

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19540280
 研究課題名（和文） NuMI における低エネルギーニュートリノ反応研究
 研究課題名（英文） Study of Low Energy Neutrino Interaction at NuMI
 研究代表者
 小松 雅宏 (KOMATSU MASAHIRO)
 名古屋大学・大学院国際言語文化研究科・助教
 研究者番号：80345842

研究成果の概要：アメリカ合衆国フェルミ国立加速器研究所の高強度ニュートリノビームライン NuMI において、高精細な空間分解能を誇る原子核乾板を用いて実験を行う事により可能となるニュートリノ反応直後の荷電粒子多重度分布およびその放出角の分析を行い、低エネルギー領域での深弾性散乱、準弾性散乱、共鳴の反応断面積比を算出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：素粒子物理 ニュートリノ NuMI

1. 研究開始当初の背景

低エネルギー領域のニュートリノ反応の重要性はスーパーカミオカンデのニュートリノ振動の観測以降は詳細な振動パラメータの測定を行う事が次の課題となっている。その為の J-PARC の高強度ニュートリノビームを用いた T2K 実験では精度の高いニュートリノ反応自身の研究がシステムティックエラーを低減する為に重要である。また、今後のニュートリノ振動に関する主要課題はパラメータの精密測定と唯一観測されていないニュートリノ混合角 θ_{13} の測定である。 θ_{13} の測定はこれまで観測されていない事からもわかる通り非常に小さなものであり T2K 実験にて答えを出せるかは「神のみぞ知

る」事である。その為に、更に T2K の先の課題としてニュートリノファクトリーでの混合角 θ_{13} の測定やレプトンセクターでの CP violation の為の国際的な準備計画が組織されており、私も我々が有する原子核乾板技術をベースにした実験計画の提案をこれまで共同研究者等と共にやってきた。

NuMI はアメリカにおける長基線ニュートリノ振動実験（通称 MINOS）の為に作られたビームラインである。MINOS 実験は disappearance の手法によるニュートリノ振動を検証する実験であり、既に 2005 年 RUN にて SK の結果とコンシステントな結果を発表している。MINOS 実験は disappearance の手法を用いている事から

Near Detector を有しており、Fermilab の地下 100m の場所に実験サイトが作られている (通称 MINOS Near Detector Hall)。Near Detector Hall の位置では 0.6 反応/kg/day といった非常に強力なニュートリノビームが利用可能である。このような高強度ニュートリノビームラインでならば 1ton に満たない検出器でも数 10K 反応を集める事は容易であることから、SciBooNE 実験が SciBar 検出器を持ち込んだのと同様に、我々は既にアメリカの DONUT の協同研究者の協力を得て DONUT 実験で用いたファイバー検出器を改良した装置を 2005 年中に MINOS Near Detector Hall の MINOS 検出器の直前に設置を完了している (写真参照)。



低エネルギーニュートリノ反応での粒子生成分布の測定はマッシブなターゲットを用いなければならないニュートリノ反応検出器において困難な課題であるが、原子核乾板の高精細な空間分解能は検出器のサイズに左右されないものであり、特徴的なデータを提供可能であることから、本研究を計画、実施した。

2. 研究の目的

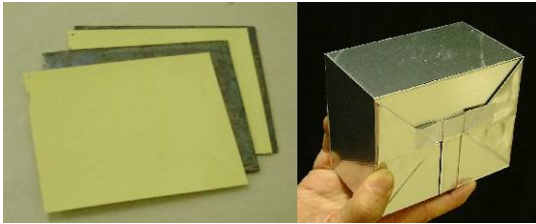
研究の目的としては大きく分けて 3 点ある。(1) NuMI ビーム中に含まれる電子ニュートリノ成分の分析。約 1%と予想されている電子ニュートリノ成分の分析は MINOS の共同研究者にとっても重要な課題である。MINOS 検出器本体では 2.54cm の鉄板と読み出しのセグメンテーション 4.1cm という大きさにより π^0 生成を伴うニュートラルカレント (NC) 反応と電子ニュートリノのチャージカレント (CC) 反応との識別能力は乏しい。電子成分の分析は MINOS の混合角 θ_{13} の測定にとって極めて重要な項目である。また、この測定は T2K での電子成分測定能力の実証試験でもある。我々の検出器における現時点での電子ニュートリノ反応識別能力は約 80%と見積もられている。(本研究において更なる改良を目指す。) 詳細な反応数等は研究計画の項にて説明する。我々はエネルギーは高いが非常に高いバックグラウン

ド環境である DONUT 実験においても電子識別を原子核乾板で、エネルギー損失をスキヤタリングの変化で、及びシャワー粒子を捉えることにより行ってきた。(2) ノンバイアスなニュートリノ反応解析。如何なる実験においても基本的に何らかの反応に対してトリガー条件を設定してデータ収集を行ってきた。(我々の過去の CHORUS, DONUT 実験も例外では無い) 原子核乾板は時間分解能が無い代わりに、いわゆる dead time を持たない検出器でもある。近年我々の原子核乾板飛跡自動読み取り装置の性能は飛躍的に向上し、今までは不可能と思われた 1m^2 の面積の全面読み出しが可能となった。 1m^2 を 1 ミクロン精度で 3 次元情報 (16 層) を読み出す事はチャンネル数に換算すれば $10^6 \times 10^6 \times 16 = 1.6 \times 10^{13}$ チャンネルに相当する驚異的な事である。旧来我々は時間分解能を持ったファイバー等の支援検出器に基づき原子核乾板中の限定された領域のみ読み出しを行い分析してきた。しかし読み出し技術の向上により全面積の読み出しが可能になり、また今回は物理的なトリガー条件を設定せずにファイバーの全スピルを記録するという試みにより、トリガーバイアス、及びファイバーの再構成バイアスを受けない解析が可能となった。いずれのバイアスも低エネルギー反応において顕著に現れてくるものを排除できる。(3) 低エネルギーニュートリノ反応での粒子生成分布の測定。原子核乾板の分解能、読み出し頻度 (MINOS の 2.54cm 毎に比べて 0.5mm 毎) ならではの情報として、ニュートリノ反応から出てくる 1 次粒子と 2 次粒子を明確に識別できる。また粒子の角分布やエネルギー分布を反応単位で捉える事が可能であり、ニュートリノ反応ジェネレーターへのインプットとしてユニークなデータを提供する。上記の(2)は非常に独創的であり、本研究の原子核乾板を用いて以外は為しえない研究課題である。また、(3)は今後のニュートリノ振動研究における混合角測定や、CP violation の測定に欠くべからざる、ニュートリノ反応の基礎データを得るものである。

3. 研究の方法

低エネルギーニュートリノ反応及び電子ニュートリノ成分の分析を行うために以下の様なターゲット構成が検討されている。DONUT 実験及び OPERA 実験と同様に原子核乾板と反応標的となる金属板 (鉄や鉛板) とを積層した構成 (ECC) を用いる事に変わりは無いが、低エネルギー反応に特化させるため ECC の内部構造は過去の実験とは異なる構成となる。DONUT 実験では 1mm 厚のステンレス板、OPERA 実験では 1mm 厚の

鉛板をそれぞれ $3X_0, 10X_0$ 積層したものを
用いたが、本実験では 0.5mm 厚のステンレ
ス板をトータルで $2X_0$ 積層した ECC 標的を用
いる。PEANUT のファイバー検出器は 10 個



の X プレーンと 10 個の Y プレーン、更に 2
個の 45 度傾斜した U プレーンが装備されて
おり、ファイバートラッカーで挟み込まれる
形で 4 つのターゲットを挿入可能なステー
ションがある。それぞれのターゲットステー
ションは $3 \times 4 = 12$ 個のターゲットをインス
トール可能である。合計で 48 個の ECC ター
ゲットをインストール可能である。



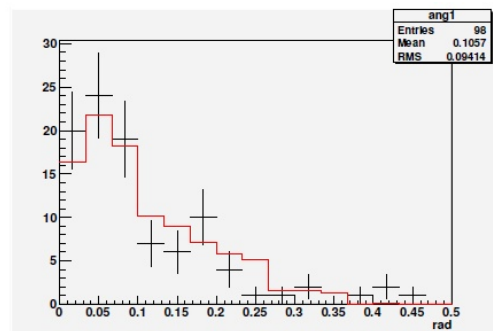
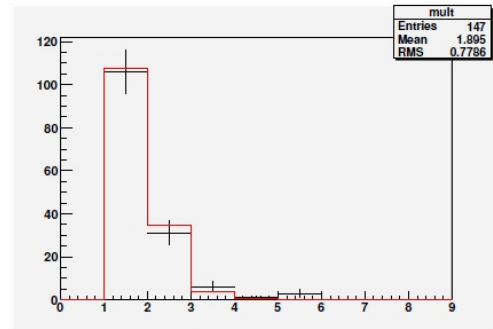
4 つのターゲットステーションの内ビーム上
流方向に位置する 3 つのターゲットステー
ションに $2X_0$ の ECC ターゲットをインス
トールし、最下流に位置するターゲットステー
ションには 3 番目のステーションにインス
トールされた ECC ターゲットで起きた反応の電
子同定を行う為に $3X_0$ の ECC を用いる。ス
テンレス板を標的物質として用いる理由は
 X_0 密度が他の物質に比べて非常に小さい為
である。その為多くのニュートリノ反応を起
こし、かつ緩やかな電子シャワーを作るとい
う点である。 $500\ \mu\text{m}$ の高精細なファイバ
だけでも電子シャワーを捉えられる構成と
なる。上記の構成で期待されるニュートリノ
反応数は 100 日間の照射で 7,200CC 反応が
期待される。NuMI の低エネルギーニュート
リノビーム (NuMI LE) では約 1% の電子ニ
ュートリノ成分の混入が見込まれているが、
200 日間の照射で統計エラー 10% 未満の分析
が可能である。現在 19 年度の照射に向けて
ターゲット構成の最適化作業を MC ベースで
行っている。

4. 研究成果

現在はまだデータ解析の途中であり現時

点での成果としては最初の照射にて得られ
たサンプルの多重度分布データから算出中
の深弾性散乱 (DIS), 準弾性散乱 (QE), レゾ
ナンス (RES) の反応断面積比の結果である。
近々論文を發表予定である。

図は観測されたニュートリノ反応の荷電粒
子の多重度分布である。十字がデータ、実線
は MC である。



同データの放出角分布である。

MC は多重度分布において DIS, QE, RES 比を
仮定しフィッティングしたものである。フィ
ッティングの際にはコンストレイントとし
て $\sigma \text{RES} / \sigma \text{QE} = 0.58$ として σDIS とでフィ
ッティングしている。多重度分布からフィッ
ティングした放出角分布も MC と良く合致し
ている。Preliminary な結果として $\text{QE}/\text{CC} =$
 $0.20 + 0.06 - 0.07(\text{stat}) + 0.02(\text{syst})$,
 $\text{DIS}/\text{CC} = 0.68 + 0.09 - 0.11(\text{stat}) + 0.02$
 (syst) , $\text{RES}/\text{CC} = 0.12 + 0.04(\text{stat})$
 $+ 0.02(\text{syst})$ という結果を得ている。

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10件)

- ① A. Anokhina *et al.*, Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment. JINST 3:P07005, 2008, 20pp, 査読有
- ② A. Kayis-Topaksu *et al.*, Leading order analysis of neutrino induced dimuon events in the CHORUS experiment. Nucl.Phys. B798:1-16, 2008, 査読有
- ③ A. Anokhina *et al.*, Study of the effects induced by lead on the emulsion films of the OPERA experiment. JINST 3:P07002, 2008, 19pp, 査読有
- ④ E. Eskut *et al.* Final results on $\nu(\mu) \rightarrow \nu(\tau)$ oscillation from the CHORUS experiment. Nucl.Phys. B793, 2008, 326-343, 査読有
- ⑤ K. Kodama *et al.*, Final tau-neutrino results from the DONuT experiment. Phys.Rev. D78:052002, 2008., 37pp, 査読有
- ⑥ A. Kayis-Topaksu *et al.*, Associated Charm Production in Neutrino-Nucleus Interactions. Eur.Phys. J. C52, 2007, 543-552, 査読有
- ⑦ A. Kayis-Topaksu *et al.*, Charged Particle Multiplicities in Charged-Current Neutrino and Anti-Neutrino Nucleus Interactions. Eur.Phys. J. C51, 2007, 775-785, 査読有
- ⑧ T. Toshito *et al.*, Measurements of total and partial charge-changing cross sections for 200-400 MeV/nucleon C-12 in water and polycarbonate. Phys.Rev. C75, 2007, 054606 28pp, 査読有
- ⑨ K. Kodama *et al.*, Momentum measurement of secondary particle by multiple Coulomb scattering with emulsion cloud chamber in DONuT experiment. Nucl.Instrum.Meth. A574, 2007, 192-198, 査読有
- ⑩ S. Miyamoto *et al.*, Sub-micron alignment for nuclear emulsion plates using low energy electrons caused by radioactive isotopes. Nucl.Instrum.Meth. A575, 2007, 466-469, 査読有

〔学会発表〕(計2件)

- ① 北川暢子, 加速器ニュートリノ実験 PEANUT における反応解析, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月26日, 近畿大学
- ② 野々山芳明, Fermilab における加速器ニュートリノ実験 PEANUT の現状報告, 日本物理学会 第62回年次大会, 2007年9月22日, 北海道大学

〔図書〕(計1件)

Jennifer A Thomas & Patricia L Vahle, NEUTRINO OSCILLATIONS, Present Status and Future Plans, World Scientific Publishing Company Imperial College Press, 2008, 276

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松 雅宏 (KOMATSU MASAHIRO)

名古屋大学・大学院国際言語文化研究科・助教

研究者番号: 80345842