

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03684

研究課題名(和文) ニュートリノ原子核反応の理解にむけた大型液体アルゴンTPC測定器の開発研究

研究課題名(英文) Development of a large size liquid argon TPC toward a neutrino interaction measurement

研究代表者

坂下 健 (Sakashita, Ken)

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・准教授

研究者番号：50435616

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)：ニュートリノ原子核反応の理解にむけて液体アルゴンタイムプロジェクションチェンバーの開発研究を進めた。本研究では、高い信号-雑音比で信号読み出し可能な気液2相型測定器の開発を行った。ガス電子増幅器(GEM)を用いて約9倍の増幅率で電離電子の読み出しに成功した。一方で読み出し面を大きくしたときに放電が生じることも分かり、今後、高抵抗物質を電極に用いたGEMの開発などが必要である。信号増幅読み出しと並行して、雑音を低く抑えて大きな信号量まで飽和することなく読み出すことができるエレクトロニクスの開発も進めた。ダイナミックレンジや内部ノイズ量など検出器からの要求を満たすことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノ原子核反応の理解は、ニュートリノ振動の全容解明にむけて事前に解決すべきステップである。液体アルゴンTPCは、反応から放出される荷電粒子の飛跡を3次元で詳細に捉え高い粒子識別やエネルギー測定能力によりニュートリノ原子核反応を詳細に調べることができるが、実際の実験に必要な大型化に課題がある。本研究成果を基に、液体アルゴンTPCの大型化にむけた課題の1つ、高い信号-雑音比での信号読み出しが可能になった。また、本研究で開発する検出器技術開発は、他の素粒子原子核の測定器や、医療用イメージングデバイスへの応用も可能である。

研究成果の概要(英文)：The development of a large size "Liquid Argon Time Projection Chamber (LAR TPC)" was studied. In this study, we developed a dual-phase liquid-argon TPC to realize a high signal-to-noise ratio. We successfully achieved to observe a signal from cosmic-ray muon events in which the signal gain was about 9 with the dual-phase TPC. On the other hand, we also turned out that a electrical discharge of the large area GEM boards is one of serious problem toward the realization of large size LArTPC. We plan to develop a GEM using a high resistive material in order to resolve this problem. In parallel with the dual-phase readout R&D, we also developed an application-specific integrated circuit (ASIC) that can read out a large size signal without any saturation and keeping a low noise. It was confirmed that the ASIC satisfied the requirements from the detector such as a dynamic range and amount of internal noise as predicted by the simulation.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 液体アルゴンTPC

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理の研究では、ヒッグス粒子の発見や新しいニュートリノ振動モードの発見など、大きな進展があった一方で、宇宙に反物質がなく物質優勢となった宇宙進化の謎や他の素粒子に比べて非常に軽いニュートリノ質量起源の解明など残っている課題も多く、これらの解明が宇宙・素粒子実験の流れである。この解明の1つのアプローチがニュートリノでの粒子・反粒子対称性(CP対称性)の測定である。ニュートリノのCP対称性の破れが見つかれば、物質優勢宇宙の解明や軽いニュートリノ質量が示唆する新しい物理に対する重要なヒントとなる。

一方で、ニュートリノCP対称性測定に向けては、ニュートリノと物質の反応(ニュートリノ原子核反応)の理解不足を事前に解決する必要がある。複数の核子や π 中間子が2次粒子として付随する反応やミュー型と電子型ニュートリノの間の反応違いを詳細に調べるためには、高い粒子識別能力やエネルギー測定能力をもつ測定器が必要となる。これまでのニュートリノ測定器には、これらの能力が十分ではなかった。そこで本研究では、3次元イメージング液体アルゴンTPCに注目した。液体アルゴンTPCでは、荷電粒子が通過したときに生成される電離電子を読み出して粒子の飛跡を3次元で捉えることができ、粒子識別やエネルギー測定能力が高い。しかし、実際の測定に必要な $\sim 100\text{ton}$ クラスの検出器では、測定器の構造から信号・雑音比があまりよくなく、ニュートリノ反応の詳細理解に必要な低い運動量の粒子の検出効率が良くなかった。

2. 研究の目的

本研究では、ニュートリノ原子核反応の詳細測定にむけて、高い信号・雑音比で信号読み出しが可能な、気液2相型の液体アルゴンTPCの大型化に向けた要素技術の開発研究を行う。

3. 研究の方法

高い信号・雑音比での信号読み出しを実現するために、以下の2つの課題解決を試みた。

(1) 気液2相型TPCによる信号増幅の実現

気液2相型は、電離電子を測定器上部のガス領域に取り出し、ガス領域に設置した増幅装置で信号を増幅して読み出す(図1)。海外の他の実験の液体アルゴンTPCの構造は、電離電子の読み出し機構が液体アルゴン中に設置してあるために、このガス増幅による信号増幅がない。気液2相型では、数倍以上の信号増幅が見込まれる。本研究では、ガス電子増幅器(GEM)を用いる。10cm x 10cmの大きさの小型検出器による実証試験や、大面積(50cm x 50cmのユニットを並べた構造)による実証試験や安定運転試験を行い、検出器の大型化を目指す。

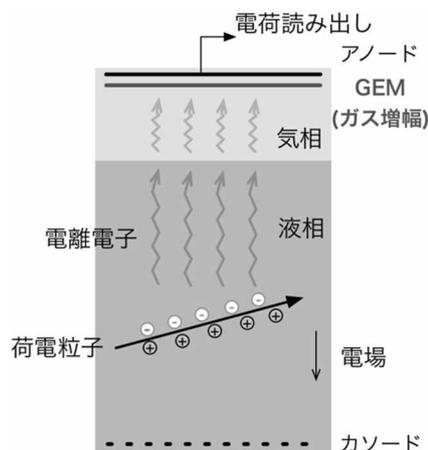


図1：気液2相型TPC

(2) 低雑音での信号読み出しにむけたエレクトロニクスの開発

(1)で行う信号増幅に加えて、雑音をできるだけ小さくして読み出しできるように、読み出しエレクトロニクスの開発を進める。雑音を小さくするためには、エレクトロニクスを検出器の中、つまり液体アルゴンに近い低温環境下に設置することが考えられる。低雑音で信号のダイナミックレンジが広い特定用途向け集積回路(ASIC)の開発を進める。

4. 研究成果

(1) 気液2相型TPCによる信号増幅の実現

内容量30リットルの液体アルゴンTPCに10cm x 10cmのガス増幅器(GEM)およびストリップ読み出しを組み込んで、アルファ線源や宇宙線による性能評価を行った。まず、ガスアルゴン中でのGEMの信号増幅率の印加電圧依存性を測定した。次にこのGEMを液体アルゴン上部で運転し、宇宙線ミュー粒子が液体アルゴン中を通過する際に生成される電離電子を上部ガス相に取り出し、このGEMで増幅して信号増幅された宇宙線トラック事象の観測を行なった。図2で見られるとおり、信号の増幅に成功し、高い信号・雑音比での信号読み出しに成功した。GEMに33kV/cmの電場を印加し、約9倍の増幅率で安定に運転することを達成した。一方で、長時間運転では、信号量の時間変化が見られた(図3)。これはGEM基板の増幅率が時間とともに減少して行っている

ためである。GEM 基板の増幅率の測定を 30 リットル TPC 容器にガスアルゴンだけ充填したセットアップで測定した結果や国際共同実験 WA105 でのスタディ結果から、GEM 基板のチャージアップが原因と考えられる。一方で、大型化にむけた大面積 GEM (50cm x 50cm) の開発を WA105 で進めたところ、本研究で開発した GEM の構成では大型化したときに放電しやすいことが問題となった。

今後、大型化にむけては、放電を抑えながらかつ増幅率の時間変化を小さくする改良が必要となる。その方法としては、高抵抗物質を電極に用いた GEM の開発等を考えている。

(2) 低雑音での信号読み出しにむけたエレクトロニクスの開発

(1) で進めた信号増幅で信号が大きくなると、出力信号が飽和しない領域 (ダイナミックレンジ) を広げる必要がある。シミュレーションによるスタディから液体アルゴン TPC による最小電離粒子による事象に対して、電子シャワー事象は信号量が 50 倍程度大きい。そこで、これらの信号をカバーするダイナミックレンジを持ち、かつエレクトロニクス自体の雑音を少なく抑えた新しい信号増幅回路を特定用途向け集積回路 (ASIC) として開発した。

まず、シミュレーションでパラメーターを最適化し、試作チップの評価を進めた。この結果、以前は -70fC 程度で飽和していたダイナミックレンジが -1400fC まで拡大できることを達成した (図 4)。開発したこのエレキは、さらに雑音を下げるために検出器に極力近づけるために低温環境下でも動作可能なことを目指しており、今後、低温での動作の最適化を進める。

以上のように 2 つの課題に対して研究開発を進め、成果をまとめた。液体アルゴンの大型化に向けてまだ解決しないと行けない課題も残っているが、その解決の方向は概ね明確になったといえる。今後の研究では、残った課題を解決してニュートリノ原子核反応の詳細測定を目指す。

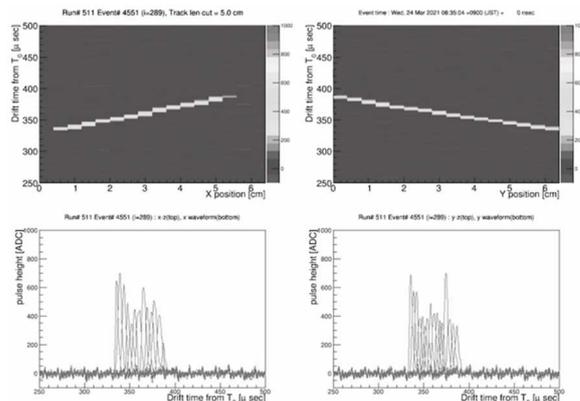


図 2 : 宇宙線による信号

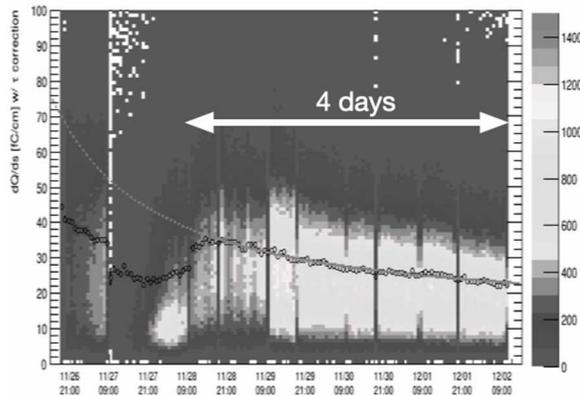


図 3 : 信号量の時間変化

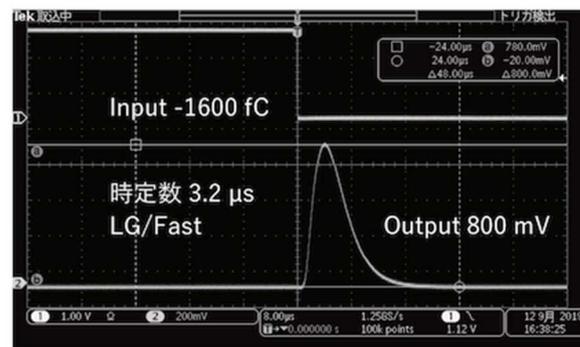


図 4 : 開発した ASIC からの出力信号

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 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 B.Aimard他	4. 巻 13
2. 論文標題 A 4 tonne demonstrator for large-scale dual-phase liquid argon time projection chambers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 P11003-P11003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/13/11/P11003	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 M.Nakazawa 他	4. 巻 14
2. 論文標題 Prototype Analog Front-end for Negative-ion Gas and Dual-phase Liquid-Ar TPCs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 T01008-T01008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/14/01/T01008	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 Kishishita T., Sumomozawa S., Kosaka T., Igarashi T., Sakashita K., Shoji M., Tanaka M.M., Hasegawa T., Negishi K., Narita S., Nakamura T., Miuchi K.	4. 巻 15
2. 論文標題 LTARS: analog readout front-end ASIC for versatile TPC-applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 T09009 - T09009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/15/09/T09009	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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 五十嵐大翔(岩手大)、坂下健(KEK) 他
2. 発表標題 液体アルゴンTPC用信号読み出しエレクトロニクスの開発
3. 学会等名 マイクロバターンガス検出器 (MPGD) & アクティブ媒質TPC合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂下健
2. 発表標題 大型液体アルゴンTPC開発
3. 学会等名 アクティブ媒質TPC座談会
4. 発表年 2019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
研究協力者	笠見 勝祐 (Kasami Katsuyu) (50391727)	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・専門技師 (82118)	

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			
フランス	University of Lyon	CEA/IRFU	LAPP	他2機関
スイス	University of Bern	CERN	ETH Zurich	
スペイン	IFAE	University of Granada	CIEMAT	