

令和元年6月5日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25109004

研究課題名(和文)宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載X線精密イメージングの開拓

研究課題名(英文)Development of X-ray Astronomy SOI Pixel Sensor for Study of First Black Holes

研究代表者

鶴剛(Tsuru, Takeshi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：10243007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 127,540,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙最初期に誕生する超巨大ブラックホール「ファーストブラックホール」を探査・研究し、銀河も含めた形成と進化を読み解くことが最終目標である。本研究では、広帯域、精密撮像、精密分光とともに、反同時計測による低バックグラウンド性能を実現可能な、マイクロ秒時間分解能のX線SOIPIX検出器の開発を行った。

イベント駆動可能な23.3万画素の大型素子と、6.4keV X線に対するエネルギー分解能216eV (FWHM)を実現した。本研究の成果を受け、本X線SOIPIXを主観測装置とするX線天文衛星FORCEが宇宙科学研究所のワーキング・グループとして認められ、また学会議の大型研究計画にも選定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、最終目的である「ファーストブラックホール」の探査・研究への道が開かれた。この観測装置は、広がったX線天体に対する感度も高い。従って、超新星残骸、銀河団、銀河中心領域の硬X線での分光撮像に基づく、高温・非熱的宇宙の研究にも寄与する。

この検出器を用いた公募研究も進み、新たに6つのサイエンス領域を切り拓いた。具体的には次のような新たな基礎物理学分野の創出にも繋がった：アクシオン探索、低質量暗黒物質探索、宇宙X線タルボ干渉計観測、弱い等価原理(重力質量と慣性質量の等価)検証、電子トラック型コンプトンガンマ線カメラの研究開発が始まった。また、X線撮像蛍光分析分野への応用の提案も受けた。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to explore "First Black Holes" born in the early universe, and to understand the formation and evolution of the universe. For this research, we have developed an X-ray SOIPIX detector with microsecond time resolution that can realize low background performance by anti-coincidence technique as well as performances of broadband, imaging and spectroscopy.

We realized a large device with 23.3 million pixels, and a device with an energy resolution of 216 eV (FWHM) for 6.4 keV X-rays in the event-driven readout mode. Based on the results from our research, a working group of the X-ray astronomical mission, FORCE, with X-ray SOIPIXs as its main instruments was established in ISAS. The FORCE mission was selected as one of Large Research Projects by Science Council of Japan.

研究分野：高エネルギー宇宙物理実験

キーワード：X線天文学 宇宙物理 X線検出器 SOIPIX検出器 SOIPIX X線検出器

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙最初期に誕生する超巨大ブラックホール「ファーストブラックホール」を探索・研究し、銀河も含めた形成と進化を読み解くことが本研究の科学的最終目標である。

天の川銀河をはじめとする全ての銀河の中心核には、太陽の 10^9 倍に達する質量を持つブラックホールが存在している。この超巨大ブラックホールと銀河本体は無関係ではない。例えば図1は私達が得た若い銀河の X 線画像であるが、超新星爆発を繰り返し、高温プラズマを噴出する銀河の中心核から、超巨大ブラックホールの種となる中質量ブラックホールを発見した(Matsumoto, Tsuru 他, ApJL, 547, L25, Tsuru 他, PASJ, 59, 269)。ここから銀河と超巨大ブラックホールは共に密接に影響し合って進化することを見いだした。本提案の最終目標は、宇宙最初期に誕生する超巨大ブラックホール＝「ファーストブラックホール」を探索・発見し、そこから始まるブラックホールと銀河の形成と進化を系統的に理解することである。これは今後 10 年の宇宙物理学の最重要課題の 1 つである。

2. 研究の目的

超巨大ブラックホールと銀河の熱的プラズマはそれぞれ、硬 X 線 (10keV 以上) / 軟 X 線 (10keV 以下) で卓越、点源/空間的に広がる、中性元素輝線/電離元素輝線を持つ。従って両者を空間的・X 線エネルギー的に分離し研究するには、広帯域性能 (硬・軟 X 線の両方をカバー)、精密撮像性能、精密分光性能が必要である。さらに微弱なファーストブラックホールを発見する超低バックグラウンド性能が必須である。しかしこうした性能を同時に持つ X 線検出器は現存しない。

このため、本研究では、広帯域、精密撮像、精密分光とともに、反同時計測による低バックグラウンド性能を実現可能な、マイクロ秒の時間分解能を持つ X 線 SOIPIX (XRPIX) の開発を行った。

3. 研究の方法

本計画研究が開発を目指す SOIPIX システムの模式図を図 1 に示す。非 X 線バックグラウンドのほとんどは、軌道上の高エネルギー粒子が衛星本体やカメラ筐体で起こす 2 次的な放射線である。そこでカメラ筐体自身を井戸型の放射線シンチレーター検出器 (アクティブシールド) で作り、その中に SOIPIX 素子を取り入れる。SOIPIX 素子およびアクティブシールドが同時にイベントを出力した場合は、カメラ筐体を通して来た放射線＝非 X 線バックグラウンドと判定する。一方、SOIPIX 素子のみのイベントなら天体からの X 線だと判定する。これを実現するには SOIPIX 素子がイベント検出の瞬間のトリガ信号と、検出ピクセルの座標を出力させる必要がある (イベント駆動読み出し機能)。そこで本研究は SOIPIX システムの実現に必要な、SOIPIX 素子 (XRPIX) の開発を行った。

最終的に目指す素子を一気に完成させることはできない。そこで要求性能は超

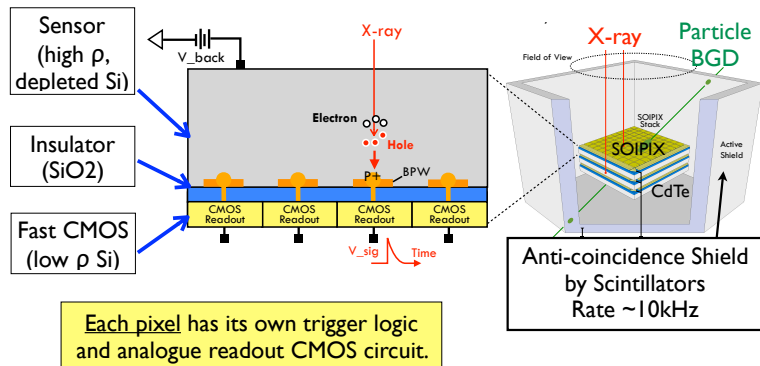


図 1. X 線 SOIPIX 素子 (左) と X 線 SOI カメラ (右) の模式図。

X 線 SOIPIX 素子は、センサー層、SiO₂ のインシュレーター層、高速 CMOS 回路層の 3 層から構成される。ピクセルの CMOS 回路は低ノイズアナログ読み出し回路と高速のトリガ出力回路から構成される。X 線入射により、トリガ信号が出力される。アクティブシールドはシンチレーターで構成し、フォトダイオードで読み出す。その中に SOIPIX 素子を入れる。スタックはオプションである。

マイクロ秒の時間分解能を持つ X 線 SOIPIX (XRPIX) の開発を行った。

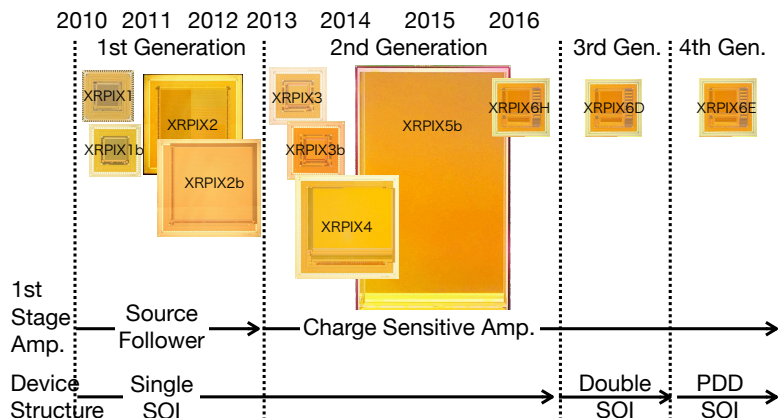


図 2. 本研究およびそれに先立つ研究で開発した SOIPIX 素子。大きく 4 世代に分けられる。ピクセル回路の初段アンプとして第 1 世代はソースフォロアタイプを適用した。第 2 世代以降は電荷有感アンプを採用し、十分なゲインを実現した。ウェハとして、第 1, 第 2 世代はシングル SOI タイプを、第 3 世代はダブル SOI タイプ、第 4 世代として PDD 構造を採用した。最終的に第 4 世代でほぼ満足の行くイベント読み出しにおける目標の分光能力を実現した。XRPIX5b は 14mm×22mm の撮像エリアを実現し、目標を達成した。

低バックグラウンド、広帯域、精密分光=極低読み出しノイズ、撮像領域サイズの4つに要素分割し、図2に示す通り、比較的低コストの中型の素子(4mm 角)で試作と評価を繰り返し、撮像領域サイズ以外の性能(精密分光、広帯域、超低バックグラウンド)に必要な要素技術を得る。撮像領域以外の3つの要求性能が揃った時点で統合し、10mm 角以上の大型素子を試作した。

4. 研究成果

最初は、小さな素子(2.4mm 角-6.0mm 角)の製作からスタートした。

A01, A02, C01 班との協力のもと、回路レイアウトの配置による電荷収集効率の改善、埋め込み P 層の小面積化および電荷有感型アンプの導入によるゲイン向上、差動増幅器の導入によるフロントエンド回路の簡素化等を行った。開発の最大の難関であったイベント駆動時の分光性能劣化の原因が、回路層のデジタル回路動作によるセンサ層への干渉であることを突き止め、A01, A02 と協力し、ダブル SOI および PDD を導入することで解決に成功した。また、衛星搭載に必要な放射線耐性を持つことも確認した。最終的に、必要な 40keV までの広帯域性能とイベント駆動可能な 23.3 万画素の大型素子と(図3)、イベント駆動による 6.4keV X 線に対するエネルギー分解能 216eV (FWHM)を実現した(図4)。イベント駆動シリコンピクセル検出器で、この分光能力を発揮する検出器は他に存在せず、世界一と言える。本研究の成果を受け、SOIPIX を主観測装置とする X 線天文衛星 FORCE が宇宙科学研究所のワーキング・グループとして認められ、また学会議の大型研究計画にも選定された。

本研究の到達点として、ダブル SOI 構造を持つ XRPIX7(15.3 x 24.6 mm²)を設計・製作した。このチップは 36 μ m 角のピクセルを約 23.3 万画素持ち、X 線がヒットすると直ちにトリガー信号を出し、ヒットしたピクセルの周り 8 x 8 画素を高速に読み出すことが出来る。この素子は、このままレイアウトを水平方向に反転し 2 倍のサイズとすることで、次期 X 線天文衛星 FORCE に搭載することが出来る。本研究の終了後に予算を獲得し、第4世代の PDD 構造を持つ大型素子の開発を行いたいと考えている。

またこの検出器を用いた公募研究も進み、新たに6つのサイエンス領域を切り拓いた。スパーズな量子を検出する高時間分解能の精密撮像分光器として理想的な性能を持つ SOIPIX の開発成功により、次のような新たな基礎物理学分野の創出にも繋がった；アクシオン探索、低質量暗黒物質探索、宇宙 X 線タルボ干渉計観測、弱い等価原理(重力質量と慣性質量の等価)検証。さらに宇宙観測と医学応用を統合した、電子トラック型コンプトンガンマ線カメラの研究開発が始まり、X 線撮像蛍光分析分野への応用の提案も受けた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 28 件)

1. "Total ionizing dose effects on the SOI pixel sensor for X-ray astronomical use", Mori, K., Nishioka, Y., Takeda, A., Takebayashi, N., Takenaka, R., et al. (2019), NIMPA, 924, 473.
2. "Performance of the Silicon-On-Insulator pixel sensor for X-ray astronomy, XRPIX6E, equipped with pinned depleted diode structure", Harada, S., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Uchida, H., Matsumura, H., et al. (2019), NIMPA, 924, 468.
3. "Proton radiation damage experiment for X-ray SOI pixel detectors", Yarita, K., Kohmura, T., Hagino, K., Kogiso, T., Oono, K., et al. (2019), NIMPA, 924, 457.
4. "Studies of radioactive background in SOI pixel detector for solar axion search experiment", Onuki, Y., Grimaldo, J. A. M., Ose, T., Aihara, H., Inoue, Y., et al. (2019), NIMPA, 924, 448.
5. "Evaluation of Kyoto's event-driven X-ray astronomical SOI pixel sensor with a large imaging area", Hayashi, H., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Uchida, H., Matsumura, H., et al. (2019), NIMPA, 924, 400.
6. "Kyoto's event-driven x-ray astronomy SOI pixel sensor for the FORCE mission", Tsuru, T. G., Hayashi, H., Tachibana, K., Harada, S., Uchida, H., et al. (2018), SPIE, 10709, 107090H.

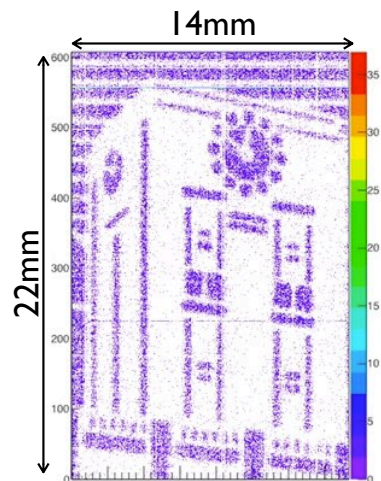


図 3. 本研究で開発した最大の素子 XRPIX5b で得た X 線イメージ. Am-241 からの X 線を用い常温下でイベント駆動を用いて取得した。

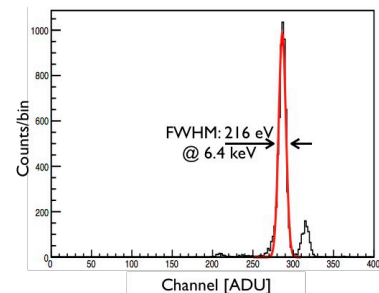


図 4. XRPIX6E でイベント駆動モードで測定した ⁵⁷Co の X 線スペクトル。トリガ型シリコン X 線ピクセル検出器として、世界最高の性能である。

7. "The FORCE mission: science aim and instrument parameter for broadband x-ray imaging spectroscopy with good angular resolution", Nakazawa, K., Mori, K., Tsuru, T. G., Ueda, Y., Awaki, H., et al. (2018), SPIE, 10699, 106992D.
8. "Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution: the FORCE mission", Mori, K., Tsuru, T. G., Nakazawa, K., Ueda, Y., Okajima, T., et al. (2017), mbga, 77.
9. "Development of X-ray SOI pixel sensors for future X-ray wide field cameras", Hayashi, H., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Uchida, H., Matsumura, H., et al. (2017), fym, 313.
10. "A broadband X-ray imaging spectroscopy with high-angular resolution: the FORCE mission", Mori, K., Tsuru, T. G., Nakazawa, K., Ueda, Y., Okajima, T., et al. (2017), fym, 311.
11. "Development of electron-tracking Compton imaging system with 30- μ m SOI pixel sensor", Yoshihara, Y., Shimazoe, K., Mizumachi, Y., Takahashi, H., Kamada, K., et al. (2017), JInst, 12, C01045.
12. "Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto's X-ray astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer", Ohmura, S., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Uchida, H., Takeda, A., et al. (2016), NIMPA, 831, 61.
13. "The first back-side illuminated types of Kyoto's X-ray astronomy SOIPIX", Itou, M., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Takeda, A., Matsumura, H., et al. (2016), NIMPA, 831, 55.
14. "A broadband x-ray imaging spectroscopy with high-angular resolution: the FORCE mission", Mori, K., Tsuru, T. G., Nakazawa, K., Ueda, Y., Okajima, T., et al. (2016), SPIE, 9905, 990510.
15. "X-ray Performance of Back-Side Illuminated Type of Kyoto's X-ray Astronomical SOI Pixel Sensor, XRPIX", Itou, M., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Takeda, A., Matsumura, H., et al. (2016), arXiv, arXiv:1604.00170.
16. "Electron Pattern Recognition using trigger mode SOI pixel sensor for Advanced Compton Imaging", Shimazoe, K., Yoshihara, Y., Fairuz, A., Koyama, A., Takahashi, H., et al. (2016), JInst, 11, C02030.
17. "Improving charge-collection efficiency of SOI pixel sensors for X-ray astronomy", Matsumura, H., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Takeda, A., Arai, Y., et al. (2015), NIMPA, 794, 255.
18. "Improving Charge-Collection Efficiency of Kyoto's SOI Pixel Sensors", Matsumura, H., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Takeda, A., Ito, M., et al. (2015), arXiv, arXiv:1509.00538.
19. "A low-noise wide-dynamic-range event-driven detector using SOI pixel technology for high-energy particle imaging", Shrestha, S., Kamehama, H., Kawahito, S., Yasutomi, K., Kagawa, K., et al. (2015), SPIE, 9593, 95930X.
20. "Investigation of the Kyoto's X-ray Astronomical SOIPIXs with Double-SOI Wafer for Reduction of Cross-talks", Ohmura, S., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Takeda, A., Matsumura, H., et al. (2015), arXiv, arXiv:1508.05185.
21. "Light Dark Matter Search with SOIPIX", Oka, N., Miuchi, K., Tsuru, T. G., Takeda, A., & Matsumura, H. (2015), arXiv, arXiv:1507.06987.
22. "Improvement of spectroscopic performance using a charge-sensitive amplifier circuit for an X-ray astronomical SOI pixel detector", Takeda, A., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Uchida, H., Matsumura, H., et al. (2015), JInst, 10, C06005.
23. "Investigation of charge-collection efficiency of Kyoto's X-ray astronomical SOI pixel sensors, XRPIX", Matsumura, H., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Nakashima, S., Ryu, S. G., et al. (2014), NIMPA, 765, 183.
24. "Investigation of Charge-Collection Efficiency of Kyoto's X-ray Astronomical SOI Pixel Sensor, XRPIX", Matsumura, H., Tsuru, T. G., Tanaka, T., Nakashima, S., Arai, Y., et al. (2014), ASPC, 176.
25. "Development and performance of Kyoto's x-ray astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor", Tsuru, T. G., Matsumura, H., Takeda, A., Tanaka, T., Nakashima, S., et al. (2014), SPIE, 9144, 914412.
26. "Development and Evaluation of Event-Driven SOI Pixel Detector for X-ray Astronomy", Takeda, A., Tsuru, T., Tanaka, T., Matsumura, H., Arai, Y., et al. (2014), co94, 138.
27. "Design and Evaluation of an SOI Pixel Sensor for Trigger-Driven X-Ray Readout", Takeda, A., Arai, Y., Ryu, S. G., Nakashima, S., Tsuru, T. G., et al. (2013), ITNS, 60, 586.
28. "Tests With Soft X-rays of an Improved Monolithic SOI Active Pixel Sensor", Ryu, S. G., Tsuru, T. G., Prigozhin, G., Kissel, S., Bautz, M., et al. (2013), ITNS,

〔学会発表〕（国際会議 計 30 件, 国内学会 計 50 件）研究代表者の一部のみ記載

29. "Overview of the X-ray Astronomical Imaging Detectors - CCD to APS -", Tsuru, Takeshi, 11th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11), 10-15 December 2017 at OIST, held in Okinawa, JAPAN
30. "Kyoto's Event-Driven X-ray Astronomical SOI Pixel Sensor", T.Tsuru, New Developments In Photodetection held in Tours, France, 3-7 July 2017
31. "Spectral Performances of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor in the Frame and Event-Driven Readout Modes", T.Tsuru, SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2016: "High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII", held in Edinburgh, UK, 2016/06/26-07/01, 9915-48.
32. "Event driven type of SOI pixel sensors for future X-ray astronomy satellites", T.Tsuru, in IFDEPS, Lake Kawaguchi, Feb. 28- Mar. 01, 2016,
33. "Recent progress in the development of Kyoto's X-ray astronomy SOI pixel sensor - XRPIX", T.Tsuru, 2015, the SPIE, San Diego, USA, 2015/08/09-13, 9601-12.
34. "Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor - XRPIX", T.G.Tsuru, T.Tanaka, A.Takeda, K.Mori, in SOIPIX2015, held in Sendai
35. "Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor", XRPIX, T.Tsuru, SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2014: "Ultraviolet to Gamma Ray" held in Montreal, Canada, June 22-27, 2014, Proceedings of the SPIE, 9144, pp. 914412 (7pages) (2014)
36. "Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor", T.Tsuru, FEE2014 "Front End Electronics 2014", held 19-23 May, 2014 at Argonne National Laboratory, Lemont, IL, USA
37. "Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor", T.Tsuru, "Scientific Detector Workshop 2013", held in Florence, Italy, Oct. 7-11, 2013
38. 「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 32: 現在の到達点と今後の開発」, 鶴剛他, , 日本天文学会, 2019 年春季年会, 法政大学
39. 「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 27: これまでの到達点と今後の開発」, 鶴剛他, 日本天文学会, 2018 年春季年会, 千葉大学
40. 「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 19: これまでの到達点と今後の開発」, 鶴剛他, 日本天文学会, 2016 年秋季年会, 愛媛大学
41. 「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 12: 開発の現状」, 鶴剛他, 日本天文学会, 2015 年秋季年会, 甲南大学
42. 「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 10: 開発の現状」, 鶴剛他, , 日本天文学会, 2014 年秋季年会, 山形大学

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<https://soipix.jp/>

<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/X/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：森 浩二

ローマ字氏名：Mori, Koji

所属研究機関名：宮崎大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：00404393

研究分担者氏名：幸村 孝由
ローマ字氏名：Kohmura, Takayuki
所属研究機関名：東京理科大学,
部局名：理工学部物理学科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：20365505

研究分担者氏名：田中 孝明
ローマ字氏名：Tanaka, Takaaki
所属研究機関名：京都大学
部局名：理学研究科
職名：助教
研究者番号（8桁）：20600406

研究分担者氏名：武田 彩希
ローマ字氏名：Takeda, Ayaki
所属研究機関名：宮崎大学
部局名：工学部
職名：助教
研究者番号（8桁）：40736667

(2)研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。