

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：82657

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14505

研究課題名（和文）低エネルギー宇宙線反陽子の高感度観測による太陽変調研究

研究課題名（英文）High-sensitivity observation of low-energy antiprotons for the study of solar modulation of cosmic-rays

研究代表者

小財 正義（Kozai, Masayoshi）

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構（機構本部施設等）・データサイエンス共同利用基盤施設・特任
研究員

研究者番号：60781739

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：天体衝撃波などで加速された素粒子・宇宙線は太陽から噴出する太陽風プラズマの影響を強く受け、太陽変調現象と呼ばれる。その謎を解く鍵として近年注目されているのが宇宙線反陽子である。本研究では、反陽子高感度観測へ向けた技術的課題であった大型シリコン検出器の量産法と冷却技術を開発した。さらに反陽子観測が行われる飛翔体実験と、太陽変調研究での高い実績を誇る地上観測との連携も目指し、大気影響の評価などを行った。以上により、反陽子を用いた太陽変調研究の実現への道筋を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オーロラをはじめとする地球磁気圏や超高層大気の変動は太陽風（太陽から常時噴出するプラズマ風）に支配されている。太陽風の電磁的構造の解明は宇宙時代の環境問題として喫緊の課題である。宇宙線の太陽変調は太陽-地球間距離に匹敵する大規模構造の情報が得られる数少ない研究対象である。特に反陽子は宇宙線中で唯一存在が確認されている反原子核成分であり、独自の知見を与えてくれると期待される。本研究は反陽子観測での技術的課題の解決方法を示し、その実現への道筋をつけた。また本研究の成果は、他分野での放射線計測や冷却実験などへの応用も期待される。

研究成果の概要（英文）：Properties of galactic cosmic rays are altered by the solar wind plasma ejected from the sun, which is called the solar modulation of cosmic rays. Cosmic-ray antiprotons are attracting attention as a key to solving the solar modulation problem. In this research, we developed a mass production method and cooling technology for a large silicon detector, which was a technical issue for high-sensitivity antiproton observation. In addition, we evaluated atmospheric effects on cosmic rays, aiming for an integrated study of cosmic rays by an antiproton observation at the top of the atmosphere and ground-based observations. From the above, we showed the path to the solar modulation research using antiprotons.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：銀河宇宙線 反陽子 反粒子 太陽変調 惑星間空間 宇宙天気 リチウムドリフト型シリコン検出器
自励振動ヒートパイプ

1. 研究開始当初の背景

宇宙線反陽子の観測では、10000 倍以上の存在量を持つ陽子成分との識別が最大の課題となる。従来は磁気分析器による識別が主流であったが、磁石を用いる構造上、有感体積やアクセプタンスの確保、エネルギー閾値の引き下げ(遮蔽物の低減)に困難があった。特に GeV 以下の低エネルギー領域は太陽変動が顕著に現れるため、太陽変動研究にとって重要である。それらを克服する手法としてエキゾチック原子の活用(エキゾチック原子法)が提案されている。反粒子がターゲット物質で減速・捕捉されると、ターゲット物質の原子軌道を占有してエキゾチック原子を形成する。その脱励起では特性 X 線、反粒子と原子核の対消滅ではパイ粒子等が放出される。ターゲット物質として比較的構成物質がシンプルなシリコン検出器を用い、これら 2 次的粒子を計測することで、入射反粒子を識別することができる[文献]。この手法では検出器の敷き詰めにより大型化が容易で、遮蔽物も低減できるため、低エネルギー反陽子の高感度観測が可能である。

エキゾチック原子法による宇宙線反陽子観測へ向けて、技術的課題となるのが大型シリコン検出器の量産と品質管理、およびその運用時の温度制御である。エキゾチック原子法の強みを活かすには、大口径と厚い有感層を兼ね備えたシリコン検出器を高い品質で量産し、大規模アレイ化する必要がある。特性 X 線への感度を確保するには、アレイ内に分散されたシリコン検出器を均一にマイナス数十度まで冷却しなければならない。さらに飛翔体観測で用いるには、低電力かつ軽量の冷却システムが必要である。

2. 研究の目的

エキゾチック原子法の初めての実用化により、宇宙線反陽子の超高感度観測を目指すのが GAPS (General Antiparticle Spectrometer) 実験である。研究代表者は本研究に先立ち、大口径(直径 10 cm)・厚い有感層(2 mm 以上)・比較的高い動作温度(約 - 40 度)を兼ね備えたシリコン検出器の開発に成功した[文献]。さらに GAPS 実験の第一回観測へ向けて約 1000 個の検出器の量産を実施した。本研究では量産検出器の詳細調査や冷却システムの開発により、エキゾチック原子法の実現可能性を実証し、GAPS 実験による反陽子観測と太陽変動研究へ道筋をつける。

3. 研究の方法

GAPS 実験へ向けた検出器の量産では、大量の製造パラメータや性能評価のデータが蓄積された。エキゾチック原子法で必須となる大型シリコン検出器の初めての統計的調査が可能となっている。そこで、データマイニング手法を活用して製造・性能データを分析する。

冷却システムの開発は自励振動ヒートパイプの応用を軸に進める。自励振動ヒートパイプは作動流体として 2 相流体を用い、加熱部での沸騰と冷却部での凝縮による圧力差で効率的に熱輸送を行うデバイスである[文献]。潜熱の活用により分散された対象物でも均一な温度分布が得られること、受動的に駆動力が誘発されるため低消費電力であること、シンプルな細管で構成されるため軽量であることなどの特長を持つ。しかし、新奇な技術であり実用化の例がほとんど無い。本研究ではヒートパイプの監視・制御系などを開発し、この技術を要素技術開発フェーズから実運用フェーズへ引き上げる。

さらに、GAPS の観測実施後のデータ解析のアプローチも検討する。特にこれまでの反陽子観測実験でも先例の少ない、地上観測との連携解析を検討する。地上観測は高い時間分解能と安定的な長期連続観測を特長とするため、時間変動が主な研究対象となる太陽変動研究で高い実績を誇る。

以上により、エキゾチック原子法の実現可能性を実証し、GAPS 観測装置の性能向上や太陽変動研究での有用性を示す。

4. 研究成果

(1) 新型シリコン検出器の統計解析

エキゾチック原子法では有感領域がターゲット物質も兼ねるため、厚い有感層を持つシリコン検出器が望まれる。厚み数 mm 以上の有感層が得られる数少ないデバイスがリチウムドリフト型シリコン検出器(Si(Li)検出器)である。エキゾチック原子法のために開発された新型 Si(Li)検出器[文献]を GAPS 実験でのアレイ化へ向けて約 1000 個量産し、その統計解析を行った[文献]。

厚み方向と直径方向の双方での素子の均一性が求められるという技術的困難があるため、同様のデバイスは人工衛星実験などで数個レベルの製作・使用実績が存在するのみである。一方で GAPS 実験をはじめとして科学観測装置の大型化が進み、社会的にも放射能汚染問題などから放射線計測への需要が高まる中、大型かつ高品質な半導体検出器の安定的生産への需要は高まっている。本研究はそのような検出器製造での品質確保や再現性を初めて実証的に示した。

解析では製造パラメータおよび特性評価による性能パラメータから成る全検出器のデータセ

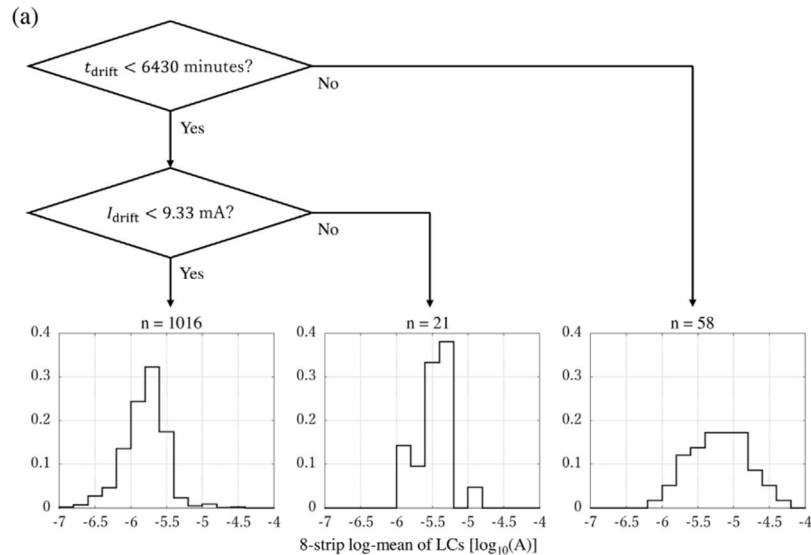


図 1：新型 Si(Li)検出器量産データのデータマイニングの例[文献]。多変量解析から選別した製造パラメータを説明変数、性能パラメータを目的変数として決定木解析を行った。

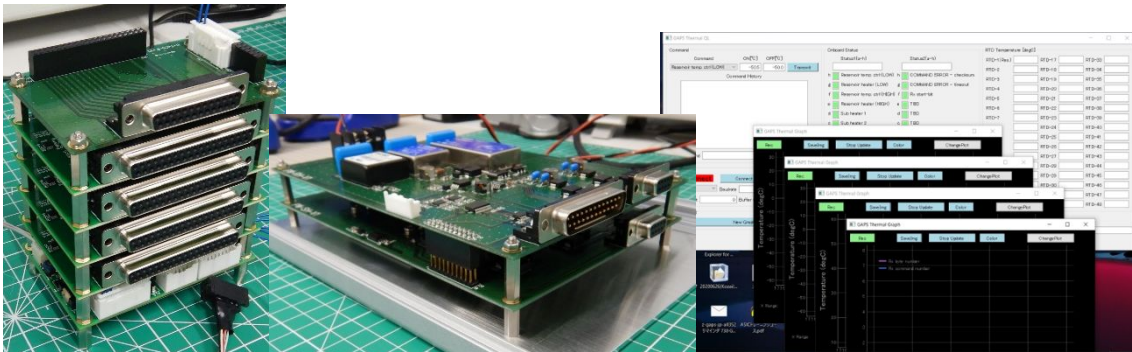


図 2：(左から)本研究で開発したプロセッサモジュール、電源モジュール、運用ソフト。

ットを構築した。性能パラメータの統計解析により量産検出器の統計的性質を明らかにした。さらに多変量解析や教師なし学習などのデータマイニング手法を適用することで、製造パラメータと性能パラメータの因果関係を示した(図 1)。GAPS 観測装置のアップグレードや異分野での活用へ向けて、新型検出器のさらなる品質向上やコスト節減へ繋がる結果である。

(2) 新型ヒートパイプを用いた冷却システムの開発

GAPS 実験では自動振動ヒートパイプとサーモサイフォン(重力で作動流体を駆動する方式)のハイブリッドによる新型ヒートパイプを採用予定である。本研究ではこのデバイスを実運用フェーズへ引き上げるべく、監視・制御系の開発やスケールモデルでの動作実証を行った。さらに GAPS 実験用フライトモデルを完成させてペイロードの構築作業へ参加し、実機での運用試験に成功した。

監視・制御系は温度センサや温調ヒーター、それらを制御し運用端末と通信するプロセッサモジュール、全系への電源供給と電源制御を行う電源モジュール、各信号・電源ケーブル、運用端末で運用者とのインターフェースやデータ取得を担う運用ソフトなどから構成される(図 2)。

温度センサは熱電対と測温抵抗体の比較検討を行い、計測回路や配線の設計自由度が高い測温抵抗体を採用した。プロセッサは人工衛星などでの実績が高い FPGA を採用し、50 点以上に及ぶ温度計測点へ対応するため、多チャンネル ADC 回路を開発した。FPGA は各温度や気圧、各デバイスのステータスをパケット化し、テレメトリデータとして運用端末へ送信する。さらに運用端末からのコマンドデータを受信し、ヒーターなど各デバイスの動作ステータスを制御する。測定温度に従ってデバイスのステータスを制御するなどの自動フィードバック制御も行う。これらの処理を行うアルゴリズムを開発し、プロセッサモジュールへ実装した。プロセッサモジュールの開発と並行して、それとの通信を担う運用ソフトも開発した。

それぞれの回路基板開発では自作 CAD モデルによる試験用基板を初めに製作し、-60 度以下での各素子の耐環境試験を行った。特に電源モジュールは環境依存性が比較的高いと予想されるため、出力ノイズなどのデータを詳細に取得し耐環境性を実証した。その上でフライトモデルを設計し、専門業者での設計レビューののちにフライトモデルを製作した。シリコン検出器は電磁ノイズの影響を強く受けるため、シールド性と耐環境性を兼ね備えたシールドケースとケ

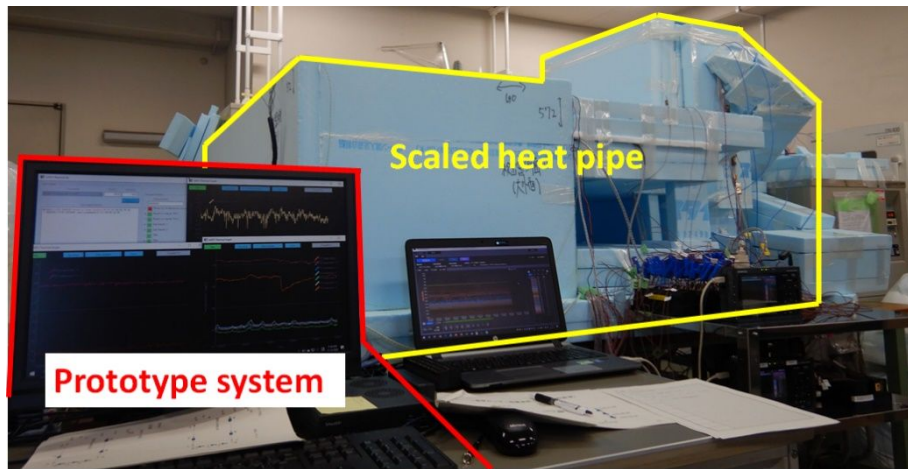


図3：GAPS シリコン検出器アレイ 1/10 モデルでの統合試験。

ーブルを設計・製作した。

これらの統合試験として大型チャンバーでの低圧低温試験を行い、さらに GAPS シリコン検出器アレイの 1/10 モデルでのヒートパイプとの結合試験を行った(図3)。2022 年度後半から GAPS ペイロードの構築が始まったのに合わせ、ヒートパイプと監視・制御系をペイロードへ組み付け、GAPS 全システムとの統合試験を行った。これらいずれの試験でも開発システムの正常動作を示した。以上により、均一な温度分布や低電力、軽量などの特長を持つ新型ヒートパイプを実運用フェーズへ引き上げることに成功した。

(3) 反陽子観測との連携へ向けた地上観測データの解析

GAPS などの飛翔体観測と地上観測を比較する場合、その間に存在する大気効果の評価が大きな課題となる。近年、地上宇宙線の大部分を占めるミュオンの新たな大気効果補正法が提案された。気象再解析による詳細な大気パラメータを用いる手法である。本研究では、惑星間空間磁場の極性と宇宙線異方性の相関関係を活用し、この手法により 0.1%オーダーの異方性を検出できるレベルまで大気効果を補正できることを示した。

<引用文献>

- T. Aramaki, S.E. Boggs, P. von Doetinchem, H. Fuke, C.J. Hailey, S.A.I. Mognet, R.A. Ong, K. Perez, J. Zweerink, Potential for precision measurement of low-energy antiprotons with GAPS for dark matter and primordial black hole physics, *Astroparticle Physics*, Volume 59, 2014, 12-17, <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2014.03.011>.
- M. Kozai, H. Fuke, M. Yamada, K. Perez, T. Erjavec, C.J. Hailey, N. Madden, F. Rogers, N. Saffold, D. Seyler, Y. Shimizu, K. Tokuda, M. Xiao, Developing a mass-production model of large-area Si(Li) detectors with high operating temperatures, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 947, 2019, 162695, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162695>.
- Shun Okazaki, Hideyuki Fuke, Hiroyuki Ogawa, Yoshiro Miyazaki, Katsumasa Takahashi, Noboru Yamada, Meter-scale multi-loop capillary heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, Volume 141, 2018, 20-28, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.116>.
- M. Kozai, K. Tokunaga, H. Fuke, M. Yamada, C.J. Hailey, C. Kato, D. Kraych, M. Law, E. Martinez, K. Munakata, K. Perez, F. Rogers, N. Saffold, Y. Shimizu, K. Tokuda, M. Xiao, Statistical investigation of the large-area Si(Li) detectors mass-produced for the GAPS experiment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 1034, 2022, 166820, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166820>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kozai M., Tokunaga K., Fuke H., Yamada M., Hailey C.J., Kato C., Kraych D., Law M., Martinez E., Munakata K., Perez K., Rogers F., Saffold N., Shimizu Y., Tokuda K., Xiao M.	4. 巻 1034
2. 論文標題 Statistical investigation of the large-area Si(Li) detectors mass-produced for the GAPS experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 166820 ~ 166820
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.166820	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 Saffold N., Rogers F., Xiao M., Bhatt R., Erjavec T., Fuke H., Hailey C.J., Kozai M., Kraych D., Martinez E., Melo-Carrillo C., Perez K., Rodriguez C., Shimizu Y., Smallshaw B.	4. 巻 997
2. 論文標題 Passivation of Si(Li) detectors operated above cryogenic temperatures for space-based applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165015 ~ 165015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.165015	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 Kozai M., Tokunaga K., Fuke H., Erjavec T., Hailey C.J., Kato C., Madden N., Munakata K., Perez K., Rogers F., Saffold N., Shimizu Y., Xiao M.	4. 巻 1
2. 論文標題 Analysis of Mass-production Data of the GAPS Si(Li) Detectors using Data-mining Methods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)	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/NSS/MIC44867.2021.9875898	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 該当する
1. 著者名 Fuke Hideyuki, Shimizu Yuki, Kozai Masayoshi, Rogers Field, Perez Kerstin, Hailey Charles J.	4. 巻 1
2. 論文標題 Potential and Application of Large-area Si(Li) Detectors developed for the GAPS Project	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)	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/NSS/MIC44867.2021.9875615	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 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 小財正義
2. 発表標題 南北異方性を用いた宇宙線モジュレーションの研究
3. 学会等名 2022年度ISEE研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小財正義、宗像一起、加藤千尋、門倉昭、片岡龍峰
2. 発表標題 ミュオン計ネットワークを用いた銀河宇宙線の南北異方性の研究
3. 学会等名 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小財正義、宗像一起、加藤千尋、門倉昭、片岡龍峰
2. 発表標題 地上ミュオン計ネットワークを用いた宇宙線南北異方性の解析
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小財正義、宗像一起、加藤千尋、門倉昭、片岡龍峰
2. 発表標題 銀河宇宙線の多地点観測による南北異方性の解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kozai, M. Saijo, K. Tokunaga, S. Okazaki, H. Fuke, A. Kawachi, Y. Shimizu
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF CONTROL AND MONITORING SYSTEM FOR THE GAPS HEAT PIPE
3. 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小財正義, 西城大, 徳永翔, 岡崎峻, 福家英之, 河内明子, 小林聖平, 水野広基, 清水雄輝, 鈴木俊介
2. 発表標題 GAPS実験用ヒートパイプの運用システムの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小財正義, 宗像一起, 加藤千尋, 門倉昭, 片岡龍峰, 村瀬清華, 三宅晶子, GMDN collaboration
2. 発表標題 南極昭和基地の宇宙線計を用いた南北異方性の解析
3. 学会等名 2021年度 ISEE研究集会 太陽地球環境と宇宙線モジュレーション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kozai, K. Tokunaga, H. Fuke, T. Erjavec, C.J. Hailey, C. Kato, N. Madden, K. Munakata, K. Perez, F. Rogers, N. Saffold, Y. Shimizu, M. Xiao
2. 発表標題 Analysis of mass-production data of the GAPS Si(Li) detectors using data-mining methods
3. 学会等名 IEEE NSS MIC 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小財正義
2. 発表標題 地上観測および気球観測による銀河宇宙線研究
3. 学会等名 極域データの保全・公開と利活用に関する研究集会-II
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Kozai, S. Tokunaga, H. Fuke, T. Erjavec, C.J. Hailey, C. Kato, N. Madden, K. Munakata, K. Perez, F. Rogers, N. Saffold, Y. Shimizu, M. Xiao
2. 発表標題 Mass production of large-area lithium-drifted silicon detectors for the GAPS silicon tracker
3. 学会等名 TIPP2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Kozai for the GAPS collaboration
2. 発表標題 The GAPS instrument to search for low-energy cosmic antinuclei as a dark matter signature
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小財正義, 他33名
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS 実験の進捗報告
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小財正義 for the GAPS collaboration
2. 発表標題 宇宙線反粒子観測実験GAPSと太陽モジュレーション
3. 学会等名 令和2年度ISEE合同研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小財正義, 徳永翔, 福家英之, T. Erjavec, C.J. Hailey, 加藤千尋, N. Madden, 宗像一起, K. Perez, F. Rogers, N. Saffold, 清水雄輝, M. Xiao
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS実験用リチウムドリフト型シリコン検出器の開発(4)
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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	コロンビア大学	MIT	