

## 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18日現在

機関番号： 82645  
 研究種目： 基盤研究（A）  
 研究期間： 2008～2011  
 課題番号： 20244017  
 研究課題名（和文） ロケットと大気球を用いた硬 X 線撮像実験による相対論的現象の探査・解明  
 研究課題名（英文） Study of relativistic phenomena based on Rocket and Balloon borne Hard X-ray Imaging Experiments  
 研究代表者  
 高橋忠幸（TAKAHASHI TADAYUKI）  
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授  
 研究者番号： 50183851

## 研究成果の概要（和文）：

本グループが開発を進めてきた Si あるいは CdTe を用いた硬 X 線イメージャー、あるいは Si/CdTe コンプトンカメラを発展させ、ロケット、大気球実験用検出器の開発を行なった。Fermi、すざく、RHESSI 衛星などを用いて、超新星残骸、ガンマ線連星、太陽における、相対論的現象にもとづく非熱的放射の観測研究を行った。

## 研究成果の概要（英文）：

Based on our technology of Si and CdTe imaging device and Si/CdTe Compton Camera, we have succeeded to develop detectors for a balloon-borne and rocket-borne hard X-ray observations. By using results obtained from Fermi, Suzaku and RHESSI, we performed various studies of particle acceleration in objects, such as Supernova Remnants, Gamma-ray binary system and the sun.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
平成21年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
平成22年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
平成23年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X線γ線天文学、太陽、超新星残骸、加速、ガンマ線検出器

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙における加速現象、非熱的放射は、太陽から超新星残骸、活動銀河核ジェット、そして銀河団と様々なスケールで観測されているが、それを支配する物理法則は同一のものであり、統一した概念で説明できるはずである。最近、本研究グループによって行われた「チャンドラ」と「すざく」による超新星残骸 RXJ1713-3946 の X 線の研究 (Nature 誌 10月4日掲載 内山、高橋他) により、超新星残骸において、はじめて非熱的スペクトルの1年以内での時間変動の発見という衝撃的な結果が明らかとなった。さらに、0.4 keV から 40 keV までのスペクトルのはじめての観

測から、1mGauss という従来考えられていたよりも 100 倍以上も強い磁場が存在し、衝撃波加速の効率も理論上最大限に達する事が明らかになった。この観測は、 $10^{15}$  eV までの加速が超新星残骸で起こることを明らかにしたと同時に、あらゆる加速源において、荷電粒子が磁場の増幅を伴いながら加速されるようなダイナミックな宇宙粒子加速の描像を新たに要求する。今後、こうした描像を様々なスケールの相対論的現象において研究することが必要であり、そのためには硬 X 線による高感度なかつイメージを伴う観測が必要である。

RXJ1713-3946 の観測では、「すざく」の硬 X

線検出器 (HXD/PIN) の能力の高さを示す事ができたが、HXD はコリメータによる観測であり、イメージを取得することはできず、感度に限界がある。硬 X 線望遠鏡を用いた観測は、イメージ取得ばかりではなく、望遠鏡の有効面積に対して検出器を小さくでき、S/N 比をあげることができるため、2 桁も感度の高い観測が可能である。現在、一刻も早くこうした観測を行うために複数の国際共同実験が計画されている。将来の科学衛星においても、日本の「NeXT」衛星 (後の ASTRO-H 衛星) を筆頭に、「Nu-Star (米国)」、「Symbol-X (伊仏独)」など 2011 年以降の実現をめざして急ピッチで研究が進んでいる。技術面においては、硬 X 線集光鏡の開発と硬 X 線イメージング検出器の開発が鍵を握る。前者は名古屋大学の他、コロンビア大学、NASA/MSFC などが、後者は、本研究グループの他、カリフォルニア工科大学などが開発を進めているが、数 100 ミクロンの位置分解能を持つシリコンとテルル化カドミウム半導体を組み合わせたハイブリッド型の検出器の開発において、本研究グループは他の追随を許さない。

## 2. 研究の目的

本グループが開発を進めてきた先端的硬 X 線イメージャーを発展させ、ロケット、大気球など迅速な実験が可能な機会を用いて相対論的天体の観測を行うとともに、Fermi、すざく、RHESSI 衛星などを用いた相対論的現象にもとづく非熱的放射の観測研究を行う。さらに将来の小型飛翔体を用いた観測をめざした検討や検出器開発を行う。

角度分解能 7~15 秒角というような過去にないイメージング能力と 1-2 keV のエネルギー分解能 (FWHM) を有する硬 X 線観測を迅速に進めるために具体的な国際共同実験の提案をすでに通しており、それに特化した検出器を開発し、国際パートナーに提供する。共同で実験装置全体の開発、試験を打ち上げのスケジュールに合わせて進める。

NASA への提案がすでに認められている以下の二つの観測実験への主体的な参加を前提として行う。

[1] カリフォルニア工科大学、コロンビア大学と共同で硬 X 線撮像観測気球実験 HEFT。

[2] カリフォルニア大学 SSL (Space Science Laboratory)、NASA/MSFC と共同でロケット実験 FOXSI による太陽フレアの硬 X 線撮像観測実験。

## 3. 研究の方法

本科研費の期間中にロケット観測実験が行われる事を前提として、開発スケジュールをたて、搭載する検出器の開発を行う。大気球やロケット実験プログラムの進捗に応じて、インターフェースかみ合わせ試験、現地実験、データ解析、論文執筆を行う。

(1) 気球観測実験では、われわれは 3 台搭載される硬 X 線望遠鏡のうち、一台の焦点面検出器を担当する。望遠鏡の有効面積は 40keV で 30 cm<sup>2</sup> である。Si と CdTe イメージング素子を重ねたハイブリッドカメラをもちい、検出器内でコンプトン散乱をおこした事象を積極的に応用した Si/CdTe コンプトンカメラを気球実験用に完成させる。

(2) ロケット実験では、MSFC が現在開発を進め、硬 X 線領域では世界でもっとも角度分解能のすぐれた望遠鏡を 7 台搭載する 40-80 keV までの硬 X 線領域において、7-15 秒角という角度分解能を生かすために、我々は、75-150 ミクロンという位置分解能を持ち、0.5 mm 厚のシリコン検出器を 1 層、もしくは数層に重ねて 2mm 厚にした高分解能硬 X 線検出器を提供する。より高い有効面積を得るために、開発状況によっては、現在われわれのグループが世界に先駆けて開発を進めている、両面テルル化カドミウム (CdTe) ストリップ検出器を用いる事をめざし、その開発を行う。

気球実験により、相対論的現象にもとづく非熱的放射を行う天体を研究するための適切なターゲットを選定したり他の波長との同時観測を行うための予備的研究として、また、太陽から超新星残骸や X 線連星、ブラックホール天体などにおける非熱的放射機構を探る為に、Fermi、すざく、RHESSI 衛星などを用いた非熱的放射天体の観測研究を積極的に行う。

検出器開発については、衛星、ロケット、大気球等、飛翔体を用いた将来の実験をめざし、より検出効率の高い硬 X 線イメージャー やガンマ線検出器の開発を行い、機会をみて実験提案を行う。

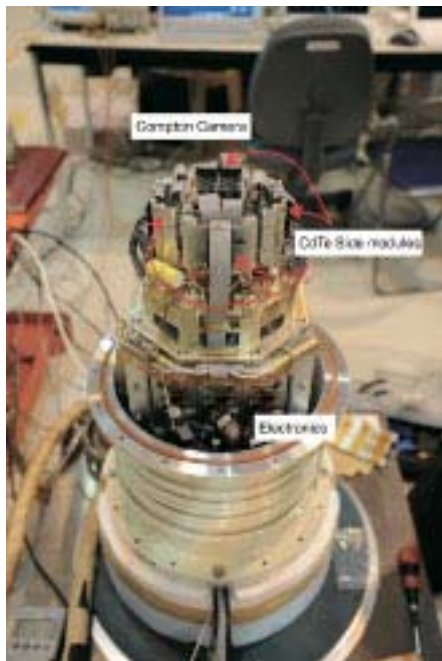
## 4. 研究成果

### 1) 気球実験用検出器の開発

Si 両面ストリップ検出器 4 層、CdTe のピクセル検出器を下部 4 層、側面に 1 層配置し、さらに BGO 結晶にてアンチシールドを施した気球実験用 Si/CdTe コンプトンカメラを完成させた。

さらに重量とサイズに制限のあるなかで、

検出器が打ち上げ時の衝撃に耐えるような構造設計を行い、高度 40 km の気球高度において  $-20$  度の検出器動作温度を保つための気密箱の製作を行った（下写真）。



Si/CdTe コンプトンカメラの性能を様々な方法で実証した。修士論文や博士論文の他、学術雑誌に発表した。特に、2008 年に本検出器の性能を SPring-8 の硬 X 線ビームラインにて評価し、当初の目的であった搭載装置が実際に求められる性能を達成できていることを確認した。さらに、硬 X 線ビームがほぼ 100% 偏光している事を利用し、本検出器が極めて優れた偏光測定性能を持つことをはじめて実証した。これは、Si/CdTe コンプトンカメラが将来の衛星ミッションにおいて優れた硬 X 線偏光測定装置になることを示す。

性能評価の一環として、医療への応用実験を理化学研究所や群馬大学医学部（重粒子治療センター）、日本原子力研究開発機構と行い、マウス、ラットの多核種同時イメージングに成功した。

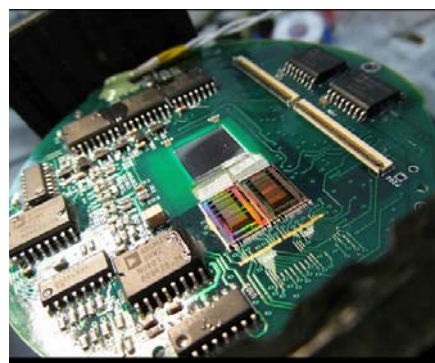
## 2) ロケット観測実験

カリフォルニア大学バークレー校 SSL (Space Science Lab.) と協力して、ロケット観測実験の準備を行った。焦点面検出器に用いられる多チャンネルアナログ VLSI と組み合わせたファインピッチ Si 両面ストリップ検出器を新たに開発した。

太陽観測ロケット実験 FOXSI は、5 - 15 keV の硬 X 線領域で世界で初めて集光系を導入し、12 秒角という高い角度分解能にて太陽静穏領域のかつてない高感度

な撮像観測を目指す。その実現のためには、焦点面検出器は 5 keV 付近からの撮像観測を可能にするエネルギー分解能に加え、ミラーの角度分解能に見合う位置分解能 ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) を持ち合わせなければならない。従来の CCD のような検出器では、硬 X 線での有効面積が小さすぎる上、数 10 マイクロ秒以下が要求される時間分解能を達成できないため、新たな撮像検出器が必要となった

本研究では FOXSI ロケットへ搭載する検出器の開発を行った。新たに実装技術を確認することで、ストリップピッチが  $75 \mu\text{m}$  の両面シリコンストリップ検出器素子にその読み出しのための専用多チャンネル ASIC を組み合わせた検出器を製作した。シリコンストリップ検出器素子の雑音性能やイメージング性能を最大限発揮させるための ASIC パラメータの最適化を行い、0.5 keV @ 13.9 keV (FWHM) という高いエネルギー分解能を達成し、FOXSI で想定される温度下で 5 keV 以下のエネルギーしきい値を達成できることを示した（下写真）。



さらに実際の宇宙観測を見据えて、天体のフラックスを精度よく決定するために、ランダムな疑似イベントによるデッドタイム補正回路を開発し搭載用 FPGA に実装した。乱数にもとづいた疑似イベントの除去率を応用したデッドタイム補正は、シールド検出器やソフトウェアによるデータ処理のデッドタイムをも補正できる新たな手法である。また、運用の時間的制約の大きいロケット実験において、打ち上げ途中での放電を避けた上で観測時間を最大限確保するために、検出器への効率のよい高電圧印加方法について検討し、オペレーションについての指針を示した。

本研究において、当初の目的であった搭載装置の開発は達成された。2013年3月

末にロケット実験が設定され、観測装置、望遠鏡、バス系などロケット実験に必要な全てを統合してホワイトサンズロケット発射基地にでかけ、現地での、かみ合わせ試験を実施した。最後の段階でやむをえない事情から、延期せざるをえず、現在では2014年に実験を行う予定である。

本研究は、FOXSI実験を可能にしたばかりではなく、2014年に打ち上げを予定しているASTRO-H 衛星に搭載される大型硬X線撮像装置の技術実証としての意味も持つ。太陽観測ロケット実験という具体的な目標をたてて試験をすることで、様々な見落としを最小限にすることが可能である。特に、ロケット実験としてグラウンド系、電源系、テレメトリ系まで統合して試験できるメリットはきわめて大きい。

80 キロ電子ボルトまでの硬X線領域でより高い感度を持つテルル化カドミウム検出器の基礎開発を60マイクロピッチの両面ストリップ検出器を新たに開発して行った。この成果を元に、より高い効率で硬X線を観測することが可能なFOXSI2ロケット実験をNASAに提案し、採択された。

### (3) 相対論的現象にもとづく非熱的放射を行う天体の研究

X線からTeVガンマ線にまでいたる広い波長域で、非熱的放射がみられる天体をすざく、チャンドラ、Fermi を用いて観測した結果を論文にまとめた。特に、超新星残骸とガンマ線連星について研究を行い、物理学会誌にレビュー論文が掲載された。太陽における硬X線フレアの観測的研究についても並行して行われた。

LS5039 連星系は0型星(LS5039)とコンパクト天体からなり、相対論的アウトフローを持つことが電波観測から知られている。コンパクト天体が中性子星であるかブラックホールであるか、不明である。「すざく」によって連星周期3.9日間を完全にカバーする約一週間におよぶ長期X線観測が行われ、硬X線までのびるシンクロトロン放射スペクトルが全周期にわたって得られた。X線・硬X線強度の時間変化は、TeVガンマ線と同期している。また他のX線衛星のデータとの照合から、X線強度が9年にわたって正確に

周期変動を保っており、位相だけに依存する非常に安定して超高エネルギー電子を生成する加速機構が存在している事がわかった。

われわれはTeVガンマ線の強度とスペクトルの変動は、逆コンプトン放射の角度異方性および星からの光子との間の吸収によって説明されうるがX線変動は断熱冷却の効果で説明できる事を示した。電子の冷却時間は短く、1秒で10TeVまで電子を加速する高効率の加速機構が働いている事を明らかにした。

太陽観測衛星RHESSIによる、太陽からの硬X線フレアの観測を行い、150-450keVのエネルギー帯域においてイメージング可能な全てのフレアについてイメージングを行ない、150keV以上という高いエネルギーにおける放射の空間構造をはじめ統計的にあきらかにした。その結果、150keV以上の放射も100keV以下の放射と同じフレアループの足元から検出されており、同様の機構で粒子加速が起こっているという示唆が得られた。

太陽外縁付近で起こったフレアの解析を行い、フレアループ上空からの硬X線放射を発見した。このフレアではループ上空の硬X線放射とループ足元からの放射が同時に観測されているという極めて珍しい観測例であり、粒子加速のモデルを構築する際に非常に重要な結果である。RHESSI衛星の撮像分光性能を生かしてそれぞれの硬X線源からの放射のスペクトルを調べたところ、ループ上空と足元で同一成分の粒子が硬X線を放射するというモデルとコンシステントな結果が得られた。このことにより、ループ上空の領域で加速された粒子が、一時ループ上空の領域に閉じ込められて硬X線を放射し、その領域を逃げ出した粒子が彩層に達したときにループの足元で硬X線を放射するという、加速粒子の描像を得ることができた

### 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 25 件)

[1] S. Ishikawa, S. Krucker, T. Takahashi, R. P. Lin, "On the Relation of Above-the-loop-top and Footpoint Hard X-ray Sources in Solar Flares" ApJ, 737,

(2011)

- [2] S. Ishikawa, S. Krucker, T. Takahashi, R. P. Lin, "RHESSI Imaging Survey of  $\gamma$ -ray Bremsstrahlung Emission in Solar Flares" ApJ, 728, in press (2011)
- [3] S. Krucker, S. Christe, L. Glesener, S. Ishikawa, S. McBride, D. Glaser, P. Turina, R. P. Lina, M. Gubarev, B. Ramsey, S. Saito, Y. Tanaka, T. Takahashi, S. Watanabe, T. Tanaka, H. Tajima, S. Masuda, "The Focusing Optics X-ray Solar Imager: FOXSI" SPIE (2011)
- [4] H. Odaka, F. Aharonian, S. Watanabe, Y. Tanaka, D. Khangulyan, T. Takahashi, "X-ray Diagnostics of Giant Molecular Clouds in the Galactic Center Region and Past Activity of Sgr A\*" ApJ, 740, in press (2011)
- [5] S. Ishikawa, S. Saito, H. Tajima, T. Tanaka, S. Watanabe, H. Odaka, T. Fukuyama, M. Kokubun, T. Takahashi, "Fine-pitch semiconductor detector for the FOXSI mission, IEEE Nucl. Sci., 58 pp. 2039 - 2046 (2011)
- [6] Hirokazu Odaka, Yuto Ichinohe, Shin'ichiro Takeda, Taro Fukuyama, Koichi Hagino, Shinya Saito, Tamotsu Sato, Goro Sato, Shin Watanabe, Motohide Kokubun, Tadayuki Takahashi, Mitsutaka Yamaguchi, Takaaki Tanaka, Hiroyasu Tajima, Kazuhiro Nakazawa, Yasushi Fukazawa, "High-resolution Compton cameras based on Si/CdTe double-sided strip detectors", Nucl. Instr. Meth. A, in press (2011)
- [7] 渡辺 伸, 佐藤 悟朗, 高橋忠幸, CdTe 半導体を用いた高エネルギー分解能ガンマ線イメージャーの開発, 放射線, 36, 2, pp. 59-78, 2010
- [8] 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 and L. Glesener, "Fine-pitch semiconductor detector for the FOXSI mission", Submitted to IEEE NS (2010)
- [9] S. Shinya; S. Ishikawa, S. Watanabe, H. Odaka, S. Sugimoto, T. Fukuyama, M. Kokubun, Motohide; T. Takahashi, Y. Terada, H. Tajima, Hiroyasu; T. Tanaka, S. Krucker, S. Christe, S. McBride, L. Glesener, Lindsay, "Development of double-sided silicon strip detectors for solar hard x-ray observation", Proceedings of the SPIE, Volume 7732, pp. 77320Q-77320Q-9 (2010).
- [10] S. Ishikawa, S. Watanabe, T. Fukuyama, M. Kokubun, H. Odaka, S. Saito, G. Sato, S. Sugimoto, T. Takahashi, K. Nakazawa, T. Tanaka, "Development of a 2 mm thick CdTe double-sided strip detector for gamma-ray imaging and spectroscopy", JJAP, in press (2010)
- [11] 高橋忠幸, 内山泰伸, 牧島一夫, "宇宙 X 線衛星「すざく」による非熱的宇宙物理学の開拓" 日本物理学会誌, 65, 911-921 (2010)
- [12] M. Ushio, L. Stawarz, T. Takahashi, D. Paneque, G. Madejski, M. Hayashida, J. Kataoka, Y. Tanaka, T. Tanaka, M. Ostrowski, "A novel approach in constraining electron spectra in blazar jets: The case of Markarian 421" ApJ, 724 pp. 1509- 1516, (2010)
- [13] S-N, Ishikawa, S. Watanabe, T. Fukuyama, G. Sato, G., M. Kokubun, H. Odaka, S. Saito, T. Takahashi, K. Nakazawa, T. Tanaka, "Development of double-sided CdTe strip detectors for gamma-ray imaging and spectroscopy" Japanese Journal of Applied Physics, 49 pp. 116702 -116706 (2010)
- [14] S. Takeda, H. Odaka, J. Katsuta, S.-N. Ishikawa, S.-I. Sugimoto, Y. Koseki, S. Watanabe, G. Sato, M. Kokubun, T. Takahashi, K. Nakazawa, Y. Fukazawa, H. Tajima, H. Toyokawa "Polarimetric performance of Si/CdTe semiconductor Compton camera" NIM A, 622 pp. 619-627, (2010)
- [15] Saito, S. Ishikawa, S. Watanabe, H. Odaka, S. Sugimoto, T. Fukuyama, M. Kokubun, T. Takahashi, S. Krucker (他 6 名), "Development of Double-sided Silicon Strip Detectors for solar hard X-ray observation" SPIE 7732, pp. 77320Q-77320Q-9 (2010)
- [16] Hirokazu Odaka, Soichiro Sugimoto, Shin-nosuke Ishikawa, Junichiro Katsuta, Yuu Koseki, Taro Fukuyama, Shinya Saito, Rie Sato, Goro Sato, Shin Watanabe, Motohide Kokubun, Tadayuki Takahashi, Shin'ichiro Takeda, Yasushi Fukazawa, Takaaki Tanaka, Hiroyasu Tajima, "Development of an integrated response generator for Si/CdTe semiconductor Compton cameras Nucl. Instr. Meth. A, 624, pp.303-309, (2010)
- [17] T. Takahashi, T. Kishishita, T. Tanaka, Y. Uchiyama, K. Yamaoka, D. Khangulyan, D., F. A. Aharonian, V. Bosch-Ramon, "Study of the Spectral and Temporal Characteristics of X-Ray Emission of the Gamma-Ray Binary LS 5039 with Suzaku" ApJ, 697, 592-600 (2009)

[18] Krucker, Sam; Christe, Steven; Glesener, Lindsay; McBride, Steve; Turin, Paul; Glaser, David; Saint-Hilaire, Pascal; Delory, Gregory; Lin, R. P.; Gubarev, Mikhail; Ramsey, Brian; Terada, Yukikatsu; Ishikawa, Shin-Nosuke; Kokubun, Motohide; Saito, Shinya; Takahashi, Tadayuki; Watanabe, Shin; Nakazawa, Kazuhiro; Tajima, Hiroyasu; Masuda, Satoshi; Minoshima, Takashi; Shomojo, Masumi, "The Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI)", Proceedings of the SPIE, Volume 7437, pp. 743705-743705-10 (2009)

[19] Y. Uchiyama, T. Tanaka, T. Takahashi, K. Mori, K. Nakazawa, "Suzaku Observations of PSR B1259 - 63: A New Manifestation of Relativistic Pulsar Wind"

ApJ, 698, 911-921 (2009)

[20] "Development of a low-noise, two-dimensional amplifier array" T. Kishishita, H. Ikeda, T. Sakumura, T. Tamura, T. Takahashi, NIM A, 598, pp. 591-597 (2008)

[21] T. Takahashi, T. Tanaka, Y. Uchiyama, (他 16 名) "Measuring the Broad-Band X-Ray Spectrum from 400eV to 40keV in the South-west Part of the Supernova Remnant RXJ1713.7-3946"

Publ. Astr. Soc. Japan, 60, S131-S140 (2008)

[22] 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 Trans. Nucl. Sci., 56, 3, PP. 783 - 790 (2008)

[23] T. Tanaka, Y. Uchiyama, F.A. Aharonian, T. Takahashi, A. Bamba, J.S. Hiraga, J. Kataoka, T. Kishishita, M. Kokubun, K. Mori, K. Nakazawa, R. Petre, H. Tajima, S. Watanabe "Study of nonthermal emission from SNR RX J1713.7-3946 with Suzaku", ApJ, 685, pp.988-1004 (2008)

[24] T. Takahashi, T. Tanaka, Y. Uchiyama, (他 16 名) Publ. Astr. Soc. Japan, 60, S131-S140 (2008)

[学会発表] (計 5 件)

1) T. Takahashi, "High Resolution CdTe detectors and Applications to Gamma-ray Imaging", IEEE Nucl. Sci. Symp. Valcerna, Spain, Oct 23-28, 2011

2) T. Takahashi, "Future X-ray Missions to

Study Relativistic Astrophysics", Texas Symposium 2010, Heidelberg, Germany, Dec 6-10, 2010

3) T. Takahashi, "Exploring the Hot Universes with High Energy Astrophysics Observatories", The IAU 's XXVII GENERAL ASSEMBLY, Rio de Janeiro, Brasil, Aug 10-16, 2009)

4) T. Takahashi, "Non-Thermal X-ray Astronomy", 4th Heidelberg International Symposium on High Energy Gamma-Ray Astronomy, Heidelberg, Germany. July 7-11, 2008

5) T. Takahashi "Recent Advances on CdTe /CdZnTe detectors", 5th International Conference on New Developments In Photodetection 2008, Aix-les-Bains, France, June 15-20, 2008

[図書] (計 2 件)

1) T. Takahashi, S. Watanabe, S. Ishikawa, "High Resolution CdTe detectors and Applications to Gamma-ray Imaging", Biological and Medical Sensor Technologies, CRC Press, 2011

2) T. Takahashi, S. Watanabe, S. Ishikawa, S. Takeda, G. Sato "High Resolution CdTe detectors and Applications to Gamma-ray Imaging", Semiconductor Radiation Detection System, CRC Press. 2010

[産業財産権]

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

www.astro.isas.jaxa.jp/~takahashi

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋忠幸 (TAKAHASHI TADAYUKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号:

(2) 研究分担者

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

(3) 研究分担者

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