

論文の内容の要旨

Measurement of the tau Michel parameters $\bar{\eta}$ and $\xi\kappa$ in the radiative leptonic decay $\tau \rightarrow \ell\nu\bar{\nu}\gamma$

(輻射レプトニック崩壊 $\tau \rightarrow \ell\nu\bar{\nu}\gamma$ を用いたタウ粒子のミシェルパラメータ $\bar{\eta}$ と $\xi\kappa$ の測定)

氏名 清水 信宏

§ 序論

本論文では、輻射レプトニック崩壊 $\tau \rightarrow \ell\nu\bar{\nu}\gamma$ ($\ell = e$ or μ)を利用したタウ粒子のミシェルパラメータ、 $\bar{\eta}$ と $\xi\kappa$ の測定について述べる。本測定では、KEKB加速器およびBelle検出器で生成、記録された 703 fb^{-1} の $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ データを解析した。この結果は、実験的には初めての測定となる。

ミシェルパラメータ(Michel parameter)とは、タウ粒子のレプトニック崩壊 $\tau \rightarrow \ell\nu\bar{\nu}$ のダイナミクスを特徴づけるパラメータである。本崩壊の確率振幅をローレンツ普遍性の仮定のもと、できる限り一般的に計算すると、それはS(スカラー型)、V(ベクトル型)、テンソル型(T)の三つの振幅の混合状態として書くことが出来る。さらに、 τ 粒子と娘粒子である ℓ のカイラリティ(L or R)を各々分けて記述することで、最終的に10個の項の和となる。そ

の複素結合定数を規格化して書けば、 g_{ij}^N ($i, j = L \text{ or } R, N = S, V, T$)である (ただし、このうち g_{LL}^T と g_{RR}^T は恒等的に0であるので除いた)。標準理論では、Wボソンを介したV-A型の相互作用を通じてこの過程がおこるので、 $g_{LL}^V = 1$ が唯一、非零の値となる。実験的には、確率振幅の自乗が観測可能量であるため、 g_{ij}^N の双線型な組み合わせ、すなわちミシェルパラメータが測定量となる。より具体的に言えば、それは、レプトニック崩壊 $\tau \rightarrow \ell \nu \bar{\nu}$ の微分崩壊幅に変数として現れる。二つのニュートリノの崩壊方向と ℓ の偏極の観測は実験的に難しく、その未知の自由度を積分すれば、結果的に4つのミシェルパラメータ $\rho, \eta, \xi, \xi\delta$ が残る。標準理論の予測する値と、実験値を比較することで新物理の効果を一般的に検証することが可能である。

一方、終状態に輻射を許したレプトニック崩壊 $\tau \rightarrow \ell \nu \bar{\nu} \gamma$ を用いると、 ℓ の運動に対しての γ の角度依存性を知ることとなり、新たに ℓ の偏極の情報をもたらす。言い換えると、これは別のミシェルパラメータ、 $\bar{\eta}$ と $\xi\kappa$ 、が露わになるということでもある。これらパラメータは、標準理論では $\bar{\eta} = \xi\kappa = 0$ であり、未知の粒子の寄与によってその値がずれることが期待される。 ℓ の偏極の情報を反映していることからわかるように、 $\bar{\eta}$ と $\xi\kappa$ の測定は、弱い相互作用のローレンツ構造の解明にさらなる制限を与えることを意味し、例えばパリティの破れの起源を探る手段の一つとなる。

以上の説明は、 ℓ を e に限定すれば $\tau \rightarrow \mu$ としても同様なことが言え、実際 μ 粒子ではこれらと同等なものが既に測定されている。しかしながら、質量が μ 粒子よりも17倍ほど重く、より未知の物理に感度が高いと考えられる τ 粒子では、これらの値はまだ測定されていない。本研究では、既に高精度で測定がなされている4つのミシェルパラメータ $\rho, \eta, \xi, \xi\delta$ の値を仮定しつつ、 τ 粒子の $\bar{\eta}$ と $\xi\kappa$ の測定を行った。

二つのミシェルパラメータのうち、 $\xi\kappa$ は τ のスピン(偏極)に関わる量であるため、その値を測定するためには寿命の短い τ 粒子のスピンの向きを知らなくてはならない。本解析では、二つの τ 粒子が生成されるときのスピンの相関性に注目した。角運動量の保存によって、二粒子間の偏極は互いに同じ向きを向く性質があり(別の言い方をすれば、ヘリシティが反相関性を持つ)、対となる τ が崩壊してできた粒子の角度分布を知ることによって、レプトニック崩壊する τ のスピンの方向を確率的に推定することができる。本研究では、 ρ 中間子を励起状態とした τ のハドロニック崩壊 $\tau^+ \rightarrow \rho^+ \bar{\nu} \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\nu}$ を組み合わせ、合計で $\tau^+ \tau^- \rightarrow (\pi^+ \pi^0 \bar{\nu})(\ell^- \nu \bar{\nu} \gamma)$ をシグナルとして解析を行った。

本論文の一章、二章では、以上で述べた物理的背景、目的と、輻射レプトニック崩壊 $\tau \rightarrow \ell \nu \bar{\nu} \gamma$ に関して詳細に述べている。

§ 手法

本研究は、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構で行われたBelle実験によるデータを解析することで行った。Belle実験は1999年から2010年にかけて行われたプロジェクト

クトであり、その主な目的はKEKB加速器で生成された大量のB中間子の崩壊をBelle検出器でもって測定し、CP破れの起源を探ることであった。しかしながら、KEKB加速器はいわゆるBファクトリーだけでなく、 τ ファクトリーでもある。本研究で利用した 703 fb^{-1} の $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 事象は、およそ 6×10^9 個もの数に達し、この大統計は輻射によって抑制されてしまう $\tau \rightarrow \ell\nu\bar{\nu}\gamma$ 崩壊の解析を行う上で必要不可欠なものであった。三章では、本研究を実現するために用いた実験装置について説明している。

最初に、シグナル事象である $\tau^+\tau^- \rightarrow (\pi^+\pi^0\nu)(\ell^-\nu\bar{\nu}\gamma)$ 崩壊の選別の研究を行った。ミシエルパラメータの測定は、統計誤差が優位な解析であるために、十分なイベント数を維持しつつ、測定を可能たらしめる程度に高い純度を達成する必要がある。結果的に、 $\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}\gamma$ のモードで約30%、 $\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu}\gamma$ のモードで約60%の純度を、効率 $\varepsilon = 4\%$ ほどで抽出することに成功した。四章では、その具体的なイベント選別について記述している。

ミシエルパラメータ $\bar{\eta}$ と $\xi\kappa$ の測定は、unbinned maximum likelihood法によるフィッティングによって行う。 $\tau^+\tau^- \rightarrow (\pi^+\pi^0\nu)(\ell^-\nu\bar{\nu}\gamma)$ 崩壊の微分散乱断面積は12次元の微分変数 $x = \{P_\ell, \Omega_\ell, P_\gamma, \Omega_\gamma, P_\rho, \Omega_\rho, m_\rho^2, \tilde{\Omega}_\pi\}$ を持ち、その位相空間の中で、シグナルの確率密度関数 $S(x)$ を定義する。バックグラウンドに対しても同様に $B(x)$ を定義することで、実際に「見える」確率 $P(x)$ を定式化することができ、尤度関数 $L = \prod_{i:\text{event}} P(x^i)$ が決まる。この L の最大化を行うことで最も尤もらしい実験値を、その統計的不定性と共に得ることが出来る。本論文では、シグナルの $S(x)$ のみ本文に詳細を示し、 $B(x)$ の解説は付録にまとめることとした。五章ではモンテカルロ法を用いて検証したこれら内容を示している。

実際の実験データに対してフィッティングを行う際は、モンテカルロ法と実験データのズレを表す係数(correction factor) $R(x) = \varepsilon^{EX}(x)/\varepsilon^{MC}(x)$ を考慮して確率密度関数を補正する。本研究では、トリガー、粒子識別、トラックの再構成、に関わって生じる効率の補正係数を抽出し、ミシエルパラメータ測定の手順に組み込むこととした。六章では、これら $R(x)$ の具体的な測定法とその補正の効果について述べている。

得られたミシエルパラメータの系統誤差はモンテカルロ法を基本とした手法で見積もることとした。検証の対象となる不定性の分だけ入力する要素を変え、フィッティングによって得られるミシエルパラメータの変化を対応する系統誤差とした。七章ではその手順を説明している。

§ 結果と考察

七章までで解説してきた手法をもとに、実験データに対してフィッティングを行い、尤もらしいミシエルパラメータを測定した。その結果、 $\bar{\eta} = -1.3 \pm 1.5 \pm 0.8$ 、 $\xi\kappa = 0.5 \pm 0.4 \pm 0.2$ という値を得た。さらに、この値をうけてフィッティングの評価を行った。likelihood法では、統計が十分であればその対数をとった関数が最尤値を基準にして対称な二次関数になることが期待されるが、確かにそれが満たされているのが確認された。また、likelihoodには既知の分布がないために、p値をはじめとして、あらゆる関数に対して

フィッティングを評価することのできる一般的な手法が存在しない。本研究では、その手法の一つとして *point-to-point dissimilarity method* というやや特殊な方法を採用し、その良さの定量的な評価を試みた。その結果、この手法ではフィットの良さを棄却することはできなかった。

以上で得られた結果をもとに、その物理的な意義の考察を行った。 $\bar{\eta}$ と $\xi\kappa$ の値、あるいはその線形な組み合わせを考えると、先に述べた $g_{i,j}^N$ の各係数の値の制限を得ることが出来る。その中でも現状存在している制限に対して意義のあるものは、 $|g_{R,L}^T| < 0.6$ と $|g_{R,L}^V| < 0.8$ であった。また、今回新たに得られた $\xi\kappa$ の値と、精度よく測られている ξ 、 $\xi\delta$ の値を組み合わせることで、 τ が右巻きのヘリシティをもつ ℓ へと崩壊する(規格化された)確率、 Q_R^T の制限を $Q_R^T < 2.4$ のように得た。しかしながら、現状の感度では、これらは新物理への強い制限とは言えず、今後遂行されるBelle II実験による感度の改善が望まれる。

最後に九章では、 $\tau \rightarrow \ell\nu\bar{\nu}\gamma$ の崩壊分岐比の測定を説明している。本来であれば、独立したプロジェクトとして測定すべき対象であるが、ミシェルパラメータの測定で煮詰めた事象選別からさらにその条件を厳しくすることによって、純度をより高め、注目すべき結果を得ることができた。その測定値は、 $\mathcal{B}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}\gamma) = (1.82 \pm 0.02 \pm 0.10) \times 10^{-2}$ 、 $\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu}\gamma) = (3.68 \pm 0.02 \pm 0.15) \times 10^{-3}$ であった。これらの値は、本来の目的であるミシェルパラメータの測定を引き継いだ結果であるため、 $\tau^+\tau^- \rightarrow (\pi^+\pi^0\bar{\nu})(\ell^-\nu\bar{\nu}\gamma)$ のイベント数の観測に基づいている。しかしながら、より高い精度で測定を行うのであれば、対となる τ の崩壊として、 $\tau^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\bar{\nu}$ の崩壊ではなく、一つの荷電粒子を含むinclusiveな崩壊(1-prong)を用いるべきである。実際、 π^0 の検出効率の不定性からくる系統誤差がすべての誤差の中でも支配的となってしまった。それでもなお、本結果は、従来のtree levelを考慮した理論値と無矛盾であることを示唆しており、この点ではBaBar実験で得られた結果と食い違わない。さらに注目すべきは、この結果は、輻射補正を考慮した(next leading order)最新の理論予測値の一部を弱く棄却(1.7 σ)していることであり、また同時に、BaBarのそれ(3.5 σ)をサポートする結果でもある。

十章では、このミシェルパラメータ $\bar{\eta}$ 、 $\xi\kappa$ の物理的意義を今後、より大きいものにしていくために、本研究で得た経験をもとにした今後の展望について述べる。