

Be型 X線連星パルサーの巨大 X線増光

中 島 基 樹

〈日本大学松戸歯学部 〒271-8587 千葉県松戸市栄町西 2-870-1〉

e-mail: nakajima.motoki@nihon-u.ac.jp



国際宇宙ステーションに搭載された全天 X 線監視装置 MAXI により Be 型星と X 線パルサーの連星系の X 線光度曲線が長期間モニタされた。10 年のモニタ観測の結果、17 天体から総計およそ 200 回の X 線増光を検出し、うち 9 割以上はパルサーの近星点通過付近で起きる周期的増光、残りは連星位相に無相関な巨大 X 線増光であった。Be 型 X 線連星パルサーの一つである A 0535+26 からは巨大 X 線増光の軌道位相が変化する現象を観測した。これは星周円盤の歳差運動に伴う現象であると解釈できる。

1. Be 型 X 線連星パルサー (BeXBP)

Be 型 X 線連星パルサー (Be/X-ray Binary Pulsar: BeXBP) とは、Be 型星と X 線パルサー (中性子星) で構成される X 線連星系である。主星である Be 型星は水素輝線を示す早期型星で、この輝線は Be 型星の周囲の星周円盤が起源であると考えられている。この星周円盤は Be 型星の速い自転のため形成されると考えられているが、詳しい形成過程や動径方向への拡がりの物理機構などについて不明な点が残されている¹⁾。伴星のパルサーは X 線光度が数桁にもわたり変化する X 線トランジェント天体で、X Persei (本特集の谷田部による記事を参照) を除き、静穏時の X 線強度は、MAXI などの広視野 X 線モニタ装置で検出できないほど暗い。銀河系内では X Persei を含みこれまでに 28 個の BeXBP が確認されている²⁾。

主星から伴星への質量降着により生じる BeXBP の X 線増光は、多様な現象についての研究機会を提供してくれる。明るい状態のときに観測される X 線パルスの到来時刻の変動から、連星系の軌道パラメータを決定できたり³⁾、X 線スペクトル中に現れるサイクロtron 共鳴散乱構造から

中性子星の表面磁場が測定可能となるほか^{4,5)}、降着物質による角運動量の輸送による中性子星の自転周期の変化についてのモデル検証の場も与えてくれる (本特集の杉崎の記事を参照)⁶⁾。この様に、X 線増光中の BeXBP の観測は多様な物理量・状態の決定に重要となるが、質量降着機構については未だに決着していない問題も残されている。

2. BeXBP の周期的な X 線増光

BeXBP は、MAXI にとって絶好の観測対象で、これまでに 17 天体から総計およそ 200 例の X 線増光を検出した。そのうち 2 天体、GRO J1008-57 と A 0535+26 の X 線光度曲線を図 1 に示す。BeXBP の X 線増光は特徴により大きく 2 つに分類される。一つは、連星の軌道周期と同期して近星点を通過する前後で発生する、最大 X 線光度 $\leq 10^{37}$ erg/s、継続時間が ~ 10 日程度の X 線増光である。本稿ではこれを「周期的増光」と呼ぶ。これは中性子星の誕生時における超新星爆発の影響により、軌道離心率が 0.3 以上となった連星系において、近星点の近くで星周円盤からガスが降着しやすくなるためと考えられている。MAXI が検出した BeXBP の増光のうち、9 割以上はこのタイプであった。

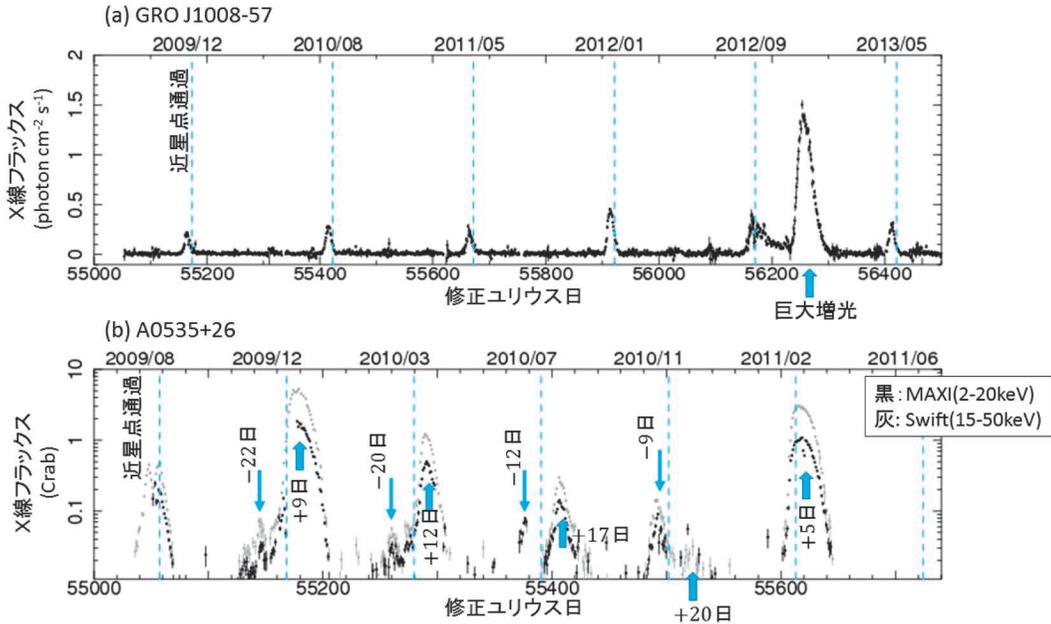


図1 MAXI搭載のガススリットカメラで観測した2つのBeXBPのX線光度の変動。上下の図とも、縦の点線が近星点の通過日を表わしている。(a) GRO J1008-57の2009年8月から2013年7月までの2-20 keVのX線光度曲線。近星点を通過する直前に周期的増光が起きている。2012年11月には巨大増光⁷⁾が近星点から離れた場所で起きた。(b) A 0535+26のMAXI(黒)とSwift衛星(灰色)で観測したX線光度曲線。巨大増光は軌道周期の5サイクル続いた(上向き矢印)。また、それに伴う前駆ピーク(下向き矢印)を見やすくするため、縦軸は対数目盛で表示した。矢印の側の数字は、近星点通過からの日数を表わしている。巨大増光の前駆ピークと主ピークは、ほぼ30日の間隔を保ったまま、それらの軌道位相が軌道周回ごとに数日ずつ、ずれていく様子を確認できる。

図1に示すように、GRO J1008-57は2005年から2019年まで、約249日の軌道周期に同期した増減光を繰り返している。A 0535+26も2008年から周期的な増光を繰り返し、2009年8月に増光ピークの間隔が約10日の二峰性のX線増光を起こすと、2009年12月頃から2010年11月頃にかけて後述する特異な挙動を示し、2011年半ばに消えて行った。このように軌道周期に同期した増光だけでなく、数年から十数年の長期変動も特徴である。これは星周円盤が数年から十数年の時間スケールで、形成・成長・縮小もしくは消滅を繰り返しているためと考えられる。

3. BeXBPの巨大X線増光

2つに分類されるBeXBPのX線増光のもう一つ

が「巨大増光」と呼ばれる、近星点から離れた場所で発生する現象で、最大X線光度はほぼエディントン光度 ($\sim 2 \times 10^{38}$ erg/s) に達する。図1(a)の上向き矢印で示したのがGRO J1008-57の巨大増光で、1993年にこの天体が発見された時の巨大増光から、実に20年ぶりの大増光であった⁷⁾。BeXBPごとに異なるが、この巨大増光はおおむね数年から十数年に一度の割合で発生していることが知られている。こうした巨大増光を引き起こす大量のガスが、なぜ近星点から離れた場所に存在するかは大きな謎だが、それに対する一つの解釈を、MAXIが観測した近傍に位置するBeXBP、A 0535+26のX線観測の結果を元に紹介する。

図1(b)でわかるように、A0535+26は約111日の軌道周期を持つので、2009年8月に検出され

た周期的増光の次の X 線増光は約 4 ヶ月後になると予測されていたが、この予想は外れ、次の近星点通過の約 40 日前に当たる、2009 年 10 月末ごろからゆっくりとした X 線増光が始まった⁸⁾。近星点を通過する 22 日前に一度、微小な前駆ピークを迎えたあと (図 1b の下向き矢印)、近星点の通過後に巨大増光が観測された (上向き矢印)。この近星点を挟んだ一対の X 線増光は、2010 年 11 月まで、近星点を通過する前後で繰り返し起きていた。このように巨大増光は、数連星軌道周回にわたり続くことがある。

2010 年 7 月の前駆ピークは、A 0535+26 が太陽近傍の位置にあったため、太陽角制限の緩い MAXI でのみ観測できた。そのおかげで、図 1(b) から読み取れるように、2009 年 12 月から 2010 年 11 月までに観測された巨大増光の性質が以下のように明らかになった。

- ・前駆ピークと主ピークの間隔は、常に約 30 日であった。
- ・一対のピークの軌道位相は、1 連星軌道周回で約 5 日ずつ遅れていった。
- ・主ピークの光度は、 ~ 2 Crab (X 線標準光源である「かに星雲」の X 線フラックスの 2 倍) から、 ~ 50 mCrab (最初の 1/40) まで暗くなった。
- ・逆に前駆ピークの光度は、 ~ 30 mCrab から、 ~ 100 mCrab まで増光した。

この様な大小 X 線増光が対となり、それらの軌道位相とピーク光度が変化する現象が観測されたのは、A 0535+26 が初めてである⁹⁾。

以上の結果をまとめたものが図 2(a) である。前駆ピークと主ピークの軌道面上での位置を線で結ぶと、Be 星を挟んで反対の位置にある。この線分は 1 連星軌道周回で約 15 度程度ずつ回転していた。また最大 X 線光度は、中性子星の軌道と Be 星の間の距離が近いときの方が大きくなる傾向が確認できる。

これらの観測事実を説明するため、軌道面に対して傾いた星周円盤がゆっくりと歳差運動してい

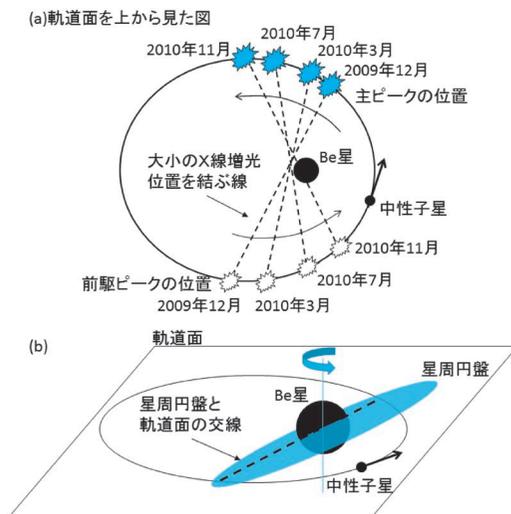


図 2 (a) A 0535+26 の連星軌道面を上から見た想像図。中性子星は反時計回りで周回している。巨大増光の前駆ピークと主ピークの軌道位置を印で示すと、Be 星を挟んでちょうど反対に位置する。(b) 軌道面に対して傾いた星周円盤が存在しているときの想像図。星周円盤が大きく広がっていれば、中性子星軌道と 2 ヶ所で交差する。

る状況を仮定してみる (図 2b)。歳差運動により中性子星と星周円盤の交差する位置が時間と共にずれるため、X 線増光の軌道位相が連星軌道周回ごとに移動する。また、Be 星の半径を r_* 、Be 星からの距離を r 、星周円盤面からの高さを z とすると、星周円盤の密度分布は $(r_*/r)^{1.5 \sim 4.5} e^{-z^2}$ に比例する¹⁰⁾。今回の巨大増光の発生時期の前後で、光学観測より水素の輝線等価幅の増大と減少が観測されていた¹¹⁾。特に巨大増光の終盤には、星周円盤の大きさの指標となる水素の輝線等価幅の減少が観測されていたので、星周円盤の縮小が示唆される。よって X 線光度の変化は、歳差運動と星周円盤の縮小の重ね合わせで生じたと解釈できる。このことから、巨大増光は軌道面に対して傾いて広がった星周円盤が起源となっていることが判明した。これは光学観測の結果¹¹⁾ や数値計算の結果¹²⁾ ともおおむね一致している。ただし、星周円盤の幾何学的な変化が生じる原因については、

まだ多くの未解明点が残されているので、今後の課題となっている。

4. 巨大増光の長い周期性

最後に前節で紹介した巨大増光の原因と考えられる星周円盤の幾何学的な変化について、長い周期性がある、つまり巨大増光に長い周期性が存在する可能性について紹介する。代表的な BeXBP の一つである EXO 2030+375 は、1985 年に巨大増光を起こして発見された連星である。約 46 日の軌道周期と同期して、近星点を通過してから約 5 日後に増光ピークが每周回観測されていたため、もっとも多くの周期的増光が観測された連星となっている。

発見後から数年の間は、決まった軌道位相での増減光が続いていたのだが、1995 年にそれまでとは異なる軌道位相、すなわち近星点の約 3 日前で周期的増光のピークが観測されるようになった¹³⁾。その後、この周期的増光の位相のずれは約 2 年かけて徐々に解消していき、元の位相で周期的増光が観測されるようになった。

この位相のずれの発生から約 10 年後の 2006 年、再び巨大増光が観測された。前回の巨大増光から約 20 年後であった。さらに 10 年後の 2016 年、今度は 1995 年に観測されたのと同じ、周期的増光の位相のずれが MAXI により発見された¹⁴⁾。つまり、巨大増光や周期的増光の位相のずれが、ほぼ 20 年間隔で起きていたのだ。この準周期性は、古在機構¹⁵⁾により、星周円盤の離心率と、連星軌道面に対する円盤の傾斜角が、周期的に変化するモデルで解釈可能であることが示された¹⁴⁾。古在機構が他の BeXBP に適用できるかどうかについては、さらなる議論が必要である。

参考文献

- 1) Porter, J. M., & Rivinius, T., 2003, *PASP*, 115, 1153
- 2) Reig, P., 2011, *Ap&SS*, 332, 1
- 3) Sugizaki, M., et al., 2015, *PASJ*, 67, 73
- 4) Yamamoto, T., et al., 2011, *PASJ*, 63, 751
- 5) Yamamoto, T., et al., 2014, *PASJ*, 66, 59
- 6) Sugizaki, M., et al., 2017, *PASJ*, 69, 100
- 7) Nakajima, M., et al., 2012, *The Astronomer's Telegram*, 4561
- 8) Sugizaki, M., et al., 2009, *The Astronomer's Telegram*, 2277
- 9) Nakajima, M., et al., 2014, *PASJ*, 66, 9
- 10) Silaj, J., et al., 2010, *ApJ*, 187, 228
- 11) Moritani, Y., et al., 2013, *PASJ*, 65, 83
- 12) Okazaki, A., et al., 2013, *PASJ*, 65, 41
- 13) Wilson, C. A., et al., 2008, *ApJ*, 678, 1263
- 14) Laplace, E., et al., 2017, *A&A*, 597, 124
- 15) Kozai, Y., 1962, *AJ*, 67, 591

Giant X-ray Outburst of Be/X-ray Binary Pulsar

Motoki NAKAJIMA

School of Dentistry at Matsudo, Nihon University, 2-870-1 Sakaecho-Nishi, Matsudo, Chiba 271-8587, Japan

Abstract: The X-ray lightcurves of Be/X-ray binary pulsars have been monitored by MAXI for 10 years. Among ~200 X-ray outbursts observed from 17 Be/X-ray binary pulsars, ≥90% of them were categorized into normal outbursts, and rest of the events were giant outbursts. We confirmed that the precessing stellar disc causes the outburst phase shift and Kozai oscillation is related to the periodic giant outburst.