

令和元年6月24日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K15345

研究課題名(和文) 高速時間検出器を用いたTOF-PET用検出器開発

研究課題名(英文) Study of high time resolution photon counter for TOF-PET

研究代表者

大坪 隆(OHTSUBO, TAKASHI)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70262425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：次世代PETの候補であるTOF-PETは従来に比べ詳細な画像診断を可能とするものであるが、このためには時間分解能に優れた光子検出器が必要である。我々の研究室ではこれまで重イオンビーム用高時間分解能検出器として高屈折ガラスチェレンコフ光検出器を開発してきた。これは最高時間分解能5psを持つ。本研究ではこの検出器の光子検出器としての特性を調べた。重イオンビームと比較すると光子検出では発生チェレンコフ光の光子数が少ないことに起因すると思われる時間分解の悪化が見られた。今後も検出器形状の検討など光子検出器としての可能性を追求する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TOF-PET装置に必須な高時間分解光子検出器には様々な検出器が提案開発されている。チェレンコフ光検出器はその原理から高い時間分解能が期待されている一方、シンチレーション光検出器に対し生成光子数が極めて少ない。重イオンビームで実績のある高屈折率ガラスチェレンコフ光検出器での光子検出特性の研究から、重イオンビームに対し時間分解能がかなり落ちることが分かった。チェレンコフ光検出では発生光子数の改善や検出器形状検討による時間分解能向上の検討が必要と考えられる。

研究成果の概要(英文)：TOF-PET is one of candidates of next generation PET. It makes more reliable diagnostic imaging possible compared with the present one. It needs a high time resolution photon detector. We have studied the high refraction glass Cherenkov detector as the high time resolution detector for heavy ion beams. Its time resolution is as good as 5 ps that is enough for TOF-PET detector. In this project, we studied the detection property for photons. In comparison to heavy ion detection, we have worse time resolution for photon detection. It is probably due to the less Cherenkov photon creation in photon detection. We will study the detector to improve time resolution of photon detection.

研究分野：原子核実験

キーワード：チェレンコフ光検出器 高時間分解能 TOF-PET

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

TOF-PET は短時間で高精度のがん診断を行うため、Time-Of-Flight(TOF: 飛行時間)情報検出機能を備えた PET 装置であり、通常の PET に比べ詳細な画像診断を可能とするものである。TOF-PET に用いるため、これまでさまざまな時間検出器が開発されてきている。通常の PET 装置では相対する二台の光子線検出器で陽電子消滅により生じた対消滅光子線を同時検出して陽電子消滅点分布を求める。TOF-PET ではこれらの光子線飛行時間差を測定し光子線軸内での位置情報が得ることでより詳細な線源分布測定を可能とする。従来型 PET でよく用いられる BGO シンチレーション(蛍光)検出器では、蛍光減衰時間が 300 ns ときわめて長く TOF 用途には適さない。最近 LSO(ケイ素酸ルテチウム+Ce: 40 ns)や LaBr₃ などのシンチレーション検出器が開発され、LSO(Ce,Ca)を用いて時間分解能 180 ps が報告されている。また CsBr 結晶を用いた同時係数実験で時間分解能 75 ps が報告されている。

我々のグループでは不安定原子核研究のための重イオンビームの高時間分解能検出器の開発を進めており、その高速性からチェレンコフ光検出器に着目し、高速光電子増倍能力を持つ MC-PMT(Metal Channel Photo Multiplier Tube)を組み合わせた検出器のテストを放射線医学総合研究所重粒子がん治療加速器 HIMAC で行ってきた。チェレンコフ光とは物質中に高速荷電粒子が通過する際、粒子速度が物質内の高速を越える際に生じる衝撃波光であり、物質通過中に発生するためその時間分解能は原理的には物質通過時間(～ps)と期待される。高屈折率ガラスと MC-PMT を組み合わせた検出器においては、一核子当り約 400 MeV の Xe ビームを用いた実験で、5 ps の時間分解能を達成している。またこの時間分解能が、媒質中で発生する光子数に依存していることもわかってきた。屈折率 n の媒質中のチェレンコフ光の光子数は荷電粒子の電荷 Ze と光速に対する荷電粒子の速度比 β を用い単位波長及び単位長さあたりの光子数として次式で表される。

$$\frac{d^2 N_{\text{photon}}}{d\lambda dL} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2} \right)$$

我々は、これらの研究を元に、PET で測定する 511 keV 光子線についても、光電効果及びコンプトン散乱により生ずる電子のチェレンコフ光についてもある程度の時間分解能が期待される考え、本研究の着想に至った

2. 研究の目的

TOF-PET 法は通常の PET 法の角度分布に加えて、時間差信号を取ることで線源位置の分解能が飛躍的に向上させることが期待されている。これまでのシンチレータを用いた検出器ではその蛍光発生機構から 100 ps 程度より短い時間分解能が得られない。そこで高速時間検出器としてチェレンコフ光を利用することで高い時間分解能が期待される。我々が重粒子ビーム用に開発しているチェレンコフ光時間検出器では Xe ビームで数 ps に達する時間分解能が得られている。そこで重イオン用高速チェレンコフ光時間検出器を PET 用光子線に対して実用的な検出効率及び時間分解能を持つものに改良することを目標とした。

3. 研究の方法

これまで得られている重イオンビームを用いた時間分解能測定について GEANT4 を用いたシミュレーションを行い発生光子数に対する関係を調べた。実験条件での光子数を GEANT4 で評価し得られた時間分解能との関係を調べた。

次に重イオンビーム実験で用いたものと同じ高屈折率ガラスチェレンコフ光検出器の 511 keV 光子検出について基本的性質を調べた。まず NaI シンチレータを基準とした検出効率を ²²Na 線源からの対消滅光子の同時計数から求めた。次に二個一対の高屈折ガラスチェレンコフ光検出器について同時計数により時間分解能の測定を行った。

4. 研究成果

重イオンビームでの時間分解能の GEANT4 を用いたシミュレーションとの比較では時間分解能の発生光子数との関係を図 1 に示す。重イオンビームは ¹³²Xe (324-394 MeV/u)、⁸²Kr (358-460 MeV/u)、⁵⁸Ni (434-491 MeV/u) を用いた。先の式より、重イオンの Z が大きいほど、またエネルギーが高いほど生成光子数は増加する。光子数が多い領域では 5 ps オーダーの高い時間分解能を示すが、光子数の減少につれ分解能が悪化

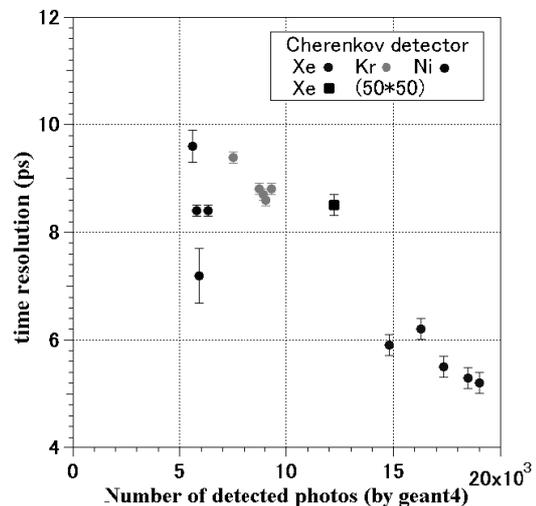


図 1 重イオンビームでの発生光子数 (GEANT4 によるシミュレーション) と時間分解能の関係。

していることが分かった。511 keV 光子検出においては光電効果もしくはコンプトン散乱により生じた光電子による発生チェレンコフ光を検出する。これは $Z=1$ に対応しており、重イオンに比べるとかなり少なくなると予想され、グラフでは 0 に近いところとなる。時間分解能の依存性のグラフでの 0 近傍での振る舞いが問題となる。

次に ^{22}Na 線源からの対消滅 511 keV 光子についてチェレンコフ光の検出を行った。高屈折ガラスは屈折率 $n = 1.89$ のものを用い、 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ の立方体のものを光電子増倍管に直接光学接着したものを使用した。重イオンビームでの研究ではチェレンコフ光子の軌跡が限定することで時間分解能が向上すると期待されたので薄い板状のものを用いたが、光子の光電子変換効率を考慮してこの形状を選んだ。

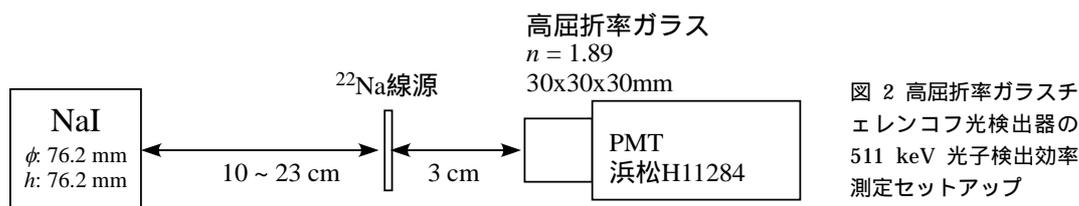


図 2 高屈折率ガラスチェレンコフ光検出器の 511 keV 光子検出効率測定セットアップ

線測定で標準的に用いられる NaI シンチレータを基準に ^{22}Na 線源を用いて 511 keV 光子の検出効率を測定した。図 2 に実験セットアップを示す。NaI、線源、高屈折率ガラス検出器を同軸上に置き、NaI の信号をトリIGGERとして NaI 及びガラス検出器の波高スペクトルを測定した。立体角の影響を除くため線源からの距離依存性も測定した。図 3 に NaI 及びチェレンコフ光検出器でのエネルギースペクトルを示す。

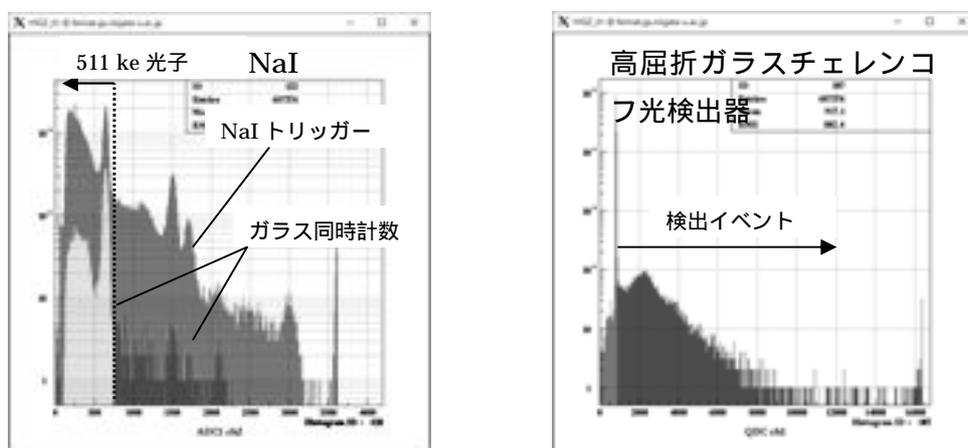


図 3 NaI でトリIGGERした NaI(左)と高屈折率ガラスチェレンコフ光検出器(右)の ^{22}Na 線源での同時計数エネルギースペクトル

測定は NaI 信号をトリIGGERとし同時計数を行った。ガラスのしきい値以上のイベント(濃灰色)は NaI では 511 keV(明灰色)と 1275 keV(濃灰色)に対応することがわかる。511 keV 光子について NaI トリIGGERとガラスとの同時計数の比を取ることによって NaI に対する検出効率を求めた。さらに立体角の影響を取り除くため、線源との距離依存性を取った。図 4 にこの結果を示す。15 cm 以上離れるとほぼ一定になっていると判断した。これらの結果より 2 台の高屈折率ガラスチェレンコフ検出器の NaI を基準とした検出効率はそれぞれ 13.5(1) %、14.5(1) % となった。

次に同形の二台の高屈折率ガラスチェレンコフ光検出器を用いて時間分解能の測定を行った。図 5 のように同軸上に置いた二つの高屈折率ガラス検出器と線源について、光子検出の時間差スペクトルを測定した。一方の検出器と線源間の距離を変えたその依存性を測定した。

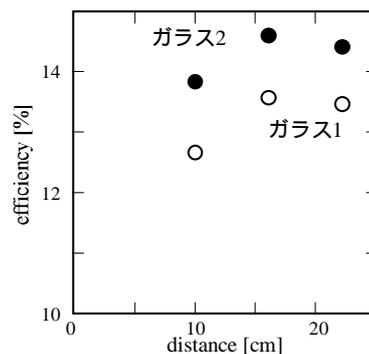


図 4 NaI に対する検出効率の線源距離依存性

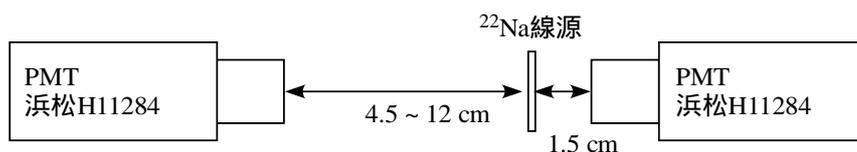


図 5 高屈折率ガラスチェレンコフ光検出器の 511 keV 光子検出効率測定セットアップ

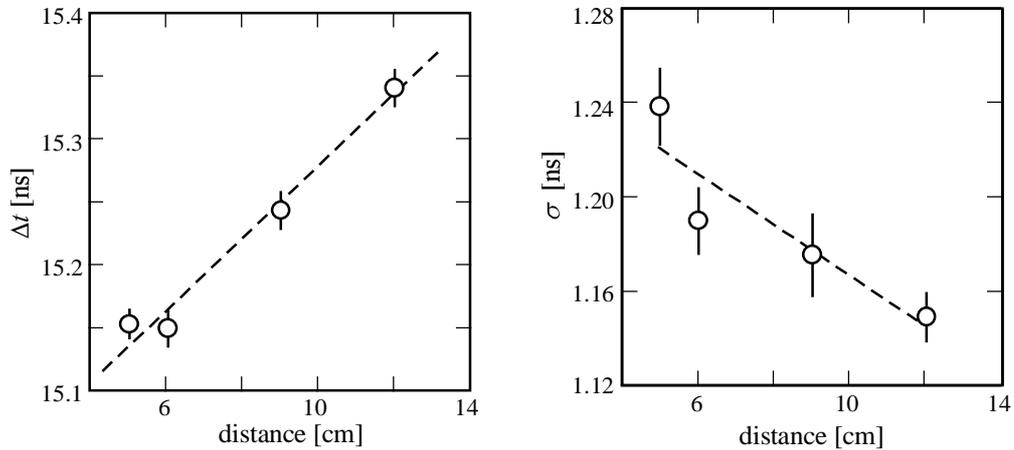


図 6 時間差の距離依存性(左)と時間差スペクトルの線幅の距離依存性

図 6 に時間差及び線幅の位置依存性を、また図 7 に時間差スペクトルの例を示す。

時間差の距離依存性を見ると良い比例関係が得られており、数 mm の分解能で位置が決定可能である。一方、スペクトルの線幅の位置依存性からは距離が離れるに従い、線幅が小さくなっていることがわかる。片側の検出器までの距離が遠ざかると反対側の検出器に入る光子の立体角が小さくなることから、検出器内に入る光子の領域が小さいほど時間分解能が上がると予想される。両方の検出器についてさらに距離を遠ざけることにより、線幅()で最高 0.9 ns を達成した。しかしこの値でも目標値に比べて非常に大きい。今回の研究では形状の最適化まで至らなかったが、今後引き続きガラス形状の最適化を図り、時間分解能の向上がどこまで可能かを調べる。形状の候補としては図 8 のように短冊柱を並べ、側面境界部分で光が透過しないようにすることで、検出器体積を保ったまま、入射面積を小さくするなどが考えられる。

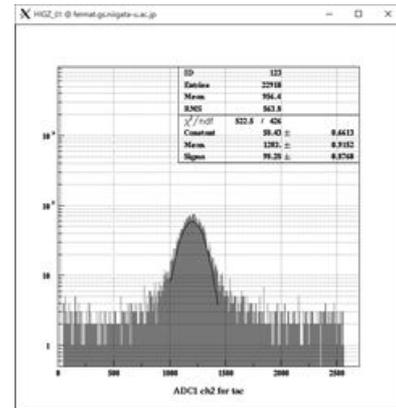


図 7 時間差スペクトルの例

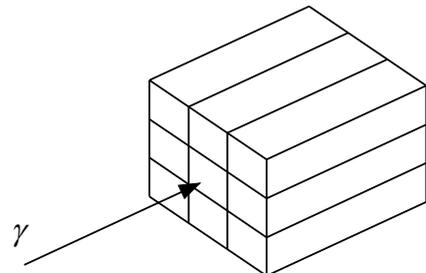


図 8 高屈折率ガラスの形状案

5. 主な発表論文等

雑誌及び学会での発表はない。

6. 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名：宮田 恵理

ローマ字氏名：(MIYATA, eri)

研究協力者氏名：神田 直人

ローマ字氏名：(KANDA, naoto)

研究協力者氏名：野口 法秀

ローマ字氏名：(NOGUCHI, norihide)