

X 線光度と自転周期変化を用いた連星系中性子星の連星軌道パラメータの解析

Orbital parameters of a neutron-star binary
by X-ray luminosity and change of rotational period○山本 堂之¹, 三原 建弘², 藤井 紫麻見³*Takayuki Yamamoto¹, Tatehiro, Mihara², Shiomi Fujii³

Abstract: A binary X-ray pulsar is a celestial object in which a neutron star and a star make a binary system. A neutron star rotates in tens to hundreds of seconds, and shows the X-ray pulsation with the rotation. A 275.5 sec binary X-ray pulsar, GX 304-1, showed eight outbursts in 2009 to 2012 which were observed with the MAXI. Measurements of the pulse period were carried out by RXTE during three outbursts. We analyze the binary orbital parameters of GX 304-1 using X-ray luminosity observed by MAXI and change of neutron star rotational period by RXTE.

1 研究目的

中性子星と恒星が連星をなす連星系中性子星は、系の年齢や形成環境により多種多様な特徴を持つ。本研究の目的は連星系天体の観測から、連星系の進化の理解を深める事である。本講演では、測定された X 線光度と中性子星の自転周期変化を用いた、連星系中性子星 GX 304-1 の連星軌道パラメータの解析結果を発表する。

2 連星系中性子星とその自転周期変化

2.1 中性子星とその連星系

中性子星とは、太陽より 8 倍以上 30 倍以下の質量の大きい恒星がその一生を終える際に起こす超新星爆発で作られる、中性子の縮退圧で支えられた高密度の天体である。恒星と連星をなす中性子星では、恒星から流れ出したガスが中性子星の重力圏に捉えられ、磁力線に沿って磁極に落ち込む(質量降着)。その際、重力エネルギーを熱エネルギーに変換して X 線領域で輝く。この種の中性子星は数秒～数百秒で自転しており、磁軸と回転軸の不一致により磁極が見え隠れする事で「X 線パルサー」として観測される。

2.2 X 線光度と自転周期変化の関係

中性子星の重力圏に引き込まれた降着物質は角運動量を持つため中性子星に直接的に落下せず、降着円盤を形成する。降着円盤の物質が中性子星に近づくにつれて磁場の圧力のためにせき止められ、それ以降は磁力線に沿った移動しかできなくなる。その時の半径をアルフベン半径 r_A と呼ぶ。また、中性子星の自転する角速度 Ω_s と降着物質がケプラー運動する角速度 Ω_K が等しくなる半径 r_c を共回転半径と呼ぶ。

$r_c > r_A$ の場合、降着物質はアルフベン半径まで近づいた後、磁力線に沿って中性子星の磁極付近へと降着し、X 線を放射する。この場合降着する物質のケプラー運動は高速であり、中性子星は降着物質から角運動量を獲得し、自転は加速される (spin-up)。加速の割合(角加速度)は質量降着率 \dot{M} に比例し、 \dot{M} は X 線輝度 L_x に比例する事から、自転周

期の変化率 \dot{P} と X 線輝度 L_x は自転周期 P_{spin} が一定とみなせる範囲では比例関係にある。双極子磁場を仮定した場合、Ghosh & Lamb (1979) [1] より

$$\dot{P} = \alpha L_x^{\frac{6}{7}} \quad (1)$$

として表される。 α は

$$\alpha = 5.0 \times 10^{-5} N \mu_{30}^{\frac{2}{3}} R_6^{\frac{6}{7}} (M/M_{\odot})^{-\frac{3}{7}} I_{45}^{-1} P_{\text{spin}}^2 \quad (2)$$

である。パラメータはそれぞれ、 N は中性子星のトルク関数、 μ_{30} は磁気双極子モーメント (10^{30} G cm³)、 R_6 は中性子星半径 (10^6 cm)、 M は中性子星質量、 I_{45} は中性子星の慣性モーメント (10^{45} g cm²)、 P_{spin} は中性子星の自転周期 (s) である。

3 測定

3.1 宇宙 X 線測定装置

本研究では 2 つの X 線測定装置を用いた。精度の良い連続的な X 線光度の変化を得るために、国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」船外実験プラットフォーム搭載の全天 X 線監視装置 MAXI を用いた。また、アウトバーストの全期間に渡って精度の良い中性子星のからの X 線パルスを得るために、アメリカの RXTE 衛星を用いた。

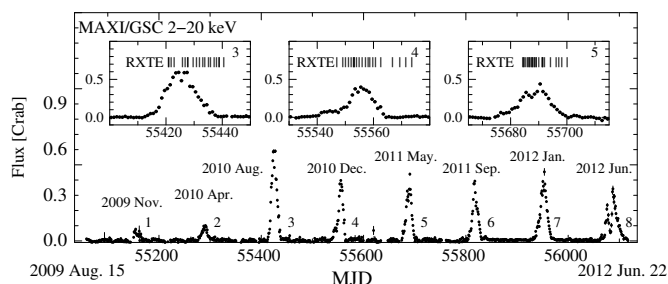


Figure 1: X-ray light curves of GX 304-1 with MAXI and RXTE. The RXTE observations are indicated in the insets.

3.2 測定天体：X 線連星パルサー GX 304-1

GX 304-1 は自転周期 P_{spin} 275.5 秒 [2], 連星周期 P_{orb} 132.5 日 [3] の X 線連星パルサーである. 連星をなす恒星が Be 型星 (赤道周りに星周円盤と呼ばれるガス円盤を形成している恒星) であり, 中性子星が星周円盤を横切るとアウトバーストと呼ばれる X 線の大增光を起こす. 1980 年代以降は X 線が検出されない状態が続いていたが, 2009 年以降再び活発な活動を示している. 過去の研究では連星軌道のパラメータは測定された事が無い. 図 1 は MAXI が測定した GX 304-1 からの X 線光度曲線である. 2012 年 9 月現在までに 8 回の X 線アウトバーストを観測している. そのうち 3, 4, 5 番目のアウトバーストにおいて, RXTE 衛星による X 線パルス測定が行われた (図 1). 合計 40 点の測定点を得, 測定された P_{spin} は図 3 (a) に示した.

4 解析・結果

まず [3] より, 1972 年に観測されたアウトバーストのピーク時刻を用い, 連星周期 P_{orb} の改正を行った. アウトバーストは連星周期毎に起こるため, [3] のピーク時刻と MAXI が観測したアウトバーストのピーク時刻の差 T を P_{orb} で割ると, 間に入る連星周期回数が整数 N で求まる ($N = T/P_{\text{orb}}$). 更に, T を N で割ると N 回目のアウトバーストまでの精度の良い $P_{\text{orb}N}$ が求まる ($P_{\text{orb}N} = T/N$). 最適な P_{orb} を求めたところ, 132.190 ± 0.014 日となった (図 2).

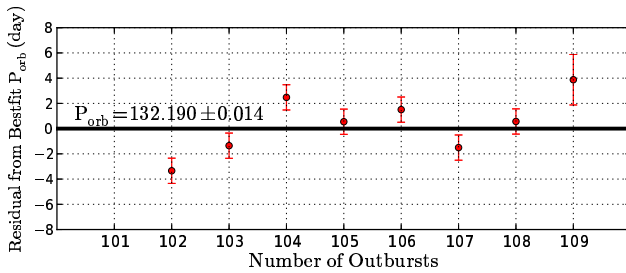


Figure 2: Determined new orbital period.

次に, 求めた P_{orb} と式 (1) を用いて連星軌道パラメータの解析を行った. 測定した P_{spin} には, 2.2 で述べた質量降着による spin-up と, 連星軌道運動による視線速度のドップラー効果による見かけ上の spin-up の 2 種類の要素が混ざり合っている. それらを切り分けるために, 以下の作業を行った.

(i) アウトバーストの全期間に渡って, MAXI の測定エネルギー範囲における GX 304-1 のスペクトル形状の大きな変化は無い. それを基に, GX 304-1 までの距離 2.4 kpc [4] を仮定して, X 線光度曲線を L_x 曲線に変換した (図 3 (b)). 変換した L_x 曲線と式 (1) より, 「 L_x から予想される理論的 P_{spin} 」となる P_{theory} を求めた (図 3 (c) 青点).

(ii) 同じ連星軌道位相においては視線速度のドップラー効果は等しい. それを基に, 3 回目のアウトバーストピーク

を原点 t_3 における自転周期 P_3 と, それぞれ P_{orb} 後の t_4 , t_5 における自転周期 P_4 , P_5 の差 P_{3-4} , P_{3-5} だけ, 測定した P_{orb} を shift-up させ P_{shift} とした (図 3 (c) 赤点).

(iii) $P_{\text{shift}} - P_{\text{theory}}$ の残差が視線速度のドップラー効果による見かけ上の spin-up である. 視線速度の変化 Z は

$$Z(t) = a_x \sin i \{ \sin \omega (\cos u - e) + (1 - e^2)^{\frac{1}{2}} \cos \omega \sin u \} \quad (3)$$

である. $a_x \sin i$ は投影短半径, i は軌道傾斜角, ω は近星点見込み角, e は離心率, u は離心近点角である. u はケプラー方程式より,

$$u - e \sin u = \frac{2\pi}{P_{\text{orb}}} (t - t_{\text{per}}) \quad (4)$$

であり, t_{per} は近星点通過時刻である.

(iv) α , P_{orb} , t_{per} , e , ω , $a_x \sin i$ をフリーパラメータにし, 式 (3), (4) を用いて残差に対してフィッティングを行った (図 3 (d)). 最適パラメータは表 1 に示した.

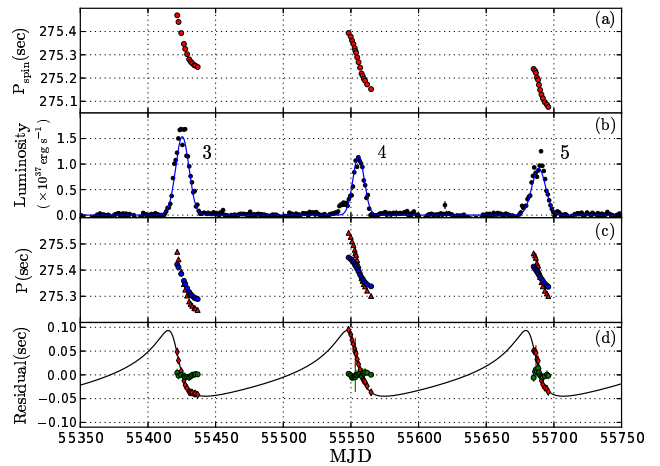


Figure 3: (a) Observed pulse periods, (b) Luminosity light curve, (c) P_{theory} and P_{shift} , (d) Residuals of $P_{\text{shift}} - P_{\text{theory}}$ and orbital doppler curve.

Table 1: Binary orbital parameter of GX 304-1

Parameter	Value
$\alpha (\times 10^{-3})$	9.28 ± 0.54
$P_{\text{orb}}(\text{days})$	132.190 ± 0.014
$t_{\text{per}}(\text{MJD})$	55419.81 ± 0.45
e	0.566 ± 0.029
$\omega(\text{deg})$	51.9 ± 2.2
$a_x \sin i(\text{lt-s})$	376.2 ± 29.2

参考文献

- [1] Ghosh, P., & Lamb, F. K., 1979, APJ, 234, 296
- [2] Yamamoto, T., et al. 2011, PASJ, 63, 751
- [3] Priedhorsky, W. C., Terrell, J., 1983, ApJ, 273, 709
- [4] Parkes, G. E., et al., 1980, MNRAS, 190, 537