

全天 X 線監視による巨大恒星フレアの観測的研究 An X-ray Survey of the Most Energetic Stellar Flares

物理学専攻 佐々木 亮

18S2100002L

研究背景

太陽フレアは、太陽表面で発生する突発的な爆発現象である。これは蓄えられた磁場のエネルギーが解放される、磁気リコネクションによって発生すると考えられている。太陽以外の恒星のフレアの発生機構も、同様と考えられている^[1]。磁気リコネクションによって加速粒子が生成され、それらが星表面の彩層に衝突することで運動エネルギーが彩層に渡され、熱化される。これによって彩層のガス圧が増幅されることで、彩層蒸発と呼ばれる数億度を超える高温高密度のプラズマの上昇流を作り出す。これらが磁力線内を満たすことで、熱的制動放射による X 線放射が観測される。

他恒星でもフレアが検出されている。太陽及び恒星のフレアは、規模が大きければ大きいほど、発生頻度が冪乗で低くなるため、検出が難しい。また、超巨大フレアでは、それを発生させる星と同じ体積程度のプラズマが瞬時に作られることが知られ、その温度は 1 億度以上にものぼる。このような超高温大規模フレアがどのような機構で発生するか、またそのプラズマの形状はどのようになっているかという点は、観測において空間分解ができない恒星フレアでは未解明である。

様々な規模のエネルギーの恒星フレアが発見される中、全天 X 線監視装置 MAXI が検出するフレア群は、エネルギーが $10^{34} - 10^{39}$ erg と、最大級の太陽フレアエネルギー (10^{32} erg) を最大で 1,000 万倍上回る。MAXI は国際宇宙ステーションに (ISS) に搭載され、その地球周回 (92 分) に合わせて全天を X 線でスキャンする。そのため、発生頻度が低く通常の望遠鏡では検出が困難であった大規模な恒星フレアの検出に長けている。過去に MAXI が検出してきたフレアは、X 線光度、継続時間、温度、エミッションメジャー (EM) でフレア観測史上最大規模を示す^[2]。坪井氏らの MAXI の初期 2 年のデータを使用した恒星フレアの研究によって、以前から柴田氏らなどによって指摘されていた太陽から恒星フレアまで成り立つ EM vs. kT ^[1] が MAXI の巨大フレア群まで成り立つことが明らかになった^[2]。更に坪井氏らによって、フレア光度と継続時間の間にも太陽から MAXI フレアまで成り立つ正の相関が新たに発見され、フレアの発生から減衰までのメカニズムに普遍的な機構があることが示唆されている^[2]。巨大フレアの発生頻度の低さから MAXI 以外でのそれらの検出は困難であるが、MAXI の X 線感度では詳細な時間発展スペクトルが得られないため、詳細な冷却機構の解明には至っていない。そこで、MAXI で検出したフレアを他観測機でフォローアップ観測することによって、冷却機構及びその形状に言及できるのではないかと考えた。他方で、急激に明るくなり、緩やかに減衰していく恒星フレアの X 線光度の時間変動において、MAXI 以外の観測装置では、限られた観測時間とその発生予測の困難さ、変動のタイムスケールの長さから、フレア光度曲線を立ち上がりから減衰しきるまでの光度変動の全容をえることが難しい。この時間変化は、フレアプラズマの時間発展を示していると考えられることから、MAXI を用いることで未解明の巨大恒星フレアの形状を明らかにできるのではないかと考えた。

本研究では、フレアの光度変動に注目し、恒星フレアの幾何を明らかにすることを目的とする。さらに、MAXI

以外で観測することが難しい観測史上最大規模のフレアを狙ったフォローアップ観測を行い、未解明の詳細なプラズマの冷却過程を明らかにすることを目的とする。

研究手法と結果

MAXI の過去 10 年間 (2009 年 8 月 15 日-2019 年 8 月 14 日) のデータからフレア調査を行なった。フレア調査には 2 手法を採用した。1 つは宇宙全天から自動で突発現象を検出する "nova-alert system"^[3] である。本システムは日本大学の根来氏らによって開発され、全天画像を ISS の 1 軌道から 4 日の 8 タイプで積分し、カウント数をバックグラウンドとその天体の過去の明るさと比較して突発現象を抽出するものである。これによって抽出された恒星フレアの候補現象に対して、私が画像を作成して、その検出の有意性を検証した。本検証では、バックグラウンドのカウントのゆらぎ (σ) に対して 5σ 以上増光しているものを本物のフレアと認めることとした。これにより 28 天体から 100 発を超えるフレアが検出された。加えて、これら 28 天体から更にフレアを発見するために、天体毎に ISS の 1 周期 bin の 10 年間の光度曲線を私が作成し、そこから目視で突発的に増光するデータをフレア候補として自ら抽出した。その後、前述の画像を用いた有意度の判定を行った。この追加調査の結果、nova-alert system と合計で 28 天体から 200 発以上のフレアを発見した。

これらのフレア全ての光度曲線とピークスペクトルの解析を私が行った。光度曲線は基本的には線形増加の後指数関数的に減少するバーストモデルでフィッティングをした。フレアピーク前のデータが欠損しているものは指数関数のみでフィッティングを行った。以上の光度曲線による解析から、立ち上がり時間 (線形 fitting の始まりから終わりまで) と減衰時間 (e-folding time) を私が見積もった。他方で、ピークスペクトルの解析では光学的に薄いプラズマの熱的制動放射モデル (apec) を用いて、ピークの温度 (kT) とエミッションメジャー (EM : 放射量度)、X 線光度 (L_x) を私が見積もった。得られたパラメータ群は、坪井氏らによって確認された EM vs. kT、 L_x vs. e-folding time の間にある太陽フレアから続く普遍的な相関^[2] とよく一致した。これにより、過去最大規模のフレア群であることを確認した。

MAXI と同様に ISS に搭載されている X 線望遠鏡 NICER を用いた、MAXI 巨大フレアのフォローアップ観測とそのデータ解析を私が主導して行なった。本連携観測を含めた研究結果は、査読論文として The Astrophysical Journal に受理されている^[4]。MAXI は宇宙全体から突発現象を捉えることに長けた観測機であり、それらの詳細な変動を追うことができない。そこで 2017 年 7 月に ISS に搭載された NICER による即時フォローアップ観測を行うことで、それらの詳細な変動を捉える試みを日本の MAXI チーム、アメリカの NICER チームで推進してきた。ここで、NICER は 2017 年に稼働を開始した X 線検出器で、観測帯域 (0.2-12 keV) は MAXI のそれ (2-20 keV) とよく一致し、過去最高の X 線の検出感度をもつ^[5]。2017 年 7 月 18 日に MAXI が近接連星系 GT Mus からの観測史上最大規模のフレアを検出した。MAXI の検出の 1.5 日後から、フォローアップ観測を、私が主導でその観測提案から行い、実施することに成功した。このフレアの放射エネルギーは $\sim 10^{39}$ erg であり、過去最大規模のフレアであった。このような巨大フレアにおいて、時間分解スペクトルが得られたのは初めてである。その時間分解スペクトルを解析し、星間吸収を含む 2 つの apec モデルでよく再現されることを我々は明らかにした。その時間変化は、高温成分の kT と EM がフレアの減衰に伴って減衰しており、それ以外はフレア中に時間変動を見せないことを我々は明らかにした。

考察

① フレアの立ち上がり時間と減衰時間の相関

MAXI の光度曲線の解析によって得られたフレアの立ち上がり時間と減衰時間を私が比較したところ、それらに間に正の相関を発見した。更に、2000 年から 2016 年までの太陽観測衛星 GOES によって観測された太陽フレアが、MAXI で得られた相関の同一直線上に位置することを初めて明らかにした。

本研究では、太陽フレアからの類推をもとに、高温プラズマの形状を求める手法を独自の観点から確立した。太陽フレアにおいては、フレアの空間分解が可能であるため、フレアによって発生した高温プラズマがどのように広がっていくかを追うことができる。その描像を恒星フレアにも適応することで、空間分解できない恒星フレアにおいても、その形状が太陽フレアと相似である示唆を得ることに成功した。この形状の議論から、私は MAXI で検出される巨大フレア群は、その星で発生しうる最大規模のフレアである示唆を得た。本研究結果は、ある星で発生しうる最大規模のフレアを制限する物理量を示唆した点で新しい。

② 観測史上最大規模のフレアに対する詳細観測

NICER で観測した GT Mus のフレアスペクトルの中で、時間変動を示した高温成分の kT の EM から、フレアの冷却過程を検証した (quasi-static cooling model^[6])。その結果我々は、このフレアの冷却過程が、放射冷却と伝導冷却の時定数の比が一定な準静的過程であることを明らかにした。これは太陽フレアのそれと同様である。太陽と同様の冷却過程であることから、超巨大フレアの形状も太陽のそれと同様と仮定して、冷却過程モデルからフレアループの長さを見積もった。その結果、太陽半径の 65 倍にも及ぶフレアループを形成していることを明らかにした。そこから我々は、フレアの底面積、つまり黒点の半径は太陽半径の 4 倍であることも見積もった。ここから、星表面の 20%程度の巨大な黒点が形成されていた示唆を得た。

まとめと展望

本研究での調査で、28 天体から 200 発を超えるフレアを MAXI を用いて発見した。それらの解析により、フレアの立ち上がり時間と減衰時間の間に正の相関があることを明らかにした。また、MAXI で検出した巨大恒星フレアに対して、検出から 1.5 日後から NICER による追観測が成功し、 10^{39} erg 規模のフレアで初めて減衰過程の時間分解スペクトルを獲得した。今後は MAXI と NICER の ISS 軌道上連携が計画されており、これにより類を見ない速さでのフォローアップ観測が実施されることが期待される。ここからフレアの立ち上がり中の時間分解スペクトルが得られる可能性が見込まれ、磁気リコネクションによって加速された粒子によって放射される非熱的放射の時間変化までが明らかになれば、フレアの立ち上がりフェーズへの理解が深まることが期待される。

参考文献

1. K. Shibata & T. Yokoyama 1999 “Origin of the Universal Correlation between the Flare Temperature and the Emission Measure for Solar and Stellar Flares” *Astrophysical Journal Letter*, Vol. 526, 49
2. Y. Tsuboi, K. Yamazaki, Y. Sugawara et al. 2016 “Large X-ray flares on stars detected with MAXI/GSC: A universal correlation between the duration of a flare and its X-ray luminosity” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 68, 90
3. H. Negoro, M. Kohama, M. Serino et al. 2016 “The MAXI/GSC Nova-Alert System and results of its first 68 months”,

Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 68, S1

4. **R. Sasaki**, Y. Tsuboi, W. Iwakiri et al. "The RS CVn type star GT Mus shows most energetic X-ray flares throughout the 2010s"
The Astrophysical Journal (accepted)

5. K. C. Gendreau, Z. Arzoumanian, P. W. Adkins, et al. 2016 "The Neutron star Interior Composition Explorer (NICER): design and development" Proceedings of the SPIE, Vol. 9905, id. 99051H 16 pp.

6. van den Oord, G. H. J.; Mewe, R. 1989 "The X-ray flare and the quiescent emission from Algol as detected by EXOSAT."
Astronomy and Astrophysics, Vol. 213, p. 245