

平成 21年 5月 20日現在

研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18684010
 研究課題名（和文） 単光子イメージング検出器を用いたベータ・ニュートリノ相関観測実験
 研究課題名（英文） Measurement of Beta-Neutrino Correlation
 using Single Photon Imaging Detectors
 研究代表者
 村田 次郎（MURATA, JIRO）
 立教大学・理学部・准教授
 研究者番号：50360649

研究成果の概要：

本研究は、ベータ崩壊の相関項の精密観測により標準模型の精密検証を行う事を目的として行われた。具体的には、主に偏極核から放出される電子線の横方向偏極度の存在を検証する事で、時間反転対称性の破れを探索する実験を装置開発から初めて本番実験まで行った。

結果として、世界で初めてイベント再構成による Mott 散乱非対称観測による時間反転対称性の破れに対する制限を与えることに成功した。本研究の装置を用いて、TRIUMF 研究所にて次期計画を実行する予定であり、その最終テストを完了させる事が出来たと言える。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2007年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
年度			
総計	22,800,000	6,840,000	2,9640,000

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)

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初は、低速不安定核を真空中に引きだしてベータ崩壊を観測する実験を計画していた。本研究は、まず低速不安定核の生成という技術的に困難な部分を除去する方法として、検出器内でのベータ崩壊の

観測方法の観測を目指す事を想定して開始された。同時に、固体中に停止させた不安定核を何らかの形で偏極させる事が出来れば、偏極の相関観測が可能になる事から、偏極実験の可能性も模索していた。結果としては、後者の偏極実験に集中する事で大きな成功を収めることが出来たと言える。

2. 研究の目的

本研究で最大の成果をあげた、偏極核のベータ崩壊に於ける時間反転対称性の破れの検証の目的は、標準模型に組み入れられている小林・益川理論の予言する CP 対称性の破れでは、その大きさがあまりに小さい為に我々の宇宙の物質・反物質存在比の大きな偏りが説明できないという謎に対して、標準模型を超える大きさの CP 対称性の大きな破れ、即ち CPT 定理においてそれと等価な、時間反転対称性の大きな破れを探索する事である。

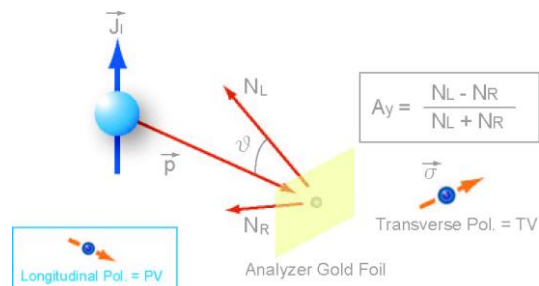
小林・益川理論では軽いクォークから成る系では CP の破れの効果は強く抑制される為、小林・益川理論の検証という目的の為に K 中間子、さらには B 中間子等の重いクォークの系を観測する事が圧倒的に有利である。しかし、本研究では小林・益川理論を超える新現象を発見する事を目的と考えるため、小林・益川機構は強く抑制される一方で全ての系で最も統計精度を上げる事が可能な、通常核の系を用いる方がむしろ有利であるという考えで進められた。

通常核のベータ崩壊で時間反転対称性を破る相関には最低次で二種類ある。一つは D 相関と呼ばれる相関項で、時間反転対称性を破る一方でパリティ対称性は保持するものである。もう一方は R 相関と呼ばれる相関項で、時間反転対称性を破ると同時にパリティ対称性をも破る相関である。

KEK-PS で行われた E246 実験、及び J-Parc での TREK 実験は上記の D 相関に相当する時間反転対称性の破れを探索している。本研究ではパリティ対称性も破る R 相関に特に注目して時間反転対称性の破れの探索実験を行った。

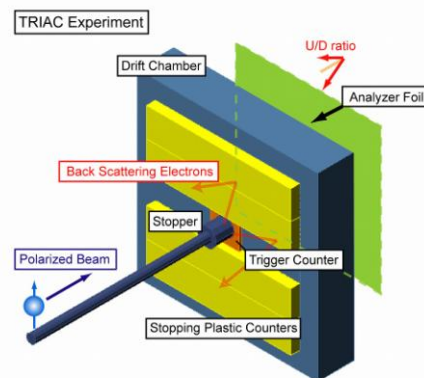
3. 研究の方法

本研究で目的とした R 相関は、偏極した原子核からベータ崩壊により放出される電子線が横方向に偏極を持つか否かを検証する事で計測する事が出来る。



電子線の横方向偏極度は、Mott 散乱の偏極分解能を利用して薄膜による Mott 散乱の散乱方向非対称度により計測する事が可能である。本研究では、下図の様なドリフトチェ

ンバーを用いた Mott 散乱による V 字飛跡を検出し、偏極核の偏極方向を反転した際に非対称度の変化があるかどうかを検証する実験を計画した。



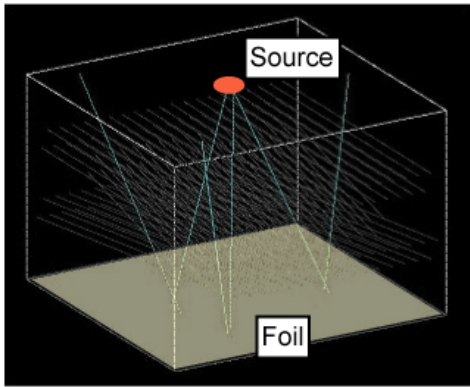
4. 研究成果

まず、本研究の基幹部分である、電子線の飛跡検出器として下図の様な平面型ドリフトチェンバーの開発を行った。

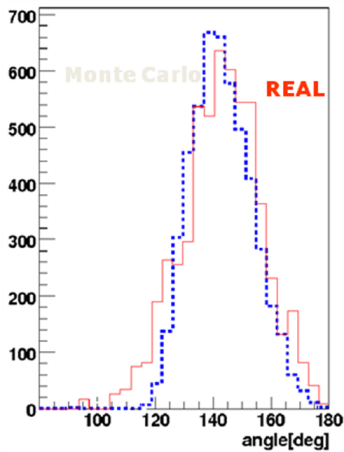


このドリフトチェンバーは元々、真空中に引き出された不安定核のベータ崩壊を観測する際に、電子線の放出方向を特定する為に設計・製作されたものであったが、本研究を開始するにあたり、その入射窓部分の一方に金属薄膜を貼り付ける事で Mott 散乱を起こさせ、その V 字飛跡を計測するという目的の為にデータ収集システム及び解析系を一から構築しなおした。

放射線源を用いた性能評価試験では、次図の様に薄膜による散乱飛跡を事象毎に再構成可能である成果が得られた。



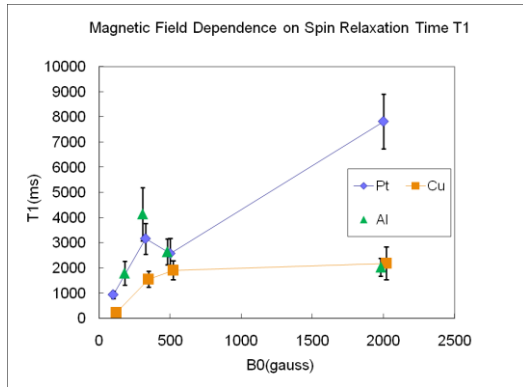
最終的に計測したい観測量は散乱時の散乱角度である。放射線源を用いた試験では、得られた角度分布とモンテカルロ計算が比較され、両者は十分な精度で一致する事が確認された。



以上から、ドリフトチェンバーを用いた Mott 散乱による電子線横方向偏極度計は開発を完了したと言える。

次いで、時間反転対称性の破れ探索実験を遂行する為には、偏極核の生成と保持という課題をクリアする必要があった。そこで、偏極核生成は KEK-TRIAC にて KEK の平山氏が開発した傾斜薄膜偏極生成法という技術を用いる事とした。その為、本研究の基幹装置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の開発と並行して KEK-TRIAC にて平山氏の偏極生成の開発実験に参加し、ポリスチレン膜を用いた ^8Li 核の偏極方法を確立させる事が出来た。

最後の課題である、偏極保持装置に関しては、実験の制約から低保持磁場でかつ常温で十分長いスピン緩和時間を持つ、材料研究から開始した。その為、阪大の松多氏の協力を得て、プラチナ、銅、アルミニウムの各金属材料に対して、実際に ^8Li 核を偏極させてその緩和時間を NMR 法を用いて計測する実験を、大阪大学バンデグラフ加速器において行った。

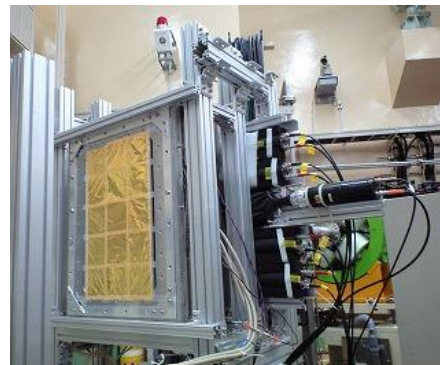


上図は保持磁場の強度の関数として計測された ^8Li 核のスピン緩和時間の実測値である。これらの結果から、総合的に判断してアニール処理されたプラチナ薄膜を常温で 500G 程度の保持磁場中で用いる事で十分に目的が達成出来る事が明らかとなった。

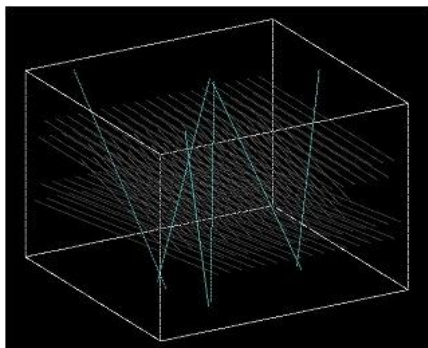
この結果を受けて、KEK-TRIAC での実験に使用できる偏極保持装置を製作した。下図はその写真である。TRIAC では ^8Li ビームが傾斜薄膜を通過してくる為にビームが大きく広がり、それらを有効活用する為に大型のプラチナストッパーを製作した。その際に、500G の保持磁場を確保する為に永久磁石で挟み込んだ形状を取った。



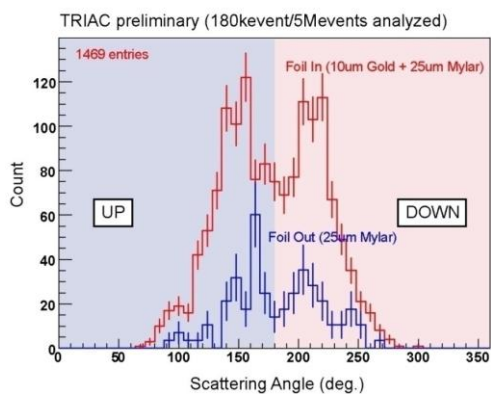
以上の準備の上で、2008 年 4 月に ^8Li を用いた TRIAC での最初のテスト実験を行った。この際、検出器系の動作確認を目標とした為、傾斜薄膜は用いずに非偏極 ^8Li ビームを用いた測定を行った。



前図が実験のセットアップである。この実験では初めて 8Li からのベータ線を用いた V 字飛跡再構成を行う事が目標であった。結果として、放射線源を用いたテスト同様に、8Li に対しても下図のように見事な V 字散乱飛跡の取得に成功した。



得られた V 字散乱飛跡から、散乱角度分布を求めた結果が次図である。横軸が Mott 散乱の角度を偏極軸方向に射影したもので、縦軸は計数である。180 度対称の結果は、Mott 散乱の上下非対称性がない事を示しているが、この測定は非偏極なのでそもそもそれ自身には意味はない。この測定では、Mott 散乱をさせる金属薄膜として 10 ミクロン厚の金箔を用いたが、その有無による計数率の明瞭な違いが観測された。

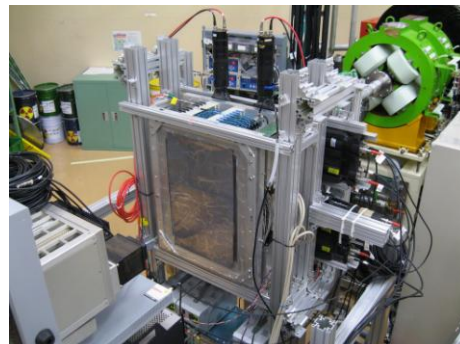


この実験では、プラスチックシンチレータで構成したトリガー系は低エネルギー電子線の多重散乱事象や制動放射などの影響を非常に受けやすく、取得したデータをオフライン解析した所、ドリフトチェンバーの信号が正しく V 字飛跡になっているものが 1% に満たない事が明らかとなった。

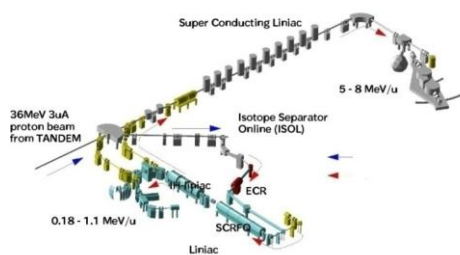
そこで、この障害を取り除くにはトリガー系に V 字飛跡である事を判定させる機能を持たせる事が必要である為、ドリフトチェンバーをトリガーに参加させるシステムを新たに構築する事とした。ドリフトチェンバーのヒット情報をオンラインでパターン分析し、データ取得の判定をさせるインテリジェント・トリガーシステムを、FPGA を用いて開

発・製作した。

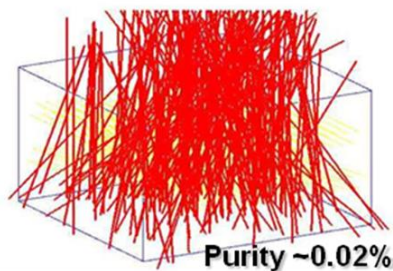
XILINX XCV150 を搭載した VME の汎用トリガーモジュールを用いて、6 面あるセンス面それぞれ、最低 2 本以上のアノード信号が得られるという論理回路を FPGA 上にロードして Level-2 トリガーを構成した。



新たなトリガーを検出器系に実装し、放射線源を用いた性能評価の後に本番実験にて実用化した。偏極 8Li ビームを用いた本番実験は 2008 年 9 月に、4 月のテスト実験と同様に KEK-TRIAC で行われた。次図は TRIAC の構成図である。

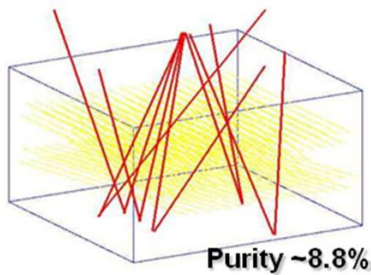


この実験で新たに導入し Level-2 トリガーの効果は下記のように確かめられた。まず、プラスチックシンチレータのみによる Level-1 トリガーで取得したドリフトチェンバーの飛跡は下図の様になった。これらの散乱飛跡の内、オフライン解析で真に薄膜により後方散乱していると判定された事象はわずかに 0.02% であった。



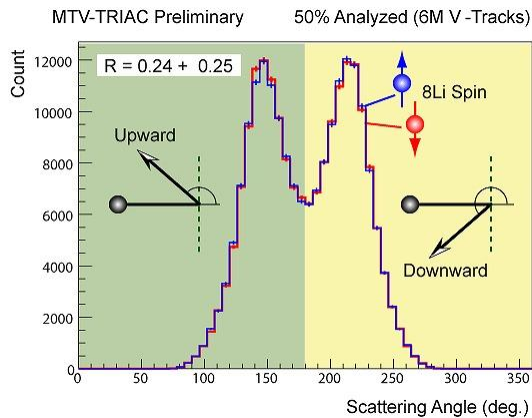
これらの事象に対し、Level-2 トリガーの条件を加えることで下図の様に V 字飛跡を選

捩的に取得できるようになった事が確認された。



実験は実質的に2日間程度データ収集が行われ、約600万事象のV字飛跡が観測された。これらの飛跡再構成の解析をするにあたって、Linux クラスタを新たに構築して並列処理により約一か月のオフライン解析時間で全ての飛跡の決定が行われた。

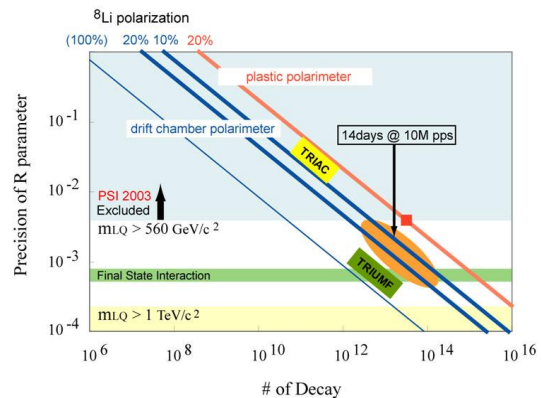
これらの飛跡情報から得た Mott 散乱の散乱角度分布は下図のようになった。



これは本研究のほぼ最終的な目的となるもので、この角度分布が原子核の偏極方向の反転操作により変化するかどうか時間が反転対称性の破れの信号となるものである。結果として、現段階で R パラメーターが 0.24 ± 0.25 という値が得られているが、この結果はさらに精査中である。

KEK-TRIAC で得られた成果として、プラスチックシンチレータだけを用いた過去の実験は多重散乱や制動放射による偶然同時計数による影響を除去しえていない可能性が明らかとなった。一方で、本研究で初めて試みられた、事象毎に散乱飛跡を再構成する方法では支配的なバックグラウンドを強く抑制できるため、信号がバックグラウンドに埋もれることなく観測が可能である。その意味で、原子核のベータ崩壊において、真に時間反転対称性の破れを信頼性の高い方法で検証した初めての実験を行ったという事が出来るだろう。

この結果は、実験計画時に行ったイベントジェネレータを用いた下図に示すモンテカルロシミュレーションによる予測と一致した。



本研究は信頼性の高い方法で初めて R 相関を検証したという成果を上げただけでなく、この実験方法の信頼性を評価し、実用レベルに足るものの建設を達成したという成果もあげることが出来た。前図に示すとおり、本研究で開発された電子線横方向偏極度計を用いて、KEK-TRIAC ではなく TRIUMF-ISAC の偏極ビームラインで実験を行うと、前人未達の最高精度での時間反転対称性の破れの探索が可能となる事がわかる。TRIUMF にて 2008 年度に行われた Experiment Evaluation Committee に実験提案を行い、本研究で達成された実績が評価された形で採択を受ける事が出来た。また、その TRIUMF での次期計画を推進する事を掲げた科研費若手 A にも再度採択を頂く事が出来、将来へ発展する基礎を築き上げる事が出来たというのが本研究の成果のまとめである。

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)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. The first T-Violation Experiment at KEK-TRIAC

H. Kawamura, J. Murata et. al. Eur. Phys. J (2009) in press (査読無)

2. Development of a new drift chamber based Mott polarimeter

H. Kawamura, J. Murata et. al. AIP CP915, 218 (2007) (査読無)

3. Beta neutrino correlation and T-violation experiment in nuclear beta decay

J. Murata et. al. AIP CP915, 1105 (2007) (査読無)

〔学会発表〕(計 10 件)

1. 「TRIAC における偏極 8Li を用いた時間反転対称性破れの探索」 川村広和、村田次郎 他
日本物理学会 2009 年春季大会 (立教大学)
2009 /3/27-30.
2. 「TRIAC における偏極不安定核を用いた時間反転対称性破れの探索」 川村広和、村田次郎 他
第 5 回 停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 (大阪大学) 2008 /12/24-25.
3. 「TRIAC における時間反転対称性の破れ探索実験」 豊田健司、村田次郎 他
日本物理学会 2008 年秋季年会 (山形大学)
2008/9/20-23.
4. The first T-Violation Experiment at KEK-TRIAC
H. Kawamura, J. Murata et. al.
Spin-Praha-2008, Prague 2008/7/20-26
5. 「時間反転対称性検証実験のための偏極保持装置開発」 成田圭吾、村田次郎 他
日本物理学会 2008 年春季大会 (近畿大学)
2008/3/22-26.
6. 「時間反転対称性検証実験のための 8Li の T1」 成田圭吾、村田次郎 他
原子核プローブ生成とそれを用いた物性研究 III (KUR 専門研究会・京大原子炉実験所) 2007 /11/20-21.
7. A New Drift Chamber based Mott Polarimeter for T-Violation experiment
H. Kawamura, J. Murata et. al. INPC 2007, Tokyo 2007/6/3-8
8. T-Violating transverse electron polarization in polarized nuclear beta decay
J. Murata et. al. INPC 2007, Tokyo 2007/6/3-8
9. Development of a new drift chamber based Mott polarimeter
H. Kawamura, J. Murata et. al. SPIN06, 2006/10/2-7
10. Beta neutrino correlation and T-violation experiment in nuclear beta decay
J. Murata et. al. SPIN06, 2006/10/2-7

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし