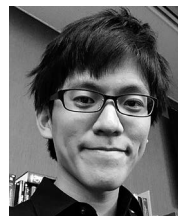


超小型衛星観測データの活用

—太陽軟X線分光観測 MinXSS で迫る フレア粒子加速機構—



長澤俊作¹・川手朋子^{2,3}・成影典之^{4,3}・
高橋忠幸^{5,6}・Amir Caspi⁷

〈¹ Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, 7 Gauss Way Berkeley, CA, 94720, USA〉

〈² 自然科学研究機構 核融合科学研究所 〒509-5292 岐阜県土岐市下石町 322-6〉

〈³ 総合研究大学院大学 〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町湘南国際村〉

〈⁴ 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈⁵ 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

〈⁶ 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈⁷ Southwest Research Institute, 1050 Walnut St Suite 300, Boulder, CO 80302, USA〉

e-mail: nshunsaku@berkeley.edu

磁気リコネクションによる磁気エネルギー解放を理解するうえで、太陽フレアは、多波長で明るく、空間分解可能であるという点で唯一無二の観測対象である。これまで衛星を用いたX線観測によってフレアに伴うプラズマの加熱や、粒子加速過程の理解が進みつつある一方で、軟X線帯域のスペクトル情報が不足しているために熱的・非熱的放射の分離や定量的な評価が難しかった。この現状を打ち破ったのが、超小型衛星 MinXSS であり、空間分解能こそないものの軟X線光子計測型分光観測に成功した。そこで我々は MinXSS の軟X線と RHESSI 衛星の硬X線観測データを組み合わせ、2016年7月に発生した GOES M7.6 クラスフレアのスペクトル解析を実施。その結果、非熱的放射成分に加え、最大で三温度の熱的放射成分を同時検出、その時間発展を最短10秒間隔で追跡することに成功した。

1. 粒子加速と磁気リコネクション

宇宙における粒子加速に伴う非熱的放射は、超新星残骸や活動銀河核ジェット、銀河団など様々なスケールのプラズマ環境下で観測されている。フェルミによる衝撃波統計加速 (Diffusive Shock Acceleration, DSA) [1] は、これらの粒子加速を理解する枠組みとして、加速機構の理論的研究の中心を担ってきた。一方、かに星雲での GeV 帯

域における day スケールの突発的な増光 [2, 3] など、依然として DSA では説明できない観測結果も多く、近年は磁気リコネクションによる直接加速を組み込んだモデルが提唱されてきている。

磁気リコネクションとは、反平行成分を持つ磁力線がつなぎ変わることで効率的に磁気エネルギーがプラズマの加熱や粒子の加速エネルギーへと変換される現象である [4]。例えば、ブラックホールでは、磁気乱流状態の降着円盤上で次々と

磁気リコネクションが発生することで、X線強度の短時間増光を説明しようとしてその重要性が指摘されている [5]。また、複数の磁気島（磁場によって閉じ込められたプラズマ塊）による磁気リコネクション過程を考えることで、従来のフェルミ加速よりも効率的に高エネルギー宇宙線を生成することができるというモデルも提唱されている [6]。ただ、一方で、磁気リコネクションにより解放される磁気エネルギーの大きさや、加速電子への分配比率、加速効率など、詳細はまだまだ不明な部分が多い。

太陽フレアは、磁気リコネクションによるエネルギー解放が起きていると考えられる典型的な現象であり、多波長で非常に明るく、地球からの距離も近いため、空間分解された情報を得ることができる。また、フレアの発生から収束までの時間は100~1000秒と短く、フレアの時間発展を始めから終わりまで通して追跡することが可能である。この点において、太陽フレアは磁気リコネクションを理解する上で唯一無二の観測対象であるといえる。

2. 太陽フレアからの熱的・非熱的放射

2.1 熱的・非熱的放射過程

磁気リコネクションによる粒子加速を理解するために、加速粒子を「その場」観測により直接観測することは、太陽フレアにおいては現実的に難しい。一方、周辺プラズマや電磁場との相互作用により電磁波、特にX線、電波を放出するため、これを観測することで加速電子の情報を引き出すことができる。特に、太陽フレアに伴う放射には大きく分けて、数千万度に加熱されたプラズマからの、熱的 (Maxwell) 分布を持つ電子による「熱的放射」と、熱的分布ではない加速電子による「非熱的放射」の2種類存在する。

図1は、太陽フレアの標準モデルとして知られる“CSHKPモデル”（モデル構築に重要な役割を果たした Carmichael, Sturrock, Hirayama, Kopp

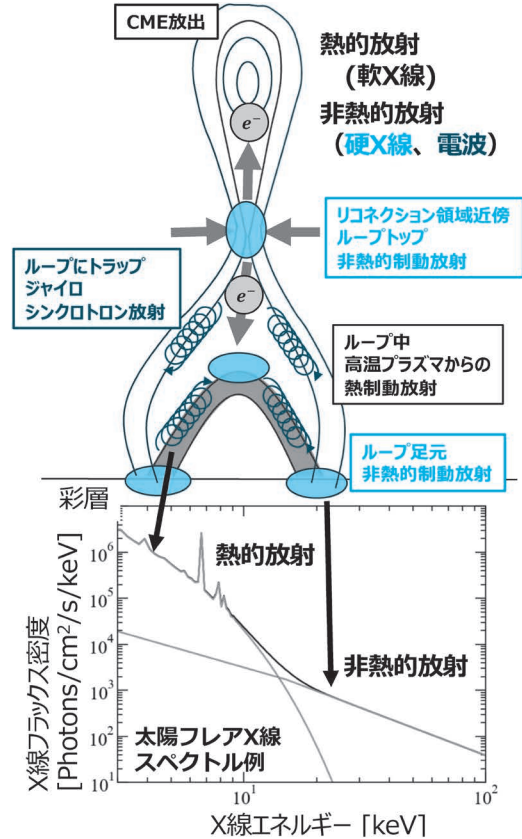


図1 太陽フレアからの熱的・非熱的放射の概要。非熱的放射として、硬X線帯域でのループトップ・ループ足元からの非熱的制動放射、電波帯域でのループにトラップされた非熱的電子からのジャイロシンクロトロン放射。熱的放射として加熱された高温プラズマからの熱制動放射がある。

and Pneumanの頭文字を取っている)と、関連する熱的・非熱的放射機構を示したものである [7]。磁気リコネクションによって下方に加速された電子は磁気ループに衝突し、高密度プラズマの彩層へと突入する。このとき、電子はループトップ上空およびループ足元で非熱的制動放射によりPower-law型のスペクトルを持つ硬X線を放射する。ただし、ループ足元のプラズマ密度はループトップ上空と比較し二桁以上高いため、太陽縁付近で足元が隠れていない限りループ足元からの放射が卓越する。ループ足元に突入した電子は、

クーロン衝突によりエネルギーを失い彩層プラズマを加熱する。このとき加熱されたプラズマがフレアループを満たし（彩層蒸発）、熱制動放射によって軟X線を放射する。また、非熱的電子の一部は磁気ミラー効果によりループにトラップされ、特に準相対論的電子（ ~ 1 MeV）はジャイロシンクロトロン放射により電波を放射する。一方で、上方に噴出したプラズマは、コロナ質量放出（CME）として惑星間空間内へと放出される。このように、熱的・非熱的放射は、磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速、プラズマの加熱過程と密接に関わっている。そのため、フレアに伴うX線放射を熱的・非熱的放射に正確に分離し、熱的放射の制動放射連続成分や輝線成分による温度構造の推定と時間発展の追跡を行うと共に、さらには非熱的放射との関連を追うことが重要である。

2.2 太陽フレアX線観測の問題点

1958年 Petersonらによる気球観測によって太陽フレアで硬X線放射が初めて確認 [8] されて以降、ようこう衛星、ひので衛星、そして Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI 衛星) によって軟X線、硬X線観測が行われてきた。その結果、通称マスタ・ソースとよばれる加速された電子の衝突した結果であると考えられるループトップと足元からの硬X線源の観測 [9] や、軟X線と電波の同時観測によって磁気リコネクション領域近傍に非熱的電子が存在していることが見つかる [10] など、磁気リコネクションが太陽フレアの発生機構として確立するうえで重要な観測結果は挙がっているものの、いまだ加速機構の詳細を結論づけるまでには至っていない。

その原因の一つとして、軟X線帯域における分光観測データの不足が挙げられる。従来の軟X線観測は、ようこう衛星ブラッグ結晶分光器のようにエネルギー範囲は狭いが高エネルギー分解能 (≤ 0.1 keV) での測定か、ようこう衛星の軟X線

望遠鏡や GOES 衛星 X-ray Sensor (XRS) のように複数のフィルターと光度計を組み合わせたエネルギー範囲は広いが低エネルギー分解能 (≥ 1.0 keV) またはバンドパス積分値での測定であった。そのため、スペクトル解析による熱的・非熱的放射の分離が難しく、GOES 衛星 XRS による「 $0.5\text{--}4.0$ Å ($3.1\text{--}24.8$ keV)」と「 $1.0\text{--}8.0$ Å ($1.6\text{--}12.4$ keV)」の2バンドの積分フラックスの比率を元に、単温度成分を仮定して温度を推定する [11] しかなく、熱的放射成分に不定性があった。また、RHESSI 衛星は、大規模なフレアになるとパルスのパイルアップ（複数のX線光子による信号が重なって区別できなくなる現象）を避け、硬X線に対する感度を維持するために、検出器の前にアッテネータを挿入する [12] ため、軟X線に対する感度に制限がかかる。

熱的放射の多温度構造は Solar Dynamics Observatory (SDO 衛星) など極紫外線帯域の輝線放射を元に Differential Emission Measure (DEM) 解析も行われてはきたが、 ~ 20 MK を超える高温のプラズマからの熱的放射や非熱的放射に対して感度がない。また、仮定しているイオン化平衡まで到達する時間が長い可能性があるため、イオン化状態にあまりよらない連続成分を用いたX線スペクトル解析の方が、多温度構造の詳細な時間発展を調べるのに適している。

そのため、フレアの熱的放射成分の多温度構造とその詳細な時間発展を理解するためには、広い軟X線帯域におけるエネルギー分解能、空間分解能、時間分解能を兼ね備えた光子計測観測（フォトンカウンティング、X線光子1個1個の位置・時間・エネルギー情報を計測）実現が重要となる。このような観測はX線天文学分野では、すぐく衛星の CCD 検出器をはじめ、普通に行われてきたが、太陽フレア観測においては現象の時間スケール (Alfvén time scale) が数秒から数十秒程度と短く、光子の数も圧倒的に多くなる。そのため、おおよそミリ秒程度の露光時間での連続観測

が必須となるが、CCD検出器での1回の露光と読出しに1秒程度かかるため、これまで実現不可能であった。

3. 超小型衛星 MinXSS による軟X線分光観測の実現

このような現状を打ち破り、軟X線帯域で光子計測観測を実現したのが、超小型衛星 Miniature X-ray Solar Spectrometer (MinXSS) である。MinXSSはコロラド大学の Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP) の大学院生が中心となって開発を行った超小型衛星である [13]。近年の分光観測で唯一、軟X線帯域で0.8–12 keVの広いエネルギー範囲、0.15 keV (FWHM) の高いエネルギー分解能での分光観測に成功した。空間分解能こそないものの、フレアイベント時には10秒ごとに積分しスペクトルを取得しており、RHESSI衛星による硬X線観測データと組み合わせスペクトル解析を行うことで、熱的・非熱的放射の時間発展を詳細に追跡することができる。大きさはCubeSat規格で3 U (1 U=10 cm×10 cm×11.35 cm) と非常に小さいながら、衛星制御などを行うバスシステムに加えて、主要となる科学観測装置としてX123と呼ばれるスペクトロメータが搭載されている [14]。

X123は、空間分解能こそないものの、0.15 keVと高いエネルギー分解能 (FWHM) に加え、最大カウントレート 8000 counts/s と高い光子分別能力を併せ持つ。Amptek社の製品であるX123-SDDを利用しており、厚さ24 μmのベリリウム窓とその背後にある厚さ500 μmのSi空乏層を備えたシリコンドリフト検出器 (Silicon Drift Detector, SDD)、デジタルパルスプロセッサ (Digital Pulse Processor, DPP) で構成されている。SDDは他の半導体検出器と同様に、入射したX線がSi

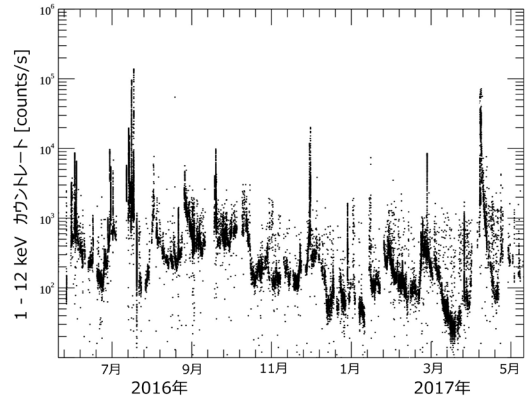


図2 MinXSSの1年間の観測ライトカーブ。1-12 keVの総カウントレートを示している。

半導体結晶内で光電効果により生成した電子・ホール対を収集し、収集した電荷量から入射X線のエネルギー計測を行う。SDDではリング状に配置された電極によるドリフト電場によって、電荷を中央の小さなAnodeに効率的に集めることで、静電容量を小さくし雑音を抑え、高速な信号を得ることが可能となる。また、熱雑音を抑えるため、検出器はペルチェ素子による熱電冷却によって、およそ-50℃に冷却されている。その後、収集した電荷による信号は、DPPによってデジタル信号として、波形整形、波高計測、スペクトル作成処理が行われる。

2016年5月に国際宇宙ステーションより軌道投入が行われてから2017年5月に運用終了するまでの約1年間、7個以上の中規模フレア (Mクラス^{*1})、40個以上の小規模フレア (Cクラス) の観測に成功した [15]。図2は、MinXSSの1年間の軟X線帯域のライトカーブであり、各ピークがフレアの発生時期に対応している。MinXSSで観測された最大規模のフレアである2016年7月23日GOES M7.6クラスフレアのスペクトル時間発展を図3に示す。超小型衛星ではあるもののX123によ

^{*1} GOES軟X線強度によるフレアの規模の分類。フレア中の1.0–8.0 Åの最大フラックスを元に対数目盛で分類し、文字A/B/C/M/Xは、10⁻⁸から10⁻⁴ W/m²のフラックスの指数、数字は係数を示す (例: M7.6=7.6×10⁻⁵ W/m²)。

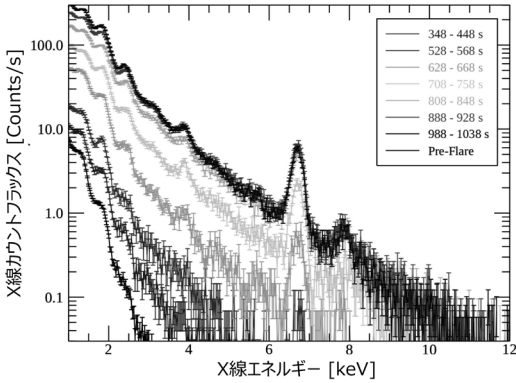


図3 2016年7月23日GOES M7.6クラスフレアイベントのMinXSSによる軟X線帯域のスペクトル。0.15 keVの高いエネルギー分解能 (FWHM) で最短10秒ごとにスペクトル変化を追跡可能。

り軟X線帯域でエネルギー、時間発展について非常に詳細なスペクトルが得られており、RHESSI衛星による硬X線観測データと組み合わせスペクトル解析を行うことで、熱的放射の多温度構造や放射量（エミッションメジャー）、各元素組成など様々な物理量を引き出せることが期待できる。このように、超小型衛星でも新規性のある検出器を打ち出せば、非常に高統計である太陽フレア観測のメリットである。

このような貴重なデータにもかかわらず、MinXSSのデータは開発チームによる初期解析 [15] に留まっており、マニュアルも未整備であった。近年、MinXSSによりフレア中の元素組成の時間発展を調べた研究も報告 [16] されたものの、熱的・非熱的放射を分離する上で重要となるRHESSIなど硬X線観測データと組み合わせたスペクトル解析は行われてこなかった。そこで、名古屋大学宇宙地球環境研究所の国際共同研究による援助を受け、2019年9月から1週間、MinXSSの開発拠点であるコロラド州デンバーの研究機関Southwest Research Institute (SwRI) を訪問、開発者であるTom Woods博士、Amir Caspi博士らと議論を行い、解析方法の整備を一から行った。

4. MinXSSとRHESSIを組み合わせた広X線帯域スペクトル解析

4.1 2016年7月23日に発生したGOES M7.6クラスフレアイベント

本研究では、磁気リコネクションによるエネルギー解放、および粒子加速過程理解を目指すうえで重要となる、太陽フレアに伴う熱的放射、非熱的放射の分離、およびその時間発展を調査するため、超小型衛星MinXSSによる軟X線、およびRHESSI衛星の硬X線観測データを組み合わせたスペクトル解析を行った。本研究の解析には、MinXSSにより～1000秒間の長時間観測が行われており、かつRHESSIによる硬X線観測も行われていることから、2016年7月23日に起こったGOES M7.6クラスフレアの比較的大規模なフレアを対象とした。

GOES M7.6クラスフレアにおける、MinXSS、GOESによる軟X線フラックス、RHESSIによる硬X線フラックス、野辺山強度偏波計NoRPによる17 GHzの電波強度の時間発展を図4に示す。5:00ごろより徐々に熱制動放射による軟X線フラックスが上昇、GOES XRSの高エネルギー側のchのフラックス (0.5-4.0 Å) はフレア開始後～800秒後にピークに達する。また、650秒および850秒付近において非熱的放射に対応する硬X線と電波放射がピーク状に急上昇しており、その間の時間帯においても継続的な電波放射と小さなスパイク状の硬X線放射が見られる。その後、軟X線、硬X線のフラックスはゆるやかに減少し、1700秒付近において再びスパイク状に急上昇している。

4.2 太陽フレアスペクトル解析の問題点

熱的放射、非熱的放射成分に分離し、温度、エミッションメジャーの推移、非熱的放射のべきの時間発展を詳細に追うためには、スペクトル解析が必要となる。しかし、太陽分野で通常使用されるX線スペクトル解析ツールObject SPectral EXec-

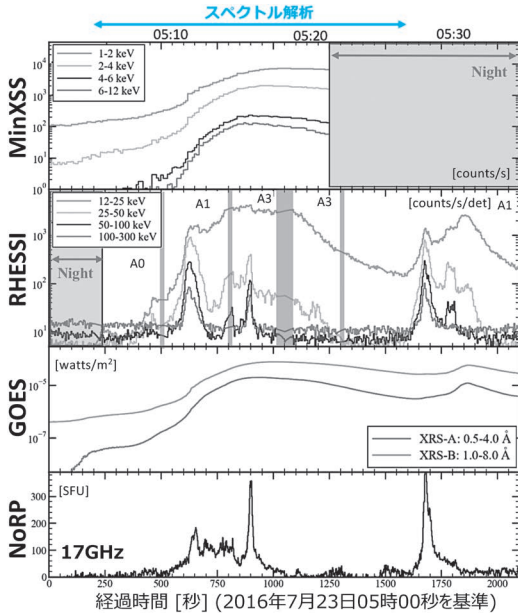


図4 2016年7月23日GOES M7.6クラスフレアのライトカーブ。MinXSS, GOESによる軟X線, RHESSIによる硬X線フラックス, NoRPによる17 GHzの電波強度の時間変化を示し, Nightは衛星が地球の影に隠れている時間帯。

utive (OSPEX) [17] では, 軟X線のMinXSSと硬X線のRHESSIなど, 複数の観測機器のデータを組み合わせてフィッティングを行うことができない。このことがスペクトル解析を行ううえで大きなボトルネックとなっている。

この問題を解決すべく, 本研究ではOSPEXに代わり, 太陽フレアスペクトル解析にX線天文学分野の標準的なスペクトル解析ツールXSPEC [18]の活用を図った。XSPECは観測機器に依存せず設計されており, Forward Fittingによりフィッティングを行う。Forward Fittingでは, まず熱制動放射など放射モデルを選択し, 温度などパラメータを決定, フォトンフラックスを計算する。その後, 検出器のレスポンス(エネルギー分解能, 検出効率など)を畳み込み, 検出器で観測されるカウントスペクトルに変換, これを実際に観測されたカウントスペクトルと比較(χ^2 検定など)しながら, パラメータの調整, モデルの再計算を繰り返

すことでパラメータを最適化する。

XSPECに必要なファイルは, スペクトルファイル(PHA)とレスポンスファイル(ARF/RMF)であり, OGIP data format [19, 20]として形式が定義されている。そこで, OSPEXに対応する太陽観測データをXSPECへ形式変換するソフトを開発することで, MinXSSによる軟X線とRHESSI衛星の硬X線観測データを組み合わせた広X線帯域スペクトル解析が初めて可能となった。また, 粒子加速の研究を行うX線天文学分野の研究者にとって太陽観測データを扱いやすくなり, 後述するFOXSI実験の解析ソフトにも実装予定である。

4.3 太陽フレアの多温度構造の時間発展

以上のソフトを使い, 1.5 keVから100 keVの範囲で, X線フラックスの強さに応じて最短10秒毎に時間を区切り, スペクトル作成, フィッティングを行った。モデルは, 熱的放射として光学的に薄い高温プラズマからの熱放射(vaptec), 非熱的放射としてBroken Power-law(bknpower)を用いた。フレアの各時間帯におけるスペクトル構造の変化を図5に示す。フレア開始初期から最初の硬X線ピークまでの時間帯(I)では, GOESの2バンドのフラックス観測から通常示唆されるおよそ18 MKの高温熱放射成分とPower-law型の非熱的放射成分に加え, 更におよそ3 MKの低温成分が存在する。その後, 最初の硬X線ピーク後フレアピーク時の時間帯(II)になると, 低温成分, 高温成分のエミッションメジャーは2桁程度増加するとともに, 非熱放射のべきがソフトになるに従って30 MKを超える超高温熱放射成分が現れはじめる。その後, フレア減衰期(III)には, 非熱的放射は減衰し, 各熱放射成分の温度が徐々に冷えていく。このように, 本研究の解析により, フレアの進行に伴い最大三温度の熱放射成分が同時検出され, さらにそれぞれの温度・エミッションメジャーを最短10秒間隔で追跡することに初めて成功した。

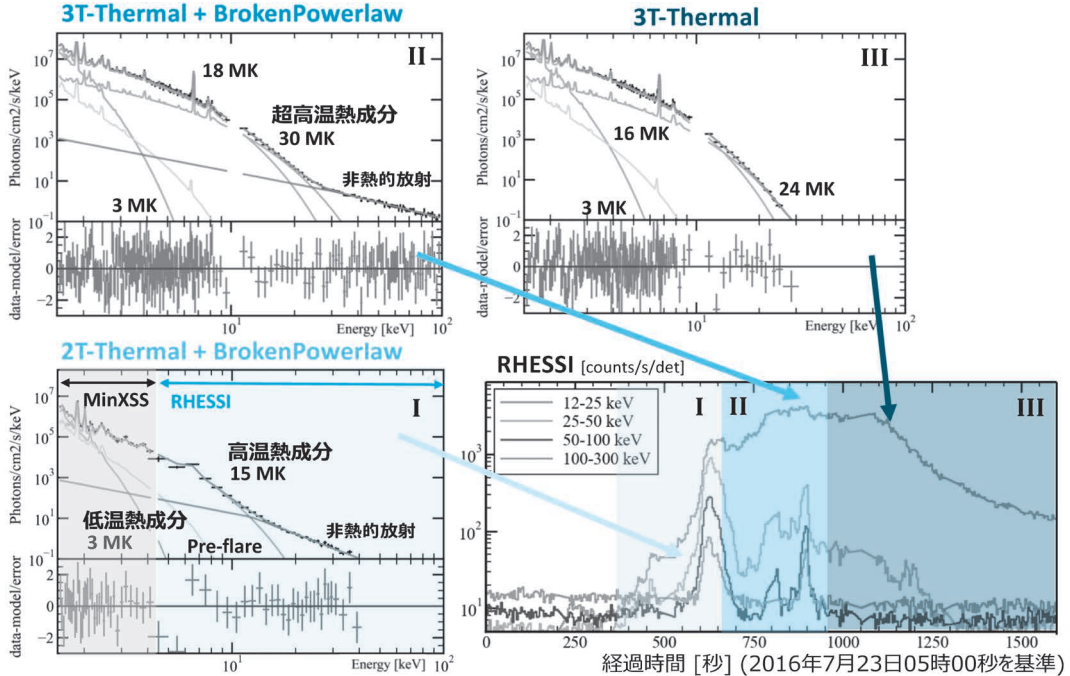


図5 MinXSS の軟X線と RHESSI の硬X線を組み合わせたスペクトルの時間発展。非熱的放射成分に加え、低温 (~3 MK) と高温 (~18 MK) 成分、さらにフレアピーク時より「超高温」(~30 MK) 成分の三温度構造の時間発展を追跡可能に。全ての時間帯のスペクトル変化の動画は [21] 参照。

4.4 各放射成分の起源

時間発展の情報は各放射起源を特定する鍵となる。そこで、各熱放射起源を推定するため、SDO 衛星搭載の Atmospheric Imaging Assembly (AIA) による極端紫外線画像を用いた DEM 分布の計算と、RHESSI 衛星を用いた硬X線像合成を行った。詳細は、投稿論文 [21] に譲るが、得られた結果をまとめると以下の通り。ただし、フレアループ構造が複雑であること、RHESSI 衛星ではダイナミックレンジが一桁程度であることから、高温・超高温熱放射成分については放射場所の特定はできなかった。

低温熱放射成分

フレアループに当たる箇所では 3 MK に対応する DEM が急激に増加していること、硬X線の放射に伴い、エミッションメジャーが二桁上昇するとともに温度が低下していることから、彩層蒸発に伴ってフレアループを満たしたプラズマに対応し

ていることが示唆される。

高温熱放射成分

SDO 衛星 AIA, RHESSI による像合成からは判別が難しいが、低温成分と同じく硬X線のピークに伴って、エミッションメジャーが 200-300 秒の時間スケールで急激に上昇していることから、彩層蒸発に伴いフレアループを満たしたプラズマが起源であると示唆される。

超高温熱放射成分

高温成分と同じく SDO 衛星 AIA, RHESSI による像合成からは判別が難しいが、非熱的電子のペギがソフトになる過程で超高温成分が出現していること、非熱的電子によるジャイロシンクロトロン放射と考えられる電波放射が継続的に存在することから、ループにトラップされた非熱的電子が徐々に熱化したものが起源である可能性が示唆される。

5. 今後の展望

本研究により、太陽フレアの熱的成分の多温度構造と非熱的成分の時間発展追跡に成功した。ただし、軟X線帯域での空間情報と硬X線帯域でのRHESSI衛星のダイナミックレンジの不足のため、各放射成分の起源について決定的な証拠を掴むまでには至っていない。そのため、軟X線、硬X線両帯域でダイナミックレンジを改善した撮像分光観測の実現が必須となる。

日米共同太陽観測ロケット実験Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI) [22] では、Marshall Space Flight Center (MSFC)/NASA・名古屋大学が中心となり開発を進めているWolter-I型斜入射X線望遠鏡と、国立天文台、東京大学Kavli IPMU・ISAS/JAXAがそれぞれ中心となり開発を進めている軟X線、硬X線焦点面検出器を組み合わせることで、直接撮像分光観測の実現を目指している。これまで太陽活動が比較的穏やかな静穏領域を対象に3回の打ち上げに成功し、RHESSIの約100倍のダイナミックレンジと7秒角の角度分解能の達成によって、約5分間と限られた観測時間にもかかわらず、従来の観測感度では発見できなかった微小なフレア現象（ナノフレア）が発生していることを示すなど重要な科学的成果を挙げている[23]。さらに、2024年4月17日には、4回目の打ち上げFOXSI-4 [24] が、米国アラスカ州ポークラットより無事打ち上げに成功した [25]。FOXSI-4は、NASAによる初の「フレアキャンペーン」として実施し、太陽の状態をリアルタイムでモニターすることで、GOES M1.8クラスフレアの発生と同時に打ち上げを行った。打ち上げに向け日本のメンバーも開発・準備に大きく貢献しており、昨年2023年度には、米国ミネソタ大学、MSFC、カリフォルニア大学バークレー校、ホワイトサンズを中心に長期滞在し準備を進め、アラスカでの打ち上げオペレーションにも日本から8名（うち学生5名）が参加した。また、FOXSIを衛星

に発展させたPhysics of Energetic and Non-thermal plasmas in the X (=magnetic reconnection) region (PhoENiX) 衛星計画 [26] も2030年代初頭の打ち上げを目指し、提案されている。このような観測が実現すれば、太陽フレアの足元とループトップを含むフレアループからの放射とその時間発展を直接比較ができるようになり、本研究で得られた各熱的・非熱的成分の起源の解釈を検証、改善することが可能となる。

謝辞

本稿の内容は、筆者らが2022年に発表した投稿論文 [21] に基づいているため、詳しくはそちらをご覧ください。本研究は、文部科学省科学研究費補助金（17K14314, 18H03724, 18H05457, 20H00153, 21KK0052, 22H00134, 22J12583, 22KJ0873）、及び名古屋大学宇宙地球環境研究所の国際共同研究による支援を受けている。また、筆者である長澤俊作は文部科学省卓越大学院「東京大学変革を駆動する先端物理・数学プログラム」、及び東京大学JSRフェローシップによる支援を受けている。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Blandford, R. D., & Ostriker, J. P., 1978, ApJ, 221, L29
- [2] Abdo, A., et al., 2011, Science, 331, 739
- [3] Buehler, R., et al., 2012, ApJ, 749, 26
- [4] Yamada, M., 2022, Magnetic Reconnection: A Modern Synthesis of Theory, Experiment, and Observations (Princeton University Press)
- [5] Kawaguchi, T., et al., 2000, PASJ, 52, L1
- [6] Hoshino, M., 2012, PRL, 108, 135003
- [7] Benz, A. O., 2017, Living Rev., Sol. Phys., 14, 1
- [8] Peterson, L., & Winckler, J., 1959, J. Geophys., 64, 697
- [9] Masuda, S., et al., 1994, Nature, 371, 495
- [10] Narukage, N., et al., 2014, ApJ, 787, 125
- [11] White, S., et al., 2005, Sol. Phys., 227, 231
- [12] Smith, D. M., et al., 2003, SoPh, 33
- [13] Mason, J. P., et al., 2016, J. Spacecr Rockets, 53, 328
- [14] Moore, C. S., et al., 2018, Sol. Phys., 293, 1
- [15] Woods, T. N., et al., 2017, ApJ, 835, 122
- [16] Suarez, C., & Moore, C. S., 2023, arXiv preprint arXiv:2308.16235
- [17] Tolbert, K., & Schwartz, R., 2020, ASCL, ascl:2007.018

[18] Arnaud, K., 1996, ADASS V, 101, 17
 [19] Arnaud, K., et al., 2009, OGIP/92-007
 [20] George, I. M., et al., 2007, CAL/GEN/92-002
 [21] Nagasawa, S., et al., 2022, ApJ, 933, 173
 [22] Krucker, S., et al., 2009, Proc. SPIE, 7437, 48
 [23] Ishikawa, S., et al., 2017, Nat. Astron., 1, 771
 [24] Buitrago-Casas, J. C., et al., 2021, Proc. SPIE, 11821, 210
 [25] <https://cse.umn.edu/college/news/u-m-researchers-lead-nasas-first-solar-flare-observation-campaign> (University of Minnesota, Web Release, 2024.04.18)
 [26] Narukage, N., et al., 2020, Proc. SPIE, 11444

Utilizing CubeSat Observation Data: Investigating Solar Flare Particle Acceleration Mechanisms through MinXSS Solar Soft X-ray Spectroscopic Observations

Shunsaku NAGASAWA¹, Tomoko KAWATE^{2,3}, Noriyuki NARUKAGE^{3,4}, Tadayuki TAKAHASHI^{5,6} and Amir CASPI⁷

¹*Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, 7 Gauss Way Berkeley, CA, 94720, USA*

²*National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki, Gifu 509-5292, Japan*

³*The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Shonan-Kokusai Village, Hayama, Miura, Kanagawa 240-0193, Japan*

⁴*National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

⁵*Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU, WPI), The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan*

⁶*Department of Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan*

⁷*Southwest Research Institute, 1050 Walnut St Suite 300, Boulder, CO 80302, USA*

Abstract: The lack of spectral information in the soft X-ray band has made it difficult to separate thermal and nonthermal emissions from solar flares. MinXSS CubeSat is a game changer and succeeded in soft X-ray photon-counting observations of solar flares in 2016. We conducted a wide-band X-ray spectral analysis of the M7.6 class flare of July 23, 2016, with soft X-ray data from MinXSS and hard X-ray data from the RHESSI satellite. As a result, we succeeded in simultaneously detecting three temperatures of thermal emission components and nonthermal emission components and tracing their time evolution with a 10 s cadence.