

CERN Summer Student Programme 2025 参加報告

東京大学理学系研究科物理学専攻 横山中島研

関山 実

minorusekiyama@hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp

2025 年 (令和 7 年) 8 月 27 日

1 はじめに

私は、2025 年 6 月 30 日から 8 月 22 日の間、CERN Summer Student Programme に参加した。本記事は、その参加記録である。

2 活動内容

2.1 講義

このプログラムの前半 1 ヶ月は、サマースチューデントに向けた講義が開講される。講義は各コマ 1 時間程度で、平日毎日 3 コマ、午前 9 時から正午まで開講された。講義内容は、CERN で行われている研究に関するものを取り扱うもので、素粒子理論の講義から、ビーム技術、データ解析手法、放射線の医療への応用まで、多岐にわたった。物理や統計の初歩的な部分から出発するものが多く、あまり馴染みのないテーマでも無理なく全貌が把握できる一方で、講義中や講義後には受講生から鋭い質問がなされることも多く、非常に勉強になった。

2.2 施設見学

プログラムの一環で、CERN 内のいくつかの施設を見学した。最初期のシンクロサイクロトロン、ATLAS の見学用施設、反陽子減速器、コンピューティングセンターを見学することができた。実際にそこで研究をしている先生方がガイドとなって見学できたため、他では聞くことができない興味深い話を知ることができた。

2.3 ワークショップ

プログラム期間内は、何度もワークショップが開催された。私はウェブセキュリティについてのワークショッ

プを受講した¹。実際に講師の先生が作ったウェブサイトの脆弱性を攻撃しながらセキュリティの手法について学ぶという内容で、とても実践的だった。

2.4 ハッカソン

CERN と周辺のスイスの大学が開催していた、Quantum Material Hackathon に参加した [1]。参加者は 5-6 人 1 班に割り振られ、班ごとに異なる課題が設定される。金曜日の夕方から日曜日の夕方まで丸 2 日間、それぞれの班で課題に挑戦し、最終的には全体の前で成果を発表するというものだった。参加してみて、ディスカッションやプレゼンテーションの非常にいい練習になっただけでなく、班員との交流が深まり、新たな友人を得ることもつながった。



図 1. ハッカソンのメンバーと記念撮影。著者は右から 2 番目である。

2.5 研究

研究に関しては、講義がある期間は昼食後から午後 6 時頃まで、講義のない後半期間は一日の時間全てが充てられた。私が配属されたのは、LHCb 実験の PicoCal[2] グループだった。LHCb 実験は、CERN で行われている大型実験の 1 つで、クォークセクターにおける CP 対称性の破れの精密測定などを目的としている。PicoCal グ

¹他には、ガスチェンバーを自作するワークショップや、ROOT の使い方をレクチャーするワークショップなどもあったようである。

ループの主たる目標は、直近の2回のLHCのシャットダウンの間にHL-LHCに向けてLHCbのECAL(電磁カロリメータ)をアップグレードすることである。そこで新たにSpaCalという検出器が導入される予定である。チーム内での私の研究内容は、そこで用いられるPMTの候補について、主に反応の一意性の面から性能評価をするということだった。

2.5.1 研究の背景

HL-LHCにおいては、現在よりも高頻度でpp衝突が起こり、それによる放射線は、試算によればビーム軸付近でおよそ1MGy程度になる。現在LHCbのECALで用いられているShashlik検出器は、この放射線強度には耐えられないため、新たに放射線耐性の高い検出器を開発する必要がある。より具体的な技術的な要求は以下である [3][4]。

- 高い放射線耐性。特にビーム軸中心付近で1MGyに耐えられること。
- 現行の検出器と同様のエネルギー分解能。

$$\sigma(E)/E \sim 10\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$$

- 時間及び位置分解能(ビーム軸中心付近)。

$$\Delta t \sim \mathcal{O}(10) \text{ ps}, \quad \Delta x^2 \sim 1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$$

これらの水準を満たすべく、PicoCalグループは新たなECAL検出器SpaCalを開発してきた。



図 2. SpaCal-W のプロトタイプ。この写真に見えるようなファイバー断面にライトガイドを設置し、その先でPMTから信号を読み出す。

SpaCalの特徴は以下である。

- 吸収剤にWまたはPbを用いている。
- 発光材にシンチレーションファイバーやガーネットの結晶シンチレータを用いている。

- 光子検出にPMT²を用いている。

そこで用いられる可能性のある2種類のPMT³の性能評価、特に、エネルギー分解能の定数項への寄与がある、光子の入射位置に対する反応の一意性についてを調べることが私の研究だった。

2.5.2 研究手法

PMTの光電面にレーザーを照射し、2次元的に照射位置を変化させながらその出力を調べた。

1. PMTを台にセットし、レーザーやレンズの位置を調整する。PMTのガラス面にちょうど焦点がくるようにPMTの位置を調整する。
2. マシンを使ってレーザーの位置をレーザー軸と垂直な方に2次元的に変化させながら出力データを取る。

これを下記の条件を変えながら繰り返し行う。

- PMTにかける高圧電源。
- レーザー強度(減衰レンズを用いる)。
- レーザー波長(372 nm と 420 nm)。

2.5.3 解析

上の手順により、レーザー位置に対する出力の二次元のプロットを得たのち、フィッティングを用いて光電面の反応についてのみ抜き出し、その領域上にあるピクセル全体における反応強度の標準偏差を計算し、平均により正規化する。おおむね、正規化標準偏差が小さければ反応は一律であり、大きければ非一律であるということが出来る。

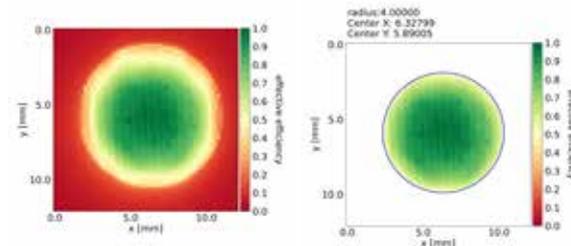


図 3. 解析の一例。左図は、最大値によって正規化された反応マップ。右図は、そこから光電面についてのみ抜き出したもの。Hamamatsu R9880-U20 に対し 372 nm のレーザーを用い、高圧電源は 400 V を用いた。減衰レンズは使用していない。

²放射線耐性が高く、時間分解能やエネルギー分解能についても要求水準と合致しているため、信号の読み出しにはPMTが用いられる予定である。

³Hamamatsu R9880-U20 およ R9800。これらはそれぞれWタイプとPbタイプの候補である。

2.5.4 結果

ここでは、結果の例として R9880-U20 について、高圧電源に対する応答の一様性を挙げる。高圧電源を変化させている途中で減衰レンズの強さ (OD⁴) を変えているのは、PMT の出力に DAQ がサチレーションを起こしてしまうのを防ぐためである。

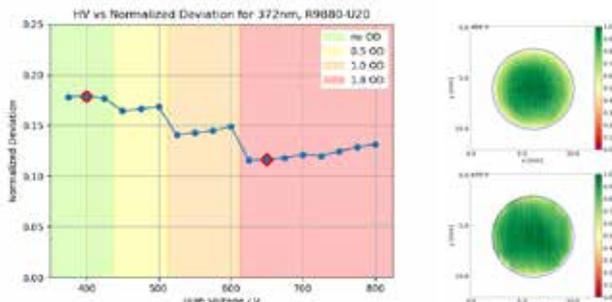


図 4. 左図は Hamamatsu R9880-U20 の、高圧電源ごとの正規化標準偏差の推移。横軸は高圧電源、縦軸は正規化標準偏差。背景色は用いている減衰レンズの強さを表す。波長は 372 nm で固定されている。右図上段は 400 V に対する反応マップ。右図下段は 650 V に対する反応マップ。境界周辺付近で、反応の強さが異なることがわかる。

プロットは、階段上になっていることが見てとれるが、それらの段差はそれぞれ減衰レンズの強さが変わった時に現れていることがわかる。このことから、減衰レンズの強さ (レーザーの強度) は、反応の一様性に対してなんらかの寄与があることが推測される。

そこで、高圧電源を変化させずに、減衰レンズの強さを変化させて同様の解析を行なうことで、減衰レンズのみの寄与を調べた。

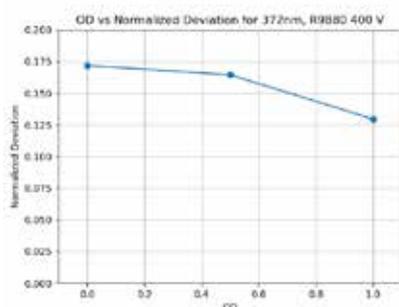


図 5. Hamamatsu R9880-U20 の、減衰レンズの強さごとの正規化標準偏差の推移。横軸は OD、縦軸は正規化標準偏差。400 V に固定している。波長も変わらず 372 nm。

この結果自体は先のプロットと整合しており、それぞれのステップは減衰レンズの強さの変化によって引き起こされたと考えられる。また、減衰レンズの強さが具体的にどのように一様性に寄与しているかを見るために、対応するマス目同士の値を引き算して、その差をプロットした。

⁴Optical Density の略。

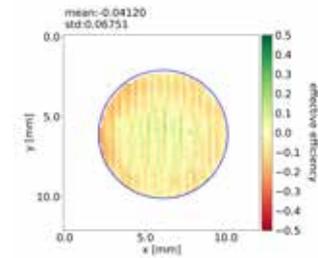


図 6. Hamamatsu R9880-U20 の 400 V について、対応するマス同士で最大値により正規化した反応マップの値を引き算したものの。外側の領域は負になっており、内側の領域は正になっている。また、全体的に縦縞の様が見られる。

これらの、減衰レンズの強さの違いによって生じる場所ごとの反応の違いや縦縞模様などは、PMT の内部構造に起因するものと考えられ、さらなる研究が必要である。

同様の解析を Hamamatsu R9800 に対しても行い、また、時間分解能についての調査も行なったが、紙面の都合上割愛する。

2.5.5 シフト

LHCb の SpaCal の組み立てシフトにも数回参加した。大体 1 回 3 時間程度で、内容は主にシンチレーションファイバーを適切な長さに切り揃えたり、PMT の高圧電源デバイダーを半田付けしたりすることだった。単純な作業だったが、実際に設置される予定の検出器の一部を自らの手で作ることはなんとも言えないワクワクがある。



図 7. Hamamatsu R9800 に対して電子部品をはんだ付けしている著者。

2.6 発表会

8/5 および 8/19 日に、LHCb のサマースチューデント間で、プログラムの成果を発表し合う会があった。そこで、自分の研究内容について発表し、また他の生徒の内容についても聴講した。他の生徒がどのような課題に取り組んでいるのかを詳しく知ることができるいい機会だっ

た。また、そこでの発表内容と、LHCb グループへの貢献度などを合算して、Moritz Karbach Summer Student Prize に複数の生徒が選ばれる。私自身が選ばれることはなかったものの、Honourable mentions として、自分の名前が挙げられたことはとても嬉しかった [5]。



図 8. LHCb Summer Student presentation で発表している著者。

3 CERN での生活

私は、Saint-Genis 側のホステルに滞在した。CERN までは主にモビリティセンターで借りた自転車を用いて毎日通っていた。講義がある期間は、朝ごはんをレストランで買ってそれを食べながら講義を聞いていた。講義の後にはほかのサマースチューデントと昼食を食べ、それから supervisor と軽くミーティングをしてその日にやることを決め、終日それに取り組むというスケジュールだった。

また、PicoCal グループでは毎週月曜の 9 時にコーヒミーティングがあり、10 人弱のスタッフと共にレストランの外の木陰で雑談をする習慣があった。あまりかしこまったものではない分、スタッフとの距離も近く、リラックスした雰囲気情報交換をすることができて、良い習慣だったように思う。

週末は友人と近隣の都市まで旅行に出かけたり、レマン湖で泳いだりした。

4 今後の抱負

本プログラムは、自分の人生の中で最も長く海外に滞在した経験であり、またプログラムの生徒も数多の国籍から構成されていて、非常に国際色に富んだものだった。この経験を活かし、今後は国際的な研究をリードするような存在になりたいというのが私の抱負である。

5 プログラムに望むこと

予算の兼ね合いもあり、難しいことは承知の上でだが、もう 2-3 週間でいいので滞在期間を長くしていただけたら、と思う。私自身、CERN での生活に慣れて軌道に乗ってきた頃にちょうど帰国というタイミングだったので、もうあと少しでもいられたらどれほど良かったかと思わずにはいられなかった。

6 謝辞

このプログラムを支援している KEK の加速器科学国際育成事業 (IINAS-NX) に感謝します。このプログラムの存在を知らせていただき、推薦状を書いていただいた横山将志先生および横山中島研の皆様に感謝します。推薦状を書いていただいた戸本誠先生に感謝します。実際に研究を進めていく上でほぼ毎日議論に付き合ってくれた supervisor の Aleksandar Bodelius 氏および Matteo Salomoni 氏に感謝します。現地での生活面や休日の旅行先の相談など話を聞いてくれた KEK の小作さんに感謝します。同じオフィスで、同じ日本からのサマースチューデントとして英語面など色々お世話になった杉本一陽君に感謝します。

参考文献

- [1] <https://indico.cern.ch/event/1495039/>
- [2] Aleksandar Bordelius, The LHCb PicoCal, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **1079**, 170608 (2025).
- [3] The LHCb Collaboration, Framework TDR for the LHCb Upgrade II Opportunities in flavour physics, and beyond, in the HL-LHC era, Tech. Rep., CERN, Geneva, 2021.
- [4] The LHCb Collaboration, LHCb Particle Identification Enhancement Technical Design Report, Tech. Rep., CERN, Geneva, 2023.
- [5] https://lhcb.web.cern.ch/Collaboration_prizes/Moritz_Karbach_summer_student_prize.html