

MAXI-NICER 連携で切り拓く X 線突発天体

岩 切 渉

〈中央大学理工学部物理学科 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27〉

e-mail: iwakiri@phys.chuo-u.ac.jp



近年、継続時間の短い貴重な突発現象の時間経過を研究する時間領域天文学が活発である。全天 X 線監視装置 MAXI や硬 X 線の Swift 衛星が突発天体を発見・速報し、様々な観測波長のチームに伝えることでこの分野を牽引してきた。しかし、MAXI の観測波長帯域でのみ輝き、急速に減光する突発天体に対しては、即時追観測が間に合わず、未開拓領域として残されている。そこで我々は、MAXI と同じく国際宇宙ステーションに搭載された X 線望遠鏡 NICER と協力し、MAXI と NICER による MANGA および OHMAN と名づけた 2 つの連携により、突発現象の即時観測を目指している。これまでにアルゴルからの X 線フレア食の観測や、MAXI 新星の発見から約 4 時間後の NICER による追観測に成功した。

1. 即応時間と観測感度の未開拓領域

MAXI チームでは突発天体発見の報せをいち早く世界に伝えるべく、前号の三原氏、根来氏の記事にもあるように、ほぼリアルタイムで国際宇宙ステーション (ISS) から送られてくる MAXI の観測データを突発天体発見システム¹⁾によって監視し、疑わしきイベントがあった場合には、当番がその詳細を確認する体制をとっている。そのため、当番に従事していると、新たな X 線新星や突発現象を発見する時がある。昼夜を問わずにやってくるこの瞬間は、どんなに眠くともハッと目が覚める。そして、「これは一体何事が宇宙で起きたのか?」という好奇心が湧き上がってくるのを感じつつデータを解析し、速報を準備する。しかし、必ずしも MAXI のデータのみで、この好奇心というものに十分に答えられないことがある。例えば、本号の芹野氏の記事に登場する MAXI 未同定天体 MUSST が現れた時には、「あの光は一体…」というモヤモヤとした感情が晴れることはない。

MAXI は全天スキャンにより突発現象を高い効率で検出できるが、一つの点源を観測できる時間は 92 分毎に約 60 秒しかないため、しばしば光子数が不足し、次のスキャンまでの情報が得られず、位置精度も約 0.3 度と必ずしも十分ではない。そこで、迅速に MAXI のトリガー情報を提供し、視野は狭いが感度は高い検出器を搭載したポインティング型の衛星に、追観測を行ってもらうことが重要となる。これまで、MAXI の発見は多くの場合、米国のガンマ線バースト探査衛星 Swift に通報され、Swift の即応ポインティング観測で対象天体の誤差が約 3 秒角にまで狭められるとともに、Swift 自身や他の望遠鏡で、天体の詳細なスペクトル情報や時間遷移が明らかにされてきた。しかし、X 線衛星としては抜群の即応性を持つ Swift 衛星といえども、MAXI で突発天体を検出してからその情報を受け、対象に向けて姿勢制御を決断・実行するには、どんなに早くとも ~3 時間を要する。つまり、この「~3 時間」以内が未開拓領域であり、この間に X 線の突発天体・現象がどのように変動し、どのように消えてゆくか、

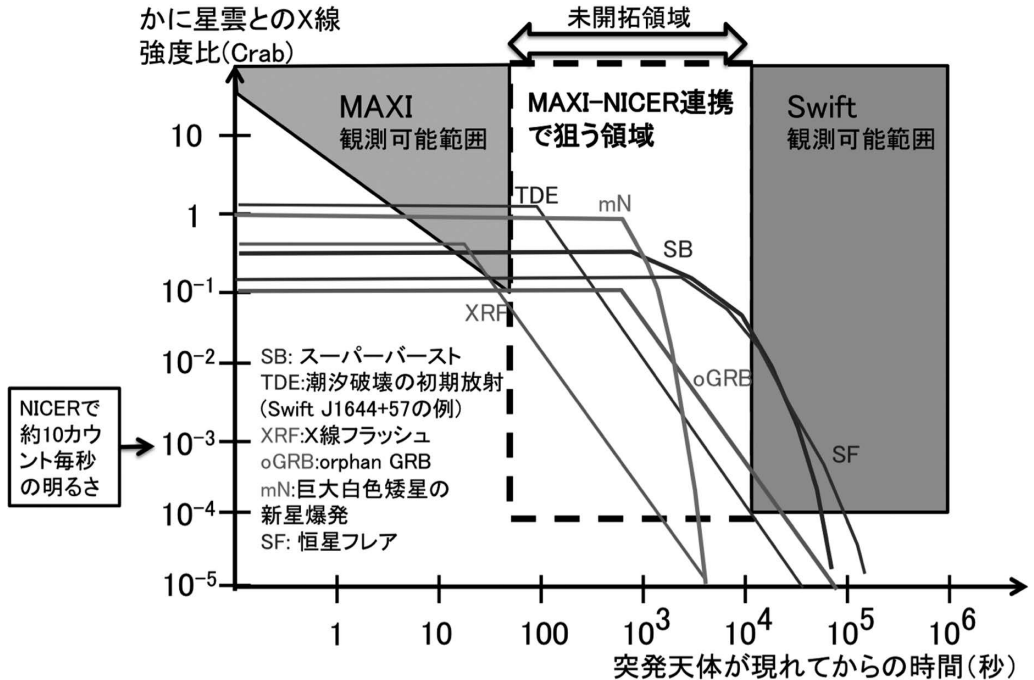


図1 さまざまなX線の急速減光天体の光度曲線を、MAXI及びSwiftの観測可能範囲と比べたもの。

十分に観測されていない。中には急速に減光する天体も存在している。図1に、この未開拓領域をいくつかのX線突発天体の光度曲線とともに示す。MAXIで観測される突発天体は多岐にわたっている。X線フラッシュ、MUSST（本号の芹野氏の記事参照）といったものや、詳細な観測例が少なくスペクトルの時間発展が十分に理解されていない、太陽フレアの10万倍以上の規模を持つ巨大恒星フレア（本号の坪井氏の記事）、中性子星表面で起きる不安定な核融合のうち、通常のX線バースト（数十秒で終わる）に比べてずっと長く、1時間以上も続くスーパーバースト²⁾、チャンドラセカール限界に近い白色矮星での新星爆発³⁾、星がブラックホールに落ち込む際の潮汐破壊現象⁴⁾の初期放射など、この未開拓領域には興味深い物理現象が集まっている。ここにどうにかして分け入ることはできないのか。そんな折、「X線望遠鏡NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) がISSに搭載される」と

いうことが2014年に決まった。

2. NICER 望遠鏡がISSにやってくる

NICER⁵⁾は、NASAゴダード宇宙飛行センターで開発されたX線観測装置である。その科学的な目的は、パルサーの詳細なパルスプロファイルの観測から一般相対論的效果の情報を引き出し、中性子星の半径と質量の比などを精度よく推定し、それを高密度核物質の状態方程式の決定に役立てることである。NICERの構成は、同じ視野を持つ56個のX線集光鏡と、その焦点面（焦点距離～1 m）に非常に信号処理速度が速い（ナノ秒）シリコンドリフト検出器を配したX線望遠鏡である。撮像能力は持たないが、点源に対しては軟X線帯域で現在最大の有効面積 (>2,000 cm² @1.5 keV) を持つ。地球周回に伴うISSの自転を打ち消すため、NICERは自分自身で星姿勢系をもち、経緯台で自動的に目標を追尾する。

「NICERがISSにやってくる」。我々MAXIチー

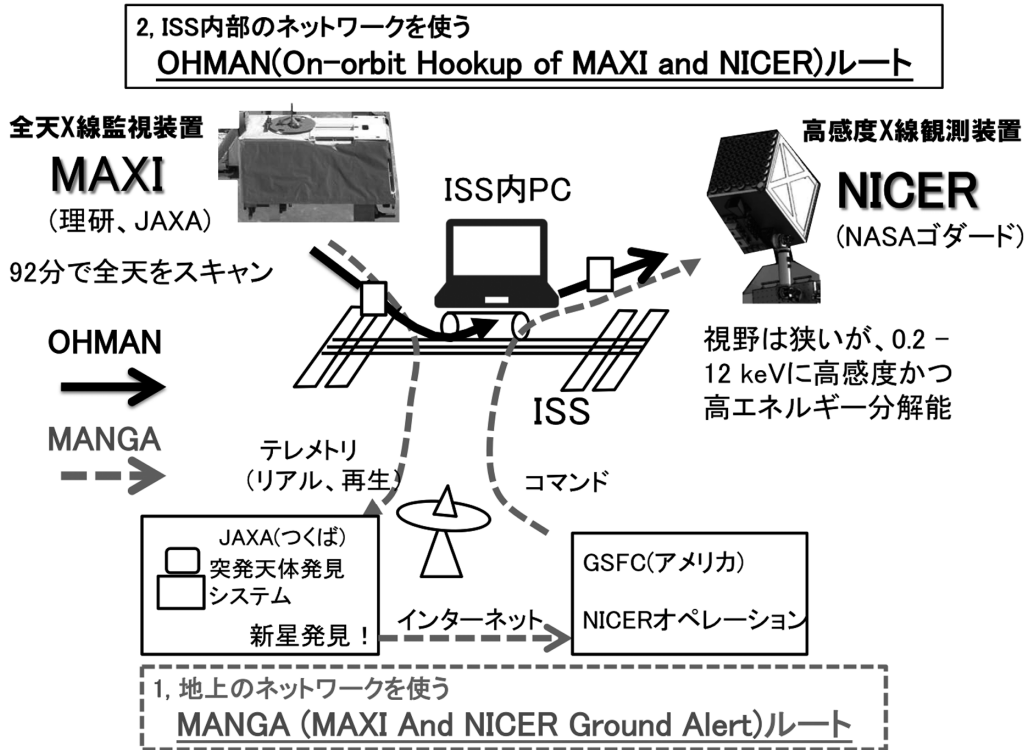


図2 MAXI-NICER連携, MANGAとOHMANに関する模式図.

ムはそれを聞いて、この機会を逃してはならぬと、図2に示す2つのMAXIからNICERへの突発現象情報の伝達ルートを構想し、NASAのNICERチームと打ち上げ前の2015年頃から議論を開始した。

伝達ルートの1つ目は、これまで通りMAXIのデータは地上（JAXA 筑波宇宙センター）にて突発天体発見システム¹⁾により監視し、そこで検出された情報を、インターネットを通じてNICER側に送るというものである。我々はこれをMANGA（MAXI And NICER Ground Alert）と名付けた。この方法は他の衛星にも使えるが、相手がNICERであると特に効果的である。まず、ISSとは1日の70%の時間常に通信が接続されているので、NICERは1日の70%の時間、リアルタイムで即座に観測天体の変更が可能である。さらに、衛星では通常その全体を姿勢制御して目標

座標に向けなければならないが、NICERの場合は巨大なISSには全く影響なしに自身を目標に向けることができるため、簡単でリスクが少ない。これらのメリットは非常に大きく、例えば日本の「すざく」衛星でガンマ線バーストの発生5時間後から残光観測に成功した際の田代氏の記事⁶⁾をお読みいただければ、人工衛星を数時間以内に姿勢変更することの困難さが伝わるであろう。

さて、両機器ともにISSに搭載されているのならば、わざわざ地上を経由せずとも、ISS上で繋がれるはず、と考える読者も多いだろう。それが、図2に示したもう一つのMAXI-NICER間の情報伝達ルートで、これはNICERチームのリーダー、Gendreau氏によってOHMAN（On-orbit Hookup of MAXI And NICER）と名付けられた。具体的には、地上で動いているMAXIの突発天体発見システムをISS内部にあるノートPCにイ

ンストールし、そこで得られた新星や突発現象の情報をそのままダイレクトにNICERに伝え、観測を開始するというものである。しかし、地上でならばすぐにでも開通できそうなこのルートも、ISS上ではそう簡単ではなく、OHMAN計画を実現する上で障壁が2点ある。1つ目は、普段JAXA(つくば)で動かしている突発天体発見システム¹⁾を、ISS内のマシンパワーやOSが限定された環境で動かす必要があることである。2つ目は、NICER側がISS内のPCからMAXIの新星情報を受け取れるように、機上ソフトウェアを書き換えることである。

もしこのOHMANルートを開通できれば、即応時間はほぼNICER望遠鏡の現在位置と目標天体位置の角度の移動時間で決まり、MAXIによる突発現象の発見から約2分以内にNICERによる高感度のX線観測を始めることができる。つまり、図1に示す空白の未開拓部分を探索することができる。

日米による検討の結果、まずはMANGA経路で変動のタイムスケールが1日程度の恒星フレアや、数日以内で進行するブラックホールX線連星の状態遷移などに対して、1時間以内の即応観測を目標にして進め、並行してOHMANに向けた準備を行うこととした。

3. MAXI-NICER連携の開始

MANGAの現状

NICERは2017年6月にISSへと向かい、無事に設置され、6月後半から順次観測を始めた。NICERのメインサイエンスや打ち上げの様子に関しては、NICERの集光鏡の開発に携わっていた榎戸氏のISASニュースの記事⁷⁾にも詳しい。

MANGA連携観測は、打ち上げ前から議論を重ねていたおかげで、NICER打ち上げ直後の2017年7月から開始することができ、2019年5月現在、23例の観測に成功している。その内訳は、9例が恒星フレア、8例が新天体、6例が既知

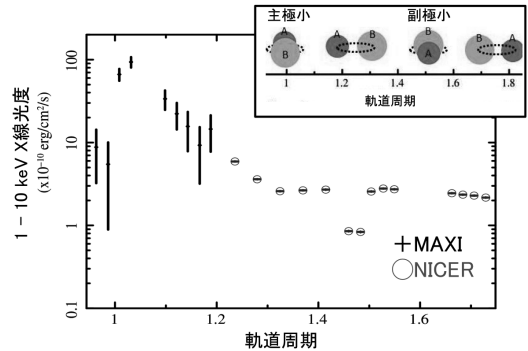


図3 アルゴルで観測された巨大恒星フレアの食。アルゴルBがAの後ろに来る、可視光で見たときの副極小で、NICERが食によるX線減光を観測できた。

のX線連星の時間変動に対するフォローアップ観測であった。

図3にMANGAの恒星フレアの観測例を示す。アルゴルが食変光星であるということは本誌の読者の方々には言わずもがなであろう。一方で、アルゴルがしばしば巨大フレアを起こすフレア星であることはあまり知られていない。恒星フレアの場合、太陽フレアと違って撮像が困難なため、そのループサイズは観測される高温プラズマの情報に冷却のモデルを適用して推定する必要があり、間接的にしか求まらない。ところがアルゴルの場合は、もしフレアの食が観測されれば、連星軌道パラメータがよく分かっているため、フレアループのサイズを幾何学的に制限できるという大きなメリットを持つ。これまでにアルゴルのX線フレア食は2回だけ偶然に観測されており、いずれも副極小で起こった^{8),9)}。可視光で明るい主極小ではX線の減光は見られないため、X線フレアを起こすのは可視光で暗いアルゴルBであることもわかる。今回MANGAによって、初めて狙い通りに副極小にてフレア食の観測に成功し、この時のフレアループの高さは約2太陽半径以上であったことが推定された。

次にMANGAの観測が多かったのが、X線新星である。NICERが打ち上がったからは、ちょ

うど前号の根來氏の記事における「第3期—巨大マンモスの時代」に対応しており、かに星雲よりも明るくなる X 線新星が頻発した。高カウントレートの観測に強い NICER は、このような明るいブラックホール新星（前号の志達氏の記事に詳しい）のミリ秒スケールの早い時間変動の観測にとっても適しており、MANGA 連携によって発見初期の早い段階から観測が行われ、詳細な時間変動解析で NICER の威力を発揮している^{10), 11)}。観測開始までの迅速性についての最速記録は MAXI J1727-203 のフォローアップ観測で、MAXI での発見から約 4 時間であった。目標の 1 時間以内の観測はまだ達成できていないが、MAXI 側も NICER 側もより早くできるように努力を続けている。

OHMAN の現状

OHMAN 計画を実現する上での障壁のうち、1 つ目の突発天体発見システム³⁾を ISS 内のノート PC で動作させることに関しては、JAXA 宇宙科学研究所の「小規模プロジェクト」の予算を頂いてソフトウェアの改良を行い、地上での試験を終え、2018 年度の後半に実際に ISS 内部の PC にインストールし、ISS 一周回分にわたり動作させることに成功した。2 つ目の NICER の機上ソフトウェアの書き換えに関しては、2018 年の ISS R&D Conference にて開催された、ISS 利用に関する「JAXA/NASA 共同ワークショップ」¹²⁾において、MAXI-NICER 間のネットワークの具体的な議論を行い、JAXA-NASA 間で担当者間の合意を得て、NASA の予算獲得に向けて動くこととなった。大げさと思われるかもしれないが、軌道上の装置のソフトウェア書き換えは常に細心の注意を要し、まして異なる国の異なる装置間の話となれば、いたしかたない。もし日本の MAXI が発見した X 線星をアメリカの NICER が即時追跡観測したら、それは誰が見ても ISS 上の日米協力の成功であり、まことの意味での「国際」宇宙ステーションと言えよう。また進展等があれば、学

会やシンポジウムを通してご報告していきたい。

謝 辞

いつも急なお願いを聞き入れてくれる Keith Gendreau 博士を始めとした NICER チームの皆様と、OHMAN 実現のために動いてくださっている JAXA の皆様に感謝します。また、本稿の執筆にあたって、有用なコメントを頂いた牧島一夫氏、常深博氏に感謝します。

参考文献

- 1) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 2) in't Zand 2017, in 7 years of MAXI, ed Serino, M., et al.
- 3) 森井幹雄, 2015, 天文月報, 108, 225
- 4) 川室太希, 2018, 天文月報, 111, 856
- 5) Gendreau, K. C., et al., 2016, SPIE, 9905, 99051H
- 6) 田代信, 2007, 天文月報, 100, 254
- 7) 榎戸輝揚, ISAS ニュース 2018 年 6 月号
- 8) Schmitt, J. H. M. M., & Favata, F., 1999, Nature, 401, 44S
- 9) Schmitt, J. H. M. M., et al., 2003, A&A, 412, 849S
- 10) Stevens, A. L., et al., 2018, ApJ, 865, L15
- 11) Kara, E., et al., 2019, Nature, 565, 198
- 12) http://iss.jaxa.jp/topics/2018/08/180816_workshop.html (2019/5/17)

The new observational system of X-ray transients based on the MAXI and NICER collaboration

Wataru IWAKIRI

Department of Physics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

Abstract: MAXI has discovered many X-ray transients in the last 10 years. To reveal properties of short soft X-ray transients, we are going to proceed with the two kinds of collaborations between MAXI and NICER, called MANGA (MAXI and NICER Ground Alert) and OHMAN (On-orbit Hookup of MAXI and NICER). In this article, we report the detail and current status of these collaborations and the observational result on X-ray flare eclipse from Algol obtained by MANGA.