

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03588

研究課題名（和文）物質優勢宇宙の謎の解明に向けたニュートリノ反応断面積の精密測定

研究課題名（英文）Neutrino cross section measurements to solve the mystery of the matter-dominated universe

研究代表者

南野 彰宏（MINAMINO, Akihiro）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70511674

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：研究期間を通して、以下の成果を得た。(1)WAGASCI検出器によるニュートリノビーム測定を成功させた。(2)WAGASCI検出器の荷電カレント0パイオン生成モードのニュートリノ反応解析を完了した。(3)WAGASCI検出器とND280検出器のデータを組み合わせた荷電カレント0パイオン生成モードのニュートリノ反応解析を進めた。(4)WAGASCI検出器の荷電カレント1パイオン生成モードのニュートリノ反応解析を進めた。(5)T2K実験の系統誤差削減を目的とする前置ニュートリノ検出器データフィットにWAGASCI検出器のデータを組み込む準備を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の宇宙は反粒子がほとんど存在しない物質優勢宇宙であるが、このような宇宙が形成されたメカニズムは明らかになっていない。ニュートリノにおける粒子と反粒子の対称性（以後CP対称性）の破れが発見されると、上記の物質優勢宇宙が実現される可能性がある。T2K実験は加速器で生成したニュートリノビームを用いてニュートリノにおけるCP対称性の破れの発見を目指している。T2K実験の主要な系統誤差の一つである「ニュートリノと標的原子核の反応」の不定性を、T2K実験の2つの前置ニュートリノ検出器WAGASCIとND280の測定データを用いて削減できることが本研究の学術的意義である。

研究成果の概要（英文）：The following results were obtained. (1) Successful neutrino beam measurement using the WAGASCI and ND280 detectors. (2) Completion of neutrino interaction analysis in the charged-current zero-pion mode of the WAGASCI detector. (3) Progress of neutrino interaction analysis in the charged-current zero-pion mode by combining data from the WAGASCI and ND280 detectors. (4) Progress of neutrino interaction analysis in the charged-current one-pion mode of the WAGASCI detector. (5) Progress of preparations to incorporate WAGASCI data into the near-neutrino detector data fit to reduce systematic errors in the T2K experiment.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 検出器 ニュートリノ振動 加速器ニュートリノ 物質優勢宇宙 CP対称性の破れ 前置ニュートリノ

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ビッグバンで宇宙が誕生した時、同じ数の粒子と反粒子が生成された。しかし、誕生から 138 億年がたった現在の宇宙は反粒子がほとんど存在しない物質優勢宇宙である。ニュートリノで CP 対称性が破れていれば、この物質優勢宇宙が実現される可能性がある。

T2K 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC でニュートリノビームを生成し、295 キロメートル離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデ検出器で測定する長基線加速器ニュートリノ振動実験である。T2K 実験は、2018 年度までに取得したデータから、ニュートリノにおいて CP 対称性が破れていることを 95% の信頼度で示した (Nature 580 (2020) 339.)。T2K 実験は、蓄積データ量を増やしながら、系統誤差を削減することで、CP 対称性の破れを 99.7% (3 シグマ) の信頼度で確認することを目指す。ここで、T2K 実験の系統誤差削減の鍵となるのが、ニュートリノと標的原子核の反応断面積の精密測定である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、T2K 実験の CP 対称性の破れの探索感度向上をさせることである。その目的の達成の為に、T2K 実験の前置ニュートリノ検出器である WAGASCI 検出器と ND280 検出器のニュートリノビーム測定データを用いて、ニュートリノと標的原子核の反応断面積の精密測定を行う。

3. 研究の方法

本研究では、T2K 実験の WAGASCI 検出器 (図 1) と ND280 検出器を用いてニュートリノと標的原子核の反応断面積の精密測定を行う。具体的には、以下の (1)~(5) を推進する。

(1) WAGASCI 検出器によるニュートリノビーム測定

(2) WAGASCI 検出器の荷電カレント 0 パイオン生成モードのニュートリノ反応解析

(3) WAGASCI 検出器と ND280 検出器を組み合わせた荷電カレント 0 パイオン生成モードのニュートリノ反応解析

(4) WAGASCI 検出器の荷電カレント 1 パイオン生成モードのニュートリノ反応解析

(5) T2K 実験の系統誤差削減を目的とする前置ニュートリノ検出器データフィットへの WAGASCI 検出器のデータの組み込み

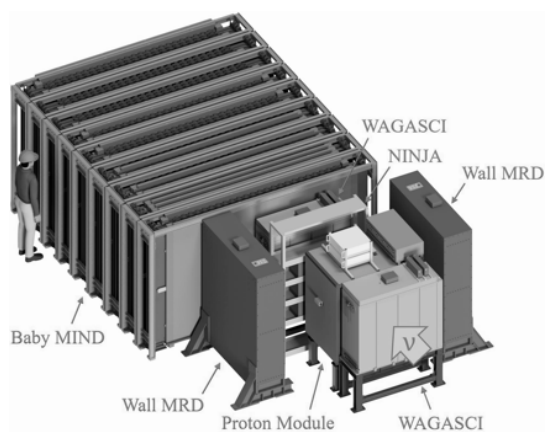


図 1 WAGASCI 検出器の全体図

4. 研究成果

成果を以下にまとめる。

(1) WAGASCI 検出器と ND280 検出器を用いたニュートリノビーム測定

2023 年 4 月および 2023 年 11 月から 2024 年 2 月に WAGASCI 検出器によるニュートリノビーム測定を成功させ、 3.2×10^{20} Proton On Target (蓄積データ量に相当、以後 POT) のニュートリノビームデータを蓄積した。本研究開始前に取得したニュートリノビームデータと合計すると 9.2×10^{20} POT のニュートリノビームデータが蓄積された。

(2) WAGASCI 検出器の荷電カレント 0 パイオン生成モードのニュートリノ反応解析

原子核内での終状態反応後にミューオンが観測される荷電カレント反応のうち、荷電パイオンが観測されない荷電カレント 0 パイオン生成モードの反応断面積測定を進めた。この反応モードは、T2K 実験のニュートリノエネルギー領域で支配的な反応モードの一つである荷電カレント擬弾性散乱に深く関係しており、ニュートリノ反応の理論モデルの検証に重要である。

最初に、2017年10月から2018年5月に取得したWAGASCI検出器の反ニュートリノランの測定データの解析を完了し、**反ミューオンニュートリノの荷電カレント擬弾性散乱積分反応断面積を測定した**。測定結果をニュートリノ反応シミュレーターの予想値と比較したところ、図2のように 1σ の範囲で一致することが確認できた。そして、この解析結果を論文にまとめた (PTEP 2021, 043C01)。

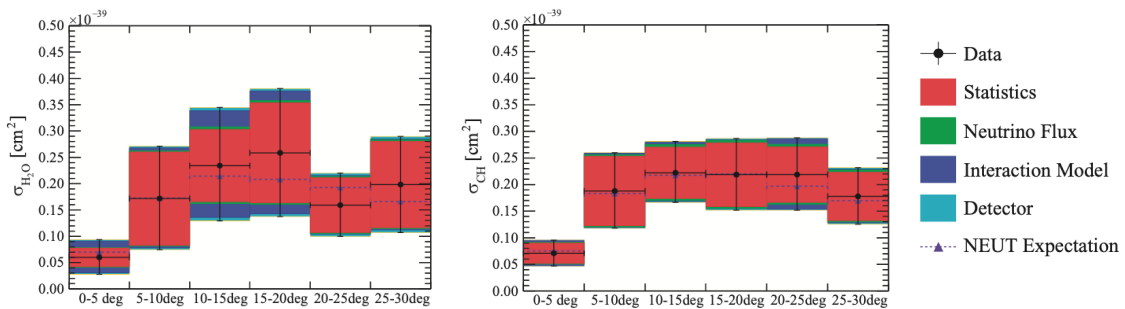


図 2 WAGASCI 検出器で測定した反ミューオンニュートリノの荷電カレント擬弾性散乱断面積 (左図:水標的、右図:CH 標的。横軸はミューオンの角度)

次に、2019年11月から2021年4月に取得したWAGASCI検出器のニュートリノランの測定データの解析を完了し、**ミューオンニュートリノの荷電カレント擬弾性散乱積分反応断面積を測定した**。ミューオンの角度の関数としての反応断面積の測定結果をニュートリノ反応シミュレーターの予想値と比較したところ、 1σ 以上離れているミューオンの角度領域が確認された。現在、この解析結果を論文にまとめている。

(3) WAGASCI 検出器と ND280 検出器のデータを組み合わせた荷電カレント 0 パイオン生成モードのニュートリノ反応解析

WAGASCI 検出器と ND280 検出器は、ビーム軸に対して異なった位置に設置されているため、異なるニュートリノエネルギー分布を持つ。そのため、2つの検出器の測定データを統合し、エネルギー分布を差し引きすることで、**より狭いエネルギー分布幅でのニュートリノ反応断面積測定が可能**となる。本研究では、このWAGASCI検出器とND280検出器の統合解析に向けた解析フレームワークの構築を進めた。

(4) WAGASCI 検出器の荷電カレント 1 パイオン生成モードのニュートリノ反応解析

荷電カレント反応のうち、荷電パイオンが1つ観測される荷電カレント1パイオン生成モードは、T2K 実験のニュートリノエネルギー領域で支配的な反応モードの一つである荷電カレントパイオン生成反応に深く関係しており、ニュートリノ反応の理論モデルの検証に重要である。本研究では、WAGASCI 検出器を用いたミューオンニュートリノの荷電カレント1パイオン生成反応モードの解析フレームワークの構築を進めた。

(5) T2K 実験の系統誤差削減を目的とする前置ニュートリノ検出器データフィットへの WAGASCI 検出器のデータの組み込み

T2K 実験では、前置ニュートリノ検出器である ND280 検出器のデータフィットを行い、ニュートリノビームおよびニュートリノ反応断面積に起因する系統誤差を削減している。当初の計画を超えた研究として、この前置ニュートリノ検出器フィットの解析フレームワークに WAGASCI 検出器のデータを新たに組み込む準備を進め、期待される系統誤差削減効果を見積もった。この研究は、本研究の目的である **T2K 実験の CP 対称性の破れの探索感度向上に直結する重要な研究** である。

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 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Abe K., Akhlaq N., Akutsu R., Kikawa T., Minamino A., Seiya Y. et al. (T2K collaboration)	4. 巻 108
2. 論文標題 Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.6×10^{21} protons on target	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.072011	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 該当する

1. 著者名 Abe K., Akhlaq N., Akutsu R., Kikawa T., Minamino A., Seiya Y. et al. (T2K collaboration)	4. 巻 108
2. 論文標題 Measurements of the muon neutrino and muon anti-neutrino induced coherent charged pion production cross sections on ^{12}C by the T2K experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.092009	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 該当する

1. 著者名 Abe K., Akhlaq N., Akutsu R., Kikawa T., Minamino A., Seiya Y. et al. (T2K collaboration)	4. 巻 108
2. 論文標題 First measurement of muon neutrino charged-current interactions on hydrocarbon without pions in the final state using multiple detectors with correlated energy spectra at T2K	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.112009	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 該当する

1. 著者名 Abe K., Akhlaq N., Akutsu R., Ali A., Kikawa T., Minamino A., Seiya Y. et al.	4. 巻 17
2. 論文標題 Scintillator ageing of the T2K near detectors from 2010 to 2021	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P10028 - P10028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/10/P10028	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 該当する

1. 著者名 Abe K, Akhlaq N, Kikawa T, Minamino A, Seiya Y et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 2021
2. 論文標題 Measurements of anti- μ and anti- e + e charged-current cross-sections without detected pions or protons on water and hydrocarbon at a mean anti-neutrino energy of 0.86 GeV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043C01:1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab014	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 該当する

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 在原拓司
2. 発表標題 T2K実験WAGASCI/Baby MIND検出器による荷電 中間子を1つ伴うニュートリノ荷電カレント反応測定に向けた事象選別
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本條貴司
2. 発表標題 T2K実験WAGASCI/Baby MIND検出器によるデータ取得状況
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 工藤悠仁
2. 発表標題 T2K実験前置ニュートリノ検出器WAGASCI/Baby MINDのビームデータ取得状況
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 Akihiro Minamino
2. 発表標題 T2K Results and Plans
3. 学会等名 8th International Conference on High Energy Physics in the LHC Era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuya Kikawa
2. 発表標題 Recent results and future prospects from the T2K 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 永井恒輝
2. 発表標題 T2K実験前置ニュートリノ検出器WAGASCIの時間分解能向上に向けたファームウェア開発
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 工藤悠仁
2. 発表標題 T2K実験WAGASCI検出器のフロントエンドエレクトロニクスの入力電荷量に対する線形性評価
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 永井恒輝
2. 発表標題 T2K実験WAGASCI検出器のフロントエンドエレクトロニクスの改良
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 K. Yasutome
2. 発表標題 Towards the measurement of neutrino cross section on H2O and CH target at 1GeV region by T2K-WAGASCI experiment
3. 学会等名 The 22nd International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Giorgio Pintaudi
2. 発表標題 T2K-WAGASCI実験による水標的の 中間子を含まないニュートリノ荷電カレント反応散乱断面積の測定結果
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 永井恒輝
2. 発表標題 T2K-WAGASCI実験のフロントエンドエレクトロニクスのタイミングキャリブレーション
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 小林北斗
2. 発表標題 T2K実験WAGASCI検出器フロントエンドエレクトロニクスを用いた電荷測定による線形性の評価
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 永井恒輝
2. 発表標題 T2K実験WAGASCI検出器フロントエンドエレクトロニクスの特性の測定、及びミュオン飛程検出器Wall-MRDのチャンネルマップの確認
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 Giorgio Pintaudi
2. 発表標題 T2K実験WAGASCI-BabyMIND検出器による水標的の中間子を伴わないニュートリノ荷電カレント反応散乱断面積の系統誤差の評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

T2K https://t2k-experiment.org/ja/
--

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	木河 達也 (KIKAWA Tatsuya) (60823408)	京都大学・理学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	清矢 良浩 (SEIYA Yoshihiro) (80251031)	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授 (24405)	

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			
米国	Colorado State University	Duke University	Stony Brook University	他12機関
英国	Imperial College London	Oxford University	STFC	他8機関
フランス	CEA/IRFU, Saclay	LLR Ecole polytechnique (IN2P3)	LPNHE, UPMC, Paris	
カナダ	TRIUMF	University of Toronto	York University	他4機関
スイス	CERN	ETH Zurich	University of Bern	他1機関