

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18540274

研究課題名（和文）パイ中間子系におけるレプトン対称性の検証実験

研究課題名（英文）Experimental test of lepton universality in pion decays

研究代表者

吉田 誠 (YOSHIDA MAKOTO)

大阪大学・大学院理学研究科・特任研究員

研究者番号：70379303

研究成果の概要（和文）：パイ中間子の崩壊分岐比を精密に測定するために必要なシンチレーション検出器の読み出し装置を開発した。高エネルギー加速器研究機構が開発した読み出し装置 COPPER システムとフラッシュ ADC カードを用いて、ファームウェアの改良、同期に必要なクロック発生装置の開発を行い、500MHz サンプルングでの多チャンネルデータ取得システムを構築した。カナダ TRIUMF 研究所においてパイ中間子崩壊事象のデータを取得し、未知の反応を探索した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	600,000	4,000,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子

キーワード：(1)素粒子物理 (2)パイ中間子 (3)レプトン対称性 (4)読み出し回路 (5)フラッシュ ADC

1. 研究開始当初の背景

これまでのレプトン対称性検証実験の中で、パイ中間子の崩壊を用いた実験が最も精度が高い。この実験では、パイ中間子が陽電子に崩壊する分岐比とミュオン粒子に崩壊する分岐比を精密測定する。測定精度を決定しているのは統計誤差であり、測定の為に大量に用意できる粒子ほど精度の高い測定が可能である。パイ中間子は、カナダ TRIUMF やスイス PSI などの大強度メソンファクトリーにおいて大量に得ることが可能であり、こ

の特徴を生かせば、高い統計精度での意義ある実験を早く・安く遂行することができる。

過去の実験で最も精度が高い測定は、カナダ TRIUMF での実験とスイス PSI での実験で、分岐比の測定誤差はおおよそ 0.5% である。これは標準模型を用いた理論計算値の精度に比べておおよそ 10 倍も悪い。本研究ではこれをおおよそ 5 倍改善することを目指す。本実験で理論予想値から外れた実験値を得れば、これは直ちに標準理論を超えた物理の存在を証明することとなる。

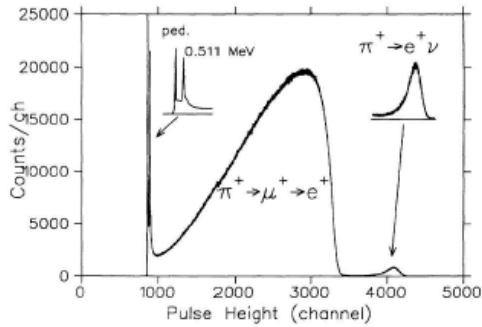


図1 陽電子エネルギー分布

標準理論の特徴として弱い相互作用を起源とするヘリシティー抑制効果によってパイ中間子が陽電子に崩壊する分岐比は非常に小さな値となっている。ヘリシティー抑制効果の働かない新しい相互作用が存在すると、分岐比は標準理論予想値から大きくずれる可能性がある。このため、本研究は標準理論を超える物理に対して非常に感度が高い。特定の粒子を仮定しない一般的な相互作用の場合、およそ 1000 TeV のエネルギースケールの物理まで感度を持つ。

2. 研究の目的

本研究の目的は、パイ中間子が陽電子へ崩壊 ($\pi \rightarrow e \nu$ 崩壊) する分岐比とミュー粒子へ崩壊 ($\pi \rightarrow \mu \nu$ 崩壊) する分岐比の比を 0.1% の精度で測定することである。これによって「電子・ミュー粒子対称性」を、0.05% の精度で検証する。「電子・ミュー粒子対称性」は標準理論の根幹をなす法則の一つであり、W ゲージボソンが荷電レプトンカレントへ結合する結合定数がレプトン世代によらずに普遍であることを要請する。この「電子・ミュー粒子対称性」を実験的に検証することによって、標準理論を超えた新しい現象を高い感度で探索することが可能である。また、未知の粒子の関与する反応が存在した場合、崩壊分岐比やエネルギー分布が理論計算値からずれることが期待される。本研究の実験精度は過去の実験に比べて約 5 倍であり、標準理論を超える物理に対して非常に感度の高い探索となる。

3. 研究の方法

本研究は、カナダ TRIUMF 研究所のパイ中間子ビームを用いて、パイ中間子崩壊分岐比を 0.1% という高精度で測定することで、標準理論に含有される電子・ミュー粒子対称性を精密検証することを目的とする。このような精密測定では大量のパイ中間子崩壊事象を測定することが必要になるが、本研究では検出器を直線的に並べることで全パイ中間子崩壊事象の 25% を捕えることを可能にし、これまでの実験のおよそ 10 倍の効率で統計

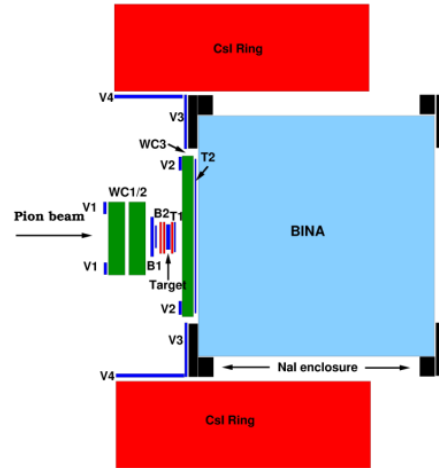


図2 検出器レイアウト

を貯められる。しかし、標的で停止したパイ中間子のうち陽電子に崩壊するのはわずか 0.012% であるため、大量の $\pi \rightarrow \mu \nu$ 崩壊事象の中から精密に $\pi \rightarrow e \nu$ 崩壊事象を選び出すにはパイ中間子停止標的シンチレーションカウンタの波形分析が鍵となる。本研究課題においては、本実験用測定器のうち、この波形読み出し装置を開発する。

本実験では、パイ中間子ビームを標的に打ち込み、標的内部で停止させたのち、標的から飛び出てくる陽電子を検出する。パイ中間子がミュー粒子に崩壊した場合でも、ミュー粒子が寿命 2 マイクロ秒で陽電子に崩壊するが、検出される陽電子のエネルギーによって崩壊モードを選別することができる。本実験では、BINA とよばれる大型 NaI 結晶 (直径 48cm、高さ 48cm の円柱形) を用いる。図 1 は TRIUMF でのパイ中間子崩壊分岐比測定実験 E249 において同様の大型 NaI 結晶を用いて測定された陽電子のエネルギー分布である。パイ中間子が直接陽電子に崩壊した場合は単一エネルギー 69.3MeV の陽電子が生成し、パイ中間子からミュー粒子、陽電子という連鎖で生成した陽電子はゼロから 52.3MeV までの幅広いエネルギー分布を持つ。56MeV あたりより高いエネルギーを持つ陽電子はパイ中間子から直接崩壊して生成したものであると同定できる。

図 2 に本実験の検出器レイアウトを示す。本研究では運動量 75MeV/c のパイ中間子ビームを検出器中央の標的に打ち込み、停止させる。確実にパイ中間子が標的に入射したことを確認するために、ワイヤーチェンバーで入射ビームの軌道を測り、2mm 厚のプラスチックシンチレータ (ビームカウンタ) で入射時間を記録する。標的に入射したパイ中間子のほとんどはミュー粒子に崩壊し、ミュー粒子は標的の中で崩壊し陽電子を放出する。パイ中間子が直接陽電子に崩壊した場合に比べて、

ミュー粒子を経て陽電子が放出される場合にはミュー粒子が標的の内部に余分に約 4 MeV のエネルギーを落とす。標的自体も 2cm 厚のプラスチックシンチレータでできているので、ミュー粒子による余分なシンチレータ光を検出することで $\pi \rightarrow \mu \nu$ 崩壊を 10 万分の 1 の精度で同定できる。標的から放出された陽電子を、2mm 厚のプラスチックシンチレータ(テレスコープカウンタ)で時間を記録し、BINA でエネルギーを測定する。

4. 研究成果

(1) ターゲットカウンタ用 500MHz 波形読み出し回路を開発した。まず、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の開発した汎用読み出しボード COPPER、および 500MHz フラッシュ ADC カードを用いて読み出しシステムを構築した。フラッシュ ADC カードの読み出しロジックのデバッグを行い、リセット信号などのコントロール信号のタイミング調整を行った。その後テストパルスを入力し、市販のオシロスコープで記録した波形と比較し、波形解析用ソフトウェアを開発した。その結果、 $\pm 500\text{mV}$ の入力範囲においての非リニアリティは 0.3% と非常に小さく、時間分解能は 20ps であることが分かった。実際の実験では、ターゲットカウンタで停止したパイ中間子が崩壊して放出されるミュー粒子がパイ中間子の信号に重なることがあるので、パイルアップした二つの擬似信号を使ってパルスの分別性能を調べた。その結果 2ns 以上離れたパルスを分解できることが分かった。この結果を平成 18 年 10 月 29 日から米国サンディエゴで開かれた国際会議 IEEE NSS において発表した。

平成 18 年 11 月 29 日から 12 月 23 日にかけてカナダ TRIUMF 研究所の M9A ビームラインにてターゲットカウンタのビームテストを行った。検出器の一部(ビームカウンタ、ターゲットカウンタ、テレスコープカウンタ、NaI カロリメータ)を設置、校正し、基本的な性能を確認した。テストパルスを用いて開発した波形解析ソフトウェアを発展させ、Likelihood を用いた分析を行ったところ、パイ中間子の信号に 1.2ns 遅れたミュー粒子の信号が重なった場合でもパルスを分別できた。さらに、この波形解析を用いると、 $\pi \rightarrow e \nu$ 崩壊事象に対するバックグラウンドとなる $\pi \rightarrow \mu \nu$ 崩壊事象を 91% の確率で識別できることが分かった。

(2) 本研究で開発した 500MHz 波形読み出しシステムを使って、カナダ TRIUMF 研究所においてターゲットカウンタのビームテストを行い、さらにより効率的なデータ収集を可能にするための改善を施した。本実験では

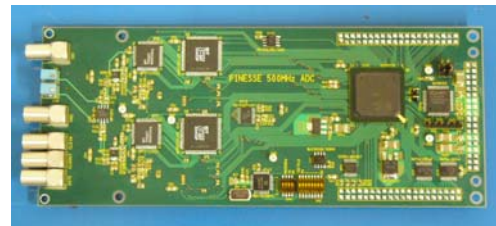
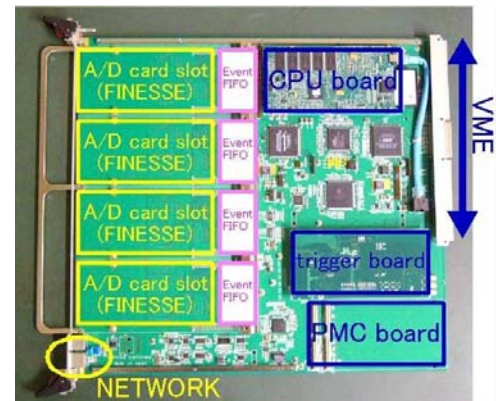


図 3 高エネルギー加速器研究機構で開発された汎用読み出しボード COPPER(上)と COPPER 用 500MHzFADC カード(下)

複数のカウンタからの信号を同時に計測するため、トリガー時刻に対して各信号記録間に時間不定性があってはならない。複数フラッシュ ADC チャンネルの同期運転のために、ADC カードのリセットのタイミングを微調整した。これによって、全チャンネルの記録開始時間を揃える事ができた。また、本システム以外の様々なデータ記録システムが混在する実験において、本システムでデータを記録開始するかどうかの判断は、フラッシュ ADC に信号がやって来るよりも遅れて、トリガー信号として送られてくる。フラッシュ ADC では一度に 8 マイクロ秒の波形情報を記録できるが、このような遅延トリガー信号に対処するため、信号をフラッシュ ADC でいったん記録しておき、古いデータを捨てながらトリガー信号を待つように改良したファームウェアをフラッシュ ADC カードに実装した。

TRIUMF 研究所におけるビームテストにおいて、トリガーレートは本システムを含む実験全体のデータ取得システムの限界に達した。物理データ取得に際しては、より効率的なデータ収集が望まれるため、本フラッシュ ADC システムにおいても改良を施した。データ転送速度を改善するため、フラッシュ ADC カード上の FPGA において逐次データ解析を行い、不要なデータを省くための機構を実装した。その結果、2.3kHz だったデータ取得レートを 13kHz にまで高めることに成功した。

(3) 平成 20 年にカロリメータなどの検出器を TRIUMF 研究所 M13 パイ中間子ビームラ

インの直下流に配置し、パイ中間子ビームを用いて飛跡検出器を除いた一部の検出器を調整した。平成 20 年度 10 月から 12 月にかけて M13 ビームラインの改良を行った。パイ中間子ビーム中に混入する陽電子及びミュー粒子を減らすため、双極磁石、四重極磁石、スリットを追加し、最適な設定を探した。その結果、パイ中間子のレートを 100kHz に保ちつつ、陽電子を 20 分の 1 以下に減らすことに成功し、パイ中間子純度を 82% にあげることができた。

(4) 飛跡検出器をはじめとする検出器群を完成させ、ビームを用いて検出効率の較正やトリガータイミングの調整等を行った。その中で、COPPER を用いたフラッシュ ADC のファームウェアを改良して時間測定の変動性を減らすことにも成功し、他の検出器と正確に同期を取るためにタイムスタンプをファームウェアに実装した。全検出器を組み合わせた最終調整の結果、2.3% の電子エネルギー分解能を達成し、600Hz のトリガレイトでデータ取得を開始した。平成 21 年 7 月から 12 月にかけておよそ 200 万イベントのデータを取得した。データ解析において、バックグラウンドを除去するカットをかけたところ、 $\pi \rightarrow e \nu$ 崩壊の検出効率は 56% に保たれ、52MeV 以下の低エネルギー側への染み出しは 8% に抑えられることが分かった。

得られたデータを用いて未知の重いニュートリノが関与する反応を探索した。陽子スペクトルに有意な信号が無かったことから、90MeV から 110MeV の重いニュートリノに他する混合行列要素についてこれまでより 1.5 倍厳しい上限値を与えることができた。

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 1 件)

- ① Kaoru Yamada, Makoto Yoshida (著者 10 人中 2 番目) *et al.*, “Pion Decay-Mode Tagging in a Plastic Scintillator Using COPPER 500-MHz FADC”, IEEE Trans. Nucl. Sci., 査読有, vol 54, No. 4, 2007, pages 1222 - 1226

[学会発表] (計 9 件)

- ① 山田薫、吉田 誠、青木 正治 「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比測定実験—実験開始に向けて—」、日本物理学会、2009 年 9 月 11 日、甲南大学
- ② 山田薫、吉田 誠、青木 正治 「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比測定実験—実験開始に向けて 1—」、日本物理学会、2009 年 3

月 29 日、立教大学

- ③ 伊藤尚祐、吉田 誠、青木 正治 「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比測定実験—実験開始に向けて 2—」、日本物理学会、2009 年 3 月 29 日、立教大学
- ④ 山田薫、吉田 誠、青木 正治 「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比測定実験—実験開始に向けて—」、日本物理学会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学
- ⑤ 山田薫、吉田 誠、青木 正治 「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比測定実験 PIENU の準備状況」、日本物理学会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学
- ⑥ 室井章、吉田 誠、青木 正治 「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比測定実験 PIENU のための COPPER 500MHz Flash-ADC System の開発」、日本物理学会、2007 年 9 月 23 日、北海道大学
- ⑦ 吉田 誠、「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比の精密測定—概要—」、日本物理学会、2007 年 3 月 27 日、首都大学東京
- ⑧ 室井章、吉田 誠、青木 正治 「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比の精密測定—ビームテスト 1—」、日本物理学会、2007 年 3 月 26 日、首都大学東京
- ⑨ 山田薫、吉田 誠、青木 正治 「 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊分岐比の精密測定—ビームテスト 2—」、日本物理学会、2007 年 3 月 26 日、首都大学東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 誠 (YOSHIDA MAKOTO)

大阪大学・大学院理学研究科・特任研究員
研究者番号：70379303

(2) 研究分担者

青木 正治 (AOKI MASAHARU)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：80290849

佐藤 朗 (SATO AKIRA)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：40362610