

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	内田 和海
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1・2 項該当		
論文題目			
<p>X-ray Study of Stellar-Wind Accretion on a Highly-Magnetized Neutron Star in a Binary System</p> <p>(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)</p>			
論文審査担当者			
主 査	准教授	高橋 弘充	
審査委員	教 授	深澤 泰司	
審査委員	教 授	小嶋 康史	
審査委員	教 授	川端 弘治 (宇宙科学センター)	
審査委員	教 授	志垣 賢太	
〔論文審査の要旨〕			
<p>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 ($10^8 \sim 10^{15}$ G) と速い自転 (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。</p> <p>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、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。中性子星には恒星と連星系を組んでいる天体が多数あるが、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来なかった。連星系では恒星からの質量降着によって重力エネルギーを解放し X 線を放出する。近年、X 線スペクトルに依存しない磁場推定方法である降着トルクモデル (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、マグネターと考えられる 10^{14} G の強磁場を持つことが報告された (F. Yatabe, 2018)。ただし、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。</p> <p>本研究では、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</p>			

用を行なった。

「天体の選別」星風降着系かつ強磁場の中性子星を探す。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)。

「中性子星かブラックホールか为天体判別」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 秒の周期を検出した。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。そのため、先行研究では 4 ks の短い観測で 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、スペクトルの形状が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支持された。

「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た。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 以上と推定された。

次に、GL79 の適用による定量的な磁場推定を行った。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を見出した。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) が起きるモデルのみ、説明ができることが分かった。最後に GL79 モデルを適用し、IGR J00370+6122 連星における中性子星は 5×10^{13} G というマグネター並みの磁場を持つことが算出された。

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、軌道周期に応じた光度変動に GL79 モデルの適用条件を広げた。この結果、中性子星の進化、磁場測定の研究分野の開拓に一助した。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士 (理学) の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

“A study of the accretion mechanisms of the high mass X-ray binary IGR J00370+6122.”

Nagomi Uchida, Hiromitsu Takahashi, Yasushi Fukazawa, and Kazuo Makishima, Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ), psab083, 2021

参考論文

(1) M. Chauvin, H. G. Floren, M. Friis, M. Jackson, T. Kamae, J. Kataoka, T. Kawano, M. Kiss, V. Mikhalev, T. Mizuno, N. Ohashi, T. Stana, H. Tajima, H. Takahashi, N. Uchida, M. Pearce, “Shedding new light on the Crab with polarized X-rays”, Scientific Reports, Vol. 7, No. 7816, 2017

(2) M. Chauvin, H. G. Floren, M. Friis, M. Jackson, T. Kamae, J. Kataoka, T. Kawano, M. Kiss, V. Mikhalev, T. Mizuno, N. Ohashi, T. Stana, H. Tajima, H. Takahashi, N. Uchida, M. Pearce, “Accretion geometry of the black-hole binary Cygnus X-1 from X-ray polarimetry”, Nature Astronomy, Vol. 2, pp. 652-655, 2018

(3) K. Torigoe, Y. Fukazawa, G. Galgoczi, T. Mizuno, K. Nakazawa, M. Ohno, A. Pal, H. Takahashi, K. Tanaka, N. Tarcai, N. Uchida, N. Werner, T. Enoto, Z. Frei, Y. Ichinohe, L. Kiss, H. Odaka, J. Řipa, Z. Varhegyi, “Performance study of a large CsI(Tl) scintillator with an MPPC readout for nanosatellites used to localize gamma-ray bursts”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 924, pp. 316-320, 2019

(4) Q. Abarr, M. Baring, B. Beheshtipour, M. Beilicke, G. deGeronimo, P. Dowkontt, M. Errando, V. Guarino, N. Iyer, F. Kislat, M. Kiss, T. Kitaguchi, H. Krawczynski, J. Lanzi, S. Li, L. Lisalda, T. Okajima, M. Pearce, L. Press, B. Rauch, D. Stuchlik, H. Takahashi, J. Tang, N. Uchida, A. West, P. Jenke, H. Krimm, A. Lien, C. Malacaria, J. M. Miller, C. Wilson-Hodge, “Observations of a GX 301-2 Apsastron Flare with the X-Calibur Hard X-Ray Polarimeter Supported by NICER, the Swift XRT and BAT, and Fermi GBM”, The Astrophysical Journal, Vol. 891, 70, 2020

(5) N. Uchida, H. Takahashi, M. Ohno, T. Mizuno, Y. Fukazawa, M. Yoshino, K. Kamada, Y. Yokota, A. Yoshikawa, “Attenuation characteristics of a Ce:Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ scintillator”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 986, No. 164725, 2021