

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2011

課題番号：18071004

研究課題名（和文）

タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究

研究課題名（英文）

Study of neutrino flavor by the detection of Tau neutrino

研究代表者

中村 光廣（NAKAMURA MITSUHIRO）

名古屋大学・現象解析研究センター・准教授

研究者番号：90183889

研究成果の概要（和文）：

タウニュートリノの出現を捕らえてニュートリノ振動現象の最終検証を行う日欧共同実験 OPERA を推進した。原子核乾板はタウニュートリノの検出ができる唯一の検出器であり、OPERA では、はがきサイズの原子核乾板約 930 万枚を用いて重量 1250 トンのニュートリノ検出器をイタリアグランサッソ地下研究所に建設し、730km 離れたスイスにある CERN 研究所に新たに建設されたニュートリノ製造装置より製造された純粋なミューニュートリノを打ち込んだ。2008 年より本格的なニュートリノビームの照射を開始し、2011 年度までに約 13000 反応を検出器に蓄積した。平行して反応が起こった原子核乾板標的（ECC）を随時取り出し、自動飛跡読取装置を用いた解析を推進し、2010 年にミューニュートリノが変身して現れた最初のタウニュートリノ反応の検出に成功した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we pushed forward the OPERA experiment which intends to give a final conclusion to the existence of Neutrino Oscillation by detecting Tau neutrino appearance.

Nuclear emulsion is the only one detector which can detect Tau neutrinos. In OPERA, about 9.3 Million nuclear emulsion films with the size of 10cm times 12.5cm were used to construct a neutrino detector of which mass is 1250 ton in Gran Sasso underground laboratory, Italy. Pure Muon neutrino beam was produced and injected to the direction of OPERA detector by a newly constructed neutrino beam line at CERN which is about 730km distant from Gran Sasso. In 2008, the exposure was started and until 2011 about 13000 neutrino interactions were accumulated in the detector. In parallel to the exposure, the extraction and the analysis of the Nuclear Emulsion target were continued. In 2011, we succeeded to detect the first Tau neutrino interaction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	150,000,000	0	150,000,000
2007 年度	112,500,000	0	112,500,000
2008 年度	15,000,000	0	15,000,000
2009 年度	7,500,000	0	7,500,000
2010 年度	7,500,000	0	7,500,000
2011 年度	7,500,000	0	7,500,000
総計	300,000,000	0	300,000,000

研究分野：素粒子物理学

科研費の分科・細目：

キーワード：ニュートリノ、タウニュートリノ、ニュートリノ振動、原子核乾板

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動の研究は日本の独創性発露の場である。ニュートリノ振動の理論的予言は名古屋大学の牧・中川・坂田により世界に先駆けてなされた(1962年)。またその最初の実験的兆候は東京大学の神岡グループによって、大気中で発生したミューニュートリノの減少としてとらえられた(1994年)。OPERAでは、変身して現れるタウニュートリノをとらえることにより、その最終的な検証を行なう。

歴史的には、我々はこの流れとは独立に、ニュートリノ振動現象の探索を行なっていた。90年代初頭、宇宙のダークマターとしてタウニュートリノ(ν_τ)が注目され、我々は原子核乾板を用いた CHORUS 実験 (CERN WA95)を1994年から行なったが、ミューニュートリノ(ν_μ)から ν_τ への振動は検出できなかった。CHORUS 実験と並行して、原子核乾板の ν_τ 検出の能力を示すべく行なったのが DONUT 実験 (Fermilab E872)であり、ビームに ν_τ を含む(チャーム粒子の崩壊に起因する)プロンプトニュートリノビームを用い、これに鉄板と原子核乾板からなる標的(ECC)を照射し、 ν_τ の世界初の検出に成功した。

最初の ν_τ 反応を高山で開かれた NEUTRINO98 (1998年)で報告したが、同会議で東大の戸塚教授のグループは、カミオカンデで発見した大気ニュートリノの ν_μ 欠損をスーパーカミオカンデで確実なものとし、その解釈として ν_μ から ν_τ への振動を筆頭にあげた。

これらの日本が主導した成果(SK、CHORUS、DONUT)をもとに、神岡のグループの指し示す振動パラメーター領域に的を絞り、タウニュートリノの出現検出でニュートリノ振動の有無に対して明確に答えを与えることができる OPERA 実験を2000年に提案、実験は富士フィルムで原子核フィルムの大量製造が可能と確認された段階で CNGS1 (OPERA)として受理された。

2. 研究の目的

タウニュートリノの出現を直接検出することにより、ニュートリノ振動現象の最終検証を行う。

3. 研究の方法

日本が担当する原子核乾板はタウニュートリノを検出できる世界で唯一の検出器であり、この実験の遂行には日本の技術が不可欠であった。

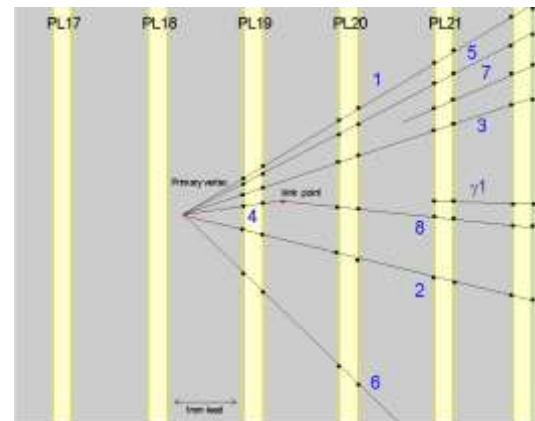
OPERAの検出器(上の写真)は、はがき大で1mm厚の鉛板56枚と、OPERAフィルムと呼

ばれる原子核乾板57枚をサンドイッチにした ECC と呼ばれる原子核乾板標的(重さ8.3kg)を15万個積み上げたものである。



ニュートリノ反応は主に ECC 中の鉛板で起こり、発生してきた素粒子を原子核乾板でとらえて、ニュートリノ反応の解析をおこなう。

OPERA がとらえた最初のタウニュートリノ反応を次に示す。タウニュートリノ反応に特有のタウ粒子は、約1mm飛んで崩壊し、1本の荷電粒子と、2本のガンマー線に崩壊している。飛跡の折れ曲がりの検出精度は1mrad、ニュートリノ反応点に対するインパクトパラメーターの切れ味は1ミクロンの精度を持つ。10メートルサイズの検出器の中に記録された、このミクロンサイズの反応点を原子核乾板中に同定する作業が、OPERAの原子核乾板解析の解析である。



ECCの壁の間にシンチレーティングファイバー読出しの幅2.6cmのシンチバー位置検出器(TT)が挟んであり、そのヒットパターンからニュートリノ反応があるECCを同定する。対応するECCを取り出し、外付けされている取り外し可能な原子核乾板(CS)を現像し、名古屋ならびにグランサッソーのスキヤニングラボで読み出し、ニュートリノ反応起因の飛跡を探索する。CSはグランサッソーの地下でリフレッシュ(飛跡消去処理)した新鮮なフィルム二枚から成っており、地下で記録された高エネルギー粒子の飛跡のみを検出できる非常に低バックグラウンドの検出

器になっている。

CS の読出し面積は平均 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 程度を反応あたりに読み出している。この読出しのために現在使用しているのが、我々が開発した世界最高速の読み出し能力を持つ SUTS(下の写真)である。読出し能力は毎時 72cm^2 で、5台を運用して一週間に最大 100 反応のフィードバックを行っている。

名古屋での解析の場合、輸送期間がかかる関係で、その解析の結果をフィードバックするのに約二ヶ月程度かかる。その間、ECC 本体はグランサッソーの地下の遮蔽室に保存される。

解析の結果、ニュートリノ反応からの飛跡が検出されたら ECC 本体の現像を行い、解析を行なう。もし検出されなかった場合は、次に可能性のある ECC を取り出し、CS の解析を行いニュートリノ反応が含まれる ECC を探索

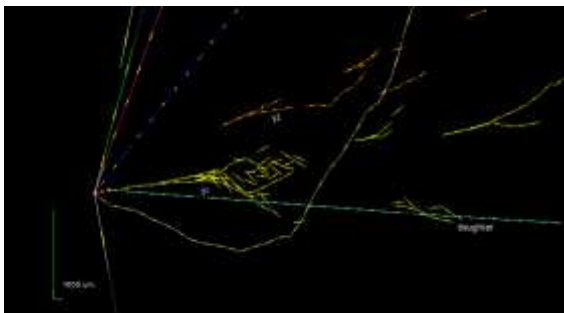


する。

CS で検出された飛跡を、プレートチェンジャーという解析装置でコマ送りしながら、反応点まで追いつける。行き着いた反応点近傍の全飛跡情報は SUTS を用いて読み取り、先のタウニュートリノ反応の図で示したように反応点近傍の詳細な再構成を行い、タウ粒子の崩壊を探索する。

4. 研究成果

2011 年度までに約 13000 反応を検出器中に検出し、2010 年度にミューニュートリノが変身して現れた最初のタウニュートリノ反応の検出に成功した。



この反応では、タウニュートリノの反応によって発生したタウ粒子は約 1mm 飛行して、電荷をもった娘粒子 1 個と γ 線 2 個に崩壊、 γ 線のエネルギーならびに方向は π^0 の崩壊と一致しており、 $\tau^- \rightarrow \rho^- + \nu \tau$ 崩壊として矛盾ないものとなっている。

この報告書を書いている時点でも解析は継続しており、複数のタウニュートリノ反応の候補を検出し、詳細解析中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① N. Agafonova, K.Niwa, M.Nakamura, et al., Search for $\nu/\mu \rightarrow \nu/\tau$ oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam. *New J.Phys.* 14 (2012) 033017. (査読有)
- ② T.Adam, M.Nakamura, M.Komatsu, et al., Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam, arXiv:1109.4897(査読無)
- ③ N. Agafonova, K.Niwa, M.Nakamura, et al., Momentum measurement by the Multiple Coulomb Scattering method in the OPERA lead emulsion target, *New J.Phys.* 14 (2012) 013026. (査読有)
- ④ N. Agafonova, K.Niwa, M.Nakamura, et al., Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment., *New J.Phys.* 13 (2011) 053051. (査読有)
- ⑤ T. Yoshioka, J. Yoshida and K. Kodama, Sub-micron accurate track navigation method ‘Navi’ for the analysis of Nuclear Emulsion., *JINST* 6 P03001. (査読有)
- ⑥ N. Agafonova, K.Niwa, M.Nakamura, et al., Observation of a first $\nu \tau$ candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam., *Phys.Lett.* B691, 138-145(2010). (査読有)
- ⑦ N. Naganawa, K. Kuwabara, Long-term characteristics of nuclear emulsion., *JINST*, 5, P02006 (2010). (査読有)
- ⑧ T. Fukuda, K. Morishima, T. Nakano, et al., The analysis of interface emulsion detector for the OPERA experiment in JAPAN scanning facility., *JINST*, 5, P04009 (2010). (査読有)
- ⑨ M. Agafonova, K.Niwa, M.Nakamura, et al., Measurement of the atmospheric muon charge ratio with the OPERA detector., *Eur.Phys.J.*, C67, 25-37 (2010). (査読有)

- ⑩ R. Acquafredda, K.Niwa, M.Nakamura et al.}, The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam., JINST. 4, P04018 (2009). (査読有)
- ⑪ A. Anokhina, N. Naganawa, Ydul {K. Niwa}, M. Nakamura, et al., Study of the effects induced by lead on the emulsion films of the OPERA experiment, JINST. 3, P07002 (2008). (査読有)
- ⑫ A. Anokhina, A. Ariga, K. Niwa, M. Nakamura, et al., Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment, JINST. 3, P07005 (2008). (査読有)
- ⑬ K. Kodama, T. Furukawa, K. Niwa, M. Nakamura, et al., Final tau-neutrino results from the DONuT experiment, Phys. Rev. D78, 052002 (2008). (査読有)
- ⑭ E. Eskut, *O. Sato, Ydul {K. Niwa}, M. Nakamura, et al., Final results on ν_{μ} to ν_{τ} oscillation from the CHORUS experiment, Nucl. Phys. B793, 326-343 (2008). (査読有)
- ⑮ R. Acquafredda, K. Niwa, M. Nakamura et al., First events from the CNGS neutrino beam detected in the OPERA experiment, New J. Phys. 8 (2006) 303. (査読有)

[学会発表] (計 43 件)

- ① Status of the OPERA Experiment, Speaker: Kaname HAMADA, NEW TRENDS IN HIGH-ENERGY PHYSICS 2011/ 09/03-10 Alushta Crimea, Ukraine.
- ② Status and results from the OPERA experiment, Speaker: Tsutomu FUKUDA, 11th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN10), 2010/12/13-16 Toyama, Japan.
- ③ Status and results from OPERA, Speaker: SATO Osamu, Neutrino 2010, 2010/06/14-19 Athens, Greece.
- ④ Status of the OPERA Experiment, Speaker: Junya YOSHIDA, Miami2009, 2009/12/15-20 at Lago Mar Resort, Fort Lauderdale, Florida, USA. Software Awards (MacKichan Software) 受賞}
- ⑤ Double beta experiment using current nuclear emulsion technology, Speaker: M. Nakamura, Japan-US seminar on "Double Beta Decay and Neutrinos", 2009/10/13-17 at Hawaii's Big Island, USA}
- ⑥ Search for numu \rightarrow nutau appearance in OPERA, Speaker: Seigo Miyamoto, XXIX

- PHYSICS IN COLLISION, 2009/8/30-9/2 at Kobe, Japan.
- ⑦ The Nuclear Emulsion Technology and the Analysis of the OPERA Experiment Data, Speaker: Tsutomu FUKUDA, DPF2009-APS, 2009/07/26-31 at Wayne State University, Detroit, MI, USA.
- ⑧ Emulsion analysis in the OPERA experiment, Speaker: Naotaka Naganawa, Topics in Astroparticle and Underground Physics, TAUP2009, 2009/07/01-05 at LNGS, Italy.
- ⑨ The OPERA Experiment status, Speaker: Osam Sato, 16th YKIS Conference Progress in Particles Physics 2008
- ⑩ Current Status of The OPERA Experiment, Speaker: Kunihiro Morishima, the NNN08 International Workshop on Next Nucleon decay and Neutrino detectors, Paris Diderot University, Thursday 11 September 2008.
- ⑪ OPERA 検出器によるニュートリノの研究, 発表者: 中村光廣, 2011 年度 日本写真学会秋季研究発表会, 日時: 2011 年 12 月 5 日(月), 京都教育文化センター.
- ⑫ 原子核乾板を用いた中性子検出 技術の開発, 発表者: 森島邦博, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/09/16-19, 弘前大学.
- ⑬ ニュートリノ振動実験 OPERA の現状, 発表者: 濱田要, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/09/16-19, 弘前大学.
- ⑭ ニュートリノ振動実験 OPERA における崩壊事象の探索, 発表者: 中塚裕司, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/09/16-19, 弘前大学.
- ⑮ ニュートリノ振動実験 OPERA における Brick の選び出しと反応点探索バイアス, 発表者: 大村拓也, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/09/16-19, 弘前大学.
- ⑯ ニュートリノ振動実験 OPERA の現状, 吉田純也, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010/09/11-14, 九州工業大学.
- ⑰ ニュートリノ振動実験 OPERA における崩壊事象の解析, 濱田 要, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010/09/11-14, 九州工業大学.
- ⑱ ニュートリノ振動実験 OPERA における電磁成分の解析, 北川暢子, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010/09/11-14, 九州工業大学.
- ⑲ ニュートリノ振動実験 OPERA におけるニュートリノ反応から出た核破砕片の研究, 石黒勝己, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010/09/11-14, 九州工業大学.
- ⑳ リフレッシュにより長期保管後の再生・使用が可能になったエマルジョン, 長縄

- 直崇, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/20-23, 岡山大学.
- ②① ニュートリノ振動実験 OPERA の現状報告, 森島邦博, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/20-23, 岡山大学.
- ②② ニュートリノ振動実験 OPERA のニュートリノ反応点探索, 福田努, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/20-23, 岡山大学.
- ②③ ニュートリノ振動実験 OPERA のタウニュートリノ反応探索, 佐藤 修, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/20-23, 岡山大学.
- ②④ ニュートリノ振動実験 OPERA の現状, 長縄直崇, 日本物理学会 2009 年秋季大会での発表, 2009/09/25-28, 熊本大学.
- ②⑤ ニュートリノ振動実験 OPERA の解析 I, 福田努, 日本物理学会 2009 年秋季大会での発表, 2009/09/25-28, 熊本大学.
- ②⑥ ニュートリノ振動実験 OPERA の解析 II, 野々山芳明, 日本物理学会 2009 年秋季大会での発表, 2009/09/25-28, 熊本大学.
- ②⑦ 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA 現状報告, 佐藤 修, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009/03/27-30, 立教大学.
- ②⑧ 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA におけるカウンターから ECC への繋ぎ, 酒谷佳紀, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009/03/27-30, 立教大学.
- ②⑨ 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA における「原子核乾板全自動解析システム」, 森島邦博, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009/03/27-30, 立教大学.
- ③⑩ 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA におけるニュートリノ反応点探索, 吉田純也, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009/03/27-30, 立教大学.
- ③⑪ OPERA 実験におけるニュートリノ反応により生成された荷電粒子の分析, 濱田要, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009/03/27-30, 立教大学.
- ③⑫ 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA における崩壊事象の探索, 吉岡哲平, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009/03/27-30, 立教大学.
- ③⑬ エマルションハイブリッド望遠鏡によるガンマ線観測計画: 準備状況報告, 高橋覚, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008/03/23-26, 近畿大学.
- ③⑭ 加速器ニュートリノ実験 PEANUT における反応解析, 北川暢子, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008/03/23-26, 近畿大学.
- ③⑮ 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA の解析状況, 有賀 昭貴, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008/03/23-26, 近畿大学.
- ③⑯ 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA 現状報告, 和山正志, 日本物理学会第 63 回年

- 次大会, 2008/03/23-26, 近畿大学.
- ③⑰ OPERA の物理, (宇宙線・宇宙物理, 素粒子実験, 実験核物理合同シンポジウム), 中村光廣, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008/03/23-26, 近畿大学.
- ③⑱ 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA の現状, 有賀, 日本物理学会春季大会, 2007/03/25-28, 首都大学東京.
- ③⑲ OPERA 実験・PEANUT 実験での ECC の解析, 福田, 日本物理学会春季大会, 2007/03/25-28, 首都大学東京.
- ④① ニュートリノ振動実験 OPERA における超高速飛跡読取装置 S-UTS によるスキューミング, 森島, 日本物理学会春季大会, 2007/03/25-28, 首都大学東京.
- ④② 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA における CS 検出器の性能評価, 和山, 日本物理学会春季大会, 2007/03/25-28, 首都大学東京.
- ④③ J-PARC でのニュートリノ実験に向けた原子核乾板によるニュートリノ事象のノンバイアス解析方法の開発, 野々山, 日本物理学会春季大会での発表, 2007/03/25-28, 首都大学東京.
- ④④ OPERA film における, 金沈着現象を用いた Li, Be, B, C イオンの飛跡の同定, 久保田, 日本物理学会秋季大会, 2006/9/20-23, 奈良女子大学.

〔図書〕 (計 1 件)

- ① ニュートリノ問題に終止符を打つ、「宇宙史を物理学で読み解く」-素粒子から物質・生命まで, 中村光廣、中野敏行 著、福井康雄監修、2010 年 5 月、名古屋大学出版会.

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

2006 年～2009 年

丹羽公雄 (NIWA KIMIO)

名古屋大学・大学院・理学研究科・教授

研究者番号: 60113445

2010 年～2011 年

中村光廣 (NAKAMURA Mitsuhiro)

名古屋大学・現象解析研究センター・准教授

授

研究者番号: 90183889

(2)研究分担者

中村光廣 (NAKAMURA Mitsuhiro)
名古屋大学・大学院・理学研究科・准教授
研究者番号：90183889

中野敏行 (NAKANO Toshiyuki)
名古屋大学・大学院・理学研究科・助教
研究者番号：50345849

星野 香
名古屋大学・大学院・理学研究科・准教授
研究者番号:70022738

青木 茂樹
神戸大学・大学院・人間発達環境学研究科・教授
研究者番号:80211689