

CERN Summer Student Programme 2024 参加報告

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士1年

篠田 遼太郎

shinoda@km.icrr.u-tokyo.ac.jp

2024年(令和6年)10月15日

1 はじめに

CERN Summer Student Programme は、毎年夏期の数ヶ月間にわたって、理学や工学を専攻する学生が世界中から CERN に集まり、講義や研究活動に参加するプログラムである。私は8週間本プログラムに参加し、CERN の SPS 加速器で将来的に行われる予定である SHiP (Search for Hidden Particles) 実験のチームに配属された。プロジェクトでは、電磁カロリメータからの情報を用いて信号とバックグラウンドを分離する方法をモンテカルロシミュレーションを元に考察した。

2 活動内容

2.1 講義・見学

本プログラムでは例年、7月上旬から8月上旬の約一ヶ月の間、summer student を対象とした講義が行われる。今年度の講義では、素粒子・原子核物理学から、宇宙論、加速器物理学、医療物理学、コンピュータサイエンスまで非常に幅広い分野について学ぶことができた。また、プログラム中には何度か施設見学の機会があった。私は ATLAS のコントロールルーム、anti-matter factory, synchrotron を見学することができた。

2.2 研究

2.2.1 SHiP 実験の概要

SHiP 実験は SPS 加速器の ECN3 cavern に建設が予定されている固定標的の実験である [1]。SHiP 実験の目的は大きく分けてふたつある。標準模型の粒子と弱いカップリングで相互作用する $\mathcal{O}(10)$ GeV 以下の hidden sector 粒子 (ダークフォトン, ダークスカラー, Heavy Neutral Lepton, axion-like particles, 超対称性粒子など) の探索と、 τ ニュートリノの精密測定である。SPS 加速器から

の 400 GeV の陽子ビームを用いて intensity frontier での測定を行う [2]。

2.2.2 研究の動機

SHiP 実験のシミュレーションにおけるジオメトリを図 1 に示す。チタニウム-ジルコニウム標的のすぐ下流にはバックグラウンド除去のため、hadron absorber と、ミューオンの軌道を曲げ検出器の検出領域から除去する muon shield がある。検出器は大きく分けてふたつの要素から構成される：

Hidden Sector (HS) Decay spectrometer

検出器全体の下流部に位置する。陽子と標的の衝突で生じた hidden sector 粒子は、検出器中ほどの decay volume で崩壊する。この際に生成される標準模型粒子を検出する。

Scattering and Neutrino Detector (SND)

検出器全体の上流に位置し、 τ ニュートリノ物理の研究を行う。

HS decay spectrometer 内では電磁カロリメータが粒子識別、タイミング情報の取得、荷電粒子と光子のエネルギーの測定を行う。SHiP 実験での主要なバックグラウンドは、ニュートリノ深非弾性散乱と宇宙線ミューオンを含むミューオン非弾性散乱である。これらのバックグラウンドは電磁カロリメータで観測され、信号として誤って再構成される恐れがある。そこで、事象再構成の際には適切なカットを設け、信号効率を最大化する必要がある。以下では、電磁カロリメータからの情報を用いて信号とバックグラウンドを分離するカットの基準をモンテカルロシミュレーションの結果を元に考察する。

2.2.3 手法

FairSHiP[4] は SHiP 実験におけるシミュレーションおよび事象再構成に用いられるソフトウェアである。FairSHiP は FairROOT[5] をベースとし、複数のモンテカル

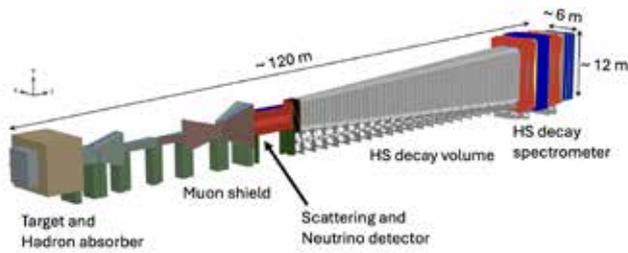


図 1: シミュレーションにおける SHiP 実験のジオメトリ ([3] より字の大きさのみ変更)。標的で生じた hidden sector 粒子は中央部の HS decay volume で崩壊し、崩壊後の粒子を下流の HS decay spectrometer で観測する。

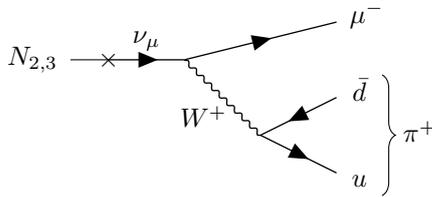


図 2: SHiP 実験で探索が予定されている, Heavy Neutral Lepton (HNL) の主要な崩壊モードのひとつ。終状態の粒子が共に電磁カロリメータで検出可能。

ロジェネレータ (GENIE (ニュートリノ反応の生成), PYTHIA8, PYTHIA6 など) により, 異なる反応を精密にシミュレーションすることが可能である。信号とバックグラウンドはシミュレーションで別々に生成される。電磁カロリメータに検出可能な粒子が入射すると, ECAL クラスタと呼ばれる入射位置と energy deposit を持つデジタル情報が生成される。各イベントは同一の親粒子を持つ ECAL クラスタから構成される。

2.2.4 結果

本研究では, 図 2 に示すような, Heavy Neutral Lepton (HNL) のベンチマーク信号 $N_{2,3} \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp$ に着目した。ここで, $N_{2,3}$ は第 2, 3 世代のステライルニュートリノである。この信号とニュートリノ深非弾性散乱によって生じる背景事象 (以下, ニュートリノ背景事象) のそれぞれについて, それぞれの ECAL クラスタの空間, エネルギー分布の違いを調べた。 2×10^{20} proton on target で, 数イベントのニュートリノ背景事象が decay volume 周辺に設置された veto システムなどで除去されずに残る。信号と背景事象のそれぞれについて, decay volume が真空の場合とヘリウムで満たされている場合についてシミュレーションを行った。これは真空度を引き下げた場合に, 背景事象がどの程度増加するかを調べるためである。以下の量に着目し比較を行った:

表 1: それぞれの条件について, 10000 イベント生成した場合に電磁カロリメータで再構成された事象数。真空およびヘリウムは decay volume の中身を表す。

事象	HNL	ニュートリノ
真空	3.8×10^3	0.6×10^3
ヘリウム	3.9×10^3	0.6×10^3

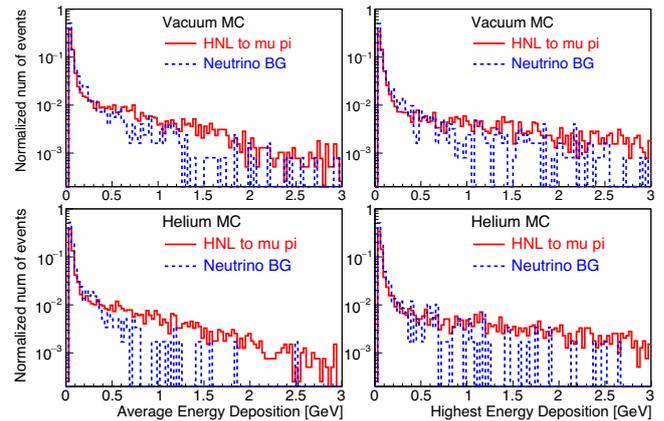


図 3: MC で生成された電磁カロリメータでのクラスターの energy deposition, 左列がイベントごとの平均値, 右列がイベントごとの最高値, 上段が decay volume が真空の場合, 下段がヘリウムの場合。実線が信号事象 ($N_{2,3} \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp$), 破線がニュートリノ背景事象を表す。縦軸の値は全イベント数で規格化している。

- イベントごとのクラスターの平均エネルギー
- イベントごとのクラスターの最高エネルギー
- イベントごとのクラスター数

事象再構成の結果を表 1 に示す。ニュートリノ背景事象の再構成数は誤って信号として再構成されたものの数を示している。図 3 にシミュレーションで生成した, 電磁カロリメータにおけるクラスターの energy deposition を示す。Decay volume が真空, ヘリウムの場合共にニュートリノ背景事象は信号事象に比べてよりエネルギーの低い領域に集中している。表 2 にイベントごとにクラスターの平均および最高エネルギーに応じて, 特定のエネルギー以上の事象を選択した場合の信号効率と背景事象除外効率を示す。

表 3 に 1 イベントに N 個のクラスターを持つ割合を示す。信号事象が二体崩壊であることを利用し, 真空, ヘリウムのどちらの場合でもクラスター数 1 個のみのイベントをカットすると, 信号効率は約 60% であり, ニュートリノ背景事象は約 80% 除外できる。

表 2: イベントごとのクラスターのエネルギーに着目して, 特定のエネルギー以上の事象を選択した場合の信号効率とニュートリノ背景事象除外効率。上段が decay volume が真空の場合, 下段がヘリウムの場合。

真空						
選択領域	≥ 0.3 GeV		≥ 0.5 GeV		≥ 1.0 GeV	
エネルギー	平均	最高	平均	最高	平均	最高
信号効率 (%)	33	38	27	34	14	25
BG 除外 (%)	84	80	89	88	95	90

ヘリウム						
選択領域	≥ 0.3 GeV		≥ 0.5 GeV		≥ 1.0 GeV	
エネルギー	平均	最高	平均	最高	平均	最高
信号効率 (%)	34	39	28	35	16	27
BG 除外 (%)	89	84	94	88	98	94

表 3: 1 イベントに N 個のクラスターを持つ割合。上は decay volume が真空の場合, 下はヘリウムの場合を表す。

真空				
クラスター数 (N)	1	2	3	≥ 4
HNL (%)	42	44	10	4
ニュートリノ (%)	78	9	5	8

ヘリウム				
クラスター数 (N)	1	2	3	≥ 4
HNL (%)	41	45	9	5
ニュートリノ (%)	80	9	4	7

2.2.5 結論

本プロジェクトでは FairSHiP ソフトウェアを用いて, SHiP 実験における HNL のベンチマーク信号 ($N_{2,3} \rightarrow \mu^{\pm}\pi^{\mp}$) とニュートリノ背景事象による電磁カロリメータの応答を評価した。イベントごとのクラスター数およびクラスターのエネルギーに着目し, それぞれの値に応じてカットを設けた場合の信号効率とニュートリノ背景事象の除外効率を求めた。今回の解析では, イベントの平均 (最高) エネルギーとクラスター数の相関については調べることができなかったが, その点を考慮することでより効率的なカット設定を行える可能性がある。

3 プログラム中の生活

滞在中はフランス側の St. Genis にあるホテルに宿泊し, CERN の Meyrin サイトで研究を行った。ホテルでは海外からの summer student (図 4) と仲良くなり, 互いの研究, 文化, 価値観などについて話した。



図 4: 友人と Léman 湖畔で

4 今後の抱負, プログラムに望むこと

私は今後, ハイパーカミオカンデ実験に参加するが, CERN で行われている加速器実験の最前線の一端を知ることができた経験を自分の研究に活かしていきたいと思う。本年度は日本から量子光学のバックグラウンドを持つ学生も参加しており, 交流を通じて刺激を受けることができた。今後のプログラムでも多様な分野から参加者を募ってほしいと感じた。

5 謝辞

プログラムに参加するにあたり, 多くの方にお世話になりました。推薦書を書いていただいた KEK の戸本誠教授, 京都大学の田島治教授に感謝申し上げます。University of Zurich の Iaroslava Bezshyiko 博士には supervisor として, 解析や考察について数々のアドバイスをいただきました。KEK 国際企画課の皆様には事務手続きなどについてお世話になりました。特に橋本様には到着後すぐコロナになってしまった際に大変お世話になりました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- [1] BDF Working Group, SHiP Collaboration, *BDF/SHiP at the ECN3 high-intensity beam facility*, CERN-SPSC-2022-032 (2022).
- [2] The SHiP Collaboration, *A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS. Technical Proposal*, CERN-SPSC-2015-016 (2015).
- [3] The SHiP Collaboration, *The SHiP experiment at the proposed CERN SPS Beam Dump Facility*, arXiv:2112.01487v2 (2022).
- [4] FairSHiP URL: <https://ship.web.cern.ch/FairShip>.
- [5] FairRoot URL: <https://fairroot.gsi.de>.