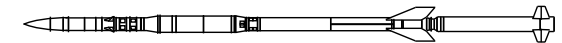
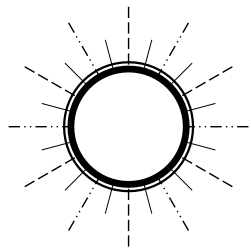




磁気リコネクションに伴う
粒子加速過程を明らかにするミッション
– Physics of Energetic and
Non-thermal plasmas in the X- (magnetic
reconnection) region (PhoENiX) – の紹介

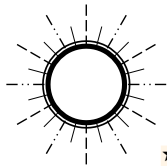


成影 典之 (国立天文台)、
ほか 磁気リコネクション・粒子加速 (PhoENiX) WGメンバー



PhoENiX WGメンバー (60名)

2017年9月11日 現在



太陽 (19)

- ★ 成影 典之 (国立天文台)
- 坂尾 太郎 (ISAS/JAXA)
- 松崎 恵一 (ISAS/JAXA)
- 石川 真之介 (ISAS/JAXA)
- 川手 朋子 (ISAS/JAXA)
- 末松 芳法 (国立天文台)
- 柴田 一成 (京都大学)
- 下条 圭美 (国立天文台)
- 増田 智 (名古屋大学)
- 松本 琢磨 (名古屋大学)
- 高棹 真介 (名古屋大学)
- 飯島 陽久 (名古屋大学)
- 柴山 拓也 (名古屋大学)
- 袁島 敬 (海洋研究開発機構)
- Lindsay Glesener (米国・ミネソタ大学)
- Sâm Krucker (米国・カリフォルニア大学バークレー校、スイス・北西スイス応用科学大学)
- Steven Christe (米国・NASAゴダード)
- Amir Caspi (米国・Southwest Research Institute)
- Iain Hannah (英国・University of Glasgow)



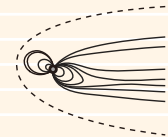
高エネルギー天体 (24)

- 深沢 泰司 (広島大学)
- 水野 恒史 (広島大学)
- 高橋 弘充 (広島大学)
- 大野 雅功 (広島大学)
- 北口 貴雄 (理化学研究所)
- 田島 宏康 (名古屋大学)
- 山岡 和貴 (名古屋大学)
- 斉藤 新也 (立教大学)
- 馬場 彩 (東京大学)
- 中澤 知洋 (東京大学)
- 高橋 忠幸 (ISAS/JAXA)
- 渡辺 伸 (ISAS/JAXA)
- 武田 伸一郎 (沖縄科学技術大学院大学)
- 萩野 浩一 (東京理科大学)
- 内山 泰伸 (立教大学)
- 榎戸 輝揚 (京都大学)
- Herman Lee (京都大学)
- 井上 芳幸 (ISAS/JAXA)
- 田中 康之 (広島大学)
- 坪井 陽子 (中央大学)
- 菅原 泰晴 (ISAS/JAXA)
- 山崎 了 (青山学院大学)
- 大平 豊 (青山学院大学)
- 政井 邦昭 (首都大学東京)



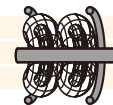
地球・惑星磁気圏プラズマ (11)

- 高島 健 (ISAS/JAXA)
- 齋藤 義文 (ISAS/JAXA)
- 篠原 育 (ISAS/JAXA)
- 岡 光夫 (米国・カリフォルニア大学バークレー校)
- 三好 由純 (名古屋大学)
- 今田 晋亮 (名古屋大学)
- 銭谷 誠司 (京都大学)
- 星野 真弘 (東京大学)
- 笠原 慧 (東京大学)
- 木村 智樹 (理化学研究所)
- 寺澤 敏夫 (理化学研究所)



実験室プラズマ (3)

- 小野 靖 (東京大学)
- 田辺 博士 (東京大学)
- 山田 雅章 (米国・プリンストン大学・プラズマ研究所)



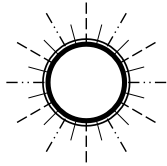
工学 (3)

- 山内 和人 (大阪大学)
- 松山 智至 (大阪大学)
- 小畑 俊裕 (東京大学)

ワーキンググループの設立を、
宇宙科学研究所・理学委員会に申請し、
2017年9月4日の理学委員会で承認された。

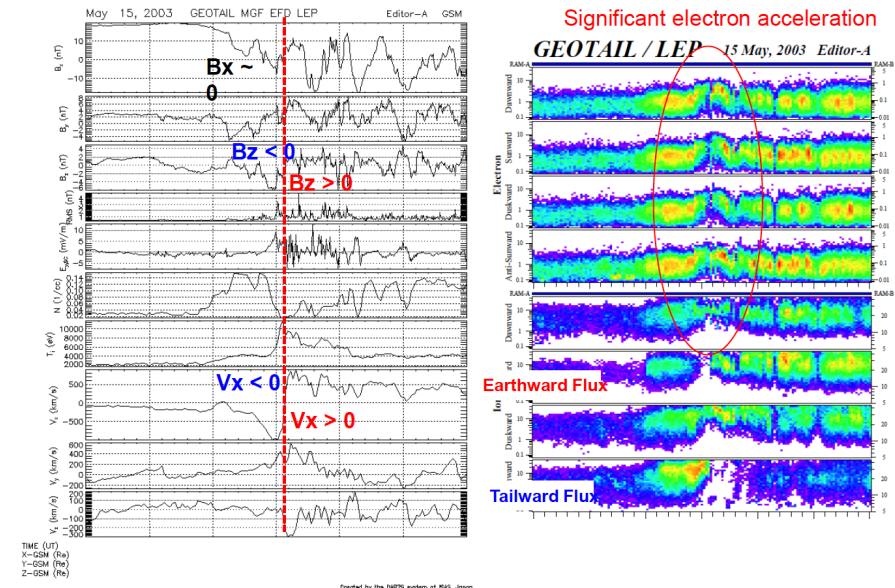
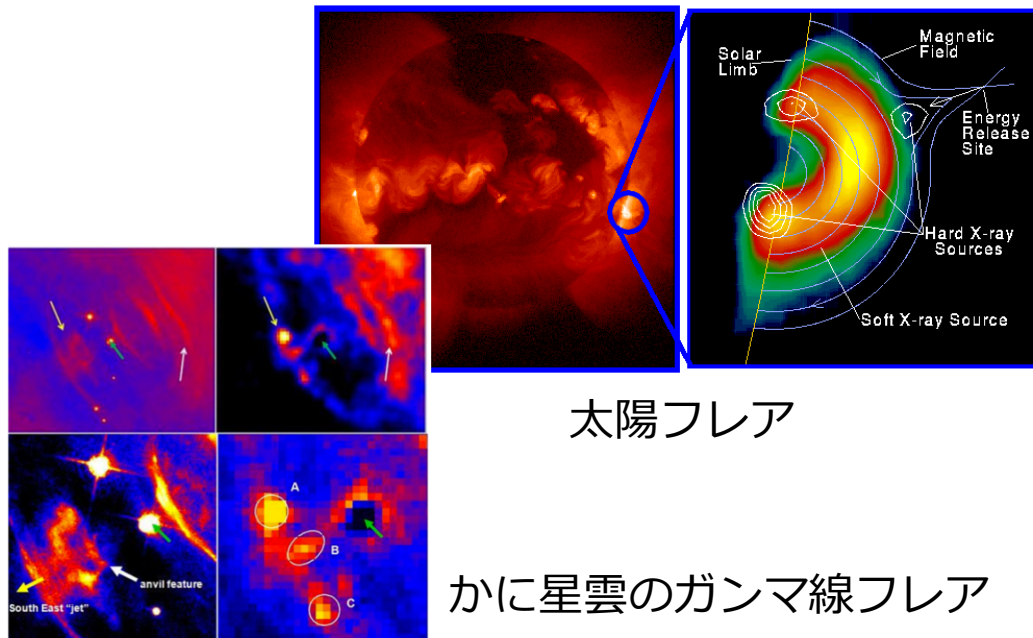
Science goal

宇宙プラズマ（地球・惑星磁気圏、太陽、高エネルギー天体を含むプラズマ）において普遍的に起きている「磁気リコネクションに伴う粒子加速過程を明らかにすること」



粒子加速

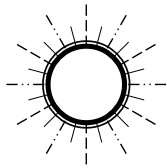
高エネルギー粒子は宇宙の至る場所で発見されているが、「高エネルギー粒子の起源は何か？」という問題は、宇宙科学における今も未解決の難問。磁気リコネクションは、加速環境（電場、衝撃波、乱流など）を生み出しやすく、地球磁気圏、木星磁気圏、太陽フレアにおいてリコネクションに伴う加速電子が実際に観測されている。しかし、その加速過程は明らかになっておらず、今後の研究の進展が待たれている。



地球磁気圏 X-line での加速電子

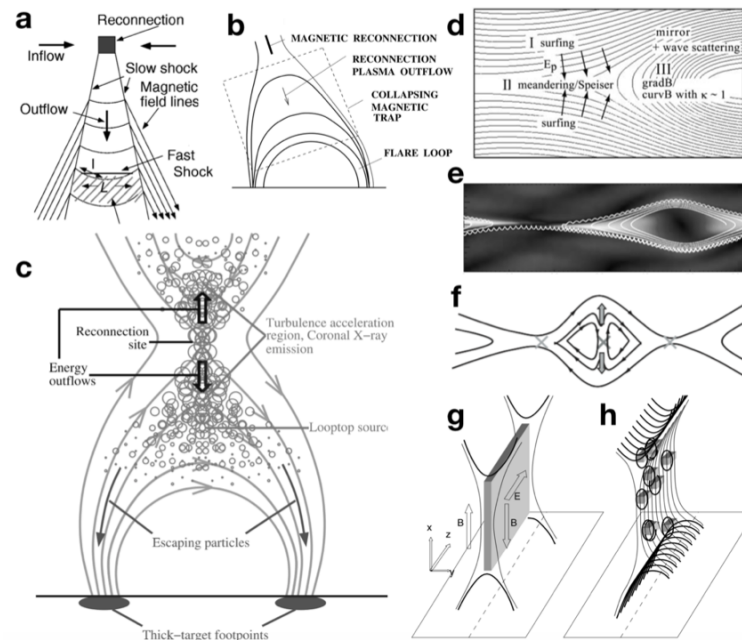
Science goal

磁気リコネクションに伴う粒子加速過程を明らかにすること



Science Objectives

- 磁気リコネクション中の加速場所を絞り込む
- 磁気リコネクション中の加速粒子の時間発展の調査
- 磁気リコネクション中の加速粒子の特徴の把握

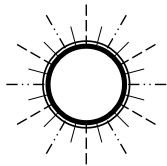


磁気リコネクションに伴う 粒子加速の様々なモデル

- (a) Tsuneta and Naito, 1998;
 (b) Karlický and Kosugi, 2004;
 (c) Liu et al., 2008;
 (d) Hoshino et al. 2001; (e) Drake et al., 2006,
 (f) Oka et al., 2010; (g,h) Aschwanden 2002.



観測ターゲットと観測手法



- 本ミッションの科学目的達成のためには、磁気リコネクション過程とそこで発生する粒子加速を同時に捉え、理解する必要がある。
- そのための手法として、以下が必要と考える。

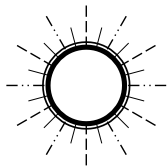
【観測対象に求められる条件】

- リコネクション・粒子加速が、空間的にある程度の広がりを持って観測できること
- 現象のタイムスケールが適当で、現象の始まりから終わりまでが観測できること
- 熱的・非熱的成分が同時に観測できること
- ミッション期間中に、適切な数の観測例が集まること

【観測手法に求められる条件】 上記観測対象に対し、

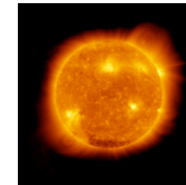
- リコネクション、粒子加速領域全体を見渡せる広い視野で観測できること
- 十分な視野に対し、十分な空間分解能を持つこと
- 現象のタイムスケールに対し、十分な時間分解能を持つこと
- 熱的・非熱的成分が同時に観測できるエネルギー帯域に対し、十分なエネルギー分解能を持つこと
- 偏光測定も行えること

観測ターゲットと観測手法



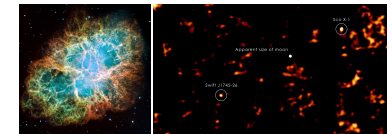
• これを達成するために、

- 主たる観測ターゲットとして太陽フレアを設定し、
- 観測手法として、



- ① 軟X線～硬X線の photon counting (非分散型) による 2次元撮像分光観測 と、
- ② 硬X線～軟 γ 線域の 高時間・高エネルギー分解・偏光スペクトル観測 (空間分解能は無し; 偏光情報は 60 keV 以上で)

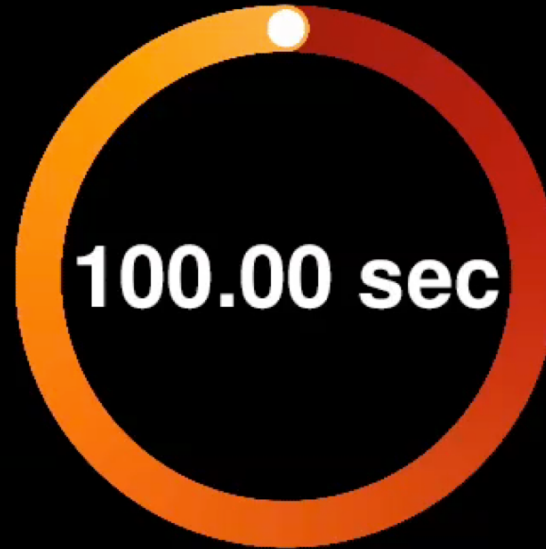
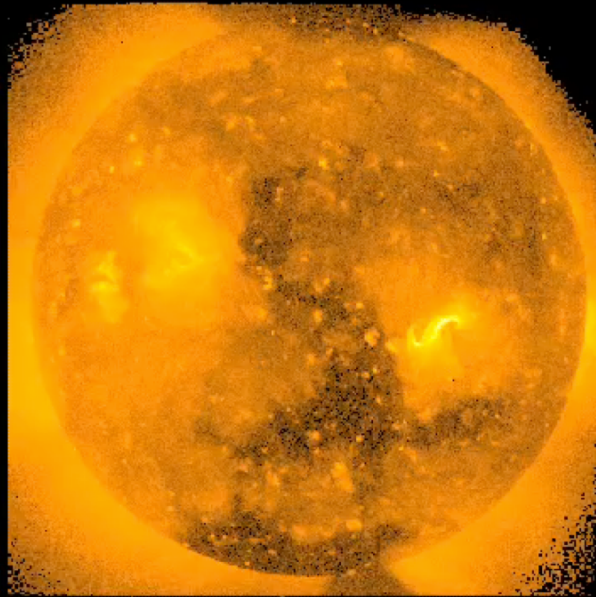
を実施する。(黄道面の天体も観測ターゲット; かに星雲、Sco X1)



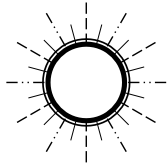
①の軟X線については、本ミッションに向けてFOXSIロケット実験で実証実験を行う(2018年夏)。①の硬X線については、FOXSIロケット実験で実証実験を2度実施済みで、行い2018年夏には3度目のフライトを行う。②については、「ひとみ」衛星での実績がある。

しかし、いずれも観測対象は太陽フレアではなく、①②の組み合わせで行う太陽フレア観測、すなわち、本ミッションが目指すサイエンスが行えるのは、本ミッションが世界初である。

exposure time

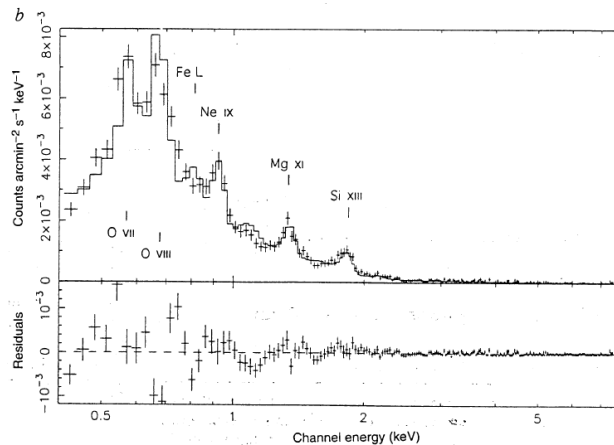
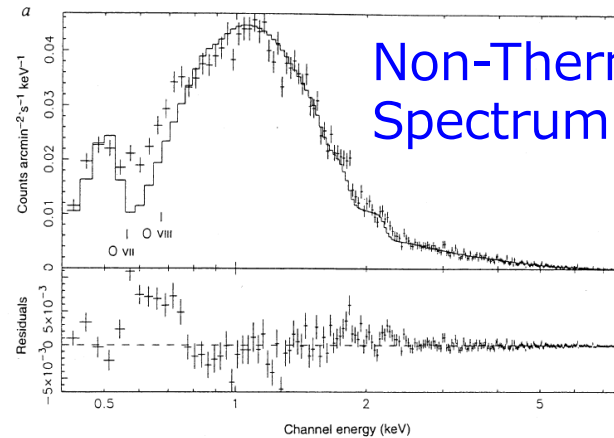
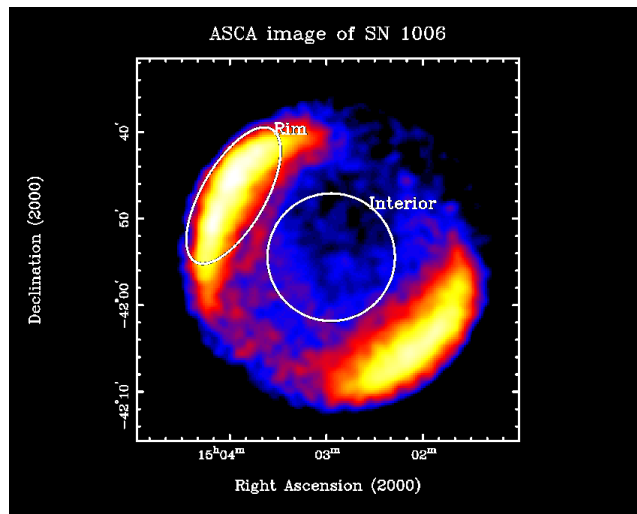


科学目的達成のための方法（撮像分光観測）



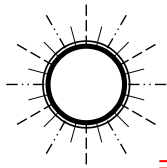
1. 加速電子の位置を同定し、その場所で起きている現象を明らかにすることで、加速のメカニズムに迫る。：天体プラズマで行われている手法と同様の手法

宇宙プラズマにおける
衝撃波による電子加速
の例；超新星残骸



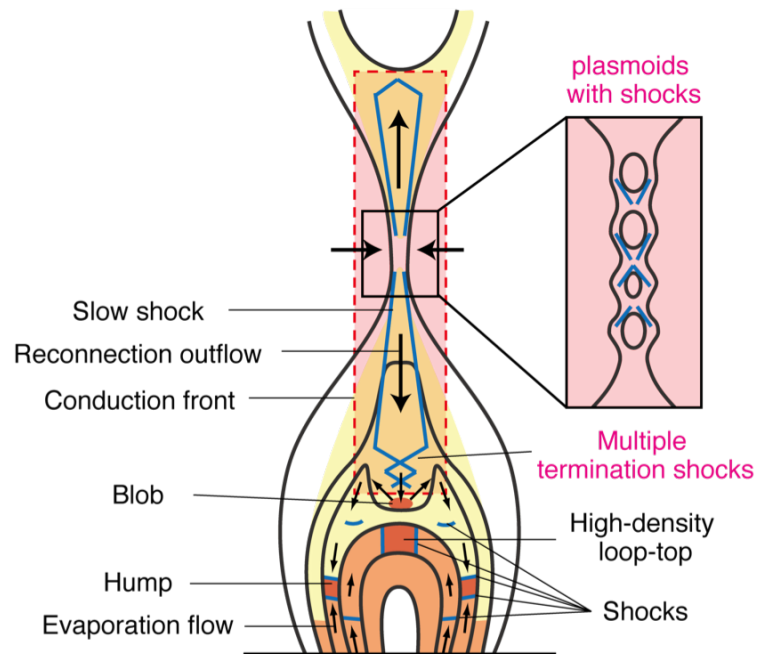
(Koyama et al. 1995)

科学目的達成のための方法（撮像分光観測）

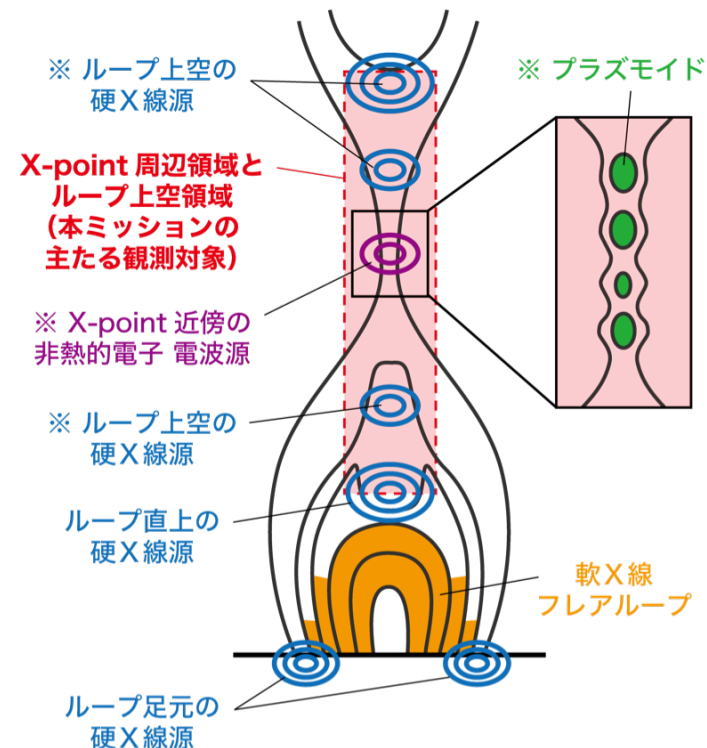


- 非熱的電子とリコネクション領域の現象（衝撃波、プラズモイドなど）の関係を比較することで、どのような現象と粒子（電子）加速が関係しているかを調査し、加速のメカニズムを明らかにする、もしくは、制限をつける。
1. リコネクション領域における非熱的電子の位置、時間発展を押える（霧マップ；次頁）。
 2. リコネクション領域における現象（衝撃波（その存在は、まだ観測的に殆ど確認されていない）、プラズモイドなど）を定量的に押える（Rankine-Hugoniot の関係など）（温度・密度マップ；次頁）。

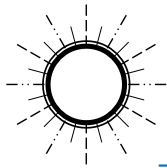
(a) Expected reconnection features



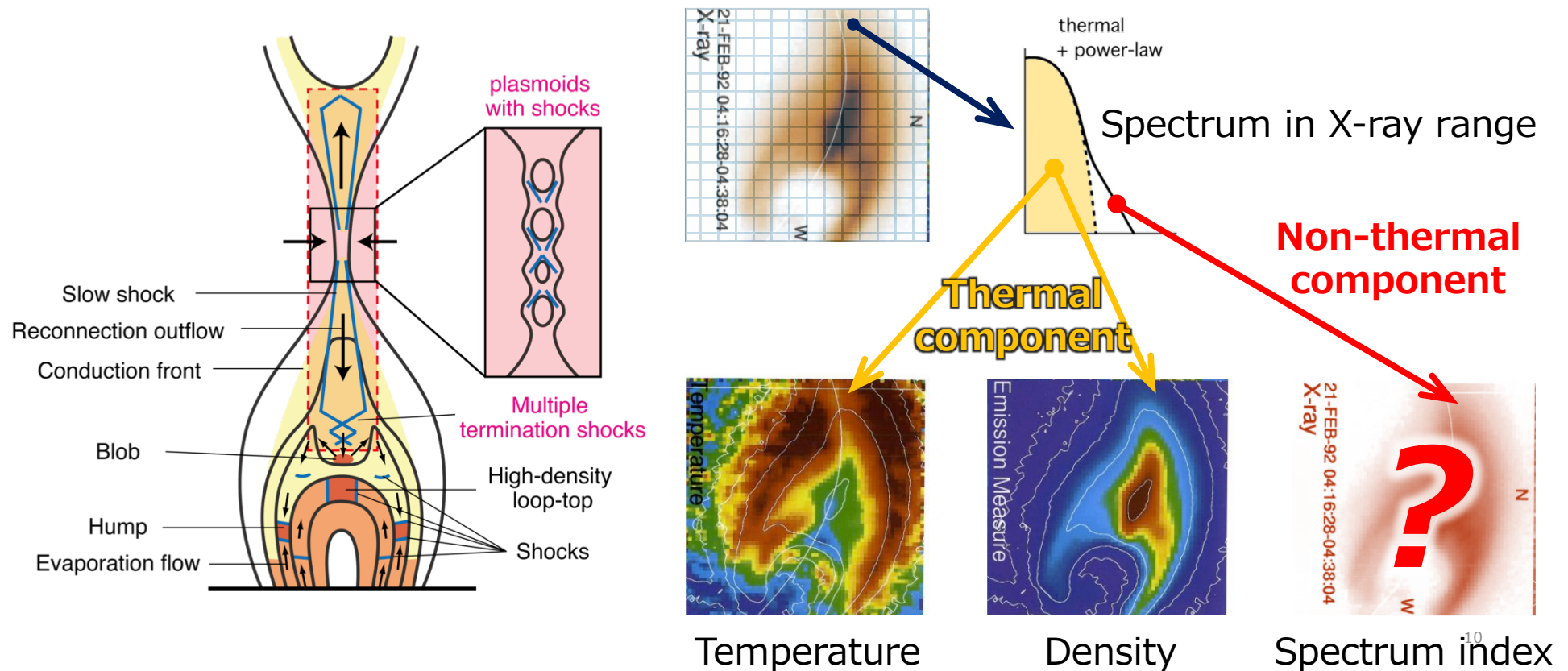
(b) Observation



科学目的達成のための方法（撮像分光観測）



- 太陽フレアに対し Photon counting（非分散型）による2次元撮像分光観測を行うことで、軟X線～硬X線のフォトン・スペクトルを、空間・時間情報とともに得る。
- 軟X線～硬X線域は熱的成分と非熱的成分を含んでおり、**熱的成分から温度・密度のマップ**が得られる。一方、**非熱的成分からは、加速の情報を含む非熱的成分の霧マップ**が得られる。
- 温度・密度マップからは衝撃波などの存在を調査し、霧マップからは加速場所を絞り込む。

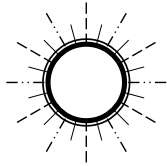


Temperature

Density

Spectrum index¹⁰

Approach



Assumption in this estimate

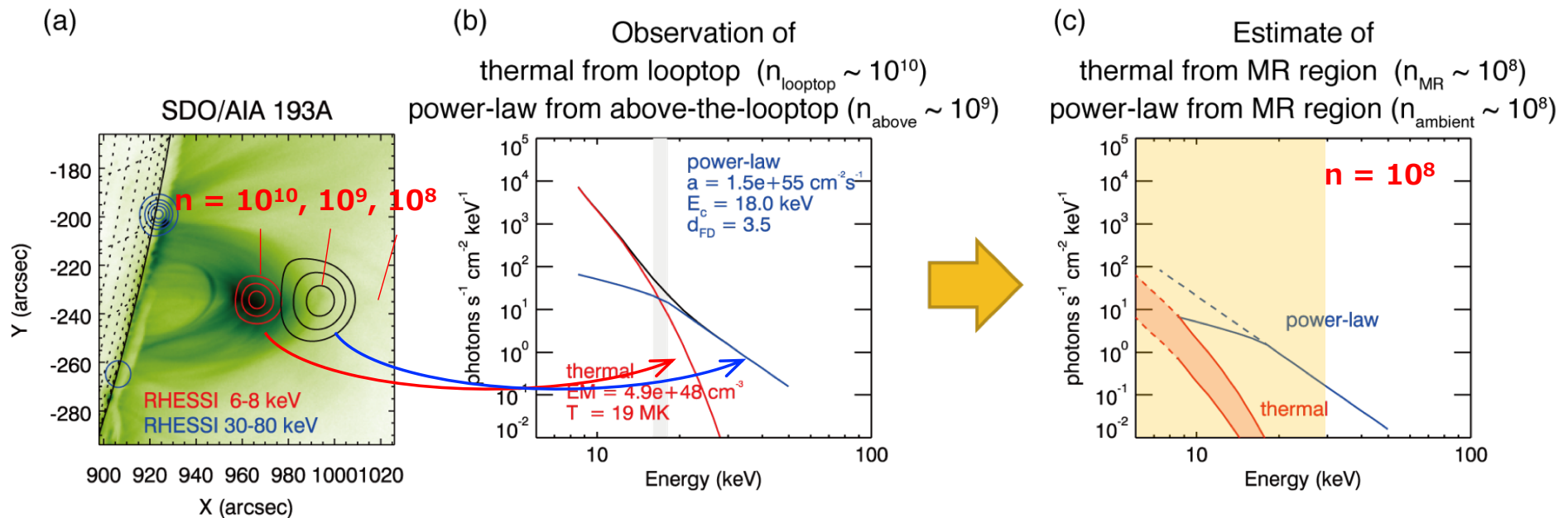
- HXR source is emitted by thin target model.
- The electrons are continuously accelerated around the X-point.
- The density of the energetic electron around the X-point is same as the above-the-looptop source.



- On the basis of very simple estimate, the intersection between thermal and non-thermal spectra is expected to be located below 10 keV.

Observed loop top source

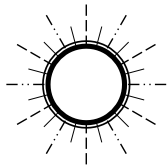
Estimated spectrum in MR region



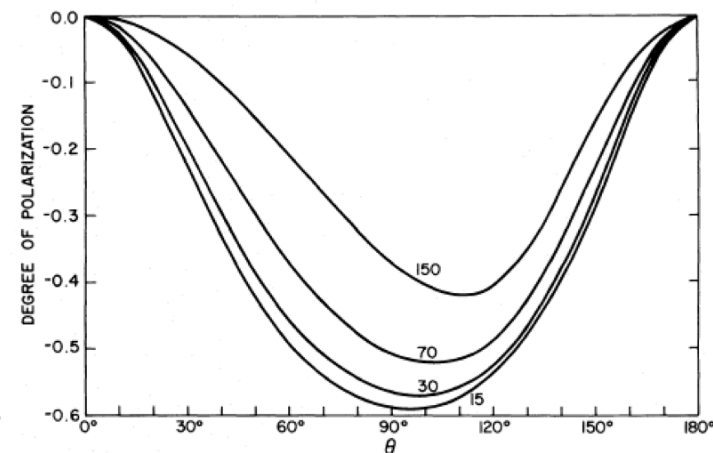
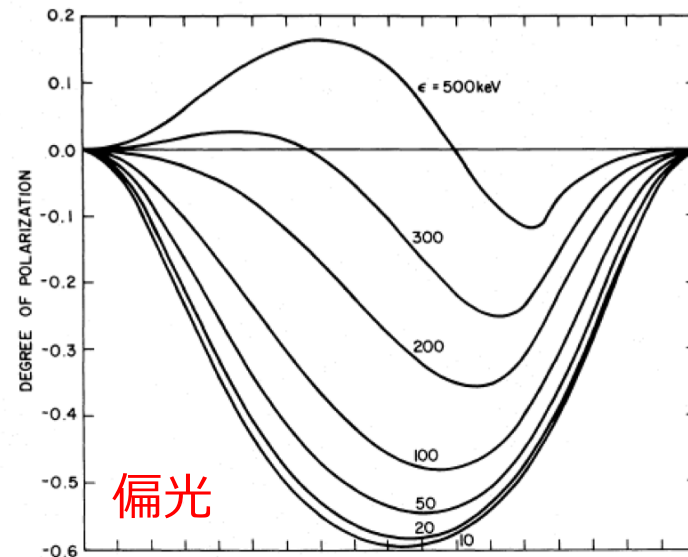
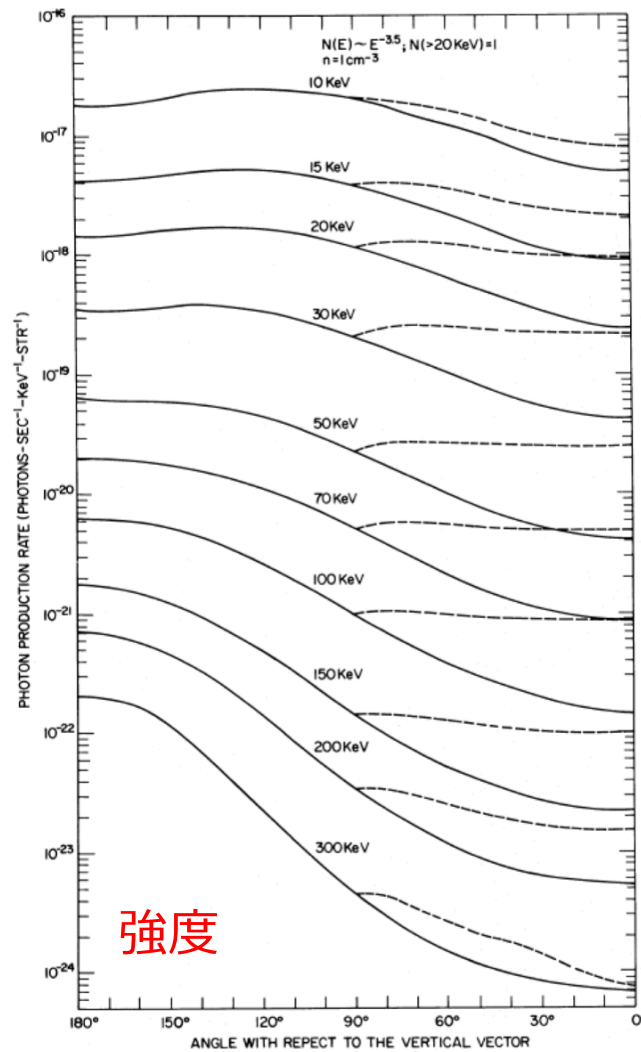
(Oka et al. 2015)

Thermal emission decreases by $10^{-3} - 10^{-4}$.
Non-thermal emission decreases by 10^{-1} .

科学目的達成のための方法（偏光分光観測）

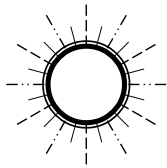


偏光を測定することで、加速電子の非等方性を知ることが出来る。



モデル
Bai and Ramaty
(1978)

科学目的達成のための方法（偏光分光観測）



偏光を測定することで、加速電子の非等方性を測定することができる。

Flare #2 (2002/8/20 10:28)

GOES class: M3.4

Thermal bremsstrahlung

Emission Measure

$$= 0.105804 \times 10^{49} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

Temperature = 2.92287 [keV]

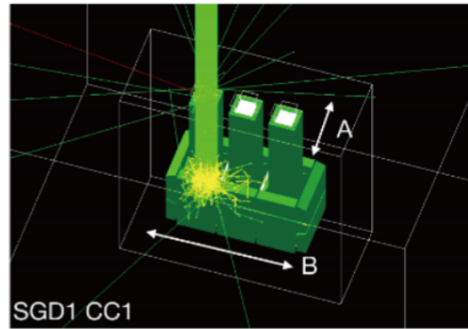
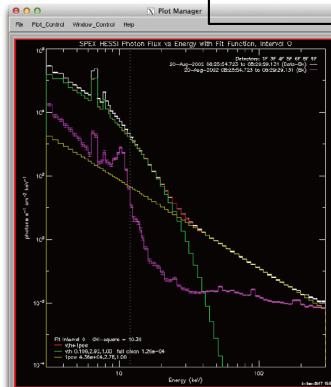
Power-law

Photon Index = 2.76146

Normalization = 43630.3

[photons/keV/cm²/s] at 1 keV

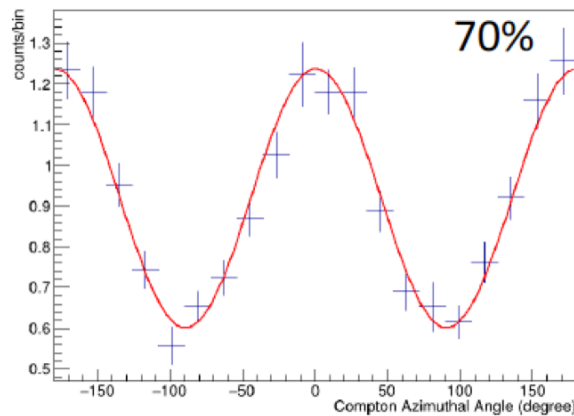
Integration time 214.408 s



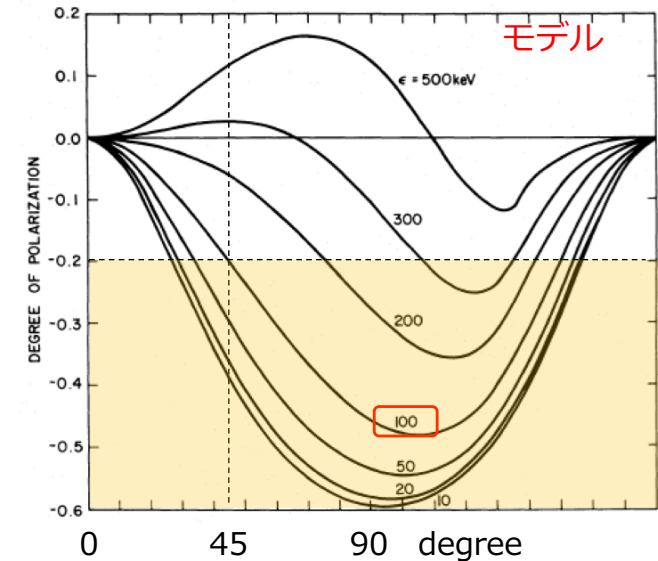
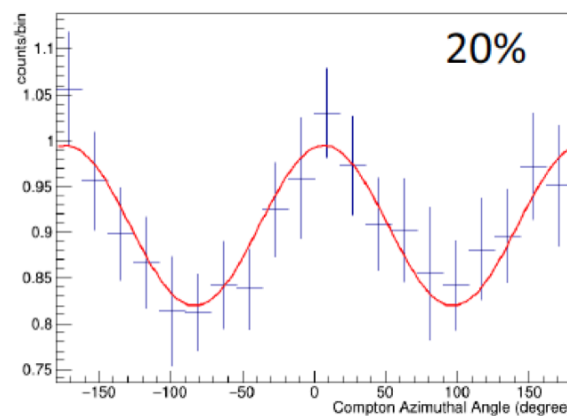
M-class フレアでも少なくとも20%以上の偏光は測定可能の見積り（大野；広島大学）

→ X-class なら更に小さな偏光まで検出できる

Normalized by Unpolarized Response

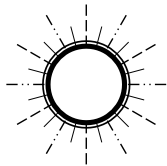


Normalized by Unpolarized Response



Bai and Ramaty (1978)

衛星搭載・観測装置のコンセプト

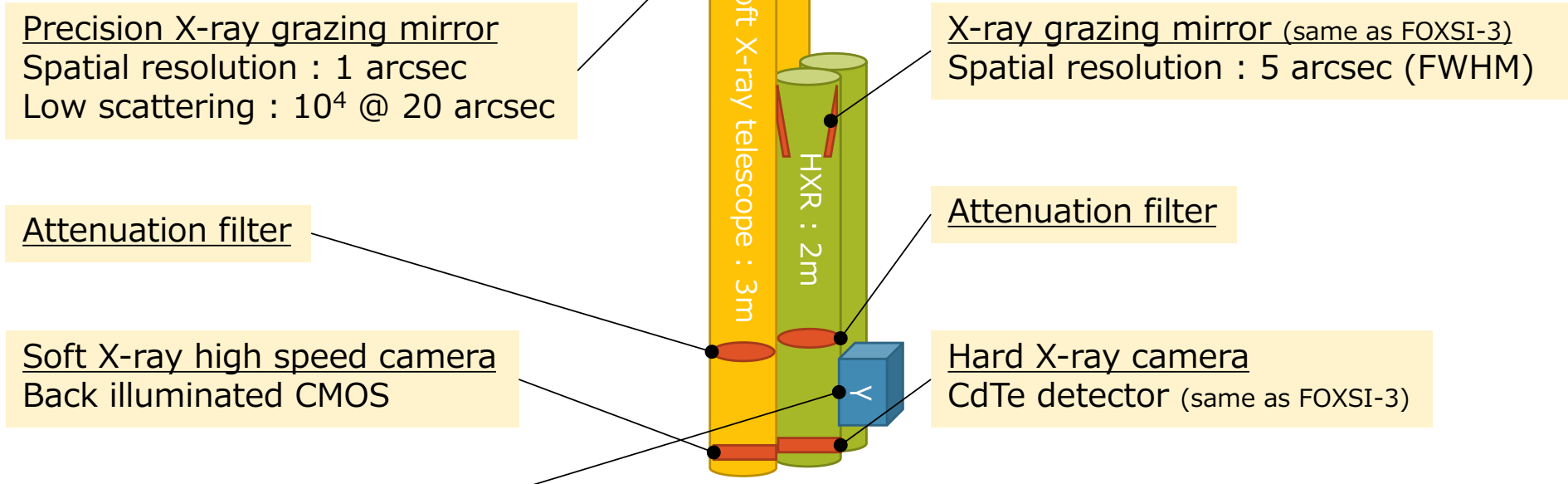


Soft X-ray imaging-spectrometer

Energy range: 0.5 ~ 10 keV
 Energy resolution: ~0.2 keV
 Spatial sampling: 0.75 arcsec
 Temporal sampling: 1 ms
measurable photons: ~10 photon/sec/pixel
 Dynamic range: 10^4 (with 2 telescopes)

Hard X-ray imaging-spectrometer

Energy range: 5 ~ 30 keV
 Energy resolution: ~1 keV
 Spatial sampling: 6 arcsec
 Temporal sampling: several us
measurable photons: ~500 photon/sec
 Dynamic range: 10^4 (with 2 telescopes)



Precision X-ray grazing mirror
 Spatial resolution : 1 arcsec
 Low scattering : 10^4 @ 20 arcsec

X-ray grazing mirror (same as FOXSI-3)
 Spatial resolution : 5 arcsec (FWHM)

Attenuation filter

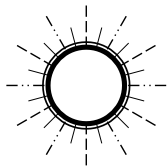
Attenuation filter

Soft X-ray high speed camera
 Back illuminated CMOS

Hard X-ray camera
 CdTe detector (same as FOXSI-3)

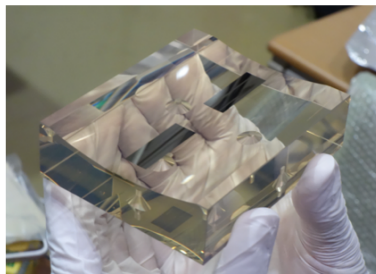
Soft γ-ray detector ASTRO-H SGD: Si/CdTe Compton camera
 Energy range : ~ 600 keV polarization measurement (> 60 keV)

観測装置の開発状況



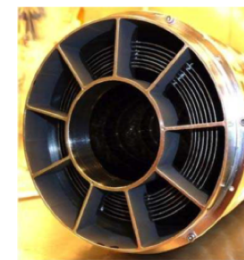
Soft X-ray imaging-spectrometer

Hard X-ray imaging-spectrometer



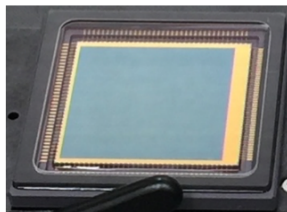
坂尾、
大阪大学

Precision X-ray grazing mirror
Spatial resolution : 1 arcsec
Low scattering : 10^4 @ 20 arcsec



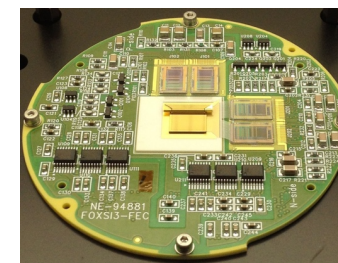
米国FOXSIチーム

X-ray grazing mirror (same as FOXSI-3)
Spatial resolution : 5 arcsec (FWHM)



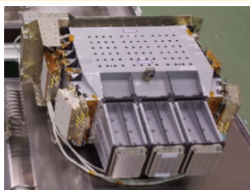
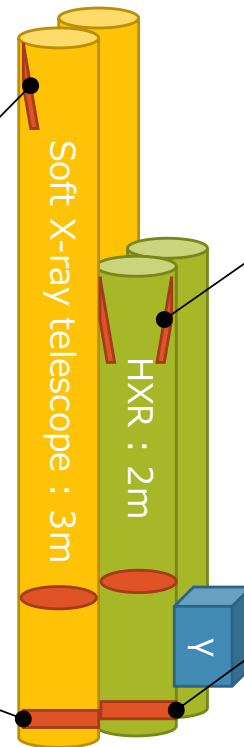
成影、
石川

Soft X-ray high speed camera
Back illuminated CMOS



日本FOXSI
チーム

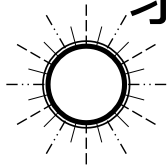
Hard X-ray camera
CdTe detector (same as FOXSI-3)



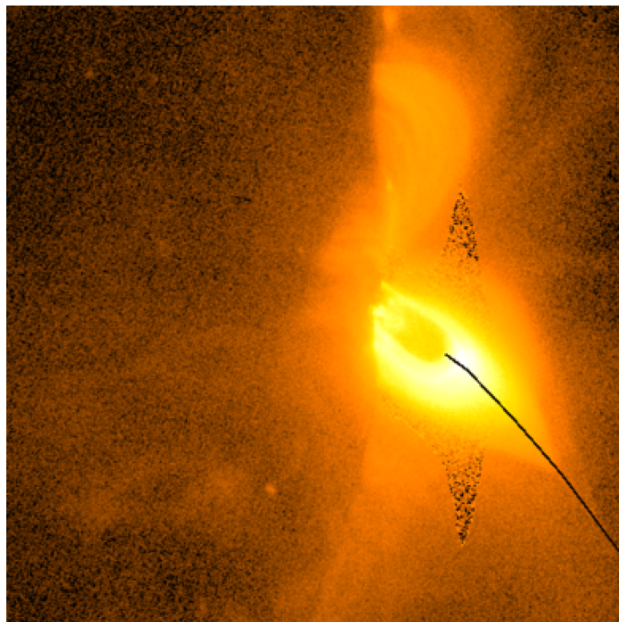
Soft γ -ray detector
Energy range : ~ 600 keV

ASTRO-H SGD: Si/CdTe Compton camera
polarization measurement (> 60 keV)

太陽フレアにおける磁気リコネクション観測に 求められるダイナミックレンジ（軟X線）

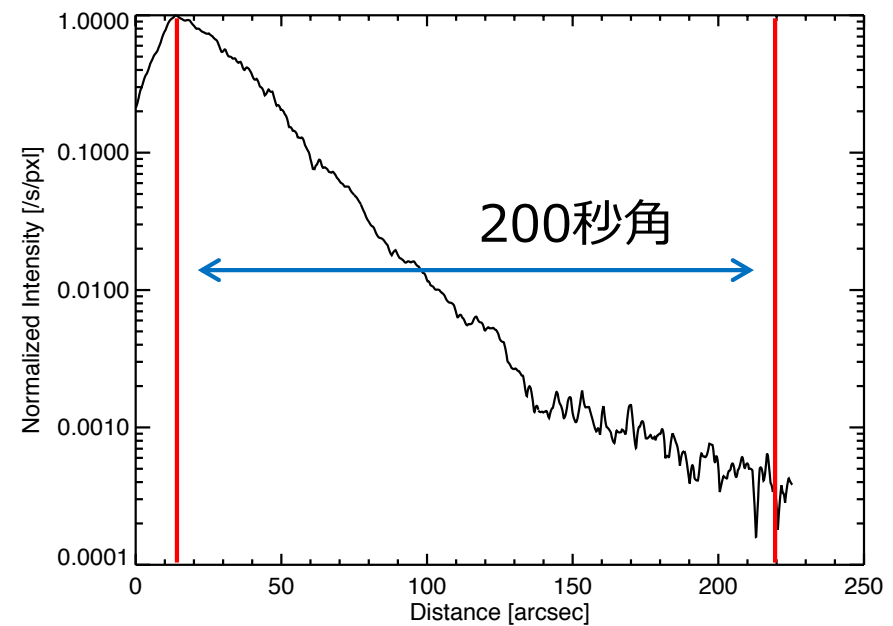


- **High dynamic range (10^4)** observation is required to observe the reconnection region above the flaring loop.

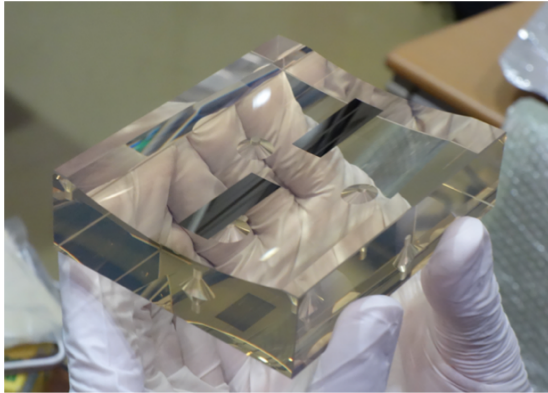
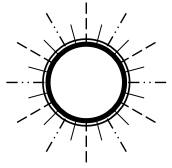


フレアループ

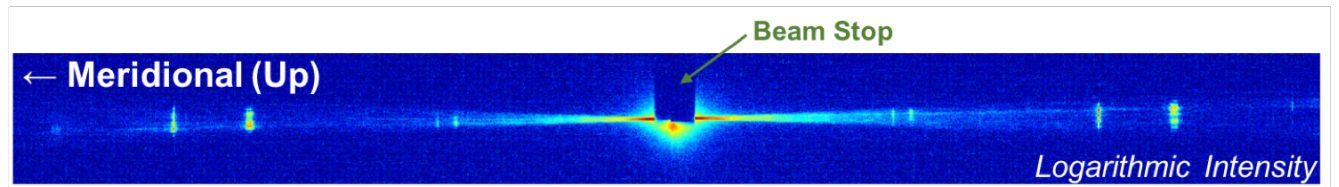
X-point 近傍



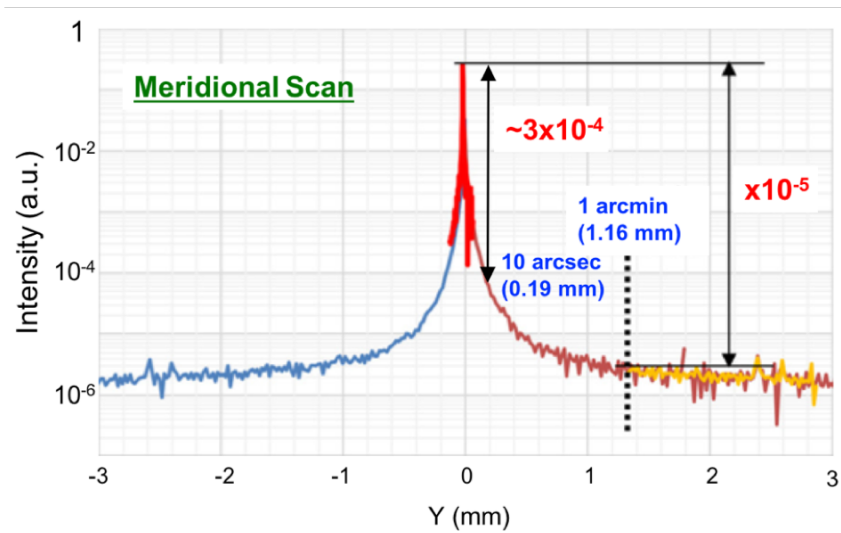
High precision X-ray mirror



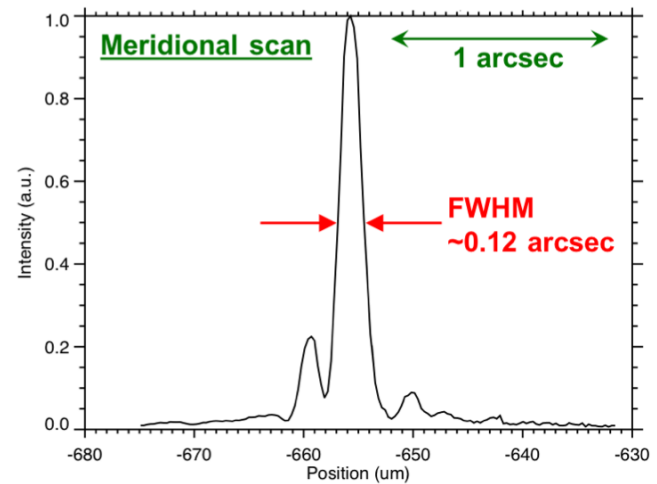
Spot of 8 keV X-rays at focus position



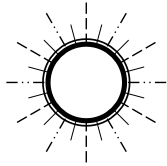
Scattered light



PSF of spot



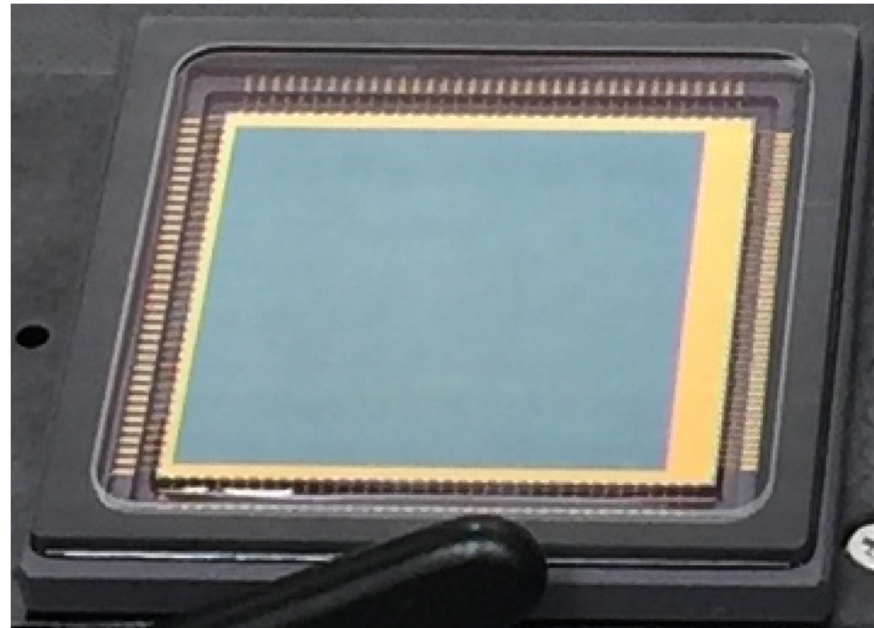
High speed X-ray camera



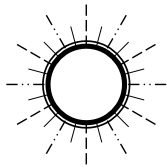
Back illuminated high speed CMOS sensor

- This sensor has a **sensitivity to soft X-rays**.
- The continuous high speed exposure (**1,000 frame/sec**) is possible.
- We can **detect the solar soft X-ray photons one by one** (see next slide), and **measure its "energy" in "2D" with "temporal resolution"**.

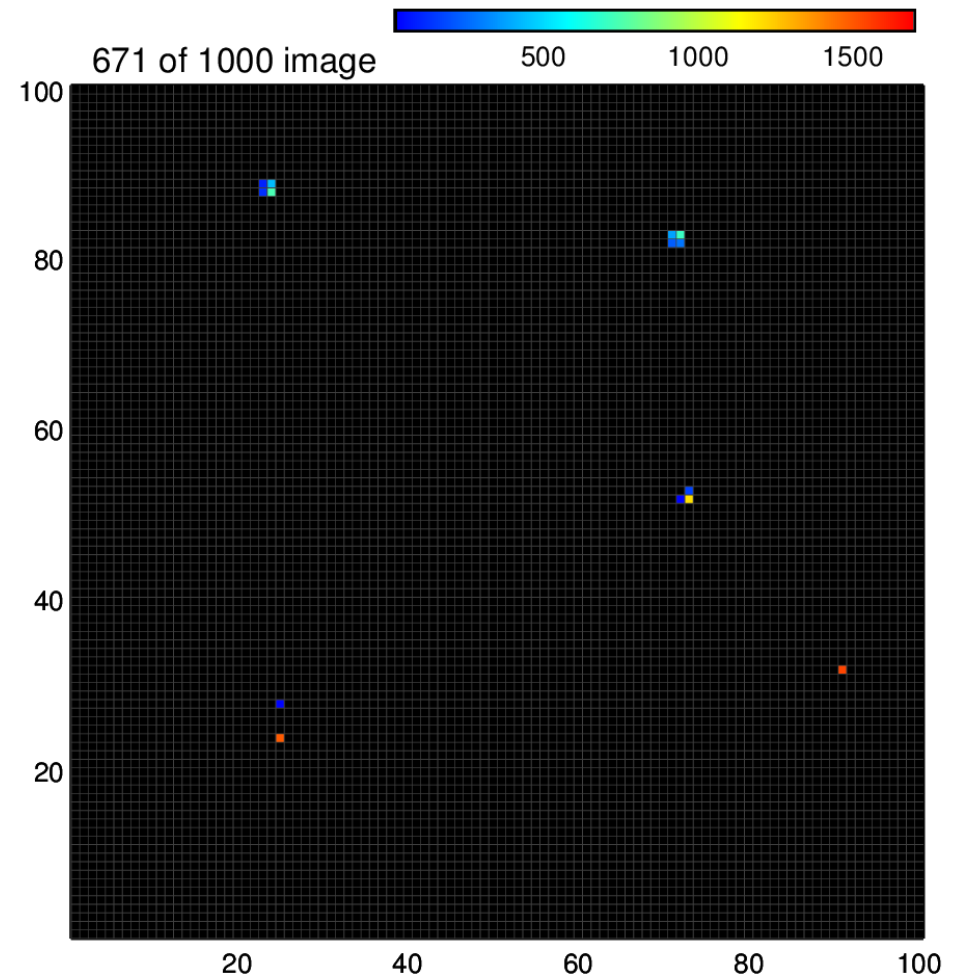
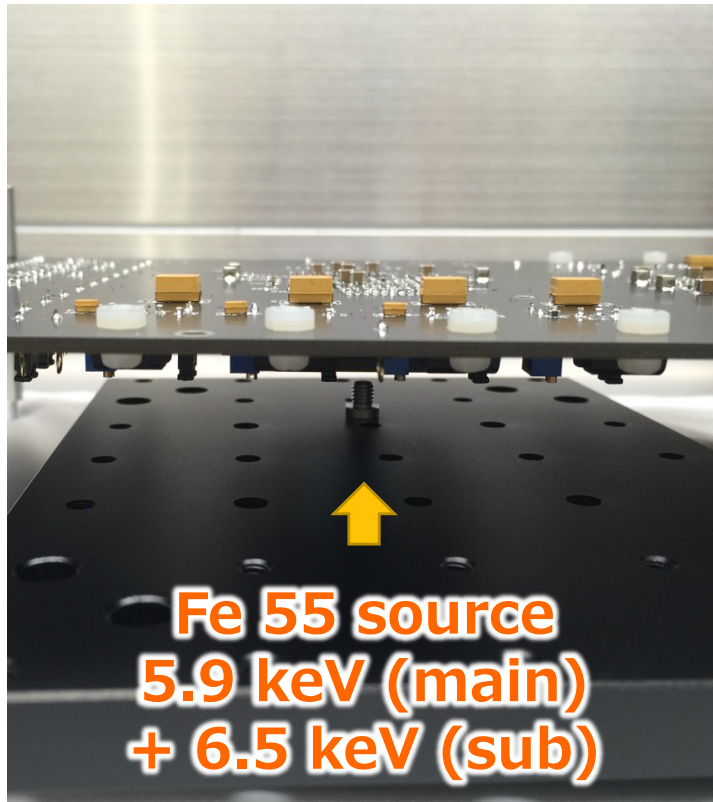
In order to make a **spectrum each ~ 10 sec, high speed continuous exposure** is required.



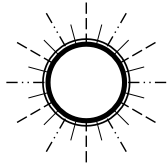
Performance of the CMOS sensor



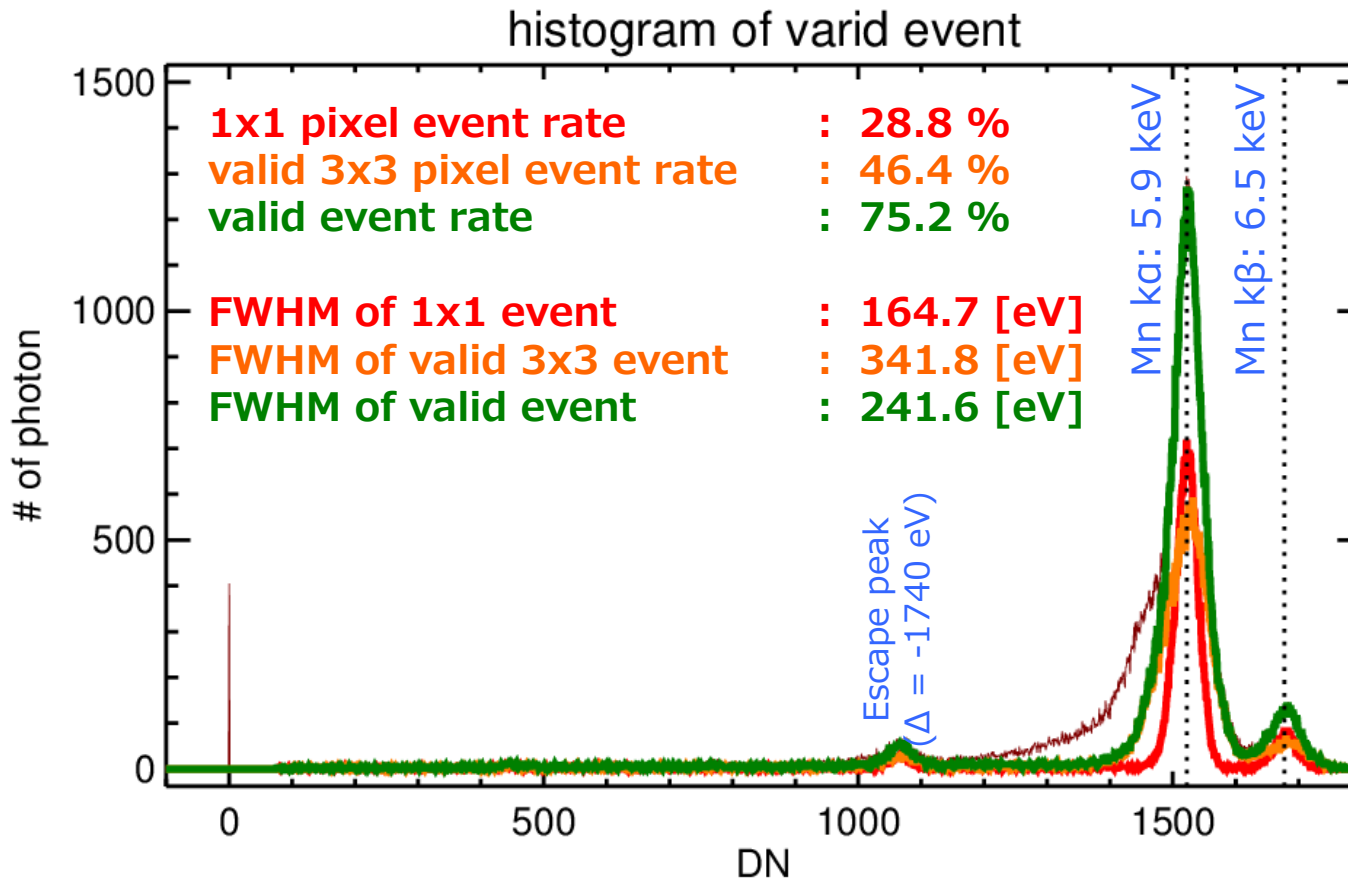
- X-ray illumination test with Fe55 source (5.9 keV)



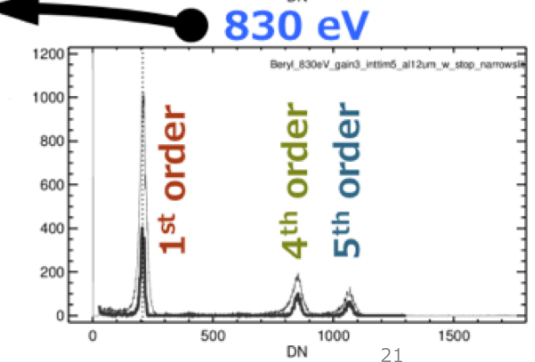
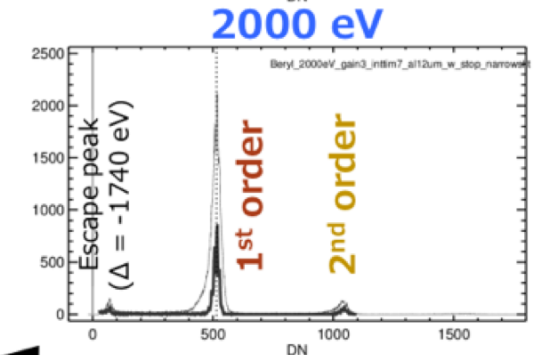
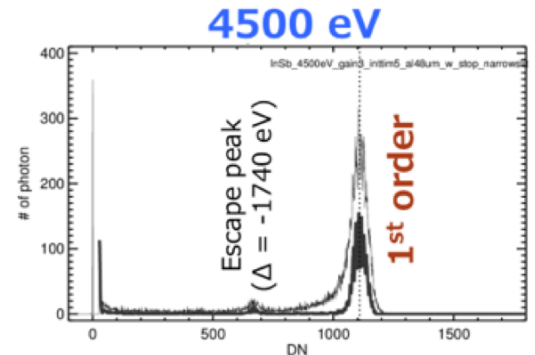
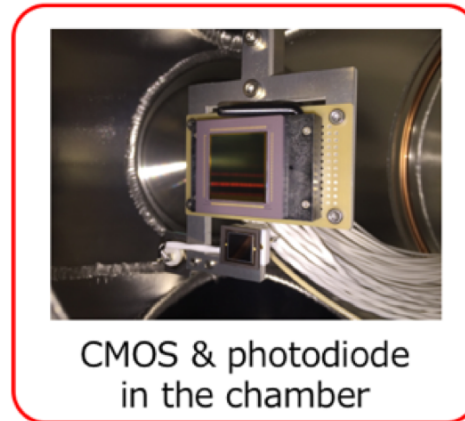
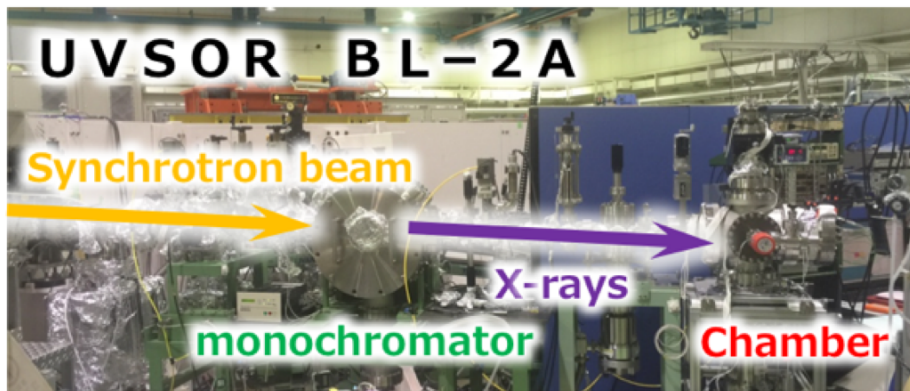
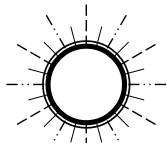
Performance of the CMOS sensor



- Result of X-ray illumination test with Fe55 source (5.9 keV + 6.5keV)
Narukage et al. (2017 in prep)



Performance of the CMOS sensor



Example of imaging spectroscopy with photon counting method



Imaging obs.

All order beams are mixed

2D imaging spectroscopy

1st order (830 eV)

4th order (3,320 eV)

5th order (4,150 eV)

太陽観測のために開発された高速のエク
ス線観測装置が幅広い分野から関心を集めて
いる。これまで難しかった写真のような画像
と、波長ごとのエネルギー分布を示すスペク
トルを同時に詳しく観測できるためだ。学術
研究だけでなく、将来は電池の開発や半導体
製造などの産業利用も視野に入れた応用が期
待されている。

国立天文台や宇宙航空
研究開発機構(JAXA)
などが開発したエク
ス線観測装置は、1秒間に
最大1000枚のエク
ス線画像を撮影できるの
が特徴だ。正確な時間で
空間とスペクトルを同時
に高い分解能で観測でき
る。「これらを同時に満
たせる装置はなかった」と
国立天文台の成影典之
助教は言う。

範囲絞り高速化
X線観測装置は主に天
文学で利用されている。
用途に合わせて、画像セ
ンサーや分光器などを
使っている。従来は短波長
のX線を高速でとらえら
れる性能のものは無かつ
た。

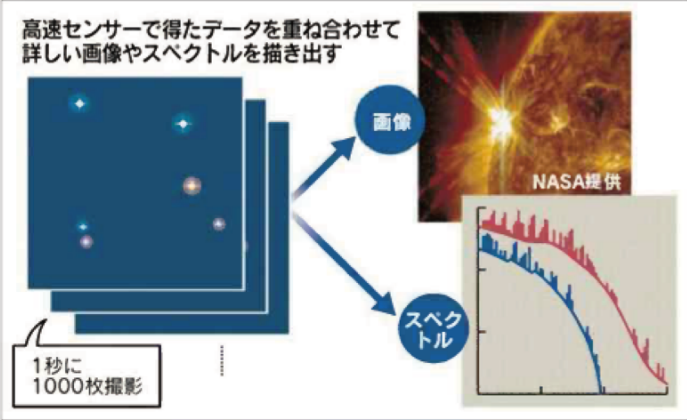
新型の観測装置はエッ
クス線を捉える目に、高
速読み出しが可能な裏面
照射型CMOS画像セン
サーを使った。この画像
センサーは縦横2048
画素で、ももとの性能
では1秒間に撮影でき
るのは48枚。しかし撮影範
囲を太陽観測に必要な縦
横512画素に絞り、画
像の読み出しや処理用の
回路などを新たに開発し
て1秒あたり最大100
0枚の高速化を実現し
た。

太陽観測 転じて先端産業

Start Up
Innovation
Science

高速撮影ができること
で、空間画像とスペクト
ルを同時に細かく捉えら
れるようになった。短時
間だけ撮影すると、セン
サーのどこにだけだけの
エネルギーを持ったエッ
クス線が飛び込んできた
か、というデータがとれ
る。ただ極めて時間が短
いので、1回に採れるデ
ータはごく部分的なもの
だ。例えば画像の場合、
1カーとは共同でエッ

X線で1秒1000枚撮影



一度に撮影したものはど
ころどこに点のような
模様映るにすぎない。
しかし高速撮影で多数
の連続したデータを重ね
合わせれば、全体の細か
な画像や連続した詳しい
スペクトルのデータが浮
かびあがってくる。一つ
一つのデータは短時間の
ものなので、時間でどう
変化したかを細かく調べ
ることもできる。

元素の動きを追う 電池や半導体に応用

ス線観測装置用に改良し
ても取り組み始めた。
この新型のエク
ス線観測装置に、天文学以外
の分野の専門家も注目し
た。

なかでも活用が見込め
る分野のひとつが、放射
光施設などで発生させた
強力なエク
ス線を使う
て顕微鏡のようにもの
内部を詳しく調べる分野
だ。分子科学研究所極端
紫外光施設の大東琢
治助教は「特定の元素が
どのように動いているか
まで、リアルタイムに追
いかけられるようにな
る」と期待する。

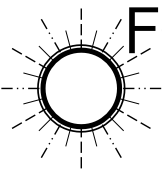
エネルギー分析

エク
ス線顕微鏡を使
って動画を撮影すること
はできるが、白黒画像で
わかるのはものの形だ
け。しかし新装置はエネ
ルギーの分析までできる
ので、化学反応などの過
程でそれぞれの元素を区
別できるようにする。
例えば、リチウムイオ
ン電池の内部で、充電や
放電の時に、リチウムイ
オンがどのように動いて
いるのかをリアルタイム
に調べられる。電気自動
車向けなどに電池の改良
や開発を進める上で、こ
うした解析技術は大きな
武器になる。

次世代半導体の回路の
原板にあたるマスクに欠
陥がないかを調べる検査
にも使える期待がある。
回路の線幅が約10ナノメ
ートル(10億分の1)の次世
代半導体の製造に使われ
るEUVという波長の極
端に短い紫外線を使った
露光装置が対象だ。
これまでのセンサーで
は1秒に1枚の画像を撮
るのが限界で、マスクの
検査に時間がかかるのが
問題だった。新装置はエ
クス線に波長が近い紫
外線でも高速撮影が可能
でこの問題を解決でき
る。加えて「光子1個の
検出が可能で、超精密測
定への道を開ける」と検
査装置を開発している兵
庫県立大学の原田哲男助
教は説明する。
装置はももとの開発
目的である天文でも期待
を集めている。太陽を観
測し、太陽を取り巻くコ
ロナとよばれる電離ガス
が100万度と極めて高
温になる仕組みを解明す
るのが目的だ。太陽の表
面が6000度しかない
のにコロナがこれほど高
温になるのは、フレアと
その周辺で起きている磁
場の変化や粒子の加速が
重要な役割を果たしてい
ると考えられている。

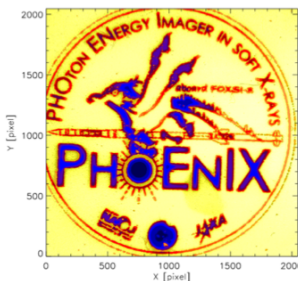
(小玉祥司)

Demonstration of soft X-ray imaging spectroscopy @ FOXSI-3 (2018 Summer)

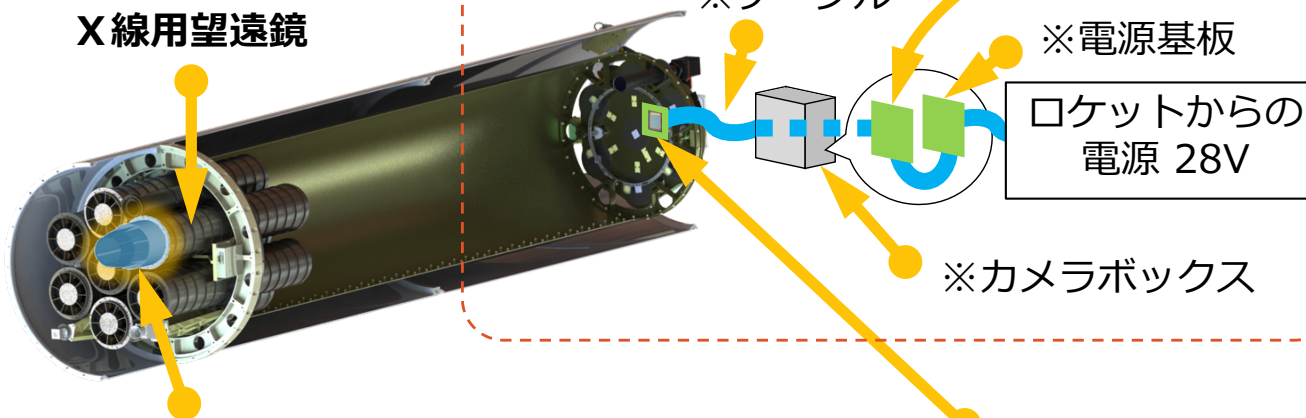


開発は順調に進捗している

CMOSカメラで撮影した可視光でのサンプル画像



FOXSI (既存) の X線用望遠鏡



軟X線用・高速度カメラ

※印は、2017年度に開発する品

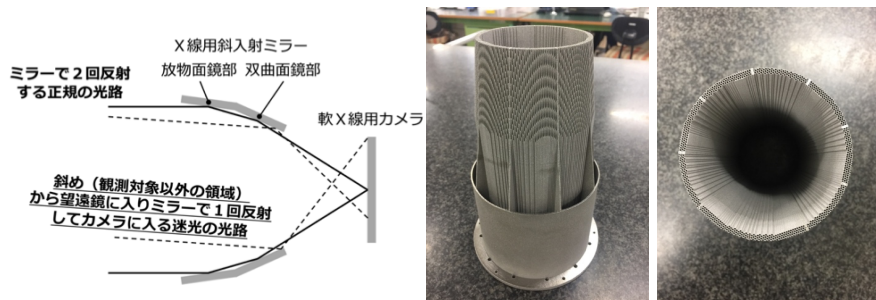
読み出し回路

CMOS検出器から出力される大量のデータ (2.4 Gbps) を保存するための専用基板。
2016年度、ISASのX線グループ、天文台の光赤外グループなどと協同し開発を行った。



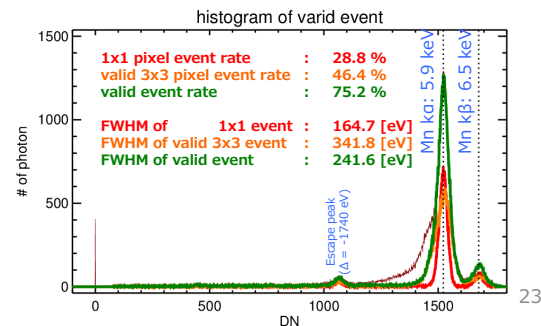
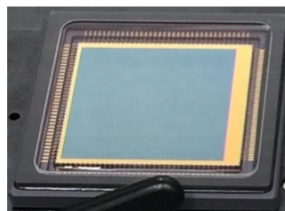
X線用コリメータ

望遠鏡の軸から14分角以上傾いた場所からの迷光を遮蔽するための構造体。アスペクト比 (穴径 : 長さ) = 1 : 190 の筒が必要。2017年度、3Dプリンターでフライト品を製作。

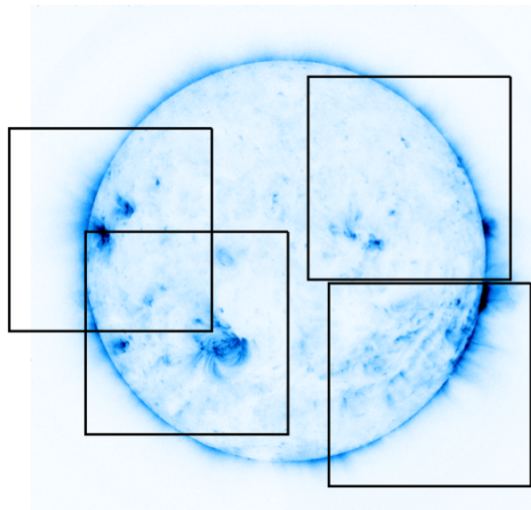
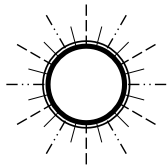


CMOS検出器 とフロントエンド基板

軟X線に感度を持つ最新の裏面照射型CMOSセンサー。2016年度、フライト品を入手。放射光施設 (分子研・UVSOR) にて、同一ロットの評価品を用いて感度評価を完了した。



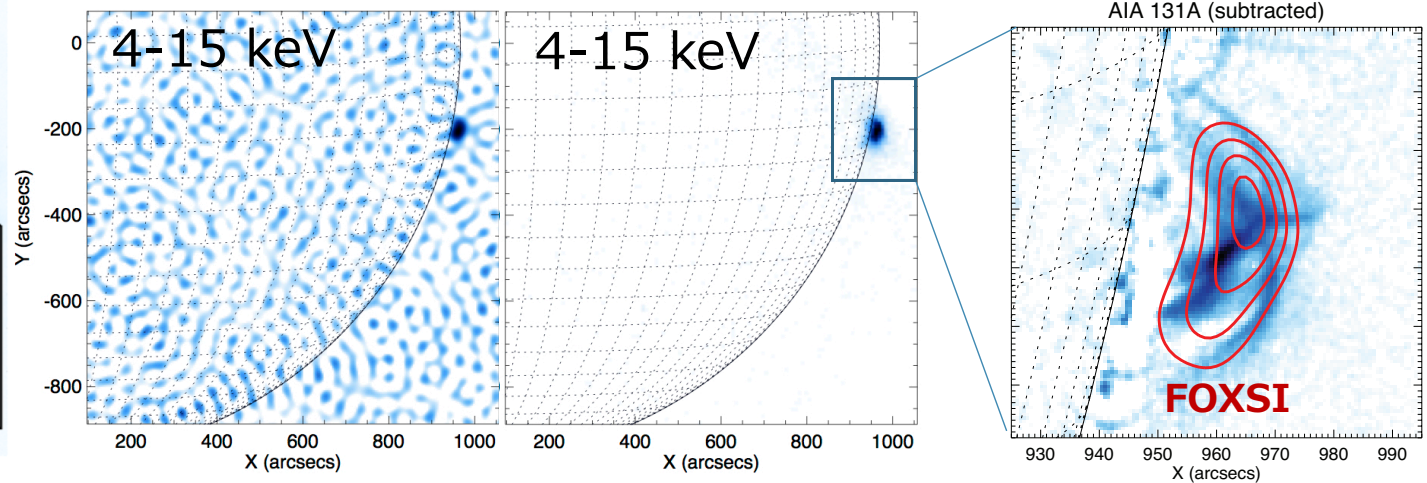
Performance of HXR instrument



AIA 94A **2012**
Nov 2 Launch
17:55 UTC

RHESSI

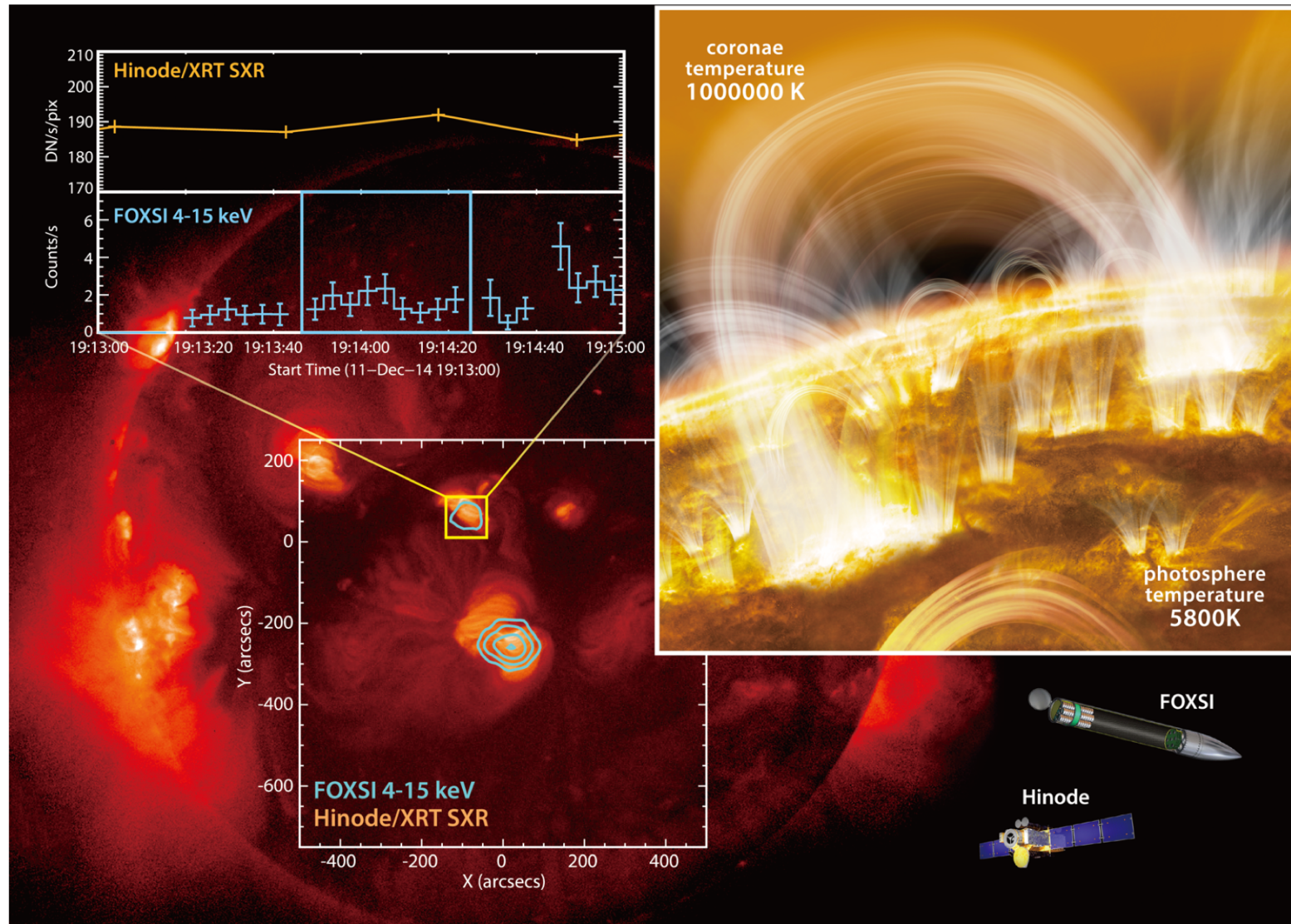
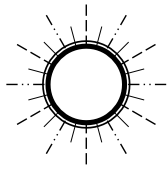
FOXSI-1



**First focused image of the Sun in
hard X-rays! (>5 keV)**

Krucker, Christe, Glesener, Ishikawa et al., ApJL 2014

FOXSI-2 の結果は Nature Astronomy に掲載 (Ishikawa et al. 2017)

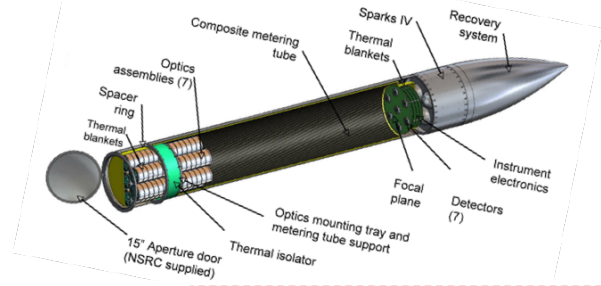


太陽コロナのX線観測

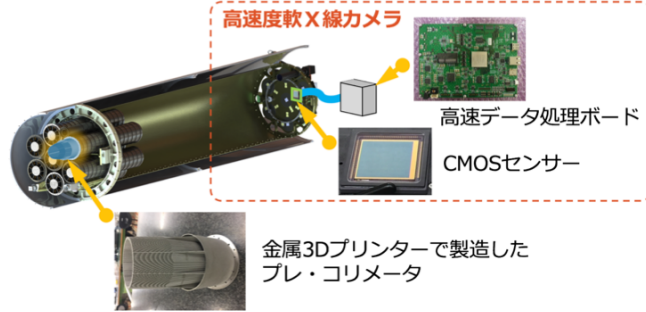
「ひので」衛星
X線望遠鏡
(2006年～現在)



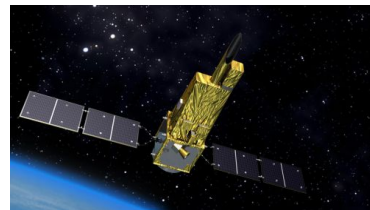
ロケット実験
FOXSI-1, 2
(2012年, 2014年)



ロケット実験
FOXSI-3
(2018年夏)



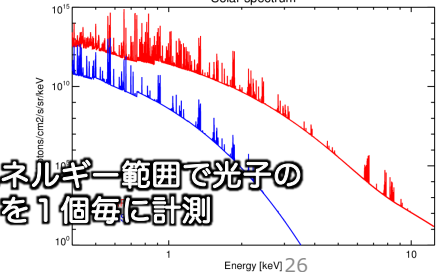
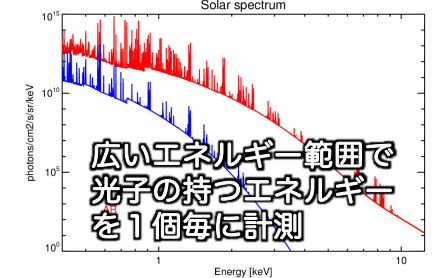
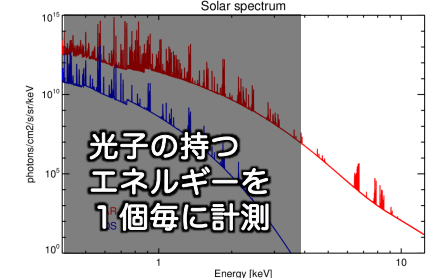
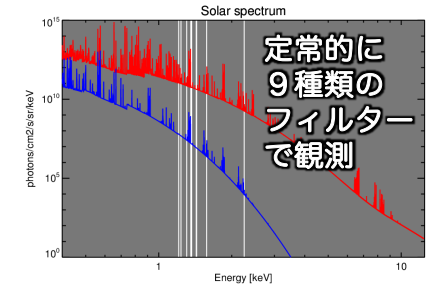
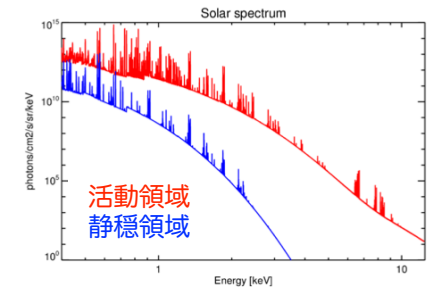
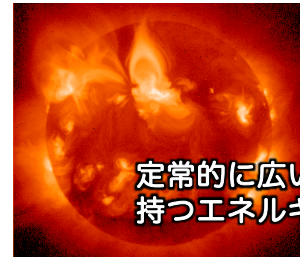
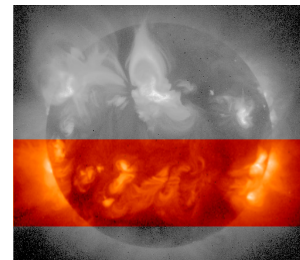
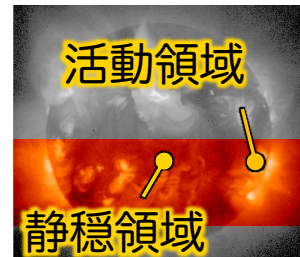
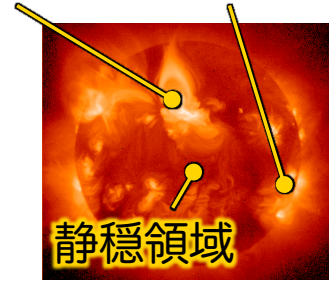
将来計画
「PhoENiX」衛星
(2025年頃)



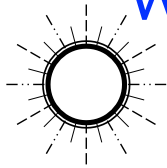
軟X線望遠鏡
硬X線望遠鏡
軟ガンマ線検出器

「ひさき」衛星と同程度のサイズの衛星 (図は「ひさき」衛星)

フレア 活動領域



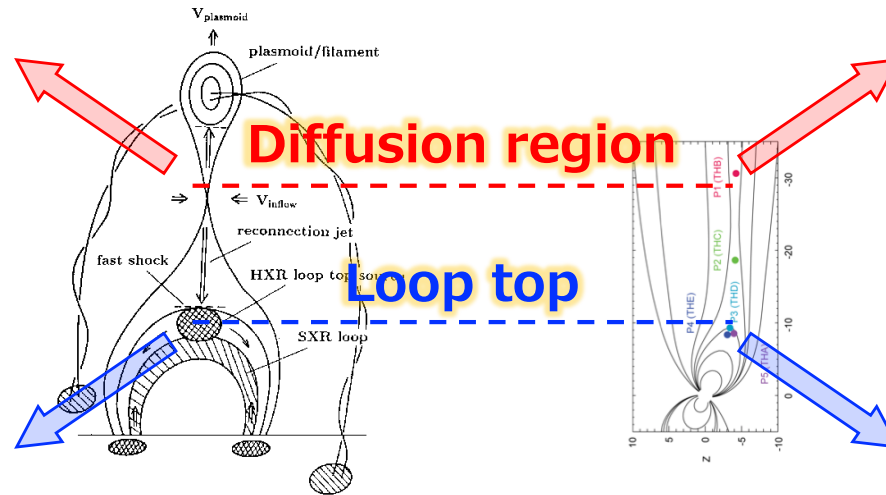
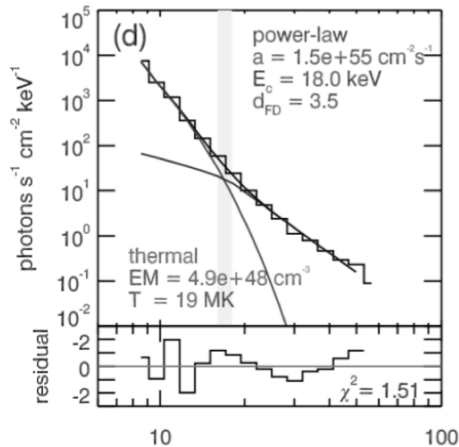
Comparison between solar flare and magnetotail with X-ray spectrum



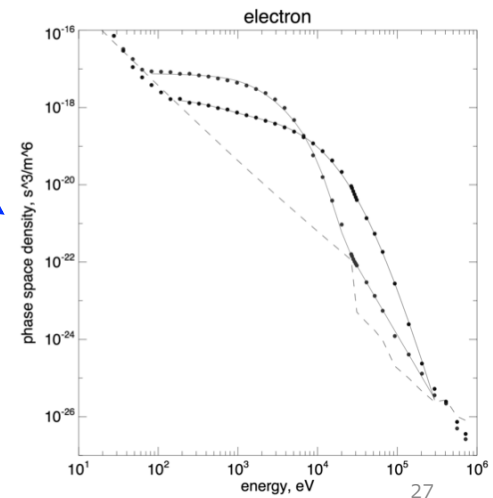
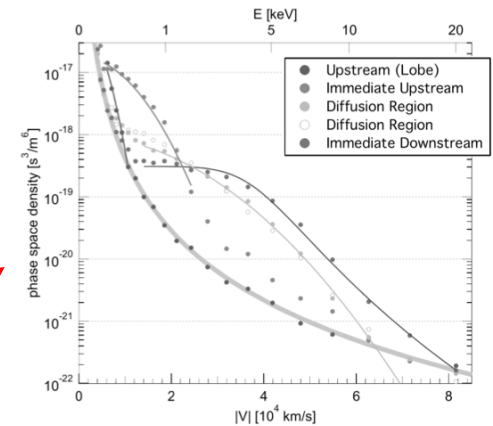
Sun

Magnetotail

?

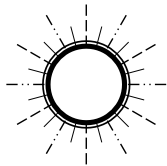


太陽でも空間・時間分解したX線スペクトルが取れるようになり、同じ土俵で比較することが可能となる



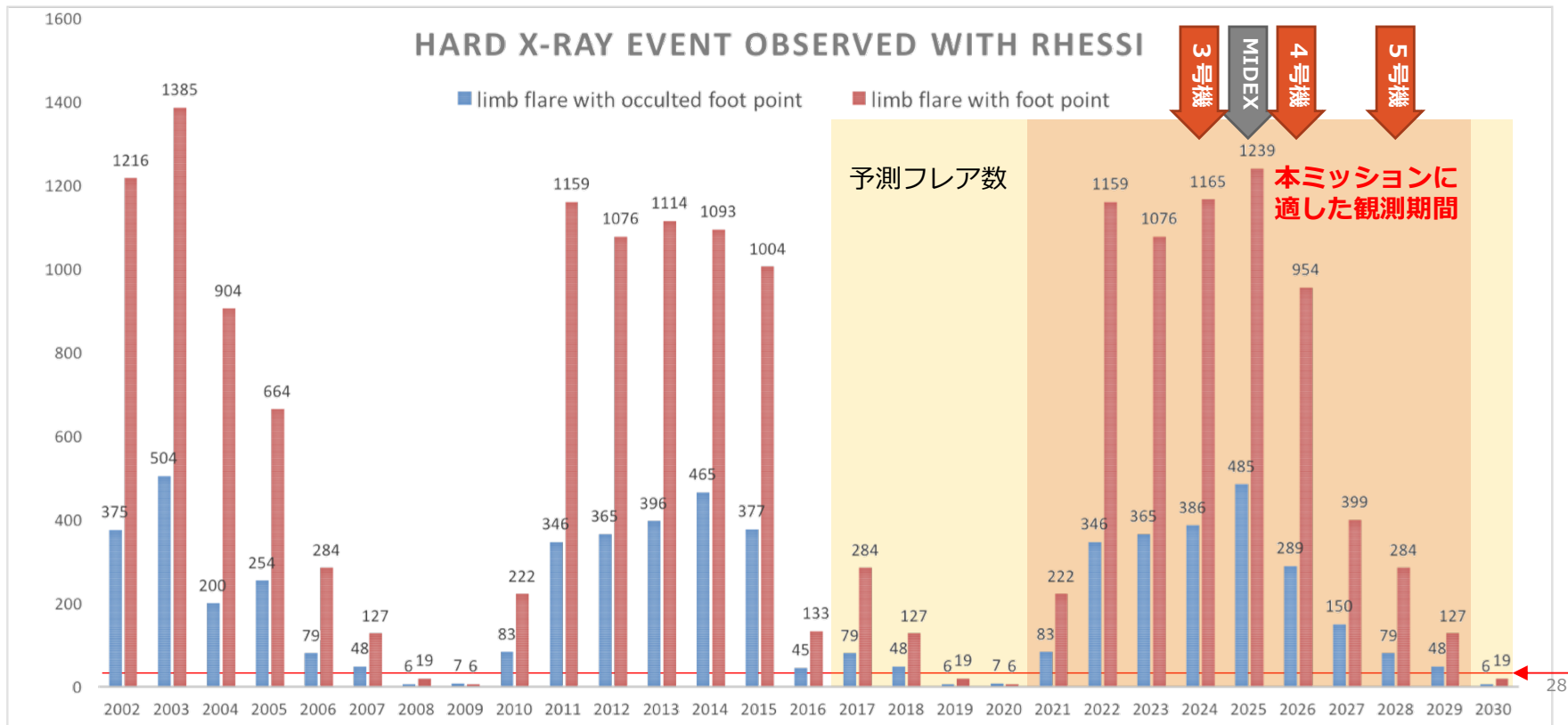


観測開始の時期について

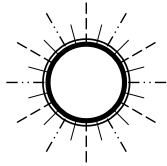


- 硬X線2次元撮像分光装置（すだれコリメータ型）RHESSI 衛星のフレア観測実績と予測
 - 合計カウント100,000以上のフレアを抽出
 - 11年周期を仮定（実際は遅れ気味）
 - メモ：RHESSI 衛星の観測制限
 - RHESSI 衛星は、SAA で観測を停止
 - RHESSI 衛星の、日陰期間は、全体の 20~30 %
 - 下記プロットは、これら観測制限下でのフレア数

【本ミッションの要件】 太陽縁付近のフレア2種類（足元が隠されたものと、隠れていないもの）のうち、**条件の良いものをそれぞれ 10 例程度** 観測することとする。
 → 条件の良いものを「フレアループが30°以内で視線方向と正対したもの」とすると、その数は全体の1/3。
 つまり、**2種類のフレアをそれぞれ 30 例以上ずつ観測（合計60例以上の太陽縁付近フレアを観測）** する必要がある。



2017年度のWG活動



下記を目標としたワーキンググループの設立を、宇宙科学研究所・理学委員会に申請し、**2017年9月4日の理学委員会で承認された。**

- 主力カテゴリ： **(ii) 公募型小型計画の提案を行うWG**

2029年初頭までに観測を開始できる小型衛星計画への提案をミッション実現の機会のひとつとして設定する。

→ 2018年1月29日 公募型小型3・4号機の提案書提出〆切



PhoENiX のホームページ： <http://www.phoenix-project.science/>