

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540304

研究課題名（和文） 高時間分解能の大型サンドイッチ型 γ 線検出器の開発

研究課題名（英文） Development of high time resolution and long size sandwich type gamma detector

研究代表者

田島 靖久 (TAJIMA YASUHISA)

山形大学・基盤教育院・准教授

研究者番号：50311577

研究成果の概要（和文）：波長変換ファイバー読み出しの大型サンドイッチ型 γ 線検出器を高時間分解能にするために使用する Multi Pixel Photon Counter (MPPC) の基礎性能の評価を行った。現時点では時間分解能のよい増幅器が必要であることが分かり、その設計・製作を行った。加えて波長変換ファイバー読み出し部分の光量の詳細な位置依存性を測定し、粒子の入射位置の再構成の手法を確立した。また 3 種類のファイバーについて減衰長を測定し、高時間分解能に適したファイバーの選択、実機製作のための基礎データを取得した。

研究成果の概要（英文）：Multi Pixel Photon Counters (MPPC) are added to a long-size sandwich-type gamma detector, which is read out with wavelength shifting fiber (WLSF), to get high time resolution. From the beam experiment, good time resolution pre-amplifiers are needed to read MPPCs for the present time. We measured position dependencies of the light yield of WLSF. From the results, we established reconstruct particle position from light yields of WLSFs. Attenuation lengths of 3 kinds of WLSFs were measured. We selected best fibers for the detector, and basic parameters were got to make a new detector.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）・放射線、X 線、粒子線

1. 研究開始当初の背景

直接 CP 対称性を破る $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 反応は理論計算による不定性も数%と少なく、標準理論から予想されている分岐比は 10^{-11} と大変小さい値になっている。私が参加していた KEK-PS E391a 実験では、Run I のデータから 2.1×10^{-7} 、Run II のデータから 6.7×10^{-8} の上限値を求め、最後の Run III を含

めたデータ解析により、 2.6×10^{-8} の上限値が得られている。

E391a 実験を引き継いで行われている J-Parc E14 実験では、最終的には標準理論より予想されている分岐比よりも小さい、 10^{-13} の感度で測定し、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 反応を検出する実験である。

まず E14 実験の step 1 では E391a 実験で

使用した検出器を改良して実験を始め、 10^{11} の測定感度を目指し、 $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma \bar{\nu}$ イベントの収集を目指す。

E14 実験は E391a 実験と比べて、測定感度が三桁高くなるため、周辺を覆う Barrel γ 線 Veto 検出器 (MB: Main Barrel) の in-efficiency の要求も E391a 実験より厳しくなるため、現状の Main Barrel の内側にさらに γ 線 Veto 検出器 (Inner MB) を追加して入れる計画である。

この Inner MB は鉛-プラスチックシンチレータによるサンドイッチ型のカロリメータになるが、大型 (長さ 2.5m、内径 1.5m) であるため、既存の Main Barrel と同様 Wave Length Shifter (WLS) fiber による読み出しを想定している。しかし、K 中間子ビーム強度が E391a 実験と比べて一桁以上強くなり、アクシデンタルコインシデンスも多く、さらに E391a 実験の解析から分かってきたメインカロリメータの CsI 検出器及びその前面にある荷電粒子 Veto 検出器 (CV: Charged Veto) で後方散乱されて Main Barrel に入ってくる γ 線によるアクセプタンスのロスの影響が顕著になることが実験の解析やシミュレーションから分かってきた。この問題を解消するためには、Inner MB には低エネルギー付近で 1ns 程度の時間分解能が要求される。しかし、WLS fiber 読み出しであるため、WLS fiber による集光効率の悪さ、蛍光寿命の長さから、高い時間分解能を得ることは困難で、現状の仕組みではこの要求を満たすことができない。そのため、新しい高い時間分解能を持つ γ 線検出器の開発が期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、Wave Length Shifter (WLS) Fiber 読み出しにより大型化に成功した鉛-プラスチックシンチレータによるサンドイッチ型 γ 線カロリメータの時間分解能を向上である。

E14 実験の Inner MB では低エネルギー (1MeV) で 1ns 程度の時間分解能が要求される。この条件を満たすための検出器として、WLS fiber 読み出しの検出器の各層のプラスチックシンチレータの側面に Multi Pixel Photon Counter (MPPC) を適当な間隔で取り付け、 γ 線のエネルギー測定と位置測定を WLS Fiber による読み出しで、時間測定、位置測定を側面の MPPC で行う。MPPC をシンチレータの側面につけることで、直接十分な光量のシンチレータの光が得られると考えられる。シンチレータ幅は 20cm 程度であるため時間分解能も十分得ることも期待される。

3. 研究の方法

本研究では、

(1) WLS fiber の検討

サンドイッチ型 γ 線検出器の基礎となる WLS fiber による集光について詳細に調べる必要がある。WLS fiber の種類、太さ、間隔を変えて、荷電粒子の入射位置依存性等を測定する実験を行う。

(2) MPPC の読み出し方法の検討

MPPC を使って時間分解能を向上させるために効率的な MPPC の配置や数を検証する必要がある。そのため MPPC を複数取り付け付けたプラスチックシンチレータのビーム実験を行い、時間分解能を向上させるために必要な配置や読み出し回路の最適化を検討する。この 2 点についてそれぞれの試作機で調査・評価を行い、高時間分解能サンドイッチ型 γ 線検出器の最適な構造を決定することを目標として実験を行う。

4. 研究成果

研究初年度(2010 年度)は MPPC のオペレーションに関するスタディを行った。時間分解能が本研究の重要な点であるために、MPPC で取得する信号は時間分解能を劣化させないために増幅器を通さない信号を用いることで測定を始めた。実験は千葉大学のグループと共同で東北大学電子光物理学研究センターにおいて共同利用実験を申し込み、複数の MPPC を取り付け付けたプラスチックシンチレータ (図 1) に 600MeV/c の陽電子を照射する実験を行った。(課題番号 2730) この測定ではビームによる信号は小さく、十分な時間分解能を得ることができなかった。時間分解能が悪化しないような増幅器の設計が必要で、今後も引き続き実験することにした。しかし、2011 年 3 月の震災により、東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) の加速器も被害に会い、増幅器の設計、実装は完了したもののこの実験の続きができない状態にある。2013 年度には ELPH での実験の

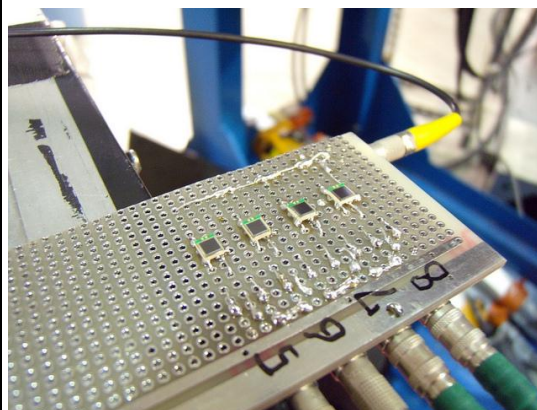


図 1 シンチレータ取付前の MPPC

募集が再開する予定であるので、2013年度にこの実験の続きを申請し、増幅器を用いた場合の時間分解能について評価をする予定である。それまでは、増幅器単体での性能評価、放射線源、および宇宙線を用いた本学の実験室での基礎データ収集作業を行う。

2年目(2011年度)からは主にWLS Fiberの集光についてその詳細に調べるために、WLS Fiberの太さ、配置の間隔を変えた複数のプラスチックシンチレータ(図 2)を用意し、各WLS Fiberを独立に読み出し、粒子の入射位置と獲得光量についての詳細な分布の測定の実験を行った。

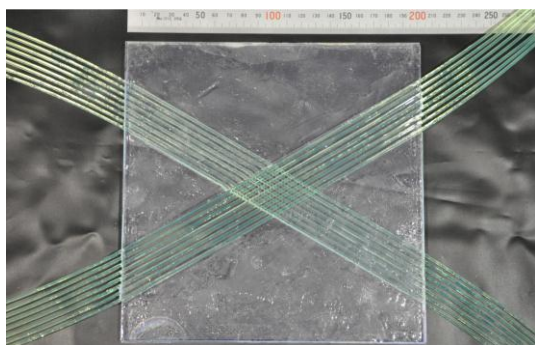


図 2 WLS Fiber を取り付けたプラスチックシンチレータ

こちらの実験もELPHに課題申請をし、承認されていて2011年度に実験の予定であったが、前記のように震災のため行うことができず、約半年遅れで兵庫県にある高輝度光科学研究センター(SPring-8)の大阪大学レーザー電子光実験施設(LEPS)で行った。ここは大強度のγ線を発生させて実験する施設であるが、途中で電子陽電子生成のためのターゲットを置き、分析用電磁石を使って、運動量を選択した電子を用いて実験を行った。

図 3に実験のセットアップを示す。

実験はWLS Fiberを取り付けたプラスチックシンチレータ(図 2のHodoscope)の前面に1mm角のシンチレーティングファイバー8本をそれぞれx,yに張り、1mm×1mmで位置を決定できるビームプロファイルモニタ(BPM)を、背面にはビームの突き抜けを保証するプラスチックシンチレータ(PS)を設置し、Hodoscope内への入射位置を1mmの分解能で決定した。Hodoscopeに取り付けたWLS Fiberは一本毎に光電子増倍管を使って光量の測定を行った。今回使用したHodoscopeは荷電粒子測定の用途も探っていたため、獲得光量を均一化するために、プラスチックシンチレータに溝を掘ってWLS Fiberを埋めずに、

平板のプラスチックシンチレータの表と裏にWLS Fiberをはわせ、WLS Fiber間は発光しないアクリル板で間を埋めたものを使用した。

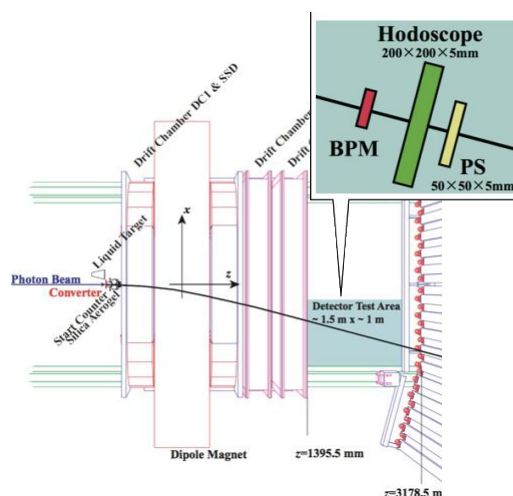


図 3 SPring-8 実験セットアップ

実験の解析の結果、ビームの入射位置とWLS Fiberの獲得光量の相関を得ることができ、読みだしたWLS Fiberからの距離と獲得光量との関係の詳細な分布を得ることができた。(図 4)

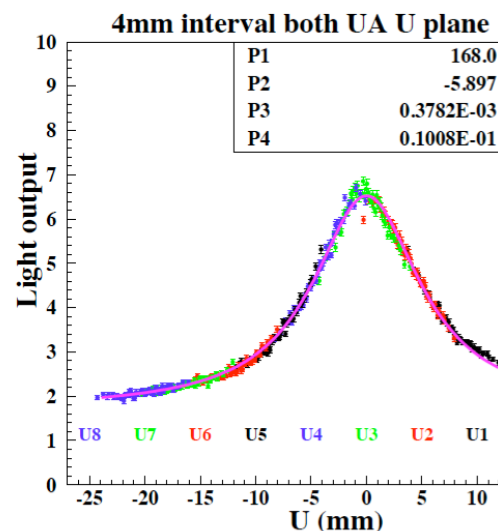


図 4 WLS Fiber 光量の位置依存性

このWLS Fiberの発光量と入射位置との関係を用いて、各WLS Fiberの発光量から粒子の入射位置の再構成を試み、その結果、4mmの位置分解能を得た。今回の測定で分解能が悪かった原因は主に各WLS Fiberの獲得光量が少ないことが挙げられる。これを改善することで位置分解能をさらに向上できることが期待される。

今回試験をした Hodoscope は前述のように WLS Fiber をプラスチックシンチレータの表面に接着したもので、溝を掘って埋め込んでいない。これが主に獲得光量の減少の原因と考えられる。

大型の検出器において最も重要となるのは読み出しを行なっている WLS Fiber のパラメータは減衰長である。減衰長が短いと遠距離からの信号の光量が少なくなってしまう、位置、時間分解能の劣化に直結するためである。今回この減衰長を測定するために新しくシステムを構築した。これまでは放射線源を用いて測定するシステムを使っていた。このシステムは WLS Fiber にプラスチックシンチレータを取り付け、放射線源を用いて測定するようになっているため、実際の使用状態に最も近い形で測定されるという利点があるが、線源の強度が決まっているため測定時間が長くなる、WLS Fiber の多数の位置で測定するため測定点の切り替えに時間がかかってしまい、時間的に効率のよい測定ができないという欠点があった。今回作成したシステムは LED を用いたシステムで、位置の変更の作業効率を劇的に改善した。放射線源を用いたシステムと比較しても測定された減衰長に違いはなく同等の性能があることを確認した。この減衰長測定システムを用いて、これまでより時間分解能のよい新しい WLS Fiber (Saint Gobain BCF-92) を測定した。(図 5)

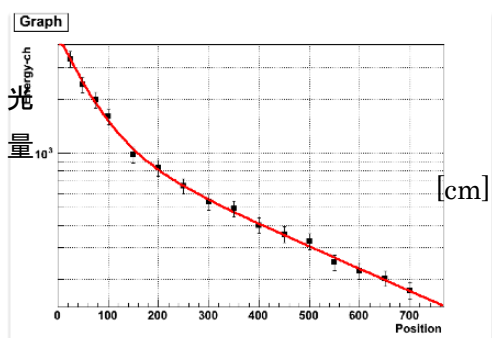


図 5 WLS Fiber の減衰長測定結果

その結果、減衰長については、これまで使用していた WLS Fiber (Kuraray Y-11, Saint Gobain BCF-91a) と同等の性能であることが分かった。また Y-11, BCF-91a については 10 年間の使用後でも経年劣化はあまり見られないという実験結果を得た。これらの実験結果を受け、Inner MB で使用する WLS Fiber はこの BCF-92 に決定した。現在は納入された大量の BCF-92 の均一性の評価、サンドイッチ型線検出器を作成した場合の強度検査、組立手順の確立等の作業を行なっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 谷口 雄亮、波長変換ファイバーを用いた荷電粒子検出器の開発、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 14 日、京都産業大学
- ② 谷口 雄亮、波長変換ファイバーを用いた荷電粒子検出器の開発、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 25 日、関西学院大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

修士論文 3 件

- ① 保原 直博 (山形大学) K 中間子稀崩壊実験で使用する波長変換ファイバーの経年劣化の検証研究、2013 年 3 月
- ② 谷口 雄亮 (東北大学) GeV 光子ビームプロファイルモニタの開発、2013 年 3 月
- ③ 久保田 尚矢 (山形大学) 荷電粒子識別用ホドスコープのための波長変換ファイバー読み出し系の研究、2011 年 3 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島 靖久 (TAJIMA YASUHISA)

山形大学・基盤教育院・准教授

研究者番号：50311577

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし