

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800160

研究課題名(和文) 硬X線およびガンマ線を用いた星形成領域における宇宙線加速と伝播の研究

研究課題名(英文) Study of cosmic-ray acceleration and propagation processes in star-forming regions using high energy X rays and soft gamma rays

研究代表者

林 克洋 (Hayashi, Katsuhiro)

名古屋大学・理学研究科・研究員

研究者番号：40713863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、星形成領域のX線やガンマ線観測から、宇宙線の加速/伝播についての観測的制限を目指した。「ひとみ」衛星の喪失により、X線や軟ガンマ線の観測データを用いた研究はできなかったが、Fermi衛星によるGeVガンマ線と、Planck衛星によって取得されたダストの光学的厚さをベースとする星間ガスの分布をと詳細に比較することで、カメレオン分子雲領域についてガスの柱密度を精密に測定することに成功した。そして原子ガスの柱密度が、場所によって従来の1.3-1.5倍程度に大きくなる可能性を明らかにした。その結果得られた宇宙線スペクトルは、太陽系近傍において概ね一様であることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to reveal cosmic-ray acceleration and propagation processes in the local interstellar medium using X-ray and gamma-ray data. Due to an incident of the Hitomi satellite, we could not perform analyses using X-ray and soft gamma-ray data, but we succeeded to accurately measure the mass of the atomic hydrogen for a local molecular cloud complex, Chamaeleon region, through comparing GeV gamma rays obtained by Fermi with a gas column density model based on dust optical depth estimated from the Planck dust emission model. The obtained hydrogen column density is 1.3-1.5 times larger than that measured by previous estimates. Based on this column density model, we derived a cosmic-ray spectrum in the Chamaeleon region, which suggests a uniform cosmic-ray density in the vicinity of the solar system.

研究分野：ガンマ線天文学

キーワード：水素原子ガス 光学的厚さ 宇宙線スペクトル 軟ガンマ線検出器

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間には、光速で飛び交う高エネルギー荷電粒子「宇宙線」が分布している。宇宙線のエネルギー密度は、星間空間や星間磁場のエネルギー密度に匹敵するもので、そのスペクトルや空間分布を測定することは、宇宙線加速起源やその拡散・伝播過程を明らかにする上で重要な情報となる。しかし、直接測定ができない太陽系外の宇宙線については、観測的にはほとんど明らかにされていない。一方で宇宙線は、分子雲などの星間ガスと衝突することで、核子相互作用や制動放射によるガンマ線を放射する。このガンマ線スペクトルはその場の宇宙線スペクトルを直接反映するので、ガンマ線観測から宇宙線の空間分布を明らかにすることができる。

2008年に打ち上げられた Fermi 衛星搭載 LAT 検出器は、先代のガンマ線観測機器をはるかにしのぐ感度や空間・エネルギー分解能を有し、星形成領域を伴った分子雲などからの広がったガンマ線を検出し、銀河系内における宇宙線研究において、新たな知見を生み出した。そして、太陽系近傍 500 パーセク(約 1500 光年)以内に分布する分子雲領域についても、より精度の高いガンマ線スペクトルの導出を可能にさせた。その一方で、宇宙線スペクトルの探査には、ガンマ線を生み出す元となる星間物質の姿を正確に再現することが新たな課題として浮き上がってきた。

宇宙線加速のトレーサーとしては、GeV ガンマ線だけでなく、宇宙線電子の加速によって生じる硬 X 線帯域でのシンクロトロン X 線の検出も重要なターゲットとなる。星形成領域を含む太陽系近傍の分子雲からは、先代の衛星によって、Al (1.8 MeV) からの核ガンマ線が検出された。こうした星形成領域でのシンクロトロン X 線や、軟ガンマ線帯域での核ガンマ線(Ni, Be, 陽子電子対生成による 511 keV など)の検出を目指したのが、「ひとみ」(ASTRO-H)衛星に搭載された硬 X 線撮像検出器(HXI)並びに、軟ガンマ線検出器(SGD)であった。それまでもシンクロトロン硬 X 線の直接撮像や、数 100 keV における核ガンマ線は、検出が可能であると言われてきたが、はっきりとした成果は出ておらず、「ひとみ」衛星による観測での進展が期待された。

2. 研究の目的

太陽系近傍の星形成領域について、硬 X 線から GeV ガンマ線に渡るマルチバンドの観測・解析を行うため、以下の二つのことを主軸に研究を進めた。

(1) Fermi 衛星の観測データを用いて、星形成領域からのガンマ線放射を精査し、宇宙線スペクトルと宇宙線密度分布を求め、付随した分子雲内での宇宙線加速の有無や、分子雲周辺での宇宙線陽子/電子の拡散の様子を、30

パーセク程度のスケールで調査する。その際、分子/原子ガスの分布については、Planck 衛星で得られたダストの光学的厚さをガスのトレーサーとした、正確なガスの柱密度のモデルを採用する。

(2) 「ひとみ」衛星搭載の HXI/SGD 検出器の開発に貢献し、打ち上げ後は特に SGD を使った核ガンマ線を検出することで、得られた核種のフラックス・速度から、(1)で求めたその周辺環境との関連を探り、宇宙線加速の有無と伝播の様子シナリオを考察する。

3. 研究の方法

(1) Fermi 衛星のガンマ線データ解析

GeV ガンマ線の観測データから、宇宙線スペクトルを導出する際に必要となるのが、星間物質の情報である。ガンマ線は星間物質との相互作用によって生じるため、星間物質の測定精度は、宇宙線の定量的な測定に決定打を与える。しかし従来の研究では、星間ガスの大半を占める水素原子ガスは光学的に薄いものと仮定され、その結果に基づいたガスの物理状態や、宇宙線密度などの議論しか行われてこなかった。そのような中、Planck 衛星の観測データに基づくガス-ダスト比の推定より、水素原子ガスの多くは光学的に厚く、その多くが飽和により見落とされている可能性が指摘された(Fukui et al. 2014; 2015)。このガス-ダスト比は、しばしば一次の線形直線でモデル化されるが、分子雲の中心領域に対しは、それが非線形な関係を示す観測結果も指摘されていた。これらの星間ガスの観測結果をベースに、私はいくつかの星形成領域(分子雲領域)の中でも、比較的星形成活動が穏やかなカメレオン座分子雲領域に着目し、光学的に厚い水素原子ガスの存在を考慮して、ダストの光学的厚さに対して線形・非線形の関係をもつ複数のガスの柱密度のモデルをたて、宇宙線とガスの相互作用によって生じるガンマ線強度との相関を綿密に調査した。そしてガンマ線分布と最も整合が良いガスのモデルを決定することで、水素原子ガスを主体とする星間ガスを定量的に測定し、宇宙線スペクトルの導出を行った。

(2) 「ひとみ」衛星搭載 SGD 検出器の開発

SGD のメインセンサーとして搭載される合計 6 台のコンプトンカメラの単体環境試験に望み、それらが衛星搭載品として十分な性能を満たすか検証試験を実施した。その後は、各カメラのシールドとしての役割を果たす結晶シンチレータを SGD 本体に組み込み、ハウジングと合体させた後、それらのシールドが反同時計数の読み出しによる、バックグラウンド低減のための機能を十分に果たしているか確認試験を行った。フライトモデル品が完全に組み上がった後は、衛星に搭載される 2 台の SGD に対して、打ち上げの際にかか

る振動を模擬した振動試験や、実際の宇宙環境を模擬した熱真空試験など、数ヶ月に渡って実施された全ての試験に携わった。2015年度は、「ひとみ」衛星の打ち上げに向けて、筑波及び種子島で行われた最終的な衛星試験に参加し、SGDの動作検証及び性能評価を、チームの中心メンバーとして行った。一方で打ち上げ後の観測に向けてのキャリアレーションデータの構築や、偏光測定のためのSpring-8でのビーム試験にも参加し、検出器とデータプロセッシングシステムの開発に貢献した。衛星打ち上げ後は、内之浦にてSGDの立ち上げ並びに試験観測を行った。

4. 研究成果

(1) Fermi 衛星のガンマ線データ解析

Fermi 衛星によって得られたガンマ線データを、Planck 衛星によって得られたダストの光学的厚さをベースとするガスの柱密度のモデルとフィットすると、ガンマ線強度分布は、ダストの光学的厚さの $1/1.3$ 乗程度の非線形関数で表された柱密度で最もよく再現できることが分かった(図 1)。この結果は、水素原子ガスの柱密度が場所によって従来の 1.3 - 1.5 倍程度に大きくなる可能性を示唆する。またガス-ダスト間の非線形な関係は、分子雲とその周辺のダストの進化の度合いを反映した結果であると考えられる。

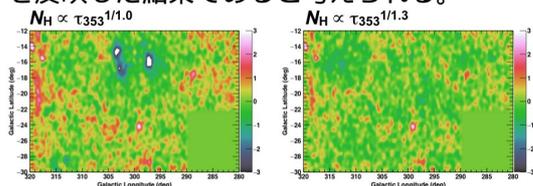


図 1: カメレオン座分子雲領域のガンマ線解析によって得られたガンマ線データとモデルの ratio マップ。ダストの光学的厚さ(353)に対して、冪が $1/1.0$ のモデル(左)より $1/1.3$ のモデルの方が、その比が 1 に近く、ガンマ線分布をよく再現できている。

一方、ガンマ線解析の結果得られた宇宙線スペクトルは、従来の解析方法によって得られてきたそれと系統誤差の範囲で一致した。従って、光学的に厚い水素原子ガスの存在を考慮した上でも、太陽系から数 100 パーセク内における宇宙線密度はおよそ一様であることを意味する。

本研究により、光学的に厚い水素原子ガスの存在を考慮した上での初めての宇宙線スペクトルの導出が導出され、今後の他の領域の解析を通じて、さらに正確な太陽系近傍領域の宇宙線分布の測定が期待させる。一方で光学的に厚い水素原子ガスは、原子/分子ガスの観測ではトレースが難しく組成の未解明な「ダークガス」を説明可能とするものであり、本研究によるガンマ線解析が星間ガス研究の観点でも重要な結果を導く可能性を示した。今後、他の領域の解析を通じて、太陽系近傍領域全体に渡った宇宙線スペクトルの測定や、それらに基づく宇宙線拡散過程

の解明が期待される。

(2) 「ひとみ」衛星搭載 SGD 検出器の開発

2014 年から 2015 年度末までの開発期間中には、ハードウェアのフライトモデル品の開発や、波形処理のためのパラメータサーチなどを行い、最適な観測モードを確立させた。そうした尽力により、SGD は 2014 年度末に無事に単体環境試験を突破した。これらの成果は、国内/国際学会で SGD チームの代表として報告している。衛星システム全体の試験が始まった 2015 年度以降も、打ち上げ後の観測に向けてのキャリアレーションデータの構築や、偏光測定のための Spring-8 でのビーム試験に貢献した。衛星打ち上げ後の 2016 年 3 月半ばからは、内之浦宇宙空間観測所にて SGD の立ち上げを行い、「かに星雲」のファーストライトに成功した。衛星の姿勢制御トラブルによる事故のため、SGD を用いた様々な星形成領域の観測は実現できなかったが、我々が開発してきた半導体を基礎とする狭視野コンプトンカメラが、高い感度で軟ガンマ線を検出し、さらに偏光観測も実現可能であることを実証した。この結果は、今後の軟ガンマ線帯域でのサーベイ観測や偏光観測を基盤とする衛星ミッションに向けて、重要なステップとなった。

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 11 件)

H. Odaka, K. Hayashi 他 (計 50 名, 研究代表者は 13 番目), “Modeling of proton-induced radioactivation background in hard X-ray telescopes: Geant4-based simulation and its demonstration by Hitomi’s measurement in a low Earth orbit”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 査読有, 891, 2018, 92-105, DOI: 10.1016/j.nima.2018.02.071

H. Tajima, K. Hayashi 他 (計 42 名, 研究代表者は 8 番目), “Design and Performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (ASTRO-H) Satellite”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 査読有, 4(2), 2018, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.2.021411

K. Hagino, K. Hayashi 他 (計 40 名, 研究代表者は 7 番目), “In-Orbit Performance and Calibration of the Hard X-ray Imager (HXI) onboard Hitomi (ASTRO-H)”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems,

査読有, 4(2), 2018, DOI:
10.1117/1.JATIS.4.2.021409

K. Nakazawa, K. Hayashi 他 (計 35 名,
研究代表者は 8 番目), “The hard X-ray
imager (HXI) onboard ASTRO-H”,
Journal of Astronomical Telescopes,
Instruments, and Systems, 査読有,
4(2), 2018, DOI:
10.1117/1.JATIS.4.2.021410

J. Katsuta, I. Edahiro, S. Watanabe, H.
Odaka, Y. Uchida, N. Uchida, T. Mizuno,
Y. Fukazawa, K. Hayashi, S. Habata, and
Y. Ichinohe, “Study of the
polarimetric performance of a Si/CdTe
semiconductor Compton camera for the
Hitomi satellite”, Nuclear
Instruments and Methods, 査読有, 840,
2016, 51-58, DOI:
10.1016/j.nima.2016.09.057

K. Nakazawa, K. Hayashi 他 (計 35 名,
研究代表者は 8 番目), “The hard x-ray
imager (HXI) onboard ASTRO-H”,
Proceeding of the SPIE, 査読無, 9905,
2016, DOI: DOI10.1117/12.2231176

S. Watanabe, K. Hayashi 他 (計 42 名,
研究代表者は 7 番目), “The soft
gamma-ray detector (SGD) onboard
ASTRO-H”, Proceeding of the SPIE, 査
読無, 9905, 2016, DOI:
10.1117/12.2231962

F. Acero, K. Hayashi 他 Fermi-LAT
Collaboration (計 172 名, 研究代表者は
99 番目), “Development of the Model of
Galactic Interstellar Emission for
Standard Point- source Analysis of
Fermi Large Area Telescope Data”
Astrophysical Journal Supplement, 査
読有, 223, 2016, 26-49, DOI:
10.3847/0067-0049/223/2/26

Y. Ichinohe, Y. Uchida, S. Watanabe, I.
Edahiro, K. Hayashi, T. Kawano, M. Ohno,
M. Ohta, S. Takeda, Y. Fukazawa, M.
Katsuragawa, K. Nakazawa, H. Odaka, H.
Tajima, H. Takahashi, T. Takahashi,
and T. Yuasa, “The First
Demonstration of the Concept
“Narrow-FOV Si/CdTe Semiconductor
Compton Camera”, Nuclear Instruments
and Methods in Physics Research
Section A, 査読有, 806, 2016, 5-13,
DOI: 10.1016/j.nima.2015.09.081

T. Mizuno, T. Tanabe, H. Takahashi, K.
Hayashi, R. Yamazaki, I. Grenier, and

L. Tibaldo, “Suzaku Observation of
the Fermi Cygnus Cocoon: The Search for
a Signature of Young Cosmic-Ray
Electrons”, Astrophysical Journal,
査読有, 803, 2015, 803, 2015, 74-82,
DOI: 10.1088/0004-637X/803/2/74

Y. Fukazawa, K. Hayashi, 他 (計 34 名,
研究代表者は 5 番目), “Soft gamma-ray
detector (SGD) onboard the ASTRO-H
mission”, Proceeding of the SPIE, 査
読無, 9144, 2014, DOI:
10.1117/12.2055292

[学会発表](計 14 件)

K. Hayashi, “Chameleon Region
Optically Thick HI”, Fermi-LAT
collaboration meeting, 2018

K. Hayashi, “Fermi-LAT study of the
ISM in Chamaeleon region using the
Planck thermal dust optical depth”,
7th Fermi Symposium, 2017

K. Hayashi, “Analysis of Chameleon
Molecular Cloud Region Based on the
Optically Thick HI”, Fermi-LAT
collaboration meeting, 2017

K. Hayashi, “Analysis of Chameleon
Molecular Cloud Regions : Using Gas
Model Maps Based on Planck Dust Data
with Non-linearity Model”, Fermi-LAT
collaboration meeting, 2016

K. Hayashi, “Fermi-LAT study of the
ISM in Chamaeleon region using the
Planck dust optical depth”,
The interstellar hydrogen
international workshop 2016, 2016

K. Hayashi, “Fermi-LAT study of the
ISM and CRs in Chamaeleon region using
the dust optical depth”, Interstellar
Hydrogen Workshop, 2016

K. Hayashi, “Study of the ISM in
nearby molecular cloud regions based
on the optically thick HI”, CTA 研究
会「高エネルギーガンマ線でみる極限宇
宙 2016」, 2016

林 克洋, “フェルミ・ガンマ線宇宙望遠
鏡による 2016 年の成果”, 第 17 回宇宙
科学シンポジウム, 2017

林 克洋, “フェルミ・ガンマ線宇宙望遠

鏡によるカメレオン座分子雲領域の星間物質の探査”，日本天文学会春季年会，2017

K. Hayashi, “Galactic GeV Gamma-ray Sources Observed by Fermi”, 特別推進研究研究会:宇宙線研究所共同利用研究会「高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2015」(招待講演), 2016

林 克洋, “ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の衛星総合試験における試験結果”, 日本物理学会 秋季年会, 2015

K. Hayashi, “Analysis of Chamaeleon Cloud Regions Using Planck Gas Model Maps (Optically-thick HI hypothesis)”, Fermi-LAT collaboration meeting, 2015

K. Hayashi, “Preflight Model Performance of the Soft Gamma-ray Detector Onboard the ASTRO-H”, IEEE NSS/MIC, 2014

K. Hayashi, “Test of Opt-thick HI Hypothesis and Non-proportionality between Dust Opacity and $N(H)$ ”, Fermi-LAT collaboration meeting, 2014

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 克洋 (HAYASHI, Katsuhiko)
名古屋大学・大学院理学研究科・研究員
研究者番号: 40713863