

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244045

研究課題名(和文) タウレプトンの異常磁気能率の精密測定による新物理探査

研究課題名(英文) Probing new physics through precision measurement of anomalous magnetic moment of tau lepton

研究代表者

相原 博昭 (Aihara, Hiroaki)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60167773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子物理学の喫緊の課題は、標準理論と呼ばれる現パラダイムを越える、新しい、より根源的な原理を探求することである。第三世代レプトンのタウは、レプトンの中で最も大きな質量を持つ。そのため、タウの崩壊現象には新物理の効果が出現することが期待されている。本研究では、KEKのBファクトリー加速器で得られた世界最大統計量の約9億のタウ反タウ対を使ってタウレプトンの異常磁気能率および崩壊パラメータをこれまでの10倍の精度で測定し、新物理の効果を探索した。さらに、次世代実験で使用される高バックグラウンド下においても高効率で稼働する電磁シャワーカロリメータの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Searching for physics beyond the Standard Model has the highest priority in the research of particle physics. We have searched for the effects of new physics based on precision measurements of decay parameters of tau weak decay. Because tau is the heaviest lepton and physics beyond the Standard Model is expected to manifest itself in the heavy particle system particularly, this search has a unique significance. Using data of about 0.9 billion tau events collected by the Belle experiment, we measured decay parameters with the precision improved over previous measurements by an order of magnitude. We also successfully developed a new electromagnetic calorimeter prototype, a key detector component to be used in the upgraded Belle experiment.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：素粒子実験 Bファクトリー タウレプトン 異常磁気能率

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の喫緊の課題は、標準理論と呼ばれる現パラダイムを越える、新しい、より根源的な原理を探求することである。素粒子の磁気的性質は、新しい原理の発見や理論の検証に大きな役割を果たしてきた。粒子のスピン \mathbf{s} と磁気モーメント $\boldsymbol{\mu}$ との間には、 $\boldsymbol{\mu} = g(e/2m) \mathbf{s}$ という関係がある。 e と m は、それぞれ粒子の電荷と質量である。 g は、ジャイロ磁気比と呼ばれる無次元量で、スピン $1/2$ の点電荷粒子に対するディラック理論では $g=2$ である。 $a=(g-2)/2$ で定義される異常磁気能率(anomalous magnetic moment)は、 g のディラック理論からのズレを表している。電子の異常磁気能率の測定は、 0.28×10^{-12} の精度に達している。新物理の異常磁気能率への寄与は、新物理の発現するエネルギースケールを m_e とすると、レプトン質量(m_e) との比の二乗(m_e/μ)² に比例する。電子は質量が小さいために、その異常磁気能率には、標準理論を超える物理(新物理)は寄与しない。電子の異常磁気能率の測定は、量子電磁気学(QED)の厳密な検証となる。第二世代レプトンであるミュオンは、電子の206倍の質量を持っているために、その異常磁気能率にはQEDのみならず、弱い相互作用と強い相互作用も寄与する。ミュオンの異常磁気能率の測定精度は 6.3×10^{-10} に達している。その測定値は、実験誤差と理論不定性の双方を考慮しても、約4の統計的有意性を持って標準理論の予言値からずれており、さらなる測定精度の向上を図った実験が計画されている。第三世代レプトンのタウは、レプトンの中で最も大きな質量を持っている。タウレプトンの質量は、ミュオンの質量の約17倍であり、新物理に対してその二乗、約290倍の感度を有する。しかしながら、タウは、安定粒子である電子や比較的長い寿命を持つミュオンと異なり短寿命粒子なので、外磁場とタウの磁気モーメントとの相互作用を測ることができない。代わりにタウの磁気モーメントは、タウの特定の稀崩壊への分岐比の測定や、崩壊で発生した二次粒子の運動量分布や角分布から導く必要がある。

2. 研究の目的

本研究はKEK B ファクトリー加速器で得られた約9億のタウ反タウ対を使ってタウレプトンの異常磁気能率および崩壊パラメータ(ミッシェルパラメータ、Michel parameters)をこれまでの10倍の精度で測定し、標準理論を超える効果の検証を行う。同時に、本研究をSuperKEKBにおいて展開し、精度をさらに改善するための研究(feasibility study)を行う。そのために重要となる検出器は、高い効率で光子や電子を検出できる電磁シャワーカロリメータ

であり、SuperKEKBにおいてバックグラウンドが増大する前方領域においても高い効率で稼働するカロリメータとその読み出しエレクトロニクスを開発する。

3. 研究の方法

タウレプトンの異常磁気能率をKEK B ファクトリーのタウの輻射レプトン崩壊(radiative leptonic decay)データを使って測定するための物理解析手法を確立し、データ解析を遂行するために、研究代表者と連携研究者、ポスドク、大学院生および理論研究者のチームを作って推進した。また、SuperKEKB ファクトリーにおいて光子と電子の検出効率を向上させるための純粋CsI結晶を使った応答の早い電磁シャワーカロリメータの開発を、研究代表者と連携研究者、ポスドク、大学院生のチームで推進した。特に、高磁場(1.5テスラ)中でも稼働するシリコン半導体光センサーとその読み出し回路の開発を進めた。

4. 研究成果

(1) タウの輻射レプトン崩壊の精密測定によるタウの磁気および電気双極子モーメント(electric dipole moment)の測定方法を考案し、発表した[発表論文(1)]。理論研究者との連携によって、輻射レプトン崩壊の微分断面積の厳密な定式化を行い、標準理論を超える効果を特定の理論モデルに依存せずに検出する方法を考案し、Bファクトリー実験のシミュレーションデータに適用した。その結果、Belle および BelleII 実験におけるタウの異常磁気モーメントと電気双極子モーメントの感度の予想値を得た。解析方法の概要は以下の通りである。Bファクトリーで対生成されたタウの一方が輻射レプトン崩壊をし、もう一方のタウが中間子(直ちに荷電パイ中間子と中性パイ中間子に崩壊する)とニュートリノに崩壊する事象を選び出す。後者は、タウ粒子のスピンを伝えるので、スピン-スピン相関の手法を使うことにより、輻射レプトン崩壊のタウのスピンに依存する微分断面積に感度のある運動学的情報を抽出することができる。これらの終状態にあるニュートリノを除く粒子の運動学的量を全て使って、多次元(12次元)同時最尤法による解析を行った。その結果、Belle 実験の全タウデータ(約9億タウ反タウ対)を使うと、異常磁気モーメントと電気双極子モーメントが、それぞれ0.16と0.15の精度で測定できることが分かった。さらに、BelleII 実験でデータ量が50倍になると、感度は、それぞれ0.023と0.021に改善することが予想される。

(2) タウのレプトン崩壊データを使ったミッシェルパラメータの精密測定を行った[学会発表(3,6,7)]。ミッシェルパラメータとは、タウ粒子の弱い相互作用による崩壊の微分断面積を記述するパラメータであり、標準理論の枠内で、厳密に予想値を計算できる。本研究では、(1)で開発した手法を(終状態にフォトンを含まない)レプトン崩壊のモードに適用して、タウ崩壊のミッシェルパラメータ(4種類)の超精密測定を行った。予備的な結果として、

$$=0.7586 \pm 0.0013, \quad =-0.0276 \pm 0.0062, \\ =0.9973 \pm 0.0039, \quad (\quad)=0.7520 \pm 0.0025$$

を得た。これらの統計精度は、いずれも先行研究と比べて一桁以上向上している。まもなく系統誤差の評価の詳細が完了する。その後、直ちに論文として結果を公表する。

(3) タウの輻射レプトン崩壊データを使った、標準理論では出現しない崩壊パラメータの測定を行った[学会発表(1,5)]。

(1)と同様の解析手法で、ミッシェルパラメータのうち、輻射を含まないレプトン崩壊事象からは得られない二つのパラメータに関して、Belle実験の全てのデータを用いて、世界で初めて測定を行った。これらの値が、0(ゼロ)から有意にずれていれば、新物理の存在を示唆する。現在、データ解析の詳細を検証中である。

(4) タウの稀崩壊の測定によって、ステライル(sterile)ニュートリノの探索を行う手法を考案した。上記(1)(2)(3)の解析を発展させ、数10~数100MeV程度の質量を持つ、標準理論のゲージグループ下では荷(charge)を持たず、したがって、既知の弱い相互作用もしないステライルニュートリノの探索を開始した。具体的には、タウの2種類の崩壊モード $\mu^- \mu^+$ および $\mu^- \mu^+ e^-$ を測定し、その終状態においてステライルニュートリノの崩壊によって生成される可能性のある $\mu^+ e^-$ 対、 $\mu^+ e^-$ 対の崩壊点とタウの崩壊点との差(displaced vertex)の存在を検証する。

(5) 純粋CsI結晶とアバランシェ型光ダイオード(Avalanche Photon Diode, APD)から成る高性能電磁シャワーカロリメータの開発研究を行った[学会発表(4)]。複数のAPD(浜松ホトニクス社のS8664シリーズ)をナノ構造有機シリコン発光体を用いた波長変換プラスチック(Wave Length Shifter)を介して純粋CsI結晶に搭載する構成は、高いフォトン検出効率と低雑音レベルを達成できることを示した。そのノイズは、1結晶当たり0.41MeV程度の小さなエネルギーに相当し、これは、BelleII実験の必要要件を満たしていることが分かった。

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4件)

(1) S. Eidelman, D. Epifanov, M. Fael, L. Mergoli and M. Passera, "Tau Dipole Moments via Radiative Leptonic Tau Decays", JHEP, 1603, 140, 2016, 査読有 10.1007/JHEP03(2016)140

(2) Y. Onuki On Behalf of the Belle II SVD Collaboration, "The Silicon Strip Vertex Detector of the Belle II Experiment", Nuclear Instrument and Methods in Physics Research Section A, 756, 99-102, 2014, 査読有, 10.1016/j.nima.2014.05.101

(3) A. V. Anisenkov, D. Epifanov et al. (計30名中6番目), "Barrel calorimeter of the CMD-3 detector", Nucl. Instrum. Meth. A, 732, 463, 2013, 査読有 10.1016/j.nima.2013.07.044

(4) H. Aihara, D. Epifanov et al. (計161人中1番目、26番目), "First Measurement of $B \rightarrow DK, D K_s$ Decay", Phys. Rev., D85, 112014, 2012, 査読有 10.1103/PhysRevD.85.112014

[学会発表](計18件)

(1) Nobuhiro Shimizu, "Search for the New Physics with decay of tau into leptons at B factory," 5th KEK Flavor Factory Workshop, 2015年10月26日~2015年10月27日, ワテラスコモン(東京都千代田区)

(2) D. Epifanov, "Recent Results from Belle", 17th Lomonosov Conference of Elementary Particle Physics, 2015年8月20日~2015年8月26日, Moscow(Russia)

(3) D. Epifanov, "Study of Michel Parameters in Tau Decays at Belle", 17th Lomonosov Conference of Elementary Particle Physics, 2015年8月20日~2015年8月26日, Moscow(Russia)

(4) D. Epifanov, "Study of Scintillation Counter Consisting of a Pure CsI Crystal and APD", PhotoDet2015, 2015年7月9日, Moscow(Russia)

(5) Nobuhiro Shimizu, "Monte Carlo study of the measurement of Michel Parameters in the radiative leptonic decay of tau," Frontier Detectors for Frontier Physics: 13th Pisa Meeting on Advanced Detectors, 2015年5月24日~2015年5月30日, Pisa(Italy)

(6) D. Epifanov "Tau Michel parameters at Belle II", KEK Flavor Workshop, 2014年10月28日~2014年10月31日, 高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)

(7) D. Epifanov, "Study of Michel Parameters in Leptonic Tau Decays at Belle", the 13th International Workshop on Tau Lepton Physics, 2014年9月15日, Aachen(Germany)

(8) Y. Onuki, "B DK Dalitz plot analyses for 3 at Belle", 37th International Conference on High Energy Physics, 2014年7月4日, Valencia(Spain)

(9) D. Epifanov, "Tau Lifetime and Decays", the 13th International Workshop on Tau Lepton Physics, 2014年5月29日, Marseille(France)

(10) H. Aihara, "Large Particle Accelerators in Japan -Tools for Discoveries and Innovation-", Hard and Earth Sciences Workshop, 2013年11月12日, Sao Paulo(Brazil)

(11) Y. Onuki, "The Silicon Strip Vertex Detector of the Belle II Experiment", HSTD9-International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, 2013年9月1日~2013年9月5日, 広島国際会議場(広島県広島市)

(12) H. Aihara, "Exploring the Energy Frontier with Lepton Colliders", SLAC Summer Institute, 2013年7月10日, California(USA)

(13) Y. Onuki, "SuperB and BelleII prospects on direct CP violation measurements", 7th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, 2012年9月28日~2012年10月2日, Ohio(USA)

(14) D. Epifanov, "CP Violation in Charm and Tau at B-Factories", XXIVth Rencontres de Blois, Particle Physics and Cosmology, 2012年5月27日~2012年6月1日, Blois(France)

(15) D. Epifanov, "Belle pion form factor in tauola", Tau lepton decays workshop: hadronic currents from Belle BaBar data and LHC signatures, 2012年5月14日~2012年5月19日, Cracow(Poland)

(16) 相原博昭, "SuperKEKB/Belle-II in context -インパクトのある仕事をするために-", B workshop 2011, 2011年12月5日~2011年12月8日, 永楽館(福島県郡山市)

(17) H. Aihara, "SuperKEKB -Motivation and Significance-", Groundbreaking Ceremony for the SuperKEKB Project, 2011年11月18日, 高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)

(18) H. Aihara, "SuperKEKB and SuperB Projects -Super High-Luminosity Heavy Flavor Factories-", the XXV International

Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, 2011年8月22日~2011年8月27日, Mumbai(India)

6. 研究組織

(1)研究代表者

相原 博昭 (AIHARA, Hiroaki)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 60167773

(3)連携研究者

エピファノフ デニス (EPIFANOV, Denis)
東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員
研究者番号: 70645746

岩崎 昌子 (IWASAKI, Masako)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・加速器研究施設・准教授
研究者番号: 70345172

中山 浩幸 (NAKAYAMA, Hiroyuki)

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・助教
研究者番号: 10587900