

■ 研究紹介

CERN SPS を用いたタウニュートリノ測定と新物理探索： SHiP 計画 + DsTau/NA65 実験

^aUniversity of Bern, ^b九州大学, ^c名古屋大学, ^d岐阜大学

有賀 昭貴^a, 有賀 智子^b, 小松 雅宏^c, 佐藤 修^c, 吉本 雅浩^d

akitaka.ariga@lhep.unibe.ch, tomoko.ariga@cern.ch, komatsu@flab.phys.nagoya-u.ac.jp,

sato@flab.phys.nagoya-u.ac.jp, yohim@gifu-u.ac.jp

2020 年(令和 2 年)2 月

1 物理背景

著者らは, CERN の Super Proton Synchrotron (SPS) を用いて, 以下 1.1-1.3 で述べる物理を追求している。そこでは日本の得意とする技術が生きている。

1.1 タウニュートリノ散乱におけるレプトン普遍性の検証

タウニュートリノは 3 世代あるニュートリノの中でも第 3 世代に位置する。その生成と検出は困難であったが, 近年ようやくその検出技術が確立しつつある。これまでに DONuT, OPERA, Super-K, IceCube 実験がタウニュートリノの観測を報告している。この中でもニュートリノ振動を介さない直接的な測定は DONuT 実験だけである。それぞれの測定結果は不定性が大きく, タウニュートリノに関してはその基本的な性質について実験的に理解されていない。図 1 に現在得られているニュートリノ反応断面積を示す。ミューニュートリノに関しては 2% 程度と精度よく測られている。他方, タウニュートリノに関しては 50% 以上の不定性がついている。これがニュートリノ散乱におけるレプトン普遍性検証の限界を決めている。

レプトン普遍性はこれまでの半世紀にわたる様々な実験において実証してきた。今では素粒子標準理論における “sacred principle” (聖なる原理) として受け入れられている。現に図 1 の結果は測定精度の範囲内で普遍性が成り立っているとも言える。レプトン普遍性を信じるならばタウニュートリノはただただ他の 2 世代と同じ性質であり, 目新しい物理はないのかもしれない。しかし歴史上ニュートリノは常に我々を驚かす性質を示してきた。人類がようやく獲得したタウニュートリノ検出の技術を武器にして第 3 世代のレプトンに新しい物理の可

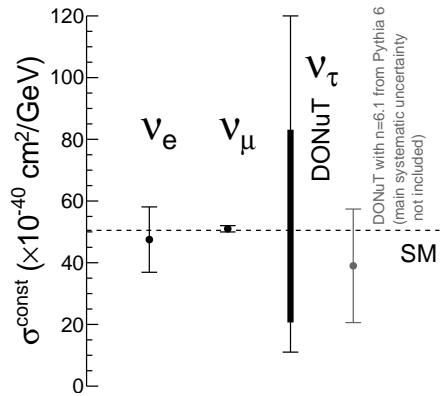


図 1: 3 世代のニュートリノの $\nu, \bar{\nu}$ 平均深非弾性散乱反応断面積 [1]。横破線が標準理論から予測される値。

能性を探すのは心が躍る試みである。

折しも近年複数のコライダー実験によって「第 3 世代の粒子が関わる過程ではレプトン普遍性が破れているかもしれない」という実験結果が報告されてきている。例えば b クォークを含む粒子のセミレプトニック崩壊においてはタウへ崩壊する確率とミューオンへ崩壊する確率の比, $R(D^{(*)}) = \frac{\Gamma(B \rightarrow D^{(*)}\tau\bar{\nu}_\tau)}{\Gamma(B \rightarrow D^{(*)}l\bar{\nu}_l)}$, が理論予想より多いことが報告されている [2] (BaBar, Belle, LHCb の結果より, 2019 年時点での 3.1σ の有意性)。同様の兆候が $b \rightarrow sll$ ($B^0 \rightarrow K^{*0}ll$, $B^+ \rightarrow K^+ll$) 等からも示唆されている。これらのセミレプトニック崩壊は tree-level での過程であり世代間の違いはレプトン質量だけとなるため, それぞれの崩壊確率の比は正確に計算できる。これらの実験結果は標準理論では説明がつかず, “Flavor anomalies” と呼ばれるようになっている。このアノマリーに対して新物理の存在が活発に議論され, また実験的有意性の確立・否定に向けて多方面から努力がなされている。

これまでの報告は粒子の崩壊を用いた実験からのみで

あった。もし高い世代のレプトンへ選択的にカップルする新粒子が存在するならば逆過程であるニュートリノ散乱においてもレプトン普遍性を破る現象が見て然るべきである。それはニュートリノ反応断面積が世代間で異なることを意味し、図1中で横破線からずれることになる。しかし、現在の測定精度ではニュートリノ散乱においてレプトン普遍性を精査することは難しい。

上記を踏まえ、著者らは CERN の SPS からの 400 GeV 陽子ビームを用いてタウニュートリノ生成を研究する実験 (DsTau) とタウニュートリノの大統計検出を行う実験 (SHiP ニュートリノプログラム) を立案した。図1中に示されている DONuT 実験によるタウニュートリノ測定ではニュートリノ生成による系統誤差 ($>50\%$) と小統計の検出数 (9 例) による統計誤差 (33%) の両誤差が要因となり非常に大きな不定性がついている。よって高い精度の測定を実現するにはタウニュートリノの生成・検出の両者の精度向上が必要となる。図2にタウニュートリノ測定のための実験セットアップの概念図を載せる。タウニュートリノを人工的に生成するには、高エネルギー陽子を標的に当て、 D_s 中間子 ($c\bar{s}$ または $\bar{c}s$) を生成し、そこからの連鎖崩壊 $D_s \rightarrow \tau\nu_\tau$, $\tau \rightarrow \nu_\tau X$ を利用する。この方法は DONuT 実験でも採用された。生成による主な不定性は D_s の微分生成断面積である。特に陽子反応において D_s の縦方向運動量依存性についての測定がこれまでに報告されていない。微分生成断面積はタウニュートリノ検出器を横切るニュートリノ数 (フラックス) を決定するため、精度よく知る必要がある。これを DsTau 実験が担当し、タウニュートリノ測定の系統誤差を 10%程度にまで抑える。他方で、SHiP 実験は約 10,000 事象のタウニュートリノ反応を蓄積し、統計誤差を 2%にまで小さくする計画である。

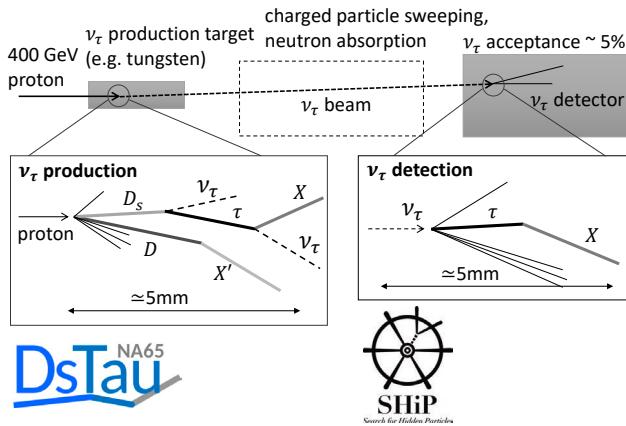


図2: タウニュートリノ測定のための実験レイアウト。

2つの実験を経てタウニュートリノ反応断面積を 10% 以下の精度で知ることには非常に価値があると考える。また基礎的興味以上に、ここで得られる 10–150 GeV 領域でのニュートリノ反応断面積は Super-K や Hyper-K

でのニュートリノ振動研究などへの実用的なデータを提供する。

1.2 Hidden Sector サーチ

LHC に代表されるエネルギーフロンティアにおける新物理探索においては未だに兆候が見られない中で、もう一つの方向性であるインテンシティフロンティア、要するにカップリングコンスタントの極めて小さな方向に新物理の探索領域を広げていくことが必要である。SHiP (Search for Hidden Particle) 実験は、CERN SPS による Beam Dump Facility (BDF) において、主に charm · beauty 粒子の崩壊において生成される hidden sector particle の可能な限り多くの崩壊モードを捉える Hidden Sector (HS) decay spectrometer と、ニュートリノおよび Light Dark Matter (LDM) の物質との相互作用を通して検出するための Scattering and Neutrino Detector(SND) とで構成される。図3に実験装置の概要を示す。

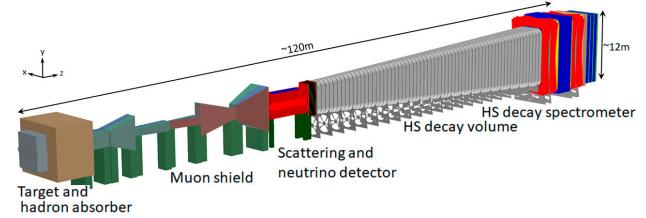


図3: SHiP 実験装置: 左からターゲットとそれを囲む磁化されたハドロンアブソーバー、マグネットで構成されたミューオンを sweep する為の Active Muon shield、中央辺りに Scattering and Neutrino Detector、その後方に sweep したミューオンを避けるためのピラミッド型の真空の decay volume、その後方に HS decay spectrometer を持つ全長約 120 m の実験装置となる。

現時点では SHiP 以外にも複数の長寿命粒子の探索を目的とした実験計画が議論されているが、SHiP 実験は charm · beauty 粒子の質量以下の領域において非常に大きな探索領域を持つ。特に Hidden particle の model independent なサーチを行うために、可能な限り多くの崩壊モードを particle ID も含めて検出するための装置を有する。多くの崩壊モードを捉える事により、Heavy Neutral Lepton (HNL) をはじめ、dark photon, dark scalar, axion-like particles 等に対して感度を持つ。図4に HNL に対する感度を示す。他のモードに関しては別紙 [3, 4] を参照されたい。

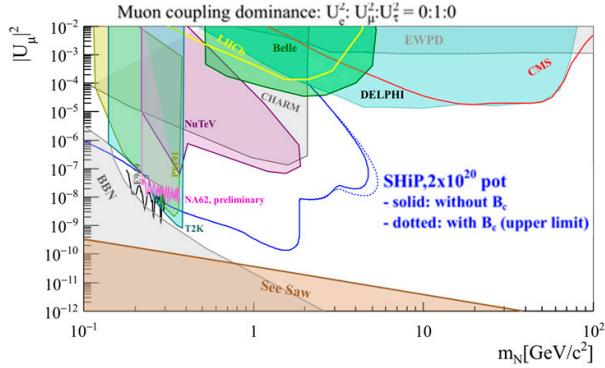


図 4: SHiP の Heavy Neutral Lepton に対する感度

1.3 Charm Production, Intrinsic Charm, Prompt Neutrino Study

チャーム粒子は、本研究のエネルギー領域では、ハドロン反応の際に 1000 反応に一対程度の割合で生成される。固定標的の場合、前方方向に 2 次粒子が集中するため、超前方方向においては飛跡分離の困難さから探し尽くされてはいない。この領域を研究することでいくつかの興味深い物理に迫ることができる。例えば、核子は価クォーク 3 個とグルーオン（ハドロン反応の際は海クォークとして見える）でできている。価クォークは u または d クォークである。ところがチャームクォークが核子内で価クォークのように振舞っている可能性 (intrinsic charm) が議論されている [5, 6]。また、大気ニュートリノは一次宇宙線（主に陽子）が大気上空で空気分子の原子核と衝突・ハドロン反応の生成 2 次粒子がレプトニック崩壊する際に放出される。エネルギーの低い大気ニュートリノの源は主に π 中間子そして K 中間子である。エネルギーが高くなると π や K 中間子は崩壊する前に空気の原子核に衝突するため短寿命のチャーム粒子が高エネルギーニュートリノの源になる。高エネルギーの大気ニュートリノ成分の理解は宇宙ニュートリノとの弁別の際に重要である。特に一次宇宙線に対して超前方のチャーム生成の理解が必要である。

DsTau 実験では高エネルギー陽子とタングステン標的のハドロン反応約 2×10^8 事象を原子核乾板トラッカーで記録する。サブミクロンの位置分解と広い角度アクセプタンスを生かし、超前方からビーム後方までハドロン反応で生じたチャーム粒子を探索・解析する。約 2×10^8 事象のハドロン反応から数 10 万事象のチャーム粒子生成事象を見込んでおり、チャーム粒子生成断面積やチャーム対のチャーム粒子間相関の解析を行い、上記の超前方でのチャーム粒子生成も研究する。また、議論になっている intrinsic charm 状態が存在するのであればビーム陽子の中の charm 価クォーク様チャームと標的核子の中の価クォーク様チャームが考えられる。実験的には前者

は反応の超前方、後者は標的原子核の静止系でのチャーム粒子となって観測される。原子核乾板トラッカーの高位置分解と広アクセプタンスにより両者の生成率の測定を考えている。

2 DsTau・SHiP 実験の現状

著者らは、DsTau/NA65 実験の Spokesperson, Deputy Spokesperson, Physics Coordinator として本研究を国際共同研究（5ヶ国 9 研究機関）にて推進している。これまでの経緯としては、CERN-SPS の 400 GeV 陽子ビームを用いて DsTau 実験を行うことを立案し、2016 年 2 月に CERN SPS/PS 実験審査委員会 (SPSC) に letter of intent を提出した [7]。2016/2017 年にビームテストを実施し、実験プロポーザル [8] を執筆して 2017 年 8 月に SPSC に提出した。2018 年 1 月の SPSC による審査にて、2018 年パイロットランの承認と 2021 年のビームタイム確保の推奨を受け、2018 年 8 月に今後の物理ランの 1/10 に相当する検出器を用いてパイロットランを実施した。解析状況を SPSC に報告し、2019 年 6 月、CERN Research Board により DsTau 実験は NA65 として正式承認され、2021/2022 年の物理ランが認められた。現在は、パイロットランの解析および物理ランの準備に取り組んでいる。

SHiP 実験計画は 2015 年 4 月に SPSC に Technical Proposal [9] を提出し、同時に SHiP において期待できる物理をまとめた review article [3] も合わせて提出した。2015 年のプロポーザル時点では約 170 名、45 機関、14 カ国であったが、2019 年末には約 250 名、57 機関、18 カ国にまで増えている。このプロポーザルは SPSC によるレビューを受け、2016 年には SPSC から 3 年間の Comprehensive Design Study (CDS) 期間を与えられ、加えて CERN が組織した Physics Beyond Collider forum (PBC) の R&D プロジェクトに BDF とともに正式に加えられた上に、European Particle Physics Strategy Update (EPPSU) にプロポーザルを出すように PBC に推奨された。Comprehensive Design Study の結果は EPPSU へのプロポーザルとして SHiP 実験 [10] と BDF [11] 共に 2019 年 1 月に提出した。SHiP/BDF 併せて 2019 年 5 月のグラナダでの Open EPPSU Symposium にて集中的に議論され非常にポジティブに受け入れられた。そして、2019 年 12 月に Comprehensive Design Study (CDS) report [12] を SPSC に提出した。2020 年に Technical Design Report (TDR) への承認が出れば、2023 年までに TDR を準備する運びとなる。これにより建設へのアプルーバルが出れば 5 年から 6 年の準備期間を経て、早ければ 2028 年にデータテイキングが始まる見込みである。

3 DsTau/NA65 実験

3.1 検出器

DsTau/NA65 実験は、400 GeV 陽子ビームとタンゲステン標的との反応の際のタウニュートリノ生成を測定する。400 GeV 陽子がタンゲステン原子核と反応すると 10 から 20 本の荷電粒子、同程度の中性粒子が生成される。このうちタウニュートリノの源になるのはチャーム中間子の一種の D_s 中間子である。 $D_s^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau$ そして $\tau^- \rightarrow X \nu_\tau$ の崩壊連鎖によりタウニュートリノが生成される。 D_s 中間子の生成率を D_s 中間子のエネルギーの関数として測定すればタウニュートリノフラック分布を精度よく計算できる。

DsTau/NA65 実験では、この崩壊連鎖を同定し、 D_s 中間子のエネルギーを測定するために原子核乾板を用いる。 $D_s^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau$ そして $\tau^- \rightarrow X \nu_\tau$ の崩壊連鎖を検出器で見ると、第 1 崩壊で飛跡が折れ曲がり（キンクと呼ぶ）、第 2 崩壊でまた飛跡が折れ曲がったように見える。それぞれの崩壊までの D_s 中間子、 τ 粒子は数 mm の飛程である。データにおいて、一次反応点から数 mm の中に折れ曲がりが 2 回あるものを探索する。特に $D_s^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau$ の崩壊では D_s と τ の質量差が小さいため角度差は平均 7 mrad と小さい。数 mm の距離で mrad 程度の角度差を検出・測定するために、ナノ精度の位置精度を持つ原子核乾板を図 5 のように配置し、タンゲステン反応の中から連続キンク事象を選別・詳細解析を行う。 D_s 中間子のエネルギーは崩壊連鎖の D_s 粒子の飛程、 $D_s \rightarrow \tau$ 崩壊角、 τ の飛程、 $\tau \rightarrow X$ での崩壊角の 4 変数を用いて推定する。 D_s のエネルギーが高い（低い）ほど飛程は長く（短く）崩壊角は小さく（大きく）なる特徴を利用する。検出器の位置角度精度を含めたシミュレーションデータによる 4 変数の機械学習により、約 20% のエネルギー推定精度を見込んでいる [1]。

ビーム陽子を原子核乾板トラッカーの全面積 ($12.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) に均等の密度で照射するため、原子核乾板トラッカーは x-y ステージに搭載しビームスピル毎に x 方向に動かす（図 6）。実際には、約 4 秒間のスピル内でビーム強度が大きくふらつく。これをビームカウンターと同期することでスピルの間の移動速度をダイナミックに調整することで照射密度揺らぎを 10% 以下にしている。約 2×10^8 反応を蓄積するため約 400 モジュールの原子核乾板トラッカーに陽子ビームを照射する。

3.2 2018 年パイロットラン

著者らは 2018 年に全体の 1/10 スケールのパイロットランを行った。その目的は実験の大型化に向けてのス

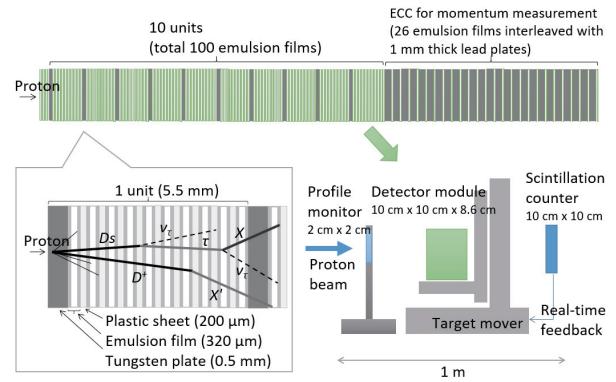


図 5: DsTau/NA65 実験の検出器構造

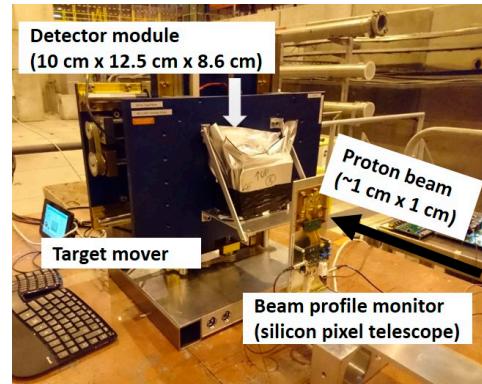


図 6: DsTau/NA65 実験の照射セットアップ

テップを踏むことと、大統計陽子反応解析の確立と得られた結果を過去の DONuT 実験のケースに適応することにより 2021 年を待たずしてタウニュートリノ反応断面積の精度を上げることである。2018 年春より 55 m^2 の原子核乾板/エマルションフィルムを名古屋大とベルン大にて計 3 カ月をかけて生産した。8 月には CERN にて検出器モジュールの組み立てを行い、SPS-H2 ビームラインにて、 3.5×10^8 の 400 GeV 陽子を延べ 30 モジュールに照射した。この照射キャンペーンには 4 か国 11 名の研究者が参加した（図 7）。

エマルションフィルムの読み取りは、名古屋大学で稼

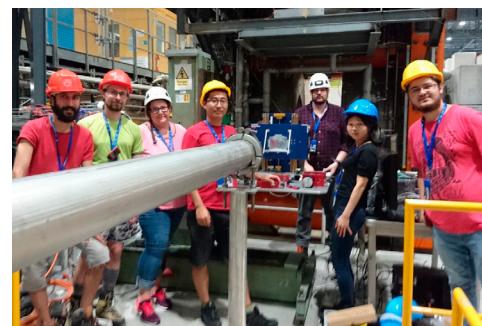


図 7: DsTau パイロットランチームの一部、SPS-H2 ビームラインにて。

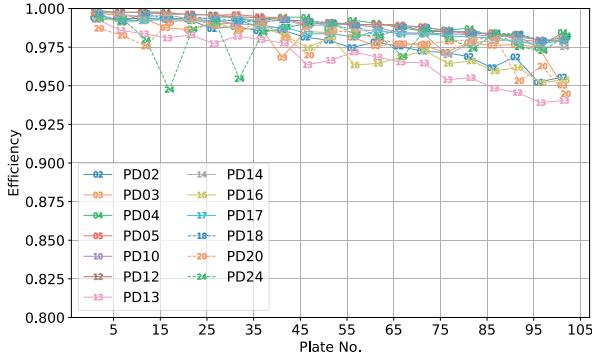


図 8: 各フィルムでの飛跡の検出効率。番号が小さい側が上流。

働く中の超高速飛跡読み取り装置 HTS で遂行している。HTS の飛跡 1 本あたりの角度精度は 2.5 mrad であり、タングステン中の反応や、 τ の崩壊事象を同定するには十分な精度である。

2018 年パイロットランの 30 モジュールの読み取りは 2019 年末時点で約 90% を完了した。読み取った飛跡集団の位置と角度の情報から、フィルムごとの飛跡を接続・再構成し、フィルム 1 枚毎の飛跡の有無を調査することで、フィルムと読み取りの評価を行った。飛跡再構成と評価が完了した 13 モジュール分の、各フィルムごとの飛跡の検出効率の結果を図 8 に示す。検出効率は、評価したいフィルムの上流 1 枚と下流 2 枚で接続できた飛跡に対し、そのフィルムで飛跡が確認された割合である。 $\tan\theta < 0.1$ の角度空間において、2 次粒子により飛跡密度が高くなり飛跡再構成の条件が悪くなる下流フィルムでも、95%以上の検出効率を達した。ビーム下流フィルムにおける飛跡密度は $5 \times 10^5 / \text{cm}^2$ と、HTS がこれまで対象としてきた飛跡密度よりも 1 衍多いが、実験遂行に十分な検出効率を達成できた。一部のフィルムで検出効率の低下が見られるが、原因は読み取りではなくフィルムの品質に依るものであり、今後の物理ランで良質なフィルムを製造・ハンドリングすることで改善可能である。

著者らは、これまでのニュートリノ実験 CHORUS・DONuT・OPERA において短寿命粒子の崩壊探索を主導した経験を生かし、陽子反応を再構成してチャーム/タウ粒子の崩壊トポロジーを選び出す自動解析スキームの構築に取り組んできた。手順としては、複数枚のエマルションフィルムを通して再構成された飛跡を用いて陽子反応点を組み、その中でチャーム/タウ粒子の崩壊を含む事象を探索する。この探索では、荷電粒子の崩壊候補と、そのペアとなる荷電/中性チャーム粒子の崩壊候補を含む事象を選び出す。詳細な条件については [13] で述べている。これまでにサブサンプルとして、400 GeV 陽子反応 76151 事象の解析を行い、チャーム/タウ粒子

の崩壊を含む候補 86 事象を検出した。検出数については期待値との矛盾はないことを確認し、角度分布などの詳細解析を行っている。検出した事象の一例を図 9 に示す。さらに、それらの事象における荷電チャーム/タウ候補について、微小な折れ曲がりの有無を調べることにより、 D_s 中間子のタウ粒子への崩壊を探索する。数 mrad という微小な折れ曲がりを特徴とする D_s 中間子の崩壊を検出するにはナノ精度での飛跡の測定が必要であり、そのための精密測定システムをベルン大学にて開発している。

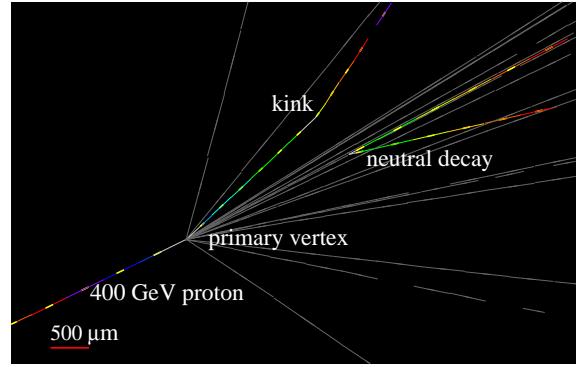


図 9: 荷電 1-prong トポロジー (kink, チャーム/タウ候補) と中性 2-prong トポロジーを持つ崩壊候補 (斜めから見た描像) [1]。

3.3 物理ランに向けて

2021-2022 年の物理ランでは、陽子反応 2×10^8 事象 (従来のエマルジョン実験に対して 2 桁以上多い解析事象数) の解析を遂行する。陽子反応で生成される D_s 中間子のタウ粒子への崩壊が約 1000 事象検出されると見積もっている。 D_s 中間子は短寿命で崩壊することからその運動量を直接測定することは難しいため、崩壊角などの幾何学的情報を組み合わせて推定する手法を構築してきた [1]。その手法を用いて、400 GeV 陽子反応における D_s 中間子の微分生成断面積を測定する。このデータは SHiP などの将来計画におけるタウニュートリノフラックスの見積もりに直接貢献するだろう。 D_s 中間子の微分生成断面積を $d^2\sigma/dx_F/dp_T^2 \propto (1 - |x_F|)^n \cdot e^{-b \cdot p_T^2}$ という現象論的な式でフィットするとして、データからパラメータ n および b を推定することができる。タウニュートリノ検出においてフラックスはパラメータ n に大きく依存するが、 D_s 中間子に対するパラメータ n の値は陽子ビームを用いた固定標的実験では測定されていない。図 10 は、 D_s 中間子のタウ粒子への崩壊事象の検出数とその場合に期待されるパラメータ n の精度を示している。この図から、 D_s 中間子のタウ粒子への崩壊を約 1000 事象を用いることにより、タウニュートリ

ノビーム生成の不定性を現在の 50%相当から 10%以下に抑えることができる。このデータをもとに、将来的にタウニュートリノ反応における新物理の効果を探索することを可能にしたい。

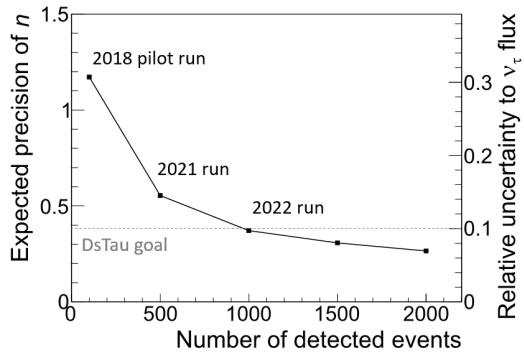


図 10: D_s 中間子のタウ粒子への崩壊事象の検出数と、その場合に期待されるパラメータ n の精度 (δn) の関係 [1]。右側の y 軸は、タウニュートリノフラックスの不定性への対応を示している。 $n = 5.8$ の場合に対して計算を行った。

4 SHiP 計画における ν_T 測定

SHiP 実験を行うビームダンプ (BDF) は最も強力なタウニュートリノ源である。名古屋大学・愛知教育大学・神戸大学・日本大学・東邦大学の日本グループはニュートリノ振動によるタウニュートリノの appearance を実証した OPERA 実験 [14] を遂行したグループであり、DONuT 実験、OPERA 実験で培ってきた原子核乾板技術を用いて、Scattering and Neutrino Detector (SND) でのタウニュートリノの断面積測定や Lepton Universality の検証および Light Dark Matter (LDM) の検出に挑む。

4.1 BDF+検出器

BDFは、図11に示すようにCERNのNorth Areaに新たに建設する予定である。既存のNorth Areaの施設との共存を考慮して新たなスプリッターを加える。

BDF は、SPS の 400 GeV 陽子を 1 秒の slow extraction でターゲットにダンプする。7.2 秒の SPS サイクルタイムでの平均ビームパワーは 355 kW であるが、1 秒の extraction time 内でのパワーは 2.65 MW に達する。本来ビームダンプターゲットとしてはタングステンのように高密度の物質が最適であるが、純タングステンのターゲットでは熱膨張によるストレスに耐えられない。このためターゲットとしては最も熱ストレスの大きくな

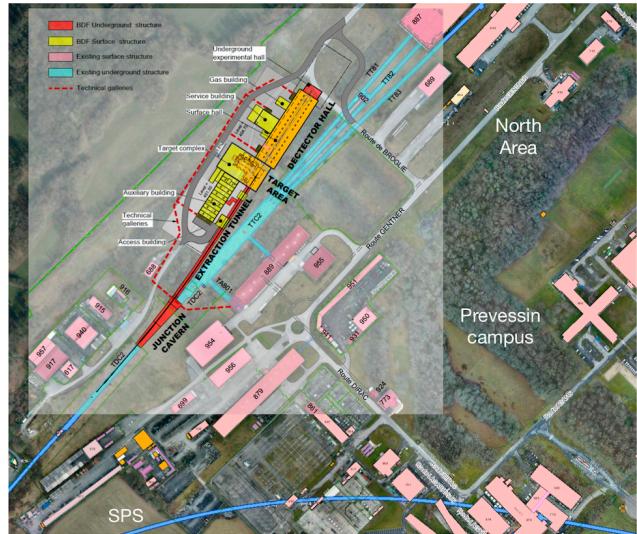


図 11: BDF の建設予定場所: CERN North Area

る前方部分はチタン・ジルコニウムを混ぜたモリブデン合金(TZM)を使い、下流側にはタンクステンを用いる。

BDF にはビームエクストラクション, トランスポート, ターゲット, サービスビルディング, 実験ホール, 実験ホール後方のミューオンシールドも含まれる。図 12 に実験ホールを含めた BDF の施設を示す。

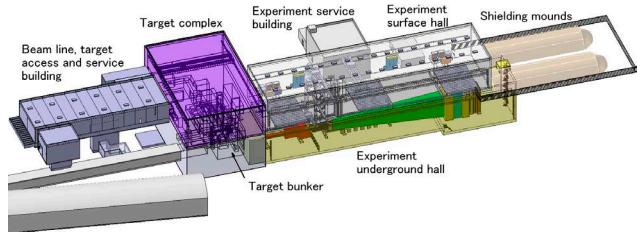


図 12: BDF の target complex と実験ホール

SHiP の検出器は図 12 の実験ホールにインストールされる。実験装置の全体像は図 3 に示した通りである。ここでは紙面の都合もあり、タウニュートリノの検出を担う SND についてのみ詳しく紹介する。SND は OPERA 実験の Emulsion Cloud Chamber (ECC) と同様の ECC を主検出器とし、プロポーザル段階では OPERA 実験と同様の鉛プレートと原子核乾板を積層した ECC を検討していたが、平面性を保つ強度とさらには密度を考慮してタンクスチレン合金のプレートを用いる。ECC モジュールのサイズは $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ で 35 枚の原子核乾板で 35 枚のタンクスチレンプレートを交互に挟み $10X_0$ の厚さをもつ。この ECC の下流に原子核乾板 3 枚を 15 mm の間隔で配置し構成した Compact Emulsion Spectrometer (CES) と、原子核乾板中のニュートリノ反応と後方の muon filter 等と対応させるための Target Tracker (TT) で wall を構成する。一つの wall には 2×2 の ECC と CES を持ち、SND は全体で 19 wall で構成される。総

ターゲット質量は約 8 トンである。トラックの蓄積を抑える為に半年毎にフィルムを交換する。CES はタウニュートリノの荷電カレント反応によって生成されるタウ粒子が崩壊した娘粒子の運動量と電荷を決定することを目的とする。

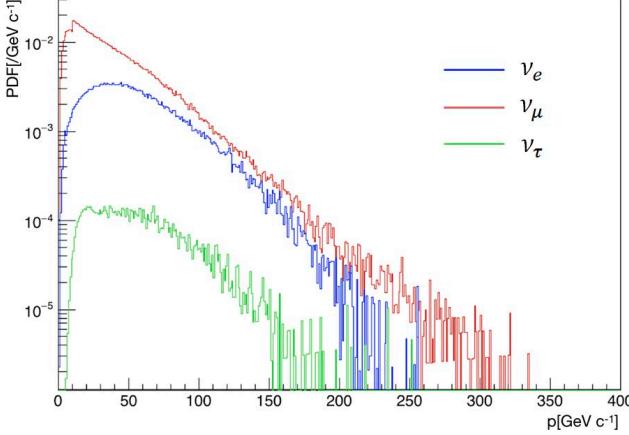


図 13: SND の場所で期待されるニュートリノのエネルギー分布 (多い方から interacted の ν_μ , ν_e , ν_τ)

ビームダンプで生成されるニュートリノビームは正反同数のニュートリノと電子, ミュー, タウ全ての種類を含んでおり, 正反区別して解析するためには電荷決定が不可欠である。図 13 に各ニュートリノ種別毎のエネルギー分布を示す。ニュートリノ実験においてミューオン以外の電荷決定は極めて難しいが, 原子核乾板のサブミクロンの位置分解能を生かして, わずか 30 mm の距離で 10 GeVまでのハドロンの電荷決定を行う。このために SND は図 14 に示す 1.2 T のダイポールマグネットの中に設置される。このマグネットはニュートリノ反応解析の際のミューオンスペクトロメータとしても機能する。この CES により, タウ粒子のハドロニック崩壊に対しても電荷決定が可能になり, 正反タウニュートリノを識別できる数はミューオンだけで正反を識別するのに比べて 3 倍以上に増やすことが可能となる。

4.2 期待される成果

SHiP 実験では BDF に 5 年間で 2×10^{20} PoT を予定している。この数字は OPERA 実験で用いた CERN Neutrino beam to GranSasso (CNGS) の実績 1.8×10^{20} PoT とほぼ同じであり十分現実的な数字である。期待されるニュートリノ反応数とその平均エネルギーを表 1 に示す。

この反応数に反応の検出効率, 電荷識別効率を勘案して期待される正・反タウニュートリノ反応数はそれぞれ約 6000 反応と 5000 反応である。各崩壊モード毎の詳細を表 2 に示す。CES により hadronic decay の電荷を決定出来る事により正反タウニュートリノを識別できる

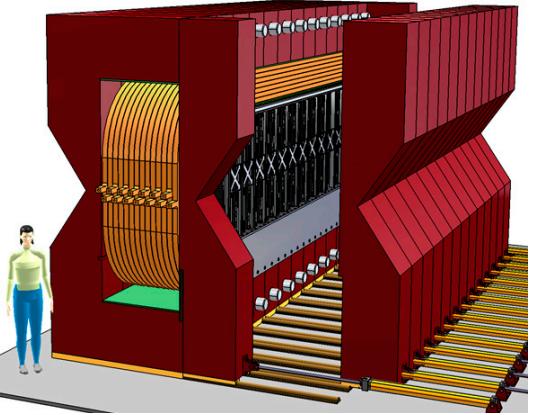


図 14: SND: SND は 1.2T のダイポールマグネットの中に配置される。

表 1: ニュートリノ種別ごとの荷電カレント DIS 反応数と平均エネルギー

	$\langle E \rangle$ [GeV]	CC DIS
N_{ν_e}	59	1.1×10^6
N_{ν_μ}	42	2.7×10^6
N_{ν_τ}	52	3.2×10^4
$N_{\bar{\nu}_e}$	46	2.6×10^5
$N_{\bar{\nu}_\mu}$	36	6.0×10^5
$N_{\bar{\nu}_\tau}$	70	2.1×10^4

反応数はミューオンの電荷決定だけに比べて大幅に向上去っている。タンクステンを標的とする SHiP の ECCにおいては $\tau \rightarrow e$ 崩壊における電子の電荷を決定することは電磁シャワーのせいで CES をもってしても困難である。

表 2: 崩壊モード毎の正・反タウニュートリノそれぞれの検出数期待値

Decay Mode	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$
$\tau \rightarrow \mu$	1200	1000
$\tau \rightarrow h$	4000	3000
$\tau \rightarrow 3h$	1000	700
Total	6200	4700

これらの 5000 反応を超える統計数により, 反応断面積の測定においても, 過去の DONuT 実験での 9 反応, OPERA 実験での 10 反応とは桁違いの統計精度を得られる。3 世代のニュートリノを大統計で測定することによりレプトン普遍性の検証を行う。しかしながら, 反応断面積のような絶対値の測定においてはタウニュートリノフラックスの不定性が全てを決定することになってし

まう。そのために DsTau/NA65 実験は SHiP におけるタウニュートリノの反応断面積測定にとって不可欠の前提実験となる。

もう一つの重要なテーマとしてはニュートリノ反応における重いクォークの生成が上げられる。この B anomaly がみられる崩壊 $B \rightarrow D\tau\nu_\tau$ のダイアグラムにおいて、ニュートリノを左辺に移動させればタウニュートリノ反応によるチャーム粒子生成と酷似しており、違いは b,d クォークだけである。高い世代のニュートリノが重いクォークにカップルする新物理があれば、Belle, BaBar, LHCb とは全く異なるアプローチでの検証が可能である。興味深いことにこのほど OPERA はタウニュートリノによるチャーム生成の初検出 ($\nu_\tau N \rightarrow \tau D^0 N'$) を報告した [15]。たった 1 例ではあるが期待をしていなかつたチャネル（期待値 0.1 事象）の検出であり、驚きを隠せない。これもまた高い世代に強く働く新物理の影響である可能性であり、SHiP での大統計の ν_τ を用いて明らかにすることを期待している。

この検証ではニュートリノによるチャーム生成比でレプトン普遍性が破られるという形で観測されるはずであり、 $R(D)$ と同様に $RR(c) = \frac{\nu_\tau N \rightarrow \tau c X}{\nu_\tau N \rightarrow \tau X} / \frac{\nu N \rightarrow l c X}{\nu N \rightarrow l X}$ のような double ratio をとることでフラックスの不定性にも強い検証が可能である。表 3 に、GENIE [16] によって期待される電子・ミュニュートリノ反応でのチャーム粒子生成と生成率を示す。

表 3: 荷電カレント DIS 反応数でのチャーム生成反応と生成率

$\langle E \rangle$ [GeV]	CC DIS with charm	Charm frac. [%]
N_{ν_e}	6.0×10^4	5.7
N_{ν_μ}	1.3×10^5	4.7
$N_{\bar{\nu}_e}$	1.3×10^4	5.1
$N_{\bar{\nu}_\mu}$	2.5×10^4	4.2
Total	2.3×10^5	

約 6000, 5000 の正反タウニュートリノ反応に対してそれぞれ 300 反応の charm 生成事象が期待される、B anomaly にみられるのと同程度の 15% を超える異常であれば十分に観測可能である。

新物理への糸口がどこで見つかるかわからない現状では一つ一つ可能性をつぶしていく地道な努力が必要である。著者らは DONuT, OPERA で培ってきた他には無いタウニュートリノの検出技術で新物理に挑んでいく。

5 最後に

CERN SPS における DsTau/NA65 実験および SHiP 計画を紹介した。タウニュートリノの物理、hidden sector サーチ、intrinsic charm study を含むチャームの研究などを、日本人グループが中心となって国際共同研究により推進している。DsTau/NA65 は 2021-2022 年に承認されている物理ラン、SHiP は 2020 年代後半から計画されている実験により、ユニークなデータを提供できると考えている。

6 謝辞

本研究は、DsTau Collaboration (本記事の著者らの他、中野敏行氏、六條宏紀氏、吉田純也氏、児玉康一氏、青木茂樹氏、中村光廣氏ら)、SHiP Collaboration によって遂行しており、SPS 加速器の方々、SPS Coordinator、名古屋大学グループら様々な方々に支えられている。

また、科研費 (17H02887, 18KK0085) の助成を受けている。

参考文献

- [1] S. Aoki et al. [DsTau Collaboration], DsTau: study of tau neutrino production with 400 GeV protons from the CERN-SPS. *J. High Energ. Phys.* 2020, 33 (2020).
- [2] Y.S. Amhis et al. [HFLAV Collaboration], Averages of b -hadron, c -hadron, and τ -lepton properties as of 2018. [[arXiv:1909.12524](#)].
- [3] S. Alekhin et al., A facility to Search for Hidden Particles at the CERN SPS: the SHiP physics case, *Rept. Prog. Phys.* **79** (2016), no. 12 124201. [[arXiv:1504.04855](#)].
- [4] J. Beacham et al., Physics Beyond Colliders at CERN: Beyond the Standard Model Working Group Report, 2019. [[arXiv:1901.09966](#)].
- [5] A.V. Giannini, V.P. Goncalves, and F.S. Navarra, Intrinsic charm contribution to the prompt atmospheric neutrino flux, *Physical Review D* 98 (2018) 014012.
- [6] Weidong Bai, Mary Hall Reno, Prompt neutrinos and intrinsic charm at SHiP, *J. High Energ. Phys.* (2019) 77.

- [7] S. Aoki, A. Ariga, T. Ariga, K. Kodama, M. Nakamura, O. Sato, Study of tau-neutrino production by measuring $D_s \rightarrow \tau$ events in 400 GeV proton interactions: Test of lepton universality in neutrino charged-current interactions, Letter of Intent to SPSC, CERN-SPSC-2016-013 ; SPSC-I-245.
- [8] S. Aoki et al. [DsTau Collaboration], Study of tau-neutrino production at the CERN-SPS, Experiment Proposal, CERN-SPSC-2017-029 ; SPSC-P-354.
- [9] M. Anelli et al. [SHiP Collaboration], A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS - Technical Proposal, 2015. [arXiv:1504.04956].
- [10] C. Ahdida et al. [SHiP Collaboration], The SHiP experiment at the SPS Beam Dump Facility - Comprehensive overview, submitted to EPPSU, 2018.
- [11] C. Ahdida et al., SPS Beam Dump Facility - Comprehensive overview, submitted to EPPSU, 2018.
- [12] C. Ahdida et al. [SHiP Collaboration], SHiP Experiment - Comprehensive Design Study report, CERN-SPSC-2019-049 ; SPSC-SR-263.
- [13] S. Aoki et al. [DsTau Collaboration], DsTau Status Report, CERN-SPSC-2019-013 ; SPSC-SR-250.
- [14] N. Agafonova et al. [OPERA Collaboration], Final Results of the OPERA Experiment on ν_τ Appearance in the CNGS Neutrino Beam, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) no.21,211801. Erratum: Phys. Rev. Lett. 121 (2018) no.13, 139901.
- [15] N. Agafonova et al. [OPERA Collaboration], First observation of a tau neutrino charged current interaction with charm production in the Opera experiment. [arXiv:1912.11012].
- [16] C. Andreopoulos et al., The GENIE Neutrino Monte Carlo Generator, Nucl. Instrum. Meth. A 614 (2010) 87.