

論文要旨

氏名 松尾友和

論文題目

タウニュートリノ反応のハドロンバックグラウンドの研究

(英訳) Study of hadron backgrounds of tau neutrino interactions

論文要旨

ニュートリノ振動とは、ニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態が異なり、かつ質量固有状態の質量が同一でない時、ニュートリノの飛行に伴いフレーバーの観測確率が変化する現象である。標準理論では質量0とされているニュートリノだが、もしニュートリノ振動が発見されれば、ニュートリノが質量を持っていることが示される。

ニュートリノ振動を強く示唆する現象は、1998年にスーパーカミオカンデで生成したニュートリノが減少する『消滅モード』で発見され、世界中の様々な実験で確認がなされてきた。しかし、消滅モードと対になる、振動によって別種ニュートリノが現れる『出現モード』の確認はニュートリノ振動の検証で重要であるにもかかわらず世界のどの実験も、ニュートリノに対応するレプトンの出現を確認することには成功していない。

そこで、日欧国際共同長基線ニュートリノ振動実験 OPERA は、欧州合同原子核研究機構 (CERN、スイス) のスーパー陽子シンクロトロン加速器 (SPS) で作られたミュニュートリノを、730km離れたイタリアのグランサッソ研究所に照射し、振動により現れるタウニュートリノを検出することにより $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ へのニュートリノ振動を『出現モード』で検証する事を目指す。

反応で発生したタウ粒子は反応断面積が非常に小さいだけでなく、寿命も短く殆どが飛距離数百 μm 以下で崩壊するため、OPERA では、世界で唯一タウニュートリノの検出に成功している標的兼飛跡検出器 (ECC、鉛板 56 枚と原子核乾板 57 枚の交互積層体) を約 15 万個、有感質量 $1.25 \times 10^6 \text{kg}$ を用い、タウの出現によりタウニュートリノの存在を確認する。OPERA 実験は 2008 年から 2012 年までの 5 年間の照射を計画している。照射は順調に進んでおり、2010 年 5 月 31 日に世界で初めてとなるタウニュートリノ出現候補事象を有意度 95% で検出したと発表した。

OPERA 実験では、タウニュートリノの荷電カレント反応によって生成するタウ粒子が崩壊する際の飛跡の幾何学的な折れ曲がり、および運動学的な性質に基く選別を用いてタウ粒子を識別している。タウ粒子の崩壊のほかにも、 ν_{μ} が荷電カレント反応を起こした時に生成したチャームを含むハドロンの崩壊や、 ν_{μ} が中性カレント反応を起こした時に生成したハドロンが、 τ の崩壊とほぼ同じ距離内で原子核と衝突し飛跡が折れ曲がる事象 (ハドロンバックグラウンド) がタウ崩壊と類似の幾何学的描像を持つため、これらのバックグラウンドとタウ崩壊を十分な精度で識別し、

バックグラウンドと十分に分離しないとタウニュートリノの判定が出来ない。

そこで OPERA では、モンテカルロシミュレーションにより、タウ崩壊の候補事象のシグナル領域として、崩壊二次粒子の運動量 $P > 2.0\text{GeV}/c$ かつ横運動量 $P_T > 0.6\text{GeV}/c$ を定めている。この結果からハドロンバックグラウンドは、 $(1.9 \pm 0.1) \times 10^{-4}/\text{NC event}$ と見積もられている。この見積の精度を実験的に確認する事は、推定の検証や正当性の確認に直接結び付くにもかかわらず、極めて作業量が多いためこれまで行われて来なかった。代わりに、ハドロンバックグラウンドについては、モデルの系統誤差等を考慮して、50% の誤差を計上している。そこで本研究では、OPERA 実験とは独立した実験である KEK PS 4 GeV/c π^- ビームの ECC への照射実験によって、ハドロンバックグラウンドを実験的に測定して解析、モンテカルロシミュレーションと体系的に比較した。

シグナル判定には、個々の粒子の運動量を測定することが必要である。そこで、多重電磁散乱による角度変化を使用して運動量を計算する角度法と呼ばれる手法を使用して同照射乾板を用いて評価し、粒子の運動量を統計誤差 50 % 以下、系統誤差 24 % で、かつ各単一の粒子単位で測定できる事を確認した。

また、乾板上の 2.2cm^2 の範囲からビーム飛跡を抽出し、下流に向かって追跡することにより反応点を検出し、反応点に収束する二次粒子の本数および運動量を用いて、バックグラウンドとなるハドロン反応の頻度を測定した。その結果、353 反応を検出し、ハドロンバックグラウンドとなる、荷電二次粒子多重度 1 の反応の中から、運動量を誤差 50 % 以下で測定する事のできる 33 反応について二次粒子の運動量および横運動量を計算した結果、OPERA のシグナル領域に入った事象は 2 回であった。以上の結果から、シグナル領域に入る事象は、本実験条件下の値として、反応点に対する割合は $(2 \pm 2) \times 10^{-2}$ となった。

また、OPERA のハドロンバックグラウンドを見積もるために使用されているモンテカルロシミュレーションで本照射実験を再現した。その結果、発生させた 1388 反応の中から、運動量を誤差 50 % 以下で測定する事のできる 98 反応について二次粒子の運動量および横運動量を計算した結果、OPERA のシグナル領域に入った事象数は 9 となった。以上の結果から、シグナル領域に入る事象は、本解析条件下の値として、反応点に対する割合は $(4.0 \pm 1.4) \times 10^{-2}$ となった。

この結果、4 GeV/c のハドロンにおいて、OPERA でのバックグラウンドの見積もりが誤差範囲内で一致している事が示された。このことは、OPERA が発表した最初のタウニュートリノ反応候補事象をも含め、その有意度が 95% またはそれを上回ることを実験データに基づき初めて確認した。

今後本研究で確立した解析手法を用いる事により、本研究では対象となっていなかった 3-prong ハドロン崩壊のバックグラウンドの検証や、複数のエネルギーでバックグラウンドを解析し多エネルギーで比較によるシミュレーションコード自体の精度向上等へ応用が期待される。