

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25105001

研究課題名(和文)ニュートリノフロンティアの融合と進化

研究課題名(英文)Unification and Development of the Neutrino Science Frontier

研究代表者

中家 剛(Nakaya, Tsuyoshi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：50314175

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,900,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子から宇宙のスケールに渉る自然の各階層で展開する、世界最先端を走る日本のニュートリノ研究を融合し、ニュートリノを使った科学研究フロンティアを進化・発展させてきた。ニュートリノ振動の研究で3世代混合パラダイムを確立し、ニュートリノの粒子・反粒子対称性(CP対称性)の破れの測定の展望を開いた。T2K実験で、CP対称性が大きく破れていることを示唆する結果を報告した。IceCube実験で高エネルギー宇宙ニュートリノ観測技術を確立し、TeVを超える高エネルギー宇宙ニュートリノを発見した。総括班は企画と調整を効率的に行い、上記の発見と目標達成に向け、各計画研究班の研究活動を積極的にサポートした。

研究成果の概要(英文)：We develop Neutrino Science Frontier by unifying Japanese neutrino research projects. Japanese neutrino research is well advanced in the world in the scale of elementary particle to cosmology. Three generation paradigm of neutrino oscillations is established, and explore the possibility to measure the symmetry between a particle and the anti-particle in neutrinos (CP symmetry). The T2K experiment reports a hint of large CP violation. The IceCube experiment establishes the observation technology of cosmic neutrinos, and discovers the high energy cosmic neutrinos beyond TeV energy. The leading group efficiently makes the plan and strategy under the good management, and supports the activity of each research group toward the discovery and the achievement.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子 宇宙 加速器 原子炉 原子核

1. 研究開始当初の背景

日本におけるニュートリノ研究は、小柴博士のノーベル賞受賞につながった 1987 年の超新星ニュートリノ観測、ニュートリノ質量の発見(2015 年度に梶田博士がノーベル賞受賞)、太陽ニュートリノ問題の解決、地球反ニュートリノの発見、3 世代間ニュートリノ混合の確立、宇宙起源ニュートリノの発見、と世界第一級の成果を続々とあげてきた。発見されたニュートリノの質量が他の素粒子よりもずっと小さいことは、ニュートリノが他の素粒子とは大きく異なる性質をもつことを示唆している。その起源として、大統一理論を見据えたシーソー機構、超弦理論と余剰次元、複合粒子仮説等、様々な可能性が考えられている。

起源の解明に向け、「加速器ニュートリノを使った素粒子、原子核実験」、「原子炉反ニュートリノを使った素粒子実験」、「大気ニュートリノと太陽ニュートリノの観測」等で、ニュートリノそのものの性質(質量、混合、粒子と反粒子間の CP 対称性)が研究されている。同時に、「地球反ニュートリノ、太陽ニュートリノ、宇宙ニュートリノ等の自然ニュートリノ観測」により、自然の様々な理解(地球内部の熱発生源の解明、太陽の核融合燃焼メカニズム確立、宇宙線起源の解明等)も進んでいる。さらに理論研究において、牧・中川・坂田によるニュートリノ振動の提唱、柳田によるニュートリノ質量の理解(シーソー機構)、柳田・福来によるニュートリノ起源による物質優勢宇宙論模型の提唱(レプトジェネシス)等、ニュートリノが素粒子・宇宙の深部を探るユニークな手段となっている。

ニュートリノの基本性質を究明し自然の深部を理解するためには、加速器、原子炉、自然のニュートリノ源を組み合わせ、研究を総合的に進展させることがきわめて重要であると認識されている。

2. 研究の目的

素粒子から宇宙のスケールに渉る自然の各階層で展開する、世界最先端を走る日本のニュートリノ研究を融合し、ニュートリノを使った科学研究フロンティアを進化・発展させる。総括班の目的は、本領域内の 10 の計画研究班で展開する「ニュートリノの質量と混合の解明に向けた基礎研究」、「ニュートリノによる自然観測」、「ニュートリノ研究をベースとした技術応用」を有機的に結合させ、更に公募研究の活動も組み入れ、ニュートリノ研究の融合と進化を促進することである。

ニュートリノの基本性質を究明し自然の深部を理解するために、加速器、原子炉、自然のニュートリノ源を組み合わせ、研究を総合的に進展させる。3 世代間ニュートリノ混合が確立したことを受け、ニュートリノ振動の精密測定と CP の破れの発見を目指す。

それと共に、大気ニュートリノと宇宙ニュートリノの同時観測により、ニュートリノ天文学の新たな展開を目指す。総括班では企画と調整を行い、上記の発見・展開に向け、各計画研究班の研究活動が滞りなく進むようにサポートする。

3. 研究の方法

総括班は直接の研究をする組織ではないので、ここでは主に領域の運営方法について説明する。総括班がニュートリノ研究の世界的動向を先導することを目指し、領域代表者を中心とし全ての計画研究の代表が研究分担者として協力して領域の運営にあたる。総括班では、定期的に総括班会議を開き、次の活動を進める。

[1: 領域全体の研究方針の策定と評価] 各計画研究班と連携し、国内外の研究動向を調査し、研究方針を策定する。研究計画班の進展状況を評価し、研究が円滑に進むようサポートしていく。

[2: 研究計画の間(+公募研究)の連携推進] 各研究計画班(+公募研究)が情報を共有できるように、ホームページを立ち上げる。毎年、領域研究会を開催する。

[3: 研究成果発表の促進と若手研究者支援] 領域研究会を通じ、最新結果を国内外に発信する。海外の国際会議へ研究者(特に若手)を派遣し、日本での成果を発表する。ホームページにより、随時最新の成果を発信する。

[4: 若手研究者育成] 若手研究者育成の一環として、国際スクールに講師を派遣する。また、国内向けのスクールを開催する。

[5: アウトリーチ活動] 一般向けの講演、中高生を対象とした出前講義・実験、広報、Web を通じたアウトリーチ活動を行う。各大学・研究機関の社会連携室・広報室と協力して、広く情報を発信していく。

4. 研究成果

総括班は直接の研究をする組織ではないので、領域の成果を総括班の研究成果として報告する。

- ニュートリノ振動の研究で 3 世代混合パラダイムを確立し、ニュートリノの粒子・反粒子対称性(CP 対称性)の破れの測定の展望を開いた。T2K 実験が、CP 対称性が大きく破れていることを 95% の有意度で示唆する結果を世界に先駆けて報告した。また、 $\sin^2 \theta_{23}$ を 10% の精度で測定することに成功した。Double Chooz 実験では $\sin^2 \theta_{13} = 0.09 \pm 0.03$ と精密に測定した。
- Super-Kamiokande 実験で大気ニュートリノの観測を通して、第四のニュートリノの混合に対し $|U_{\mu 4}|^2 < 0.041$, $|U_{\tau 4}|^2 < 0.18$ と新たに制限をつけ、ローレンツ不変性を破るニュートリノ振動パラメータに対しこれまでより 7 けた強い制限を与えた。質量階層構造決定感度の改善を行い、正

順階層構造を示す結果(2 レベル)を得た。

- IceCube 実験で高エネルギー宇宙ニュートリノ観測技術が確立し、TeV を超える高エネルギー宇宙ニュートリノを発見した。
- ニュートリノを観測する実験技術を応用し、ニュートリノを使った原子炉モニター、宇宙線ミュオントモグラフィ法によるピラミッドや氷河の透視を可能とした。開発した原子核乾板を使った透視によってクフ王・ピラミッド内部に新たな大空洞を発見し、考古学分野でも注目されている。
- 大統一理論のエネルギースケールを仮定する従来のシーソー機構に加えて、暗黒物質や物質・反物質非対称性の起源をも説明可能な新しいシーソー機構を提唱した。さらにミュオンの磁気能率のずれ、陽子の荷電半径異常、中間子系でのレプトン普遍性の破れなど、レプトンセクターに見られる綻びを包括的に説明する様々な理論を提案し、新物理の探索に大きく貢献した。
- ニュートリノ原子核反応において、2 万点に及ぶ核子標的の中間子生成反応データを解析した。その結果、 Λ 、 Σ 、 K などの中間子生成過程を包括的に記述する反応モデルを構築した。

5. 主な発表論文等

以下では、主な著者として各計画研究の研究代表を主に記し、分担者は紙面の制限のため省略した。

[雑誌論文](計 22 件)

“Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K”, T.Nakaya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett. 118, 151801, 2017, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.118.151801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.151801)

“Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5×10^{21} protons on target”, T.Nakaya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 96, 011102(R), 2017, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.96.011102](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.011102)

“Measurement of double-differential muon neutrino charged-current interactions on C8H8 without pions in the final state using the T2K off-axis beam”, T.Nakaya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 93 11, 112012, 2016, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.93.112012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.112012)

“Measurement of muon anti-neutrino oscillations with an accelerator-produced off-axis beam”, T.Nakaya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys.Rev.Lett.116.181801, 2016,

査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.181801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.181801)

“Measurement of the muon charged current quasi-elastic cross-section on carbon with the T2K on-axis neutrino beam”, T.Nakaya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 91, 112002, 2015, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.112002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.112002)

“Limits on sterile neutrino mixing using atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande”, T.Nakaya, M.Shiozawa 他 (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 91, 052019(2015). 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.052019](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.052019)

“Test of Lorentz Invariance with atmospheric neutrinos”, T.Nakaya, M.Shiozawa 他 (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 91, 052003(2015). 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.052003](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.052003)

“Atmospheric and Astrophysical Neutrinos above 1 TeV interacting in IceCube”, S.Yoshida et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. D 91 022001 (2015). 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.022001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.022001)

“Cosmic neutrino spectrum and the muon anomalous magnetic moment in the gauged L_μ - L_τ model”, T. Araki, F. Kaneko, Y. Konishi, T. Ota, J. Sato, T. Shimomura, Phys. Rev. D 91, 037301(2015). 査読有

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.037301](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.037301)

“Discrimination of dark matter models in future experiments”, T. Abe, R.Kitano, R. Sato, Phys. Rev. D91, 095004 (2015). 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.095004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.095004)

“Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, T.Nakaya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett, 112 P 61802, 2014, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.061802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.061802)

“Measurement of Neutrino Oscillation parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-axis Beam”, T.Nakaya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett, 111 卷 P211803, 2014, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.111.211803](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.211803)

“Improved measurement of the neutrino mixing angle θ_{13} with Double Chooz detector”, M.Kuze 他 (Double Chooz Collaboration), JHEP 1410, 086(2014). 査読有.

DOI: [10.1007/JHEP10\(2014\)086](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2014)086)

“ Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data ”, S.Yoshida et al.(IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. 113, 101101 (2014). 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.113.101101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.101101)

“ Development of High Sensitivity Nuclear Emulsion and Fine Grained Emulsion ”, M. Nakamura et al., Nucl. Phys. Proc. Suppl. 253-255, 216-217 (2014). 査読有.

DOI: [10.1016/j.nuclphysbps.2014.09.056](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2014.09.056)

[056](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2014.09.056)

“ Search for Cosmic Background Neutrino Decay ”, S. H. Kim et al., JPS Conf. Proc. 1, 013127 (2014). 査読有.

DOI: [10.7566/JPSCP.1.013127](https://doi.org/10.7566/JPSCP.1.013127)

“ LArIAT: Liquid Argon In A Testbeam ”, T.Maruyama et al., arXiv:1406.5560 [physics.ins-det] (2014). 査読無.

<https://arxiv.org/abs/1406.5560>

“ Nonadiabatic contributions to the neutrino oscillation probability and the formalism by Kimura, Takamura and Yokomakura ”, O. Yasuda, Phys. Rev. D 89, 093023(2014). 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.89.093023](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.093023)

“ Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam ”, T.Nakaya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev., D88 P32002, 2013, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.88.032002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.032002)

“ Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector ”, S.Yoshida et al.(IceCube Collaboration), Science 342, 1242856 (2013). 査読有.

DOI: [10.1126/science.1242856](https://doi.org/10.1126/science.1242856)

- 21 “ First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube ”, S.Yoshida et al.(IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. 111, 021103(2013). 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.111.021103](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.021103)

- 22 “ Nucleon resonances with a dynamical coupled-channels model N and \bar{N} reactions ”, H.Kamano, S.X.Nakamura, T.-S.H.Lee and T.Sato, Phys. Rev. C88, 035209(2013). 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevC.88.035209](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.88.035209)

[学会発表](計 14 件)

“ Liquid argon TPC for neutrino experiment ”, K.Sakashita, Asian Forum for Accelerator and Detector

2018, Jan. 2018. 2017.

“ A Status Report of J-PARC/T2HK/T2HKK ”, T.Nakaya, The International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (Lepton Photon 2017), 2017/8/7-12, Guangzhou, China.

“ Neutrino Physics from Particle Beam and Decay Experiments ”, T.Nakaya, EPS Conference on High Energy Physics, 2017/7/5-12, Venice, Italy.

“ Latest results from Double Chooz ”, M.Kuze, Neutrino Telescope, Venice, 13-17/Mar/2017.

“ Super-Kamiokande ”, M.Shiozawa, XVII International Workshop on Neutrino Telescope, Mar.13-17, 2017, Venice, Italy.

“ Analysis of bubble chamber data on neutrino-induced pion production off the deuteron ”, S. X. Nakamura, 11th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV region, June 25-30, 2017, Toronto, Canada

“ Strong CP problem on the lattice ”, R. Kitano, Johns Hopkins Workshop Series on Current Problems in Particle Theory Summer 2017, “ Beyond the Standard Model - Exploring the Frontier ”, July. 6, 2017, Budapest, Hungary.

“ Status and Prospect of Recent Neutrino Experiments ”, T.Nakaya, Invisibles 16 Workshop, 2016/9/12-16, Padova, Italy.

“ The Neutrino Experimental Program in the Years 2020-2040 ”, T.Nakaya, NuFact2016, 2017/8/21-27, ICISE, Quy Nhon, Vietnam.

“ Program of accelerator-based experiments in Japan ”, T.Nakaya, The Third International Meeting for Large Neutrino Infrastructures, 2016/5/30-6/1, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan.

“ Synergy of T2HK & DUNE ”, O.Yasuda, 3rd International Meeting on Large Neutrino Infrastructures, May 30-31, 2016, KEK, Japan.

“ What Neutrinos Tell about the Ultra-high Energy Universe ”, S.Yoshida, International Conference on Massive Neutrinos, Feb. 9-13, 2015, Nanyang Technological University, Singapore.

“ Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors for Cosmic Background Neutrino Decay Search ”, S.H.Kim, 2nd International Workshop on Superconducting Sensors

and Detectors (IWSSD2014), Nov. 5-8, 2014, Shanghai, China.
“Neutrino Program in Japan”,
T.Nakaya, ICFA Neutrino Panel, Asian Neutrino Community Meeting, 2013/11/13, Kashiwa, Japan.

〔図書〕(計 3 件)

鈴木厚人 監修(中家 剛 共著)「カミオカンデとニュートリノ」、丸善出版、1-178、2016 年、ISBN:4621300490。
中家 剛、「ニュートリノ物理：ニュートリノで探る素粒子と宇宙(基本法則から読み解く物理学最前線)」、共立出版、1-85、2016 年、ISBN:4320035291。
久世正弘、他「現代素粒子物理」、森北出版、256 ページ、2016 年、ISBN: 978-4-627-15581-7

〔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

<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nuffrontier/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中家 剛 (NAKAYA, Tsuyoshi)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：50314175

(2)研究分担者

久世 正弘 (KUZE, Masahiro)
東京工業大学・理学院・教授
研究者番号：00225153

塩澤 真人 (SHIOZAWA, Masato)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号：70272523

吉田 滋 (YOSHIDA, Shigeru)
千葉大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号：00272518

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

金 信弘 (KIM, Shinghong)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号：50161609

丸山 和純 (MARUYAMA, Takasumi)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子
原子核研究所・准教授
研究者番号：80375401

安田 修 (YASUDA, Osamu)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号：50183116

佐藤 透 (SATO, Toru)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：10135650

北野 龍一郎 (KITANO, Ryuichiro)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子
原子核研究所・教授
研究者番号：50543451

(3)連携研究者

横山 博美 (YOKOYAMA, Hiromi)
東京大学・国際高等研究所カブリ数物連携
宇宙研究機構・教授
研究者番号：50401708

(4)研究協力者(評価者)

徳宿克夫 (TOKUSHUKU, Katsuo)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・所長
研究者番号：80207547

中野 貴志 (NAKANO, Takashi)
大阪大学・核物理研究センター・センター
長
研究者番号：80212091

福島 正己 (FUKUSHIMA, Masaki)
東京大学・宇宙線研究所・名誉教授
研究者番号：30241227

野尻 美保子 (NOJIRI, Mihoko)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・教授
研究者番号：30222201

岡 眞 (OKA, Makoto)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：60144606