

# 東邦大学学術リポジトリ

Toho University Academic Repository

タイトル	原子核乾板による1 GeV領域のニュートリノ 原子核反応の検出
別タイトル	Detection of neutrino nucleus interactions in the 1 GeV energy region with nuclear emulsion
作成者(著者)	森元, 祐介
公開者	東邦大学
発行日	2020.03.26
掲載情報	東邦大学大学院理学研究科 博士論文 内容の要旨及び審査結果の要旨.
資料種別	学位論文
内容記述	主査: 小川 了 /
著者版フラグ	none
報告番号	32661乙第2923号
学位記番号	乙第43号
学位授与年月日	2020.03.26
学位授与機関	東邦大学
メタデータのURL	<a href="https://mylibrary.toho u.ac.jp/webopac/TD82656760">https://mylibrary.toho u.ac.jp/webopac/TD82656760</a>

論文審査の要旨及び審査結果の要旨

年入学	研究分野 素粒子物理学	氏名 森元 祐介
審査委員	(主査) 小川 了 (副査) 渋谷 寛 (副査) 酒井 康弘 (副査) 西尾 豊 (副査) 中 竜大 (副査) 青木 茂樹	
(論文題目) 原子核乾板による 1GeV 領域のニュートリノ-原子核反応の検出		
(論文審査の要旨及び審査結果の要旨) 本論文は、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のニュートリノビームラインに原子核乾板を主体とする検出器を導入するにあたり、原子核乾板乳剤の製作から性能の最適化、さらに、性能保証のための予備実験を繰り返すことにより、最終的にニュートリノ反応を検出し、さらに、低バイアスでニュートリノ反応を検出する手法を示した報告である。 J-PARC のニュートリノビームラインでは、スーパーカミオカンデ検出器にニュートリノビームを照射することにより、ニュートリノ振動実験を行っている。ニュートリノ振動の確率を測定するためには、ニュートリノビームのエネルギーと照射量を知る必要があり、そのために、前置検出器を J-PARC に設置し、ニュートリノビームの測定を行っている。ニュートリノビームの測定は、ニュートリノ-原子核反応のモデルを用いて測定結果と比較することにより行われるため、モデルの不定性はニュートリノの照射量の不定性となって現れる。本研究は、J-PARC のニュートリノビームラインに鉄板と原子核乾板フィルムによるエマルジョンクラウドチェンバー (ECC) を独自に設置することにより、200MeV/c まで低運動量の陽子を検出することで、低運動量閾値の実証実験を行った。運動量閾値 200MeV/c は、過去行われた実験の中でも最低の閾値である。新しい感度で実験することにより、モデルの精度の良い検証を行う。 森元さんは、鉄板と原子核乾板フィルムからなる 2 kg の ECC を前置検出器の一つである INGRID の上流側に設置しニュートリノ反応検出の実証実験を行った。使用した原子核乾板乳剤は、独自に調合し製作を行い、飛跡に対する感度を最適化した。さらに、この乳剤は、ニュートリノ照射前のバックグラウンドを除去するために、強制的に飛跡を消す機能を持たせており、そのために通常の乳剤より飛跡の潜像が消えやすい、潜像退行の特性を持つ。そこで、製作したフィルムを照射、保存、測定を繰り返すことにより、ニュートリノ照射実験中、十分な感度が維持されていることを保証した。最終的に、二次粒子の多重		

度3以上のニュートリノ反応を12事象検出することに成功した。この実験では、INGRIDとECCの間に原子核乾板多段シフターを導入し、INGRIDまで貫通したミュ粒子に対し原子核乾板中のミュ粒子の飛跡に時間情報を付与することを可能にしているが、実際、12事象中4事象に対し時間情報を付与することに成功した。ECC中に期待される事象数が44事象であることから、ニュートリノ反応を低バイアスに検出するためには、多重度2以下の反応の高効率な検出が必要となることが解る。実証実験に続く65kgECCの照射実験では、全体の4%のデータに対して、INGRIDまでの貫通した粒子に対し、高効率でINGRID内の飛跡と対応をとることにより、低バイアスなニュートリノ反応の検出に成功した。

最終的に観測した51事象に対し、モンテカルロシミュレーションGENIE2.11.0と比較することにより、解析を行った。GENIEには、ニュートリノと核子との素過程に加えて、原子核のモデルと生成粒子の原子核中の伝搬過程モデルが実装されている。本研究では、実験データの各飛跡に飛程による運動エネルギー測定および多重電磁散乱による運動量測定、さらに電離損失測定を加えることで、低運動量領域における陽子およびパイ中間子の同定を可能にした。これらにより、陽子およびパイ中間子の多重度、それらの運動量分布、角度分布が理論モデルと比較可能になったことが示された。今後統計を増やすことにより、詳細な比較が可能となり、ニュートリノ-原子核反応の詳細な解析が期待される。

以上、審査委員全員は、論文提出者の素粒子物理学に関する知識と本研究結果の素粒子物理学への貢献は十分であり、論文提出者 森元 祐介 が、博士の学位を受けるのに十分な学力と資格があると認めた。

東邦大学審査学位論文（博士）の要旨

## 原子核乾板による 1 GeV 領域のニュートリノ-原子核反応の検出

森元祐介（素粒子物理学教室）

標準理論の枠組みではニュートリノは質量を持たないとされてきた。しかし 1998 年、Super-Kamiokande による大気ニュートリノの観測において $\mu$ 型ニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) の消失が発見され、ニュートリノが質量を持つ証拠となるニュートリノ振動が示唆された。現在までにこの現象を利用した様々な研究手法によりニュートリノの性質が解明されてきた。ニュートリノ実験においては、大量のニュートリノを標的物質に照射してニュートリノ-原子核反応を起こし、生成する 2 次粒子を測定することで研究を行う。ニュートリノは重力相互作用を除けば弱い相互作用しかしないためニュートリノ-原子核反応は稀で、稀な現象を捉えるためには多数の反応を集める必要があり、大質量の標的物質を含む大型検出器がよく用いられる。特に、ニュートリノ振動研究で重要となる 1 GeV エネルギー領域とよばれる数百 MeV から数 GeV のエネルギー帯においては多くの場合、大きな質量と位置や角度の高い分解能の両立は困難で、2 次粒子のうち大型検出器内の短距離で停止してしまうような低エネルギーのハドロンを検出することができない。そのため、起こりうる様々な反応過程、すなわち荷電カレント準弾性散乱、 $\pi$ 中間子生成反応、2 核子散乱等を明確に識別することができず、入射ニュートリノのエネルギーを決定する際に系統誤差が残ってしまうことが依然として問題となっている。

そこで薄い標的物質と位置分解能の優れた原子核乾板を交互に積層した検出器 Emulsion Cloud Chamber (ECC) を J-PARC のニュートリノビームラインに設置し、1 GeV 領域のニュートリノ-原子核反応の反応過程ごとに（付随する 2 次ハドロンの種類や数ごとに）排他的な断面積測定を行う NINJA 実験 (Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator) が計画された。薄い標的中のニュートリノ反応点から 2 次粒子が放出される。その直後に置かれた原子核乾板は貫通するすべての荷電粒子飛跡を 1  $\mu\text{m}$  以下の精度で記録する。したがって、複数の 2 次粒子の通過位置と角度を測定すればニュートリノ反応点を精度良く再構成できる。この ECC を多数積層すれば大きな質量と高い位置・角度分解能の両立が可能になる。2014 年秋からのビーム照射期間では、原理検証を目的として厚さ 0.5 mm のステンレス板 (SUS304)、新型の高感度原子核乾板を用いた標的質量 2 kg の ECC を原子核乾板多段シフターとともに J-PARC ニュートリノ実験施設の SS フロア (ビーム中心付近) において T2K 前置検出器 INGRID の上流に設置した。多段シフターは多段の原子核乾板をそれぞれ時間とともに異なった速度でスライドして時間情報を付与する装置であり、時間分解能が無く入射する全ての荷電粒子の飛跡を記録してしまう ECC と位置分解能が原子核乾板と比べて粗い INGRID の飛跡を接続する役割を担う。最初に有効なデータを収集できたのは 2015 年 1 月から 4 月の期間で、反ニュートリノ生成のために照射された累積陽子数は  $13.8 \times 10^{19}$ 、ECC に蓄積されるニュートリノ反応数の期待値は約 44 個である。ECC のみの解析の結果、2 次荷電粒子の多重度が 3 以上のニュートリ

ノ反応候補 12 個を検出した。背景事象の評価から新型原子核乾板を用いた ECC には 1 GeV 領域においてニュートリノ反応を検出する能力があることを明らかにした。多段シフターは、ECC と INGRID との対応から 7.9 秒の時間分解能があることがわかった。さらに、同時に製造した高感度および中感度の新型原子核乾板に電子ビームを照射し、これを室温および冷蔵庫内で保存して潜像退行や感度劣化の長期特性を測定した。その結果、実験期間中も 10 °C 程度の低温で保管すれば十分なニュートリノ反応数を集めるのに必要な数ヶ月間のビーム照射中も性能を保つことができることがわかった。

2016 年 2 月から 5 月まで、検出器の性能評価、解析方法の確立を目的として SS フロアにて反ニュートリノビームの照射実験を行った。厚さ 0.5 mm のステンレス板 (SUS304) と新型の中感度原子核乾板による ECC と多段シフターを約 10 °C の冷蔵シェルターの中に収め、INGRID の上流に設置した。ECC でニュートリノ反応点検出やイベント解析を行い、INGRID でニュートリノ反応による  $\mu$  粒子を特定して荷電カレント反応であることを決定する。標的質量は合計約 60 kg、累積陽子数は  $4.0 \times 10^{20}$  である。この照射量から ECC 内には約 2426 個の正ニュートリノ反応、2820 個の反ニュートリノ反応が起こると期待される。ニュートリノビーム照射後、合計 314 枚の原子核乾板を現像、超高速飛跡読み取り装置で全面スキャンを行い、記録された荷電粒子飛跡の通過位置、角度、電離損失に関連したボリュウムパルスハイトという測定量等の情報を読み取った。多段シフターにより時間情報を付与し、INGRID 中の飛跡と対応が付いた ECC に記録されたビーム照射と同期したほとんど  $\mu$  粒子からなる荷電粒子の飛跡を上流方向へ逆追跡し、ECC 中のニュートリノ反応を検出する新しい方法を標的の解析領域全体の 4% に適用した。INGRID で捉えた  $\mu$  粒子候補にわずかに含まれる  $\pi$  中間子は、INGRID と ECC で独立に測定した運動量の相関を見ることで排除した。その結果、荷電カレント反応数の期待値約 142 個に対し 51 個の正・反ニュートリノ-鉄荷電カレント反応候補の検出に成功した。この方法は ECC 下流側の INGRID で捉えた  $\mu$  粒子を逆追跡の起点としているため確実に荷電カレント反応のみを選択することができる。また、この方法によればニュートリノ反応の検出効率は反応から放出される 2 次荷電粒子の多重度に依存しない。これにより、様々な反応過程を予測する理論モデルに基づくモンテカルロ・シミュレーションと直接比較することを可能にした。さらに、各 2 次粒子の飛程による運動エネルギー測定、多重電磁散乱による運動量測定、電離損失測定等を組み合わせ、低エネルギーの陽子や  $\pi$  中間子を識別できることも確認できた。大型検出器で測定不可能な低エネルギーハドロンを含むニュートリノ反応候補に対し、大型検出器でよく用いられる近似的な手法で算出したニュートリノエネルギーと ECC で検出した 2 次荷電粒子をすべて含めて再構成したニュートリノエネルギーの差分を得、モンテカルロ・シミュレーションと比較したところ、統計量な少ないながらも概ね一致していることが分かった。これらにより、今までにない低いエネルギー閾値で、ニュートリノ反応から放出される陽子や  $\pi$  中間子を検出し様々なニュートリノ反応過程を分離した排他的な断面積測定が可能になる実験方法を確立することができた。