

氏名	原山 淳
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 900 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	強磁場白色矮星からの非熱的放射の観測的探査 (Observational Constraint on Non-Thermal Emission from Magnetic White Dwarfs)
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 准教授 山口 貴之

## 論文の内容の要旨

1912 年の V.F.Hess の宇宙線発見以来、高エネルギー粒子の起源や生成メカニズムは解明すべき謎として存在している。地上で観測される宇宙線スペクトルの中で、 $10^{15.5}$  eV 以下は銀河系内が起源であると考えられている。これらの高エネルギー粒子が生成される場所としては、超新星残骸や中性子星が考えられているが、Hillas 1984 によると強磁場を持った白色矮星もその候補となっている。磁場を持ったコンパクト天体が速い自転周期で回っているという同様の系として、中性子星パルサーのような振る舞いを白色矮星がみせてもおかしくない。実際に Terada et al. 2008 によると、強磁場白色矮星連星 AE Aquarii から中性子星パルサーに良く見られるような鋭いパルスが 4keV 以上の帯域に見つかり。白色矮星からの非熱的放射の可能性が活発に議論されるようになってきた。

本研究は先行研究を踏まえ、白色矮星が一般的に宇宙線の起源となりうるかを検証することである。単純に、回転する磁場を持つコンパクトな天体である中性子星パルサーの別の系として、同様の物理メカニズムが成り立っていると考えられる。典型的にサイズが 10 km、表面磁場が  $10^{8-12}$  G、ミリ秒から数秒で自転を行い、誘導起電力が  $10^{16-18}$  V 程度に達する中性子星に対し、サイズが 5000-10000 km、表面磁場が  $10^{5-9}$  G で、自転周期数十秒～数時間で回転する白色矮星では、誘導起電力が  $10^{14-16}$  V 程度に達し、2 桁程度低いながらも十分の粒子を加速するポテンシャルを持っている。であるならば、中性子星パルサーに見られるようなその電場により加速由来の非熱的放射が白色矮星から見えたとしてもおかしくない。de Jager 1994 によれば、AE Aquarii は中性子星のミリ秒パルサーに相当する天体であり、ラジオパルサーに相当する単独の白色矮星パルサーの存在を示唆しているが、未だにその存在は確認されていないのでこれを検証した。

単独の白色矮星パルサーを探すために、母集団として 2002 年から稼働を開始した Sloan Digital Sky Survey Project により見つかった約 9000 個の白色矮星から候補天体を絞る (Eisenstein et al. 2006)。その中の 480 個が  $10^5$  G 以上の強い磁場を持っていて (Kauwa et al. 2006)、それらの白色矮星の中で自転

周期が求められている天体に、中性子星パルサーで使う磁気双極子放射エネルギー (Shapiro & Teukolsky 1983) を白色矮星に適用する。中性子星パルサーでは、回転によるエネルギー損失(スピンドウンエネルギー)が磁気双極子放射エネルギーと等しいと考えられ、Possenti 2002によれば、そのうちの0.01~1%がパルサーとして X 線で輝くエネルギーとして使用される。白色矮星でも中性子星と同様のメカニズムが働いていると仮定すると、磁気双極子エネルギーが大きいほど X 線でのパルサー活動が盛んであることが期待できる。

候補天体から電場加速由来の非熱的放射を検出するために、まず軟 X 線からガンマ線帯域において既に全天マップに相当するデータが存在する、軟 X 線観測衛星 ROSAT、X 線モニター MAXI、ガンマ線観測衛星 INTEGRAL を使用して系統的探査を実施した。各々の帯域のイメージ解析を実施し、白色矮星の対応座標に X 線、ガンマ線での検出が有意であるかを調査した。それにより、ROSAT の軟 X 線帯域でのみ検出が有意である天体を発見した。そして、それらの白色矮星に対して、高感度観測が実施できる X 線観測衛星「すざく」を用いてポインティング観測を実施した。

結果は、「すざく」で観測した 0.5 - 10 keV 帯域で、候補天体からの有意な検出を確認することができなかった。しかし単独の白色矮星からの非熱的放射の可能性を棄却するまでに至らなかった。

この結果をふまえ、本研究では、非熱的放射の兆候が見られる連星系白色矮星である AE Aquarii と比較して、同程度の磁気双極子エネルギーを持っている単独の白色矮星 EUVE J0317-855 からは、どうして非熱的放射を検出することが出来なかったかを両者の環境の違いから説明する。さらに中性子星パルサーの議論でよく用いられるパルサー活動の境界線を白色矮星にも適応した議論、さらに自転周期が未計測なために今回のセレクションから漏れてしまった天体からの非熱的放射の可能性等の議論を展開する。

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、100 年来の宇宙物理学の謎である宇宙線起源に迫る観測的研究として、中性子星パルサーと類似する系である白色矮星に着目し、系で加速された粒子からの放射を探索、検証することが主題となっている。

宇宙線とは、宇宙を飛来する高エネルギー粒子の総称で、1912 年に発見以来 100 年以上もその起源が謎とされてきた。中でも、 $10^{15.5}$  電子ボルト以下の宇宙線は、我々の銀河系内に起源があるとされ、超新星残骸での強い衝撃波におけるフェルミ加速や、中性子星パルサーにおける静電加速が起源となる物理素過程であると考えられてきた。中性子星とは、恒星の進化の最期である超新星爆発のあとに残る高密度な中心天体で、半径 10 キロメートル、質量  $10^{30}$  キログラムの星が、典型的に  $10^8$  テスラの磁場を持ち回転している天体である。本論文では、先行研究で宇宙線加速源であるとされる中性子星パルサーと同様に、恒星の進化の最終段階で生成される白色矮星に着目し、宇宙線の起源の候補となるか、を検証している。

白色矮星が中性子星パルサーのような磁気圏活動を行い宇宙線を生成しうる、という案自体は、1969 年に J.P.Ostriker が指摘した古いものだが、観測的に検証されたことは殆どない。少数の研究者が電波、エックス線、ガンマ線帯域で、宇宙線起源の非熱的放射の検出を試みるが、明確な証拠はつかめていない状況であった。2008 年にエックス線観測衛星「すざく」が非熱的放射の片鱗を見つけた AE Aquarii という白色矮星が最も有力な例であるが、確証はない。本論文では、エックス線帯域で宇宙線が出す非熱的放射を探索することで、AE Aquarii の 2 例目を検出しようと試みている。

白色矮星は、超新星爆発で熱く誕生したあとは静かに冷えていくだけの天体で、宇宙線の加速源という劇的な物理現象の舞台としては着目されていなかった。本論文では、白色矮星連星である AE Aquarii の二例目を探す際に、エックス線でよく検出される連星系だけでなく、単独の白色矮星も候補に含め、複数のカタログから目標天体を選別している。極めて新しい視点であると評価できる。さらに本論文では、カタログを当たるだけでなく、軟エックス線 ROSAT 衛星、中エックス線 MAXI、硬エックス線 INTEGRAL 衛星で全天を観測した公開データを解析し、さらに候補天体を絞り込んでいる。結果、4 つも候補天体を見つけた点も新しいといえる。

さらに本論文では、候補として選別した 4 天体のうち 3 つの白色矮星を対象に、エックス線観測衛星「すざく」を用いた深い探索も行なっている。結果、3 天体とも装置の検出感度には届かずに不検出となったものの、これらの観測は高倍率の競争的公募に応募して獲得したデータであり、評価に値する。

本論文では、中性子星パルサーと白色矮星パルサーのエネルギーフローが同等であると仮定して、エネルギー源である磁場の回転エネルギーから、エックス線の光度への変換効率を、両天体で比較している。結果、不検出となった天体のエックス線上限値から、変換効率は 0.05% 未満と算出でき、パルサーの中でも、それほど活動的ではない部類に属することが示された。中性子星パルサーには、変換効率が 1 % を超すガンマ線パルサーや、100% をも超すマグネターという種族があり、ある論文では、マグネターは強磁場白色矮星であるという説も出ているため、これを否定する結果であるといえよう。さらに本論文で、曲率放射を仮定した場合の観測限界といえる「death line」が提示されており、今後、回転する強磁石という視点で中性子星と白色矮星を比較する上で、今後の観測的戦略や理論的予測に重要な影響を与えるものとして評価できる。

なお、本論文の主要部分は、査読制度のある国際的学術誌に主著者として英文で 1 編受理され、関連する共著査読論文も 1 編ある。また、この成果は、国際会議で 1 件口頭、1 件ポスターで発表され、国内の研究會や学会でも 2 件の口頭発表がなされている。その他、本論文とは直接は関係ないものの、関連する検出器開発や天体の観測的研究で、査読論文（共著）が 2 編ある。以上の実績を踏まえ、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。