

論文の内容の要旨

氏名：高木利紘

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：Application of accretion torque models to the binary X-ray pulsars 4U 1626-67 and X Persei
(X線連星パルサー4U 1626-67 とペルセウス座 X への降着トルクモデルの適用)

1. はじめに

1932 年の中性子の発見後、中性子星という天体の概念が提案され、1967 年に電波観測で存在が確認された。電波や X 線の観測で、我々の銀河系などを中心に 2000 個程度見つかっている。中性子星は中性子の縮退圧で支えられた天体で、内部は非常に高密度となる。従って、中性子星は超高密度における物質の極限状態を探る自然の実験室であり、その性質が解れば原子核物理の理解が大きく進む。

中性子星の構造を計算するためには中性子の圧力と密度の関係式である状態方程式が必要で、理論的に数多く提案されているが、現在のところ真の状態方程式はわかっていない。観測で中性子星の質量と半径が精度よく決まると状態方程式に制限が付けられるので、様々な手法で推定が試みられている。質量は主に連星系の軌道運動から、半径は中性子星表面で起きる核爆発（I 型 X 線バースト）から求められている。しかし、得られた値の精度や例数が真の状態方程式を選ぶのに十分ではないため、精度よく質量と半径を決められる新たな方法の確立が求められる。

中性子星のもう一つの重要な物理量として、表面磁場強度がある。単独の中性子星の場合、磁気双極子放射を仮定すると、自転周期の変化から磁場強度を推定でき、 10^{8-15} G 程度と求められている。最近、マグネターと呼ばれる超強磁場 (10^{14-15} G) を持つ天体が観測されている。強い磁場強度を持つ中性子星と恒星の連星系である X 線連星パルサーでは、周期は伴星からのガス（プラズマ）降着による角運動量の輸送で変化するので、上記の方法で磁場強度を推定することができない。この様な天体では、中性子星から放射されている X 線のエネルギースペクトル中に現れる、サイクロトロン共鳴散乱構造を用いて磁場強度が推定される。構造が現れるエネルギーと磁場強度には比例関係があり、マグネターと同程度の磁場強度の場合には 1~10 MeV の高エネルギー帯に構造ができる。しかし、この帯域の X 線強度は弱いので、サイクロトロン共鳴散乱構造の検出が実質的に不可能で、超強磁場を持つ X 線連星パルサーの中性子星が存在するかどうかはよくわかっていない。

X 線連星パルサー系では、伴星からのガスが中性子星に降着する際にガスの重力エネルギーが解放されて熱くなり、X 線を放射する。中性子星の近傍ではガスは中性子星の磁力線に沿って降着し、X 線は磁極付近から放射される。中性子星の自転により磁極が見え隠れすることでパルスが観測される。ガス降着の際に角運動量が受け渡されるので、ガスの降着量、つまり、中性子星の光度と周期の変化率には相関がある。この相関は、観測や、降着トルクモデルを用いて理論的に説明され、関係を表す式がいくつも提案されている。式には質量と半径、磁場強度が含まれるので、観測で相関関係が決まると、それらの値が推定できる。

全天 X 線監視装置 MAXI は国際宇宙ステーションに搭載された、現在唯一の全天観測型の X 線観測装置である。2009 年 8 月の観測開始から 92 分ごとに全天を観測しているので、天体の長期変動を調べることができる。また、MAXI の主検出器である Gas Slit Camera は X 線連星パルサーの主なエネルギー放射帯域の X 線を観測しているので、X 線強度、自転周期とその変化率の長期観測に最適である。

本研究では、MAXI の観測データから二つの X 線連星パルサー 4U 1626-67 とペルセウス座 X の X 線強度、自転周期とその変化率を求めた。さらに、MAXI と過去のデータを合わせたものに降着トルクモデル、ここでは Ghosh & Lamb (1979) の関係式を適用し、4U 1626-67 では質量と半径を、ペルセウス座 X では磁場強度の推定を行った。

2. 解析対象の天体

4U 1626-67 は自転周期が約 7.6 秒の中性子星を持ち、数十年にわたる観測で周期が長くなる期間と短くなる期間の両方を示すことが知られている。このため、ガス降着率と自転周期の変化が平衡状態に

近いと考えられている。連星の軌道運動のドップラー効果によるパルス周期の変化が観測されていないので、伴星の質量は太陽の 0.06 倍以下と推定されている (Levine et al. 1988)。天体までの距離は、5-13 kpc と誤差が大きい (Chakrabarty 1998)。サイクロトロン共鳴散乱構造から、磁場強度は 3.2×10^{12} G と推定されている (Orlandini et al. 1998)。磁場強度が既知で、X 線強度と周期の長期観測があるので、本研究を行うのに適している。

ペルセウス座 X は 835 秒の周期を持ち、長期の観測で 4U 1626-67 と同様に周期が短くなる期間と長くなる期間があることが知られている。伴星は Be 型星で、天体までの距離は 0.7-1.3 kpc と比較的精度よく求められている (Lutovinov et al. 2012)。磁場強度は、エネルギー Spektrum 中の幅の広いへこみ構造をサイクロトロン共鳴散乱構造と仮定して 2.6×10^{12} G と推定 (Lutovinov et al. 2012) されているが、 10^{13} G 以上ではないかとの示唆もある (Sasano 2015)。磁場強度は不明瞭だが、X 線強度と周期が長期にわたって測られているので本研究に適している。

3. データ解析

本研究の時系列解析では、光度曲線 (X 線強度の時間変化を示す) のたたみ込み解析という手法で 4U 1626-67 とペルセウス座 X の自転周期とその変化率を求めた。正確な値を求めるために、天体の連星運動と地球の公転運動で生じる観測時刻のずれを共に補正した。補正をしないと、周期の 10^{-4} 倍程度のずれが生じる。

4U 1626-67 では、光子統計が十分になるように 2009 年 10 月から 2013 年 9 月までを 60 日ごとに区切って解析した。X 線強度は、エネルギー Spektrum を X 線連星パルサーの典型的なモデルで表して計算した。自転周期とその変化率をたたみ込み解析で求めたところ、周期は他の観測装置で求められている値と一致した。この期間では、周期はだんだん短くなっていった。また、X 線強度が強くなるにしたがって周期の変化率の絶対値も増加する傾向が見えた。

ペルセウス座 X では、2009 年 10 月から 2016 年 6 月までを 250 日ごとに区切って解析し、4U 1626-67 と同様にして、X 線強度と自転周期を求めた。周期の変化率は、隣り合う二点の周期の差から求めた。この天体でも、X 線強度と周期の変化率に相関がみられた。

降着トルクモデルを適用する際に必要になる天体の光度を正確に計算するため、広帯域のエネルギー Spektrum が得られている先行観測を用いて、観測された X 線強度を全エネルギー帯域での強度に変換した。

4. 降着トルクモデルの適用

Ghosh & Lamb (1979) で提案された天体の光度と周期の変化率の関係式を、4U 1626-67 とペルセウス座 X の MAXI と過去の観測を合わせたデータに適用した。正確な値を導くため、中性子星の慣性モーメントは Lattimer & Schutz (2005) で導かれている近似式を用い、中性子星の磁気双極子モーメントと光度は Wasserman & Shapiro (1983) で示されている一般相対論効果を含めた式で計算した。

4U 1626-67 では、X 線強度と周期の変化率により相関がみられた。このデータに關係式を適用したところ、理論曲線はデータをよく再現した。天体までの距離に大きな誤差があるので、距離は仮定した。距離を 8 kpc としたとき、質量は 1.34 ± 0.02 太陽質量、半径は 11.59 ± 0.03 km と精度よく求められる。周期の変化率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、ガス降着率、つまり、天体の光度と磁気双極子モーメントで決まる。それに磁場強度を代入すると、半径が推定できる。また、理論曲線の傾きは中性子星の回りやすさ、つまり、慣性モーメントによるので、先に求めた半径を代入すると質量が求められる。質量と半径をわずかも変えると理論曲線は大きく変化するため、精度よく質量と半径が決まる。現状では、天体までの距離の誤差が大きいため、質量と半径には大きな誤差があるが、もし、距離が何らかの方法で推定できれば、精度よく質量と半径の両方を求められることがわかった。また、關係式に含まれる不定性を考慮した質量と半径の推定も行い、不定性を含んでも天体までの距離が決まれば、特に半径が精度よく求められることがわかった。

ペルセウス座 X では、多少ばらつきはあるが、X 線強度と周期の変化率に相関が見られた。Lutovinov et al. (2012) で推定された値を磁場強度と仮定して關係式を適用したところ、理論曲線はデータから大きくずれた。磁場強度を変化させて同様の解析を行ったところ、磁場強度が $(4-20) \times 10^{13}$ G の範囲であればデータによく合致することがわかった。これより、ペルセウス座 X の磁場強度は 10^{13} G 以上で

ある可能性が高いとわかった。

4. まとめ

MAXI の観測データから二つの X 線連星パルサー 4U 1626-67 とペルセウス座 X の中性子星の X 線強度、自転周期とその変化率を求めた。さらに、過去の観測データを追加して Ghosh & Lamb (1979) で提案された関係式を適用し、4U 1626-67 では中性子星の質量と半径を、ペルセウス座 X では磁場強度の推定を行った。4U 1626-67 では関係式の不定性を含めても天体までの距離が決まれば質量と精度のよい半径を求められることが、ペルセウス座 X では磁場強度が 10^{13} G 以上の可能性があることがわかった。