

学位論文要旨

X-ray Study of Stellar-Wind Accretion on a Highly-Magnetized Neutron Star in a Binary System (X線観測による連星中の強磁場中性子星への星風降着に関する研究)

氏名 内田 和海

大質量星は、星内部での核融合によって進化し、その進化の最終段階として超新星爆発を起こす。中性子星は、この恒星の最期とともに誕生を迎える。中性子星の半径は約 12 km と小さく、その中に太陽の 1.4 倍もの質量を閉じ込めている。この高密度環境のため、内部の物質はほぼ中性子で構成され、その縮退圧によって重力に対抗している。このような極限環境は、地上では実現できない天然の実験室として、宇宙物理のみならず核物理分野でも研究が進められている。その一方で、極限環境が作り出す複雑な現象のため、天体内部を探ることが難しい状況でもある。高密度や強重力場だけでなく、中性子星は非常に強い磁場 ($10^8 \sim 10^{12}$ G) と早い自転(ミリ秒～数時間)を持つことも知られている。この強力な磁場によって天体のごく限られた領域から電磁波を放出し、自転によって放射領域が見え隠れすることで、周期的な信号が観測され、中性子星であることが判別される。これらの磁場と自転周期は、完全に独立したパラメータではなく、中性子星の進化や中性子星の内部構造に密接に関係する。

中性子星の強磁場の極限として「マグネター」がある。これは、 $\sim 10^{13}$ G 以上の強力な磁場を持っており、その磁気エネルギーによって電磁波を放出する。また、その強力な磁気トルクのために自転が阻害され、中性子星の中では比較的遅い自転周期(~ 10 秒)を持つ。中性子星全体の約半数は、別の星と連星系を組んでいるが、マグネターにおいては連星系を組んでいるものは見つかっていない。連星系では他天体からの質量降着によって X 線を放出し、その X 線スペクトルに現れる構造(サイクロトロン共鳴散乱構造)によって磁場を推定する。現在の検出器の観測限界が約 10^{13} G にあるため、マグネターを持つ連星系が実際に存在しないのか、それとも観測限界によるものなのか、別の手法による判断が必要となる。

近年、X 線スペクトルに依存しない磁場推定方法;降着トルクモデル(Ghosh & Lamb, 1979、以下 GL79)が観測と比較・校正され、複数天体に適用されてきた。その適用天体の 1 つで、 10^{14} G もの強磁場を持つことも報告された(F. Yatabe, 2018)。しかし、これは Be 星(星周円盤をもつ大質量星)という限られた条件下での適用例である。我々は、GL79 が適用できる幅を広げると同時に、連星中のマグネターを開拓するために、Be 星ではない星風降着型の中性子星連星の X 線データ解析、及び GL79 モデルの適用を行なった。

研究の流れとしては、「解析前準備」「中性子星かブラックホールかの天体判別」「磁場強度の推定」に分けられる。

「解析前準備」天体の選定を行う。本研究では、星風降着系かつ強磁場の中性子星を探す必要がある。強磁場の特徴として、降着の阻害による低い X 線光度、遅い自転周期が挙げられる。今回我々は、候補天体の中で最も X 線光度の低い、IGR J00370+6122 を解析した。本天体は、暗い時の光度が 10^{32} erg/s と報告 (R. Hainich, 2020) があり、4 ks のライトカーブから一度だけ 346 秒周期のパルスが観測されている (in't Zand, 2007)。まずは、以降の解析で用いるデータが、軌道上のどの位相で撮られたものか判断するために、軌道周期解析を行った。使用したデータは、Swift 衛星 BAT 検出器で取得された 15 年分のライトカーブであり、解析には χ^2 periodogram 法を用いた。先行研究で報告のある 15.7 日周辺で周期解析を行い、 15.6649 ± 0.0014 日という周期を得た。また、近星点から位相 0.05 だけ遅れて X 線ピークが見られることが確認された。

「中性子星かブラックホールかの天体判別」これまでの観測で、一度しかパルスが観測されていないため、コンパクト天体の正体がブラックホールである可能性も棄却できない。そこで、先行研究とは別のデータ (XMM-Newton 衛星による 23 ks ライトカーブ) に対してフーリエ解析、及び χ^2 periodogram 解析を行い、偶然生起確率 5% と高い有意度で 674 秒の周期が検出された。これは、先行研究の 346 秒周期の約 2 倍である。ライトカーブを 674 秒で folding したところ、1 周期に大小 2 つのピークが存在することが確認された。これは、先行研究の 4 ks の観測では 2 つのピークが区別できず、今回求められた周期の約半分の周期が検出されたものと考えられる。XMM-Newton, Swift, Suzaku の 3 衛星による計 34 観測の 1-10 keV スペクトル解析から、光度とスペクトルのハードネスに正の相関が見られた。これは他の中性子星天体でも確認されている現象である。また、スペクトルの形状からブラックホールより連星中性子星に近いスペクトル形状を持つため、やはりコンパクト天体は中性子星であることが分かった。

「磁場の推定」まずはスペクトル形状の観察から、磁場に定性的な制限を与える。1-10 keV のスペクトルには、磁場による構造は確認できなかったため、RXTE, INTEGRAL 衛星による 7-80 keV の広帯域スペクトルで調査を行なった。これら 2 つのデータは同時取得では無いものの、両方とも近星点周辺を抜き出したものである。スペクトルは折れ曲がりの無い単一の冪関数で再現された。折れ曲がりがあると仮定した際のエネルギーの下限値は、一般的な 10~20 keV に対して非常に高い、38.6 keV と得られた。サイクロトロン共鳴エネルギーと折れ曲がりのエネルギーが正の相関を持つ経験則 (K. Makishima, 1999) より、磁場は 10^{13} G 以上と推定される。

次に、GL79 の適用による定量的な磁場推定を行う。1-10 keV のスペクトル解析で得られた光度を軌道周期に対してプロットすると、 $10^{32} \sim 10^{35}$ erg/s という大きな光度変動が見られた。この光度変動は位相 0.3、0.95 で毎軌道観測されている。Hoyle-Lyttleton 降着から、この中性子星降着系で想定される光度曲線を計算したところ、通常の降着では想定できない急激かつ大幅な変動量であることが分かった。複数の降着モデルを想定したが、軌道位置に依存した降着モードの遷移 (プロペラモードと降着モード) が起きるモデルでのみ、説明ができることが分かった。このことでトルク平衡における GL79 モデルが適用できることがわかり、 5×10^{13} G というマグネター並みの磁場が算出された。

連星中のマグネターは、中性子星の進化の一枝を担う。本研究では、トルク輸送効率の不定性は残るものの、GL79 モデルの適用条件を広げ、この分野の開拓に一助した。