

# MAXI-NICER 連携で捉えた悪魔のまばたき

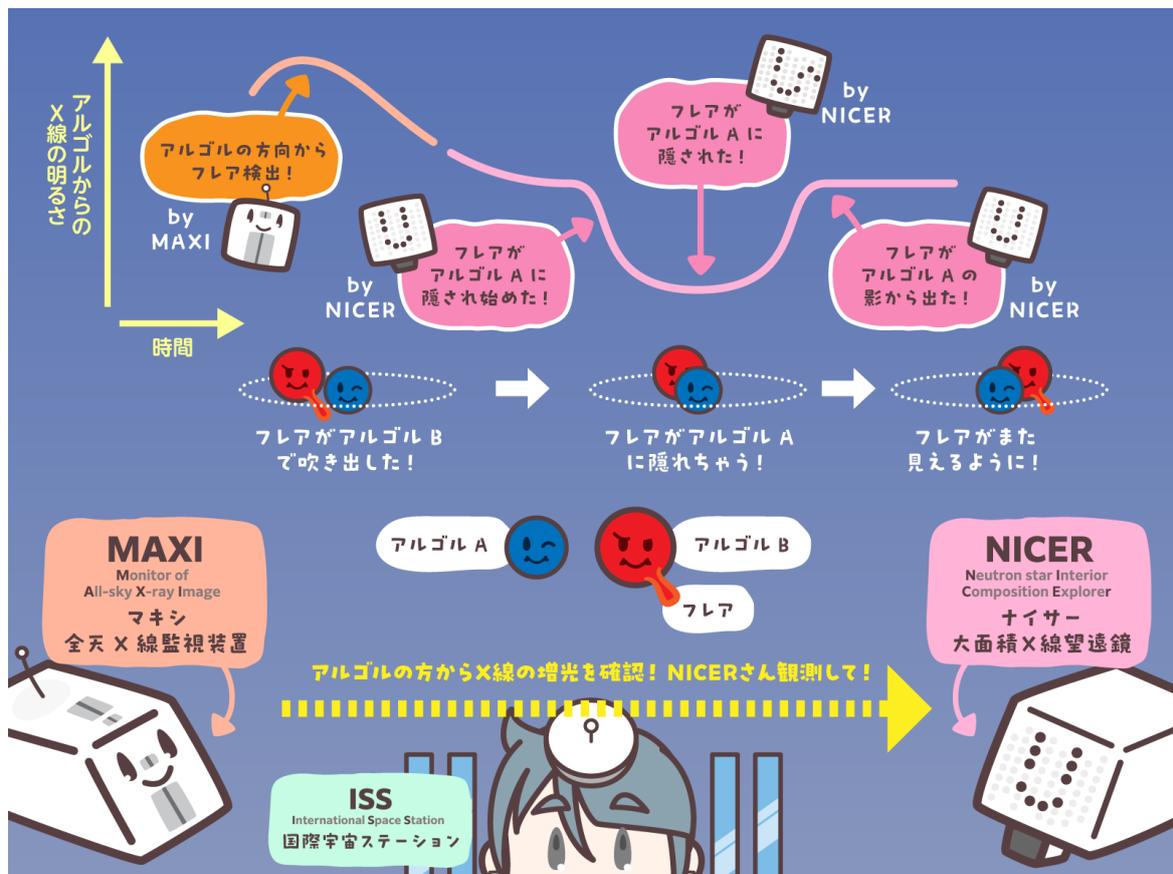
## —アルゴルで発生した巨大恒星フレア食の観測に成功—

### 概要

京都大学の中山 和哉 大学院理学研究科修士課程学生、千葉大学の岩切 渉 助教、京都大学の榎戸 輝揚 准教授、井上 峻 理学研究科博士課程学生、理化学研究所の三原 建弘 専任研究員、NASA ゴダード宇宙飛行センターの Keith Gendreau 研究員、Zaven Arzoumanian 研究員、濱口 健二 研究員、コロラド大学の野津 湧太 研究員のグループは、国際宇宙ステーションに搭載された日本の全天X線監視装置MAXI(※1)およびNASAのX線望遠鏡NICER(※2)の国際連携観測により、悪魔の星と呼ばれる食変光星アルゴル(※3)で発生した太陽フレアの～10万倍の明るさのスーパーフレア(※4)をMAXIで捉え、フレアの食(奥にいる星からの光を手前にいる星が隠すこと)による減光をNICERで捉えることに成功し、その発生位置とサイズを特定することに成功しました。

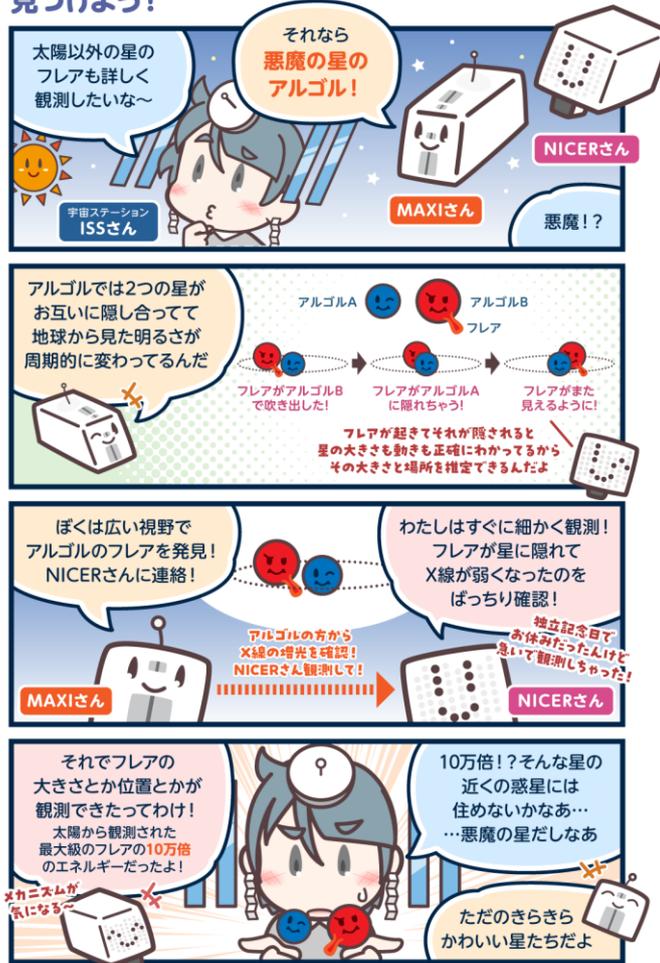
いつ起こるともわからない突発現象であるフレアの食は、これまでは偶然観測された例しかありませんでしたが、今回は事前に突発現象に対する観測体制を整えていたMAXIとNICERによって初めて狙い通りにフレア食を観測することに成功しました。恒星のスーパーフレア現象は、太陽とは違い恒星が非常に遠くにあるためその大きさや位置を決めるのが困難です。今回観測されたフレア食はその減光のタイミングからこれらの情報を推定でき、スーパーフレアの大きさは太陽の直径に匹敵するほど巨大なサイズであることがわかりました。この成果は未解明であるスーパーフレアの発生メカニズムに対して重要な示唆となります。

本研究成果は、2025年12月18日午前10時(GMT)に米国の国際学術誌「The Astrophysical Journal」に掲載されました。



(credit: ひっぐすたん)

## 悪魔の星のまばたきを見つけよう!



(credit : ひっぐすたん)

### 1. 背景

恒星で突発的に発生する大規模な爆発現象であるフレアは、身近な恒星である太陽フレアの研究を通じて、その発生メカニズムの理解が進んできています。一方で遠くの宇宙に目を向けると、人類の観測史上最大の太陽フレアのエネルギー(約  $10^{25}$  ジュール)をはるかに超えたスーパーフレアを起こす恒星があることも、これまでの X 線による観測などで知られています。そのようなスーパーフレアの発生メカニズムが太陽と同様のものであるのかは、磁気流体力学の観点からも、近年目覚ましい発展を遂げている系外惑星での居住可能性に関する議論においても鍵になります。発生メカニズムを調べる上で、観測から得られるフレアの発生場所の大きさや位置は重要な情報です。しかし、太陽以外の恒星は地球からの距離が遠いため一般的にそのフレアのサイズ、位置を特定するのが極めて困難です。そのような状況の中で、唯一これらの情報の示唆が得られていたのがアルゴルです。アルゴルは高校地学の教科書に「アルゴル型食変光星」と記載されているように、周期的に明るさが変化する有名な恒星です。アルゴルが有名である理由は、図 1 に示すようにアルゴルは連星であり、その軌道面が地球から見て揃っているため、お互いの星が地球から見て視線方向に並んだときに、奥にいる星の光を手前にいる星が隠す(食を起こす)ことによって連星の周期に伴った減光が観測されるからです。アルゴルは「悪魔」という意味を持ち、その星座上の位置からそのように名をつけられたと言われます。古代の人々の中で、この明るさの変化に気づいた人は悪魔がまばたきしているように感じていたのかもしれない。

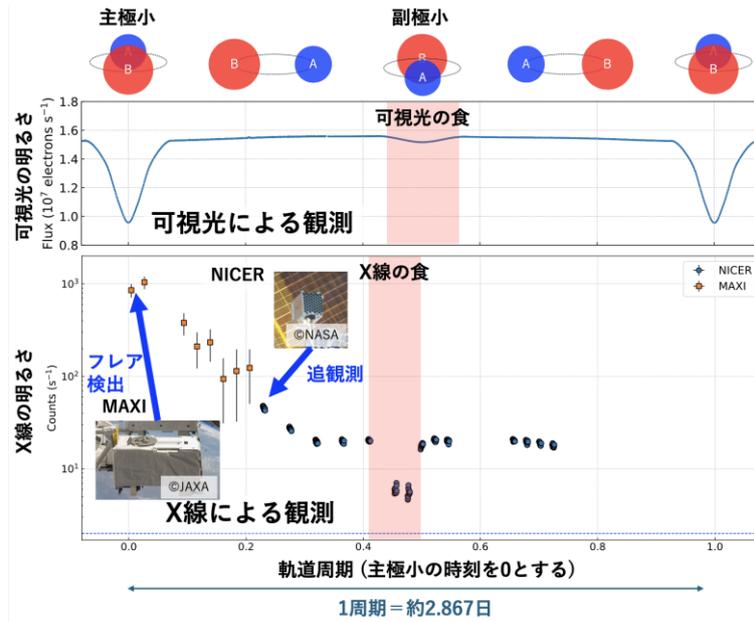


図 1：可視光で見た時のアルゴルの食による減光の模式図と、MAXI と NICER で得られた X 線のスーパーフレアとアルゴル A の食による減光の様子。

このアルゴルにおいて、X 線での観測中に偶然スーパーフレアが発生し、図 1 の副極小の位置で過去に 2 度フレアの減光が確認されたことがありました (Schmitt and Favata., 1999, Nature, 401, 44, Schmitt et al., 2003 A&A, 412, 849)。この結果から、アルゴルのスーパーフレアは 2 回ともアルゴル B で発生し、そのうち 1 回目のフレアの場合では太陽の直径に匹敵する約 140 万 km のサイズで、太陽ではこれまでに起きたことの無い南極付近で起きたことが示されました。しかし、いつ発生するかわからないフレアとその食の観測を行うのは難しく、その後十年以上追認はなされていませんでした。そこで我々の研究グループは、国際宇宙ステーション (ISS) 上で活躍している日本の全天 X 線監視装置 MAXI と米国 NASA ゴダード宇宙飛行センターの X 線望遠鏡 NICER による X 線での突発天体の即応連携観測、MANGA (MAXI And NICER Ground Alert) に注目しました。

## 2. 研究手法・成果

同じ ISS に搭載されている MAXI と NICER は、同じ X 線の観測装置ですが、異なる特徴を持っています。アルゴルを例にすると、視野が広く ISS の軌道周期約 90 分に合わせて全天を走査観測している MAXI はアルゴルで発生するスーパーフレアを効率よく検出することができます。しかし、その視野の広さゆえ、フレアの食による減光を捉えるほどの感度は持ち合わせていません。一方 NICER は十二分にフレア食を検出できる性能を持ちますが、視野が狭く通常は他の天体を観測しているためアルゴルのフレア発生に気づくことはできません。そこで、MAXI と NICER のお互いの長所を活かし、MAXI で発見した突発現象を感度の良い NICER できるだけ早く観測を行えるように MAXI チームと NICER チームは MANGA 連携を進めていました。

NICER が ISS に設置されてから 1 年程度経過した 2018 年 7 月 4 日、MAXI でアルゴルからのスーパーフレアを検出しました。その規模は、過去に観測された最大の太陽フレアと比較して約 10 万倍大きなものでした。MAXI チームはただちにスーパーフレアの減光の時間スケールの予測とアルゴルの現在の連星軌道を計算し、少なくともフレアはこの後数日ほど続き、あと 1 日程度でアルゴル A によるフレアの食が起きることを予測し、NICER の感度であれば十分に検出可能と考え、NICER チームに緊急連絡を入れました。折しも、その

日は米国の独立記念日であり休日でしたが、NICER チームは「独立記念日を祝う花火だ」と表現して予測したフレア食の時刻より前に NICER をアルゴルへと向けることに成功しました。

この観測で得られた実際の MAXI と NICER による X 線光度の時間変化が図 1 になります。研究グループの期待通り、副極小の位置でアルゴル B のフレアがアルゴル A によって隠されたフレア食、悪魔がまばたきする過程を見事観測することに成功しました。また、可視光帯域でのアルゴルの食のタイミングは第 3 の連星などの効果でわずかに予想よりもずれることが知られていますが、そのわずかなずれに関してもアルゴルの食のタイミングを長年記録し続けている Mt. Suhola 天文台のデータをいただくことで、X 線フレアの食が発生した際の連星間の位置を詳細に知ることができました。これらのデータを詳細に解析し、連星の位置関係とフレアの発生場所のシミュレーション(図 2) との比較を行うことで、フレアの大きさが約 190 万キロメートルと、過去の観測を超える巨大なサイズであり、発生場所は中緯度から高緯度の位置で今回のスーパーフレアが発生していることを特定することに成功しました。

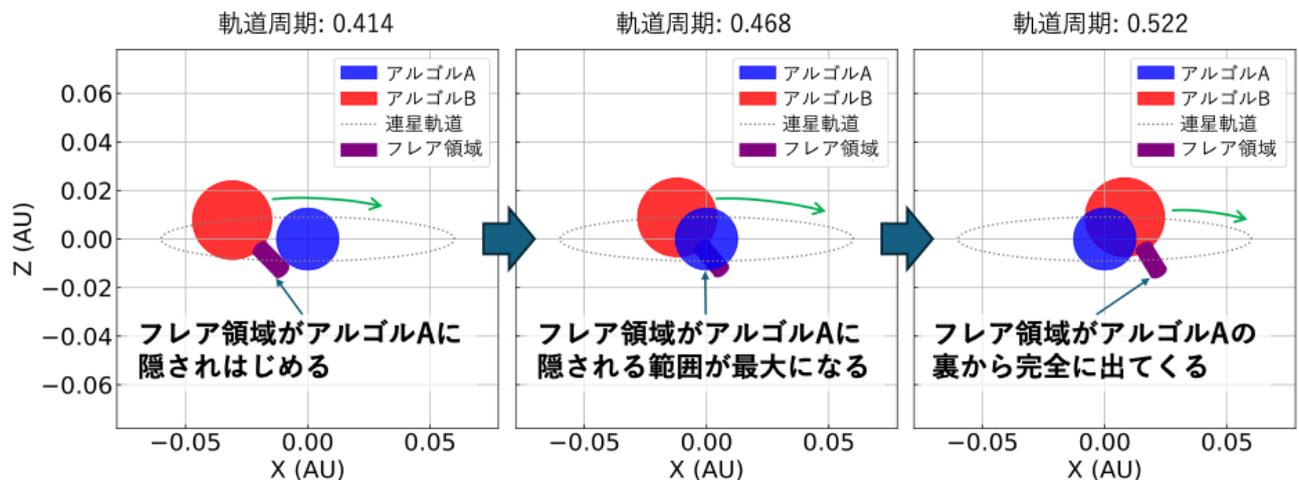


図 2：アルゴルでのスーパーフレア光度と連星の位置関係から推定したフレアの発生位置

### 3. 波及効果、今後の予定

研究グループは、それぞれ特徴の違う検出器を組み合わせたユニークな MANGA 観測によって、スーパーフレアの食という現象から、そのサイズと発生位置という重要な物理量を導き出すことに成功しました。今回のような、いつ起こるか分からない突発現象を積極的に観測する手法は時間領域天文学と呼ばれ、特にインターネットの発展以前は難しかった今回のような国際連携観測が近年推し進められています。また、2023 年 9 月に打ち上げられた日本の XRISM 衛星による高分散分光観測からもスーパーフレアの情報が引き出されることが期待されており、今後さらなる観測例が増えていくことでスーパーフレアの発生メカニズムが通常の太陽フレアと違うものなのかの議論が発展することが期待されます。スーパーフレアの発生は周囲の惑星での生命の発生、居住環境の議論においても重要な情報となり、このような研究はますます進んでいくことが期待されます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、中山和哉（京都大学大学院理学研究科修士課程学生）、岩切渉（千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター (ICEHAP) 助教）、榎戸輝揚（京都大学大学院理学研究科准教授）、井上 峻（京都大学大学院理学研究科博士課程学生）、三原建弘（理化学研究所開拓研究所 専任研究員）、Keith Gendreau、Zaven Arzoumanian（NASA ゴダード宇宙飛行センター研究員）、濱口 健二（NASA ゴダード宇宙飛行センター研究員、メリーラ

ンド大学研究員)、野津 湧太(コロラド大学研究員)を中心に行われました。また本成果に至る研究において、科学研究費補助金 JP23K22547、JP24K00673、JP 16K17717 の支援を受けています。

#### <用語解説>

※1 **MAXI**: 2009年8月から掃天観測を継続しているISSに搭載された全天X線監視装置 MAXI(Monitor of All-sky X-ray Image)。3度×160度の扇型の視野を持ち、約90分のISS軌道周期に合わせて2-20キロ電子ボルトのX線帯域で全天を走査観測し、フレアのような突発現象を察知した場合は、ただちにそのデータを解析し、世界に向けて報告している。

※2 **NICER**: 2017年6月にISSに搭載されたNASAゴダード宇宙飛行センターのX線観測装置。視野はMAXIと比べてはるかに狭く突発現象を察知することはできないが、感度が抜群によいためMAXIでは捉えきれない突発天体の詳細な減光やスペクトルの情報を得ることができる。

※3 **アルゴル**: 連星の軌道面が地球の方向にあるため、地球から見て、連星をなす2つの星が視線方向に並ぶときに減光を示す食変光星の代表的な星。

※4 **スーパーフレア**: 恒星が起こすフレアの中でも過去に観測された最大級の太陽フレア( $10^{25}$ ジュール)と比べて10倍以上のエネルギーを解放するフレアのこと。今回アルゴルで観測されたような $10^{30}$ ジュールという桁違いの規模のスーパーフレアは太陽では発生しないであろうことは多くの太陽型星の観測結果から示唆されている(一方、太陽についても最大 $10^{28}$ ジュール程度のスーパーフレアの発生可能性は示唆されている)。

#### <研究者のコメント>

スーパーフレアは興味深い研究対象ですが、太陽では見られないため、その空間情報を得るのは困難な現象です。本研究で連星の特性を活かしてそのようなフレアの空間情報を得る方法を確立することができました。これは他の連星系にも適用できる一般性の高い手法です。今後は電波などを用いた多波長同時観測を行うことでさらにスーパーフレアの機構に迫っていきたいと考えています。(中山)

MAXIの広視野、NICERの感度というお互いのもっていないものを補う、非常にユニークな連携観測に成功しました。自分で予測したタイミングで、バッチリX線の食が起きているデータがNASAから送られてきたときにはとても感動しました。このような装置や国を超えた連携観測は、さらにニュートリノや重力波といった光ではない宇宙の情報を伝えてくれるメッセンジャーと合わせることで、未開拓領域であるマルチメッセンジャー天文学を切り拓いていくことができますので、まだまだ精進していきたいです。(岩切)

国際宇宙ステーションに搭載されている2つのX線天文装置、日本のMAXIとアメリカのNICERは、それぞれ広視野探査と精密観測という特徴を持ち、それらが連携すると強力な観測装置となります。本研究は、通信衛星による軌道上-地上の常時接続、コンピュータによる自動処理、インターネットによる国境を越えた速報性を利用して、日米の研究者が協力して成し遂げた成果です。今回の「悪魔の星」は、古代アラビアから明るさが変わる不気味な星として知られ、アルゴル(悪魔)と名付けられた星。最新技術により、その素顔がまた1つ明らかになりました。(三原)

#### <論文タイトルと著者>

タイトル: Eclipsing Stellar Flare on the Demon Star Algol Binary System Observed during the MAXI-NICER Follow-up Campaign in 2018 (MAXI-NICER 連携で観測された悪魔の星アルゴルでの恒星フレア食)

著 者 : Kazuya Nakayama, Wataru Buz Iwakiri , Teruaki Enoto ,Shun Inoue, Yuta Notsu, Keith Gendreau ,  
Zaven Arzoumanian, Kenji Hamaguchi and Tatehiro Mihara

掲 載 誌 : The Astrophysical Journal                      DOI : 10.3847/1538-4357/ae1699