

Multiwavelength Study of Stellar Energetic Flares

巨大恒星フレアが多波長同時観測で明らかにしたフレアの物理

物理学専攻 河合広樹
19S2100001L

研究目的

恒星フレアは、恒星の星表面で発生する突発的な磁気エネルギーの解放現象であり、様々な波長の光を放射することがわかっている。波長ごとに放射プロセスが異なるため、恒星フレアを理解するために、多波長同時観測が行われてきた。その中でも、最も距離の近い太陽で生じる太陽フレアは、空間分解能の高い観測が可能のため、恒星フレアを理解するサンプルとして古くから研究されてきた。太陽フレアが多波長観測から、恒星フレアを引き起こすトリガーとして、磁気リコネクションモデルが考えられている (Shibata & Magara 2011)。一方で、太陽以外の恒星フレアが磁気リコネクションモデルで説明できるかはわかっていない。太陽以外の恒星フレアは、太陽フレアで生じるフレアの最大放射エネルギーより 8 桁も大きなエネルギーのフレアまで報告されている。その中でも最大規模の放射エネルギーのフレアは、その多くが連星で発生すると報告されている。連星で生じるフレアは、Uchida & Sakurai (1985) で考えられたように、そのフレアループが 2 つの星をまたぐイベントなのではないかと提案されている。これを明らかにするためには、X 線によるフレアループの情報と、 $H\alpha$ 線によるフレアの足元の情報を組み合わせて空間情報を入手する必要がある。しかし、その規模の放射エネルギーの恒星フレアで $H\alpha$ 線と軟 X 線の同時観測は未だ行われていない。

解決方法

ISS に取り付けられ、2009 年から稼働を始めた全天 X 線監視装置 MAXI (Matsuoka et al. 2009) が 92 分に 1 回の頻度で宇宙全体の 85% を観測することで、X 線放射エネルギーが 10^{34-39} erg の観測史上最大規模の恒星フレア (巨大恒星フレア) が、2-20 keV で観測された (Tsuboi et al. 2016)。この観測により、巨大恒星フレアを含む軟 X 線の統計的な恒星フレア研究が可能となった。その結果、太陽や巨大恒星フレアの最大光度と減衰時間などの相関が、全てべき乗則に従うことが報告された (Tsuboi et al. 2016)。この結果は、少なくとも軟 X 線の波長では、恒星フレアは太陽フレアのスケールを大きくした現象だという考えをサポートする。しかし、この相関は全て軟 X 線の帯域のみの情報であるため、連星フレアの発生場所の情報を考えるには不十分である。そこで我々は、軟 X 線と $H\alpha$ 線のフレア同時観測に着目した。軟 X 線と $H\alpha$ 線のフレア同時観測は、軟 X 線で 10^{29-36} erg (e.g., Butler 1993) の範囲で行われてきており、発生が稀な 10^{37} erg 以上の巨大恒星フレアのサンプルは存在しなかった。このエネルギー範囲での先行研究では、軟 X 線と $H\alpha$ 線もしくは $H\gamma$ 線のフレア同時観測のサンプルから、軟 X 線と $H\gamma$ 線の放射エネルギーが比例関係を持つ事がわかっている (Butler 1993)。また、軟 X 線と $H\alpha$ 線のフレア減衰時間の相関が Veronig et al. (2002) によって報告されているが、そのサンプルは太陽フレアのみであり、サンプルのフレア放射エネルギーの幅が狭いため、データが縮退してしまっており、優位な相関は得られていない。そこで我々は、巨大恒星フレアを軟 X 線と $H\alpha$ 線で同時観測するシステムを構築し、巨大恒星フレアの同時観測を目指した。

成果 1. 研究方法の確立

我々は、 $H\alpha$ 線でフレアを観測するために、可視光分光望遠鏡の Spectroscopic Chuo-university Astronomical Telescope (SCAT) の立ち上げを 2016 年に行なった(図 1)。我々は、軟 X 線と $H\alpha$ 線で巨大恒星フレアを同時観測するため、MAXI による軟 X 線の巨大恒星フレア発生のお知らせをトリガーとして、巨大恒星フレアを起こしている星を即時追観測できるシステムの確立を目指した。トリガーは、MAXI の運用チームが行う速報システム(Negoro et al. 2016)を用いた。MAXI は、これまでの約 12 年の運用で 153 発の巨大恒星フレアを検出してきており、巨大恒星フレアが発生した星の可視光の明るさは、4-13 等級であった。そこで我々は、SCAT の要求性能は、1) $H\alpha$ 線(6563 \AA)を分光観測できる事と、2)



図1: SCATの概観

限界等級が、MAXI で検出した星の半数以上を観測できる 10 等級以上である事であると設定した。我々は、SCAT の分光器として Shelyak 社の Alpy600 を用い、その性能を評価した。我々は、既知の輝線を放つ Ar/Ne ランプのスペクトルで確認できる輝線の振幅を調べる事で、SCAT は、 $3700\text{--}7500 \text{ \AA}$ の範囲の範囲で波長分解能 R が 600 の性能を持つことを確認した。SCAT は、導入した星を追尾する精度が悪いため、導入天体確認用のカメラで位置校正を数秒の頻度で行う必要がある。そのため、SCAT の限界等級は、この追尾を行える星の限界等級から評価した。その結果、我々は経験的に、限界等級は 13 等級であると決定した。この 2 つの結果は、SCAT の要求性能 1) と 2) を十分に満たす。これは、SCAT を用いた追観測システムは、巨大恒星フレアを軟 X 線と $H\alpha$ 線で同時観測するシステムとして十分な性能である事を意味し、我々独自の巨大恒星フレアを軟 X 線と $H\alpha$ 線で同時観測するシステムの確立に成功した。

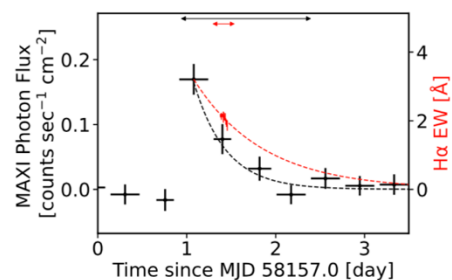
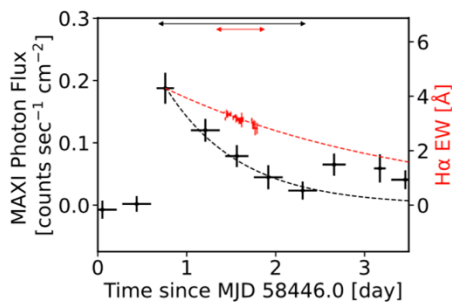
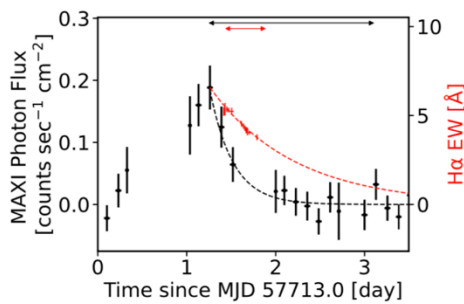


図2: 3つのフレアのlight curve

置校正を数秒の頻度で行う必要がある。そのため、SCAT の限界等級は、この追尾を行える星の限界等級から評価した。その結果、我々は経験的に、限界等級は 13 等級であると決定した。この 2 つの結果は、SCAT の要求性能 1) と 2) を十分に満たす。これは、SCAT を用いた追観測システムは、巨大恒星フレアを軟 X 線と $H\alpha$ 線で同時観測するシステムとして十分な性能である事を意味し、我々独自の巨大恒星フレアを軟 X 線と $H\alpha$ 線で同時観測するシステムの確立に成功した。

我々は、2016 年からこのシステムを運用するとともに、静穏時の $H\alpha$ 線強度を測るため、SCAT による巨大恒星フレアを起こす星の定常時の $H\alpha$ 線強度のモニター観測を行なった。今回の追観測システムは全て手動で行う。そのため、このシステムを運用するためには、全ての晴れた夜に観測者が SCAT を操作できる状態で待機する必要がある、多くの人的リソースが必要となる。この 5 年間に実際に我々が観測を行なった日数は、夜が晴れた日の 6 割であった。また、我々が行なった観測のうち、6 割は、著者自身が行なった。その結果、以下の成果を導くことに成功した。私は、SCAT の

立ち上げの中で、性能評価と運用、そのデータ解析をリードして行なった。

成果2. 軟X線とH α 線による巨大恒星フレアの同時観測

我々は、追観測システムを5年間運用する事によって、7つの巨大恒星フレアを、軟X線とH α 線で同時観測することに成功した。今回は、7つのフレアのうち、フレアの減衰時間を求められる質の3つのフレアを報告する。3つのうち2つは、おうし座UX星で、残りの1つはうお座AR星で発生したフレアである。我々はまず、観測したフレアの減衰時間である e-folding time と、ピーク時の情報からピーク光度を求めた。そして、求めた e-folding time とピーク光度の積から放射エネルギーを求めた。その結果、3つのフレアの軟X線とH α 線の放射エネルギーは、それぞれ 10^{36-38} 、 10^{35-37} erg だとわかった。これは、世界で初めて軟X線の放射エネルギーが 10^{36} erg より大きいフレアを、軟X線とH α 線で同時観測した結果である。我々は、本結果と Butler (1993)で報告された軟X線エネルギーが 10^{36} erg 以下の太陽フレアや恒星フレアのサンプルを用いて、放射エネルギーと減衰時間で軟X線とH α 線の相関を調べた。その結果、軟X線の放射エネルギー(E_{Xbol})とH α 線の放射エネルギー($E_{\text{H}\alpha}$)は、 $E_{\text{Xbol}} = 10^{29-38}$ erg の9桁の範囲で、 $\log(E_{\text{H}\alpha}) = 1 \log(E_{\text{Xbol}}) - 1.0 \pm 0.7$ の比例関係を持つことがわかった。このエラーは、モデル線とデータ点とのばらつき 1σ の1.6倍の値である。この結果は、先行研究の相関を2桁拡張した範囲でも、比例関係が成り立つ事を意味する。一方、軟X線の継続時間(τ_{SXR})とH α 線の継続時間($\tau_{\text{H}\alpha}$)が、 $\tau_{\text{SXR}} = 10^{2-5}$ sec の3桁の範囲で、 $\log(\tau_{\text{H}\alpha}) = 1 \log(\tau_{\text{SXR}}) - 0.1 \pm 0.6$ の比例関係を示す事がわかった。我々は、軟X線とH α 線のフレア継続時間で縮退のない相関の調査に初めて成功し、この相関は、比例関係を持つことを発見した。これらの結果は、巨大恒星フレアが軟X線とH α 線で、太陽フレアを含むべき乗則に乗っている事を意味する。そのため、軟X線とH α 線に関しては、巨大恒星フレア含む恒星フレアは、太陽フレアと同じ磁気リコネクションモデルで説明でき、太陽フレアのスケールの大きくなった現象だと解釈できる。

成果3. 巨大恒星フレアの空間情報の考察

私は、SCATによる静穏時のUX AriのH α 線の観測を用いた星表面の活動領域の推定と、可視連続光や電波観測を用いた Flare 1 と 2 のフレアループ位置の見積もりを行った。まず、UX Ariの公転運動について知るために、我々が観測したH α 輝線の中心波長を測定し、ドップラーシフトを調べた。その結果、Flare 1 と 2 を観測した2016年と2018年の間のUX AriのH α 輝線の中心波長は、自転周期に応じた sinusoidal な変動を示し、その振幅は、視線方向の速度が ~ 120 km/sであった。この時、 $v/c = \Delta \lambda / \lambda$ の式を用いて波長のドップラーシフトを速度に変換した。UX Ariは、主星がH α 線を放射すると報告されているので、今回観測した視線方向の速度は、主星に存在するH α 線を放射する活動領域だと考えられる。Flare 1 と 2 が発生した時のドップラーシフトは静穏時の同じ phase でのドップラーシフトと同じ値であったため、Flare 1 と 2 でのH α 放射領域は、どちらも主星側がであることがわかった。さらに、軟X線のピーク時のスペクトル fitting で得た放射測度 Emission measure と温度を用いて、フレアループの長さを見積もった。この見積もりは、ループ長Lとしてループ体積を $0.01 L^3$ と仮定し、伝導冷却と放射冷却と観測される減衰時間が同じだと仮定したモデル(Haisch 1983)を用いた。その結果、Flare 2 は、連星間距離に匹敵する長さのフレアループを持つことがわかった。これらの情報から、先行研究で考えられていた連星を跨いだフレアループの存在を確認することはできず、連星フレアは太陽フレアと似た描像であることが示唆された(図3)。

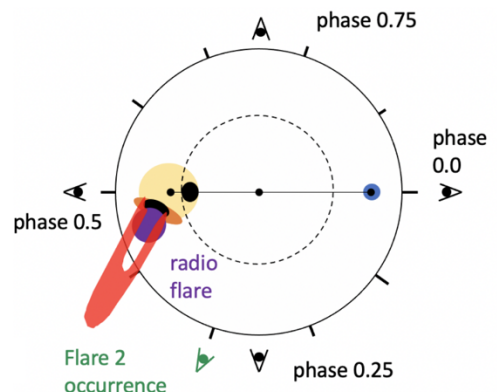


図3: Flare2の空間情報

まとめと展望

我々は、 $H\alpha$ 線を分光観測する SCAT を立ち上げ、巨大恒星フレアの軟 X 線と $H\alpha$ 線の同時観測システムを構築した。その結果、放射エネルギーが 10^{36} erg(軟 X 線)より大きい巨大恒星フレアの軟 X 線と $H\alpha$ 線の同時観測に、世界で初めて成功した。観測した 3 つの巨大恒星フレアは、軟 X 線と $H\alpha$ 線の放射エネルギーが、それぞれ 10^{36-38} 、 10^{35-37} erg であった。そして、太陽フレア、巨大恒星フレアを含む、かつてない広い範囲でのフレア放射エネルギーと減衰時間で、軟 X 線と $H\alpha$ 線の比例関係を求めた。その結果、放射エネルギーは先行研究より 2 桁広い範囲まで比例関係が続くことがわかった。また、減衰時間は、縮退のない相関を初めて求める事に成功し、比例の観測があることを発見した。さらに、Flare1 と 2 の $H\alpha$ 輝線のドップラーシフトを調べることで、Flare1 と 2 の発生場所が主星側であることを明らかにした。これらの情報から、先行研究で考えられていた連星を跨いだフレアループの存在を確認することはできず、連星フレアは太陽フレアと似た描像であることが示唆された。今後は、私が行なった手法に加えて X 線でも分光観測を行い、ループの速度成分を測ることで、より詳細な連星フレアの描像が明らかになると期待される。

参考文献

- Butler, C. J. 1993, *A&A*, 272, 507
- Doyle, J. G., Butler, C. J., Bryne, P. B., & van den Oord, G. H. J. 1988a, *A&A*, 193, 229
- Fuhrmeister, B., Lalitha, S., Poppenhaeger, K., Rudolf, N., Liefke, C., Reiners, A., Schmitt, J. H. M. M., & Ness, J. U. 2011, *A&A*, 534, 133
- Haisch, B. M. (1983). "X-ray observations of stellar flares". In: in *IAU Colloq. 71, Activity in Red-Dwarf Stars*, ed. P. B. Byrne & M. Rodono (Dordrecht: Reidel).
- Matsuoka, M., Kawasaki, K., Ueno, S., Tomida, H., Kohama, M., Suzuki, M., Adachi, Y., Ishikawa, M., et al. 2009, *PASJ*, 61, 999
- Namekata, K., Maehara, H., Sasaki, R., Kawai, H., Notsu, Y., Kowalski, A. F., Allred, J. C., Iwakiri, W., et al. 2020, *PASJ*, 72, 68
- Negoro, H., Kohama, M., Serino, M., Saito, H., Takahashi, T., Miyoshi, S., Ozawa, H., Suwa, F., et al. 2016, *PASJ*, 68, 1
- Shibata, K., & Magara, T. 2011, *Living Rev. Sol. Phys.*, 8, 6
- Smith, R. K., Brickhouse, N. S., Liedahl, D. A., & Raymond, J. C. 2001, *ApJ*, 556, 91
- Tsuboi, Y., Yamazaki, K., Sugawara, Y., Kawagoe, A., Kaneto, S., Iizuka, R., Matsumura, T., Nakahira, S., et al. 2016, *PASJ*, 68, 90
- Uchida, Y. and T. Sakurai (Jan. 1985). "Magnetodynamical processes in interacting magnetospheres of RS CVn binaries". In: *Unstable Current Systems and Plasma Instabilities in Astrophysics*. Ed. by M. R. Kundu and G. D. Holman. Vol. 107, pp. 281–285.
- Veronig, A., Temmer, M., Hanslmeier, A., Messerotti, M., Otruba, W., & Moretti, P. F. 2002a, *Proceedings of the Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference*, 477, 187