

## 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 5月 1日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740167

研究課題名（和文）GeVガンマ線全天サーベイによる超新星残骸における宇宙線加速の系統的研究

研究課題名（英文）Systematic study of cosmic-ray acceleration in supernova remnants using the all-sky survey data in GeV gamma rays

研究代表者

片桐 秀明 (KATAGIRI Hideaki)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：50402764

研究成果の概要（和文）：フェルミ・ガンマ線衛星によって、星が死ぬ時の大爆発である超新星の残骸である Cygnus Loop、G8.7-0.1、W44 の周辺を観測した。その結果、付随するガスに空間的に対応したギガ電子ボルトの高エネルギーガンマ線放射を発見した。ガンマ線データを詳細に調べた結果、どれも高エネルギーの原子核「宇宙線」が超新星残骸で加速されガスと反応していることを示唆していた。本研究によって、今後、系統的に宇宙線の加速・拡散過程を理解する上で有用となるデータが得られた。

研究成果の概要（英文）：We observed the supernova remnant Cygnus Loop, G8.7-0.1, and W44 with the Large Area Telescope (LAT) on board the Fermi Gamma-ray Space Telescope and found GeV gamma-ray emission from the surrounding material around them. The gamma-ray data are well modeled with emission due to interactions between cosmic rays accelerated in the SNRs and gas, which provides new systematic constraints on understanding particle acceleration and release in the medium.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：宇宙ガンマ線観測

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ガンマ線、超新星残骸、フェルミ衛星、宇宙線、粒子加速、拡散、分子雲

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙は人工加速器を遥かに凌駕するエネルギーまで粒子（宇宙線）を加速している。宇宙線がどこでどのように加速されているか、即ちなぜ宇宙がこのような超高エネルギーの粒子を加速しなければならないのか（宇宙線起源）は、宇宙線が発見されて以来100年たった今でも解決していない宇宙物理学

上の問題である。特に銀河内の宇宙線の主要な加速源は、超新星残骸（SNR）と考えられている（SNRの宇宙線起源仮説）。銀河内の莫大な宇宙線の総エネルギーを供給できるのは他に考えにくいためである。観測的にこの仮説を立証するには、宇宙線と加速源近傍の星間物質または磁場と相互作用する際に生じる電磁波の観測が有効である。地球近傍

の宇宙線は直接検出することが可能であるが、加速源からの伝搬過程で星間磁場により軌道が曲がるため加速源を特定することは難しい。電磁波の中で特に宇宙線の主成分である陽子をプローブする強力なツールは、GeV (10<sup>9</sup>eV ; ギガ電子ボルト) 付近のガンマ線である。陽子が星間物質と相互作用した際に生じる $\pi^0$ 粒子の崩壊で生じるためである。このエネルギー領域においては銀河面天体を同定するのに必要な1度を切る高空間分解能で測定する方法は近年までなかったが、2008年に本研究代表者の参加するチームが打ち上げたフェルミ衛星によってGeVガンマ線ソースをSNRに同定できるようになった。2009年10月までにICC443, W44, W51C, W28 (W28は研究代表者が主著者の論文)といったSNRが宇宙線陽子加速源として自然に説明できることが明らかになってきた。これらの発見により、宇宙線起源仮説は部分的には解決したと言ってもよい。しかし、上記のSNRはすべて年齢が比較的早く密度の高い分子雲に強く相関するという特殊な環境にある。これは一体何を意味するのだろうか?一つには、宇宙線加速を行うSNR共通の特徴を捉えている可能性がある。しかし、SNRの統計数が少ない上、ガンマ線の放射効率は分子雲の質量に比例するため、単に観測的なバイアスの結果かもしれない。

## 2. 研究の目的

本研究では、(1)フェルミ衛星の全天GeVガンマ線観測によってガンマ線で暗いSNRまでエネルギースペクトルを求め、さらに(2)各々のSNRに対してCO(一酸化炭素輝線)のデータを用い相互作用する分子雲の質量を求め、(1)(2)を合わせてSNRによって加速された宇宙線の総エネルギーを求める。これにより、宇宙線の総加速エネルギーとSNRの年齢および分子雲質量の関係を求める。

## 3. 研究の方法

方法としては、大きく分けて

- (1) 対象となるSNRの選定
- (2) フェルミ衛星データのスペクトル解析
- (3) COデータなどSNRの周辺物質をトレースする電波輝線データの解析による周辺の物質環境の探査
- (4) (2)(3)の結果をもとにした宇宙線加速の理論的な考察

となる。以下に詳述する。

- (1) 対象となるSNRの選定

具体的なSNR候補を選定するにあたって、本研究の申請当時(2009年10月)時点では、当初で最新となるGeVガンマ線のpreliminaryなソースカタログを考えた。こ

のカタログは、フェルミ衛星の11ヶ月の全天サーベイデータに対し、フェルミチーム内のカタロググループがパイプライン的な自動解析によって求めたものである。本来SNRは、近傍では広がったソースとして観測されるはずなので形状を考慮した解析が必要であるが、この自動解析では形状を点源として仮定している。SNRに空間的に対応した天体であったとしても、真に点源状である場合、パルサー等、他の天体の可能性があるのでSNRと同定することが難しくなる。よって、フェルミ・ガンマ線ソースカタログ中のソースと空間相関のあるSNRの周辺のガンマ線マップを作成し、フェルミ衛星の角度分解能より明らかに広がっていると考えられる天体を抽出する方法をとる。

(2) フェルミ衛星データのスペクトル解析広がりには分子雲等の他の波長との空間的相関の他に、パルサー起源の放射である可能性を棄却できるため重要である。(1)で選別したSNRが実際に広がっているか、また、どのような形状で広がっているかを定量的に評価するために、様々な広がりを持つソースモデルを加えて最尤法(likelihood法)で観測データをフィットする。Likelihoodの最大となるようなソースモデルを求めることで広がりおよびその有意度が評価できる。

有意な広がりが検出できた天体に対しては、さらにエネルギー領域毎にLikelihood解析を行い、フィットパラメータとしてフラックスを求めることで、エネルギースペクトルを計算する。

ただし、Likelihood解析に用いるバックグラウンドモデル(目標とする天体以外のガンマ線分布を表現するモデル)は目標とする天体周辺の領域で必ずしも精度よくモデル化できているとは限らない。そこで、異なる種類のバックグラウンドモデルを採用した場合のスペクトルを求め、標準のバックグラウンドモデルを採用した場合のフラックスと比較し、それらの差で系統誤差を評価する。

(3) COデータなどSNRの周辺物質をトレースする電波輝線データの解析による周辺の物質環境の探査

名古屋大・福井氏の協力のもと、NANTEN望遠鏡のCOデータを用い、目標とする天体周辺の分子雲の分布を求める。さらに、COではトレースが難しいガスの成分を探すために、IRAS衛星の赤外線データなどを併用する。

(4) (2)(3)の結果をもとにした宇宙線加速の理論的な考察

まずは、ガンマ線と周辺ガスの空間的な相関を調べる。GeVガンマ線領域では、電子起源の放射(逆コンプトン散乱など)と陽子起源の放射( $\pi^0$ 粒子の崩壊)がありうるが、陽子起源の放射の場合、周辺ガスの分布に強く相関するはずであり、加速粒子を特定する情

報になる。さらに、ガンマ線のエネルギースペクトルに他の波長のスペクトル情報を追加した多波長スペクトルを作成し、放射の理論モデルと比較することによって加速粒子種を決定する。理論モデルのフィットパラメータとして宇宙線の加速総エネルギーが求まる。

#### 4. 研究成果

平成22年度～平成23年度は、フェルミ衛星1年目カタログでSNRに空間相関が認められた比較的明るめの天体のうち、詳細解析が進んでおらずかつガンマ線で広がっている空間分布の相関を調べやすい天体であるG8.7-0.1、Cygnus Loop、W44（この天体は立教大・内山氏が研究を主導）について解析を進めた。分子雲との相関を調べた結果、G8.7-0.1は、これまでの比較的年をとったSNRの観測と同じく分子雲との相関が確認された一方（雑誌論文②）、Cygnus Loopは分子雲とガンマ線の相関していないという特異な性質が見つかった（雑誌論文③）。W44に関しては、もともとガンマ線で明るいSNRであったが、2年強のデータを蓄積した結果、SNRの外側まで広がったガンマ線構造が見つかった。これは、宇宙線が加速領域から逃げ出して拡散し、近傍の分子雲と反応して生じたものと考えられる（雑誌論文①）。年齢や周辺環境（ガスの密度）が様々であるSNRから宇宙線原子核の加速を示唆する結果が得られたので、今後、系統的に宇宙線の加速・拡散過程を理解する上で有用であると考えられる。

平成23年度までの研究の結果を考慮して、平成24年度は、（1）フェルミ衛星1年目カタログのSNRの詳細な空間分布の評価を行った。現在、4年以上のデータが蓄積されたため、これらの天体を再度、NANTENグループのCO分子線データと詳細に比較した。特にW28では詳細な分布が見え始めたので、論文化を行っている。現在、フェルミチームでの内部査読中であり、近日中に投稿予定である。（2）微弱なSNRへのガンマ線解析のさらなる拡張を行った。データ解析により、多くのSNR周辺のガンマ線放射分布を検討した結果、Monoceros Loop SNRからと思われる広がった放射を発見した。現在、鋭意解析中であり、こちらも論文化の予定である。

#### 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3件）

- ① Uchiyama, Y., Funk, S., Katagiri, H., et al. “Fermi Large Area Telescope Discovery of GeV Gamma-Ray Emission

from the Vicinity of SNR W44” The Astrophysical Journal Letters, 749, L35-L39 (2012)、査読有、DOI: 10.1088/2041-8205/749/2/L35

- ② Ajello M., Hanabata Y., Katagiri H., et al. （研究代表者が Contact Author）” Fermi Large Area Telescope Observations of the Supernova Remnant G8.7-0.1” The Astrophysical Journal, 744, 80-90 (2012)、査読有、DOI:10.1088/0004-637X/744/1/80

- ③ Katagiri H. et al. ” Fermi Large Area Telescope Observations of the Cygnus Loop Supernova Remnant” The Astrophysical Journal 741, 44-52 (2011)、査読有、DOI: 10.1088/0004-637X/741/1/44

〔学会発表〕（計6件）

- ① 花畑義隆、深沢泰司、水野恒史、高橋弘充、大野雅功、田中康之、大杉節（広島大学）、片桐秀明（茨城大学）、福井康雄、早川貴敬（名古屋大学）、他 Fermi-LAT Collaboration 口頭発表「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星残骸 W28 周辺領域の観測」日本天文学会（埼玉大学、2013年3月22日）
- ② 花畑義隆、深沢泰司、水野恒史、高橋弘充、大杉節、片桐秀明、山崎了、福井康雄、山本宏昭、窪秀利、Omar Tibolla、他 Fermi LAT Collaboration 口頭発表「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星残骸 G8.7-0.1 の観測と放射機構の考察」日本天文学会（鹿児島大学、2011年9月22日）
- ③ 片桐秀明、Luigi Tibaldo、Jean Ballet、Francesco Giordano、Isabelle A. Grenier、Troy A. Porter、Marshall Roth、Omar Tibolla、内山泰伸、山崎了 口頭

発表「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星残骸「白鳥座ループ」の観測と放射機構の考察」 日本天文学会（鹿児島大学、2011年9月22日）

- ④ 片桐秀明、Luigi Tibaldo、Jean Ballet、Francesco Giordano、Isabelle A. Grenier、Troy A. Porter、Marshall Roth、Omar Tibolla、内山泰伸、山崎了 口頭発表「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星残骸「白鳥座ループ」の観測と放射機構の考察」 日本物理学会（弘前大学、2011年9月18日）
- ⑤ 花畑 義隆、片桐 秀明、他 Fermi-LAT Collaboration 口頭発表「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星残骸 G8.7-0.1 の観測」日本物理学会（新潟大学、2011年3月26日）
- ⑥ 花畑 義隆、片桐 秀明、他 Fermi-LAT Collaboration 口頭発表「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星残骸 G8.7-0.1 の観測」日本天文学会（筑波大学、2011年3月18日）

[その他]

ホームページアドレス

- [http://golf.sci.ibaraki.ac.jp/members/katagiri/articles/110926/1109\\_cygnus\\_loop.htm](http://golf.sci.ibaraki.ac.jp/members/katagiri/articles/110926/1109_cygnus_loop.htm)
- <http://www.ibaraki.ac.jp/news/2011/09/281918.html>
- <http://www.sci.ibaraki.ac.jp/01aboutsci/topics.html>

学会誌

- 花畑義隆、片桐秀明、「超新星残骸の折れ曲がったガンマ線スペクトルについての研究」、日本天文学会 天文月報 2012年 Vol. 105, No. 6  
(ガンマ線イメージが表紙の挿絵として採用された)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

片桐 秀明 (KATAGIRI HIDEAKI)  
茨城大学・理学部・准教授  
研究者番号：50402764

### (4) 研究協力者

水野 恒史 (MIZUNO TSUNEFUMI)  
広島大学・宇宙科学センター・准教授  
研究者番号：20403579

福井 康雄 (FUKUI YASUO)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：30135298

山崎 了 (YAMAZAKI RYO)  
青山学院大学・理工学部・准教授  
研究者番号：40420509

花畑 義隆 (HANABATA YOSHITAKA)  
東京大学・宇宙線研究所・研究員  
研究者番号：30711923