

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 6月 5日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21340059

研究課題名（和文）パイオン崩壊分岐比の超精密測定と標準理論を越えた物理の探索

研究課題名（英文）A Precision Measurement of the Branching Ratio in Pion Decay and Search for the Physics beyond the Standard Model

研究代表者

青木 正治（AOKI MASAHARU）

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80290849

研究成果の概要（和文）：パイ中間子崩壊の分岐比を精密に測定することによって、素粒子の標準理論を超えた新しい物理現象の探索を行った。大型 NaI(Tl) 単結晶を用いた検出器を製作し、カナダ TRIUMF 研究所の M13 ビームラインで物理データ収集を行なった。全データの 1/10 を用いた包括的な物理解析を実行し、全データセットを用いれば相対誤差で 0.1% よりも良い精度を達成できることを確認した。全データの解析にはもう少し時間がかかる見込みである。また、重いニュートリノの探索も行ない、新しい上限値を設定した。

研究成果の概要（英文）：An experiment to search for new physics beyond the Standard Model of particle physics by measuring the branching ratio of pion decays was performed. A detector which was built with a large NaI(Tl) single crystal was installed at M13 beam line at TRIUMF, and a physics data taking was performed. A physics analysis with 10% of whole data set was performed, and it is confirmed that the final sensitivity with whole data set will be better than 0.1% in relative error. The physics analysis is expected to take more time since a blind analysis policy is adopted. New upper limits on massive neutrinos were obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

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）、精密測定、レプトン普遍性、荷電ヒッグス

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子の標準理論では $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 。崩壊はヘリシティー抑圧されており分岐比が非常に小さい。ヘリシティー抑圧されない新しい物理に対して敏感である。

① 崩壊分岐比の測定精度 0.05% は、1000 TeV を超えるエネルギースケールに相当する。

② 理論計算の不定性はわずかに 0.01% であり、一方実験による測定値の不定性は 0.5% もあった。

③ 実験精度を改善する事により、標準理論を超える新しい物理を探索することが可能である。

④ 荷電ヒッグスや荷電レプトンフレーバ

一非保存過程の研究を行う事ができる。

(2) 関連・競合する実験計画が実行中・計画中であった。

① スイス・PSI ではパイオンを用いた同種の実験(PEN 実験)が準備中であった。

② CERN・NA48/2 や DAΦNE・KLOE では、Kaonを用いた実験が行なわれた。

③ CERNではKaonを用いた次世代実験が計画中であった。

(3) 1990 年代に TRIUMF で行なわれた実験の経験をベースとして、0.05%の測定精度を目指した新しい実験に思い至った。

2. 研究の目的

(1) $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 崩壊と $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 崩壊の相対的な分岐比($R_{e/\mu}$)を 0.05%の精度で超精密測定することにより、標準理論の枠外の現象を探索する。

(2) 実験感度を 0.01%まで改善する次世代実験方法・装置の研究開発も行う。

3. 研究の方法

(1) $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 崩壊からの陽電子エネルギー(69.3 MeV)と $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu$ 崩壊からの陽電子エネルギー(0~52.3 MeV)の違いを利用して崩壊モードの弁別を行なう。

① 大型 NaI(Tl)単結晶カロリメータによる高いエネルギー分解能(2.2%FWHM)を活用する。

② 物質中でのエネルギー損失やシャワーリークなどにより $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 崩壊からの陽電子エネルギーは低エネルギー成分を持つ。パイオン静止標的からの信号の波形解析や、シリコンストリップ検出器を用いたトラッキングにより、低エネルギースペクトル成分を高精度で評価する。

③ シャワーリークの影響を低減するために、NaI(Tl)の周りを CsI 結晶で取り囲む。

④ ブラインド解析の手法を採用して、各種系統誤差や補正の評価に伴う人為的なバイアスを防ぐ。

(2) 統計精度の向上を図る。

① TRIUMF 研究所サイクロトン実験室の大強度パイオンビームライン(M13)で実験を行う。

② M13 の改造を行い、ビーム中の陽電子を1/10に低減する。これにより、大型 NaI(Tl)単結晶カロリメータをビーム軸上に配置することが可能となり、立体角を前実験の10倍に改善した。

③ 全検出器の信号を波形記録装置で記録して、パイルアップなどにもなうイベントロスを防ぐ。

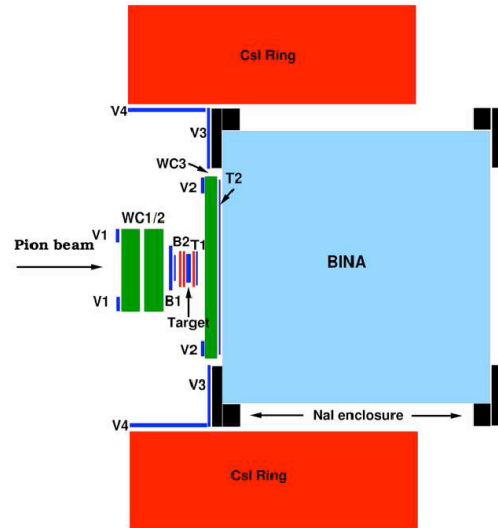


図1 実験装置

4. 研究成果

(1) 大型 NaI(Tl)単結晶の 70 MeV/c 陽電子に対するレスポンスを測定した。その結果、エネルギー分解能 2.2%FWHM を達成している事を確認した。また、光核反応に起因する低エネルギー側ピークを実際に観測する事に成功した。

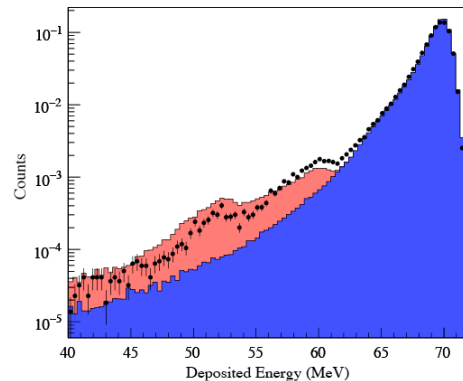


図2 70 MeV/c 陽電子による NaI(Tl)スペクトル。黒丸はデータ、ヒストグラムは Geant4 による計算結果(雑誌論文④)

(2) NaI(Tl)カロリメータの優れたエネルギー分解能を活かして、有限質量を持ったニュートリノの探索を行った。得られた上限値を図3に示す。

(3) 2012年12月まで実験を遂行し13~14Mの $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 崩壊事象を収集してビームタ

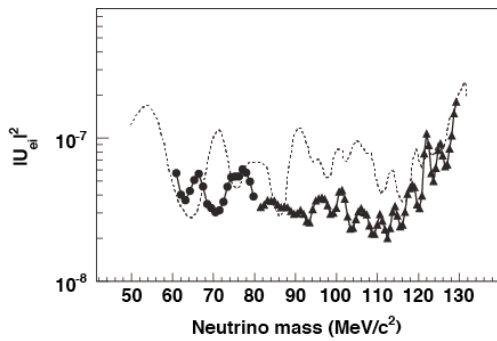


図3 シンボル：90% C.L. 上限値、点線：以前の実験による上限値(雑誌論文③)

イムを完了した。

(4) 2010年11月に収集したデータセット(全体の1/10)を用いて、物理解析を実行した。

① 解析に伴う人為的なバイアスの混入を防ぐため、ブラインド解析を採用した。ただし、本研究では稀崩壊実験におけるブラインド解析の手法を直接採用する事ができない。そこで、パイオン静止標的へのエネルギーに依存した未知の解析効率を人為的に導入する手法を新たに開発した。

② 本研究では、低エネルギー陽電子と高エネルギー陽電子の時間スペクトルを同時にフィットすることによって、 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 崩壊分岐比を算出する。このとき、スペクトルの形状を正確に見積もる事が重要となる。検出器へのパイルアップなどに伴うバックグラウンドスペクトルを詳細に評価する手法を開発した。図4に低エネルギー陽電子時間スペクトルとその成分分解を示す。

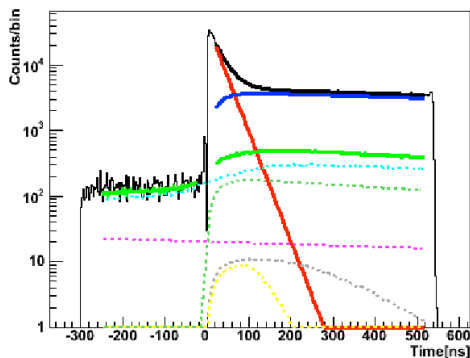


図4 高エネルギー陽電子の時間スペクトル、赤線： $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 崩壊成分、青線： $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 崩壊成分、緑線：パイルアップ成分、点線は緑線の成分分解。

③ その他の系統誤差の評価を行い、 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ 崩壊と $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 崩壊の分岐比の統計誤差 $\pm 0.003 \times 10^{-4}$ 、系統誤差 $\pm 0.002 \times 10^{-4}$ を得た。現時点ではブラインド条件を取り除いていないため、中心値は不明である。これらの解析から、全データセットを使用した場合には、 $\pm 0.001 \times 10^{-4}$ の誤差となることが予想される。

④ 更に誤差を改善するため、シリコントラッカー情報を用いてパイルアップ事象の選択を精密化する方法などの検討を行った。

(5) 全データセットを用いた最終結果を得るまでにはまだ1~2年はかかる見込みである。これは、ブラインド解析手法を採用した事に伴う副作用であるが、本研究の様な精密測定実験では避ける事ができない。

(6) 本研究では、系統誤差の評価にかかる手間と時間を厭わずに、極限精度での精密測定実験に果敢に挑戦した。本研究に触発されて新たに提案された実験(J-PARC E36、DeeMe、ミュオン超微細構造定数測定実験など)もあり、精密測定実験分野にあたえたインパクトは大きい。

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4件)

- ① C. Malbrunot, M. Aoki(3番目), Y. Igarashi(15番目), M. Yoshida(27番目) 他23名, The PIENU experiment at TRIUMF: A sensitive probe for new physics, J. Phys. Conf. Ser., 査読無, 312巻, (2011)
- ② C. Malbrunot, M. Aoki(3番目), Y. Igarashi(13番目), M. Yoshida(23番目) 他19名, Measurement of the pion branching ratio at TRIUMF, AIP Conf. Proc., 査読無, 1441巻, (2012) 564-566
- ③ M. Aoki(1番目), Y. Igarashi(10番目), M. Yoshida(22番目) 他19名, Search for massive neutrinos in the decay $\pi \rightarrow e \nu$, Phys. Rev. D, 査読有, 84巻, (2011), 052002(5)
- ④ A. Aguilar-Arevalo, M. Aoki(2番目), M. Blecher 他14名, Study of a large NaI(Tl) crystal, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 査読有, 621巻, (2010), 188-191

[学会発表] (計6件)

- ① 伊藤慎太郎, 青木正治, 五十嵐洋一, 久野良孝, その他 PIENU Collaboration,

$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 崩壊分岐比の精密測定における時間スペクトラム解析 -PIENU-, 日本物理学会, 2013. 3. 29, 広島大学

- ② M. Aoki, The new pi-e-nu experiments, 招待講演, the 13th Annual Meeting of the Northwest Section of the American Physical Society, 2011. 10. 21, Corvallis USA
- ③ 青木正治, レプトンユニバーサリティの破れの探索, 日本物理学会, 2011. 9. 18, 弘前大学
- ④ M. Aoki, Rare Decays, 招待講演, Precision Tests of the Standard Model, 2010. 11. 10, ECT* Trento Italy

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

吉田 誠 (YOSHIDA MAKOTO)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号: 70379303
(H22 から連携研究者として参画)

(3) 連携研究者

五十嵐 洋一 (IGARASHI YOUICHI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号: 50311121

小松原 健 (KOMATSUBARA TAKESHI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号: 50311121
(H21 まで連携研究者として参画)

(4) 研究協力者

Douglas Bryman
University of British Columbia (Canada)
Professor

沼尾 登志男 (NUMAO TOSHIO)
TRIUMF (Canada)
上級研究員

伊藤 慎太郎 (ITOU SHINTARO)
大阪大学・大学院理学研究科・博士前期大学院生
(H23 から研究協力者として参画)

伊藤 尚祐 (ITOU NAOSUKE)
大阪大学・大学院理学研究科・博士前期大学院生
(H21 まで研究協力者として参画)

山田 薫 (YAMADA KAORU)
大阪大学・大学院理学研究科・博士後期大学院生
(H21 まで研究協力者として参画)