまとめ

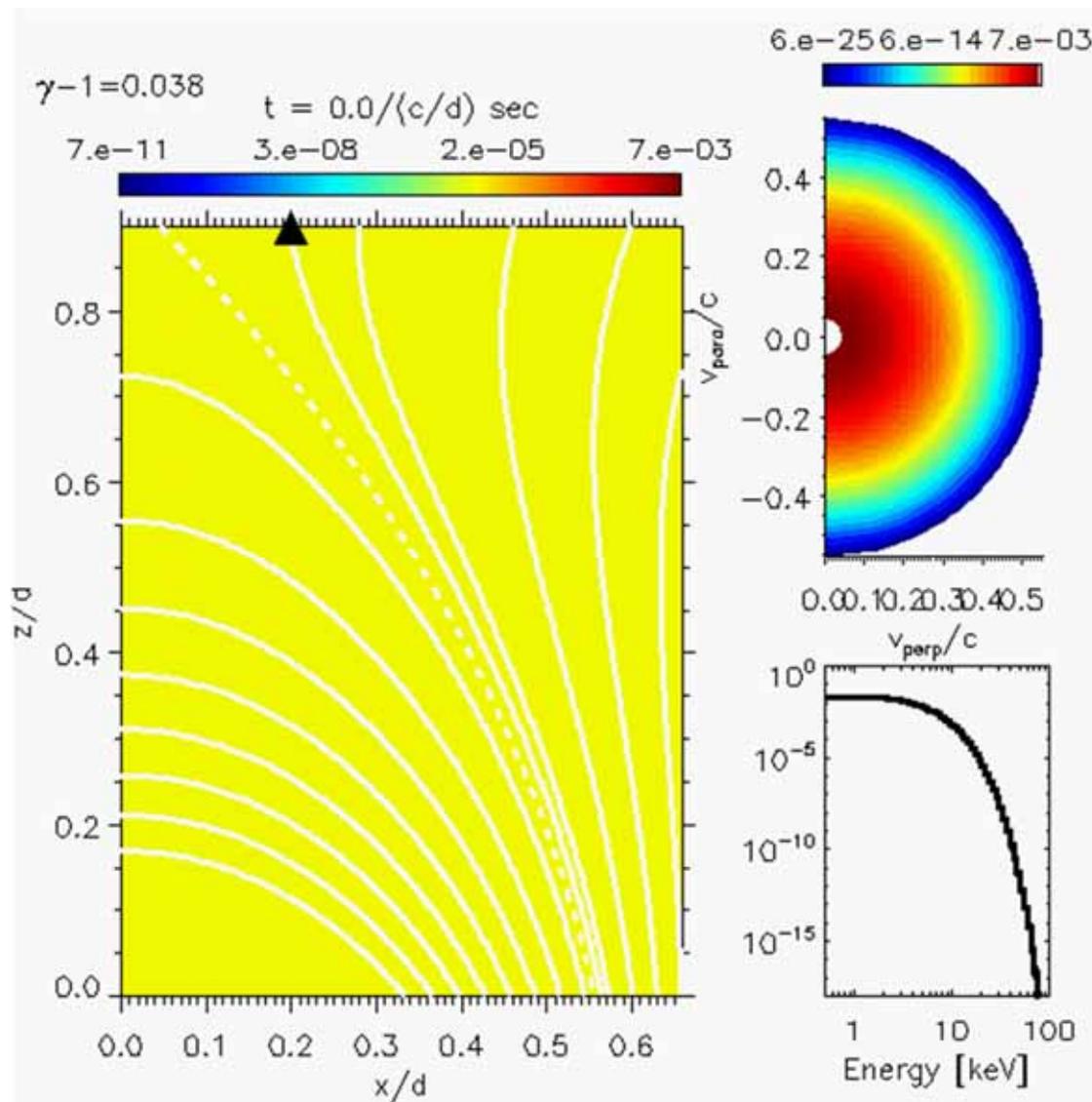
放射	元の電子	高さ
低エネルギー硬X線	~ 50 keV	低高度
高エネルギー硬X線	~100keV	高高度
電波(17GHz)	~1 MeV	低高度

どのような機構がこのような結果を生み出すのか？

→ モデリング / シミュレーション

# GEMSIS-Sun

## 太陽フレア粒子加速数値計算



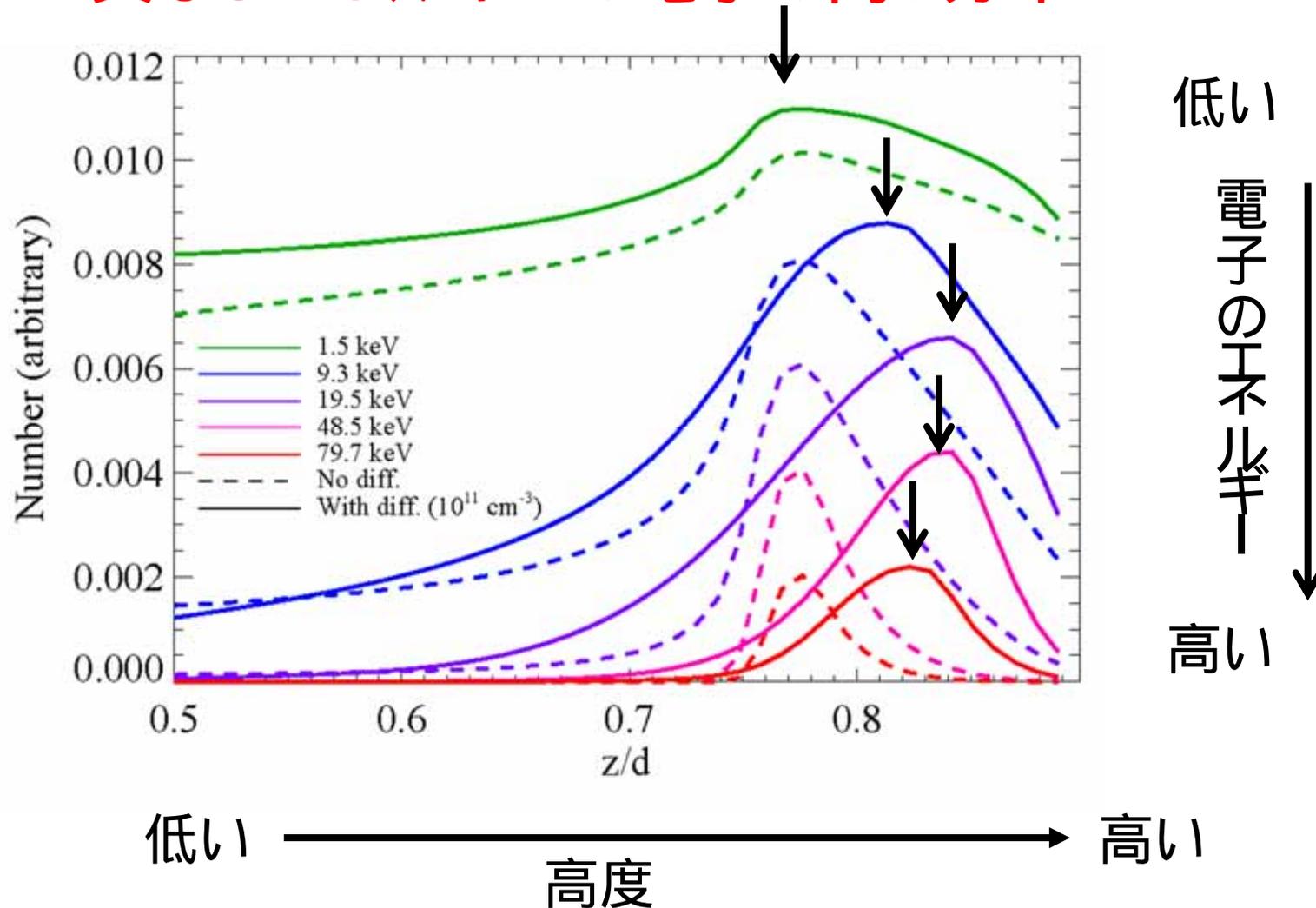
- I. 開いた磁力線におけるフェルミ加速
- II. 閉じた磁力線におけるドリフト加速

- 左図: 20 keV 電子数分布
- ▲: 電場ドリフト軌道
- 右上図: ▲の速度空間分布
- 右下図: ▲のエネルギー分布

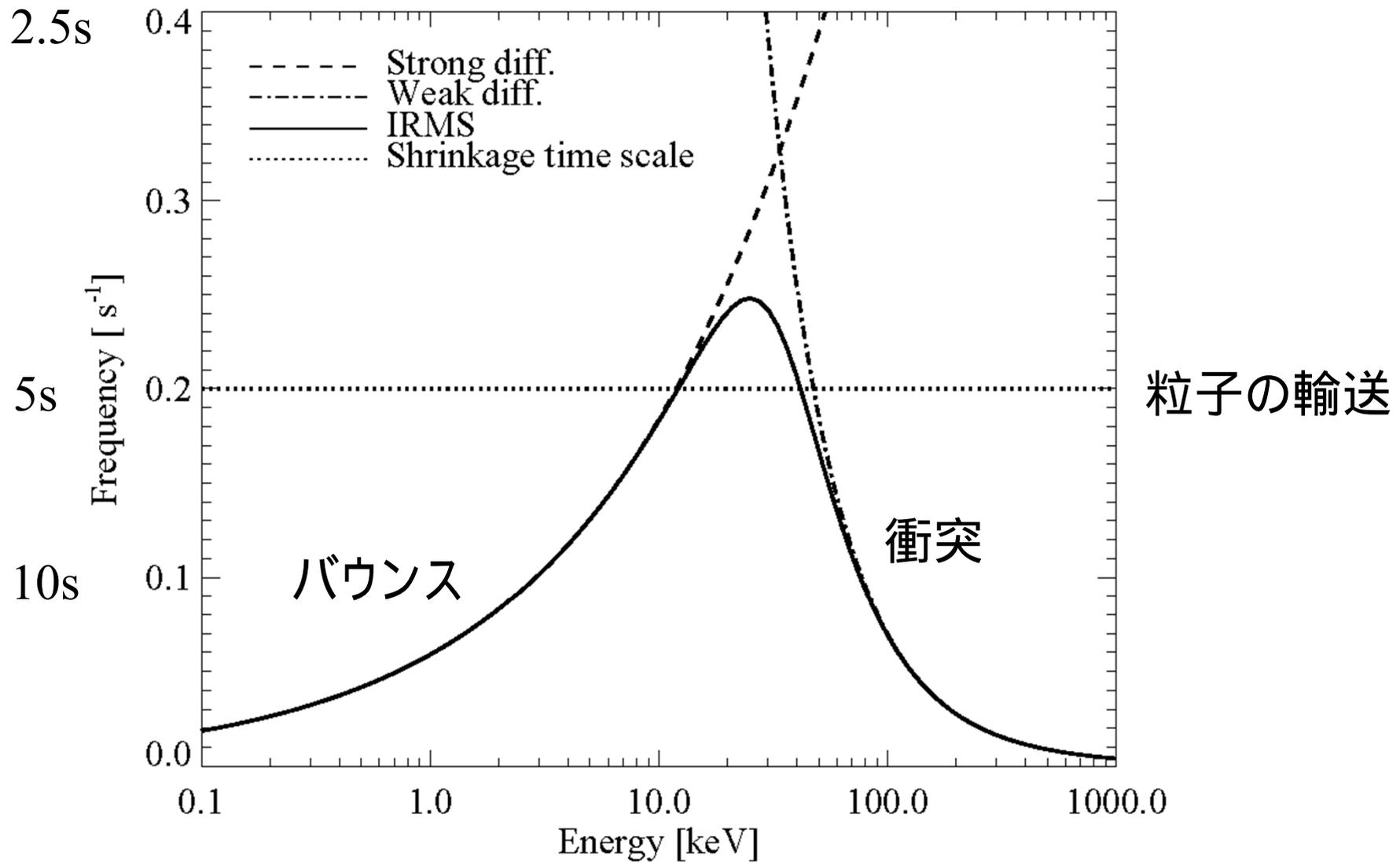
# Modeling of particle acceleration based on drift-kinetic theory with collisional process

(Minoshima, Masuda, Miyoshi, and Kusano, ApJ, 2011)

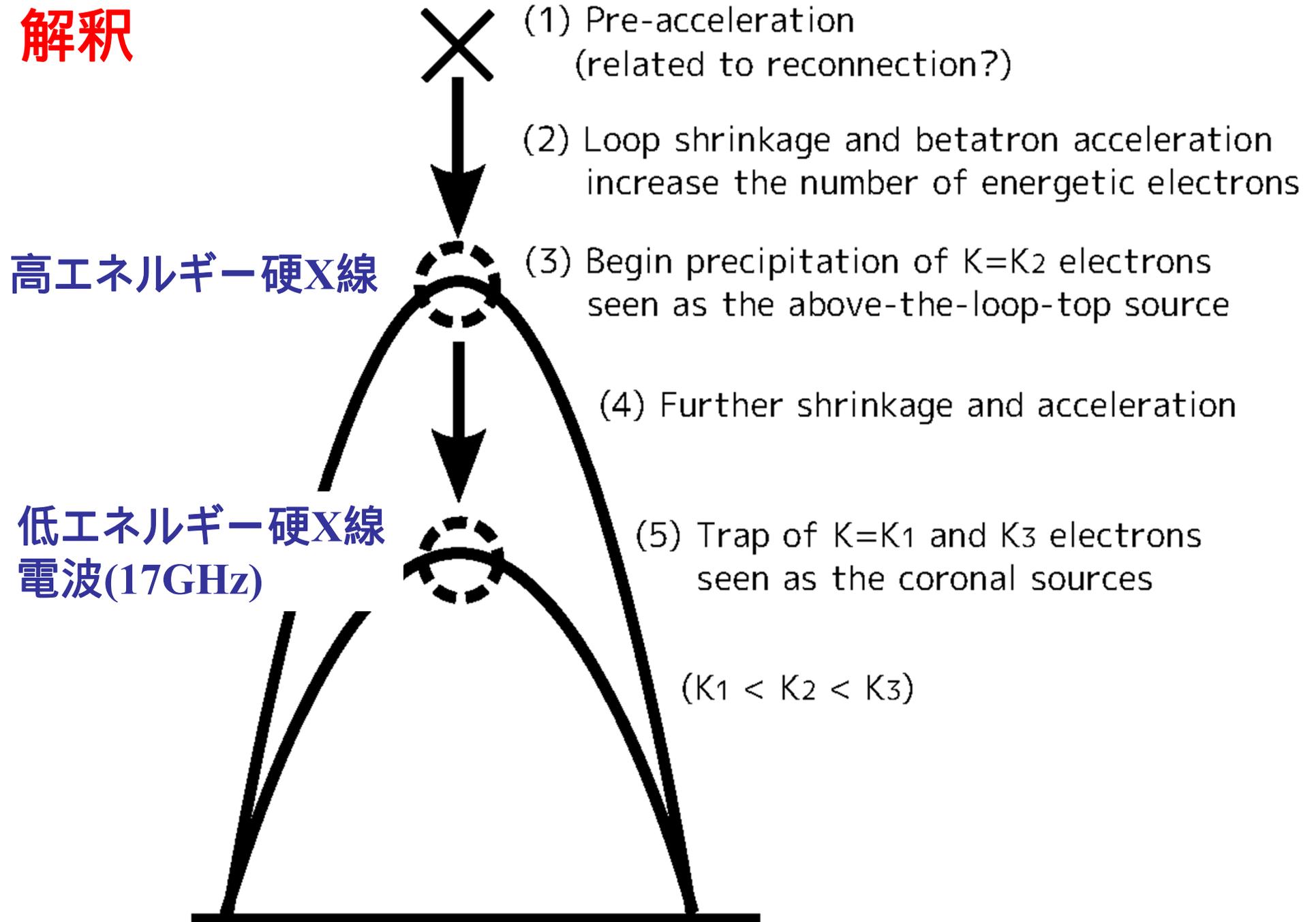
## 異なるエネルギーの電子の高さ分布



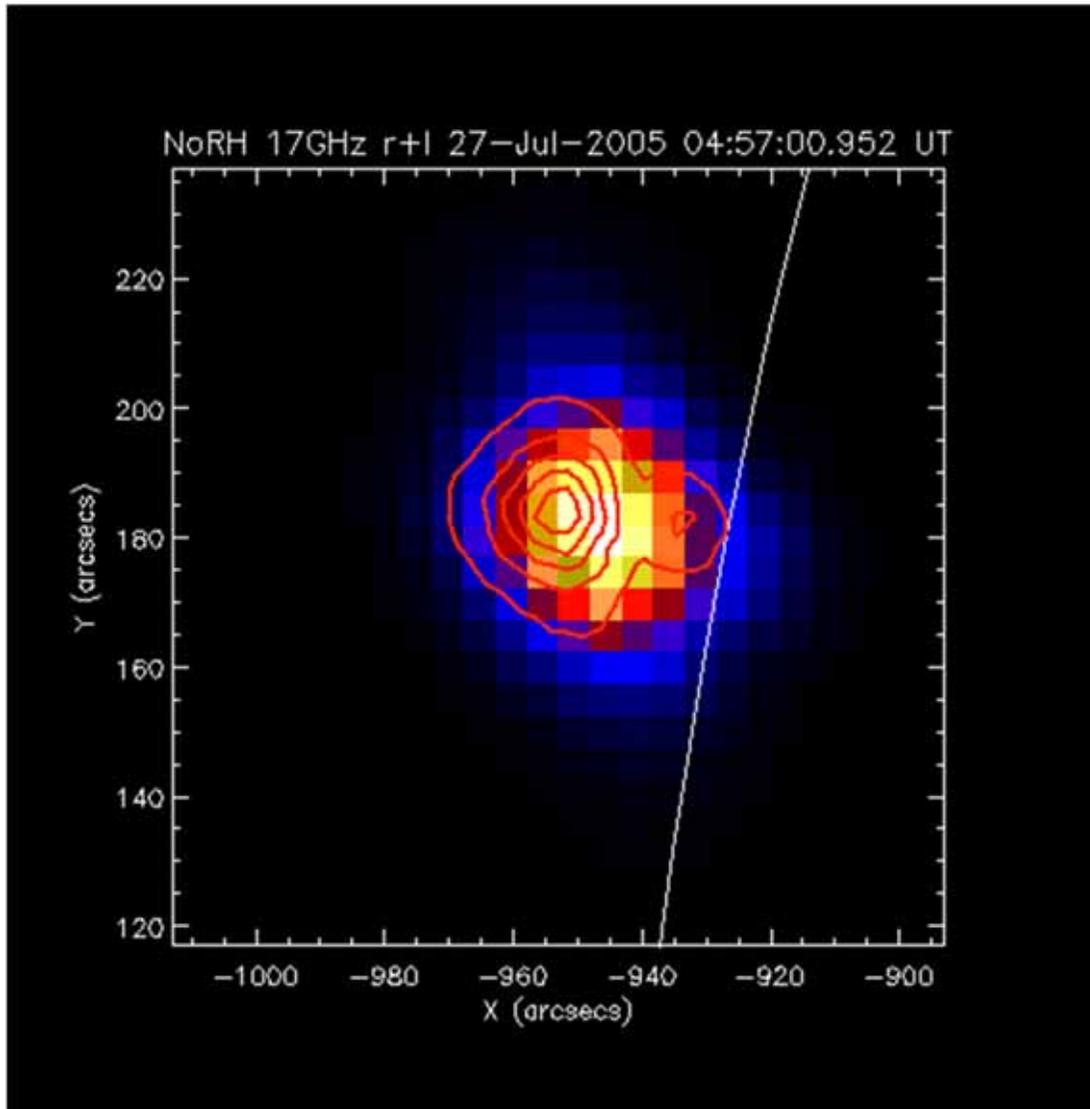
# 衝突のタイムスケール vs バウンスのタイムスケール + 輸送のタイムスケール



# 解釈



# Microwave images of 27-July-2005 flare

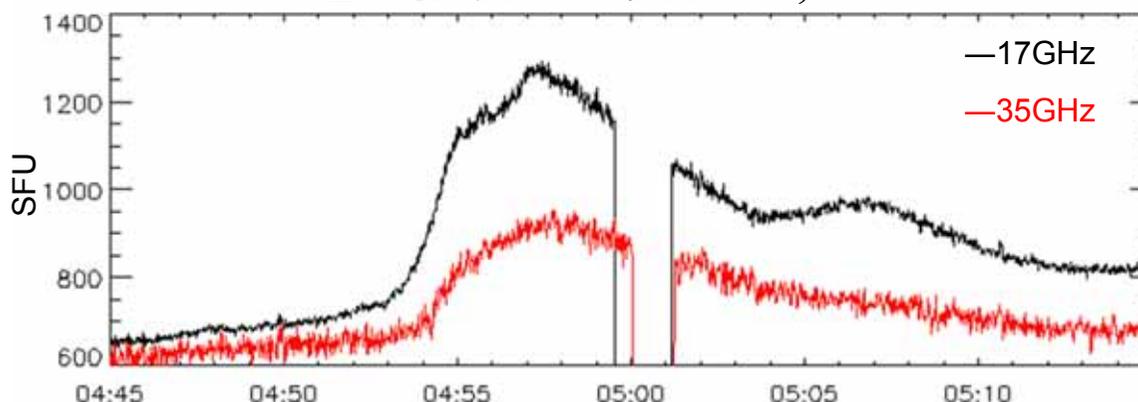


Color: 17GHz  
Contours: 34 GHz

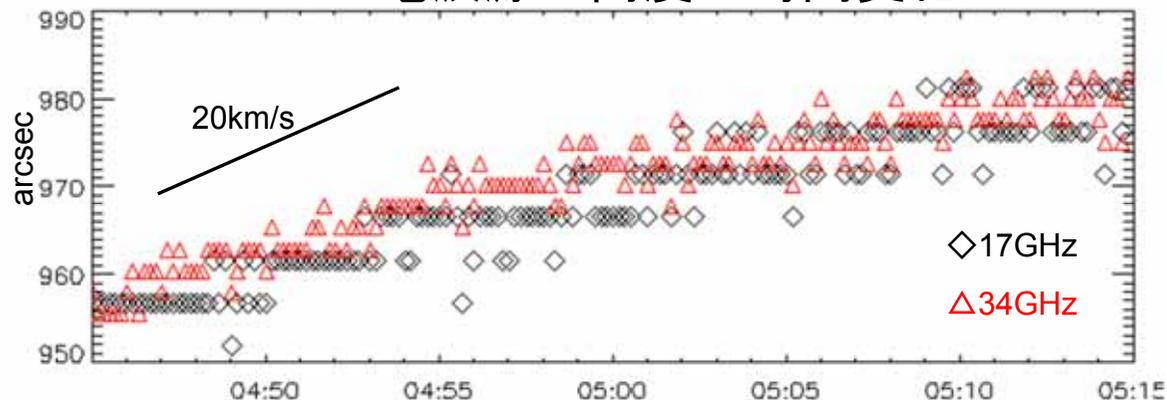
# 観測結果

- フレアの全期間中、34GHz電波源のほうが、17GHz電波源より高高度に位置している。
- その差は、電波強度のピーク時刻付近でもっとも大きくなる。

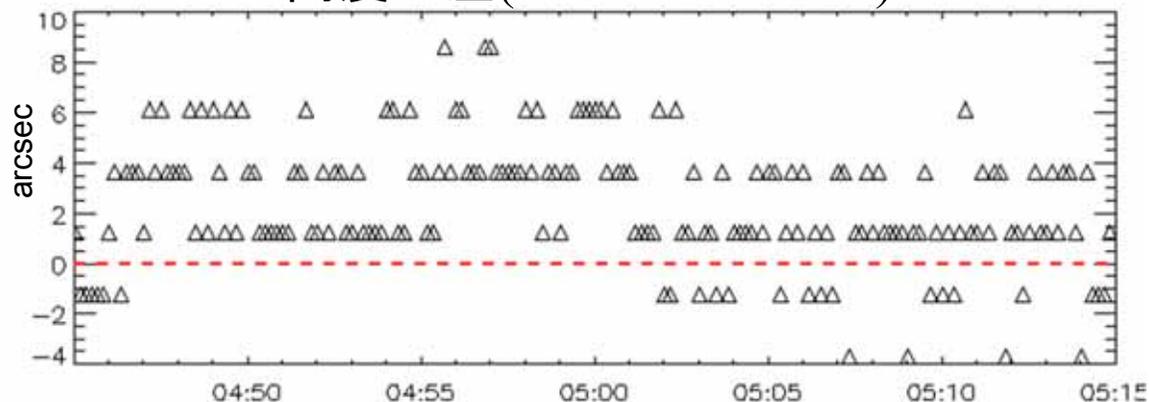
電波強度時間変化 17, 34 GHz



電波源の高度の時間変化



高度の差(34GHz - 17GHz)

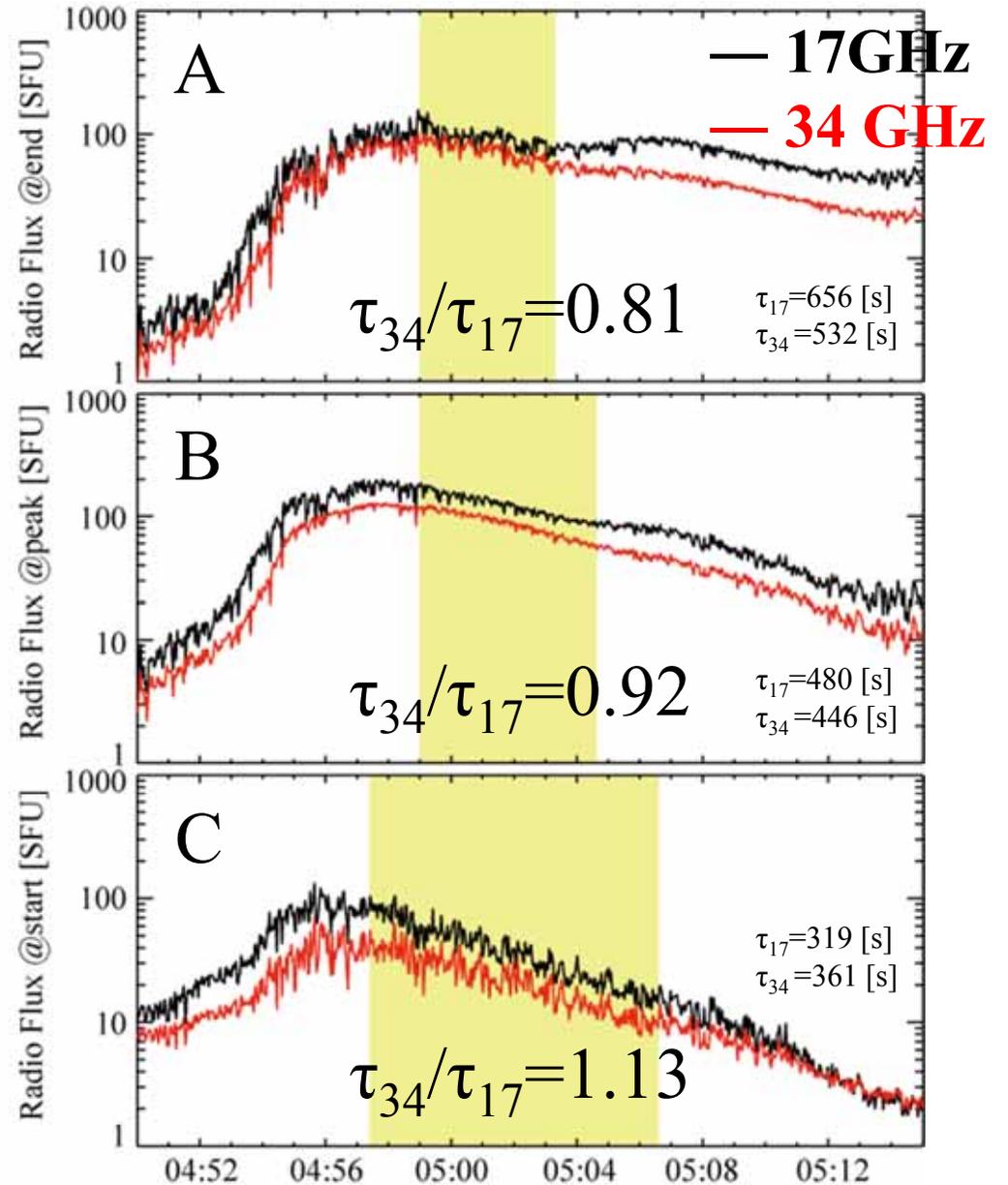
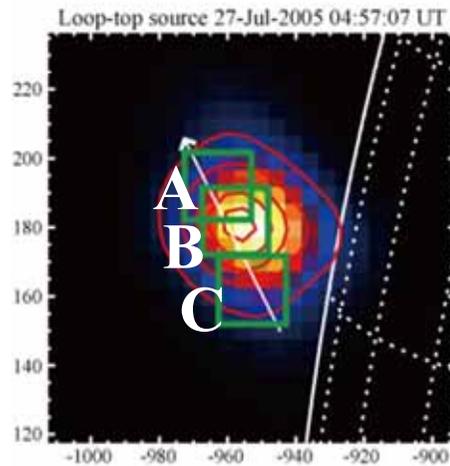


# 原因に関する議論

- 34GHz電波源のほうが17GHz電波源より高い高度にある。
  - 高さによる磁場強度の違い？  
高高度のほうが一般的に磁場が弱い  
→ 観測とは逆
  - 34GHz電波を放射する高エネルギー電子に衝突以外のロス機構が働いている？
  - 34GHz電波が放射されているを高度で別の加速機構が存在する？

# 解析結果

- e-folding timeの比の値が1.68よりも小さい。
- 低高度から高高度に向かって電波強度のe-folding timeの比が小さくなる。
- 高高度でe-folding timeの比が1より小さくなる領域がある。



## 太陽フレアにおける**粒子加速**に関する研究テーマ

- ・多量の電子は、どのように加速されているのか？
- ・電子を高いエネルギー(>MeV)に加速する機構は？
- ・電子とイオンで加速場所や加速機構は違うのか？
- ・磁気リコネクションと粒子加速の関係は？
- ・小さなフレアでも粒子加速が起きている？

まだまだ解くべき問題は多い。

若い人たちに期待しています。

太陽フレア研究は楽しいですよ。