

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18740108

研究課題名（和文） 硬X線撮像分光および多波長観測によるパルサー星雲でのプラズマ加速機構の解明

研究課題名（英文） A Study of particle acceleration mechanism in pulsar wind nebulae using hard X-ray imaging spectroscopy and multi-wavelengths observations

研究代表者

森 浩二 (MORI KOJI)

宮崎大学・工学部材料物理工学科・准教授

研究者番号：00404393

研究成果の概要：

パルサー星雲は宇宙の巨大加速器として知られていますが、その加速メカニズムはよくわかっていません。本研究では、その代表天体であるカニパルサー星雲とベラパルサー星雲について硬X線観測をおこない、以下のような成果を得ました。まず前者に関しては、見た目が時間と共に変化する様子を詳細に示しました。また、後者に関しては、その見た目の形を初めて明らかにしました。以上の観測結果を他波長の観測結果と照らし合わせるなどして、パルサー星雲の加速メカニズムに関して新たな示唆を得ました。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	800,000	0	800,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,100,000	240,000	3,340,000

研究分野：X線天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X線天文学、パルサー星雲、超新星残骸

1. 研究開始当初の背景

パルサー星雲は天然の巨大加速器であり、その代表例であるカニパルサー星雲では、パルサーから吹く相対論的プラズマ風（パルサー風）が衝撃波を経て、最高で 10^{16} eV にまで加速されることがわかっている。この最高エネルギーの値は、シンクロトロンスペクトルの高エネルギー側のカットオフエネルギーと磁場強度（シンクロトロン放射と逆コンプトン放射のフラックス比より求められる）という観測量だけで決まる確

かな値である。しかし、この巨大加速器のパルサー風における加速機構は、まったくわかっていないといっても過言ではないのが現状である。

歴史的にパルサー星雲の研究は、カニパルサー星雲をモデルケースに進められてきた。そして、「まず、パルサー風の加速ありき」という前提で、理想電磁流体の仮定の下、強い衝撃波、断熱膨張の式を解いた理論の仕事が、カニパルサー星雲の標準モデルとなっている。この1980年代に提唱されたモ

デルがその地位を得た要因は、カニパルサー星雲全体の光度、スペクトル、膨張速度をうまく説明できる点にある。しかし、その前提とされる加速があまりにも極端であることは、当初から認識されていた。つまり、衝撃波直前までに、元々パルサー風が持っていた電磁場のエネルギーが $>99\%$ もの効率でプラズマの運動エネルギーに変換されているというのである。

この20年間は「なぜそのような効率のよい加速がおこるのか？」という理論的な考察が先行してきたが、我々は「そのような加速が本当におこっているのだろうか？」という新たな視点の下、観測的な検証を進めてきた。その際、標準モデルで使われた空間的に積分した観測量ではなく、衝撃波下流の流れの速度、表面輝度の動径方向の変化といった空間的に分解した観測量を調べた。そして、それらが標準モデルでは説明できないことを明らかにし、これまでの見方に修正が必要であることを示した

ここまでの研究開始当初の背景であった。

2. 研究の目的

本研究では、前記の方針をさらに推し進め、衝撃波下流のパルサー星雲の観測量を詳細に決定することを目的とした。さらに、この観測量を用いてパルサー星雲のプラズマ加速機構の解明を目指した。

3. 研究の方法

観測研究の対象として、パルサー星雲の代表天体であるカニパルサー星雲とベラパルサー星雲を選んだ。また、この2つの天体を研究対象の中心に据えるとともに、他のパルサー星雲やパルサー星雲候補、超新星残骸も研究の対象とした。

カニパルサー星雲に関しては、チャンドラX線天文衛星を用いて、長期定期観測を行うことで、その形態の時間変動を追いかける手法を選択した。カニパルサー星雲は、もともとその衝撃波付近が週のオーダーで時間変動することが知られていた。しかし、我々はより長いタイムスケールでの時間変動が他の領域にあるというヒントを過去の観測から得ていたため、今回の長期観測に踏み切った。時間変動はプラズマの不安定性に起因していると考えられる。不安定性は密度や磁場のプラズマパラメータに依存するため、それらを知るうえでの新たなプローブとなり得る。また、パルサー風における加速の下限値の粒子がシンクロトロン

放射をおこす波長域と考えられている近赤外での観測も手法の一つとして選択した。

ベラパルサー星雲に関しては、パルサー極近傍の明るい部分しか、その構造がわかっていなかった。軟X線の観測では、その明るい部分を越えて1度角程度に広がる構造が捉えられていたが、超新星残骸に起因する熱的成分なのか、パルサー星雲に起因する非熱的成分なのか、不明であった。そのため、我々は「すざく」X線天文衛星を用いて、ベラパルサー星雲を含む1度角程度の広い領域を硬X線で観測する手法を選んだ。これにより、ベラパルサー星雲の広がり判明することが期待された。また、TeVガンマ線放射との対応が明確になることで、その放射機構の解明にも繋がると予想した。

上記のように、主に硬X線観測を主軸として、近赤外・TeVガンマ線などの多波長観測結果の比較をとり入れた研究手法を本研究では取り入れた。

4. 研究成果

本研究における成果は大まかに、カニパルサー星雲に関する成果、ベラパルサー星雲に関する成果、その他の天体に関する成果の3つに大別できる。以下、順にそれらをまとめる。

(1) カニパルサー星雲に関する成果

我々は過去の研究から、カニパルサー星雲の形態が時間変動することを明らかにしてきた。本研究ではさらに、チャンドラX線天文衛星を用いたカニパルサー星雲の長期観測から、その時間変動成分の特性を明確に示すことができた。まず、日から週単位の短期変動成分に関しては、「ウィスプ」と呼ばれる紐状の構造が衝撃波から外側にむかって伝播していくことが既に知られていたが、これが徐々に減速していくことを初めて明らかにした。また、年単位の長期時間変動成分に関しては、トーラスが部分的に膨張と収縮を繰り返していることを明らかにした。加えて、10年以上のタイムスケールで、南部のジェットが捻じれながら進展していく様子も明らかにした。この時間変動の様子は、MHDシミュレーションで再現されるキンク型不安定性の挙動と酷似しており、今後、変位・タイムスケールを比較していくことで具体的なプラズマパ

ラメータの推定が可能になると考えられる。

これら X 線観測に加えて、地上望遠鏡を使用した近赤外での観測を同時におこなった。近赤外の観測ではパルサー極近傍の「ノット」と呼ばれる成分が時間共に激しく変動している様子を初めてあきらかにした。このノットの成因はパルサー星雲におけるジェット形成に深く関与していると考えられており、激しい時間変動は高緯度パルサー風の衝撃波を見ている可能性もある。国内外で様々な波長でカニパルサー星雲は観測されているが、今後は空間分解したうえでの SED を調べていく必要がある。

(2) ベラパルサー星雲に関する成果

ステレオ型地上チェレンコフ望遠鏡の登場により飛躍的に感度が上昇した TeV ガンマ線領域において、広がっている他波長未同定天体の多くがパルサー星雲だと考えられている。この対応関係を調査する上で、それら未同定天体の他波長での観測を進めると平行して、TeV ガンマ線と他波長での対応がはっきりしているパルサー星雲の特徴をよりよく研究することも重要である。我々は後者のアプローチをとり、観測対象としてベラパルサー星雲を選び、X 線天文衛星「すざく」で観測をおこなった。ベラパルサー星雲は、近傍にあり最もよく知られるパルサー星雲の 1 つであり、早期に TeV ガンマ線源と認定された天体でもある。この TeV ガンマ線の起源を探ることで、今後の未同定 TeV ガンマ線の解明に繋がることが期待できる。

まず、「すざく」衛星の特徴である広がった硬 X 線放射に対する高い感度を活かして、ベラパルサー星雲の硬 X 線での空間的な広がりを初めて明らかにした。また、「あすか」衛星のデータを再解析することでこれを確かめた。これまでは、軟 X 線でパルサーから南部に広がる構造がパルサー星雲と考えられていたが、硬 X 線での形態は軟 X 線の形態とはまったく異なっていた。パルサー星雲からのシンクロトロン放射は、軟 X 線では手前のベラ超新星残骸からの熱的放射と区別ができず、硬 X 線で観測して初めて明確に捉えることができる。よって、我々の硬 X 線観測により、初めてベラパルサー星雲の広がりが測定されたといえる。

さらに、スペクトル解析からは、以下ののような結果を得た。まず、0.2–10 keV のスペクトルは、温度・アバダンスの異なる 2 種類の熱的放射と 1 種類の非熱的放射の計 3 成分から説明できること、それら 3 成分が空間的に異なる分布を持つことを明らかにした。特に、これまでパルサーからのジェットだと考えられていた構造が、実は熱的成分でありパルサー起源でないことを明瞭に示した。2 種類の熱的成分に関しては、各成分のアバダンスから、低温成分 (~0.1 keV) が周囲の星間物質が衝撃波により掃き集められたもの、高温成分 (~0.3 keV) が超新星残骸起源のイジェクタであると判断した。非熱的成分に関しては、パルサーからの距離が離れるにつれスペクトルが軟化していくことがわかった。これは定性的にはシンクロトロン放射による冷却の効果で説明することができる。もしこの非熱的成分が TeV ガンマ線と同一の粒子群に起源を持つとすると (X 線はシンクロトロン、TeV ガンマ線は逆コンプトン)、この結果は TeV ガンマ線でも空間的なスペクトルの変化が観測されることを示唆する。さらに電波観測との比較から、ベラパルサー星雲がベラ超新星残骸に起源をもつイジェクタに囲まれている様子を明らかにした。この結果は、パルサー星雲からの放射と加速機構を研究するうえで、パルサー星雲単独ではなく、それらが付随する超新星残骸との相互作用も併せて考慮することが重要であることを示唆する。

(3) その他の天体に関する成果

カニパルサー星雲、ベラパルサー星雲の観測の他に、その他の主に超新星残骸についての観測的研究も並行しておこなった。これは、研究開始当初の目的に完全に沿ったものではないが、関連する領域として発展的に研究をおこなったものである。

まず、小マゼラン星雲の DEM L241、および、銀河系内の G330.2+1.0 の 2 つの天体から、新にパルサー候補を発見した。

また、ベラパルサー近傍に位置する超新星残骸 RXJ0852.0-4622 (Vela Jr.) を「すざく」衛星で観測した。Vela Jr. も TeV ガンマ線天体であり、プラズマ加速を調べる上で重要な天体である。我々はこの観測により、硬 X 線での詳細な姿を明らかにし、TeV ガンマ線とよい対応があることを示した。加えて、既に観測がおこなわれていた XMM 衛星によるデータを解析

し、Vela Jr. の衝撃波の膨張速度を測定した。この結果から、Vela Jr. の年齢と距離がこれまで考えられていた値よりもいずれも大きいほうが妥当であることを示した。

他にも、白鳥座ループ、Puppis A 等の熱的超新星残骸についても、X線での観測をおこない、アバンダンスの異常や高速で移動するイジェクタなどの発見をおこなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① Tsunemi, H., Kimura, M., Uchida, H., Mori, K., and Katsuda, S., “Another Abundance Inhomogeneity in the South East Limb of the Cygnus Loop”, 2009, Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, p147-153, refereed
- ② Tanaka, T., Uchiyama, Y., Aharonian, F.A, and 11 co-authors (Mori, K. at 10th), “Study of Nonthermal Emission from SNR RX J1713.7-3946 with Suzaku”, 2008, The Astrophysical Journal, 685, p988-1004, refereed
- ③ Katsuda, S., Tsunemi, H., Kimura, M., and Mori, K., “Chandra Observations of the Northeastern Rim of the Cygnus Loop”, 2008, The Astrophysical Journal, 680, p1198-1205, refereed
- ④ Katsuda, S., Tsunemi, H., and Mori, K., “The Slow X-Ray Expansion of the Northwestern Rim of the Supernova Remnant RX J0852.0-4622”, The Astrophysical Journal, 2008, 678, L35-L38, refereed
- ⑤ Katsuda, S., Mori, K., Tsunemi, H., Park, S., Hwang, U., Burrows, D.N., Hughes, J.P., and Slane, P.O., “Discovery of Fast-Moving X-Ray-Emitting Ejecta Knots in the Oxygen-Rich Supernova Remnant Puppis A”, The Astrophysical Journal, 2008, 678, p297-302, refereed
- ⑥ Yamaguchi, H., Koyama, K., Katsuda, S. and 7 co-authors (Mori, K. at 8th), “X-ray Spectroscopy of SN 1006 with Suzaku”, Publication of the Astronomical Society of Japan, 2008, 60, p141-152, refereed
- ⑦ Park, S., Slane, P.O., Hughes, J.P., Mori, K., Burrows, D.N., and Gordon, G.P., “Chandra X-Ray Study of Galactic Supernova Remnant G299.2-2.9”, The Astrophysical Journal, 2007, 665, p1173-1181, refereed
- ⑧ Mitsuda, K., and 142 co-authors (Mori, K. at 80th), “The X-ray Observatory Suzaku”, Publications of the Astronomical Society of Japan”, 2007, 59, p1-8, refereed
- ⑨ Park, S., Mori, K., Kargaltsev, O., Slane, P.O., Hughes, J.P., Burrows, D.N., Gordon, G.P., and Pavlov, G.G., “Discovery of a Candidate Central Compact Object in the Galactic Nonthermal SNR G330.2+1.0”, 2006, The Astrophysical Journal, 653, L37-L40, refereed
- ⑩ Bamba, A., Ueno, M., Nakajima, H., Mori, K., and Koyama, K., “A detailed observation of a LMC supernova remnant DEM L241 with XMM-Newton”, 2006, Astronomy & Astrophysics, 450, p585-591, refereed

[学会発表] (計 10 件)

- ① 森浩二、「X線によるパルサー星雲の観測的研究」、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月27-30日、立教大学
- ② 北園武、森浩二、内山 泰伸、高橋 忠幸、田中 孝明、平賀 純子、「すざく衛星による超新星残骸 Vela Jr. 北部のマッピング解析」、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008 年 9 月 11-13 日
- ③ Mori, K., Yamamoto, M., Kargaltsev, O., Pavlov, G.G., Takata, J., Shibata, S., and Tsunemi, H., “Suzaku mapping observation of the Vela X”, 37th COSPAR Scientific Assembly, 2008 July 13th-17th, Montréal, Canada
- ④ 森浩二、「すざくで見る Vela X」、高エネルギーガンマ線天体研究会、2008 年 3 月 24-27 日、東京大学宇宙線研究所
- ⑤ Mori, K., Yamamoto, M., Kargaltsev, O., Pavlov, G.G., Takata, J., Shibata, S., and Tsunemi, H., “The Suzaku view of the Vela X central region”, The Suzaku X-ray Universe, 2007 December 10th-12th, Sandiego, USA
- ⑥ 森浩二、勝田 哲、常 深博、「An Observational Approach to Supernova explosion mechanism with X-ray Studies of the remnants」、超新星を舞台とする高エネルギー現象、2007 年 2 月 1-3 日、東京大学
- ⑦ Mori, K., Kargaltsev, O., Pavlov, G.G.,

Yamamoto, M., Shibata, S., Takata, J., and Tsunemi, H., "A hard X-ray view of Vela X with Suzaku", The extreme universe in the Suzaku era, 2006 年 12 月 4-8 日

- ⑧ Yamamoto, M., Mori, K., Burrows, D.N., Pavlov, G.G., Hester, J.J., Shibata, S., and Tsunemi, H., "An X-ray Study of fine structures of the Crab Nebula", The extreme universe in the Suzaku era, 2006 年 12 月 4-8 日
- ⑨ Mori, K., Yamamoto, M., Kaminishizono, I., Shibata, S., Burrows, D.N., Pavlov, G.G., Hester J.J., and Tsunemi, H., "X-ray monitoring observations of the Crab Nebula", 36th COSPAR

Scientific Assembly, 2006 July 16th-23th

- ⑩ Yamamoto, M., Mori, K., Shibata, S., Tsujimoto, M., Misawa, T., Burrows, D.N., and Kawai, N., "Near-infrared observations of the variable Crab Nebula"

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 浩二 (MORI KOJI)

宮崎大学・工学部材料物理工学科・准教授

研究者番号：00404393