

CERN Summer Student Programme 2023 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

近藤 翔太

skondo@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2023年(令和5年)10月6日

1 はじめに

私は7月3日から9月1日までの9週間、CERN Summer Student Programme 2023に参加した。本記事では、このプログラムでの活動を報告する。

2 活動内容

2.1 講義

今年から対面での講義が再開された。講義のテーマは素粒子理論、素粒子実験、データ解析、統計学、放射線医療と多岐に渡り、興味深いものばかりだった。また、同時期に開催されているOpen Labというプログラムの機械学習の講義にも参加した。

2.2 研究



(a) シンチレーションパドル

(b) 新型Beam Profile Monitor

図1: (a) シンチレーションパドル。シンチレーションタイル、ライトガイド、光電子増倍管から構成される検出器。[1](b) 新型 Beam profile monitor。1 mm 角のシンチレーションファイバ (192 本) と SiPM (192 個) から構成される検出器。[2]

私は CERN North Area のビームラインで使用される Beam monitor の研究・開発を行うチームに配属され、beam intensity の測定、および、他の検出器へのトリガ

配布を行う Beam intensity monitor の開発に携わった。従来、Beam intensity monitor にはシンチレーションパドル (図1(a)) が用いられてきた。しかし、長年の使用による劣化や開発・運用をしてきた専門家の引退に伴う技術の喪失、後述する新型 Beam profile monitor (図1(b)) 上への設置の難しさが理由で、新しい Beam intensity monitor が必要とされている。配属先のチームでは、シンチレータと SiPM を用いた新型 Beam intensity monitor (図2) の開発を進めており、私はそのプロトタイプ作成と β 線源 ^{90}Sr を用いた粒子検出効率の評価を行った。

2.2.1 新型 Beam intensity monitor の構成

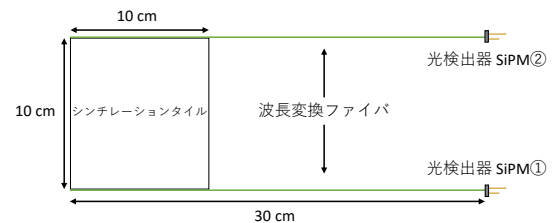


図2: 新型 Beam intensity monitor。表面積 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、厚さ 0.1 cm のシンチレーションタイルに、直径 0.1 cm、長さ 30 cm の波長変換ファイバが2本取り付けられている。タイルとファイバは光学素子用接着剤で接着した。

新型 Beam intensity monitor の構成を図2に示す。1枚のシンチレーションタイル、2本の波長変換ファイバ、2個の SiPM から構成される検出器で、粒子がタイルを通過したときに発生する紫外光を、波長変換ファイバで SiPM の光子検出効率が高い可視光に変換し、それを SiPM で読み出す。新型 Beam intensity monitor は、新型 Beam profile monitor (図1(b)) の表面に設置し、トリガとして用いることを念頭に設計されている。新型 Beam profile monitor はビームの進行方向に垂直な断面をモニタする検出器で、ビームライン上の真空容器内に設置して使用する。従来 Beam intensity monitor として

用いられたシンチレーションパドル (図 1(a)) は光電子増倍管で光検出を行うが、サイズが大きく、新型 Beam profile monitor のセットアップに設置するのは難しい。一方、新型 Beam intensity monitor はサイズの小さい SiPM を光検出に使用しているため、新型 Beam profile monitor のセットアップに設置できる。

2.2.2 閾値の決定と SiPM の較正

SiPM では、光が当たっていない状態でも、ピクセル内で熱的に励起したキャリアが増幅されることで信号 (ダークパルス) が発生する。これは beam intensity 測定におけるノイズとなるが、パルス波高が低いため、波高に対して適切な閾値を設定することでビーム由来の信号と区別できる。閾値を決定するために、図 3 のセットアップでダークパルスのイベントレートを測定した。

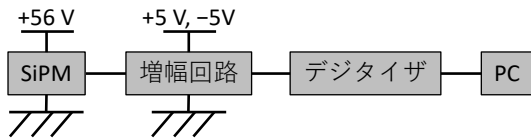


図 3: ダークパルスのイベントレート測定のセットアップ。SiPM の信号は増幅回路で増幅された後、デジタイザでデジタル信号に変換され、PC にデータが保存される。

まず閾値を設定せずに測定を行い、波高分布から pedestal と 1 p.e.¹ を弁別する閾値を決定した。次にその閾値の下で測定を行い、波高分布から 1 p.e. と 2 p.e. を弁別する閾値を決定した。これをイベントレートが十分小さくなるまで、閾値を上げながら繰り返した。結果を表 1 に示す。閾値は 3 p.e. 以上に設定した。また、1 p.e. 以上と 2 p.e. 以上のイベントレートがほとんど等しいが、これはイベントレートが高すぎてデジタイザが busy になったためだと考えられる。

表 1: ダークパルスのイベントレート (Hz)

パルス波高の閾値	1 p.e. 以上	2 p.e. 以上	3 p.e. 以上
SiPM①	1108	1097	84
SiPM②	1121	1074	18

また、ダークパルスの積分値 (パルスの電荷量) を用いて、検出光子数の較正を行った。結果を図 4 に示す。図 4(b) に示すフィット (破線) から、積分値を検出光子数に換算する式が得られた。

SiPM①

$$\text{Number of photons} = 943 \times \text{Integrated pulse} - 5$$

SiPM②

$$\text{Number of photons} = 737 \times \text{Integrated pulse} - 11$$

¹Photon Equivalent の略。検出光子数が 1 のときの信号の大きさを表す。

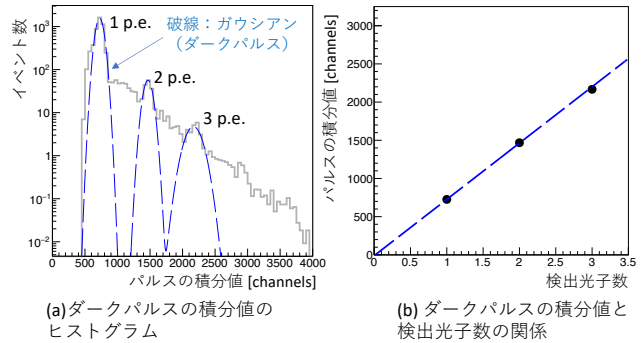


図 4: (a) ダークパルスの積分値のヒストグラム。2 p.e. 以上、3 p.e. 以上の測定データを、閾値 (境界) におけるイベント数が一致するようにスケールして合成した。(b) パルスの積分値と検出光子数の対応関係。各点の y 座標はガウシアンフィットの平均値。

2.2.3 β線源 ⁹⁰Sr を用いた粒子検出効率の評価

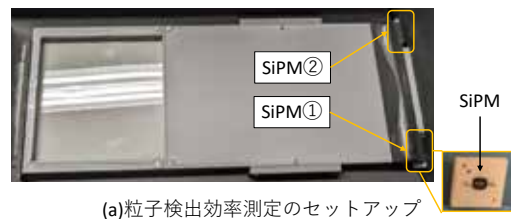


図 5: (a) 粒子検出効率測定のセットアップ。SiPM は右下に示すベージュ色のフレームに入れ、灰色のフレームの側面に固定した。(b) 測定に使用した三種類の検出器。左から、加工を施していない物、タイル表面に拡散型反射塗料を塗った物、タイルをアルミホイルで包んだ物。

新型 Beam intensity monitor の粒子検出効率の目標値は 99% に設定されている。図 2 の検出器が目標を達成できているか評価するために、β線源 ⁹⁰Sr を用いて検出効率の測定を行った。なお、正常に動作する増幅回路が一つしかなかったため、二つの SiPM について独立に測定を行った。測定のセットアップを図 5 に示す。波長変換ファイバは放っておくと湾曲し、ファイバの断面と SiPM の受光面が平行に couple しない。これはファイバと SiPM の境界における光子のロストを引き起こすため、3D プリンタで作成したフレーム (図 5(a)) で検出器を固定し、波長変換ファイバの湾曲を抑えた。放射線源はタイルの表面に対して垂直に約 4 cm 離れた位置に

設置した。また、タイル表面から外に出ていく光子を減らす加工を施した検出器（図5(b))を二種類用意し、加工を施していない検出器と検出効率を比較することで、検出効率の向上に対する効果を検証した。

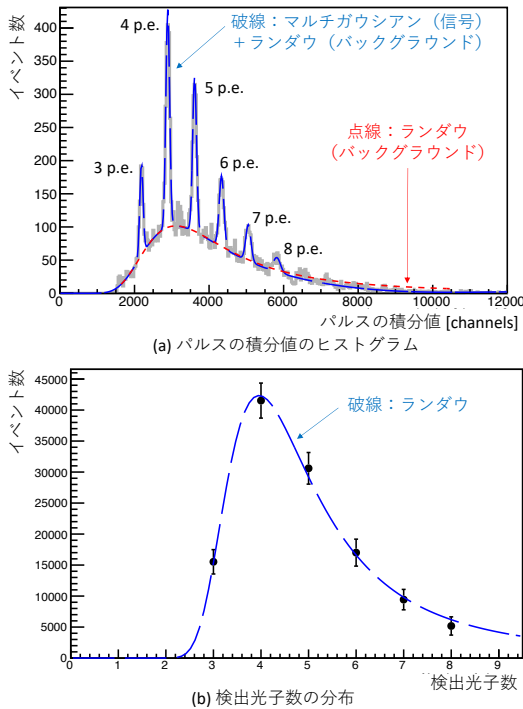


図 6: (a) パルスの積分値のヒストグラム。(b) 検出光子数の分布。各点の y 座標は (a) の各ピークの積分値。赤線は、検出光子数 3 から 8 の部分でフィットした結果を、検出光子数 2 以下、9 以上の部分に外挿したもの。

図 6 に示す結果を元に、次のように検出効率を求めた。まず、図 6(b) の分布を全イベント数（各点の y 座標の和）で規格化し、SiPM①、SiPM②で検出した光子数の確率分布 $P^1(x)$ 、 $P^2(y)$ を求めた。次に、

$$P^{1+2}(z) = \sum P^1(x) \times P^2(y)$$

を計算することで、二つの SiPM の確率分布を合成した。ただし、和は $z = x + y$ を満たす全ての組 (x, y) についてとった。最後に、この確率分布をランダウ関数でフィットし、以下の式で定義した検出効率を求めた。

$$\text{Efficiency} = \frac{\int_{\text{Threshold}}^{\text{inf}} \text{Fitting curve } dx}{\int_0^{\text{inf}} \text{Fitting curve } dx}$$

結果を表 2 に示す。検出器①の検出効率は、誤差の範囲で目標値をわずかに下回った。一方で、検出器③の検出効率は、誤差を含めて目標値を達成できた。両者が誤差の範囲で一致し得るため断言はできないが、フィットの MPV (Most Probable Value) が向上していることから、タイルをアルミホイルで包むことは、タイル表面から出ていく光子を減らし、検出効率を向上させる可能性がある。検出器③とは対照的に、検出器②の検出効率は下

表 2: 粒子検出効率とランダウフィットの MPV

	粒子検出効率	MPV
検出器①	$(99.92 \pm 1.01)\%$	8.803 ± 0.015
検出器②	$(94.99 \pm 0.97)\%$	7.102 ± 0.011
検出器③	$(99.97 \pm 0.81)\%$	10.86 ± 0.02

がった。拡散型反射塗料は入射光をランダムな方向に反射するため、一部の光がタイル内部にトラップ・吸収されたことで、検出効率下がったと考えられる。

3 生活面でのエピソード

様々な国の人達と交流する中で、日本では知り得ない文化や歴史、価値観に触れることができた。研究室のメンバーで朝にコーヒーを飲んだり、一緒に昼食を食べるのは良い文化だと思ったので、日本でもやってみたい。

4 今後の抱負、プログラムに望むこと

プログラムの研究に取り組む中で得られた教訓を忘れず、今後の研究に活かしていきたい。また、現地で知った人との繋がりを大事にしたい。

今後も講義を含むプログラムが対面で開催されることを望む。対面の方が他の Summer student と交流できる場面が多く、参加者の視野を広げる良い機会になる。

5 おわりに

プログラム参加を全面的にサポートしてくださった KEK 職員の皆様、私を温かく迎え入れ、共に研究して下さった supervisor の Emma Buchanan さん、Inaki Ortega さん、PhD の Robert Larsen さんをはじめとする SY-BI グループの皆様、お忙しい中推薦状を書いて下さった横浜国立大学 南野彰宏教授、KEK 花垣和則教授、プログラム応募にあたりアドバイスしてくださった東京大学 奥村恭幸准教授に心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Inaki Ortega Ruiz. Accurate profile measurement of the low intensity secondary beam in the CERN experimental areas [Doctoral dissertation]. Ecole Polytechnique, Lausanne. 2018.
- [2] Inaki Ortega Ruiz, et al. The XBPF, a new multipurpose scintillating fibre monitor for the measurement of secondary beams at CERN. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 951 (2020) 162996.