

# 論文要旨

東邦大学大学院理学研究科 博士後期課程  
石田 拓運

## 論文題目

### ニュートリノ振動実験における タウ崩壊事象のハドロンバックグラウンド研究

## 論文要旨

素粒子のうち中性レプトンであるニュートリノは、素粒子物理学の基本理論である標準模型において、長く質量が存在しないとして考えられてきた。しかし、1998年スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ欠損の発見等により、ニュートリノは有限の質量を持つことが明らかとなった。しかし、これらの実験はニュートリノ振動前のニュートリノフラックスの欠損を捉えたものであり、振動先のニュートリノの出現を観測したものではない。対して OPERA 実験は、欧州原子核研究機構 (CERN) からミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) ビームを照射し、730 km 離れたイタリア国立 Gran Sasso 研究所の地下 1400 m に設置した総質量 1.25 kton の検出器で振動後に生成したタウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) の出現を観測する。標的には位置分解能約 1  $\mu\text{m}$  の原子核乾板と鉛板を積層した ECC 検出器約 15 万個を用いてその鉛中でニュートリノ反応を起こさせ、生成された荷電粒子の飛跡を原子核乾板で捉える。その中にタウ粒子を同定できると、その反応事象は  $\nu_\tau$  が起こしたことを示し、出現したニュートリノを観測することによりニュートリノ振動を直接観測となる。

タウ粒子は短寿命のため、平均数百  $\mu\text{m}$  走った後、ミュー粒子、電子或いはハドロンへ崩壊する。この崩壊前後の飛跡が幾何学的折れ曲がりを示すため、これを観測してタウ粒子を同定する。従ってタウ粒子以外の荷電粒子がこれと似た幾何学的折れ曲がりを示すと、それはタウ崩壊事象と誤認されるバックグラウンドとなる可能性がある。2013年4月4日現在、OPERA 実験は2例のタウ崩壊事象候補を発表したが、これは振動により現れたニュートリノの反応の世界で初めての成果である。筆者はその主要なバックグラウンドうちの一つ、ハドロン衝突バックグラウンドの低減によるタウ崩壊事象の有意性の向上に注目した。

ハドロン衝突バックグラウンドの期待値は既にシミュレーション (FLUKA) を用いて見積もられており、タウ崩壊事象候補のシグナル領域 (崩壊2次粒子の運動量  $P > 2.0 \text{ GeV}/c$  かつ横運動量  $P_T > 0.6 \text{ GeV}/c$ ) に入る期待値は、1中性カレント反応あたり  $(1.9 \pm 0.1) \times 10^{-4}$  である。しかしこの実験的裏付けが十分ではないため、系統誤差を50%付加している状態となっている。

そこで我々は CERN PS beam line で 2, 4, 10 GeV/c の  $\pi^-$  粒子を照射した ECC(OPERA 実験に用いられた Brick と同構造) を用いて、ハドロン衝突バックグラウンドの系統的な評価を行った。

まず 2, 4, 10 GeV/c の  $\pi^-$  粒子飛跡をそれぞれ 584, 913, 2205 本を抽出し、ハドロン衝突を起こすまでの平均自由行程をそれぞれ  $110_{-11}^{+14}$ ,  $185_{-20}^{+24}$ ,  $223_{-16}^{+18}$  mm と得た。これはシミュレーション結果  $124_{-3}^{+3}$ ,  $209_{-7}^{+8}$ ,  $231_{-5}^{+6}$  mm と良く一致している。次に反応点から放出される 2 次粒子を OPERA 実験と同じ条件で探索した結果、タウ崩壊事象のバックグラウンドとなる 1, 3 本の 2 次粒子が観測される (1, 3-prong 事象) 比率は、1-prong がそれぞれ  $43_{-5}^{+5}$ ,  $43_{-6}^{+6}$ ,  $15_{-2}^{+3}$  % であり 3-prong がそれぞれ  $< 3$ ,  $3_{-1}^{+4}$ ,  $25_{-3}^{+4}$  % であった。更に 2 次粒子の運動量  $P$  と横運動量  $P_T$  を多重電磁散乱を用いた位置変位法にて求め、タウ崩壊事象選択条件を満たす確率を求めた。その結果、10 GeV/c においては 1-prong 事象で  $10_{-3}^{+16}$  %, 3-prong 事象で  $2_{-1}^{+4}$  % が選択領域に混入することが分かった。これらはシミュレーション結果のそれぞれ  $14_{-3}^{+4}$ ,  $5_{-1}^{+1}$  % と良い一致を示し、OPERA 実験シミュレーションの実験的裏付けとなった。この結果から、本研究におけるシミュレーションとの差異は統計誤差で説明することができ、従来 50% から 30% に計上すべき誤差を削減することが出来た。

さらに新たな指標として核破砕粒子の付随確率を測定した。核破砕粒子はハドロンと原子核との衝突反応により原子核を構成する陽子等が放出されるものであり、これが付随していればその反応は崩壊ではないと断定できる。しかし、その放出角分布は等方的なため、従来の自動飛跡認識装置では十分な検出効率がなかった。これを解決するために本研究室では広視野・高分解能の CMOS カメラ、広視野対物レンズ、高速演算処理のための GPU を用いた新たな自動飛跡認識装置を開発し、乾板に垂直な方向からの角度を  $\theta$  として、認識できる最大角度を従来の  $\tan \theta = 0.6$  から 3.0 まで拡張した。これを用いてハドロン衝突の 1, 3-prong 事象に対して、衝突反応の上下流の乾板の  $3.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ ,  $\tan \theta < 3.0$  の領域までの核破砕粒子探索を行った。その結果、2, 4, 10 GeV/c の衝突現象においてそれぞれ  $31_{-7}^{+9}$ ,  $58_{-9}^{+8}$ ,  $64_{-6}^{+5}$  % の付随確率を得ることができた。これによりバックグラウンドの期待値を大幅に低減することが可能であることが示され、シミュレーションに 10% の誤差を付加することで実験を再現することも分かった。実際に OPERA 実験で発見された最初のタウ崩壊事象候補に対して同じ条件で核破砕粒子の探索を行ったところ、付随していないことが確認され、信頼性の向上に大きく貢献できた。

本研究によりハドロン衝突バックグラウンドは実験的な裏付けを得ることができ、更に核破砕粒子の探索もこのバックグラウンド低減に非常に有用であることが示された。OPERA 実験はこの結果を受けて、実際のビームエネルギースペクトル、ニュートリノ反

応、2次粒子の検出効率等を考慮し、本実験の解析サンプルにおける2次ハドロン衝突によるバックグラウンドの期待値を再計算している。この精密計算により、タウニュートリノ反応検出の信頼性を正しく見積もることができ、大気ニュートリノ欠損の問題に決着がつくと期待される。