

# 「すざく」による激変星 V1223 Sagittarii の白色矮星質量の推定

和田 有希 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

V1223 Sagittarii は強磁場白色矮星と晩期型主系列星が連星系なす激変星である。主系列星から白色矮星へガスが降着する際に、白色矮星の磁極付近で形成される降着柱内に衝撃波が発生し、加熱されたガスが X 線を放射している。本研究では 2014 年 4 月に X 線天文衛星「すざく」により観測されたエネルギースペクトルの解析を行い、V1223 Sagittarii の白色矮星質量を推定した。取得した 5.0–50.0 keV のスペクトルに対し、降着柱を満たすプラズマが衝撃波の直下で最も高温で、白色矮星表面に近づくにつれ放射冷却されると仮定し、多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (cevmkl: Done & Osborne 1997) を適用した。また降着柱からの放射が白色矮星表面で反射する効果を reflect モデル (Magdziarz & Zdziarski 1995) で取り込んだ。プラズマの最高温度は  $31.3 \pm 1.7$  keV と測定され、そこから  $M$  と  $R$  の比は  $(M/M_{\odot})(R/R_{\odot})^{-1} = 68 \pm 4$  と求めた。さらに白色矮星の  $M$ - $R$  関係式 (Nauenberg 1972) を用いて、 $M = 0.73 \pm 0.02 M_{\odot}$  と推定された。これはケプラー則を用いた可視光観測による推定質量  $M = 0.93 \pm 0.12 M_{\odot}$  (Beuermann et al. 2004) と比較して、約 20 % の精度で一致している。今後、解析の手法とモデルの改良を行い、より精度よく白色矮星の質量を推定できることが期待される。

## 1 Introduction

激変星は強磁場白色矮星 (主星) と晩期型主系列星 (伴星) との連星系である。Roche lobe overflow によって伴星から主星へガスが降着し、X 線を放射している。こうした連星系は白色矮星の磁場強度によって分類され、 $10^6$ – $10^7$  G 程度の場合は Intermediate Polar (IP)、 $10^8$  G 以上の場合には Polar と呼ばれる。V1223 Sagittarii は典型的な IP である。

IP では伴星からのガスが主星の周りで降着円盤を形成し、最終的に磁力線に沿って白色矮星の磁極へ降着する。このとき白色矮星表面に近づくにつれガスは加速され、その流速は音速を越え、白色矮星の表面近くで定在衝撃波を形成する。降着ガスはこの衝撃波によって  $10^7$ – $10^8$  K まで加熱され、高温プラズマから成る降着柱を形成し、そこから熱制動放射によって数十 keV までの硬 X 線を放出する。この高温プラズマは衝撃波面から白色矮星表面に近づくにつれ放射冷却されるため、エネルギースペクトルは多温度放射の様相を呈す。また熱制動放射によって放出される X 線が、白色矮星表面や降着柱上部の冷えた物質で反射する成分も検出される。

低温ガスが無制限遠方から自由落下により降着する

と仮定した場合、衝撃波直下のプラズマの温度は

$$kT = 32 \left( \frac{M_{\text{WD}}}{M_{\odot}} \right) \left( \frac{R_{\text{WD}}}{10^9 \text{cm}} \right)^{-1} \text{keV} \quad (1)$$

で与えられる (Aizu 1993)。したがってプラズマの最高温度を測定することにより重力ポテンシャル、すなわち  $M$  と  $R$  の比を求めることができる。さらに白色矮星の  $M$ - $R$  関係式 (Nauenberg 1972)

$$R_{\text{WD}} = 0.78 \times 10^9 \left[ \left( \frac{1.44 M_{\odot}}{M_{\text{WD}}} \right)^{\frac{2}{3}} - \left( \frac{M_{\text{WD}}}{1.44 M_{\odot}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{2}} \text{cm} \quad (2)$$

を援用すると、白色矮星の質量が推定できる。

V1223 Sagittarii は太陽系より  $527^{+54}_{-43}$  pc (Beuermann et al. 2004) の距離に存在し、0.1–100 keV の X 線平均光度は  $2.4 \times 10^{34}$  erg/s (Suleimanov et al. 2005) である。公転周期は 3.37 hours (e.g. Beuermann et al. 2004)、白色矮星の自転周期は 746 sec (Osborne et al. 1985) である。可視光観測による連星の運動学を用いた白色矮星の推定質量は  $0.93 \pm 0.12 M_{\odot}$  (Beuermann et al. 2004) である。

激変星の白色矮星は伴星から質量を獲得しているため、Ia 型超新星爆発の候補天体とされる。したがって白色矮星の質量を推定し、チャンドラセカール質量

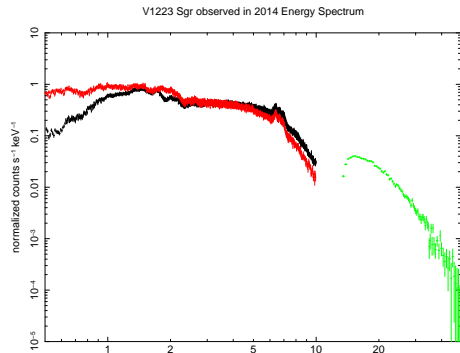


図 1: V1223 Sagittarii の 0.5–50.0 keV スペクトル。黒は XIS0+XIS3, 赤は XIS1, 緑は HXD-PIN のスペクトルを示す。検出器の応答を含んでいる。

に近い白色矮星を探索することは重要である。可視光観測によりケプラーの法則を用いて質量を推定する方法は、食が観測されない系において誤差が大きくなる。X 線観測による質量推定の方法を開発し、可視光観測により質量のわかっている例で較正することで、より多くの天体の質量を推定できるようになると期待される。

## 2 Methods/Instruments and Observations

X 線天文衛星「すざく」(Mitsuda et al. 2007) は JAXA 宇宙科学研究所によって開発され、2005 年 7 月 10 日に之内浦宇宙空間観測所より打ち上げられた、日本 5 機目の X 線観測衛星である。観測機器として軟 X 線を集光する X 線望遠鏡 XRT (X-ray Telescope: Serlemitsos et al. 2007), 軟 X 線 CCD カメラ XIS (X-ray Imaging Spectrometer: Koyama et al. 2007), 硬 X 線検出器 HXD (Hard X-ray Detector: Takahashi et al. 2007; Kokubun et al. 2007) を搭載する。XIS は 4 台のカメラ (それぞれ XRT の焦点面におかれる) で構成される。XIS1 は裏面照射型, XIS0, 2, 3 は表面照射型の CCD であり, 前者は 0.4–10.0 keV, 後者は 0.2–10.0 keV の帯域で感度を持つ。HXD は PIN と GSO の 2 つの検出器で構成され, PIN は 10–70 keV の帯域で, GSO は 50–600 keV の帯域で感度を持ち, 非撮像型であるがバックグ

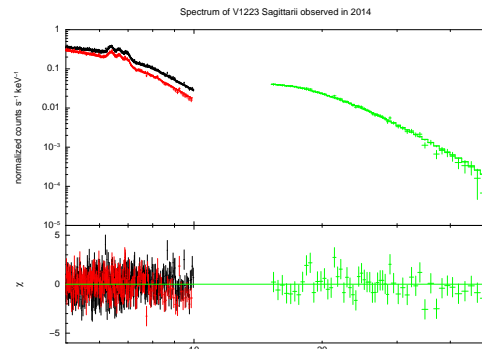


図 2:  $\text{phabs} \times (\text{reflect} \times \text{cevmk} + \text{gaussian})$  によるベストフィットモデルをデータに重ねたもの。データは図 1 の 5.0–50.0 keV の部分と同一である。6–7 keV に見える 3 本の輝線は左から中性 Fe (6.4 keV), He-like Fe (Fe XXV: 6.7 keV), H-like Fe (Fe XXVI: 6.9 keV) である。

ラウンドの低い観測ができる。XIS と HXD により 0.2–600 keV の広帯域観測が可能となった。

V1223 Sagittarii はすざくによって 2007 年 4 月に 60 ksec, 2014 年 4 月に 150 ksec 観測され, 2007 年のデータは Hayashi et al. (2011) により解析済みである。本研究では 2014 年に観測された XIS と HXD の広帯域にわたるデータを初めて解析した。図 1 に示すように, スペクトルには電離した元素からの放射である輝線と, 熱的制動放射による連続成分が検出された。そこで 5.0–50.0 keV の連続成分に中性 Fe, He-like Fe (Fe XXV), H-like Fe (Fe XXVI) からの輝線が加わっていると考え, 解析フレームワーク XSPEC (Arnaud 1996) によりモデルフィッティングを行った。降着柱内のプラズマは衝撃波の直下で最も高温で, 白色矮星表面に近づくにつれ放射冷却される。そこで電離平衡に達した光学的に薄いプラズマ放射モデル (`mekal`: Mewe et al. 1985, 1986; Liedahl et al. 1995; Kaastra et al. 1996) をもとに, 温度  $T$  の emission measure が

$$f(T)dT \propto (T/T_{\max})^{\alpha-1}dT \quad (3)$$

で与えられるような, 多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (`cevmk1`; Done & Osborne 1997) を適用した。  $T_{\max}$  はプラズマの最高温度で, 自由パラメータである。このとき圧力勾配と重力効果を取り

込んだ理論モデルにより,  $\alpha = 0.43$  (Suleimanov et al. 2005) と予言されている. これに加え, 放射された X 線が白色矮星の表面で反射することによるコンプトン散乱および光電吸収成分を `reflect` モデル (Magdziarz & Zdziarski 1995) で取り込んだ. また 3 本の鉄輝線のうち, 電離した 2 本は `cevmk1` モデルで再現されるが, 中性 Fe 輝線はこれらのモデルに含まれていないため, 幅の狭いガウシアンをモデルに加えた.

### 3 Results

図 2 は 5.0–50.0 keV の帯域に対し, モデル `const × phabs × (reflect × cevmk1 + gaussian)` でフィッティングを行った結果である. `phabs` は天体から観測機器までのガスによる光電吸収を加味したモデルである. `const` は XIS と HXD の間のオフセット調整のためのパラメータで, 今回は観測中心が XIS のため 1.16 で固定されている.  $\chi^2$  は 717 (d.o.f. 655) であった. このフィッティングより降着柱内のプラズマの最高温度は  $31.3 \pm 1.7$  keV と測定された. したがって式 (1) より  $M$  と  $R$  の比が  $(M_{\text{WD}}/M_{\odot})(R_{\text{WD}}/R_{\odot})^{-1} = 68 \pm 4$  と計算され, (2) とあわせて, 白色矮星の質量は  $M_{\text{WD}} = 0.73 \pm 0.02 M_{\odot}$  と推定された.

### 4 Discussion

V1223 Sagittarii の白色矮星質量の推定は過去に先行研究がある. 既に述べたとおり, ハッブル宇宙望遠鏡を用いた可視光観測で  $M = 0.93 \pm 0.12 M_{\odot}$  (Beuermann et al. 2004), そして「すぎく」による 2007 年の観測で  $M = 0.82^{+0.05}_{-0.06} M_{\odot}$  (Hayashi et al. 2011) と求められている. 今回得られた  $M = 0.73 \pm 0.02 M_{\odot}$  と合わせて検討すると, X 線によって推定された質量は可視光による質量よりも少なく見積もられている. これは一部の IP でよくみられる現象である (Suleimanov et al. 2005, Yuasa et al. 2010). この原因としては, `cevmk1` のパラメータを決定する際に使用する降着柱のジオメトリの仮定が適切でないことが考えられる. 降着柱の標準モデル (Cropper et al. 1998) では降着柱の円柱の断面積を一定とし,

イオン温度と電子温度が一致していることを仮定している. しかし実際には磁極に沿ってガスが降着するため, 降着柱は白色矮星表面に向かってしぼんだ形になっていると考えられ, ガスの密度や温度分布をより正しく取り込む必要がある (Hayashi & Ishida 2014). また白色矮星表面からの反射成分にも改良の余地がある. これらのモデルの単純化や, 50 keV 以上のデータの欠落, 検出器のキャリブレーション等による系統誤差が生じており, 統計誤差に対して無視できない可能性が高い. 2007 年観測データに基づく推定質量 (Hayashi et al. 2011) と本研究での推定質量が, 同様の解析手法 (フィッティングモデル, データ処理の方法) にも関わらず 10 % ほど相違していることについては, 現在, 検出器応答やバックグラウンドモデルの検証を行い, 原因の特定を行っている.

現在, 打ち上げが計画されている次期 X 線天文衛星 ASTRO-H (Takahashi et al. 2012) に搭載される SXS (Soft X-ray Spectrometer: Mitsuda et al. 2012) では XIS の 20 倍のエネルギー分解能が得られるとされる. これにより, 降着柱上部のガスから放射される中性 Fe 輝線の, 白色矮星の自転によるドップラーシフトが観測されると期待される. また降着柱の標準モデルで一定と仮定しているガス密度が実際には一定ではなく, 元素からの K 輝線が密度・温度依存性を示すと考えられている. さらに HXI (Hard X-ray Imager: Kokubun et al. 2012) および SGD (Soft Gamma-ray Detector: Tajima et al. 2010) を用いた低バックグラウンドの広帯域観測では 100 keV 以上のスペクトルが得られ, 電子-電子制動放射の効果が顕著になるとされる. これらより, 降着柱の縦方向の温度, 密度勾配や, 白色矮星表面での反射の成分などの情報がより詳細に解明できると期待される. いずれにせよ, 現状で約 20% の精度をもって光学的手法と一致する結果が得られており, 今後さらに手法を改良することで, IP の質量推定方法として, X 線を用いたこの手法は有望なものとなるだろう.

## 5 Conclusion

「すぎく」によって 2014 年 4 月に観測された激変星 V1223 Sagittarii の 5.0–50.0 keV のスペクトルを、多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (cevmk1: Done & Osborne 1997) でフィットし、白色矮星表面からの反射成分を `reflect` モデルで取り込んだ。その結果、プラズマの最高温度は  $31.3 \pm 1.7$  keV と測定され、そこから白色矮星の  $M$  と  $R$  の比が  $(M_{\text{WD}}/M_{\odot})(R_{\text{WD}}/R_{\odot})^{-1} = 68 \pm 4$  と計算された。さらに白色矮星の  $M$ - $R$  関係式 (Nauenberg 1972) より、質量は  $M_{\text{WD}} = 0.73 \pm 0.02 M_{\odot}$  と求められた。推定された質量はケプラー則を用いた可視光観測による  $M = 0.93 \pm 0.12 M_{\odot}$  (Beuermann et al. 2004) と約 20% の精度で一致している。降着柱のジオメトリ、温度、密度分布、白色矮星表面からの反射成分をより正しく取り込み、X 線によってより精度よく質量を推定できることが期待される。

## Acknowledgement

2015 年度第 45 回天文・天体物理若手夏の学校の開催に際し、京都大学基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## Reference

- Aizu, K. 1973, *Progress of Theoretical Physics*, 50, 344
- Arnaud, K. A. 1996, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, 101, 17
- Beuermann, K., Harrison, Th. E., McArthur, B. E., Benedict, G. F., & Gänsicke, B.T. & 2004, *A&A*, 419, 291
- Cropper, M., Ramsay, Gu., & Wu, K. 1998, *MNRAS*, 293, 222
- Done, C., & Osborne, J. P. 1997, *MNRAS*, 288, 649
- Hayashi, T., Ishida, M., Terada, Y., Bamba, A., & Shionome, T. 2011, *PASJ*, 63, 739
- Hayashi, T., & Ishida, M. 2014, *MNRAS*, 438, 2267
- Kaastra, J. S., Mewe, R., & Nieuwenhuijzen, H. 1996, in *UV and X-ray Spectroscopy of Astrophysical and Laboratory Plasmas*, ed. K. Y. Yamashita & T. Watanabe (Tokyo: Universal Academy Press), 411
- Kokubun, M., et al. 2007, *PASJ*, 59, S53
- Kokubun, M., et al. 2012, *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE*, 8443, 15
- Koyama, K., et al. 2007, *PASJ*, 59, S23
- Liedahl, D. A., Osterheld, A. L., & Goldstein, W. H. 1995, *ApJ*, 438, L115
- Magdziarz, P., & Zdziarski, A. A. 1995, *MNRAS*, 273, 837
- Mewe, R., Gronenschild, E. H. B. M., & van den Oord, G. H. J. 1985, *A&AS*, 62, 197
- Mewe, R., Lemen, J. R., & van den Oord, G. H. J. 1986, *A&AS*, 65, 511
- Mitsuda, K., et al. 2007, *PASJ*, 59, S1
- Mitsuda, K., et al. 2012, *JLTP*, 167, 795
- Nauenberg, M. 1972, *ApJ*, 175, 417
- Osborne, J. P., Rosen, R., Mason, K. O., & Beuermann, K. 1985, *Space Science Review*, 40, 143
- Serlemitsos, P. J., et al. 2007, *PASJ*, 59, S9
- Suleimanov, V., Revnivtsev, M., & Ritter, H. 2005, *A&A*, 435, 191
- Tajima, H., et al. 2010, *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray. Edited by Arnaud, Monique; Murray, Stephen S.; Takahashi, Tadayuki. Proceedings of the SPIE*, 7732, 17
- Takahashi, T., et al. 2007, *PASJ*, 59, S35
- Takahashi, T., et al. 2008, *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE*, 8443, 22
- Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Saitou, K., Ishida, M., Ebisawa, K., Mori, H., & Yamada, S. 2010, *A&A*, 520, A25