

## MAXI で探る Be 型 X 線連星パルサーの星周円盤の密度

高木 利紘 (日本大学大学院 理工学研究科)

### Abstract

Be 型 X 線連星パルサーは中性子星と Be 型星の連星系で、既知の大質量 X 線連星パルサーの 70% 以上の数が知られている。Be 型星は、過去に一回でも水素の輝線が観測されたことのある B 型星で、水素の輝線 ( $H\alpha$ ) は、Be 型星の赤道面上にできる星周円盤から放射されている。星周円盤は粘性で外側へ広がっていると考えられているが、構造や生成過程などがよくわかっていない。星周円盤と中性子星の軌道が交わる場所を中性子星が通るとガスが降着し、X 線の増光 (アウトバースト) を起こす。全天 X 線監視装置 MAXI は 92 分で地球を一周しながら全天の約 90% を観測し続けることで、Be 型 X 線連星パルサーからのアウトバーストを常に監視している。本研究では MAXI の観測で得られた A 0535+262、GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 のピーク光度を用いて、中性子星への質量降着率を求め、降着モデルを Bondi Accretion あるいは Roche Lobe 捕獲と仮定して、星周円盤の密度の推定を行った。推定した A 0535+262 の密度は  $1.4 \times 10^{-15}$  [g/cm<sup>3</sup>] で、星周円盤密度分布モデルと比較すると、同等の値であった。GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 の密度は  $6.8 \times 10^{-16}$  [g/cm<sup>3</sup>]、 $2.7 \times 10^{-15}$  [g/cm<sup>3</sup>]、 $1.9 \times 10^{-14}$  [g/cm<sup>3</sup>] となった。

## 1 Introduction

Be 型 X 線連星パルサーは中性子星と Be 型星の連星系で、軌道周期は数百日、離心率  $e$  は 0.3 以上のものが多い。伴星である Be 型星は、過去に一回でも水素の輝線が観測されたことのある B 型星で、自転がとても速く星風も強いという特徴があり、B 型星の 2~3 割を占めている。水素の輝線 ( $H\alpha$ ) は赤道面上にできる星周円盤から放射されていると考えられており、図 1 のように先端部分がダブルピークになっていると、星周円盤の内側や外側の半径を測ることが出来る。中性子星の軌道と星周円盤が交わっている

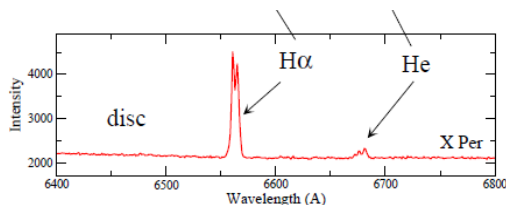


図 1: X Per の  $H\alpha$  のプロファイル (Reig 2011)

所を中性子星が通過すると、星周円盤のガスが中性子星に落ち込み、アウトバーストと呼ばれる X 線での増光を示す。それがほぼ軌道周期で繰り返し、ト

ランジェント X 線源として現れる。星周円盤はケプラー回転しており、ガスの粘性で外側に広がっていくと考えられるが、構造や生成過程などがよくわかっていない。全天 X 線監視装置 MAXI は約 92 分で地球を一周しながら全天の約 90% を監視し続けることで、Be 型 X 線連星パルサーからのアウトバーストを常に監視している。MAXI が監視している Be 型 X 線連星パルサーは 25 天体あり、そのうち 14 天体から合計 45 回のアウトバーストを観測している (2013 年 5 月 27 日)。

本研究では、よくわかっていない星周円盤の密度を MAXI が観測した X 線光度から推定していく。得られた値は、Be 型星の  $H\alpha$  プロファイルによる星周円盤密度分布モデル (Silaj et al. 2010) と比較する。

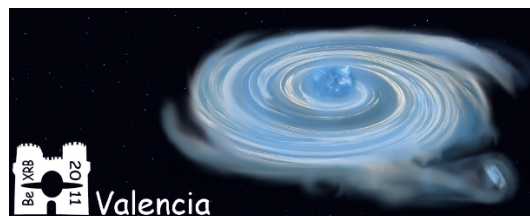


図 2: Be 型 X 線連星パルサーの想像図 (BeXRB2011HP)

## 2 Methods

星周円盤の密度の推定は以下の手順で行う。まずはじめに、アウトバースト光度 ( $L_x$ ) から質量降着率 ( $\dot{M}$ ) を次の式から求める。

$$\dot{M} = \frac{L_x R_{\text{NS}}}{GM_{\text{NS}}} \quad (1)$$

ここで、 $G$  は重力定数、 $R_{\text{NS}}$  と  $M_{\text{NS}}$  はそれぞれ中性子星の半径と質量である。求めた  $\dot{M}$  を Bondi Accretion の式に代入することで密度を推定する。

$$\rho_{\text{B}} = \frac{\dot{M} V^3}{4\pi(GM_{\text{NS}})^2} \quad (2)$$

$\rho_{\text{B}}$  は推定した星周円盤の密度、 $V$  は中性子星と星周円盤の相対速度である。また、Bondi 半径 ( $r_{\text{B}}$ ) がロッシュローブ半径 ( $r_{\text{R}}$ ) より大きいときは、式 (2) ではなく、以下の式で密度の推定を行う必要がある。

$$\rho_{\text{B}} = \frac{\dot{M}}{V\pi r_{\text{R}}^2} \quad (3)$$

$r_{\text{B}}$ 、 $r_{\text{R}}$  は

$$r_{\text{B}} = \frac{2GM_{\text{NS}}}{V^2} \quad (4)$$

$$r_{\text{R}} = R_{\text{peri}} \frac{0.49q^{\frac{2}{3}}}{0.69q^{\frac{2}{3}} + \ln(1 + q^{\frac{1}{3}})} \quad (5)$$

から求める。 $R_{\text{peri}}$  は近星点距離、 $q$  は中性子星と Be 型星の質量比 ( $M_{\text{NS}}/M_{\text{Be}}$ ) である。

星周円盤密度分布モデルは次の式で表される。

$$\rho_{\text{m}}(R, Z) = \rho_0 \left(\frac{R}{R^*}\right)^n e^{-\left(\frac{Z}{H}\right)^2} \quad (6)$$

$\rho_{\text{m}}$  はモデル密度、 $R$  は密度を求めたい場所の Be 型星の中心からの半径方向の距離、 $Z$  は星周円盤の厚みの中心からの距離、 $\rho_0$  は星周円盤の内側の密度、 $R^*$  は近星点距離、 $H$  は星周円盤の厚み関数である。

$\rho_{\text{m}}$  の推定は、中性子星が星周円盤の厚さの中心 ( $Z = 0$ ) を通るとする仮定の下で行う。

## 3 Observations

MAXI で観測された A 0535+262、GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 の光度曲線は図 3、図 4、図 5、図 6 のようになる。A 0535+262 は 6 回、

GX 304-1 は 10 回、GRO J1008-57 は 6 回、4U 0115+63 は 3 回アウトバーストを観測している。この光度曲線より求めたアウトバーストのピーク光度を表 1 にまとめる。

天体	$L_x$ [erg/s]	[kpc]
A 0535+262	$\sim 10^{37}$	2
GX 304-1	$4.8 \times 10^{36}$	$2.4 \pm 0.5$
GRO J1008-57	$2.7 \times 10^{37}$	$5.8 \pm 0.5$
4U 0115+63	$3.5 \times 10^{37}$	$8.0 \pm 0.3$

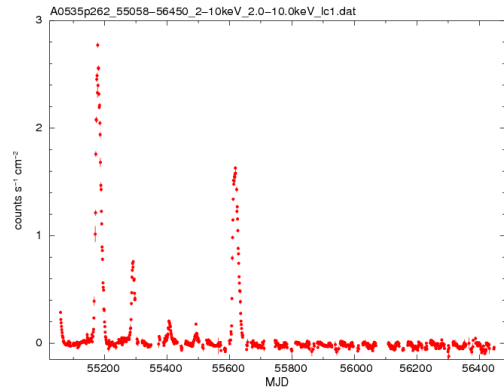


図 3: A 0535+262 の 2-10 keV の光度曲線

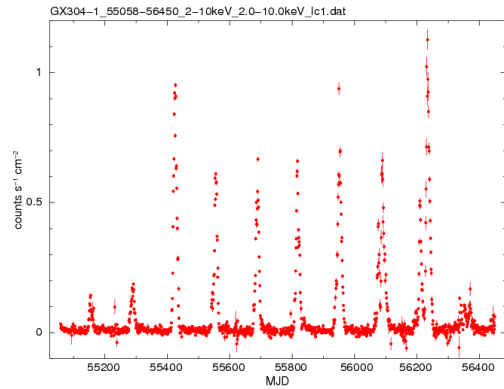


図 4: GX 304-1 の 2-10 keV の光度曲線

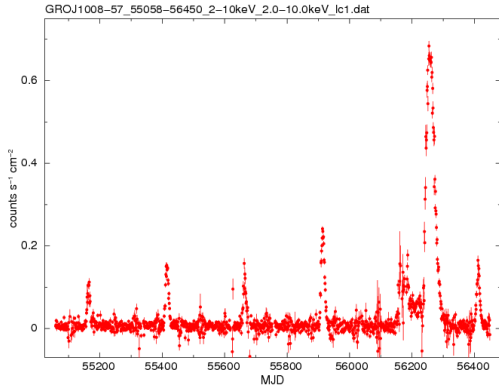


図 5: GRO J1008-57 の 2-10 keV の光度曲線

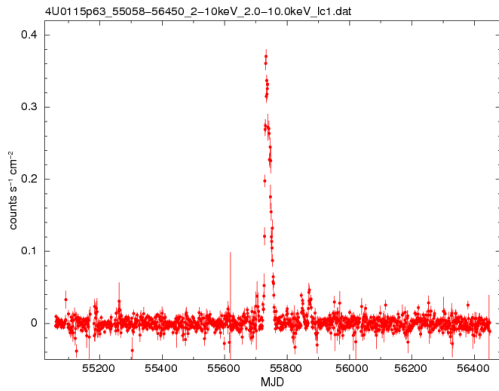


図 6: 4U 0115+63 の 2-10 keV の光度曲線

## 4 Results

表 2 に各天体の Be 型星の質量と半径、近星点距離を示す。

天体	$M_{\text{Be}}$	$R_{\text{Be}}$	$R_{\text{peri}}$ (cm)
A 0535+262	$25M_{\odot}$	$15R_{\odot}$	$1.1 \times 10^{13}$
GX 304-1	$18M_{\odot}$	$8R_{\odot}$	$1.1 \times 10^{13}$
GRO J1008-57	$20M_{\odot}$	$8.5R_{\odot}$	$1.0 \times 10^{13}$
4U 0115+63	$18M_{\odot}$	$8.5R_{\odot}$	$4.4 \times 10^{12}$

### 4.1 A 0535+262 の密度の推定

まず初めに、A 0535+262 の密度の推定を行う。密度を推定する場所は近星点である。アウトバースト光度 ( $L_x$ ) を式 (1) に代入して、 $\dot{M}$  を求めると

$$\dot{M} = 5.3 \times 10^{16} \text{ [g/s]} \quad (7)$$

となる。ここで、 $R_{\text{NS}} = 10^6 \text{ [cm]}$ 、 $M_{\text{NS}} = 2.8 \times 10^{33} \text{ [g]}$  を用いた。また、ここでの Bondi 半径 ( $r_B$ ) とロッシュローブ半径 ( $r_R$ ) を比べてみると、Bondi 半径の方が大きくなるので、式 (3) を用いる。式 (3) に  $\dot{M}$ 、 $V$ 、 $r_R$  (表 3) を代入すと

$$\rho_B = 1.4 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (8)$$

と求まる。

比較を行うため、式 (6) から  $\rho_m$  を求める。各パラメータ  $\rho_0 = 1.0 \times 10^{-11} \text{ [g/cm}^3\text{]}$ 、 $R_{\text{peri}}/R^* = 10.2$ 、 $n = 3.5$ 、 $Z = 0$  を代入すると

$$\rho_m = 3.0 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (9)$$

となる。この値と  $\rho_B$  を比較するとほぼ一致している。

### 4.2 GX 304-1 の密度の推定

次に GX 304-1 の密度の推定を行う。密度を推定する場所は近星点である。A 0535+262 の時と同様の方法で  $\dot{M}$  は

$$\dot{M} = 2.6 \times 10^{16} \text{ [g/s]} \quad (10)$$

と求まる。 $r_B$  と  $r_R$  を比べると  $r_B$  の方が大きくなるので、式 (3) を用いる。 $\dot{M}$ 、 $V$ 、 $r_R$  を代入すると

$$\rho_B = 6.8 \times 10^{-16} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (11)$$

と求まる。

### 4.3 GRO J1008-57 の密度の推定

同様の方法を用いて GRO J1008-57 の密度の推定を行う。密度を推定する場所は近星点である。 $\dot{M}$  は

$$\dot{M} = 1.4 \times 10^{17} \text{ [g/s]} \quad (12)$$

となる。 $r_B$  の方が大きいので、式 (3) を用いる。 $\dot{M}$ 、 $V$ 、 $r_R$  を代入すると

$$\rho_B = 2.7 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (13)$$

と求まる。

#### 4.4 4U 0115+63 の密度の推定

同様の方法で 4U 0115+63 の密度の推定を行う。密度を推定する場所は近星点である。 $\dot{M}$  は

$$\dot{M} = 1.9 \times 10^{17} \text{ [g/s]} \quad (14)$$

となる。 $r_B$  の方が大きくなるので、式 (3) を用いる。 $\dot{M}$ 、 $V$ 、 $r_R$  を代入すると、

$$\rho_B = 1.9 \times 10^{-14} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (15)$$

と求まる。

表 3: 各天体の相対速度とロッシュローブ半径

天体	$V$ [cm/s]	$r_R$ [cm]
A 0535+262	$4.04 \times 10^6$	$1.8 \times 10^{12}$
GX 304-1	$3.04 \times 10^6$	$2.0 \times 10^{12}$
GRO J1008-57	$5.05 \times 10^6$	$1.8 \times 10^{12}$
4U 0115+63	$4.73 \times 10^6$	$8.2 \times 10^{11}$

## 5 Discussion

軌道パラメータがほぼ同じ A 0535+262 と GX 304-1 では密度が半分になったが、これは、密度を決める要素が  $L_x$  以外ほぼ同じで、 $L_x$  が半分であったために密度も半分になったと考えられる。また、4U 0115+63 は他の天体に比べて 1 桁密度が大きかった。この原因として考えられるのは  $L_x$  が他の天体より明るかったことも要因であるが、一番は密度の推定を行った場所が他の天体の場所よりも Be 型星に近かった為であると考えられる。

表 4: 各天体のピーク光度と密度

天体	$L_x$ [erg/s]	$\rho_B$ [g/cm <sup>3</sup> ]
A 0535+262	$\sim 10^{37}$	$1.3 \times 10^{-15}$
GX 304-1	$4.8 \times 10^{36}$	$6.8 \times 10^{-16}$
GRO J1008-57	$2.7 \times 10^{37}$	$2.7 \times 10^{-15}$
4U 0115+63	$3.5 \times 10^{37}$	$1.9 \times 10^{-14}$

## 6 Conclusion

MAXI で観測された A 0535+262、GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 のアウトバースト光度から密度を推定することができ、A 0535+262 の密度は、星周円盤密度分布モデルから求めた密度と同等の値を得ることが出来た。GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 は、密度分布モデルとの比較を行わなかったが、軌道パラメータが近い A 0535+262 と GX 304-1 では、アウトバースト光度が密度の違いになった。また、GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 も確からしい値を得ることができた。

密度の推定は 4 天体しか行っていないが、これから数を増やしていき、より一般的な議論を行っていく。求めた密度は密度分布モデルとの比較を行い、精度の向上に努めるとともに、X 線と可視光それぞれで求めた際の違いを見つけていく。また、可視光との同時観測を増やしていき、星周円盤のより詳細な構造を探っていく。

## Reference

- Reig, Ap&SS, 332, 1, 1, (2011)  
 Silaj et al., Ap&SS, 187, 228, (2010)