

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22740119

研究課題名（和文）

超新星残骸の広域分子雲探査による高エネルギー放射起源の解明

研究課題名（英文）

Study of an origin of high energy radiation in Super Nova remnants by large scale survey

研究代表者

山本 宏昭 (HIROAKI YAMAMOTO)

名古屋大学・理学研究科・助教

研究者番号：70444396

研究成果の概要（和文）：

NANTEN2 望遠鏡を用いて複数の超新星残骸全体に対して $^{12}\text{C0}(J=1-0, 2-1)$ 、 $^{13}\text{C0}(J=1-0)$ 輝線のスキャン観測を実施し、付随する分子雲の全貌を明らかにした。また、水素原子雲のデータも活用することにより、全星間陽子の分布を明らかにし、ガンマ線との比較を通して、ガンマ線放射の陽子起源説を指示する結果を得た。さらに宇宙線陽子のエネルギーが超新星残骸のエネルギーの0.1-1%程度であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

$^{12}\text{C0}(J=1-0, 2-1)$ and $^{13}\text{C0}(J=1-0)$ observations by scanning method have been carried out several super nova remnants by NANTEN2 telescope, and whole distribution of molecular clouds associated with super nova remnants is revealed. All interstellar gas associated with super nova remnants are estimated by using not only CO data but also data of molecular hydrogen. The interaction between cosmic ray proton and dense interstellar gas is suggested as the origin of the gamma-ray emission from comparison of distribution of interstellar gas with that of gamma-ray emission. In addition, the energy of cosmic ray proton is estimated to be 0.1-1% of the total energy of super nova remnant.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：電波天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：分子雲、超新星残骸、ガンマ線、星間陽子

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発は多大なエネルギーを星間空間に注入し、銀河面内での分子雲の形成・破壊を支配する一因となっている。HESS TeVガンマ線望遠鏡の目覚ましい活躍により、超新

星残骸(SNR)に付随するTeVガンマ線の様子が明らかになってきた。一方で「なんてん」によって得られたHESSと空間的に十分比較可能な銀河面の高域分子雲地図(Miuno & Fukui 2004)を使用してSNRに付随するTeVガンマ線と分子雲との比較が精力的に行なわ

れてきた (Aharonian et al. 2006, 2007, 2008)。さらに Fermi ガンマ線衛星による MeV-GeV 域の全天観測が行われており、SNR において MeV-TeV にわたるガンマ線のエネルギー分布を知ることができつつある。

RX J1713-3946 は非熱的 X 線放射 (Koyama et al. 1997) や TeV ガンマ線放射 (Aharonian et al. 2006) が検出されている 1 度 × 1 度程度の大きさの SNR である。「なんてん」による分子雲観測の結果から、SNR までの距離は 1 kpc 程度、年齢が 1600 年程度と見積もられた若い SNR である (Fukui et al. 2003, Moriguchi et al. 2005)。近年、TeV ガンマ線放射と「なんてん」で得られた分子雲の比較も行われた (Aharonian et al. 2006)。この天体については NANTEN2 望遠鏡を用いた ^{12}CO (J=2-1) 輝線の詳細観測が実施され、SNR に付随する高励起分子雲の全貌が 90" の分解能で明らかになった。これらのデータから TeV ガンマ線との比較が詳細にできるようになり、SNR 内の個々の領域において、TeV ガンマ線の起源に関する議論が可能となった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、NANTEN2 望遠鏡による CO の高励起線観測を複数の SNR 全体に対して行い、分子雲の物理パラメータを明らかにすること、また、Fermi、HESS のガンマ線衛星のデータを用いて SNR での衝撃波加速の物理、ガンマ線放射起源の詳細を明らかにすることである。ガンマ線の宇宙線陽子起源、宇宙線電子起源はそのエネルギースペクトル分布から推定は可能であるが、特にガンマ線放射が宇宙線陽子起源である場合は相互作用する密度の高い星間物質の存在が必要不可欠である。そのため、星間空間でも密度の高い分子雲の分布を明らかにすることは陽子起源を特定するのに役立つ。複数の CO 輝線の観測から LVG (Large Velocity Gradient) モデル (Goldreich & Kwan 1974) を用いることにより、密度・温度等の詳細な物理パラメータを導出する。また、全星間陽子を特定するため、同様に水素原子雲 (HI) の量も同定し、ガンマ線との比較を行う。さらにガンマ線強度から宇宙線パラメータの導出も行う。

3. 研究の方法

本研究を遂行、達成するための手段は大きく以下の 3 つに分けられる。

(1) NANTEN2 4m 望遠鏡による一酸化炭素分子輝線の観測

SNR に付随する分子雲の全貌、またその分子雲の物理状態をより詳細に解明するため、NANTEN2 望遠鏡を用いて、 ^{12}CO の観測を J=1-0 輝線を含めた高励起線の観測を広範囲に行う。また、 ^{13}CO 輝線についても観測を行う。現在 NANTEN2 望遠鏡にはこれらの輝線を観測するための装置が搭載されており、円滑に観測を行うことができる。これらすべての輝線についてナイキストサンプリングのスキャン観測 (On The Fly = OTF) を実施し、分子雲をもれなく検出する。これらの結果を用いて、分子雲の物理量を詳細に解明する。CO について多準位のデータを用いると LVG モデルを適用することができ、分子雲の温度、密度等重要なパラメータを精度良く求めることが可能となる。

(2) 水素原子雲の観測、全星間陽子の特定

超新星残骸には分子雲だけでなく、水素原子雲 (HI) も付随している。SNR に付随する全星間陽子を特定するためには、HI も考慮に入れなければならない。その上でガンマ線と比較することが必要不可欠である。HI のデータについては ATCA+PARKS による銀緯 ± 1.5 度を 2 分角程度でカバーしているアーカイブデータを用いて解析を行う。アーカイブデータがない領域については、新規観測の提案をする。これらのデータを用いて SNR に付随する全星間陽子を同定する。

(3) MeV から TeV にわたるガンマ線観測データを用いたガンマ線の起源の解明

Fermi 衛星、HESS 望遠鏡によるガンマ線データと全星間陽子の比較を行い、ガンマ線の起源を明らかにする。ガンマ線のスペクトルエネルギー分布については論文を引用する。ガンマ線のイメージと全星間陽子の分布、スペクトルエネルギー分布を比較することによって、ガンマ線の起源を明らかにし、宇宙線パラメータの導出を行う。

4. 研究成果

(1) NANTEN2 望遠鏡による観測

W44、RX J0852.0-4622 (Vela Jr.)、HESS J1614-518 に対して ^{12}CO (J=2-1) 輝線観測を行い、90" 角の分解能で詳細な分子雲の分布を明らかにした (図 1 は W44 領域の ^{12}CO (J=2-1) 輝線の積分強度図)。

^{12}CO 、 ^{13}CO (J=1-0) 輝線の観測を IC443 を含め、複数の SNR に対して行なった。これまでは「なんてん」の 4 分角のアンダーサンプリングのデータしかなかったが、OTF 観測により、フル

サンプリングのデータを取得し、もれなく分子雲を検出したことで、完全な分子雲地図を得ることができた。特にIC433では分子雲は赤外線との相関が非常に良い一方で、可視光とはきれいに反相関することを明らかにした。

また、RX J1713.7-3946の一部の領域について、 $^{12}\text{CO}(J=7-6)$ 、 $\text{CI}(^3\text{P}_2-^3\text{P}_1, ^3\text{P}_1-^3\text{P}_0)$ 輝線の高感度観測を実施した。

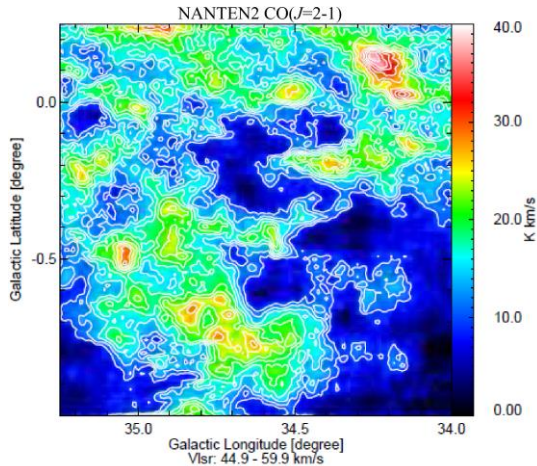


図 1. W44 領域の $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線の積分強度図。

(2) 水素原子雲の観測、全星間陽子の特定

Vela Jr. の一部(銀緯が -1.5 度より高い領域)は ATCA+PARKES のアーカイブデータが存在しないため、ATCA 干渉計に観測提案を出し、該当部分の観測を行った。そのデータと既存の Parkes のデータを合成し、既存のアーカイブデータと組み合わせることで Vela Jr. に付随する HI の全貌を初めて明らかにした。

W44, Vela Jr., RCW86 に対して CO と HI から SNR に付随する全星間陽子の個数とその分布を明らかにした(図2: Vela Jr. の例)。特に W44 においては、平均密度は 200cm^{-3} であり、ほとんどが分子雲で構成されていることを明らかにした。

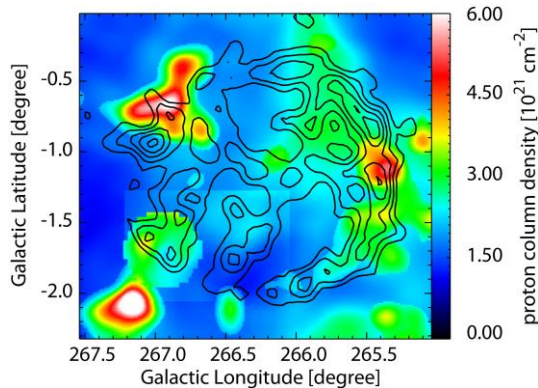


図 2. Vela Jr. 領域の全星間陽子の分布(カラー)と TeV ガンマ線(コントア)の比較。

(3) MeVからTeVにわたるガンマ線観測データを用いたガンマ線の起源の解明

Fermi チームと共同で W28 において分子雲とガンマ線の比較研究を行い、ガンマ線のスペクトル、ガンマ線と星間陽子の分布の比較から放射起源が陽子起源である可能性について言及した。

Vela Jr. については星間陽子とガンマ線強度が角度方向においてよい一致を示すことを発見した。これはガンマ線放射が陽子起源を示唆するものである(図2)。W44 において Agile 衛星、Fermi 衛星の GeV ガンマ線と全星間陽子がよい一致を示し、ガンマ線放射が陽子起源で矛盾なく説明できることを示した。宇宙線陽子のエネルギーを導出し、SNR 全体のエネルギーの 1%程度であることを明らかにした。また、ガンマ線のスペクトルは SNR の領域内で一様でなく異なっていることを発見した。Vela Jr., RCW86 についてもガンマ線放射が陽子起源として、宇宙線陽子のエネルギーを推定した。計3つの SNR において、宇宙線陽子のエネルギーは SNR 全体のエネルギーの 0.1-1%程度であり、若い SNR ほど宇宙線陽子のエネルギーが小さいことを発見した。また、RX J1713.7-3946 に対しても全星間陽子と TeV ガンマ線の比較を行ない、HI ガスを考慮に入れると星間陽子とガンマ線の相関がよくなることを発見した。特に吸収線で見える冷たく密度の高い HI ガスの存在が重要であることをつきとめた(Fukui et al. 2012)。

SNR G8.7-0.1 に対して、「なんてん」望遠鏡で取得した $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線と Fermi 衛星の GeV ガンマ線、HESS 望遠鏡の TeV ガンマ線との比較を行ない、ガンマ線放射起源が宇宙線陽子起源である可能性を示唆した。(Ajello et al. 2012)。

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 15 件)

1. Yoshiike, S. (1 番目), Yamamoto, Y. (9 番目), 著者総数=20 名, The Neutral Interstellar Gas toward SNR W44: Candidates for Target Protons in Hadronic γ -Ray Production in a Middle-aged Supernova Remnant, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 768, article id.179 (10pp), 2013
2. Acharya, B. S. (アルファベット順: 1 番目), Yamamoto, H. (アルファベット順:

- 953 番目), 著者総数=977 名, Introducing the CTA concept, Astroparticle Physics, 査読有, Vol.43, pp.3-18, 2013
3. Ackermann, M. (アルファベット順: 1 番目), Yamamoto, H. (アルファベット順: 161 番目), 著者総数=164 名, Fermi Large Area Telescope Study of Cosmic Rays and the Interstellar Medium in nearby Molecular clouds, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.755, article id.22 (16pp), 2012
 4. Fukui, Y. (1 番目), Yamamoto, H. (11 番目), 著者総数=17 名, A Detailed Study of the Molecular and Atomic Gas toward the γ -Ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946: Spatial TeV γ -Ray and Interstellar Medium Gas Correspondence, The astrophysical Journal, 査読有, Vol.746, article id. 81(18pp), 2012
 5. Ajello, M. (アルファベット順: 1 番目), Yamamoto, H. (アルファベット順: 144 番目), 著者総数=149 名, Fermi Large Area Telescope Observations of the Supernova Remnant G8.7-0.1, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.744, article id.80 (11pp), 2012
 6. Abdo, A. A. (アルファベット順: 1 番目), Yamamoto, H. (アルファベット順: 161 番目), 著者総数=164 名, Observations of the Young Supernova Remnant RX J1713.7-3946 with the Fermi Large Area Telescope, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.734, article id.28 (9pp), 2012
 7. Sano, H. (1 番目), Yamamoto, H. (5 番目), 著者総数=26 名, Star-forming Dense Cloud Cores in the TeV Gamma-ray SNR RX J1713.7-3946, 査読有, vol.724, pp.59-68, 2010
 8. Casanova, S. (1 番目), Yamamoto, H. (11 番目), 著者総数=11 名, Modeling the Gamma-Ray Emission Produced by Runaway Cosmic Rays in the Environment of RX J1713.7-3946, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.62, pp.1127-1134, 2010
 9. Abdo, A. A. (1 番目), Yamamoto, H. (150 番目), 著者総数=154 名, Fermi Large Area Telescope Observations of the Supernova Remnant W28 (G6.4-0.1), The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.718, pp.348-356, 2010
 10. Casanova, S. (1 番目), Yamamoto, H. (11 番目), 著者総数=11 名, Molecular Clouds as Cosmic-Ray Barometers, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.62, pp.769-777, 2010
- [学会発表] (計 14 件)
1. 山本宏昭, NANTEN2 の近況: NASCO 計画に向けて, 受信機ワークショップ, 2013.2.27, 名古屋大学
 2. Yamamoto, H., NASCO - NANTEN2 Super CO survey-, International Workshop on CMB "Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components, 2012.10.18, Hotel Okura meeting room, Kyoto
 3. 山本宏昭, 星間物質と高エネルギージェットとの相互作用による分子雲形成 - 網羅的サーベイを通して -, ジェット研究会, 2012.10.9, 名古屋大学
 4. Yamamoto, H., Observations of colliding molecular clouds, Workshop "Cloud collisions and triggered high-mass star formation", 2012.7.3, Hokkaido University
 5. Yamamoto, H., Mopra telescope -NANTEN2 context 1, ALMA Workshop "Science with Mopra for the ALMA", 2012.6.8, NAOJ, Mitaka
 6. 山本宏昭, 『なんてん』銀河面サーベイデータを用いたメーザー源の探索, メーザーと分子雲観測, 2012.4.5, 名古屋大学
 7. 山本宏昭, NANTEN Legacy CO Survey, 研究会「南天の大質量星形成」, 2012.1.12, 名古屋大学
 8. 山本宏昭, NASCO 計画 -NANTEN2 望遠鏡新 CO 輝線探索計画-, 宇宙電波懇談会シンポジウム, 2011.12.15, 東京大学
 9. Yamamoto, H., Super CO survey with NANTEN2, CMB workshop in Tokyo,

2011.2.17, Tokyo

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本宏昭 (YAMAMOTO HIROAKI)

名古屋大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：70444396