

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 5月14日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340059

研究課題名（和文）時間反転対称性の破れ探索実験用CsI(Tl)カロリメータの改良

研究課題名（英文）Improvement of CsI(Tl) calorimeter for the experiment to search for time reversal violation

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）：

J-PARC TREK 実験は読み出し方法が改良された CsI(Tl)カロリメータで π^0 を測定することで時間反転対称性の破れを探索することを目的とする。TREK 実験に使用するためには高係数の状況下(50kHz)で動作させる必要がある。そのため、光の読み出しを従来の PIN 光ダイオードから APD に変更し、出力波形を FADC に記録することで、必要とする性能が達成出来た。

研究成果の概要（英文）：

The J-PARC TREK experiment has been aimed at a T-violation search by detecting π^0 from K^+ decay using the existing CsI(Tl) calorimeter. In order to use this calorimeter in TREK, reliable operation under high rate environment (~ 50 kHz) is required. The light detection device was replaced from PIN optical diode to avalanche photo diode (APD). In addition, the output pulse from APD was recorded by a Flash ADC (FADC). As a result, the CsI(Tl) calorimeter has been successfully improved, and it can be used in the TREK experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合 計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総 計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

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）、K 物理

1. 研究開始当初の背景

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。更に重要なことは、この P_T をからファイナル・ステート・インタラクションからの擬似的な関与がないため、純粋に標準模型を超えた現象と断言出来ることである。幾つか

のモデルが提案されているが、マルチヒッグス模型、レプトクォーク模型などの極めて興味深い理論を挙げることが出来る。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。実験のベースとなる装置はトロイダルスペクトロメータと呼ばれる12個の独立のギャップを持つ荷電粒子分析器である。ここでミュオンの運動量を測定し、さらに粒子の識別も行なう。またミュオンの偏極度はスペクトロメータ出口に取付けたミュオン・ポーラリメータによって測定する。ミュオンは、崩壊においてスピン方向に陽電子を放出しやすい性質があるため、陽電子の放出方向をプラスチックシンチレータによって測定することで P_T を見いだす。この研究の重要なことは、生成された K^+ 中間子を物質中に静止させ、そこから発生するミュオンとパイオンを測定する静止 K^+ 方法を採用している点である。更にトロイダルスペクトロメータの対象構造とパイオンを全方向で観測することによって系統誤差を極端に小さく出来る。本研究ではKEK-PSで実現した 10^{-3} レベルを更に向上することを目的としている。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予定である。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 π^0 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。

2. 研究の目的

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊を用いて時間反転対称性の破れを探索するためには、各イベント毎に崩壊平面を決定する必要がある。そのため π^0 の運動量ベクトルを求める必要があるが、 π^0 が崩壊した2本のガンマ線を観測することで、運動量の保存を利用して再構成する。KEK PS実験では、このガンマ線測定に、768本に細分化されたCsI(Tl)カロリメータを用いた。CsI(Tl)に入射したガンマ線は電磁シャワーを発生させ、幾つかのモジュールにまたがってエネルギーを放出する。これにより、ガンマ線のエネルギーはエネルギー観測が出来たモジュールの和、また入射位置はエネルギーで重みをかけたモジュールの重心和から導く。今回の研究では、この読み出し方法を改良することで、J-PARC TREK実験でも利用可能なCsI(Tl)カロリメータに再構築することを目的とする。しかしながら、CsI(Tl)結晶で発生するシンチレーション光の時定数は約 $1\mu s$ と非常に長く、元々高速応答が必要となる実験には不向きという側面があ

った。つまり、これまでのE246実験とは違い、TREK実験に使用するためには高係数の状況下(50kHz)で動作させる必要があった。KEK-PSではガンマ線の入射によって発生する電磁シャワーでシンチレーション光を生成し、それらをPIN光ダイオードで電気信号に変換していた。そしてPINの出力を電荷型前置増幅器を通し、シェーピング増幅器によってセミガウシアン成型を施し、最終的にはピークホールドADCによってデジタル化した。しかしこの方法では必要とされる計数率で稼働することは極めて困難である。これらを解決するために、従来のPIN型の光センサーかavalanche photo diode (APD)に変更し、さらにカレントアンプを導入することで電気回路を含めた光センサーの応答スピードを高速にする。また、APD出力波形をFlash ADC (FADC)に記録させることで波形分離が可能になり、レート耐性が向上する。以上の改良を導入し、標準放射線源や加速器で生成される人工放射線を利用し性能を確認することが本研究の目標である。そして、TREK実験を実現するためにJ-PARC施設にCsI(Tl)カロリメータを再構築する。

3. 研究の方法

本研究はCsI(Tl)とAPDのアセンブル及びテストベンチでの実験を大阪大学が担当し、読み出しのカレントアンプを高エネルギー加速器研究機構(KEK)が担当する形で始まった。大阪大学では、CsI(Tl)結晶にAPDを取り付け、従来の電荷型アンプを使って新しいAPD素子のテストを行なう。APDはPINに比べると素子自体が増幅機能を持っているため、増幅器のゲインを小さくすることが出来るため、ノイズを軽減につながる。しかし、このゲインが回りの温度に依存するため温度管理が必要となってくる。そのため、装置全体を温度管理されたケースのいれ、その中で一連の開発を行なった。一方KEKでは、PIN光センサーを用いてカレントアンプの開発を行なった。電荷型のアンプでは分解能を良くする他面に $660\mu s$ の時定数を採用していたが、カレントアンプではこのような長い時定数は不要であり、CsI(Tl)のシンチレーション光の寿命で決定される $1\mu s$ 程度のパルス幅となる。そして、双方の開発が十分となったところで、それぞれの研究成果を足し合わせた。開発の1年目は、このようにして光の読み出し部分を完了し、全て基礎となるプロトタイプ機を製作した。図1に読み出しシステムのスキームを示す。オリジナルの計画では、研究の2年目にプロトタイプ検出器を東北大学核理研に持ち込みtagged photonを照射することで性能を確認する予定であった。しかし、東日本大震災の発生により計画の変更を余儀なくされ、このプロトタイプ機のテ

ストはカナダ、バンクーバー、TRIUMF 研究所にて継続することを決定した。

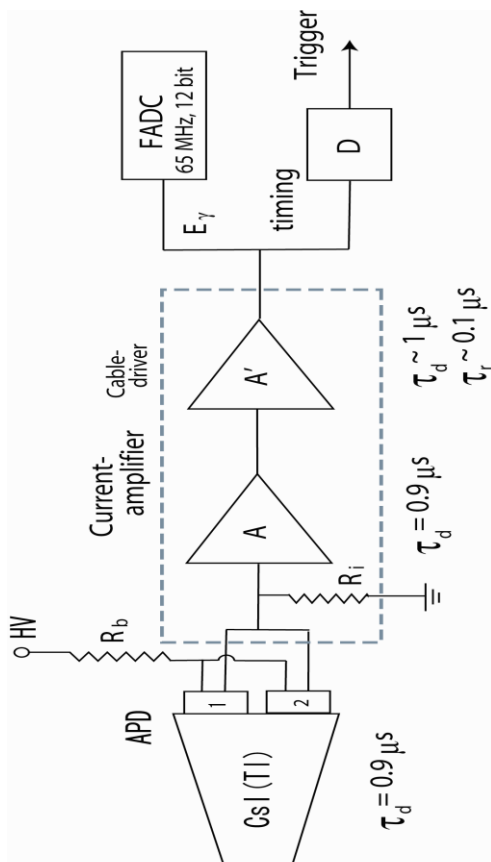


図1：読み出しシステムのスキーム

TRIUMF 研究所にて、陽電子、ミュオン、パイオン、陽子、等のビーム等を照射することで、ビーム強度に対する耐性を実測することが出来た。図 3 が実験のセットアップであり、CsI (Tl) 検出器以外にも、粒子識別用の TOF スタート、ストップ検出器と Aerogel チェレンコフ検出器 (AC) が設置された。CsI (Tl) 検出器に入射した粒子達は飛行時間 (TOF) 測定と AC によって分離され、陽電子のみを選び出すことが可能である。また、陽電子強度は 1kHz から 300kHz の広範囲で可変であるため、ビーム強度依存性を確認するには極めて有利であった。また、実験のデータは FADC によって波形が記録された。この波形は単純な正規分布で記述することは出来ず、立ち上がりと立ち下がり部分に形状を補正するための補正関数が必要となる。幾つかの試行錯誤を経て、経験的ではあるが、波形の形状を正しく再現出来るモデル関数が確立された。これにより、イベントのパイルアップが発生し、出力が重なっていたとしても分離が可能になる。これにより 100kHz の計数にも耐えるようになり、本研究の当初計画が実現され

た。また、波形を記録することで従来の TDC を使った時間測定が不要になったことも言及しておきたい。

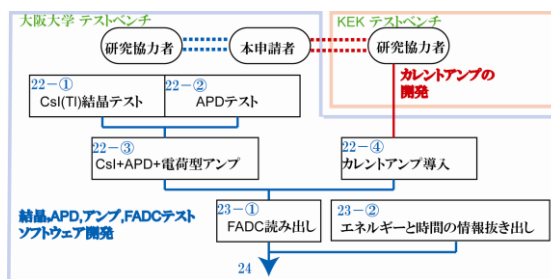


図2：研究計画の流れと協力体制。図中の数字は年度。

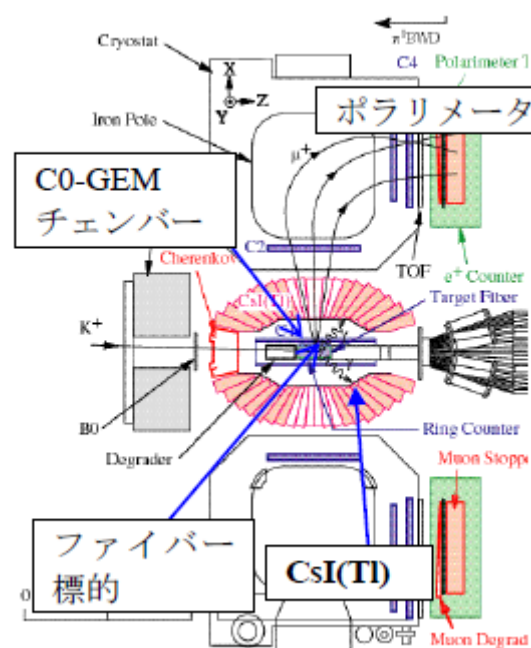


図3：実験セットアップ

TRIUMF 実験終了後は、改良された CsI (T1) カロリーメータを J-PARC に持ち込み、TREK 実験での利用方法を simulate するテスト実験をおこなった。すなわち、実際の場所に設置し、 K^+ ビームを照射することで、CsI (T1) カロリーメータが正しく動作が可能かを直接確かめた。 K^+ ビームは然るべきチューニングを行ない、静止ターゲット付近が最終フォーカスが来るようになっている。また π^+ 分離用の静電セパレータも働かせ、バックグラウンドについても本番の実験を意識したものになっている。結果として、本研究が取り組んできた性能向上によって、J-PARC 実験でも十分に動作することが確認された。ただし、若干のビームハローが確認されたが、これに関しては鉛のコリメータを設置することで簡単に除去される。

4. 研究成果

KEK PS 実験で利用した CsI(Tl)カロリメータの読み出し方法を改良することで、

J-PARC TREK 実験でも利用可能な CsI(Tl)カロリメータに再構築することを目的であった。従来の方法に代えて、APD を光センサーに採用し、カレントアンプの出力波形を FADC で記録する部分が本研究の心臓部分であった。大阪大学と KEK の 2 カ所で研究は進められ、研究成果を足し合わせることで CsI(Tl)読み出し方法が完成された。次にプロトタイプ機を TRIUMF 研究所に持ち込み、ビームを照射することで、ビーム計数に対する耐性を実験的に確認した。最後に TREK 実験が行なわれる J-PARC に持ち込み、実際の K+ビームを照射することで、TREK 実験で利用出来ることが最終的に確認された。

現在の J-PARC 研究施設では、時間反転対称性の破れ探索実験に向けて様々な準備がすすんでいる。J-PARC 研究施設では K+中間子を生成ターゲットから導く K1.1BR ビームラインでは十分な K+を生成できることが見いだされている。K1.1BR によって選別された K+中間子は BeO デグレダによって運動量が減少され、採取的には K+の静止位置が観測できる光ファイバシンチレータで構成された active ストップパーに静止する。本研究の重要な部分は、この静止 K+からミュオンとパイオンを測定することであり、様々な系統誤差を軽減化することが可能になる。ストップパーの回りを本研究で開発した CsI(Tl)カロリメータが取り囲み、全方向でパイオンの運動量ベクトルを測定出来る。実験の構成上カロリメータはビーム軸の近くに設置されることになるが、本研究の成果によって J-PARC 施設においても十分に機能することが証明されている。

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)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 清水俊、 $K \rightarrow l \nu$ 崩壊における $\mu - e$ ユニバーサル性の破れの探索、日本物理学会 (招待講演)、平成 23 年 3 月 27 日、新潟大学
- ② 榎本新一、清水俊、核内 ω 中間子質量分布測定のための検出器開発、日本物理学会、平成 23 年 3 月 28 日、新潟大学
- ③ 榎本新一、清水俊、J-PARC E06 実験及び P26 実験に向けた CsI(Tl)カロリメータ用新光読み出し方式、日本物理学会、平成 22 年 10 月 11 日、九州工業大学
- ④ 吉原圭亮、清水俊、J-PARC TREK 実験用ミュオンポラリメータのビーム試験 (3) 疑似非対称度等の系統性のまとめ、日本

物理学会、平成 22 年 10 月 11 日、九州工業大学

- ⑤ M.Hasinoff、清水俊、Search for new physics using a precision measurement of the $Ke2/Kmu2$ branching ratio、11th Conference on the Intersection of Particle and Nuclear Physics (CIPANP 2012)、2012 年 08 月 29 日、St.Petersburg、アメリカ
- ⑥ 清水俊、Search for T-violating transverse muon polarization in $K \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ decay at J-PARC、20th International SPIN Physics (SPIN2012)、2012 年 09 月 18 日、INR、ロシア
- ⑦ 小林愛音、清水俊、J-PARC TREK 実験用ミュオンポラリメータのビーム試験 (5) -MTP 型第二試作器の性能試験-、日本物理学会、2012 年 09 月 11 日、京都産業大
- ⑧ 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
- ⑨ 小林愛音、清水俊、J-PARC TREK 実験用ミュオンポ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
- ⑩ 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
- ⑪ 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

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

(2) 研究分担者

五十嵐 洋一 (IGARASHI YOUICHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：50311121

堀江 圭都 (HORIE KEITO)

大阪大学・大学院理学研究科・技術職員

研究者番号：80432467