

1 GeV エネルギー領域におけるニュートリノ・鉄荷電カレント反応の研究

大島 仁 (素粒子物理学教室)

1998 年のニュートリノ振動の発見をはじめとして、混合角の測定やレプトン CP 非保存の検証など近年のニュートリノ振動実験の成果はめざましい。ニュートリノ振動実験に用いられるのは主に数百 MeV から数 GeV のエネルギー領域におけるニュートリノ・原子核反応である。しかし、その基礎となるニュートリノ・原子核反応自体の理解が不十分なため、測定における大きな不定性となっている。複数の反応素過程の存在に加えて、生成された二次粒子が標的原子核内で衝突や吸収を起こす終状態反応や、電子散乱実験によって示唆されている複数の核子が関わる反応などの混在が不定性の要因と考えられている。これらのニュートリノ・原子核反応を実験的に理解し、明確な描像を得ることはニュートリノ振動測定の精密化に向けて喫緊の課題である。

上記の現状に着目し、本研究では大強度陽子加速器施設(J-PARC)のニュートリノモニター棟にニュートリノ検出器を導入し、この1 GeV エネルギー領域におけるニュートリノ・原子核反応の研究を行った。本検出器は鉄標的原子核乾板検出器(ECC)、原子核乾板多段シフター(Shifter)、T2K 前置検出器 INGRID で構成された複合型検出器である。原子核乾板は sub- μm の空間分解能と広い角度アクセプタンスを有する飛跡検出器である。ECC は原子核乾板(300 μm 厚)と鉄プレート(500 μm 厚)を交互に積層した鉄標的ニュートリノ検出器であり、ニュートリノ・原子核反応における終状態の荷電ハドロンを低運動量閾値(陽子で 200 MeV/c, 荷電パイ中間子で 50 MeV/c)で検出することができる。多段シフターは ECC ブリックで測定された荷電粒子の飛跡に時間情報を付与し、INGRID の飛跡との接続を補助する。本照射実験では INGRID をミュオンレンジ検出器として使用し、ECC ブリック中のニュートリノ荷電カレント反応の検出に用いた。図 1 に本検出器で検出したニュートリノ・鉄荷電カレント反応事象のイベントディスプレイを示す。本照射実験では 2016 年の 2 月と 5 月に合計で 4.0×10^{19} 個の陽子を標的に衝突させて生成した平均エネルギー 1.49 GeV のニュートリノビームを 65 kg 鉄標的原子核乾板検出器に照射し、183 事象のニュートリノ・鉄荷電カレント反応を検出器中に同定した。

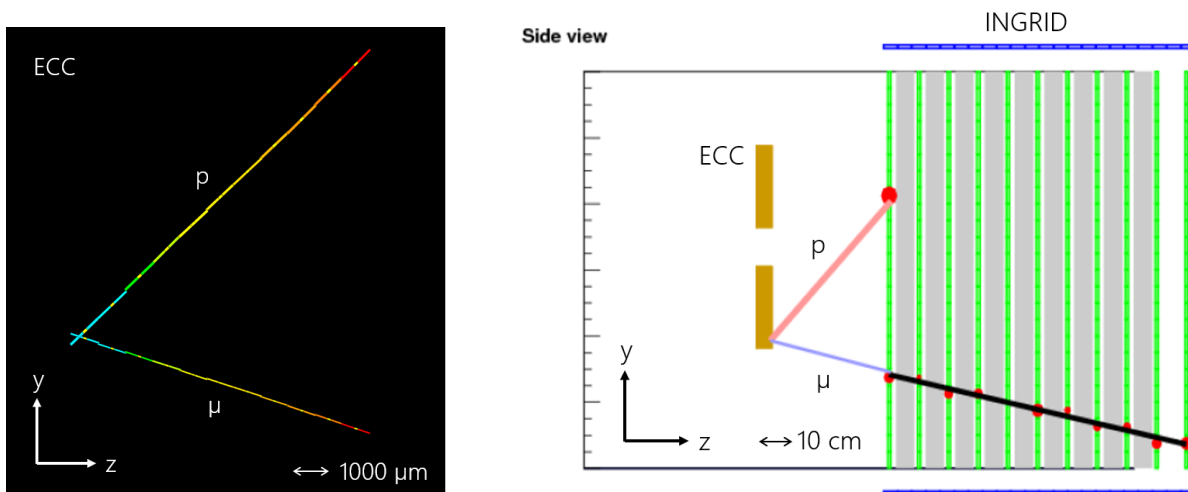


図 1. ニュートリノ・鉄荷電カレント反応事象のイベントディスプレイ。左図は ECC ブリック中のイベントディスプレイを示しており、右図は ECC ブリックと INGRID モジュールのイベントディスプレイを示している。それぞれの線は荷電粒子の飛跡を表している。

この観測された反応事象数に基づき、平均エネルギー 1.49 GeV のニュートリノ・鉄荷電カレント反応のフラックス平均断面積を測定し、

$$\sigma_{CC}^{\text{Fe}} = (1.28 \pm 0.11(\text{stat.})_{-0.11}^{+0.12}(\text{syst.})) \times 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{nucleon},$$

を得た。図2に本測定結果およびモンテカルロシミュレーションの予測と他実験グループによる測定結果を示す。また、ミューオンの位相空間を $\theta_{\mu} < 45^\circ, p_{\mu} > 400 \text{ MeV}/c$ に制限したフラックス平均断面積を測定し、

$$\sigma_{CC \text{ phase space}}^{\text{Fe}} = (0.84 \pm 0.07(\text{stat.})_{-0.06}^{+0.07}(\text{syst.})) \times 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{nucleon},$$

を得た。これらの断面積の測定結果は同ビームラインで過去に測定された断面積の測定結果と矛盾せず、現在のニュートリノ反応モデルによる予測とも一致した。本断面積測定の結果は1 GeV エネルギー領域において最も系統誤差の小さい高精度な測定結果である。これらの測定結果は本照射実験の検出器並びにデータ解析の信頼性を実証している。

さらに、本研究ではニュートリノ・鉄反応由来の荷電粒子であるミューオン、陽子、荷電パイ中間子の多重度、放出角、運動量を測定し、モンテカルロシミュレーションの予測データと比較した。図3に陽子の運動量の測定結果を示す。本測定結果は1 GeV エネルギー領域におけるニュートリノ・鉄荷電カレント反応に対して、200 MeV/c の低運動量陽子まで含めた測定データとシミュレーションデータを比較した初めての結果である。ミューオンの測定結果はシミュレーションデータとよく一致している一方で、統計的な不定性は大きい。陽子と荷電パイ中間子の測定結果はシミュレーションデータの一部分と相違が見られた。

本研究はニュートリノ・原子核反応を詳細に理解するための第一歩であり、ニュートリノ反応起因の陽子と荷電パイ中間子の多重度ならびに運動学的情報はニュートリノ反応モデルの将来的な検証と構築のための重要な基礎データとなる。

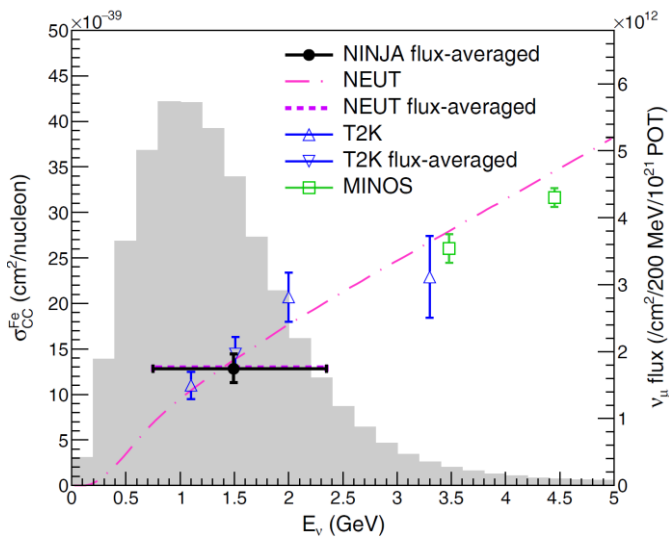


図2. ニュートリノ・鉄荷電カレント反応におけるフラックス平均断面積の測定結果。灰色のヒストグラムは本照射におけるニュートリノフラックス分布を表している。黒点が本測定結果を示しており、水平軸方向の範囲はフラックス分布の平均値から両側にそれぞれ68%の範囲を表している。垂直軸方向の誤差棒はトータルエラー(統計誤差+系統誤差)を表している。

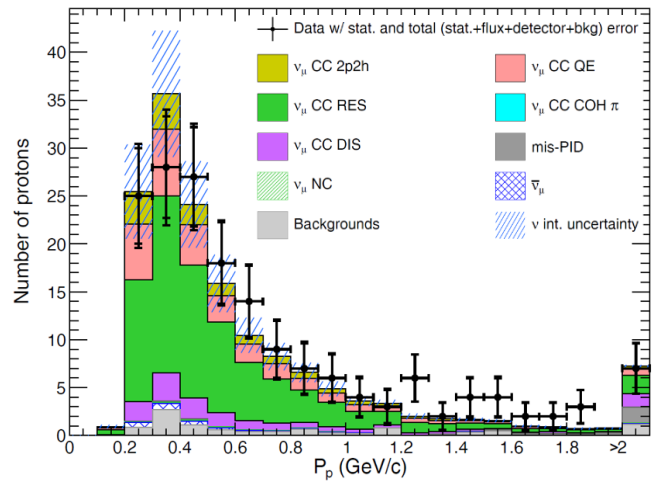


図3. 陽子の運動量の測定結果。測定データは点で表しており、右端のピンは2 GeV/c 以上の事象をまとめている。内側の誤差棒は統計誤差を表しており、外側の誤差棒は統計誤差と系統誤差(ニュートリノフラックス、背景事象の見積もり、検出器応答の不定性)の二乗和の平方根を表している。シミュレーションの予測はヒストグラムで表している。色は各反応モードと背景事象を表しており、ハッチング線はニュートリノ反応の不定性を表している。