

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00159

研究課題名（和文）キセノンガス検出器によるニュートリノレス二重ベータ崩壊探索

研究課題名（英文）Search for neutrinoless double beta decay with a Xenon gas detector

研究代表者

市川 温子（ICHIKAWA, Atsuko）

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：50353371

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,300,000円

研究成果の概要（和文）：ニュートリノを伴わない（無）二重ベータ崩壊を、ニュートリノ有効質量にして数 meV/c²まで感度を持って探索することを目指してAXEL検出器の開発を進めてきた。そのためのステップとして本研究では、まず1,000リットル(L)検出器の全体設計およびガス容器の製作を行い、東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子実験施設に設置した。設計にもとづいて小型のものを試作し、既存の180リットル容器に設置し検出器全体としての性能評価を行ったところ、1.8 MeVの電子に対するエネルギー分解能として半値全幅で0.73%を得ており同種の検出器としては世界最高性能を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無二重ベータ崩壊探索をより高感度で行うために開発してきた検出器技術の高い性能を実証することができた。無二重ベータ崩壊の探索は、ニュートリノの特異な軽さの起源、そして宇宙においてなぜ反物質が消えて物質だけが残ったのかという、世界=宇宙の起源を知りたいという人類の根源的な知的要求に答える上で重要な課題である。

研究成果の概要（英文）： We have been developing an AXEL detector with the aim of searching for neutrino-less double beta decay with a sensitivity down to the neutrino effective mass of a few meV/c². As a step to realize this, in this study, the overall design of the 1,000-liter (L) detector was first carried out and the gas chamber was fabricated and installed at the Kamioka Observatory of ICRR, the University of Tokyo. Based on the design, a small prototype was built and installed in an existing 180-liter container to evaluate the overall performance of the detector. An energy resolution of 0.73% full width at half maximum was obtained for 1.8 MeV electrons. This is the highest performance in the world for a detector of this type.

研究分野：素粒子実験

キーワード：二重ベータ崩壊 キセノンガス検出器 タイムプロジェクションチェンバー

1. 研究開始当初の背景

スピン 1/2 の素粒子に逆電荷を持つ反粒子が存在することは、1930 年に P. Dirac により予言され、2 年後には陽電子の発見によって確立した。電荷を持たない粒子の場合には、自身が反粒子となり得ることが 1937 年に E. Majorana によって指摘されたが、その唯一の候補であるニュートリノが、このマヨラナ粒子にあたるのかどうかはいまだ不明である。素粒子の質量はヒッグス機構によって与えられていると考えられているが、他の素粒子に比べて 5 桁以上軽いニュートリノの質量を同じ機構で生成するには無理がある。その軽さの起源を説明する最も有力な理論 (シーソー機構)、また宇宙の創生期において反物質は消えて物質のみが残った過程を説明する理論「レプトジェネシス」は、高いエネルギースケールに未知の物理法則があること、そしてニュートリノがマヨラナ粒子であることを前提して成り立っている。このように、ニュートリノがマヨラナ粒子であるのかどうかは、新しい種類の素粒子の発見という意味で本質的に重要であると共に、素粒子の質量の起源、高いエネルギースケールの未知の物理法則、宇宙に残る物質の起源を理解する上での鍵となっている。

ニュートリノがマヨラナ粒子であるのかどうかを追及するため、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) の探索が世界各地で進められている。これは、一つの原子核内で同時に 2 回のベータ崩壊 (二重ベータ崩壊) が起き、その際に仮想的に生成される二つのニュートリノがマヨラナ粒子であるために対消滅することで起きる現象である。この崩壊は、ニュートリノの質量が小さいほど寿命が長くなる (少なくとも 10^{26} 年以上) ためごく稀にしか起きない。当面の世界的な目標はニュートリノ有効質量が $20 \text{ meV}/c^2$ までを探索することであり、1 トン程度の二重ベータ崩壊核が必要とされるとともに背景事象を桁違いに削減することが求められている。実際には、ニュートリノ有効質量はさらに小さい可能性が高いことが最近のニュートリノ振動実験から示唆されており、既存の実験技術では決着をつけるのが困難な状況にある。

2. 研究の目的

もし背景事象がほぼない状態で測定を行うことができれば、1 トンの崩壊核で数年の測定を行うことでニュートリノ有効質量にして数 meV/c^2 に感度を持つことができる。我々は、このような探索を目指して、高エネルギー分解能、大容積、高い背景事象識別能力の検出器による AXEL (A Xenon ElectroLuminescence detector) プロジェクトを立ち上げた。本研究では、プロジェクトの R&D フェーズから移行し、まず現在の世界記録を狙える感度の検出器を製作することを目的とする。

3. 研究の方法

$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索は放出される数 MeV の 2 個の β 線のエネルギーの和が作るピークを探すことで行われる。したがって、高い分解能でのエネルギー測定により背景事象の混入を抑えること、背景事象源である周辺放射能の低減、背景事象識別能力が要求される。我々の進めている AXEL 検出器の概念図を図 1 に示す。二重ベータ崩壊核 ^{136}Xe を 8 気圧まで充填したタイムプロジェクションチェンバー (TPC) である。光電子増倍管 (PMT) でシンチレーション光を検出し事象の起き

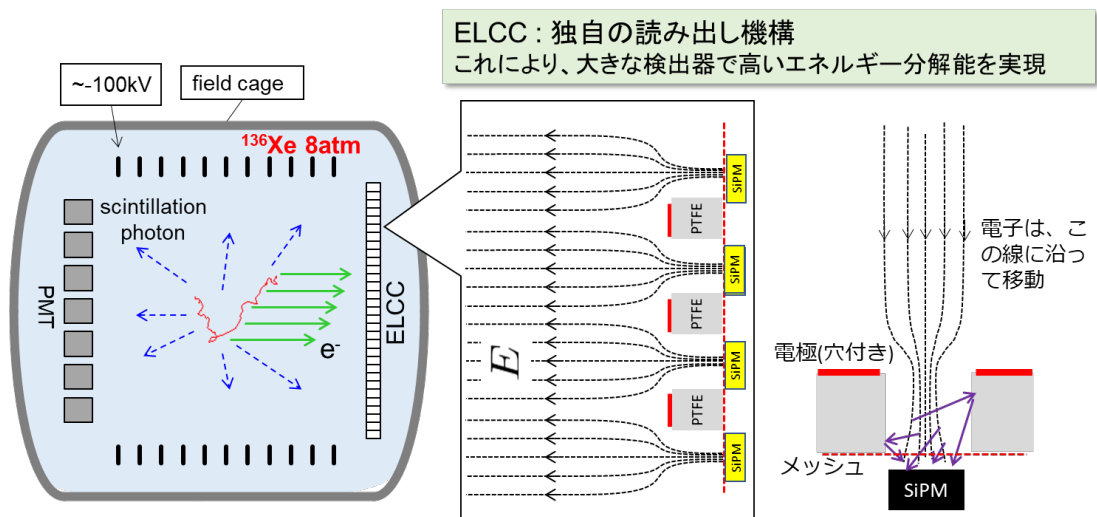


図 1 検出器の概念

図 2 ELCC の概念図

た時刻を決定する。 β 線により発生した電離電子は、ELCC と呼ばれる電離電子検出面までドリフトさせる。ELCC では高電場により発光(エレクトロルミネッセンス, EL)増幅して、MPPC 光検出器で検出しエネルギーを測定する。MPPC を 10 mm 間隔で並べることにより、二重ベータ崩壊で放出された電子 2 個の 3 次元の飛跡の再構成も行う。

本研究では 0 ν $\beta\beta$ 探索を行うための検出器を製作する。この検出器により目指す最終的な目標は、濃縮 ^{136}Xe 30 kg を充てんし、背景事象混入が 0.05 事象/年以下、すなわち「バックグラウンドフリーな 0 ν $\beta\beta$ 探索」を行うことである。本基盤研究 A の範囲では、検出器全体の製作と 30kg の ^{136}Xe の購入は予算的に不可能なためチャンネル数を絞った上で検出器を製作する。

4. 研究成果

8 気圧で 30kg のキセノンガス含有することができる 1,000 リットル(L) 検出器の全体設計を行った。シミュレーションにもとづいてガス容器の全体形状、信号ポートの数、電離電子検出面のサイズと読み出しチャンネル数を決めた。検出器を内包するガス容器は、内圧 9 気圧に耐えられ、かつアウトガスを抑えるためステンレス製で、円筒部と両端の鏡板部からなる構造を持つ。内部で用いる高電圧から容器への放電を防ぐため、高密度ポリエチレン (HDPE) の筒が容器内側に配置される。容器は円筒部でフランジ構造を介して二つに切り分けられる構造で、信号や電圧供給ケーブルは、気密フィードスルーが取り付けられたポートから容器外側に取り出す。

1,000L 検出器を設置して測定を行う場所として、東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子実験施設のクリーンルームの使用許可を得た。当該場所を整備し、ガス容器を開閉するためのレール等を設置したのちに、製作したガス容器を設置、アライメント調整を行い、大型で重いガス容器の開閉が 2 人で手動で行えるようになっている。

容器内部の電場を形成するフィールドケージは、一様性の高い領域を広く確保するために直径の異なる 2 種類のリング電極を互い違いに並べて抵抗で接続した構造とした。

二重ベータ崩壊探索で用いる予定の貴重な ^{136}Xe ガスを万が一にも逃さないように、フェイルセーフなガス循環系を製作した。

ELCC については、モジュール間のギャップでの放電耐性を向上するため、ギャップに蓋をする構造とし、高い電圧印加に成功した。検出器の各構成要素からの放射線の測定を行ったところ、ELCC の MPPC のセラミックスパッケージの放射能が高く、二重ベータ崩壊探索において深刻な背景事象源になることがわかった。また後述するように電離電子検出効率を高めることでエネルギー分解能を向上することが可能なことが判明した。大口径 MPPC 素子を直接 FPC 基板上に載せることでパッケージなしで使用せずに ELCC 用アレイを製作することができた。

シンチレーション光の検出効率をコストを抑えつつ向上するために、波長変換板を開発した。キセノンシンチレーションの真空紫外光を青色に変換するテトラフェニルブタジエンとポリスチレンをトルエンに溶かした溶剤をアクリルの表面にスピンコーティングすることで、表面の鏡面を維持した波長変換板を製作することに成功した。この波長変換板の表面以外の面を ESR の鏡面反射フィルムで覆い、SiPM センサーで青色光を検出することで、安価で高効率のシンチレーション検出を実現する目途が立った。

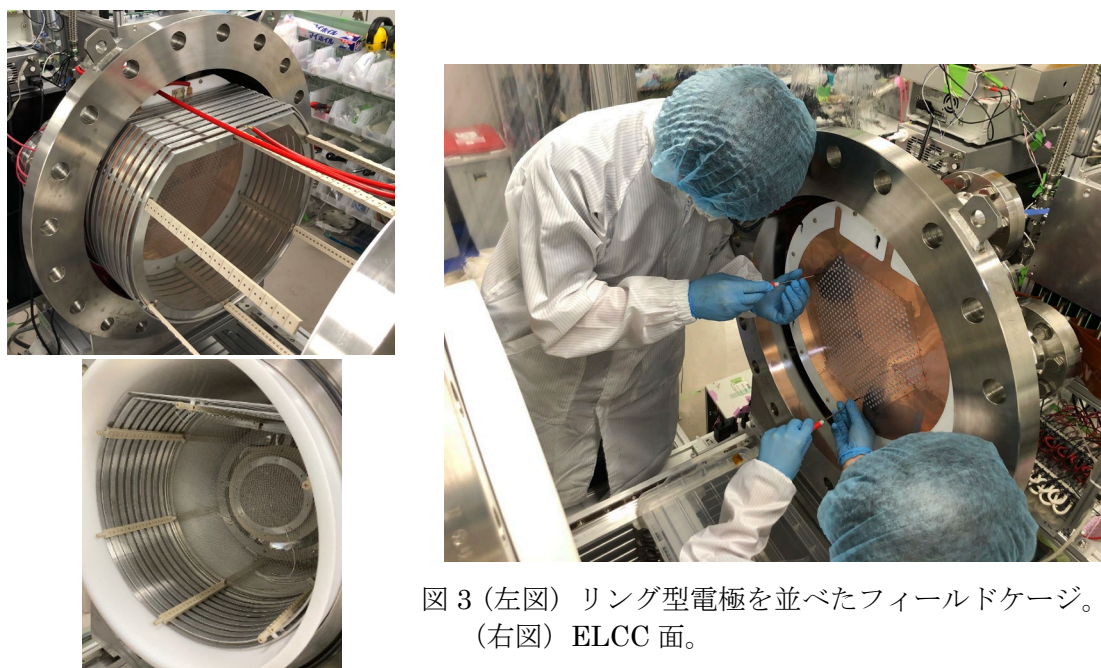


図 3 (左図) リング型電極を並べたフィールドケージ。
(右図) ELCC 面。

フィールドケージのリング電極の小型のものを試作し、既存の 180 リットル容器に設置し (図 3) 検出器全体としての性能評価を行った。MPPC の非線形、ドリフト中の吸着による電離電子のロスなどの各種補正法を確立し、図 4 のようなエネルギースペクトルを得ることができた。1.8 MeV の電子に対するエネルギー分解能として半値全幅で 0.73%を得ており同種の検出器としては世界最高性能を達成した。また分解能を決めている要因を特定した[1]。主な要因のうち、補正精度に由来するものが 0.43%、MPPC のサイズを大きくすることや電場強度を上げることで改善できる要因が 0.29%あることがわかり、これらの要因を取り除き、エネルギー分解能を最高で 0.37%まで改善する可能性が見えてきた。MPPC の非線形性のゆらぎ、デジタルイザモジュールの初段のローパスフィルタとサンプリング周波数の影響は十分に小さいことを証明した。飛跡パターンについては、機械学習の入力に重要な拡散係数の測定に成功した。

これらの結果をもとに、我々の開発した検出器技術で ^{136}Xe 1 トンの検出器で 10 年間 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索データを取得すると半減期の 90%信頼度の下限値として、現在のエネルギー分解能で 1.2×10^{27} 年、0.37%のエネルギー分解能では 2.5×10^{27} 年の感度が得られることを示した。

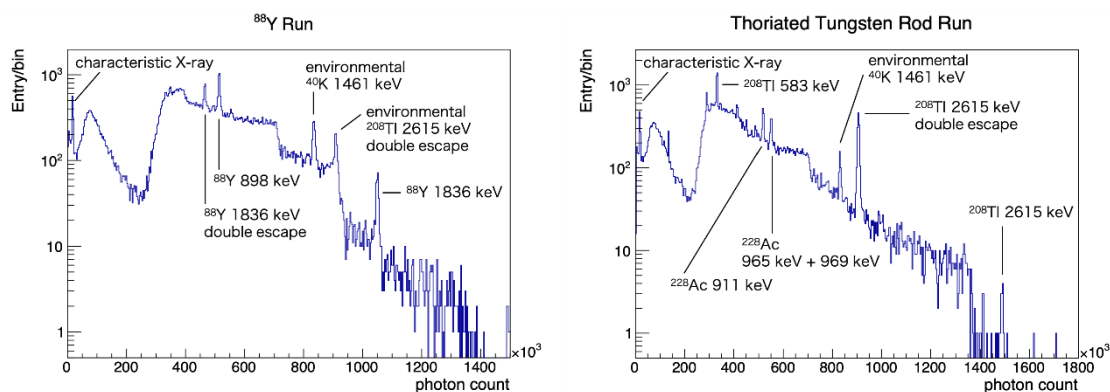


図 4 180 リットル検出器により得られた電子のエネルギー分布

[1] “High-pressure xenon gas time projection chamber with scalable design and its performance at around the Q value of ^{136}Xe double-beta decay”, M. Yoshida *et al.*, PTEP, 2024,1, 013H01

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakamura K. Z., Ban S., Ichikawa A. K., Ikeno M., Nakamura K. D., Nakaya T., Obara S., Tanaka S., Uchida T., Yoshida M.	4. 巻 67
2. 論文標題 Front-End Electronics for the SiPM-Readout Gaseous TPC for Neutrinoless Double-Beta Decay Search	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 1772 ~ 1776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2020.2988716	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 Ban Sei	4. 巻 1468
2. 論文標題 AXEL : High pressure Xe gas TPC for neutrinoless double-beta decay search	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012207 ~ 012207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012207	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 -

1. 著者名 Yoshida M, Ban S, Hirose M, Ichikawa A K, Iwashita Y, Kikawa T, Minamino A, Miuchi K, Nakadaira T, Nakajima Y, Nakamura K D, Nakamura K Z, Nakaya T, Obara S, Sakashita K, Sekiya H, Sugashima B, Ueshima K	4. 巻 1468
2. 論文標題 Drift field generation with Cockcroft-Walton voltage multiplier in xenon gas for AXEL 0v search detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012151 ~ 012151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012151	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 -

1. 著者名 Obara S., Ban S., Hirose M., Ichikawa A.K., Kikawa T., Nakamura K.Z., Nakaya T., Tanaka S., Yoshida M., Iwashita Y., Sekiya H., Nakajima Y., Ueshima K., Miuchi K., Nakamura K.D., Minamino A., Nakadaira T., Sakashita K.	4. 巻 958
2. 論文標題 AXEL: High-pressure Xe gas TPC for BG-free $0\ 2$ decay search	5. 発行年 2020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 162803 ~ 162803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.162803	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 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中村輝石
2. 発表標題 希少事象探索にむけた高圧キセノンガスによる放射線検出器開発
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 菅島文悟
2. 発表標題 AXEL: Efforts to develop a large gas Xe TPC
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 中村和広
2. 発表標題 AXEL実験 88Y(1.8MeV)のガンマ線による180L大型試作機の性能評価
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 吉田 将
2. 発表標題 Demonstration by 180 L detector
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川 温子
2. 発表標題 Towards neutrinoless double-beta search with 100L detector
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村輝石
2. 発表標題 高圧キセノンガス検出器を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊探索
3. 学会等名 令和3年度東京大学宇宙線研共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅島文悟
2. 発表標題 AXEL実験：180L検出器での 測定結果と今後の計画
3. 学会等名 MPGD & Active媒質TPC2021研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅島文悟
2. 発表標題 AXEL実験：ニュートリノを伴わない 二重ベータ崩壊探索のための 大型キセノンガス検出器の設計
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村輝石
2. 発表標題 AXEL実験：大型試作機phase2の最新結果
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅島文悟
2. 発表標題 ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索に向けたAXEL 1000LキセノンTPCのバックグラウンド評価
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」若手研究会 ポスターセッション
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小原脩平
2. 発表標題 高圧キセノンガス検出器開発の現状
3. 学会等名 新学術地下宇宙2021領域研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村和広
2. 発表標題 0 探索実験AXEL 大型試作機にまつわる苦労話エトセトラ
3. 学会等名 MPGD & Active媒質TPC2020研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 潘 晟
2. 発表標題 High pressure xenon gas TPC for neutrinoless double-beta decay search : AXEL
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 将
2. 発表標題 Detector performance of AXEL prototype high-pressure Xe gas TPC for 0 search
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 将
2. 発表標題 高圧キセノンガスTPCでミグダル効果の観測なるか?
3. 学会等名 ミグダル観測検討会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 将
2. 発表標題 AXEL実験: 大型試作機の662 keVガンマ線によるエネルギー分解能の評価
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 潘 晟
2. 発表標題 シミュレーションによるAXEL検出器の詳細な理解
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村和広
2. 発表標題 ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索のための高圧XeガスTPC大型試作機の開発状況
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅島文悟
2. 発表標題 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための固体キセノンをを用いたバリウムイオン検出への取り組み
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市川温子 for B0班およびAXEL collaboration
2. 発表標題 B01「ニュートリノはマヨラナか？希力？検出器による革新測定の開拓」報告
3. 学会等名 新学術成果報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村輝石
2. 発表標題 ガス検出器を用いたミグダル事象の観測可能性について
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村和広
2. 発表標題 AXEL実験？ 大型試作機のための読み出し機構の開発と性能評価（にむけた準備）
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅島文悟
2. 発表標題 0 探求のための固体Xeを用いたBaイオン検出器の開発（AXEL）
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 潘 晟
2. 発表標題 AXEL実験：大型試作機の511keVガンマ線によるエネルギー分解能の評価
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

AXEL https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/Neutrino/AXEL/index.html

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	木河 達也 (KIKAWA Tatsuya) (60823408)	京都大学・理学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	中村 輝石 (NAKAMURA Kiseki) (80750463)	東北大学・理学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	中島 康博 (NAKAJIMA Yasuhiro) (80792704)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	関谷 洋之 (SEKIYA Hiroyuki) (90402768)	東京大学・宇宙線研究所・准教授 (12601)	
研究分担者	小原 脩平 (OBARA Shuhei) (70834711)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教 (11301)	

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
---------	---------