

日欧国際共同研究・長基線ニュートリノ 振動実験 OPERA が最終結果を公表

名古屋大学未来材料・システム研究所の佐藤 修 助教、教養教育院の小松 雅宏 准教授らの研究グループは、日欧国際共同研究・長基線ニュートリノ振動^{注 1,2)} 実験 OPERA において、ニュートリノ振動の結果として生じたタウニュートリノを最終的に 10 個観測し、そのニュートリノ振動探索の最終結果を発表します。

OPERA 実験とは、直接的かつ決定的な形でミューニュートリノがタウニュートリノへと振動することを示すことを目的とした実験です。スイスの欧州共同原子核研究所 (CERN) の加速器を用いて生成されたミューニュートリノビームを 730km 離れたイタリアの Gran Sasso 地下研究所に設置された OPERA 実験装置に向けて 2008 年からの 5 年間に渡り、照射しました。2015 年にはニュートリノ振動の発見により、梶田教授らがノーベル物理学賞を受賞しましたが、OPERA 実験の結果は、この受賞を支える一つの重要な結果として受賞理由にも挙げられています。

本研究成果については、2018 年 5 月 22 日付 (日本時間 21 時) 「Physical Review Letters」に掲載されると同時に、CERN においてもプレスリリースされました。

なお、この研究は 2000 年度から 5 年間、日本学術振興会科学研究費助成事業 (学術創成研究費) 『素粒子標準理論の検証に関する日欧国際共同研究』等の支援のもとで行われたものです。

OPERA 実験は、2000年に名古屋大学の“世界初のタウニュートリノ検出の成果”と“高度化した原子核乾板解析技術”を基に立案されました。名古屋大学を中心とする日本の研究グループ（愛知教育大学・宇都宮大学・神戸大学・東邦大学・日本大学）は、OPERA 実験の提案段階から中心的な役割を果たしており、検出器の要である大量の原子核乾板^{注3)}の準備及びその解析を担当し、従来の1000倍規模の史上最大の原子核乾板実験でミューニュートリノのタウニュートリノへのニュートリノ振動を直接証明しました。原子核乾板は優れた空間分解能を持つ伝統的な検出器ですが、顕微鏡での読み取りが必要なため、使われることが少なくなっていました。しかし、私たちが開発した超高速な自動解析システムにより、大規模なスケールの実験・観測で用いることが可能となりました。この成功を土台に、現在では原子核乾板を用いた多くの応用研究、ダークマター探索・ガンマ線天文学から火山・氷河の透視による内部構造の研究やピラミッドの透視等への道も切り拓かれてきています。

【ポイント】

2015年の「ニュートリノ振動の発見」によるノーベル賞の受賞を後押ししたニュートリノ振動実験 OPERA は、さらに統計を増やしてきました。今回、新たに5個のタウニュートリノ反応候補を検出して解析を完遂し、合計10個のタウニュートリノ反応候補によるニュートリノ振動解析の最終結果を公表しました。

【研究背景と内容】

自然界には、電子・ミュー・タウ型の3種類のニュートリノの存在が知られています。3種類目のタウニュートリノは名古屋大学が主導したDONUT実験^{注4)}により、その存在が2000年に確認され、その功績により、2004年に丹羽公雄本学名誉教授が仁科記念賞を受賞しました。それぞれのニュートリノは物質との相互作用時にその名前に対応する電荷を持った電子・ミュー粒子・タウ粒子を生成します。OPERA 実験装置はこれらの生成された3種類全ての粒子を識別可能で、結果としてその反応を引き起こすニュートリノの種類を識別できる唯一の実験です。1990年代の様々な実験でミューニュートリノが長い距離を通過する間に減少しているという観測結果が得られていましたが、この結果は本学の牧二郎・中川昌美・坂田昌一によって予言されたニュートリノ振動を通してミューニュートリノが別の種類に変化した結果ではないかと示唆されました。同時に、電子ニュートリノは予測どおりに検出されていたことから、ミューニュートリノがタウニュートリノへと変化したと予想されていました。この予想は、2015年までにOPERA 実験でミューニュートリノがスイスからイタリアへの730km飛行する間にタウニュートリノに変化した現象を5例検出し、決定的な証拠として証明されました。

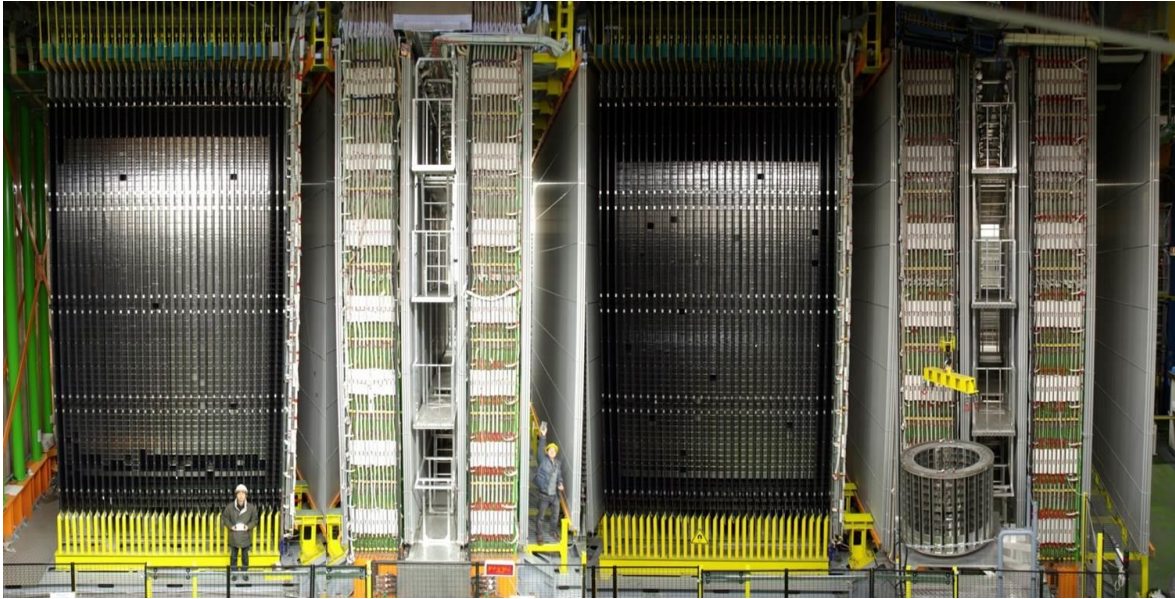


Figure 1 OPERA 実験装置

はがき大の鉛板と原子核乾板を積層した ECC、約 15 万個、総重量 1250 トンの標的からなる。ミューニュートリノビームが 730 km 離れたセルシウムより図の左方向から照射された。

[本論文の内容]

OPERA では、2015 年までにタウニュートリノ候補を 5 個検出し、タウニュートリノの出現を確かな精度で証明しました。しかし、この時のタウニュートリノ反応の選別の条件は、背景事象を 1 反応より充分低く抑えるためにタウニュートリノ反応自体もこの選別で落ちることが分かっていました。

そこで、OPERA 実験の最終結果をまとめるに際し、背景事象数を解析の邪魔にならない範囲に抑えつつも実験で捉えたタウニュートリノをくまなく残す選別条件を考案し、全期間をとおして原子核乾板 ECC 中に捉えられた約 7000 のニュートリノ反応を再解析しました。選別条件は緩めるだけではなく、ニュートリノ反応のエネルギーやタウ粒子候補の崩壊の運動力学的な測定量の 1 反応あたりに得られる複数の情報を同時に処理（多変数解析）することで、タウニュートリノ反応と背景事象の区別をより詳細に行いました。その結果、タウニュートリノ候補をデータ中に 10 反応検出しました。この 10 反応の全てが背景事象であったとして説明される確率は 100 億分の 5 となり、事実上、背景事象では説明することは不可能であり、高い信頼度でタウニュートリノの出現を捉えたと言えます。

2015 年当時の 5 反応検出から 10 反応に増やしたことで、ニュートリノ振動のパラメータ（混合角、質量差）の精度も向上し、タウニュートリノと物質との反応断面積の値と合わせて報告しています。

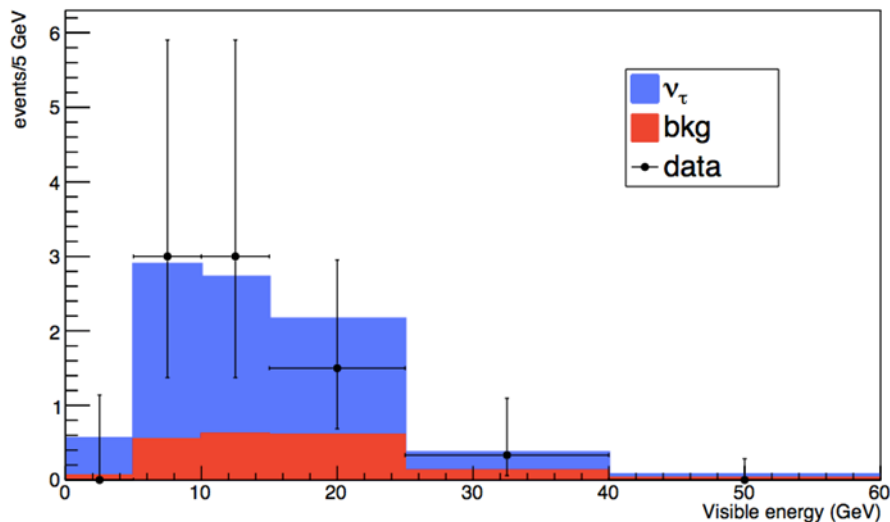


Figure 2 OPERA 実験で検出された 10 個のタウニュートリノ反応のエネルギー分布
 得られたデータの分布 (data) はニュートリノ振動して出現したエネルギー分布
 (ヒストグラム) に合っている

【成果の意義】

OPERA 実験では、2010 年に最初のタウニュートリノ反応を検出、さらに、2012 年～2015 年の間に 4 つのタウニュートリノ反応を観測してミューニュートリノからタウニュートリノへの振動を証明し、梶田教授らのノーベル賞へとつながった。その後、2008 年～2012 年までのビーム照射期間に集められた全データに対し、検出効率向上を狙った新しい解析手法を適用して、最終的に 10 個のタウニュートリノ反応候補(背景事象期待値:2 個)を選別し、ニュートリノ振動を極めて高い信頼性で証明しました。

【用語説明】

1. ニュートリノ：素粒子標準理論の中で電荷がなく、弱い相互作用しかしないため検出するには大質量の検出器が必要。電子ニュートリノ・ミューニュートリノ・タウニュートリノの 3 種類が観測されており、それぞれのニュートリノは物質との相互作用時にその名前に対応する電荷を持った電子・ミュー粒子・タウ粒子を生成する。長らく質量はないものとして扱われていたがニュートリノ振動現象をとおして、ごくわずかながら質量があることが証明された。
2. ニュートリノ振動：3 種類あるニュートリノに質量差がある場合に、ある種類のニュートリノから他の種類のニュートリノに変化する現象。ニュートリノの種類ごとに質量が異なる場合に起き、本学の牧・中川・坂田によって予言されていた現象。この「ニュートリノ振動の発見」により 2015 年ノーベル物理学賞を梶田教授が受賞した。ニュートリノ振動は長い距離を伝搬する間に 3 種類相互の間で種類が入れ替わる現象で、ニュートリノが飛行する長い距離が必要。
3. 原子核乾板：高感度の写真フィルムで宇宙線・放射線や荷電粒子の飛跡が写るように開発されたもの。ゼラチン中に直径 200nm 程度の臭化銀結晶を高密度に入れてあり、荷電粒子の飛跡をサブミクロンの位置精度で測定できる。OPERA では 1 mm 厚の鉛板と 300 μ 厚

(支持体込) の原子核乾板を交互に積層した ECC 構造でニュートリノ反応を詳細に解析した。

4. DONUT 実験：素粒子標準理論にて物質を構成する 12 種類の基本粒子の中で、最後まで実験的にその存在が確認されていなかったタウニュートリノを実験的に証明した実験。アメリカのフェルミ国立加速器研究所にて人工的なタウニュートリノビームを生成し、その反応を原子核乾板技術を用いて初めて実験的に観測した。

【論文情報】

雑誌名：Physical Review Letters

論文タイトル：Final results of the OPERA experiment on ν_τ appearance in the CNGS beam

著者：OPERA Collaboration

DOI： [10.1103/PhysRevLett.120.211801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.211801)