

RHESSI 衛星他による高エネルギー粒子の
硬X線・ガンマ線観測
- 魂(ALMA)ノ導 -

石川真之介 (NAOJ)

フレアの硬X線・ガンマ線観測

- 太陽フレア観測

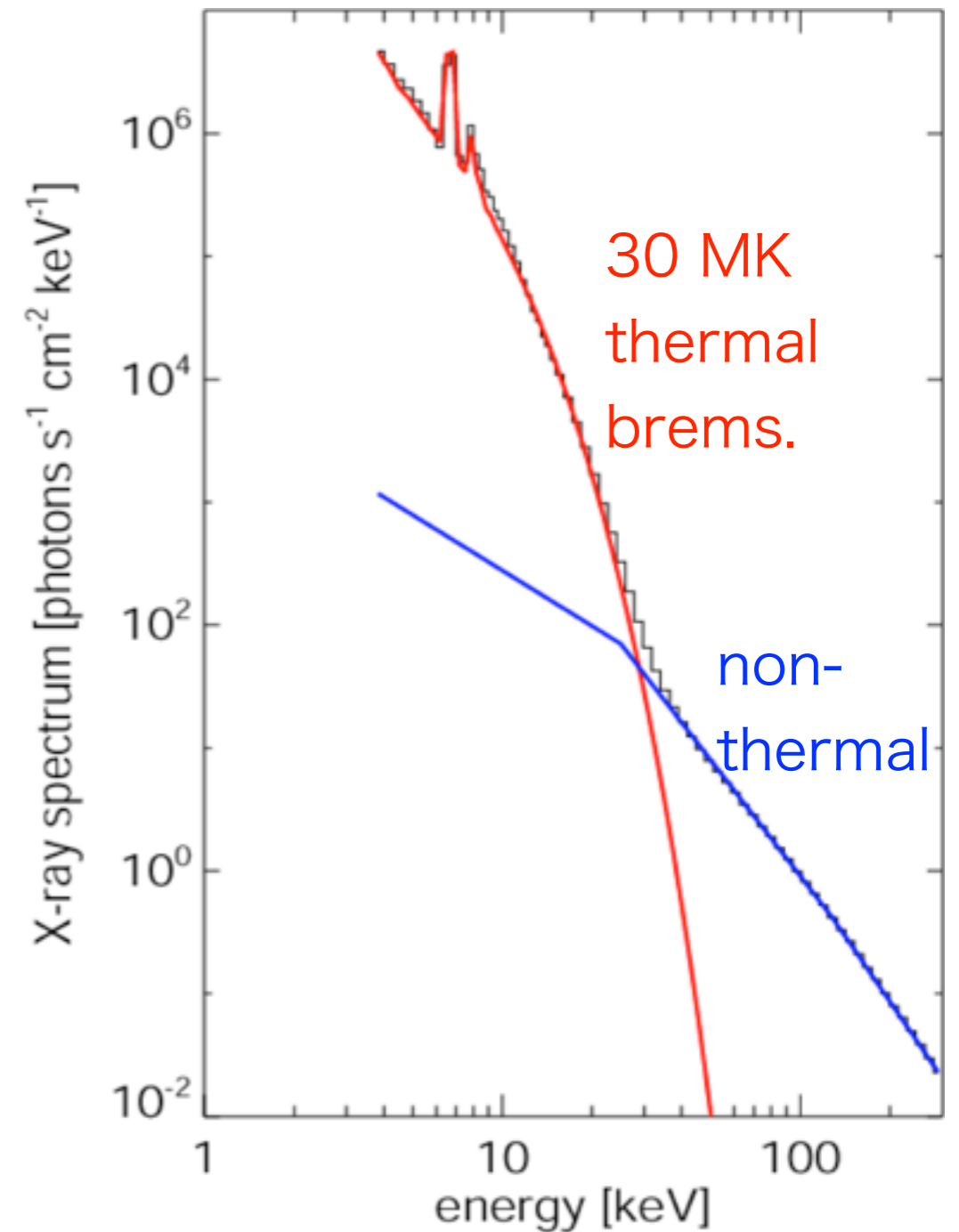
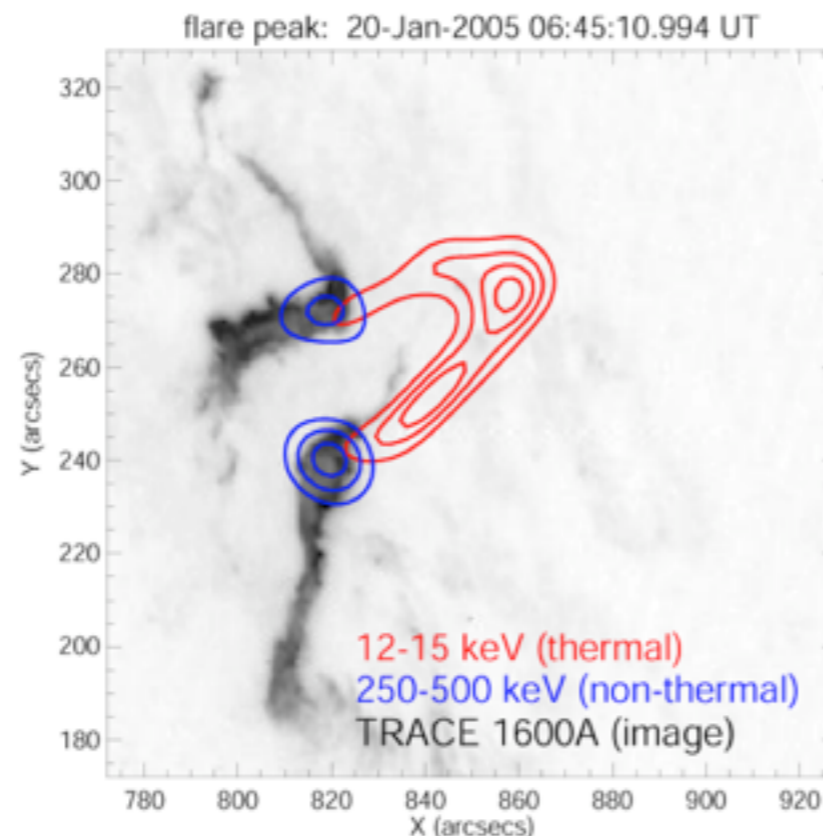
磁気ループに沿った ~数10 MK の
熱的プラズマ (20-30 keV まで) と、
加速粒子からの非熱的放射 (20-30 keV 以上)

- 加速粒子からの放射

電子 非熱的制動放射、power-law

イオン 核ガンマ線ライン

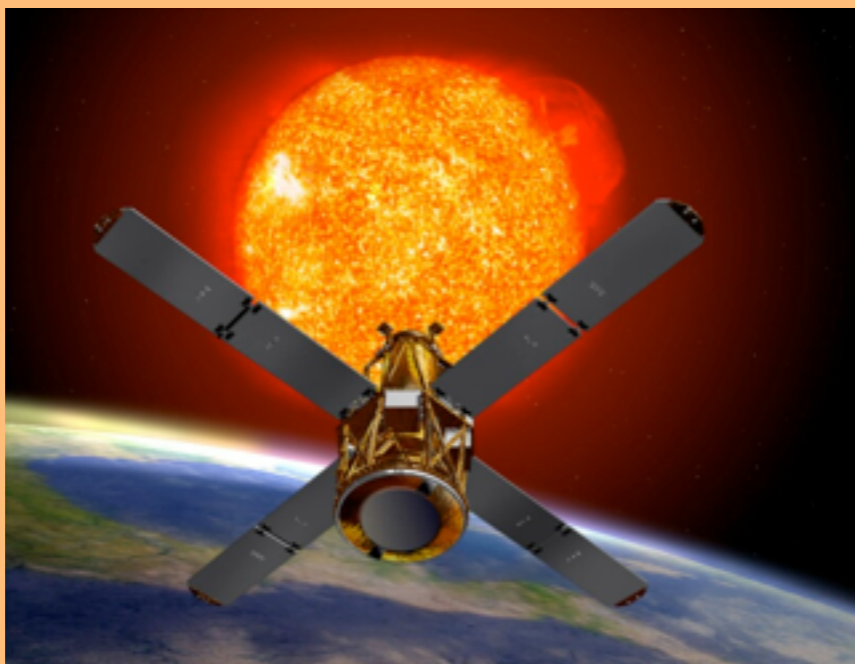
π^0 崩壊?



太陽硬X線・ガンマ線観測衛星

イメージング観測

RHESSI (2002-、米国)



3 keV - 17 MeV 撮像分光 (すだれコリメータ)
エネルギー分解能 ~1 keV (@100 keV)

非イメージング観測



すざく (2005-、日本)
50 keV - 5 MeV、有効面積最大



Fermi (2008-、米国)
8 keV - 300 GeV の広帯域

- 単に多くの光子を集めるだけならば巨大な検出器を持った非イメージング型観測機器の方が有利
- しかしフレアの物理過程の理解には撮像分光観測が重要

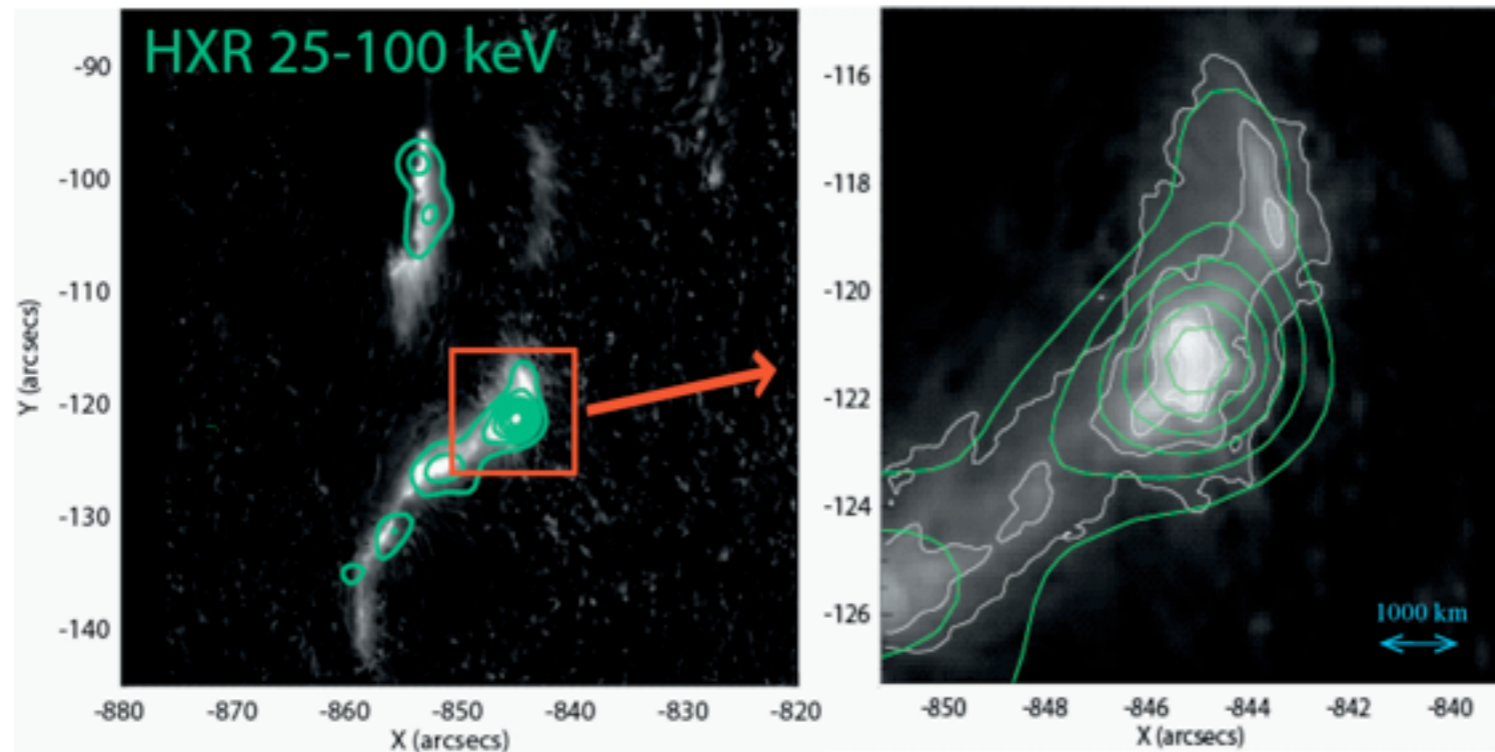
(RHESSI 衛星による太陽フレアの撮像分光)

RHESSI 10年の成果は以下にもまとめがあります

[http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/wiki/index.php/RHESSI
%27s_Tenth_Anniversary](http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/wiki/index.php/RHESSI%27s_Tenth_Anniversary)

RHESSI による高分解能撮像分光

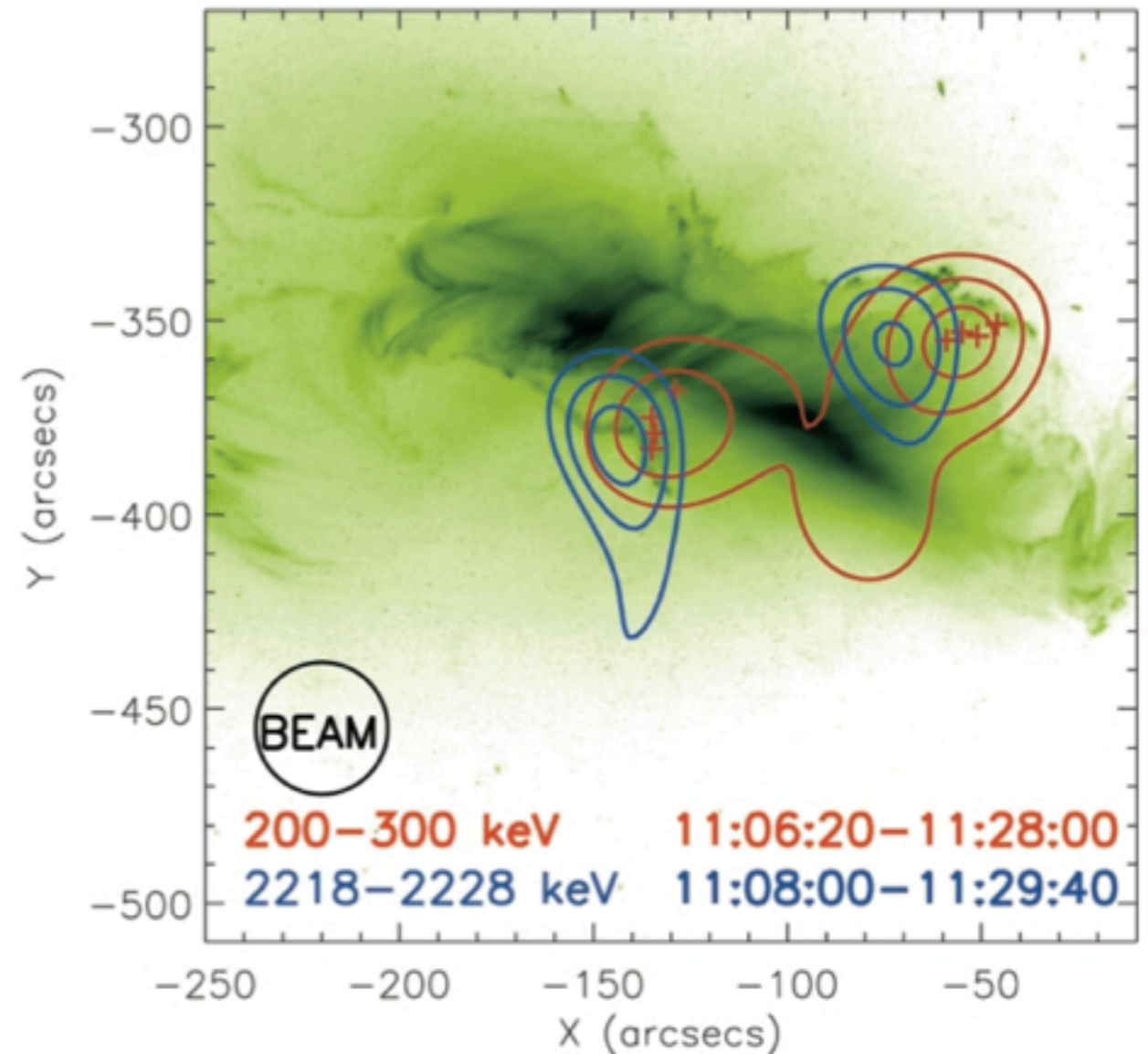
- ~ 1 keV (@100 keV) のエネルギー分解能により、硬X線連続放射(加速電子)の詳細なスペクトルが明らかになってきた
- 最大 ~ 3 秒角の位置分解能によるイメージング
白色光フレアの硬X線リボン構造の発見



- 複数ソースのスペクトルの関係(Saint-Hilaire et al. 2008、Battaglia&Benz 2006、Ishikawa et al. 2011a 他)
- 高い有効面積による統計的研究(マイクロフレアの統計的研究、Christe et al. 2008、Hannah et al. 2008 等)

RHESSI ガンマ線イメージング

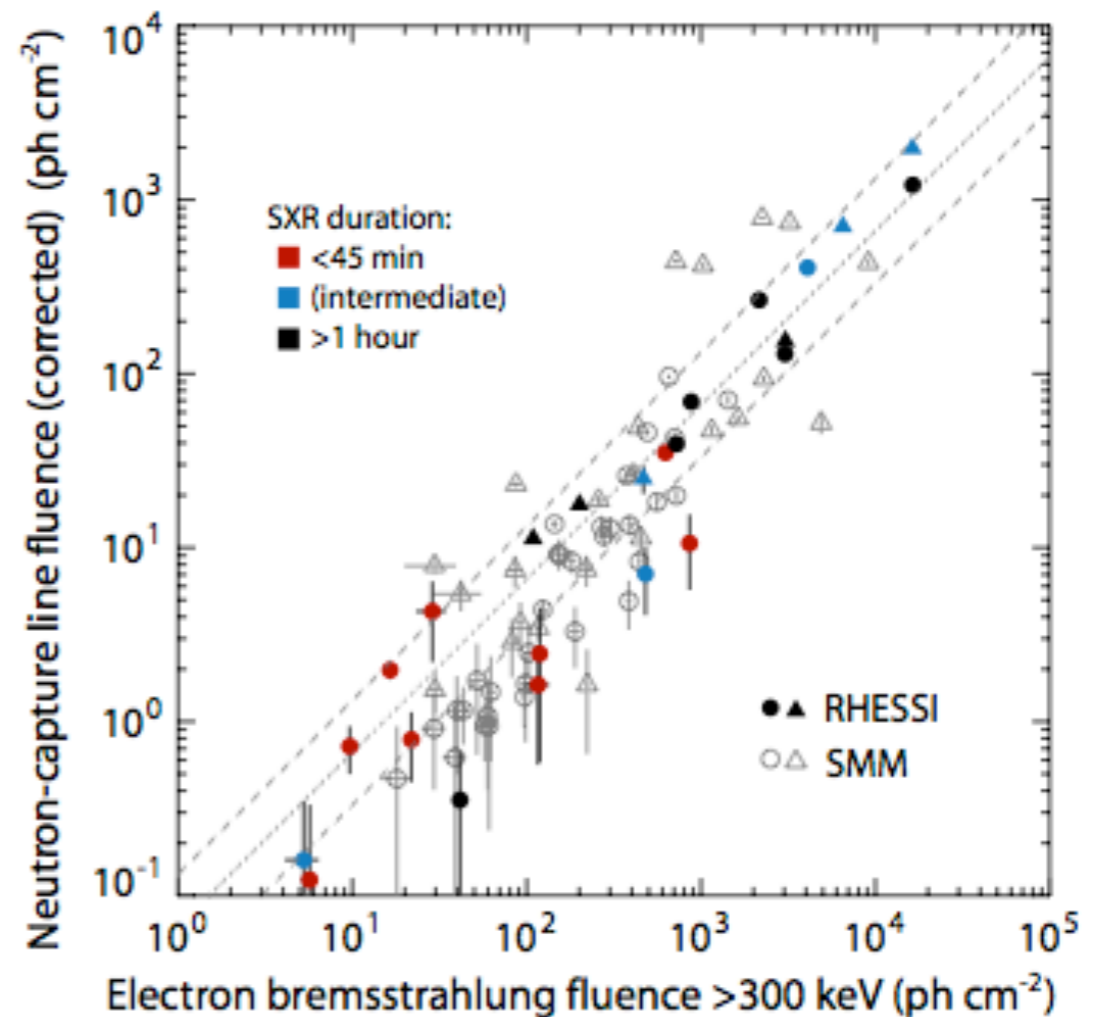
- ガンマ線イメージング観測は RHESSI で初めて可能に
- 2.2 MeV 中性子捕獲線のイメージは 2つの footpoint を持ち、硬X線とよく似ている
 - 電子とイオンは同じプロセスで同じように加速？
- 2.2 MeV ソースは硬X線ソースとずれている
 - 加速場所は同じではない？
- ガンマ線ラインのイメージングが成功したのは数イベントのみ (感度、有効面積の制限)



(Hurford et al. 2006)

イオンによる核ガンマ線放射と 電子による連続放射との関係

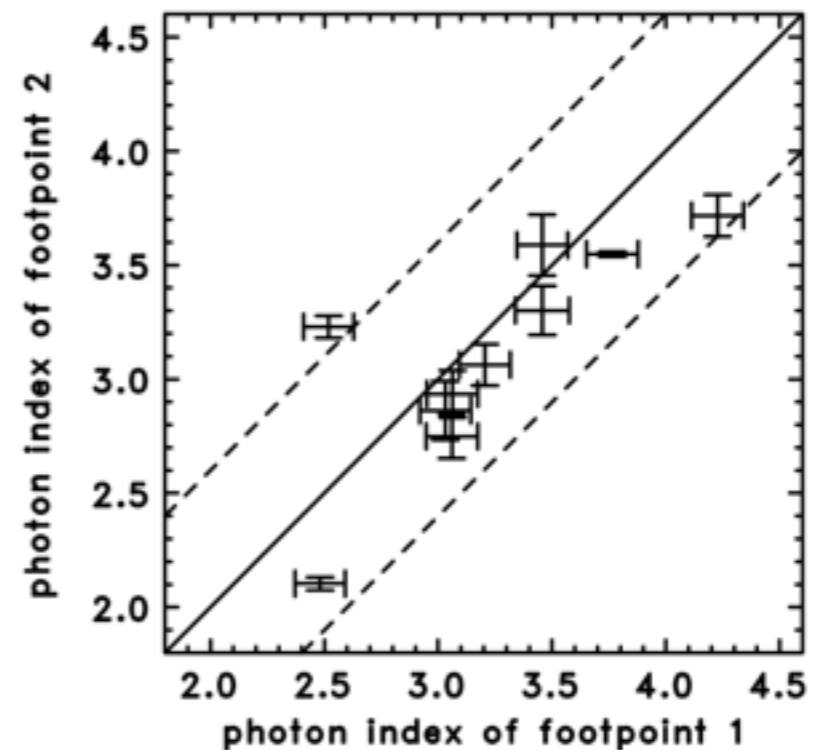
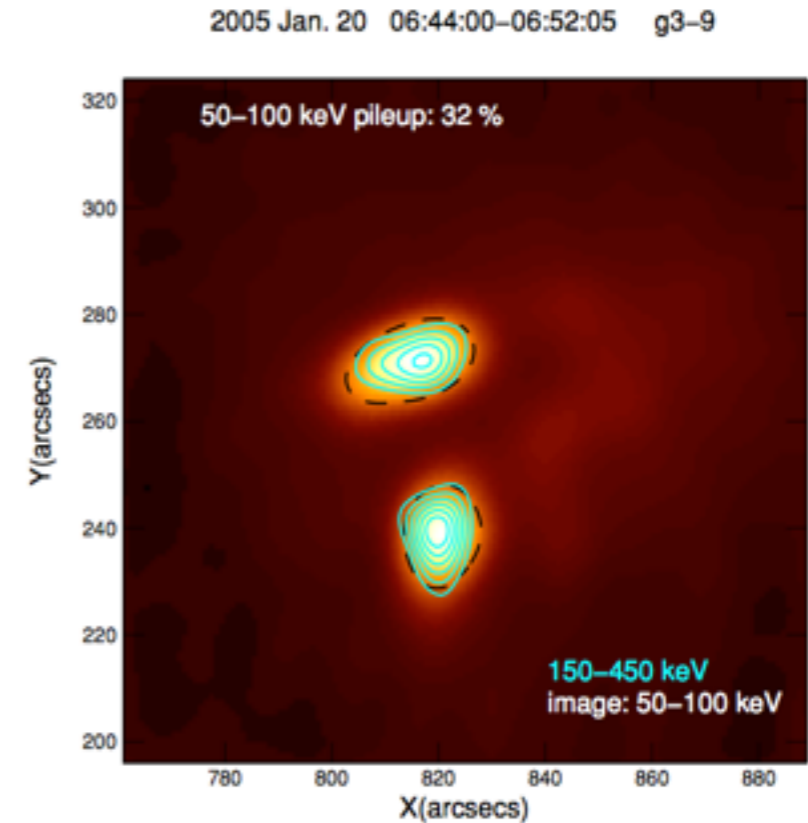
- 2.2 MeV の放射と >300 keV の連続放射には、3桁以上にわたり相関がある (RHESSI, SMM/GRS)
- この相関は、熱的X線との相関よりも強い
→ 電子とイオンの加速の関係を示唆
- RHESSI でのガンマ線フレアは30例程度、フレア全体が観測され、エネルギーを決定できたイベントは10数例程度



(Shih et al. 2009)

> 100 keV の電子による連続放射のイメージング

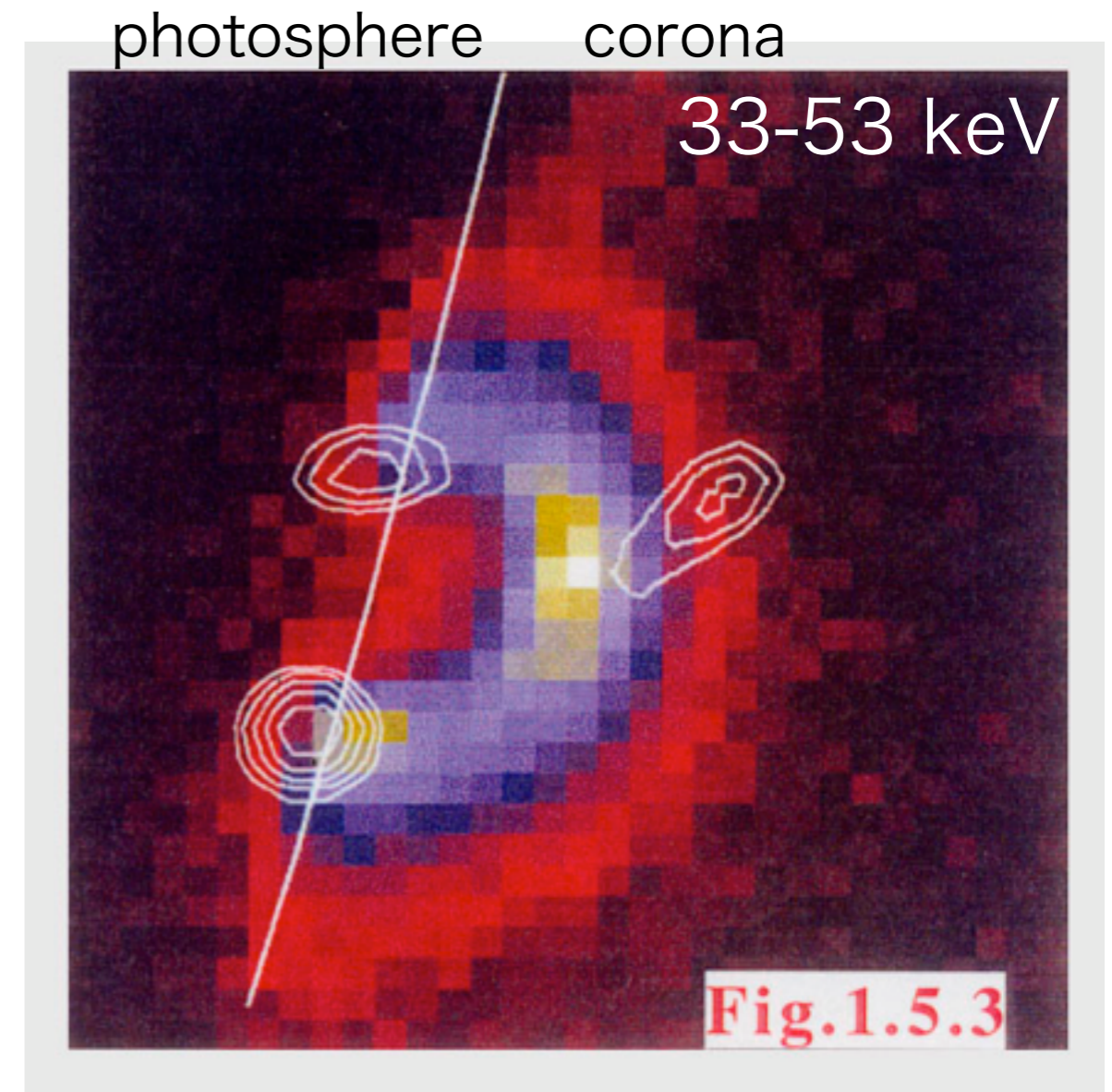
- 100 keV 以上の放射によるイメージは 100 keV 以下のイメージとほぼ同じ
- 2つのfootpoint の photon index は >100 keV まで考えても~0.6以内で一致 (> 100 keV 以下の結果とよく一致)
→ 少なくとも数百 keV まで電子は同様のメカニズムで加速されていることを示唆
- 複数の footpoint を分解できる等
> 100 keV の空間構造を調べられる
イベントは RHESSI の全観測でも10例程度



(Ishikawa et al. 2011)

コロナからの非熱的放射

- フレア観測一般において硬X線は footpoint で強いが、コロナ中からも観測されている
- 代表例：「増田フレア」
footpoint ソースの他に、
「above-the-loop-top」ソースの発見
→ フレアの起源が磁気リコネクションであることを支持
- 加速された粒子がそのままコンパクトな領域にトラップされていると考えられ、重要な観測であるが、
footpoint からの放射が強いため
一般的にコロナソースの観測は困難
→ footpoint の隠れたリムフレア観測、
特にコロナからの放射が強いイベントの探索

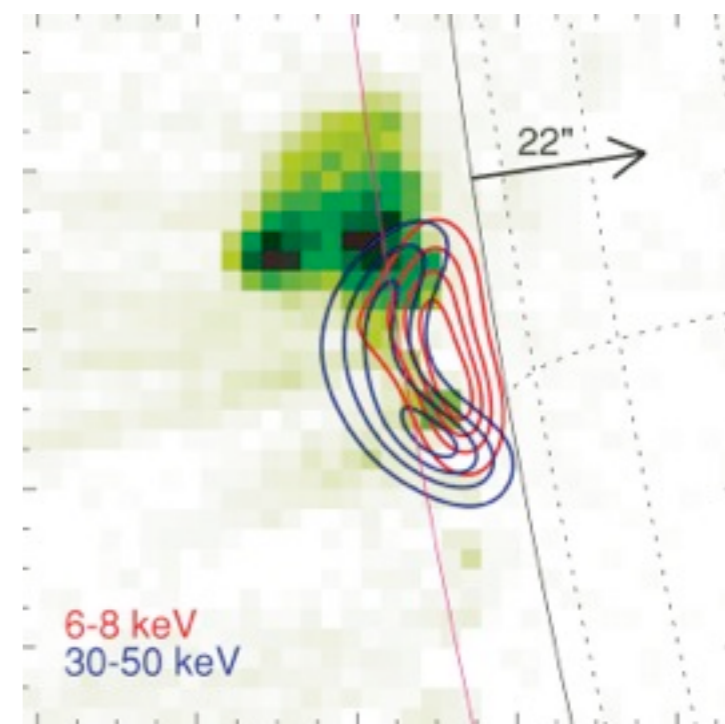


(Masuda et al., 1994)

RHESSI の “above-the-loop-top” ソース観測

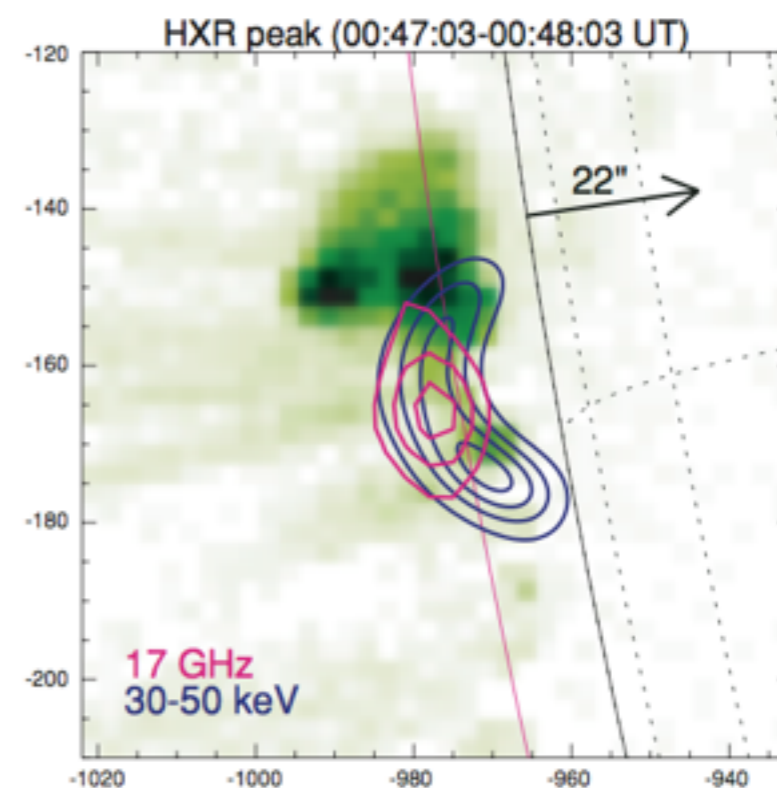
- RHESSI でも above-the-loop-top ソースは数個しか観測されていない
- 2007/12/31 のフレアの観測では、above-the-loop-top ソースは非熱的放射であることを支持

corona photosphere



above-the-loop-top ソースの位置に熱的放射は検出されていないが、もし低温のプラズマがあれば直ちに加熱されて熱的放射が検出されるはず
→ この領域には加速粒子しか存在せず、ほとんど(数十%以上)の粒子が加速されているとしている
(Krucker et al. 2010)

- NoRH 17 GHz も非熱的硬X線と同じ位置
→ この領域で MeV まで加速？

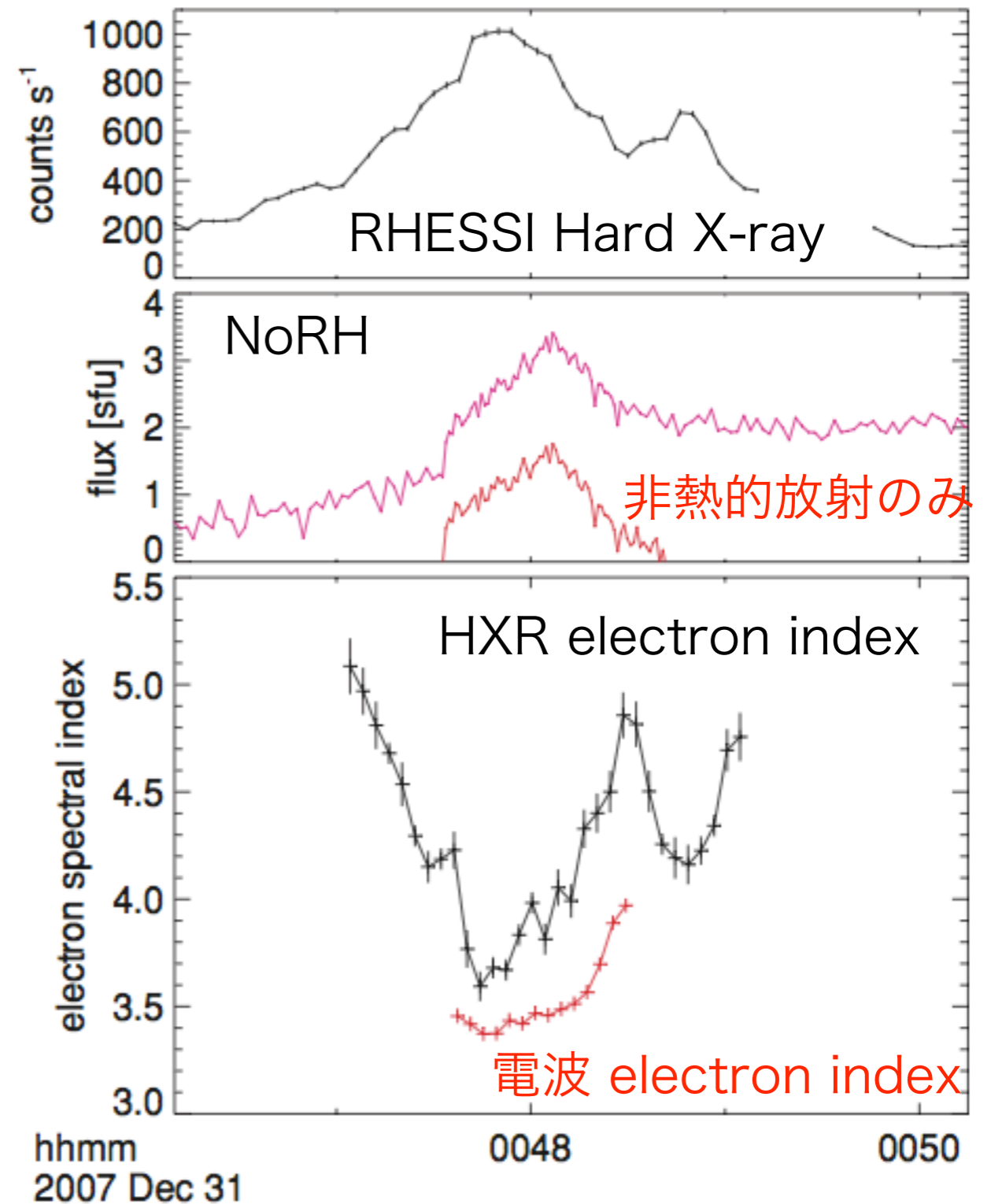


(Krucker et al. 2010)

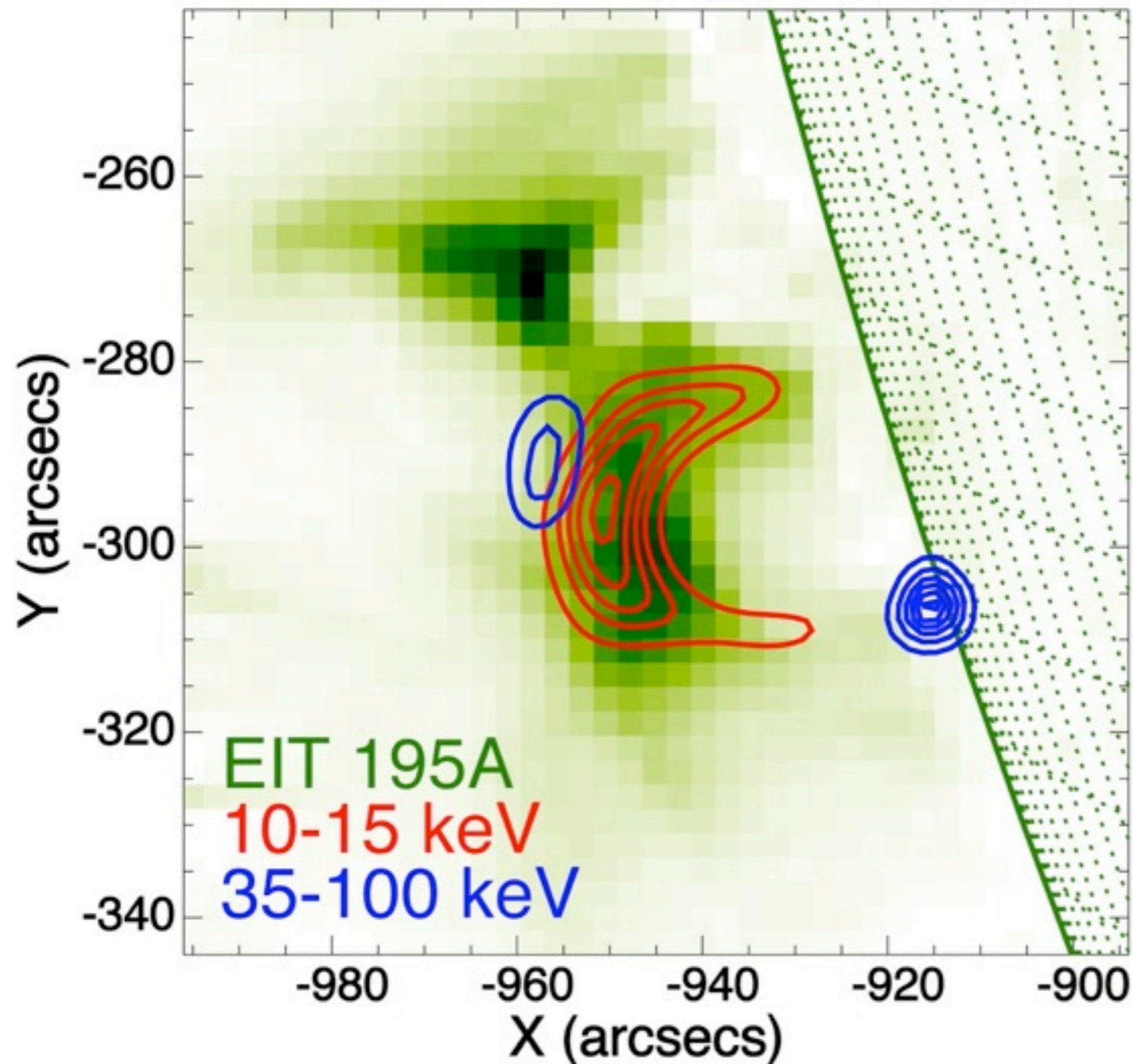
硬X線と電波の時間発展

- 硬X線強度の時間発展、
スペクトルの時間発展は
電波の時間発展と非常によく
似ている
→ MeV まで同様に加速されている
ことを示唆

(Krucker et al. 2010)



“above-the-loop-top” ソースと footpoint が 同時観測されているケース

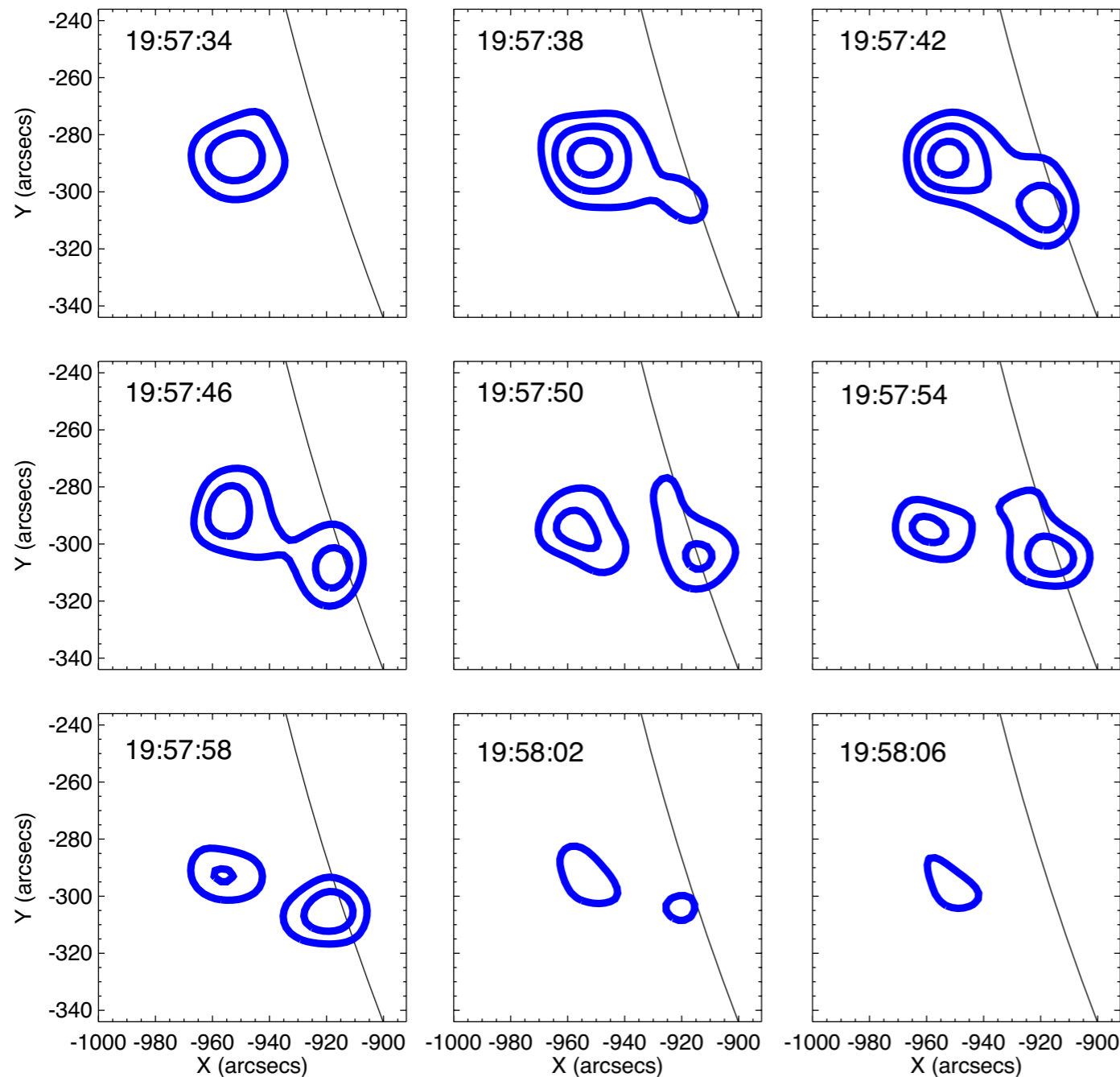


(Ishikawa et al. 2011)

- RHESSI の Masuda-type フレアの観測
- 2003/10/22のフレアでは above-the-loop-top ソースと footpoint ソースが 明確に同時観測されている
- スペクトルは
above-the-loop-top ソース
 $\gamma = 4.8 \pm 0.4$
footpoint ソース
 $\gamma = 3.7 \pm 0.5$
→ 同一成分の電子の thin-/thick-target による放射

それぞれのソースの時間変化 (35-100 keV)

35-100 keV

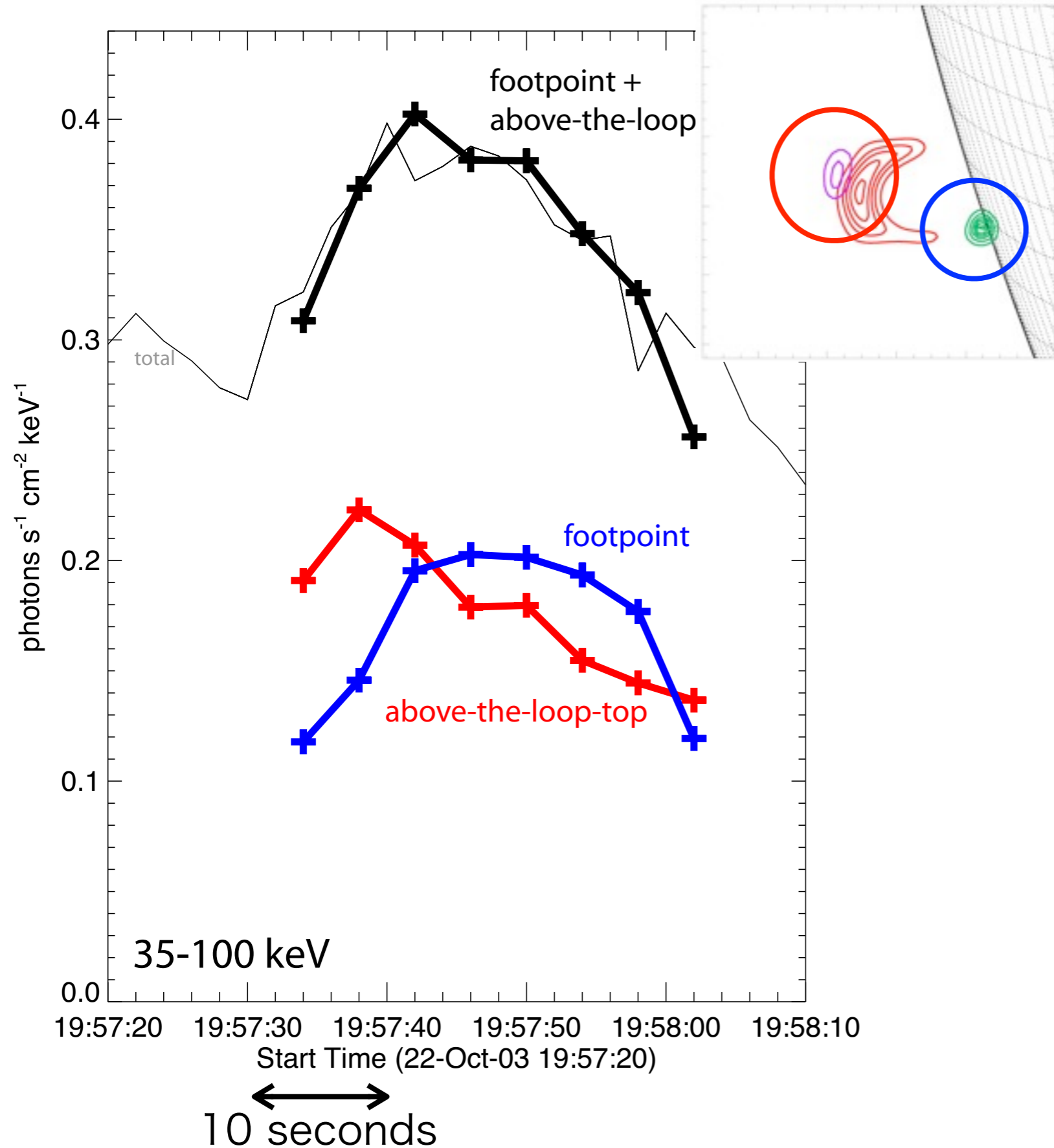


- above-the-loop-top ソースが最初に立ち上がり、above-the-loop-top ソースの減衰中に footpoint ソースが強くなる

- タイムスケールは ~20 秒

- 加速粒子がまずコロナ中にトラップされ、逃げ出した電子が footpoint 放射を行うというモデルを強く支持

それぞれのソースの時間変化 (35-100 keV)

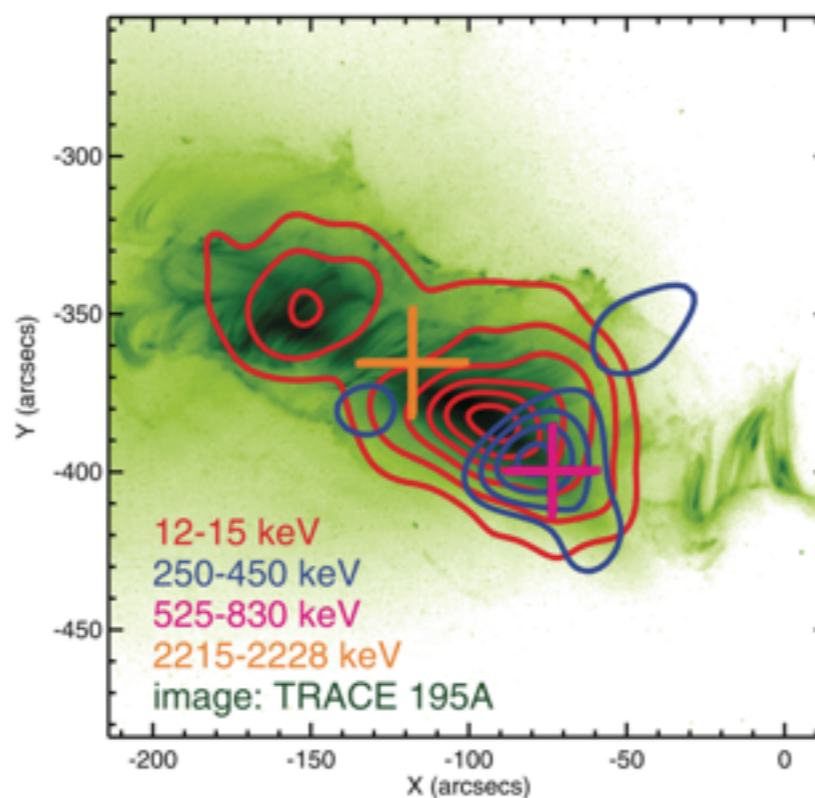
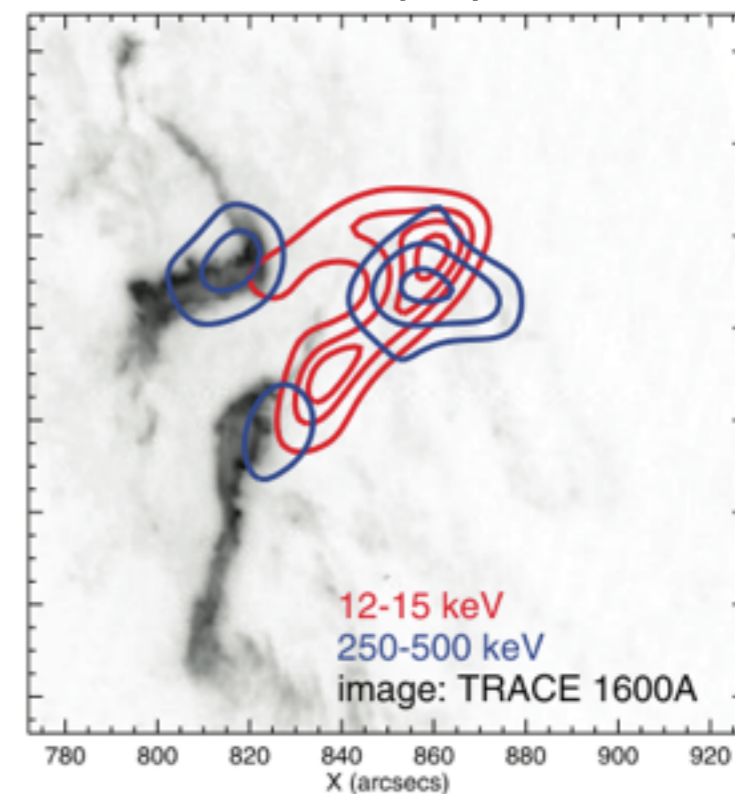


- above-the-loop-top ソースが最初に立ち上がり、above-the-loop-top ソースの減衰中に footpoint ソースが強くなる
- タイムスケールは ~20 秒
- 加速粒子がまずコロナ中にトラップされ、逃げ出した電子が footpoint 放射を行うというモデルを強く支持

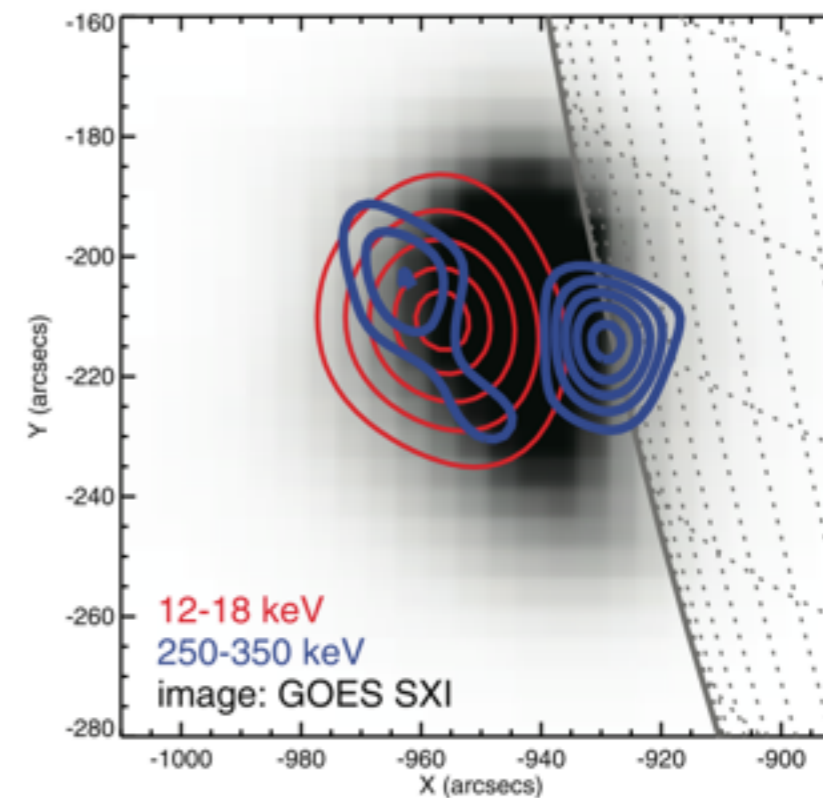
コロナからの高エネルギー放射

2005/1/20

- いくつかのフレアで、コロナから高エネルギー放射(> 200 keV)が検出されているものが発見されている (Krucker et al. 2008、3例示している)
- それらのイベントでは、硬X線の減衰時間で、コロナからの放射がイメージングされやすい (相対的に footpoint の放射より強くなる)



2003/10/28

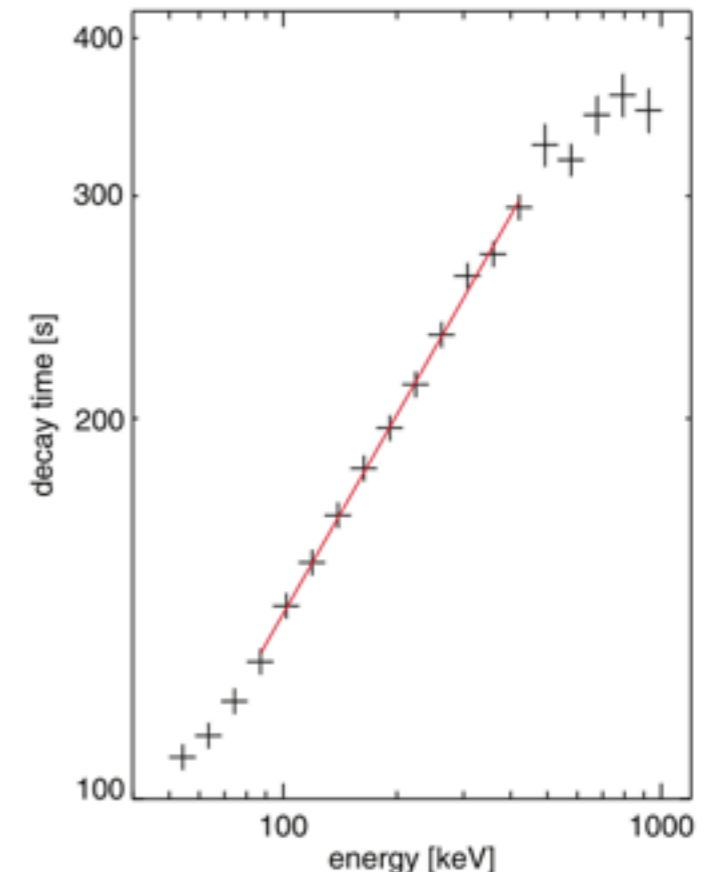
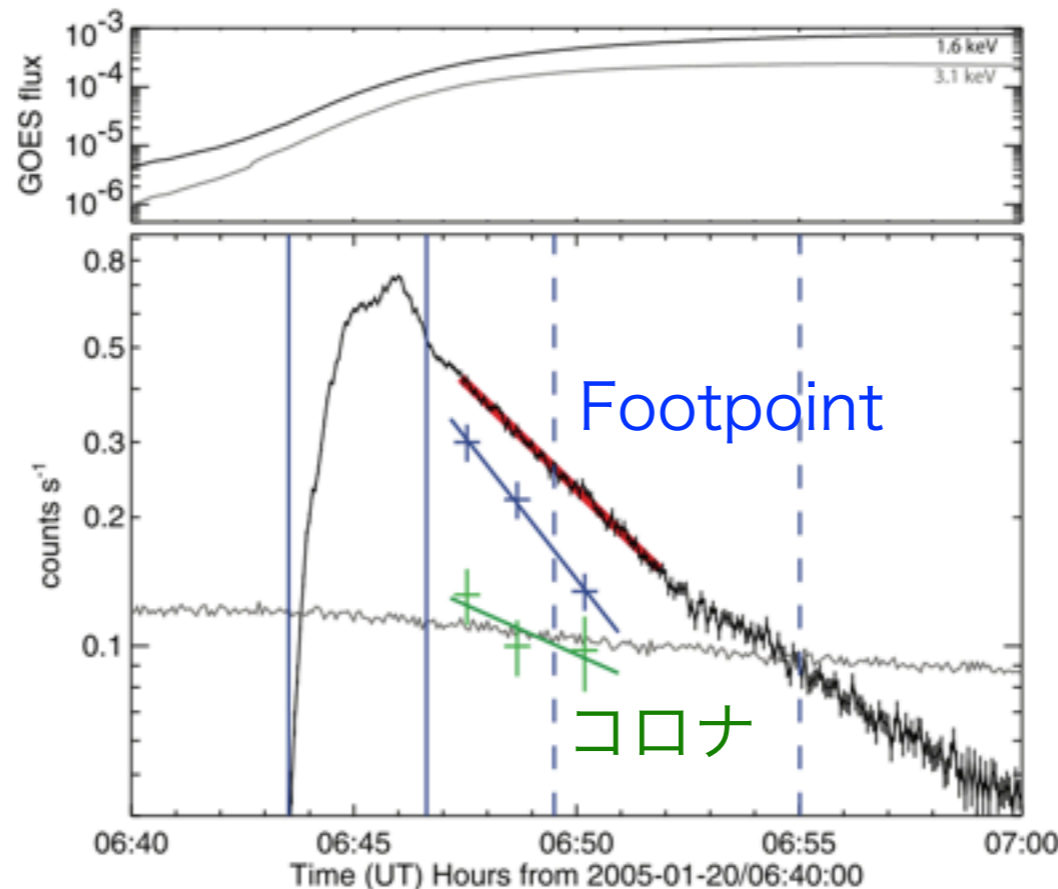
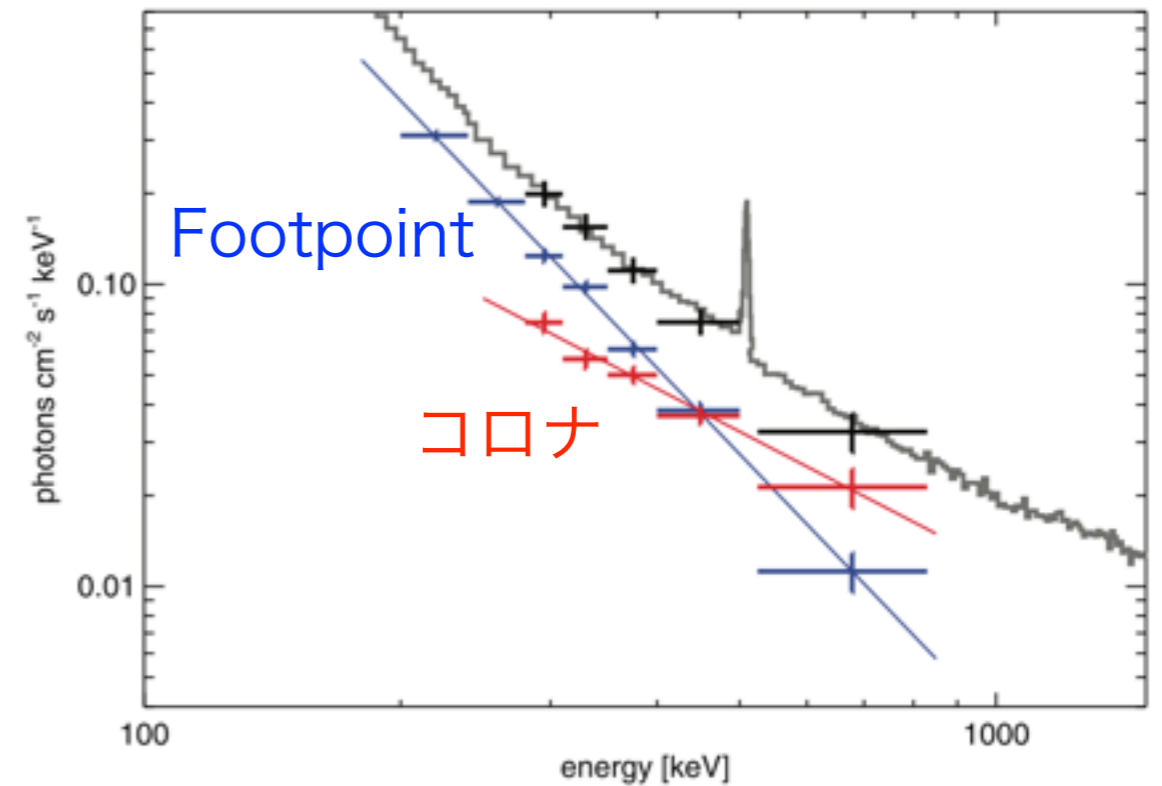


2005/9/7

(Krucker et al. 2008)

コロナからの高エネルギー放射

- Footpoint よりもコロナからの放射の
ほうがスペクトルはハード
(Footpoint: $\gamma = 3-4$ 、コロナ: $\gamma = 1.5-2$)
- Footpoint の方が早く減衰
- エネルギーが高いほど減衰時間が長い
→ 高エネルギーの電子ほどコロナ中に
長くとどまる



(Krucker et al. 2008)

(すざく衛星、Fermi 衛星の全天サーベイによる
太陽フレアからの高エネルギー放射の検出)

すざく衛星

- すざく (Astro-EII) 日本のX線天文衛星
2005年7月打ち上げ

- Low earth orbit (~550 km)

- 観測機器 (ポインティング観測):

X-ray Imaging Spectrometer (0.3-10 keV CCD)

Hard X-ray Detector (10-700 keV)



- 太陽はポインティングできないX線天文衛星だが、
全天ガンマ線モニタ (Wide-band All-sky Monitor, WAM)により、
太陽フレアの観測が可能

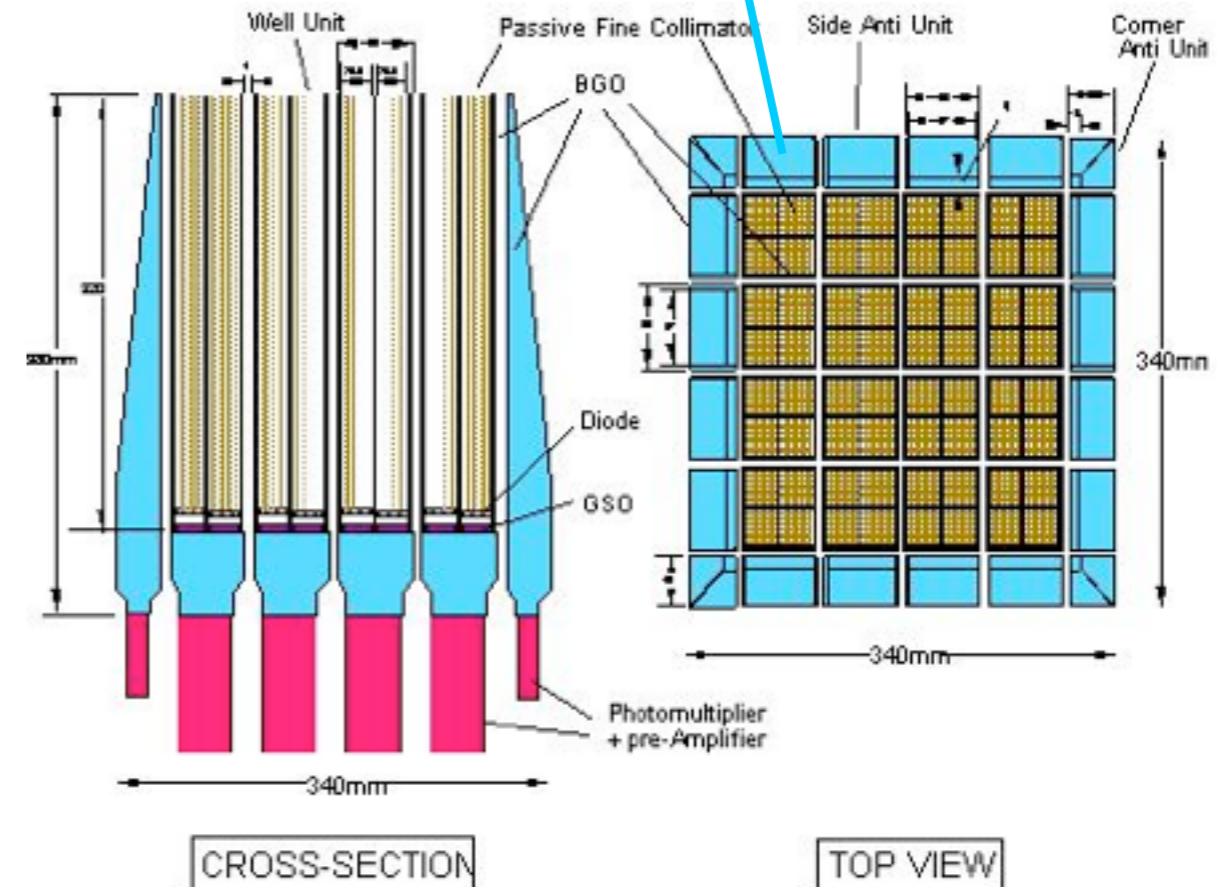
- WAM の太陽フレアリストはすで出版されており (Endo et al. 2010)、
最新のリストは WAM のホームページで閲覧可能

<http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/HXD-WAM/WAM-GRB/>

Hard X-ray Detector / Wide-band All-sky Monitor (HXD/WAM)

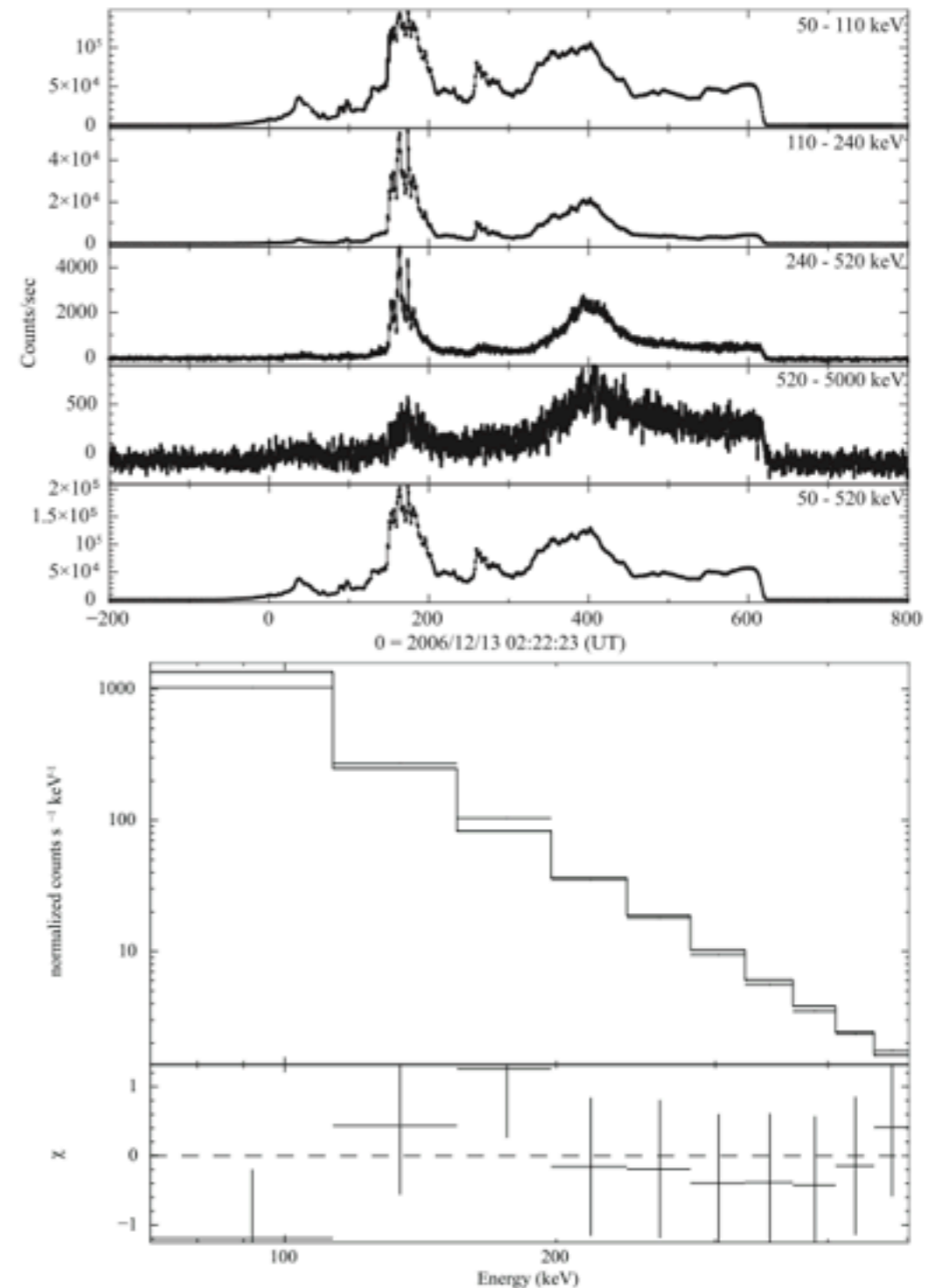
BGO アクティブシールド/WAM

- HXD の BGO シンチレータによる
アクティブシールドは硬X線・ガンマ線
全天モニタとしても利用可能
- 広いエネルギーレンジ (50 keV - 5 MeV)、
大きな有効面積 (800 cm² at 100 keV、
RHESSI の~13倍@100 keV)
- 1 s 分解能のモニター観測
(Transient Mode, 55 energy bins) と
15 ms 分解能のトリガー観測の2つの観測モード
(Burst Mode, 観測時間1分, 4 energy bins)



WAM の太陽フレア観測

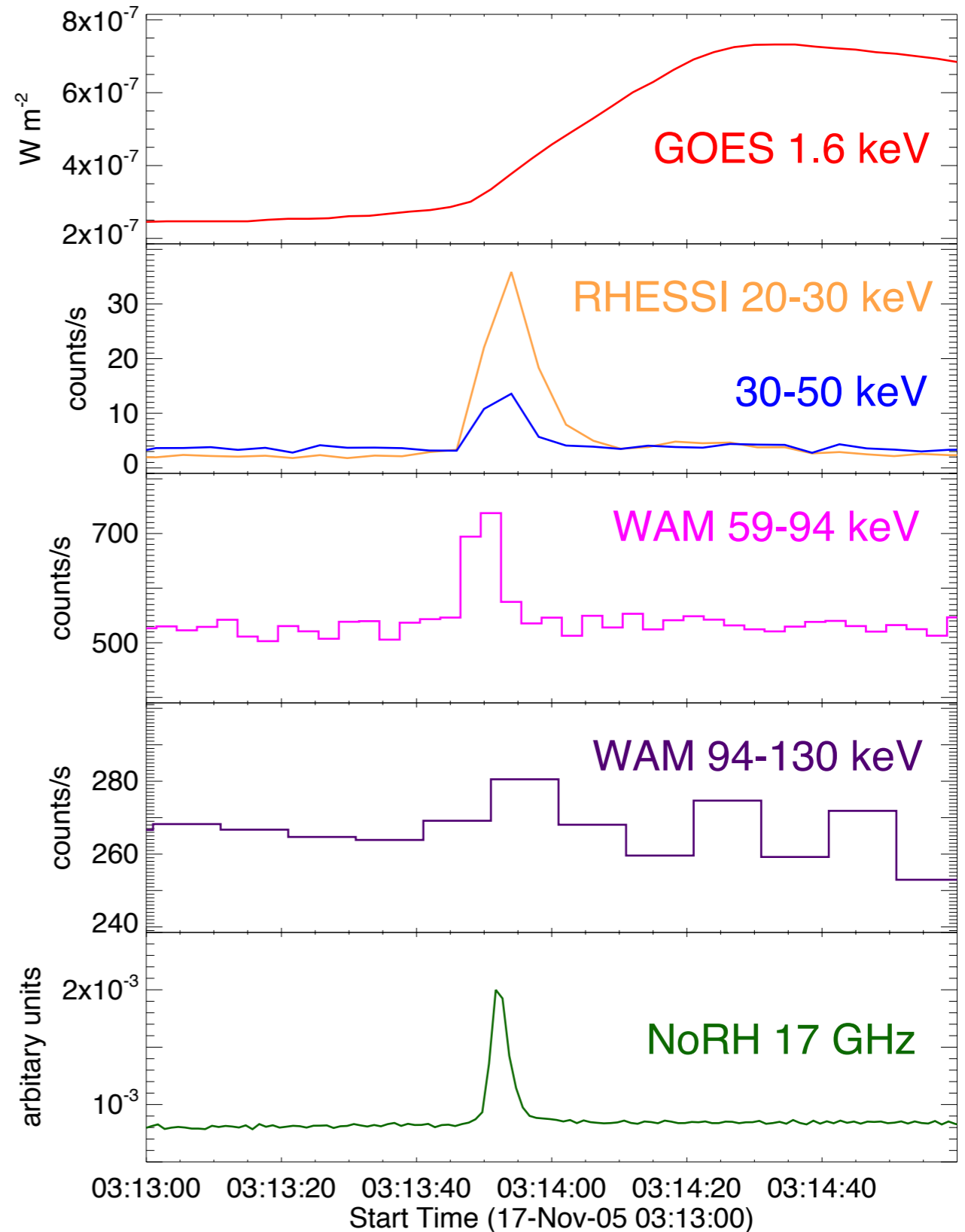
- Bクラスのマイクロフレアから、Xクラスのフレアまで
100イベント以上観測されている
- 大きいフレアでは
>500 keV の放射が検出されている
- バーストモードでトリガーされた
イベントも複数存在
- スペクトルは基本的に
power-law で表される
(Endo et al. 2010)



(Endo et al. 2010)

WAM マイクロフレア観測の例：2005/11/17 (B5.3)

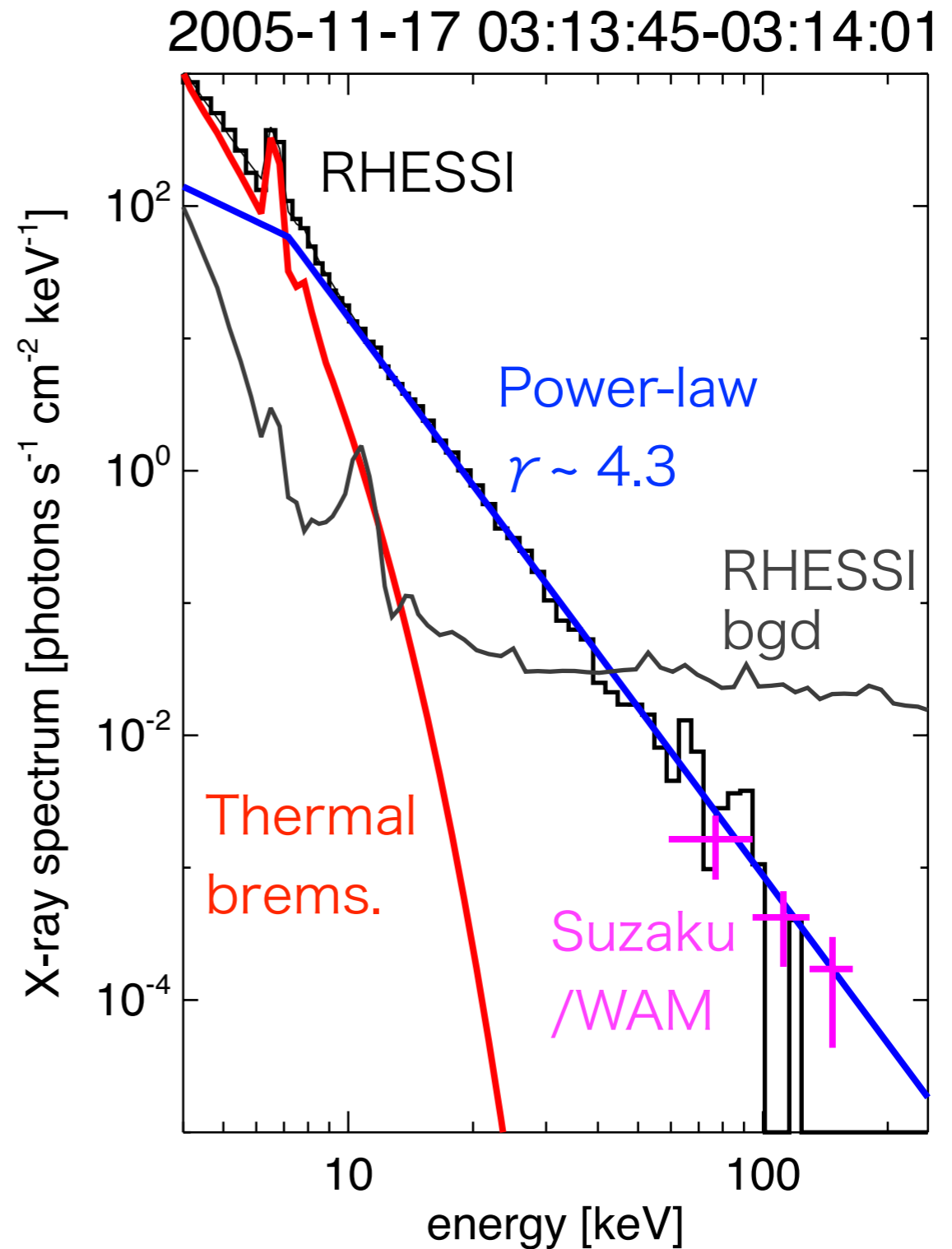
- Bクラスマイクロフレアの >50 keV 以上の放射が検出されている
- NoRH 17 GHz、RHESSI と
すざく/WAM の非熱的硬X線は
同様の時間発展
→ マイクロフレアでも
通常のフレアと同様に
粒子加速が起こっていることを
示唆



(Ishikawa et al. 2012, submitted)

WAM マイクロフレア観測の例：2005/11/17 (B5.3)

- WAM と RHESSI の同時観測でスペクトルを比較
- ~100 keV まで単一の power-law で説明できる
 - マイクロフレアにおいても、少なくとも100 keV 前後まで cut-off はなく、同一の機構で加速



(Ishikawa et al. 2012, submitted)

Fermi 衛星

- Fermi 衛星 (GLAST) アメリカのガンマ線全天サーベイ衛星
2008年6月打ち上げ
常時全天の $\sim 1/6$ をモニター観測(太陽含む)

- 観測機器

GBM (Gamma-ray Burst Monitor)

結晶シンチレータ 8 keV - 40 MeV

LAT (Large Area Telescope)

対生成望遠鏡 20 MeV - 300 GeV

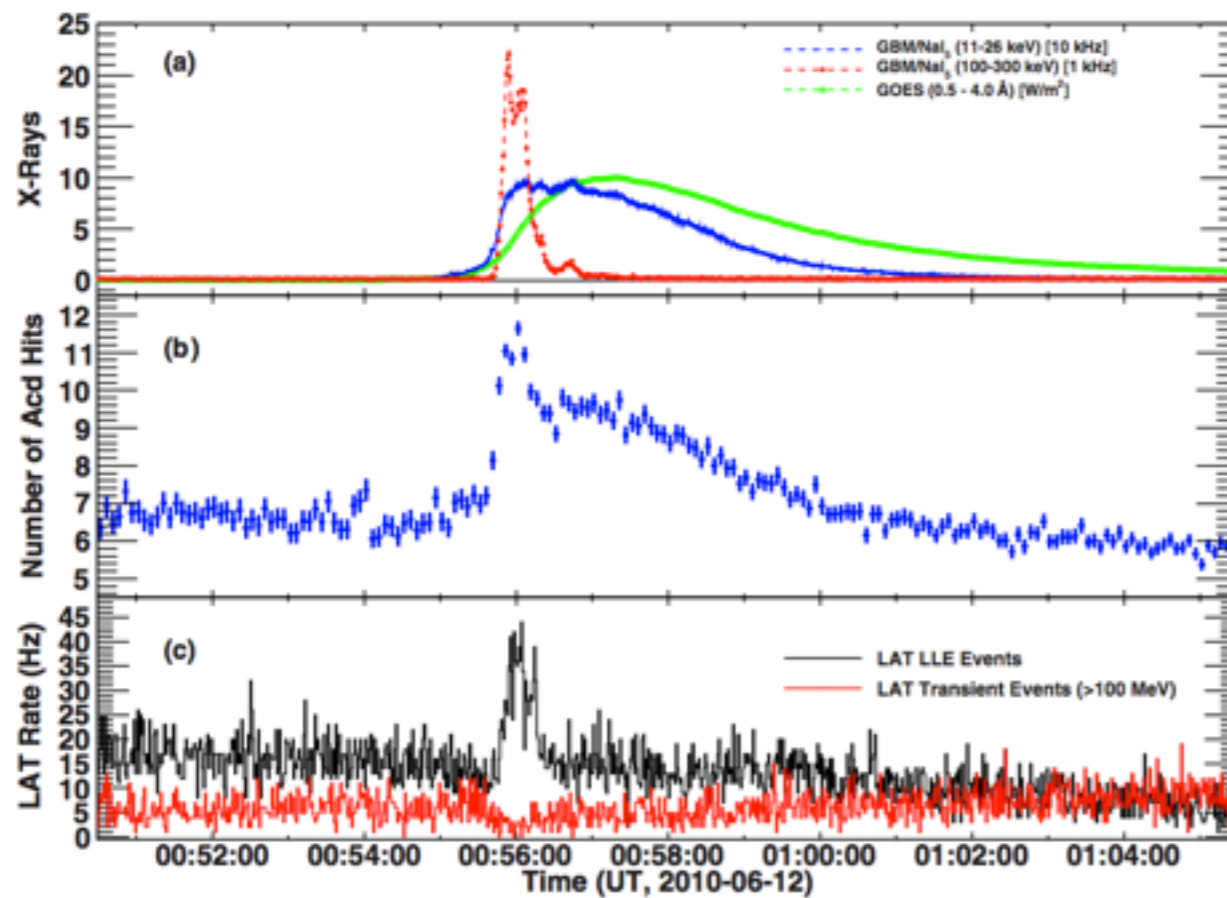
位置分解能 $< 3.5^\circ$ (@100 MeV)

$< 0.15^\circ$ (> 10 GeV)

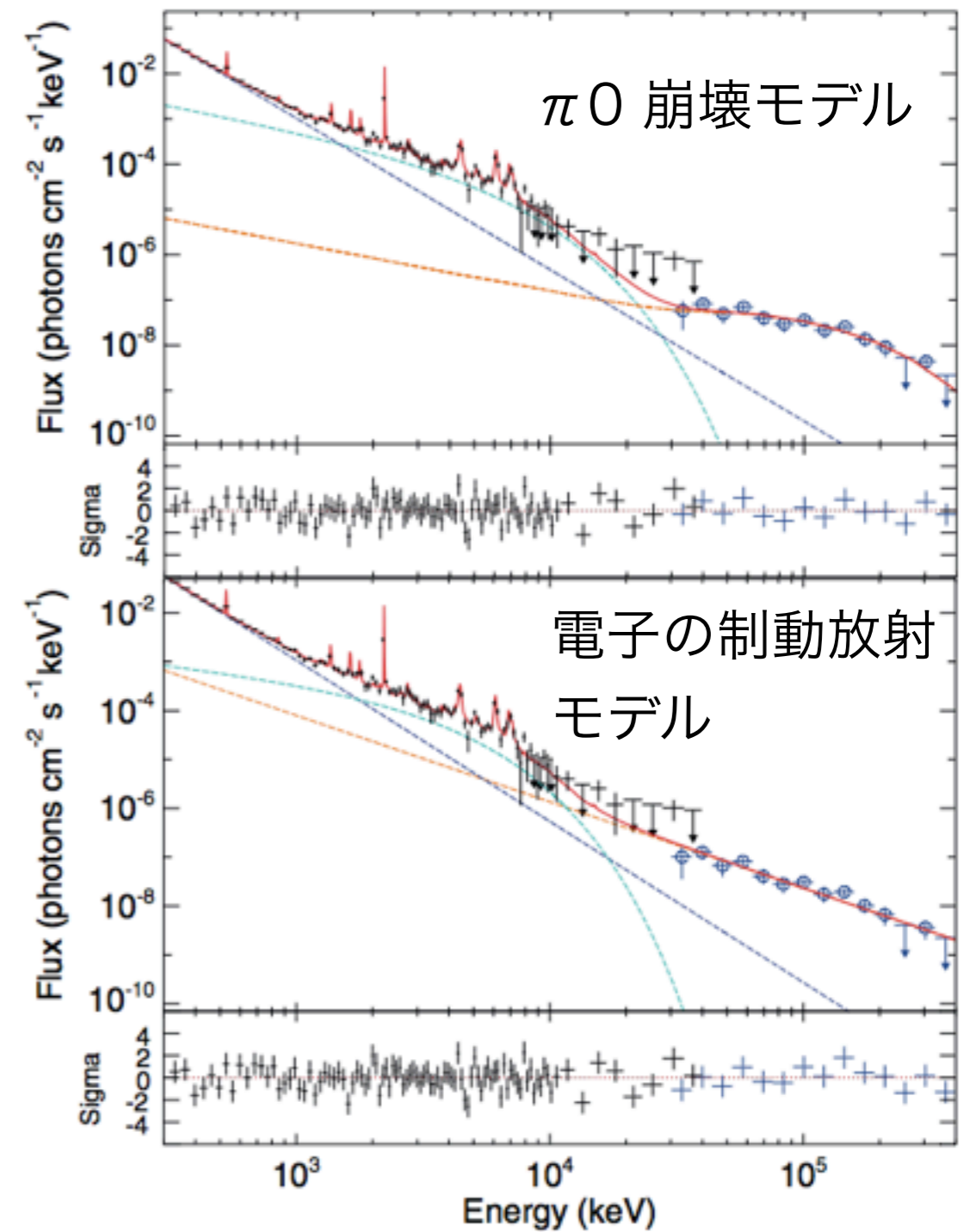
- 太陽は定常時から検出されているが、
放射は宇宙線起源、太陽はターゲットと
考えられている
- GBM で太陽フレアは多数観測されている



Fermi/LAT による >100 MeV ガンマ線放射の検出

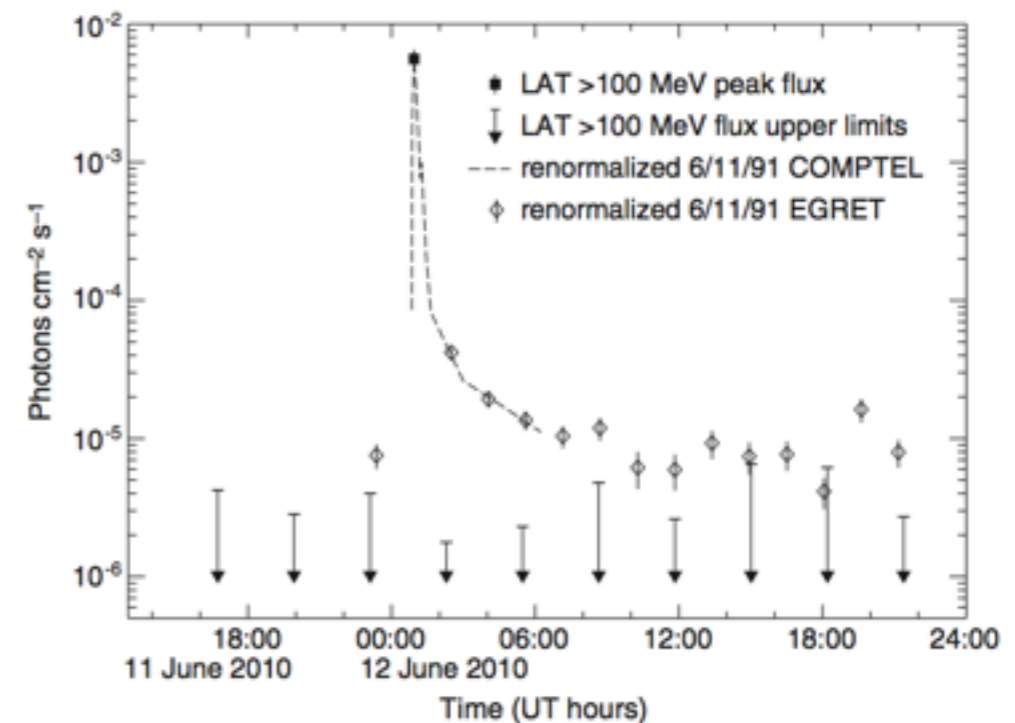
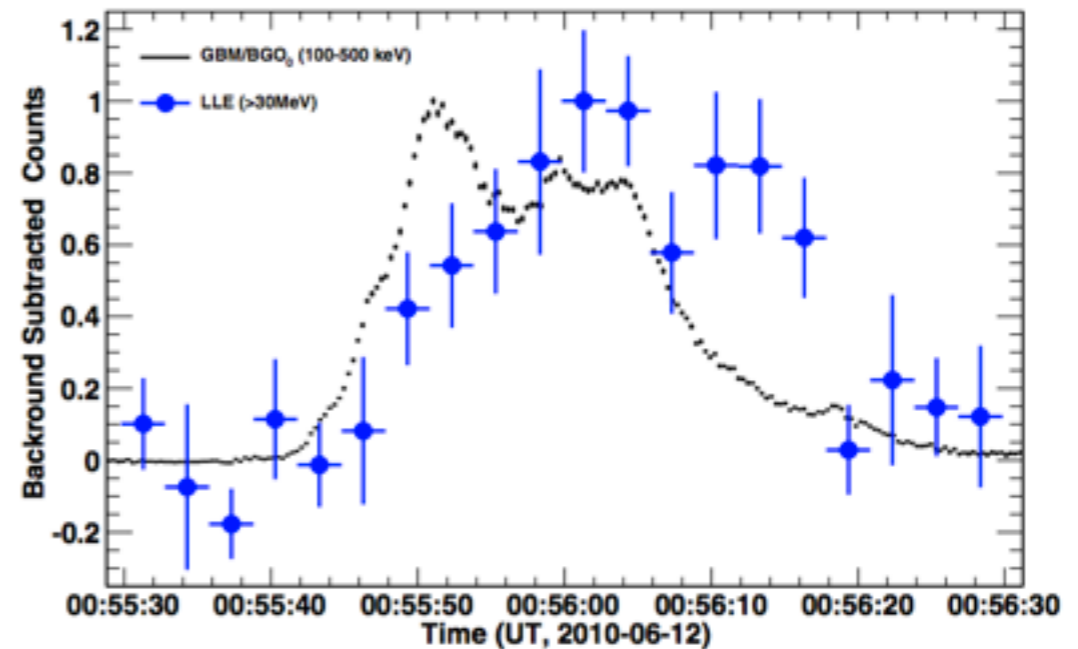


- 2010/6/12 のフレア(M2)で初めて LAT でガンマ線放射が検出
- 数百 MeV までの fitting では、pion decay と電子の制動放射(power-law) どちらでも合う



Fermi/LAT による >100 MeV ガンマ線放射の検出

- GBM 100-500 keV と LAT >30 MeV を比べると、 >30 MeV の放射の方が 6 ± 3 s 程度遅れているように見える
- 過去に EGRET でも >100 MeV のガンマ線放射が検出されたことがあるが (1991/6/11)、そのときに存在した \sim 1日に及ぶ長時間放射は今回 Fermi では優位に検出されなかった



まとめ

RHESSI の観測

- ガンマ線ライン放射(イオン加速)、非熱的電子放射、高エネルギー電子(> 100 keV)からの放射は基本的にいずれもよく似たふるまいをしている
- コロナからの高エネルギー放射では、高エネルギーの電子が長時間トラップされているようなイベントも見つかっている
- しかし MeV 電子の直接観測は困難

すざく/Fermi の観測

- 高い有効面積、広いエネルギー帯域により、光子の検出自体は有利
- Fermi/LAT では100 MeV 以上の放射が観測されているが、放射が電子起源かイオン起源かわからない等、不明な点は多い