

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月14日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654088

研究課題名（和文）チェレンコフ光を利用した、汎用的な高時間分解能ガンマ線測定方法

研究課題名（英文）Development of versatile gamma-ray detectors with good timing resolution making use of Cherenkov photons

研究代表者

清水 俊（SHIMIZU SUGURU）

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：60294146

研究成果の概要（和文）：

従来のガンマ線検出器は scintillation 光を利用してエネルギーと時間を測定している。しかし、エネルギー分解能が高い場合には時間分解能が悪いという性質があり、両者を併せ持つ検出器は知られていない。本研究によって、エネルギー測定は scintillation 光を用いるが、時間測定は即発の Cherenkov 光によって決定させる仕組みを開発した。結果として、素粒子実験に使われる電磁カロリメータや医療技術で進歩が著しい PET 診察などに応用することが可能であり、両者の性能が大幅に改善されることになる。

研究成果の概要（英文）：

A gamma-ray measurement has been performed using scintillating photons generated in a detector. However, in general, detectors with good energy resolution have poor timing resolution. In this research, we successfully developed the detection mechanism by measuring gamma-ray energy and timing using scintillating photons and Cherenkov photons, respectively. As a result, we can apply this method to electro-magnetic calorimeters used in particle physics and recently highly advance PET medical examination. The detector performance in both fields is higher improved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

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：粒子測定技術、チェレンコフ、光、医療機器分野、ガンマ線、時間分解能

## 1. 研究開始当初の背景

一般的に、ガンマ線測定は検出器に入射したガンマ線が電子（陽電子）にエネルギーを与え、その電子がシンチレーション光を生成することで実現される。従来、このシンチレーション光を光検出器で測定することで、ガンマ線のエネルギーと時間を測定してきた。しかし、エネルギー分解能が良い場合は、時間分解能が悪いというジレンマが存在し、双方を満足する検出器は難しかった。本研究では、これらの従来の方法を考え直し、エネルギーはシンチレーション光、時間はチェレンコフ

光によって決定する、新しい測定方法を開発することを最終的な目的とする。チェレンコフ光は光量が少ないという難点があるが、荷電粒子の通過に対して即発で放出されるため、時間測定には有利になる。また、シンチレーション光とチェレンコフ光の共存を利用する測定原理は知られておらず、純粋に技術的観点からも興味を持たれる。一般論として、汎用的な実験方法で時間分解能 100ps を達成することが重要であると考えられている。本研究においてもそれを目標としている。ただし個別のケースでは、更なる性能が可能

であったり、逆にそこまで性能が必要でない実験であったりするので一概に目標を数値化するのには難しい側面も持つ。

## 2. 研究の目的

本研究は、(1) 高エネルギー物理学実験で利用されるカロリメータ、(2) 医療技術のための $\gamma$ 線測定、の2つの分野に応用できる汎用的な時間測定技術向上を目的としている。高エネルギー実験の場合、時間分解能の向上はバックグラウンドの軽減に直接つながり極めて重要である。特に電磁カロリメータの場合、電子と陽電子のペアが多数発生することにより、即発のチェレンコフ光の光量も多くなる。よって、光検出器の閾値を小さくすることで、チェレンコフ光によって時間測定が決まることになる。一方、エネルギー測定は、長時間のシンチレーション光の積分によって決めることができる。これによって検出器内部で発生した性質が異なる光を有効利用することでガンマ線測定の性能が向上することになる。近年の加速器視線の性能向上によって、J-PARC などの大強度のビームを用いた研究が始まりつつある。これより粒子の稀崩壊観測精度が格段に向上するが、研究が成立する前提として高計数環境で作動する検出器の存在が挙げられる。本研究は、今後ますます重要となる加速実験で利用されるガンマ線検出器の開発と言い直してもよい。

一方、医療技術としてのガンマ線測定の時間分解能向上についても原理は同じである。歴史を眺めて見ると素粒子・原子核実験技術は医療技術を支えて来ていて、レントゲン、X線CT、MIR等も物理学研究の発展が無い限り、その実現は不可能であったと言える。現在、ガン発見の切り札と考えられるPETに関しても例外ではない。PETはがん細胞に陽電子を含む物質を吸収させ、陽電子が対消滅することによって発生する511-keVのガンマ線を測定することでがん細胞の存在を見つけ出す技術である。従来のPETに加え、2本のガンマ線入射時間差を精密に測定することで「線」ではなく「点」で測定できることが重要である。これによって、がん細胞がより鮮明に少ない放射線量で観測できることになる。しかし、シンチレーション光を時間測定に利用する場合、ガンマ線の入射からシンチレーション光の発生までの時間的遅れが問題となり、これまでは時間分解能を高性能化することが非常に難しかった。本研究はチェレンコフ光を利用することで、この問題を克服する。

## 3. 研究の方法

実際の研究では、シンチレーション光とチェレンコフ光を共存させた状態でガンマ線を

測定するのであるが、問題を単純にするために、チェレンコフ光のみが発生する(シンチレーション光が発生しない)鉛ガラスでの時間分解能を調べることで、究極的な性能を見出す方法を採用する。まずは高エネルギー実験への応用の研究方法であるが、カナダ、バンクーバー、TRIUMF 研究所から供給される電子ビームを利用することで、鉛ガラス検出器の時間分解能を実測した。TRIUMF では、電子、ミュオン、パイオン、陽子が利用可能であるが、飛行時間方法(TOF)を用いて電子のみを選別することが出来る。選び出した電子イベントを解析し、鉛ガラス検出器の時間分解能を求めたところ80psを得ることが出来た。これは、予想していた結果ではあるが、チェレンコフ光を用いて到達することが出来る究極的な数字であることになる。今後は、電気的なノイズなどを軽減することで、更なる向上を目指す予定である。一方、PET技術への応用であるが、こちらは511keVの低エネルギーガンマ線を用いる必要がある。しかしながら、 $\beta$ 崩壊によって電子を発生する $^{90}\text{Sr}$ 標準線源を利用することでも同様な測定を行った。本来ならば、 $^{22}\text{Na}$ のように511keVガンマ線を放出する線源で実験を行なうべきであるが、時間分解能測定のための基準時間を決めることが出来ず、荷電粒子委を用いての実験を行なうことにした。結果としては、電気ノイズが大きいなどの技術的課題の解決が必要なものの、分解能が150ps程度を達成することが出来た。こちらは、100ps程度まで分解能が向上することを期待している。また $^{90}\text{Sr}$ から $^{22}\text{Na}$ へ変更して実際の511keVガンマ線を用いて最終的な結果としていく予定である。

## 4. 研究成果

本研究では、従来のシンチレーション光のみを利用したガンマ線検出方法を考え直し、エネルギーはシンチレーション光、時間はチェレンコフ光によって決定する、新しい測定方法を開発することを最終的な目的とする。結果として、鉛ガラス検出器を(a)TRIUMF 研究所にて電子を照射することで80ps、(b) $^{90}\text{Sr}$ 線源を用いたテスト実験結果から将来的には100ps、の時間分解能が得られた。以上により(1)高エネルギー・素粒子実験におけるガンマ線測定技術が向上したこと、(2)PETなどの医療技術についてもガンを見いだす能力の向上や測定時間の短縮が実現出来る。以下に、具体的な研究における成果報告をまとめる。

### (1) 高エネルギー・素粒子実験におけるガンマ線測

これによって、J-PARC 研究施設で準備されて

いる時間反転対称性破れ探索実験 (TREK) 実験などの、高エネルギー物理学実験が可能となった。本研究の最終ゴールは KEK PS で行なわれた  $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$  崩壊を用いた時間反転対称性の破れ探索実験 (E246 実験) を更に精密化することを目的としている。崩壊平面に対して垂直方向のミュオン偏極成分 ( $P_T$ ) の存在は、標準模型を超えた現象の存在を直接証明することになる。実際に標準模型では観測可能な大きさの  $P_T$  を導くことは不可能であり、そこには何らかの新しい“仕組み”が必要となる。しかし、E246 実験は  $P_T$  を  $10^{-3}$  レベルでの測定に成功したものの、有限な数字を見つけることはできなかった。そのため、研究開始当初に稼働が始まった J-PARC の高強度  $K^+$  ビームを用いた新しい TREK 実験が計画された。TREK 実験では  $P_T$  を  $10^{-4}$  レベルまで感度を向上させるよていである。すなわち E246 の 1/10 の統計精度が必要であり、当然ながら収集されるイベント数は 100 倍となる。このため J-PARC 研究施設を利用する訳だが、ビームの強度が上がるため従来のガンマ線測定法を利用することが出来ず、装置の性能向上が求められていた。これまでの CsI (Tl) 検出器の時間分解能は 15-25ns 程度しか得られておらず、本研究成果の 100ps とは桁違いに悪い結果である。すなわち、本研究によってチェレンコフ光を利用することによる時間分解能向上が実現したことで、バックグラウンドを 1/20-1/30 に軽減されることとなった。以上により J-PARC 研究施設の大強度ビームを用いた素粒子実験での運用が可能となる。

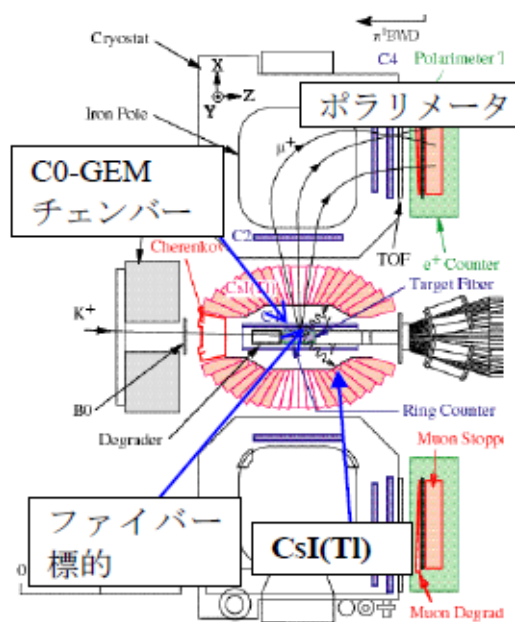


図 1 : 高エネルギー・素粒子実験におけるガンマ線測定実験セットアップ

(2) PET などの医療技術についてもガンを見いだす能力の向上や測定時間の短縮

従来の PET による診断は、がん細胞に陽電子を吸収させ、がん細胞内部で発生して消滅 511keV ガンマ線を観測することが基本的な技術である。患者の回りをガンマ線検出器で覆い、511keV ガンマを同時計測することで陽電子崩壊点を含む線を定義出来る。これを複数組み合わせることで、3 次元的な診断が可能になる。この場合は、ガンマ線のエネルギーだけを測定すれば良いので、エネルギー分解能のすぐれたガンマ線検出器を用意すればよかった。しかし、がん細胞の空間的分解能力は 5mm 程度であり、小さな細胞の分析には不向きという問題点を抱えていた。これらを改善するために、2 つのガンマ線の入射時間を精密に測定することによって、その時間差から「線」でなく「点」で陽電子消滅点を求める方法が提案された。この場合、時間の分解能力が 100ps より高性能ではなくてはならず、従来のガンマ線測定技術では難しいとされた。困難さの原因としてはガンマ線の入射に対するシンチレーション光発生 of 時間的な遅れであり、エネルギー分解能がすぐれた検出器ほどこの遅れが顕著であった。本研究では、この技術的な困難をシンチレーション光ではなくチェレンコフ光を用いることで解決し、時間分解能が 100ps 達成出来る見通しをつけたことになる。これにより、がん細胞の空間的な分解能力は 2mm まで向上できると考えられる。また同時に、PET での測定時間が人体に注入する放射線量も減量出来ることが期待出来る。

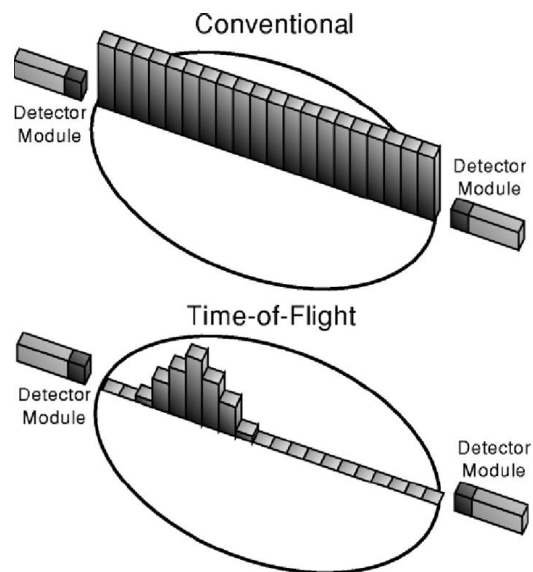


図 2 : TOF-PET の原理と、本研究で改善した点の模式図

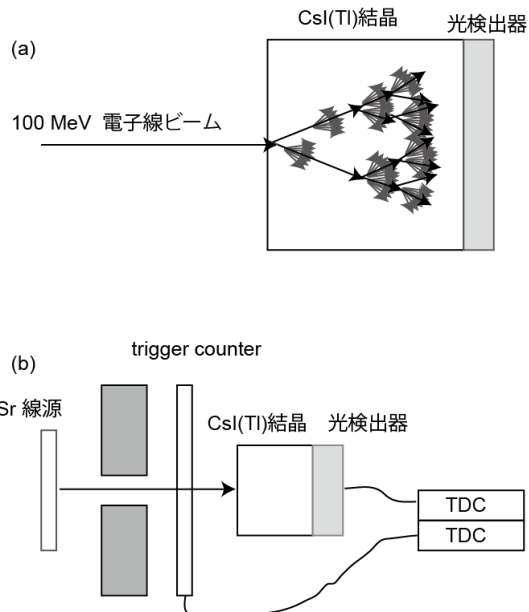


図3：テスト実験のセットアップ。

## 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)

[学会発表] (計4件)

- ① 五十嵐洋一、J-PARC ハドロンホール K1.1BR ビームラインにおける K 中間子ビーム調整、日本物理学会、2013年03月27日、広島大学
- ② 小林愛音、清水俊、J-PARC TREK 実験用 ミューオンボラリメータの性能評価、日本物理学会、2013年03月27日、広島大学
- ③ 宮崎陽平、清水俊、J-PARC E36 実験に向けた鉛ガラス・チェレンコフ検出器の性能測定、日本物理学会、2013年03月27日、広島大学
- ④ 成川玲也、清水俊、J-PARC E36 実験に用いるエアロゲルチェレンコフカウンター (AC) の性能評価、日本物理学会、2013年03月27日、広島大学

[その他]

ホームページ等

ホームページ

J-PARC E06, E36 experiment

<http://trek.kek.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 俊 (SHIMIZU SUGURU)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：60294146