

# X線衛星すざくによる矮新星 Z Cam のアウトバースト直前観測

2010年度 第40回 天文・天体物理若手の会 夏の学校 @愛知県豊橋市ホテル日航豊橋

2010/08/02-2010/08/05

齊藤 慧<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻 博士課程 1年

<sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 / 宇宙科学研究本部

*ksaitou@astro.isas.jaxa.jp*

(講演日 2010/08/03; 集録提出日 2010/08/31)

## 1. 目的

矮新星は、白色矮星と晩期型主系列星の近接連星系である激変星の一種である。数十日ごとにアウトバーストと呼ばれる、可視光で2-5等級増光する現象を示す (Warner 1995)。伴星からの質量輸送の結果、降着円盤に物質が蓄えられ、その質量が次第に増加する。降着円盤の面密度がある臨界密度を超えると、降着円盤の熱不安定性により、一気に白色矮星へと質量降着が生じる。これがアウトバーストの原因であると考えられている (Osaki 1996)。X線は、白色矮星表面と降着円盤内縁の間に形成される境界層にある  $\sim 10^8$  K の高温プラズマから放射される。アウトバースト時にはプラズマが光学的に厚くなるため、熱制動放射による放射冷却の影響が大きくなり、プラズマの温度は  $\sim 10^5$  K まで下がる。つまり、硬 X線放射が抑制されるので、X線で暗くなり、かつ、その X線スペクトルはソフトになる。また、可視光で明るくなり始める時間と、X線で暗くなり始める時間には 0.5-1.5 日程度の差があることが知られている (Jones & Watson 1992; Wheatley et al. 2003)。

Z Cam は、矮新星の中でも典型的に公転周期が長く、質量降着率が大きな系であり、standstill と呼ばれる現象が特徴的な、Z Cam 型矮新星のプロトタイプである。また、紫外線による観測によって、過去に古典新星爆発を起こした証拠が発見されている系である (Shara et al. 2007)。Z Cam は紫外線と X線の観測から、アウトバースト時に降着円盤から wind が生じることが示唆されている (Knigge et al. 1997; Baskill et al. 2001)。しかし、wind がアウトバースト中のみが生じるのか、それともアウトバーストの前にも存在しているのかは、よく分かっていない。その原因の一つとして、アウトバーストを予想して観測を行うことが難しいことが挙げられる。加えて、過去の ASCA 衛星による X線観測 (Baskill et al. 2001) では、鉄 K $\alpha$  輝線に対するエネルギー分解能と、高エネルギー帯における感度の問題から、高温プラズマの状態を詳細に調査することができなかった。

本集録では、Z Cam が可視光でアウトバーストを起こした立ち上がりの状態を、X線衛星すざくを用いて観測を行った結果について報告する。

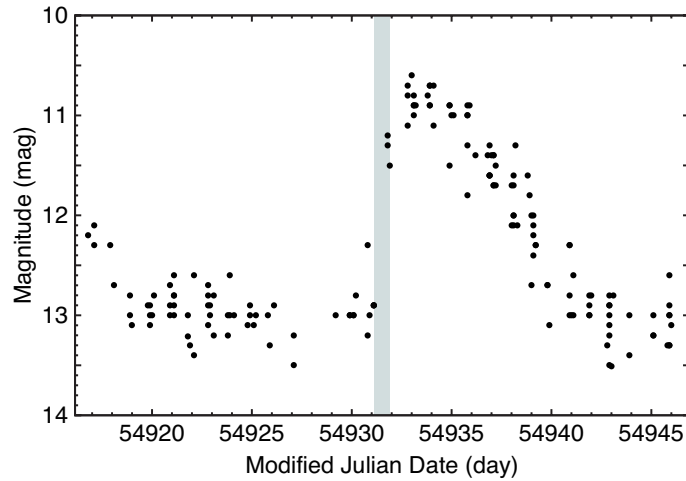


図 1. すざく衛星の観測時の可視光ライトカーブ。AAVSO (<http://www.aavso.org/>) よりデータ (Visual observations) を取得した。すざく衛星による観測が行われた時間帯を灰色で示している。

## 2. 観測

我々は、X線衛星すざく (Mitsuda et al. 2007) を用いて 2009 年 4 月 10 日に Z Cam の観測を行った (表 1)。すざく衛星には 0.2–12 keV に感度を持つ XIS 検出器 (Koyama et al. 2007) と、10–70 keV に感度を持つ HXD/PIN 検出器 (Takahashi et al. 2007; Kokubun et al. 2007) の二つの検出器が搭載されている。

すざく衛星が観測を行った時の可視光ライトカーブを図 1 に示す。

表 1. 観測ログ

観測装置	観測開始時刻 (UT)	観測終了時刻 (UT)	観測時間 (ks)
XIS	02:50:57	21:49:19	37.7
HXD PIN	02:50:57	21:49:19	36.5

## 3. 解析

まず始めに、X線の時間変動を調べるために XIS の 0.2–12 keV のデータを使用してライトカーブを作成した (図 2)。するとカウントレートの平均値は  $4.1 \text{ ct s}^{-1}$  であるが、およそ  $2\text{--}8 \text{ ct s}^{-1}$  の間で短時間変動を示していることが分かった。

そこで、次に、時間変動によってスペクトルの形状が変化していないかを調べるために、quantile を用いて二色図 (Hong et al. 2004) を作成した (図 3)。Quantile  $Q_x$  は、

$$Q_x = \frac{E_x - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (1)$$

で定義される。ここで  $E_x$  はある時間内に検出した光子をエネルギー順に並べた時の  $x\%$  目のエネルギーである。 $E_{\min}$ 、 $E_{\max}$  は使用したエネルギー帯の最小値、最大値であり、今の場合それ

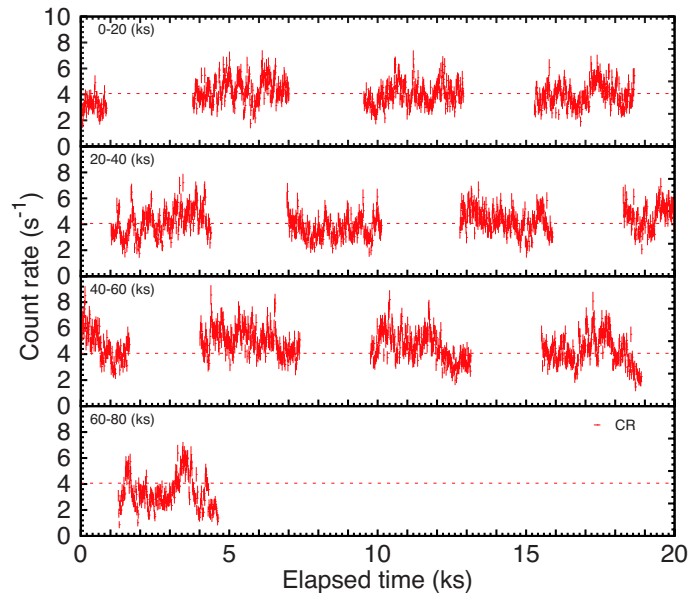


図 2. 0.2–12 keV のライトカーブ。20 ks ごとに分けて、上から順に表示している。各データ点は 16 s でビンまとめしている。点線はカウントレートの平均値 ( $\sim 4.1 \text{ ct s}^{-1}$ ) を示している。エラーは  $1\sigma$  のポアソンエラーである。ライトカーブが不連続であるのは、衛星が地球の蝕に隠れている時間帯であるため、天体の観測ができないからである。

ぞれ 0.2 keV、12 keV である。その結果、時間変動に対してスペクトルの形状は大きく変化しないことが分かった。そのため本集録では、時間平均したスペクトルのみを使用する。

以上の調査後に、時間平均スペクトルを作成した (図 4)。低エネルギー側のスペクトルを見ると、紫外線の観測から求まっている星間吸収量 ( $N_{\text{H}} = 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ; Mauche et al. 1988; Wheatley et al. 1996; Knigge et al. 1997; Baskill et al. 2001) に比べて、大きな吸収を受けていることが分かる。また、6.4 keV の蛍光鉄輝線が存在することと、40 keV まで伸びる硬 X 線放射が存在することから、高エネルギー側のスペクトルには低温物質からの反射の影響が表れていると考えられる。

吸収の影響を受けることなく反射成分を決定するために、以下の手順でスペクトルフィットを行った。(1) 4–40 keV のエネルギー帯で、反射成分を考慮した多温度プラズマモデルでフィットを行い、蛍光鉄輝線の等価幅を求める。(2) 手順 1 で求めた観測的な等価幅と、理論的に予想される等価幅 (George & Fabian 1991) を比較することで、プラズマが反射体を見込む立体角を推定することができる。(3) 得られた立体角を使い、手順 1–2 を立体角の値が収束するまで繰り返す。その結果得られた値は、 $\Omega/2\pi = 0.484$  である。

以上の手順で反射成分を決定した後、0.3–40 keV のエネルギー帯でフィットを行った。低エネルギー側の吸収を考慮するために、星間吸収以外の吸収成分として中性の部分吸収体をモデルに含めた。

最終的なモデルは、Xspec において、tbabs\*pcfabs\*(reflect\*cemek1+gaussian) である。ここで軌道傾斜角は  $68^\circ$  を使用した (Hartley et al. 2005)。フィットの結果、得られたパラメータを表 2 に示す。

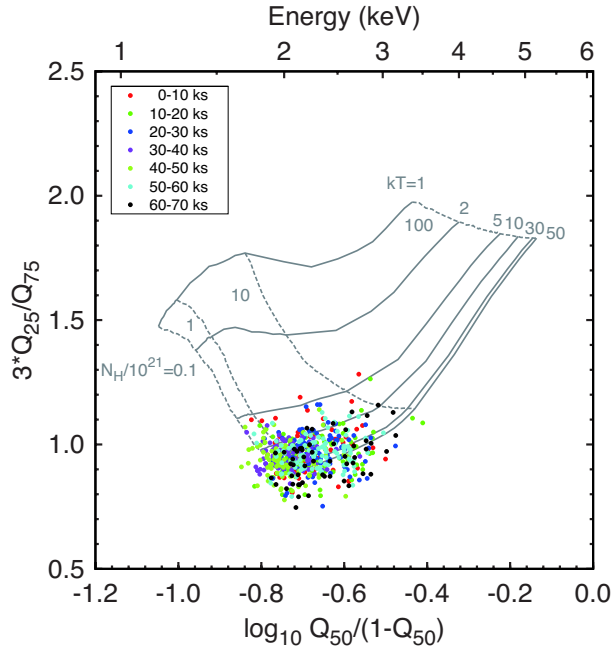


図 3. Quantile 法で作成した二色図。観測開始時刻から 10 ks ごとに分けて色分けしている。横軸の上段レベルは、下段の値に対応するエネルギーである。灰色の点線と実線は、星間吸収 ( $N_{\text{H}} \text{ cm}^{-2}$ : tbabs) を受けた熱制動放射 ( $kT$  keV: brems) を仮定してシミュレーションを行ったものである。

表 2. ベストフィットパラメーター\*

$N_{\text{H}}/10^{20}$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	$N_{\text{H}}^{\text{PC}}/10^{20}$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	$C^{\text{PC}}$	$\Omega/2\pi$	$\alpha$	$kT_{\text{max}}$ (keV)	$Z$ ( $Z_{\odot}$ )	EW (eV)	$L_{\text{X}}/10^{31}$ ( $\text{erg s}^{-1}$ )	$\text{Re-}\chi^2$ (dof)
$0.4^{\dagger}$	$89_{-5}^{+5}$	$0.73_{-0.02}^{+0.02}$	$0.484^{\dagger}$	$1.07_{-0.07}^{+0.08}$	$20.0_{-1.4}^{+1.2}$	$2.07_{-0.10}^{+0.11}$	$64_{-2}^{+4}$	8.4	1.11 (2000)

\* パラメーターの意味は以下の通り。  $N_{\text{H}}$ : 星間吸収の水素柱密度 (Verner et al. 1996 の光電断面積を仮定)、  $N_{\text{H}}^{\text{PC}}$ : 部分吸収体の水素柱密度、  $C^{\text{PC}}$ : 部分吸収体の covering fraction、  $\Omega$ : プラズマから見た反射体の立体角、  $\alpha$ : プラズマ放射の emissivity のベキ、  $kT_{\text{max}}$ : 多温度プラズマの最高温度、  $Z$ : 多温度プラズマの元素量 (Wilms et al. 2000 の太陽組成を仮定)、 EW: 6.4 keV 蛍光鉄輝線の等価幅、  $L_{\text{X}}$ : 距離 163 pc (Thorstensen 2003) を仮定した時の 2–10 keV における光度、  $\text{Re-}\chi^2$ : reduced カイ二乗、 dof: 自由度。エラーは 90% の不確定性を表している。

† パラメーターを固定。

#### 4. 議論

本観測が行われたのは、可視光ではアウトバーストが始まった時であると考えられる。しかし、X 線でハードであること、およびアウトバースト時の ASCA 衛星による観測 (Baskill et al. 2001) と比較して明るいことから、降着円盤の熱不安定性が境界層まで達していないと考えられる。すなわち、X 線では静穏時として扱うことができるといえる。

XIS と HXD を用いた広帯域スペクトル解析によって、初めて Z Cam の多温度プラズマの最高温度を決定することができた。境界層へ落ち込むガスが 1 粒子あたり  $5/2kT$  のエネルギーを放出すると仮定すると、プラズマの最高温度と境界層の X 線光度より (Pandel et al. 2003)、

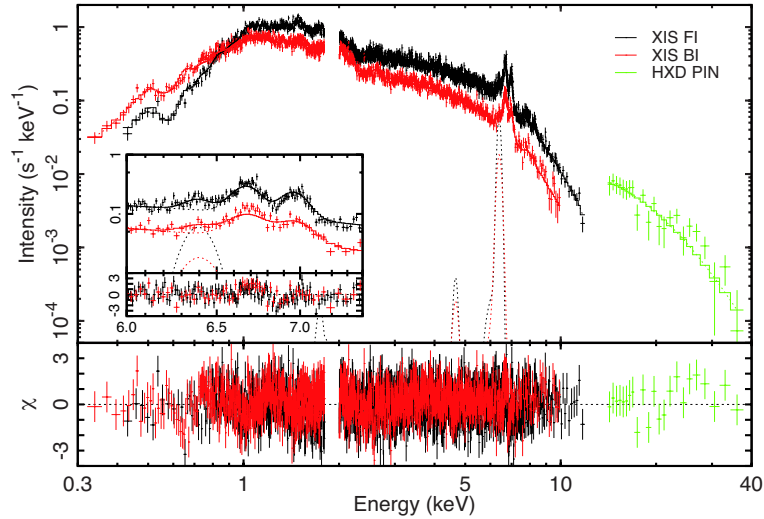


図 4. 0.3–40 keV のスペクトル。上段のパネルは、データ (十字) とモデル (実線) を表している。下段のパネルは、モデルのデータからの残差を表している。挿入図は鉄  $K\alpha$  輝線を示すための 6.0–7.4 keV の拡大図である。

境界層へと落ち込む質量降着率は  $\sim 2 \times 10^{-11} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  となる。

磁場の弱い激変星である矮新星では、反射成分は白色矮星表面、または光学的に厚い降着円盤から生じると考えられる。静穏時には降着円盤の内縁は存在しないか、存在したとしても光学的に薄いと考えられる (Rana et al. 2006)。そのため、反射成分は主に白色矮星表面から生じているといえる。もしプラズマが点状であると仮定すると、プラズマから反射体を見込む立体角  $\Omega/2\pi$  と、白色矮星表面から測ったプラズマが存在する高度  $h$  の関係式を導くことができる (Ishida et al. 2009)。すると、スペクトルフィットより  $\Omega/2\pi = 0.484$  (表 2) であるから、 $h = 0.17R = 9.7 \times 10^7 \text{ cm}$  となる。ここで  $R$  は白色矮星の半径であり、 $R = 5.8 \times 10^8 \text{ cm}$  (Hartley et al. 2005) を用いた。

低エネルギー側のスペクトルを説明するためには、星間吸収よりも二桁以上大きな水素柱密度を持つ部分吸収体が必要であった (表 2)。この部分吸収体は、天体に付随する吸収体であると考えられる。この吸収体は、降着円盤からの wind によるものであると考えられる (Knigge et al. 1997; Baskill et al. 2001)。ASCA 衛星によるアウトバースト時の観測でも同様に、そのスペクトルを説明するためには星間吸収以外の吸収体が必要であった (Baskill et al. 2001)。今回の観測によって、X 線でアウトバースト期にならなくても、可視光でアウトバーストが始まっている時期には、降着円盤からの wind の影響が生じることが示唆される。

## 5. 結論

- (1) Z Cam が可視光でアウトバーストを起こした、その立ち上がりの時期の X 線観測を行った。
- (2) 広帯域スペクトル解析によって、その X 線スペクトルは部分吸収を受けた、反射成分込みの多温度プラズマモデルで説明できることが分かった。
- (3) スペクトル解析によって、質量降着率、およびプラズマの幾何を求めた。

- (4) X線でアウトバーストの状態になる前でも、可視光でアウトバーストの状態では降着円盤からの wind による部分吸収体が存在することが分かった。

## 参考文献

- Baskill, D. S., Wheatley, P. J., & Osborne, J. P. 2001, MNRAS, 328, 71  
George, I. M. & Fabian, A. C. 1991, MNRAS, 249, 352  
Hartley, L. E., Long, K. S., Froning, C. S., & Drew, J. E. 2005, ApJ, 623, 425  
Hong, J., Schlegel, E. M., & Grindlay, J. E. 2004, ApJ, 614, 508  
Ishida, M., Okada, S., Hayashi, T., Nakamura, R., Terada, Y., Mukai, K., & Hamaguchi, K. 2009, PASJ, 61, S77  
Jones, M. H., & Watson, M. G. 1992, MNRAS, 257, 633  
Knigge, C., Long, K. S., Blair, W. P., & Wade, R. A. 1997, ApJ, 476, 291  
Kokubun, M., et al. 2007, PASJ, 59, S53  
Koyama, K., et al. 2007, PASJ, 59, S23  
Mauche, C. W., Raymond, J. C., & Córdova, F. A. 1988, ApJ, 335, 829  
Mitsuda, K., et al. 2007, PASJ, 59, S1  
Osaki, Y. 1996, PASP, 108, 39  
Pandel, D., Córdova, F. A., Mason, K. O., & Priedhorsky, W. C. 2005, ApJ, 626, 396  
Rana, V. R., Singh, K. P., Schlegel, E. M., & Barrett, P. E. 2006, ApJ, 642, 1042  
Shara, M. M., et al. 2007, Nature, 446, 159  
Takahashi, T., et al. 2007, PASJ, 59, S35  
Thorstensen, J. R. 2003, AJ, 126, 3017  
Verner, D. A., Ferland, G. J., Korista, K. T., & Yakovley, D. G. 1996, ApJ, 465, 487  
Warner, B. 1995, Cataclysmic Variable Stars (Cambridge: Cambridge University Press), 1  
Wheatley, P. J., van Teeseling, A., Watson, M. G., Verbunt, F., & Pfeffermann, P. 1996, MNRAS, 283, 101  
Wheatley, P. J., Mauche, C. W., & Mattei, J. A. 2003, MNRAS, 345, 49  
Wilms, J., Allen, A., & McCray, R. 2000, ApJ, 542, 914