

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 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21244043

研究課題名（和文）ガンマ線レンズを用いた新世代のラインガンマ線天文学の開拓

研究課題名（英文）Development of a new generation line gamma-ray astronomy with the gamma-ray lens

研究代表者

国分 紀秀（KOKUBUN MOTOHIDE）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：50334248

研究成果の概要（和文）：

ガンマ線を用いた天体観測における観測限界感度を大幅に引き上げ、新世代のラインガンマ線天文学を開拓するため、ガンマ線を集光することが可能なガンマ線レンズの開発と、集光したガンマ線を高感度で観測する検出器の開発を行った。ガンマ線レンズの試作機を用いた基礎特性の測定と、人工衛星搭載用焦点面検出器のプロトタイプの開発を行い、性能実証を行うことが出来た。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a combination of the gamma-ray lens and Compton camera for a purpose of opening a new door in the gamma-ray astronomy. A prototype of gamma-ray lens which can condense gamma-ray photons was used for obtaining fundamental properties, and an engineering model of the camera was newly developed as a demonstration equipment for on-board hardware of a spacecraft.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2010 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2011 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
年度			
年度			
総計	28,700,000	8,610,000	37,310,000

研究分野：数物系科学

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：ガンマ線レンズ、半導体コンプトンカメラ

1. 研究開始当初の背景

X線や電波をプローブとした近代天文学の観測技術の発達により、我々は今や、電子や粒子が時には TeV 帯域にまで加速されるような高エネルギー現象が、ブラックホール近傍や超新星爆発、あるいは活動銀河核などにおいて普遍的に起きていることを知ることになった。地上では決して実現出来ないような強重力・強磁場、高温・高密度状態といった極限的な物理環境下において粒子がエネルギーを獲得する物理素過程や、その蓄積エネ

ルギー総量、さらに放射として観測されるまでのエネルギー散逸過程といった根本的な疑問は現代の宇宙物理学全体の大命題であり、従ってそれに迫るべく、電波から TeV ガンマ線までのほとんどあらゆる波長での電磁波観測が地上や衛星軌道上において精力的に展開されようとしている。しかし、この中で MeV を中心とするガンマ線領域だけは、その観測技術の困難さから、1990 年代の Compton 衛星以後ほとんど進展がないまま取り残されてきた。

一方、もし他波長に比肩する高感度でラインガンマ線を撮像・分光する検出器が実現すると、透過率の極めて高いガンマ線をプローブとして、高エネルギー粒子加速や重元素合成のまさに現場へと迫ることが可能になる。たとえば、MeVを超えるようなエネルギー領域においては、光子と粒子とがそれぞれに電磁相互作用もしくは強い相互作用の素過程を経て電子と陽電子を対生成することが可能になるため、その帰結として電子陽電子対消滅線が放射されることが普遍的に期待される。従って、その放射強度や分布、さらにはドップラーシフトや輝線幅の広がりなどを精度良く決定することが出来れば、高エネルギー粒子加速のまさに現場へと切り込むための強力なプローブとなり得る。実際、天の川銀河の中心付近に集中して観測される電子陽電子対消滅線の強度分布と、ブラックホール連星系の分布には類似の非対称性が見られることが観測的に確認されており、まさにブラックホール近傍の極限環境における粒子加速領域の物理情報を、透過率の高いガンマ線を介して観測している可能性を示唆している。数 100 keV から MeV のエネルギー帯には電子陽電子対消滅線の他にも ^{44}Ti や ^{26}Al などに代表される不安定核からのラインガンマ線が多数存在しており、高感度観測を実現することで、宇宙の重元素合成史に迫ることが出来る。X線天文学が、高階電離したイオンからの輝線を用いたプラズマ診断によって、超新星残骸や銀河団中の熱的プラズマに対する科学的知見を飛躍的に高めたことと同様に、高感度ラインガンマ線観測はまさに高エネルギー宇宙物理学の基本ツールとなり得る。

我々はこれまで、本格的にガンマ線天文学を切り拓くべく、衛星搭載検出器の開発を進めてきた。2005年に打ち上げられた「すざく」衛星には、我々が開発した硬 X線検出器(HXD)が搭載され、徹底したアクティブシールド技術により、数 100 keV までの硬 X線領域における観測感度を飛躍的に高めることに成功した。天の川銀河の中心領域において非熱的放射成分の存在と、熱的放射との共存を発見するなどの科学的成果も達成している。また、次期 X線天文衛星 ASTRO-H に搭載するための硬 X線撮像検出器(HXD)及び軟ガンマ線検出器(SGD)の開発においても一貫して主導的な役割を果たしており、シリコンとテルル化カドミウム半導体を用いたコンプトンカメラを世界に先駆けて提唱・製作し、この帯域での一層の高感度化を実現した。しかしなお、新世代ラインガンマ線天文学を真に切り拓くための感度を実現するには、検出器の改良の他に、信号対雑音比を向上するための本質的な変革が必要である。そこで

2008年度より、「ガンマ線を集光」して感度を向上するための技術である、ラウエレンズを応用したガンマ線レンズの開発に関して、フランスのグループとの国際共同研究を行うとともに、ガンマ線レンズとコンプトンカメラを組み合わせた、新世代ガンマ線観測衛星の概念設計を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、新世代のガンマ線観測技術を開発実証する実験的側面を中心にしつつ、既存の観測機器による観測研究的側面も並行して実施する。実験的側面としては、ガンマ線レンズと半導体コンプトンカメラを組み合わせて衛星搭載用のガンマ線集光撮像分光系を実現し、地上での性能実証試験を行うことが具体的な目標である。ステップとしては以下の3つに分けて進める。

(1) ガンマ線レンズの開発と試作

まだ衛星レベルでは実用化されたことのないガンマ線レンズの技術的成熟度を高めるために、回折素子レベルの試作から開始し、レンズとして組上げる過程までを一通り実施する。

(2) 焦点面検出器の製作と試験

我々がこれまでに世界に先駆けて実現してきた半導体コンプトンカメラをベースとして、焦点面検出器として配置するためのデザインの見直しを行った上で製作し、単体での性能評価試験を実施する。

(3) ガンマ線集光撮像実験

レンズと検出器を一つの光学系として組み上げ、放射線源あるいは放射光施設のビームラインなどを用いて集光性能、撮像性能、分光性能などを評価するとともに、衛星搭載品として要求される機械・熱・放射線環境試験などを実施する。

一方で、観測的研究については「すざく」HXDによる電子陽電子対消滅線観測を発展させつつ、Fermi衛星などの観測データも併用して多波長観測のアプローチを採る。

3. 研究の方法

(1) ガンマ線レンズの開発と試作

ガンマ線レンズの原理は、ブラッグ回折を利用したラウエレンズである。レンズの素子としては、高純度のゲルマニウムあるいは銅などの数 cm 角サイズ結晶を用いる。例えば 511 keV (波長 0.24 Å) を集光する場合、格子間隔 2 Å のゲルマニウム結晶を約 0.7 度傾ければ良い。集光に必要な面積からレンズの半径を決めると、この半径と傾き角によって焦点

距離が決定され、典型的に半径 1m のレンズを考えると、焦点距離は 82m となる。まずこの気球用ガンマ線レンズそのものを用いた基礎測定を行うことと並行して、新規に開発するガンマ線レンズ用の結晶素子の試作を行い、素子レベルで特性を評価する。その場合は、ガンマ線源を遠距離においた準平行光源に対して素子を検出器との間に置き、微小角度ずつ回転させながら透過光と干渉光の強度変化をそれぞれ測ることで、素子内部での減衰と、干渉を同時に求めることが可能である。素子としてはすでに実績のあるゲルマニウム、銅の他に、シリコン・ゲルマニウム合金など、複数の素材で試作評価を行う。最も性能の良い素子を決定してから、実際にレンズとして組上げるために必要な個数の製作を行う。その後、ガンマ線レンズの製作及び組上げ、アライメント測定を行った後、単純な 1 次元ガンマ線検出器を用いたレンズ全体としての単体試験を実施する。

(2) 焦点面検出器の製作と試験

コンプトンカメラは、検出器ユニット内部で一度コンプトン散乱した後に光電吸収されるように、シリコン(Si)とテルル化カドミウム(CdTe)という元素番号の異なる半導体を多層に積み重ねた上で、周囲をさらに CdTe で覆うようになっている。読み出しは専用の LSI を搭載した基板をセンサ近傍に配置する。ガンマ線レンズを用いた場合、高いエネルギー帯域では 100m もの焦点距離が必要となることから、実際の衛星では、ガンマ線レンズのみを搭載した衛星と、検出器部とのフォーメーションフライト(編隊飛行)となることが想定される。この場合、検出器を搭載した衛星側は、半導体コンプトンカメラを立体的に敷き詰めることで相互の反同時計数をとってアクティブシールドとして働かせ、バックグラウンドを除去する。また、複数の検出器同士の距離をなるべく近づけて配置することが必要となるため、回路部分の配置や検出器ハウジングなど、機械的デザインを、これまで開発してきたものから変更して再デザインし、1 ユニットの試作する。試作品に対して、熱環境試験及び機械環境試験などを実施して、衛星搭載品として問題がないことを確認した後に、標準ガンマ線源を用いた性能評価試験を実施する。なお将来的に搭載する衛星としては、JAXA の小型科学衛星を想定して機械・熱環境などを設計する。試作したコンプトンカメラの性能評価試験、特に、宇宙放射線環境下での性能を調べるため、加速器施設における粒子照射実験を実施し、衛星軌道上を模擬した環境での性能実証を実施する。

(3) ガンマ線集光撮像実験

ガンマ線レンズとコンプトンカメラを組み合わせて実際にガンマ線集光撮像系を構築する。この際、対象エネルギーを高くすると焦点距離を非常に長くした実験が必要となるため、まずは 100 から 200 keV 程度のエネルギーで測定を行う。標準ガンマ線源を用いた準平行光源の実験に加えて、Spring-8 などの放射光施設のマシンタイムを利用して、ほぼ完全な平行光源を用いた最終的な集光実験も実施する。

以上と平行して「すざく」搭載 HXD を用いて、主に電子陽電子対消滅線の探査を行う。最も重要となる、バックグラウンドの輝線成分を精度良く差し引くためのモデル化をアーカイブデータを用いて最初に行う。観測データとしてはすでに「すざく」が重点的に観測を行った銀河中心領域に加えて、複数のブラックホール連星のアーカイブデータを活用する。

4. 研究成果

まず気球用ガンマ線レンズを用いた基礎測定と、新規に開発するガンマ線レンズ用の結晶素子の特性を評価した。フランスの共同実験グループが気球実験用に開発したガンマ線レンズを用いて、約 120 keV の単色ガンマ線を 14m の距離から照射し、約 3m 離れた焦点位置にシンチレーターを置いて測定を行ったところ、確かに集光されたガンマ線を検出し、そのスポットサイズを定量的に評価することが出来た。また、シリコン結晶を用いて X 線ビームラインにおいて集光効率の測定を行った。一方で、半導体コンプトンカメラのプロトタイプの試作と、カメラに用いる半導体素子の性能評価を行い、さらには加速器施設において高エネルギー陽子を照射して放射線損傷による特性の影響を実測した。

次に、シリコンとテルル化カドミウム半導体の両面ストリップ型素子を用いて、硬 X 線からガンマ線帯域まで撮像が可能なカメラ部のプロトタイプを試作することを中心として進めた。結果として製作したカメラは衛星搭載を前提とした設計となっており、振動試験や低温動作試験、放射線耐性試験などの各種の試験を行うことでその性能と機能の実証を行うことが出来た。これらの実測データを元にしてモンテカルロシミュレーションなどと組み合わせることで、実際の衛星搭載検出器のモデル化を行うことの基礎データベースを確立することが出来た。

そこで、さらにプロトタイプを用いた性能評価を進めるため、Spring-8 における単色ガンマ線ペンシルビームを用いた実験を実施し、

検出器素子内部の微細な電極構造に対応する、詳細な位置応答特性を知る事が出来た。さらに放射線医学総合研究所における加速器実験のデータを加えて、これらの実測データを再現するようにモンテカルロシミュレーションをチューニングすることで、実際の衛星搭載検出器のモデル化を行うことの基礎データベースを確立することが出来た。

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 7 件)

① S. Takeda, H. Odaka, S. Ishikawa, S. Watanabe, H. Aono, T. Takahashi, Y. Kanayama, M. Hiromura, S. Enomoto, “Demonstration of in-vivo Multi-Probe Tracker Based on a Si/CdTe Semiconductor Compton Camera”, IEEE Transactions on Nuclear Science, 59, 2012, 70-76 (査読有)
DOI: 10.1109/TNS.2011.2178432

② S. Ishikawa, S. Saito, H. Tajima, T. Tanaka, S. Watanabe, H. Odaka, T. Fukuyama, M. Kokubun, T. Takahashi, Y. Terada, S. Krucker, S. Christe, S. McBride, L. Glesener, “Fine-Pitch Semiconductor Detector for the FOXSI Mission”, IEEE Transactions on Nuclear Science, 58, 2011, 2039-2046 (査読有)
DOI: 10.1109/TNS.2011.2154342

③ M. Kokubun, S. Watanabe, K. Nakazawa (16名省略), “Hard X-ray and gamma-ray detector for ASTRO-H based on Si and CdTe imaging sensors”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 63, 2010, 425-427 (査読有)
DOI: 10.1016/j.nima.2010.03.024

④ M. Kokubun, K. Nakazawa, T. Enoto, (24名省略), “Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H Mission”, Proceedings of the SPIE, 7732, 2010, 73215-1-13 (査読無)
DOI: 10.1117/12.857933

⑤ K. Nakazawa, T. Takahashi, O. Limousin, M. Kokubun, S. Watanabe, P. Laurent, M. Arnaud, H. Tajima, “The Hard X-ray Imager onboard IX0”, Proceedings of the SPIE, 7732, 2010, 77321L-1-13 (査読無)
DOI: 10.1117/12.856368

⑥ S. Takeda, H. Aono, S. Okuyama, S. Ishikawa, H. Odaka, S. Watanabe, M.

Kokubun, T. Takahashi, K. Nakazawa, H. Tajima, N. Kawachi, “Experimental Results of the Gamma-Ray Imaging Capability With a Si/CdTe Semiconductor Compton Camera”, IEEE Transactions on Nuclear Science, 56, 2009, 783-790 (査読有)
DOI: 10.1109/TNS.2008.2012059

⑦ S. Watanabe, S. Ishikawa, H. Aono, H. Odaka, M. Kokubun, T. Takahashi, K. Nakazawa, H. Tajima, M. Onishi, Y. Kuroda, “High Energy Resolution Hard X-ray and Gamma-ray Imagers Using CdTe Diode Devices”, IEEE Transactions on Nuclear Science, 56, 2009, 777-782 (査読有)
DOI: 10.1109/TNS.2008.2008806

[学会発表] (計 10 件)

① 渡辺伸、ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器(SGD)の開発の現状、日本天文学会、平成24年3月19日、龍谷大学

② 中澤知洋、ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器(HXI)の現状～FM 製造へ向けて～、日本天文学会、平成23年9月21日、鹿児島大学

③ 国分紀秀、ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器(HXI)の開発、日本物理学会、平成23年9月18日、弘前大学

④ 渡辺伸、ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器(SGD)の開発の現状、日本物理学会、平成23年9月18日、弘前大学

⑤ 渡辺伸、ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線イメージャー(HXI)の開発の現状(V)、日本物理学会、平成22年9月22日、金沢大学

⑥ M. Kokubun, “Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H Mission”, Space Telescopes and Instrumentation 2010, 平成22年7月30日, San Diego

⑦ 古関優、ガンマ線レンズを用いた新世代ガンマ線検出システムの開発(III)、日本物理学会、平成22年3月20日、岡山大学

⑧ 国分紀秀、X 線・ガンマ線観測の将来計画、高宇連研究会、平成22年3月9日、JAXA 宇宙科学研究所

⑨ 古関優、ガンマ線レンズを用いた新世代ガンマ線検出システムの開発(II)、日本物理学会、平成21年9月10日、甲南大学

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

国分 紀秀 (KOKUBUN MOTOHIDE)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・准教授

研究者番号：50334248

(2) 研究分担者

中澤 知洋 (NAKAZAWA KAZUHIRO)

東京大学大学院・理学系研究科・講師

研究者番号：50342621

渡辺 伸 (WATANABE SHIN)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・助教

研究者番号：60446599

(3) 連携研究者

()

研究者番号：