

氏名	神頭 知美
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 896 号
学位授与年月日	平成 25 年 3 月 22 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	X-RAY STUDY OF VARIABILITY IN THE CRAB PULSAR WIND NEBULA (かにパルサー風星雲の X 線変動の観測)
論文審査委員	委員長 准教授 寺田 幸功 委員 教授 井上 直也 委員 教授 田代 信 委員 連携准教授 望月 優子

## 論文の内容の要旨

中性子星パルサーは、大質量星の終末である超新星爆発の後にできる高密度な天体で、半径 10 キロメートルに太陽程度の質量が詰め込まれている。加えて、自転周期が数十ミリ秒という超高速回転をしており、 $10^8$  テスラという高い表面磁場をもつ。その結果、星表面から引きはがされた電子が磁場と相互作用して、星付近で電波や X 線を放射する。これが地球からは自転周期と同期したパルスとして検出される。パルサーの磁力線が星の高速回転に追いつけなくなる地点は光円錐と呼ばれ、磁気圏で対生成された電子陽電子のプラズマが外向きに風のように吹く。この風は「パルサー風」と呼ばれ、外部の物質などと相互作用し「パルサー風星雲」として輝く。

なかでも、「かに星雲」は、全天で最も明るいパルサー風星雲のひとつである。軟 X 線での画像で星雲が局所的に変動する様子が捉えられているが、放射のエネルギー源は安定したパルサーであるため、撮像ができない硬 X 線では安定した光度で輝くと信じられ、長年にわたり硬 X 線検出器の較正にも使われてきた。しかし、最近になって、年スケールのフラックス変動が 4 つの衛星の硬 X 線検出器によって独立に確認された。これは、全天に数あるパルサー風星雲のなかでも初めて見つかった現象である。硬 X 線の帯域のエネルギースペクトルは折れ曲がっており、フラックス変動からはこうしたスペクトルの形状の変化も示唆される。

「すざく」衛星搭載の硬 X 線検出器 (HXD) は、10-600 keV に高い感度を持つ検出器である。低いバックグラウンドと高いバックグラウンド再現性 (< 3%) を誇り、かに星雲の微細なスペクトル変動を探るのに最適である。HXD は、較正のため、年に一度は必ずかに星雲を観測しており、本研究で解析した結果、100 keV 以下の帯域で他の検出器で報告されたフラックス変動を再確認した。さらに、100 keV 以上の帯域でのフラックス変動のふるまいに違いがあることを発見した。光子エネルギー帯域ごとのカウントレートの比は有意に分散しており、スペクトル変動を示唆していた。そこで、スペクトルを、折れ曲がりを入れたべき関数でフィットし定量化したところ、折れ曲がり前後のべきの差は 0 ~ 0.5 におさまっていることを明ら

かにした。これは複数の冷却時間をもつシンクロトン放射の重ね合わせを示唆するもので、パルサー風星雲のなりたちに重要な制限を与える。

また、硬 X 線でとらえた変動と星雲の構造変化の関係を探るため、軟 X 線の帯域で世界最高の空間分解能を誇る Chandra 衛星の軟 X 線画像も解析した。Chandra は 1999 年の打ち上げからほぼ毎年数回ずつ、かに星雲を観測した公開データがあり、系統探査が可能である。本研究では、すでに報告されている日～週スケールの小規模な変動に加えて、星雲全体の構造が変わっている様子も確認した。本論文ではまた、硬 X 線変動と星雲構造の変動の相関について様々な検討を示し、硬 X 線変動の起源について観測的制限を加えている。

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、代表的な中性子星パルサーを含む「かに星雲」を対象に、その周辺に輝くシンクロトロン星雲（パルサー風星雲）の時間変動の起源を探ろうとする観測的研究に関するものである。

中性子星パルサーは、恒星の最期である超新星爆発の後にできる高密度な天体で、半径 10 キロメートルに太陽程度の質量が詰め込まれている。加えて、自転周期が数十ミリ秒という超高速回転をしており、 $10^8$  テスラという強い磁場をもつ回転磁石である。その結果、星表面から引きはがされた電子が磁場と相互作用して、星付近で電波や X 線を放射する。これが地球からは自転周期と同期したパルスとして検出される。パルサーの磁力線が星の高速回転に追いつけなくなる地点は光円筒と呼ばれ、磁気圏で対生成された電子陽電子のプラズマが外向きに風のように吹く。この風は「パルサー風」と呼ばれ、外部の物質などと相互作用し、天体は「パルサー風星雲」として輝く。その放射のエネルギー源は、安定して回転を続ける強磁石・中性子星パルサーであるため、パルサー風星雲の放射も極めて安定していると考えられてきた。しかし、近年、全天で最も明るいパルサー風星雲のひとつである「かに星雲」を硬 X 線帯域で長期間モニターした結果を集計してみると、年スケールで数%程度の変動を示す事が発見された。この「パルサー風星雲」の硬 X 線変動の起源を、硬 X 線における分光測定と、軟 X 線における撮像観測から明らかにすることが、本論文の主題となっている。

本論文では、まず、かに星雲の硬 X 線光度だけでなく、エネルギースペクトルにも着目し、硬 X 線で世界最高感度を誇る「すざく」衛星搭載の硬 X 線検出器 (HXD) による高精度な分光データを解析している。結果、300 keV 以上の帯域でも光度変動が見られること、10 から 600 keV の帯域のエネルギースペクトルの形状が有意に時間変動していること、を世界で初めて示した。

さらに、本論文では、軟 X 線で超高精度な撮像が可能なチャンドラ衛星の公開データを用いて、1999 年から 2011 年までの 12 年間の画像を解析し、硬 X 線変動と連動して変化する領域を探索した。「かに星雲」の画像に見られる、ジェットやトーラス、リング、といった複数のコンポーネントを丹念に調べた結果、パルサー風星雲の主な構成要素であるトーラスを取り巻く形で存在する「ポロイダルリング」が、硬 X 線の変動と連動している兆候が見られる事を突き止めた。この指摘は世界で初めてのものである。

本論文では、上記の 2 点の観測的発見を元に、パルサー風星雲の硬 X 線変動の起源について議論している。硬 X 線放射の素過程は、パルサーから注入される高エネルギー電子と星雲の磁場との相互作用で出るシンクロトロン放射であること、また、その放射のスペクトルがべき型関数が途中で折れ曲がる形状をとること、は、先行研究から分かっている。本論文で、スペクトル形状の変動を定量化することで初めて、系の硬 X 線放射が、シンクロトロン放射の slow cooling regime に相当し、単一の様な領域が放射するのではなく、ミリパーセク ( $10^{10}$  km) 程度の空間的広がりを持つ最大 100 ナノテスラ程度の磁場を持つ領域が、複数、放射している事が示唆された。さらに、本論文では、軟 X 線画像で変動が見られた「ポロイダルリング」の磁場エネルギーが解放され、硬 X 線放射の変動に寄与するという描像も定量的に議論されている。この物理描像は、天体の磁場構造として双極子磁場に加えポロイダル成分の磁場が存在し、その磁気エネルギーがエネルギー解放されて光る、とされる「太陽フレア」や「超強磁場中性子星マグネターのフレア」等と類似しており、桁で物理量が異なる別の系の現象と統一的な理解をすすめる上で重要な視点となっている。

以上から、本論文における観測成果2点と物理的解釈の議論は、先行研究に重要な影響を与えるものとして高く評価できる。

なお、本論文の主要部は査読論文（英文；主著）としてまとめられており、国際会議でもポスター発表として一件報告されている。また、本論文に用いた検出器や関連機器の開発も査読論文（共著）1編や、国際会議口頭1件、ポスター1件、国内学会口頭2件としてまとめられている。その他、本論文とは直接関係ない成果も査読論文2件、国際会議3件などが挙げられる。以上の実績をふまえ、本論文は十分に学位論文に値すると判断され、学位論文審査委員会では全員一致で合格と判定した。