
ニュートリノフロンティアの融合と進化

領域番号： 2504

平成25年度～29年度
科学研究費助成事業（科学研究費補助金）
（新学術領域研究（研究領域提案型） 研究成果報告書

令和元年6月

領域代表者 中家 剛
京都大学 理学研究科・教授

はしがき

新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」は、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・発展させるために、2013年度に発足しました。本領域では、世界の第一線の研究者集団を集め、「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」を展開し、2017年度に終了しました。この間、計画研究に加えて37の公募研究も実施されました。本領域の研究成果のハイライトとしては、「ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動」を発見し3世代間でのニュートリノ振動を確立し「CP対称性の破れ」の研究への扉を開いたことと、高エネルギー宇宙ニュートリノを発見し、ニュートリノ天文学への新しい扉を開いたこと、があげられます。本領域の期間中に、領域の主たる研究テーマである「ニュートリノ振動」で梶田隆章氏がノーベル物理学賞を受賞したことも大きなニュースでした。

研究成果の評価においては、中間評価「A+（研究領域の設定目的に照らして、期待以上の進展が認められる）」、最終評価は「A（研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの成果があった）」でした。最終評価において、科学研究費補助金審査部会における所見の内容は、「CP対称性の破れの兆候とニュートリノ質量階層構造への強い制限、超高エネルギー宇宙ニュートリノ源の同定とそれに伴うマルチメッセンジャー天文学の開拓などについては、世界的にインパクトのある大きな研究成果が上がったことが認められ、期待以上の成果があったと言える。」と高い評価を受けました。反面、「検出器開発を主目的とする研究では遅れがみられ、実用度の高い実験装置の開発には至らず予備実験の段階にとどまっており、本研究領域を総合的に高く評価するには至らない。各計画研究組織同士の融合的・連携的研究が顕著にはみられなかった点と併せて、課題が残ったと言える。」との指摘がありました。革新的な実験装置の開発に挑戦した結果、実用には至らなかったことは事実で、実力が及びませんでした。しかし、失敗するリスクを負ってでも野心的な研究課題に挑む姿勢は大事だと考えていて、失敗にめげず再度挑戦していき、新しい研究分野を開拓していきたいと考えています。

最後に、取りまとめ予算を頂き、通常の結果まとめに加え、より一般向けの講演会や解説書も取りまとめました。それらは、領域のホームページ

<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nufrontier>

で公開しています。世界最先端の研究を4コマ漫画で紹介する試みも行なっていて、広く社会一般に素粒子や宇宙の基礎研究の面白さが伝わればと願っています。

2019年6月吉日 領域代表者・京都大学理学研究科 教授 中家 剛

<研究組織>

計画研究

領域代表者 中家 剛 (京都大学・理学研究科・教授)

[平成 25 年度～平成 29 年度]

(総括班) ニュートリノフロンティアの融合と進化

研究代表者 中家 剛 (京都大学・理学研究科・教授)

研究分担者 久世 正弘 (東京工業大学・理学院・教授)

研究分担者 吉田 滋 (千葉大学・大学院理学研究院・教授)

研究分担者 金 信弘 (筑波大学・数理物質系・教授)

研究分担者 安田 修 (首都大学東京・理工学研究科・教授)

研究分担者 北野 龍一郎 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授)

研究分担者 塩澤 真人 (東京大学・宇宙線研究所・教授)

研究分担者 丸山 和純 (大学共同利用機関法人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)

研究分担者 中村 光廣 (名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授)

研究分担者 佐藤 透 (大阪大学・大学院理学研究科・准教授)

(A01班) 加速器ニュートリノビームによるニュートリノフロンティアの展開

研究代表者 中家 剛 (京都大学・理学研究科・教授)

研究担当者 市川 温子 (京都大学・理学研究科・准教授)

研究担当者 小林 隆 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授)

研究担当者 小関 忠 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授)

研究分担者 中平 武 (大学共同利用機関法人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)

研究分担者 清矢 良浩 (大阪市立大学・大学院理学研究科・教授)

連携研究者 南野 彰宏 (京都大学・理学研究科・助教)

(A02班) 原子炉ニュートリノを用いた基礎科学および応用化学

- 研究代表者 久世 正弘 (東京工業大学・理学院・教授)
- 研究分担者 末包 文彦 (東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授)
- 研究分担者 住吉 孝行 (首都大学東京・理工学研究科・教授)
- 研究分担者 川崎 健夫 (北里大学・理学部・教授)
- 研究分担者 原 俊雄 (神戸大学・理学研究科・准教授)
- 研究分担者 箕輪 眞 (東京大学・理学系研究科・教授)
- 連携分担者 石塚 正基 (東京理科大学・理工学研究科・准教授)
- 連携研究者 長坂 康史 (広島工業大学・工学系研究科・教授)
- 連携研究者 坂本 泰伸 (東北学院大学・教養学部・教授)
- 連携研究者 白井 淳平 (東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授)

(A03班) 大気ニュートリノを用いた質量階層構造の研究と次世代研究のフロンティアの発展

- 研究代表者 塩澤 真人 (東京大学・宇宙線研究所・教授)
- 研究分担者 横山 将志 (東京大学・理学研究科・准教授)
- 研究分担者 早戸 良成 (東京大学・宇宙線研究所・准教授)
- 研究分担者 鈴木 州 (神戸大学・理学研究科・助教)
- 連携研究者 田中 真伸 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授)
- 連携研究者 竹内 康雄 (神戸大学・理学研究科・教授)
- 連携研究者 中山 祥英 (東京大学・宇宙線研究所・助教)
- 連携研究者 関谷 洋之 (東京大学・宇宙線研究所・准教授)
- 連携研究者 三浦 眞 (東京大学・宇宙線研究所・助教)
- 連携研究者 Wendell Roger (東京大学・宇宙線研究所・助教)
- 連携研究者 伊藤 好孝 (名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授)
- 連携研究者 亀田 純 (東京大学・宇宙線研究所・助教)
- 連携研究者 田中 秀和 (東京大学・宇宙線研究所・助教)

(A04班) ニュートリノで探る宇宙

- 研究代表者 吉田 滋 (千葉大学・理学研究院・教授)

研究分担者 石原 安野 (千葉大学・理学研究院・教授)
研究分担者 間瀬 圭一 (千葉大学・理学研究院・助教)
研究分担者 奥村 公宏 (東京大学・宇宙線研究所・准教授)

(B01班) 超高解像度ニュートリノ検出器の開発

研究代表者 中村 光廣 (名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授)
研究分担者 佐藤 修 (名古屋大学・理学研究科・助教)
研究分担者 青木 茂樹 (神戸大学・人間発達県境学研究科・教授)
研究分担者 渋谷 寛 (東邦大学・理学部・教授)
連携研究者 中 竜太 (名古屋大学・高等研究院・特任助教)
連携研究者 長縄 直崇 (名古屋大学・素粒子宇宙期限研究機構・現状解析研究センター・研究員)

(B02班) 宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発

研究代表者 金 信弘 (筑波大学・数理物質科学研究科・教授)
研究分担者 武内 勇司 (筑波大学・数理物質科学研究科・准教授)
研究分担者 吉田 拓生 (福井大学・工学研究科・教授)
連携研究者 池田 博一 (独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 宇宙探査工学研究系・教授)

(B03班) 液体アルゴン3次元飛跡イメージング検出器の開発研究

研究責任者 丸山 和純 (大学共同利用機関法人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)
研究分担者 坂下 健 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教)
連携研究者 成田 晋也 (岩手大学・工学部・准教授)
連携研究者 山野井 豊 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・前任技師)
連携研究者 池野 正弘 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・前任技師)

(C01班) ニュートリノ振動現象論の新展開と新物理の追求

研究責任者 安田 修 (首都大学東京・理工学研究科・教授)
研究分担者 佐藤 丈 (埼玉大学・理工学研究科・准教授)
連携研究者 下村 崇 (宮崎大学・教育文化学部・准教授)
連携研究者 小池 正史 (宇都宮大学・工学研究科・准教授)
連携研究者 小西 康文 (茨城大学・大学教育センター・准教授)
連携研究者 太田 俊彦 (埼玉大学・理工学研究科・研究支援者)
連携研究者 高西 康敬 (埼玉大学・理工学研究科・研究支援者)
連携研究者 荒木 威 (工学院大学・学習支援センター・講師)
連携研究者 梁 正樹 (埼玉大学・理工学研究科・研究支援者)
連携研究者 Monojit Ghosh (首都大学東京・理工学研究科・特任助教)

(C02班) ニュートリノで探る原子核のクォーク・グルーオン構造と標準反応モデルの構築

研究代表者 佐藤 透 (大阪大学・理学研究科・准教授)
研究分担者 熊野 俊三 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授)
連携研究者 齊藤 晃一 (東京理科大学・理工学部・教授)
連携研究者 鎌野 寛之 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・博士研究員)
連携研究者 堀内 渉 (北海道大学・理学研究科・講師)

(C03班) ニュートリノで探る素粒子の起源と宇宙の構造

研究代表者 北野龍一郎 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授)
研究分担者 伊部 昌宏 (東京大学・宇宙線研究所・准教授)
研究分担者 大河内 豊 (九州大学・基幹教育院・准教授)
連携研究者 川崎 雅裕 (東京大学・宇宙線研究所・教授)
連携研究者 遠藤 基 (大学共同利用機関法人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)
連携研究者 松本 重貴 (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授)

[平成 27 年度～平成 29 年度]

(Y00・国際活動支援班) 国際ニュートリノ研究ネットワーク構築によるニュートリノ
フロンティアの展開

研究代表者 中家 剛 (京都大学・理学研究科・教授)

研究分担者 久世 正弘 (東京工業大学・理学院・教授)

研究分担者 塩澤 真人 (東京大学・宇宙線研究所・教授)

研究分担者 吉田 滋 (千葉大学・理学研究科・教授)

研究分担者 中村 光廣 (名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授)

研究分担者 金 信弘 (筑波大学・数理物質系・教授)

研究分担者 丸山 和純 (大学共同利用機関法人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)

研究分担者 安田 修 (首都大学東京・理工学研究科・教授)

研究分担者 佐藤 透 (大阪大学・理学研究科・准教授)

研究分担者 北野龍一郎 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子
原子核研究所・教授)

(公募研究)

平成 26 年度～27 年度

- 研究代表者 福田 善之 (宮城教育大学・教育学部・教授)
- 研究代表者 Hartz Mark (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・助教)
- 研究代表者 六條 宏紀 (名古屋大学・エコトピア科学研究所・研究員)
- 研究代表者 吉田 斉 (大阪大学・理学研究科・准教授)
- 研究代表者 飯田 崇史 (大阪大学・核物理研究センター・助教)
- 研究代表者 小川 了 (東邦大学・理学部・教授)
- 研究代表者 栗本 佳典 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教)
- 研究代表者 田島 治 (大学共同利用機関法人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)
- 研究代表者 平出 克樹 (東京大学・宇宙線研究所・助教)
- 研究代表者 保科 琴代 (東京大学・地震研究所・研究員)
- 研究代表者 赤池 宏之 (名古屋大学・工学系研究科・准教授)
- 研究代表者 鈴木 英之 (東京理科大学・理工学部・教授)
- 研究代表者 太田 俊彦 (埼玉大学・理工学研究科・研究支援者)
- 研究代表者 村山 斉 (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授)
- 研究代表者 浅賀 岳彦 (新潟大学・自然科学系・准教授)
- 研究代表者 青木 真由美 (金沢大学・数物科学系・助教)
- 研究代表者 瀬戸 治 (北海学園大学・工学部・准教授)
- 研究代表者 梶野 敏貴 (国立天文台・理論研究部・准教授)
- 研究代表者 郡 和範 (大学共同利用機関法人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)
- 研究代表者 長瀧 重博 (独立行政法人理化学研究所・長瀧天体ビックバン研究室・准主任研究員)

平成 28 年度～29 年度

- 研究代表者 清水 格 (東北大学・理学研究科・准教授)
- 研究代表者 西村 康宏 (東京大学・宇宙線研究所・助教)
- 研究代表者 松岡 広大 (名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・助教)
- 研究代表者 飯田 崇史 (筑波大学・数理物質科学研究科・助教)
- 研究代表者 小川 了 (東邦大学・理学部・教授)
- 研究代表者 田島 治 (大学共同利用機関法人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)

研究代表者 F r i e n d M e g a n (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教)

研究代表者 西口 創 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教)

研究代表者 赤池 宏之 (名古屋大学・工学系研究科・准教授)

研究代表者 谷本 盛光 (新潟大学・自然科学系・教授)

研究代表者 青木 真由美 (金沢大学・数物科学系・准教授)

研究代表者 津村 浩二 (京都大学・理学研究科・助教)

研究代表者 諏訪 雄大 (京都大学・基礎物理学研究所・准教授)

研究代表者 波場 直之 (島根大学・総合理工学部・教授)

研究代表者 郡 和範 (大学共同利用機関法人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)

研究代表者 B A R K O V M A X I M (理化学研究所・研究員)

< 交付決定額（配分額） >

	合計	直接経費	間接経費
平成25年度	273,260,000円	210,200,000円	63,060,000円
平成26年度	301,730,000円	232,100,000円	69,630,000円
平成27年度	317,980,000円	244,600,000円	73,380,000円
平成28年度	325,780,000円	250,600,000円	75,180,000円
平成29年度	271,830,000円	209,100,000円	62,730,000円
総計	1,490,580,000円	1,146,600,000円	343,980,000円

上記の内訳には、以下の公募研究、国際活動支援班を含む

公募研究

平成26年度～平成27年度、平成28年度～平成29年度 各年30,000,000円

国際活動支援班

平成27年度 6,900,000円

平成28年度 11,700,000円

平成29年度 11,900,000円

<研究発表>

発表論文 (全 483 篇)

□計画研究A O 1

1. “Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K” , A. K. Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. 118 no.15, 151801(2017).
査読有 被引用回数 88
2. “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam” , A. K. Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. 112, 061802 (2014).
査読有 被引用回数 474
3. “Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter θ_{23} from Muon Neutrino Disappearance in an Off-axis Beam” , A. K. Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. 112, 181801 (2014).
査読有 被引用回数 252
4. “Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam” , A. K. Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. D 88, 032002 (2013). 査読有 引用回数 191

□計画研究A O 2

5. “Measurement of θ_{13} in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques”: Double Chooz Collaboration ; JHEP 1601 (2016) 163, arXiv:1510.08937[hep-ex](2015). 査読有
6. “Background independent measurement of θ_{13} in Double Chooz” , Y. Abe, T. Hara, M. Ishitsuka, T. Kawasaki, M. Kuze, Y. Nagasaka, Y. Sakamoto, F. Suekane, T. Sumiyoshi et al., Phys. Lett. B735, 51-56(2014). 査読有
7. “Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method” , S. Oguri, Y. Kuroda, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, *M. Minowa, Nucl. Inst. Meth. A757, 33-39(2014). 査読有
8. 「原子炉によるニュートリノ混合角 θ_{13} の測定」, 川崎健夫, 石塚正基, 古田久敬, 松原綱之, 日本物理学会誌・解説 2013年7月号 Vol.68, p450~457. 査読無

□計画研究A03

9. “Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV” , K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 97, 072001 (2018). 査読有
10. “Search for nucleon decay into charged antilepton plus meson in 0.316 megaton • years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector” , K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, *M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 96, 012003 (2017). 査読有
11. “Physics Potential of a Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment Using J-PARC Neutrino Beam and Hyper-Kamiokande” , K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, *M. Yokoyama et al. (Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 053C02(2015). 査読有
12. “Limits on sterile neutrino mixing using atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande” , K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 91, 052019(2015). 査読有

□計画研究A04

13. “Measurement of the $\nu \mu$ energy spectrum with IceCube-79” , M. G. Aartsen, A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al (IceCube Collaboration) European Physical Journal C77, 692 (2017). 査読有
14. “Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere Using Six Years of IceCube Data” , M. G. Aartsen, A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al (IceCube Collaboration) The Astrophysical Journal, 833:3 (2016).
15. “Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data” , A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. 113, 101101 (2014).
査読有 被引用回数 168
16. “Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector” , M. G. Aartsen, A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al. (IceCube Collaboration), Science 342, 1242856 (2013). 査読有 被引用回数 205

□計画研究B 0 1

17. “Development of High Sensitivity Nuclear Emulsion and Fine Grained Emulsion” .
H. Kawahara, T. Asada, T. Naka, N. Naganawa, K. Kuwabara, M. Nakamura, Nucl.
Phys. Proc. Suppl. 253-255, 216-217(2014). 査読有
18. “Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA
experiment” , N. Agafonova, N. Naganawa, T. Naka, M. Nakamura et al. (OPERA
Collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 101C01(2014). 査読有
19. “Study of hadron interactions in a lead-emulsion target, Hirokazu Ishida” ,
M. Nakamura, H. Shibuya et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 093C01(2014).
査読有
20. “Evidence for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ appearance in the CNGS neutrino beam with the
OPERA experiment” , N. Agafonova, N. Naganawa, T. Naka, M. Nakamura et al.
(OPERA Collaboration), Phys. Rev. D89, 051102R(2014). 査読有

□計画研究B 0 2

21. “Development of Superconducting Tunnel Junction detectors as a far-infrared
photon-by-photon spectrometer for neutrino decay search” , Y. Takeuchi, S.
H Kim, H. Ikeda, T. Yoshida et al. , Instrumentation and Measurement
Technology Conference (I2MTC), 2015 IEEE International, 551 - 555 (2015),
DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151327 査読有
22. “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector on SOI
Preamplifier Board to Search for Radiative decays of Cosmic Background
Neutrino” , K. Kasahara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, H. Ikeda, T. Yoshida et al.,
PoS(TIPP2014) 074(2014). 査読有
23. “Search for Cosmic Background Neutrino Decay” , S. H. Kim, Y. Takeuchi, H.
Ikeda, T. Yoshida et al., JPS Conf. Proc. 1, 013127 (2014). 査読有

□計画研究B 0 3

24. “Liquid Argon TPC Neutrino Detector” , K. Sakashita, JPS Conf. Proc. 8, 023011
(2015)
25. Optimised sensitivity to leptonic CP violation from spectral information :
the LBNO case at 2300km baseline, S.K. Agarwalla, K. Sakashita et. al,

arXiv:1412.0593 (2014).

26. "LArIAT: Liquid Argon In A Testbeam", J.Paley, E.Iwai, T.Maruyama, et al, arXiv:1406.5560 [physics.ins-det] (2014)

□計画研究C O 1

27. "Complementarity Between Hyperkamiokande and DUNE in Determining Neutrino Oscillation Parameters", S. Fukasawa, M. Ghosh, O. Yasuda, Nucl.Phys. B918 (2017) 337. 査読有
28. "Detecting the $L\mu-L\tau$ gauge boson at Belle II", T. Araki, S. Hoshino, T. Ota, J. Sato, T. Shimomura, Phys.Rev. D95 (2017) 055006. 査読有
29. "The possibility to observe the non-standard interaction by the Hyperkamiokande atmospheric neutrino experiment", S. Fukasawa, O. Yasuda, Nucl.Phys. B914 (2017) 99. 査読有
30. "A way to crosscheck μ -e conversion in the case of no signals of $\mu \rightarrow e\gamma$ and $\mu \rightarrow 3e$ ", J. Sato, M. Yamanaka, Phys.Rev. D91 (2015) 055018. 査読有

□計画研究C O 2

31. "Toward a unified model of neutrino-nucleus reactions for neutrino oscillation experiments", *S. X. Nakamura, H. Kamano, Y. Hayato, M. Hirai, W. Horiuchi, S. Kumano, T. Murata, K. Saito, M. Sakuda, T. Sato, Y. Suzuki, Rep. Prog. Phys. 80, 056301(2017). 査読有
32. "Dynamical coupled-channels model for neutrino-induced meson productions in resonance region", S. X. Nakamura, H. Kamano, T. Sato, Phys. Rev. D92, 74024 (2015). 査読有
33. "Incoherent pion production in neutrino-deuteron interactions", Jia-Jun Wu, T. Sato, T.-S.H. Lee, Phys. Rev. C91, 035203 (2015) 査読有
34. "Nucleon resonances with a dynamical coupled-channels model πN and γN reactions", H. Kamano, S. X. Nakamura, T. -S. H. Lee and T. Sato, Phys. Rev. C88, 035209(2013). 査読有

□計画研究C O 3

35. “Primordial Lepton Oscillations and Baryogenesis,” Y. Hamada, R. Kitano, J. High Energy Phys. 1611, 010 (2016) 査読有
36. “Thermal Effects on Decays of a Metastable Brane Configuration” , Y. Nakai, Y. Ookouchi, Phys. Lett. B762, 321 (2016). 査読有
37. “Lower Bound on the Gravitino Mass $m_{3/2} > 0(100)\text{TeV}$ in R-Symmetry Breaking New Inflation” , K. Harigaya, M. Ibe, T. T. Yanagida, Phys. Rev. D89, 055014(2014). 査読有
38. “Neutrino Universe” . T. Higaki, R. Kitano, R. Sato, J. High Energy Phys. 1407, 044 (2014). 査読有

□公募研究

39. “Development of Microwave Kinetic Induction Detectors for Cosmological Observations” K. Karatsu, S. Mima, S. Oguri, O. Tajima et al. IECE Trans. Electron E98-C, No. 3, 207-218 (2015). 査読有
40. “Neutrinos in Core-Collapse Supernovae and Nucleosynthesis” T. Kajino, G. J. Mathews and T. Hayakawa, Journal of Physics, G41, 44007 (2014).
査読有
他 443 篇

<国際会議講演 (全 563 件) >

□計画研究A O 1

1. “Current and future prospects on long-baseline neutrino experiments in Japan” , T. Nakaya, Prospects in Neutrino Physics (NuPhys2013), Dec. 19-20, 2013, London, UK.
2. “Neutrino Program in Japan” , T. Nakaya, ICFA Neutrino Panel: Asian Neutrino Community Meeting, Nov. 13, 2013, Kashiwa, Japan.

□計画研究A O 2

3. “Recent Results from Double Chooz” , M. Kaneda, Lake Louise Winter Institute, Feb. 20, 2015, Lake Louise, Canada.
4. “A Search for Sterile Neutrino at J-PARC Materials and Life Science Experimental Facility” , H. Furuta, The 2nd International Symposium on

Science at J-PARC, July 12-15, 2014, Tsukuba, Japan.

□計画研究A O 3

5. “Super-Kamiokande” , M. Shiozawa, XVII International Workshop on Neutrino Telescope, Mar. 13-17, 2017, Venice, Italy. 招待講演
6. “Atmospheric Results from Super-Kamiokande” , R. Wendell, XXVI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2014), June 2-7, 2014, Boston, USA. 招待講演

□計画研究A O 4

7. “What Neutrinos Tell about the Ultra-high Energy Universe” , S.Yoshida, International Conference on Massive Neutrinos, Feb. 9-13, 2015, Nanyang Technological University, Singapore.
8. “Dual DOM housing up and down PMT pair” , S.Yoshida, HAP workshop, Dec. 8-10, 2014, Aachen, Germany.

□計画研究B O 1

9. “Latest Developments in Nuclear Emulsion Technology” , K. Morishima, 26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids (ICNTS26), Sep. 15-19, 2014, Kobe, Japan.
10. “Nuclear Emulsion technology and Directional Dark Matter Study” , T. Naka, KMI International Symposium 2013, Dec. 11-13, 2013, Nagoya, Japan.

□計画研究B O 2

11. “Superconducting Tunnel Junction Detectors” , Y. Takeuchi, The 18th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN17), Oct. 26-28, 2017, Coventry, UK
12. “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. 招待講演

□計画研究B 0 3

13. “Liquid argon TPC for neutrino experiment” , K.Sakashita, Asian Forum for Accelerator and Detector 2018, Jan. 2018.

□計画研究C 0 1

14. “CLFV theoretical review” , J. Sato, 22nd International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS 2016), July 10-16, 2016, Quy Nhon, Vietnam. 招待講演
15. “Synergy of T2HK & DUNE” , O. Yasuda, 3rd International Meeting on Large Neutrino Infrastructures, May 30-31, 2016, KEK, Japan. 招待講演

□計画研究C 0 2

16. “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 招待講演
17. “Electromagnetic N^* transition form factors in the ANL-Osaka dynamical coupled-channel approach” , H. Kamano, 11 th international workshop on the physics of excited baryon, Aug. 20-23, 2017, Columbia, SC, USA 招待講演

□計画研究C 0 3

18. “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
19. “Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory” , Y. Ookouchi, String 2015, Feb. 5, 2015, Tsukuba, Japan

□公募研究

20. “Coleman-Weinberg inflation models” K. Kohri, COSPA 2014, Dec. 10, 2014, Auckland, New Zealand

他 552 件

<国内講演、学会発表（全 651 件）>

□計画研究A04

1. “高エネルギーニュートリノ天文学:南極から見上げる高エネルギー宇宙”, 吉田滋, 第 27 回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」, 2014 年 12 月 24-26 日, 国立天文台. 招待講演

□計画研究B02

2. “超伝導トンネル接合素子 STJ を用いた光・量子計測”, 金信弘, 第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム, 2016 年 11 月 10 日, つくば国際会議場

□計画研究B03

3. “液体アルゴン飛跡検出器荷電粒子応答テスト実験 (LArIAT 実験) RunIII までの現状”, 丸山和純, 日本物理学会, 2017 年 9 月 12 日, 宇都宮大学

□計画研究C01

4. “レプトンフレーバーの破れを見る新しい実験の提案”, 佐藤丈, 第一回琉球大学計算科学シンポジウム “素粒子と物性・化学は協力し合える!”, 2017 年 6 月 23 日 琉球大学. 招待講演
他 647 件

<一般・学生向けの講演, 解説>

□計画研究B01

1. “先進科学塾@名大”, 中村光廣, 実験講座, 2015 年 4 月 18・25 日, 1 月 24・25 日, 2014 年 11 月 15・23 日, 9 月 20・23 日, 6 月 7・8 日, 3 月 9・16 日, 2013 年 12 月 7・8 日, 8 月 3・4 日, 名古屋大学 <http://asw.flab.phys.nagoya-u.ac.jp/>

□計画研究C01

2. “ニュートリノ物理学へのいざない”, 安田修, 首都大学東京オープンユニバーシティ, 2017 年 5 月 13 日, 5 月 20 日, 6 月 3 日, 首都大学東京.
3. “2015 年ノーベル物理学賞”, 安田修, 数学セミナー, 日本評論社, 2016 年 3 月号, p43.

□計画研究C02

4. “反応理論から探るバリオン励起状態”，鎌野寛之，中村聡，松山晶彦，佐藤透，
日本物理学会誌第69巻第2号74（2014）

□計画研究C03

5. “宇宙の歴史と物理法則”，大河内豊，2015年9月23日，九州大学
6. “ニュートリノと宇宙の謎”，北野龍一郎，2013年12月21日，
高エネルギー加速器研究機構
7. “素粒子標準模型とヒッグス粒子”，伊部昌宏，2013年12月1日，
東京大学本郷キャンパス
8. “ヒッグス粒子を超えて”，北野龍一郎，2013年11月9日，東京工業大学

<計画研究班ホームページ・新聞記事等>

□計画研究A01

1. “仁科賞に小林隆氏ら ニュートリノの変化観測”，日本経済新聞(他 京都新聞，朝日新聞など)，2014年11月11日
2. “ニュートリノ変化「全容解明」 ミュー型→電子型 宇宙進化の謎迫る”，読売新聞(他 朝日新聞，西日本新聞，毎日新聞，毎日新聞，産経新聞など)，
2013年07月20日
3. プレスリリース “T2K 実験、電子型ニュートリノ出現現象の存在を明らかに！”，
2013年7月19日 <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20130719210000/>

□計画研究A02

4. A02 ホームページ <http://dchooz.titech.jp.hep.net/>
および <http://dchooz.titech.jp.hep.net/A02publications.html>

□計画研究A03

5. プロジェクトホームページ “ハイパーカミオカンデ ホームページ”，
<http://www.hyper-k.org>
6. 神岡宇宙素粒子研究施設ホームページ “神岡宇宙素粒子研究施設”，
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp>
7. “ハイパーカミオカンデ国際共同研究グループ結成記念シンポジウム及び調印式”，

グループ発足記念シンポジウムと研究所の協力協定調印式，参加者 100 名，2015 年 1 月 31 日

8. プロジェクトパンフレット 2000 部 “Hyper-Kamiokande ハイパーカミオカンデ”，ハイパーカミオカンデグループ，2015 年 1 月
9. “「ハイパーカミオカンデ」目指す”，朝日新聞，2015 年 2 月 5 日.

□計画研究 A 0 4

10. ハドロン宇宙国際研究センター website <http://www.icehap.chiba-u.jp/>
11. ハドロン宇宙国際研究センター
Facebook <https://www.facebook.com/ICEHAP.Chiba.Univ>
12. “Japanese neutrino physicists think really big”，Science, FEBRUARY 2015 · VOL 347 ISSUE 6222.
13. ハドロン宇宙国際研究センターニュース，吉田滋，2014 年 6 月
http://www.icehap.chiba-u.jp/activity/ICEHAP_NEWS/ICEHAP_NEWS-No2.pdf
14. “「宇宙の果て」南極で観測”，読売新聞，2014 年 1 月 23 日
15. 「南極でニュートリノ検出」，毎日新聞、千葉日報、しんぶん赤旗、四国新聞など，2013 年 11 月 12 日

□計画研究 B 0 2

16. “宇宙背景ニュートリノ崩壊探索”，日経サイエンス 2013 年 8 月号 55 ページ
17. B02 ホームページ
<https://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/twiki/bin/view/STJ/StjTalksPub>
18. COBAND 実験ホームページ <http://hep.px.tsukuba.ac.jp/coband/>

□計画研究 C 0 1

19. C01 ホームページ <http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/nushin/>

□計画研究 C 0 2

20. C02 ホームページ <http://nuint.kek.jp/>

□計画研究 C 0 3

21. BS ジャパン「咲くシーズン」に出演，北野龍一郎，2014 年 3 月 15 日放送
22. 日本評論社編集部 編「物理学ガイド」に「ヒッグス粒子の先へ」の記事，

北野龍一郎，2014年2月出版

23. 「物質に質量を与える素粒子、ヒッグス粒子とは？」，北野龍一郎，月刊「化学」特別解説，2013年12月号
24. C03 ホームページ <http://research.kek.jp/people/kitano/C03/>

<受賞>

□計画研究A01

1. 仲村佳悟，高エネ研(KEK)測定機開発室第5回測定器開発優秀修士論文賞，論文題目「T2K 実験ニュートリノビーム増強のための J-PARC MR Intra-Bunch Feedback System の開発」，2015年05月7日
2. 小林隆，読売テクノ・フォーラム第21回ゴールド・メダル賞，受賞業績「電子ニュートリノ出現の発見」，2015年3月21日
3. 中家剛，小林隆，塩澤真人，平成基礎科学財団第6回戸塚洋二賞，受賞業績「加速器ミューニュートリノビームによる電子ニュートリノ出現現象の発見」，2015年2月17日
4. 中家剛，小林隆，2014年度仁科記念賞，受賞業績「ミューニュートリノビームからの電子ニュートリノ出現事象の発見」，2014年11月12日
5. J-PARC ニュートリノビームグループ（代表者 小林隆），高エネルギー加速器科学研究奨励会諏訪賞，題目「世界最高強度ニュートリノビーム施設の実現による電子ニュートリノ出現現象発見への貢献」，2014年2月17日
6. 市川温子，お茶の水女子大学第1回湯浅年子賞，題目「ニュートリノ振動実験への寄与」，2013年11月14日

□計画研究A02

7. T. J. C. Bezerra 高エネルギー物理学奨励賞・日本物理学会若手奨励賞，論文題目「Improvement of θ_{13} Measurement in the Double Chooz Experiment and the First Effective Δm_{231} Measurement from Reactor Neutrino Oscillation at Different Baselines」，2014年10月16日
8. 今野智之，高エネルギー物理学奨励賞・日本物理学会若手奨励賞，論文題目「Measurement of reactor anti-neutrino disappearance using the Double Chooz detector」，2013年11月21日
9. 末包文彦：Blaise Pascal Chairs 受賞，2016年

□計画研究A03

10. Roger Wendell, 高エネルギー物理学奨励賞・日本物理学会若手奨励賞, 論文題目「Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande」Phys. Rev. Lett. 110, 181802 (2013), 2014年10月16日

□計画研究A04

11. 吉田滋, 石原安野, 平成基礎科学財団第5回戸塚洋二賞, 題目「超高エネルギー宇宙ニュートリノ発見への貢献」, 2014年2月12日
12. 石原安野, IUPAP若手賞, 2013年7月9日
13. 石原安野, 第37回猿橋賞, 2017年5月27日

□計画研究B01

14. 高橋寛, 福田努, 日本写真学会進歩賞, 題目「エマルションガンマ線望遠鏡のための時間分解原子核乾板多段シフターの開発」, 2014年5月26日

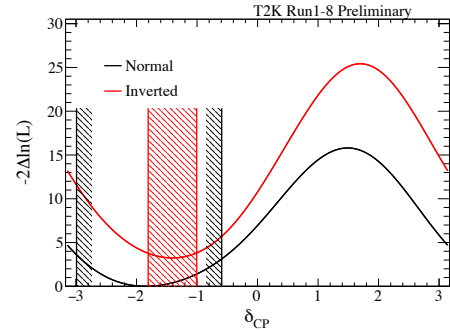
□計画研究C02

15. 中村聡, 佐藤透, 平成基礎科学財団第8回戸塚洋二賞, 題目「精密な νd 断面積計算による太陽ニュートリノ問題解決への貢献」, 2017年3月20日
16. 佐藤透, 鎌野寛之, 日本物理学会第20回(2015年)論文賞, 論文題目「Energy Dependence of KN Interactions and Resonance Pole of Strange Dibaryons」Prog. Theor. Phys. 124, 533-539 (2010), 2015年03月25日

<研究成果>

・ 計画研究 A01 [加速器ニュートリノ]

【1】 T2K 実験でのニュートリノ振動の測定と、原子炉反ニュートリノによる θ_{13} の測定結果と組み合わせ、世界で初めてニュートリノで CP 対称性が破れている可能性を 95% の有意度で発見した。 $\delta_{CP} = -1.872$ ラジアンと決定し、95% で許容される領域は右図の範囲である。



【2】 電子ニュートリノ出現の発見 (信頼度 7.3σ)

【3】 ニュートリノ振動パラメータ θ_{23} と Δm_{32}^2 の精

密測定 : $\sin^2 \theta_{23} = 0.526^{+0.032}_{-0.036}$ 、 $|\Delta m_{32}^2| = (2.464 \pm 0.065) \times 10^{-3} \text{eV}^2$ [$\Delta m_{32}^2 > 0$ の場合]

・ 計画研究 A02 [原子炉ニュートリノ]

Double Chooz 実験での原子炉ニュートリノの精密測定からニュートリノ振動角 θ_{13} を 13% の精度で測定した。上記 T2K での δ_{CP} 決定には本実験を含む原子炉実験での θ_{13} 結果が使われている。中性子の水素吸収事象を用いての θ_{13} 測定法を初めて開発した。また、原子炉運転の出力 (2 基, 1 基, 0 基) とニュートリノ観測数の相関から背景事象と θ_{13} を同時に求める方法 (Reactor Modulation Method) も開発した。

プラスチック・シンチレータおよび液体シンチレータを用いる 2 タイプの原子炉運転遠隔モニターを建設し、調整運転データから雷雲によるガンマ線を観測した。液体シンチレータを用いたステライルニュートリノ探索検出器を設計し、J-PARC での実験実現につなげた。

・ 計画研究 A03 [大気ニュートリノ]

大気ニュートリノ観測データに領域内のニュートリノ相互作用モデルの最新研究結果 (A01, C02) や、加速器 (A01) ・ 原子炉 (A02) ・ 太陽ニュートリノ振動測定結果を拘束条件として追加し、世界最高感度での検証により順階層構造を示唆すること、さらに逆階層構造の棄却優位度は 91.9% から 94.5% の範囲であることがわかった。

次世代基幹実験ハイパーカミオカンデ実験では、国際研究グループの下で地下大空洞や高感度光センサーの開発、期待される科学成果を明らかにし、文科省による大型計画のロードマップ 2017 の一プロジェクトとして、予算措置がされれば建設をすみやかに開始できる状態に到達した。

・ 計画研究 A04 [宇宙ニュートリノ]

PeV のエネルギーを持つニュートリノ事象を発見した解析の threshold energy を下げることに成功した。この結果、宇宙ニュートリノは少なくとも 60 TeV 以上からほぼエネルギーにべき乗のスペクトルで PeV まで伸びていることが分かった。その最初の成果はサイエンス誌に掲載され、2013 年取得の最新データを使って更に高統計で測定した結果を PRL に出版した。信号は 5.7σ の優位性で雑音事象に卓越し、宇宙ニュートリノの発見を正式にクレームした。高エネルギーニュートリノ検出器開発では、卵型耐圧ガラス球内に 8 インチ PMT 二台を上下に内蔵する新型検出器 D-Egg の開発とプロトタイプ検出器の製作を完遂した。波長域 350nm 以下の紫外線領域でも透過度を保つ耐圧ガラス球及び光学ジェルの製作、低温化で安定的に動作する高電圧回路開発、安価かつ簡易に実装できる地磁気シールドの製作に成功し、その評価を終えた。IceCube 実験検出器に比してチェレンコフ

光有感波長領域平均で2倍の検出面積を達成した。

・ 計画研究 B01 [原子核乾板技術]

- 2018年4月 GRAINE の第二回オーストラリア気球フライトに成功
- 2018年3月 J-PARC PAC にてニュートリノ - 水反応断面積の精密測定実験が Stage-1 承認 (E71)
- 2017年11月 クフ王のピラミッドに大空洞検出を発表
- 2015年5月 高感度原子核乾板を搭載した γ 線観測用気球のフライトの成功
- 2015年4月 ニュートリノ実験用・水標的 ECC を開発
- 2015年3月 福島第一原子力発電所 2号機・5号機の透視結果を発表
- 2014年10月 低エネルギー γ 反応研究の為のテスト実験 JPARC T60 のビーム照射を A01 と共同で開始
- 2014年4月 タウニュートリノ反応研究を含む SHIP 実験の実験・技術提案書を CERN SPSC へ提出
- 2014年2月 新原子核乾板塗布室稼働開始 (10月に新乳剤製造装置稼働開始)

・ 計画研究 B02 [超伝導トンネル結合素子技術]

本研究では、宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験に用いる遠赤外線光を検出する超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器を開発してきた。Nb/Al-STJ 検出器については、ロケット実験のための実験要求値であるリーク電流 0.1nA を下回る STJ の作成に成功した。さらに S/N 比を改善するために、極低温 0.4K で動作する前置増幅器の開発を行い、SOI (Silicon-On-Insulator) 技術を用いた前置増幅器を STJ 検出器の直近に設置して、波長 465nm の可視光レーザーパルスを用いて光応答性能試験を行った。この試験において、Nb/Al-STJ の光応答信号を 70 倍に増幅することに成功し、信号ノイズ比を大幅に改善した。さらに電荷積分型の極低温 SOI 増幅器を試作して、極低温 0.4K の冷凍機内に Nb/Al-STJ 検出器の直近に設置し性能試験を行った。この試験において設計通りの性能を示すことを確認した。この電荷積分型増幅器と上記の電圧増幅器を組み合わせた最終設計を行い、試作機を作成した。また Hf-STJ 検出器の開発研究で、ハフニウムとしては世界初の STJ として動作し、可視光レーザーパルスに対して光応答信号を出すことを確認するという実績をあげた。

・ 計画研究 B03 [液体アルゴン TPC 技術]

検出器大型化に必要な電荷読み出しシステム、純化装置、高圧生成といった要素技術を開発し、CERN WA105 実験の 70 トン検出器で実証試験を進めた。宇宙線信号の観測や、大型検出器を動作させたときに読み出し系にどのくらいの雑音に影響するかなどの試験を進めた。本研究で開発した電荷読み出しシステムで用いる低ノイズな電荷増幅用の CMOS ASIC は、液体アルゴン TPC 以外にも応用が可能なことを活用し、暗黒物質探索などの実験へも技術の発展が見込まれている。また、日本で培った技術・知見も盛り込んだ国際共同実験 (LArIAT) にて、運動量・粒子識別・角度等素性の良く分かった荷電粒子ビームに対する液体アルゴン TPC 検出器の応答を測定した。2015年から2017年の3年間で、約 180 万事象のデータを取得し、パイ中間子 - アルゴン原子相互作用の全断面積の解析結果を公表するなどの成果を得、更にデータ解析を進めている。結果や解析ツール・技術は全世界で使用できるものとなっている。

・ 計画研究 C01 [ニュートリノ現象論]

3世代ニュートリノ混合の標準的枠組に関しては、将来の長基線実験計画のHKとDUNEを組み合わせた場合の振動パラメーターの測定精度を議論し、階層性縮退とoctant縮退が解決できることを示した。標準シナリオを超える枠組については、非標準相互作用に関して、HK・DUNE・T2HKKの各計画の感度とその感度の系統誤差への依存性・T2HKKのoff-axis角度の最適化について考察することにより将来計画への指針の一助を与え、軽いステライルニュートリノの(3+1)-スキームに関しては新たなCP位相による新しい種類の縮退を発見した。荷電レプトンを通して得られる新物理の研究に関しては、IceCube Gapと μ 粒子の異常磁気能率を説明するモデルを提唱してその現象論を議論し、Belle-II実験・COMET実験・LHC実験・ILC実験でのレプトンフレーバーの破れの可能性を議論した。

・ 計画研究 C02 [原子核反応理論]

核子共鳴領域（不変質量2 GeVまで）のニュートリノ反応による中間子生成反応モデルを構築した。電子線・パイ中間子反応データの包括的解析のもと、 2π 中間子発生反応も記述できるモデルは他に例を見ない。重陽子反応の解析から終状態相互作用の重要性が示され、ANL/BNL泡箱実験を再解析する必要性を示した。深非弾性散乱領域の研究では、ニュートリノを含む高エネルギーレプトン・原子核反応の断面積の実験データを解析し、原子核パートン分布関数を求めた。この解析で、荷電レプトン散乱とニュートリノ散乱における原子核補正に違いがあることを示した。深非弾性散乱領域から共鳴領域、また $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$ のRegge領域へ繋げる統一モデルを検討した。

・ 計画研究 C03 [素粒子・宇宙理論]

これまで本計画研究班から約80本の論文が発表され、学術雑誌に掲載されている。A01班の研究と関連して、CPを破るニュートリノ振動が宇宙のインフレーション直後のプラズマ中において起こり、宇宙のバリオン数を説明する新しい可能性を提唱した。IceCube実験（A04）において発見された超高エネルギー宇宙ニュートリノの素粒子論的起源について世界に先駆けた研究も行い、特に暗黒物質との関連についての研究において成果があがっている。また、超弦理論の示唆する宇宙紐から生成する粒子への宇宙観測からの制限や、宇宙紐による真空崩壊の議論など、様々な興味深い結果が得られた。

公募研究より抜粋

- ・ D01: キセノンを用いた二重ベータ崩壊実験のための新型液体シンチレータ検出器の開発

キセノン含有液体シンチレータを用いた高感度な二重ベータ崩壊探索実験を実現するため、本研究では発光時定数による外部バックグラウンド識別を目指す。シンチレーション光に対する吸収・再発光や散乱の効果を正確に評価するため、発光時間波形・波長情報と散乱角度を同時に測定する光学パラメータ測定装置を製作し、再発光確率、及び長波長（ $> 400 \text{ nm}$ ）の散乱確率とその角度依存性を測定した。これらの結果を入力値とした光学シミュレーションを行うことで、発光点識別能の評価が可能となる。

- ・ D01: 原子核乾板ハイブリッド検出器によるニュートリノ反応断面積の精密測定
ニュートリノ反応断面積の精密測定のために、60kg鉄エマルジョン積層チェンバー（ECC）とエマルジョンマルチステージシフター（シフター）とINGRIDを用いたハイブ

リッド検出器によるニュートリノ照射実験を行った。ECC内の飛跡のみによる解析とハイブリッド解析を並行して行うことにより、バックグラウンドと検出効率の最適化を行っている。前者では、低運動量飛跡によるバックグラウンドが理解できてきており、低多重度の反応断面積の解析に道筋が付けられた。後者は、1/24の再構成が終わっており、少なくとも1本がINGRIDと対応が付くことを要求することにより、バイアスの小さい検出が可能となった。高統計化のために、シフターの解析を進めている。

- D01: CMB 偏光観測によるニュートリノ質量和の測定にむけた装置校正と読み出し系開発

宇宙背景放射(CMB)の偏光観測からニュートリノ質量和の測定を行う為には、高精度の偏光角校正手法と多帯域観測を効率的に行う多重読み出し系の確立が必須である。後者について、従来のCMB観測の読み出し多重度を2倍以上も上回るシステムを開発した。さらに、トリガー機能の付加により、CMB観測のみならず、放射線計測の用途開拓も可能とした。前者については、一本の金属ワイヤーで望遠鏡の偏光角を校正する新手法を開発した。実際にチリ・アタカマ高地にて校正試験を行い、その有用性を確認した。

- D03: スカラーセクターとフレーバー構造から探るニュートリノ質量起源

本研究では、ニュートリノの質量生成に寄与する湯川相互作用の構造に注目することで、将来実験において様々なニュートリノ質量生成機構を選別できる可能性があることを示した。スカラーセクターの相互作用の詳細に依らずにニュートリノ質量モデルを分類すると、ニュートリノがマヨラナ粒子の場合は8つ、ディラック粒子の場合は18の機構に分類できる。それらに対して、レプトンフレーバーを破る(LFV)荷電レプトンの崩壊実験の結果を考慮し、LFVヒッグス崩壊について議論した。その結果、将来LFVヒッグス崩壊が観測された場合には、ニュートリノがディラック粒子であることが示唆されることを示した。

- D03: 爆発的天体現象とニュートリノ輸送

ニュートリノ輻射輸送方程式と流体力学方程式を同時に解くシミュレーションを用いて、ニュートリノによって駆動される突発的爆発天体の研究を進めた。特に、重力波源として極めて注目を集めている連星中性子星を形成する超新星爆発の爆発機構やニュートリノ駆動風の中での元素合成の研究が進み、また高速回転している超新星において回転駆動の非軸対称な不安定モードとニュートリノ加熱が非線形に結合することで現れる新しい爆発機構を発見した。さらに、ニュートリノ輸送方程式の相対論的補正項がニュートリノ加熱率を著しく上げる可能性を示した。

- D03: 宇宙観測によるニュートリノの絶対質量の決定

将来計画されている宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光観測と宇宙論的な21cm線の観測は、ニュートリノの質量の絶対値にたいへん感度がある。このことは、主に既存のニュートリノ振動実験が質量の2乗差に感度があることと比較すると、相補的である。CMBの偏光観測、21cm線観測に加えて、バリオン音響振動(BAO)の観測を組み合わせることが、我々のアイデアである。我々が発表した文献(Y. Oyama, K. Kohri and M. Hazumi JCAP 1602 (2016) no. 02, 008)により、次の3つの結論が得られた。1) ニュートリノ質量の階層性を決定できる。2) ニュートリノの質量の絶対値を0.04eVの精度で検出できる。3) ニュートリノ有効世代数を0.1世代の精度で検証できる。