

## 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

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 1GeV エネルギー領域（数百 MeV から数 GeV）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、1GeV 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 0.5mm 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 2kg 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 1GeV 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、実験期間中も摂氏 10 度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 0.5mm のステンレス板 (SUS304) と新型の中感度原子核乾板による ECC と多段シフターを摂氏約 10 度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 60kg、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、ボリュームパルスハイト (電離損失に関連した測定量) 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荷電粒子 (主に  $\mu$  粒子) 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領域の一部 (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。