

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22684008

研究課題名(和文) 新型微細検出器によるニュートリノ-原子核反応の詳細研究

研究課題名(英文) Study of neutrino-nucleus interaction with a new fine grained neutrino detector

研究代表者

横山 将志 (Yokoyama, Masashi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90362441

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,000,000円、(間接経費) 5,400,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノ振動パラメータの測定精度を向上させるうえで今後必要不可欠となるニュートリノ-原子核反応の研究を進展させるために、従来より一桁以上位置分解能の良い、1 mm 程度で細分化された全感知型ニュートリノ検出器の基礎技術を開発し、その性能を評価した。

カナダ・TRIUMF研究所で陽子や中間子ビームの照射試験を行った結果、シンチレーティングファイバーを使用した全感知型検出器は低エネルギー粒子の検出能力にすぐれ、ニュートリノ検出器として高い性能を持ちうる事が確認できた。また、ニュートリノ反応の研究が可能な、より大きなサイズの検出器を製作するための基礎技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the understanding of the neutrino-nucleus interaction that is necessary for precision measurements of the neutrino oscillation parameters, basic technologies necessary to build a fully active detector with ~1mm segmentation using scintillating fibers (about an order of magnitude finer compared to the existing detectors) have been developed.

Based on the result of a beam test using protons and charged pions at TRIUMF laboratory in Canada, the developed detector is confirmed to have high efficiency for low energy particles, which is a key for the study of neutrino interaction. The basic technologies to realize a larger detector with more target mass, such as the readout electronics and improved photosensors, are established.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：粒子測定技術 ニュートリノ 中間子 断面積 光検出器

1. 研究開始当初の背景

2009 年から開始された東海-神岡ニュートリノ振動実験(T2K)のような、加速器ニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験では、ニュートリノを検出装置内の物質と反応させ、生成された粒子を観測することでニュートリノの研究を行う。このため、ニュートリノ振動の精密研究にはニュートリノ-原子核反応の理解が重要となる。例えば、T2K 実験では荷電カレント準弾性散乱と呼ばれる反応 ($\nu\mu + n \rightarrow \mu^- + p$) を利用してニュートリノエネルギーの再構成を行うが、このとき余分に 粒子などを生成する過程が主なバックグラウンドとなる。ニュートリノ振動パラメータの精密測定のためには、このようなバックグラウンドの混入率を再構成されたエネルギーの関数として精度良く見積もることが不可欠であるが、そのために必要なエネルギー1GeV 付近のニュートリノと原子核の反応に関する過去の実験データは精度が十分ではなかった。

過去の実験 (K2K・SciBooNE) で、1GeV 以下のエネルギー領域のニュートリノ-原子核反応の研究には検出器自体が標的であり不感領域がなく、細分化された検出器が有効であることを立証した。この方針をさらに進めて、空間分解能を現行の検出器の 1cm から一桁向上させ、1mm のオーダーで粒子の飛跡を測定することが可能となれば、飛跡の分離・検出能力が飛躍的に向上し、ニュートリノ-原子核反応の理解が格段に進展するのではないかと考えられた。

2. 研究の目的

ニュートリノ振動パラメータの測定精度を向上させるうえで今後必要不可欠となるニュートリノ-原子核反応の研究を進展させるために、従来よりも一桁以上位置分解能の良い、1mm 程度で細分化された全感知型ニュートリノ検出器の基礎技術を開発し、ニュートリノ測定器として予想される性能を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

2mm 角のシンチレーティングファイバー約 1000 本で検出器を作成し (図 1・2) カナダ・TRIUMF 研究所の加速器を利用して陽子や中間子ビームを照射して核反応の検出を行い、反応点まわりの低エネルギー核子の検出能力や飛跡分離能力を確認した。さらに、得られたデータに基づき、J-PARC の T2K 前置検出器ホールに設置した場合の性能について検討した。並行して将来の多チャンネル化に向けた MPPC や読み出しの並列化の開発も行った。

さらに、ビーム照射実験の結果から、荷電中間子と炭素原子核の散乱断面積を求めた。ニュートリノ-原子核反応で生成された中間子は原子核中で散乱を受けるため、その散乱断面積不定性はニュートリノ実験デ

ータの解析において重要な系統誤差のソースとなる。この断面積を精度よく測ることで、ニュートリノ振動実験の不定性をさらに減らすことが可能となる。



図 1 : 開発した検出器

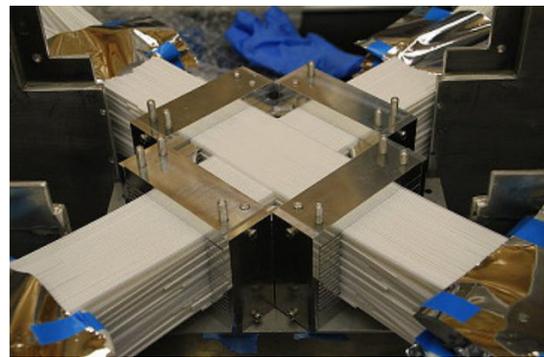


図 2 : 検出器の内部。

2mm 角のシンチレーティングファイバーを束ねて標的兼検出器とした。

4. 研究成果

図 3 に、シンチレーティングファイバーを使用した全感知型検出器によるテスト実験で測定された検出器中での 中間子の散乱の様子を示す。中間子は図の左側から入射し、検出器内の原子核と散乱して陽子をはじき出した。散乱による低エネルギー粒子の飛跡が明瞭に捉えられおり、この検出器が低エネルギー核子の検出能力にすぐれ、ニュートリノ検出器として高い性能を持ちうる事が確認できた。

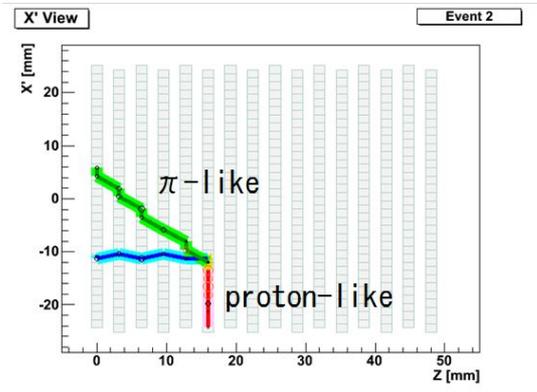


図3：テスト実験で測定された検出器中での中間子の散乱の様子。中間子は図の左側から入射し、検出器内の原子核と散乱して陽子をはじき出した。散乱による低エネルギー粒子の飛跡が明瞭に捉えられている。

ビーム照射試験のデータを利用して、中間子と炭素の散乱断面積を求めた。図4に、中間子と炭素原子核の、吸収および荷電交換反応の反応断面積について、我々の測定の結果と過去の同様の測定の比較を示す。過去の報告よりも精度の高い測定に成功した。この結果は、T2K 実験でのニュートリノ振動解析 (T2K Collaboration, Physical Review Letters 112, 61802 (2014)等)での系統誤差の見積もりに使われており、ニュートリノ振動測定のための系統誤差を削減することにすでに寄与している。

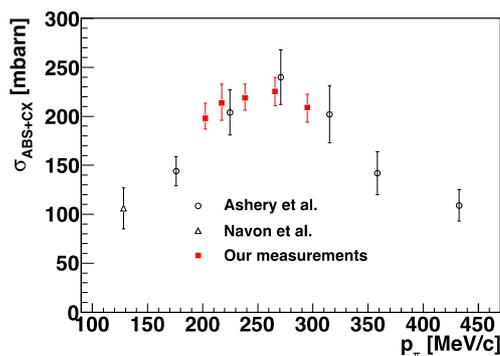


図4：中間子と炭素原子核の、吸収および荷電交換反応の反応断面積。我々の測定の結果と、過去の同様の測定の比較。

また、半導体光センサー Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) の改良を浜松ホトニクスと共同で行った。図5に従来型(上)と改良型(下)のMPPCの出力波形を示す。従来型で見えていた、アフターパルスと呼ばれる時間的に遅延して現れる余分なノイズ成分が、改良型では劇的に減少していることが分かる。この他に、多チャンネル読み出し用の回路の評価を行い、ニュートリノ反応の研究が可能なサイズの検出器を製作するための基礎技術を確立した。

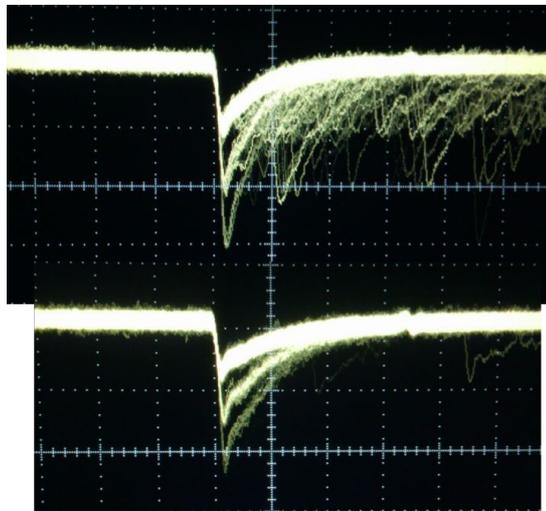


図5：従来型(上)と改良型(下)のMPPCの出力波形。アフターパルスと呼ばれる、時間的に遅延して現れる余分なノイズ成分が、改良型では劇的に減少している

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

古賀太一郎、「新型 MPPC の特性評価」、第3回高エネルギー春の学校、琵琶湖リゾートクラブ、2013年5月30日-6月1日、滋賀県

金沢康孝、横山将志、池田一得、家城佳、中家剛、早戸良成、E.Pinzon、H. Tanaka、J.Kim、K.Mahn、M.Wilking、P.de Perio、「T2K 実験のための荷電 中間子反応断面積測定 10」、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月26-29日、広島大学、広島県

Y.Kanazawa、M.Yokoyama and Duet Collaboration、「Duet experiment: Overview of Detector and Performance」、Poster presentation at The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO2012), June 3-9 2012, Kyoto, Japan.

横山将志、「MPPC/PPD 過去、現在、未来」、第4回次世代光センサーワークショップ&EASIROC 研究会、大阪大学、2012年12月25-26日、大阪府

金沢康孝、横山将志、池田一得、家城佳、中家剛、早戸良成、E.Pinzon、H. Tanaka、J.Kim、K.Mahn、M.Wilking、P.de Perio、「T2K 実験のための荷電 中間子反応断面積測定 7」、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012年9月11-14日、京都産業大学、京都府

M.Yokoyama、A. Minamino、T. Kikawa、T. Nakaya、「MPPC readout for pion scattering experiment」、EASIROC board development workshop、2012年3月2日、東北大学、宮城

県

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 将志 (YOKOYAMA, Masashi)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：90362441

(2) 研究分担者

なし