

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800158

研究課題名(和文) ストレンジ・ダイバリオン探索実験に用いる高時間分解能TOF検出器の開発

研究課題名(英文) Development of a high-resolution TOF counter using a MPPC array for strange-dibaryon searches

研究代表者

佐久間 史典 (Sakuma, Fuminori)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号：10455347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARCで行う「反K中間子原子核探索実験」や「S=-2ダイバリオン探索実験」で使用するための、Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)を用いた安価でロバストな高時間分解能Time-of-Flight検出器の開発を行った。本研究では、複数のMPPCを直列接続してプラスチック・シンチレーターを読み出す技術を用いて、100ps以下の時間分解能を有した検出器を開発し、その技術を確立した。このような100ps以下の時間分解能を有した小型で安価/ロバストな検出器は、J-PARC/RIBF等での原子核実験において今後さらに重要性が増していくものである。

研究成果の概要(英文)：We developed a cost-effective and robust high-resolution Time-of-Flight detector with Multi-Pixel Photon Counters (MPPCs), which is used for "kaonic nuclear states search experiments" and "S=-2 di-baryon search experiments" at J-PARC. In this work, we developed and established a high-resolution detector with time resolution of less than 100 ps by using series-connected 3 MPPCs read-out on both sides of a plastic scintillator slab. Usage of such the high-resolution detector with cost-effectiveness and robustness becomes increasingly important in the field of nuclear experiments at J-PARC and RIBF.

研究分野：高エネルギー原子核実験

キーワード：MPPC 高時間分解能 TOF K中間子原子核

1. 研究開始当初の背景

我々は J-PARC K1.8BR において、反 K 中間子原子核探索実験(E15)を行っている。反 K 中間子原子核は反 K 中間子と原子核の強い束縛状態であり、強い引力であると知られる  $K^{\bar{b}ar}N$  相互作用の帰結としてその存在が理論的に予想されている [PRC65(2002)044005 等]。このような反 K 中間子原子核が存在すると、原子核密度の数倍にも及ぶ非常に密度の高い状態になっているとの理論予想もあり、反 K 中間子凝縮やカイラル対称性回復現象等を実験室レベルで検証出来る可能性がある。J-PARC E15 実験では、 $3He(K^-,n)$  反応を用いて反 K 中間子原子核  $K^-pp$  の存否及びその性質を調べ、 $K^{\bar{b}ar}N$  相互作用のりなす様々な可能性をアイソスピン依存性も含めて追求する。また、その発展である  $S=-2$  を持ったダイバリオン  $K^-K^-pp$  束縛状態の存在も理論的に予想されているが[図 1]、現在までその存在は実験的に確認されておらず、QCD が予言する豊かな原子核の存在形態の理解を進める上で重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では J-PARC で行う「 $K^-3He \rightarrow pn$  反応を用いた反 K 中間子束縛状態探索実験 (E15)」や「stopped- $p^+3He \rightarrow X$  を用いた  $S=-2$  ダイバリオン探索実験」で用いる、Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を用いた安価でロバストな高時間分解能 Time-of-Flight (TOF) 検出器の開発を行った。MPPC の特徴は安価で高レート耐性を有し磁場中でも高ゲインで動作することであるが、広く用いられている「プラスチックシンチレーターを波長変換ファイバー等で読み出す方法」では特性上時間分解能は 1ns 程度となり、TOF 検出器としての使用には不向きである。そこで、「複数の MPPC を直接プラスチックシンチレーターに直接装着し直列で読み出す方法」により、100ps 以下の

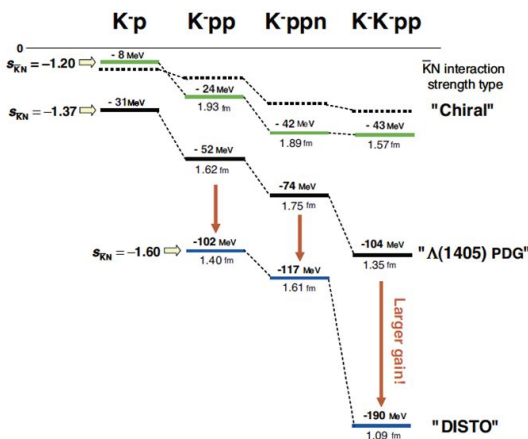


図 1：反 K 中間子束縛状態の束縛エネルギーに対する理論予想 [Proc. Jpn. Acad., B 89 (2013) 418.]

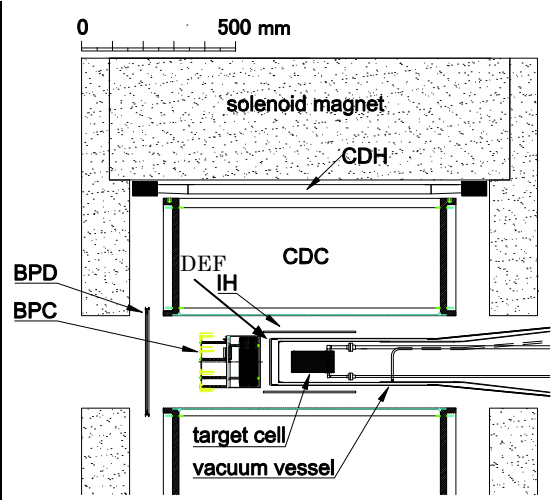


図 2：CDS@K1.8BR。CDC により荷電粒子の飛跡再構築、CDH により粒子識別を行う。

時間分解能を有する検出器の開発を目的とした。

“E15 実験”や“ $S=-2$  ダイバリオン探索実験”は J-PARC K1.8BR にある中心飛跡検出器 (CDS) を用いて行う。CDS は液体  $3He$  標的からの崩壊粒子を再構成する検出器で、その鳥瞰図を図 2 に示す。我々は H24 年度にアクセプタンス向上のためにインナーホドスコープ(IH)を、また同時期にビーム粒子同定のために標的直前に Beam Definition Counter (DEF) を導入した。IH/DEF は共に MPPC と波長変換ファイバーを用いたシンチレーション検出器である。IH を導入したことにより CDS で飛跡再構築・粒子識別が可能な立体角は 60% から 80% まで増加し、また、DEF は  $3He$  標的に当たる粒子の詳細な再構成に用いられている。しかしながら、ファイバー読出の特性により時間分解能が劣るため (~1 ns)、“ $S=-2$  ダイバリオン探索実験”で行うような静止ビームを用いるような実験においては、これら検出器を高時間分解能化して TOF として用いることが必須である。また、E15 のような in-flight 実験においても、これら検出器の高時間分解能化は確固たる粒子識別を行う上でも大変重要となる。

本研究ではこれらの検出器と入れ替わる安価でロバストな高時間分解能 TOF 検出器の開発を行い、高価な高磁場耐性 PMT を使わずを得なかったような実験において、安価に大面積を覆うと同時に実験装置配置の自由度の高い高時間分解能 TOF 検出器を用いることの実現を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、MPPC を用いた高時間分解能 TOF 検出器の開発を行った。MPPC の特徴は、安価 (~1 万円/素子)、高レート耐性、磁場中でも高ゲインで問題なく動作 ( $10^5 \sim 10^6$ )、高速な応答速度、高い量子効率 (~50% @ 400nm)、等が

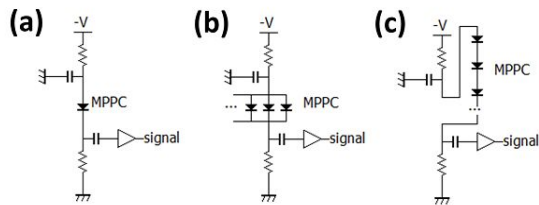


図 3: MPPC の結線方法。(a) 単素子での読み出し: ファイバーを用いた検出器等で使用。(b) 並列接続: 静電容量増加のために S/N 悪化の問題が出る。(c) 直列接続: 静電容量の問題は無い。

あげられる。しかしながら、素子サイズの制限から、ある程度大きな検出器に用いる際にはプラスチックシンチレーターと波長変換ファイバー等を組み合わせて単素子で読み出すことが一般的である[図 3-a]。この読み出し方法ではファイバーの特性上時間分解能が $\sim 1$  ns 程度となるため、時間分解能 100ps 以下が求められる TOF 検出器としての使用には不向きである。また、大面積を覆うために MPPC を並列化して並べると、その静電容量の増大により S/N が大幅に悪化してしまう問題がある[図 3-b]。これらの問題を解決するために、複数の MPPC を”直列接続”して直接プラスチックシンチレーターに装着することにより MPPC の大面積化で問題となる静電容量増加の問題を解決し[図 3-c]、高時間分解能を得ることを目指す。本研究では、先行研究(MEG2 実験アップグレード計画, arXiv:1301.7225) より大きなシンチレーター(20[w]\*200~300[l] \*5[t]mm<sup>3</sup>程度)を用いて、低エネルギー粒子の粒子識別に十分な 100ps 以下の高時間分解能検出器の確立を目指すべく、下記のように開発を進めた:

- (1) MPPC とシンチレーターのカップリング構造を確立する
- (2) 高時間分解能を得るためのプリアンプ開発を行う
- (3) プロトタイプ検出器を用いて、その時間分解能等を調べる
- (4) 時間分解能のシンチレーター長依存等を J-PARC において実際にビームを当てて調べる
- (5) これらの結果を元に既存の DEF を置き換える新しい DEF を作成する。

#### 4. 研究成果

##### (1) MPPC とシンチレーターのカップリング構造の確立

まずは MPPC とシンチレーターの接続方法を確立した。MPPC が故障した場合に容易に交換可能なように、また、集光率を可能な限り失わないように、3つの 3mm 角 MPPC をデルリン製のホルダーに装着し、それをシンチレーターと細い針金で固定する方法を取った。図 4 にこれらの様子を示す。このような方法を

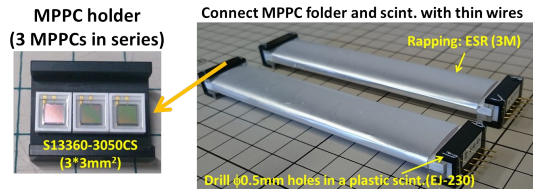


図 4: (左)MPPC ホルダー、(右)MPPC ホルダーとシンチレーターとの固定の様子

採用することにより、集光光子数を失うことなくメンテナンス性が格段に向上した。

##### (2) 高速プリアンプ開発

時間分解能 100ps を切るような高時間分解能を得るには、高速のプリアンプが必要である。本研究では(有)富士ダイヤモンドと協力して、高速プリアンプの開発を行った。開発したプリアンプは RF アンプ(HP MSA-0385)をカスケードで使い pole-zero-cancellation を組み込んだもので(図 5)、バンド幅が 100kHz~2GHz、ダイナミックレンジが $-2V \sim +2V$ 、ゲインが 10~16(PZC に依存)等の性能を持つ。次項に述べる宇宙線によるテスト等で必要な性能を満たしていることを確認した。今回作成したプリアンプは 1ch/module であるが、将来的には 8or16ch/module に集積を試みる予定である。

##### (3) プロトタイプ検出器での宇宙線テスト

まずは、プロトタイプのシンチレーター(EIjen EJ-230, 20[w]\*95[l]\*5[t]mm<sup>3</sup>)を用いて、宇宙線にてその性能評価を行った。プリアンプは前述のもの、MPPC は浜松ホトニクス の 3mm 角を 2 種類(S12572-050C/S13360-3050C)用いてテストした。MPPC は 3 つをシンチレーターの両端に装着して直列

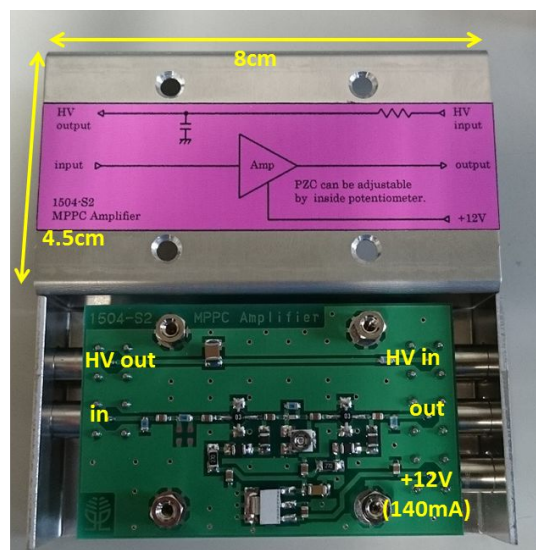


図 5: (有)富士ダイヤモンド製プリアンプ [1504-S2]

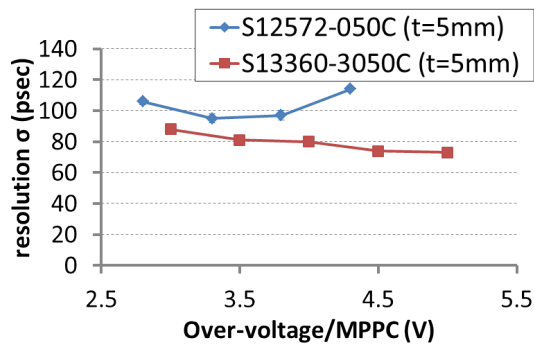


図 6 : 宇宙線を用いたプロトタイプでの、時間分解能の over-voltage 依存

で読み出す。図 6 に時間分解能の over-voltage 依存を示す。図から明らかなように、S13360 の方が良い時間分解能を示す。これは旧型の S12572 よりも新型の S13360 の方がノイズ面で優れているためだと考えられる。実機作成では S13360 を用いた。また、時間分解能も 73ps と性能を満たしていることを確認した。

(4)時間分解能のシンチレーター長依存

次に、断面が  $20 \times 5 \text{mm}^2$  のプラスチック・シンチレーターを用いて、その時間分解能の長さ依存を  $1.0 \text{GeV}/c$  ビームを用いて調べた。実験は J-PARC K1.8BR ビームラインのビームダンプにおいて行い、長さがそれぞれ 45/95/145/195mm における時間分解能はそれぞれ 53/70/74/79ps であることを確認した(図 7)。この結果より、長さ 300mm 程度においても 100ps 程度の時間分解能が期待出来る事が分かり、ビームライン検出器として良く用いるサイズの検出器で MPPC を用いた高時間分解能 TOF 検出器が構築できることを明らかにした。

(5)新しい DEF の製作及び性能評価

これらの結果を基に、K1.8BR スペクトロメーターで用いる新しい DEF の実機を製作した。DEF は断面が  $20 \times 3 \text{mm}^2$ 、長さが 110mm のプラスチック・シンチレーター 5 本からなる検出器で、その検出有効面積は  $96 \times 100 \text{mm}^2$  である。この検出器の性能評価も  $1.0 \text{GeV}/c$  ビームを用いて行い、時間分解能が 77ps である事

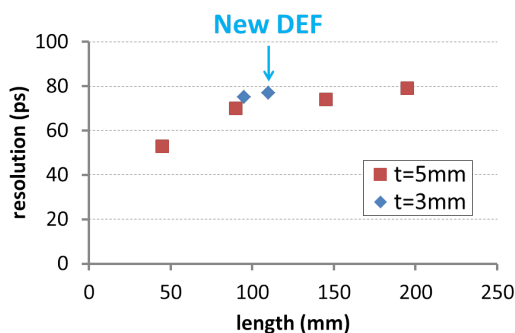


図 7 : 時間分解能のシンチレーター長依存

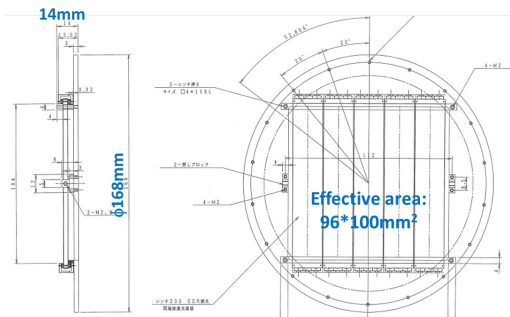


図 8:新しく作成した DEF (beam definition counter)

(図 7)、時間分解能の位置依存性は無い事を確認した。本 DEF は H28 来年度以降スペクトロメーターに組み込んで実験に使用する予定である。

得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望

通常の素粒子原子核実験で用いられるある程度の大きさを持った TOF 検出器において、磁場中でも用いる事が出来る安価でロバストな高時間分解能検出器はこれまで前例が無い。本研究で開発した MPPC アレイを用いた高時間分解能 TOF 検出器を用いると、低予算な実験においても FM-PMT 等の高価な検出器を使用せずに実験が可能となることは特筆すべきことである。従って、J-PARC/RIBF 等での比較的小規模な実験において、このような検出器の需要はますます増えていくものと考えられる。

今後は、中性子検出器に用いるような長さ 1-2m 程度のプラスチック・シンチレーターを MPPC アレイを用いて読み出すことにより、磁場中でも使用できる高時間分解能 TOF 検出器の開発を進めていきたい。このような検出器の利用が可能となると、例えば大型ソレノイド磁石の中に安価に中性子検出器を導入することが可能になる等が期待される。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

Y.Sada, S.Ajimura, M. Bazzi, F.Sakuma, 他, 著者合計 67 人, 46 番目, "Structure near K-+p+p threshold in the in-flight  $3\text{He}(K^-, p)n$  reaction", Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有, 051D01 (2016).

DOI: 10.1093/ptep/ptw040

T.Hashimoto, S.Ajimura, M.Bazzi, F.Sakuma, 他, 著者合計 67 人, 46 番目, "Search for the deeply bound K-pp state from the semi-inclusive forward-neutron spectrum in the in-flight K- reaction on helium-3", Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有, 061D01 (2015).

〔学会発表〕(計 4 件)

佐久間史典, “ ストレンジ・ダイバリオン探索実験に用いる高時間分解能 TOF 検出器の開発 ”, 2016.3/19-22, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学・(宮城県・仙台市)

F.Sakuma, “ Experimental Investigations of the KbarN Interaction at J-PARC K1.8BR ”, 2016.1/18-20, The 31st Reimei WorkShop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC, 日本原子力研究開発機構・(茨城県・東海村)

F.Sakuma, “ Recent results of the KbarNN search via the in-flight  $^3\text{He}(K^-,n)$  reaction at J-PARC ”, 2015.9/7-12, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), 東北大学・(宮城県・仙台市)

F.Sakuma, “ Recent results and future prospects of the KbarNN search via the  $(K^-,N)$  reaction at J-PARC ”, 2014.10/27-31, Achievements and Perspectives in Low-Energy QCD with Strangeness, ECT\*・トレント・イタリア

〔その他〕

ホームページ等

<http://ag.riken.jp/J-PARC/sakuma/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐久間 史典 (SAKUMA Fuminori)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号: 10455347