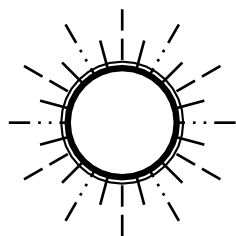


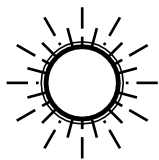


磁気リコネクションに伴う
粒子加速の理解を目指すミッション
– Physics of Energetic and Non-thermal plasmas in the X- (magnetic
reconnection) region (PhoENiX) – の紹介



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

日本学術会議 天文学・宇宙物理学分科会からの 発表依頼



- 計画の概要とコミュニティでの検討状況

粒子加速 高エネルギー粒子（加速された粒子）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未解決の難問である。一方、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、実際、地球磁気圏、太陽フレアなどにおいて、リコネクションに伴う加速電子が観測されている。しかし、その加速過程は未解明であり、今後の研究の進展が待たれている。



PhoENiX (Physics of Energetic and Non-thermal Plasmas in the X-region)

Science Goal (本ミッションの前提となる大目標)

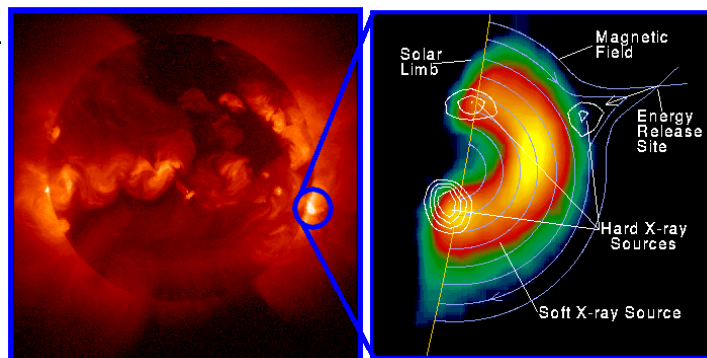
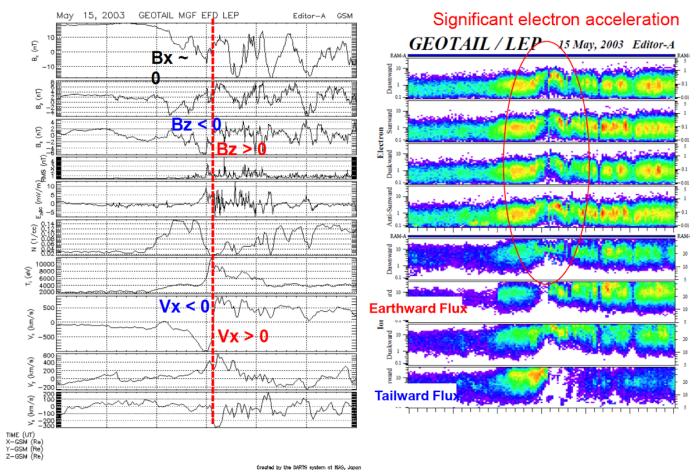
磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解

Science Objectives (本ミッションの科学目的)

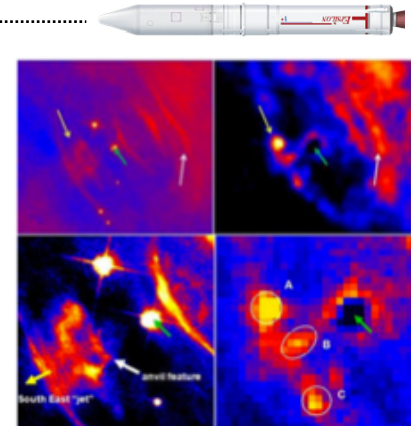
太陽フレアを対象に、磁気リコネクション中の加速場所を絞り込む [where]

太陽フレアを対象に、磁気リコネクション中の加速粒子の時間発展の調査 [when]

太陽フレアを対象に、磁気リコネクション中の加速粒子の特徴の把握 [how]

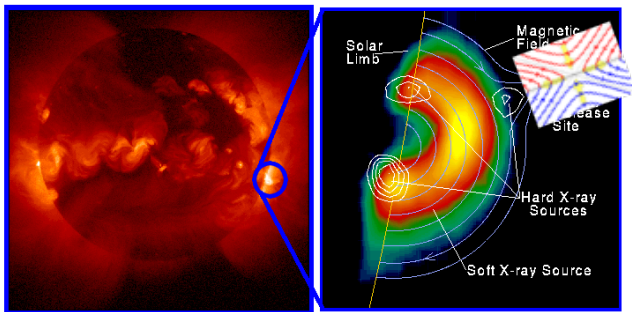
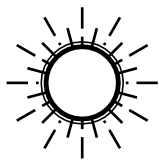


太陽フレア



かに星雲のガンマ線フレア 3

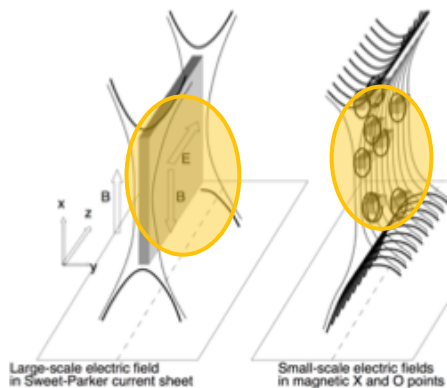
太陽フレアによる粒子加速は加速場所すら未解明



既存の観測では、太陽フレアで粒子加速が起きていることは解っているが、モデルが乱れるだけで、加速場所も加速機構も解明されていない。

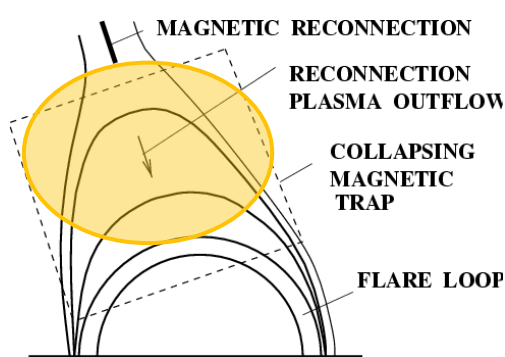
∴ 磁気リコネクションに関連する領域・現象（ループ上空）が観測できていない。

DC acceleration?



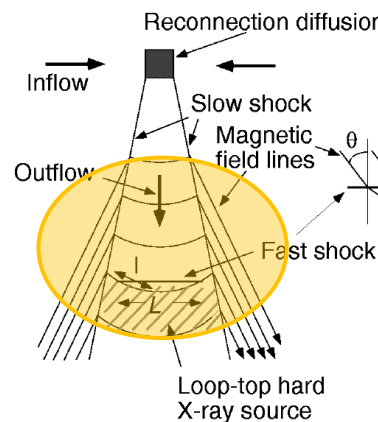
Aschwanden (2002)

Collapsing magnetic traps?



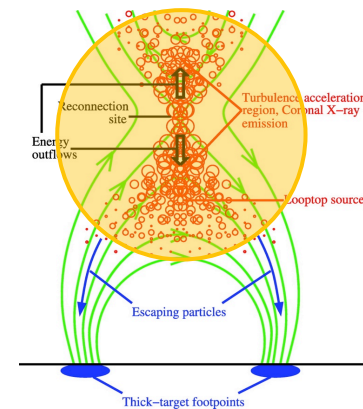
Karlicky & Kosugi (2004)

Shocks?



Tsuneta & Naito (1998)

Turbulence?



Liu et al. (2008), Petrosian, (2012)

PhoENiX FACT SHEET

Physics of Energetic and Non-thermal plasmas in the X- (magnetic reconnection) region



大目標：磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解

PhoENiX の目的：太陽フレアにおける粒子加速の場所・時間発展・特徴を調べる

技術革新 太陽フレア観測では世界初

- ☑ 軟X線～硬X線の2次元集光撮像分光観測
X線なのに高画質 & 高精細、スペクトルも！
- ☑ 高精度の硬X線～軟ガンマ線の偏光分光観測
加速電子はどこから来てどこに向かうのか？

分野間連携による学際的プロジェクト

- ☑ 太陽、地球惑星、高エネルギー天体
- ☑ 室内実験・数値シミュレーション
- ☑ 各学界から粒子加速の専門家が集結
- ☑ 宇宙プラズマの普遍的理解の糸口

☑ SXIS 軟X線分光撮像装置

0.5 – 10 keV with 240 eV FWHM
FOV: 384"x384", Spatial res. 1.5"

コンテキスト
情報

☑ HXIS 硬X線分光撮像装置

5 – 30 keV with ~1 keV FWHM @
FOV: 792"x792", Spatial res. 8"

非熱的成分

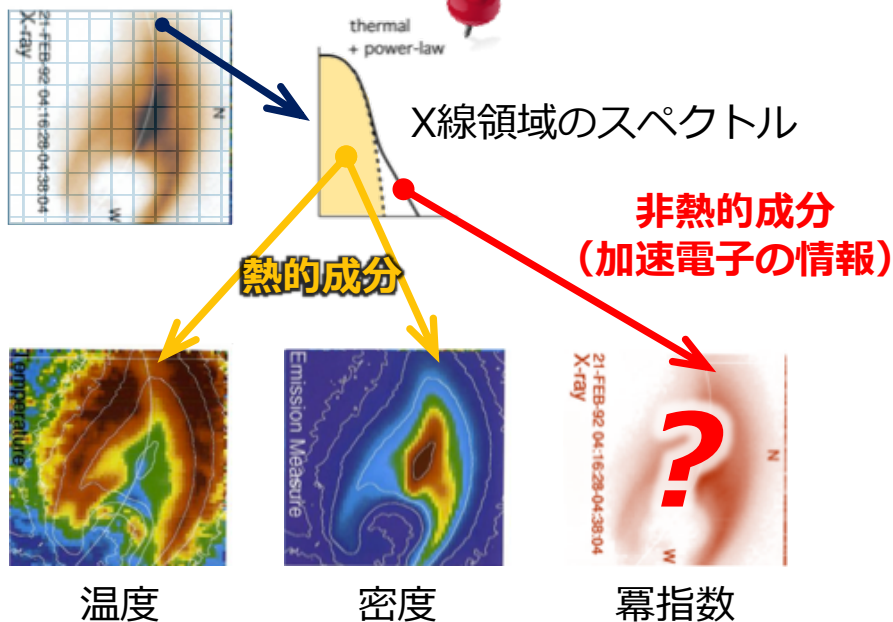
☑ SGSP 軟ガンマ線偏光分光装置

20 – 600 keV (60 – 600 for
FOV: 36'x36' at <150 keV, Sp

異方性

次の太陽活動極大期（2025年頃）

を活かし、最新の技術を用いて、
初めて本当に粒子加速の謎に迫る。



太陽コロナのX線・集光撮像観測

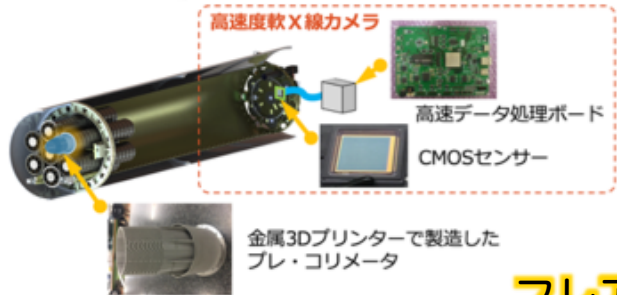
「ひので」衛星
X線望遠鏡
(2006年～現在)



ロケット実験
FOXSI-1, 2
(2012年, 2014年)



ロケット実験
FOXSI-3
(2018年9月7日)



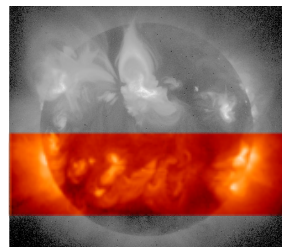
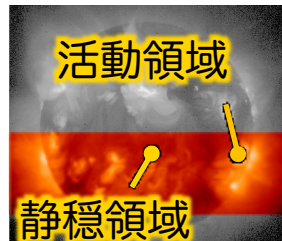
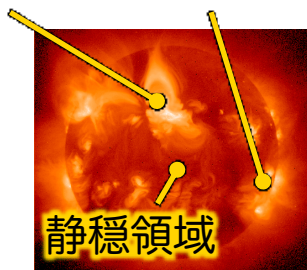
将来計画
「PhoENiX」衛星
(2025年頃)



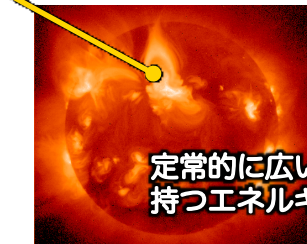
軟X線望遠鏡
硬X線望遠鏡
軟ガンマ線検出器

「ひさき」衛星と同程度のサイズの衛星 (図は「ひさき」衛星)

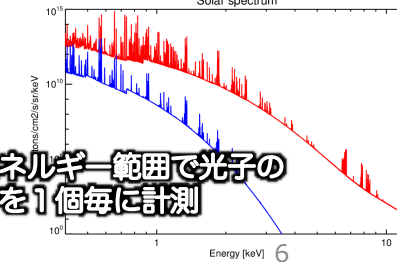
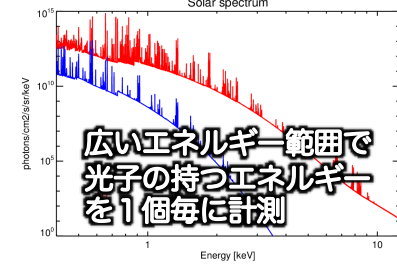
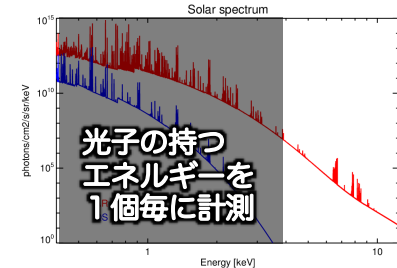
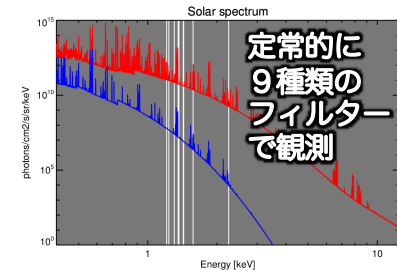
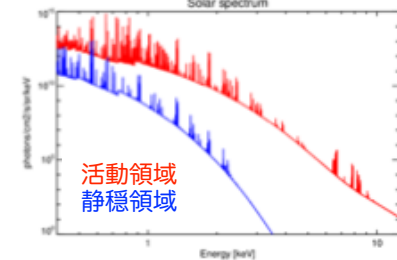
フレア 活動領域



フレア

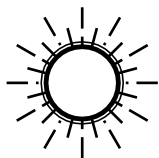


定常的に広いエネルギー範囲で光子の持つエネルギーを1個毎に計測





2018年9月7日 FOXSI-3 打ち上げ成功！！



- 日米共同の観測ロケット実験 FOXSI-3 の打ち上げを 2018年9月7日午前11時21分（アメリカ山岳部夏時間；日本時間では、2018年9月8日午前2時21分）、米国ニューメキシコ州ホワイトサンズの観測ロケット打ち上げ場にて行った。
- FOXSI-3は、最高到達高度約300kmの弾道軌道で約15分間飛翔し、太陽コロナからのX線を、約6分間観測した。
- 観測機器は全て正常に動作し、**世界初となる太陽コロナの軟X線・集光撮像分光観測に成功した。**

本研究は、下記のJSPS科研費の助成を受けたものです。

- JP18H03724（基盤研究(A)、研究代表者：成影典之）
- JP17H04832（若手研究(A)、研究代表者：石川真之介）
- JP16H02170（基盤研究(A)、研究代表者：高橋忠幸）
- JP16H03966（基盤研究(B)、研究代表者：渡辺伸）
- JP15H03647（基盤研究(B)、研究代表者：成影典之）
- JP24244021（基盤研究(A)、研究代表者：高橋忠幸）
- JP21540251（基盤研究(C)、研究代表者：成影典之）
- JP20244017（基盤研究(A)、研究代表者：高橋忠幸）



打ち上げ成功の web リリース（国立天文台、東大 Kavli IPMU、名古屋大学、ISAS/JAXA）の URL:

- <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/>
- https://www.ipmu.jp/ja/20180907-foxsi-3_launch
- http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20180911_isee.pdf
- <http://www.isas.jaxa.jp/topics/001870.html>

太陽観測のために開発された高速のエク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クス線観測装置は、1秒間に最大1000枚のエク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。

観測装置の高速化
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った。

新型の観測装置はエククス線を捉える目的、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1000枚の高速化を実現した。

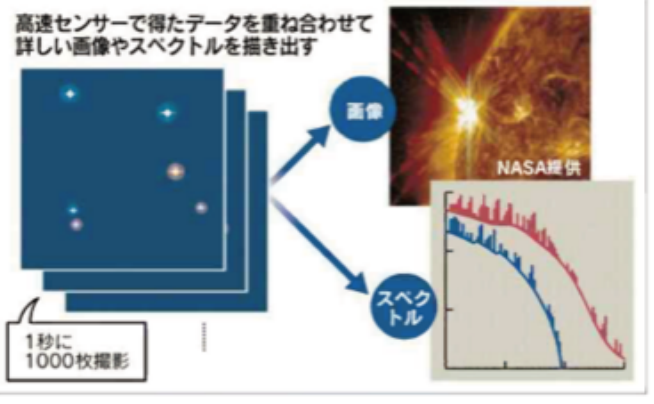
太陽観測 転じて先端産業

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、センサーは市販品で、本来エネルギーを持ったエク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ため、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、一度に撮影したものはこのよう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、時間どうに変化したかを細かく調べることができる。

使ったCMOS画像センサーは市販品で、本来エネルギーを持ったエク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ため、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、一度に撮影したものはこのよう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、時間どうに変化したかを細かく調べることができる。

X線で1秒1000枚撮影



元素の動き追う 電池や半導体に応用

X線観測装置用に改良した端に短い紫外線を使った露光装置が対象だ。この新型のエククス線観測装置は、天文学以外の分野の専門家も注目している。

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クス線を使って顕微鏡のようにもの内部を詳しく調べる分野だ。分子科学研究の先端装置を開発している長治助教は「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るようになる」と期待する。

エネルギー分析
エククス線顕微鏡を使って動画を撮影することはできるが、白黒画像でしか捉えられるもの形だ。しかし新装置はエネルギーの分析までできる。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なる。

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。回路の幅が約10ナノメートル(10億分の1)以下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。この新型のエククス線観測装置は、天文学以外の分野の専門家も注目している。

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クス線を使って顕微鏡のようにもの内部を詳しく調べる分野だ。分子科学研究の先端装置を開発している長治助教は「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るようになる」と期待する。

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、フレアと関係している。フレアと関係し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。

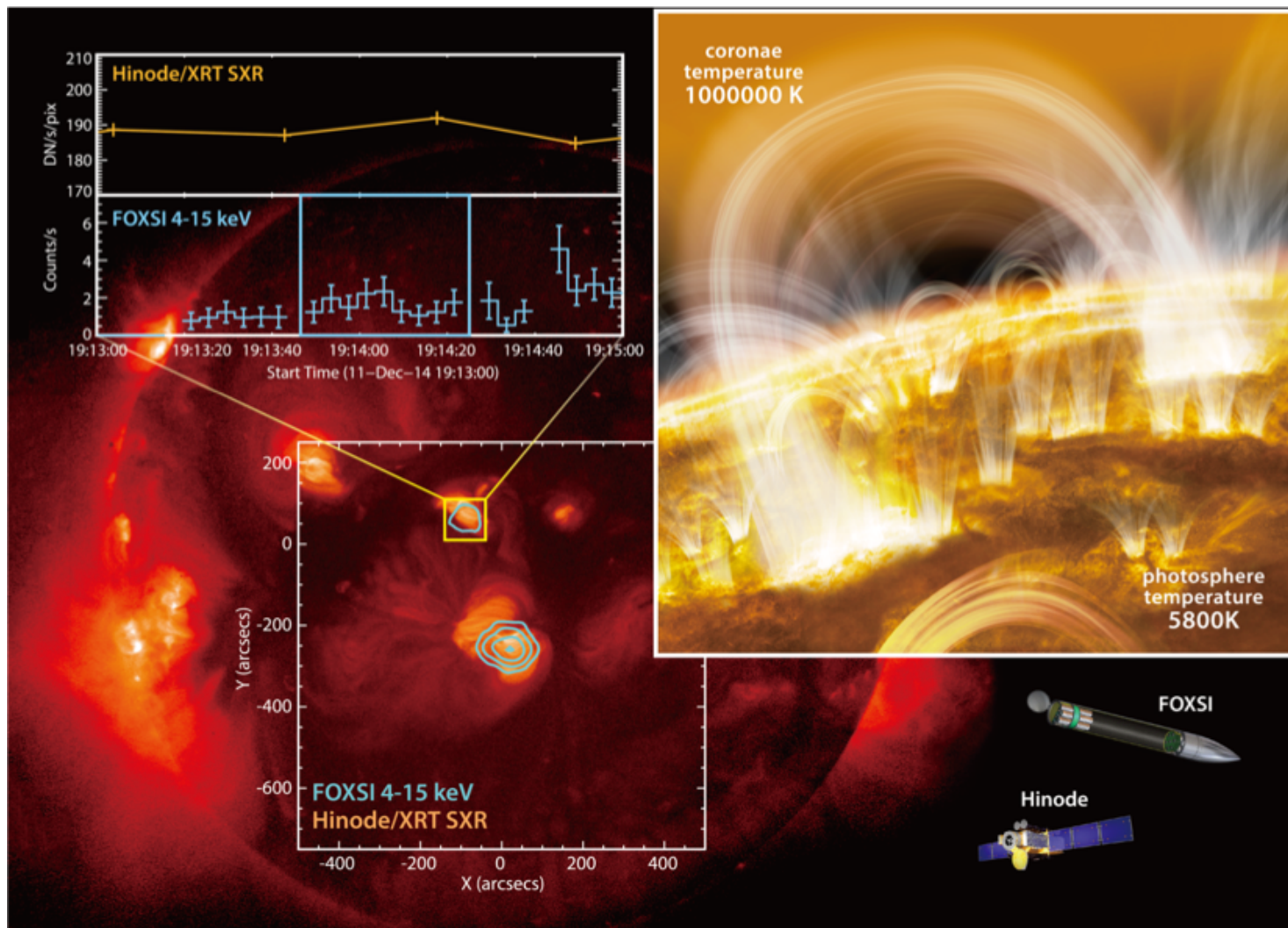
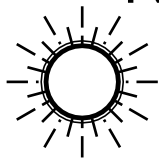
この仕組みは、核融合発電の時に、リチウムイオンなども関係するプラズマ物理学でも重要なテーマだ。専門分野での応用を目的に、研究プロジェクトには東京大学などの研究者も参加している。

太陽の観測では、2018年、米国で打ち上げられる観測用小型ロケット「フォクシー3」に搭載して、実証実験する準備が進む。将来的には、観測衛星に搭載して24時間太陽の観測に使うことも考えられている。

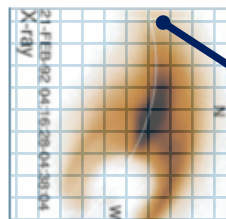
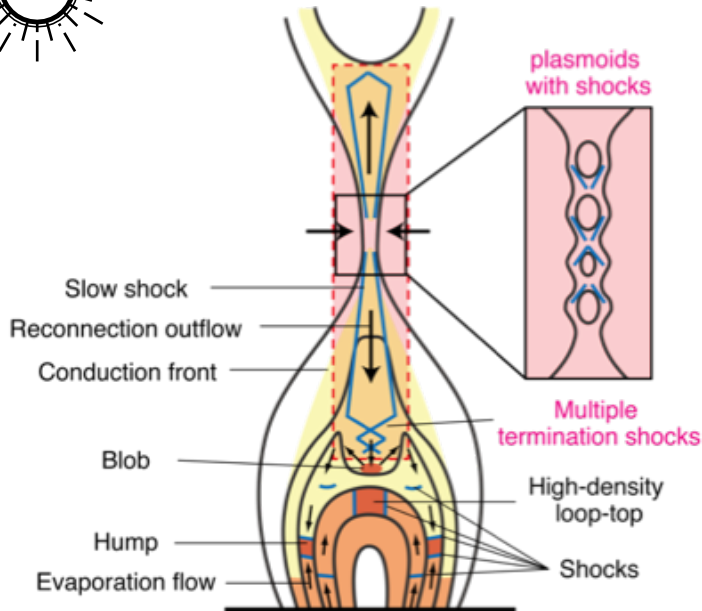
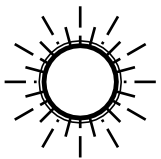
(小玉祥司)



FOXSI-2 (硬X線撮像分光) の成果は Nature Astronomy に掲載 (Ishikawa et al. 2017)



科学目的達成のための方法（撮像分光観測）



thermal + power-law

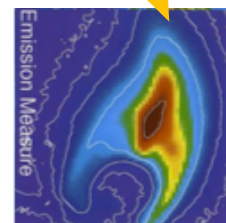
X線領域のスペクトル

熱的成分

非熱的成分
(加速電子の情報)



温度



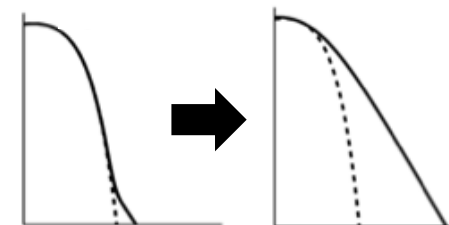
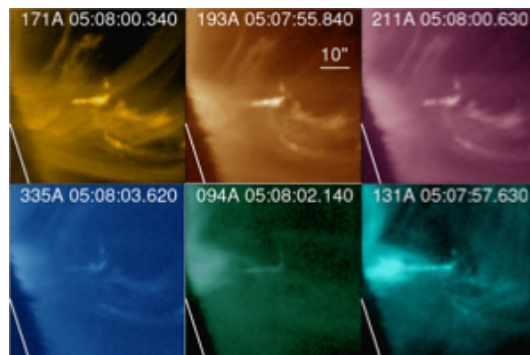
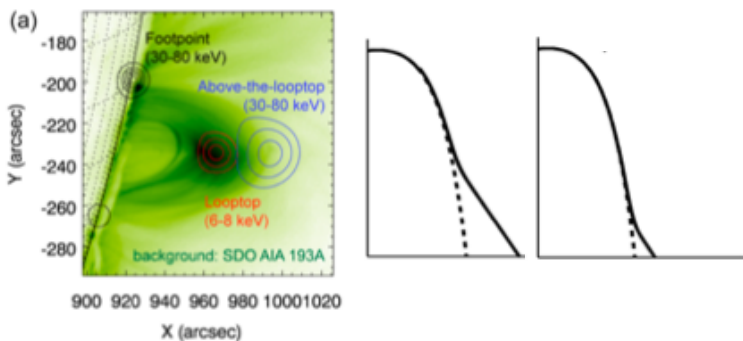
密度



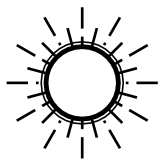
冪指数

[Where] 加速場所を同定

[When] 加速のタイミング・時間発展を追跡



科学目的達成のための方法（偏光分光観測）



[How] 偏光を測定することで、加速電子の非等方性を測定する。

Flare #2

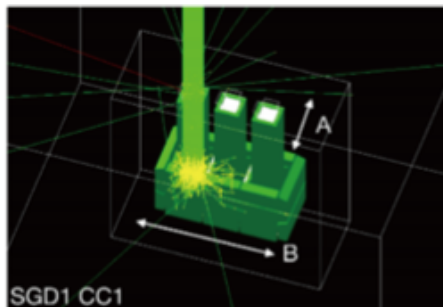
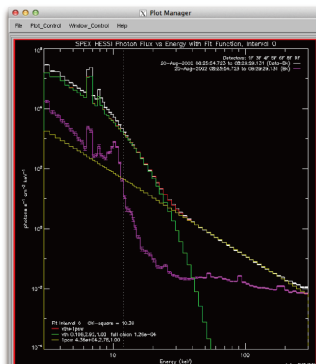
M-class フレアでも少なくとも20%以上の偏光は測定可能の見積り
 → X-class なら更に小さな偏光まで検出できる

GOES class: M3.4

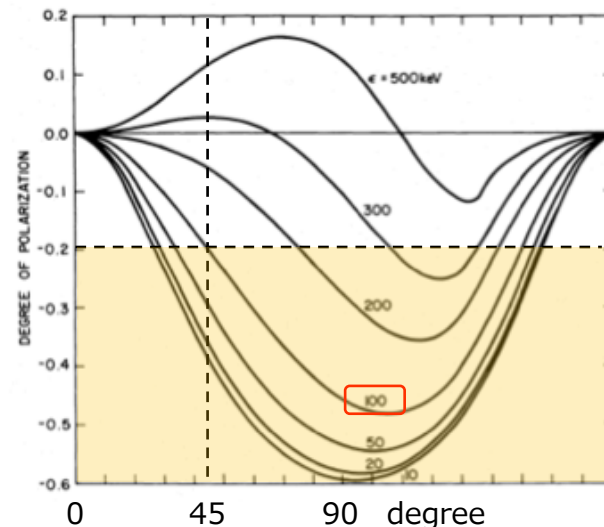
Thermal bremsstrahlung
 Emission Measure
 = $0.105804 \times 10^{49} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$
 Temperature = 2.92287 [keV]

Power-law
 Photon Index = 2.76146
 Normalization = 43630.3
 [photons/keV/cm²/s] at 1 keV

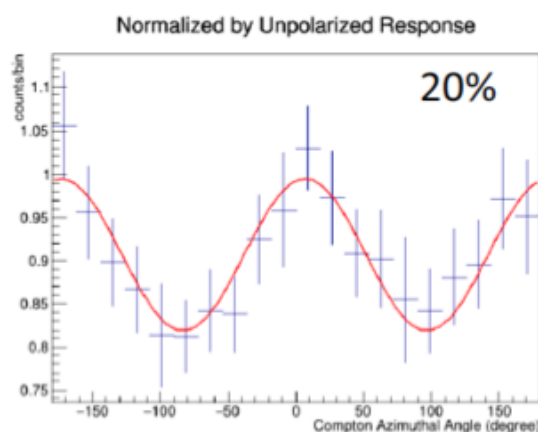
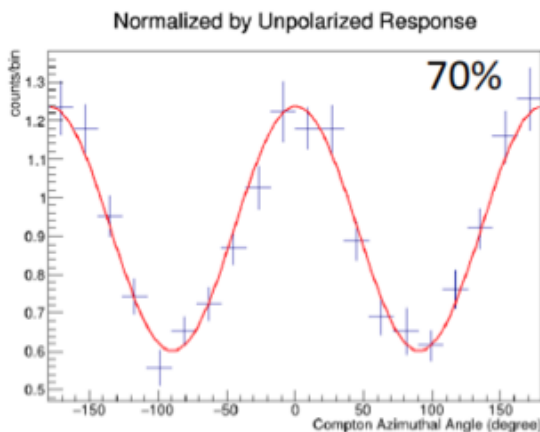
Integration time 214.408 s



モデル

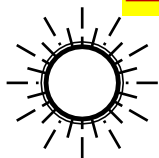


Bai and Ramaty (1978)



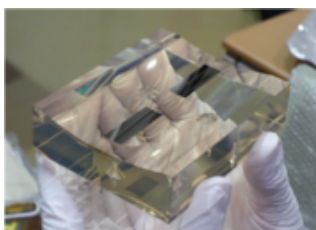
各観測装置のキー技術

基礎開発は完了しており、現在、衛星搭載に向けた開発を進めている。



軟X線撮像分光装置 (0.5 keV ~ 10 keV)

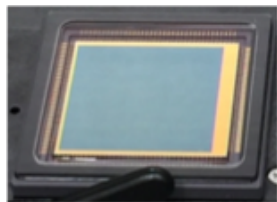
硬X線撮像分光装置 (5 keV ~ 30 keV)



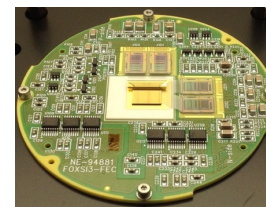
高精度X線斜入射ミラー
空間分解能：< 1 秒角 (ミラー単体)
低散乱： 10^4 @ 20 arcsec



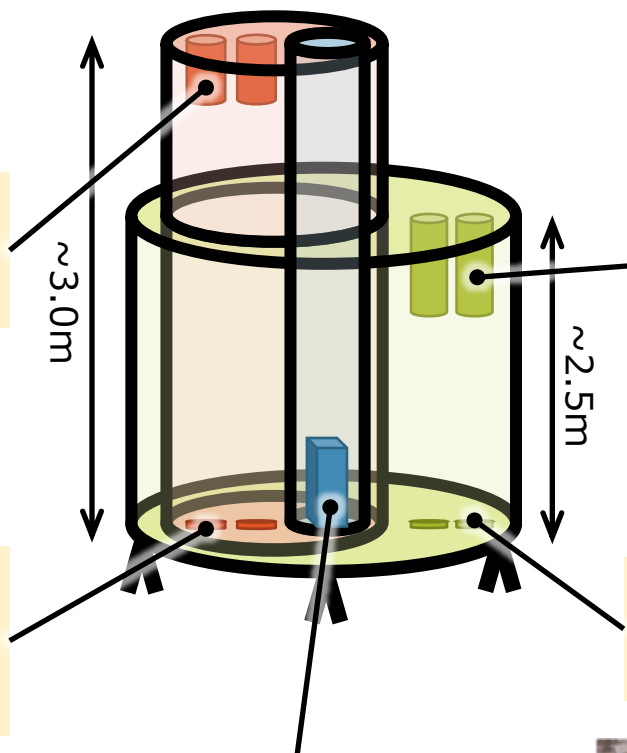
高感度X線斜入射ミラー
空間分解能：~ 8 秒角 (FWHM)
(観測ロケット実験 FOXSI の技術を活用)



高速度・軟X線カメラ
裏面照射型CMOSセンサーを使用
空間サンプリング：~ 0.75秒角
(観測ロケット実験 FOXSI-3 で技術実証)



高感度・硬X線カメラ
ファインピッチ CdTe 検出器を使用
(観測ロケット実験 FOXSI の技術を活用)

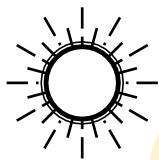


軟γ線偏光分光装置 (20 keV ~ 600 keV)

Si/CdTe コンプトンカメラ
偏光測定：> 60 keV
(ひとみ衛星搭載の SGD の技術を活用)



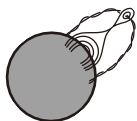
PhoENiX ミッションの特徴



Science Goal: 磁気リコネクションに伴う
粒子加速の理解

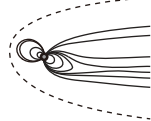
学際・分野間連携

PhoENiX



太陽

MMS etc.



地球・惑星磁気圏

NuSTAR etc.



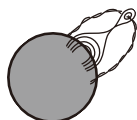
高エネルギー天体

TS-4 etc.



実験室

Science Objectives:

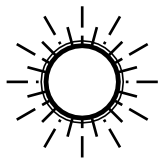


1. 磁気リコネクション中の加速場所を絞り込む [where]
2. 磁気リコネクション中の加速粒子の時間発展の調査 [when]
3. 磁気リコネクション中の加速粒子の特徴の把握 [how]

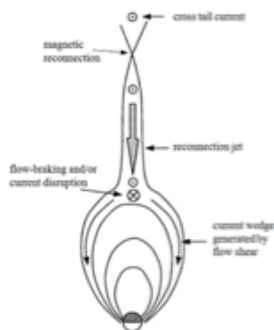
Observation target: 太陽フレア



Science Goal (本ミッションの前提となる大目標) に向けて 太陽 (PhoENiX) と他の天体との比較

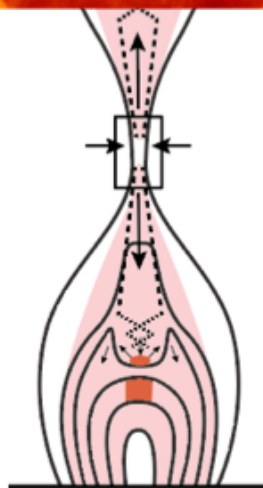
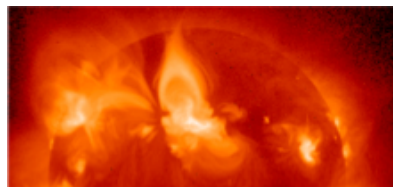


地球磁気圏



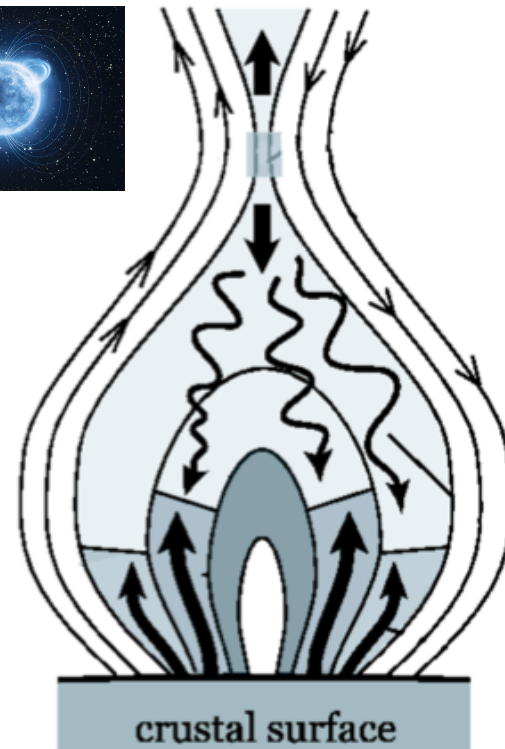
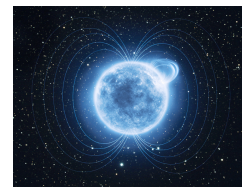
Shiokawa et al., 1997

太陽フレア

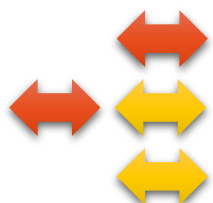


Courtesy of S. Takasao

マグネターフレア

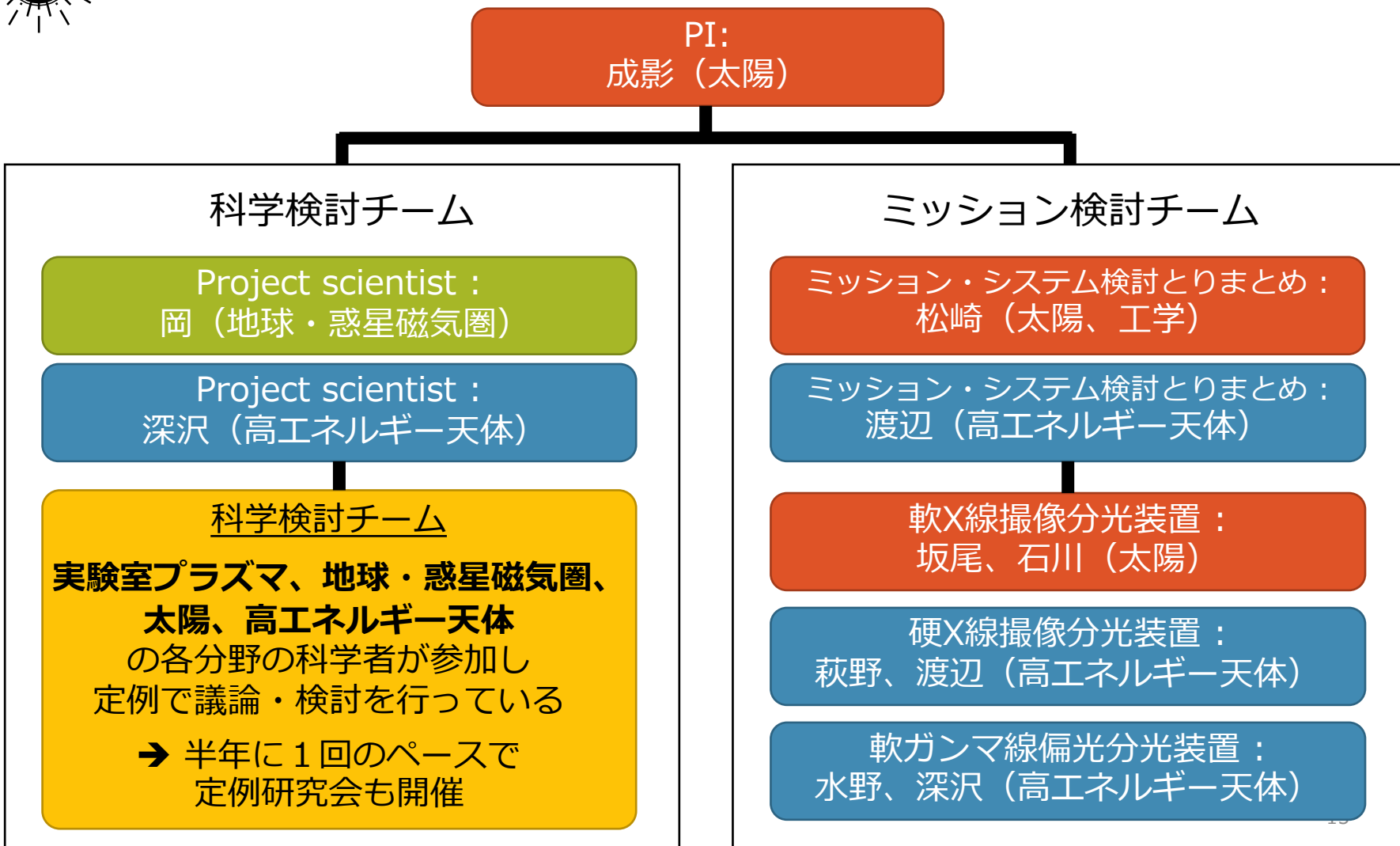
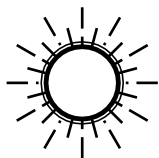


Masada et al. 2010



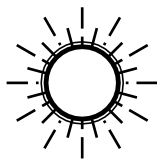
類似点は？ 相違点は？
スケール則は？ 普遍性は？
高エネルギー天体フレアのモデリングのヒントは？

PhoENiX の実施体制： 分野間連携コミュニティとして計画推進中





PhoENiX の活動歴 (2018年9月13日現在)

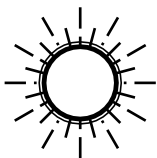


- 2017年4月、6月、7月、9月：勉強会と仲間集め
実験室プラズマ、地球・惑星磁気圏プラズマ、太陽、高エネルギー天体の研究者たちを中心に
- 2017年5月20日：太陽研連への支持を依頼 → ミッション実現に向けて具体的検討を行うことを支持
- 2017年6月26日：ワーキンググループ設立提案書を宇宙科学研究所・理学委員会に提出
理学4分野+工学（海外の研究者（米国、スイス、英国）も含む）の総勢60名のメンバー
- 2017年9月4日：ワーキンググループの設立が理学委員会で承認
- 2018年1月29日：平成29年度公募型小型計画・宇宙科学ミッションコンセプト提案書（PhoENiX）を宇宙科学研究所に提出
- 2018年1月31日：太陽地球系物理学分野（STP）の将来計画（宇宙研へのRFI）にPhoENiXを記載する提案を行った → RFI 改訂原稿に掲載
- 2018年3月9日：高宇連研究会で PhoENiX 計画を紹介。高宇連の将来計画における PhoENiX の位置付けについて議論を開始した → ロードマップ検討資料（2018年6月22日版）に掲載
- 2018年6月19日：平成30年度宇宙理学委員会戦略的基礎開発研究費：採択。予算を用いての本格的な衛星検討を開始
- 2018年7月18日：平成29年度公募型小型計画・宇宙科学ミッションコンセプト提案：不採択
- 2018年7月30日：【学術会議マスタープラン2020】大型（+中型）計画の意志表明書提出
- 2018年9月7日：FOXSI-3 の打ち上げ成功！！
- 現在：次のAO（小型衛星4・5号機）に向けて、科学検討、ミッション検討、装置開発を実施中

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



PhoENiX に対する関連コミュニティの見解



PhoENiX を推進する分野間連携コミュニティ（working group）に関連する既存コミュニティへの働きかけも行っている

• 太陽コミュニティ（太陽研連）の見解

1. 粒子加速は非常に重要な科学課題だと広く認識されている。
2. SOLAR-Cでは対象（科学目的）となっていない。
3. PhoENiX 実現に向けて具体的検討を行うことを支持している。

• 高宇連・将来計画検討委員会での検討

XARMにガンマ線検出器が搭載されないと決定した今では、高感度のガンマ線観測を実現すべきという高宇連の科学目標を担うミッションの一つとして、また、「ひとみ」で失われたサイエンスの1つである粒子加速の解明につながるミッションの推進という意味で、推薦を検討することが望ましい。ただし、高宇連内部での議論が必要であり、その結果をもって最優先課題の判断をするべきである。

PhoENiX FACT SHEET

Physics of Energetic and Non-thermal plasmas in the X- (magnetic reconnection) region



大目標：磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解

PhoENiX の目的：太陽フレアにおける粒子加速の場所・時間発展・特徴を調べる

技術革新 太陽フレア観測では世界初

- ☑ 軟X線～硬X線の2次元集光撮像分光観測
X線なのに高画質 & 高精細、スペクトルも！
- ☑ 高精度の硬X線～軟ガンマ線の偏光分光観測
加速電子はどこから来てどこに向かうのか？

分野間連携による学際的プロジェクト

- ☑ 太陽、地球惑星、高エネルギー天体
- ☑ 室内実験・数値シミュレーション
- ☑ 各学界から粒子加速の専門家が集結
- ☑ 宇宙プラズマの普遍的理解の糸口

☑ SXIS 軟X線分光撮像装置

0.5 – 10 keV with 240 eV FWHM
FOV: 384"x384", Spatial res. 1.5"

コンテキスト
情報

☑ HXIS 硬X線分光撮像装置

5 – 30 keV with ~1 keV FWHM @
FOV: 792"x792", Spatial res. 8"

非熱的成分

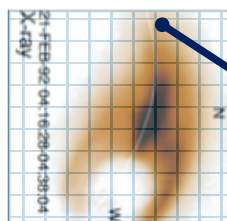
☑ SGSP 軟ガンマ線偏光分光装置

20 – 600 keV (60 – 600 for
FOV: 36'x36' at <150 keV, Sp

異方性

次の太陽活動極大期（2025年頃）

を活かし、最新の技術を用いて、
初めて本当に粒子加速の謎に迫る。

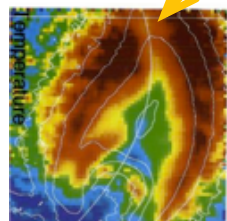


thermal
+ power-law

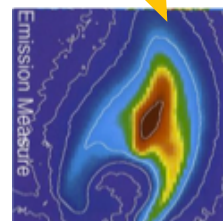
X線領域のスペクトル

熱的成分

非熱的成分
(加速電子の情報)



温度



密度



冪指数