

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800131

研究課題名(和文) J-PARCビームラインにおけるニュートリノ反応の研究

研究課題名(英文) Study of neutrino interactions at J-PARC neutrino beamline

研究代表者

北川 暢子 (NOBUKO, Kitagawa)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・研究員

研究者番号：20727911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、原子核乾板の優れた位置分解能を生かした数百MeVから数GeVニュートリノ反応の詳細解析のための大面積の解析手法の開発を行った。また、ECC(Emulsion Cloud Chamber)中での500MeVから2GeVの電子のエネルギー推定法を開発し、70%のエラーで測定可能な事を示した。エマルジョン多段シフターを搭載したECCをJ-PARCのニュートリノビームラインに設置し、ニュートリノ反応の検出と二次粒子の時間情報付加、下流のT2K前置検出器INGRIDへの接続に成功した。更に、角度精度を現行比2.7倍の厚型の原子核乾板を開発し、今後のニュートリノ実験への実装を考えている。

研究成果の概要(英文)：In this project, I developed the analysis method of neutrino interactions at the range of sub-GeV to multi-GeV in order to provide the detail information, using a feature of fine position resolution of emulsion films. The method of electron energy measurement has been developed. As the result, it was shown that the energy (500MeV - 2GeV) is estimated with 70% error. The test exposure to the emulsion detector has been carried out at the neutrino beamline at J-PARC, which was equipped with emulsion shifter. Neutrino interactions have been detected and some secondary particles were added time information. And then they were matched with INGRID tracking information. New type emulsion with a thick base was developed and it has 2.7 times higher angle accuracy than current one.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 原子核乾板

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動現象は消失型、出現型の双方で実験での検証が行われ、3つの混合角が測定されていた。そして、次のフェーズは質量階層の決定やCP violationにおける位相の測定である。この目的を達成するには、大統計の精密測定が鍵となり、そのため加速器によるニュートリノビームを用いた長基線実験が主流となっている(T2K、NOvA)。これらは基線長から数百 MeV から数 GeV と云ったエネルギー領域に限定されている。しかし、このエネルギー領域のニュートリノ反応は標的核子の核の効果を受け、未だ理解不十分な要素がいくつも存在する。実際に、MiniBooNE や SciBooNE (数百 MeV ~ 2GeV) で測定されたニュートリノ反応断面積は、NOMAD (5GeV 以上) の測定結果との間に隔たりがあり、この溝を埋める妥当なモデルが見つかっていない。さらに、このエネルギー領域のニュートリノ反応の理解により、軽い3種のニュートリノ間での振動の枠組みでは説明が出来ない、LSND-MiniBooNE が観測したアノマリーについても、決着の糸口を見いだす可能性がある。

原子核乾板は優れた位置分解能をもつ検出器で、その特徴を生かし短寿命粒子の崩壊点の直接検出に多く用いられて来た。従来の読み取り装置では乾板の読み取り速度が律速し、大統計の物理解析には不向きであった。しかし、2014 年から高速の読み取り装置が本格的に稼働し始め、原子核乾板の全面読み取りによる統計的な解析が可能になった。

2. 研究の目的

本研究では、サブミクロンの位置分解能を持つ原子核乾板を用いて、数百 MeV から数 GeV 領域でのニュートリノ反応の詳細解析を行うために基礎研究を行う。(1) 原子核乾板と金属板とを交互に積層した検出器 (Emulsion Cloud Chamber = ECC) に蓄積した数百イベント / 1 ECC のニュートリノ反応をノンバイアスで検出する手法を開発し、統計的なニュートリノ反応の研究を目指す。(2) ECC を用いた sub-GeV から数 GeV の電子のエネルギー測定手法の開発 (3) J-PARC のニュートリノビームラインに検出器を設置し、上記のエネルギー領域のニュートリノ反応の詳細研究に向けた予備実験を行う。(4) 原子核乾板本体を含めた検出器のデザインの提案を行う。

3. 研究の方法

(1) フェルミ国立加速器研究所のニュートリノビームライン NuMI においてビームを

照射した ECC を用いたノンバイアスのニュートリノ反応検出手法の開発

NuMI はピークのエネルギーが 3GeV のニュートリノビームである。数 GeV 領域のニュートリノ反応の研究のために NuMI ビームを照射した ECC は、ターゲット領域(500 μ m の鉄板)とビーム中に含まれる電子ニュートリノ反応により生成した電子を識別する領域(鉛 1mm)から構成されている。用いた原子核乾板は ECC1 個当たり 90 枚で、その大きさは 12.5cm x 10cm である。これらを高速自動飛跡読み取り装置 (HTS) により全面積のデータ取得を行っていく。近年の原子核乾板を用いた代表的な実験は、タウニュートリノ反応の検出によりニュートリノ振動を検証した OPERA 実験である。OPERA では1反応毎に 1cm²、15 枚のデータで飛跡再構成を行い、反応点や崩壊点の探索を行っていた。これと比較して、解析対象となる総面積は 400 倍である。このデータを用いて全乾板間の位置関係を保証し、飛跡再構成を行った上で、ニュートリノ反応の検出を行っていく。

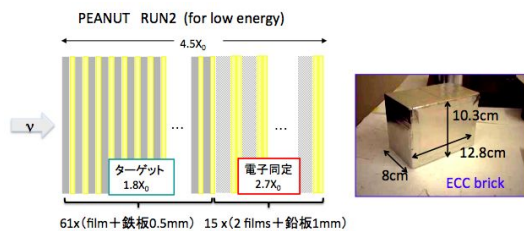


図1 NuMI ビームを照射した ECC の構造

(2) ECC の鉛領域での sub-GeV から数 GeV の電子の識別とエネルギー測定手法の開発

図1の1mm厚の鉛板を積層した部分での電子同定並びにエネルギー測定をするために、GEANT4によるシミュレーションサンプルを用いて手法の開発を行う。物質中では電子は電磁散乱だけでなく制動放射によるエネルギー損失をするので、その効果を含めたアルゴリズムの開発を行い、さらに測定エラーを最小にするデータ数を提示する。

(3) J-PARC ニュートリノビームラインでのテスト照射

J-PARC のニュートリノビームラインで、T2K の off-axis に設置されている INGRID の前方に検出器を設置し、ニュートリノを照射する。神戸大学が開発した原子核乾板に時間情報を持たせる機構 (エマルジョン多段シフター) に ECC を密着させ縦置きにした。ニュートリノ反応で生成した二次粒子は ECC 中で位置と角度情報が与えられ、それをシフター部分に外挿し、時間情報を付加する。

下流に設置されている INGRID で検出された飛跡とマッチングを取り、ミューオン同定を試みる。

(4) 角度精度向上のための厚型支持体を用いた原子核乾板検出器の開発

原子核乾板検出器はプラスチックの支持体の両面に原子核乳剤を塗布したものである。OPERA 実験等大半の実験で用いている原子核乾板は 200 μm 前後の支持体を使用しており、読み取りの角度精度は $\tan\theta < 0.1$ で 2.62mrad である。これを、500 μm のものに変更することで、どの程度改善がみられるか CERN でビーム照射を行う事で評価した。

4. 研究成果

番号は 3 の研究方法と関連している。

(1) 初年度は NuMI ビームを照射した ECC の乾板を HTS でデータ取得した。80 $\text{cm}^2 \times 60$ 枚分のデータの飛跡再構成を行い、その中から低運動量で濃い飛跡を用いてニュートリノ反応の検出を行った。照射期間と解析有効面積から 2 本以上の荷電粒子と低運動量の飛跡を伴う反応の期待値は 6 反応で、実データで検出した反応数は 9 反応だった(図 2 参照)。

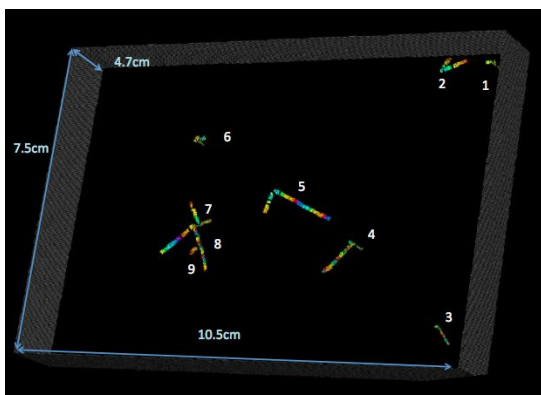


図 2 80 $\text{cm}^2 \times 60$ 枚分のデータを用いて検出した低運動量の飛跡を伴い 2 本以上の荷電二次粒子からなる反応

(2) 1mm 厚の鉛板を積層した ECC に 500MeV、1GeV、2GeV の電子を照射したシミュレーションサンプルを用いて、制動放射によるエネルギー損失の効果を含めた多重電磁散乱方によるエネルギー推定のアルゴリズムの開発を行った。結果、8 枚のデータを用いた時に 70% のエラーで測定可能であることを確認した (500MeV、1GeV は 90% C.L.、2GeV は 68% C.L.)

(3) 東邦大学と神戸大学と共同で、名古屋大学で製造した原子核乾板を用いて、J-PARC のニュートリノビームラインの T2K

の前置検出器 INGRID の前方にシフターを搭載した ECC 検出器 (500 μm の鉄板 40 枚と原子核乾板 41 枚の積層構造) を設置し、2014 年 10 月末から 2015 年 3 月末まで 4 回ニュートリノ照射を行った (図 3 参照)。ニュートリノ反応の解析に用いたサンプル内で、核破砕片を含む荷電粒子の本数が 3 本以上で VTX を組む反応を 12 反応検出した。

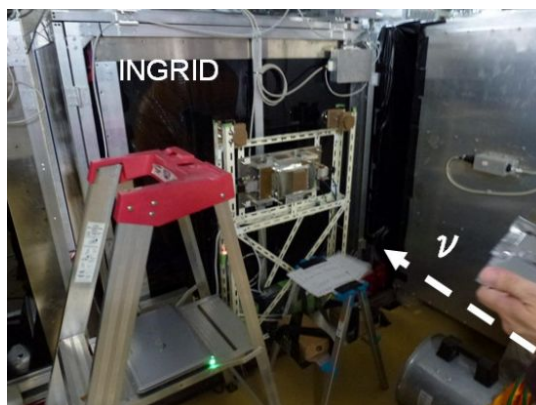


図 3 T2K の前置検出器 INGRID(off-axis) の前に設置したシフターを搭載した ECC

(4) 現在、多くの原子核乾板実験で用いている乾板の支持体は 170 μm 厚のポリスチレン板である。角度精度を向上させるために、厚型の 500 μm 厚のシクロオレフィンポリマーとアクリルの 2 種のプラスチック板を選び出し、化学的処方を試行錯誤の結果、実験に耐え得る厚型の原子核乾板の作成に成功した (名古屋大学基本粒子研究室の大学院生が中心となり開発された)。角度精度評価のために CERN でビーム照射を行い、HTS でデータ取得をした結果、現行比 2.7 倍精度が向上した事が確認出来た (2.62mrad 0.97mrad)。角度精度の向上に伴い、ECC の積層物質の少量化やより高エネルギーの粒子の運動量測定が可能になったり、厚型のため硬度が増した事を利用して水を標的とした検出器にも適用出来ると考えている。

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 1 件)

N. Kitagawa, M. Komatsu, Electron Identification and Energy Measurement with Emulsion Cloud Chamber, Physics Procedia, 査読有, Volume 80, 2015, 87-89, DOI : 10.1016/j.phpro.2015.11.099

T. Fukuda, et al, First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline, Prog. Theor. Exp. Phys.,

査読有、0000、2015、
DOI: 10.1093/ptep/0000000000

〔学会発表〕(計 4 件)

北川暢子、「加速器ニュートリノ実験
PEANUT の反応解析」, 日本物理学会第 71
回年次大会、2016 年 3 月 21 日、東北学院大
学(仙台市)

北川暢子、「加速器ニュートリノ実験
PEANUT の反応解析」, 日本物理学会第 70
回年次大会、2015 年 3 月 22 日、早稲田大
学(東京都)

北川暢子、「加速器ニュートリノ実験
PEANUT の反応解析の現状」, 日本物理学会
2014 年秋季大会、2014 年 9 月 18 日、佐賀
大学(佐賀市)

Electron Identification and Energy
Measurement with Emulsion Cloud
Chamber, N. Kitagawa, M. Komatsu, 26th
International Conference on Nuclear
Tracks in Solids, 2014, September, Kobe

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北川 暢子 (NOBUKO, Kitagawa)
名古屋大学・未来材料・システム研究所・
研究員
研究者番号：20727911

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()