

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901
研究種目：基盤研究(A) (一般)
研究期間：2012～2014
課題番号：24244027
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

研究課題名(英文) Neutrino research by OPERA detector

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) 30,000,000円

研究成果の概要(和文)： これまでに振動で現れた4例のタウニュートリノ反応を検出し、統計的有意性4.2でミューニュートリノからタウニュートリノへの振動の存在を確立した。またそのうちの1例は崩壊の娘粒子である μ 粒子の電荷をマイナスと同定でき、正タウニュートリノ反応であると同定し、98%の確率で確かに正ミューニュートリノが正タウニュートリノへ振動している事を確認した。電子ニュートリノ事象についても探索を行ない、2年間の照射統計を用いて19事象を検出(期待値21.3事象)、混合角 θ_{13} に制限を与えると共に、LSND実験がクレームしている電子ニュートリノへの振動のパラメータ領域について制限を与えた。

研究成果の概要(英文)： Until today, four clear tau neutrino events have been detected. The existence of the neutrino oscillation, i.e. muon-neutrino to tau-neutrino, has been confirmed with the statistical significance of 4.2sigma. In one of the detected event, the decay daughter was identified as muon with minus charge. This means that the event is tau-neutrino event not the anti-tau-neutrino event. By this fact, it is confirmed with 98% probability that muon-neutrino oscillate to tau-neutrino (not anti-tau neutrino). The search of electron-neutrino has been tried and 19 events was identified with 21.3 expectation. This result gave an upper limit on the oscillation parameter θ_{13} and gave limitation on the oscillation parameter region of LSND claimed oscillation.

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 出現法 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研究者の独創性発露の場である。そ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(1962年)、またその最初の実験的兆候は神岡の実験グループによって、大気ミューニュートリノ(ν_μ)の減少としてとらえられた(1994年)。OPERAは、変身して現れるタウニュートリノ(ν_τ)をとらえることにより、その直接的な証拠を与えるための実験である。

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 ν_τ が注目され、我々は原子核乾板を用いた短基線ニュートリノ振動実験CHORUS実験(CERN WA95)を1994年から行なったが、 ν_μ から ν_τ への振動は検出できなかった。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。

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、 ν_τ 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出来るOPERA実験を2000年に提案、2008年からビーム照射を行ない2010年に最初の ν_τ 反応1例の検出に成功したが、その存在を言い切るには統計的にまだ不十分な状態であった。

2. 研究の目的

十分な数の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

原子核乾板は ν_τ 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原子核乾板技術が不可欠であった。

OPERAの検出器(図1)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原子

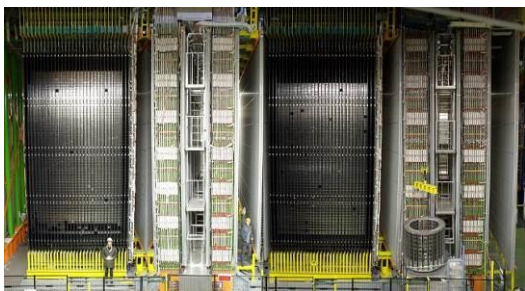


図1 OPERA 検出器(写真)

核乾板標的(ECC、重さ8.3kg)を15万個積み上げたものである。

ニュートリノはECC中の鉛板で主に反応を起こし、発生した荷電素粒子の反応点への収束ぐあいを原子核乾板で調べて ν_τ 反応の探索を行なう。

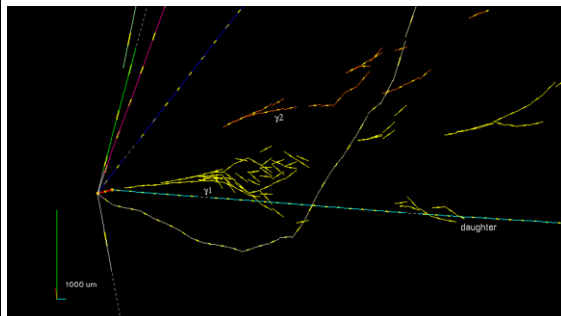


図2 OPERAの1st ν_τ

図2にOPERAがとらえた最初の ν_τ 反応を示す。発生した τ 粒子(反応点から出ている赤色で示した短い飛跡)は、約1mm飛んで崩壊し、1本の荷電粒子と、2本のガンマ線に崩壊している。飛跡の折れ曲がりの角度は $41 \pm 2 \text{ mrad}$ 、ニュートリノ反応点に対するインパクトパラメータは $55 \pm 4 \mu\text{m}$ であり、それぞれmradと μm の切れ味を持つ。10メートルサイズの検出器の中の原子核乾板中に、このミクロンサイズの反応点を同定する作業が、OPERAの原子核乾板の解析である。

そのために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のシンチパー位置検出器(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起こったECCを同定する。対応するECCを取り出し、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は平均 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 程度の面積を反応当たりに読み出している。この読み出しのために現在使用しているのが、我々が発明し開発してきた自動飛跡読取装置である。読み出し能力毎時 72cm^2 のSUTS5台と2014年度からは毎時 4500cm^2 で運用できるHTSを使用して解析を行ってきた。

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、本体の解析を行なう。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、反応点まで追上げる。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 ν_τ 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、 τ 粒子の崩壊を探索する。

4. 研究成果

ニュートリノビーム照射は2008年～2012年の5年間にわたり行い、400GeV陽子 1.8×10^{19} POTを照射、ニュートリノ事象を蓄積した。

2012年に第2 ν_τ イベント、2013年に第3イベント、2014年に第4イベントの検出に成功した。



図3 2nd ν_τ イベント。 τ の三体崩壊。

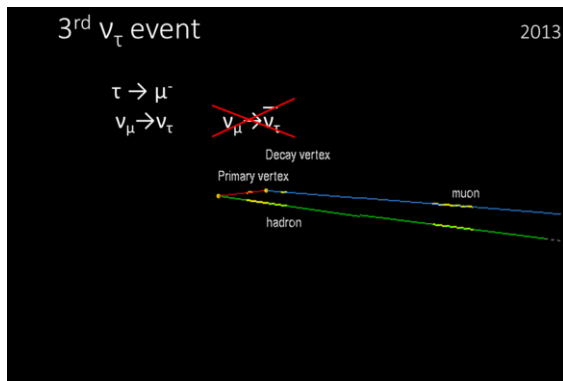


図4 3rd ν_τ イベント。 $\tau^- \rightarrow \mu^-$ 崩壊。

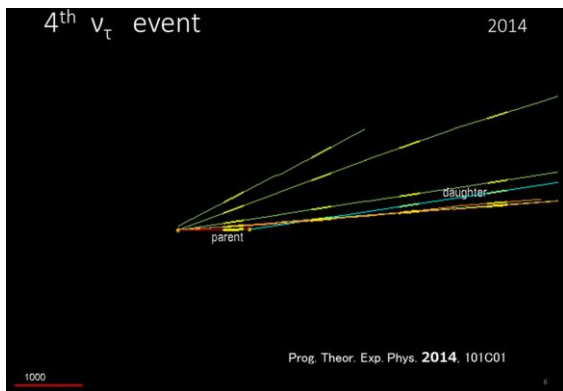


図5 4th ν_τ イベント

このうち3rdイベントは、娘粒子が μ 粒子

と同定できそのサインも-と決定でき、確かに正ミューニュートリノが正タウニュートリノに振動していることを世界で初めて確認した。

検出数の統計的な有意性は、第3イベント検出時 3.4σ でいわゆる Evidence レベル、第4イベントで 4.2σ で Observation レベルに到達し、実験提案書で目的とした 4σ を越えることができた。

後者は2014年春の時点の4685反応に対する探査結果で、2008～2012年のランで記録された μ 粒子が付随しない 0μ イベント(大半が ν_μ の中性カレントイベント)979と運動量で15GeV以下の μ 粒子が付随する 1μ イベント3706イベントが含まれる。2008、2009年のランに対しては、候補となる第2ECCまでを、2010～2012年のランに対しては第1候補のみを探査対象とした。この中に予想された背景事象数は、チャーム事象を見誤るもの 0.198 ± 0.040 、ハドロンの二次反応を見誤るもの 0.021 ± 0.006 、 μ 粒子の大角度散乱を見誤るもの 0.014 ± 0.007 の計 0.233 ± 0.041 であり、観測した4例全てを背景事象で説明できる確率(p value)は 1.24×10^{-5} であり、統計的有意性にして 4.2σ に相当する。

振動パラメータは混合角 $\sin^2 \theta_{23}=1$ を仮定して $\Delta m_{23}^2=3.1[1.8-5.0]10 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ と求められ、消滅法で求められているパラメータと矛盾は無いものとなっている。

また電子ニュートリノに関しても探索を行ない、期待値21.3イベントに対し19イベ

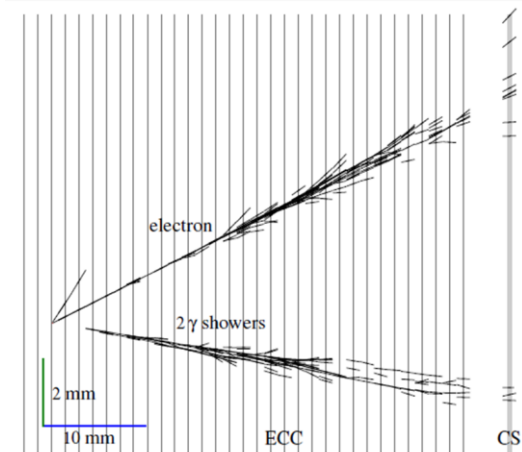


図6 検出した電子ニュートリノの反応の1例。反応点からの電子と反応で発生した π^0 からの電子-陽電子対2対が検出されている。

ントを得て、振動に上限をつけた。図7に検出された電子ニュートリノのエネルギー分布を示す。ほとんどがビームに最初から含まれるプロンプト電子ニュートリノである。

また図8に、LSNDが観測したとクレームしている振動領域に対する我々の制限をプロットする。この解析に使用していない2010～2012年の統計の解析は進行中である。

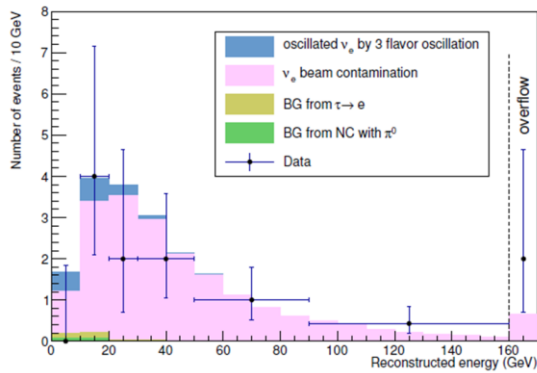


図 7 検出した電子ニュートリノのエネルギー分布。大半が最初からビームに含まれるプロンプト電子ニュートリノである。

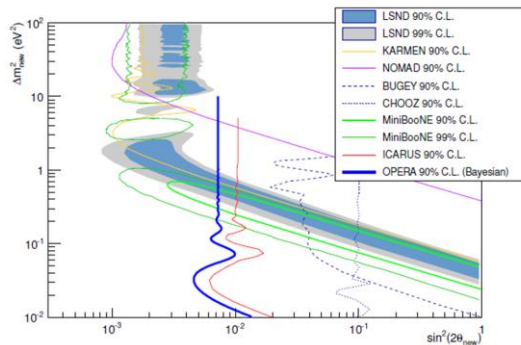


図 8 LSND 振動領域に対する制限。質量差の小さな領域は排除された。

以上 OPERA は実験提案書で目標とした 4σ を越え、さらなる高い統計的有意性での $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動の検証、またこれまで用いてきた ν_τ のタイトな条件を満たさなかったボーダーイベントを用いたより高い統計での振動パラメータの決定にむけて解析を続けている。

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 14 件)

*OPERA collaboration には研究代表者、分担者全員を含む。

以下は査読付き

- ① Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data
OPERA Collaboration (T. Adam, et al.). JHEP 1301 (2013) 153.
- ② Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam
OPERA Collaboration (N. Agafonova, et al.). New J.Phys. 14 (2012) 033017.
- ③ Comprehensive track reconstruction tool "NETSCAN 2.0" for the analysis of

the OPERA Emulsion Cloud Chamber
K. Hamada, et al. JINST 7 (2012) P07001.

- ④ New results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam
OPERA Collaboration (N. Agafonova, et al.). JHEP 1311 (2013) 036, JHEP 1404 (2014) 014.
- ⑤ Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam
OPERA Collaboration (N. Agafonova, et al.). JHEP 1307 (2013) 004, JHEP 1307 (2013) 085.
- ⑥ Development and utilization of "Plate Changer" system for neutrino interaction locations in OPERA emulsion target
J. Yoshida, T. Nakano, et al. JINST 8 (2013) P02009.
- ⑦ Development of an automated nuclear emulsion analyzing system
K. Morishima, K. Hamada, R. Komatani, T. Nakano (Nagoya U.), K. Kodama (Aichi U. of Education), Radiat. Meas. 50 (2013) 237-240.

- ⑧ Measurement of the TeV atmospheric muon charge ratio with the complete OPERA data set
OPERA Collaboration (N. Agafonova, et al.). Eur. Phys. J. C74 (2014) 7, 2933

- ⑧ Study of hadron interactions in a lead-emulsion target
Hirokazu Ishida, Mitsuhiro Nakamura, et al. PTEP 2014 (2014) 9, 093C01.

- ⑨ Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment

OPERA Collaboration (N. Agafonova, et al.). PTEP 2014 (2014) 10, 101C01

- ⑩ Procedure for short-lived particle detection in the OPERA experiment and its application to charm decays

OPERA Collaboration (N. Agafonova, et al.). Eur. Phys. J. C74 (2014) 8, 2986

- ⑪ Evidence for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment

OPERA Collaboration (N. Agafonova, et al.). Phys. Rev. D89 (2014) 5, 051102

以下は国際会議の Proceeding

- ⑫ Observation of a first ν_τ candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam
OPERA Collaboration (O. Sato (Nagoya U.) for the collaboration). Nucl. Phys. Proc. Suppl. 229-232 (2012) 38-42

- ⑬ Results from OPERA
OPERA Collaboration (Mitsuhiro Nakamura
 (KMI, Nagoya) for the collaboration).
 Nucl.Phys.Proc. Suppl. 235-236 (2013)
 112-114
- ⑭ OPERA Results
OPERA Collaboration (Osamu Sato (Nagoya
 U.) for the collaboration).
 Nucl.Phys.Proc. Suppl. 253-255 (2014)
 147-150

[学会発表] (計 44 件)

国際会議

- ① TAU 2012, The 12th International
 Workshop on Tau Lepton Physics
 Nagoya, Japan, 17-21 September, 2012
 1-1) Results from OPERA, SATO, Osamu
 1-2) Decay search of OPERA experiment,
 ISHIGURO, Katsumi
- ② Neutrino 2012, June 3-9 2012, Kyoto,
 Japan
 Results from OPERA, Mitsuhiro Nakamura
- ③ KMI International Symposium 2013
 Sakata-Hirata Hall, Nagoya University
 December 11-13, 2013
 Evidence for $\nu\mu \rightarrow \nu\tau$ oscillation by
 appearance mode from OPERA experiment
O. Sato
- ④ NNN13: International Workshop on Next
 generation Nucleon Decay and Neutrino
 Detectors
 11-13 November 2013, Kavli IPMU
 OPERA, NAGANAWA, Naotaka
- ⑤ 16th Lomonosov Conference on
 Elementary Particle Physics
 August 22-28, 2013, Moscow State
 University, Moscow, Russia
 The OPERA experiment, analysis status
 and recent results on muon-neutrino to
 electron-neutrino oscillations
 KITAGAWA Nobuko
- ⑥ Windows on the Universe 2013
 August 11-17, 2013, ICISE, Quy Nhon,
 Vietnam
 OPERA, Yuji Nakatsuka
- ⑦ FLASY13, Third Workshop on Flavor
 Symmetries, FLASY13, 1 - 5 July, 2013,
 Niigata, Japan
 OPERA: Current status and future
 prospects of long baseline neutrino
 oscillation experiments
 ISHIGURO katsumi
- ⑧ ICHEP 2014, 37th International
 Conference on High Energy Physics
 (ICHEP), 2-9 July 2014 VALENCIA
 Latest results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$
 oscillations from the OPERA experiment
Masahiro KOMATSU
- ⑨ XXX-th International Workshop on High
 Energy Physics, 23-27 June 2014, IHEP,

Protvino, Theoretical Division
 Recent results from OPERA, Takuya OMURA

国内学会

- ① 日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産
 業大学、2012/09/11-14
 1-1) ニュートリノ振動実験 OPERA における
 崩壊事象の解析、石黒勝己
 1-2) ニュートリノ振動実験 OPERA における
 $\nu\mu \rightarrow \nu e$ 振動解析、北川暢子
 1-3) OPERA 実験におけるニュートリノ速度
 測定、小松雅宏
 1-4) ニュートリノ振動実験 OPERA の解析状
 況、佐藤修
 1-5) ニュートリノ振動実験 OPERA の反応点
 探索バイアスの研究、白石卓也
 1-6) ニュートリノ振動実験 OPERA における
 ショートフライト崩壊事象探索、中塚裕
 司
- ② 日本物理学会 2012 年春季大会、関西学
 院大学、2012/03/24-27
 2-1) 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA に
 おける $\nu\mu \rightarrow \nu\tau$ Appearance 解析の現
 状、吉田純也
 2-2) 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA の
 ニュートリノ反応探索、小木曾康弘
 2-3) 長基線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
 2-4) 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA
 における電子ニュートリノ反応の解析、
 北川暢子
- ③ 日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大
 学、2013 年 9 月 20~23 日
 3-1) ニュートリノ振動実験 OPERA でのニ
 ュートリノ反応点探索、大村拓也
 3-2) ニュートリノ振動実験 OPERA の現状、
 石黒勝己
 3-3) ニュートリノ振動実験 OPERA におけ
 る崩壊事象探索、中塚裕司
 3-4) ニュートリノ振動実験 OPERA の最新
 結果、佐藤修
 3-5) ニュートリノ振動実験 OPERA におけ
 る $\nu\mu \rightarrow \nu e$ 振動解析、北川暢子
- ④ 日本物理学会 2013 年春季大会、第 68 回
 年次大会、2013/03/26-29
 4-1) ニュートリノ振動実験 OPERA の現状、
 長縄直崇
 4-2) ニュートリノ振動実験 OPERA におけ
 る崩壊事象探索 1、石黒勝己
 4-3) ニュートリノ振動実験 OPERA におけ
 る崩壊事象探索 2、中塚裕司
 4-4) $\bar{\nu}$ ニュートリノ振動実験 OPERA の最新
 結果、佐藤修
 4-5) $\bar{\nu}$ ニュートリノ振動実験 OPERA におけ
 るインターフェイス乾板での飛跡検出
 効率向上、白石卓也
 4-6) $\bar{\nu}$ ニュートリノ振動実験 OPERA におけ
 る反応点探索手法の改良、吉田純也
- ⑤ 日本物理学会 2014 年秋季大会、2014

- 年9月18～21日、佐賀大学
- 5-1)ニュートリノ振動実験 OPERA の現状
中塚裕司
- 5-2)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
- 5-3)OPERA 検出器による宇宙線事象解析
白石卓也
- 5-4)加速器ニュートリノ実験 PEANUT の反
応解析の現状、北川暢子
- ⑥日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学
湘南キャンパス、2014 年 3 月 27 日～30 日
- 6-1)ECC による低エネルギーニュートリノ
反応検出手法の開発、北川暢子
- 6-2)ニュートリノ振動実験 OPERA の現状、
大村拓也
- 6-3)ニュートリノ振動実験 OPERA における
崩壊事象探索、中塚裕司
- 6-4)ニュートリノ振動実験 OPERA の最新結
果、佐藤修
- ⑦日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大
学早稲田キャンパス、2015 年 3 月 21～24
日
- 7-1)ニュートリノ振動実験 OPERA の現状、
大村拓也
- 7-2)ニュートリノ振動実験 OPERA における
複数ブリック運動力学的解析の研究、中
塚裕司
- 7-3)OPERA 実験における BDT を用いたフィ
ルム間アライメントの改善、早川友博
- 7-4)加速器ニュートリノ実験 PEANUT の反
応解析、北川暢子

国内研究会

- ① 18th ICEPP Symposium、平成 24 年 2 月
19 日-22 日、長野県 白馬村岳美山荘
ニュートリノ振動実験 OPERA における崩壊
事象探索への CS の飛跡の活用、大村拓也
- ② 新学術領域研究 「ニュートリノフロン
ティア」研究会、2013 年 12 月 7 日(土) - 8
日(日)、クロス・ウェーブ府中
- 2-1) OPERA 実験、大村拓也
- 2-2) 原子核乾板を用いた低エネルギーニ
ュートリノ反応の研究 (PEANUT)、
北川暢子
- ③ 「ニュートリノフロンティアの融合と進
化」研究会 2013、平成 25 年 4 月 21 日(日)、
東京大学、小柴ホール
原子核乾板技術、中村光廣

〔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〕

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
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
- 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