

CERN Summer Student Programme 2024 参加報告

東京科学大学 理学院 物理学系 物理学コース 修士1年

丸谷 晏大

maruya@hep.phys.titech.ac.jp

2024年(令和6年)9月10日

1 はじめに

CERN Summer Student Programme は全世界の理工系を専攻する学生が欧州原子核研究機構 (CERN) に滞在し、講義の聴講や指導教員のもとでの研究を行うプログラムである。私は2024年6月17日から8月9日までの8週間、KEK IINAS-NX 支援のもと参加し、FASER 実験にかかわる研究を行った。以下では、感想を含めて、活動内容を報告する。

2 活動内容

2.1 講義

講義は7月の初旬から5週間にわたって行われた。講義は素粒子実験を専門としない学生も対象とし、素粒子理論、実験の基礎から応用まで幅広い内容が扱われた。非常に興味深い講義が多く、有意義であった。

2.2 施設見学

プログラムの一部として、ATLAS Control Room, Synchrotron, Antimatter Factory, Data Center を見学することができた。また、個別にLINAC2/LEIR もガイド同伴で見学することができた。稼働中の加速器や過去に稼働していた加速器施設を見学することができる機会はモチベーションの向上につながった。

2.3 研究

2.3.1 FASER (ForwArd Search ExpeRiment)

FASER 実験 [1] は Large Hadron Collider (LHC) における陽子陽子衝突によって超前方に放出される粒子を検出することを目的にした実験である。FASER 実験の物理目標は大きく二つに分けることができる。

1つ目は弱くしか相互作用をしない軽い長寿命粒子の探索である。陽子陽子衝突から生ずる可能性のある長寿命粒子のうち、質量が重い粒子はビーム軸に対して横方向に放出される。そのような粒子は高背景事象のなか、強く相互作用することを前提に ATLAS, CMS や LHCb 実験などで探索されている。ただ、軽い長寿命粒子はほぼビーム軸に沿った方向に放出されるため、これまでは探索されてこなかった。FASER 実験はこの軽い長寿命粒子を探索目標とし、図1のように検出器を LHC の衝突点からビーム軸の延長線上 480 m に設置している。そのようにすることによって、高エネルギーのミューオンとニュートリノを除く背景粒子は強く抑制され、低背景の状況で軽い長寿命粒子を探索できている [2, 3]。

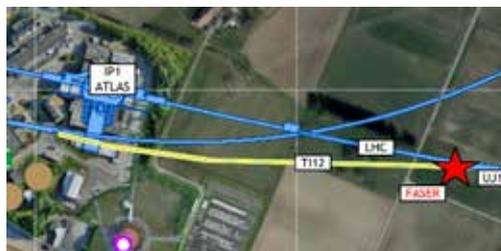


図1: FASER 検出器の位置

2つ目は陽子陽子衝突から放出される高エネルギーのニュートリノを観測することである。その目的は大きく分けて2つある。1つ目はニュートリノ反応におけるレプトン普遍性を検証することである。検証は $O(1)$ TeV のニュートリノにおける反応断面積を測定することで行われる。2つ目は陽子陽子衝突の強い相互作用で生成したハドロンが崩壊することによって生じるニュートリノのフラックスを測定することである。陽子陽子衝突におけるニュートリノのフラックスの理論予想は、強い相互作用の未知な部分によりモデルごとで大きなブレを持っている。そのため、フラックスを測定することは、適切なモデルの決定および、強い相互作用の理解につながる。図2は FASER 検出器の模式図である。FASER 検出器は時間分解能を持たない原子核乾板検出器 (FASER ν)

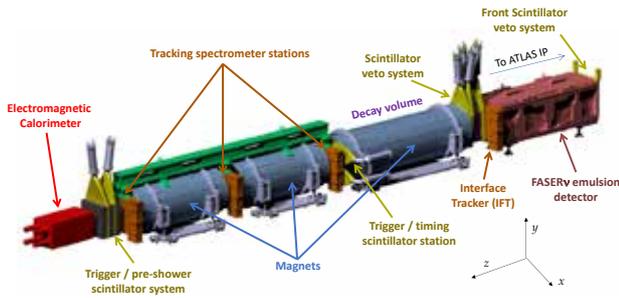


図 2: FASER 検出器の模式図

と、時間分解能をもつ電氣的検出器から構成され、電氣的検出器はシンチレーション検出器、永久磁石、シリコン飛跡検出器、電磁カロリメータからなる。

2.3.2 ニュートリノの検出

FASER 実験では 2 つの方法で、ニュートリノ観測を行っている。1 つ目は FASER ν 検出器内のタングステンプレートでのニュートリノ反応から生成した荷電粒子の飛跡を FASER ν 検出器内の原子核乾板で再構成することで、ニュートリノ反応を再構成する方法である。この方法では、電子ニュートリノ荷電カレント反応とミューニュートリノ荷電カレント反応を区別しながら、双方を観測している [4]。

2 つ目は FASER ν 検出器内のタングステンプレートでのニュートリノ反応から生成した荷電粒子のうち、FASER ν 検出器を通り抜けてシリコン飛跡検出器に飛跡を残すミューオンをシリコン飛跡検出器で再構成することで、ニュートリノを観測する方法である [5]。この方法では、電子、タウニュートリノ荷電カレント反応は観測できず、ミューニュートリノ荷電カレント反応のみを観測している。

つまり、現在 FASER 実験では、FASER ν 検出器のみでしか電子ニュートリノを観測できていない。この現状は、きたる高輝度 LHC において問題となる。高輝度 LHC では、瞬間ルミノシティの大幅な上昇により、より多くのミューオンが FASER ν 検出器に入射することになる。ミューオンは原子核乾板に飛跡を残し、一定以上の密度の飛跡が原子核乾板にたまると飛跡を読みだすことが困難になるため、高輝度 LHC においては FASER ν 検出器を今まで以上に頻繁に人の手で交換する必要が出てくる。そのため、FASER 実験としては、FASER ν 検出器以外を用いた電子ニュートリノの検出方法について検討することが不可欠となっている。

2.3.3 カロリメータとプリシャワー検出器で反応する電子ニュートリノ

以上の理由から、私は FASER の電氣的検出器を用いた新たな電子ニュートリノの検出方法について研究を行った。私の研究では、FASER 検出器最下流に位置するプリシャワー検出器と電磁カロリメータ内で反応する電子ニュートリノをターゲットとする。ニュートリノ反応によって生まれる荷電粒子がカロリメータにエネルギーを落とす。本研究ではモンテカルロ (MC) シミュレーションを用いて、カロリメータエネルギーを予測し、背景事象と、主要な系統誤差を見積もる。その結果を用いて、電子ニュートリノの検出可能性、その微分反応断面積の測定可能性、フラックスモデルの選択可能性について統計的に見積もった。以下では、それらについて簡潔に述べる。

背景事象としては、電子ニュートリノ荷電カレント事象以外のニュートリノ反応に加えて、前方の岩盤から発生する中性ハドロンやシンチレーション検出器が衝突点からくるミューオンに対して不活性だった場合などがある。ただ、MC シミュレーションに事象選択を行うことで、背景事象のうちニュートリノ以外の粒子由来の背景事象の大部分は無視できることが判明した。一部の実データを用いてしか見積もることのできない背景事象については無視できるとした。

図 3 は現在の FASER 検出器を再現した MC シミュレーションで見積もった事象選択後のカロリメータのエネルギー分布である。

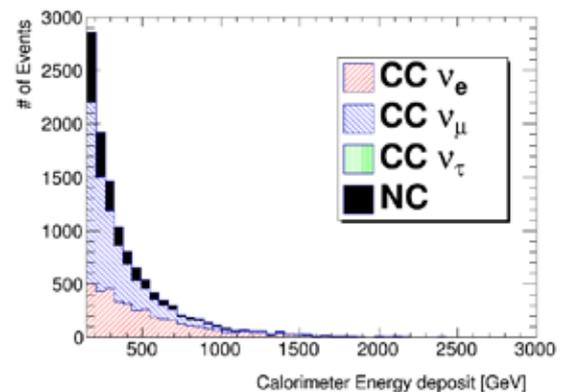


図 3: MC シミュレーションから得たカロリメータエネルギーの分布、積分ルミノシティ 10 ab^{-1} に対応

電子ニュートリノ荷電カレント事象では電子（陽電子）が原子核との反応で生成し、電磁シャワーがカロリメータ内に生じる。一方で、その他のニュートリノ反応では常には電磁シャワーが発生しない。そのため、信号事象の分布は背景事象に比べて高いカロリメータエネルギーを持つ。この違いをもちいて、信号事象と背景事象を統

計的に区別することができる。カロリメータエネルギーをいくつかのビンに分けたうえで、尤度を設定し、信号事象と背景事象を考慮する場合の尤度の最大値と背景事象のみの場合の尤度の最大値を比較することで信号検出の有意度を求める。ここでは、実データは用いず、信号事象と背景事象が MC シミュレーションに完全に従うという仮定の下での電子ニュートリノ検出の有意度を求めた。

系統誤差としては、積分ルミノシティの誤差、MC シミュレーションにおける統計誤差とニュートリノフラックスの予測の誤差について考慮した。その他にも、カロリメータエネルギーの系統誤差、ジェネレータにおけるニュートリノ反応断面積の誤差、MC シミュレーションにおけるハドロン生成の系統誤差などがあるが、ニュートリノフラックスの予測誤差に比べると小さく、また考慮に難があったため、無視した。

図4は積分ルミノシティに対しての有意度の向上の仕方を表している。有意度が 5σ となるのはおよそ 500 fb^{-1} であり、現状のセットアップのままでも、高輝度 LHC の初めのランでは検出できるであろうことがわかった。また、FASER はプリシャワー検出器のアップグレードを計画しており、有効質量が現在のおよそ10倍に増える。その場合、高輝度 LHC より前に検出を行うことができる可能性もあることがわかる。

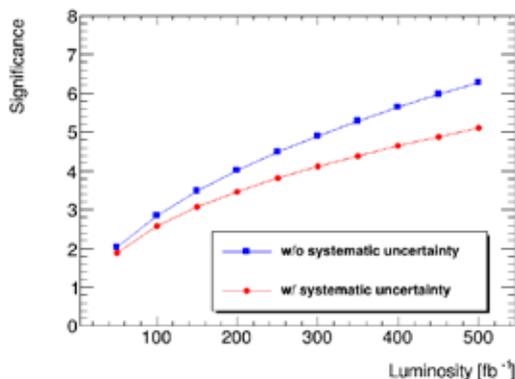


図 4: 有意度の成長曲線

さらに、電子ニュートリノの微分反応断面積の測定可能性、フラックスモデルの選択可能性について統計的に見積もりも行った。詳細を述べることはしないが、反応断面積は 500 fb^{-1} でおおよそ70%の誤差で計測可能であり、フラックスモデルもいくつかのモデルを棄却することが可能であることが判明した。

2.4 Student Session

滞在最終週に、自らの研究について10分+5分(質問)でプレゼンテーションを行う機会を得た。英語で行

う初めての対外発表ということで緊張していたが、実力を出し切ることができた。

3 CERNでの生活

構内にある CERN Hotel に滞在し、食事は自炊や main building のレストランを主に利用した。休日にはスイス、フランスの観光地などを他の Summer Student たちと訪問したり、夕食を作りあった。

4 抱負とプログラムへの期待

今回のプログラムに参加することができたことは、自分にとって非常に大きな経験になったと思う。この経験を糧にこれからも頑張っていきたい。

このプログラムに追加で望むこととしては、派遣期間の延長である。予算の都合もあるだろうができるだけ派遣期間を長くすることを考えていただきたい。

5 謝辞

今回のプログラムに参加するにあたって、非常に多くの方々にお世話になりました。ここに感謝の意を示させていただきます。特に、現地での指導をしていただいた supervisor の稲田知大様、Susanne Kühn 様に感謝いたします。また、東京科学大学の陣内教授、KEK の戸本教授には、推薦状を書いていただきましたこと、感謝いたします。東京科学大学の久世教授、久世研究室の皆様、また、渡航にあたって多くのことをサポートしてくださった KEK の有本様、仁井田様、現地でのサポートをしていただいた橋本様に、感謝いたします。このプログラムは KEK IINAS-NX の援助によって行われています。

参考文献

- [1] J.L. Feng *et al.*, Phys. Rev. D **97**, 035001 (2018)
- [2] H. Abreu *et al.*, Phys. Lett. B **848**, 138378 (2024)
- [3] FASER Collaboration, Conference Paper, CERN-FASER-CONF-2024-001, <https://cds.cern.ch/record/2892328> (2024)
- [4] R.M. Abraham *et al.*, Phys. Rev. Lett. **133**, 021802 (2024)
- [5] H. Abreu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **131**, 031801 (2023)