

CERN LHC Run3におけるFASER最新結果 ビーム軸超前方での物理研究の開拓と進展

千葉大学 素粒子実験研究室

早川 大樹

daiki.hayakawa@cern.ch

九州大学 粒子系実験研究室

河原 宏晃

kawahara@artsci.kyushu-u.ac.jp ken.ohashi@cern.ch

欧州原子核研究機構 (CERN)

稲田 知大

tomohiro.inada@cern.ch

ベルン大学高エネルギー物理学研究室

大橋 健

2024年(令和6年)9月16日

1 はじめに

光陰矢の如し。前回FASER実験を高エネルギーニュースで紹介させて頂いてから5年もの月日が経った[1]。準備段階と今後の展望について述べた前回から時は経ち、今回はLHC Run3でのデータ取得と現在までに得られた物理結果について紹介したい。

FASER (ForwArD Search ExpeRiment at the LHC) はCERN・LHCにおける陽子・陽子衝突により超前方方向で生成されるMeVからGeV質量程度の軽い長寿命の新粒子探索とTeV領域のニュートリノ研究を目的とした新たな実験で、ATLAS実験衝突点から480m前方に検出器を設置している(図1)。検出器のアクセプタンス

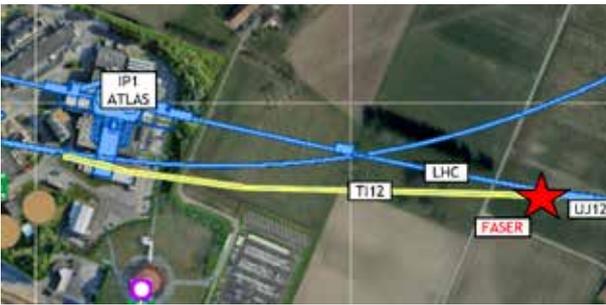


図1: FASER実験サイトと他の実験サイトとの位置関係を示した図。FASERはLHCトンネルをジュネーブ側に480m前方に進んだ場所にある[2]。

は半径約10cm、長さ7mと非常にコンパクトであるが、Veto検出器、FASERνエマルジョン検出器、シリコン飛跡検出器、プレシャワー検出器、電磁カロリメータと3種類のニュートリノの精密測定と長寿命未知粒子を効率よくとらえることができる検出器デザインとなって

いる。(図2は検出器概観)。実験は2017年に提案され[3]、そこから2018年11月にLetter of Intent (LOI)がCERNに提出され、2019年3月に承認された。その後ニュートリノプログラムについてFASERν LOI [4]およびプロポーザル [5]が提出され、2019年12月に承認された。地上での検出器コミッショニングや、実験サイトであるLHCトンネル脇のサービストンネル(TI12)の工事などを終え、2021年3月に検出器の大部分がTI12にインストールされた。その後、2022年3月にFASERνエマルジョン検出器をインストールし、同年7月のLHC Run3開始当初からデータ取得し続けている。基本的にオペレーションはフルリモートの24時間体制で行っており、検出器の状態をモニタリングし、何か問題が起これば随時現地のエキスパートが対応するという手筈になっている。執筆時点の2024年7月末までで約110 fb⁻¹ものデータを取得している。2022年度、2023年度に毎年蓄積データを用いて、これまで4つの物理成果を発表してきた。後の章ではそれらについて詳しく述べる。

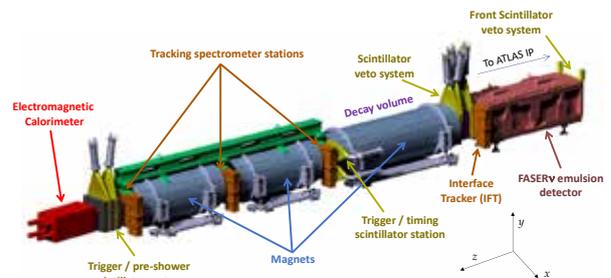


図2: FASER検出器の概念図[2]。

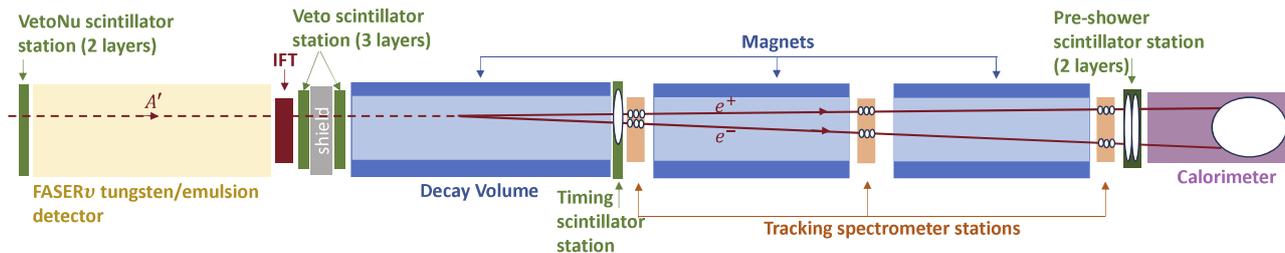


図 3: ダークフォトンの FASER 検出器内でのイベントトポロジー [7]。ダークフォトン (A) が崩壊した e^+e^- ペアを捕らえることが必要である。

2 Dark Photon 探索

暗黒物質は素粒子標準模型を超える新粒子の存在を示唆しているが、粒子的性質に関しては、多くの性質は謎に満ちている。しかし、それは標準模型を超える物理について豊富なアイデアを生み出す動機付けにもなっている。WIMP miracle を強い動機とした Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) などの重い暗黒物質からの信号が見えない現状で、“WIMPlless” miracle [6] を動機の一つとするダークセクターの導入は暗黒物質探索の新たな突破口となっている。これらの模型の中では暗黒物質が $U(1)$ 電磁気力を含むダークセクターの一部である場合には標準模型粒子と相互作用する可能性があり、その場合にダークゲージボソンは標準模型粒子と混合し、新しい粒子であるダークフォトン A を生成する。そしてダークフォトンが軽く、微弱な (Feebly) 相互作用を持つ場合、これらは長寿命粒子となり LHC の陽子・陽子衝突で大量に生成される可能性があり、FASER 検出器まで到達し、そこで荷電粒子対に崩壊したものを信号として飛跡検出器で捕らえるというのが大筋である (図 3)。ダークフォトン解析で主要なシグナルは陽子・陽子衝突により前方方向に豊富に生成された中性パイ中間子起源の崩壊モード $\pi^0 \rightarrow A \gamma$ である。このモードでは $m_A < m_\pi \simeq 135 \text{ MeV}/c^2$ の質量領域のダークフォトンを探索可能である。

この解析は LHC Run3 で FASER が取得したデータを用いた初の解析であるため、できるだけシンプルでロバストな信号選択基準を置いて、ブラインド解析を行うこととなった。そのカット基準は (1): 物理ランで取得したクオリティの良いデータであること, (2): 上流でのミュオンを主とする荷電粒子の背景事象を除くため、5 層の Veto 検出器の全層で信号が検出されていないこと ($< 40 \text{ pC} \sim 0.5 \text{ MIP}$), (3): Timing とプレシャワー検出器で信号が見えていること ($> \text{MIP}$), (4): 検出器の 95 mm 半径の有効体積内に 20 GeV 以上の運動量を持つ飛跡が 2 本再構成されていること, (5): カロリメータで 500 GeV 以上のエネルギーを落としていること, の 5 条件である。このカット基準では 40–50% の signal

efficiency を保つことができている。Veto 検出器で上流からの荷電粒子を 99.9998% の efficiency で消せるため、カットをかけた後に残らうる主な背景事象は二種類である。一つ目は検出器内でのニュートリノ相互作用起源の二次粒子であり、 300 ab^{-1} 相当の MC サンプルを用いて背景事象としての二次粒子の混入数を見積もった。最終的にダークフォトン探索に用いたデータ量 27 fb^{-1} にスケールしたところ $(1.5 \pm 0.5^{\text{stat.}} \pm 1.9^{\text{syst.}}) \times 10^{-3}$ 事象が背景事象として得られた。もう一つの主要な背景事象はミュオンが FASER 検出器上流の岩盤と相互作用した際に生じる中性ハドロンの崩壊である。中性ハドロンの大部分が崩壊起源のミュオンの検出及び FASER ν 検出器内にあるタングステンで抑制されるが、それでも一部は生き残り、2-track や 3-track の飛跡を残す。2-track の飛跡は信号領域において背景事象になるため、3-track の背景事象をコントロール領域として、低エネルギー成分 ($E < 100 \text{ GeV}$) とカロリメータによるカットを通過する高エネルギー成分 ($E > 500 \text{ GeV}$) に分けて事象数を見積もり、その比を用いて、2-track 事象の低エネルギー成分から信号領域である高エネルギー成分への外挿を行った。その結果、 $(8.4 \pm 11.9) \times 10^{-4}$ 事象という値が見積もられた。これらより最終的に見積もられた背景事象の合計は $(2.3 \pm 2.3) \times 10^{-3}$ 事象である。その後、アンブラインドした結果、有意な信号超過はみられなかったため 90% の信頼区間で上限値をつけた。図 4 は先行研究と本研究でつけた制限を示している。縦軸はダークフォトンと γ の混合パラメータ (ϵ), 横軸はダークフォトンの質量 m_A である。図 4 中には暗黒物質が宇宙初期の熱平衡から取り残されて生じた (Thermal freeze-out), ダークフォトンが標準模型粒子と暗黒物質を媒介する場合の一つ例となる理論曲線を引いており、特に 30–40 MeV/c^2 程度の質量を保つ場合にはそれらの模型を排除することができた。また、そのシナリオ以外を含めると $\epsilon \sim 4 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$ and $m_A \sim 10 - 80 \text{ MeV}/c^2$ という広いパラメータ空間を排除することに成功した。余談ではあるが、最初の結果は 2023 年の Moriond EW で発表したのだが、2022 年夏にデータを取り始め、最初はデータを用いた性能評価

に追われた。秋にデータ取得が終了するとそこからコラボレーション内で手分けしながら様々な解析・確認作業を行い、検出器関係の support note、物理解析の internal note を2月末までに完成させてと、データ取得開始から後の章で述べるコライダーニュートリノ初観測と合わせて、初結果を得るまでは怒涛のタイムスケールであった。1、2月は週3回ミーティングを行い、アンブラインドをしていいかの承認検討を実験グループ一体となって議論するなど、必要な手続きはしっかり踏みつつ、FASER のコンパクトさを活かして、素早く結果を出すことができたのは非常に良かったと思う。若手としてそのような時期に携われたのは良い経験になった。

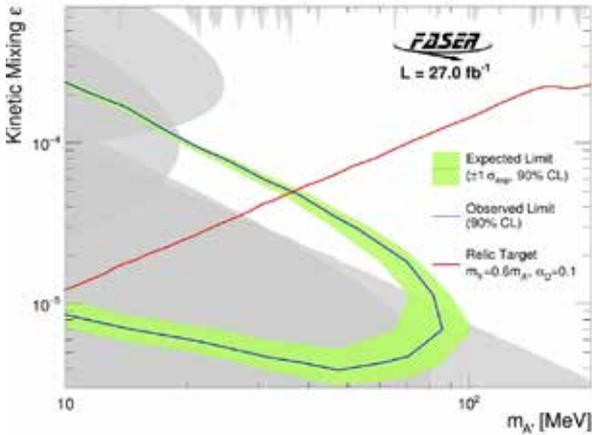


図 4: ダークフォトンの制限曲線 [7]。図中の Relic target はダークフォトンを用いて現在の暗黒物質質量をうまく説明できる場合の理論予想曲線である。灰色の領域が先行研究により排除された領域で、緑のバンドが今回新たに排除した領域である。

3 ALPs

アクシオン様粒子 (Axion-like particles: ALPs) はアクシオンを含めた擬スカラー粒子の総称であり、様々なモデルが検討されている [8]。ここでは、ALP が $SU(2)_L$ ゲージボソンと相互作用し、電磁対称性の破れ以降は光子と弱ゲージボソンと相互作用するシナリオ (ALP-W モデル) について考える。ラグランジアン \mathcal{L} は

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{2}m_a^2 a_W^2 - \frac{1}{4}g_{aWW} a_W W^{i,\mu\nu} \tilde{W}_{\mu\nu}^i \quad (1)$$

で表される。ここで、 m_a , a_W はそれぞれ ALP-W モデルにおける ALP の質量と場、 g_{aWW} は ALP と弱ゲージボソンの結合定数、 $W^{\mu\nu}$ は $SU(2)_L$ 場の強さである。

LHC 前方領域では B メソン (B^0 , B^\pm) が ALP の主な生成源となる。2022 年と 2023 年に取得したデータ (57.7 fb^{-1}) を用いて、ALP が 2 つの光子に崩壊する事象を探索した [9]。

> 1.5 TeV signal region	
Light	$0.23_{-0.11}^{+0.01} \text{ (flux)} \pm 0.11 \text{ (exp.)} \pm 0.04 \text{ (stat.)}$
Charm	$0.19_{-0.09}^{+0.32} \text{ (flux)} \pm 0.06 \text{ (exp.)} \pm 0.03 \text{ (stat.)}$
Total	$0.42 \pm 0.38 \text{ (90.6\%)}$

表 1: MC で見積もった信号領域におけるニュートリノ背景事象のまとめ (57.7 fb^{-1})。ニュートリノ生成ハドロンの種類ごとに見積もった (Light は π , K を主要とするハドロン要素であり、Charm は D メソンなどのチャームを含むハドロン要素を意味する)。誤差として、ハドロンフラックスの不定性 (flux), カロリメータのエネルギースケールによる誤差 (exp.), MC の統計誤差 (stat.) が考慮されている [9]。

FASER 検出器で捉える ALP の崩壊事象は図 5 のようになる。ALP は電荷を持たないため、Veto 検出器、飛跡検出器に信号を残さない。ALP 崩壊後に放出される高エネルギー光子対はプレシャワー内で反応し、電磁シャワーとして観測される。信号領域の設定を、プレシャワー内シンチレータの 2 層目で落とすエネルギーを 10 MIP 以上とし、さらに 1 層目で落とすエネルギーに比べ 4.5 倍以上とした (図 6)。光子対は互いに非常に近い距離でプレシャワーと反応するため、FASER 検出器では分離することができない。1.5 TeV 以上の「単一の」電磁シャワーがカロリメータで観測される事象が想定される。

主な背景事象は、プレシャワーにおけるニュートリノの荷電カレント反応である。ニュートリノ背景事象は MC を用いて見積もり、図 6 に示した信号領域以外の領域でデータと一致しているか確認し、MC の見積もりに問題がないことを確認した。その他の背景事象として、Veto 検出器の取りこぼし、FASER 検出器に飛来するミューオン、中性ハドロン、宇宙線、ビームバックグラウンドについて考慮したが、いずれも無視できるほど小さいと見積もった。系統誤差としては、ニュートリノを生成する超前方ハドロンフラックスの不定性が最も大きい。超前方ハドロンを light, charm ハドロンに分類し、それぞれ文献 [10] が推奨する MC generator を用いて値と不定性を見積もった。他には、カロリメータのエネルギースケール較正の不定性が挙げられる (表 1)。

今回の解析では信号領域に 1 事象を確認し、この事象が ALP かニュートリノか検討を行ったが、区別をつけることはできなかった。この事象は「ALPtrino」イベントとコラボレーション内で呼ばれている。得られた結果を元に ALP の制限曲線を図 7 のように作成した。既存の実験では排除されていない領域を新たに排除することに成功した。

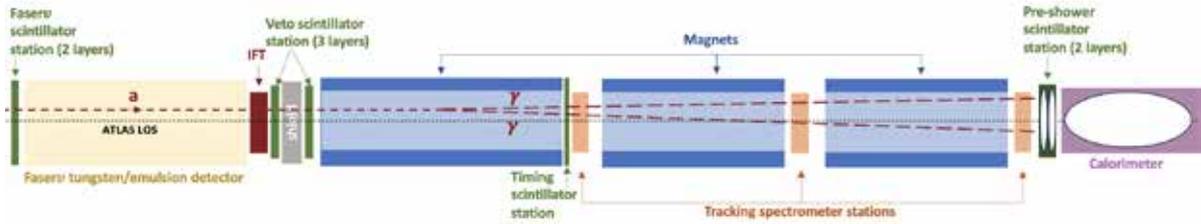


図 5: ALP の FASER 検出器内でのイベントトポロジー [9]

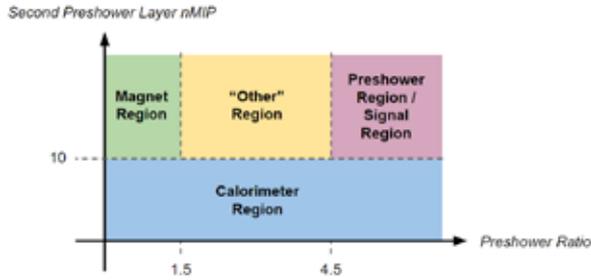


図 6: ALP 解析における信号領域とニュートリノ背景事象の確認領域 [9]。信号領域 (Signal) 以外の領域は、FASER 検出器のどの部分がニュートリノと反応したかによって区別されており、それぞれの領域で MC の見積もりとデータが一致しているか確認されている。

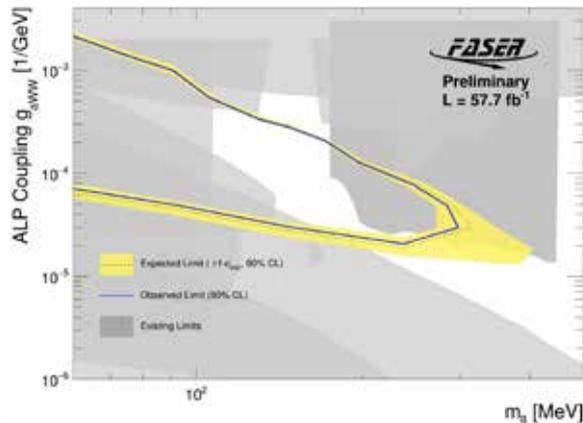


図 7: ALP の制限曲線 [9]

4 Spectrometer によるニュートリノ測定

FASER 実験のもう一つの物理として、ニュートリノ測定がある。LHC の ATLAS 衝突点では、散乱角 0 度付近に多数のハドロンが生じる。生成したハドロンのうち、 π^\pm や K^\pm の一部やチャームハドロンなどが崩壊し、ニュートリノが生じる。これらのニュートリノは検出器前方にある約 100 m の岩盤を突き抜け、FASER 検出器内のタングステンからなるターゲットと相互作用する。この相互作用により生じた 2 次粒子は、タングステンの間に挿入されたエマルジョン検出器に記録され、

さらに後方にあるシリコン飛跡検出器によって捉えられる。FASER 実験では、2018 年にエマルジョン検出器を用いた FASER ν のパイロットランを実施し、2021 年にニュートリノ反応候補の初観測を報告する論文を発表した [11]。その後、シリコン飛跡検出器を用いて、衝突型加速器における ν_μ の初検出を 2023 年 3 月に報告した [12]。さらに、2024 年 3 月にエマルジョン検出器を用いて、 ν_e の検出及び TeV スケールでのニュートリノ衝突断面積を報告した [13]。本章では、まずシリコン飛跡検出器を用いた解析を紹介し、次章でエマルジョン検出器を用いた解析を紹介する。

シリコン飛跡検出器を用いた解析では、タングステン標的の前後にある FASER ν Veto 検出器と Veto 検出器を用いてニュートリノ反応起因のミュオンを検出する。図 8 は、検出手法を模式的に表したものである。ATLAS 衝突点方向から入射する ν_μ は、タングステン標的直前の FASER ν Veto 検出器を通過し、タングステン内で荷電カレント反応を起こす。これにより生じたハドロンおよびミュオンは、直後にある InterFace Tracker (IFT) と Veto 検出器にシグナルを起こす。その後、吸収材によりハドロンは除去され、一つのミュオンがスペクトロメータおよびカロリメータを通過する。このため、FASER ν Veto 検出器で粒子の検出がなく、スペクトロメータで一つの高エネルギーミュオンが検出される事象を選ぶことで、ニュートリノ事象を選び出すことができる。具体的には、以下の選別条件を用いた。(1): 物理ランで取得したクオリティの良いデータ、(2): FASER ν Veto 検出器の 2 つの層でともに粒子が検出されない (< 40 pC ~ 0.5 MIP), (3): Veto 検出器 3 層のうち、少なくとも 2 層で粒子を検出、(4): カロリメータ内のシグナルが 1 MIP 相当、(5): スペクトロメータにおいて、95 mm 半径の有効体積内で単一の 100 GeV 以上の粒子を検出、(6): 検出した粒子の飛跡から外挿した FASER ν Veto 検出器での粒子の位置が中心より 120 mm 以内。

この解析におけるバックグラウンドは、a) 中性ハドロンがタングステン中で衝突することにより生じるミュオンが飛跡検出器で検出される場合、b) FASER ν Veto 検出器の検出範囲の外側から入射したミュオンがタン

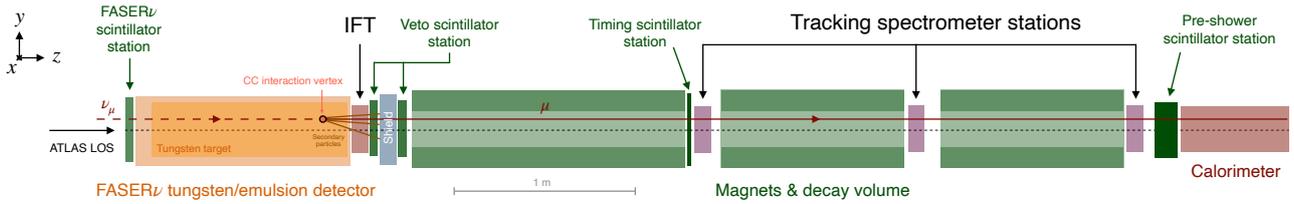


図 8: ニュートリノ候補事象の FASER 検出器内でのイベントトポロジー [12]

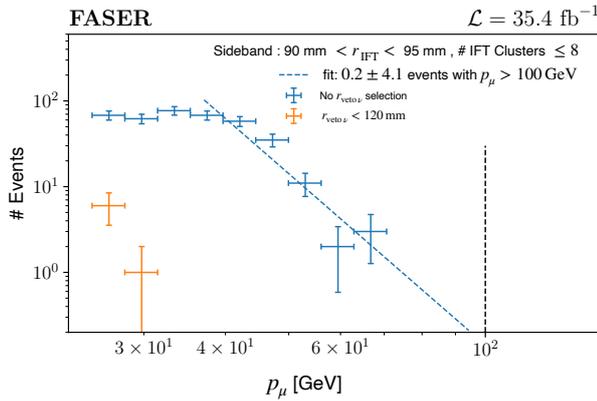


図 9: 大角度ミューオン散乱由来するバックグラウンド事象のミューオン運動量分布 [12]

グステンと散乱して選別条件を満たす場合の 2 つが挙げられる。a) については、GEANT4 を用いたシミュレーションにより、背景ミューオンの岩盤反応起因の中性ハドロンによる反応を生成し、事象選別後に残る割合を求めることで推定され、 0.11 ± 0.06 と求めた。b) については、FASERν Veto 検出器での粒子位置による選別を緩めた、低運動量のミューオン事象を用いることで推定された。まず、半径 95 mm の有効体積中 90 mm から 95 mm で検出され、飛跡から外挿した FASERν Veto 検出器での位置が半径 120 mm 以内で、IFT で 8 つ以下のクラスターが検出された事象に注目し、低エネルギーのミューオン事象を選別した。これは、主に大角度のミューオン由来の事象である。この選別で、30 GeV 以上の事象は見つからず、ポワソン統計よりバックグラウンド事象の 3σ 上限として 5.9 を用いた。次に、30 GeV 以上と 100 GeV 以上の選別条件の違いの影響を理解するために、上の条件から FASERν Veto 検出器での位置も用いた選別をなくした場合に注目し、検出した事象で直線フィットすることにより 30 GeV 以上と 100 GeV 以上の事象数の割合をもとめた。図 9 はこのフィットを示している。これにより 100 GeV 以上のバックグラウンドを 0.01 ± 0.23 と見積もった。最後に、解析に用いた有効体積の違いを補正することにより、このバックグラウンドを 0.08 ± 1.83 と求めた。

この解析では、2022 年 7 月から 11 月までに取得した、 35.4 fb^{-1} のデータを使用した。選別を通過した事象数

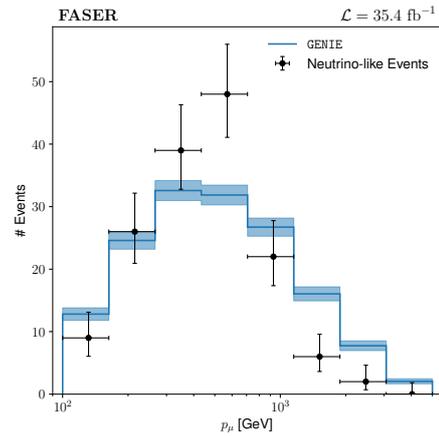


図 10: ニュートリノ候補事象のミューオン運動量分布 [12]

に加えて、FASERν Veto 検出器の 2 層のうち片方もしくは両方でシグナルがあった事象数を用いて最尤法で推定することにより、これらの検出器の検出効率の影響も考慮した。この解析により、選別条件を満たした 153 事象が検出され、 16σ の有意度で ν_μ を検出した。これは、衝突型加速器における初めてのニュートリノ検出である。図 10 は、ニュートリノ候補事象でのミューオン運動量分布である。データには統計誤差のみがつけられている。青線は、GENIE を用いたシミュレーションである。これらの運動量を用いたニュートリノエネルギー推定を含む詳細な解析を現在行っており、近いうちに報告できる見込みである。

5 FASERν エマルジョン検出器を用いた電子ニュートリノ・ミューニュートリノの検出と反応断面積の初測定

これまでの実験でのニュートリノの反応断面積の測定は、電子ニュートリノで 300 GeV まで、ミューニュートリノでは 400 GeV までと 6 TeV を超えるエネルギー領域に限られていた。FASER 実験では、未開拓の TeV 領域にて 3 世代のニュートリノを研究することを目的の 1 つとして、タングステン/エマルジョン検出器・Veto

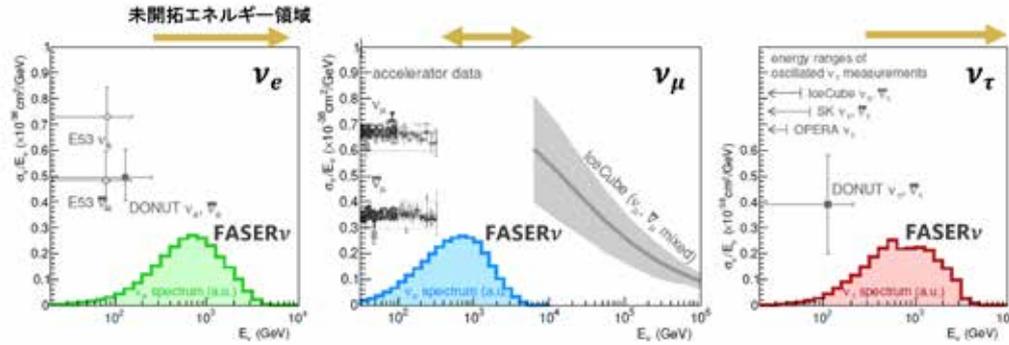


図 11: FASER ν 検出器で期待される電子ニュートリノ・ミューニュートリノ・タウニュートリノのエネルギー分布。固定標的型実験と宇宙線実験のエネルギーギャップを埋めるように FASER が相補的にカバーしている。

検出器・インターフェース検出器から成る FASER ν 検出器をデザインし運用してきた。図 11 に FASER ν 検出器で期待される電子ニュートリノ・ミューニュートリノ・タウニュートリノのエネルギー分布を示す。ナノ精度のエマルジョン検出器を用いることで3世代のニュートリノの物理解析が可能であり、精密な測定によって標準理論の検証や新しい物理現象の発見が期待される。

別の見方では、特に電子ニュートリノの反応頻度の解析からその生成源である超前方チャーム生成についての初データが得られる。これにより、超高エネルギーの宇宙ニュートリノ観測において背景事象として問題になっている地球大気でのチャーム生成とその崩壊によるニュートリノ生成の理解を深めることができ、ニュートリノ研究だけでなく、QCD や宇宙物理学等への幅広いインパクトが期待されている。

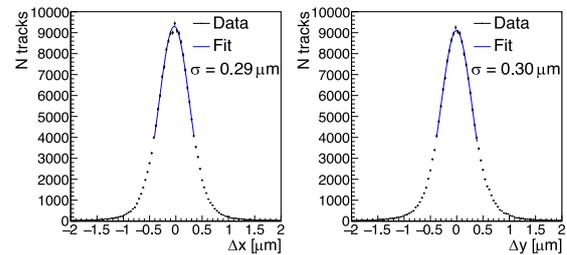


図 13: FASER ν エマルジョン検出器内で再構成したミューオンの飛跡 (線形フィット) に対する各エマルジョンフィルムでのヒットの位置ズレ分布 [13]。エマルジョンフィルムでのヒットの位置精度が $\sim 0.3 \mu\text{m}$ であると示している。

FASER 実験では、2018 年にエマルジョン検出器を用いた FASER ν のパイロットランを実施し、2021 年にニュートリノ反応候補の初観測を報告する論文を発表した [11]。これにより、その後のコライダーを用いた高エネルギー領域でのニュートリノ実験への道を拓いた。2022 年から始まった LHC Run 3 における FASER ν エマルジョン検出器は、1.1 mm 厚のタングステン板 730 枚とエマルジョンフィルム [14] の積層構造であり、タングステンの総質量は約 1.1 トンである。FASER ν エマルジョン検出器では、5 本以上の飛跡が $5 \mu\text{m}$ 以内で組む反応点候補を検出し、反応点から出る各粒子のビーム軸に対する角度・運動量・飛程・ビーム軸に垂直な面での角度情報などによりミューニュートリノ反応を識別する。また、電子の同定とタウ粒子の崩壊の検出を行うことにより、電子ニュートリノ反応とタウニュートリノ反応を識別する。ニュートリノエネルギーは、ニュートリノ反応点から出る各粒子の角度と運動量などを用いた多変量解析により推定することができる。さらに、FASER スペクトロメータとのハイブリッドによりミューオンの電荷識別が可能であり、ミューニュートリノと反ミューニュートリノを区別した測定を実施する。タウニュートリノについては、タウ粒子からミューオンへの崩壊モー

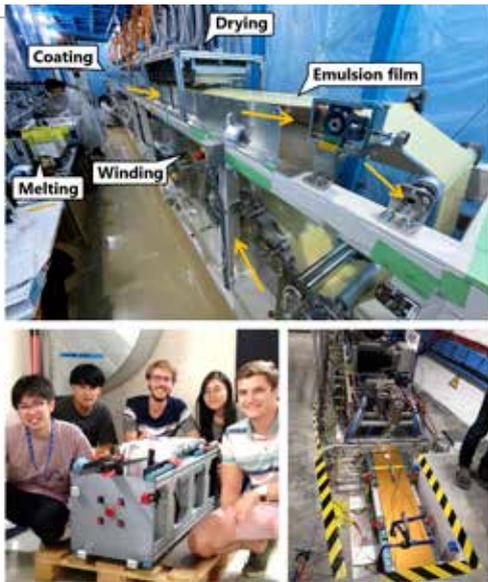


図 12: エマルジョンフィルム製造施設の塗布装置 [15], CERN で組み立てた検出器, 地下トンネルへ設置後の様子。

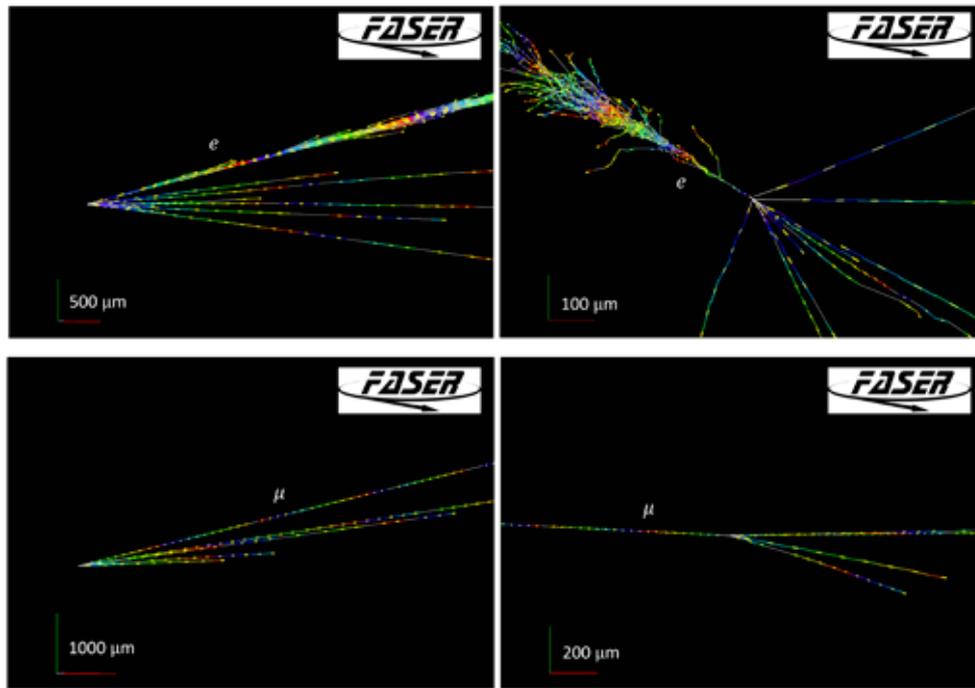


図 14: FASER ν エマルジョン検出器で初観測した電子ニュートリノ反応のうちの 1 例およびミューニュートリノ反応の 1 例 [13]。左側の図はおおよそ左から、右側の図は紙面に垂直な方向からビームが来ている。各線分はエマルジョンフィルムで捉えた、反応から生じた荷電粒子の飛跡を表している。

ドを利用して、タウニュートリノと反タウニュートリノを区別した測定が可能である。

2022 年 3 月にデータの取得を開始し、エマルジョンフィルムに蓄積する背景ミューオン事象密度を解析可能な範囲に抑えるために、2022 年に 3 回・2023 年に 2 回のエマルジョンモジュールの入れ換え・ビーム照射を実施してきた。各モジュールについて、エマルジョンフィルムの製造 [15]・カット・リセット処理¹等の準備を日本で行なって CERN へ輸送し、CERN のエマルジョンファシリティにてモジュールを組み立ててインストールし (図 12)、照射後に取り出して現像を実施している。その後日本へ輸送し、主に FASER コラボレーターによるシフトで高速読み出し装置 (光学顕微鏡) を用いたフィルム全面的読み出しを行なっている。読み出したデータを再構成して評価した位置精度は約 $0.3 \mu\text{m}$ を達成している (図 13)。

最初の反応断面積測定に向けた解析範囲として 2022 年にビームを照射した 2 つ目のエマルジョンモジュールの上流側 398 層までの中央の領域を設定し、電子ニュートリノおよびミューニュートリノの荷電カレント反応を探索した。背景事象となるハドロン反応とニュートリノ中性カレント反応を除くため、反応点から 200 GeV 以上の電子・ミューオン候補が出ていることや角度の条件を課した [13]。そのための電子のエネルギー測定および

ミューオンの運動量測定はエマルジョンデータを用いて行なった。それぞれ 200 GeV で $\sim 25\%$, 30% の運動量測定精度と見積もっている。このデータ解析により、加速器実験としては最高エネルギーの電子ニュートリノ荷電カレント反応候補 4 例 (5.2σ の有意性) およびミューニュートリノ荷電カレント反応候補 8 例 (5.7σ) の観測に成功した。電子ニュートリノ反応については、LHC における初めての直接検出である。図 14 に電子ニュートリノ・ミューニュートリノ反応候補を一例ずつ示す。

これらの事象を用いて、TeV エネルギー領域において世界初となる反応断面積の測定を実施した。結果を図 15 に示す。標準理論で期待される断面積とエラーの範囲でうまく一致することがわかった。今回報告したのは 2022–2023 年に蓄積したデータの 2% 程度を用いた最初の結果であり、今後の物理解析に向けた筋道をつけることができた。

6 今後の展望

LHC Run3 の残り期間のデータだけでなく、LHC のアップグレード (High Luminosity LHC) の Run 4 以降も継続してデータ取得を行う。3 章で述べた ALPs 探索ではニュートリノが主要な背景事象であり、フラックスの不定性も考慮すると単純に統計を増やすだけでは高い感度が期待できない。そこで、タングステン板と読み

¹製造後のフィルムを高湿度環境 (95%, 30°C) に置くことにより長期的なフィルムの性能を向上させる処理。

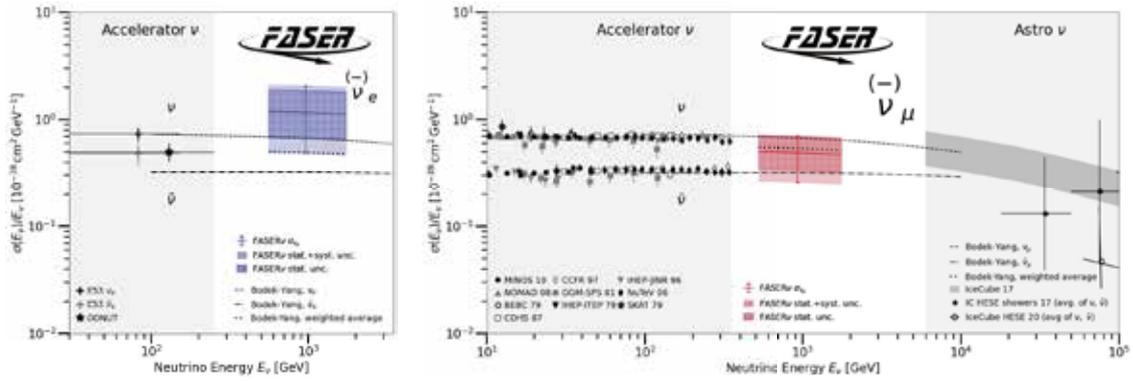


図 15: FASER ν エマルジョン検出器による, TeV エネルギー領域で初めてとなる電子ニュートリノとミューニュートリノの反応断面積の測定結果 [13]

出し一体型シリコンピクセル検出器 (MAPS) の 6 層から成る, 新しいプレシャワー検出器を 2024 年末にインストールする [16]。MAPS はジュネーブ大学が中心となって開発しており, 130 nm SiGe BiCMOS プロセス (IHP Microelectronics 社の SG13G2) を採用している。図 16 のように, ピクセルの角付近で電場の上昇を抑えるために六角形ピクセル (65 μm 長) で設計し, 各ピクセルのフロントエンド回路は 0.5 fC から 65 fC の広いダイナミックレンジを有している。これまで単一の電磁シャ

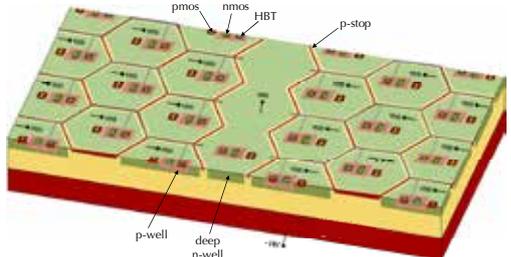


図 16: 新しいプレシャワー検出器に用いる読み出し一体型 SiGe BiCMOS sensor [16]

ワーとして観測されていた光子対を高い位置分解能を用いて分離し, ニュートリノ背景事象を大幅に削減する。図 17 は予想される感度である。一時的な半導体需要の増加によりチップの製造が遅れたが, 2024 年 5 月に最終版のチップを受け取った。現在プレシャワー検出器のインストールに向けたセンサーの動作確認, モジュールの作成等を急ピッチで進めている。日本グループも検出器周りのエレクトロニクスや電源, 制御システムの構築を担当し, 主要な役割を果たしている。

FASER ν ニュートリノ解析については, エマルジョン検出器データの読み出し・再構成, ニュートリノエネルギー測定手法の開発などを進めている。今後の解析により, タウニュートリノ反応の検出, 3 世代ニュートリノの反応断面積測定/フラックス測定, 超前方ハドロン生成の測定を実現していきたい。

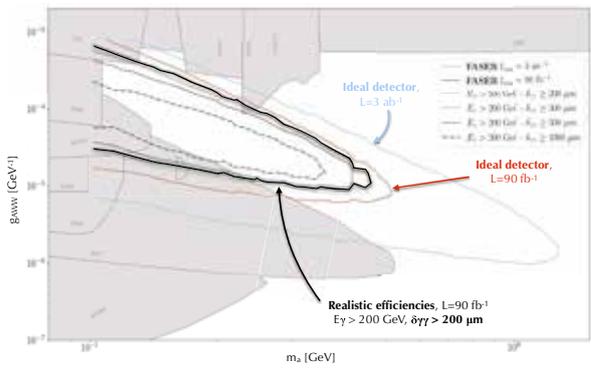


図 17: ALP 探索の将来感度 [16]。Run 3 (90 fb $^{-1}$) および HL-LHC (3 ab $^{-1}$) のデータに対して, 100%の光子対再構成効率を持つ理想的な検出器の感度を示している。また, $E_\gamma > 200$ GeV の光子に対して, 光子対の分離能力 δ_γ による感度の変化を示している (90 fb $^{-1}$)。

2023 年 8 月と 2024 年 7 月には, エマルジョン検出器の性能評価のため, ビーム試験を CERN-SPS にて行った。この試験では, 電子ビーム, ミューオンビーム, そしてハドロンビームを照射し, エマルジョン解析におけるミューオン運動量推定および電子シャワーエネルギー推定の精度評価のためのデータを取得した。これらのデータを解析して, 解析手法の精度評価を行なっている。

加えて, バックグラウンドミューオンの解析も行っている。FASER 実験で測定されるミューオンは解析の主要なバックグラウンドの一つであるとともに, ニュートリノと同時に生成する, ハドロン崩壊由来の成分も含まれている。そのため, ミューオンの分布の理解は, 他の解析の向上につながる。図 18 は, FASER ν 検出器で測定されたバックグラウンドミューオンの x 方向の角度分布である。これまでの測定では, 角度分布に複数のピーク構造があることがわかっている。今後これらの分布の詳しい解析を行う。

FASER 実験では, 新粒子探索と TeV 領域のニュートリノ研究の両面で更なる解析を進めていく。今後の物理

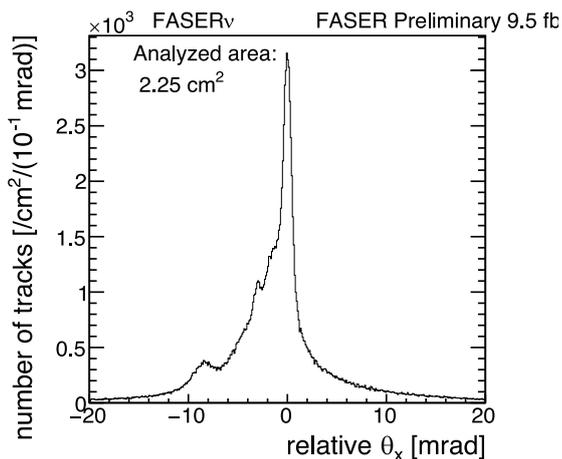


図 18: FASER ν 検出器で測定されたバックグラウンド ミューオンの x 方向角度分布。横軸は 0 が角度分布の平均となるように相対値を示している。

成果にご期待を寄せていただきたい。また、さらに少し先の未来ではあるが、HL-LHC 時代に向けて次世代計画である Forward Physics Facility (FPF) という実験計画が議論されている [17]。FASER は現行のトンネルで使われていない箇所を再利用する形であったが、FPF 時代には新たな実験ホールを作り、FASER2 実験、FASER ν 2 実験などを開発し、2031 年の開始を目指している。そして、さらなる高感度での新粒子探索及び TeV 領域でのニュートリノ物理の精密測定、フレーバー物理の確立、そして LHC におけるビーム軸超前方というユニークな環境を活かしたの物理研究をさらに切り拓いていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 音野瑛俊, 田窪洋介, 高エネルギーニュース, Vol.38, No.3, 2019
- [2] H. Abreu *et al.* [FASER], JINST, **19**, no. 05, P05066, (2024) [arXiv:2207.11427 [hep-ex]]
- [3] J. L. Feng, I. Galon, F. Kling and S. Trojanowski, Phys. Rev. D, **97**, no. 3, 035001, (2018) [arXiv:1708.09389 [hep-ph]]
- [4] H. Abreu *et al.* [FASER], Eur. Phys. J. C, **80**, no. 1, 61, (2020) [arXiv:1908.02310 [hep-ex]]
- [5] H. Abreu *et al.* [FASER], LHCC-2019-017, LHCC-P-015 [arXiv:2001.03073 [hep-ex]]
- [6] J. L. Feng and J. Kumar, Phys. Rev. Lett., **101**, 231301, (2008) [arXiv:0803.4196 [hep-ph]]
- [7] H. Abreu *et al.* [FASER], Phys. Lett. B, **848**, 138378, (2024) [arXiv:2308.05587 [hep-ex]]
- [8] M. Bauer, M. Neuber and A. Thamm JHEP, **2017**, 44, (2017) [arXiv:1708.00443 [hep-ex]]
- [9] H. M. Abraham *et al.* [FASER], CERN-FASER-CONF-2024-001, (2024)
- [10] H. Abreu *et al.* [FASER], Phys. Rev. D, **110**, 012009, (2024) [arXiv:2402.13318 [hep-ex]]
- [11] H. Abreu *et al.* [FASER], Phys. Rev. D, **104**, 091101, (2021) [arXiv:2105.06197 [hep-ex]]
- [12] H. Abreu *et al.* [FASER], Phys. Rev. Lett., **131**, 031801, (2023) [arXiv:2303.14185 [hep-ex]]
- [13] H. M. Abraham *et al.* [FASER], Phys. Rev. Lett., **133**, 021802, (2024) [arXiv:2403.12520 [hep-ex]]
- [14] A. Ariga, T. Ariga, G. De Lellis, A. Ereditato and K. Niwa, part of Particle Physics Reference Library **2** Detectors for Particles and Radiation, 383-438, Springer, (2020). ISBN (print) 978-3-030-35317-9, ISBN (online) 978-3-030-35318-6
- [15] H. Rokujo *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A, **1066**, 169622, (2024)
- [16] H. Abreu *et al.* [FASER], CERN-LHCC-2022-006, LHCC-P-023, (2022)
- [17] J. L. Feng, *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., **50**, 030501, (2023) [arXiv:2203.05090 [hep-ex]]