

論文審査の結果の要旨

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)

審査委員：（主査） 教授 藤井紫麻見

（副査） 教授 岩本弘一 教授 根来均

理化学研究所専任研究員 三原建弘

パルサーとは秒程度の規則的な周期でパルス状の放射を出す天体で、質量が太陽程度、半径が 10 km 程度の中性子星が高速で自転している。1967 年にケンブリッジ大学のヒューイッシュとベルの電波観測により発見され、中性子星実在の証拠となった。中性子星は、大質量の恒星が超新星爆発する際に、恒星中心核の重力崩壊によって形成される。恒星中心核の半径は数千 km なので、重力崩壊で角運動量や磁束が保存されると、中性子星は非常に速い自転速度と強い磁場を持つ。その回転エネルギーを少しずつ失いながら、磁場の極方向に強い放射ビームを出し、自転軸と磁軸とのずれによりパルス状の放射を出し、パルサーとして観測されると考えられている。

1971 年には X 線放射強度が規則的に変動する“X 線パルサー”が初の X 線天文衛星ウフルにより発見された。それまで研究されていたパルサーが回転エネルギーを放射エネルギーに変えているのに対して、X 線パルサーは中性子星と恒星の連星系で、恒星の表面ガスが中性子星に落ち込むことで、その物質の重力エネルギーを放射エネルギーに変えていることがわかってきた。このような X 線パルサーを特に“X 線連星パルサー”と呼ぶ。

本論文では、X 線連星パルサーである 4U 1626-67 およびペルセウス座 X について、全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) による観測データを用いて、中性子星の自転周期の変化や表面磁場強度を求めた。4U 1626-67 について質量や半径を初めて精度よく決定したことは大きな成果であり、高密度下の中性子の状態方程式に制限を与え得る。この結果は高エネルギー天体物理学にとどまらず、他の物理分野である原子核物理学にも大変有意義なものである。MAXI は国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」に搭載され、2009 年 8 月に観測を開始した。世界最大の広い視野を持つ X 線カメラで、92 分で 1 周回し全天を監視している。X 線強度が変動する天体を 92 分に 1 回ずつ観測できることになり、X 線連星パルサーの長期間に渡る変動の解明には大変適している。

X 線パルサー 4U1626-67 は 1970 年代から多くの X 線衛星で観測されてきた。つまり伴星からの質量降着がほぼ定常的に続いていることが示唆される。自転周期は現在 7.6 秒であるが、これまでに周期が長くなる時期と短くなる時期を繰り返している。X 線パルス周期の変化に連星の公転運動を示唆する変動が観測されないことから、伴星の質量は太陽の 0.06 倍以下と大変小さいことがわかっている。またサイクロトロン共鳴線の観測により中性子星の表面磁場強度は 3.2×10^{12} G である。このことを使って本研究で中性子星の半径が見積もられることとなる。地球からの距離はまだよくわかっておらず、可視光観測から 5-13 kpc と推定されており、誤差が大きい。

本研究では MAXI による 2009 年 10 月から 2016 年 9 月までの観測データから、4U 1626-67 の自転周期とその変化率を求めた。その結果、自転周期はこれまでの観測で得られていた結果とほぼ一致し、この観測期間中、自転周期はずっと短くなる一方であったことがわかった。また X 線強度と周期の変化率を比較すると、X 線強度が増加するにつれて、周期の変化率の絶対値が大きくなっていった。

Gosh & Lamb (1979) の降着トルクモデルでは、自転周期の変化率の絶対値は X 線強度、中性子星の慣性モーメント、磁気モーメントなどに依存する。距離を 8 kpc と仮定してこのモデルを適用し、得られた磁気モーメントから既知の表面磁場を用いて中性子星の半径を 11.59 ± 0.03 km,

また得られた慣性モーメントから質量が太陽の 1.34 ± 0.02 倍と推定した。4U 1626-67 の半径や質量の推定は初めてである。距離やモデルの不定性(中性子星の磁軸と自転軸の傾きの角度など)は2倍程度あるが、他の X 線連星パルサーで軌道測定法により半径や質量が求められていた例では誤差が本研究の10倍程度ある。降着トルクモデルの適用による半径や質量の推定は大変精度が良く、有効な手法であることが実証された。

中性子星のような高密度下における状態方程式(圧力と密度の関係式)は、物理学、特に原子核物理学上の重要な問題とされ、これまで多くの理論研究が行われてきたが、観測的実証はあまり進んでいなかったのが現状である。本研究の成果は、提案されてきた様々な状態方程式に厳しい制限を与え得る点でも有意義である。

また中性子星は超新星爆発で鉄核の重力崩壊によって作られるが、多くの中性子星の質量分布を知ることにより、中性子星と爆発で吹き飛ばされる外層の境界の決定についての知見が深まることも今後期待されている。

もう一つの天体、ペルセウス座 X は古くから知られた変光星で19世紀末から可視光で詳しく観測されていた。X 線観測によって自転周期 835 秒のパルサーであることが明らかになり、また伴星は太陽の10倍以上の質量を持つ、青白色で非常に明るくさらに強い水素輝線をもつ Be 型星である。距離は 0.7-1.3 kpc と近い。X 線連続スペクトルで 30 keV 付近に幅の広いへこみ構造があり、これを仮にサイクロトロン共鳴線による吸収によるものと仮定すれば、中性子星表面磁場強度は 2.6×10^{12} G と推定される。しかしパルス周期が長いことから、磁場はもっと強いとの指摘もある。

本論文では、2009年10月から2016年6月までの MAXI の観測データについて 4U 1626-67 と同様のデータ解析を行ったところ、同様に自転周期の変化率と X 線強度に相関が見られた。しかし磁場強度を 2.6×10^{12} G とした場合には降着トルクモデルではこの相関を再現することができなかった。そこで磁場強度を変化させて同様の解析を行ったところ、 $(4-20) \times 10^{13}$ G 程度であれば降着トルクモデルで再現できることがわかった。これはペルセウス座 X の磁場強度がより大きい可能性があることを示唆している。この場合、先行研究で指摘された 30 keV の構造はサイクロトロン共鳴線ではなく、実際のサイクロトロン共鳴線は 100 keV 以上になる。その領域では連続スペクトルが弱いために吸収構造の観測は難しく、観測とは矛盾しない。

以上、本論文で著者は、X 線連星パルサー 4U 1626-67 およびペルセウス座 X における X 線観測データから、降着トルクモデルを適用して、それぞれ中性子星の半径や質量、および表面磁場強度などを求めた。特に 4U 1626-67 では中性子星の半径や質量を他の研究より1桁高い精度で求めることができた。この成果は高エネルギー天体物理学のみならず、高密度下の物理学の発展に大きく寄与するものである。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士(理学)の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成29年2月16日