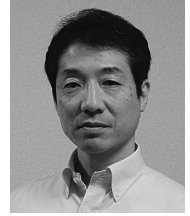


# MAXIによる X線新星の発見

根 来 均

〈日本大学理工学部 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8〉

e-mail: negoro.hitoshi@nihon-u.ac.jp



MAXIの最大の目的の一つは、X線新星などの突然輝き出す突発天体の発見である。この10年間に、MAXIは27個の新たなX線新星を発見し、うち12個がブラックホール（またはその候補）を含む連星系、11個が中性子星を含む連星系であった。本稿では、MAXIによるX線新星の発見から正体判明までの過程と、発見された天体の多種多様な特徴を述べる。発見例の中には高銀緯に位置し、伴星が低質量星のものも多きことから、ブラックホールや中性子星を含む低質量連星系が、銀河面を離れ数多く存在する可能性が示唆される。さらなる全天観測の重要性についても触れる。

## 1. はじめに

重力波の検出<sup>1)</sup>やEvent Horizon Telescopeによる観測<sup>2)</sup>で、ブラックホールの存在はいよいよ疑う余地が無くなった。ただし、そこに物が吸い込まれてゆく際の現象に対しては、依然としてX線観測が重要な観測手段となる。X線の様々な強度変動、多彩なエネルギースペクトル、高速で飛び出すジェットが発生場所や機構など、まだ多くの謎が残る。

こうした謎を解明する鍵となるのが、広帯域・高感度・高精度なX線観測や、短時間変動をも捉えられるようになった可視光を含む、多波長同時観測である。ただしこれら装置の性能を十分に活かすには、光子数などの統計揺らぎが無視できる明るい天体を観測する必要がある。そこで、恒星質量ブラックホールが恒星と連星系をなし、質量降着によりX線を放射するブラックホール連星(BHB)が、最適な観測対象となる。

恒星質量ブラックホールは我々の銀河には数億個も存在すると見積もられているが、これまでBHBは70個ほどしか知られていない<sup>3)</sup>。「はくちょう座X-1」など準定常的に輝く数例を除くと、

それらの大部分はX線で突然に現れ、一時的にしか輝かない現象、すなわちX線新星として発見される場合が多い<sup>4)</sup>。よってBHBの包括的な理解には、X線新星の発見と監視が重要である。

MAXIは全天を監視し、X線での突発天体の発見を、最重要課題の一つとしている。実際、我々はこれまでにBHBを含むX線新星や、より短時間の突発現象（ガンマ線バーストや活動星のフレアなど）を捉え、世界に速報してきた。その科学的な意義は、MAXIのThe Astronomer's Telegram (ATel)への速報（2019年4月末現在307編）が、査読論文で600回近く引用されていることからわかる。

以下、MAXIによるX線新星の発見の過程と、発見された多様なX線新星の特徴を紹介する。また発見から示唆される新たな連星系の姿と、全天観測の科学的意義にも触れる。

## 2. 発見と追観測

MAXIの全天X線監視による新天体の発見は、データを自動監視する突発天体発見システム<sup>5),6)</sup>が発行するアラートメールから始まる。我々は、24時間2交代制でこのアラートメールの対処に当

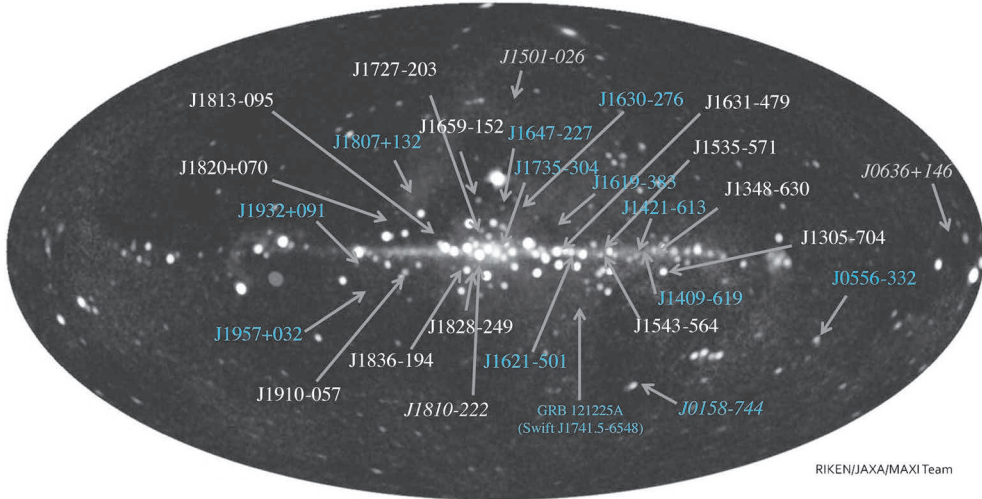


図1 MAXIが発見した新天体の位置をMAXIのGSCとSSCによって得られた全天図上に示した。ブラックホールは白で、中性子星は水色で、白色矮星は斜体水色で、正体不明な天体は斜体白でそれぞれ天体名を示した。なお、全天図を作成した後に明るくなった天体や暗い天体は全天図には表示されておらず、およその位置を矢印で示してある。

たっている。そして新天体を発見すると、いつまで明るい状態が続くかわからないため、その出現と位置を、世界中の研究者に急ぎメールで知らせる。その後、増光の様子やスペクトル、推測される正体などの情報も加えてATelに報告する。

MAXIは広視野で新天体を発見する能力は高いが、発見時の天体の位置決定精度は $0^{\circ}.1-0^{\circ}.5$ に留まるため、別衛星による追観測が重要となる。Swift衛星の科学運用チームのリーダー J. Kennea は、MAXIの運用初期の我々の不確かな情報にもめげず、多くの場合に報告から6時間以内に同衛星のXRT検出器で追観測を行ってきた。その結果、秒角の精度で位置が決まり、新天体か否か判断でき、さらなる追観測が可能になった。

XRTでも分解できない、球状星団の中の星が密集した領域に新天体を検出したときは、最高の位置分解能を誇るChandra衛星が天体を同定した。さらに最近では、天体が太陽近くのためSwiftが観測できない時なども、NuSTAR衛星やNICER X線観測装置が追観測を行い、3つの新天体を確認した。このようにMAXIは、世界の全

天モニターとしての役割を十分に果たしている。

こうして詳細な位置が報告されると、様々な波長で追観測が行われる。そして、数日のうちにそれらの結果がATelに報告され、その正体が明らかされていく。その様子は感動的できさえる。

### 3. 発見されたX線新星の正体と数

MAXIが検出した突発天体には、ガンマ線バースト等の短時間の突発現象もあるが、本稿ではX線新星に焦点を当てる。

弱磁場の中性子星やブラックホールは、自らは殆どもしくは全くX線を放射しない。しかしそれらが恒星との連星系を成すと、伴星からのガスが降着円盤と呼ばれる円盤を形成し、重力エネルギーを解放しつつ降着し、X線を放射する。このとき、降着する量が少ないとガスはいったん円盤の外縁部に溜まり続ける。そして溜まったガスの温度が上昇して電離し粘性が高まると、一気に降着が始まり、数十～数百日間だけX線が放射される<sup>7)</sup>。これが「X線新星」の最も代表的な例である。

MAXIは、観測当初から短時間の突発現象は捉える一方、X線新星に関しては観測を始めて1年余り、RXTE衛星など先行する諸衛星の後塵を拝していた。しかし2010年9月25日にMAXI J1659-152を発見して以来、MAXIはX線新星発見の先陣を切ることとなる。

新天体が発見され、MAXI自身も含め追観測が始まると、過去の知識から、数日で天体の正体に見当がつく。例えば、X線バーストや周期パルスが観測されれば、「表面」のある中性子星とわかる。他方、激しく不規則なX線の短時間変動に加え、べき乗型スペクトル、もしくは「低温度の熱的成分とハードテイル」というスペクトルが観測されるとブラックホール「らしい」<sup>4)</sup>となる。X線と電波の強度比は中性子星とブラックホールを判別する手掛かりとなり、可視光観測からは、伴星の情報や、減光による距離の推定値が得られる。

こうしてMAXIが発見し、MAXI名を冠するX線新星は、2019年4月末までに27天体となった。その主星の内訳は、まだ推測中のものも含め、ブラックホール（候補も含む）12、中性子11（うちパルサー1）、白色矮星1、不明3である。図1にはMAXIで得たX線全天図にそれらの位置を示し、図2と3に各天体の光度曲線を示した。ここに載せたのは、太陽近くのため詳細な位置が得られなかったJ1619-383とJ1630-276を除き、正真正銘の新天体であり、MAXI J0911-655のように、過去に暗いながらも受かっていた天体は含まない。

このようなX線新星の一部は、数年～数十年で再び明るくなる再帰X線新星なので、後発のミッションほど新天体の発見は難しくなる。にもかかわらず、MAXIによる銀河系内の新しいBHBの発見数12は、RXTEが17年間で築いた15個に次ぐ、歴代2番目の数となった。

## 4. 新天体の特徴

発見されたX線新星は、偶然にも面白いことに、他の衛星が発見したものを含めても、次の3つの期間で様相がかなり異なる（図2,3参照）。

### 4.1 第1期—暗いブラックホール新星

BHBや降着型中性子星のX線光度は、降着ガスに働く重力と放射圧が釣り合う「エディントン限界光度」で基本的に頭打ちとなる。この値は中心天体の質量に比例するので、中性子星より数倍から1桁ほど質量が大きいブラックホールでは、よりX線光度が高くなると期待され、実際、これまでの観測でその傾向が確認されている。

ところが2014年初めまでの第1期に発見された6つのBHBのX線ピーク強度（見かけの値）は、「ぎんが」衛星やRXTEが20-30年前に捉えたものより2桁ほど低く、半数は図2で青系統の色で示した中性子星X線新星と大差ない。このようなX線で暗い（強度の低い）BHBは過去に、RXTEやINTEGRAL衛星の銀河面サーベイによって発見されてきた。MAXIの全天観測により、同様な天体が高緯度（ $|b| > 5^\circ$ ）でも多く見つかるようになったといえる。なぜX線で暗いか、以下の3つの可能性が考えられる。

第1は、これらBHBが系統的に遠くに位置するという可能性である。実際、多くのBHB X線新星ではピーク光度はエディントン限界の1割程度という報告<sup>8)</sup>があり、また、RXTEなどが発見した銀河中心方向の暗いBHBではソフト状態も観測されているので、光度はかなり高かった可能性がある。このような遠方のBHB X線新星の発見は、後述する銀河系内のブラックホール総数の見積りという点で重要となる。

第2は、発見したBHBでは降着量が少なく、光度がエディントン限界に比べ大幅に低かったという可能性である。実際、これら6天体のうち4つ（J1659-152, J1836-194, J1305-704, J1828-249）では、エディントン限界で規格化した光

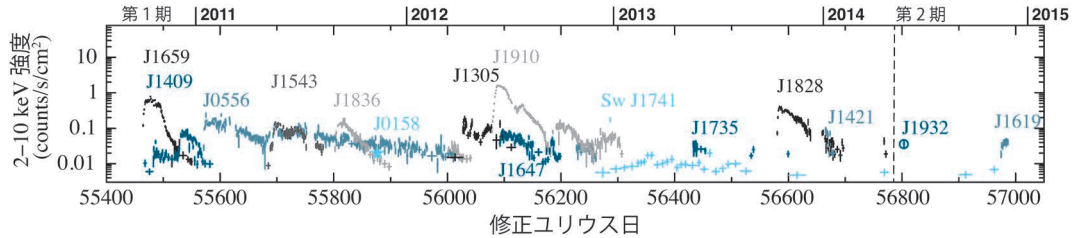


図2 MAXIが発見した新天体の光度曲線 (MJD 55400–57050). ブラックホールは黒か灰色で、それ以外を青系統の色で示す. 強度は、1日平均のデータを  $5\sigma$  以上になるようにピンまどめし、有意な点のみ記した. よって、1日未満の短い増光の場合は低く表示されている. (代表的な X 線源「かに星雲」の強度は、 $2.2 \text{ counts/s/cm}^2$  である.)

度が增大する際の指標である、ソフト状態への完全な遷移 (本号 633 頁, 志達による記事参照) は見られなかった. また, J1659 では連星周期がこれまで発見された BHB では最短の 2.4 時間と見積もられている<sup>9)</sup>. このことも, 連星系が幾何学的に小さいために, 降着円盤に貯められる降着物質が少なかった可能性を示す<sup>10)</sup> (11 月号掲載予定, 浅井による記事も参照).

第3に, これらの X 線新星ではブラックホールが低質量で, エディントン限界光度そのものが低かったという可能性も考えられる. しかし BHB の平均質量  $\sim 7M_{\odot}$  は, ブラックホールの下限質量のたかだか 2-3 倍なので, この可能性は低い.

また, BHB ではないが, この期間に小マゼラン雲近傍で発見された J0158-744 も, 白色矮星の超軟 X 線新星の初期爆発を初めて捉えた特筆すべき重要な発見である<sup>11)</sup>.

#### 4.2 第2期—暗く短い正体不明の X 線新星

続く 2017 年中頃までの第2期の新天体は, MAXI で受かった期間が 1 スキャンからせいぜい数日と短いものが多い. 第1期中性子星 X 線新星も様々な継続時間を示したが, この期間のものはそれらより 2-3 桁短い.

そのうちのひとつ J1957+032 は, MAXI では 1 年半の間に 4 度にわたって検出され, 各検出は 2-3 スキャン (3-5 時間) という短いものであった. Swift による追観測の結果と合わせ, 同現象は, “Very Faint X-ray Transient (VFXT)” と呼

ばれる, 非常に暗い中性子星連星系からの増光である可能性が指摘されている<sup>12)</sup>.

さらに短い例として, MAXI の発見後に Swift でも約 1 日しか受からなかった J0636+146<sup>13)</sup> や, Swift の即時追観測でも受からなかった J1501-026<sup>14)</sup> が挙げられる. これらの正体は不明で, 高銀緯であることから, いわゆる X 線新星ではないかもしれない. しかし MAXI が当初ガンマ線バーストと報告した GRB 121225A が, 後に X 線新星 Swift J1741.5-6548 と判明した例<sup>5)</sup> もあるので, “burst only source” と呼ばれる中性子星の一種である可能性もある.

高銀緯でのこのような短い X 線増光は, MAXI によって初めて多く捉えられ始めた. VFXT にせよ, J1932+091 の解釈の一つである<sup>5)</sup> “Supergiant Fast X-ray Transient” と呼ばれる大質量星と中性子星の連星系にせよ, 短時間での X 線増光のメカニズムは分かっていない. MAXI の全天観測は中性子星連星系の多様性という観点でも新たな情報を提供し続けている.

#### 4.3 第3期—巨大マンモスの時代

2017 年半ば以降になると様相は一変し, 今世紀最大級の明るさの J1535-571 の発見を初め, 「ぎんが」や RXTE の時代に現れたような非常に明るい X 線新星, いわば巨大マンモスを, MAXI は次々に発見した.

J1535 とそれに続く奇妙な天体 J1820+070 の長期変動については, 志達による記事を参照された

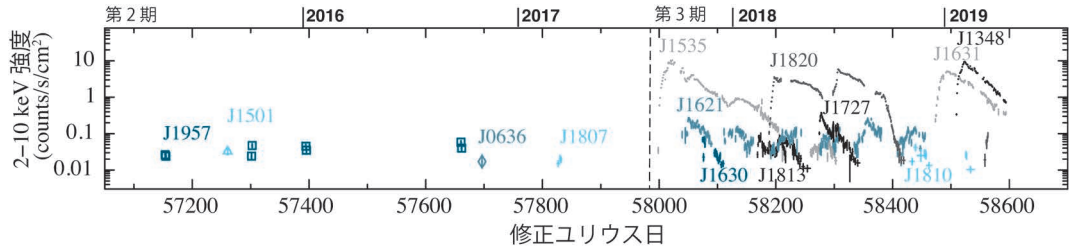


図3 (図2の続き, MJD 57050-58700)

いが, J1820ではX線のみならず, 可視光でも1秒以下の激しい短時間変動がかつてない精度で観測されている<sup>15)</sup>. これらの観測により, まだ謎が多いブラックホール特有の短時間変動やジェットの起源の解明が進むことが期待される.

それらに続くJ1631-479とJ1348-630は, 本稿の執筆段階ではまだ減光中だが, 先の2天体とは状態遷移の様子などがまた異なる特徴を示している. 統計的に十分な明るさを持つこれらの天体をNICERやNuSTARなど最新の検出器で観測することにより, これまでは統計的な問題で決め手に欠いた, ブラックホール近傍での相対論効果の検証<sup>16-18)</sup>や, 多波長観測による降着円盤の大局的な理解の進展が期待される. 世界最高のエネルギー分解能を持つXRISM衛星の打ち上げも待たれる. こうして明るいX線新星の相次ぐ発見により, ブラックホール研究も高性能X線検出器が十分活かせる新たな時代に入った.

## 5. 高銀緯に分布する新天体

MAXIで発見されたX線新星の距離を様々に見積もって3次元地図を作ると, それらは銀河中心方向に広く分布しており<sup>14)</sup>, 太陽系近傍で多く検出したわけではない. さらにこれまでも述べたように, MAXIで発見されたX線新星は, かなり高銀緯に分布している(図1). まだ約 $2\sigma$ の有意性であるが, MAXI X線新星のうち高銀緯( $|b| > 5^\circ$ )に分布する相対数(56%)は, 低質量連星系カタログ<sup>19)</sup>にある187個の天体から, 球状星団などを除いたサンプルの場合(26%)と比べ超

過を示す.

MAXIでは位置分解できない低銀緯の明るい天体付近での新天体の数なども考慮しなければならないが<sup>14)</sup>, 上記のことから, 銀河面を離れた高銀緯領域に, ブラックホールや中性子星を含む, 低質量連星系が数多く存在する可能性が示唆される. また, このことは, 同時に, 相当な数の孤立したブラックホールや中性子星が銀河面を離れて存在することも意味する.

この示唆は, 3つの課題に直結する. まず, 銀河面に集中する大質量星から生まれるはずのブラックホールや中性子星が, いかにして高銀緯まで分布するかという問題である. 次に, 仮に中性子星は誕生時のキックで銀河面を飛び出したとしても, MAXIで検出されるには連星を組まねばならず, 十分な確率で低質量星を捕獲できるかという問題. 最後に, ダークマターの候補となるMACHO探査では, 銀河系ハローに高い密度でブラックホールが存在する可能性には否定的な結果が出ており<sup>20)</sup>, その結果といかに整合させるかである.

## 6. 長期観測と今後への期待

このように, MAXIによる長期観測は新天体の発見のみならず, 統計的研究においても重要である. 高銀緯での天体の数の推定に加え, 銀河全体のブラックホールの総数を見積もるには, 現在のところ, BHBの発見された数とX線新星の再帰間隔が重要な観測量となる. かつて, X線新星は平均10-50年間隔で増光を繰り返すと予想されて

いた。しかし一部の天体を除き、この50年の間に1度しか増光していない天体も多い<sup>3)</sup>。BHBの数は、高密度星の元となる大質量星や連星進化の研究においても稀少な情報を与える。こうした研究を進める意味で、MAXIのさらなる長期運用が望まれる。

今後、さらなる長期観測により、重力波で発見されたような数十太陽質量<sup>1)</sup>をもつBHB X線新星も見つかるかもしれない。そして、MAXIが多くの再帰X線新星を検出してきたように、50年後、もしくは100年以上経って再びMAXI名を持つ天体が明るく輝き、MAXIの活躍を思い起こさせるであろう。

最後に、これらの研究成果は、長年にわたる多くのMAXIチームのメンバーの多大な貢献によるものであることを記しておく。また、本稿に対して大変有益なコメント等を頂いた、牧島一夫氏、常深博氏に感謝する。

### 参考文献

- 1) Abbott, B. P., et al., 2016, Physical Review Letters, 116, 061102
- 2) The Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L1
- 3) Corral-Santana, J. M., et al., 2016, A&A, 587, A61
- 4) McClintock, J. E. & Remillard, R. A., 2006, in "Compact stellar X-ray sources", eds. Lewin, W. H. G. & van der Klis, M., (Cambridge University Press), 157
- 5) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 6) 鈴木素子, 根来均, 2010, 天文月報, 103, 465
- 7) 嶺重慎, 1991, 天文月報, 84, 288

- 8) Dunn, R. J. H., et al., 2010, MNRAS, 403, 61
- 9) Kuulkers, E., et al., 2013, A&A, 552, A32
- 10) Meyer-Hofmeister, E., 2004, A&A, 423, 321
- 11) Morii, M., et al., 2013, ApJ, 779, 118
- 12) Beri, A., et al., 2019, MNRAS, 486, 1620
- 13) Kennea, J. A., et al., 2016, The Astronomer's Telegram, 9710
- 14) Negoro, H., & MAXI Team, 2017, 7 years of MAXI: monitoring X-ray Transients, 15, <http://maxi.riken.jp/conf/sevenyears/pdf/toc.html> (2019.8.5)
- 15) Sako, S., et al., 2018, The Astronomer's Telegram, 11426
- 16) 牧島一夫, 山田真也, 2010, 天文月報, 103, 186
- 17) 根来均, 2010, 天文月報, 103, 379
- 18) 海老沢研他, 2010, 天文月報, 103, 445
- 19) Liu, Q. Z., et al., 2007, A&A, 469, 807
- 20) Wyrzykowski, L., et al., 2011, MNRAS, 413, 493

### X-ray novae discovered by MAXI

**Hitoshi NEGORO**

*Department of Physics, Nihon University, 1-8, Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan*

Abstract: MAXI discovered 27 X-ray novae including 12 black hole candidates in 10 years. Here, I describe how we have discovered and identified the X-ray novae, and introduce their various interesting properties. A suggestion from the discoveries and the importance of further all-sky survey with MAXI are also discussed.