

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：32686

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20527

研究課題名（和文）精密X線分光偏光観測に向けた極低温コンプトンカメラの開発

研究課題名（英文）Development of Compton camera for high-resolution and polarization X-ray spectroscopy

研究代表者

山田 真也（YAMADA, SHINYA）

立教大学・理学部・准教授

研究者番号：40612073

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：超伝導遷移端検出器はX線帯域におけるエネルギー分解能を比較的向上できるが高度な低温技術が求められる。素子数増を目指し、信号多重化の開発も必要である。偏光観測やコンプトンイベントの活用を見据え、エネルギー帯域の拡大と多画素化も必要である。本研究で、約80画素を読み出せるシステムを構築し、信号の取得を確認できた。室温部分では、大規模なFPGAと1Gサンプル14bitのAD変換器の活用から、次世代の室温読み出しに向けた5Gの高速AD/DAとFPGAの詳細検討も行った。研究期間を通じて、超伝導遷移端検出器の技術の成熟化と応用性能の向上が進められ、またX線観測や偏光観測との比較研究も進展している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究による超伝導遷移端検出器の基礎と応用的な発展は、X線観測の精度を飛躍的に向上させ、宇宙の詳細な構造や物理現象の解明に寄与するものである。また、エネルギー分解能の向上は物質分析技術の進展にも応用可能であり、より正確な物質の化学状態の把握や分析につながる可能性を秘めている。X線の偏光の測定にも応用可能な幾何学的な自由をもつ検出器であり、測定対象に応じて自由なデザインやカスタマイズが可能な検出器として、今後の活用が期待される。超伝導遷移端検出器の基礎となる極低温技術と高周波技術の両面の成熟度を高めることができたと考えている。

研究成果の概要（英文）：Superconducting transition-edge sensors (TES) have the capability to significantly enhance the energy resolution in X-rays, though they require advanced cryogenic technology. An increase in the number of elements and the development of signal multiplexing are also necessary. In application of polarization and Compton events, it is crucial to expand the bandwidth and signal multiplexing. In this study, a system capable of reading approximately 80 pixels was developed, and signal acquisition was successfully confirmed. In the room temperature segment, the utilization of large-scale FPGAs and 1G-sample 14-bit AD converters has led to detailed examinations of 5G high-speed AD/DA and FPGA technologies for next-generation room temperature readouts. Throughout the research period, there has been progress in maturing the technology of superconducting transition-edge sensors and enhancing their application performance, as well as in comparative studies with X-ray and polarization observations.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 X線検出器 超伝導検出器

1. 研究開始当初の背景

超伝導遷移端検出器は、非分散型の精密 X 線分光分野で、次世代の技術として期待されている。この検出器は、図 1 に示すように、超伝導状態から常伝導状態への遷移時に生じる抵抗の変化を利用し、X 線帯域におけるエネルギー分解能を理論的に大幅に向上させることが可能である。しかし、動作には 100mK という超伝導体が遷移する極低温が必要であり、実際に多数の素子を低温下で動作させるには、効率的な多画素読み出しのための配線数の最適化が求められる。

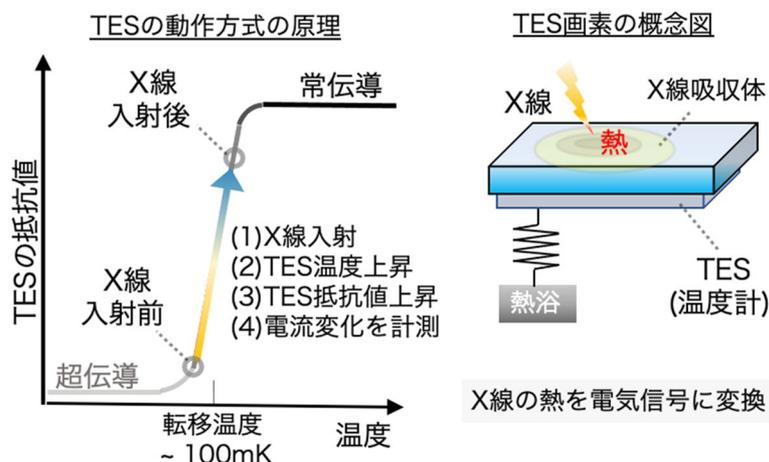


図1: TESの動作方式の原理とTES画素の概念図

技術的には、極低温を利用することによって、室温での検出器と比較して高い感度を達成することができる一方で、安定した極低温環境の維持と、センサーを含むシステム全体の運用は、大きな挑戦であった。極低温での信号読み出し技術の開発は、装置の複雑性を増すが、これを克服することで、未知の天体現象の観測や新しい物質の性質の解明など、科学の新たな地平を開く可能性を秘めている。極低温環境に適応した素子の設計、信号の多重化技術、安定した運用を可能にするための工夫は、X 線を用いる研究分野にとって現在も継続している主要な研究課題の一つであり、これらの技術的障壁を乗り越えられれば、X 線天文学のみならず、放射光や分析施設での新しい診断方法など他分野への応用も期待される。

2. 研究の目的

本研究の主要な目的の一つは、超伝導遷移端検出器 (TES) の技術を向上させることにある。これにより、将来の精密 X 線偏光分光観測への道を拓くことを目指している。精密 X 線分光は、ブラックホール近傍での蛍光 X 線の詳細な測定を可能にし、ガスの運動や相対論的效果を検証するための重要な手法である。これに X 線偏光観測を加えることで、空間的に分解できないコンパクト天体の構造を推定することが可能になる。

TES の応用範囲は非常に広く、その形状や幾何学的な自由度の高さが偏光観測において特に重要である。ジオメトリーを有効に活用することで、偏光の特性も捉えることができる。したがって、システム全体の設計、特に読み出し技術を含む総合的な検討が不可欠である。TES 技術の進化は、天文学において新たな発見をもたらすだけでなく、その精度と応用の幅広さから、他の科学分野においても革新的な進歩を促す可能性を秘めている。本研究を通じて、TES の可能性を最大限に引き出し、未知の宇宙現象の理解を深めることが期待される。

3. 研究の方法

本研究は、実験的に極低温環境下でのシステム実証とその成熟化を目指すものである。具体的には、信号線の帯域に着目し、4GHz から 8GHz の範囲で増幅可能な極低温 HEMT アンプの帯域を活用することによって、少ない配線で多画素の信号読み出しの効率を高めることに焦点を当てる。将来の偏光観測やコンプトンイベントの活用には必須である多画素化の推進は、本研究の根幹をなす部分である。この目的のため、高速 AD/DA と FPGA を用いた読み出しシステムの開発を進め、実験的に多画素読み出し方式の実証を行いながら、今後のシステム拡張に向けた具体的な指針を設定する。さらに、現在利用されているファームウェアのみならず、最先端の技術動向をも念入りに分析し、将来的なファームウェア設計のための知見を蓄積する。また、機械学習を活用した波形弁別の手法に関しても、将来の応用を視野に入れながら、開発を進めていく。これらの方法を通じて、本研究は超伝導遷移端検出器の機能向上と応用範囲の拡大に寄与することを目指す。

4. 研究成果

本研究により、38 素子の超伝導遷移端検出器を同時に駆動し、6keV で 3eV を下回る高いエネルギー分解能を達成し、その成果は投稿論文にて受理された。この実験で使用された読み出し装置の室温部分には、大規模な FPGA と 1G サンプル 14bit の AD 変換器が用いられ、マイクロ波信号をダウンコンバートし帯域を狭めた後、高速で A/D 変換を行い、位相情報を抽出して PC へ迅速に転送するシステムが確立されたと言える。超伝導遷移端検出器の特長は、波形を加工せずに保持し、後工程で効率的な処理を可能にする点にあるため、帯域幅を最大化するための工夫も実施できた。

これに加えて、図 1 に示すように、FPGA 内にリングバッファや様々なノイズ評価が可能なトリガーシステムを設計し、概念設計から具体的な FPGA のコーディング、読み出し用ソフトウェアの開発まで行った。高周波デバイスの評価効率を高めるためには、擬似パルス発生機能と、ソフトウェア開発専用エミュレータの開発が同時に実施され、基礎的な性能確認に成功した。これにより、多画素の複数トリガーイベントを処理し、基本波形処理を行う体制が整った。

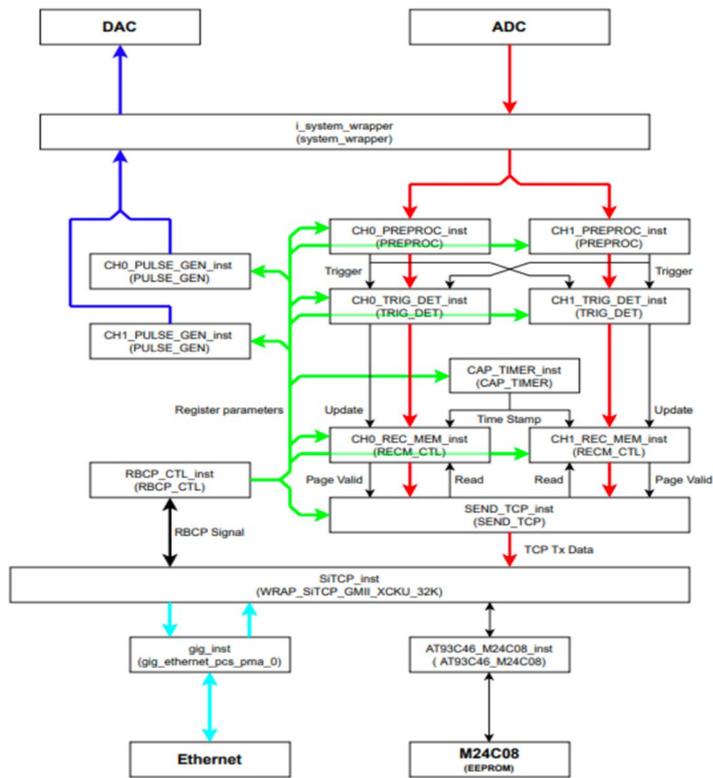


図 2: SiTCP と高速転送システムの実装例

図 3 にトリガ機能の概念図を示した。データを記録するためのメモリは 1ch あたり 1MByte である。1MByte のデータを 8page に分割して使用する設計にした。1page あたり 128kByte となり 1 データあたり 16bit (2Byte) なので 1page あたり 64k レコードとなる。ch1 は極性反転されているが、処理前に反転することで非反転として扱えるようにした。TCP セッションが確立するとデータは使用中の page に書き込み続ける。トリガ前レコード長以上が書込まれた後にトリガ条件が成立すると、レコード長に応じて必要データが書込まれるのを待ち、書き込みを次の空いている page に更新する。なお、空いている page がない場合は、page の更新は行わない。書き込み page が更新された場合は書き込みが完了した page の情報にヘッダ情報を付加し、TCP データとして出力する。なお、チャンネルバインドによって Ch0 と Ch1 を一緒に出力する場合は、Ch0 のメモリ書き込みアドレスを Ch1 のメモリ書き込みアドレスとする事で同じアドレスが同時刻のデータとなるように実現した。トリガ判定をする前に SINC フィルタを経由してノイズの影響を軽減できる設計にもした。図 3 のトリガ回路の概念図を示したように、得られたトリガ情報を元にトリガ・ソースが選択できる。両チャンネルを Edge にすると完全に変化点が一致しないとトリガが有効にはならない。このような詳細な設計を行い、汎用性の高い波形処理のプロトタイプとして使うことができた。

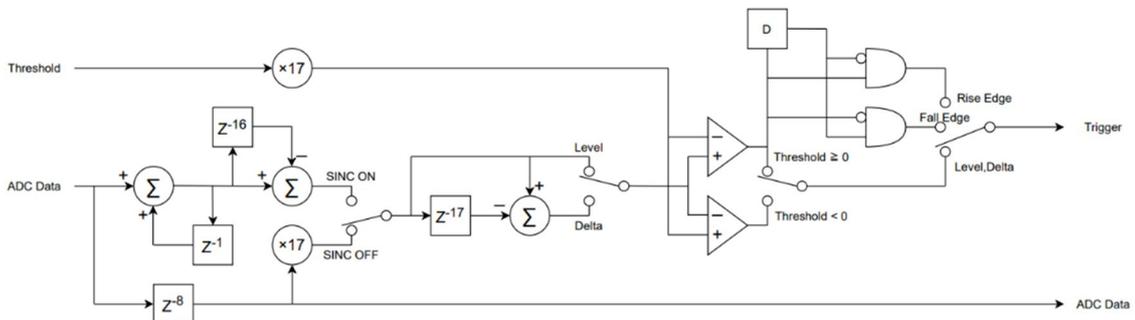


図 3: 製作したトリガー回路の概念図

さらに、機械学習を用いた波形弁別手法の研究も進められ、良質なパルスとそれ以外を自動的に識別するシステムの動作検証が行われた。最適フィルタリングは、超伝導遷移端センサーカロリメーターのデータ解析において、最も良いエネルギー分解能を達成するための重要な技術である。高速処理のためには、不良データをデータセットからフィルタリングすることが、エネルギー分解能の劣化を防ぐために重要であるが、容易ではない。そこで、TES パルスの自動良否タグ付けのために、ニューラルネットワークベースの技術を提案した。この技術は高速かつ自動であり、不良データをトレーニングに必要としないものである。図 4 に、平均パルスとの比較を示した。良好なパルスのみを使用して計算されたもの（赤の実線）と、不良パルスを使用して計算されたもの（黒の破線）で行った。MSE 値の 1.5×10^{-5} を良否判定の閾値とした。対応するベースラインレベルの拡大図は以下に示される。低レート、高レート、およびベースラインのクリーンデータセットは、それぞれ左、中、右のパネルに対応する。このように、一見すると同じような波形でも、わずかに平均波形と異なる場合であっても、高感度に弁別することができた。

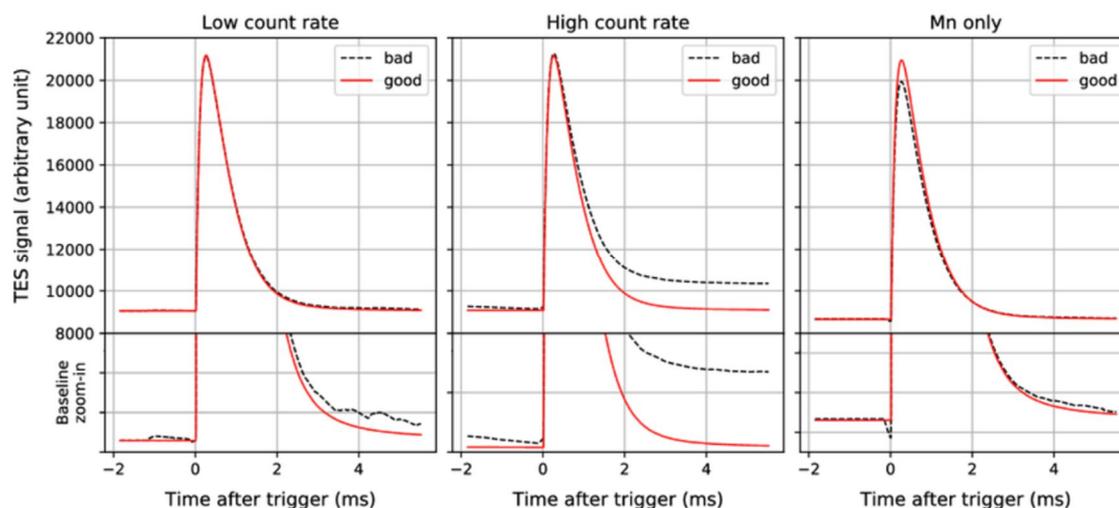


図 4: 機械学習を用いた波形弁別の例

5G 技術の急速な進展に伴い、次世代の室温読み出し用デジタル回路に関する検討が深められ、さまざまな組み込みシステムの情報収集や開発手法が検討された。その結果、AD/DA と FPGA、CPU を組み合わせたシステムが将来性と拡張性において最も有望であるとの結論に至り、インターフェース設計や既存システムの移植性に関する検討が進められた。今後も実験室での室温デジタル回路の実装を経て、宇宙応用への研究をさらに進めていく。コンパクト天体の宇宙 X 線観測と X 線偏光研究も進み、特にコンパクト天体における短時間の X 線偏光の変動についての理解が深まった。この研究により、超伝導検出器の将来性が大いに広がったと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Yan Daikang, Yamada Shinya et al., | 4. 巻 209 |
| 2. 論文標題 Absolute Energy Measurements with Superconducting Transition-Edge Sensors for Muonic X-ray Spectroscopy at 44 keV | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics | 6. 最初と最後の頁 271 ~ 277 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02860-3 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Li Wenshuai, Yamada Shinya, et al. | 4. 巻 1240 |
| 2. 論文標題 High-sensitive XANES analysis at Ce L2-edge for Ce in bauxites using transition-edge sensors: Implications for Ti-rich geological samples | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Analytica Chimica Acta | 6. 最初と最後の頁 340755 ~ 340755 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aca.2022.340755 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Hayakawa Ryota, Yamada Shinya, Suda Hirotaka, Ichinohe Yuto, Higurashi Ryota, Sakemi Haruka, Machida Mami, Ohmura Takumi, Katsuda Satoru, Uchiyama Hideki, Sato Toshiki, Akamatsu Hiroki, Axelsson Magnus | 4. 巻 74 |
| 2. 論文標題 X-ray hot spots in the eastern ear of the supernova remnant W50 and the microquasar SS433 system | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 510 ~ 520 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac011 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Tsuchioka Tomoya, Sato Toshiki, Yamada Shinya, Uchiyama Yasunobu | 4. 巻 932 |
| 2. 論文標題 X-Ray Studies of the Inverted Ejecta Layers in the Southeast Area of Cassiopeia A | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 93 ~ 93 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6e63 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Okumura T, S. Yamada, Y. Ichinohe et al. | 4. 巻 127 |
| 2. 論文標題 Deexcitation Dynamics of Muonic Atoms Revealed by High-Precision Spectroscopy of Electronic K X Rays | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 53001 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.053001 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Hashimoto T, S. Okada, S. Yamada, Y. Ichinohe et al. | 4. 巻 128 |
| 2. 論文標題 Measurements of Strong-Interaction Effects in Kaonic-Helium Isotopes at Sub-eV Precision with X-Ray Microcalorimeters | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 112503 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.112503 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 Y. Ichinohe, S. Yamada, et al. | 4. 巻 22 |
| 2. 論文標題 Application of Deep Learning to the Evaluation of Goodness in the Waveform Processing of Transition-Edge Sensor Calorimeters | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics | 6. 最初と最後の頁 2719 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02719-7 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Yamada Shinya, Ichinohe Yuto, et al. | 4. 巻 92 |
| 2. 論文標題 Broadband high-energy resolution hard x-ray spectroscopy using transition edge sensors at SPring-8 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments | 6. 最初と最後の頁 013103 ~ 013103 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020642 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Nakashima Y., Hirayama F., Kohjiro S., Yamamori H., Nagasawa S., Sato A., Yamada S., Hayakawa R., Yamasaki N. Y., Mitsuda K., Nagayoshi K., Akamatsu H., Gottardi L., Taralli E., Bruijn M. P., Ridder M. L., Gao J. R., den Herder J. W. A. | 4. 巻 117 |
| 2. 論文標題 Low-noise microwave SQUID multiplexed readout of 38 x-ray transition-edge sensor microcalorimeters | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 122601 ~ 122601 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0016333 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Yan Daikang, Yamada Shinya, et al. | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Transition-Edge Sensor Optimization for Hard X-ray Applications | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3059972 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Sakai Yusuke, Yamada Shinya, Sato Toshiki, Hayakawa Ryota, Higurashi Ryota, Kominato Nao | 4. 巻 951 |
| 2. 論文標題 Richardson? Lucy Deconvolution with a Spatially Variant Point-spread Function of Chandra: Supernova Remnant Cassiopeia A as an Example | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 59 ~ 59 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acd9b3 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Okumura T., Azuma T., S. Yamada et al. | 4. 巻 130 |
| 2. 論文標題 Proof-of-Principle Experiment for Testing Strong-Field Quantum Electrodynamics with Exotic Atoms: High Precision X-Ray Spectroscopy of Muonic Neon | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 173001-173007 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.130.173001 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shinya Yamada |
| 2. 発表標題 Application of X-ray microcalorimeters from astrophysics to on-ground experiments |
| 3. 学会等名 UGAP2022（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田真也 |
| 2. 発表標題 ブラックホール連星のX線観測 |
| 3. 学会等名 宇宙プラズマの活動性 - 天体形成から高エネルギー現象まで（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| <p>大強度加速器x超高精度「温度計」で原子核を作る力に迫る https://www.rikkyo.ac.jp/news/2022/03/mknpps000001wdb7.html 最先端超伝導検出器で探るミュオン原子形成過程の全貌 https://www.rikkyo.ac.jp/news/2021/07/mknpps000001oo10.html 超伝導転移端検出器TESを用いた蛍光XAFS分析に成功 https://www.rikkyo.ac.jp/news/2021/01/mknpps000001dxgp.html</p> |
|---|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 一戸 悠人 (Ichinohe Yuto) (30792519) | 立教大学・理学部・助教 (32686) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | | |
|---------|---------|---------------------|--|--|
| 米国 | NIST | Colorado University | | |
| オランダ | SRON | | | |