

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01108

研究課題名（和文）原子核乾板検出器による電子ニュートリノ反応断面積の精密測定

研究課題名（英文）Precise measurement of electron neutrino cross-sections with nuclear emulsion detector

研究代表者

福田 努（Fukuda, Tsutomu）

名古屋大学・高等研究院・特任講師

研究者番号：10444390

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、NINJA実験における原子核乾板を用いた将来のステライルニュートリノ検証に向けて、新奇な検出器構成やグラフ理論に基づく飛跡再構成法の開発など新しい電子ニュートリノ反応解析手法を開発した。また、東北大学電子光物理学研究センターでの陽電子ビーム照射実験とJ-PARCでのニュートリノビーム照射実験を成功裏に遂行して、本番のステライルニュートリノ検証実験への土台を築くことができた。さらに、NINJA実験の解析を進め、ニュートリノ-核子反応測定に向けた重水標的・原子核乾板検出器を用いたニュートリノ-重水反応の検出・反ニュートリノ-鉄原子核荷電カレント反応における荷電粒子過剰生成を検出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

20年以上解決していない、標準的な3種類のニュートリノ振動の枠組みから外れたステライルニュートリノの存在について早期の追証・決着が強く望まれている。原子核乾板実験は極小の背景事象の元でステライルニュートリノ検証が可能である。本研究の結果により、この将来実験に向けて着実な一歩を踏み出すことができた。また、原子核乾板によるニュートリノ-重水反応の検出・反ニュートリノ-鉄反応における荷電粒子の過剰生成の検出といった結果は、今後のニュートリノ-核子/原子核反応の研究を大きく進展させるのみならず、ニュートリノCP非対称性の検証を目指すニュートリノ振動実験での系統誤差の抑制に繋がることを期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed new electron neutrino interaction analysis methods, including novel detector configurations and a graph theory-based track reconstruction method for the future verification of sterile neutrinos using nuclear emulsion in the NINJA experiment. Additionally, we successfully conducted positron beam exposure experiments at the Research Center for Electron Photon Science of Tohoku University and neutrino beam exposure experiment at J-PARC, laying the groundwork for the upcoming sterile neutrino verification experiments.

Furthermore, during this research period, we advanced the analysis of the NINJA experiment and detected neutrino-heavy water interactions using heavy water target-nuclear emulsion detectors for neutrino-nucleon interaction measurements, and the excessive production of charged particles in antineutrino-iron charged current interactions.

研究分野：素粒子実験

キーワード：原子核乾板 ニュートリノ 電子ニュートリノ ステライルニュートリノ NINJA実験 グラフ理論 J-PARC 加速器

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1998年にスーパーカミオカンデ(SK)実験が発見した大気ニュートリノ振動は、ニュートリノが質量を持つことを証明した。これは素粒子標準模型の不完全性を示す初の実験的証拠として注目され、世界中でその全容解明に向けた研究が進み、近年のニュートリノ振動研究の結果によって、3世代間のニュートリノ振動の詳細が明らかとなってきた。一方で、約20年前にLSND実験で観測されたミューニュートリノ(ν_μ)から電子ニュートリノ(ν_e)へのニュートリノ振動は標準的な3種のニュートリノ振動では説明できず、その解釈として第4世代目のステライルニュートリノの存在を示唆した。もし、その存在が確認されればクォーク・レプトンがそれぞれ3世代として構築されている現在の素粒子の標準模型に新たな粒子(群)を加えることになり、標準模型を超える新物理への突破口を拓くことができる。

現在までにステライルニュートリノの存在を示唆する実験報告を表1に示す。他方、PLANCK衛星による宇宙観測からは否定的なデータが出るなど、各々のニュートリノ実験における2~4の有意度は現在想定していない、加速器・検出器または物理過程による系統誤差の寄与の可能性も議論されており、現状は混沌としている。そのため、これらの実験が示唆する異常ニュートリノ振動解を検証するために世界中で新しい実験が次々と計画・実施されており、激しい競争状態にある。現在最も高い統計的有意度でステライルニュートリノ存在を主張しているのは、米国フェルミ研究所で行われているMiniBooNE実験(図1)による「電子ニュートリノ超過の検出」であるが、問題となっている背景事象の低減および統計的にもすでに限界がきており、ステライルニュートリノ存在を立証するためには、これらの結果を質的に異なる精密測定手法により、直接的に検証することが重要である。

実験	ニュートリノ源	シグナル	有意度
LSND	静止 μ 崩壊	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ ($\bar{\nu}_e$ 超過)	3.8σ
MiniBooNE	飛行 π 崩壊	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (ν_e 超過)	4.7σ
		$\nu_e + \bar{\nu}_e$ 超過	4.8σ
Gallex/SAGE	電子捕獲	$\nu_e \rightarrow \nu_x$ (ν_e 消失)	2.7σ
原子炉	β 崩壊	$\bar{\nu}_e \rightarrow \nu_x$ ($\bar{\nu}_e$ 消失)	3.0σ

表1: ステライルニュートリノ存在を主張している実験

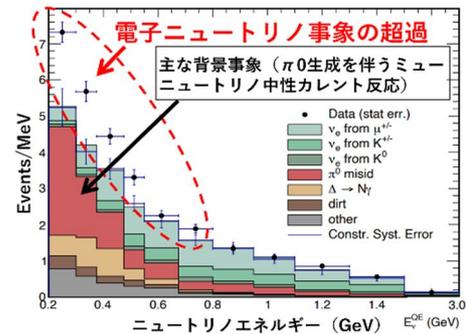


図1: MiniBooNE実験の電子ニュートリノ超過の結果

2. 研究の目的

本研究の最終目的はステライルニュートリノ探索実験、特にMiniBooNE実験の直接検証を行い、ステライルニュートリノ存在に対して明確な答えを出すことである。数100MeVの電子ニュートリノ超過を検出するMiniBooNE実験では電子ニュートリノ反応断面積及び電子ニュートリノ反応の背景事象の不定性が大きい中で、膨大な背景事象の中から統計的手法によって電子ニュートリノが予測された背景事象より多いことを検出するため、未知の系統誤差に対する懸念が払拭できておらず、大きな課題となっている。そこで、我々は原子核乾板検出器を導入し、背景事象を極少に抑えた電子ニュートリノ反応測定を行うことで明快な結果を出す。本研究課題ではその計画に向けて原子核乾板を用いた電子ニュートリノ反応の精密測定技術を確認し、小規模検出器を用いて実際にJ-PARCにて電子ニュートリノ反応測定を行う。

3. 研究の方法

: 低エネルギーニュートリノ実験における電子ニュートリノ反応探索

現在、我々はJ-PARCにて原子核乾板を主検出器とした低エネルギーニュートリノ反応の精密測定実験(NINJA実験: J-PARC E71)を遂行している。ここで取得されたデータ中から電子ニュートリノ反応を探索し、本番実験の解析デモンストレーションを行う。

：東北大学電子光物理学研究センターにおける陽電子ビーム照射実験

原子核乾板検出器における数 100MeV 電子の同定手法・エネルギー測定法の開発に向けて、実際に様々なエネルギーの(陽)電子ビームを異なる角度から原子核乾板検出器に照射したサンプルを東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)にて作成する。また、この実験では で行う第二物理ランから導入する大粒子結晶を用いた原子核乾板や角度精度向上を目的とした COP 支持体を用いた原子核乾板の性能評価も実施する。

：J-PARC でのニュートリノビーム照射実験の実施

2023 年 11 月からの J-PARC でのニュートリノビーム照射において NINJA 実験の第二物理ラン(E71b)を実施すべく、原子核乾板の製作・性能評価と改良、蓄積ノイズの消去作業、シンチレーショントラッカーの修繕、J-PARC 現地での原子核乾板検出器製作、全検出器の実験スペースへのインストール作業をビーム照射前に遂行し、ニュートリノビーム照射期間中は検出器の健全性・安定稼働を現地滞在シフトが確認、ビーム照射終了後は原子核乾板を回収して岐阜大学大暗室にて大量現像を遂行し、解析を開始する。

4. 研究成果

- 1 : 電子ニュートリノ反応候補事象の検出

2019-2020 年に実施した NINJA 実験における最初の物理ラン(J-PARC E71a)で取得した測定データのサブサンプルを用いて、電子ニュートリノ反応探索を実施した。ミュオンニュートリノ反応探索では、原子核乾板検出器後方の Muon Range Detector(MRD)で同定した μ 粒子の飛跡を原子核乾板検出器へ逆追跡する方法が一般的だが、電子ニュートリノ反応探索の場合はニュートリノ反応から生成するレプトンが電子であり、MRDで同定できず、この方法が使えないため、ニュートリノ反応を原子核乾板中で再構成し、生成粒子の中に電子があるかどうかを判定する手法をとる。原子核乾板中での直接ニュートリノ反応検出法は本研究代表者が以前テスト実験(J-PARC T60)にて確立していた(PTEP2017,063C02)が、その時と比べて E71 では、ニュートリノエネルギーがおよそ半分になっており、改めて実施した。

解析の結果、1 例の電子ニュートリノ反応候補イベントを検出した。このイベントは、
[i]陽子と最小電離粒子の飛跡が Opening Angle がほぼ Back to back で vertex を組み、
[ii]この最小電離粒子は原子核乾板標的検出器後方のエマルジョンシフターに飛跡が存在しており、ニュートリノ実験期間中の事象であるが、さらに後方の Muon Range Detector では μ 同定されていない、ことから、極めて電子ニュートリノ反応候補としての可能性が高いことがわかった。また、その他に直接検出法で検出したニュートリノ反応候補事象は逆追跡法でも検出されており、解析の信頼性も担保することができた。

一方で、いくつか課題も見つかった。低エネルギーニュートリノ反応では生成する荷電粒子数が 2~3 本と少ないことから、ノイズとなる飛跡が偽物の vertex を作ってしまうことがある。従って、このようなノイズ飛跡を極力除去することが重要である。このノイズ飛跡の大部分は原子核乾板検出器を組み立てる前の保管時に記録された宇宙線の飛跡であるため、電子ニュートリノ反応解析の際には、取得した飛跡データを保管時の原子核乾板のアライメントで接続して繋がった飛跡を解析データから消去する解析法(virtual erasing 法)を徹底する必要あることがわかった。また、低エネルギーニュートリノ反応から生成する粒子はエネルギーが低く、ニュートリノビーム軸に対して放出角が大きくなるため、そのような飛跡で構成されるニュートリノ反応への感度と信頼性を高く保持すべく、原子核乾板のエッジ付近では宇宙線等の本来貫通すべき飛跡に対しての貫通判定に十分な枚数を確保すると、原子核乾板外縁部分を大幅に有効標的質量から削ってしまうことになった。しかし、貫通判定に使う枚数を 2 枚から 1 枚に減らしたところ、貫通判定に失敗した宇宙線と考えられる飛跡が作る大量の偽 vertex を生成してしまっていたことがわかった。この問題を解決するために、ニュートリノ標的部の外側に図 2 のように、標的部の原子核乾板とは垂直な向きに原子核乾板を入れることで少ない体積で貫通判定を実現する手法を考案した。今後実施する電子ニュートリノ反応測定実験では、この手法を導入することで検出器のエッジ付近においても高い検出効率が見込めるようになる。

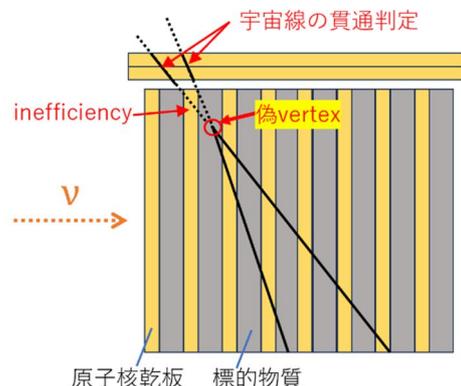


図 2 : 新しい貫通判定手法

- 2 : グラフ理論を用いた原子核乾板飛跡の新解析手法の開発

E71a におけるニュートリノ反応解析を進める上で、電子飛跡解析にも応用できる汎用的な新解析技術の開発に成功した。現在我々が利用している原子核乾板中の飛跡再構成ソフトウェア NETSCAN2 は、我々が長基線ニュートリノ振動実験 OPERA のために開発したもので、その飛跡再構成アルゴリズムは、[i] 2組の原子核乾板に記録された飛跡を位置・角度の許容値を設定して許容値内のものを全て接続する、[ii] 2組の原子核乾板は隣り合うもの、1枚飛ばし、2枚飛ばし、のように独立に接続する。接続した飛跡ペアを linklet と名付ける、[iii] 全原子核乾板の linklet を鎖のように全ての組み合わせを繋げてゆく。それを chain と呼ぶ。というものである。この方式の利点は飛跡の検出効率が低く、ノイズ飛跡の多い環境であっても1組は正しい繋がり (chain) を作ることができ、あとは偽の chain を排除すればよいことである。多くの場合は1本の正しい chain に枝葉のように偽の chain が混じっているだけで、その排除は容易であるが、対象とする荷電粒子が低エネルギーで接続許容値が大きくなる場合や荷電粒子の密度が極めて高い場合、電子シャワー等が起こって局所的に密度が高くなる場合等では、偽 chain との分離が難しくなり、それが当初からの課題であった。この課題を解決すべく、グラフ理論の考え方を導入し、飛跡集団に対して小さい二部グラフ集団に分離して各グラフを解決してゆくことによって chain 数の爆発を抑制して正しい chain のみを残すことに成功した。詳細は、2022年度名古屋大学博士論文, 甲第 14425 号 (著者: 鈴木陽介, 2023年3月) を参照されたい。図3に示すように、電子シャワーが作る膨大な数の chain から本物のみを抽出できていることがわかる。これは電子ニュートリノ反応解析にとって極めて有用である。

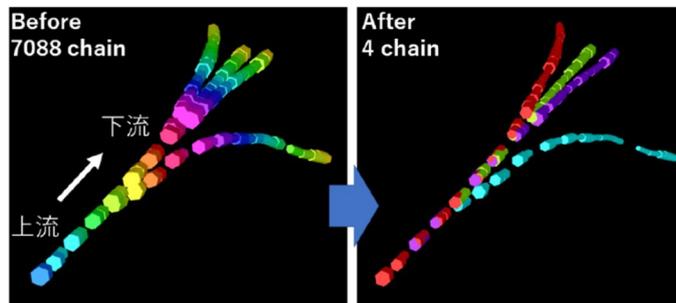


図3 : chain 数の爆発 (4本 7088本) をグラフ理論を用いて本来の4本のみ抽出成功。

: 陽電子ビームを用いた原子核乾板検出器の性能評価

2022年11月に東北大学電子光理学研究センター (ELPH) にて、[i] 新規導入した大粒子臭化銀結晶を用いた原子核乾板の性能評価、[ii] 支持体に従来より厚い COP ベースを導入した原子核乾板の性能評価、[iii] 原子核乾板検出器の電子に対する応答評価、を目的に 300, 500, 800 MeV の陽電子ビーム照射実験を実施した。[i] では現在開発中の最新型原子核乾板高速自動飛跡読み取り装置 HTS2 での飛跡認識を行い、 $|\tan \theta| < 1.5$ までの角度範囲で検出効率が 99% 以上であることを確認した。現在 HTS2 に大角度飛跡読み取り技術を導入中である。[ii] では COP ベース (厚さ 500 μm) を使った原子核乾板と従来の厚み 200 μm のポリスチレンベースを使った原子核乾板の角度ごとの角度精度を稼働中の読み取り装置 HTS1 で評価し、図4のように大角度にわたって想定通り COP ベースで角度精度が2倍以上の改善がなされていることを確認した。図5は [iii] のセットアップである。スキャンしたデータからは照射した各エネルギーの陽電子ビームがピックアップされており、現在、その詳細な振舞いについて解析が進行中である。

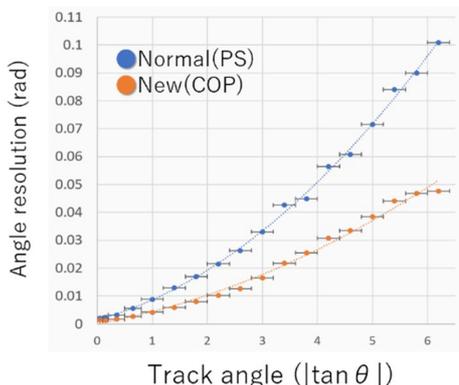


図4 : COP ベース原子核乾板の角度精度

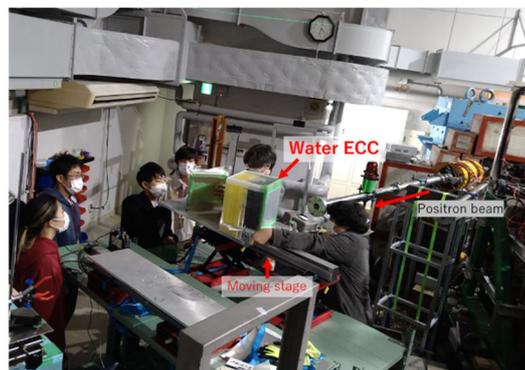


図5 : ELPH でのビーム照射セットアップ

：NINJA 実験・第二物理ラン (E71b) の進行

2023 年 11 月からニュートリノビーム開始に向け、新たに大粒子臭化銀結晶を用いた原子核乾板を本番実験用に 150m² 製造した。製造にあたっては機械塗布装置に乳剤機械送液機構を導入して歩留まり率を大幅に改善した。また、名古屋大学に大量ノイズ消去施設を立ち上げ、実験で使用する 1,300 枚の原子核乾板の蓄積ノイズを消去した。さらに、エマルジョンシフター用には COP ベース原子核乾板を 4m², 45 枚を手動塗布にて製作した。シンチレーショントラッカー修繕は横浜国立大学にてデッドチャンネルに対応するダメージファイバーの交換・コネクタ部の補修を行った。J-PARC では地下に暗室を構築し、原子核乾板の真空パック作業等を進め、図 6 のように実験スペースに全検出器のインストールを完了した。E71b では -1 で考案した新しい貫通判定手法を行うために、ニュートリノ標的部の外側に標的部の原子核乾板とは垂直な向きに原子核乾板を入れた検出器を作製している。ニュートリノビーム照射は 2023 年 11 月 23 日から始まり、途中休止を挟んで 2024 年 2 月 24 日に終了した。その後、岐阜大学の暗室にて原子核乾板の大量現像作業を行い(図 7)、約 1 か月かけて 1 枚の失敗もなく完遂した。現在、原子核乾板の表面銀拭き取り作業と膨潤作業を進めながら、7 月からのスキャン開始に向けて HTS2 の調整作業を行っている。

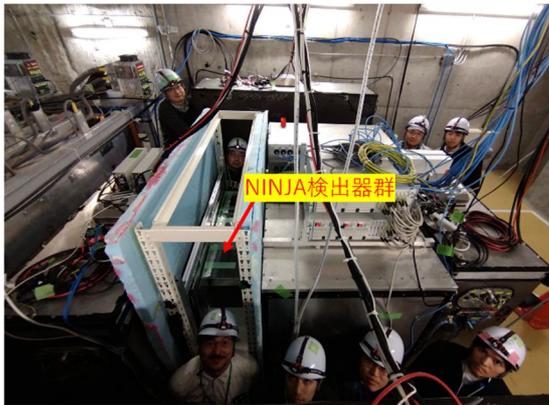


図 6：検出器インストール後の全体写真

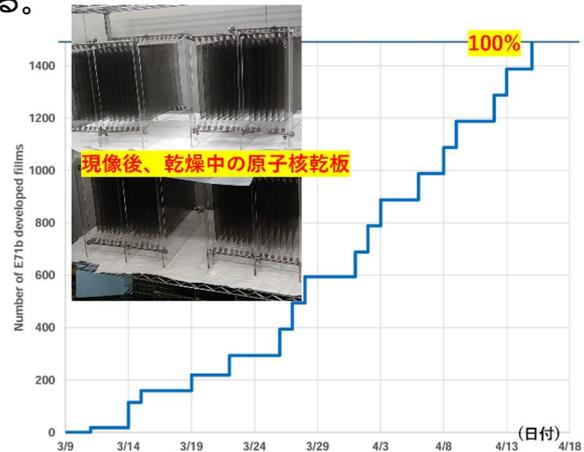


図 7：現像作業の進捗

：その他の研究課題期間中の研究成果

・重水標的・原子核乾板検出器の開発とニュートリノ-重水反応の検出

NINJA 実験ではニュートリノ-核子反応の精密測定を提案している。ニュートリノの、重水標的反応と水標的反応を差し引くことでニュートリノ-核子反応を抽出する。2021 年春に重水標的・原子核乾板検出器を初めて導入したニュートリノ照射実験を実施した(J-PARC T81)。その解析を進め、ニュートリノ-重水反応の検出に成功した。(図 8)

・反ニュートリノ-鉄原子核荷電カレント反応における 粒子過剰生成の検出

2016 年に実施した NINJA 実験における鉄標的・原子核乾板検出器のニュートリノ反応解析 (J-PARC T60) を進めるとともに、結果を注意深く精査して反ニュートリノ-鉄原子核荷電カレント反応において明快な荷電 粒子の過剰生成を検出した。現在、この物理過程についての解釈を理論の専門家も交えて議論を進めている。(図 9)

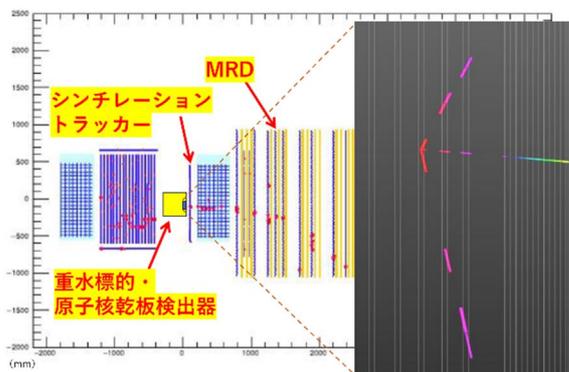


図 8：ニュートリノ-重水反応の検出

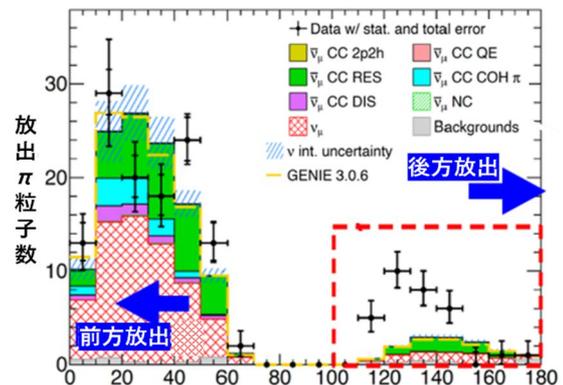


図 9： $\bar{\nu}_\mu$ -鉄原子核荷電カレント反応における荷電 粒子の放出角度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 N. Agafonova, et al (OPERA Collaboration)	4. 巻 2023
2. 論文標題 Updated constraints on sterile neutrino mixing in the OPERA experiment using a new identification method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033C01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Odagawa T., Fukuda T., Hiramoto A., Kawahara H., Kikawa T., Minamino A., Nakaya T., Sato O., Suzuki Y., Yasutome K.	4. 巻 1034
2. 論文標題 Design and performance of a scintillation tracker for track matching in nuclear-emulsion-based neutrino interaction measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 166775 ~ 166775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.166775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki Y, Fukuda T, Kawahara H, Komatani R, Naiki M, Nakano T, Odagawa T, Yoshimoto M	4. 巻 2022
2. 論文標題 Wide angle acceptance and high-speed track recognition in nuclear emulsion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 063H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Oshima H., Matsuo T., et al. (NINJA Collaboration)	4. 巻 106
2. 論文標題 Measurements of protons and charged pions emitted from μ charged-current interactions on iron at a mean neutrino energy of 1.49 GeV using a nuclear emulsion detector	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 32016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.032016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Odagawa T, Suzuki Y, Fukuda T, Kikawa T, Komatsu M, Nakaya T, Sato O, Shibuya H, Yasutome K	4. 巻 2022
2. 論文標題 Momentum reconstruction of charged particles using multiple Coulomb scatterings in a nuclear emulsion detector	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 113H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計51件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 小林 春輝
2. 発表標題 NINJA 実験に用いる大粒子原子核乾板の開発
3. 学会等名 日本写真学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩本 豪
2. 発表標題 原子核乾板自動塗布装置における機械送液の開発
3. 学会等名 日本写真学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 霞 綺花
2. 発表標題 NINJA実験・物理ランにおける最新の解析状況
3. 学会等名 日本物理学会2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 南 英幸
2. 発表標題 次世代超高速原子核乾板読取装置HTS2 の開発状況
3. 学会等名 日本物理学会2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守山 新星
2. 発表標題 NINJA実験RUN9で用いたシンチレーショントラッカーと原子核乾板検出器の飛跡接続
3. 学会等名 日本物理学会2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 俊
2. 発表標題 NINJA実験E71bにおけるシンチレーショントラッカーとエマルジョンシフターの開発状況の報告
3. 学会等名 日本物理学会2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福田 努
2. 発表標題 原子核乾板を用いた加速器ニュートリノ実験NINJAの最新状況
3. 学会等名 画像関連学会連合会2023年度秋季合同大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 広部 大和
2. 発表標題 NINJA実験に用いる大粒子原子核乾板の開発
3. 学会等名 画像関連学会連合会2023年度秋季合同大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsutomu Fukuda
2. 発表標題 The NINJA experiment and its future prospects
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2023 (ICMaSS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 霞 綺花
2. 発表標題 NINJA実験・2019年物理ラン，水標的ECCのニュートリノ反応解析の状況
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 早川 友博
2. 発表標題 NINJA実験第2物理ランの最新状況
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤 俊
2. 発表標題 NINJA実験E71bにおけるシンチレーショントラッカーの運用及び解析状況
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大谷 尚輝
2. 発表標題 NINJA実験における新型シンチレーショントラッカーの開発状況
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 守山 新星
2. 発表標題 NINJA実験RUN9で用いた原子核乾板ニュートリノ反応検出器ECCへの飛跡接続
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 稲元 柊
2. 発表標題 NINJA実験RUN9における重水標的のニュートリノ反応の解析
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 河原 剛義
2. 発表標題 原子核乾板飛跡最高速読取装置HTS2の最新運用状況
3. 学会等名 日本写真学会2024年度年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 谷 忠昭
2. 発表標題 原子核乳剤のリセット：潜像中心の除去と安定性の確保
3. 学会等名 日本写真学会2024年度年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小林 春輝
2. 発表標題 ニュートリノ反応精密測定実験NINJA E71bの最新状況と展望
3. 学会等名 日本写真学会2024年度年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 福田 努
2. 発表標題 卓越した原子核乾板自動解析技術の開発によるニュートリノ振動検出への貢献と新たなニュートリノ研究の開拓
3. 学会等名 日本写真学会2024年度年次大会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tsutomu Fukuda
2. 発表標題 Status of Neutrino-Water interaction measurements in the NINJA experiment
3. 学会等名 13th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few GeV Regions (NuInt2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihiro Minamino
2. 発表標題 Measurement of numu and numu-bar charged-current interactions on iron using a nuclear emulsion detector in the NINJA experiment
3. 学会等名 13th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few GeV Regions (NuInt2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Odagawa
2. 発表標題 Status of the NINJA experiment
3. 学会等名 The 23rd International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsutomu Fukuda
2. 発表標題 Precise measurement of Neutrino Interactions at J-PARC in the NINJA experiment
3. 学会等名 International Conference on the Physics of the Two Infinities (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 霞 綺花
2. 発表標題 NINJA実験物理ランにおける水標的ECCの解析
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小田川 高大
2. 発表標題 NINJA 実験物理ランにおけるニュートリノ-水反応由来の荷電粒子の測定
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守山 新星
2. 発表標題 NINJA実験：ニュートリノと重水の反応断面積測定におけるシンチレーショントラッカーによる荷電粒子の飛跡への時間情報の付与
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木河 達也
2. 発表標題 ニュートリノ反応測定に用いる原子核乾板との飛跡接続用の新型高位置分解能シンチレータ検出器
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺 祐仁
2. 発表標題 NINJA実験・次期物理ランにおける新型自動飛跡読み取り装置HTS2の開発及び性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Odagawa
2. 発表標題 Recent status of the NINJA experiment
3. 学会等名 新学術領域研究「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田 努
2. 発表標題 NINJA実験におけるニュートリノ研究の現状と将来構想
3. 学会等名 日本写真学会2022年年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森元 祐介
2. 発表標題 ニュートリノ精密測定実験NINJAに用いる大粒子乳剤原子核乾板の性能
3. 学会等名 画像関連学会連合会第8回秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田 努
2. 発表標題 原子核乾板・大角度スキャン技術の開発とそれを用いたニュートリノ研究
3. 学会等名 画像関連学会連合会第8回秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島 仁
2. 発表標題 NINJA実験における1 GeV領域の反ニュートリノ-鉄荷電カレント反応の測定結果
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 霞 綺花
2. 発表標題 NINJA実験・物理ランにおけるニュートリノ反応の解析状況
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松尾 友和
2. 発表標題 ニュートリノ反応精密測定実験 NINJA の次期物理ラン E71b の準備状況
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 広部 大和
2. 発表標題 大粒子ハロゲン化銀結晶を用いた原子核乾板におけるリフレッシュ性能の改良
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林 春輝
2. 発表標題 NINJA実験に用いる新型大粒子乳剤のスキャンデータによる評価
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 俊
2. 発表標題 NINJA実験の陽電子ビーム試験において垂直照射を行った原子核乾板の厚さの違いによる解析精度の評価
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河原 剛義
2. 発表標題 NINJA E71b実験へ向けた原子核乾板飛跡の時間情報付与装置LES2の開発状況
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福田 努
2. 発表標題 NINJA実験・物理ランにおけるニュートリノ反応探索
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大島 仁
2. 発表標題 NINJA実験における1 GeV領域のニュートリノ-鉄荷電カレント反応由来の陽子と荷電パイ中間子の測定
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小田川 高大
2. 発表標題 NINJA 実験物理ランにおけるニュートリノ反応に由来する荷電粒子の運動量再構成
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾 友和
2. 発表標題 水を標的とした原子核乾板検出器での電子のエネルギー再構成方法の評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺 祐仁
2. 発表標題 NINJA実験・次期物理ランにおける新型自動飛跡読み取り装置HTS2の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 霞 綺花
2. 発表標題 NINJA 実験物理ランにおける電子ニュートリノ反応の解析手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小田川 高大
2. 発表標題 NINJA 実験物理ランにおけるニュートリノ反応の測定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsutomu Fukuda
2. 発表標題 NINJA experiment : Neutrino research program with nuclear emulsion at J-PARC
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (ICMaSS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Oshima
2. 発表標題 Measurement of neutrino charged-current interactions on iron using a nuclear emulsion detector in the NINJA experiment
3. 学会等名 International Conference on Advanced Imaging 2021 (ICAI2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomokazu Matsuo
2. 発表標題 Current Status and Future Plan of NINJA Experiment at J-PARC
3. 学会等名 International Conference on Advanced Imaging 2021 (ICAI2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ayaka Kasumi
2. 発表標題 The event analysis in NINJA experiment
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2021
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

・令和6年度 日本写真学会 学術賞 受賞(福田 努・中野 敏行)
<http://www.iar.nagoya-u.ac.jp/performance/3171/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 修 (Sato Osamu) (20377964)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任准教授 (13901)	
研究分担者	中平 武 (Nakadaira Takeshi) (30378575)	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 (82118)	
研究分担者	中家 剛 (Nakaya Tsuyoshi) (50314175)	京都大学・理学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	早戸 良成 (Hayato Yoshinari) (60321535)	東京大学・宇宙線研究所・准教授 (12601)	
研究分担者	南野 彰宏 (Minamino Akihiro) (70511674)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	
研究分担者	三角 尚治 (Mikado Shoji) (80408947)	日本大学・生産工学部・准教授 (32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関

クロアチア	Ruder Boskovic Institute			
英国	King's College London			