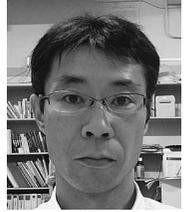


X線連星パルサーにおける降着スピナップ機構の系統的検証



杉崎 睦

〈東京工業大学理学院 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail: sugizaki@hp.phys.titech.ac.jp

X線連星パルサーでは、光学対応天体から降着する物質が中性子星に角運動量を持ち込むので、X線光度と自転周期の変化には相関がある。2009年からMAXIとフェルミ衛星ガンマ線バーストモニター（GBM）によって得られた10年間にわたるX線光度とパルス周期のデータを用いて、強磁場中性子星における降着トルクモデルの系統的な検証を行った。Be型星との連星パルサーでは、増光活動期間中、X線光度と自転周期の変化率はほぼ比例し、Ghosh & Lamb（1979）の降着円盤を介したトルクモデルに良く合うことがわかった。一方、青色超巨星との連星パルサーでは、X線光度と自転周期の変化に明らかな相関はなく、その挙動は全く異なる。さらに、エディントン光度限界の50倍を超えるX線パルサーも見つかった。今後は、これらの降着機構の解明が課題である。

1. X線連星パルサーを巡る問題

X線連星パルサー（以下、X線パルサー）は、強い表面磁場（ $\sim 10^{12}$ G）を持つ中性子星と降着物質を供給する光学対応天体からなる連星系である。降着物質が中性子星の磁気圏に到達すると、その内側では磁力線に沿ってほぼ自由落下し、磁極の表面付近で重力エネルギーを解放する。従って、観測X線強度は自転周期（数ミリ秒～千秒）で周期的に変動する。増光時にはエディントン光度（ 2×10^{38} erg s $^{-1}$ ）近くに達し、太陽系から比較的近いものは全天で最大級のX線強度になる。これまでに我々の銀河系には約50個のX線パルサーが見つかったが、そのほとんどがBe型星あるいは青色（OB）超巨星との連星系である。これは、強磁場中性子星を含む連星系の形成進化の過程を反映していると考えられるが、そのシナリオは必ずしもわかっていない。

X線パルサーでは降着物質が中性子星に角運動量を持ち込むので、X線光度（以下、単に光度）と自転周波数の変化の割合には正の相関が予想される。そのような観測結果はX線パルサーの発見当初から報告されており、いくつかの理論モデル（降着トルクモデル）が提唱されてきた。ただし、モデルの再現性を検証するためには、連続した光度と自転周波数の変化を追跡する必要があり、ポイントング衛星による断片的な観測だけでは不十分であった^{*1}。こうした状況は、1991-2000年のコンプトン衛星ガンマ線バースト検出器BATSEのデータ解析で大きく改善した。ほぼ全天に感度を持つバースト検出器の計数データに周期解析を施し、既知のX線パルサーのパルス信号を抜き出すことによって、多数のX線パルサーの自転周波数の変化を同時に得られるようになった¹⁾。この結果、Be型星を主星とするX線パルサー（本誌、中島の記事を参照）ではX線増光期

^{*1} 初期の報告の中には、軌道運動によるドップラー変調を取り除けていなかったり、ランダム的な変化の一部を誤認していたものが少なくない。

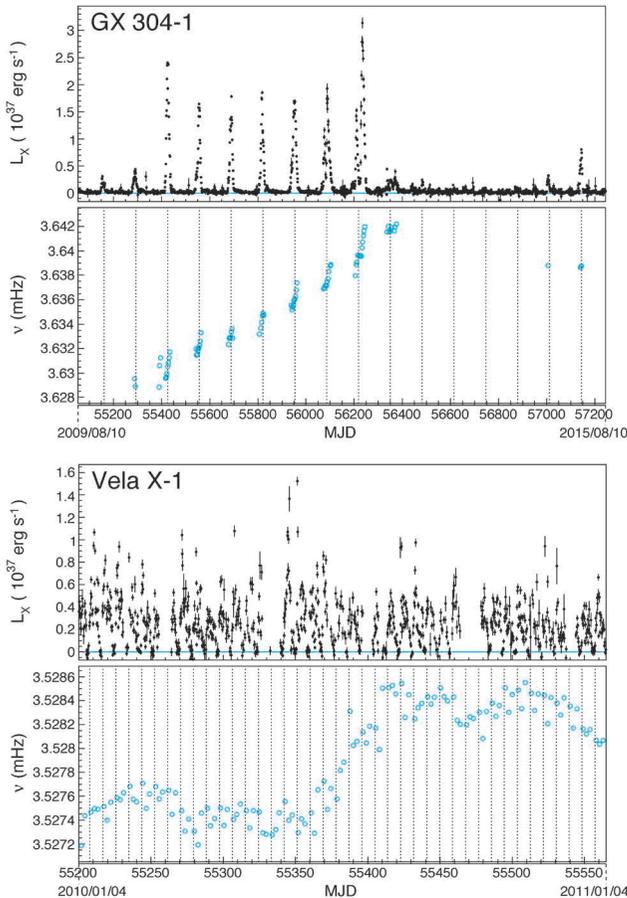


図1 (上) Be型星X線パルサー GX 304-1 (自転周期272秒, 軌道周期132日)のMAXIガススリットカメラによるX線光度 L_x (上段)とフェルミ衛星GBM検出器の周期解析から求められた自転周波数 ν (下段)。期間は2009年8月から2015年8月までの6年間。下段の縦の破線はパルサーの近星点通過の時刻を表す。(下) 青色超巨星X線パルサー Vela X-1 (自転周期283秒, 軌道周期8.96日)に対する同様の結果。期間は2010年1月から2011年1月までの1年間。下段の縦の破線はパルサーの主星による蝕の中心時刻を表す。

にはほぼ必ずスピナップが観測されるなど、光度のパルス成分と自転周波数の変化の割合に良い相関があることがわかった。一方、青色超巨星を主星にもつシステムでは、明確な相関は見られなかった。ただし、BATSEのデータから得られる情報はパルス成分に限られ、光度に関して全X線放射の情報が得られないという問題があった。

降着物質の角運動量は中性子星の磁気圏半径で受け渡されるので、中性子星の磁場が強いほど、光度に対する自転周波数の変化の割合は大きくなる。X線パルサーの表面磁場は、X線スペクトルにサイクロトロン共鳴構造を検出できれば正確に見積もることが出来るが、この方法で測られた約20天体の表面磁場は $(2-8) \times 10^{12}$ Gの非常に狭い範囲にあるという問題がある^{2), 3)}。全X線パルサーの表面磁場がこの狭い範囲にあるのか、あるいは観測バイアスが大きいのか、決着がつかっていない。残る過半数のX線パルサーの表面磁場は不明であるが、光度と自転周波数の変化率の関係から、より大きな磁場 ($\geq 10^{13}$ G) が示唆される天体が出てきた (本誌, 谷田部の記事を参照)⁴⁾。まだ表面磁場が不明のX線パルサーの中に、同様に磁場が強いものが潜んでいる可能性が考えられ、興味深い状況にある。

2. MAXIとフェルミ衛星GBMを用いた降着トルクモデルの検証

2008年からBATSEと同等の機能を持つフェルミガンマ線天文衛星のバースト検出器GBM (Gamma-ray Burst Monitor) が稼働し始め、2009年からはMAXIが観測を始め、既知のX線パルサーに関して自転周波数に加えて全X線放射の精度

の良い光度曲線 (光度の変化) が得られるようになった。図1に、Be型星または青色超巨星を主星とする2つの代表的なX線パルサーに対して、得られた年スケールでの光度と自転周波数の変化をプロットした。Be型星X線パルサーのGX 304-1では、数週間も続く増光期間の中、光度に応じて自転周波数が単調に増加していることがわか

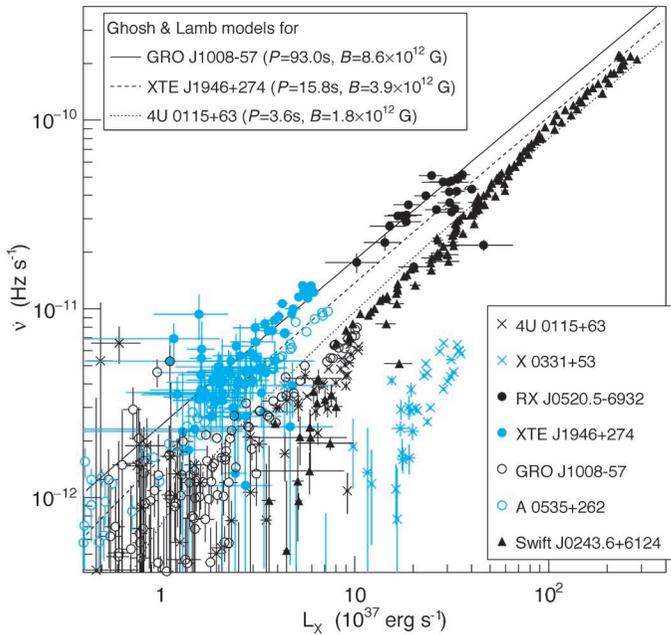


図2 MAXIが稼働し始めてからX線増光があったBe型星X線パルサーの代表サンプル7天体の、X線光度 L_x と自転周波数の変化率 $\dot{\nu}$ の関係。サイクロトロン共鳴で測られた磁場が最も強い天体 (GRO J1008-57)、中間の天体 (XTE J1946+274)、弱い天体 (4U 0115+63) に対して、Ghosh & Lambモデルで予測される関係を実線、破線、点線で示した。

る。これは降着円盤を介したスピナップを示唆している。一方、青色超巨星を主星とするX線パルサー、Vela X-1では、光度と自転周波数の間に単純な相関は見られない。

そこで、我々はMAXIとフェルミ衛星GBMによるX線パルサーの連続監視データを用いて、降着トルクモデルの系統的な検証を行った⁵⁾。このために、2009-2016年の間にX線増光が検出された全12個のBe型星X線パルサーのデータを用いた。自転周波数の変化を精度良く決定するためには、連星軌道運動によるドップラー変調を注意深く取り除く必要がある。7年間にわたるデータを使って軌道要素を最適化したところ、4天体で有意な改善を行うことができた。結果として得られた光度と自転周波数の変化率のデータは、すべてのBe型星X線パルサーのサンプルで、比例に近

い正の相関を示すことがわかった。図2に、代表的なサンプルの光度と自転周波数の変化率の関係を重ねてプロットした。この相関データを理論モデルに合わせたところ、典型的な中性子星の質量(太陽質量の1.4倍)と半径(10 km)の仮定の下で、全体としてはGhosh & Lamb⁶⁾の円盤降着トルクモデルで良く再現できることがわかった。個々の天体データの再現性を見ると、正相関の様相は合っているが、絶対値に0.3-3倍の係数の補正が必要になる。この補正量は、観測X線強度に対する放射エネルギーを計算をする時に仮定した、パルス放射の等方性と天体までの距離の誤差を考えると妥当な範囲である。唯一、X 0331+53だけは、磁場も距離も精度良くわかっている割には、10倍の補正が必要になり、原因は不明である。

3. 今後の展望

以上のように、MAXIとフェルミ衛星GBMによって得られたX線パルサーのデータを解析した結果、Be型星を主星とするX線パルサーでは、光度と自転周波数の変化率の間に良い相関があり、Ghosh & Lamb⁶⁾の円盤降着トルクモデルで説明できることがわかった。今後、データをさらに蓄積していけば、逆に仮定した中性子星の質量、半径、磁場の検証に利用できると考えている。既に得られている顕著な成功例が本誌の谷田部の記事にあるので、参照されたい。また、この解析で重要な要素である天体の距離に関しては、2014年に始まったGAIA衛星の精密測量で、精度が大幅に向上してきている。

一方、青色超巨星のX線パルサーに関しては、光度と自転周波数が両方共に複雑な時間変動を示し、単純な相関はない。青色超巨星の斑らな星風に原因があるという説が有力だが、詳細なメカニ

ズムには依然、議論の余地がある。これに関して、図1に代表例として示した Vela X-1 では、MAXI の監視データから 8.96 日の連星軌道位相に対する強度変動が特徴的な型を持つことがわかり、パルサー軌道上の星風環境の情報が得られることとなった⁷⁾。自転周波数の変化に関しても膨大なデータが蓄積してきており、光度との関係のパターン認識などの手法により、星風捕獲による降着プロセスの新たな情報が得られるかもしれない。

青色超巨星と中性子星の連星系に関しては、近年、数十日から数ヶ月に1回、持続時間が数時間以下の X 線フレアを起こす非常に活動頻度が低い突発 X 線連星^{*2}が見つかってきて、問題になっている⁸⁾。X 線パルサーと同じ構成要素の連星系でありながら、どうしてこのような活動性に違いが生まれるのか、連星進化の鍵となる可能性がある。現在、このような突発 X 線連星は 12 個ほど確認されており、6 個の天体では中性子星の自転周期がわかっている。これらの連星軌道周期、自転周期の分布に X 線パルサーとの違いはない。星風環境や中性子星の磁場の違いなど、いくつかの仮説が提案されているが⁹⁾、決定的な証拠は得られていない。X 線パルサーにおける星風降着を理解することは、この問題解決の手掛かりになりうる。

近年、我々の銀河系外でエディントン光度の 50 倍に達するような超高光度 X 線パルサー (M82 X-2 など) が見つかり、その降着機構が問題になっている¹⁰⁾。2017 年に我々の銀河系に出現した Be 型星 X 線パルサー、Swift J0243.6+6124 は、見かけ上エディントン光度の 10 倍を超えたが¹¹⁾、光度に対する自転周波数の変化の割合は他の Be 型星 X 線パルサーと全く同じレベルで (図2)、

磁場も同程度 ($\sim 10^{12}$ G) であることが示唆される。通常の X 線パルサーの超エディントン増光の詳細な解析から、超高光度 X 線パルサーの降着がそれらの延長で理解できるか、また磁場強度はどの程度か、などの問題に迫ることができると期待される。

参考文献

- 1) Bildsten, L., et al., 1997, ApJS, 113, 367
- 2) Makishima, K., et al., 1999, ApJ, 525, 978
- 3) Yamamoto, T., et al., 2014, PASJ, 66, 59
- 4) Yatabe, F., et al., 2018, PASJ, 70, 89
- 5) Sugizaki, M., et al., 2017, PASJ, 69, 100
- 6) Ghosh, P., & Lamb, F. K., 1979, ApJ, 234, 296
- 7) Malacaria, C., et al., 2016, A&A, 588, A100
- 8) Sguera, V., et al., 2005, A&A, 444, 221
- 9) Bozzo, E., et al., 2008, ApJ, 683, 1031
- 10) Bachetti, M., et al., 2014, Nature, 514, 202
- 11) Wilson-Hodge, Colleen A., et al., 2018, ApJ, 863, 9

Systematic analysis of accretion spin-up process in X-ray binary pulsars

Mutsumi SUGIZAKI

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

Abstract: Studies of luminosity—spin-up relations in X-ray binary pulsars with 10-years MAXI/GSC and the Fermi/GBM data are reviewed. In the systems with Be-star companions, the relations are well explained by the Ghosh & Lamb (1979) disk-magnetosphere interaction model. On the other hand, in the systems with OB supergiants, their correlations are not clear. The complicated spin-up/spin-down behaviors are considered to suggest the clumpy wind-fed accretion.

^{*2} SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) と呼ばれる。