

CERN Summer Student Programme 2022 活動報告

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士1年

長坂 錬

ren.nagasaka@cern.ch

2022年(令和4年)10月22日

1 はじめに

2022年6月27日から同年8月19日までCERN Summer Student Programme 2022に参加しました。今年は、昨年とは異なり現地開催で、しかもRun-3がちょうど始まるタイミングだったのもあり非常に多くの研究者、学生と研究、交流することができました。自分はCMS実験に配属され、BRIL(Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity)プロジェクトに参加しました。本記事では、活動内容や生活面でのエピソード等を書いていきたいと思います。

2 活動内容

2.1 講義

6月28日から7月29日まで、平日は毎日55分の授業が3コマ実施されました。授業の題材は素粒子物理だけではなく、原子核物理、宇宙物理や確率統計など多岐の分野にわたっていました。CERNならではのと思ったのは、理論と同じくらい実験手法やデータ解析に関する講義があったり、CERNで実際に行なっている実験と絡めた講義があったことです。授業をしてくださった講師の皆さんは第一線で物理をしている人で授業も非常に準備されており面白かったです。

2.2 研究

2.2.1 バックグラウンド

自分が配属されたCMS実験BRILプロジェクトについてまとめます。BRILプロジェクトではCMS検出器及び周りに設置されたサブ検出器を用いて、ルミノシティ測定やビームコンディションをモニターすることを目的としています。

ルミノシティ測定 イベントレート $\frac{dN}{dt}$ は、ルミノシティ L と散乱断面積 σ に

$$\frac{dN}{dt} = L \times \sigma \quad (1)$$

のように比例し、加速器実験においてルミノシティを正確に求めることは非常に重要です。実際の実験ではイベントレートはヒット、トラック、バーテックスなどの観測量の数に比例します。よって、よく知られ、キャリブレーションされた現象に対して観測量を計数することによってルミノシティを決定することができます。LHCは円形加速器で、時計回りと反時計回りに陽子の塊を加速、衝突させています。一周で3564箇所に陽子の塊を入れる余地があり、その一つ一つをバンチと呼び、一周のことをオービットと呼びます。バンチは25 nsに一回の頻度で衝突します。つまり、 $3564 \times 25 \text{ ns} = 89.1 \mu\text{s}$ 後には同じ陽子の塊同士が衝突するというわけです。

Run-3のデモ及びPhase-2システム用に開発されたBRILヒストグラミングモジュールにおいて、ルミノシティ測定のためのデータは図1の形式で送られます。0ワードから8ワードはヘッダー部分でビームに関する情報やタイムスタンプが記されています。9ワード以降のカウンターペイロード(COUNTER PAYLOAD)に観測量のカウントをヒストグラムの形式で集計したものが入っています。ここでは簡単のため、MASK PAYLOADとERROR PAYLOADについては省略します。

ビームタイミング測定 二つのLHCビームのタイミングの違いもルミノシティと同様に重要な物理量で、これを測るシステムをBeam Pick-up Timing system for Experiments(BPTX)と呼びます。二つのビームのタイミングの違いは、CMS検出器の中心点と実際の実験で二つのビームが衝突する点のずれと相関があります。BRILプロジェクトのBPTXでは、CMS検出器から175m離れた左右両側のビームライン上に、ピックアップ用の電極を配置して、その信号をオシロスコープで見ます。そのオシロスコープの波形から、二つのビームの到着時刻

General structure

Word \ Bit	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
#0	1	1	1	1	1	1	1	1	Header size										Total package size													
#1	Histogram type										Histogram ID										Number of bins											
#2	Counter width										Increment width										Number of counter words											
#3	Count Ovf	Incr Ovf																														
#4	LHC fill number																															
#5	CMS run number																															
#6	Luminosity section																															
#7	Luminosity word																															
#8	Number of words per error										Number of units										Number of mask and error words											
...	Counter payload																															
...	Mask payload																															
...	Error payload																															

図 1: BRIL ヒストグラミングのデータ形式。[1] より引用。

を得て、時間差を取ります。典型的な BPTX 信号を図 2

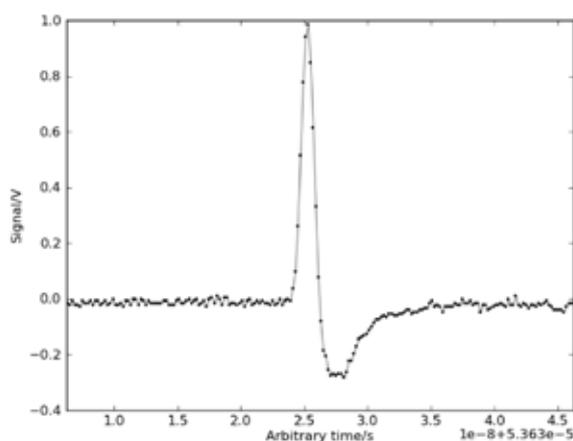


図 2: 典型的な BPTX 信号。マーカーが測定点を表している。[2] より引用。

に示します。ビーム通過時刻の正確な測定のためには、オシロスコープの分解能を最大化するために、ゲインとオフセットを最適化する必要があります。加えて、BPTX 信号のベースラインはビームの状態に依存するので、最適化はいくらかマージンを持たせて行わなければなりません。

2.2.2 手法

ここでは、先ほどの背景のもと、自分が行ったプロジェクトの手法について述べていきます。自分は、ルミノシティ測定とビームタイミング測定の両方に関わりました。オービットヒストグラム生成がルミノシティ測定に、ゲイン・オフセット最適化がビームタイミングに関わることです。

オービットヒストグラム生成 自分のプロジェクトは、BRIL プロジェクトで使われるソフトウェアのテスト

のために、図 1 の形式にあったテストデータを生成する関数を作ることでした。具体的には、ヘッダー部分には適切な値を入れ、カウンターペイロードには、観測量のヒストグラムを入れます。観測量のヒストグラムの生成の仕方は二通り用意して、ひとつはシングルビン、つまり 3564 バンチのうち一つだけが観測量のカウント N_0 があり他は 0 の状態で、もうひとつはランダム、つまり 3564 バンチ全てに対して 0 から N_0 の間のランダムなカウントが入っている状態です。これに加えて、実際のビーム構造に近づくためにアルベドエミュレーション (albedo emulation) も考慮に入れました。実際の実験では、観測量のカウントはデルタ関数的ではなく、周囲の物質の放射化により尾を引くような構造です。これがアルベドと呼ばれるもので、以下の式で近似できます。

$$N(x) = \begin{cases} N_0 & (x = n) \\ aN_0 & (x = n + 1) \\ aN_0 \exp(-bx) & (n + 1 < x < n + c) \\ 0 & (n + c - 1 < x) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $N(x)$ は x 番目のビンのカウントで、 a, b, c はパラメータです。このアルベドエミュレーションはシングルビン及びランダムどちらにも実装します。

ゲイン・オフセット最適化 自分のプロジェクトは BPTX 用のオシロスコープとの通信を確立して、ゲイン・オフセットを最適化するような関数を作ることでした。API には NI-VISA を使いました。オシロスコープとの通信を確立し、波高を読み取った後、波高の最大値 (Max) と最小値 (min) から以下の式に従って、最適なゲインとオフセットを計算します。

$$\text{vertical gain} = \frac{\epsilon}{\text{Max} - \text{min}} \quad (3)$$

$$\text{vertical offset} = \frac{\text{Max} + \text{min}}{2} \quad (4)$$

ここで ϵ は波形をどのくらい縦軸のレンジいっぱいに表示するかを示しており、先ほど述べたマージンにあた

ります。最後にこうして求めた最適なゲインとオフセットをオシロスコープに送信, 設定して完了です。

2.2.3 結果

ここではプロジェクトの結果を, 手法の欄につづいて二つに分けて述べます。

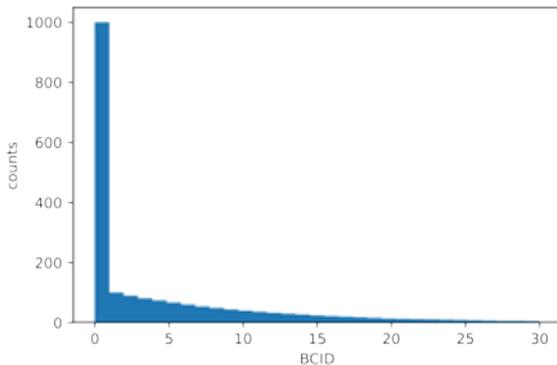


図 3: シングルビンのカウンターペイロード

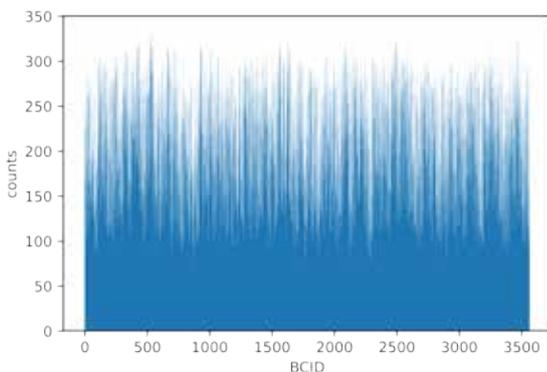


図 4: ランダムのカウンターペイロード

オービットヒストグラム生成 今回自分の作った関数の出力データが図 1 の形式に沿っていることを, 参考文献 [1] の第 20 章にあるアプリケーションで確認しました。またカウンターペイロードの結果を図 3 と図 4 に示します。ここで, シングルビンに対しては, $N_0 = 1000$, ランダムに対しては $N_0 = 200$ に設定し, その他のパラメータに関しては共通で,

$$a = 0.1 \quad (5)$$

$$b = 0.1 \quad (6)$$

$$c = 30 \quad (7)$$

と設定しました。これを見ると, アルベドエミュレーションも含めて実装がされていることがわかります。

ゲイン・オフセット最適化 ゲインとオフセットの最適化後の, 波形を図 5 に示します。ここでは, オシロスコープの全 8Ch に対して最適化が行われていて, 1Ch と 2Ch が BPTX 信号, 3Ch と 4Ch は信号なし, つまりノイズが見えているだけで, 5Ch, 6Ch, 7Ch, 8Ch は NIM ロジックレベルの固定された振幅を持つ信号です。これを見ると全 8Ch に対してゲインとオフセットの最適化がなされていることがわかります。

次に, 全 8Ch を最適化するのを 1 サイクルとして, 1 サイクルにかかる時間をプロットしたものを図 6 に示します。ここでは 5000 サイクル最適化を回しています。結果は

$$\text{Run Time} = 564 \pm 19 \text{ ms} \quad (8)$$

となりました。ここで誤差は標準偏差です。

2.2.4 今後の展望

自分が開発したオービットヒストグラム生成関数は, 今後 BRIL プロジェクトのソフトウェアのテストに使われる見通しです。一方で, BPTX に関しては, 今回ゲイン・オフセット最適化関数を実装したわけですが, 測定器にオシロスコープを用いるためにはまだまだ必要な手順が残っています [2]。加えて, 図 6 で示した実行時間も短縮できる余地があると考えています。

3 生活面でのエピソード

自分は CERN 敷地内のホテルに 2 カ月滞在することになりました。平日はしっかり 8 時間, 講義を聞いたりプロジェクトを進め, 夜はジムに行ったり友だちやスーパーバイザーの人とご飯を食べたりお酒を飲んだりします。休日は基本的に自由なので, 図書館に行って日本の課題をやったり, 軽く旅行に行ったりしていました。

4 今後の抱負

現在自分は東京大学の修士一年として, CERN の ATLAS 実験に関わっています。ATLAS 実験も, CMS 実験と同じく色々な国の人たちで構成される大きなプロジェクトです。今回, CERN に現地でプロジェクトに参加できたことは大きな財産になりました。これを生かして, 今後の研究に邁進していきたいと思っています。

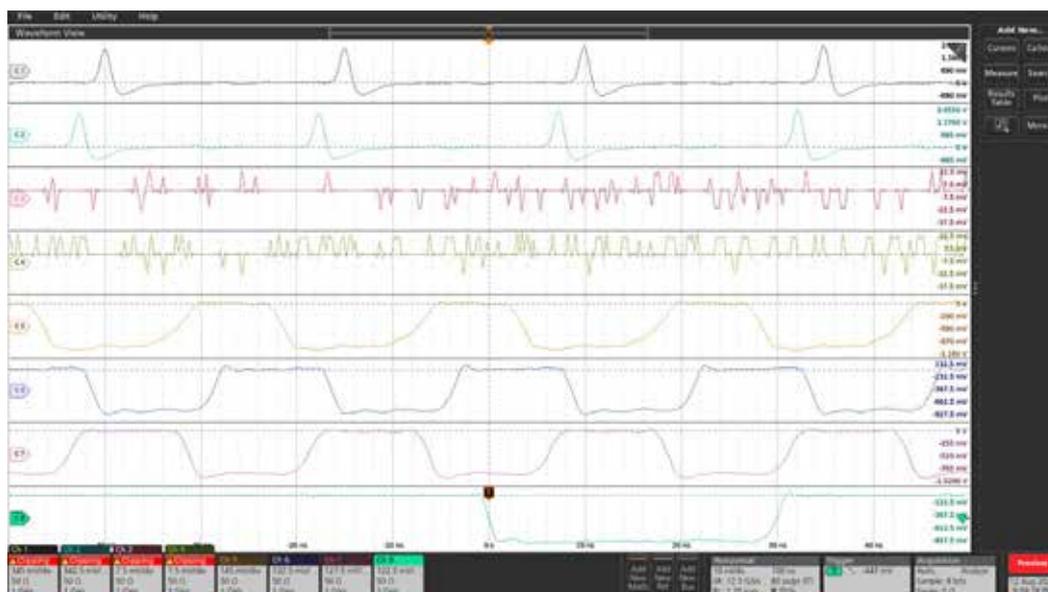


図 5: 最適化後の波形。上から順に ch1,ch2, ... ch8 である。

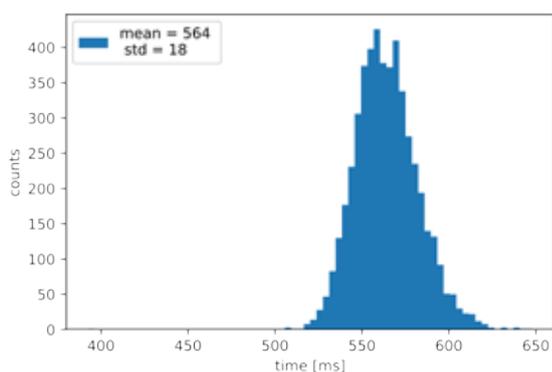


図 6: 最適化にかかる時間。

5 今後のプログラムに望むこと

COVID-19 の感染状況にもよりますが、やはり現地開催の方が得るものは大きいと思います。今回 CERN 及び日本の関係者の皆様のおかげで現地開催が出来て、自分は大変感謝しております。来年以降もそうなることを願っています。

6 謝辞

まず、繰り返しになりますが、現地開催に向けて尽力してくださった CERN 及び日本の関係者の皆さまに感謝を申し上げます。また、現地でスーパーバイザーとして、大変お世話になった Mykyta Haranko さんと Arkady Likhovitskiy さんには物理含め様々なことを教えていた

だきました。加えて奥村恭幸准教授、花垣和則教授には推薦状を書いていただきました。最後に CERN に在住している KEK 事務の江口洋さんには、事務手続き含め大変お世話になりました。特に自分が CERN でコロナにかかりホテル療養をしていた時、奥村恭幸准教授と共にサポートをしていただきました。ここに感謝を申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity Detectors Technical Design Report, CMS Collaboration, CERN-LHCC-2021-008 ; CMS-TDR-023 (CERN, Geneva, 2021).
- [2] BPTX electronics and software at CMS, Andrey Pozdnyakov, Jeroen Hegeman, & Anne Dabrowski, CMS Internal Note (CERN, Geneva, 2013).