

太陽フレアと恒星フレアにおける 高エネルギー加速粒子の硬X線観測

石川真之介

(Space Science Laboratory/
University of California, Berkeley)

太陽と恒星の硬X線観測

- 太陽フレアでは高温の熱的プラズマ(~数十 MK)とともに、非熱的、power-law 分布を持つ高エネルギーの加速粒子(>10 keV)が存在することが知られている
- 加速粒子の観測 → 加速粒子がコロナ中や彩層でエネルギーを失う際に放射する数十 keV 以上の非熱的硬X線
- X線観測は大気による吸収のため飛翔体を用いて行う必要がある(衛星、ロケット、気球)
X線の中でも特に 10 – MeV の領域は荷電粒子によるバックグラウンドが高く、観測が難しい → 感度が限られる
- 恒星フレアでは熱的成分は太陽フレアと同じスケーリング則に乗り、同種の現象であると考えられている → 非熱的加速粒子も存在するはず
しかし感度・有効面積の制限のため、観測はまだまだこれから

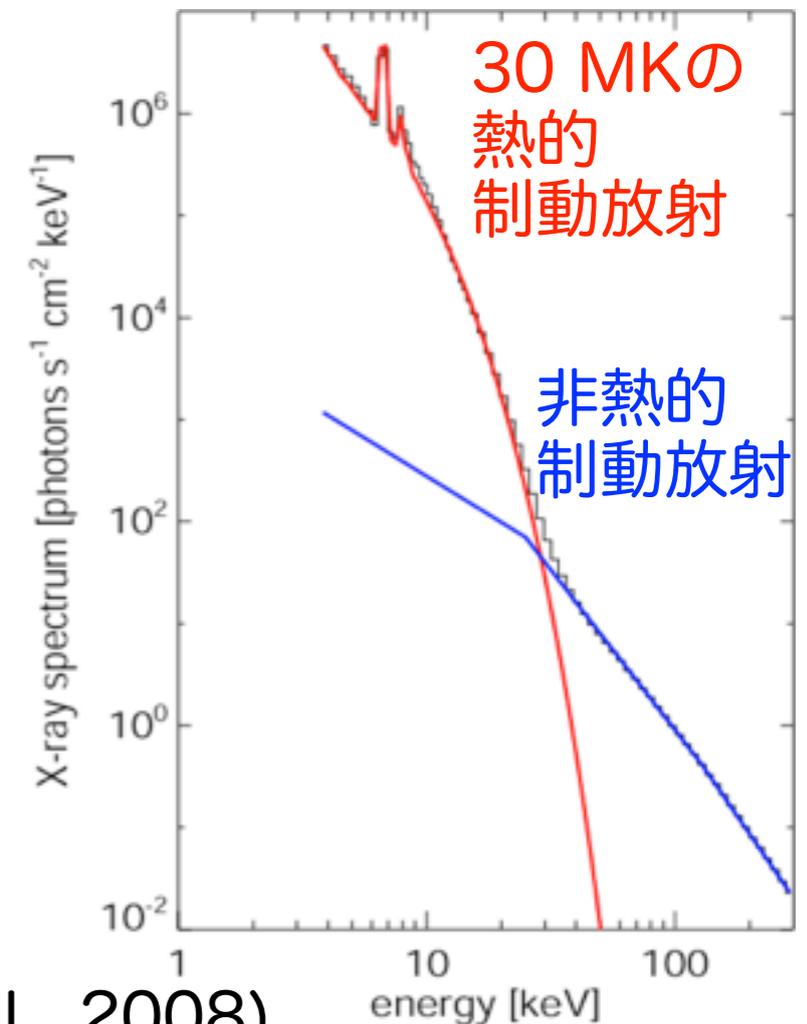
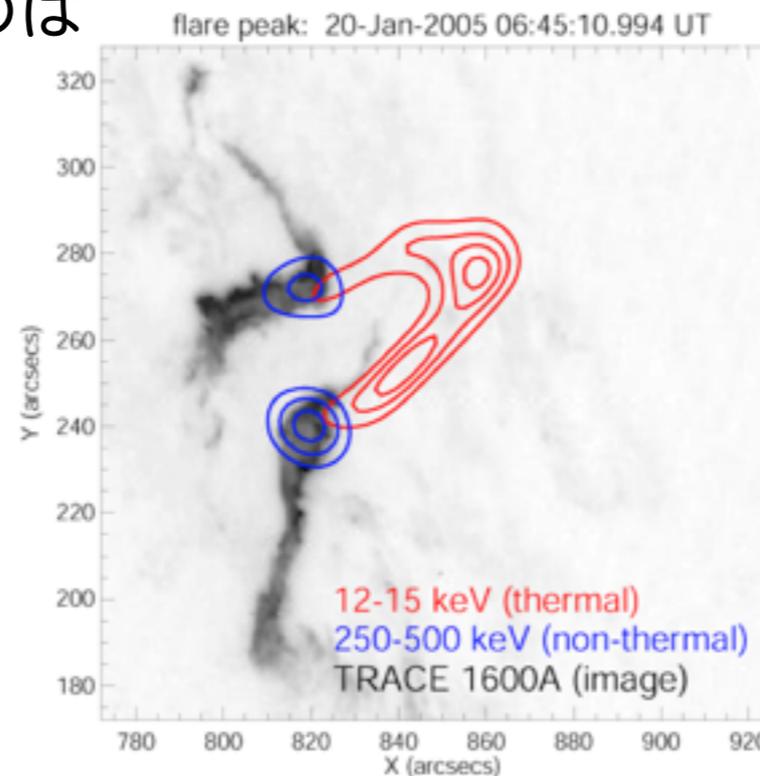
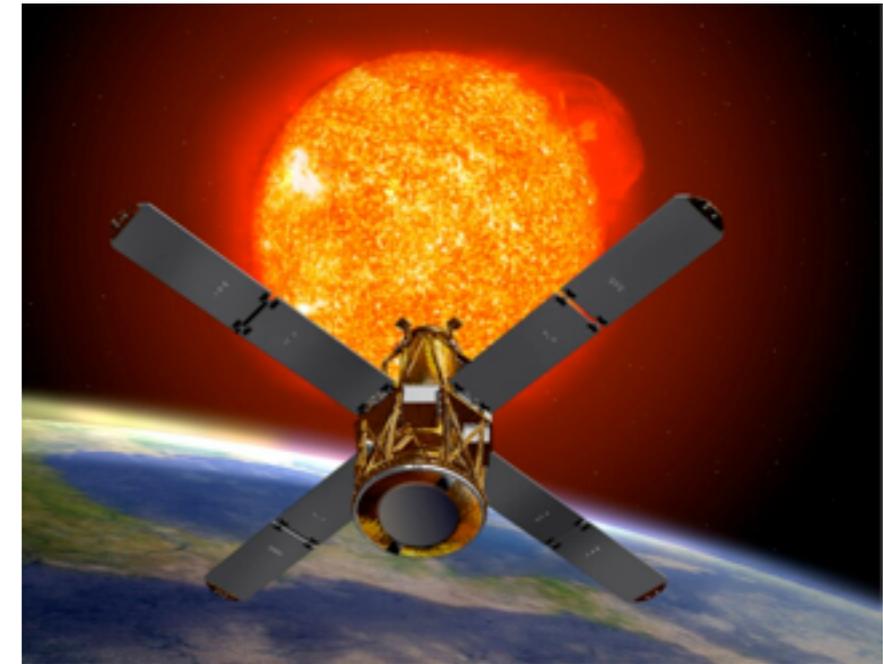
太陽観測の利点：地球から近いので多くの光子が得られる、イメージング可能

恒星観測の利点：スケールの違いから、どのような共通する物理プロセスが働いているか示唆を得られる

(太陽)

太陽の硬X線観測

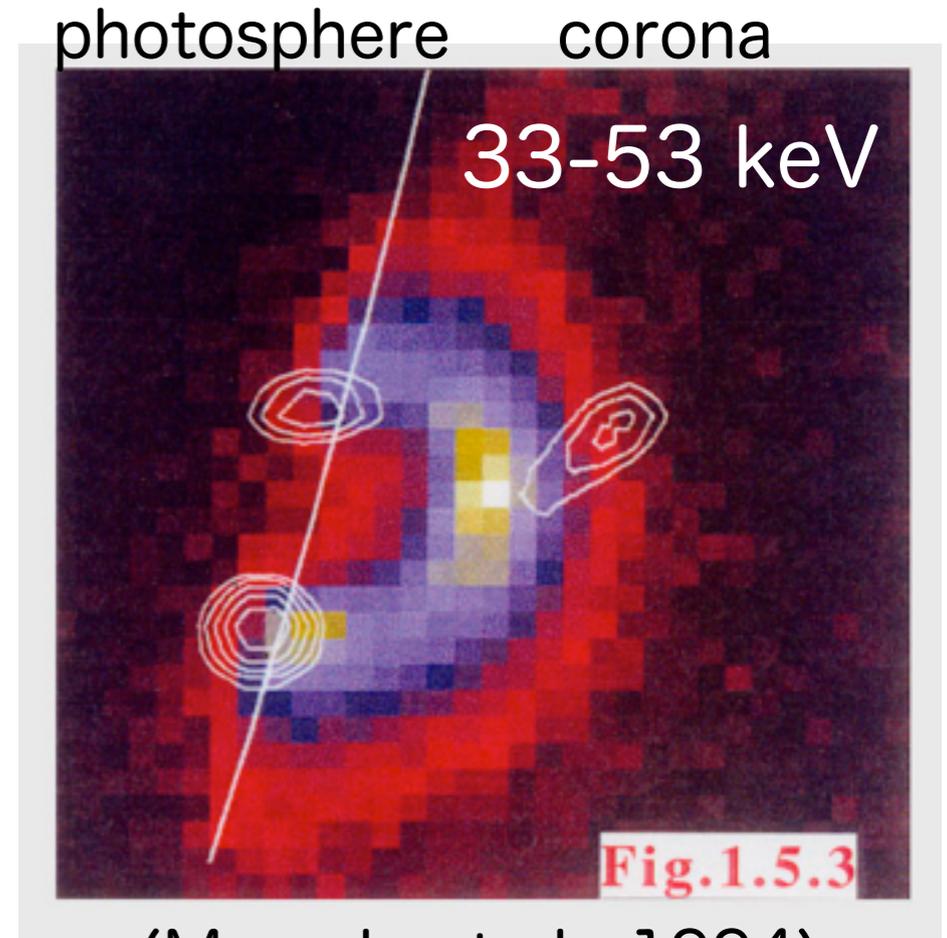
- これまで、ようこう衛星(1991-2001)/HXT や RHESSI 衛星(2002-)により 硬X線観測が行われてきた
- 磁気ループに沿った熱的プラズマと、ループの足元の加速粒子
- これまでに非常に多くのフレアが観測
巨大フレアから、エネルギースケールが $\sim 10^{-6}$ のマイクロフレアまで様々なスケールで非熱的放射が検出されている
しかし非熱的放射が観測されたのは全て活動領域
(感度による制限)
- 光子指数は巨大フレアで3-6 程度、マイクロフレアで4-10 程度まで分布



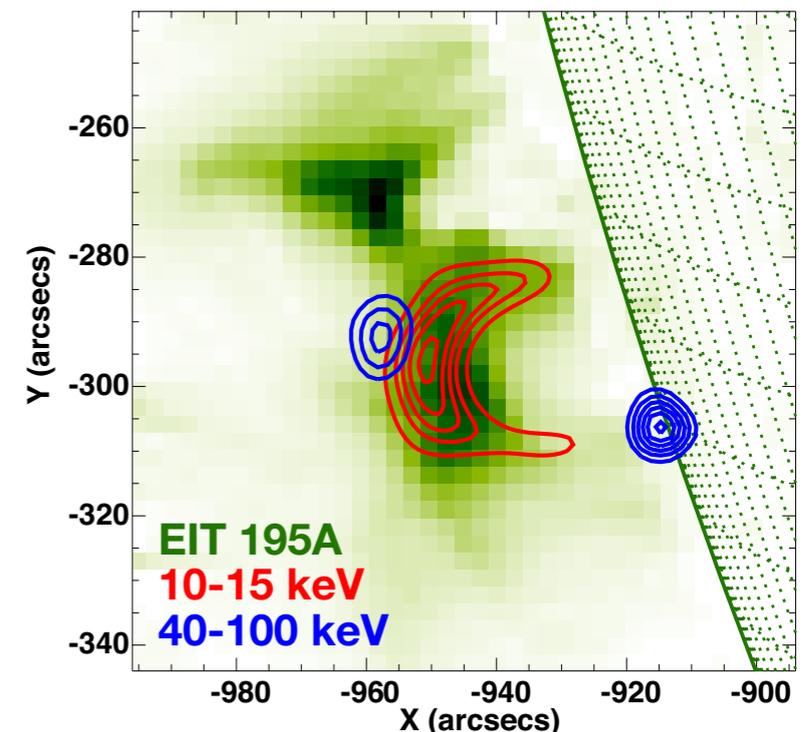
(Krucker et al., 2008)

これまでの観測(太陽)

- ループトップ硬X線ソース
磁気ループ上部のコロナ中からの放射
磁気ループよりも外側の上空にコンパクトなソース
→ フレアは磁気リコネクションの過程であり、
粒子加速がループの外側で起こっていることを示唆
- コロナ硬X線ソースは多くのイベントで
磁気ループ上空と位置が一致するが、
有意に位置がずれているものもまれに存在
- コロナソースの光子指数は $\gamma = 4-6$ (やや steep)
→ thin-target?
- コロナの密度は低いため、一般に
足元より放射が弱い
→ フーリエ再構成が必要なイメージング手法では
観測が困難、足元と同時に観測されたものは
数が限られている
今後は高ダイナミックレンジの観測が必要



(Masuda et al., 1994)



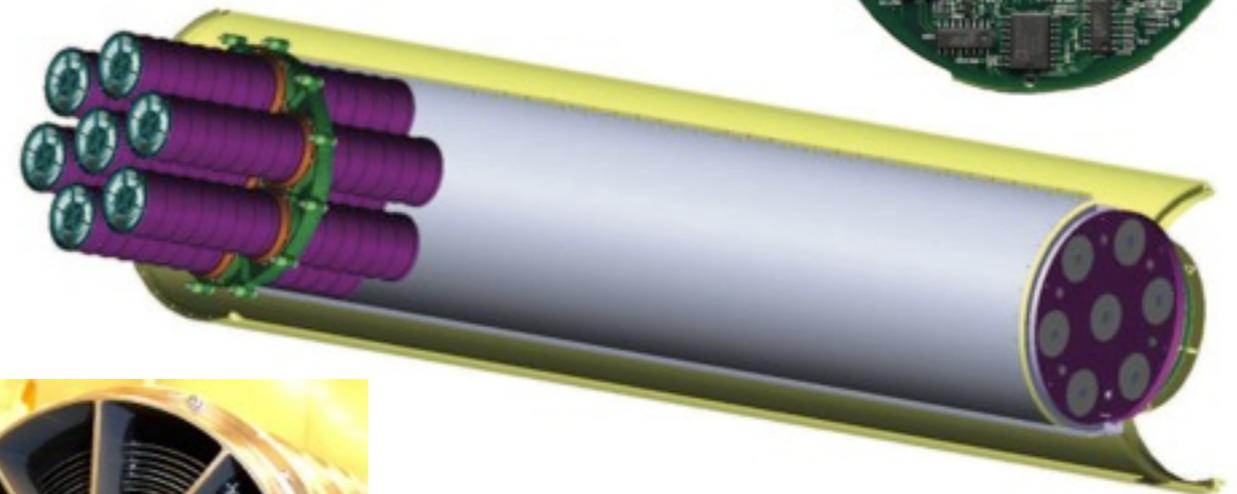
(Ishikawa et al., 2011)

今後の観測(太陽) - FOXSI

- UC Berkeley、NASA/MSFC、ISAS/JAXA の太陽観測ロケット
- 硬X線を望遠鏡により 5-15 keV を FWHM $\sim 8''$ の位置分解能で集光可能に
- 高分解能の半導体イメージング検出器と組み合わせ S/N を飛躍的に向上
- RHESSI の ~ 100 倍の感度を達成見込み
- 硬X線集光撮像による太陽観測の実証とともに 静穏領域のナノフレアからの非熱的放射の検出を目指す
- 2012年4月、2013年度以降 打ち上げ予定



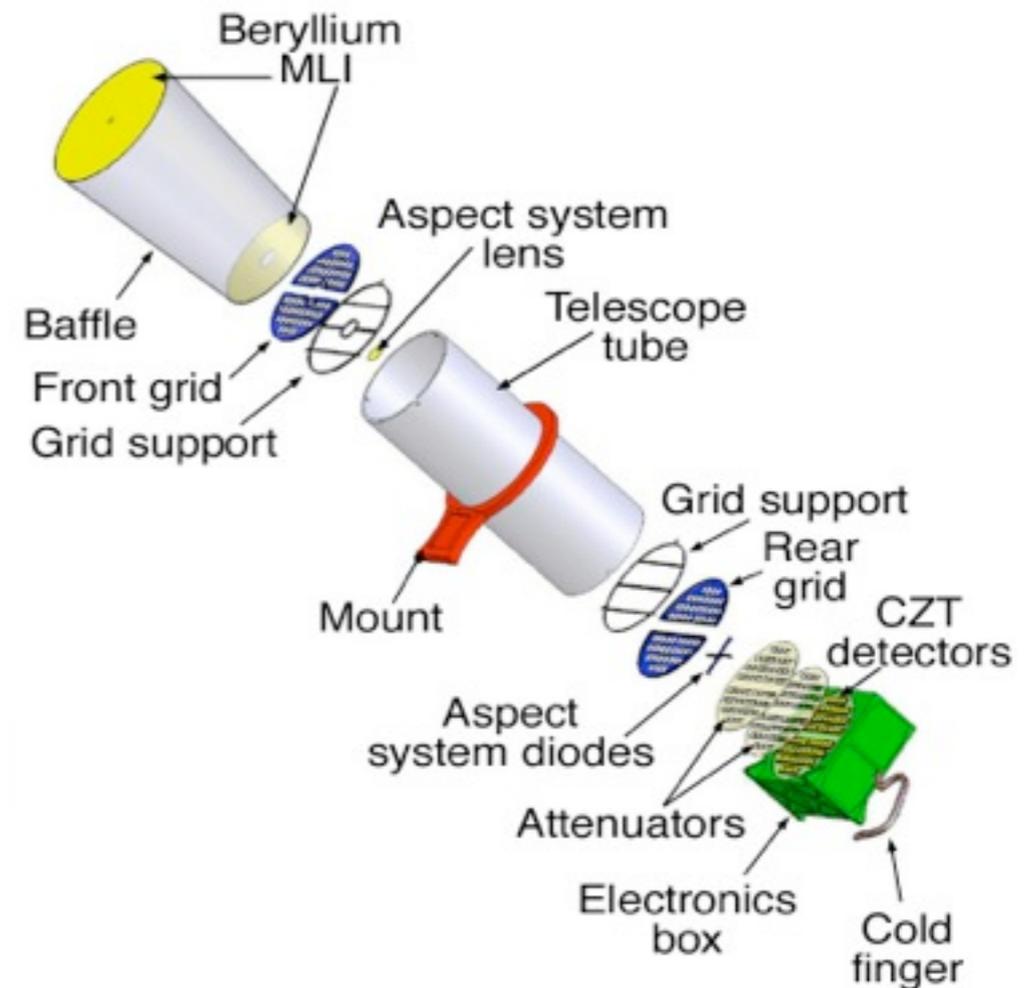
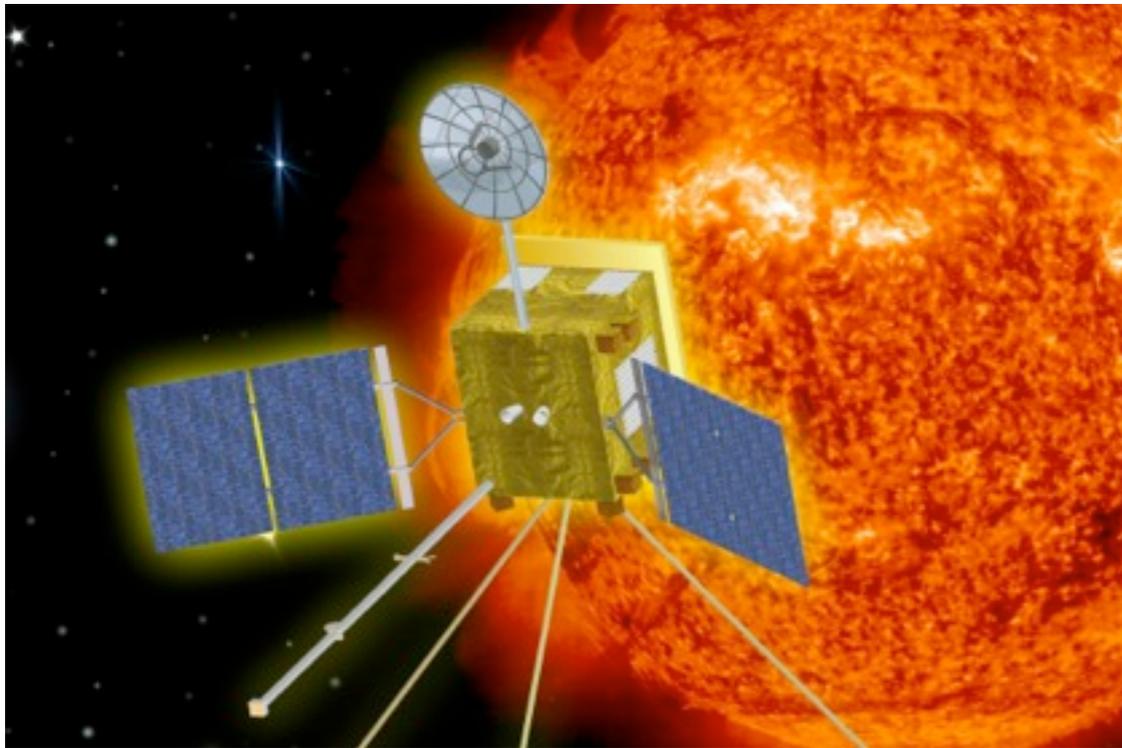
焦点面検出器



硬X線望遠鏡

今後の観測(太陽) - Solar Orbiter/STIX

- ESA の探査機
~0.3 AU まで太陽に近づき観測を行う
- 硬X線(4-150 keV)撮像分光検出器 STIX を搭載予定
- ようこう/HXT、RHESSI と同様非集光型のイメージングだが、
太陽に近づくことで高い感度、有効面積、分解能を達成見込み
- 2017年打ち上げ予定



(恒星)

恒星の硬X線観測

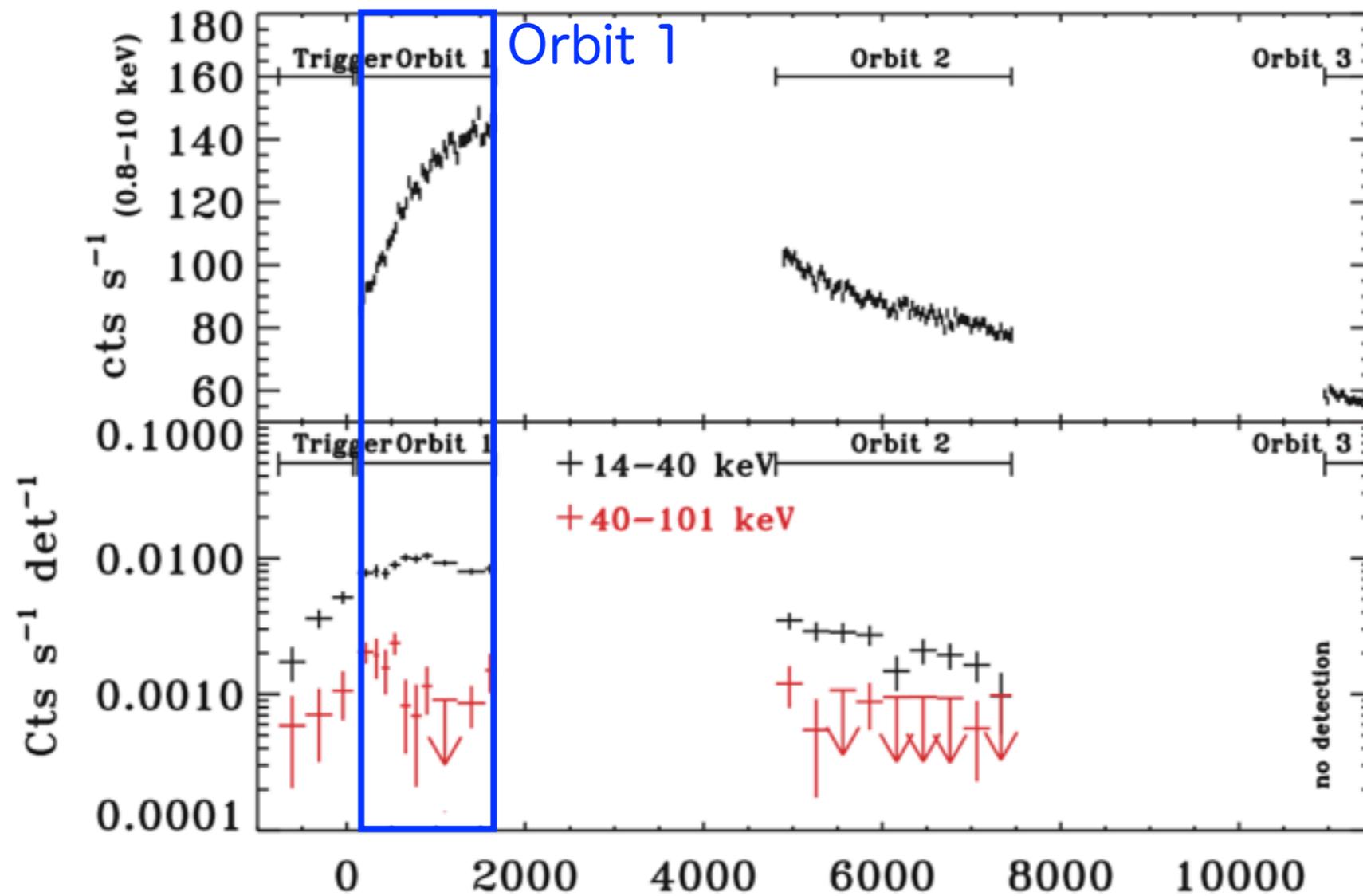
- X線で明るく、巨大な恒星フレアを起こすことが知られる
active binary (Algol 型、RS CVn 型) では太陽と同様に加速粒子が存在し、
非熱的硬X線が観測されることが期待される
- 遠いのでイメージングはできない
大きいフレアしか観測できない
- Swift (2005-)/BATによる全天サーベイ
→ トリガーされたらポインティング観測
いくつかの恒星スーパーフレアをトリガー
- BeppoSAX (1996-2003)/PDS、
すざく (2005-)/硬X線検出器による
ポインティング観測
すざくの場合、年1回観測提案を公募、採択されれば提案1つにつき
最大数日までの観測時間が与えられる
これまで数天体観測
(恒星フレアは残念ながらメインターゲットではない。)
- BeppoSAX 衛星でいくつかのフレアで $> 10 \text{ keV}$ の硬X線を観測
しかし全て熱的制動放射のみで説明できる



(※想像図)

Swift による恒星スーパーフレア観測 (II Peg)

- 2005/12/16、Swift は II Peg (K2IV が主星の連星、地球から42 pc) からのスーパーフレアをトリガー
- 太陽フレア(Xクラス)よりも $\sim 10^6$ 倍大きいX線フラックス



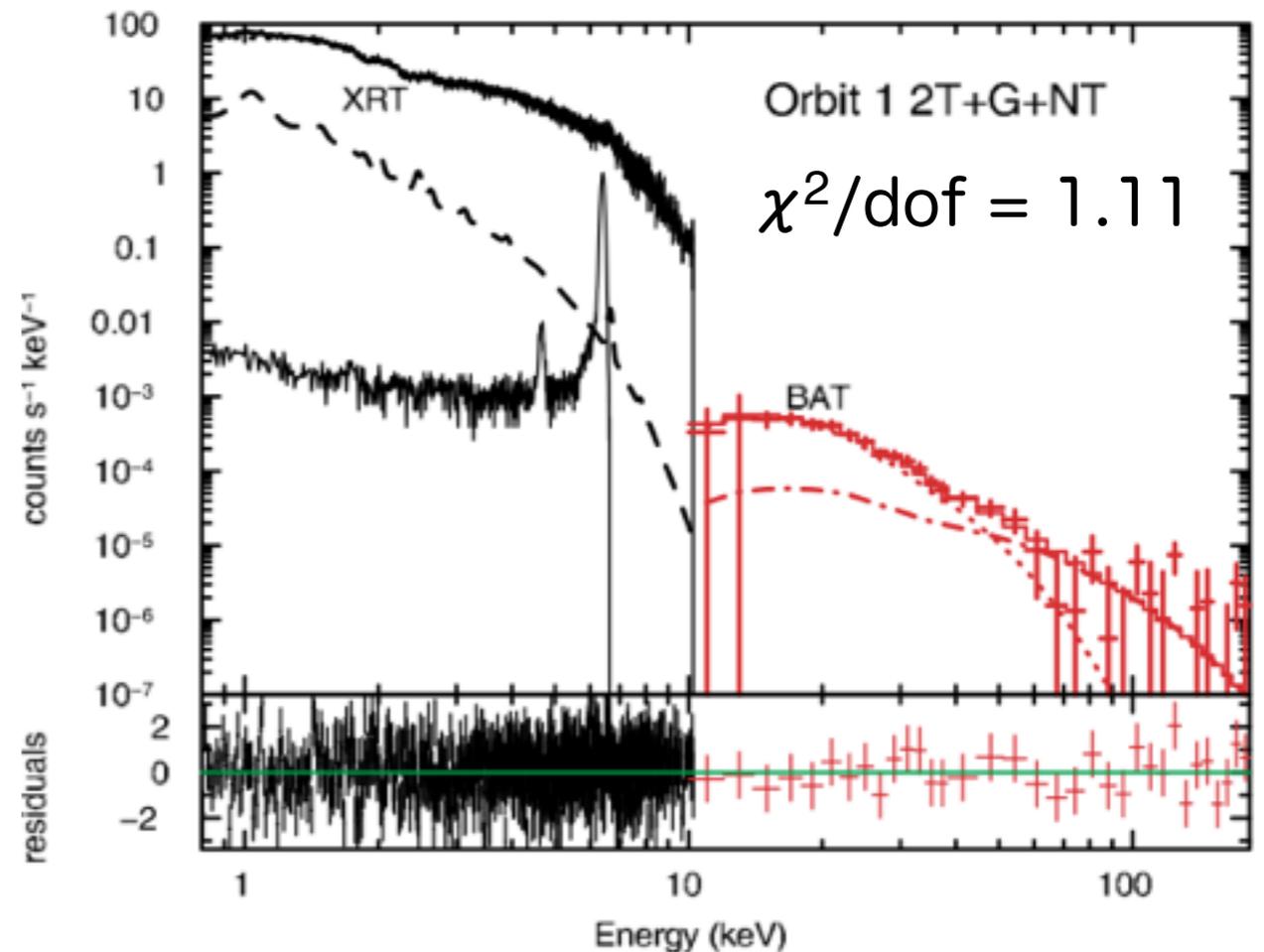
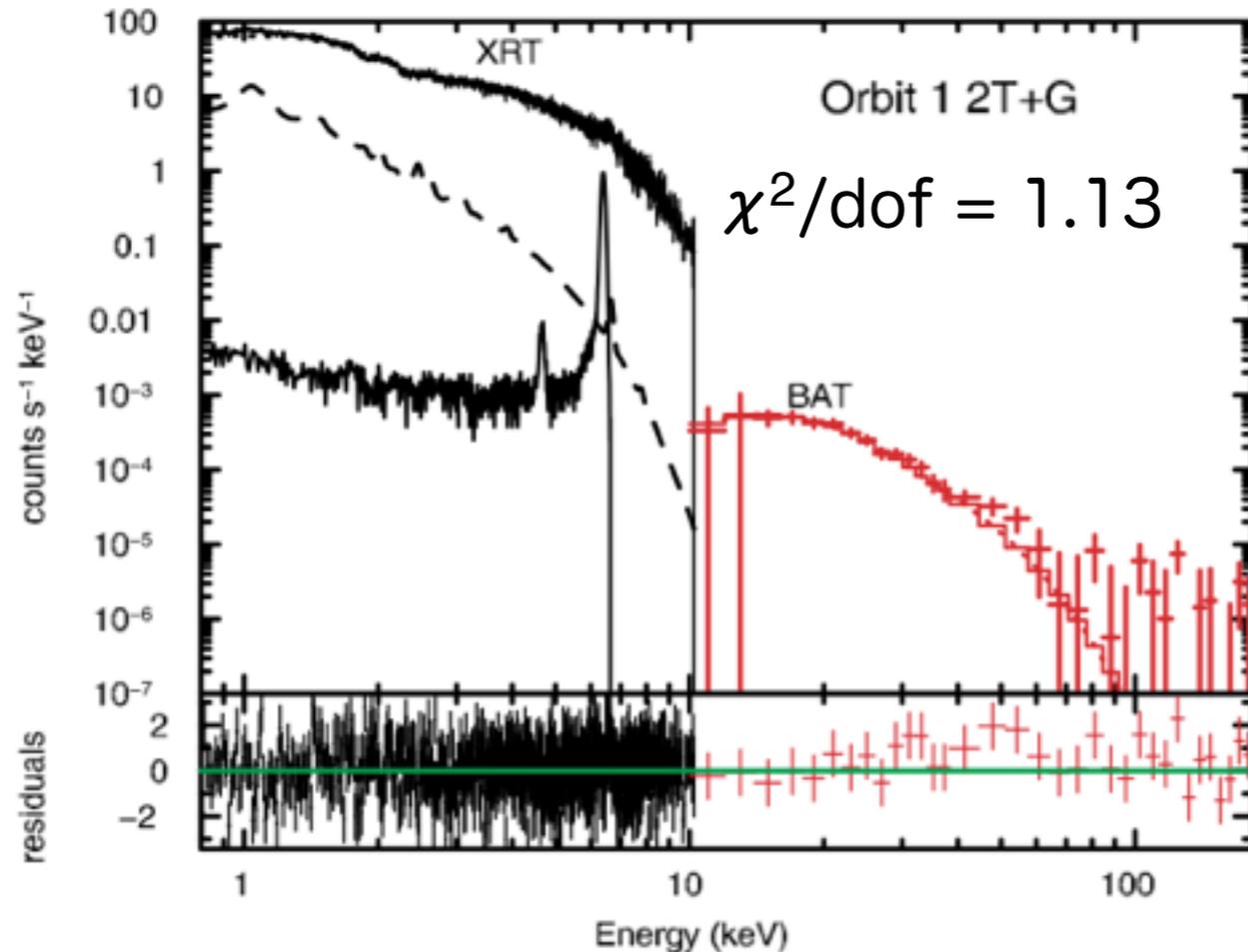
(Osten et al., 2007)

Swift による恒星スーパーフレア観測 (II Peg)

Orbit 1 のスペクトル

熱的制動放射×2

熱的制動放射×2 + 非熱的放射

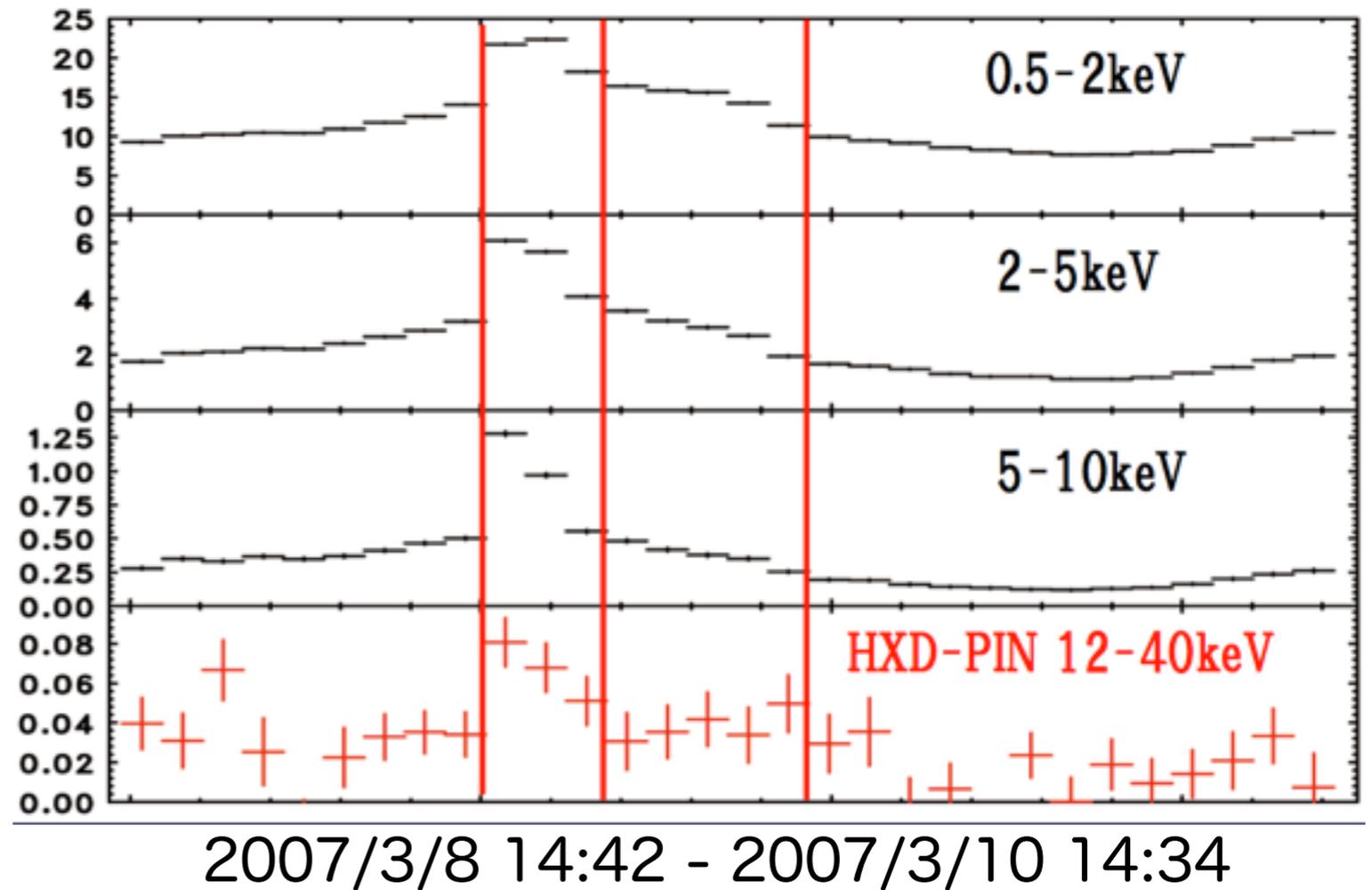


(Osten et al., 2007)

- ~150 MK の熱的プラズマ
- ~40 keV 以上に非熱的成分を検出した(とされる) 光子指数 ~3
- スペクトルから推定した非熱的放射のパラメータと熱的放射の関係は、太陽とよく似ている

すざくによる恒星フレアの観測 (Algol)

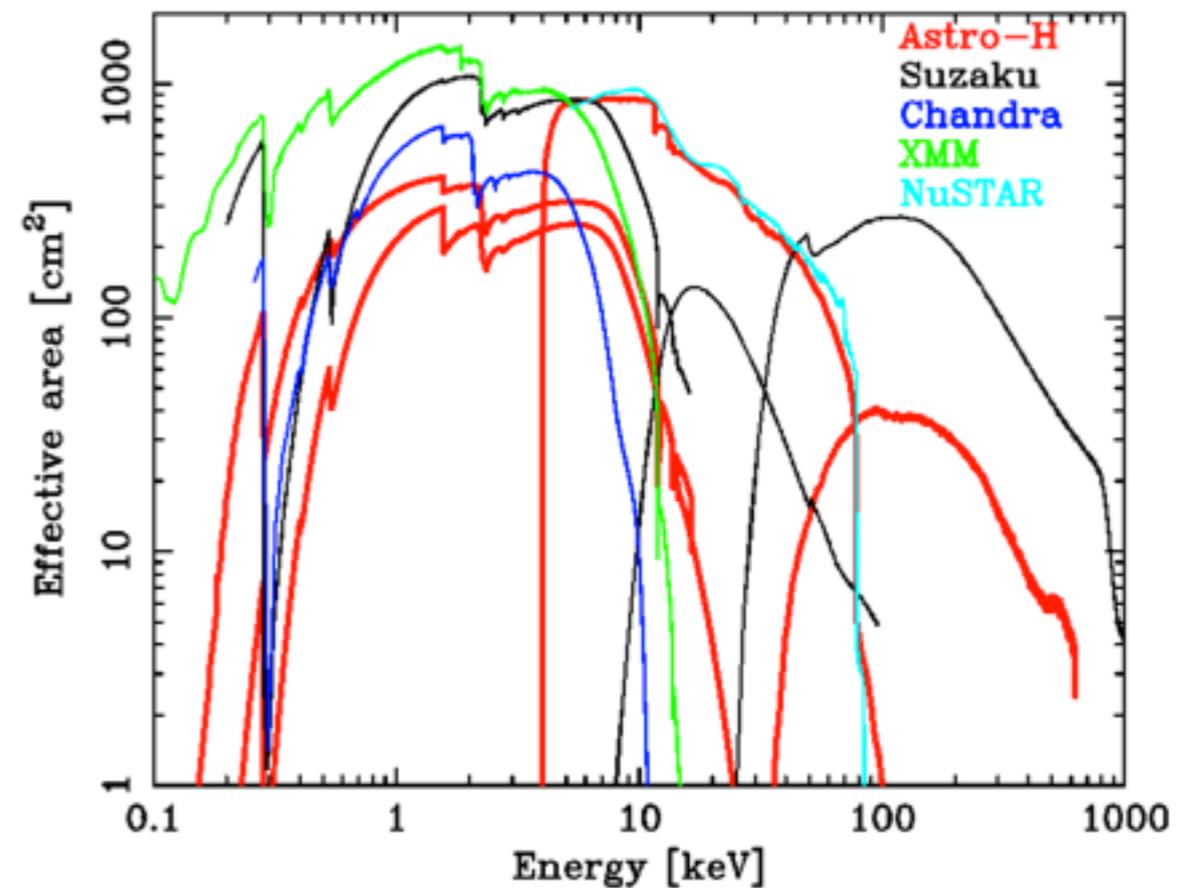
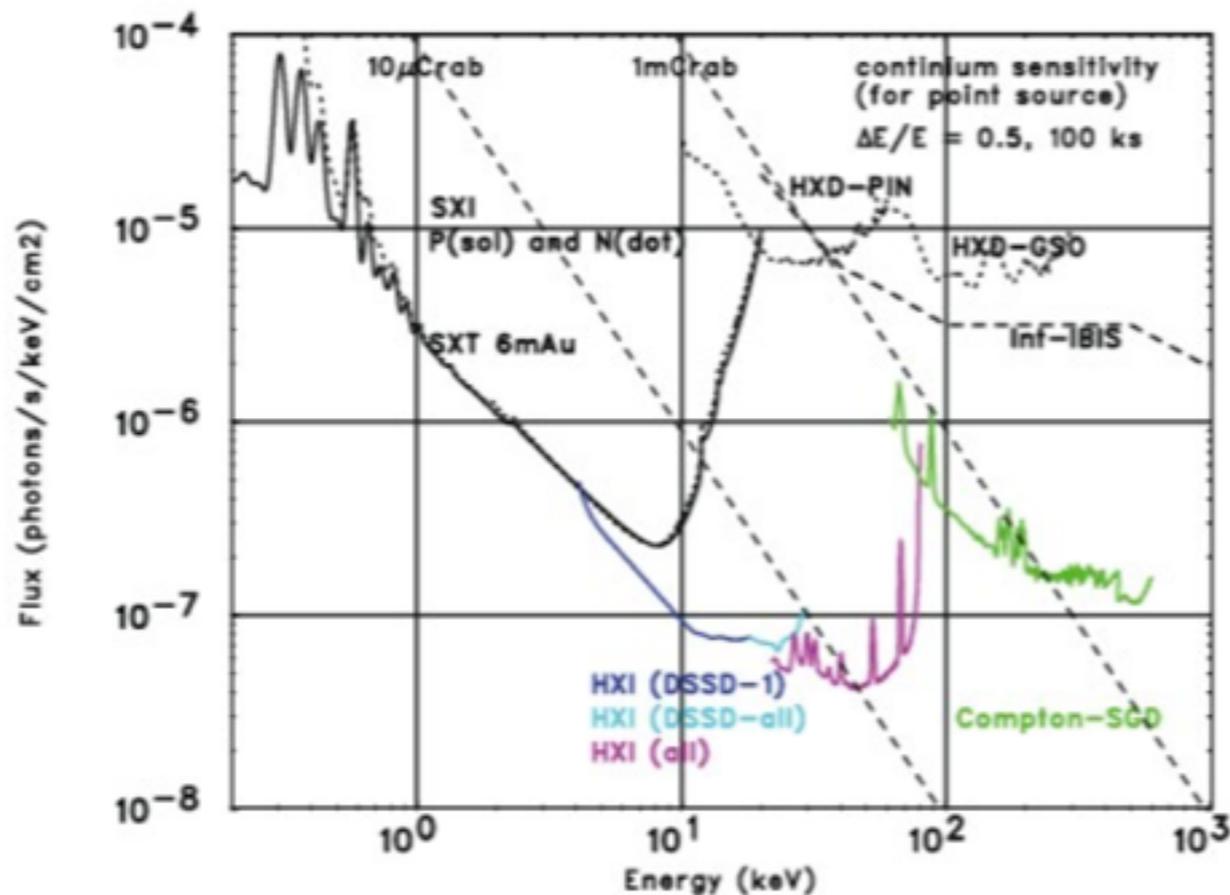
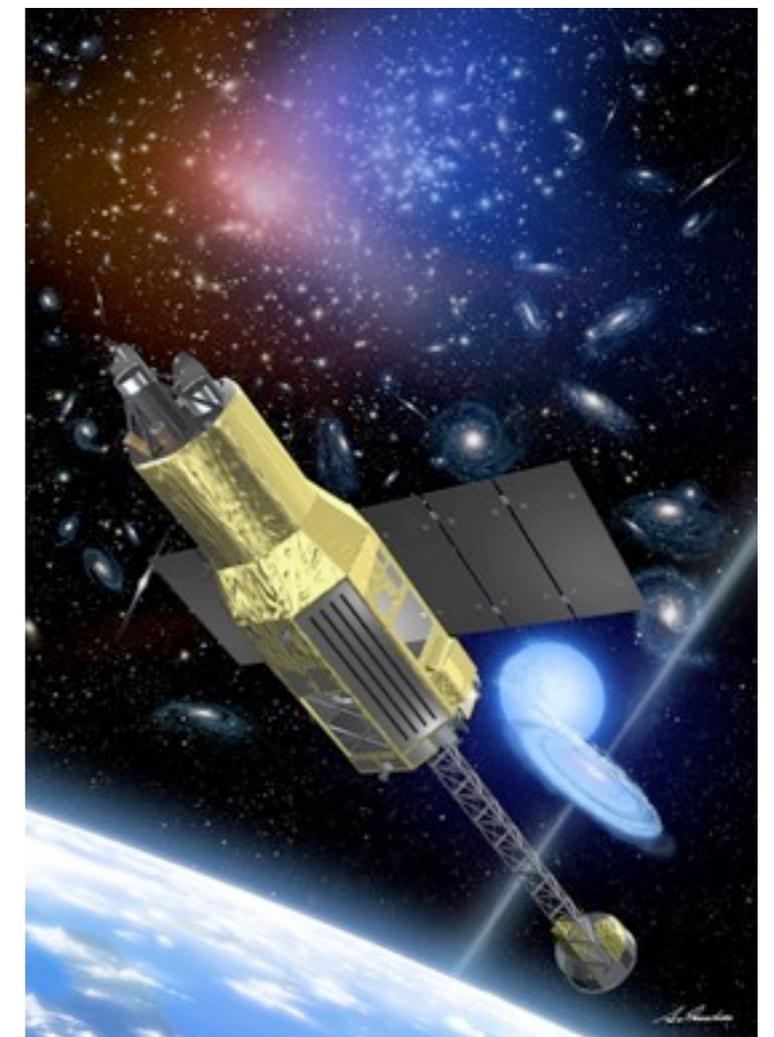
- B8V + K2IV の連星
地球から28.5 pc
- すざくにより2日間観測
- X線フラックスが静穏時の
2-3倍程度のフレアを検出
- 残念ながら~47 MK の
熱的放射のみで
スペクトルは説明でき、
非熱的放射は検出されず



- 恒星フレアからの硬X線の検出を目指した観測提案が採択され、観測が行われた。しかし残念ながらフレアは発生せず。。
- 翌年も観測提案を行ったが不採択。今後提案すれば採択される可能性あり？
フレアがいつ起きるか予言するのは太陽以上に難しいので、
確実に非熱的成分が検出可能と言えない難点がある

今後の観測(恒星)

- NuStar 衛星(2012年打上げ予定、6-79 keV)、
ASTRO-H 衛星(2014年打上げ予定)
搭載の硬X線イメージャー(5-80 keV)による、
硬X線集光撮像観測が実現
→ 感度を2桁向上、有効面積は数倍
- ASTRO-H は4つの搭載検出器により、
広いエネルギー帯域 (0.3 - 600 keV) の観測を行う
- 恒星フレアの非熱的成分の検出を期待！



まとめ

太陽フレア

- イメージング観測可能、多数観測可能
- ループトップソースや静穏領域の観測のため、感度・ダイナミックレンジを改善させた観測が必要

恒星フレア

- 点源、太陽と違うスケール
- Swift/BAT により II Peg からの非熱的放射が検出されたとされるが、今後の観測により確認し、イベント数も増やしたい

硬X線集光撮像観測という新しい技術による今後の高感度観測に期待