

氏名	岩切 涉
博士の専攻分野の名称	博士 (理学)
学位記号番号	博理工甲第 883 号
学位授与年月日	平成 24 年 9 月 14 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	OBSERVATIONAL STUDY OF RADIATIVE TRANSFER UNDER STRONG MAGNETIC FIELDS ON NEUTRON STAR (中性子星磁極における強磁場下での輻射輸送に対する観測的研究)
論文審査委員	委員長 教授 田代 信 委員 教授 井上 直也 委員 教授 鈴木 健 委員 准教授 寺田 幸功

論文の内容の要旨

降着駆動型パルサーは、中性子星と恒星の連星系（中性子星連星）であり、恒星の大気が最終的に中性子星の強磁場に捕まって磁極へと流れ込み、重力エネルギーが解放され数 keV の温度を持つプラズマの柱一降着円筒となる。そのため、 10^{12} G 程度の強磁場中における輻射輸送の基礎物理を探究するのに理想的な実験室となっている。本研究では、降着駆動型パルサー 4U 1626 – 67 に対して、2006 年の自転減速時期に硬 X 線帯域に世界最高感度を持つ日本の第 5 代 X 線天文衛星すざくを用いて 88 ksec の観測を行い、2010 年の自転加速時期には「すざく」と NASA の天文衛星 RXTE (Rossi X-ray Timing EXplorer) を用いて、それぞれ 15 ksec、100 ksec の観測を行った。自転位相ごとの詳細な X 線スペクトル解析によって、電子がランダウ準位に量子化されているために共鳴散乱によって見られる吸収線が、輝線に変化することを世界で初めて発見し、この成功をもとに強磁場中での輻射輸送の基礎物理を議論している。

4U 1626 – 67 は、7.7 秒の周期を持つ低質量 X 線連星であり、これまでに 37 keV にサイクロトロン共鳴による吸収線が確認されている。さらに、スペクトルの連続成分は自転位相に強く依存していることが知られており、サイクロトロン共鳴構造も自転位相に対して変化をするかどうか探査すべく、2006 年に「すざく」を用いて観測を行った。得られた自転位相平均のスペクトルからは、X 線光度、サイクロトロン共鳴エネルギーともに過去の観測と矛盾の無い結果が得られた。自転位相ごとのスペクトル解析の結果では、連続成分が明るい位相では光学的に厚い Thermal Comptonization のモデルで再現できるが、暗い位相では光学的に薄いモデルで再現できることがわかった。また、共鳴散乱による吸収構造が暗い位相では輝線構造に変化することを発見した。この輝線構造の有意度は F 検定を用いて算出し、バックグラウンドモデルの不定性 3 % を考慮した場合結果は、 $2.91 \times 10^{-3} \sim 1.53 \times 10^{-5}$ となり、3 シグマ以上の統計水準で世界で初めて共鳴輝線を検出した。

2008 年には、1990 年以降自転速度が減速していた 4U 1626 – 67 の自転速度が、一転、加速へと変わった。これは、中性子星への降着率が増加したために起きたと考えられ、降着率が増加して密度が増加したため X 線光度は 2006 年に比べて 3 倍明るくなった。輻射輸送過程において、共鳴散乱も含めて密度のパラメー

タは重要な為、2010年9月に「すざく」によって15 ksec、同年12月にRXTEによって100 ksecの観測が行われた。位相平均のスペクトル解析の結果では、X線光度は3倍になっているが、低エネルギー側を再現するベキ関数のベキがやや急になったこと以外には有意なスペクトルの形状の変化は見られなかった。一方、位相ごとのスペクトル解析結果では、位相を通してプラズマの電子温度は変化していないという解釈が可能であった2006年と異なり、2010年ではプラズマの電子温度が有意に変化することがわかった。さらに、2006年に暗い位相でみられた共鳴輝線は有意に検出されず、吸収と輝線が混ざった構造のようなものが見られることがわかった。

共鳴輝線の存在は1981年に理論によって予想されており、2006年に観測された共鳴輝線は、連続成分が光学的に薄くなっていることからこの理論と定性的にあっている。しかし、当時の理論では観測されたX線光度まで含めた定量的な解釈はできないため、今回の観測結果を中性子星の双極子磁場を仮定し、放射プラズマのより詳細な幾何学構造まで含めた理論シミュレーションの結果と比較することにより、強磁場中の輻射輸送の基礎物理を議論している。

論文の審査結果の要旨

本論文は、降着駆動型パルサーの X 線観測にもとづき、中性子星磁極付近の強磁場下プラズマ中の輻射輸送に対する研究をおこなったものである。

降着駆動型パルサーは中性子星と恒星の連星系（中性子星連星）をなしており、この系では、恒星大気あるいは恒星風が連星系の重力均衡点をこえると、プラズマが中性子星に向かって降着する。このとき中性子星の磁場が十分に強ければ、降着流は、直接あるいは降着円盤を経由して、最終的に中性子星の磁極へと流れ込む。このとき解放される重力エネルギーは、衝撃波を経てプラズマの熱エネルギーに変換され、プラズマは $kT = \text{数 keV}$ の温度を持つ降着円筒を形成する。磁極が自転軸に対して傾いている場合は、この円筒が自転によって見え隠れするので、ある角度からみる観測者からは、明滅するパルサー天体として認識される。逆にいえば、自転によって空間的に走査観測されることになる降着円筒は、強磁場（典型的に 10^{12}G 程度）におけるプラズマ中の輻射輸送を研究する上で地上では実現できないプラズマ実験環境となっている。本論文では特にこの点に着目し、7.7 秒の周期を持つ低質量 X 線連星系 4U 1626 – 67 に対しておこなわれた 2 つの時期の X 線観測、すなわち、2006 年の自転減速時期における硬 X 線帯域に世界最高感度を持つ日本の第 5 代 X 線天文衛星「すざく」を用いて合計 88 ksec にわたる観測と、2010 年の自転加速時期における「すざく」と米国 NASA の天文衛星 RXTE (Rossi X-ray Timing EXplorer) によるそれぞれ 15 ksec、100 ksec の観測を取り上げている。

中性子星 X 線パルサーの特徴として、その X 線スペクトル中にみられる「サイクロトロン」共鳴構造がある。これは、降着円筒プラズマ中の電子が中性子星磁極の強磁場によってランダウ準位に量子化されているために、降着円筒中を X 線が放射伝播する過程で、量子化された電子のエネルギー遷移が、X 線スペクトル中に吸収線（あるいは輝線）として観測されるものである。多くの X 線パルサーからサイクロトロン吸収線構造が観測されているが、これまで輝線構造の観測例はなかった。4U 1626-67 の場合にも、37 keV にサイクロトロン共鳴による吸収線が確認されており、またスペクトルの連続成分は自転位相に強く依存していることが知られていた。

2006 年に「すざく」を用いて観測を行ったところ、得られた自転位相平均においては、X 線光度、サイクロトロン共鳴エネルギーともに過去の観測と一致する結果が得られた。ところが、本論文においてさらに自転位相ごとのスペクトル解析をすすめると、連続成分が明るい位相では光学的に厚い Thermal Comptonization のモデルで再現できるが、暗い位相では光学的に薄いモデルで再現できることが明らかになった。その上で、たいへん興味深いことに、共鳴散乱による吸収構造が暗い位相では輝線構造に変化することが発見された。本論文では、この輝線構造の有意度を F 検定を用いて定量的に検証し、バックグラウンドモデルの不定性 3 % を考慮した場合でも危険率にして $2.91 \times 10^{-3} \sim 1.53 \times 10^{-5}$ との結果を得た。これは世界で初めて 3 シグマ以上の統計水準で共鳴輝線を検出したものである。

2008 年には、1990 年以降自転速度が減速していた 4U 1626 – 67 の自転速度が一転加速へと変わったとの報告があった。これは、中性子星への降着率が増加したために起きたと考えられ、実際に、X 線光度は 2006 年に比べて 3 倍明るくなった。輻射輸送過程において、プラズマ密度は、重要なパラメータであるので、本論文でも、2010 年 9 月に「すざく」によって 15 ksec、同年 12 月に RXTE によって 100 ksec の観測を行った。まず、位相平均のスペクトル解析の結果では、X 線光度は 3 倍になっているが、低エネルギー側を再現するべき関数のベキがやや急になった。しかしそれ以外では有意なスペクトルの形状の変化は見られなかった。一方、位相ごとのスペクトル解析結果では、プラズマの電子温度が有意に変化することがわかった。ところが、暗い位相でみられた共鳴輝線は有意に検出されず、吸収と輝線が混ざった構造のようなものが見ら

れることがわかった。これはプラズマの密度によって、輻射輸送が変化していることを示す。

本論文では、これらの観測結果をもとにプラズマ中の輻射輸送について議論している。共鳴輝線の存在は1981年の理論的研究で、光学的に薄いプラズマ中でみられる可能性が指摘されていた。本論文において、2006年の観測から発見された共鳴輝線は、同時に光学的に薄いプラズマからの連続成分とともに観測されており、この理論と定性的に一致している。しかし、すでに出版されている範囲の理論的研究では、観測されたX線光度まで含めた定量的な解釈はできない。そのため本論文では、放射プラズマのより詳細な幾何学構造まで含めた理論シミュレーションの結果と比較し、連続成分と共鳴輝線・吸収線深さが半定量的に説明できることをしめすことに成功している。

これら輝線の発見と連続スペクトルとの総合的な解釈は、いずれもX線中性子星パルサーの研究において顕著な貢献と認められる。

また本論文の主要部分は、査読制度のある国際的学術誌 *Astrophysical Journal* に英文で1編掲載され、別に共著でも1編公表されている。また論文提出者によって国際会議で1編の口頭発表、1編のポスター発表がなされている。また国内学会および研究会においても、4度にわたって口頭発表されている。このほか本論文に密接に関係する研究として、観測にもちいた硬X線検出器の較正についての論文が1編（共著）、査読付き学術誌に出版されている。その他、中性子星以外の観測的研究の分野で、査読付き学術誌に掲載された共著論文が2編、国際会議の口頭発表とポスター発表が各1編ある。以上の実績をふまえ、本論文は学位論文に十分に値すると判断され、学位論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。