

MAXIで見たブラックホール新星

中平 聡 志・MAXI チーム

〈独立行政法人理化学研究所 MAXI チーム 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: nakahira@crab.riken.jp



全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は、打ち上げ以降 2 年間の運用で多数のブラックホール連星からのアウトバースト検出に成功しました。3 例は MAXI 以降に発見されたもので、そのうち二つは MAXI が発見した“MAXI 名”を冠したブラックホールです。われわれは MAXI の常時観測性を活かし、全世界の研究者と観測情報の速報、共有を通じた研究を進めています。本稿では MAXI の特徴を活かした観測例として、MAXI によって発見され強力なフォローアップ観測が行われた MAXI J1543-564 と、MAXI 自身の観測データを使って詳細な研究が行われ、Suzaku 衛星と連携して詳細解析を行うことができた XTE J1752-223 の二つを挙げ、それらの解析結果について紹介します。

1. はじめに

X 線で見える星空、それは可視光で見える星空とは全く様子が異なります。可視光で輝く天体の多くの明るさが私たち人間のタイムスケールから見てほとんど定常的であるのに対して、X 線で明るく輝く天体はミリ秒から年にわたるさまざまなタイムスケールで何桁もの大きな光度変化を示しています。そのような X 線天体のうち、あるものは一度だけ輝き、またあるものは繰り返し輝きますが、いつ・どこで・どのような変動現象が起こるのかは誰も予測することはできません。

そのような突発的に発生する現象をとらえ、その活動を常に監視するのに最も適した装置が全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)¹⁾ です。MAXI は 2009 年 7 月にスペースシャトル・エンデバーによって国際宇宙ステーションに輸送され、同年 8 月初めから観測を開始し、現在は 2 年が経過しました。同じく X 線を観

測する日本の装置として Suzaku 衛星がありますが、Suzaku 衛星は空のある 1 点（月と同じ程度、全天のわずか 100 万分の 1 程度の視野領域）を 1 日以上かけて精密に観測するのに対して、MAXI は国際宇宙ステーションが 92 分間隔で地球を周回するごとに全天の広い領域（1 周～70%、1 日～95%）を観測します。MAXI の観測データ、300 程度の天体の光度とスペクトルは理研 MAXI サイト^{*1}にて毎日公開されています。MAXI の観測とデータ公開については、天文月報 2010 年 6 月号²⁾もご覧ください。

図 1 に、MAXI の 1 年 7 か月積分の観測画像を銀河座標系で示します。この画像中には、暗いものまで含めると数百もの X 線源が確認できます³⁾。明るい天体は多くが銀河面上に集まっており、これらのほとんどは中性子星やブラックホールなどのコンパクト星と通常の恒星が連星系を形成している「X 線連星」です。銀河系内に存在する X 線連星は非常に明るく、40-100 秒程度しかない

*1 <http://maxi.riken.jp/top>

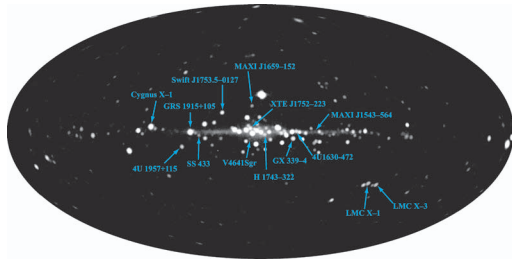


図1 MAXI/GSC で取得した、2009年9月26日から2011年4月27日までの観測画像^{*2}。MAXI/GSCによって有意に検出されたことのあるブラックホール連星には矢印で名前を示しました。これらのうち、銀河系内にあって同時期に検出できるのは定常的に明るいCygnus X1, GRS 1915+105, Swift J1753.5-0127, 4U 1957+115のほかには0-2個程度です。

MAXIによる1観測でも十分なデータを得ることができ、われわれにとって格好の研究対象となります。本稿では、その中でブラックホール連星に関してMAXIを中心とした観測的研究の現状を紹介します。

2. ブラックホール新星

はくちょう座X-1 (Cygnus X-1)が観測的に最初のブラックホール連星と信じられるようになった1970年代以来^{4),5)}, 50個程度のX線源がブラックホール連星として同定されています⁶⁾。われわれの銀河系内に存在するブラックホールの数は数千万個とも1億個と見積もられていますが⁷⁾, ブラックホール連星は100にも満たない数しか見つかっていません。この差を生み出しているのが、連星系をなしているブラックホールの割合なのか、活動時間の割合なのかこれまでのところはっきりとはわかっていませんが、現在知られているブラックホール連星の多くが「X線新星」と呼ばれる、普段はほとんどX線を発していないに

もかわらず突如として明るく輝き始める天体だという事実があります。この爆発的な増光現象は「アウトバースト」と呼ばれ、繰り返しアウトバーストを起こす天体もあれば、X線観測の歴史上1度しか観測されたことのない天体もあります。

銀河系内のブラックホール連星は、系のサイズが小さく近傍にあるため、ブラックホール連星を観測することは、AGNでは観測できない現象を短時間のうちに高統計で調べられるという意義があります。

2.1 ブラックホール新星の放射スペクトル

X線連星は伴星から流入するガスの重力エネルギーの解放によりさまざまな波長の電磁波を発生し、それはガスの流入量の変化や降着するガスの状態変化に依存するために、激しく変動します。

ブラックホール連星の放射スペクトルは大きく分けて二つの状態、ハード状態とソフト状態をとりうることが知られています⁹⁾。ハード状態は比較的低光度のときに見られ、短時間変動を示し、100 keVあたりに折れ曲がりをもつ光子指数1.7程度のべき関数的な放射スペクトルを示します。この放射は、重力エネルギーによって数十億度に加熱されたブラックホールを取り巻く希薄なコロナが、逆コンプトン散乱によって低エネルギー光子にエネルギーを与えることで説明されます。ソフト状態の放射スペクトルは比較的高い密度で、ブラックホールの近傍まで伸びる降着円盤(標準円盤⁸⁾と呼ばれる; CDとかレコードのような形状)からの、内縁温度~1 keV程度の黒体放射で説明できます。

状態間の遷移の観測も重要で、これまでの観測でハードからソフトへの遷移と巨大ジェット放出の間に関連があると考えられるようになってい

^{*2} 表紙でも使用されている、全天画像のカラー版は以下のURLで公開しています。
(本文中で用いられているデータとは異なり、2011年12月10日のデータまで使われています。)
http://maxi.riken.jp/references/allsky201112/gsum_MJD55050-55905_AIT.png

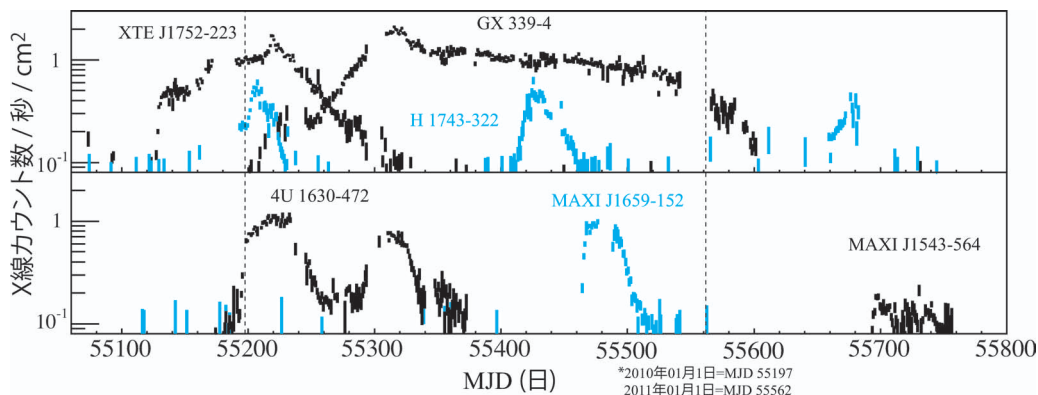


図2 MAXIによって観測された、六つのブラックホール新星の2-20 keV光度曲線。点線はそれぞれ、2010年と2011年の1月1日。

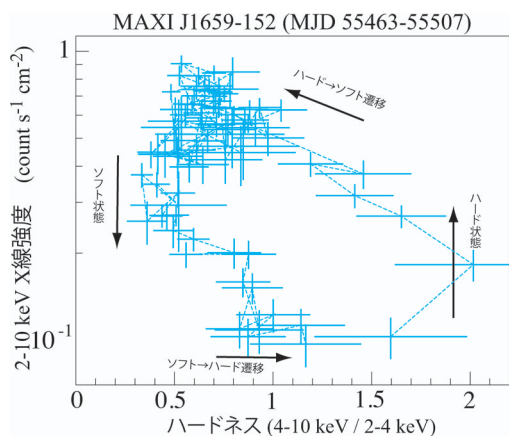


図3 MAXI/GSCが取得した、MAXIJ1659-152アウトバーストのハードネスとX線強度の変化の図。各データ点は0.5日平均で、時間順に点線で結ばれています。

ます⁹⁾。ハード状態とハードからソフト状態への遷移途中には、QPO（準周期的振動）と呼ばれる特徴的な時間変動が見られ、円盤の状態によって特徴が変化することから状態の同定のために利用されますが、その起源はまだわかっていません。

2.2 MAXIによる光度曲線

図2に、MAXI観測開始以降のブラックホール新星：XTE J1752-223^{10), 11)}、4U 1630-472¹²⁾、H 1743-322^{13), 14)}（3回）、GX 339-4^{15), 16)}、MAXI J1659-152^{17), 18)}、MAXI J1543-564¹⁹⁾の2-20 keV

X線光度曲線を示します。2年間の観測でMAXIは、新しく発見されたXTE J1752-223とMAXIソース二つを含む、8天体から12回のアウトバースト検出に成功し、ほぼすべてに対してアウトバーストの初期状態にある間に速報を行っています。

ブラックホール新星の観測において、放射状態の推移を概観するのにハードネス（硬X線と軟X線の強度比）光度図がよく使われます。図3には、例として、MAXI J1659-152のハードネス光度図が示されています。アウトバースト初期にはどの天体も、硬X線の放射が強い状態、つまりハード状態にあります。そして図中に矢印で示したとおり、しばらく増光した後に、軟X線の割合が増加しソフト状態に至ります。その後は、指数関数的な減光に転じ、再度ハード状態に戻り、終息に向かいます。

補足: J1659-152 について

2010年09月25日にガンマ線バーストGRB 100925A²⁰⁾としてSwift衛星によって速報されましたが、MAXIによっても独立に発見され、銀河系内の新突発天体だと同定されました¹⁷⁾。日本の観測装置によるブラックホール新星の発見は、ぎんが衛星以来20年ぶりになります。

後の観測によってMAXI J1659-152は、これまでに見つかった中で最も短い約2.4時間の連星周期をもつブラックホール連星²¹⁾であることが判明しました。この天体は図1を見てわかるとおり、比較的高い銀緯に位置しますが、Swift J1753.5-012 (3.2時間) やXTE J1118+480 (4.1時間) など短い連星周期をもつブラックホール連星はいずれも比較的高い銀緯で見ついていることから、連星系の進化と関連して非常に興味深い問題であると考えられています²²⁾。

3. MAXI による観測の特徴

このようにアウトバーストのあらましについては理解が進んできていますが、詳細な放射の物理状態や幾何学的形状、状態間の遷移に関する事など、わかってないことがまだ多数残っています。また、状態遷移を示さずに終息したXTE J1118+480 や GRO J0442+32 や、5章で説明するXTE 1752-223のようにこれまでの描像と異なるアウトバーストが見つかっています。

MAXIはこれまでの全天モニターの中で最も高い感度をもつので、(1) X線新星のアウトバーストの始まりを直ちに検知し、全世界の観測者に通報することで、初期段階からの詳細観測に結びつけ、(2) 数カ月から1年にわたるアウトバーストの始まりから全体をモニターし、自身でもX線強度やX線スペクトルの変化を調べることができるという利点をもっています。電波によって観測される状態遷移に同期した巨大ジェット放出と、X線放射の詳細な相関関係を調査するためにもこの点が重要です。

さらに、アウトバースト全体を統一的に理解するためには、光度の特に高い/低い状態や、状態遷移中など特別な状態にあるタイミングを狙って精密に観測しなければなりません。そこで、(3) MAXIが常にモニターを行うことで観測する価値の高い状態をSuzaku衛星などに知らせ、広帯域にわたって精密な観測を行う連携観測も重要です。

4. MAXI J1543-564: MAXI による発見と追観測

迅速な新天体の検出と速報を行うため、われわれは全天の各領域を調べなくなった天体を無バーストに探査する“ノバサーチ”と、送られた突発天体候補の真偽を判断し、本物の天体現象については位置、時刻、強度を通報する“アラートシステム”からなる速報システムを運用しています²³⁾。詳細は天文月報2010年7月号「全天X線監視装置MAXI (II)」²⁴⁾を参照してください。MAXIは常に移動する視野によって広い天空領域を観測するように設計されていますが、一方である一つの天空領域に対する観測量は少なくなります。そのためMAXIにとっては、暗い天体については特に、詳細な観測ができる指向型観測装置の補助は必要不可欠なのです。

突発天体が発見されるとわれわれは、半自動的に独自のメーリングリスト速報を流します。その後詳細解析がなされ、イベントの確実性と重要性が検証されるとThe Astronomer's Telegram (ATel)などにレポートを投稿します。その情報を見た世界の研究者が追観測を行い、詳細観測装置や他の波長による観測結果をレポートします。われわれはこのような情報交換を軸に研究を進めています。Swift衛星のMAXIに対する相補的な観測装置と非常に高い機動力は、われわれの発見した新天体候補のフォローアップにおいて威力を発揮しています。2011年5月にわれわれが発見したMAXI J1543-564に関しては、以下のように観測が進行していきました。

—2011/05/08 (UT)

- 10:20 新天体検出システムでトリガーされ、メーリングリストに第1報
- 14:43 強度が低いこともあり、慎重に調査。その結果新天体だと確信し第2報
- 16:20 Swiftチームがフォローアップ観測の

準備を開始

- 16:55 ATelへMAXI観測結果の詳細を報告¹⁸⁾
- 18:20 Swiftによるポインティング観測
- 2011/05/09 04:03 Swiftによる新天体の確認と、より詳細な位置決定²⁵⁾
- 2011/05/10 RXTE衛星による追観測²⁶⁾
- 2011/05/12, 17 ソフト状態への遷移^{27), 28)}
- 2011/05/18 可視光対応天体の候補が見つかる²⁹⁾
- 2011/05/19 電波による対応天体候補の検出³⁰⁾
- ～2011/07末 数日に1回のフォローアップが継続中

図4(a) (b)には、天体の出現前と直後のイメージが示されていますが、イメージの中心に天体が現れていることがわかります。最初に検出された際の明るさはかに星雲の約50分の1の明るさであり、われわれの新天体検出システムの感度の限界に近い暗さでした。そのため確認に数時間を費やしましたが、それでも最初の検出から8時間後

にはSwift衛星のXRTによってわれわれの決定した方向が観測され(図4(c))、誤差領域の真ん中付近に新天体があることが確認され、より高い精度で座標が決定されました。

われわれはRXTE衛星に対してもToO観測を提案し、Swift/XRTやRXTE衛星の追観測による詳細解析ではX線連星のハード状態において典型的な、光子指数 ~ 1.7 のべき関数的なスペクトルと、1 Hzの準周期的振動(QPO)が観測されました。さらに数日後にはブラックホール状態遷移途中、続いてソフト状態であることを示す観測結果が得られ、その時期に電波対応天体候補が見つかったことなどと合わせブラックホール連星の過去の観測例と一致する特徴をもつことから、ブラックホール連星の候補として同定されました。

発見から3カ月弱が経過した時点でもMAXI J1543-564はMAXIによって検出され続けており、RXTE衛星とSwift衛星によるフォローアップ観測は数日おきに行われています。それらの結果によるとMAXI J1543-564は2011年7月末(本稿執筆)時点で、ソフト状態にあり、減光を続けています。

5. XTE J1752-223: MAXIによるモニタと Suzaku 衛星による詳細観測

5.1 アウトバースト全体の光度変化

XTE J1752-223はMAXI運用初期の2009年10月23日にRXTE衛星の銀河面スキャン観測によって発見されました¹⁰⁾。MAXIもその数時間前から検出に成功していましたが、初期運用中で新天体発見システムの運用開始前で、データ解析手順も確立しておらず即時の速報はかきませんでした。しかし、なんとか解析を行い1日遅れでMAXIとして最初のATelを投稿しました¹¹⁾。MAXIによって観測された8カ月にわたる光度曲線は、XTE J1752-223が過去のアウトバーストと異なる特徴をもっていたことを明らかにしまし

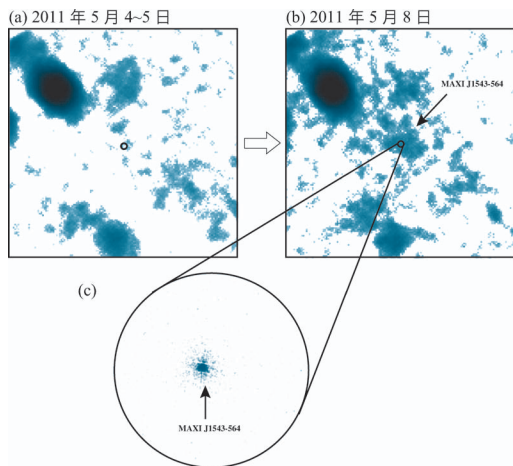


図4. MAXI J1543-564のMAXI/GSCによる(a)発見直前の2日と(b)発見日の1日をそれぞれ積分した2-20 keVイメージと、(c) Swift/XRTでMAXIの決定した座標を最初に見たときのイメージ。MAXIの決定した位置とその誤差領域を円で示しており、各図で同じ天球上の領域に対応する。

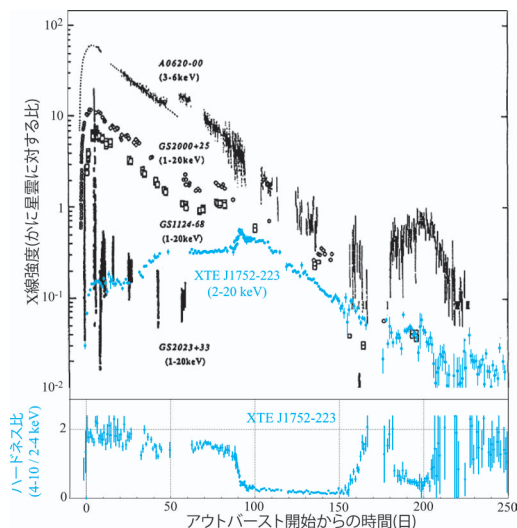


図5 過去のブラックホールX線新星の光度曲線とXTE J1752-223 (青いプロットで示した)の比較 (黒いプロットはTanaka, 1992, in Ginga Memorial Symposium, ISAS, p. 19より引用³²⁾). 下段にはハードネス比を示しており、アウトバースト開始日は2010年10月23日(MJD 55127)に対応する。

た。以下で説明する、この天体のアウトバースト全体の光度変化についての詳細は、論文³¹⁾にまとめられています。

図5に過去のブラックホールX線新星とXTE J1752-223の光度曲線を示します。横軸はアウトバーストの開始が確認されてからの日数で上段にはX線の明るさ、下段にはハードネスが示されています。過去のアウトバーストはこれまで述べたように、早い段階でピーク光度に達したあと指数関数的に減光していますが、XTE J1752-223は発生から90日程度にわたってハード状態を継続し、その後急激にソフト状態へ遷移していることがわかります。しかも、増光途中でそれぞれ約25日間と40日間の光度が安定した期間があり、

このような光度変化はこれまで見られたことのないものでした。そこで、われわれは急激に(ガスを飲み込んで)明るくなる通常のブラックホール新星に対してゆっくりと増光したXTE J1752-223を「草食系ブラックホール」と名づけ、日本天文学会2010年秋季年会において記者発表を行いました^{*3}。

このような状態を説明するためには降着円盤の質量降着率を一定に保つメカニズムや、降着円盤を安定に保つメカニズムが必要だということになります。それがどのようなものかは、まだわかっていません。残念ながらハード状態の指向型観測装置での詳細な観測は、最初の平坦な状態(図5の0-20日目あたりに対応)を除いて天体が太陽近傍に位置することによる視野角制限のため不可能でした。しかし、軟X線帯域ではMAXIのみが短い不可視期間を除くアウトバースト全体の光度変化を追い、スペクトルの取得を行うことができました。ここでは、Suzaku衛星も観測を行うことができたソフト状態を中心に、ハードからソフト、ソフトからハード遷移の両方を含む2010年1月4日から2010年4月6日(MJD 55200-55292)のデータを解析し、スペクトル変化を調べた結果について述べます。

5.2 MAXIによる連続的なスペクトルのモニター

5.2.1 解析方法

私は、上記期間のMAXIによる観測データからスペクトル解析が可能な752回のスキャンを抽出し、データの統計量を上げるためにそれぞれ足し合わせ、52の期間に分割したデータセットを作成しました。過去の観測結果から、ハード状態における放射スペクトルは高エネルギーに折れ曲がりをもつ“べき関数”、ソフト状態におけるブラックホール連星からの放射は標準円盤に起因す

*3 興味をひく名前のおかげか多くのメディアに取り上げていただきました。確か“少食系”の聞き間違いで生まれた案だったと記憶しています。発表までに“草食系男子”が死語になるかと思ってましたが、いまだに使われていて男子的には複雑です。

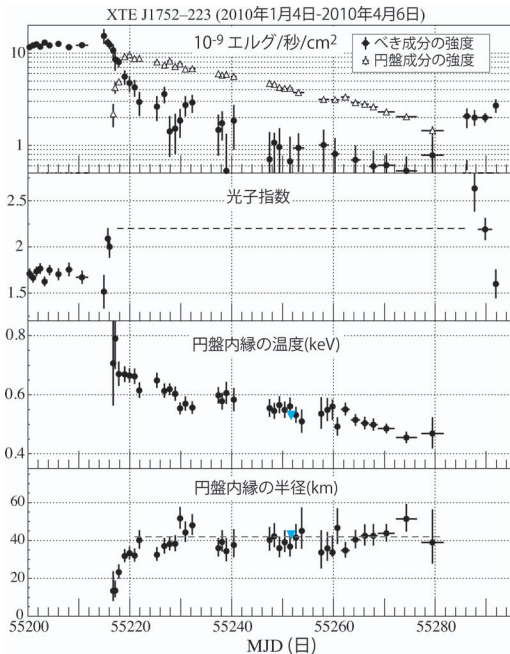


図6 MAXI/GSCのスペクトルをMCD+べき関数モデルを使って解析して得た各パラメーター。青いプロットが同じモデルで解析したときのSuzaku衛星による結果で、すべての誤差は1シグマで表示しています。

る、円盤内側に向かって連続的な温度分布をもつ多温度黒体輻射(MCD)モデル^{33), 34)}とべき関数の足し合わせ(以後MCD+べき関数)で“ある程度は”再現できることが知られています。

このMCDモデルを用いたスペクトル解析を行うことによって、標準円盤を前提とした、降着円盤の幾何学的形状と温度を調べることが出来ます。以下ではMCD+べき関数モデルを使った、3カ月にわたるデータのスペクトル解析結果(MCD成分が不要な場合はべき関数のみを適用)を示します。

5.2.2 解析結果

すべてのデータセットに一連の解析を適用した結果を図6に示します。この図から、光度曲線が一定を保っていた2010年1月4-18日(MJD 55200-55214)の期間はMCD成分が不要で、スペクトル

も光子指数~1.7のべき関数を保っていたことがわかります。これはハード状態では典型的な値であることからハード状態であったと考えられます。続いて、2010年1月19日(MJD 55215)のデータでは光子指数が~2まで急激に軟化、2010年1月20日(MJD 55216)以降はMCD成分が有意に検出されました。オーストラリアコンパクト電波干渉計の電波観測によると、2010年1月21日(MJD 55217)に巨大ジェットの放出を示す観測結果が得られていて³⁵⁾、MAXIによって観測されたX線スペクトルのハードからソフトへの遷移³⁶⁾と同期していることがわかりました。

その後2010年1月24日(MJD 55220)から、再度ハード状態に戻る2010年4月6日(MJD 55292)の期間はMCD+べき関数モデルでよく再現でき、MCD成分が主となる放射スペクトルを持続しました。MCD成分は、内縁の温度が~0.7 keVから~0.4 keVまで変化しているにもかかわらず、内縁の半径は常に一定の値を維持しました。

この半径は一体何を表しているのでしょうか? いわゆる事象の地平面のようなものが想像されますが、一般相対性理論によると回転のないブラックホールの場合、シュバルツシルト半径の3倍より内側では安定的な円運動ができないと考えられています(最終安定円軌道と呼ばれる)。仮にスペクトル解析によって得られたMCD放射の内縁半径がシュバルツシルトブラックホールの最終安定円軌道に対応すると考えた場合、ブラックホールの質量を推定することができ、質量は天体までの距離に依存しますが典型的な距離として3.5 kpcを仮定した場合、XTE J1752-223の質量は太陽質量の6.2-8.0倍となります。この値は、ブラックホールであるという前提のもとに導きましたが、求められた質量が太陽の3倍より大きいことからその前提と矛盾しないため、XTE J1752-223はブラックホールであるという結果が得られました。

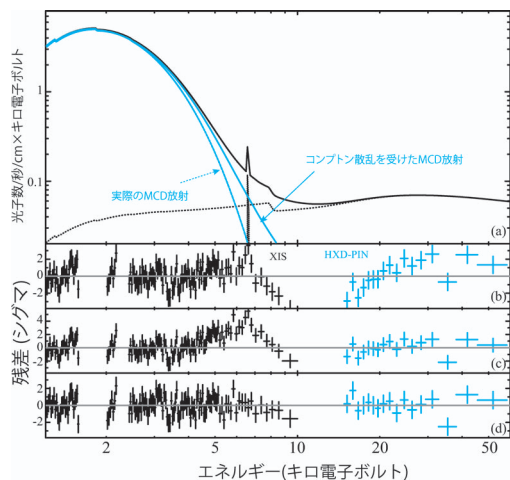


図7 Suzaku衛星によって2010年2月24日に観測されたXTE J1752-223の、(a)今回われわれが提案したモデルと、(d)モデルと観測データとの残差。(b)単純な多温度黒体放射モデルによる残差、(c)広がった鉄輝線らしき構造が見える連続成分の選び方をした場合、をそれぞれ示しました。

5.3 Suzaku衛星のデータを使ったより詳細なスペクトル解析

2010年2月24日(MJD 55251), MAXIチームと米国の研究チームによるSuzaku衛星への提案が認められ、観測が行われました。MAXIによる観測では最も単純なモデルによる解析で特に問題は出ませんでした。Suzaku衛星によって長時間集光して得られたデータに対して同じモデルを適用すると、それでは不十分であるという結果になりました(図7(b))。この残差に現れている構造は過去の観測でも頻繁に見られていて、吸収構造もしくは相対論的に広がった鉄輝線として説明されています。

ReisらによるSuzaku衛星のデータを使った先行論文³⁷⁾においてこの構造は相対論的に広がった鉄輝線として解釈されています。今回われわれは、Kolehmainenらによる“ディスク成分の放射は最も単純なMCDより広がっているかもしれない”という示唆³⁸⁾をもとに、MCD成分が弱くコ

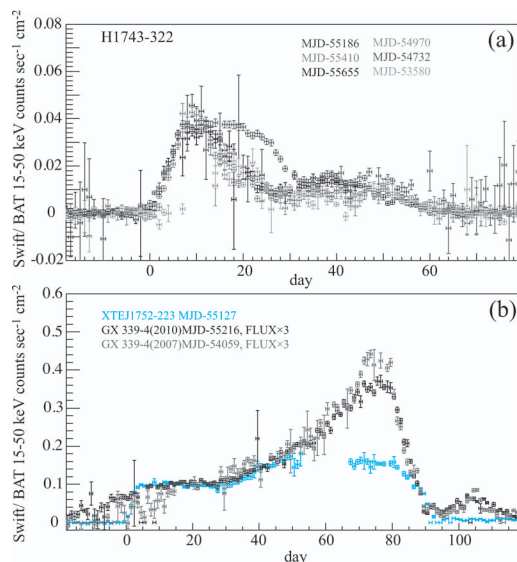


図8 アウトバースト立ち上がり時の光度曲線の相似性の例。(a) H1742-322の複数回のアウトバースト。(b) XTE J1752-223とGX 3394, GX 339の縦軸のみ3倍して、時間方向にそれぞれ平行移動。より過去のデータまで含んでいるSwift/BATを使用。

ンプトン散乱を受けたという仮定に基づくモデルと同じ観測データに対して適用しました。その結果広がった鉄輝線や吸収構造は不要であり、通常のMCDをコンプトン散乱を受けたディスクに置き換えるだけでこの構造を説明できることがわかりました。同時に細い鉄輝線が見つかり、結果としてコンプトン散乱を受けたMCD成分、細い鉄輝線、反射を受けたべき成分を使って観測データを再現できることを示しました。

XTE J1752-223のMAXIによる連続観測によるスペクトル変化と、Suzaku衛星による詳細観測という日本の観測装置の相補的な組み合わせを使った結果は筆者の投稿済み論文³⁹⁾でさらに詳しく述べられています。

6. 今後の展望とまとめ

私がX線天体の観測データ解析に本当にかかわるようになったのは、MAXIの打ち上げ以降で、

MAXIの観測データとともにいろいろと学んできました。そして近頃は、ライトカーブを眺めるのが趣味になりつつあります。MAXIやSwift衛星BAT検出器などの全天モニターによる、過去のものより高品質な長期観測データを眺めると興味深い光度変化の振舞いがいくつも目につきます。そのなかでも個人的に興味深く思っているのが、ブラックホール新星の立ち上がりの部分です。図8(a)はSwift/BATによって観測されたH1743-322からの複数回のアウトバーストの光度曲線を平行移動して並べたものです*4。この図からハード成分初期の増光の傾き、ピーク強度、終息までのタイムスケールがほぼ一致していることがわかります。同様に図8(b)のように異なる天体であっても、強度をスケールリングすることによって同様な相似関係が得られる例が存在します。これらについて、単なる偶然かもしれませんが、まだ十分な解釈ができていません。

ブラックホール新星は限られた時期だけ観測が可能で、(個人的な感想ですが)ある程度統一的な全体像の中にもそれぞれ個性があるので、継続的にモニターを行い観測例を積み重ねて、統計的な方向からも理解していくことが非常に重要です。MAXIはこれまでの観測で、8回のブラックホール新星を検出しており、これから多数観測することが期待されます。MAXIは本来の観測期間である2年を超えようとしています。MAXIの価値を高めることでより長期にわたる観測継続(ISSが落下するまで!)を認められるべく、これまでの観測結果を論文にし、2011年11月より公開を開始しました*5。

おわりに

この研究の一部は、筆者が青山学院大学に在学していたときに行われたものです。

ガススリットカメラの検出器部分の応答測定は主に青山学院大学の卒業生と理化学研究所によっておこなわれ、私はその結果をもとにして軌道上でエネルギー応答の校正と検証をおこない博士論文の一部としてまとめました。

MAXIチームには理研、JAXAのほか、大阪大学、東京工業大学、青山学院大学、日本大学、京都大学、宮崎大学、中央大学の研究者・大学院生が参加しており、共同で解析・運用を行っています。

MAXIのデータ解析、論文の執筆や検出器の較正などについて、吉田篤正氏、山岡和貴氏、三原建弘氏、杉崎睦氏、松岡勝氏、河合誠之氏、上田佳宏氏、根来均氏を始めとするMAXIチームの皆様、その他論文共著者の皆様に助言/協力をいただきました。

また、突発現象に対する対応およびデータの提供をおこなってくださったHEASARC、Suzakuチーム、RXTEチーム、そして突発現象に対していつも非常に素早い対応をしてくださるJamie A. Kennea氏を始めとするSwiftチームに感謝致します。

最後に、本稿の執筆を勧めてくださった山崎了氏に感謝します。

*4 MAXIでも硬X線帯域(10-20 keV)のデータで同じ結果が得られますが、ここでは観測期間の長さからSwift/BAT⁴⁰⁾を使用しました。

*5 <http://maxi.riken.jp/mxondem>

参考文献

- 1) Matsuoka M., et al., 2009, PASJ 61, 999
- 2) 三原建弘, MAXI チーム, 2010, 天文月報 103, 387
- 3) Hiroi K., et al., 2011, PASJ, 63, S677 (2011)
- 4) Webster B. L., Murdin P., 1972, Nature 235, 37
- 5) Bolton C. T., 1972, Nature 240, 124
- 6) McClintock J. E., Remillard R. E., et al., 2009, ApJ 698, 1398
- 7) Timmes F. X., Woosley S. E., Weaver T. A., 1996, ApJ 457, 834
- 8) Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, A&A 24, 337
- 9) Fender R. P., et al., 2004, MNRAS 355
- 10) Markwardt C. B., et al., 2009, ATel 2258
- 11) Nakahira S., et al., 2009, ATel 2259
- 12) Tomida H., et al., 2009, ATel 2363
- 13) Yamaoka K., et al., 2009, ATel 2364
- 14) Nakahira S., et al., 2010, ATel 2774
- 15) Yamaoka K., et al., 2010, ATel 2380
- 16) Shidatsu M., et al., 2011, PASJ, 63, S803
- 17) Negoro H., et al., 2010, ATel 2873
- 18) Kennea J., et al., 2010, ATel 2877
- 19) Negoro H., et al., 2011, ATel 3330
- 20) Mangano V., et al., 2010, GCN 11296
- 21) Kuulkers E., et al., 2010, ATel 2912
- 22) Yamaoka K., et al., 2011, PASJ, in press
- 23) Negoro H., et al., 2011, in preparation
- 24) 鈴木素子, 根来 均, MAXI チーム, 2010, 天文月報 103, 465
- 25) Kennea J., A., et al., 2011, ATel 3331
- 26) Altamirano D., et al., 2011, ATel 3334
- 27) Munoz-Darias T., et al., 2011, ATel 3341
- 28) Munoz-Darias T., et al., 2011, ATel 3355
- 29) Russell D. M., et al., 2011, ATel 3359
- 30) Miller-Jones J. C. A., et al., 2011, ATel 3364
- 31) Nakahira S., et al. 2010, PASJ 62, L28
- 32) Tanaka Y., 1992, Ginga Memorial Symp., ISAS 19
- 33) Mitsuda K., et al., 1984, PASJ 36, 741
- 34) Makishima K., et al., 1986, ApJ 308, 635
- 35) Brocksopp C., et al., 2010, ATel 2400
- 36) Negoro H., et al., 2010, ATel 2396
- 37) Reis R. C., et al., 2010, MNRAS 410, 2497
- 38) Kolehmainen M., 2011, MNRAS, submitted
- 39) Nakahira S., et al., 2011, PASJ, in press
- 40) Barthlmy S. D., et al., 2005, Space Sci. Rev. 120, 143

Black Hole Novae Observed with MAXI Satoshi NAKAHIRA and MAXI Team

Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: During the first two-year operation on the International Space Station, MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) has detected many outbursts from Galactic black-hole binaries including two brand-new sources named after the MAXI discoveries. Thanks to the high sensitivity and large sky coverage of MAXI, we have issued many alert e-mails of new/recurrent transient events to astronomers worldwide. In this article, we will describe results of two new sources for which the MAXI advantages worked significantly. One is MAXI J1543-564, which was first discovered by MAXI and intensive follow-up observations were carried out. The other is XTE J1752-223, whose high/soft state was studied in detail using complementary X-ray data obtained by the MAXI survey and the Suzaku pointing observation.