

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00684

研究課題名(和文)ニュートリノフラックスの系統誤差抑制のためのハドロン生成・散乱断面積の精密測定

研究課題名(英文) Precision Hadron Production Measurements to Suppress Systematic Errors in Neutrino Fluxes

研究代表者

ウェンデル ロジャー (Wendell, Roger)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20647656

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,700,000円

研究成果の概要(和文)：加速器ニュートリノ・大気ニュートリノが生成される過程を正確に理解すると、これらの粒子を観測実験の測定精度が向上される。本研究がそのニュートリノを生成する、陽子・中間子と物質との相互作用によるハドロンの生成・散乱を精密に測るため、米国FNAL研究所において実験をした。粒子の識別と飛行時間測定を行う複数の検出器を新たに開発・作成し、荷電粒子ビームに照射し、様々な散乱標的との反応におけるハドロン生成・散乱を調べた。データ取得を3回に分けて、複数種類の入射粒子とエネルギーで入射ビームに対して150mradまでの散乱角の測定をした。なお、データの解析を進めながら、350mradの測定準備も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の測定により、加速器ニュートリノや大気ニュートリノを使っている実験の不定性低減が期待される。特に世界中の現行・将来実験が高精度でニュートリノ振動現象を調べている中、このような不定性抑制が新しい結果を直接的に可能にする柱の一つである。このような意味では今回の測定は日本だけでなく世界のニュートリノ研究を強化するものでもある。本研究は日本の特色技術を用いたため、日本社会にとってこの技術が科学の進行に大きく貢献していることが重要である。なお、本研究は現在の素粒子世界を理解するため、小さな進歩ではあるが、上記のような実験の測定精度の向上に貢献し、宇宙誕生・進化の謎解きに繋がるため、意義がある。

研究成果の概要(英文)：A detailed understanding of the processes involved in creating accelerator neutrinos and atmospheric neutrinos is expected enhance the measurement capabilities of experiments using these sources. In order to make precise measurements of the production and scattering of hadrons born in the interactions of protons (or mesons) with matter, this research performed experiments at the Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) in the United States. Its focus was on the development and production of various detectors to perform particle identification and measure particle times of flight. These detectors were deployed in the FNAL charged particle beam to measure hadron production and scattering on a variety of targets. Data taking was spread over three periods and measurements of outgoing particles with scattering angles up to 150mrad were made with different primary particles of various energies. This research also made preparations for measurements up to scattering angles of 350mrad.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ ニュートリノ・フラックス ハドロン散乱 EMPHATIC実験 RPC 鉛ガラス検出器 エアロゲル検出器 ハドロン生成

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

大気ニュートリノにおけるニュートリノ振動が1998年に発見されて以来、様々なニュートリノ源を用いた実験がこの不思議な現象を測ってきたが、未解明問題がまだまだたくさん残っている。特にニュートリノ振動における粒子と反粒子の対称性が敗れているかどうか (CP対称性問題)・第二世代と第三世代のニュートリノ混合を支配する混合角の値が丁度45度であるかどうか (θ_{23} 問題)・ニュートリノの質量順番 (質量階層性問題) がその主な三つである。なお、CP対称性が破れているなら、現在の宇宙には物質が豊富であるが反物質がほとんどないことを説明しようと指摘されているから、注目を集めている。CP問題を含めてこれらの問題を解き明かすために、ニュートリノ実験の測定精度向上が必須課題となっているが、データの増量と測定の不定性 (系統誤差) の削減が現行実験と将来実験の焦点である。

後者について実験へ入射されるニュートリノの量 (フラックス) そしてニュートリノと検出器物質・材料との反応確率 (反応断面積) に伴う不定性が実験感度を抑制している。特に上記問題の解決を目指し、大気ニュートリノ (例: 日本のスーパーカミオカンデ実験) または人工的に作られる加速器ニュートリノ (例: 日本のT2K実験・米国のNOVA実験) を用いる現行実験の測定精度が既にこれらの不定性により制限されつつある。なお、一桁くらい多いデータ量を期待している将来実験 (日本のハイパーカミオカンデ実験・米国のDUNE実験) の精度がさらに制限されると知られている。

フラックスに関して両方のニュートリノ源は、同じような生成メカニズムにより生成されるため、その課程を精密に測ると両種類の実験における不定性が削減可能となる。さらに、ニュートリノの断面積自体が主に加速器ニュートリノ実験による研究されているが、こういう実験もフラックスに伴う不定性に制限されている。ただ、ニュートリノ振動が起こる前後二機の検出器で測定を行うニュートリノ振動実験に比べて一機しかない断面積測定実験が受ける制限がさらに厳しいことが問題である。まとめると、ニュートリノフラックスを正確に理解すると、フラックスの不定性が改善され、ニュートリノ断面積実験の測定精度もよくなるため、現行と将来のニュートリノ振動実験の感度は、この両方の改善により向上されると期待される。

2. 研究の目的

本研究は、ニュートリノフラックス (ニュートリノ生成) を支配するハドロン (陽子・ π 中間子・K中間子など) の生成・散乱課程を精密に測ること目的としている。そうすると大気ニュートリノと加速器ニュートリノのフラックスが理解でき、関連不定性を削減できる。

高エネルギーの陽子が原子核へ入射されると、その反応から中間子や陽子・中性子といったハドロン粒子が生成される。中間子は不安定であるため、すぐに崩壊するが、その崩壊によりニュートリノ・反ニュートリノが生成され、ニュートリノフラックスを作る。ただ、崩壊前に別の原子核と反応起こすと、例えもと粒子が吸収されたり、もしくは別の粒子が生成されたりすると、もと粒子の情報が失われる。これにより期待されるニュートリノの量がその分変化してしまう。なお、もとの反応から作られた陽子などが同じように別の原子核と打つかり、さらにハドロンを生成すると、期待されるニュートリノフラックスがまたその分変わってしまう。これらはフラックス不定性の原因となる。なお、以上の二次的な反応によるニュートリノの量が変わるが、その走る方向も変わりうる。加速器ニュートリノ実験では、決まった方向からニュートリノのビームを受けるため、その軸から離れるように親の中間子が散乱されると不定性になる。

本研究の目的は、ニュートリノ振動実験のエネルギー領域におけるニュートリノフラックスへの大きな系統誤差となっているハドロンと物質との相互作用を調べる。特に、低運動量を持つハドロンが原子核と散乱する際、生成される粒子のエネルギー・数・方向を精密に測定する。具体的に低いエネルギーから高いエネルギー (2-120 GeV) を持つ陽子・パイ中間子・K中間子と加速器ニュートリノ・大気ニュートリノに関連する標的 (鉄・炭素・アルミ・水など) との反応を10%程度で測ることを目標としている。

3. 研究の方法

ハドロン生成・散乱を測るため、本研究は米国のフェルミ加速器研究所 (FNAL) のTest Beam Facility (FTBF) にてハドロンのビームを用いた実験 (EMPHATIC実験) を行った (図1を参照)。この実験では、一次粒子ビームを散乱標的へ入射させ、下流にある永久磁石と検出器を

用い、標的から出る二次粒子の飛行時間・運動量・種類・方向を測る。荷電粒子が反応から出る場合、標的のすぐ下流にある磁石により飛跡が曲げられるが、その曲がれ具合を磁石上下流のSSD検出機（シリコンを使った、位置分解能が優れている検出機）により運動量測定と標的を出た時点での方向がわかる。この情報を下流のRICH検出機（エアロゲルを材料とした、チェレンコフ光を発生させる検出器）・RPC検出器（粒子の飛行時間を高分解能で測る検出器）・鉛ガラス検出器（粒子のエネルギー測定を行う検出器）のそれぞれの測定結果に合わせると、粒子の種類がわかる。なお、標的へ入射する粒子を識別すると、上流側のAerogel Counters（エアロゲル発光材によりチェレンコフ光を発光させる検出器）が設置してある。また、反応点をより正確に調べるため、原子核乾板を使った検出器を散乱標的の周りに設置するアップグレード計画もある。

このように様々な入射粒子と標的の組み合わせで実験をすると、ニュートリノビーム生成に関係している粒子と物質との反応を網羅的に測定できる。なお、FNALのFTBFではハドロン粒子のビームを低エネルギーから高エネルギーまで供給できるが、ユーザーが選べるし、純度の高いビームであるため、EMPHATIC実験が目指している測定には最適施設である。実験計画としては、データ取得を二つのフェーズに分ける。先ずビーム軸に対して150mradの散乱角までハドロン生成・散乱を測った上（フェーズ1）、実験のアップグレードを行い、さらに350mradの大角度で測定を繰り返す（フェーズ2）。統計量の多いデータで測定を行うと、ニュートリノフラックスの不定性に繋がる位相空間をカバーし、ハドロンの反応レートと散乱角（微分断面積）を高精度で測ることを目指す。

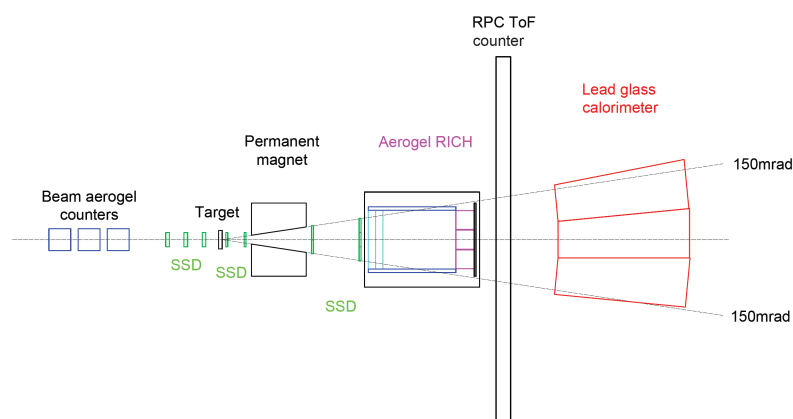


図1。EMPHATIC実験フェーズ1の様子。全長は2m程度、測定可能な最大散乱角が150mrad.

4. 研究成果

本研究は、EMPHATIC実験標的の上下で粒子識別と飛行時間測定を担当し、以下の検出機を作成した：Beam Aerogel Counters（ビームエアロゲル検出器）・RPC ToF counter・鉛ガラス検出器（図2を参照）。これらをまず日本で開発し、性能評価を行った上、米国の実験現場であるFNALへ運送した。他の検出器はアメリカグループ・カナダグループの責任になった。

ビームエアロゲル検出器は、日本の独特技術を用いた低屈折率かつ高光量のエアロゲルと光電子増倍管からなる。EMPHATIC実験のため、独特のエアロゲルを三種類（それぞれ屈折率が1.027, 1.007, 1.003）開発し、3台の検出器の一つずつ導入した。東北大学のELPH施設にて電子ビームを用い、性能評価実験を行った結果、高い光量と高い検出効率を確認し、本番実験に十分な性能を持つことと判断した。なお、RICH検出機のエアロゲル発光剤（屈折率 1.03,1.04）も日本で開発した。

RPC検出器は、入射粒子が実験に入る時点から下流側に到達するまでの時間を正確に測る。ただ、EMPHATIC実験の長さスケールが短め、2m程度であるため、到達時間を高分解能で決める必要がある。これを実現するため、6枚のガラスの間に0.260mmの空間を開け、間に流すガスを高電圧で印加するデザインにした。この構造で2台を合わせたRPC一台となり、全部で4台を作成した。荷電粒子がRPCを通過する際の時間を65 ps（一秒の1兆分の65）程度の高分解能で決めることを日本のSpring8施設にて電子・陽電子ビームで確認できた。これも十分な性能であるため、本番実験に導入した。

鉛ガラス検出器は、荷電粒子が通過する際、発光する鉛ガラスに光センサー（高電子増倍管）をくっつけたものである。研究費を節約するため、高エネルギー加速器研究機構に余っている鉛ガラスと高電子増倍管を再利用することにした。9台（+予備）を修復した後、宇宙線ミュオン粒子を使って光量と基本動作を確認した。パフォーマンスは十分あることを確認し、FNALへ運送した。

EMPHATIC実験のフェーズ1を3回に分け、データ取得したが、新型コロナウイルスの影響を受け、本研究の研究期間内にフェーズ2が行われず、後回しになった。ただ、本研究で新たに作成した、上記の検出器をフェーズ1のデータ取得期間全部に使用した。結果として、炭素・アルミ・鉄・水といった標的に7つエネルギー（4GeV-120GeV）を持つ入射粒子を当て、それぞれ100万個以上の事象を全検出機で無事に記録できた。このデータを用い、各検出機の性能も検出器群としての働きが確認できた（図3を参照）が、フェーズ2に向けて改善課題が明白となった。残念ながら、フェーズ1の最後のデータ取得が本研究期間最終の数週間に行われたため、その解析がまだ進行中である。今後は様々なハドロン生成・散乱断面積を出し、フェーズ2の準備を進めるが、その結果が研究期間外となる。



図2。本研究で開発した検出器：（左から）Beam Aerogel counters（3台），RPC(2台），鉛ガラス検出器（9台）

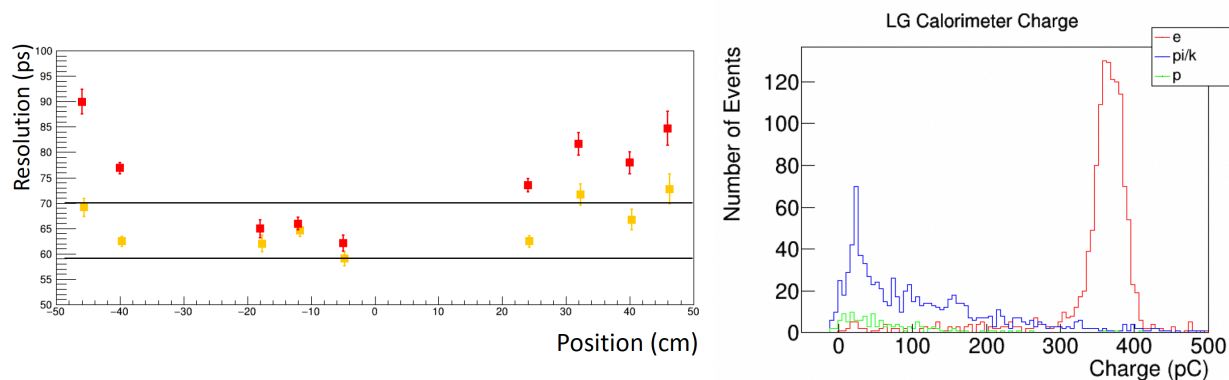


図3 本研究で開発した検出器の性能(Preliminary)。左：Spring-8にてRPC検出器の時間分解能を測り、粒子が通過した場所毎に表示している。赤とオレンジはそれぞれSlewing補正を掛ける前後、60-70ps程度の分解能が確認できた。右：EMPHATIC実験(フェーズ1)にて鉛ガラス検出器の応答を集めた電荷で表示している。なお、色付き線はBeam Cherenkov 検出器で同定した粒子を表している。両方の検出器の応答はconsistentであり、粒子識別とエネルギー測定が確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tabata Makoto	4. 巻 2374
2. 論文標題 High-quality aerogel Cherenkov radiators recently developed in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012114 ~ 012114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2374/1/012114	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5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 K. Okuhata, M. Tabata, A. Kobayashi, H. Kawai, T. Yuzawa
2. 発表標題 Development of a threshold-type silica aerogel Cherenkov counter for the EMPHATIC experiment
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田端誠, 奥畑花梨, M. Hartz, 河合秀幸, 小林篤史, 小中哲, J. Paley, 関口哲郎, R. Wendell, 湯澤貴充
2. 発表標題 EMPHATIC実験に向けたシリカエアロゲル・チェレンコフ検出器システムによる高運動量ハドロン粒子識別
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥畑花梨, 田端誠, M. Hartz, 河合秀幸, 小林篤史, 小中哲, J. Paley, 関口哲郎, R. Wendell, 湯澤貴充, 他 EMPHATIC Collaboration
2. 発表標題 EMPHATIC実験におけるビーム粒子識別のための閾値型超低屈折率エアロゲル・チェレンコフ検出器の試験結果
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Tabata
2. 発表標題 High-quality aerogel Cherenkov radiators recently developed in Japan
3. 学会等名 5th International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Friend
2. 発表標題 Hadron Production Measurements at EMPHATIC
3. 学会等名 3rd Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	福田 努 (FUKUDA Tsutomu) (10444390)	名古屋大学・高等研究院(理)・特任助教 (13901)	
研究分担者	田端 誠 (TABATA Makoto) (10573280)	千葉大学・大学院理学研究院・特任研究員 (12501)	
研究分担者	鈴木 州 (SUZUKI Atsumu) (20243298)	神戸大学・理学研究科・助教 (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	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	関口 哲郎 (SEKIGUCHI Tetsuro) (20450356)	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 (82118)	
研究分担者	F r i e n d M e g a n (FRIEND Megan) (50649332)	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 (82118)	
研究分担者	H A R T Z M A R K (HARTZ Mark) (70721702)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授 (12601)	

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