

ALMAを用いた太陽フレア粒子加速研究

名古屋大学太陽地球環境研究所 増田 智

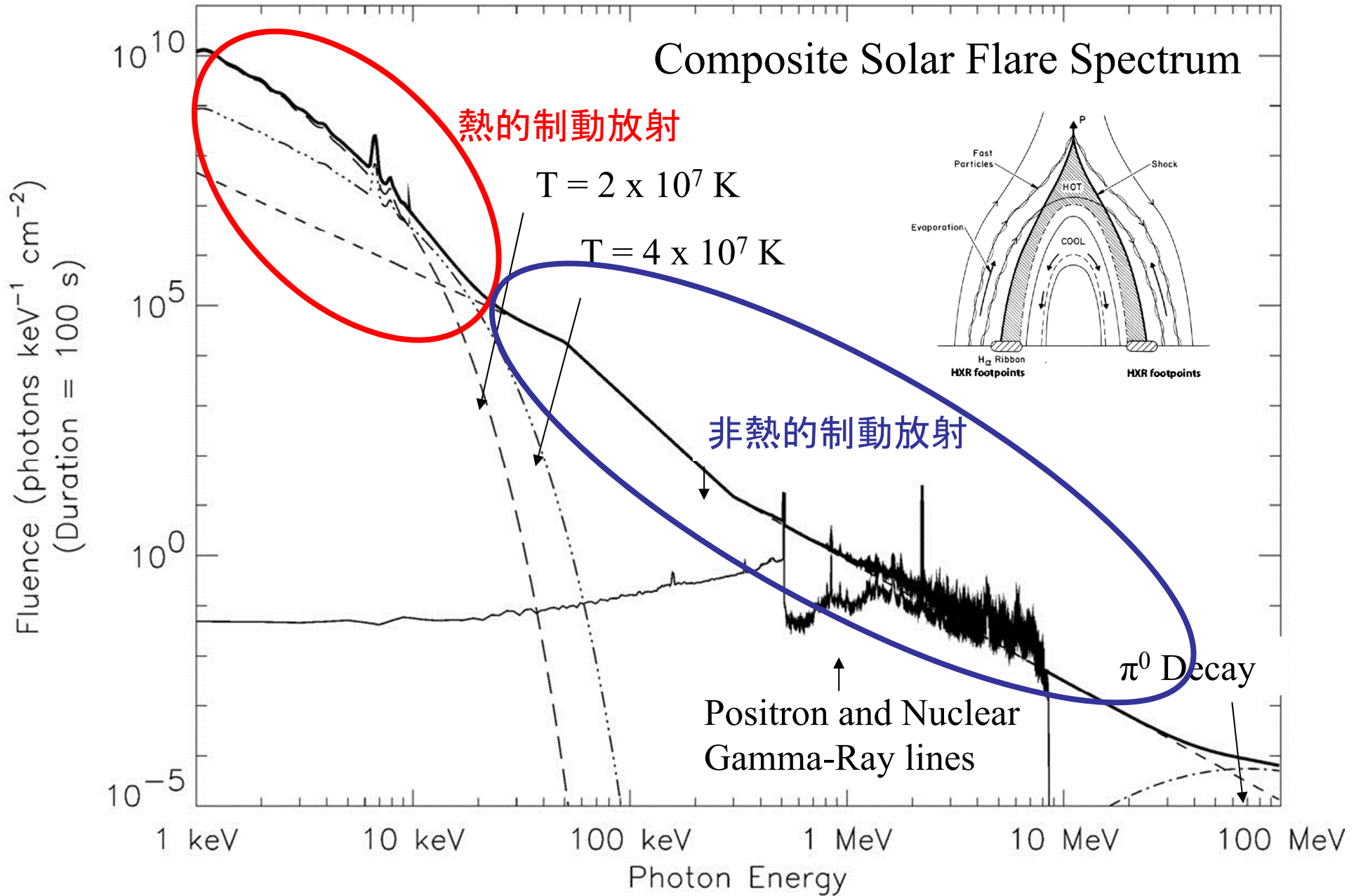
太陽フレア粒子加速研究

Looptop or さらに上空(コロナ)の観測ターゲット

Footpoint source (彩層)の観測ターゲット

微小な粒子加速研究

Composite Solar Flare Spectrum



軟X線

硬X線

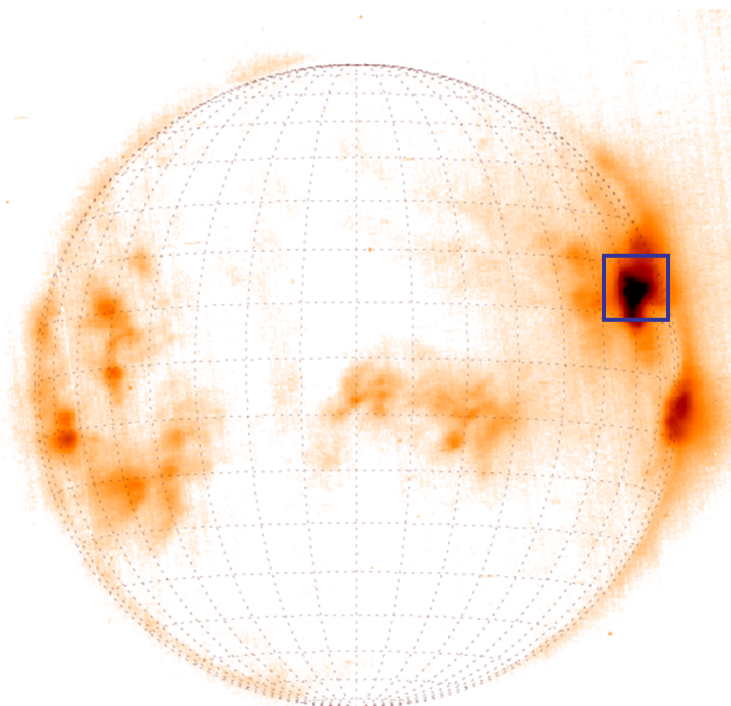
ガンマ線

X線撮像観測

例:

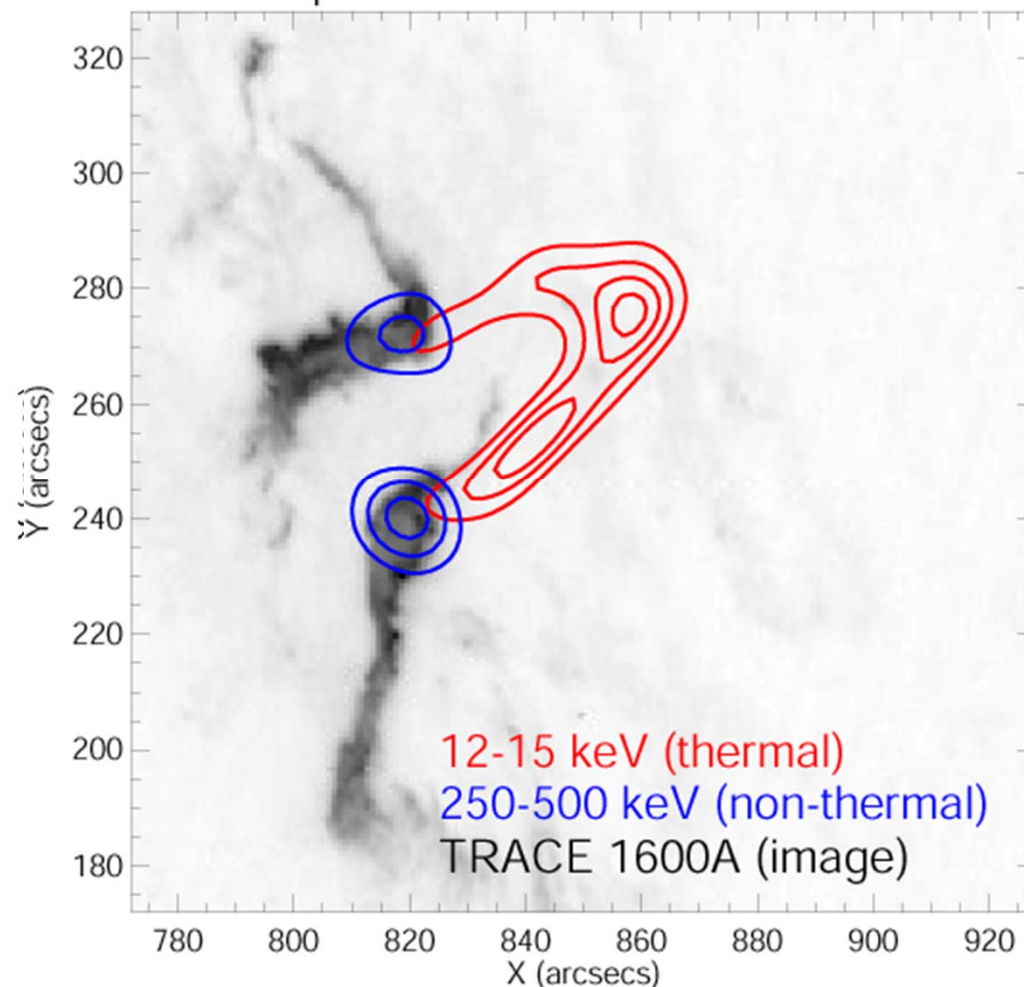
リム近くで起きたひじょうに
大きなフレア (side view)

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



Krucker氏提供

flare peak: 20-Jan-2005 06:45:10.994 UT



Two-ribbon flare

足元の硬X線源 (青)

超高温ループ 30-40 MK (赤)

大量の電子が加速される

フレアのエネルギー

磁場のエネルギー → 熱エネルギー

粒子加速エネルギー → 熱エネルギー
運動エネルギー

Neupert Effect (Neupert 1968)

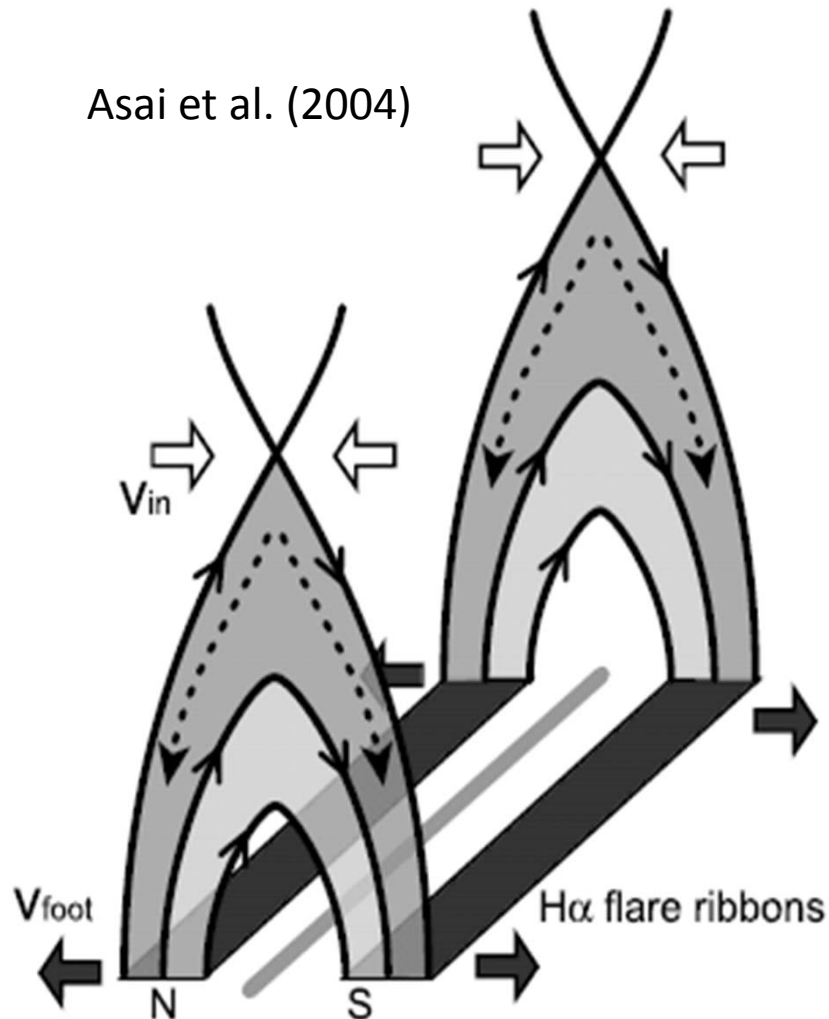
非熱的放射 (硬X線) 強度の時間積分

→ 熱的放射 (軟X線) 強度の時間変化

フレアで解放される磁気エネルギーのうち、無視できない量のエネルギーが粒子加速エネルギーに変換されている。

リコネクション電場と電子加速の相関

$E_{\text{rec}} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ を観測から推測する。



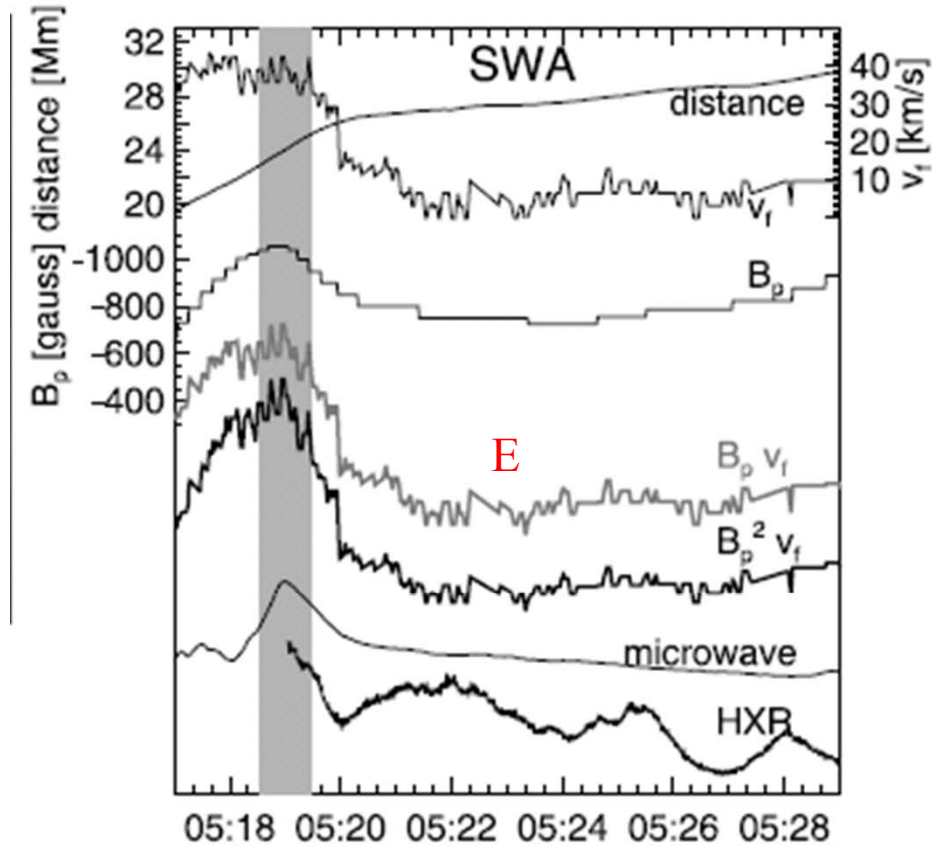
\mathbf{v} : リボン構造(彩層)の広がる速度

\mathbf{B} : 光球面磁場

フレアリボン (硬X線源)
= コロナでの連続した磁気リコネクションの最前線

リコネクション電場と電子加速の相関

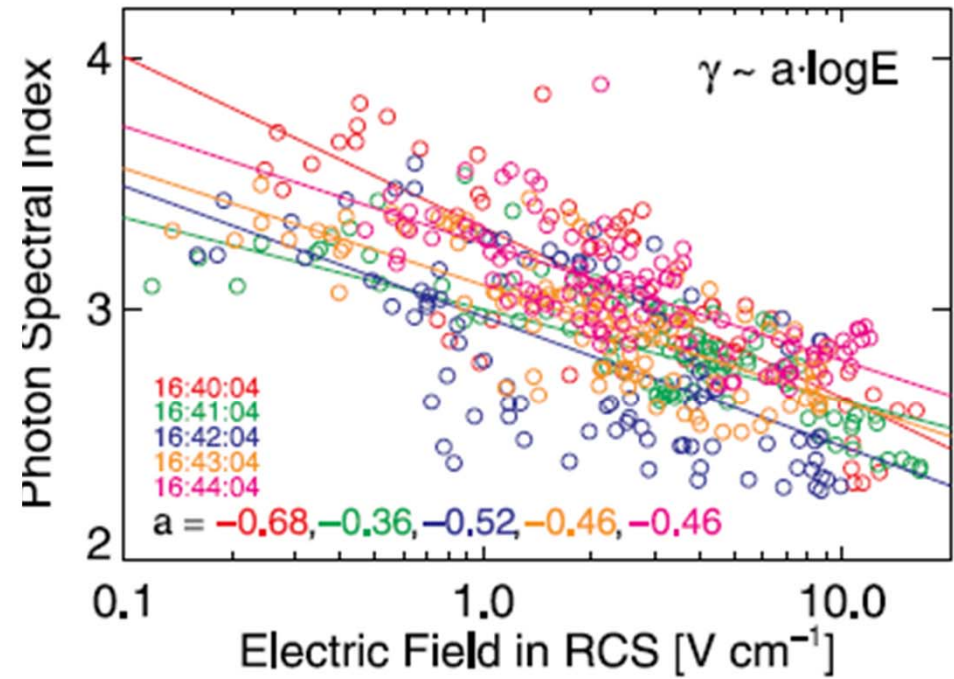
電場vs 硬X線強度



↑
HXR/microwave peak

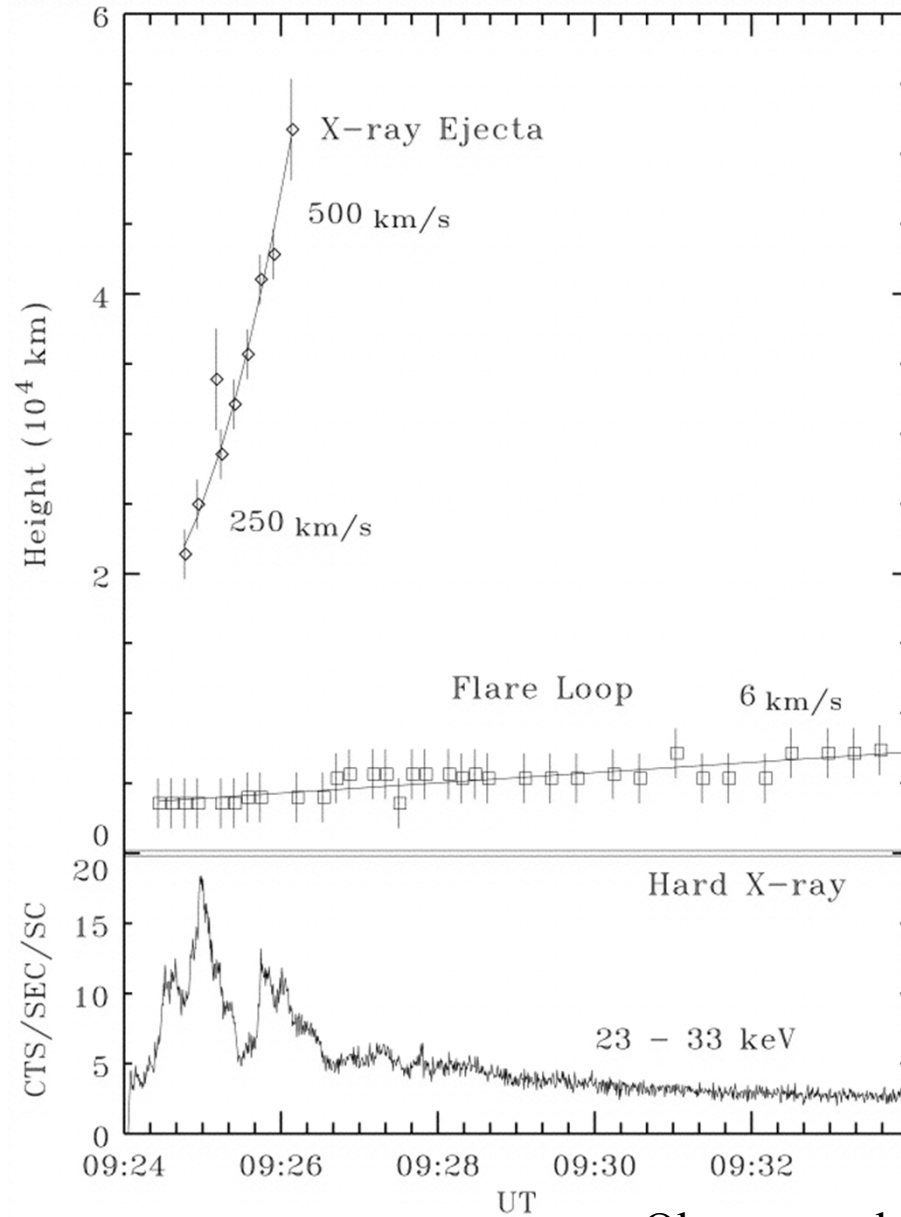
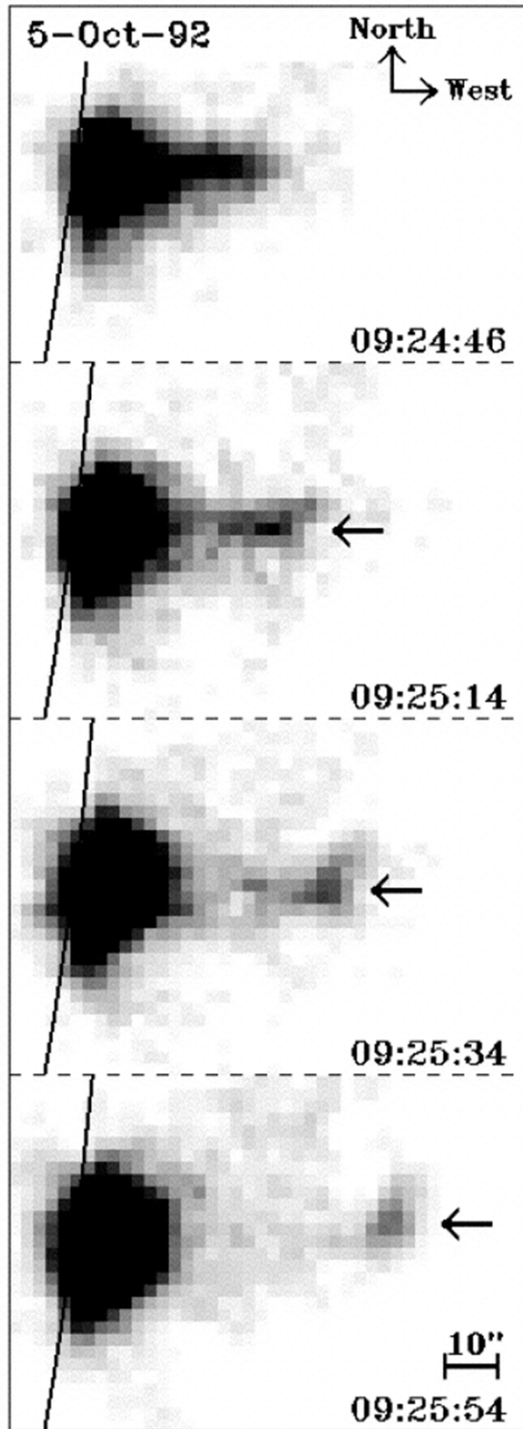
(Asai et al. 2004)

電場vs 硬X線スペクトルのべき指数



(Liu et al. 2008)

プラズマ放出現象と粒子加速(硬X線)



Ohyama and Shibata (1998)

高温プラズマの放出速度は、硬X線強度の強い時間帯 = 粒子加速が激しく起きている時間帯 = エネルギー解放(磁気リコネクション)率が大きい時間帯に加速されている。

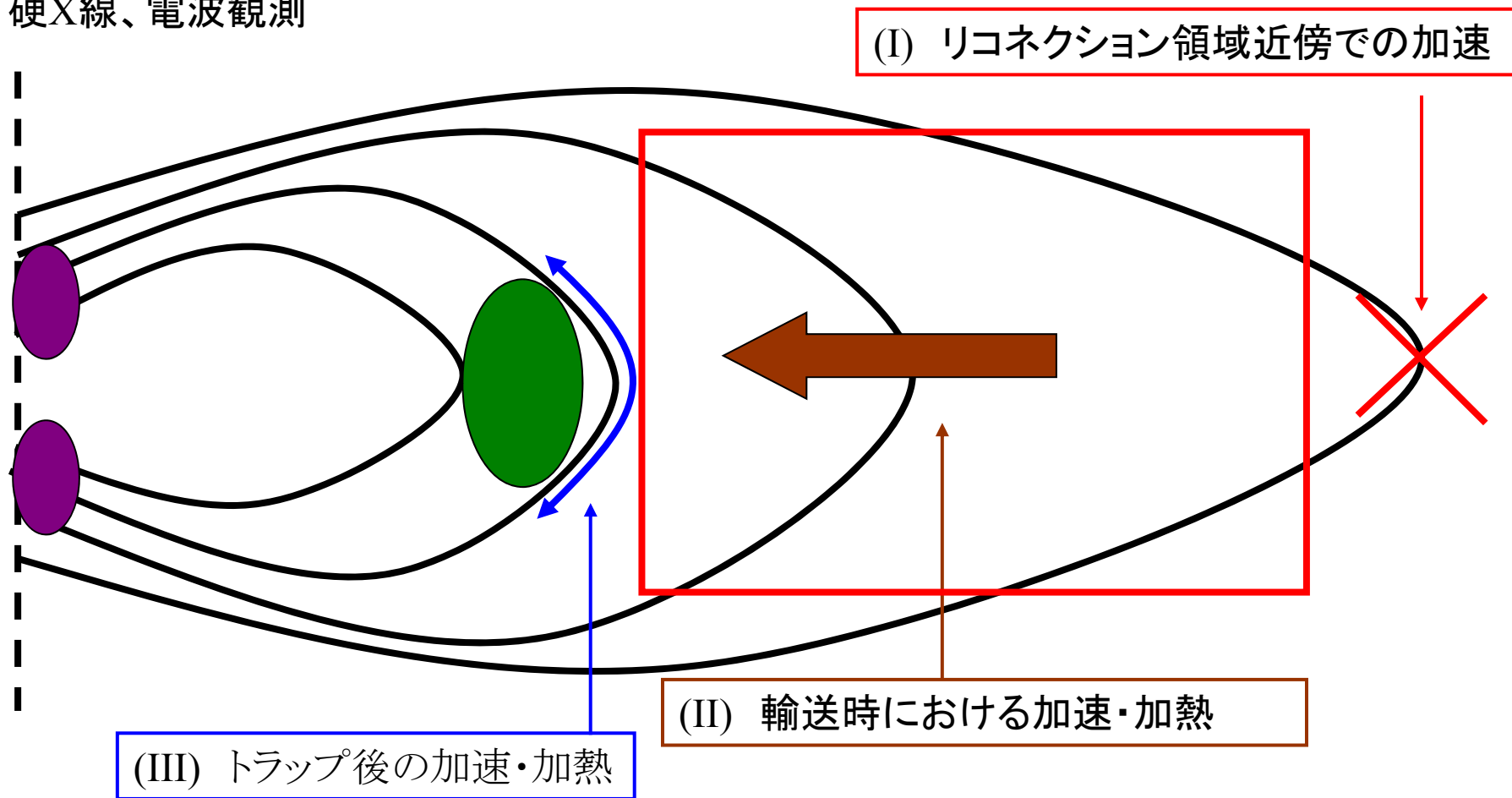


硬X線強度変化が示す粒子加速は、プラズモイド放出が加速されている時間帯 = エネルギー解放(磁気リコネクション)率が大きい時間帯に効率よく起きている。

太陽フレアにおいて、粒子加速と磁気リコネクションは深くカップルしている。

磁気リコネクションシナリオにおける粒子加速

(IV) 硬X線、電波観測



(Minoshima 2007)

ALMAによるFlare Looptop あるいは さらに上空のコロナの観測

(1) 高度 – 周波数 (電子のエネルギー) の関係

リムフレアにおいて、あるBand、例えば、Band-3の中だけでも周波数方向に電波源の高さ(重心位置)の違いを検出できないか。

(2) 加速電子の消失過程 (ピッチ角散乱)

リムフレアにおいて、あるBand、例えば、Band-3の中だけでも周波数ごと、あるいは高さごとにdecay time-scaleを正確に導出できないか。

ALMAによるFlare Looptop あるいは さらに上空のコロナの観測

(1)高度 – 周波数 (電子のエネルギー) の関係

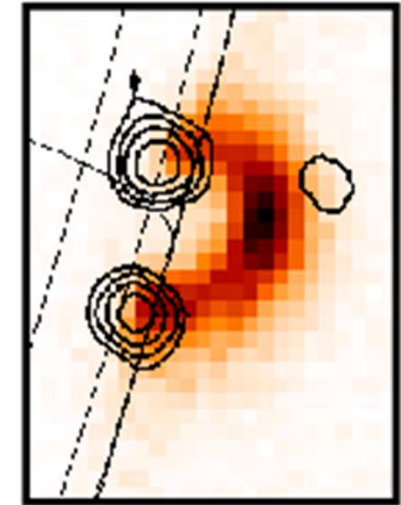
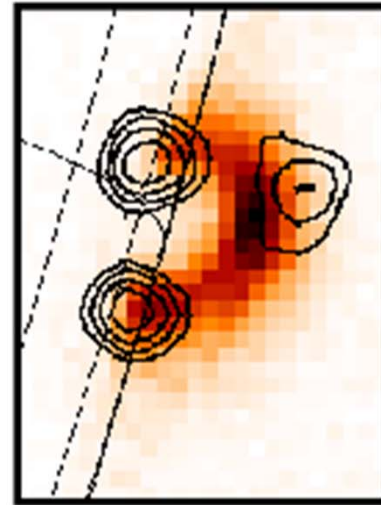
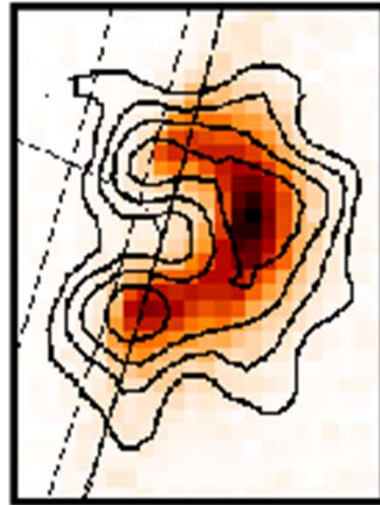
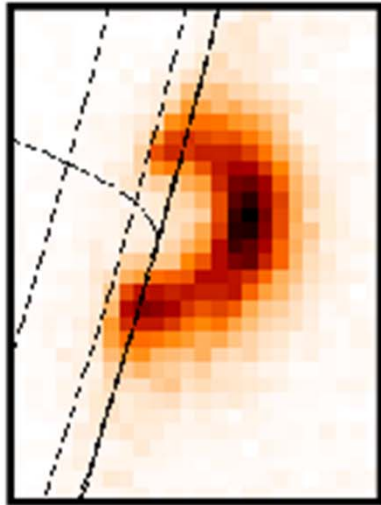
リムフレアにおいて、あるBand、例えば、Band-3の中だけでも周波数方向に電波源の高さ(重心位置)の違いを検出できないか。

(2) 加速電子の消失過程 (ピッチ角散乱)

リムフレアにおいて、あるBand、例えば、Band-3の中だけでも周波数ごと、あるいは高さごとにdecay time-scaleを正確に導出できないか。

Color: Soft X-rays = ~ 10 MK thermal plasma

Contours: Hard X-rays



14 - 23 keV

23 - 33 keV

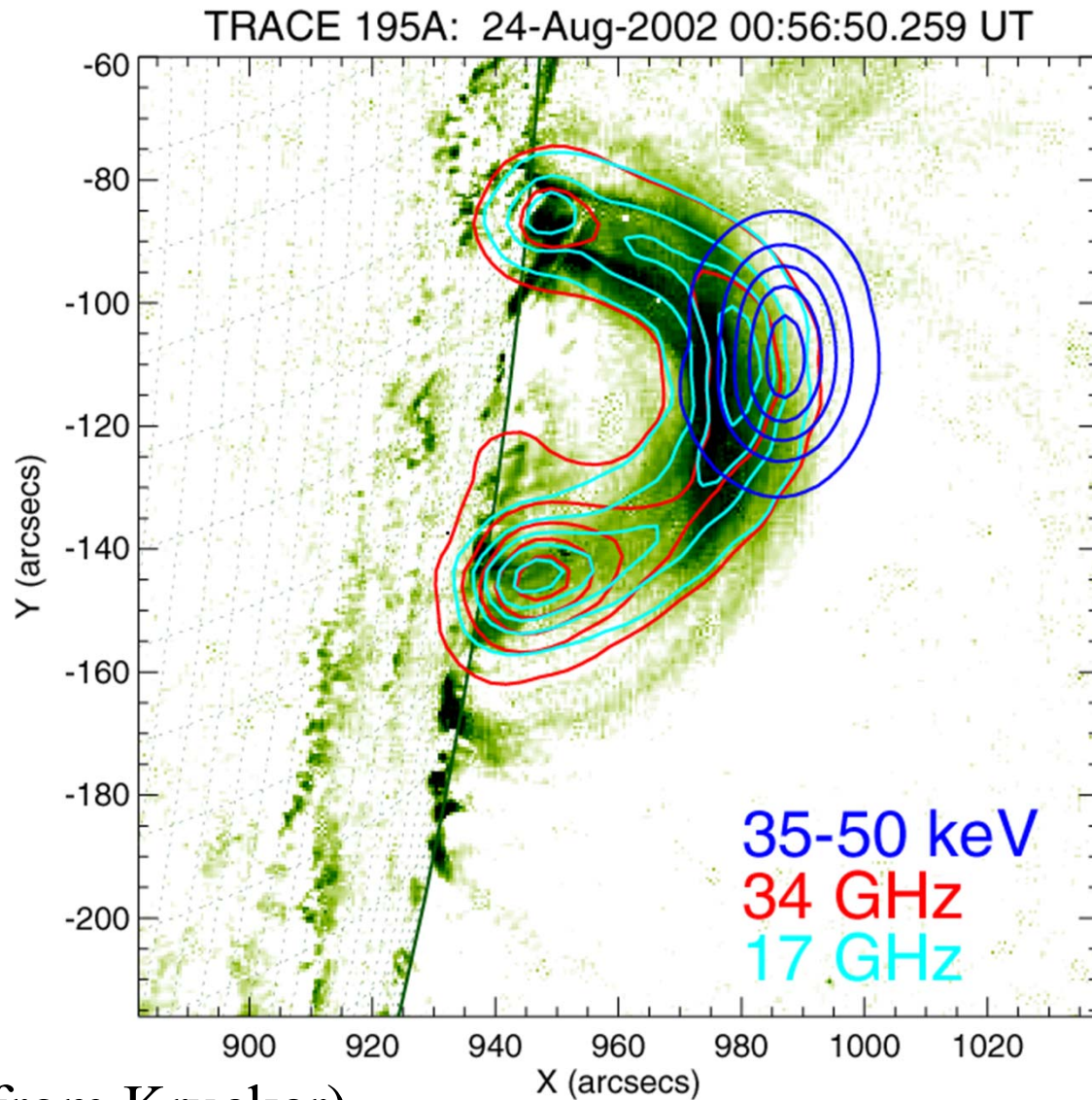
33 - 53 keV

An important observational fact is that **the coronal HXR source in the higher energy range is located at a higher altitude.**

Roughly speaking,

~ 100 keV electrons exist at a higher altitude than the altitude where ~ 50 keV electrons mainly exist.

Event study using RHESSI and NoRH data



(from Krucker)

Green color:
EUV image (TRACE)
thermal plasma

Blue contours:
HXR (RHESSI)
~ 100 keV electrons

Red and light-blue
contours: microwave
(Nobeyama Radio
Heliograph)
~ MeV electrons

Microwave source is located at a lower altitude than the altitude where the HXR source is located.

Hard X-rays – Bremsstrahlung

~ 50 keV HXR_s are produced by ~ 100 keV electrons

Microwaves – gyro-synchrotron

17GHz emissions are produced by ~ 1 MeV electrons

~ 1 MeV electrons exist at a lower altitude than the altitude where ~ 100 keV electrons exist.

Is this always true?

A statistical study without any bias is needed.

Observational Result

We compared HXR and microwave sources in height for seven solar flares. 6 among 7 flares, the HXR source is located at a higher altitude than that of the microwave source. This indicates that ~ 100 keV electrons exist at a higher altitude (closer to magnetic reconnection region) compared with ~ 1 MeV electrons.

Low-energy HXR s	~ 50 keV	Low altitude
High-energy HXR s	~ 100 keV	High altitude
Microwaves	~ 1 MeV	Low altitude

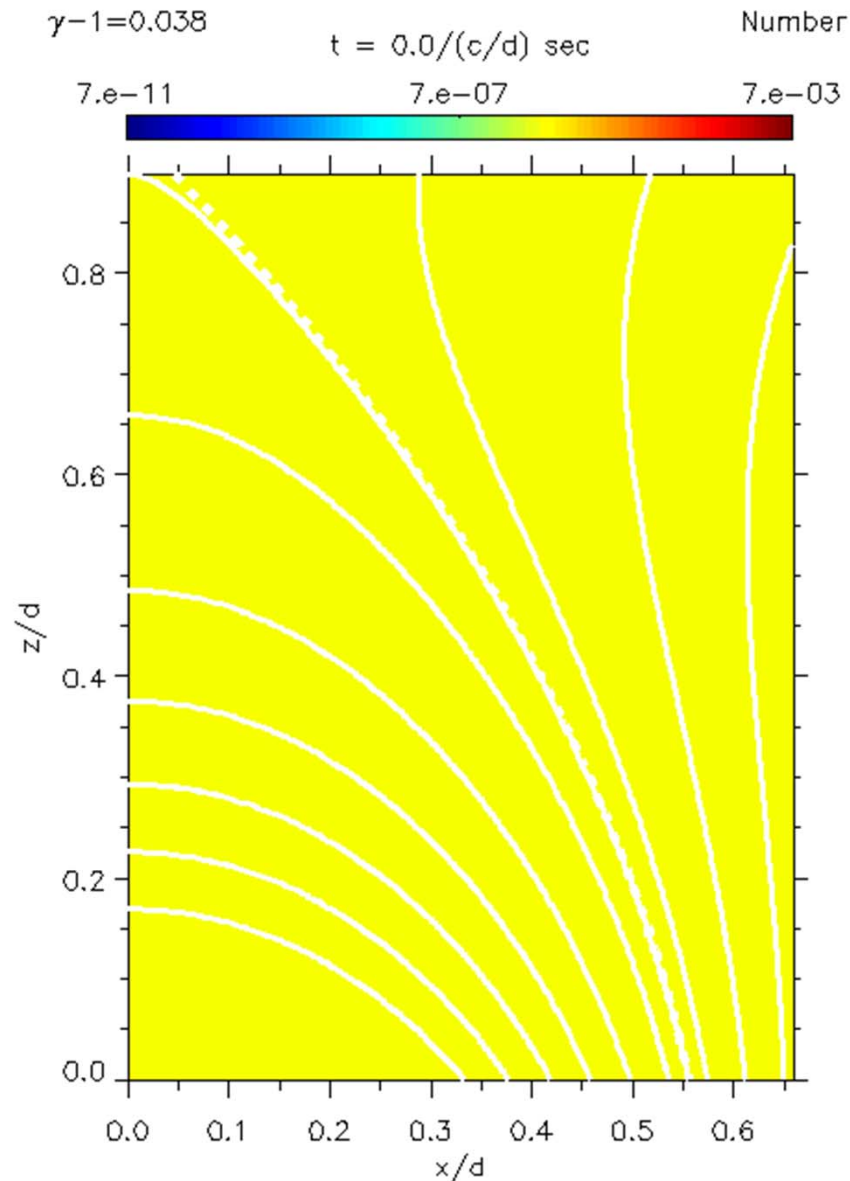
What kind of process makes this result?

\rightarrow modeling / simulation

Modeling of particle acceleration



Minoshima, Masuda, Miyoshi,
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

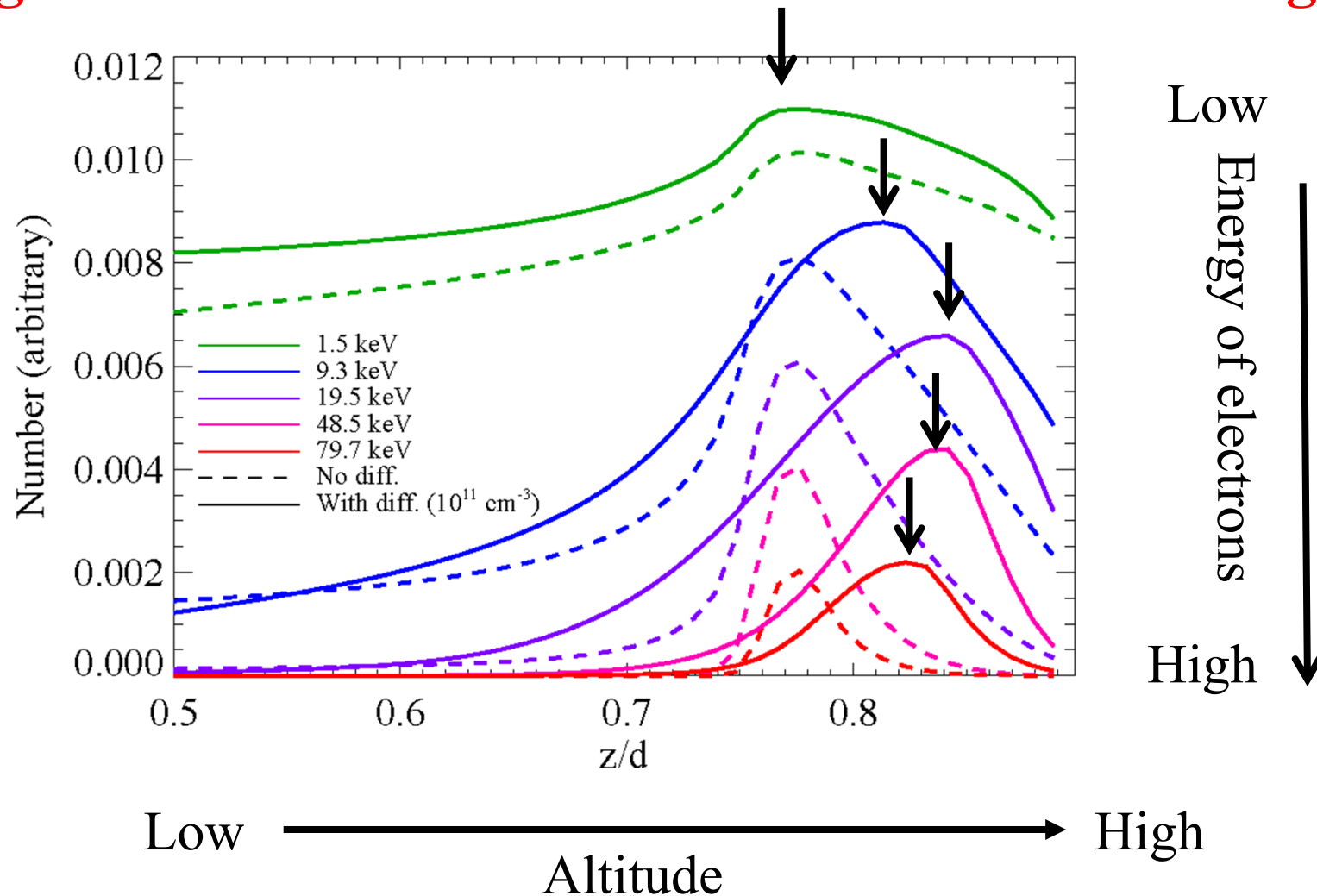
Solid line: magnetic field

Dashed line: separatrix

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

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

Height distribution of electrons with different energies



Interpretation



(1) Pre-acceleration
(related to reconnection?)



(2) Loop shrinkage and betatron acceleration
increase the number of energetic electrons

High-energy HXR



(3) Begin precipitation of $K=K_2$ electrons
seen as the above-the-loop-top source



(4) Further shrinkage and acceleration

Low-energy HXR
Microwaves



(5) Trap of $K=K_1$ and K_3 electrons
seen as the coronal sources

$(K_1 < K_2 < K_3)$



ALMAによるFlare Looptop あるいは さらに上空のコロナの観測

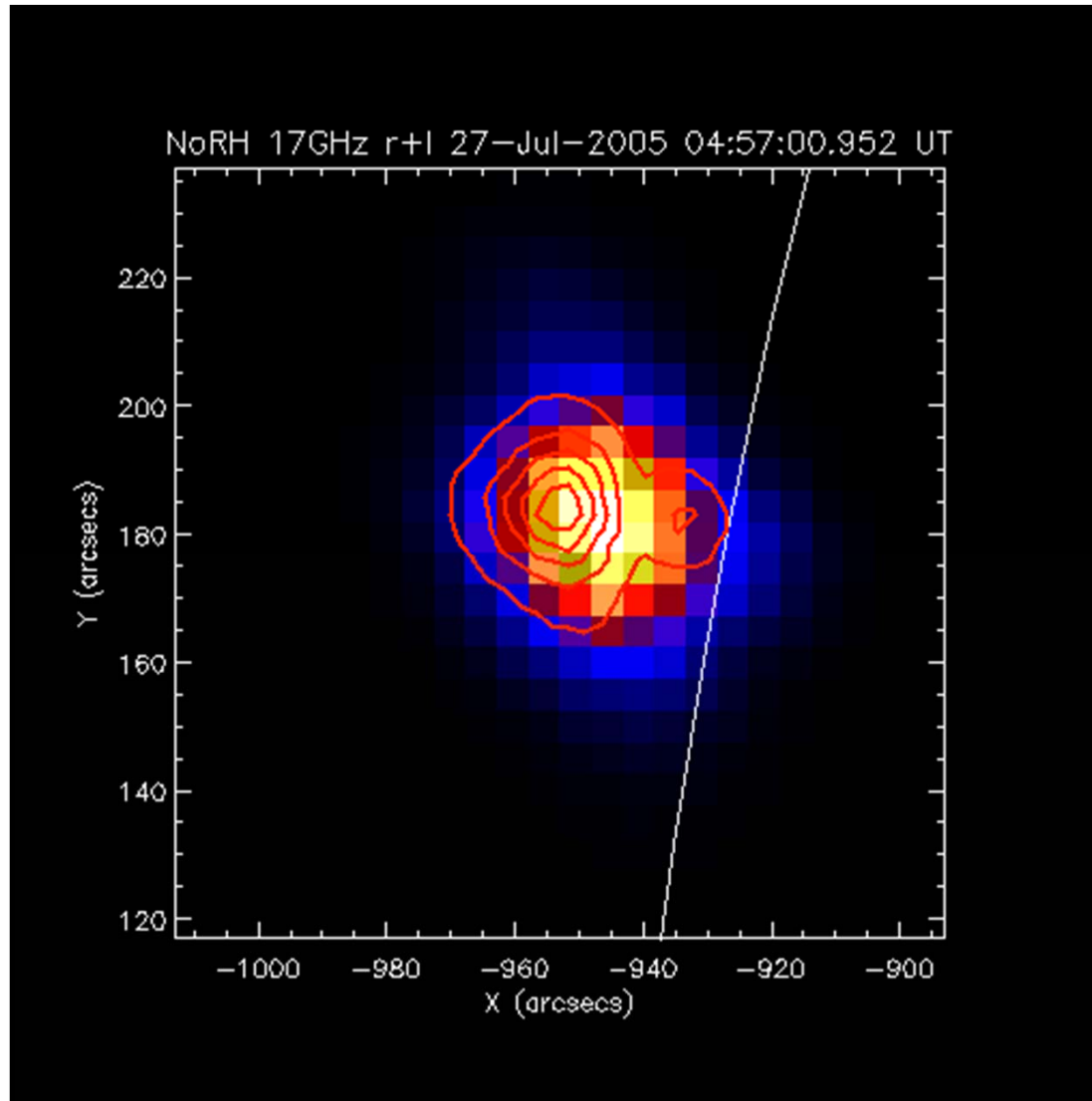
(1) 高度 – 周波数 (電子のエネルギー) の関係

リムフレアにおいて、あるBand、例えば、Band-3の中だけでも周波数方向に電波源の高さ(重心位置)の違いを検出できないか。

(2) 加速電子の消失過程 (ピッチ角散乱)

リムフレアにおいて、あるBand、例えば、Band-3の中だけでも周波数ごと、あるいは高さごとにdecay time-scaleを正確に導出できないか。

17GHz と34GHzの比較: 2005年7月27日のフレア



リムの裏側で発生したフレア

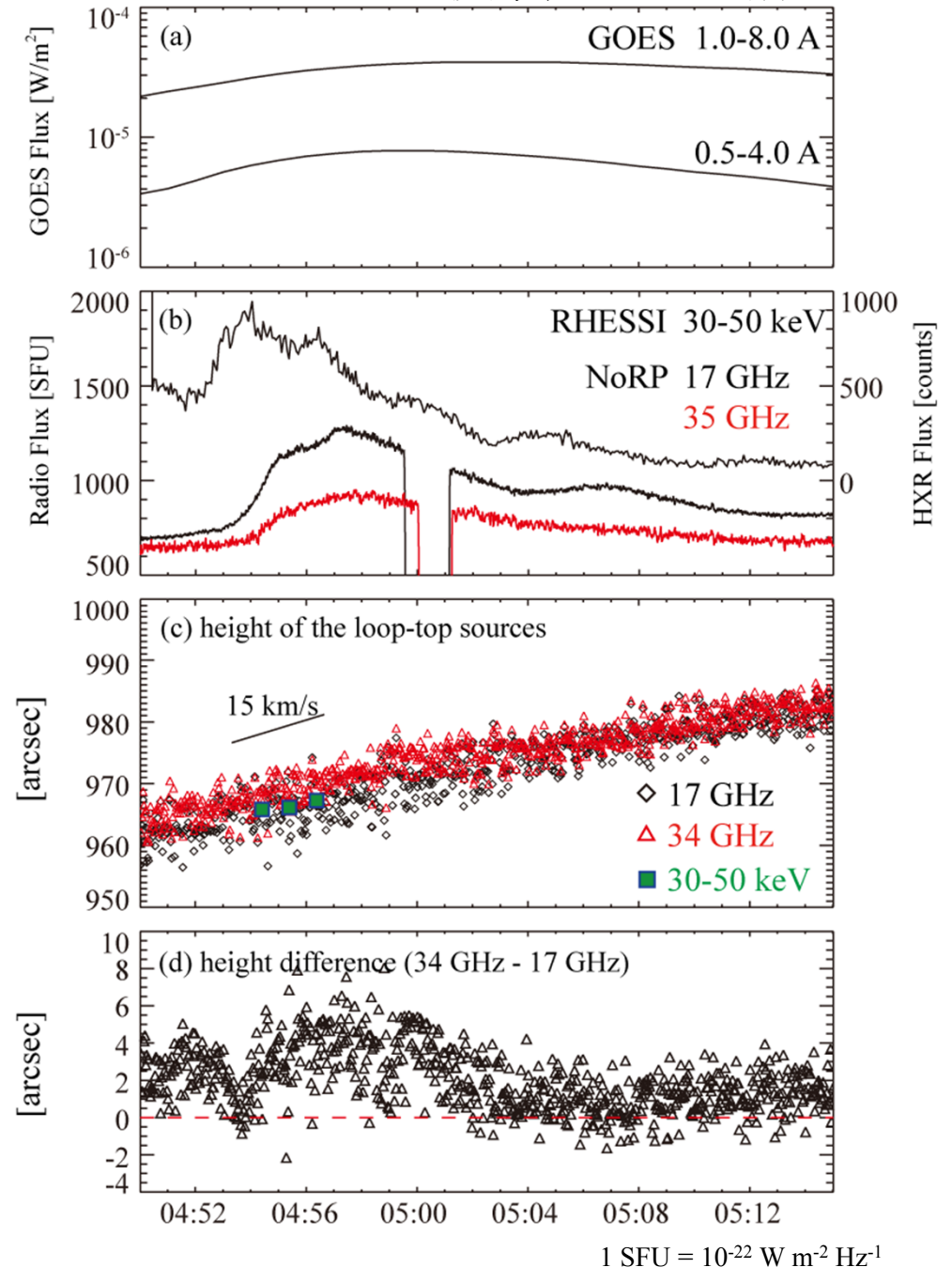
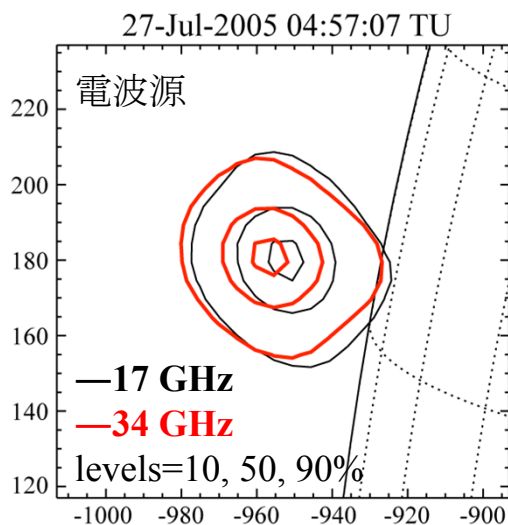
→ フットポイント領域からの放射の影響を受けない

Color: 17GHz

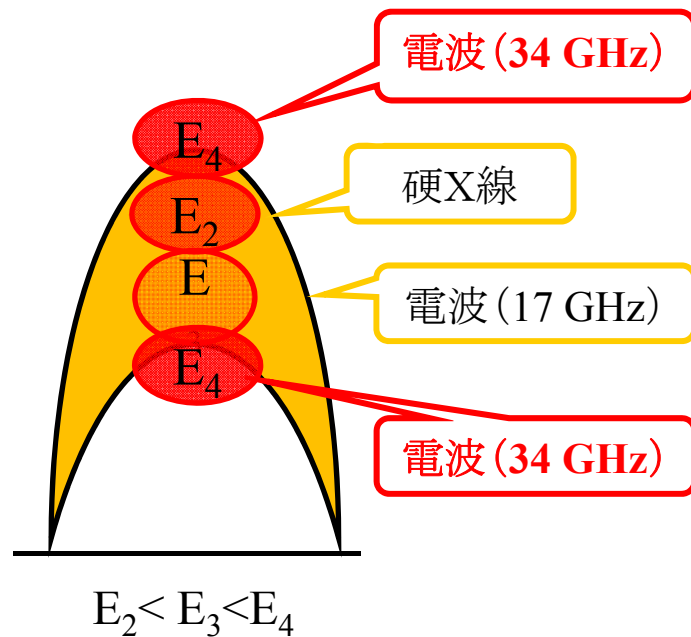
Contours: 34 GHz

解析結果

- 放射源は時間とともに上昇する。
- 常に**34 GHz電波源は17 GHz電波源や硬X線源より高高度に位置する。**
- フレアピーク時付近で17 GHzと34 GHz電波源の差が大きくなる(約3Mm)。



解析結果の考察



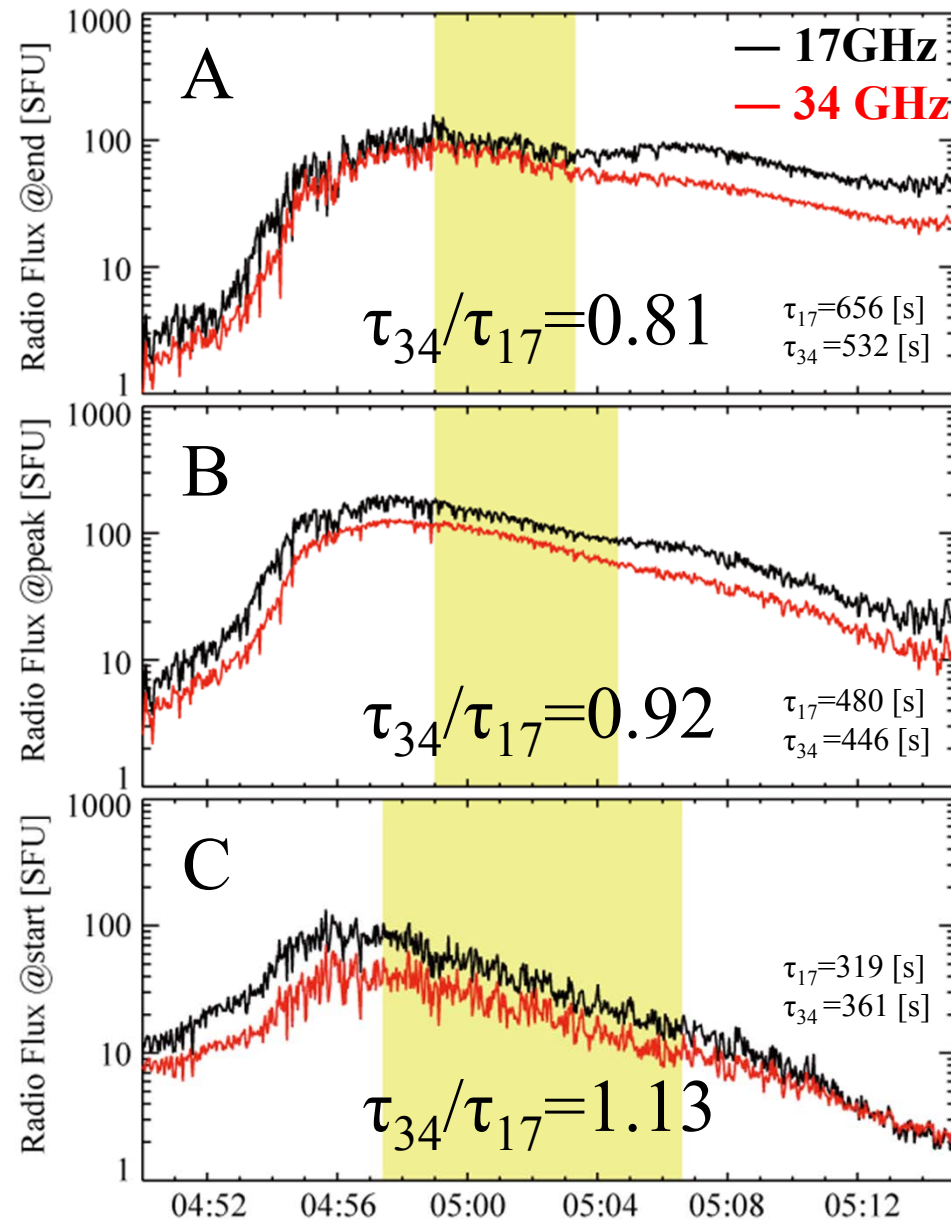
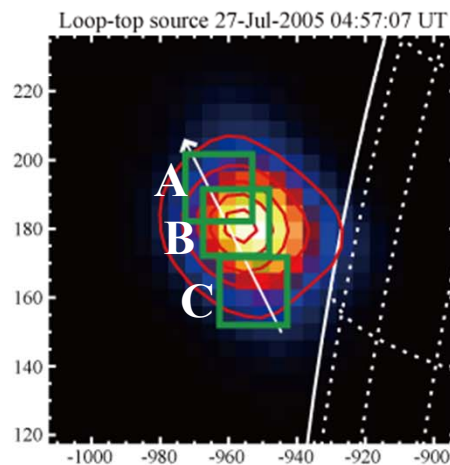
観測

3つの中で最も高いエネルギーの電子が最も高高度に位置する。

- 34 GHz電波源が17 GHz電波源や硬X線源よりも上空に位置する
 - × 観測装置によるシステムティックな誤差
 - × ジャイロシンクロトン放射の磁場依存性
 - ? 追加速機構の存在
- クーロン散乱以外の電子の散乱機構
- 電波源の高さの差がフレアピーク時に拡大する
 - エネルギー解放に深く関係
 - スペクトルの時間変化
 - 電場の時間変化

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。



解析結果のまとめと考察

- e-folding timeの比の値は低高度から高高度に向かって小さくなり、1よりも小さい領域がある。

高高度で
比が1より小さい

34 GHz電波が
早く減衰する

3つの中で最もエネルギーの
高い電子が早く消失する

クーロン散乱だけでは説明できない。
高高度ではよりエネルギーの高い電子を
選択的に消失させる機構がある。

電子の消失機構の候補として...

地球磁気圏で見られる粒子・波動相互作用

低周波のWhistler波は高エネルギー電子を選択的に散乱させることが知られている。

太陽コロナ中でも同様の機構が働いている可能性がある。

ALMAによるFootpoint sourceすなわち 彩層への加速電子の降り込みの観測

(1) 降り込み領域の大きさ

これまでのHXRの分解能は、2-3秒角程度。
彩層のレスポンスに影響。

(2) 電波源の時間変化(水平方向の動き)

上空のリコネクションの進行を反映。

→Hinode SOTとの連携

forward fittingで時間分解能を上げられないか。

(3) 白色光フレアとの空間・時間関係

白色光フレアの高度？ → Hinode SOTとの連携

ALMAによるFootpoint sourceすなわち 彩層への加速電子の降り込みの観測

(1) 降り込み領域の大きさ

これまでのHXRの分解能は、2-3秒角程度。
彩層のレスポンスに影響。

(2) 電波源の時間変化(水平方向の動き)

上空のリコネクションの進行を反映。

→Hinode SOTとの連携

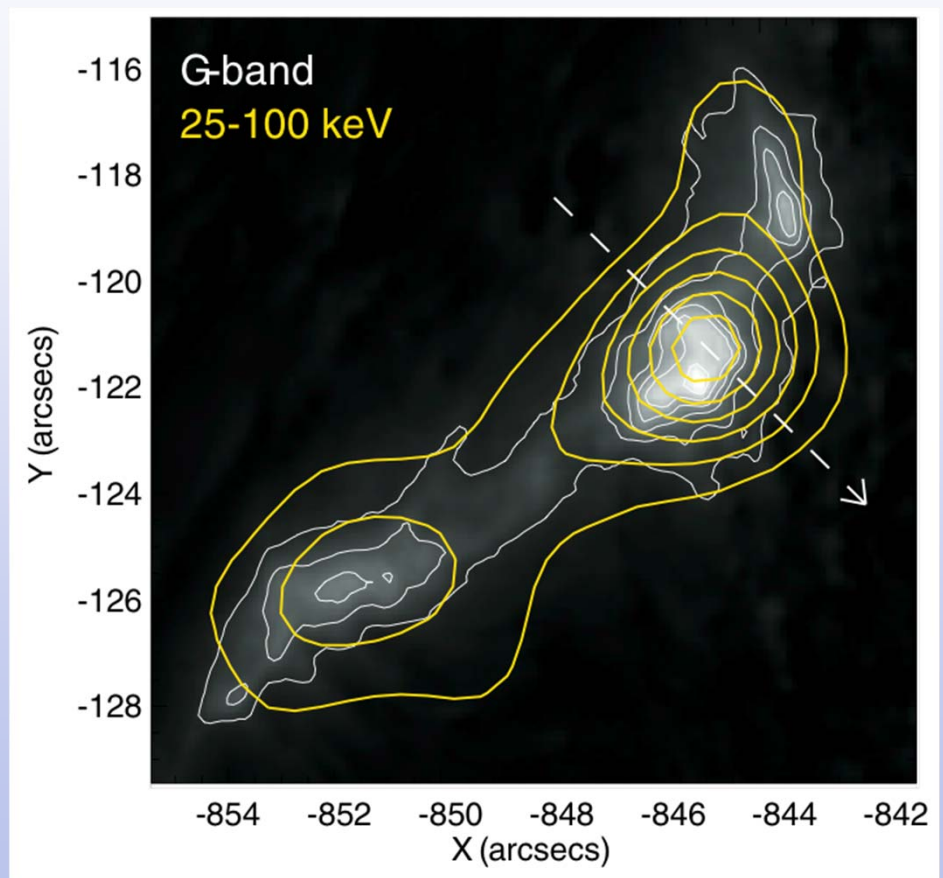
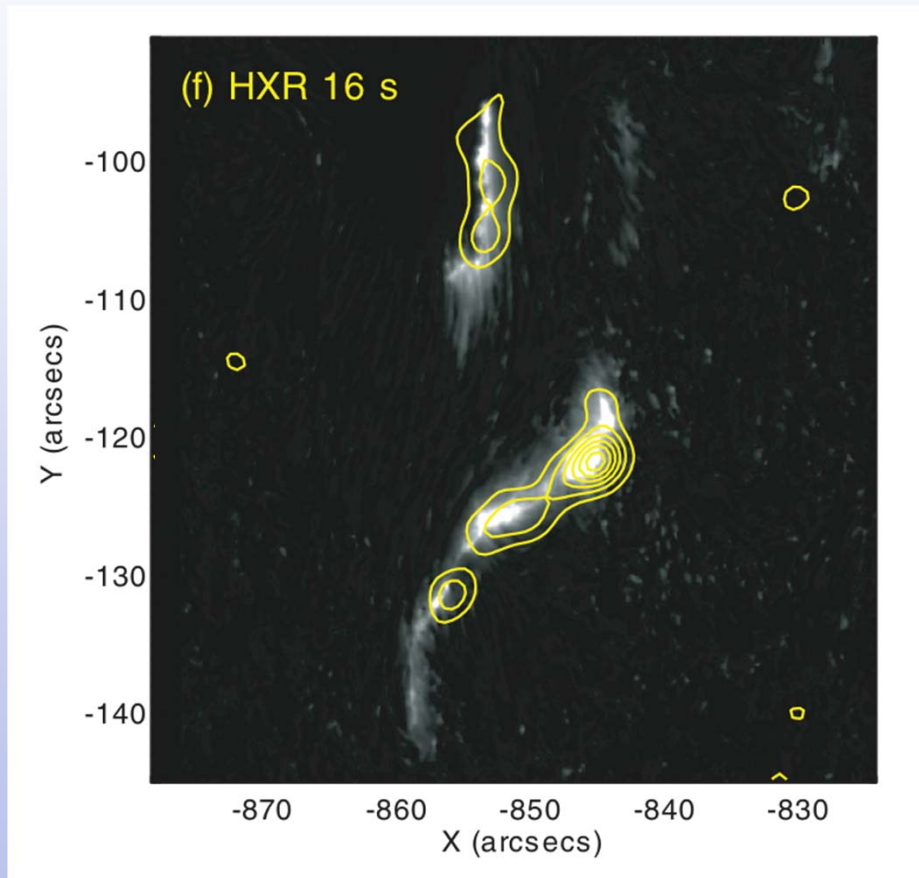
forward fittingで時間分解能を上げられないか。

(3) 白色光フレアとの空間・時間関係

白色光フレアの高度？ → Hinode SOTとの連携

2006/12/06 白色光フレア SOT/G-band + RHESSI (Krucker et al., 2011)

硬X線放射と白色光放射(G-band)の形状が 30" にわたって一致
→ 放射メカニズムは物理的に関連あり



Thick target を仮定して導出した electron beam の密度が
 $\sim 10^{10}/\text{cm}^3$ ($>18\text{keV}$) とかなり高い → コロナ中に存在できない

2006/12/14 白色光フレア SOT/G-band + RHESSI (Watanabe et al., 2010)

白色光 (G-band) と硬X線放射が
ほぼ同じ場所で観測された



- 加速電子の全エネルギー: thick target
- 白色光放射の全エネルギー: 黒体放射

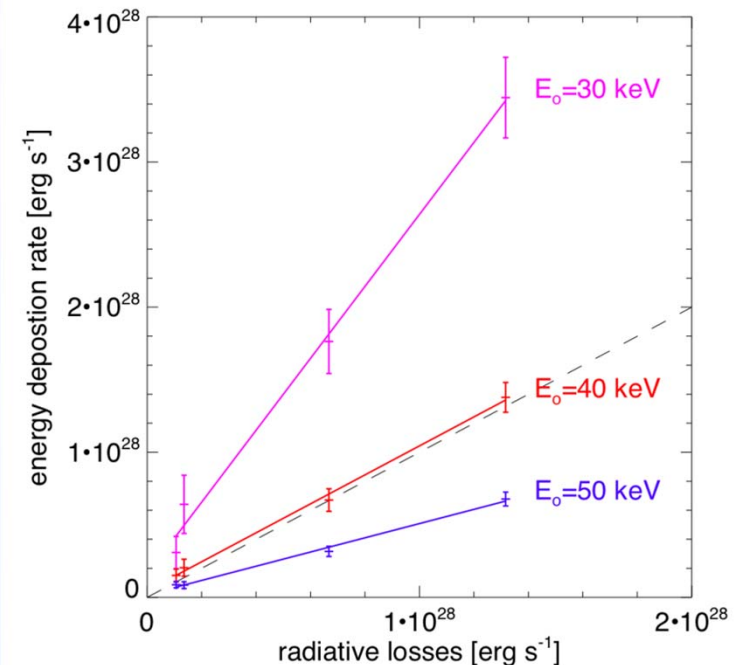
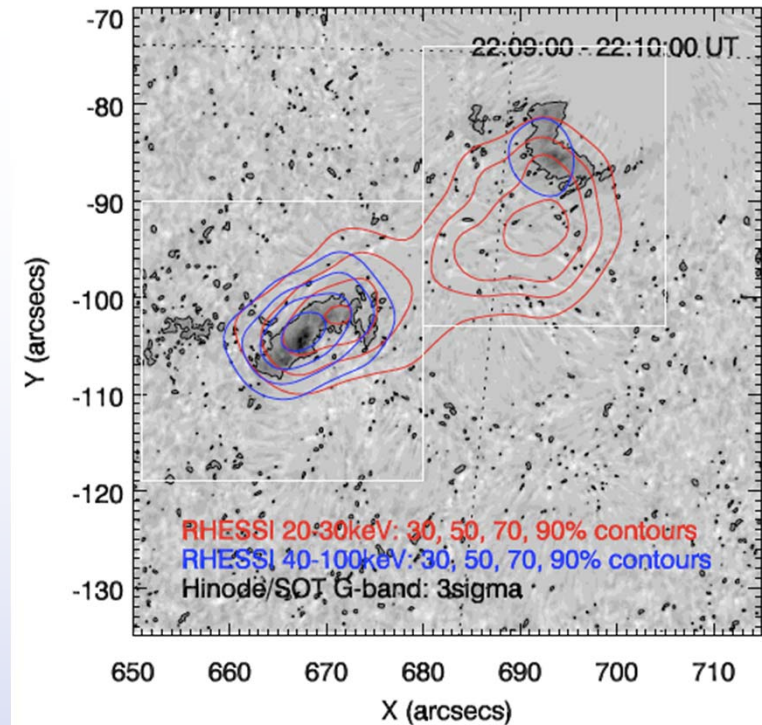


白色光放射の全エネルギーは
カットオフエネルギー (E_c) = 40keV の
加速電子の全エネルギーと同じ
白色光放射は $>40\text{keV}$ 電子で説明可能

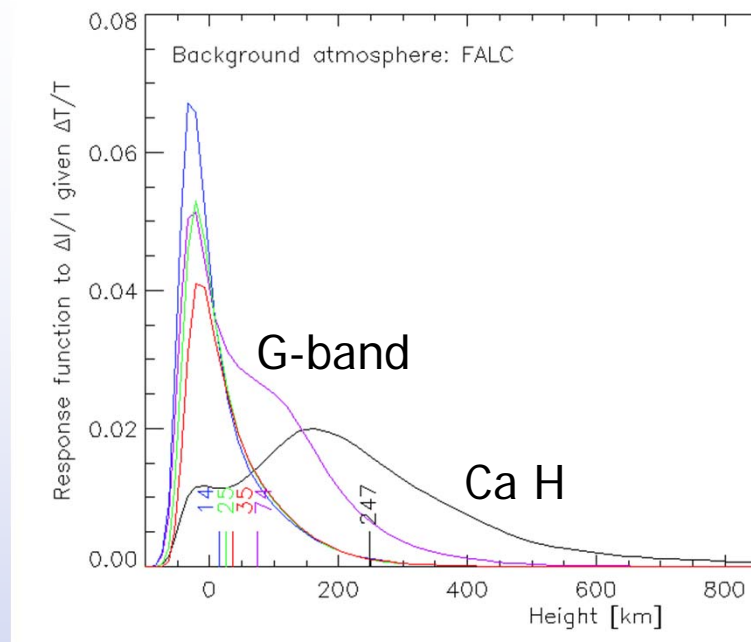
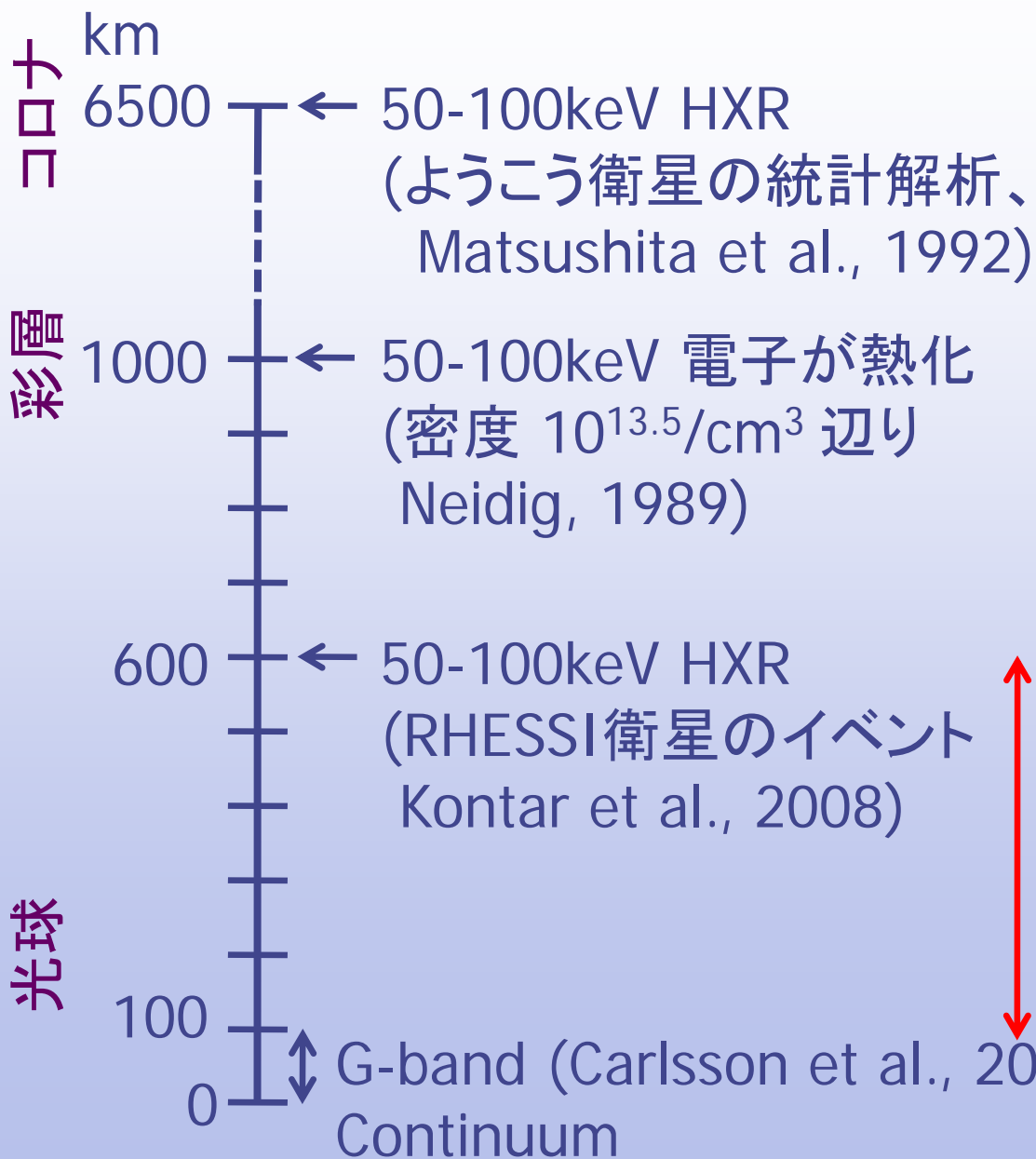
過去の観測では

$>50\text{keV}$: Neidig (1989) etc.

$>25\text{keV}$: Fletcher et al. (2007)



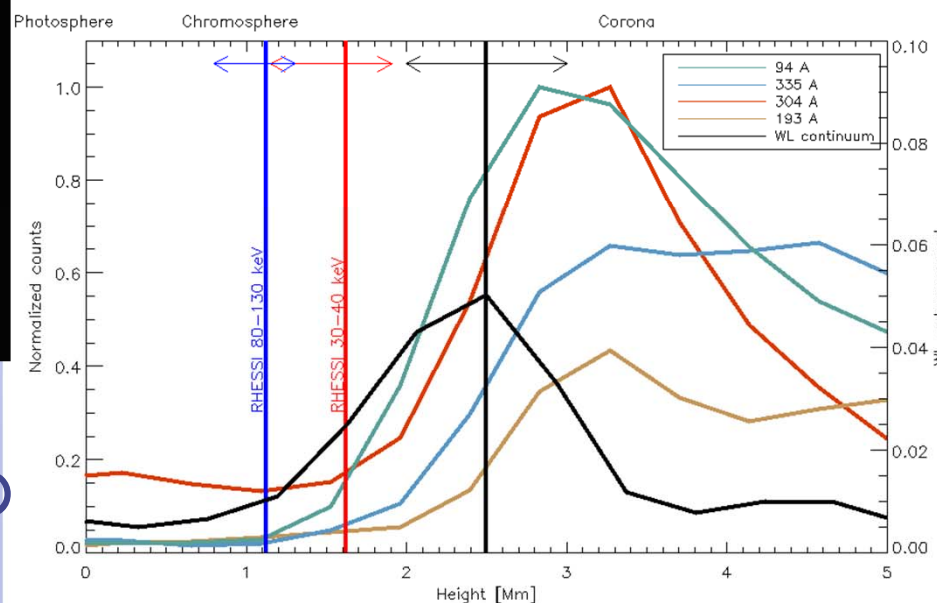
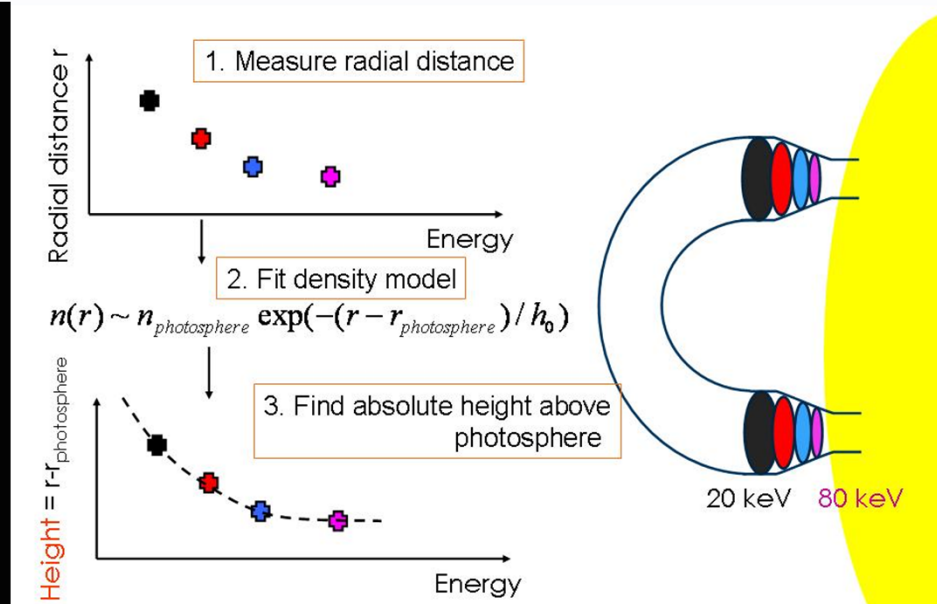
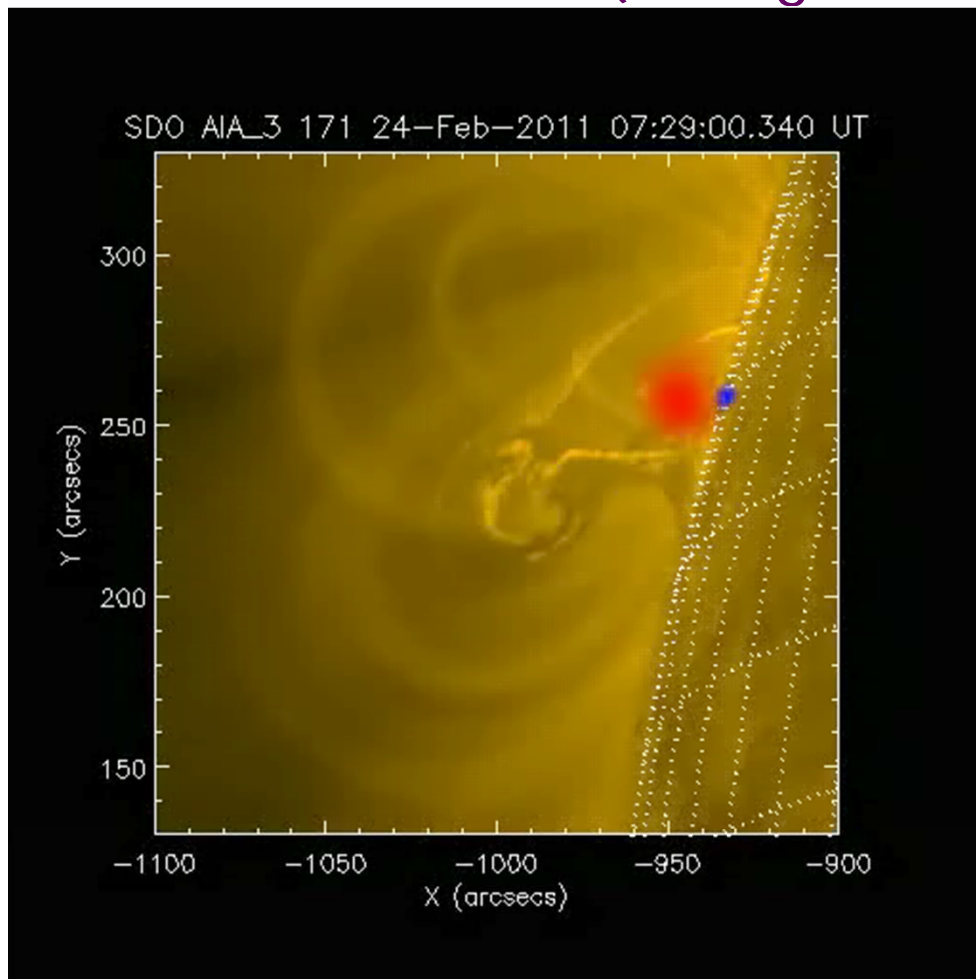
硬X線と白色光の放射高度の違いについて



硬X線と白色光で
少なくとも 500km の
放射領域の差

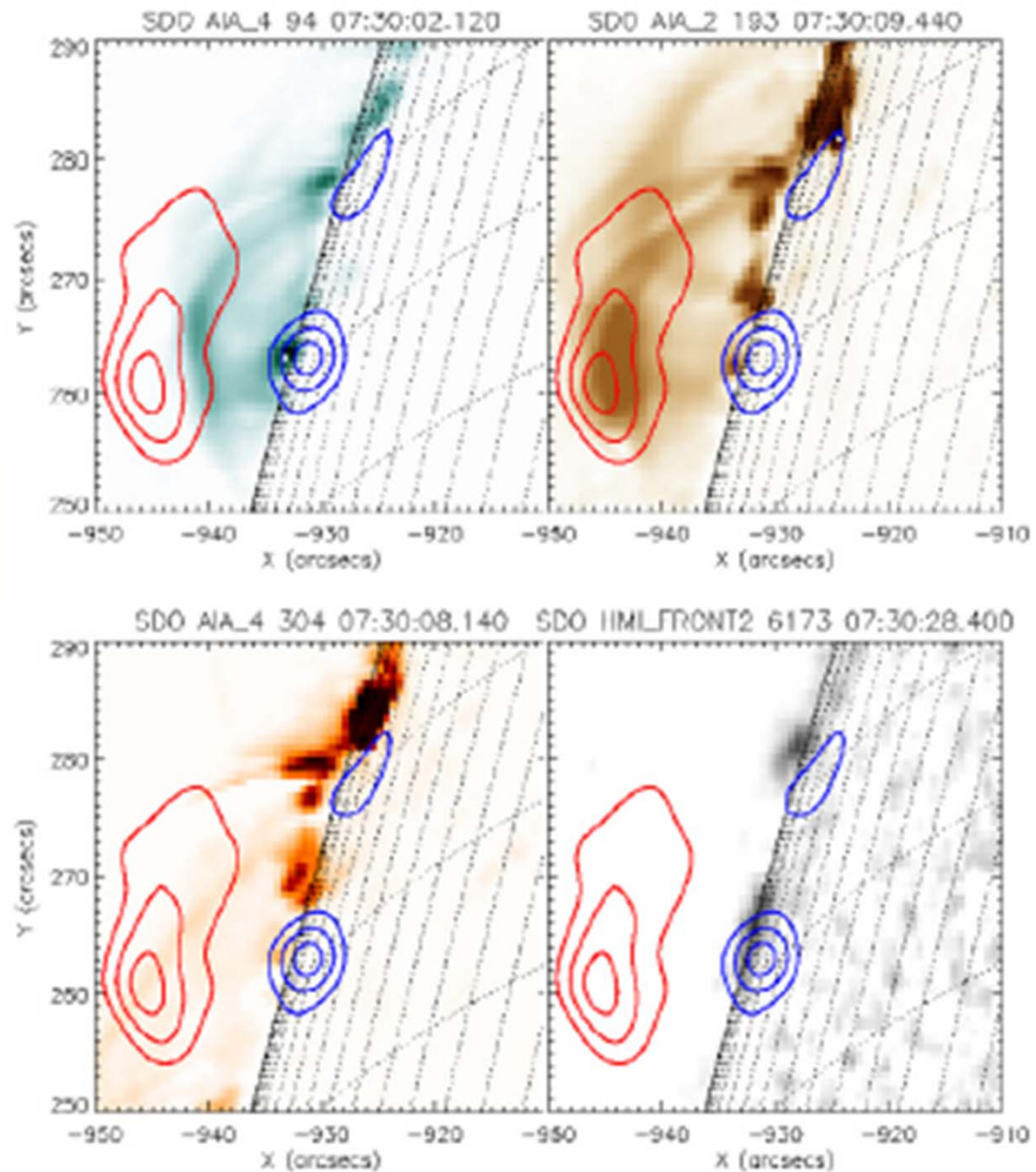
光球まで加速電子が
到達するためには
>900keV 必要
(Neidig, 1989)

2011/2/24 白色光フレア SDO/AIA,HMI + RHESSI (Battaglia & Kontar, 2011)



白色光は硬X線よりも上空に存在
→ 白色光の起源は<12keV程度の
低いエネルギーの電子

Battaglia and Kontar 2011



追加by増田

硬X線と白色光の放射高度の違いについて



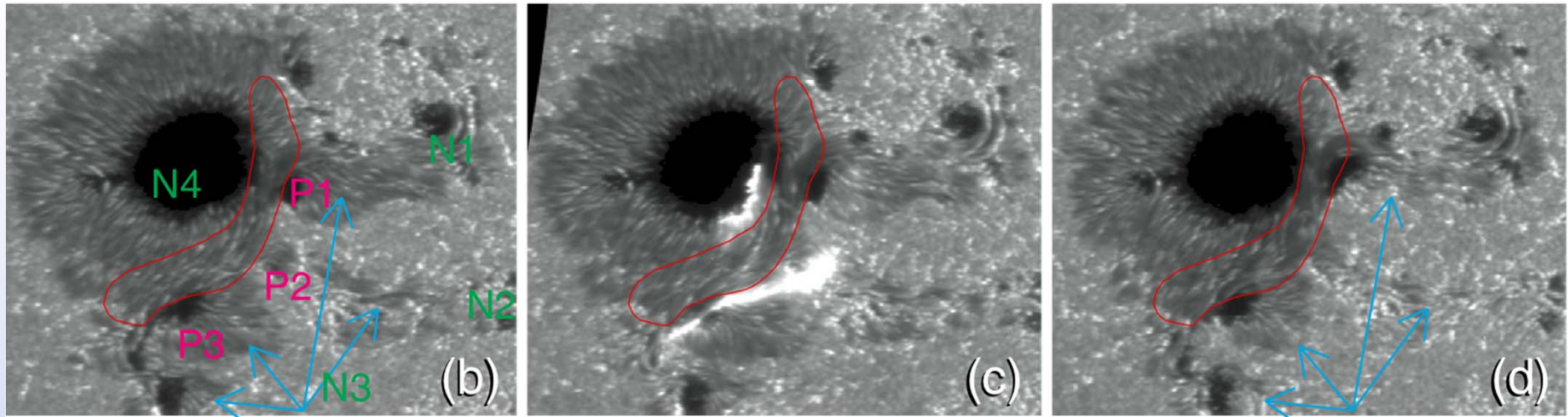
白色光フレアと磁場の変化

2006/12/06 白色光フレア SOT/SP, G-band (Deng et al., 2011)

17:59:37 UT

18:43:38 UT

19:35:33 UT

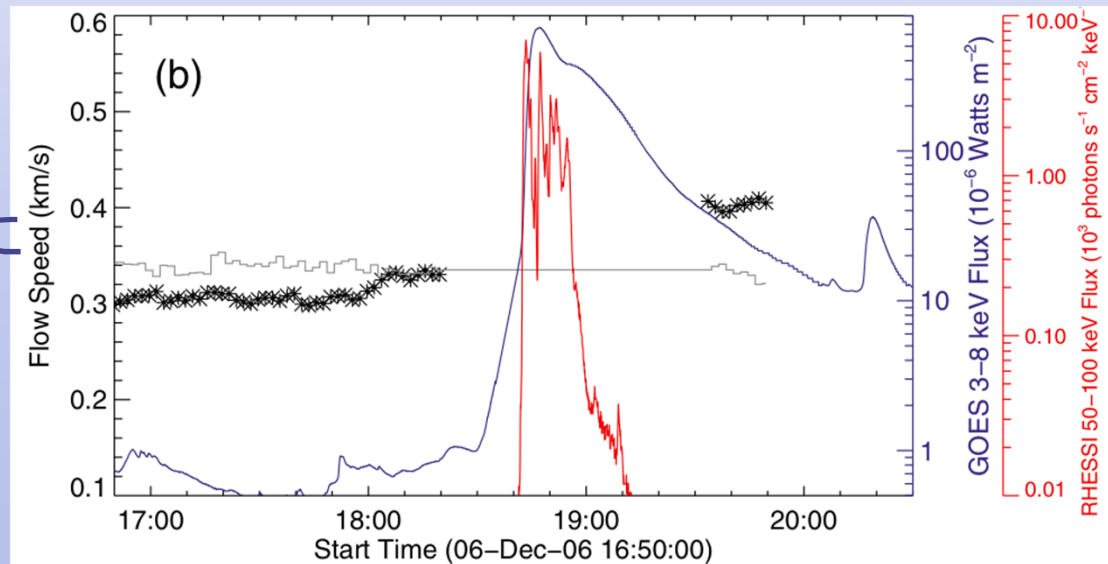


NL辺りの半暗部はフレア後に暗くなり、外側の半暗部はフレア後に decayしている

NLに沿ったエバーシェッドフローの速度が、フレア後に速くなっている。



フレア起源の磁場変化が光球にまで影響を与えた



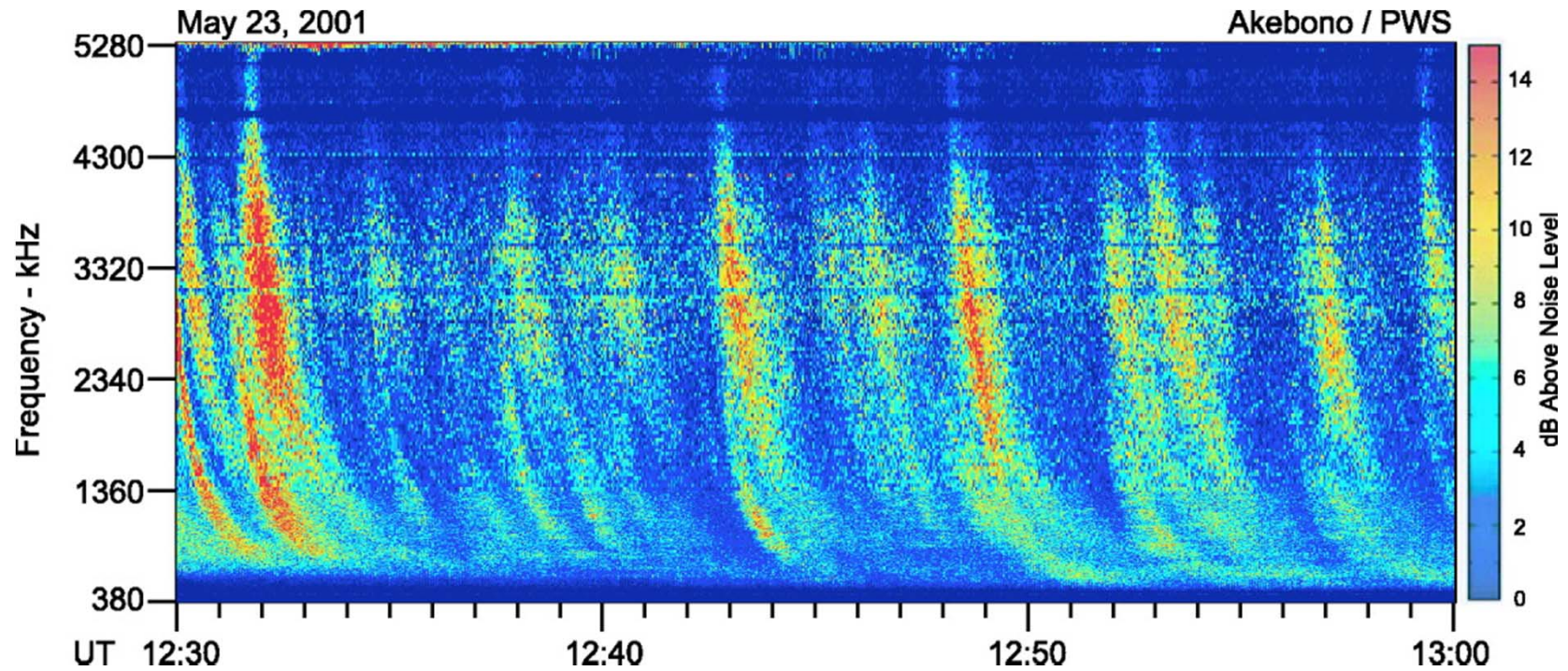
ALMAによる微小な粒子加速の観測

- (1) 活動領域microflares
microflareを用いたflare physics
- (2) micro-type III bursts、type-I bursts
コロナホール境界 (open-closed boundary)
- (3) 静穏領域微小フレア
検出を試みる。

ALMAによる微小フレアの観測

- (1) 活動領域microflares
microflareを用いたflare physics
- (2) **micro-type III busrts、type-I bursts**
コロナホール境界 (open-closed boundary)
- (3) 静穏領域微小フレア
検出を試みる。

Micro-type-III bursts



High time resolution observations by Akebono

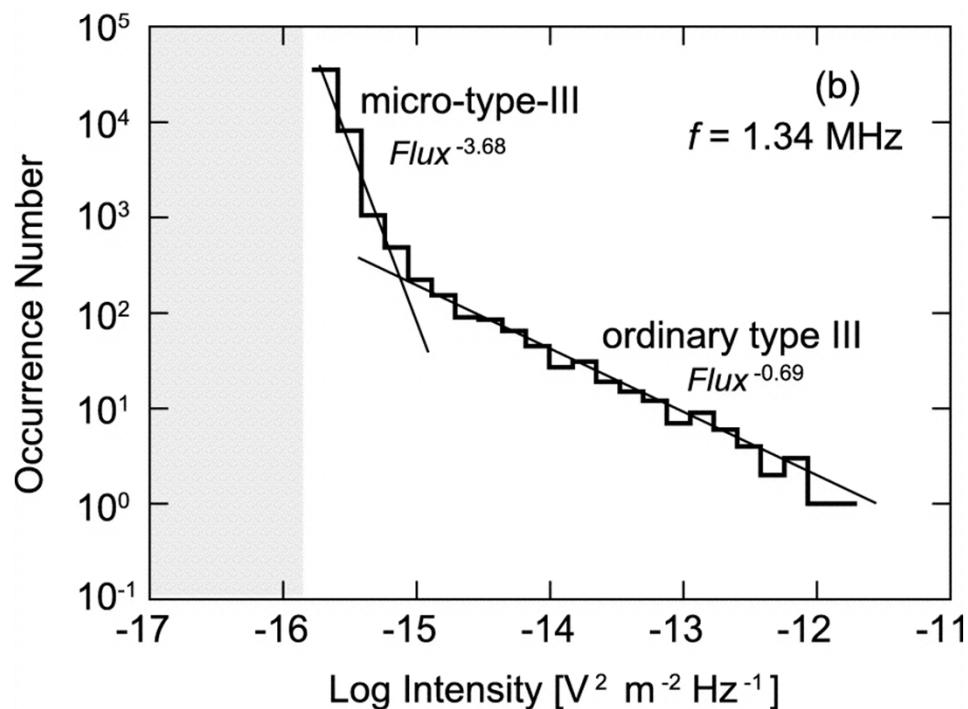
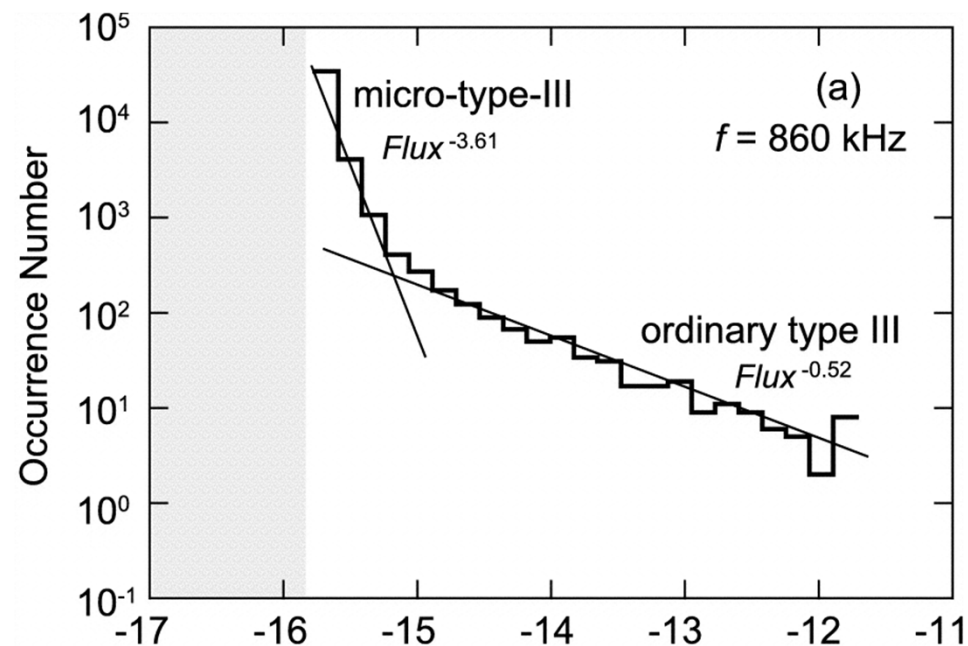
頻度分布: べき型

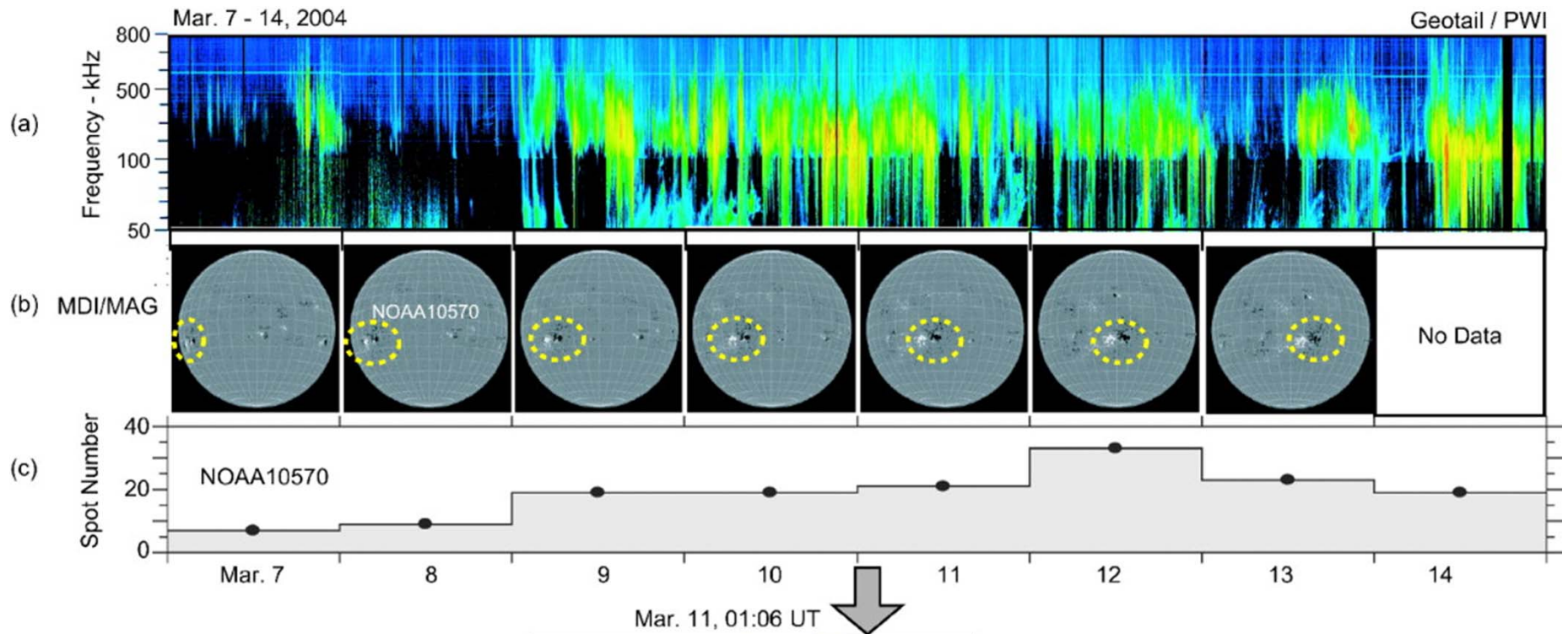
ただし、べきの値が変わる

Micro-type-III bursts

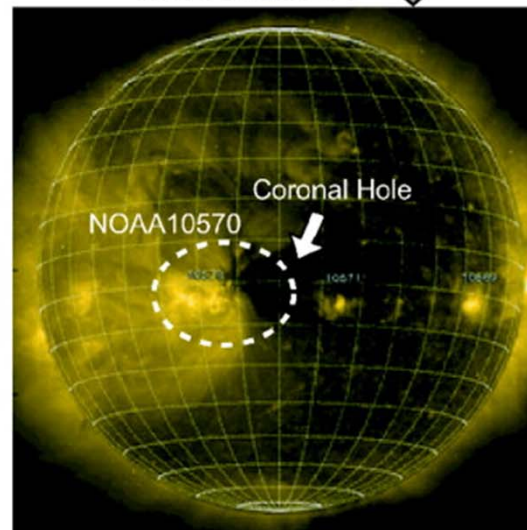
VS

Ordinary type-III bursts





(d) EIT 284 Å / SOHO



Type-I burst 微細構造

岩井一正 2012

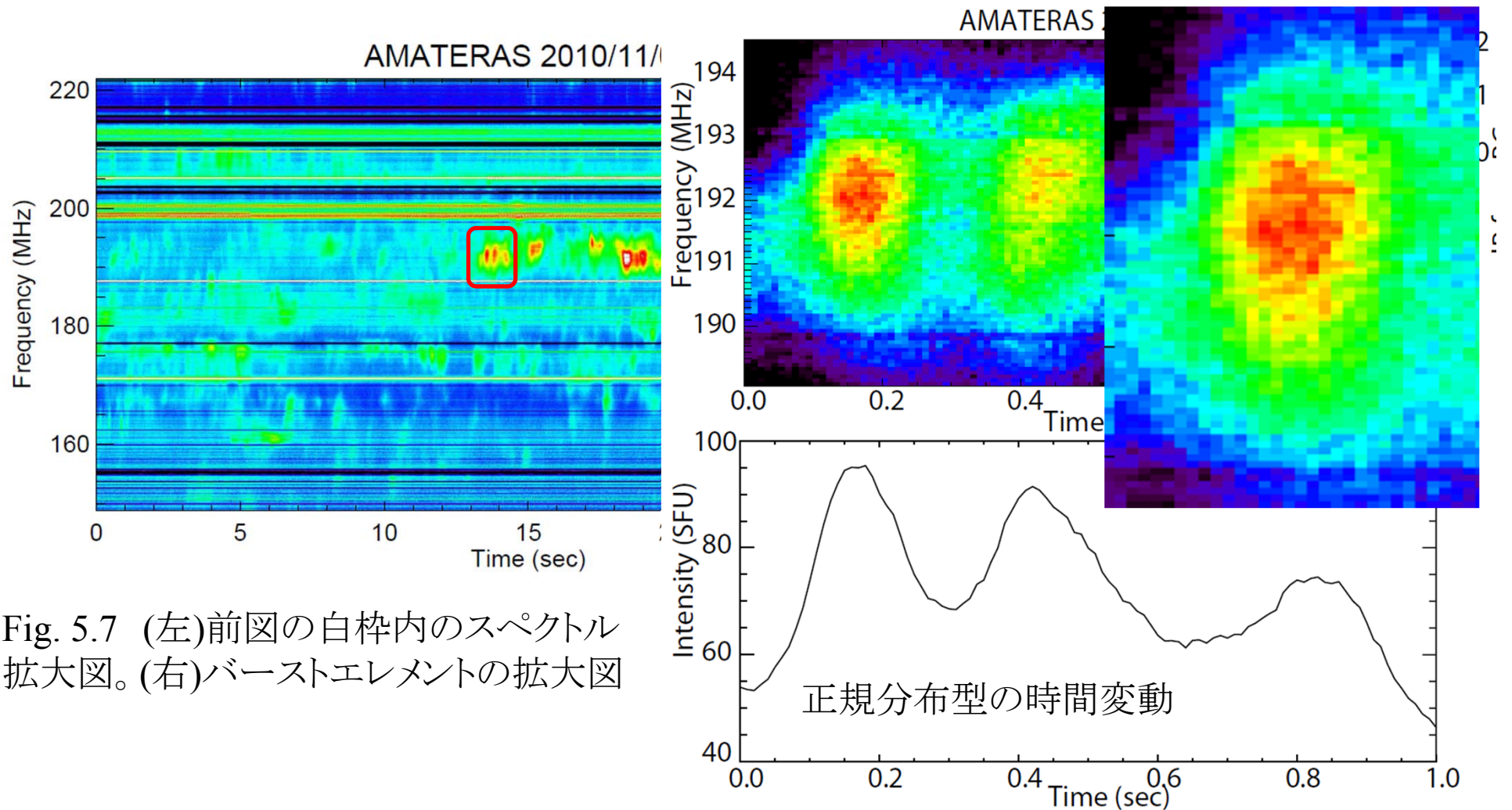
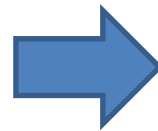


Fig. 5.7 (左)前図の白枠内のスペクトル拡大図。(右)バースト元素の拡大図

サブ構造無し



スペクトルの最小構造と定義
強度頻度分布を導出

Type-I bursts 統計的特徴

岩井一正 2012

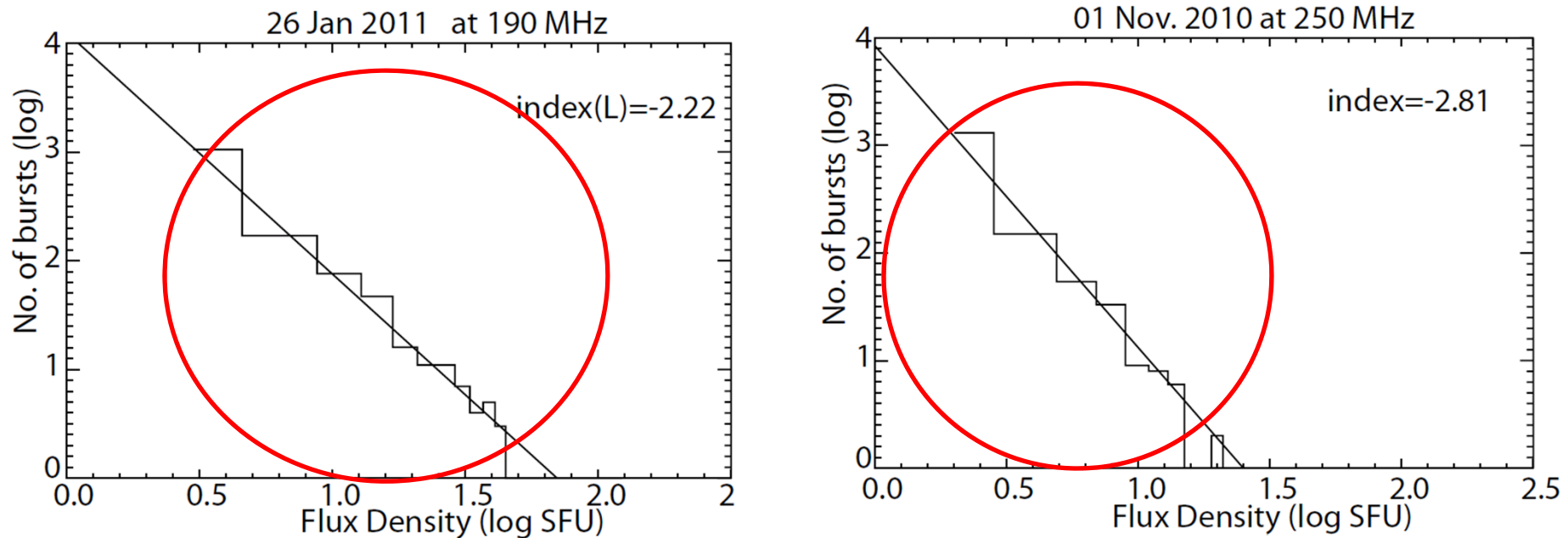


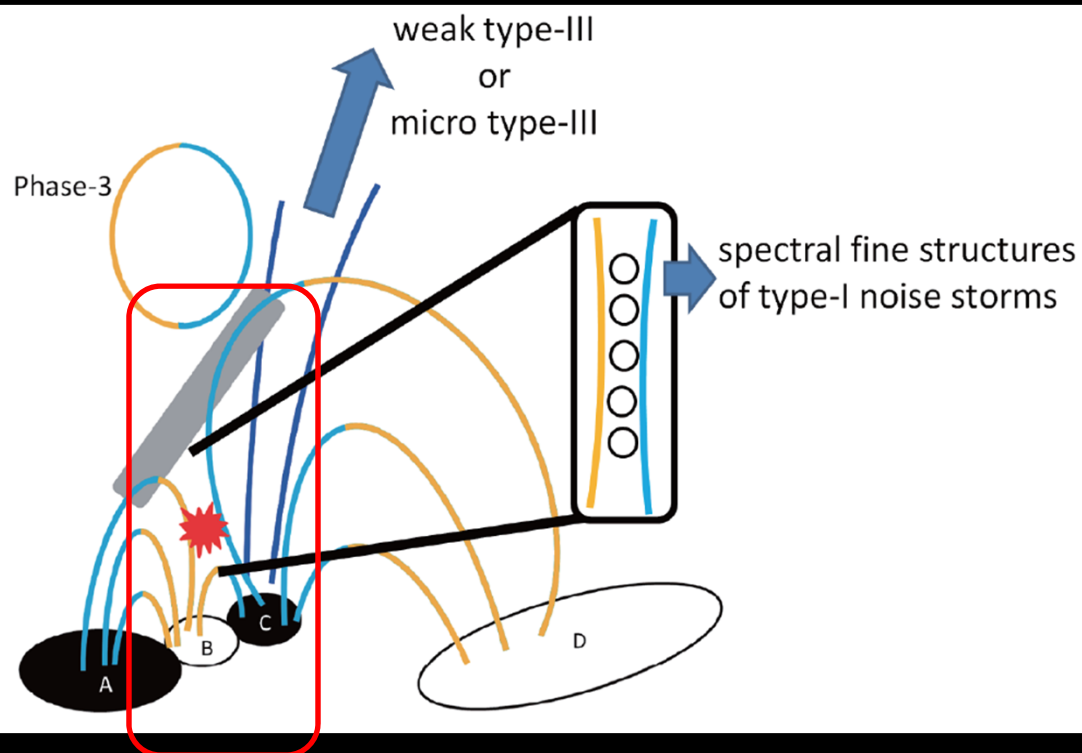
Fig. 5.8 (左): 2010年1月26日の190MHzにおけるバーストの強度頻度分布 (右):2010年11月1日の250MHzにおけるバーストの強度頻度分布

Type-I:power-law 分布を確認 ($\alpha > 2$)

フレア: $\alpha < 2$

個々のバーストエレメントはフレアとは「別物」?

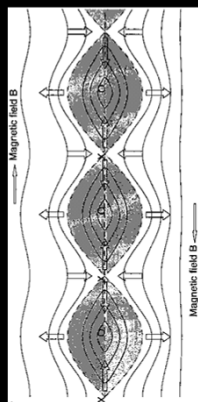
A model for entire type-I phenomena



個々のバースト：
リコネクションによって出来る別の発生機構で生成

違い：より小さい
または、より遅い

リコネクション：
Type-Iの一連の発生源
継続時間：長い

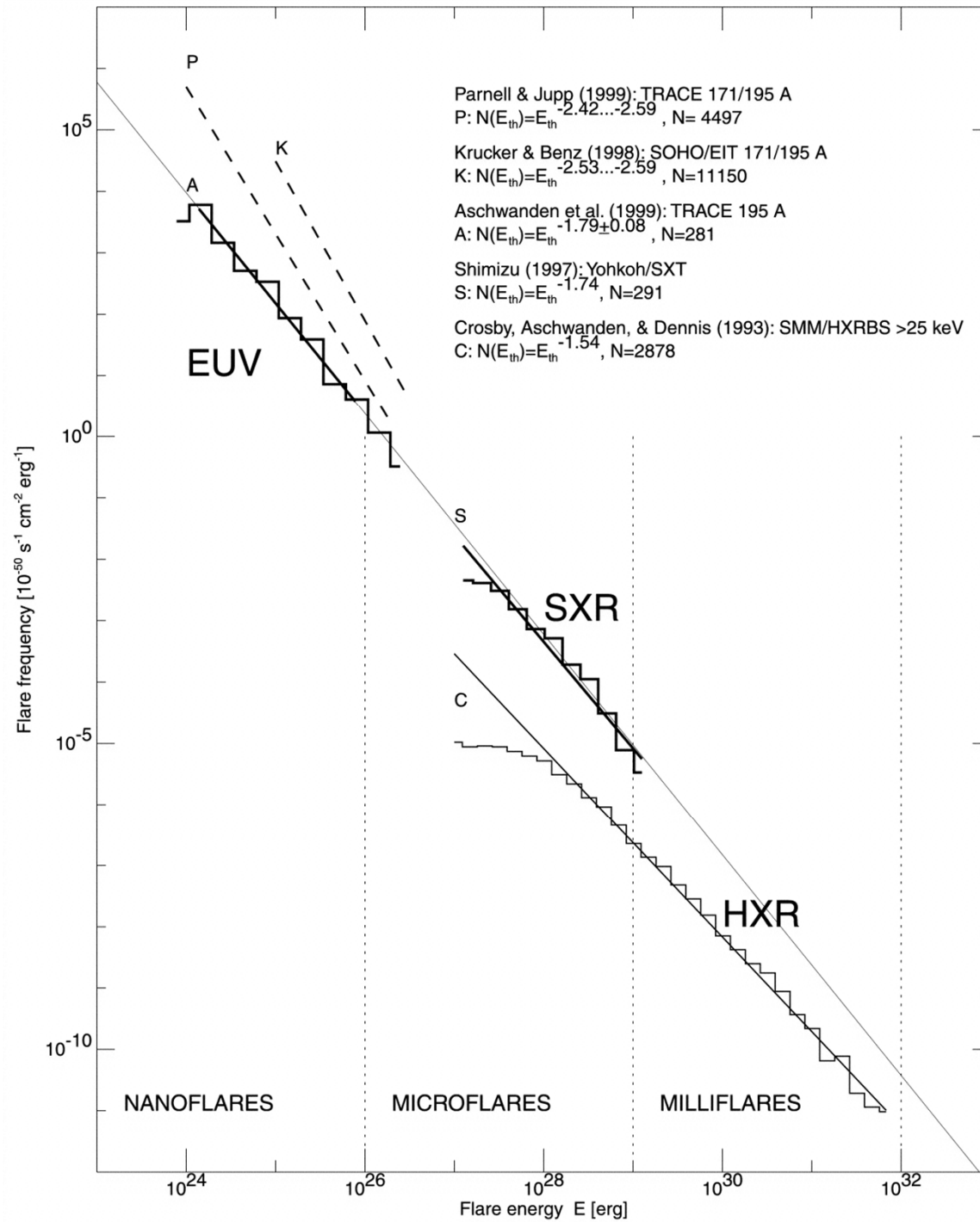


例：引き延ばされた反平行な磁場
磁気島の形成(tearing instability)
(e.g. Aschwanden 2002)

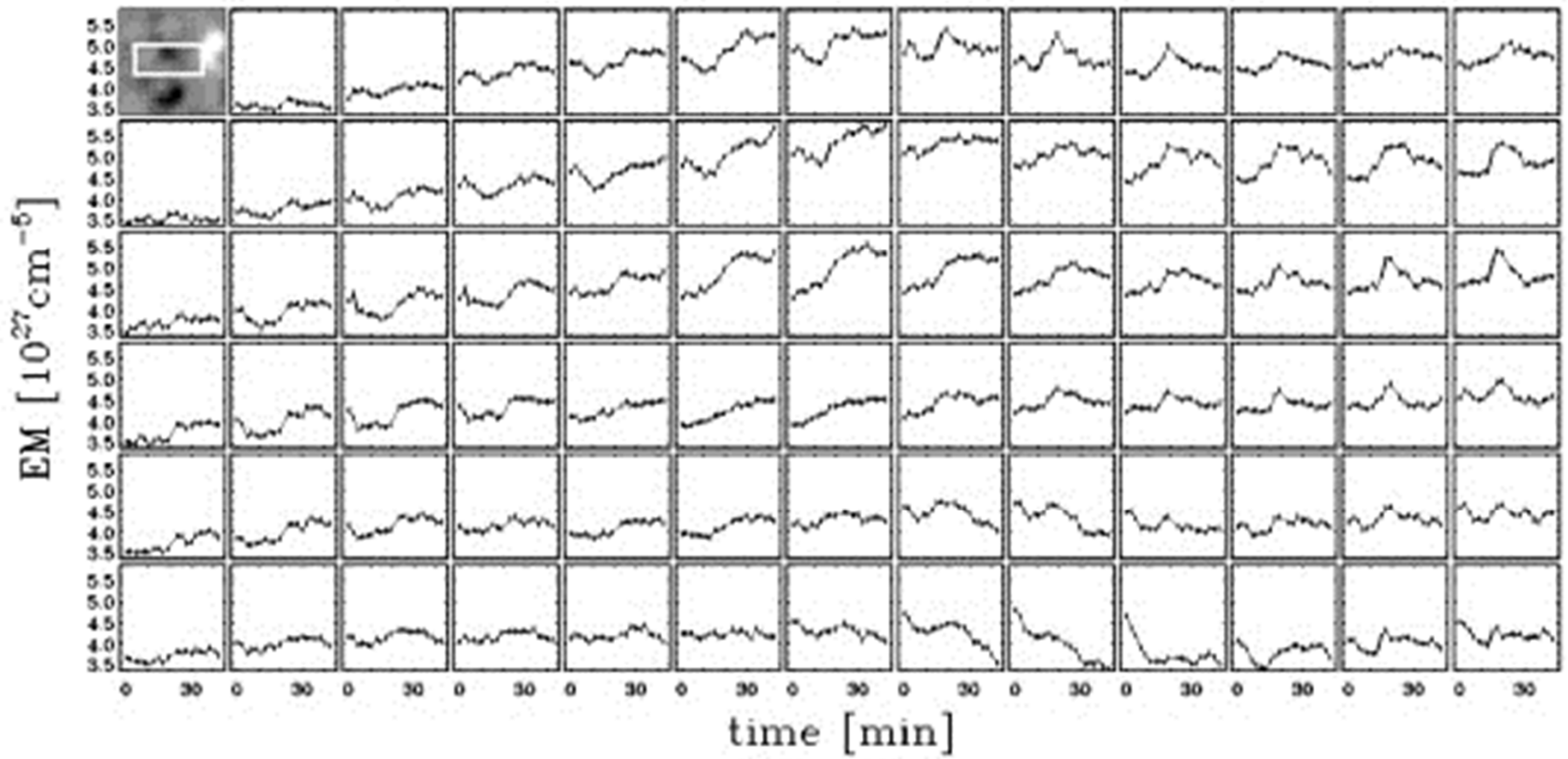
磁気島内に閉じ込められた不安定性
＝フレアと異なる幕を説明可能 ⁴¹

ALMAによる微小フレアの観測

- (1) 活動領域microflares
microflareを用いたflare physics
- (2) micro-type III bursts、type-I bursts
コロナホール境界 (open-closed boundary)
- (3) 静穏領域微小フレア
検出可能?



Aschwanden et al. 2000



Krucker and Benz 1998

ALMAを用いた太陽フレア粒子加速研究

名古屋大学太陽地球環境研究所 増田 智

Looptop or さらに上空(コロナ)の観測ターゲット

* 加速電子消失機構

Footpoint source (彩層)の観測ターゲット

* 白色光フレアのエネルギーインプット

微小な粒子加速研究

* コロナホール境界領域への加速電子の降り込み