

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20244040

研究課題名（和文） 時間反転不変性の破れ探索実験用高精度ミュオン偏極度測定装置の開発

研究課題名（英文） Development of High-precision Muon Polarimeter for the Time Reversal Invariance Violation Search Experiment

研究代表者

今里 純（IMAZATO JUN）

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・シニアフェロー

研究者番号：40107686

研究成果の概要（和文）：

J-PARC で予定されている「時間反転不変性の破れの探索実験（E06）」では、K 中間子崩壊におけるミュオンの偏極度の精密測定を行う。その測定に必要なミュオン偏極度測定装置の開発を実施した。入射ミュオンを静止させるミュオンストッパーと崩壊陽電子を観測するドリフトチェンバー、及びミュオン磁場電磁石とが基本構成となる。シミュレーション計算に基づき、1/5 サイズモデルそして実物大モデルのプロトタイプを製作し、実際にミュオンビームで試験を行った。E06 実験に用いる十分な良好な性能を確認し、また重要なデータ収集を行った。

研究成果の概要（英文）：

It is planned to measure muon spin polarization precisely in the J-PARC E06 experiment (Search for T violation in Kaon Decays). We developed a muon polarimeter for this experiment. The polarimeter consists of muon stoppers to stop incident muonbeams and drift chambers to detect decay positrons, and a muon field magnet. According to simulation calculations, a 1/5 model and then a full-size model have been constructed as prototypes and tested with an actual muon beam. Good performance could be confirmed and important data were collected.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2009 年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2010 年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
年度			
年度			
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：素粒子実験物理学

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：①時間反転不変性の破れ、②CP 対称性の破れ、③ミュオン横偏極、④J-PARC 実験、⑤ミュオン偏極度計、⑥ドリフトチェンバー、⑦電荷分割法

1. 研究開始当初の背景

我々は J-PARC において国際協力研究として時間反転不変性の破れ探索実験 E06 実験 (Measurement of T-violating Transverse Muon Polarization in $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ Decays) を

行うことを予定している。この K 中間子崩壊において生成されるミュオン粒子の、崩壊面に垂直な“横偏極”があることを測定すると、これが時間反転不変性の破れの存在を示すこととなる。素粒子の標準模型からのこの物

理量“横偏極”への寄与は非常に小さく 10^{-7} 以下であることが分かっているので、もし実験感度の 10^{-3} - 10^{-4} の範囲で見つかれば、標準模型以外のそれを超える新しい物理からに寄与であることが、ユニークに言える。時間反転対称性は基本的な原理である CPT 定理によって CP 対称性と同等であるので、標準模型を超える CP の破れについての知見を得、理論模型についての議論をすることが可能となる。“横偏極”は小さいため、高い統計精度で実験をする必要がある。我々は前に KEK 陽子加速器で実施し、世界最高の精度を得た E246 実験の上に立ち、 K^0 ビーム強度が圧倒的(約 100 倍)に向上する J-PARC で、E06 TREK 実験として実施すべく、準備を進めている。”横偏極”は小さいのみならず、1 のオーダーの大きい平面内偏極の存在のもとで測定しなければならない。そのためには系統誤差を非常に小さくできる「高精度ミュオン偏極度測定装置」の開発が必要とされた。

2. 研究の目的

本研究の目的はこのような「高精度ミュオン偏極度測定装置」を開発し、E06 実験のミュオンポラリメータとして十分な性能が得られるかを確認することであった。装置の基本的な構造・大きさは E06 実験からの要請で決まる。ある空間的・運動量的分布を持つミュオンビームを効率よく止め、崩壊によって生じる陽電子の角度分布を精密に測ることでミュオン偏極度を測定する。従って実験の目的としては次の 3 項目が柱となった。

(1) ミュオンを止めるミュオンストッパーの構造と材質の選定。構造は崩壊陽電子を測定する場合に極力、放出角度決定に誤差が出ないような構造で、系統誤差が生じない構造であることが重要である。また、一般にはミュオンは物質中に止まると、始め例え偏極していても減偏極を受ける。高精度測定のためには、減偏極の小さい物質を選定する必要があった。

(2) 陽電子の放出角度測定は、その軌跡を決めることで行う。多芯線ドリフトチェンバーを使用する方式を採用することとした。ドリフトチェンバーのセル構造はストッパーの構造と関係して決まる。もっとも放出角度決定が信頼度よくまた系統誤差を抑制してできるかが課題となった。3次元の位置測定の内一つは、芯線での電荷分割法に依らざるを得ない。その方式の妥当性を検証することも本研究の目的の一つであった。

(3) 陽電子に放出角非対称度を測定する際に、系統誤差を生まないような外場の開発。

3. 研究の方法

研究は、研究分担者、連携研究者の他 TREK 実験コラボレーションに所属する大学院生らとの共同作業として実施した。

(1) ミュオンストッパーに関してはその構造の検討はドリフトチェンバーの設計の一環として行った。材質の選定は、陽電子の散乱・吸収をできるだけ抑えるために軽い物質に限られるが、ミュオン止まった後の初期偏極が損なわれないという条件から、Al や Mg の軽い金属あるいはそれらの合金から選ぶこととした。文献等による検討を経て実際に幾つかのサンプルでの μ SR ビームテストを前年にカナダ TRIUMF 研究所のミュオンビームを用いて実施したが、そのデータを解析した。

(2) ドリフトチェンバーの開発に当たっては先ず平行平板グランド電極で比較的アスペクト比が大きいセル構造のものを検討し、1/5 サイズのプロトタイプを製作し、KEK の FTBL テストビームラインの陽電子ビームを用いてビームテストを実施した。その結果に基づき実物大モデル(FSM)を製作し、各種の試験を行った。E06 実験で系統誤差の原因となりうる装置に起因する擬似的な陽電子非対称度の研究が重要となった。FSM をカナダ TRIUMF 研究所に持ち込み、 π 中間子ビームとミュオンビームで各種のデータを取得し、解析した。この結果に基づき、平行平板ではなくミュオンチューブ型のプロトタイプを製作し、試験うを行っている。

(3) ミュオンストッパーにはミュオンピンへの外界からの擾乱を防ぐためにデカップリング磁場を印加する。0.03 T の弱い磁場でよいのであるが、スピン回転による平面内偏極の混入を抑えるためには、双極磁場の軸対称性と中心面に対する対称性が重要となる。このような磁場の生成を試験するために、TREK 実験装置の 1 セクターに相当する電磁石のプロトタイプを製作し、対称磁場分布の実現可能性についての R&D を行った。

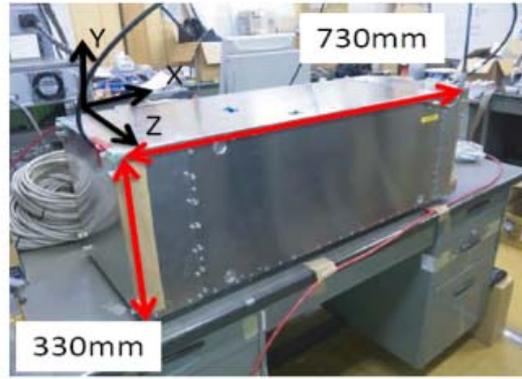
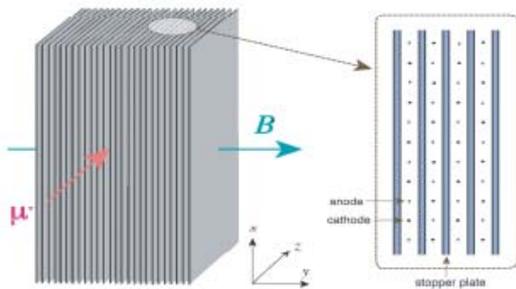
4. 研究成果

(1) ミュオン偏極緩和の実験は、Al と Mg の純金属及びそれらの幾種類かの合金で行った。緩和の研究はこれまでも多く行われて来たが、市販の構造材合金ではデータは存在しなかった。標準的な μ SR 装置を用い、縦磁場緩和 (λ^{\parallel}) と横磁場緩和 (λ^{\perp}) の測定を行った。非対称度自体は装置で決まる最大値に近く、初期的な減偏極はいずれのサンプル

でも存在しないことが判明した。緩和率はいずれのサンプルでも小さく横偏極測定に全く問題のないことが結論として得られた。表に観測された緩和率を纏める。緩和関数としては指数関数型とガウス分布型とが考えられたが、緩和率が非常に小さいために、似た傾向を示す。ここでは指数関数型の緩和関数 $R_{\mu}(t) = \exp(-\lambda t)$ へのフィットの結果を示す。

Sample	$\lambda^{TF}(\mu s^{-1}) \times 100$	$\lambda^{LF}(\mu s^{-1}) \times 100$
Pure Al (1)	0.379±0.090	1.341±0.040
Pure Al (2)	0.760±0.091	0.074±0.115
Pure Al (3)	0.338±0.087	1.491±0.359
A5052 (Al all.)	1.074±0.088	1.129±0.127
A6063 (Al all.)	1.564±0.090	1.767±0.311
A2017 (Al all.)	4.840±0.100	1.014±0.488
Pure Mg	0.327±0.086	1.503±0.262
AZ31 (Mg all.)	0.115±0.091	0.081±0.244
AZ31-pe (all.)	0.041±0.092	1.372±1.081
ZK60 (Mg all.y)	0.030±0.111	0.741±0.299
Z6 (Mg all.)	0.000±0.087	1.799±0.159
AM60 (Mg all.)	0.000±0.043	1.052±0.340
AZ91 (Mg all.)	0.270±0.093	1.912±0.277

(2) ドリフトチェンバーの R&D は段階的に行った。まず平行平板電極方式の検討を行った。この方式は左右の対称性の確保が容易である。チャンネル数を節減するため、アスペクト比が 2 と大きいセル (16 mm x 8 mm) で 5 層からなる所謂 1/5 モデルを製作し、KEK 富士実験室の陽電子テストビームで、2 GeV のビームを用い試験した。ドリフトチェンバーとしての基本的な動作の確認をし、芯線方向座標の電荷分割法による決定精度のスタディを行った。校正を入念に行うことで、 $\sigma=1$ mm 程度の比較的良好な分解能が得られることを確認した。



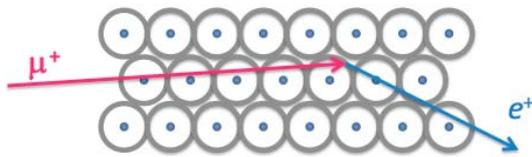
次にミュオンポラリメーターとしての性能を調査する目的で、実物サイズのプロトタイプを製作した。(図5) カナダ・バンクーバーの TRIUMF 研究所へ持ち込み、ミュオンとパイオンのビームでスタディーを行った。試験では次の項目を行いデータを得、また解析で良好な結果を得た。

- ① 読出し電子回路の稼働
- ② ドリフトチェンバーとしての性能確認 (再度)
- ③ トラッキングのアルゴリズムの確立 (z-軸の電荷分割を除く)
- ④ ミュオンビーム入射/停止で陽電子放出事象の確認
- ⑤ 偏極したミュオンビームからの陽電子非対称度 (アナライジングパワーの測定)
- ⑥ パイ中間子入射/停止→ミュオン生成からの陽電子放出によるチェンバー起因の擬似非対称度測定

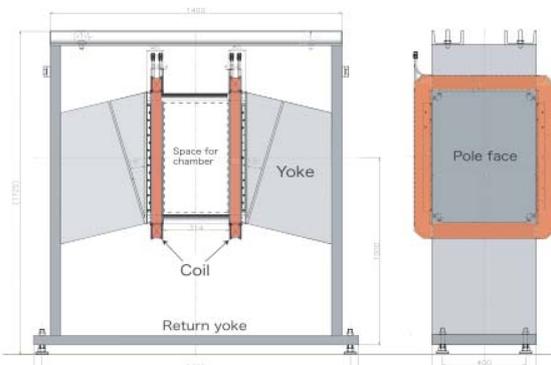
これらの測定により、E06 実験用のポラリメーターとしての必要条件をほぼ満たすことが確認された。ただ偏極を持たないパイ中間子を用いた \square の測定で、系統誤差の上限を与えることを目標としたが、パイ中間子の有限なビームエミッタンスと in-flight 崩壊からのミュオンの横方向偏極の存在で、きちんとした結果を出すに至らなかった。実際の実験ではミュオンビームが対象となるので、これは重大な問題ではないが、逆に、横偏極への高い感度が示された。

また、トラッキング解析方法の開発の途上、トラッキングの容易さと信頼性を向上させるために、平行平板方式とは異なり、所謂“ミュオンチューブ”方式の構想が出、その検討を行い、第2の実物大プロトタイプモデルを作成した。(図6) 基本的なドリフトチェンバー性能は確認された。宇宙線を用いたトラッキング試験は、震災で実験室への立ち入りができなくなったこともあり遅れているが、これから実施する予定である。また、実際にミュオンビームを用いた試験が重要なので、本科研費の期間は終了してしまうが、H23 年

度にカナダ TRIUMF 研究所加速器での実験を予定している。

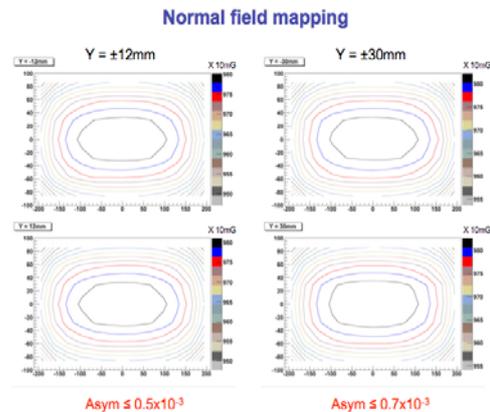


(3) 磁場分布非対称度測定用のプロトタイプ電磁石を製作した(図1)。電磁石は1対のコイル、1対の磁極及び架台をかねるリターンヨークからなる。磁極とヨークとは量産コストを考慮し、通常の構造鋼材 SS4000 を用い、高い精度で機械加工した。コイルは磁場対称性を確保する目的で、対称的なS巻きとZ巻きとした。対称性を精度よく測定するために双極磁石反撥電流法を開発した。相対するコイルに同じ値の反対方向電流を流す。中心面 (median plane) 上付近では磁場が零となるが、非常に小さい強度の磁場を、磁束計 (Flux gate magnetometer) で mG の精度で測定する。磁束計は3軸測定を行うが、基本的にオフセットがないので、ノーマルで比較的大きい双極磁場をホール素子により測定するのに比較し、精度のよい磁場対称性のチェックが可能となる。E06 実験からの要請は 10⁻³ の対称性である。この上の精度は実際の実験データを用いて校正が可能となる。今回のスタディでは 10⁻³ の対称性が得られることが確認された。図3に反撥電流でない通常電流を流した時の磁場の軸成分を y=±12 mm と±30 mm とでプロットする。ここでは非対称度は正側と負側の相対的な差として定義される。また測定において有意な残留磁化が磁極表面で観測された。これは実機においては磁極を純鉄とすることで解決したい。



が一通り終了した。ミュオンストッパーの材質としては、純 Al や純 Mg でなくても入手し

易くまた加工性や強度的な点で有利な、Al 合金(A5052 か A6063) でよいことが判明した。ミュオン磁場に関しては 10⁻³ の非対称度で磁場分布を生成した測定する方法を確立した。実機では鉄材として純鉄を用いることで、より高い性能が期待できる。ドリフトチェンバーは、本研究で試みた2台のプロトタイプから選ぶことになるが、最終的には1) 解析の容易さと2) 系統誤差混入のし難さを比較の上、決定する。



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)

[学位論文等] (計2件)

- ① Keisuke Yoshihara, "R&D Studies of Muon Polarimeter for J-PARC E06 T-violation Experiment", 2011年1月、東京大学修士論文
- ② Dang Nguyen Phuong, "Muon Polarimeter Magnetic Field Mapping of the Frontier T-violation Experiment, 2010, Vietnam National University – HCMC University of Science, Master thesis

[雑誌論文] (計2件)

- ① "Measurement of μ^+ Relaxation Rate in Al and Mg Alloys for the precise m+ Transverse Polarization Experiment TREK at J-PARC", J.Imazato, S.Shimizu *et al.*, Proceedings of the 11th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance, p.962-965, 2008.
- ② "Flavor physics of leptons and dipole moments", M.Radial *et al.* (44 番目),

Eur.Phys.J.C.57. p13-182, 2008.

[学会発表] (計 7 件)

① 吉原圭介、“J-PARC ハドロン実験ホールにおける K1.1BR ビームラインのビーム調整”、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月

② 吉原圭亮、“J-PARC TREK 実験用ミュオンポラリメータのビーム試験 (3) -トラック再構成アルゴリズムの開発と擬似非対称度の系統性の評価-”、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 9 月 11 日、九州工業大学

③ 吉原圭亮、“J-PARC TREK 実験用ミュオンポラリメータのビーム試験 (2) -パイオンビームによる擬似非対称度等の系統性の測定-”、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学

④ J.Imazato, “TREK experiment to search for T violation in kaon decays at J-PARC”, Talk given at the KAON 2009 Conference, Tsukuba, June, 2009 年

⑤ 今里 純、“J-PARC TREK 実験用ミュオン偏極度測定装置の設計とミュオンストッパー材質の選定”、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月、東京

⑥ 清水 俊、“J-PARC TREK 実験用ミュオン偏極度測定装置プロトタイプチェンバーの製作と試験”、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月、東京

⑦ 堀江圭都、“J-PARC TREK 実験用ミュオン偏極度測定装置の系統誤差解析”、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月、東京

[図書] (計 1 件)

① “Search for T violation in $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ decays”, J.Imazato, “Particle and Nuclear Physics at J-PARC”, in “Lecture Notes in Physics 781, ed. T.Sato, T.Takahashi and K.Yoshimura, Springer, p76-104, 2009 年

[その他]

ホームページ等

<http://trek.kek.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今里 純 (IMAZATO JUN)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・シニアフェロー

研究者番号：40107686

(2) 研究分担者

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・研究機関講師

研究者番号：50311121

イム ケヨブ (LIM GEI-YOUB)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：90332113

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

(3) 連携研究者

澤田 真也 (SAWADA SHINNYA)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：70311123

中山 久義 (NAKAYAMA HISAYOSHI)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・名誉教授

研究者番号：20011728

清水 裕彦 (SHIMIZU HIROHIKO)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号：50249900

山崎 寛仁 (YAMAZAKI HIROHITO)

東北大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：90260413

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