

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K15209

研究課題名(和文)チェレンコフ光を用いた高時間分解能TOF-PET装置の開発

研究課題名(英文)Development of Cherenkov-based TOF-PET with superior time resolution

研究代表者

飯嶋 徹(IIJIMA, Toru)

名古屋大学・現象解析研究センター・教授

研究者番号：80270396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：TOF-PET(ポジトロン断層撮影)装置は、一対の消滅ガンマ線の飛行時間差を利用し、より雑音の少ないコントラストの高い画像を得る最先端の医療イメージング装置である。本研究では、素粒子実験用の開発された粒子検出器技術を応用して、従来のシンチレータの代わりにチェレンコフ輻射体をガンマ線検出器に使用したチェレンコフ型TOF-PET装置の開発を目指した基礎研究を進めた。その結果、従来のシンチレータ型よりも数倍優れた約120ピコ秒(半値幅)の時間分解能を得ることができた。今後、より高効率かつこの時間分解能の半導体光検出器を併用することで、より高性能のTOF-PET装置の開発が可能となることを示した。

研究成果の概要(英文)：TOF-PET(Positron Emission Tomography) is one of the most advanced medical imaging technology, which utilizes the TOF(Time-Of-Flight) difference between the two annihilation gamma's to reconstruct images with improved signal-to-noise ratio. We have studied possibility to improve the TOF-PET performance using a Cherenkov radiator instead of a scintillator to detect gamma's, as application of technology developed for recent particle physics experiments. We have demonstrated that Cherenkov-based TOF-PET provides TOF resolution of about 120ps, a few times better compared to that reported for a scintillator-based TOF-PET. Our research shows that it is possible to develop high performance TOF-PET with relatively low cost, also by using a semiconductor photodetector device with improved photo detection efficiency and improved time resolution.

研究分野：素粒子実験

キーワード：放射線検出器 TOF-PET 半導体光検出器

1. 研究開始当初の背景

TOF-PET 装置は、一対の消滅ガンマ線の飛行時間差を画像再構成に利用し、より雑音の少ないコントラストの高い画像を得るもので、最新 PET 装置に必須の技術である。飛行時間差の情報により、ガンマ線発生領域を被写体中の小さな領域に限定し、雑音の少ない画像を得ることが可能となる。従来の TOF-PET 装置で得られる時間分解能は 0.5 ナノ秒程度であり、これは約 7.5cm の位置精度に相当するが、この時間分解能を格段に向上することができれば、飛行時間差情報をより積極的に画像再構成に利用し、格段に S/N 比のよい鮮明な画像を得ることが可能となる。この時間分解能は、シンチレータの発光寿命、光の伝搬経路、光センサー、読み出し回路の時間特性によって決まる。

申請者は、素粒子物理実験において、粒子反応で生成される粒子（特に π 中間子と K 中間子）の識別を行うために「TOP カウンター」と呼ばれる新型検出器の開発を手懸けてきた。この検出器は、荷電粒子が石英輻射体を通じた瞬間に発生するチェレンコフ光の各光子の伝搬時間（Time-Of-Propagation）を数 10 ピコ秒の時間分解能で測定して、荷電粒子の速度を精密に測定するものであり、名古屋大学の当研究室で独自の開発を進め、高エネルギー加速器研究機構のスーパー-B ファクトリー加速器実験（SuperKEKB/Belle II 実験）に向けて建設を進めている。

こうした背景から、従来の TOF-PET で使用されてきたシンチレータの代わりに、チェレンコフ光を用い、TOP カウンター用に開発した高時間分解能光検出器とその読み出し回路技術を転用すれば、従来よりも格段に明瞭なイメージング性能を有する PET 装置が可能になるとの着想を得た。

2. 研究の目的

本研究では、このようなチェレンコフ光を用いた高時間分解能 TOF-PET 装置の基礎技術開発を進めた。具体的には、マイクロチェネル内蔵型光電子増倍管（MCP-PMT）を用いて検証試験器を作製し（図 1）、チェレンコフ輻射体の最適化や、イメージングアルゴリズムの最適化によって、従来のシンチレーション光を用いた TOF-PET よりも格段に明瞭なイメージング性能を得る可能性を示す。また、光センサーとして磁場中でも使用可能な半導体検出器についても検証を進め、高時間分解能 MRI-PET 装置の開発にもつなげる。

本研究によって、チェレンコフ光を用いた高時間分解能 TOF-PET 装置の原理検証が進めば、PET 診断におけるイメージング性能を格段に向上し、より S/N 比の高い測定が可能となる。このことは、PET 診断の時間的短縮をももたらし、被験者の負担を減らすことにもつながる。

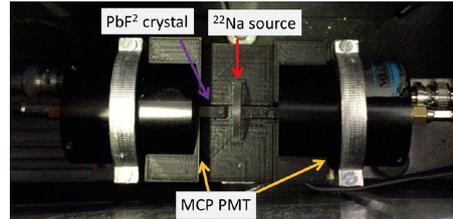
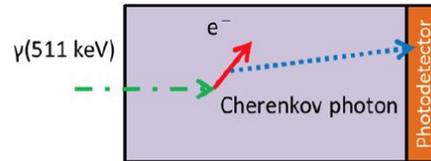


図 1 : Cherenkov TOF-PET 装置の原理 (上) と原理検証試験器

3. 研究の方法

本研究で検証する TOF-PET の原理では、消滅ガンマ線が輻射体と反応して生成される電子が輻射体中を運動する時に発生するチェレンコフ光を高時間分解能光検出器で検出する。生成した電子の飛程は約 100 ミクロンで、その間に発生する可視光領域のチェレンコフ光は 8 個程度と予想される。また、50 ピコ秒程度の時間分解能を得るためには、チェレンコフ光発生点の広がりを抑えるために輻射体の厚さを 15mm 以下にする必要がある。従って、本研究のポイントとしては、1) 検証試験器による原理検証と、微弱な信号を効率よく検出するための輻射体の最適化、2) シミュレーションによる検出器性能の理解、3) イメージ再構成アルゴリズム開発、4) 光センサーの改良を研究のポイントと考えた。

4. 研究成果

図 1 に示す試験装置を作製し、 ^{22}Na 線源からの陽電子が対消滅して得られる back-to-back のガンマ線対を、マルチアノード型マイクロチェネル内蔵型光電子増倍管（MCP-PMT）と高時間分解能読み出し回路で検出した。チェレンコフ輻射体にはフッ化鉛（ PbF_2 ）結晶を使用し、様々なサイズと結晶の表面処理として裸の状態及び黒インクやテフロンシートで覆った状態で測定を行った。その結果、最も良い TOF 分解能は、結晶無しで測定した場合で 93 ps（半値幅）が得られた。これは MCP-PMT の時間分解能と読み出し回路のジッターによって決まっている。5 × 5 × 5 mm³ の Black-Black を使用した場合 121 ps が得られ、結晶中の伝播による寄与は 77 ps と求まった。結晶有りて測定した結果について、GEANT4 を用いてシミュレーションを行い比較したところ、3 × 3 × 7.5 mm³ と 3 × 3 × 15 mm³ の TOF 分

解能については、概ね一致していることがわかった(図2)。

一方、光センサーに関しては、シングルチャンネルの半導体光センサー(MPPC)の時間分解能について詳細に調べた。MPPCは、磁場中での安定な動作、高い量子効率、比較的安価なコスト、といった特性からPET装置用光センサーとして有用と考えられる。ピコ秒パルスレーザーのスポットサイズをMPPCの1ピクセル($50 \times 50 \mu\text{m}^2$)の10分の1程度にまで絞り、入射位置依存性を調べた。また、赤色(波長635.6nm)と青色(波長404nm)の2種類のレーザーを使って比較を行った。最も良い時間分解能はピクセルの中心にヒットした場合で赤色レーザーで半値幅180ps、青色レーザーで260psであることがわかった。一方でチェレンコフ光は短波長側の成分が最も多いことから、青色の光に対して時間分解能を最適化しなければならないなどの改善点が見つかった。

上記で得られた121ps(半値幅)の時間分解能は、シンチレータを用いた既存のTOF-PETの時間分解能(約500ps)を上回っており、チェレンコフTOF-PETの有効性を示している。今後の開発課題としては大きく3つある: 1) TOF分解能だけでなく検出効率を考慮して、最も良い結晶サイズと表面状態を決めること。2) MPPCの時間分解能のさらなる向上。3) 高い時間精度を持ちかつ数千から1万チャンネル程度を読み出せるエレクトロニクスを開発である。今後は、 4×4 のクリスタルアレイからなる小型プロトタイプを用いてイメージの再構成と検出効率の検証を行い、その後、高時間分解能MPPCと多チャンネル読み出し可能なエレクトロニクスを開発し、直径20cmの小型PETによる実証試験を経て、最終的に直径80cmのフルサイズのPET装置を製作してファントム試験を行いたいと考えている。

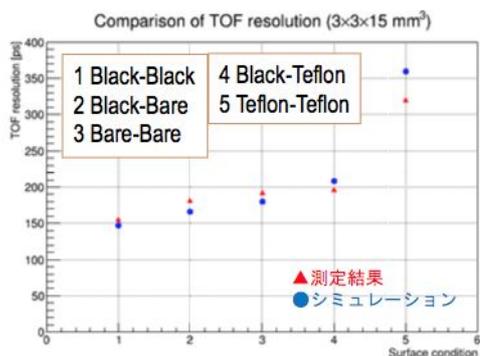


図2: 対消滅線に対するTOF分解能の測定結果(赤)とシミュレーション(青)の比較。横軸は輻射体表面状態の組合せに対応する。

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4件)

K. Kobayashi, T. Iijima, R. Dolenc, S. Korpar, P. Krizan, R. Pestotnik, N. Verdel, "Measurements of 511 keV annihilation photons with ultimate timing resolution", 9th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, September 5-9, 2017, Bled, Slovenia.

R. Dolenc, T. Iijima, K. Kobayashi, S. Korpar, P. Krizan, R. Pestotnik, N. Verdel, "Ultrafast Detection in Particle Physics and Positron Emission Tomography Using SiPMs", 9th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, September 5-9, 2017, Bled, Slovenia.

小林一帆, 飯嶋 徹, Peter Krizan, Samo Korpar, Rok Dolenc, Rok Pestotnik, Nina Verdel, "Cherenkov光を用いたTOF-PETの実現に向けたMPPCの時間分解能の測定", 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19-22日, 東北学院大学, 仙台

R. Dolenc, T. Iijima, K. Kobayashi, S. Korpar, P. Krizan, R. Pestotnik, "Improving the Time Resolution in Cherenkov TOF PET with SiPMs", The 14th Vienna Conference on Instrumentation, February 15-19, 2016, Vienna, Austria.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:

種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

名古屋大学大学院理学研究科高エネルギー
素粒子物理学研究室 N 研

<http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯嶋 徹 (IIJIMA, Toru)

名古屋大学・現象解析研究センター・教授

研究者番号：80270396

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

小林 一帆 (KOBAYASHI, Kazuho)

名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生

KRIZAN, Peter

名古屋大学・現象解析研究センター・客員
教授、Josef Stefan Institute/University
of Ljubljana 教授