

O-15

## 全天 X 線監視装置 MAXI を用いた Be 型 X 線連星パルサーの観測

## 光度曲線で見える Be 型星の星周円盤の構造

## Observation of the Be X-ray binary Pulsar with MAXI

## Assumed structure of Be Disk by Light curve

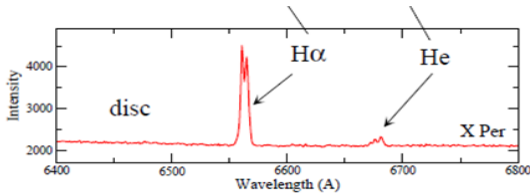
○高木利紘<sup>1</sup>, 三原建弘<sup>2</sup>, 中島基樹<sup>3</sup>, 山本堂之<sup>2</sup>, 藤井紫麻見<sup>4</sup>\*Toshihiro Takagi<sup>1</sup>, Tatehiro Mihara<sup>2</sup>, Motoki Nakajima<sup>3</sup>, Takayuki Yamamoto<sup>2</sup>, Siomi Fujii<sup>4</sup>

Abstract: MAXI observed 39 Outbursts (X-ray brightening) from 14 Be X-ray binary pulsars (BeXBP) for three years. The BeXBP is a binary that consists of neutron star and a Be star. We can solve parameters of Be disk which is formed around the Be star of observed X-ray. Getting density and total mass of the Be disk of A 0535+262 which is the brightest BeXBP observed MAXI.

## 1. Be 型星とは

Be 型星は B 型星(大質量星でスペクトルが B)の約 20%を占めている。Be 型星の赤道面上にはケプラー回転をしている星周円盤があり, そこから水素の輝線, H $\alpha$  線を放射する。この添え字 e の定義は水素の輝線を一度でも放射したことがあることである。Figure1 は水素の輝線付近のスペクトルで横軸に波長, 縦軸に光の強度を取ったものである。鋭く立っている先端部分にダブルピークが見られ, これが星周円盤外円のドップラー効果によるものとして半径を求めることができる。Be 型星は自転がとても速く, 遠心力と釣り合う速度である, Critical Velocity の 70-90%で自転しており, 多くは 90%近くになっている。この高速回転する Be 型星からなんらかの機構で, 星周円盤ができ, そこから外へは星周円盤の粘性で広がっていく。星周円盤は内側(Be 型星付近)では厚みが薄く、外側に行くにしたがって厚くなっていく。

Be 型星には解明されていないことがあり, 例としては本講演で扱う星周円盤の構造が挙げられる。

Figure 1. H $\alpha$  line profile (Reig+ 2011)

## 2. Be 型 X 線連星パルサー

Be 型 X 線連星パルサーは上記の Be 型星と中性子星が連星を組んだもので, 既知の大質量 X 線連星系の約 70%を占めており, 銀河系内に約 50 個, SMC (小マゼラン星雲)に約 70 個, LMC (大マゼラン星雲)に約 10 個存在が知られている。軌道周期は数十～数百日で, 軌道は楕円軌道を描いており, その離心率は大きいもの

( $e \geq 0.3$ )が多くなっている。

Be 型星と中性子星が最も近づく場所(近星点と呼ばれる)付近で星周円盤に中性子星が突っ込み, X 線による大増光(アウトバースト)が起こる。この X 線の増光を観測することで, 星周円盤から中性子星に落ち込む質量が解り, そこから星周円盤の密度を推定することができる。

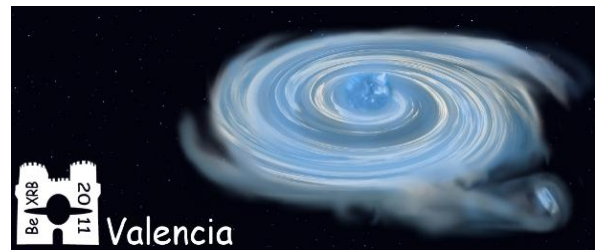


Figure2. Image of Be X-ray binary Pulsar (BeXRB2011HP)

## 3. 全天 X 線監視装置 MAXI

MAXI (Monitor of All sky X-ray Image)は国際宇宙ステーションの日本の実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに搭載されており, 92 分で地球を一周して, 常に全天を観測している。突発天体の発見や長期変動の観測などに適している。

この MAXI には, GSC (Gas Slit Camera)と SSC (Solid-state Slit Camera)の 2 つの検出器が搭載されており, それぞれ, 2-20keV と 0.5-12keV のエネルギー帯をカバーしている。

MAXI は今日までの 3 年間の観測で, 14 個の Be 型 X 線連星パルサーから 39 回のアウトバーストを観測している。

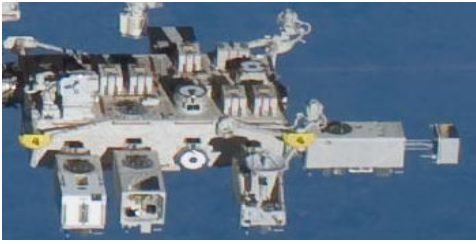


Figure3. MAXI on ISS photo by  
MAXI is at the lower left (NASA)

#### 4. Be 型 X 線連星パルサー A 0535+262

A 0535+262 は 1975 年に発見された。Be 型 X 線連星系の中でも特に有名で、MAXI で観測された中で最も明るく増光した Be 型 X 線連星パルサーでもある。これまでに 9 回のアウトバーストが観測され、MAXI でも 5 回のアウトバーストを観測している。この天体は、増光時に非常に明るくなるので観測時の統計がとてよく、光度曲線を非常にきれいに書くことができるため、星周円盤の構造を解明するのに適した天体である。

今回はこの A 0535+262 を用いて星周円盤の密度と全質量を計算した。

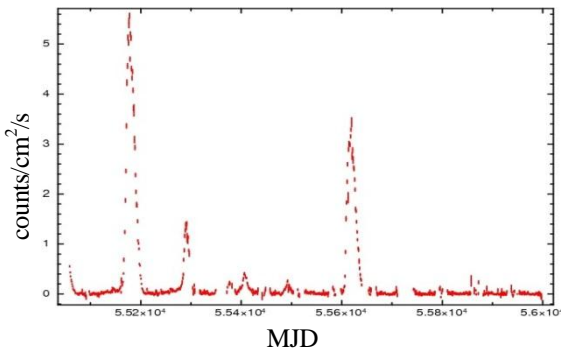


Figure4. Light curve of A 0535+262 with MAXI

#### 5. 星周円盤の密度と全質量

##### 5-1. 密度

X 線光度の観測を行うことで星周円盤から中性子星に落ち込む質量を求められる。中性子星への降着モデルには、今回は Bondi Accretion (Bondi 1952) を仮定する。Bondi Accretion の式は以下ようになる。

$$\dot{M} = \frac{4\pi\rho G^2 M^2}{V^3}$$

左辺は単位時間当たりの降着量、 $\rho$  は密度、 $G$  は重力定数、 $M$  は中性子星の質量、 $V$  は中性子星と星周円盤の速度である。これより密度は

$$\rho = \frac{\dot{M}V^3}{4\pi G^2 M^2} \cong 1.3 \times 10^{-15} [\text{g/cm}^3]$$

$$(\dot{M} = \frac{L_x r}{GM} \cong 5.3 \times 10^{16} [\text{g/s}], r = 10^6 [\text{cm}])$$

$$L_x \sim 10^{37} [\text{erg/s}], M = 1.4M_\odot, V = 2.2 \times 10^7 [\text{cm/s}]$$

となる。 $L_x$  は観測された X 線光度、 $r$  は中性子星の半径である。多くの Be 型 X 線連星パルサーの可視光観測から求められた密度の推定の式 (Silaj 2010) から求めた値は

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{R}{R^*}\right)^{-n} e^{-\left(\frac{Z}{H}\right)^2} \cong 3.0 \times 10^{-15} [\text{g/cm}^3]$$

$$(\rho_0 = 1.0 \times 10^{-11} [\text{g/cm}^3], n = 3.5, \frac{R}{R^*} = 10.2)$$

であり、同程度である。 $\rho_0$  は赤道面での基本密度、 $R/R^*$  は Be 型星と求めたい密度の所の距離と Be 星の半径の比、 $n$  は各星の定数 ( $n=1.5-4.5$ )、 $Z$  は赤道面からの距離、 $H$  は星周円盤の厚みの関数で、

$$H = \sqrt{\frac{2R^3}{\alpha_0}}$$

$$\alpha_0 = GM_* \frac{\mu_0 m_H}{kT_0}$$

である。ここで、 $M_*$  は Be 型星の質量、 $\mu_0$  は星周円盤のガス分子の質量の期待値、 $m_H$  は水素の質量、 $T_0$  は推測された初期温度である。今回は中性子星が星周円盤の赤道面上を突っ切ると仮定したので  $Z=0$  として計算を行った。

##### 5-2. 全質量

全質量は上記の Silaj (2010) の式を星周円盤の体積で積分する。

$$M_{\text{disk}} = \int_{R^*}^{10R^*} 2 \int_0^{0.4R} \rho_0 \left(\frac{R}{R^*}\right)^{-n} e^{-\left(\frac{Z}{H}\right)^2} (2\pi R) dZ dR$$

$$(R^* = 15R_\odot, M_* = 25M_\odot, \mu_0 = 1.1, T_0 = 26000 [\text{K}])$$

$$\rho_0 = 1.0 \times 10^{-11} [\text{g/cm}^3], n = 3.5)$$

各パラメーターを入れ、計算を行うと、

$$M_{\text{disk}} = 1.8 \times 10^{24} [\text{g}]$$

となる。これは Moritani+ 2011 の等価幅から考えられる A 0535+262 の星周円盤の全質量、

$$M \sim 10^{24} [\text{g}]$$

と近くなったので、確からしいと考えられる。

#### 6. 参考文献

- [1] Reig, P., Ap&SS, 332, 1-29, (2011)
- [2] Silaj, J., et al., ApJS, 187, 228-250, (2010)
- [3] Moritani, Y., et al., PASJ, 1.63, 25-29, (2011)
- [4] Moritani, Y., PhD.thesis, (2012)
- [5] Bondi, H., MNRAS, 112, 195, (1952)