

降着トルクモデルを使った中性子星の 質量・半径・磁場強度の推定

谷田部 史 堯

〈理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

〈立教大学大学院 理学研究科 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1〉

e-mail: 17la015w@rikkyo.ac.jp



中性子星の質量・半径・磁場強度の測定は、核物質の状態方程式への制限や中性子星の進化を考えるうえで重要である。われわれはMAXIによる長期連続観測のデータを用いて、2つのX線連星パルサー、4U 1626-67とX PerseiのX線光度と自転周期変化率を調べた。その結果にGhosh & Lambの降着トルクモデルを適用し、中性子星の質量・半径・磁場に同時に制限をつけることができた。X Perseiでは重めの質量と 10^{13} - 10^{14} G (ガウス)の強磁場が示された。これはX線連星中で見つかった初めてのマグネター級の強磁場中性子星である。本方法はこれらの量を決定できる、古典的ではあるが最近適用可能になった、新しい方法である。

1. X線連星パルサー

中性子星の内部は地上では実現できない高密度になっており、そこでの核物質の状態方程式(EoS)は物理学における未解決の課題である。EoSを制限するための観測的なパラメーターは中性子星の質量 M と半径 R である。質量は主に連星系の軌道運動から、半径は主に中性子星表面で起こるX線バーストのスペクトルから測定されてきたが、まだEoSを制限するには至っていない。また、同じ天体で質量と半径が同時に測定された例もない。

質量および半径と独立に観測できる磁極の表面磁場強度 B も、中性子星の起源や進化と関係のある重要な量である。X線連星パルサー(周期的なX線パルスを示す中性子星)における磁場推定には、エネルギースペクトルに現れるサイクロトロン共鳴散乱構造(CRSF)が利用されている。CRSFエネルギーは磁場強度と比例関係にあり、現在の観測ではCRSFは10-80 keV、磁場強度で

は $(2-9) \times 10^{12}$ G (ガウス)¹⁾に分布している。100 keV ($\sim 10^{13}$ G)以上のCRSFは、X線の強度不足により探査の感度が低く、発見されていない。

2. 降着トルクモデル

そこで、われわれは質量・半径・磁場強度を測定する別の方法として、降着トルクモデルに注目した。これは、中性子星と恒星の連星系において、恒星ガスの降着トルク T による、中性子星の自転角速度 ω の変化率 $\dot{\omega}$ を表す式である。基本的には中性子星の慣性モーメントを I として、 $I\dot{\omega} = T$ である。 T はガスの降着率 \dot{M} に比例し、 \dot{M} は光度 L から推定できる。 I を移項し、 ω の代わりに自転周期 P を使い、トルク受け渡しの半径(アルフヴェン半径)が \dot{M} に依存することに留意すると、次の関係式が導かれる。

$$-\frac{\dot{P}}{P^2} = (M, R, B \text{ を含む数}) \times \mu^{\frac{2}{7}} I^{-1} L^{\frac{6}{7}} \quad (1)$$

μ はパルサーの磁気モーメントである。右辺が $\mu^{(2/7)}$ に比例しているのは、同じ L でも μ が大きい

と遠方で角運動量を渡すことになり、大きな T を中性子星に与えるからである。

実際には中性子星は回転しているので、加速に働くトルクは、アルフヴェン半径における降着ガスのケプラー回転の角速度 ω_{Kep} から自転角速度 ω を引いた分になる。式(1)の定数部分に $(\omega_{\text{Kep}} - \omega)$ が入るわけである。ここで両者の比を $\omega_s = \omega / \omega_{\text{Kep}}$ と定義する。 ω_s はパルサーの回転度合いを表す無次元量で、fastness パラメータと呼ばれる。 ω_s は無次元量なのに、角運動量 ω と同じ文字を使っているのが混乱の元なのだが、ご容赦いただきたい。単純には ω_s は 0 (中性子星は静止) から 1 (これ以上加速できない) の間の値をとり、式(1)の定数部分に $\omega_{\text{Kep}}(1 - \omega_s)$ として入ることになる。

Ghosh と Lamb は磁場の変形などを考慮した降着トルク伝達モデルを考えて光度とトルクの間を導き、式(1)を定式化した(以下 GL79)²⁾。それによると式(1)の $(M, R, B$ を含む数)は、 $\omega_s = 1$ ではなく $\omega_s = 0.34$ を境に正 (スピナップ) から負 (スピンドウン) に変わる。さらに M, R, B を含んでいるので、観測から \dot{P} - L 関係を測定すれば、各パラメータを推定できるわけである。

われわれは MAXI などから得られた長期連続観測データを用い、2つの X 線連星パルサー、4U 1626-67 と X Persei の \dot{P} と L を詳細に追った。両パルサーは歴史的にスピナップ期とスピンドウン期を示しており、GL79の検証に適した天体である。その結果に GL79 を適用し、中性子星のパラメータ (M, R, B) を推定した。一方で杉崎氏の記事³⁾にあるように、MAXI を用いた 12 個の Be 型 X 線連星パルサーのアウトバースト時の挙動からは、 ω_s が小さいスピナップ領域では、GL79 理論式(1)はファクター 3 倍以内で正しいことが定量的に示されている。

3. 4U 1626-67 への適用^{4,5)}

4U 1626-67 (みなみのさんかく座 KZ 星) は自転周期 7.6 秒⁶⁾ の X 線パルサーと 0.06 M_{\odot} 以下

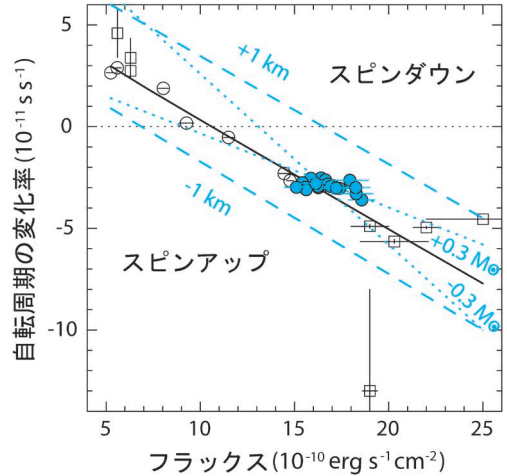


図1 4U 1626-67 の、 F_{bol} と \dot{P} の関係⁴⁾。青丸は MAXI/GSC、白丸は Swift/BAT のデータ、白四角は文献値である。実線はベストフィットな GL79 で、2本の破線と点線はそこから半径だけ、あるいは質量だけ変えたものである。杉崎氏の記事の図2とはほぼ同じものだが、縦軸に ν ではなく \dot{P} をとり、4U 1626-67 の \dot{P} は正と負の両方をとるため、ログ表示ではなく、リニア表示にしている点異なる。本図は Takagi et al. (2016)⁵⁾ が初出だが、理論曲線を書くにあたり μ や L の一般相対論的補正¹⁰⁾ を加えた Takagi (2017)⁴⁾ から引用した。

の低質量星⁷⁾の連星系である。磁場強度は CRSF から 3.2×10^{12} G⁸⁾ と測定されている。対して天体までの距離は 5-13 kpc⁹⁾ と精度はよくない。

MAXI/GSC を用いて、2009 年 10 月から 2013 年 9 月までの自転周期 P とフラックス F_{bol} を詳細に追ったところ、図1に示すように、 P の時間変化率 \dot{P} は F_{bol} と良い負の相関を示した⁴⁾。図1の実線はベストフィットな GL79 (1.34 M_{\odot} , 11.6 km, 8 kpc) であり、MAXI と Swift/BAT と文献値を合わせたデータをよく再現していることが分かる。2本の破線と点線は実線のパラメータから半径だけ、あるいは質量だけ変えたもので、半径と質量をわずかに動かすだけでも GL79 の予測は大きく変わることが分かる。そのため、仮に距離を 8 kpc に固定すると、これらは $1.34 \pm 0.02 M_{\odot}$,

11.59±0.03 km と精度よく求められる。

\dot{P} が 0 になる点は GL79 では $\omega_s = 0.34$ であることから、 $P \propto L^{-(3/7)} \mu^{(6/7)}$ が導かれる。つまり X 軸との交点からは $\mu (= (1/2)BR^3)$ が決まる。今回は CRSF から B が既知であるため、 B を代入してこれより R を算出できた。また、GL79 の傾きは中性子星の回転の変化のしやすさである $I (\propto MR^2)$ を表すため、求めた R を使って M を算出できる。現在のところ距離の不定性が 5-13 kpc と大きいので、意味のある制限を与えるには至っていないが、今後の位置天文などの観測で距離が精度良く求まれば、 M と R の両方に同時に強い制限を与えるであろう。特に R については、式(1)の GL79 にファクター 3 倍の不定性³⁾があったとしても、 \dot{P} が 0 になる点は変わらないため、精度よく求められることが判明した。

4. X Persei への適用¹⁰⁾

X Persei (ペルセウス座 X 星) は自転周期 835 秒¹¹⁾ の X 線パルサーと Be 星との連星系である。距離は GAIA 衛星によって 0.81±0.04 kpc¹²⁾ と精度よく求められている。X 線スペクトルの ~30 keV に浅く広いへこみ構造が見られ、これを CRSF とみなせば磁場強度は 2.5×10^{12} G¹³⁾ となる。

もしパルサーがトルク平衡 ($\dot{P}=0$) にあれば、前節のように $\mu \propto P^{(7/6)} L^{(1/2)}$ であるから、 P の遅いものほど磁場が強いことになる。X Persei では ~ 10^{14} G と算出される。確かに ~30 keV の構造は CRSF 以外の連続成分モデルでも表現でき、さらにスペクトルが通常の X 線パルサーのものより高エネルギーまで伸びていることから、実際は $B \sim 10^{13}$ G 以上ではないかとの示唆もある¹⁴⁾。

RXTE 衛星 / ASM 装置と MAXI / GSC を用いて 1996 年 1 月から 2017 年 9 月までの X Persei の自転周期 P とフラックス F_{bol} を詳細に追ったところ、図 2 に示すように、自転周期の変化率 \dot{P} と F_{bol} には 4U 1626-67 と同様に、良い逆相関がみられた¹⁰⁾。図 2 の実線は、ベストフィットを与える GL79 の

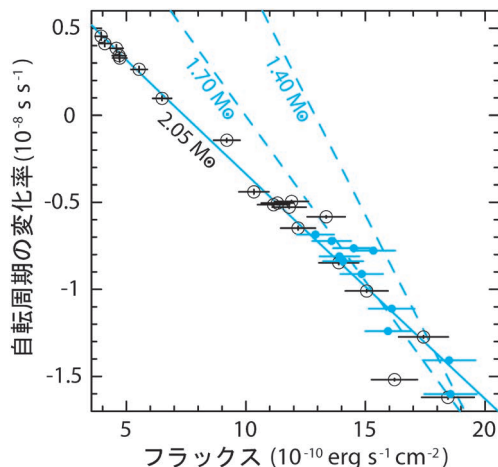


図 2. X Persei についての、図 1 と同様な関係¹⁰⁾。青丸は MAXI / GSC、白丸は RXTE / ASM のデータである。実線はベストフィットの GL79 で、2 つの破線は、そこから質量だけを変えたものである。

パラメーター例 ($2.05 M_{\odot}$, 12.9 km, 8×10^{13} G, 0.81 kpc) である。他の 2 つの破線はそこから質量だけを変えたものである。グラフの傾きから、やや大きめの質量が示唆される。実際、距離の精度がよいため、質量は $1.86\text{--}2.20 M_{\odot}$ の範囲に制限された。この値は、標準的な中性子星の質量 $1.4 M_{\odot}$ よりも有意に大きい。

中性子星の半径の範囲として 9.5-15 km を仮定すると、 $\dot{P}=0$ との交点から μ が決まっているので、磁場強度は $(5\text{--}23) \times 10^{13}$ G に制限された。GL79 式(1) のファクター 3 倍の不定性を考慮すると、質量の下限値は ~ $1.4 M_{\odot}$ になるが、 μ は $\dot{P}=0$ の点で決まっているのでほとんど影響を受けず、磁場強度の範囲は依然として $(4\text{--}25) \times 10^{13}$ G となる。このように X Persei の磁場は通常の X 線連星パルサーよりも 1-2 桁大きいことが高い信頼度で判明した。

これはマグネター級の磁場をもつ中性子星を X 線連星中で発見した最初の例であり、マグネターの生成機構の解明に大きな情報となる。磁場が大きいと考えると、従来から謎であった、長い自転

周期, 低い X 線光度, 硬いスペクトルが自然に説明できる¹⁴⁾. つまり, 強磁場でトルク平衡にあるので自転周期は長く, トルク平衡ではプロペラ効果のため降着率が減るので暗くなる. X 線連星パルサーの X 線スペクトルの高エネルギー側の落ちを CRSF によるためと解釈すれば, CRSF が高いエネルギーにあるため高エネルギーまで共鳴散乱されず, 連続スペクトルが伸びる. この視点は, 長周期パルサーである 4U 0114+65 (9760 秒), 4U 2206+54 (5420 秒), 4U 1954+31 (19000 秒) などにも適用できるかもしれない. また, 強い磁場強度と大きめの質量が同時に得られたことは, 「マグネター級の磁場を持つ中性子星は質量が大きい」という可能性を示唆している.

参考文献

- 1) Yamamoto, T., et al., 2014, PASJ, 66, 59
- 2) Ghosh, P., & Lamb, F. K., 1979, ApJ, 234, 296
- 3) Sugizaki, M., et al., 2017, PASJ, 69, 100
- 4) Takagi, T., 2017, PhD thesis, Nihon univ.
- 5) Takagi, T., et al., 2016, PASJ, 68, S13
- 6) Rappaport, S., et al., 1977, ApJ, 217, L29
- 7) Levine, A., et al., 1988, ApJ, 327, 732
- 8) Orlandini, M., et al., 1998, ApJ, 500, L163
- 9) Chakrabarty, D., 1998, ApJ, 492, 342
- 10) Yatabe, F., et al., 2018, PASJ, 70, 89
- 11) White, N. E., et al., 1976, MNRAS, 176, 201
- 12) <https://gea.esac.esa.int/archive/>
- 13) Coburn, W., et al., 2001, ApJ, 552, 738
- 14) Sasano, M., 2015, PhD thesis, Tokyo univ.

Mass, radius and magnetic field of neutron stars estimated by accretion torque model

Fumiaki YATABE

*High Energy Astrophysics Laboratory, RIKEN,
Wako, Saitama 351-0198, Japan*

College of Science, Rikkyo University, Nishi-Ikebukuro, Toshima, Tokyo 171-8501, Japan

Abstract: Measurement of the mass, radius and magnetic field of neutron stars is essential to restrict the equation of state and the evolution of neutron stars. We investigated the luminosity and pulse period derivative of two X-ray binary pulsars 4U 1626–67 and X Persei using long-term observation with MAXI. We applied the accretion torque model by Ghosh & Lamb, and estimated the mass, radius and magnetic field of the two neutron stars. For X Persei, a heavy mass and a strong (10^{13} – 10^{14} G) magnetic field were suggested. This is the first neutron star in X-ray binaries which has as strong magnetic field as magnetars. Our method using accretion torque model is classical but new to estimate those values of neutron stars.