

令和 6 年 4 月 24 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04004

研究課題名（和文）軽いアクシオンの粒子探索のためのモノリシックピクセル検出器を用いた光検出器の開発

研究課題名（英文）Development of monolithic type pixel detector to search for axion like particle

研究代表者

田窪 洋介（Takubo, Yosuke）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：50423124

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はFASER実験に2025年春にインストールされる予定である前段シャワー検出器を開発することが目標である。本研究ではまず、前段シャワー検出器に使用するSiGe-BiCMOSピクセルのための基板類のプロトタイプを開発した。そして、問題点などを洗い出し、実機に使用するための基板類を完成させた。また、理論研究にも取り組み、いくつかの新物理模型に対するFASER実験の感度評価にも取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙観測によって、宇宙の全エネルギーの25%は未知の素粒子である暗黒物質で占められていると考えられている。FASER実験は暗黒物質やそれと相互作用する新粒子の探索を行っている。前段シャワー検出器をFASER実験に導入することで、それらの新粒子への感度を飛躍的に向上することができる。もしFASER実験で新粒子が発見されれば、宇宙に対する理解が大きく前進し、人類の物事に対する認識の仕方まで変革する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to develop the new preshower detector and install it into the FASER experiment in 2025 spring. For that purpose, the prototypes of the PCBs used for the SiGe-BiCMOS sensors of the preshower detector were developed. Optimizing the design, the final version of the PCBs was produced. In addition, the theoretical studies were performed to evaluate the sensitivity of the FASER to the new particles in several new physics models.

研究分野：素粒子実験

キーワード：SiGeピクセル検出器 新粒子 素粒子実験 FASER カロリメータ

1. 研究開始当初の背景

宇宙観測によって、暗黒物質は宇宙のエネルギー全体の約 25% を占めており、素粒子の標準模型を超える新物理に属すると考えられている。暗黒物質と標準模型の粒子が弱い相互作用程度の強さで結合する場合、暗黒物質の残存量からその質量は 100 GeV 程度と期待されてきた。このような暗黒物質は、欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC (Large Hadron Collider) 加速器を用いた ATLAS 実験や CMS 実験などで精力的に研究されてきたが発見に至っていない。このような背景を踏まえ、MeV-GeV 領域に新粒子 (暗黒物質、媒介粒子、新たな荷電粒子など) が属する「暗黒セクター」が存在し、標準模型世界との間に微弱な相互作用を持つと考える理論が注目を浴びている。

ALP (Axion Like Particle) は新たな繰り込み不可能な演算子を導入することで発生する擬スカラー 1 重項で、軽い新粒子の有力候補である。ALP は LHC の陽子・陽子衝突で生成される中間子の崩壊や、と LHC の構造物と相互作用することで作り出せる。もし、ALP の質量が MeV から GeV 程度ならば、生成された新粒子は超前方に飛んでいく。ALP は最終的に崩壊するが、弱く相互作用している場合には ALP は長寿命となるので、ビーム衝突点から数百メートル離れた場所に検出器を置く必要がある。

MeV から GeV 程度の軽い新粒子探索を目的に、我々は FASER (ForwArD Search ExpeRiment) 実験を 2022 年に開始した。FASER 実験は、ATLAS 実験のビーム衝突点から 480 m 下流にある LHC への連絡トンネル内に検出器を設置してある (図 1 上)。現状では、FASER 実験の電磁力ロリメータはセグメント化されていないため、 $a \rightarrow \gamma\gamma$ (a は ALP) からの 2γ を識別できず、ALP に対する探索能力は限られている。従って、FASER 実験で ALP を探索するためには、高い 2γ 識別能力を持つ光検出器を設置する必要がある。

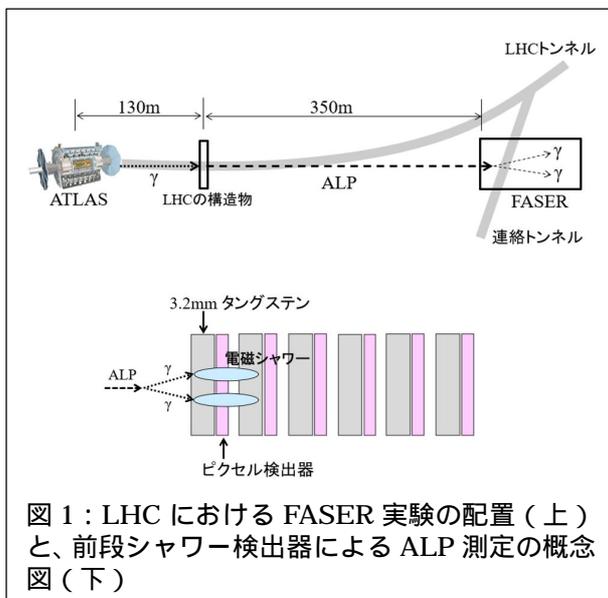


図 1: LHC における FASER 実験の配置 (上) と、前段シャワー検出器による ALP 測定 の概念図 (下)

2. 研究の目的

FASER 実験で ALP が崩壊して出てきた 2γ を分離して捕らえるために、本研究では新たな光検出器である前段シャワー検出器の開発を行った。前段シャワー検出器は電磁力ロリメータの手前に置かれ、カリロメータに入射する前に個々の 2γ を捕らえる。前段シャワー検出器は、ピクセル検出器とタングステン層をサンドイッチ構造にしたレイヤー 6 層で構成される (図 1 下)。ALP は超前方に TeV 程度の運動量を持っているので、前段シャワー検出器は非常に近接した 2γ

を識別しなければならない。さらに、同じビーム衝突由来の背景事象と分離するために、100 ps 程度の高い時間分解能が必要となる。我々は、65 μ m の六角形のピクセル・サイズと 300 ps の時間分解能を持つ、BiCMOS モノリシック型ピクセル検出器を用いた光検出器の開発を行った。また、FASER 実験の新物理模型に対する感度評価にも取り組んだ。

3. 研究の方法

図 2 に前段シャワー検出器に使用するピクセル・モジュールとレイヤーの概念図を示す。ピクセル・センサーは $2.2 \times 1.5 \text{ cm}^2$ のサイズで、それを 6 個フレキシブル基板 (モジュール基板) に接着してモジュールとする。そして、このモジュールを 12 個使用して 1 レイヤーとする。モジュール基板はピクセル・センサーに電源と信号線を供給するために必要となる。また、モジュール基板をデータ収集システムと接続するための 10~40 cm のフレキシブル

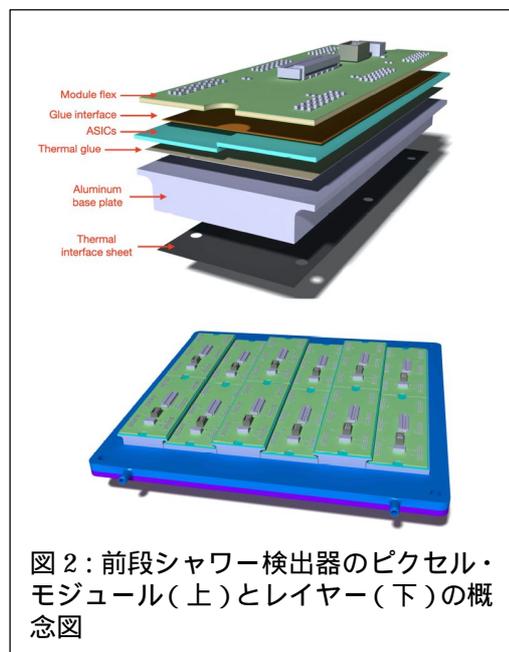


図 2: 前段シャワー検出器のピクセル・モジュール (上) とレイヤー (下) の概念図

基板（信号転送用基板）と、電源と接続するための基板（電源基板）が必要となる。本研究ではこれらの基板の開発を行った。

FASER 実験は暗黒セクターに属する様々な粒子に感度を持ち得る。そのため、本研究では理論家と協力して FASER 実験の新物理模型に対する感度評価にも取り組んだ。

4．研究成果

前段シャワー検出器を実現するため、まずプロトタイプ検出器を開発した。途中、新型コロナウイルスの影響などでセンサーの開発が 1 年ほど遅延したが、2022 年にプロトタイプが完成した。研究代表者は、研究協力者である音野氏とジュネーブ大学と協力して、プロトタイプに使用するためのモジュール基板、信号転送用基板、電源基板を開発した（図 3）。これらの基板を使用してプロトタイプ・モジュールを作成し、CERN でビームテストを実施するなど、性能評価試験を行った。

性能評価の結果に基づいてセンサーや基板類の設計を修正し、2023 年から実機用ピクセル検出器の開発を開始した。研究代表者はプロトタイプと同様、実機のためのモジュール基板、信号転送用基板、電源基板を担当した。2024 年 2 月までに全ての基板類が完成した。既に実機用センサーも完成しており、今後、これらの基板を用いてピクセル・モジュールを製造する。性能評価試験で問題がなければレイヤーを開発し、前段シャワー検出器に組み上げる。そして、2025 年春に FASER 検出器にインストールすることを目指す。

前段シャワー検出器の開発に加えて、理論研究による新粒子への感度評価にも取り組んだ。暗黒ヒッグスが 2 つの暗黒フォトンに崩壊する事象や、新粒子がレプトン・フレーバを破る崩壊に対する FASER 実験の感度を評価した。それらの結果を学術論文にまとめた。

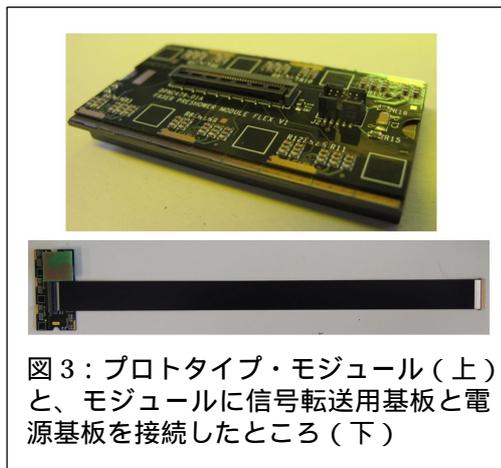


図 3：プロトタイプ・モジュール（上）と、モジュールに信号転送用基板と電源基板を接続したところ（下）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Araki Takeshi, Asai Kento, Otono Hidetoshi, Shimomura Takashi, Takubo Yosuke	4. 巻 2023
2. 論文標題 Search for lepton flavor violating decay at FASER	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1と25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2023)145	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 Ishikawa Akimasa, Sakaki Yasuhito, Takubo Yosuke	4. 巻 2022
2. 論文標題 Search for axion-like particles with electron and positron beams at the KEK linac	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1と13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptac129	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 Abreu Hense, Yosuke Takubo, et. al.	4. 巻 1034
2. 論文標題 The tracking detector of the FASER 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 166825 ~ 166825
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2022.166825	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 FASER Collaboration	4. 巻 104
2. 論文標題 First neutrino interaction candidates at the LHC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 L091101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.L091101	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 The FASER collaboration	4. 巻 16
2. 論文標題 The trigger and data acquisition system of the FASER experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P12028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/12/P12028	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 Takeshi Araki, Kento Asai, Hidetoshi Otono, Takashi Shimomura, Yosuke Takubo	4. 巻 3
2. 論文標題 Dark Photon from Light Scalar Boson Decays at FASER	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)072	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7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Yosuke Takubo
2. 発表標題 High-energy neutrino measurements with FASERnu
3. 学会等名 ICHEP2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 LHC-FASER実験における新粒子探索に向けたデータ取得の状況とアップグレード計画
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 Development of FASER preshower detector to search for right-handed neutrinos
3. 学会等名 ニュートリノ新学術研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 LHC-FASER実験用SiGe-BiCMOSモノリシック型ピクセル検出器の開発
3. 学会等名 測定器開発プラットフォーム シリコン検出器班 第四回ミーティング（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 LHC-FASER実験用シリコン検出器のコミッショニング状況とアップグレード計画
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 LHC-FASER実験用シリコン検出器のインストール状況とアップグレード計画
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 LHC-FASER実験における新粒子探索
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

FASER https://home.cern/science/experiments/faser FASER Japan https://faser-japan.org/ FASER KEK https://faser.kek.jp/
--

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
研究協力者	音野 瑛俊 (Otono Hidetoshi)		

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