

降着トルクモデルの X 線連星パルサー 4U 1626-67 への適用

Application of the accretion torque model to the X-ray binary pulsar 4U1626-67.

○高木 利紘¹, 三原 建弘², 杉崎 睦², 牧島 一夫², 森井 幹雄³, 藤井 紫麻見⁴*Takagi Toshihiro¹, Tatehiro Mihara², Mutsumi Sugizaki², Kazuo Makishima², Mikio Morii³, Shiomi Fujii⁴

Abstract: We applied the theoretical model proposed by Ghosh & Lamb (1979), describing between the pulse-period derivative and the X-ray luminosity in binary X-ray pulsars, to the observed values by the MAXI and past observations. We confirmed that the Ghosh & Lamb model successfully explained the relation. By using the observed data and the Ghosh & Lamb model, we tried to estimate the mass and radius of the neutron star in 4U 1626-67, because the model depends on these parameters. We found that mass and radius were 1.32-1.39 solar mass and 11.6-11.7 km, respectively, for the assumed source distance of 8 kpc. However, these results do not include systematic uncertainties and need to be studied further theoretically.

1 はじめに

1.1 降着トルクモデル

Ghosh & Lamb (1979) は, X 線連星パルサーのパルス周期の変化率 \dot{P} と天体の光度 L_X の関係式 (GL 式) を導いている. 主なパラメータはパルス周期 P , 中性子星の質量 M , 半径 R と磁場強度 B で,

$$\dot{P} = -5.0 \times 10^{-5} \mu_{30}^{\frac{2}{7}} n(\omega_s) S_1(M) P^2 L_{37}^{\frac{6}{7}} \text{ s yr}^{-1},$$

となる. ここで, μ_{30} は 10^{30} G cm^3 単位の磁気双極子モーメント μ , $n(\omega_s)$ は中性子星と降着するガスの角運動量の比 ω_s の関数 (正負の両方を取り得る), $S_1(M)$ は M , R と中性子星の慣性モーメント I の関数, L_{37} は $10^{37} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 単位の L_X である.

1.2 X 線連星パルサー

X 線連星は, 中性子星などの高密度天体と恒星の連星系であり, 恒星のガスが高密度天体に降着することで X 線を放射する. 高密度天体が磁場強度の強い (10^{12} G) 中性子星だと, ガスは中性子星の磁極に降着し, X 線を放射している磁極付近が回転で見え隠れすることで, X 線パルスを示す X 線連星パルサーとして観測される. 降着するガスの角運動量が中性子星に伝わると P が短くなり (Spin-up), ガスを吹き飛ばすことなどで角運動量を失うと P が長くなる (Spin-down).

1.3 4U 1626-67

4U 1626-67 は 7.6 秒の P を持つ X 線連星パルサーで, P が短くなる Spin-up 期間と, 長くなる Spin-down 期間がある [2]. 現在は Spin-up 期間である [11]. 天体までの距離 D は 5-13 kpc と推定され [4], B は X 線のエネルギースペクトル中のサイクロトロン共鳴構造から $B = 3.2 \times 10^{12} (1 + z_g) \text{ G}$ と求められている (z_g は重力赤方偏移)[8]. Figure 1 に 4U 1626-67 の X 線強度, P と \dot{P} の経年変化を示す.

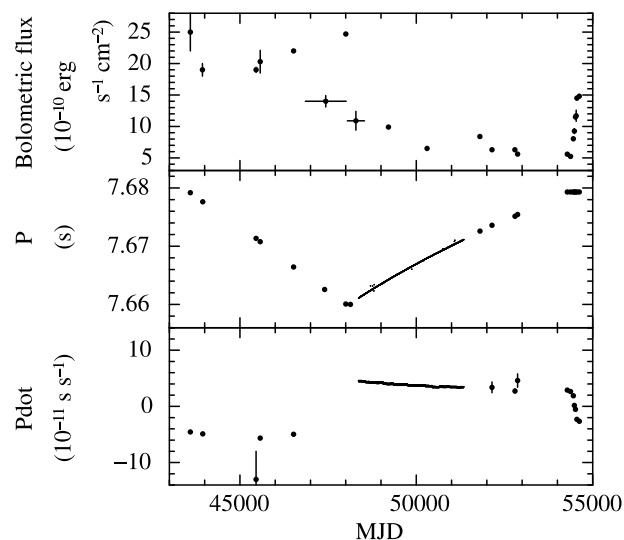


Figure 1: Bolometric flux (top), period (middle) and period derivative (bottom) of 4U1626 - 67 obtained by past X-ray observations [11].

1.4 全天 X 線監視装置 MAXI

全天 X 線監視装置 MAXI は, 2009 年に国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された全天サーベイ型の X 線監視装置で, ISS の軌道周期 92 分で地球を一周し, 全天を 1 回スキャンする. 常に全天を監視しているため, 突発天体の発見や長期変動の観測などに適している.

1.5 目的

GL 式は M と R をパラメータとして含んでいるので, 観測により \dot{P} と L_X の関係を求めると M と R が推定できる. 観測により M と R を決めると, 盛んに研究が行われている中性子星の状態方程式 (EoS) に制限を与えられる. そこで, 過去の観測や MAXI で求めた \dot{P} と L_X の関係, GL 式を元に, 4U 1626-67 の M と R の推定を試みた.

2 降着トルクモデルのデータへの適用

2.1 Ghosh & Lamb model の適用

Ghosh & Lamb model の適用にあたり, L_X は, 典型的な X 線スペクトル [3] を用いて X 線強度をすべての X 線帯域 (0.5-100 keV) の強度 F_{bol} に変換し, 等方放射として,

$$L_X = 4\pi D^2 F_{\text{bol}},$$

より, また, I は Lattimer & Schutz (2005) で導かれている近似式で計算した.

M (1.0 - 2.4 M_\odot), R (8.5 - 15.5 km), D (3 - 20 kpc) を変化させ, 観測データにもっともよく合う GL 式のモデルを求めた. 8 kpc の場合, M と R はそれぞれ 1.34 M_\odot と 11.6 km となる. Figure 2 に, もっともよく合うモデル, また, M と R を少し変えたときのモデルを示す ($M: \pm 0.3M_\odot$, $R: \pm 1$ km). \dot{P} の値がゼロになる点は角運動量の受け渡しがなくなることを意味し, μ と質量降着率 \dot{M} で決まるので, B と \dot{M} を観測から求めると R が推定できる. また, 傾きは中性子星の回りやすさ, つまり, I が関わるため, これより M が求まる. GL 式から求めたモデルは観測データを良く再現し, わずかでも M と R が変化すると観測データからモデルがずれる. このことから, GL 式を用いて M と R が精度よく推定できることがわかった.

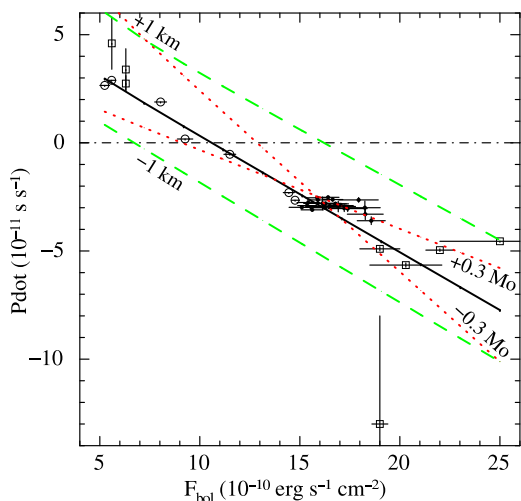


Figure 2: The scatter plot of F_{bol} and \dot{P} . The solid line is the best-fit model with $M = 1.34M_\odot$, $R = 11.6$ km and an assumed distance of 8 kpc.

2.2 中性子星の重力による相対論効果の補正

より正確な M と R の推定のため, 中性子星の重力による相対論効果の補正を行っている. 相対論効果の補正が必要となるパラメータは μ と L_X で,

$$\mu = \frac{BR^3 X^3}{2 \cdot 3} \left[-\ln(1-X) - X - \frac{X^2}{2} \right]^{-1},$$

$$L_X = c^2 \dot{M} \left[1 - (1-X)^{-\frac{1}{2}} \right], \quad X = \frac{2GM}{Rc^2},$$

の式を用いて計算した [12]. ここで, G は重力定数, c は光速である.

3 中性子星の質量と半径

GL 式に含まれる不定性まで考慮して M と R を求めるために, $A = 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5$ という定数を GL 式に掛けて同様の解析を行った. Figure 3 に, それぞれの場合における M と R の値と $A = 1.0$ の場合における 68% エラーの範囲を示す. 8 kpc においてエラー含めた M と R の範囲はそれぞれ 1.32-1.39 M_\odot と 11.6-11.7 km となる. 距離に大きな誤差があるため, 求めた範囲は EoS に制限を与えられるほど精度はよくないが, もし, 何らかの方法で距離を精度よく求めることができれば, EoS に制限を付けられるかもしれない. この方法では, 距離が決まると R に対して特に感度が良い.

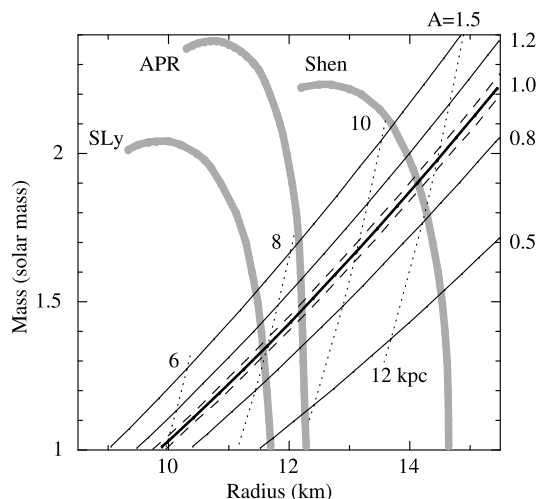


Figure 3: The obtained M and R relation in 4U 1626-67. The dotted lines indicate the source distance of 4U 1626-67. The gray solid lines are M and R relations given by three theoretical EOSs [1, 5, 9, 10].

4 参考文献

- [1] Akmal et al., Phys. Rev. C, 58, 1804 (1998)
- [2] Camero-Arranz et al., ApJ, 708, 1500-1506 (2010)
- [3] Camero-Arranz et al., A&A, 546, A40 (2012)
- [4] Chakrabarty, ApJ, 492, 342 (1998)
- [5] Douchin & Haensel, A&A, 380, 151 (2001)
- [6] Ghosh & Lamb., ApJ, 234, 296 (1979)
- [7] Lattimer & Schutz, ApJ, 629, 979 (2005)
- [8] Orlandini et al., ApJ, 500, L163 (1998)
- [9] Shen et al., Nuclear Physics A, 637, 435 (1998)
- [10] Shen et al., Prog. of Theor. Phys., 100, 1013 (1998)
- [11] Takagi et al., PASJ, 68, S13 (2016)
- [12] Wasserman & Shapiro, ApJ, 265, 1036 (1983)