

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 29 日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21684012

研究課題名（和文） TRIUMF における世界最高精度での時間反転対称性の破れ探索実験

研究課題名（英文） Experimental search of a time reversal symmetry violation
in the world highest precision at TRIUMF

研究代表者

村田 次郎 (MURATA JIRO)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：50360649

研究成果の概要（和文）：

本研究は、偏極原子核のベータ崩壊における、時間反転対称性を破る三重相関の有無を、カナダの TRIUMF 研究所において世界最高精度で探索する実験研究である。ドリフトチェンバーを用いた電子線横方向偏極度計を開発し、TRIUMF-ISAC で生成される偏極 8Li のベータ崩壊によって放出される電子の横方向偏極を、Mott 散乱飛跡を検出する事で計測する。2010 年度にデータ収集を行い、最高統計精度を得ると共に、系統誤差を抑制しうる次世代実験装置の開発にも成功した。

研究成果の概要（英文）：This project aims to perform the world highest precision test of time reversal symmetry by searching a triple vector correlation in polarized nuclear beta decay, at TRIUMF in Canada. We have developed an electron transverse polarimeter using a drift chamber. Transverse polarization of electrons emitted from beta decay of the polarized 8Li nuclei, produced at TRIUMF-ISAC, is measured by measuring Mott scattering tracks. We have performed the physics data taking in FY2010, obtaining the highest statistical precision. In addition, we have also succeeded to develop the next generation experimental setup which can suppress the systematic errors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2012年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
総計	20,500,000	6,150,000	26,650,000

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：原子核（実験）、対称性

1. 研究開始当初の背景

時間反転対称性は自然法則における最も基本的な対称性の一つであり、CPT 定理の下で CP 対称性の破れと時間反転対称性の破れは

等価であると考えてよい。ノーベル賞が与えられた小林・益川理論 (CKM 理論) はこれまで実験で観測された全ての CP 対称性の破れを矛盾なく説明したが、観測されている宇宙の

物質・反物質比の大きな非対称性は宇宙初期に CKM を大きく超える CP 対称性の破れた現象の存在を不可欠の要素として要請しており、標準理論を超える未知の相互作用を起源とする、大きな CP の破れを実験的に探索すべきという強い動機を与えている。

1964 年の CP 非保存の発見を引き金として、基本的な時空対称性の検証は素粒子の実験研究の最重要課題として熾烈な競争を生む事となった。その後今日までの 40 年間で K 中間子、B 中間子の系で CKM から予想されるほぼ全ての現象の発見が完了した。CKM 機構では重いクォークを含む系ほど大きな CP の破れが起こり、CKM の検証には有利である。B-factory の建設動機はそこにあった。しかし、CKM の正しさが確認されたと言える現在、新たな段階として CKM を超える大きな CP の破れを探索するという動機に立つ際には、CKM の強く抑制される u, d クォークの系での対称性の精密検証がむしろ有利であると考えに至った。重いクォークの系では CKM が今や不都合なバックグラウンドとなる為である。本研究は、CKM では決して観測されないはずの、原子核のベータ崩壊における世界最高精度での時間反転対称性の破れ探索実験を実行する事を目的とする。

本研究では、研究代表者が世界で初めて開発した、ドリフトチェンバーを用いた電子線横方向偏極度計をカナダの TRIUMF 研究所に設置し、過去の測定精度を最低一桁下回る超高精度実験を遂行する事を明確に目標に掲げた。研究代表者はそれまでに本研究の準備研究として、完成した電子線横方向偏極度計を用いた時間反転対称性の破れ探索実験を KEK 東海の TRIAC において実行し、TRIUMF での実験に向けた性能評価を入念に行ってきた。自ら育てた大学院生を多数率いて行った TRIAC での実験は到達精度においては過去の世界記録に及ばないものの、系統誤差の殆ど入る余地の無い電子線の飛跡検出を用いた初めての実験であり、信頼性の大きく向上した時間反転対称性の破れの検証データを得たことで、それ自体重要な成果を上げることが出来たと考えている。以上の準備の結果をもって、2008 年 7 月の TRIUMF の Experiments Evaluation Committee に渾身のプロポーザルを提出した。TRIUMF 側からは非常に高い関心を示され、medium high priority の新規実験 S1183 (MTV) 実験として採択された。

研究代表者はかつて RHIC における標準理論を超えるパリティの破れの研究を行って以来、偏極を利用した対称性の精密検証というテーマを発展させてきた。LHC のデータが始める現段階において、標準理論を最も高い精度で検証しうる本実験を行う事は LHC 一辺倒となって科学が多様性を失う危機を回避

し、多方面からの標準理論の検証データを提供の一助となる上で、その重要性ははかりしれない。以上より、本研究は時機を捉えた明確な物理的動機の下に、周到に準備してきた独創的な検出装置を用いて、TRIUMF 研究所にて供給可能なビームを活用して、既に採択済みの実験を新たに開始する事を目指して開始された。

2. 研究の目的

本研究は、偏極原子核のベータ崩壊における、時間反転対称性を破る三重相関の有無を、カナダの TRIUMF 研究所において世界最高精度で探索する実験研究である。

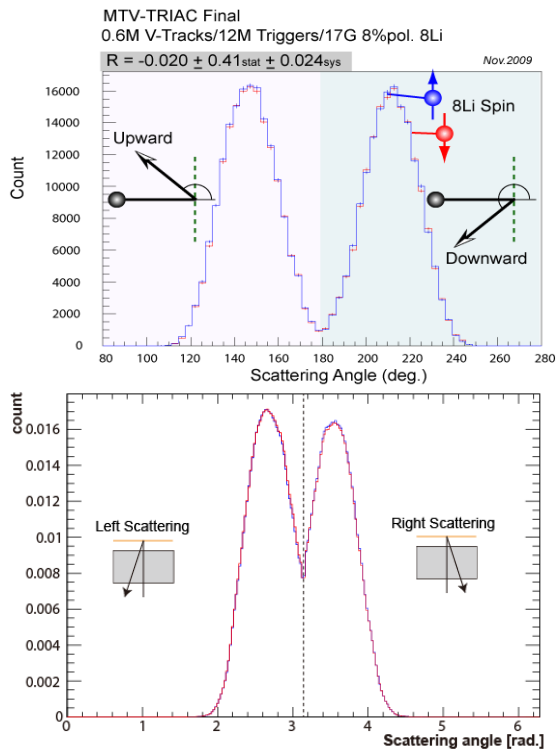
3. 研究の方法

研究初年度である 2009 年度に、S1183 MTV 実験の検出器系の信頼性を確認するため、KEK-TRIAC より TRIUMF へ移設・ビームを用いたテスト実験を行ったのに引き続き、二年目にあたる 2010 年度には本番のデータ収集を行い、初期の目標である時間反転対称性の破れに関する世界最高の統計精度での検証実験を実行した。2011 年度は 2010 年度に実行した本番実験のデータ解析を行い、特に系統誤差に関するモンテカルロシミュレーションに基づく研究と、そのオフライン解析での抑制方法とその効果についての検証を行った。それに加えて、パリティの破れと平面型ドリフトチェンバーがもつ幾何学的形状の非対称性に起因するこの実験の最大の系統誤差を根本的に解決しうる、次世代機としての円筒型ドリフトチェンバー (CDC) のプロトタイプを製作し、2011 年の秋には TRIUMF においてビームを用いたテスト実験を行った。

4. 研究成果

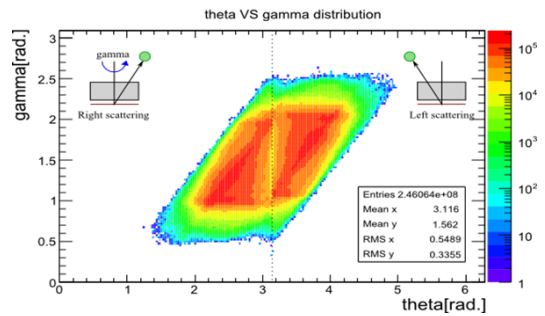
S1183 MTV 実験の検出器系の信頼性を確認するため、KEK-TRIAC より TRIUMF へ移設・ビームを用いたテスト実験を行い、KEK-TRIAC のビーム強度 1000 倍の環境での動作試験を成功させた。その中で、データ収集系及び、ドリフトチェンバーの動作速度に問題がある事が判明し、新たにバッファ読み出しによる全く新しいデータ収集システムを開発、実装した。併せて、ドリフトチェンバーの読み出し回路、ガスの基礎特性の調査を徹底的に行い、二年目の本番測定に備えた。この為、研究代表者と共同研究者の大学院生は約一年間にわたって現地に滞在し、本番のデータ収集の準備にあたった。そして二年目にあたる 2010 年度には目標通り、本番のデータ収集を行い、初期の目標であった時間反転対称性の

破れに関する世界最高の統計精度での検証実験を成功させる事が出来た。2011 年度は 2010 年度に実行した本番実験のデータ解析を行い、特に系統誤差に関するモンテカルロシミュレーションに基づく研究と、そのオフライン解析での抑制方法とその効果についての検証を行った。

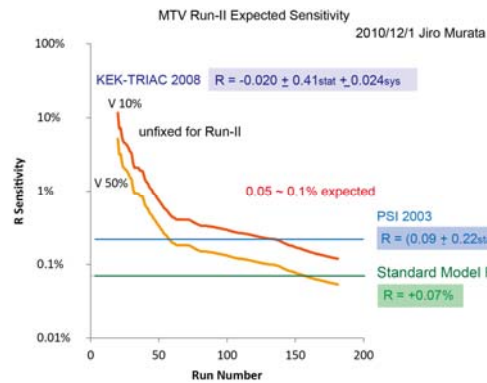


上図は Mott 散乱時の散乱角度分布であり、ビームの偏極方向の反転に対して形が違えば時間反転対称性が破れている事を意味する重要な結果である。上は KEK-TRIAc、下は TRIUMF で 2010 年度に得た結果である。事象数で、KEK-TRIAc では 0.6Mevent だったのに対し、TRIUMF では 3Gevent に達し、統計精度世界一を記録した。

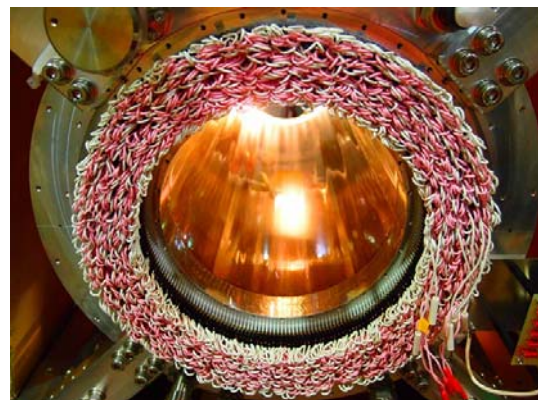
一方で、前人未到の超高精度を達成した事で新たに見えてきた問題がある。それは、検出器の幾何学的形状が対称的でない事と、パリティの破れによる電子の放出角度分布がビームのスピン反転に伴って変化する効果が重なると、消せない系統誤差を生む事であった。下図は電子の散乱事象を示しており、左右非対称となっている事がわかる。この非対称性を相殺する解析方法の開発が求められる事となった。



本研究では、下図のように標準模型に含まれる終状態相互作用の予言値に迫る統計精度を達成する事が出来ている。



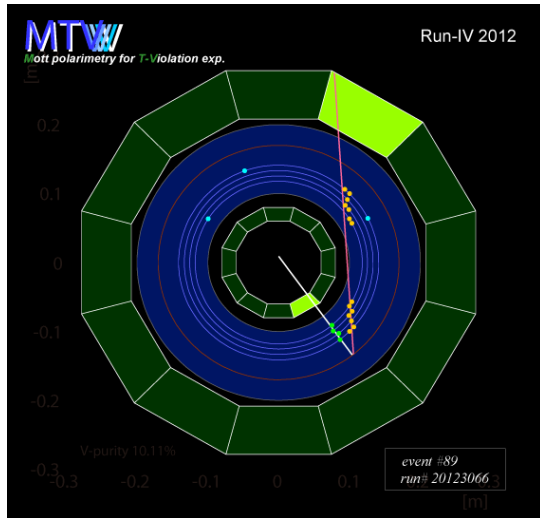
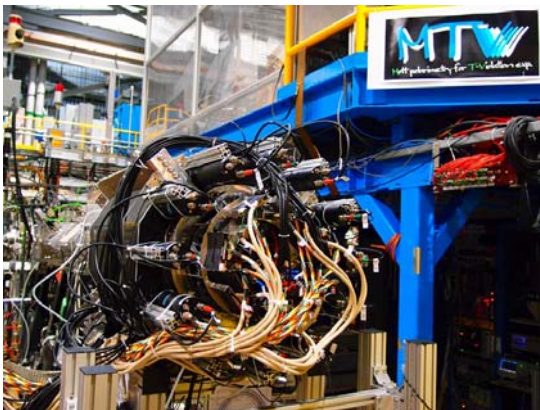
しかし、最終的な精度は統計誤差と系統誤差の合計で決まるため、系統誤差を抑制する事が必須となった。2010 年度のデータを解析の中で系統誤差を相殺させる方法を開発すると同時に、この実験の最大の系統誤差を根本的に解決しうる、次世代機としての円筒型ドリフトチェンバー (CDC) のプロトタイプを製作し(下図)、2012 年度の秋には TRIUMF においてビームを用いたテスト実験を行った。



この実験の結果、平面型ドリフトチェンバーに比して空間電荷効果が強く抑制されることも確認し、また、トリガー検出器の及ぼす影響についても検証する事が出来、次世代実験のデザインを固めるうえで最も基礎的な

情報を十分に得る事が出来た。2012 年度には、CDC を用いた MTV 実験本番セットアップを完成させ、ビームを用いた最終試験を行い、次世代実験の準備を完了させることができた。具体的には、CDC 外部に電子エネルギー計測用の検出器を設置、また、内部にトリガー系を設置し、さらに CDC の全部のチャンネルからの読み出し回路を整備してデータ収集が可能な状態にした上で、ビームを用いた実証実験を行い、性能評価を行った。

下図は実験セットアップである。この装置を組み上げた上で実験を行い、見事な V 字型散乱事象を捉える事が出来た。



この様にして、CDC を用いた開発試験を完了させ、次期計画への橋渡しも完了させる事が出来た。一方で 2010 年度に得たデータに関しては、ベータ線の放出角度と Mott 散乱角度を二次元的に区別する解析を行う事で、パリティの破れと非対称な幾何学形状に起因する系統性は取り除くことが出来るようになった。しかし、さらに、ビームのスピンの反転で相殺されると考えていた検出器の検出効率が、必ずしも相殺されない現象を発見した。

これは過去に行われた同様の実験で報告されていない技術的な問題であるが、研究代表者らはこの効果もオフライン解析で数学的に評価、除去できることを証明した。その上で、最終的な結果が投稿論文の形で発表直前となっている。

以上のように、TRIUMF での実験の立ち上げからテスト実験、多くの開発を経て本番実験遂行、オフライン解析から次期計画への橋渡しの開発まで本研究期間内に終わらせるという大きな成果を得る事が出来た。

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 2 件)

① J. Murata, H. Baba, J. A. Behr, M. Hata, Y. Hirayama, M. Ikeda, D. Kameda, H. Kawamura, R. Kishi, C. D. P. Levy, Y. Nakaya, K. Ninomiya, M. Nitta, N. Ogawa, J. Onishi, R. Openshaw, M. Pearson, E. Seitabashi, Y. Totsuka, T. Toyoda, M. Uchida

Test of Time Reversal Symmetry using polarized ^8Li at TRIUMF-ISAC

Journal of Physics: Conference Series 312 (2011) 102011 査読有

doi:10.1088/1742-6596/312/10/102011

② J. Onishi, H. Baba, M. Ikeda, H. Kawamura, R. Kishi, Y. Nakaya, K. Ninomiya, N. Ogawa, R. Openshaw, M. Pearson, E. Seitabashi, Y. Totsuka, T. Toyoda, M. Uchida, and J. Murata

Electron Transverse Polarimeter for the MTV experiment at TRIUMF

Journal of Physics: Conference Series 312 (2011) 102012 査読有

doi:10.1088/1742-6596/312/10/102012

[学会発表] (計 18 件)

① 田沼良介 他, CDC を用いた次世代 TRIUMF-MTV 開発実験 Run-IV の報告
日本物理学会第 68 回年次大会
2013/3/27 広島大学

② 戸塚祐実 他, 時間反転対称性の破れ探索・TRIUMF-MTV 実験 Run-II の結果報告
日本物理学会第 68 回年次大会
2013/3/27 広島大学

③ Saki Tanaka et. al. Search of non-standard strong gravity at nuclear scale using electron spin Geodetic precession
The 20th International Symposium on Spin

Physics (SPIN2012) 2012/9/18 Dubna, Russia

④Ryosuke Tanuma et. al. A New FPGA-based Trigger/DAQ system for the MTV experiment at TRIUMF

The 20th International Symposium on Spin Physics (SPIN2012) 2012/9/18 Dubna, Russia

⑤Yumi Totsuka et. al. First Result from the MTV experiment at TRIUMF searching T-Violation in nuclear beta decay

The 20th International Symposium on Spin Physics (SPIN2012) 2012/9/18 Dubna, Russia

⑥中谷祐輔、村田次郎他 TRIUMF-MTV 実験の次世代 CDC の為の Trigger/DAQ 複合 FPGA システムの開発

日本物理学会第 67 回年次大会
2012/3/27 関西学院大学

⑦村田次郎、他 時間反転対称性の破れ探索実験：TRIUMF-MTV 実験 Run-II 及び III の報告

日本物理学会第 67 回年次大会
2012/3/25 関西学院大学

⑧ Y. Totsuka, J. Murata et. al. Performance Test of MTV new detector TRIUMF ISAC Science Forum 2011/11/30 TRIUMF, Vancouver, CANADA

⑨戸塚祐実他、TRIUMF-MTV 実験の為の TDC を用いた電荷読み出し方法 (pQTC) の開発

日本物理学会第 66 回年次大会
2011/3/28 新潟大学

⑩大西潤一他、時間反転対称性の破れ探索を目的とした TRIUMF-MTV 実験 Run-II の報告

日本物理学会第 66 回年次大会
2011/3/28 新潟大学

⑪J. Onishi, J. Murata et. al. Electron Transverse Polarimeter for the MTV Experiment at TRIUMF

Fundamental Symmetries “Searching for New Physics” in Canada and Beyond 2010/7/10 TRIUMF, Vancouver, CANADA

⑫ J. Murata, Test of Time Reversal Symmetry using polarized 8Li at ISAC Fundamental Symmetries “Searching for New Physics” in Canada and Beyond (招待講演) 2010/7/10 TRIUMF, Vancouver, CANADA

⑬J. Onishi, J. Murata et. al., Electron Transverse Polarimeter for the MTV Experiment at TRIUMF, International Nuclear Physics Conference 2010 2010/7/5 Vancouver, CANADA

⑭J. Murata et. al., Test of Time Reversal Symmetry using polarized 8Li at TRIUMF-ISAC, International Nuclear Physics Conference 2010 2010/7/5 Vancouver, CANADA

⑮聖代橋悦子他、TRIUMF-ISAC における偏極 8Li を用いた時間反転対称性の破れ探索実験、日本物理学会 2010/3/23, 岡山大学

⑯川村広和他、KEK-TRIAC における偏極 8Li を用いた時間反転対称性の研究、日本物理学会 2010/3/23, 岡山大学

⑰Jiro Murata Test of Time Reversal Symmetry using Polarized Nuclear Beta Decay at KEK and TRIUMF, Nuclear Physics Seminar (招待講演), 2010/2/24, ミシガン州立大学、米国

⑱Estuko Seitabashi et al., T-violation experiment using polarized 8Li at KEK-TRIAC and TRIUMF-ISAC, Hawaii 2009 (JPS-APS meeting) 2009/10/16, ハワイ、米国

〔図書〕 (計 1 件)

①村田次郎 著 講談社ブルーバックス 「余剰次元」と逆二乗則の破れ, 2011, 254 ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 次郎 (MURATA JIRO)
立教大学・理学部・教授
研究者番号：50360649

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし