

■ 研究紹介

NA61/SHINE 実験の最新状況と今後の展望

コロラド大学ボルダー校

永井 義一

yoshikazu.nagai@colorado.edu

2019 年 (平成 31 年) 2 月 1 日

1 はじめに

T2K 実験によるニュートリノセクターでの CP 対称性が破れていることを示唆する結果 (95% C.L.) [1] や、次世代長基線加速器ニュートリノ実験であるハイパーカミオカンデ実験や LBNF/DUNE 実験の建設が現実味を帯びてくるなど、ニュートリノの物理は非常に面白いフェーズを迎えている。本稿では、長基線加速器ニュートリノ実験の基盤を支える NA61/SHINE 実験でのハドロン生成の精密測定について紹介する。

2 ニュートリノ実験とハドロン生成

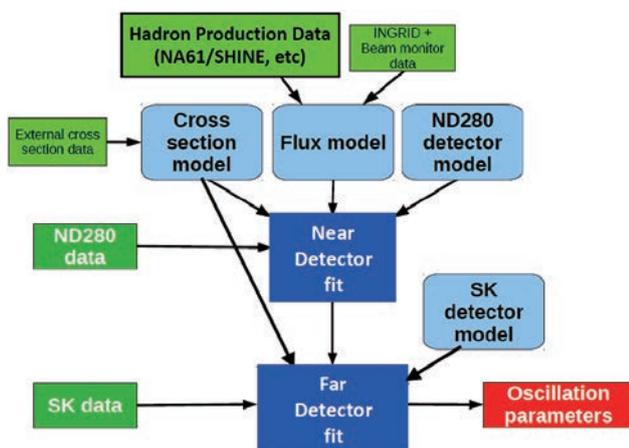


図 1: 長基線加速器ニュートリノ実験における振動解析の例 (T2K 実験)。

加速器を用いるニュートリノ実験では、陽子ビームを軽い原子核標的 (炭素, ベリリウムなど) に衝突させ、生成されたハドロン粒子の崩壊を利用してニュートリノビームを作る。主な生成過程は、 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu^{(-)}$, $K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu^{(-)}$, $\pi^0 e^\pm \nu_e^{(-)}$ などである。図 1 に示す T2K 実験における振動解析の例のように、ニュートリノの親粒子であるハドロンの生成に関する情報は重要なインプットとなる。しか

し、ハドロン生成断面積に関するモデル不定性は大きく、ニュートリノフラックス予測に関する最も大きな系統誤差となっている。また、前置検出器の物理 (ニュートリノ-原子核反応断面積の測定など) では、ニュートリノ振動解析のように前置検出器 → 後置検出器の外挿による系統誤差抑制手法を用いることができないため、ニュートリノフラックスが主な系統誤差となっている (例えば、[2])。そこで、詳細にハドロン生成を測定してニュートリノ実験にフィードバックすることが、NA61/SHINE 実験における主要な目的の一つとなる。

ニュートリノフラックス予測精度の向上の為、NA61/SHINE 実験では二種類の測定を行う。

一つは、「薄い標的」 ($0.02 \sim 0.03 \times \lambda$) を用いて、入射粒子と標的の単一散乱からハドロン生成断面積 σ_{prod} 、非弾性散乱断面積 σ_{inel} 、生成ハドロン毎の二重微分断面積 $d^2\sigma/dpd\theta$ などを測定する。これらの物理測定量は、全反応断面積 σ_{total} 、弾性散乱断面積 σ_{el} 、準弾性散乱断面積 σ_{qe} を用いて以下のように書ける。

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{inel}} + \sigma_{\text{el}}, \quad \sigma_{\text{prod}} = \sigma_{\text{inel}} - \sigma_{\text{qe}} \quad (1)$$

もう一つは、「レプリカ標的」 (T2K 実験: 90 cm 炭素標的 ($1.9 \times \lambda$), NOvA 実験: 120 cm 炭素標的 ($2.5 \times \lambda$)) を用い、実際のニュートリノ実験と同じ標的から飛び出してくるハドロン粒子生成数の測定 ($d^2n/dpd\theta$) やビーム透過率 (P_{survival}) の測定を行う。薄い標的を用いた測定とは異なり、標的内での二次・三次散乱の効果を含めた測定が可能となる。 P_{survival} と σ_{prod} は次式の関係にあり、ターゲット長 (L) と単位体積あたりの原子の数 (n) を用いてレプリカ標的における σ_{prod} を測定できる。

$$P_{\text{survival}} = e^{-Ln\sigma_{\text{prod}}} \quad (2)$$

これらの測定結果は、ニュートリノ実験におけるビームシミュレーション¹により生成されたハドロン粒子へ

¹例えば、T2K 実験では FLUKA を、NuMI ビームラインの実験では Geant4 の FTFP_BERT モデルを使用。

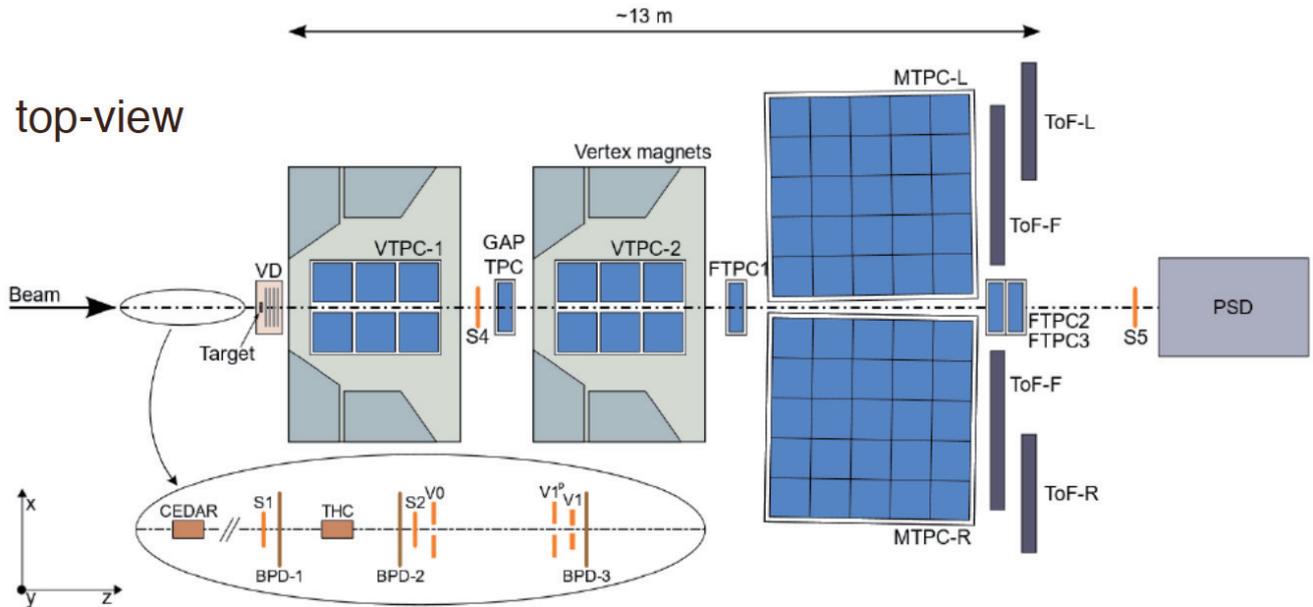


図 2: NA61/SHINE 実験の概要 (2018 年)。FTPC, VD 検出器は 2017 年に導入した。

の重み付けとして使用され、ハドロン生成モデル不定性に起因する系統誤差の抑制が可能となる。

3 NA61/SHINE 実験

3.1 実験の概要

NA61/SHINE 実験 (SHINE: SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment) は, CERN SPS 加速器の North Area に位置する固定標的実験であり, 約 150 名からなる国際コラボレーションである。物理プログラムは, 重イオンの物理, ニュートリノの物理², 宇宙線の物理と多岐にわたり, SPS 加速器から 13–350 GeV のハドロンビーム (陽子, π^\pm , K^\pm) や重イオンビーム受けることができる。

図 2 に実験の概要を示す。荷電粒子の飛跡検出器として Time Projection Chamber (TPC) を用い, 特に上流の 2 つの TPC (VTPC-1, 2) は最大 1.5 T の磁場を作り出す 2 基の超伝導ダイポールマグネット内に設置され, 精密な運動量測定を可能にしている。ビーム下流にはシンチレータを用いた Time-of-Flight 検出器 (ToF) が設置されており, TPC での dE/dx 測定と合わせて粒子同定を可能にしている。ビーム前方最下流には, ハドロンカロリメータである PSD 検出器が配置されている。ニュートリノ実験時はビーム最上流に位置するピクセルヴァーテクス検出器 (VD) は使用しない。典型的な検出器の性能を以下に, 粒子同定の一例を図 3 に示す。

$$\frac{\sigma(p)}{p^2} \approx 10^{-4} \text{ (GeV/c)}^{-1} \text{ (運動量分解能)}$$

²ニュートリノ実験のためにハドロン生成の測定を行う実験であり, ニュートリノ自身を見るわけではありません。

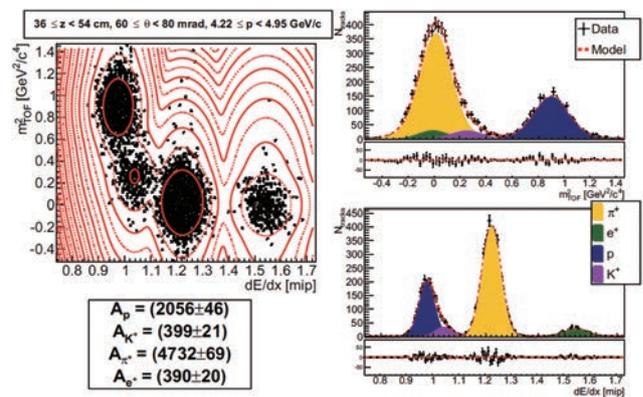


図 3: ToF (右上) および dE/dx (右下) を用いた二次元粒子同定 (左) の例。

$$\sigma(\text{ToF-L/R}) < 90 \text{ ps (タイミング分解能)}$$

$$\sigma(\text{ToF-F}) \approx 120 \text{ ps (タイミング分解能)}$$

$$\frac{\sigma(dE/dx)}{dE/dx} \approx 0.04 \text{ (dE/dx 分解能)}$$

事象トリガーは, 検出器上流のシンチレータカウンター (図 2 中の S1–S5, V0–V1), CEDAR Differential counters with Achromatic Ring focus (CEDAR) 及び Threshold Cherenkov Counter (THC) を用いたビーム粒子同定の組み合わせにより行う。図 4 に CEDAR を用いたビーム粒子同定の例を示す。加えて, ビームの標的への入射位置は 3 基のビーム位置検出器 (BPD1–3) を用いて常時モニターしている。

3.2 ニュートリノ実験用のアップグレード

2015–2017 年にかけて, NA61/SHINE 実験では検出器のアップグレードを行った。それらには, 3 基の前方

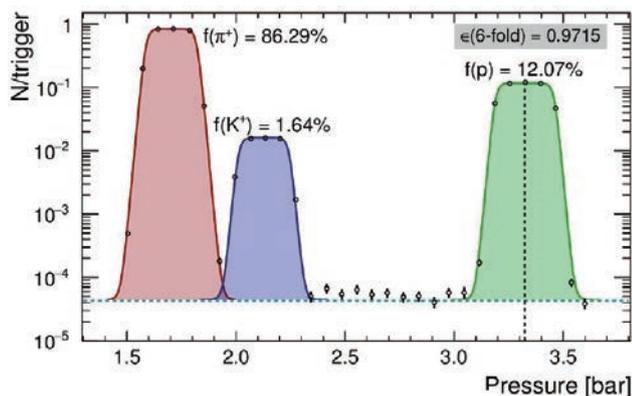


図 4: CEDAR を用いたビーム粒子選別の例。31 GeV/c ビームにおける陽子の割合は 12.07%。THC と組み合わせて陽子を純度 99.99% 以上で選別できる。

TPC の導入 (以下, FTPC1-3), ToF-F 検出器の DAQ アップグレード, 重イオン実験用 VD 検出器の設置が挙げられる。特に, 筆者の関わった FTPC について, ここで紹介させていただく。

特に高い運動量の陽子ビームを用いる加速器ニュートリノ実験では (NuMI: 120 GeV/c, LBNF: 60–120 GeV/c (未定)), ビーム前方方向へ生成されたハドロン粒子の二次散乱からのニュートリノフラックスへの寄与が大きくなる。そのため, 前方から大角度までのハドロン生成をすべて測定する必要がある。そこで, ビーム前方の飛跡アクセプタンスを確保するために, ビームライン上に 3 基の FTPC を設置した。

FTPC の主な特徴に, 低物質質量設計とタンデム構造が挙げられる。ビームライン上に設置するため多重散乱の影響を最小化する必要があり, 構造支柱には Noryl 材 (プラスチック), フィールドケージには銅ストリップをエッチングした薄いカプトンシートを採用した。また, 3 基の FTPC のドリフト方向を逆にするにより, 検出器レベルでのビームオフタイム背景事象の除去が可能な設計になっている。図 5 にタンデム構造の概念を示す。また図 6 に, NA61/SHINE 実験へ設置直前の FTPC2 と FTPC3 を示す。図 7 に示すように, 設置後はビーム前方の飛跡検出アクセプタンスが確保され, 120 GeV/c までの飛跡を検出可能になっている。

4 T2K 実験のための測定

NA61/SHINE 実験では, 2007–2010 年の間 T2K 実験のニュートリノフラックスに関する系統誤差の抑制のため, 薄い炭素標的および T2K レプリカ標的を用いた測定を行った。使用した標的の写真を図 8 に示す。

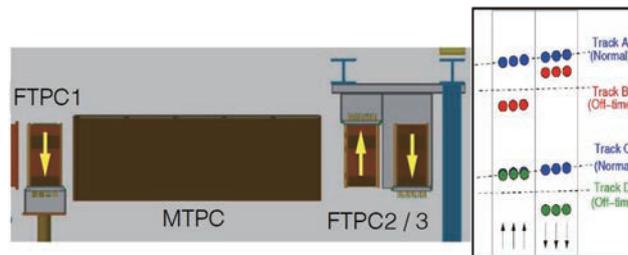


図 5: (左) FTPC の側面図。タンデム構造ドリフト方向を矢印で示す。(右) タンデム構造による検出器レベルでのビームオフタイム背景事象の除去の概念図。

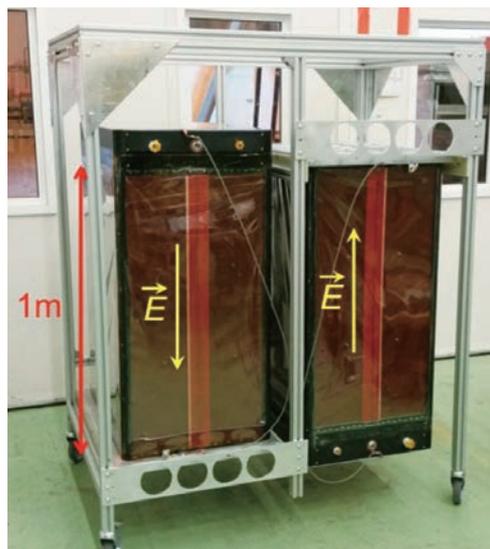


図 6: NA61/SHINE 実験へ設置直前の FTPC2 (右) と FTPC3 (左)。

4.1 薄い炭素標的

31 GeV/c 陽子ビームを 2 cm 炭素標的に照射し (以下, $p+C@31$ GeV/c のようにビーム, 標的, エネルギーを記す), σ_{prod} , σ_{inel} , $d^2\sigma/dp d\theta$ (陽子, π^\pm , K^\pm , K_S^0 , Λ^0 について) の測定を行った。結果は [3, 4, 5, 6] にまとめ, 発表済みである。

これらの測定結果は, T2K 実験における現行ビームシミュレーションのチューニングに使用し, ニュートリノフラックスに関する系統誤差を 10% 以下まで抑制することに成功した。図 9 (黒点線) に, 薄い炭素標的測定結果を用いたチューニング後のニュートリノフラックスに関する系統誤差を示す。

4.2 T2K レプリカ標的

31 GeV/c 陽子ビームを 90 cm T2K レプリカ標的に照射し, ハドロン生成数を運動量 p , 方位角 θ , ターゲット位置 Z ごとに測定した。データの取得は, 2007 年 (パイロットラン, 200k イベント), 2009 年 (物理ラン, 4M

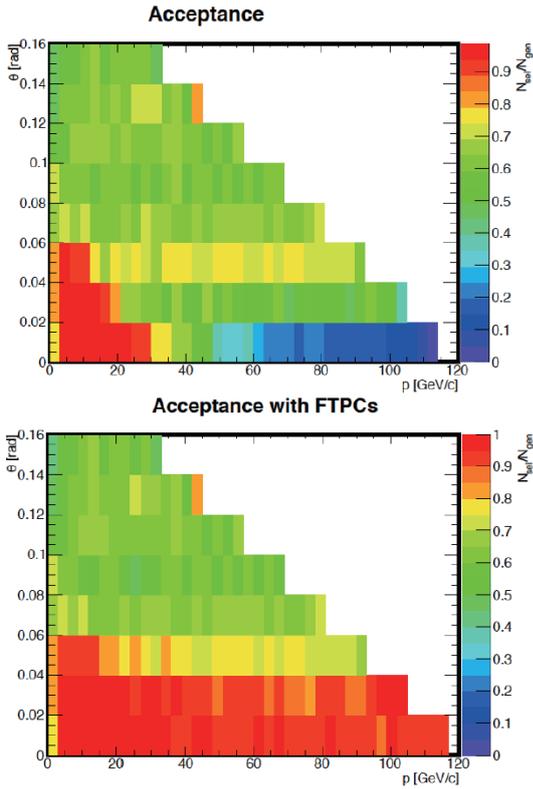


図 7: FTPC 設置前 (上) と設置後 (下) の検出器アクセプタンスの違い。ビーム前方方向のハドロン生成に対する感度が強化されたことがわかる。



図 8: (左) 薄い炭素標的。(右) T2K レプリカ標的。

イベント), 2010 年 (物理ラン, 10M イベント) に行った。2007 年の実験手法と π^\pm 生成数の測定結果は [7], 2009 年の高統計を用いた π^\pm 生成数の測定結果は [8] を参照していただきたい。ここでは, 2010 年のデータを用いた最新の結果 [9] を紹介する。

2010 年の測定はデータの高統計量を活かし, 陽子・ π^\pm ・ K^\pm の二重微分ハドロン生成数 ($d^2n/dp d\theta$) の測定を行った。測定結果の一例を図 10-12 に示す。例えば, 図 10 に示す生成された π^+ の数とモデル予測の一致は比較的良いが, 図 11 および図 12 に示す生成された K^+ や陽子の数はモデルによってうまく再現できていないことが分かる。T2K 実験では, T2K レプリカ標的の測定結果をビームシミュレーションへ適用することにより, エネルギーピーク 600 MeV におけるニュートリノフラッ

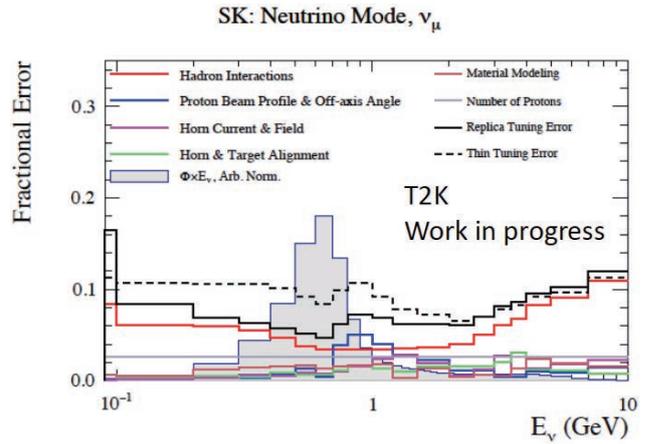


図 9: T2K 実験における, 後置検出器 SK での ν_μ フラックスの系統誤差。NA61/SHINE での薄い炭素標的を用いた測定によるチューニングを黒点線 (現在の標準シミュレーション), T2K レプリカ標的を用いた測定を用いたチューニングを黒実線 (見込み) で示す。また, レプリカ標的チューニングに占めるハドロン生成の系統誤差を赤実線で示す。

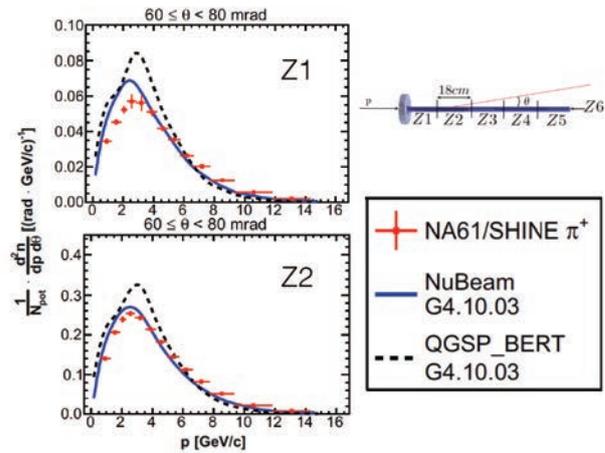


図 10: T2K レプリカ標的からの π^+ の生成数。データ (赤点) と Geant4 モデル (青実線および黒点線) との比較。

クスの系統誤差を 5% 以下に抑制することができると見込んでいる (図 9 黒実線)。

また, 2010 年には, 最大磁場を用いた T2K レプリカ標的データの取得も行った。1.5 T の磁場により, 標的を通り抜けた陽子ビームは TPC 内部へと曲げられる。その結果, TPC を用いて陽子ビームの透過率を求めることが可能になる。この性質を利用し, 式 (2) より σ_{prod} を求める解析が進行中である。2019 年中に結果を公表する予定である。

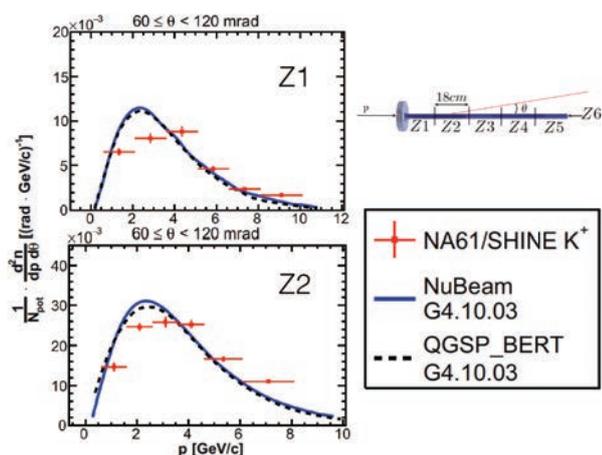


図 11: T2K レプリカ標的からの K^+ の生成数。データ (赤点) と Geant4 モデル (青実線および黒点線) との比較。

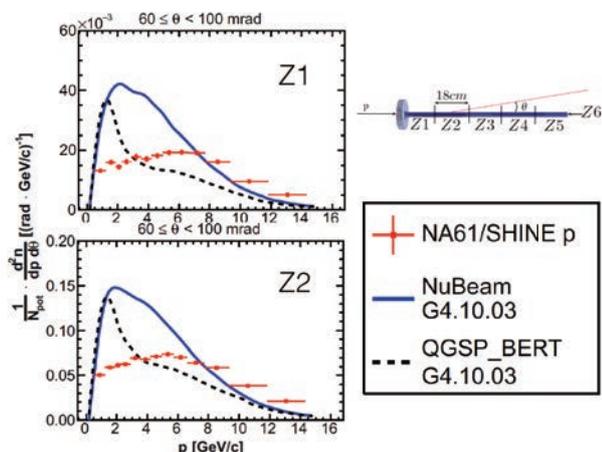


図 12: T2K レプリカ標的からの陽子の生成数。データ (赤点) と Geant4 モデル (青実線および黒点線) との比較。

5 Fermilab ニュートリノ実験のための測定

NA61/SHINE 実験では, Fermilab ニュートリノ実験, 特に NuMI ビームラインと LBNF ビームラインのためのデータ取得を行った。

2015–2017 年に種々の薄い標的を用いたハドロン生成断面積測定用のデータ取得, 2018 年に NuMI レプリカ標的を用いたデータ取得を完了し, 現在は取得済みデータの解析を精力的に行っている。これらの活動について, 最新状況を以下に紹介する。

5.1 2015 年

2015 年のデータ取得は, 式 (1) に定義する σ_{prod} および σ_{inel} の測定に最適化して行った。 $\pi^+ + \text{C}/\text{Al}@31 \text{ GeV}/c$, $\pi^+ + \text{C}/\text{Al}@60 \text{ GeV}/c$, $K^+ + \text{C}/\text{Al}@60 \text{ GeV}/c$ の各反応についてデータを取得し, 約 2% の精度で測定することに成功した。現在の NuMI ビームライン (MINERvA 実験, NOvA 実験) では, π^+ (K^+) の反応に関して 5% (10–30%) の系統誤差を付けているため, 本結果によりニュートリノフラックスのさらなる高精度決定が期待できる。また本結果は, 将来実験である LBNF ビームライン (DUNE 実験) におけるニュートリノフラックス高精度決定にも有用である。図 13 に測定結果のまとめを示す [10]。

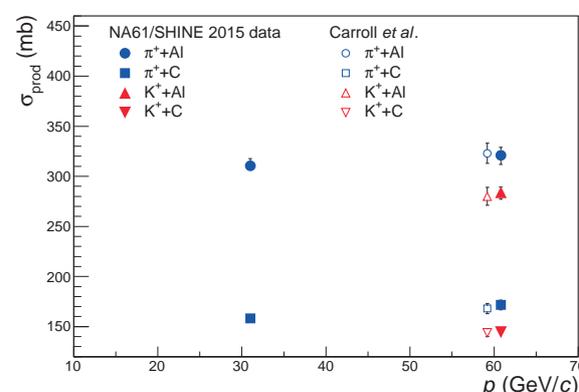


図 13: 全ハドロン生成断面積の測定結果。過去の測定との比較も示す。

5.2 2016–2017 年

2016–2017 年のデータ取得は微分ハドロン生成断面積の測定に最適化して行った。特に, 2017 年には FTPC の導入が完了し, ビーム前方から大角度散乱までの測定すべてをカバーできるようになった。現在, データの較正, 荷電ハドロンおよび V^0 粒子生成断面積測定が進行中である。図 14 に 2016 年データを用いた, Armenteros-Podolanski 図 (V^0 粒子同定法) を示す。図は事象選択および TPC ドリフト速度較正前のデータを用いたものであるが, V^0 粒子候補を同定できていることが確認でき, 良いクオリティのデータが取得できていることがわかる。

5.3 2018 年

2018 年のデータ取得は, NuMI ビームライン標的のレプリカを用いた測定を行った。120 GeV/c の陽子ビームを照射し, NuMI ビームラインにおけるニュートリノフ

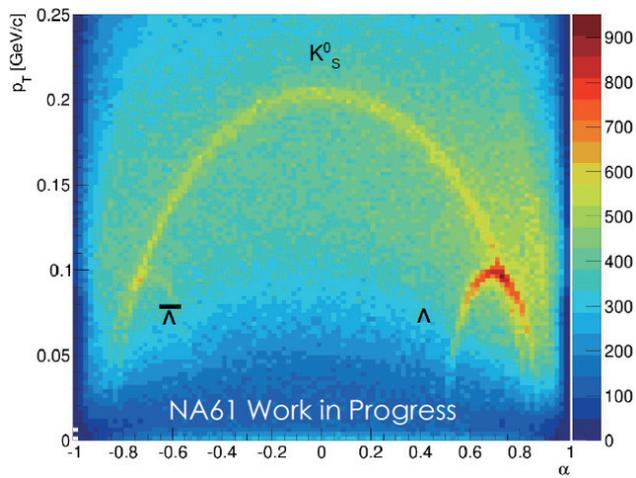


図 14: Armenteros-Podolanski 図。X 軸：縦方向運動量非対称度 ($\alpha = \frac{p^+ + p^-}{p^+ - p^-}$)。Y 軸： V^0 粒子進行方向に対する、崩壊荷電粒子の横方向運動量。

ラックス高精度決定用の高統計データ（約 18M イベント）の取得を完了した。図 15 に NA61/SHINE 実験へ設置した NuMI レプリカ標的の様子を、図 16 に NuMI レプリカ標的におけるハドロン生成事象の例を示す。

6 これからの展望

NA61/SHINE 実験は、当初の計画である 2007–2018 年のデータ取得を完了したが、CERN Long Shutdown 2 後にさらなる実験を計画している。2017 年に国際ワークショップを開催し、2021–2024 年の間に可能な実験について集中的に議論を行った。詳細は NA61/SHINE Beyond 2020 Workshop のサイトを見ていただきたい [11]。

NA61/SHINE 実験は CERN SPSC 委員会へ実験延長の提案を行い [12]、2021 年のデータ取得を既に推奨されている。現在は、CERN Long Shutdown 2 後の 2021–2024 年にさらなる測定を行うため、検出器のアップグレード計画が進行中である。以下に、特にニュートリノ物理学に関するアップグレードと今後の測定計画について紹介したい。

6.1 NA61/SHINE 実験アップグレード

NA61/SHINE 実験の主な飛跡検出器は TPC であるが、その読み出しレートはフロントエンド DAQ 性能により約 150Hz に制限されている。現在、DAQ をアップグレードすることにより読み出しレートに起因するボトルネックを解消する計画が進んでいる。NA61/SHINE 実験では、LHC・ALICE 実験にて使用されているエレクトロニクスを採用することが決定しており、アップグレード後は約 1kHz で TPC 信号を読み出せるようにな

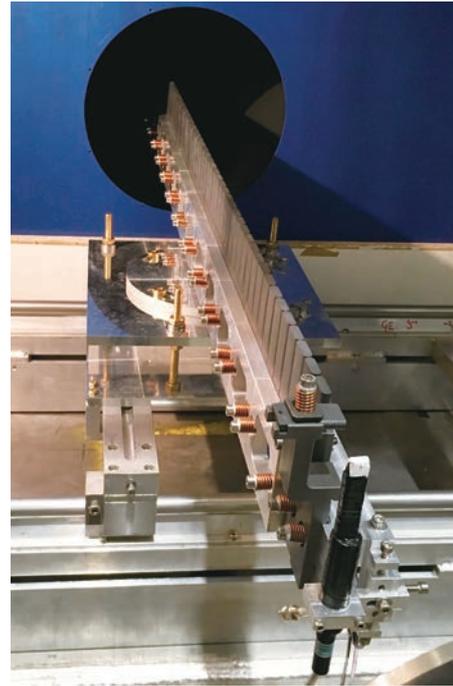


図 15: NA61/SHINE 実験にインストールされた NuMI レプリカ標的。

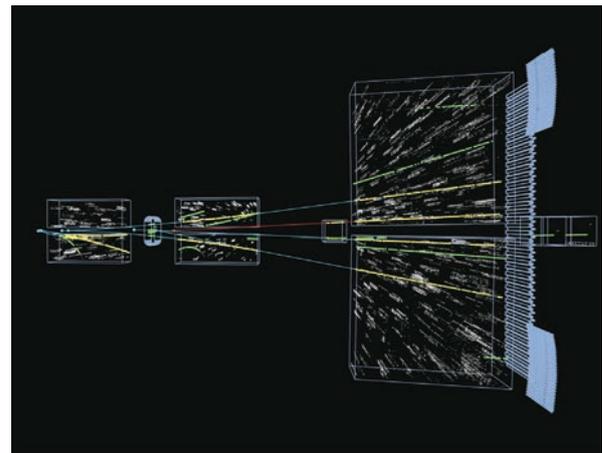


図 16: NuMI レプリカ標的でのハドロン生成事象の例。

る。これにより、高統計データを短い期間で取得できるようになり、これまでに測定されていないハドロン生成データの取得を漏れなく行うことが可能になる。

また、NA61/SHINE 実験では SPS 加速器の専門家とともに、低運動量ビームライン (1–10 GeV/c) の建設を議論している。技術的には、昨年 CERN North Area にて稼働した Proto-DUNE 実験用の三次低運動量ビームラインと同じであり、実現可能である。現在、1 GeV/c 程度の低運動量から数百 GeV/c までのハドロンビームを供給できる施設はほとんどなく、その建設により幅広い運動量領域での種々の測定が可能になる。

T2K レプリカ標的を用いた測定により、現在の主な系統誤差は検出器から標的上流まで飛跡を長距離外挿することによる位置精度の劣化が原因であることがわかって

いる。次世代長基線ニュートリノ実験では更に高精度な測定が必要となるため、レプリカ標的の周りに新しい飛跡検出器を建設する計画も進行している。現在, Micromegas チェンバーを用いた飛跡検出器の作成を検討中である。特に, 将来の DUNE 実験用の LBNF 標的は 2 m を超す長さの設計になる見込みであり, 詳細なハドロン生成測定のためには標的周りの飛跡検出器の建設が望まれる。

6.2 2021 年以降の測定計画

J-PARC における T2K 実験 (およびその次期計画である T2K-II, Hyper-K 両実験) や Fermilab における LBNF/DUNE 実験の高統計ニュートリノデータを最大限に生かした精密測定を実現するためには, 今後は 2–3% 程度の精度でニュートリノフラックスを決定する必要がある。その主たる原因であるハドロン生成のさらなる理解のために, 種々の測定計画が提案・議論されている。

一つは, これまでにデータの存在しないハドロン生成過程の測定である。標的内にて生成されたハドロン二次散乱, 特に 1–5 GeV/c の運動量を持つハドロン反応についてはデータが乏しく, ハドロン生成に関する主要な系統誤差の原因となっている。例えば, π^\pm とアルミニウム (ハドロン収束用電磁ホーンの主物質), 炭素 (標的物質), ヘリウム (冷却系) などの反応を精密に測定することは, 今後の重要な課題となる。この目的のために, 新しい低運動量ビームラインの建設は重要となる。

また T2K 実験では, ニュートリノの生成数を更に増加するために, 標的への新しい物質の導入 (例えばセラミックなど) と標的設計の変更を検討している。DUNE 実験でも LBNF ビームライン用標的のプロトタイプが数年以内に完成する見込みである。そのため, 新しい物質を用いたハドロン生成の測定と新レプリカ標的を用いた測定が今後必須となる。

その他の応用として, 加速器ニュートリノ実験ではないが, 大気ニュートリノフラックスの高精度決定のためのハドロン生成測定の可能性も検討中である。大気ニュートリノは, 一次宇宙線が大気と反応して作られたハドロンが, 大気中でさらなる反応を繰り返すことにより生成される。これまでの衛星実験の成果により, 大気ニュートリノフラックスにおける一次宇宙線起源の系統誤差は非常に小さく抑制することに成功している [13]。一方で, 大気ニュートリノを用いたニュートリノ振動パラメータの精密測定のためには, 低運動量ハドロン (1–20 GeV/c) と大気反応を精密に測定する必要性が指摘されている [14]。例えば, $p + A \rightarrow \pi^\pm + X$ ($A=N, O, C$) 反応過程を新しい低運動量ビームラインを用いて測定することで, この問題が解決可能になる。

これらの測定計画・可能性を表 1 にまとめる。

表 1: 2021 年以降に NA61/SHINE 実験にて計画もしくは議論中の測定一覧。

実験	反応過程	状況
T2K	$\pi^\pm + \text{Al/C/He} @ 1-5 \text{ GeV}$	計画中
T2K	$p + \text{replica} @ 31 \text{ GeV}$	計画中
DUNE	$p + \text{replica} @ 60-120 \text{ GeV}$	計画中
大気- ν	$p + \text{N/C/O} @ < 20 \text{ GeV}$	議論中

7 まとめ

現在およびこれからのニュートリノ実験は, 系統誤差を数%のレベルまで抑えた精密測定が必要となる。NA61/SHINE 実験におけるハドロン生成の精密な測定は, 長基線ニュートリノ実験における物理プログラムのためにこれまで重要な役割を果たし, また今後はさらに詳細な測定が要求される。

NA61/SHINE 実験では, CERN が Long Shutdown 2 に入るとともに大幅な検出器アップグレード計画が進行中である。2021 年以降は種々のハドロン生成データを取得する予定であり, 2026 年以降に見込まれる次世代長基線ニュートリノ実験の開始よりも前に, 全ての必要なデータを取得してしまうことが, NA61/SHINE 実験におけるニュートリノ物理プログラムの今後の目標となる。

もし, 各々の実験に必要なハドロン生成に関するデータが存在しない場合, この機会に測定できる可能性がある。ぜひご一考いただきたい。また, 学生や若手研究者の教育という観点でも, 検出器の開発や実験の運用, データ解析, とハードウェアやソフトウェア全分野に関して参加し経験を積む環境がある。筆者も, TPC の開発に始まり実験の運用, ソフトウェアの開発, データ較正と物理解析, など, 実験を走らせる上で必要となる全分野に携わり, 経験を積むことができた。NA61/SHINE 実験では, 新たな実験コラボレーターや実験提案を歓迎しています。

謝辞

NA61/SHINE 実験を遂行するに当たり, CERN の SPS 加速器の安定運転は必要不可欠であった。特に, SPS North Area の NA61/SHINE 実験が位置する H2 ビームラインを担当している, CERN 加速器グループの Nikolaos Charitonidis 氏にこの場を借りて感謝したい。本記事における, Fermilab ニュートリノ実験のための測定とアップグレードの一部は, アメリカ DOE の研究費補助を受けているものである。

参考文献

- [1] K. Abe, *et al.* [T2K Collaboration], Phys. Rev. Lett. **121**, 171802 (2018).
- [2] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], Phys. Rev. D **98**, 012004 (2018).
- [3] N. Abgrall *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], Phys. Rev. C **84**, 034604 (2011).
- [4] N. Abgrall *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], Phys. Rev. C **85**, 035210 (2012).
- [5] N. Abgrall *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], Phys. Rev. C **89**, no. 2, 025205 (2014).
- [6] N. Abgrall *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], Eur. Phys. J. C **76**, no. 2, 84 (2016).
- [7] N. Abgrall *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **701**, 99 (2013).
- [8] N. Abgrall *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], Eur. Phys. J. C **76**, no. 11, 617 (2016).
- [9] N. Abgrall *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], Eur. Phys. J. C **79**, no. 2, 100 (2019).
- [10] A. Aduszkiewicz *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], Phys. Rev. D **98**, no. 5, 052001 (2018).
- [11] NA61/SHINE Beyond 2020 Workshop. <https://indico.cern.ch/event/629968>
- [12] A. Aduszkiewicz *et al.* [NA61/SHINE Collaboration], CERN-SPSC-2018-008. <https://cds.cern.ch/record/2309890>
- [13] J. Evans, D. G. Gamez, S. D. Porzio, S. Söldner-Rembold and S. Wren Phys. Rev. D **95**, no. 2, 023012 (2017).
- [14] G. Barr, NA61 beyond 2020 workshop, <https://indico.cern.ch/event/629968/contributions/2659929>