

名古屋大学主導のニュートリノ振動実験 OPERA、 5 例目のタウニュートリノ反応を検出。 ニュートリノ振動現象存在の最終検証に成功

名古屋大学が主導する日欧共同実験 OPERA は、2008 年から 2012 年の 5 年間のビーム照射分のデータを解析し、このたびニュートリノ振動現象により出現したタウニュートリノ反応の 5 例目の検出に成功しました。

1998 年にスーパーカミオカンデの実験で観測された大気ニュートリノ異常は、ミューニュートリノから、タウニュートリノへと変化したものと強く示唆されていましたが、変化した先のタウニュートリノの検出には至りませんでした。OPERA 実験は、加速器により生成したミューニュートリノが確かにタウニュートリノへと変化した証拠として、変化して現れたタウニュートリノをとらえる事で、大気ニュートリノ異常が確かにニュートリノ振動によるものである事を立証するべく、計画されました。

タウニュートリノの検出は、タウニュートリノと物質の反応によって生成されるタウ粒子を検出する事で行います。タウ粒子の寿命は 1 兆分の 1 秒よりも短く、崩壊するまでの飛距離は 1 ミリ程度であり、その検出には、極めて高い位置分解能が要求されます。OPERA では、本学が誇る世界のオンリーワン技術：原子核乾板技術を用いてタウニュートリノ反応の検出を可能とし、1,250 トンの巨大な検出器の中からミクロン精度の解析で、5 例目のタウニュートリノ反応を検出しました。これにより、ミューニュートリノビーム中に検出した 5 例の事象をニュートリノ振動以外の既知の理由（背景事象）で説明できる確率は、1,000 万分の 1 しかなくなり、物理学の到達レベルとしては、目的としていた「ニュートリノ振動現象存在の立証」に成功したといえるレベルに到達しました。

本研究の成果は、6 月 15 日にイタリア・Gran Sasso National Laboratory でのセミナーで報告しました。

（セミナー案内へのリンク <http://agenda.infn.it/event/9799>）

【研究の背景・意義】

1998 年にスーパーカミオカンデが観測した大気ニュートリノ異常は、宇宙線により生成されたミューニュートリノが、ニュートリノ振動現象によりタウニュートリノへ変化したことにより、ミューニュートリノが減少したと解釈されました。しかしながら、振動により変化した先のタウニュートリノは検出されていませんでした。ニュートリノが別の種類に変化したとすれば、変化した先のニュートリノを確認する必要があります。オペラ実験はそのタウニュートリノの出現を確認することにより、確かにニュートリノが振動により変化したことを確実なものにする実験です。

【ニュートリノ振動とタウニュートリノ】

ニュートリノ振動は、1962年に名古屋大学の牧・中川・坂田らによって理論的に提唱されました。ニュートリノに質量差があり、混合角がゼロでなければ、3種のニュートリノは時間と共に相互に変化するというものです。1998年にスーパーカミオカンデは、彼らが観測した大気ニュートリノ異常は、宇宙線起因のミューニュートリノが、ニュートリノ振動現象により減少したものと解釈しました。しかしながら、ニュートリノ振動では、ニュートリノが別の種類のニュートリノ(タウニュートリノ)に変化しているはずですが、タウニュートリノに変化したとする証拠までは得られていませんでした。タウニュートリノの検出は極めて困難で、実験的に初めて観測されたのは、OPERA実験と同じ名古屋大学が主導した原子核乾板によるDONUT実験においてです。タウニュートリノ反応を識別するには、タウニュートリノ反応により生成されるタウ粒子を識別する必要がありますが、タウ粒子の寿命は1兆分の1秒よりも短く、ミクロン(μm)精度の検出器が必要です。

【OPERA実験】

OPERA実験は、ニュートリノ振動で出現したタウニュートリノを捉えます。タウニュートリノを捉えるのは、DONUT実験でタウニュートリノの初検出に成功したECCと呼ばれる原子核乾板と、金属板のサンドイッチ構造の検出器です。観測されるニュートリノ反応数は、標的の重さに比例して大きくなるので、OPERAでは、鉛板がニュートリノの標的として選ばれました。葉書大の面積、0.3mm厚の原子核乾板57枚と1mm厚の鉛板56枚とが、1枚ずつ交互に積層されて1個のレンガ大のECCを構成します。ニュートリノ反応を大量に集めるために約15万個のECCをイタリアのグランサッソ国立研究所地下に設置し、約730km離れた欧州原子核研究機構(CERN)から発射されたニュートリノ(CNGS)を、2008年～2012年のビーム照射期間中とらえ続けました。730kmの距離を飛んでいる間にミューニュートリノの内約1.7%のものがミューニュートリノから、タウニュートリノに変化していると予想されます。タウニュートリノがECC中で反応するとタウ粒子が放出され、約1mmの飛行の後に崩壊します。原子核乾板では、タウ粒子や崩壊後の娘粒子が、1本または3本の飛跡として検出されます。この崩壊様式とニュートリノ反応点の詳細解析により、タウニュートリノが同定されます。原子核乾板は、極めて優れた位置分解能を持つために、タウニュートリノではないものを間違えてタウニュートリノと同定してしまう背景事象数は0.3個以下であり、数個のタウニュートリノ反応検出で、確実にタウニュートリノ出現観測を断言することが出来ます。

OPERA実験は、日本と欧州を中心とした国際共同実験で、日本、イタリア、スイス、ロシア、韓国、トルコ、ベルギー、クロアチア、フランス、ドイツ、イスラエルの研究者が参加しています。日本からは、名古屋大学F研究室(中村光廣教授、佐藤修助教)を中心に、愛知教育大学、日本大学、東邦大学、神戸大学が参加しています。

【成果と意義】

今回、原子核乾板ECCの中に蓄積した約5,400ニュートリノ反応に対し、ミクロン精度でタウ粒子崩壊の探査を行い、5例目のタウニュートリノ反応を検出しました。5例のタウニュートリノ反応が全て背景事象で説明できる確率は、1,000万分の1と極めて低く、高い信頼性でタウニュートリノの出現を確認しました。

【原子核乾板】

1枚の原子核乾板の厚さは、約0.3mm(300 μ m)と非常に薄いシート状の放射線検出器です。原子核乾板は、透明なプラスチックシートの両面に乳剤層(素粒子の飛跡を写す層)を塗布した構造を持ちます。乳剤層は、約45 μ mの厚さのゼラチン中に約200nm(0.2 μ m)の臭化銀結晶が分散した構造となっており、この中を荷電粒子(電荷をもった素粒子)が通過すると通過した結晶に潜像(銀原子の集合体)を残し、現像処理により1 μ m程度の大きさの銀粒子へと成長します。この現像銀粒子の3次元的に並んだ点列(飛跡)を光学顕微鏡で計測する事で、現像前に乳剤層を通過して記録された荷電粒子の情報(通過経路やエネルギーなど)を引き出す事が出来ます。

原子核乾板に蓄積された荷電粒子の飛跡は、名古屋大学で開発された高速読み取り装置を駆使し読み取ります。

【第5例目のタウニュートリノ反応紹介】

ニュートリノ反応を後方支援検出器で捉えたものを図1に示します。

図のピンクの位置のECCを取り出して、まず最下流の原子核乾板を解析し、ニュートリノ反応由来の飛跡が複数確認されました。それらの飛跡を追いかけ、ECC内でのニュートリノ反応点の探索を行いました。下流の原子核乾板フィルムから飛跡を上流に追いかけ、下流から44枚目の鉛中で起きたニュートリノ反応点が検出されました。

ニュートリノ反応点は、タウ粒子と1本の荷電粒子(P1)、4本の原子核の破砕片からなります。タウ粒子は、約1mmの飛行後に崩壊し1本の荷電粒子(daughter)に崩壊しています。P1、daughterともに2次反応を起こしているためにハドロンと同定されました。つまり、ニュートリノ反応点には、ミュー粒子はついていない事でチャーム粒子崩壊を伴ったミューニュートリノ反応ではないことが言い切れます。P1はこのECCを貫通し、1個下流のECCで2次反応を起こしました。また、電離損失の程度から陽子として矛盾がありません。この反応のタウ粒子候補の崩壊様式及び運動力学的な測定値は、OPERA実験で背景事象から区別する目的で設定している厳しい条件を満たしています。(ECC内での反応点からの飛跡は図2を参照。)

【図】

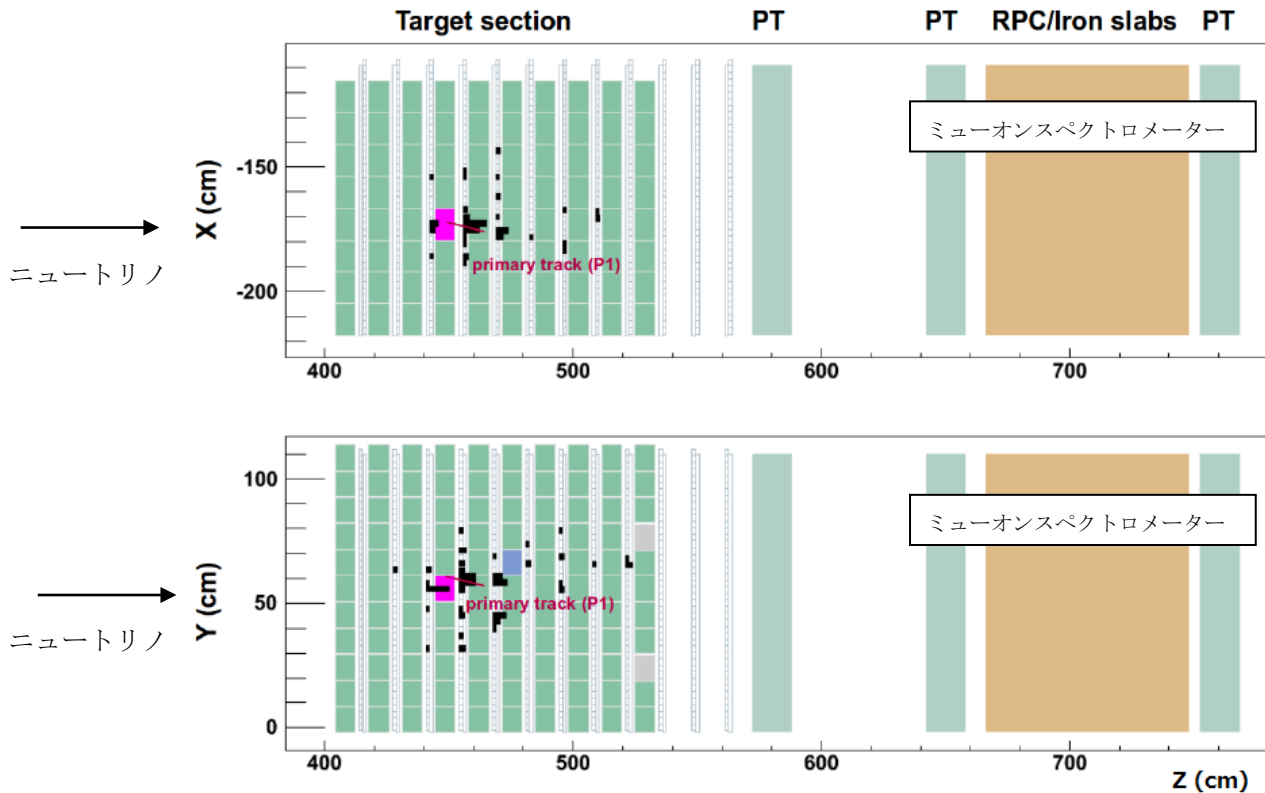


図1. 後方支援検出器で捉えた第5タウニュートリノ反応。

ピンクの四角が、ニュートリノ反応の起きた ECC です。図中の反応の起きた ECC 近傍の黒い棒グラフで示されているのが、シンチレータバーで捉えたニュートリノ反応からの粒子が、シンチレータのところで落としたエネルギーを表しています。Z 方向に長いものほど、大きなエネルギーを落としている事を表現しています。この図より、反応 ECC から後方 6ECC 目以降はシンチレータに記録されたエネルギー活性がなく、到達している荷電粒子がないことを示しています。後方のミュオンスペクトロメーターまで到達するトラックは、観測されていません。

通常ミュオン粒子は 10ECC 以上貫通する為、この段階でミュオン粒子が付随していないことが示唆されています。その後、ECC 中の解析で確かにミュオン粒子が付随していないことが確認されました。ニュートリノ反応点にミュオン粒子がないことは、タウニュートリノ反応が満たすべき重要な条件の1つです。

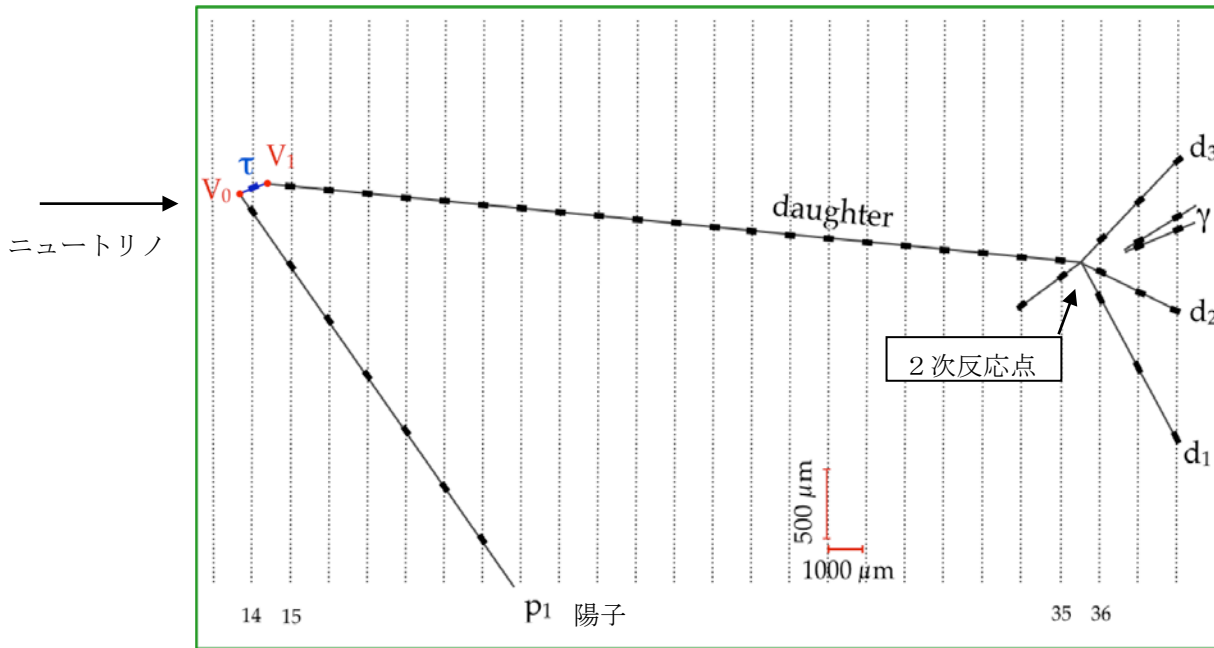


図2. ECCで捉えた第5タウニュートリノの反応模式図。点線のあるところが原子核乾板。
 1次反応点 v_0 からタウと P1 が放出され、タウ粒子は1枚の原子核乾板に飛跡を残し、すぐに daughter へと崩壊しています。その後、daughter は同じ ECC 中で2次反応を起こしています。P1 は、このECCを貫通し下流のECCでの2次反応が確認されており、ハドロンと同定されています。この時点において、1次反応点にミュー粒子は付随していないことが言い切れます。P1 は、電離損失の値から陽子であるとして矛盾がありません。

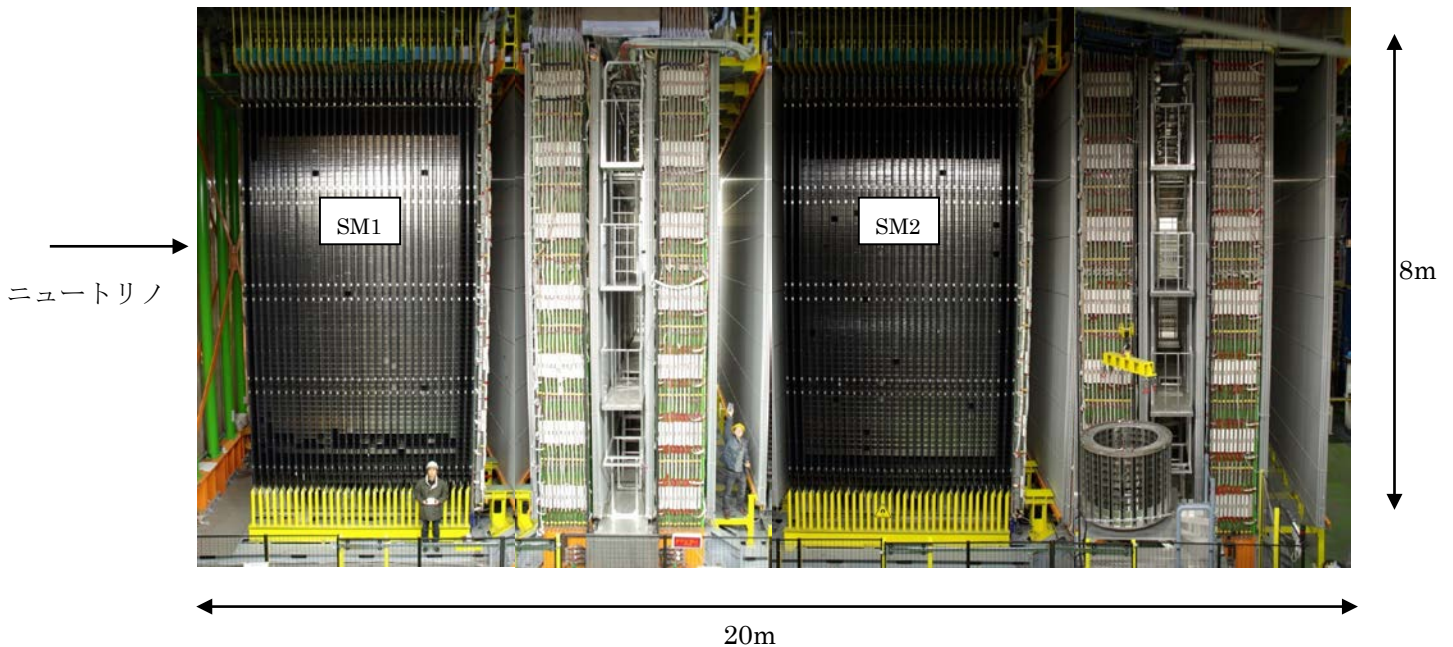


図3 グランサッソ国立研究所地下に設置されたOPERA実験装置。左下の人が1個のECCを持っている。図中のSM1、SM2の所に総計15万ECC、総重量1,250トンのECC標的が装填されています。

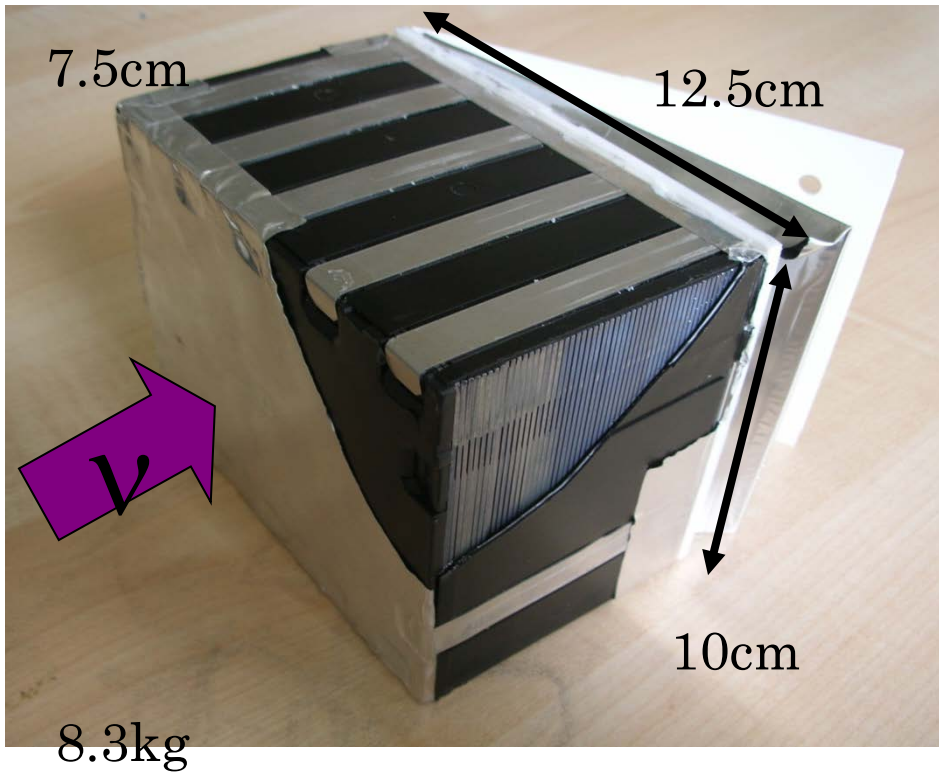


図4. OPERAのECC。