

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13943

研究課題名（和文）方向に感度のある暗黒物質探索におけるガスTPCの超微細読み出し

研究課題名（英文）Development of fine pitch pixel readout gas TPC detector for direction-sensitive dark matter search

研究代表者

東野 聡 (Higashino, Satoshi)

神戸大学・理学研究科・学術研究員

研究者番号：00895469

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は方向感度をもつ暗黒物質の直接探索実験において、低質量領域への探索感度を向上すべくピクセル型の微細読み出しを用いたガスTPCの開発を行った。微細ピクセル読み出しはその電子回路の集積度の高さから挑戦的であったが、独自に読み出しのASICを開発することで問題打開を試みた。開発したASICは各チャンネルに独立に波形取得用のADCが搭載されており、それらが設計通りに動作することを確認した。これにより、開発したフロントエンドが原理的に暗黒物質探索実験に適用可能であることを示した。また、並行してASICに搭載するピクセル電極設計も進め、暗黒物質検出器として運用するためのツールを揃えた段階に至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ピクセル読み出しのためのガスTPC読み出し用のASICは世界中の様々な機関でそれぞれ開発されているが、本研究で開発したASICは波形読み出し用のADCが付いていること、そのアナログ応答で独自のものであり、方向感度をもつ暗黒物質探索のための読み出し回路として他では代用できないものになっている。低質量の暗黒物質探索においては、方向感度のない探索では太陽ニュートリノ由来の背景事象の分離が難しいことから、本研究の成果は低質量領域探索において重要な進展である。また、開発したASICは他の素粒子・原子核実験での利用にも関心を持たれており、分野を超えたシナジーが期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a gaseous TPC with pixelized readout for the direction-sensitive direct dark matter search to improve its sensitivity in the low-mass region. The development of pixelized readout was challenging due to the high integration of the electronics. In order to solve this issue, we developed a dedicated ASIC. The ASIC has ADCs to obtain waveforms for each channel. We confirmed that ADCs in all channels work as designed. This achievement demonstrated that our front-end electronics is applicable to dark matter experiments. In parallel, we also proceeded with the design of pixelized electrodes. Finally we reached the stage where we obtain all the tools to operate a dark matter experiment.

研究分野：素粒子原子核実験

キーワード：暗黒物質 ガス検出器 ピクセル検出器 TPC

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質の直接探索においては液体キセノン検出器などを用いた大質量検出器が、特に Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) 探索に厳しい制限をかけているものの、未だ暗黒物質の発見には至っていない。上記検出器は、10 GeV 以下の WIMP に対しては、太陽ニュートリノ起源の背景事象が効いてくる領域 (ニュートリノフロア) まで制限が迫っており、それ以上に探索感度を向上させることが難しくなっている。方向に感度を持つ探索を推進する NEWAGE 実験は、ガス TPC 内で暗黒物質が物質と相互作用し、反跳した原子核の飛跡を検出する仕組みで実験を行なってきた。この方法では、ガスを WIMP 標的に用いるため大容量の検出器が必要となる一方、太陽ニュートリノ起源の背景事象を WIMP 事象候補から分別することができるため、特に低質量の WIMP 探索に期待が高まっている。

一方、WIMP 由来の原子核反跳はそのエネルギーが大きくとも 100 keV 以下であると見積もられており、原子核反跳飛跡も非常に短いため、NEWAGE 実験を始めとしたガス TPC での方向感度を持つ暗黒物質探索実験では低圧ガスを利用することで飛程を伸ばす努力をしてきた。しかし、10 GeV 以下の質量を持つ WIMP 探索のためにはそれだけでは足りず、検出器の読み出しピッチをより微細なものにする必要があった。方向感度を持つ解析で世界をリードする NEWAGE 実験は、400 μm 間隔のストリップ型読み出し検出器を使用してきたが、この読み出しピッチが低質量探索に制限をかけているため、これを超える超微細読み出し機構を持ったガス TPC 検出器の開発が必要となった。

2. 研究の目的

本研究は、低質量の WIMP 探索に向けた超微細読み出し機構を持つガス TPC の開発を目的として進めた。O(10) μm の読み出しピッチを持つことに加え、ストリップ読み出しからピクセル読み出しに変更することで飛跡再構成精度を向上させることを目指した。この粒度でピクセル読み出しができ、三次元飛跡の再構成とともにエネルギー測定が可能なガス TPC は希少であり、世界中で関心が持たれていた。微細読み出しに伴う読み出しチャンネル数の増加などによりチャレンジングな開発が求められた一方、従来 of ガス TPC の性能を大きく引き上げることが見込まれる開発項目であった。

3. 研究の方法

当初は既存のシリコンピクセル検出器をガス検出器に流用する計画であったが、調査の結果、既存のものでは暗黒物質探索のためのガス TPC 読み出しに適用できないことが判明した。これにより、新規にガス TPC のためのピクセル読み出しシステムを構築することから研究を開始した。ピクセル検出器の難点はその膨大な読み出しチャンネルを高集積度で処理することである。それを解決するための読み出し ASIC の開発を行った。ASIC は KEK の E-Sys グループと共同で開発することにした。ASIC の開発は、性能評価のために ASIC 搭載基板の開発や DAQ 開発などを伴う。これらの開発と性能評価を完了させたのち、ピクセル電極を搭載してガス TPC 検出器を開発することにした。

4. 研究成果

ピクセル読み出しガス TPC には先行研究があったものの、当時アナログ回路の不具合で実用化に至らなかった検出器が存在した。先行研究では、アナログ回路の修正とその動作検証のためにストリップ型検出器を開発していたものの、研究はそこで滞っていた。本研究では、新型 ASIC 開発に向けてまずその検出器を動作させ、アナログ応答含め回路が正しく動作することの検証から開始した。

図 1 は動作検証用のストリップ読み出し型ガス検出器が、TPC として正常に機能している様子を示している。課題であったアナログ応答の問題も解決しており、この回路をもとに新規にピクセル読み出し用の ASIC 開発を行うことにした。

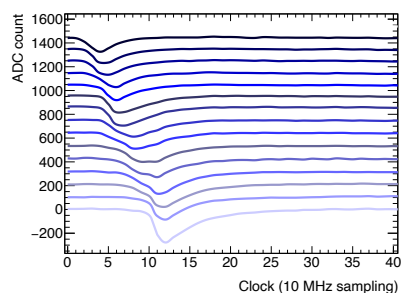
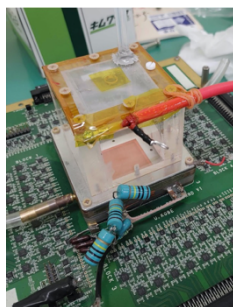


図 1: 動作検証用のストリップ読み出し型ガス TPC 検出器 (左図) と、宇宙線ミュオン測定で得られた各ストリップの波形 (右図)。

KEK の E-Sys グループの協力のもと開発した新型 ASIC である "QPIX NEO" は図 2 に示す通り、8×8 チャンネルを 2 mm 角に収める高集積な回路となった。各チャンネルに搭載するアナログ、デジタル回路の要求から想定より大きなサイズとなってしまったが、先に述べた NEWAGE 実験の検出器を上回る微細読み出しを達成できる見込みである。各チャンネルにはそれぞれ ADC を搭載しており、動作検証に用いた検出器と同様に波形読み出しが可能である。ガス TPC として各チャンネルが動作するための要求を満たす設計で製造ができた。

QPIX NEO が設計通り動作するかの検証のため QPIX NEO 搭載基板を開発した。また、その制御用に市販品の Xilinx 社製 SoC (ZYNQ) 搭載基板を購入し、図 3 のような構成で DAQ システムを構築することにした。このシステムは ZYNQ 上にソフトウェアとファームウェアを搭載しておく必要があり、その両方についての開発を行った。

開発した DAQ システムを用い、各チャンネルにテストパルスを入射して動作試験を行った様子を図 4 に示す。左図はとあるチャンネルにテストパルスを入れたときの典型的な波形を示しており、アナログ応答が設計値通りの挙動をしていることを示した。右図はテストパルスの電荷を変えてリニアリティ試験を行った結果である。QPIX NEO は各チャンネルに 2 種類のゲインモード (High/Low) があり、これらを自動的に切り替えることで高ダイナミックレンジを実現しているが、その両方のモードで仕様通り動作していることを確認した。これにて、QPIX NEO が暗黒物質探索に実用的であることを示した。

現在、実際にガス検出器に搭載するための電極を開発中であり、設計段階まで完了した。実際に検出器運用までは至らなかったが、難題であった読み出しシステム開発をクリアし、ガス TPC 開発が現実的であることを示した。さらに、本 ASIC はデータ転送量を削減したモード (ToT 読み出し) も搭載しており、動作検証中である。用途の幅も広がり、暗黒物質探索のみならず、他分野での運用も見込まれている。

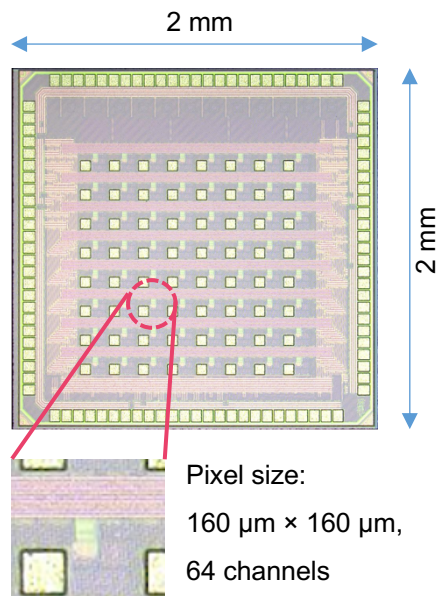


図 2: 本研究で開発した ASIC。QPIX NEO と命名した。



図 3: QPIX NEO 性能評価のために構築した DAQ システム。

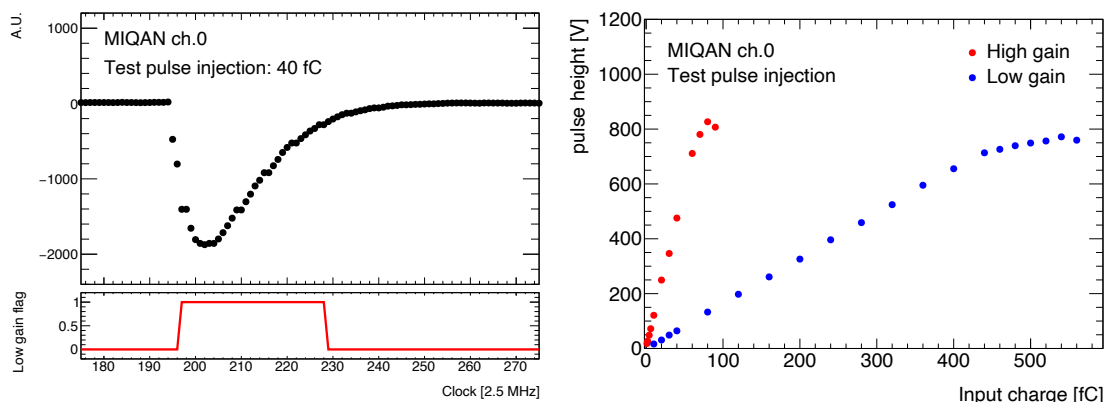


図 4: 開発した DAQ システムを用いて QPIX NEO にテストパルスを入射して取得した波形 (左図) と、テストパルス試験によって得られたリニアリティ測定結果。各ゲインモードで設計値通りに動作しており、QPIX NEO が暗黒物質探索に適用可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Higashino Satoshi, Ikeda Tomonori, Nakayama Ayaka, Ofuji Mizuno, Miuchi Kentaro	4. 巻 18
2. 論文標題 Development of negative-ion gaseous TPC using micro pattern readout for direction-sensitive dark matter search	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C06012 ~ C06012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/18/06/C06012	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 Nagao Keiko I., Higashino Satoshi, Naka Tatsuhiro, Miuchi Kentaro	4. 巻 2023
2. 論文標題 Directional direct detection of light dark matter up-scattered by cosmic rays from direction of the Galactic center	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 061 ~ 061
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/07/061	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 NEWAGE collaboration	4. 巻 2023
2. 論文標題 Direction-sensitive dark matter search with 3D-vector-type tracking in NEWAGE	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad120	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14件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Satoshi Higashino
2. 発表標題 Directional dark matter search with gaseous detectors
3. 学会等名 UGAP2022 workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Higashino
2. 発表標題 Development of negative-ion gaseous TPC using micro pattern readout for direction-sensitive dark matter search
3. 学会等名 MPGD2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東野聡
2. 発表標題 暗黒物質探索実験に向けた陰イオンガスTPCの動作検証
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 東野聡
2. 発表標題 陰イオンガスTPCのピクセル読み出し計画
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東野聡
2. 発表標題 NEWAGE実験72：方向感度を持つ暗黒物質探索のための大型ガスTPC運転状況
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Higashino
2. 発表標題 NEWAGE: direction-sensitive direct dark matter search
3. 学会等名 ICRC2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Higashino
2. 発表標題 NEWAGE: direction-sensitive direct dark matter search
3. 学会等名 TAUP2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Higashino
2. 発表標題 Direction sensitive dark matter search with gaussous TPCs
3. 学会等名 UGAP2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 東野聡
2. 発表標題 ピクセルガスTPCを用いた低質量暗黒物質探索への挑戦
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」若手研究会2023
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 東野聡
2. 発表標題 ガス飛跡検出器による方向に感度を持つ暗黒物質探索実験
3. 学会等名 令和5年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 東野聡
2. 発表標題 低質量暗黒物質探索に向けたピクセルガスTPC開発
3. 学会等名 MPGD&Active媒質TPC2023研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東野聡
2. 発表標題 NEWAGE実験78：低BG検出器を用いた方向感度を持つ暗黒物質探索地下実験
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東野聡
2. 発表標題 低質量暗黒物質探索に向けたピクセルガスTPC開発
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東野 聡
2. 発表標題 NEWAGE実験75：大型ガスTPCを用いた方向感度を持つ暗黒物質探索地下実験
3. 学会等名 2023年日本物理学会年次大会(秋)
4. 発表年 2023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