

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02085

研究課題名(和文) オペラ検出器によるニュートリノの研究 -総括と宇宙線事象解析-

研究課題名(英文) Study of Neutrino by OPERA experiment -Summary and study on cosmic-ray event-

研究代表者

中村 光廣 (NAKAMURA, Mitsuhiro)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：90183889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 24,400,000円

研究成果の概要(和文)： OPERA実験は原子核乾板を用いてニュートリノ振動で現れたタウニュートリノを検出して、ニュートリノ振動現象のひいてはニュートリノ質量の有無の最終検証を行う実験である。2000年から検出器の準備を開始し、2006年～2012年にビーム照射、その後解析を継続し、2015年に第五例目のタウニュートリノ反応を検出、ニュートリノ振動の存在に関しての統計的有意度はいわゆる発見のレベル5.1 に到達した。2016年度以降は、タウニュートリノとバックグラウンドの境界に位置するボーダー反応の解析を進め、先の5例を含めた計10例(バックグラウンド期待値 $2.0 \pm 0.4$ )で統計的有意度6.1 を達成した。

研究成果の概要(英文)： OPERA is an experiment to confirm the existence of neutrino oscillation, i.e. existence of neutrino mass, by detecting tau neutrino appearance. From 2000, we started the detector and beam line construction, did beam exposure from 2006 to 2012, have been performing event analysis until today. In 2015, we detected the fifth event and reached to the statistical significance of 5.1 level meaning the discovery level. From 2016, by applying looser cut and including the boarder events, the signal number reaches to 10 events with the expected background of  $2.0 \pm 0.4$ . The reached significance level is 6.1 . OPERA has finished the main analysis by this paper although continuing technological R&D using real events for electron neutrino detection and so on for future neutrino experiments.

研究分野：素粒子物理学実験

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

ニュートリノの研究は日本の研究者がその独創性を大いに発揮して来た研究領域である。ニュートリノ振動の理論的予言は名古屋大学の牧・中川・坂田博士らにより世界に先駆けてなされ(1962年)、またその最初の実験的兆候は神岡の実験によって、大気ミューニュートリノ( $\nu_\mu$ )の減少としてとらえられた(1994年)。長基線ニュートリノ振動実験 OPERA は、ニュートリノ振動で現れるタウニュートリノ( $\nu_\tau$ )をとらえることにより、その直接的な証拠とするための実験である。

我々はこの流れとは独立に、ニュートリノ振動の研究を推進してきた。90年代初頭、宇宙のダークマターとして $\nu_\tau$ が注目され、原子核乾板を用いた短基線ニュートリノ振動実験 CHORUS を立案し、1994年から実験を行なったが、 $\nu_\mu$ から $\nu_\tau$ への振動は検出できなかった。並行して行ったのが原子核乾板の $\nu_\tau$ 検出の能力を示すための DONUT 実験であり、ビームにチャーム粒子の崩壊に起因する $\nu_\tau$ を含むプロンプトニュートリノビームを用い、これを鉄板と原子核乾板からなる標的(ECC)に照射し、 $\nu_\tau$ の世界初の検出に成功した。

これら日本が主導してきた成果(神岡の実験、CHORUS、DONUT)をもとに、神岡の結果が指し示す振動パラメータ領域に的を絞り、 $\nu_\tau$ の出現を検出する事によりニュートリノ振動の有無に対して明確な答えを与えようというのが OPERA 実験である。2000年に提案、2008年からビーム照射を行ない2010年に最初の $\nu_\tau$ 反応1例、2014年には4例目の反応の検出に成功したが、その存在を言い切るにはもう一步の状態であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、OPERA 実験の解析を継続推進し、最大限の統計でもってニュートリノ振動の有無に答えを与えることにあった。また電子ニュートリノへの振動など OPERA 実験で出来るニュートリノ振動の解析を完了させ、OPERA 実験で出しようるデータを絞り尽くす事も目的の一つであった。

### 3. 研究の方法

原子核乾板は $\nu_\tau$ を明確に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原子核乾板技術が不可欠であった。



図1 OPERA 検出器(写真)

OPERA 検出器(図1)は、はがき大の鉛板(1mm厚)56枚と、OPERA フィルムと呼ばれる原子核乾板57枚を積層した通称 ECC を15万個使用し、標的的重量として1250トンを実現している。ニュートリノ反応は主に ECC 中の鉛板で起こり、発生した荷電粒子中にタウ粒子の崩壊候補を探索することで $\nu_\tau$ 反応の探索を行なう。

ニュートリノ反応が起こった ECC の同定は、TT と呼ばれるシンチレーションカウンターのヒットパターンを用いて行う。反応が含まれる確率の高い ECC を取り出し、ECC 最下流に付いている取り外し可能な CS と呼ばれる原子核乾板で、ニュートリノ反応で発生した荷電粒子の飛跡を探索し、ニュートリノ反応点が含まれると判断できる飛跡が見つかる本体の ECC を現像して、検出された飛跡群の上流への追跡を行い、反応点へたどり着く。

反応点の解析は、反応点へのミュー粒子や電子などの付随の有無、崩壊事象の有無、崩壊事象がある場合は、崩壊点への核破砕片の付随の有無、崩壊で発生した娘粒子の運動量、崩壊角、崩壊までの飛程などで $\nu_\tau$ とバックグラウンド事象であるチャーム粒子やハドロン二次反応との識別を行う。ちなみに運動量の測定にはサンドイッチしている鉛板での多重電磁散乱を用いている。

### 4. 研究成果

2014年度までに4例の明快な事象を検出し統計的な有意性で $4.2\sigma$ に到達していたが、本基盤研究開始の初年度(2015年度)に第5例目の事象の検出を報告する事が出来、統計

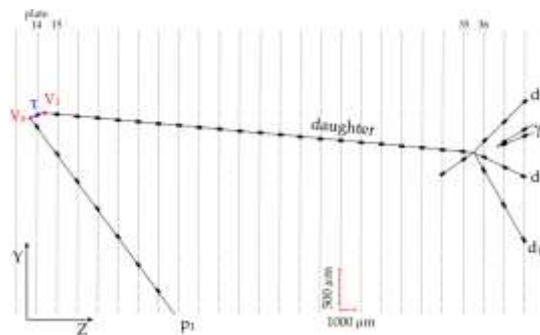


図2 第5例目のタウニュートリノ反応

的有意性 $5.1\sigma$ のいわゆる Discovery のレベルに到達した。

図2にこの第5例目の候補を示す。発生点から崩壊点までのタウ粒子の飛程は $630 \pm 30 \mu\text{m}$ 、崩壊角は $90 \pm 2\text{mrad}$ 、崩壊の娘粒子の運動量はクーロン多重散乱で $11+14-4\text{GeV}/c$ と測定され、崩壊の横運動量も $1.0+1.2-0.4\text{GeV}/c$ となり、 $\nu_\tau$ 反応点から放出される $\tau$ レプトンの崩壊と無矛盾であった。また娘粒子は ECC 下流で核破砕片を伴う二次反応を引き起こしておりハドロンであると同定された。

同年に、東大宇宙線研の SK グループ梶田博士らにノーベル賞が授与された。ノーベル賞受賞理由の解説には、これら OPERA の結果

も参照されており、ニュートリノ振動の存在検証において、期待された役割を果たしたと言っよう。

2016、17年度は、明快な $\nu_\tau$ 反応を選別するために付けていた諸条件を緩和し、バックグラウンド反応との境界に位置する崩壊候補まで含めた振動解析を行った。

この結果10例の $\nu_\tau$ 事象を検出(BG含有推定値 $2.0 \pm 0.4$ )、統計的有意性にして $6.1\sigma$ に到達した。この10例のVisible Energy分布を図3に示す。

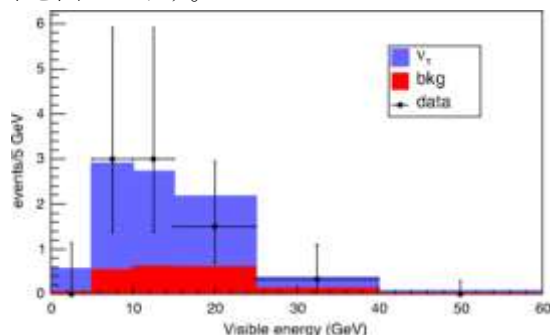


図3 検出された $\nu_\tau$ 反応のVisible Energyの分布

またこれら反応を用いて推定した振動パラメータの一つ質量差は、

$|\Delta m_{23}^2| = (2.7 + 0.7 - 0.6) \times 10^{-3} \text{eV}^2$  (68% C.L.) ( $\sin^2 2\theta_{23} = 1$ を仮定)となり、消滅法で求められている値、 $2.50 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ と無矛盾であった。

また振動パラメータ $\sin^2 2\theta_{23} = 1$ かつ $|\Delta m_{23}^2| = 2.50 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ を仮定して求めた $\nu_\tau$ の反応断面積の平均は $5.1 + 2.4 - 2.0 \times 10^{-36} \text{cm}^2$ であり、期待値 $4.29 \pm 0.04 \times 10^{-36} \text{cm}^2$ と無矛盾であった。

検出したOPERAのニュートリノ反応数は5603反応であり、電子ニュートリノ反応解析ならびにその技術開発など今後のニュートリノ研究に不可欠な研究開発を継続しているが、本基盤研究の最終年度である2017年度でグループとしての主要解析は終了した。

OPERA実験は日本の原子核乾板技術無くしてなしえなかった実験であり、これまでに受けた多くの科学研究費やご支援により、我々に期待された役割を果たすことが出来た。これらのご支援に対して、学界の諸兄、文部科学省、納税者の皆様に心より感謝を申し上げます。

## 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：以下のOPERA Collaborationには研究代表者、分担者、連携者、協力者全員含まれる。)

[雑誌論文] (計 3 件)

1) Final results of the OPERA experiment on  $\nu_\tau$  appearance in the CNGS beam

OPERA Collaboration (N. Agafonova et al.). Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.21, 211801 DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.211801

2) Study of charged hadron multiplicities in charged-current neutrino-lead interactions in the OPERA detector  
OPERA Collaboration (N. Agafonova et al.). Eur.Phys.J. C78 (2018) no.1, 62 DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-5509-y

3) Discovery of  $\tau$  Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment  
OPERA Collaboration (N. Agafonova et al.). Phys.Rev.Lett. 115 (2015) no.12, 121802

[学会発表] (計 8 件)

国際会議

1) ISETS' 15, 2015年11月27-29日, Nagoya 1-1) Result of OPERA Experiment. N.

Kitagawa

1-2)  $\Delta m_{23}^2$  Measurement in OPERA.

T. Hayakawa

1-3) Charm to electron decay event in OPERA T. Matsushita

2) Meeting of the Division of Particle and Fields of the American Physical Society, University of Michigan America, Aug. 4 - Aug. 8 2015

Results from the OPERA experiment at the CNGS beam. T. Hayakawa

3) 5th Workshop on Flavour Symmetries and Consequences at Colliders (FLASY 2015) 29 Jun - 02 Jul 2015. Manzanillo, Colima, Mexico

Results from the OPERA experiment at the CNGS beam. K. Ishiguro

国内学会

1) 日本物理学会年次大会、2016年3月19-22日、東北学院大学、仙台

1-1) ニュートリノ振動実験 OPERA における飛跡読取装置 HTS を用いた検出効率評価および $\Delta m_{23}^2$ 測定。早川友博

1-2) 加速器ニュートリノ実験 PEANUT の反応解析。北川暢子

2) 日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学 2015 年 9 月 25-28 日

2-1) ニュートリノ振動実験 OPERA の現状報告。佐藤修

2-2) ニュートリノ振動実験 OPERA における崩壊事象探索。石黒勝己

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

受賞: 日本物理学会第 21 回論文賞 (2016 年)  
対象論文

Observation of tau neutrino appearance in  
the CNGS beam with the OPERA  
experiment, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014,  
101C01 (2014)

ホームページ等

名古屋大学 F 研究室ホームページ

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村光廣 (NAKAMURA Mitsuhiro)

名古屋大学・エコトピア科学研究所

・教授

研究者番号: 90183889

### (2) 研究分担者

中野敏行 (NAKANO Toshiyuki)

名古屋大学・大学院・理学研究科・講師

研究者番号: 50345849

佐藤 修 (SATO Osamu)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・助教

研究者番号: 20377964

小松雅宏 (KOMATSU Masahiro)

名古屋大学・教養教育院: 准教授

研究者番号: 80345842

### (3) 連携研究者

青木茂樹 (AOKI Shigeki)

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

渋谷 寛 (SHBUYA Hiroshi)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号: 40170922