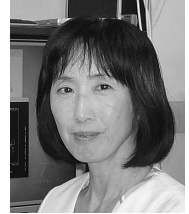


中性子星を含む低質量 X 線連星の長期変動



浅井和美

〈理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: kazumi@crab.riken.jp

中性子星を含む低質量 X 線連星にはアウトバーストと呼ばれる X 線の増光現象や長期の X 線変動がある。アウトバーストは、降着円盤の不安定性で引き起こされると考えられており、その時に生じる降着円盤の状態遷移の観測は重要な情報となる。こうした現象に対して強みを発揮する MAXI の長期連続観測で、状態遷移に関する次の二つの特徴が明らかになった。(1) 突発現象であるアウトバーストの立ち上がりを MAXI でとらえ、二つのタイプ (Slow 型と Fast 型) があることを示した。(2) 繰り返し起こる小規模の光度変動を MAXI で検出し、これも降着円盤の状態遷移を伴っていることを示した。

1. 低質量 X 線連星の長期変動

中性子星を含む低質量 X 線連星 (NS-LMXB) には、ほぼ一定光度で輝く定常天体と、突然 10 倍以上 X 線で明るくなり、数週間から数ヶ月その明るい状態を保つアウトバーストと呼ばれる現象を示すトランジェント天体がある。このアウトバーストは、矮新星やブラックホールを含む低質量 X 線連星のアウトバーストと同様に、降着円盤の不安定性が原因と考えられている。これまで、NS-LMXB のアウトバースト時の状態遷移の特徴はあまり知られていなかった。その理由には、1 日程度のポインティング観測では長時間にわたる変動の特徴がつかみきれないことがある。しかし MAXI の登場により、数十個の NS-LMXB を X 線でほぼ連続的に監視できるようになった。

2. アウトバーストの立ち上がり

アウトバーストはガス降着率の急激な増加によって始まる。アウトバースト開始時には降着円盤の内縁は幾何学的に厚く光学的に薄い状態だが、ガス降着率が増えると幾何学的に薄く光学的

に厚い状態に変化する。このとき、X 線スペクトルはハード状態 (冪関数) からソフト状態 (黒体放射) に変化する。これまでの観測では、突発現象であるアウトバーストを検出した後、光度のピークあたりからやっど観測を始めることが多く、その時点で X 線スペクトルはすでにソフト状態になっていた。よってピークを過ぎ、次第に X 線光度が減少してある光度で再びハード状態に変化する時の「立ち下がり時のソフト/ハード状態遷移」は多く観測されているが、「立ち上がり時のハード/ソフト状態遷移」はあまり観測例がなかった。

その観測に力を発揮するのが、常時 X 線で観測を行っている MAXI/GSC (Gas Slit Camera) (2–20 keV) と X 線天文衛星 Swift の BAT (Burst Alert Telescope) 装置 (15–50 keV) である。この 2 つのエネルギー帯は各々ソフト状態とハード状態で主に放射するエネルギー帯であり、両者の比を見れば X 線スペクトルの状態が判断できる。今回、アウトバーストを起こす天体として有名な 4U 1608–52 と Aql (わし座) X-1 を対象天体として、GSC データと BAT データを解析した。2009 年

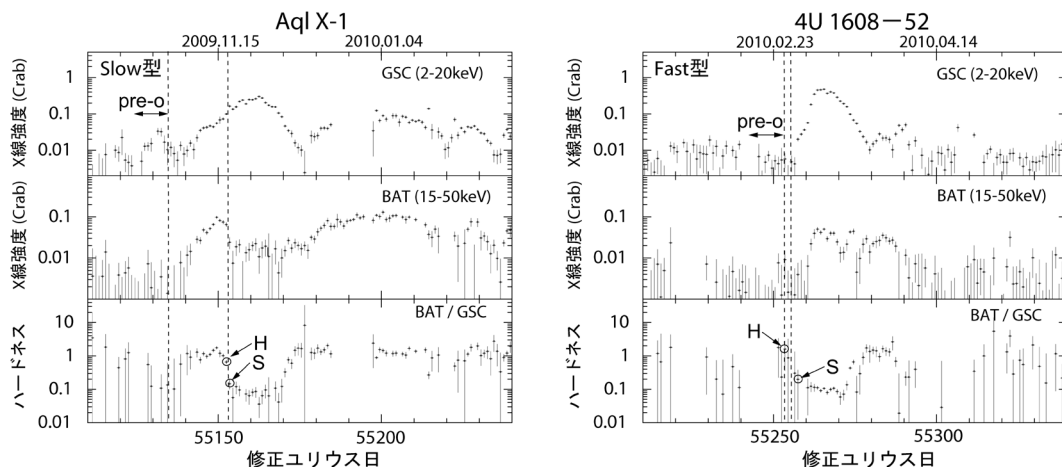


図1 Slow型(左)とFast型(右)の一例. MAXI/GSCとBATによるエネルギー別の光度曲線とその比(ハードネス)¹⁾. 1データ点は1日の平均. ハードネス図のHは最後のハード状態の点を, Sは最初のソフト状態の点を表し, この間でスペクトルがハード/ソフトの状態変化をしている.

8月から2011年12月の間に5回(4U 1608-52から2回, Aql X-1から3回)のアウトバーストを検出し, その立ち上がりに注目して解析した. さらにX線天文衛星RXTEのASM(All Sky Monitor)装置(1996年から2011年まで稼働, 2-12 keV)のデータも加え, 合計10個のアウトバーストを調べた¹⁾.

その結果, 天体によらず, アウトバーストの立ち上がりにはSlow型とFast型という二つのタイプがあることがわかった(図1). Slow型は2-20と15-50 keVバンドの両方で増光した後, 15-50 keVバンドの光度が急減してソフト状態になる. アウトバースト開始からハード/ソフト遷移を起こすまでの時間(開始-遷移時間: 図の点線で挟まれた期間)が1-2週間と長く, 遷移を起こすX線光度はソフト/ハード遷移の標準的な遷移光度であるエディントン光度の1-4%よりも明るい. 一方, Fast型は2-20と15-50 keVバンドの両方で増光するが, 15-50 keVバンドの光度が小さく, ほとんど増光開始時からソフト状態である. このため開始-遷移時間が数日とSlow型のものより短く, 遷移を起こすX線光度もエディントン光度の1-4%程度であり, Slow型より低い.

このSlow型とFast型の違いは, アウトバーストを起こす前の光度と相関があることがわかった. 図のpre-o(pre outburst)の期間が明るとSlow型になる. これはつまりアウトバースト開始前の円盤の状態や, 円盤のどの位置で状態遷移が始まり, それが半径方向にどう伝播していくのか, などとの関連を示唆しており, その後にかかるアウトバーストの特徴を決めている原因解明への手がかりとなる. 今後, 長期連続観測でアウトバーストの立ち上がりの観測が増えることで, 二つのタイプの解明に向けてさらなる進展が期待される.

3. ミニアウトバースト

定常的に輝くNS-LMXBは大規模なアウトバーストは起こさないものの, 不規則に変動することが知られている. MAXI/GSCの長期連続観測により, 3つの定常天体(4U 1636-536, 4U 1705-44, GS 1826-238)から繰り返し起こる小規模の光度変動を検出した. さらに, 1つのトランジェント天体(4U 1608-52)のアウトバースト中の明るい時期からも同様の光度変動を検出した. GSCデータとBATデータを合わせて解析した結

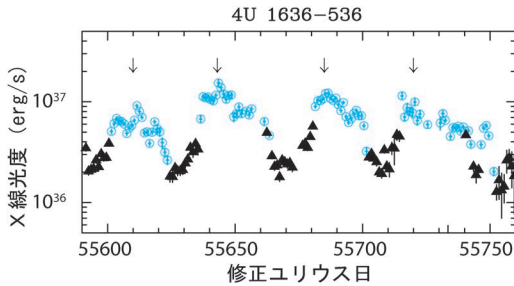


図2 ミニアウトバースト（矢印）の一例. 4U 1636-536の光度曲線²⁾. 1データ点は1日の平均. 青丸印がソフト状態で、黒三角印がハード状態を示している.

果、図2に示すように、光度が上がるとソフト状態、下がるとハード状態になっており、降着円盤の状態遷移を伴う光度変動であった。つまり見かけの強度変動ではなく、実際に降着量が変化していることが分かった。この変動は数倍の光度変化で、発生間隔も数十日と短いという性質をもち、通常のアウトバーストに対しミニアウトバーストとも呼べるものである。つまり、降着円盤の状態遷移は、通常のアウトバーストのような大きな光度変化の際だけではなく、光度が一桁以内で変動している時でも起きていることが分かった²⁾。

さらに、これらは、嶺重らが理論的に予言した円盤不安定性のうち、温度依存性が小さいときに生じる *purr type* (猫のノドゴロゴロ型) と呼ばれる光度変動^{3,4)} に対応することを提案した。また、この温度依存性が小さい不安定性は中性子星からの X 線照射により降着円盤の温度が上昇している場合に起こると考えた。今後、このような状態遷移を伴うミニアウトバーストが観測された時には、X 線照射が効いている状態にあると推測でき、降着円盤の大きさに新たな制限をつけられる

可能性がある。

4. MAXIで分かってきたこと

これまで、NS-LMXBの X 線変動はおもに $\geq 10^{37}$ erg/s の高光度の状態ばかり注目されてきた。MAXIは、高い感度と常時監視の機能を持ったため、 $\sim 10^{38}$ から $\sim 10^{36}$ erg/s までの広い光度範囲での挙動を総合的に理解できるようになった^{5,6)}。現在、ASMとGSCを合わせた合計24年の長期連続観測により、NS-LMXBの連星軌道周期よりもはるかに長いタイムスケール(10年以上)の X 線変動が見えてきている。今後、NS-LMXBの長期観測により、大局的なNS-LMXBの姿が明らかになるだろう。

参考文献

- 1) Asai, K., et al., 2012, PASJ, 64, 128
- 2) Asai, K., et al., 2015, PASJ, 67, 92
- 3) Mineshige, S., & Shields, G. A., 1990, ApJ, 351, 47
- 4) 嶺重慎, 1991, 天文月報, 84, 288
- 5) Matsuoka, M., & Asai, K., 2013, PASJ, 65, 26
- 6) 松岡勝, 浅井和美, 2013, 天文月報, 106, 244

Long-term variability of NS-LMXB

Kazumi ASAI

High Energy Astrophysics Laboratory, Riken, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Some of the low-mass X-ray binaries with a neutron star (NS-LMXB) show outbursts or long-term variability. Long-term observation with MAXI has an advantage to such a phenomenon. Here, we describe two topics, (1) we analyzed the initial rising behavior of the outbursts and classified them into two types (Slow and Fast), (2) we suggested a possibility that mini-outbursts are caused by disk instability with small temperature dependence.