

■ 談話室

CERN Summer Student Programme 2017 活動報告

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 宇宙線研究所修士 1 年

山本 晃平

yamakoh@icrr.u-tokyo.ac.jp

2017 年 9 月 11 日

1 はじめに

私は 6 月 19 日から 8 月 25 日まで、CERN Summer Student Programme に参加しました。本プログラムは世界約 90 カ国から 340 人ほどの学生が参加する、非常に国際色豊かなサマースクールです。ここでは、CERN での 10 週間で私が経験したことについての活動報告をさせていただきます。

2 研究・活動内容

2.1 Lectures

10 週間の滞在のうち 6 月 26 日からの 6 週間は、午前中に Summer Student 向けの講義が行われました。現在日本で重力波を専門としている私ですが、大学院での専門を CERN での ATLAS にするか最後まで悩んでいた私にとって、この講義で CERN の加速器や detector について幅広く学ぶことは大変に興味深いものでした。さらにこの講義は CERN で行われる実験のみに焦点を当てているのではなく、素粒子物理学の理論的な側面や弦理論、さらには素粒子物理学の医療への応用についての講義までありました。本講義の間のコーヒープレイクや、その後のランチの時間に友人と講義の内容 (に始まりそのほか色々) について話すことも多くあり、ほかの Summer Student との交流の機会としてもとても良かったように思います。

2.2 研究室での活動

CERN Summer Student Programme において、Summer Student は supervisor の下で各グループの研究に参加する形を取っています。私は Teng Jian Khoo 氏 (以下 TJ) と Christopher Young 氏の下 (主に普段指導をいただいたのは TJ)、ATLAS 実験のデータ解析グループに配属されました。

LHC で陽子ビーム同士が衝突した際にわれわれが基本的に知りたいのは、高いエネルギーを持ったある一組のパートン同士の反応 (vertex) です。しかし ATLAS 実験は高いルミノシティを誇っており、最も興味のある vertex 以外 (以下 pile-up) からの

ID tracker や calorimeter への寄与が多く存在します。これらの寄与を差し引かなければならず、そのためこの手法がこれまでも多く提案されてきました[1]。私と TJ は、Particle Flow algorithm (以下 PFlow) と呼ばれる jet clustering の手法と、SoftKiller と呼ばれる pile-up からの寄与を差し引く手法を合わせた解析のパフォーマンスを評価するということを行ないました。ATLAS 実験では Topological clustering (以下 Topo) という Calorimeter からの情報のみを用いた jet clustering がなされていますが、CMS で使われてきた PFlow は、ID tracker からの情報を Calorimeter のものと結びつけることによって、EM Calorimeter と Hadron Calorimeter 間の重複計算を効率的に避けることができるため ATLAS でも導入する流れとなっています。一方 SoftKiller は jet を構成する前に行われる pile-up suppression の手法であり、そのシンプルさに関わらずとても効果的であることが先行研究[2]で示されています。これらのコンビネーション (以下 PF+SK) の評価はこれまでほとんど研究がなされていません (唯一のものは文献[3])。私たちは様々な pile-up suppression や clustering の手法と比較することにより、PF+SK を評価するとともに、Topo などこれまで使われてきた手法に加わえて、PF+SK による解析も含んだ、 η (ビーム軸方向の座標値に相当) ビンについての calibration (η の値、および各ビンでのエネルギーに対する calibration: 以下 PFSKCal) を導出することを目標としていました。

2.2.1 Official Calibration との比較

Calibration を評価する最も直接的な量として Jet Response (定義: $R = p_T^{\text{reco}} / p_T^{\text{true}}$) があります。定義からこれが 1 に近いほど、シミュレーション結果 (true) にデータから再構成した結果 (reco) が近いことを意味し、すなわち calibration がうまくできていることに対応します。われわれの行った jet performance の評価の流れは、まず jet のみを含む dijet イベントについてシミュレーションにより適切

な calibration を導出し、それを任意のデータに適用してその結果を観察するというものです。図 1 は dijet についてのシミュレーション結果のうち、例として PF+SK の $0.0 < \eta < 0.5$ の領域のものを示します。図 1 の 2 本の線は PFSKCal 前後 (Before Calibrated と Calibrated) に対応し、シミュレーションのレベルで PFSKCal がうまく働いていることがわかります。

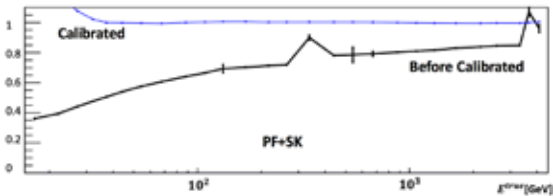


図 1 dijet シミュレーションの Jet Response。

次に PFSKCal をより詳細に評価するには、すでに導出されている OCal との比較が不可欠です。しかし当然 PF+SK についての OCal (私たちがまさに導出したもの) は存在しないため、この比較には SK を含まないコンビネーションを用いる必要があります。

図 3 には SK による pile-up suppression を行わずに PFlow を用いた解析に対して、Jet response についてそれぞれの Calibration の比較を示しています。これは先の dijet についてのシミュレーションによってうまくいくことが示された calibration を実際の $t\bar{t}$ イベントに適用したものです。ここで residual calibration とは、Primary vertex の数の関数としての pile-up 依存を軽減するための calibration であり、今回の PFSKCal には含まれていません。これを見ると今の段階では PFSKCal は OCal に比べ Topo, PFlow の両方についてクオリティが低い(1 から遠い)ことがわかります。前述の通り Jet response は最も直接的に Calibration の質を評価する指標であるため、今後はこの値を 1 に近づけていくことが最も重要な課題の一つである。

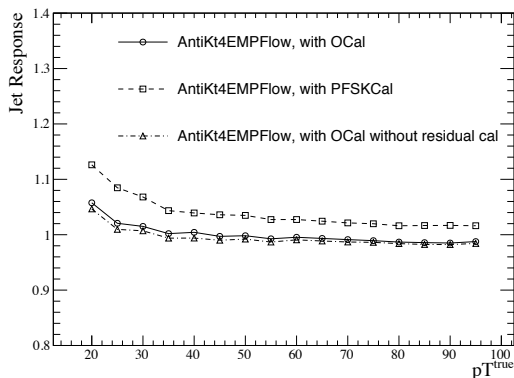


図 3 Jet Response(比較)。

さらなる詳細な検証のためにここで Fake Rate と呼ばれる量を導入します。これは「再構成した jet のうちシミュレーションで得た jet と、設定した threshold の範囲でマッチングしなかったものの比率」として表され、その定義より pile-up からの寄与をどれだけ拾ってしまったのかを示す量で、小さいほど calibration がうまくいっていることを示しています。

図 4 には、検出器内の中央部 ($|\eta| < 1.0$) についての Fake Rate を示します。これを見ると PFSKCal に次のような明らかな問題があることがわかります。「Topo による解析に比べ、PFlow についての解析では $40 \text{ GeV} < p_T^{\text{reco}} < 60 \text{ GeV}$ の範囲に奇妙なバンプのような形が見て取れる。」

この点については、値が大きく見積もられていることから jet ではない要素からの寄与を、誤って jet として再構成してしまっているのではと考えました。Topo ではなく PFlow についてのみこの特徴が現れていることから、候補となる要素はミューオンであることが示唆されます。つまり、calorimeter だけを見ている Topo の場合、ミューオンがそこまで大きなエネルギーを残さないために、jet との区別がしやすいですが、PFlow は ATLAS の ID tracker と calorimeter の情報を共に考慮するため、ミューオンが jet と似たように振る舞い得るのです。ミューオンと Fake Rate として数えられた jet との距離 ($R = \sqrt{\eta^2 + \varphi^2}$) を計算しました (図 5)。すると予想された通り、PFlow について、距離が小さいところに大きなピークが見られるため、バンプの正体はミューオンであることを示すことができました。この点については帰国後 TJ から「Overlap removal (jet とそのほかの電荷を持った粒子とを区別するアルゴリズム) についてのバグを発見した」旨の連絡が届きました。

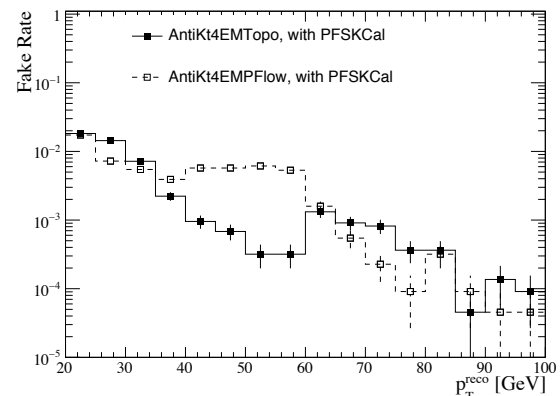


図 4 中央部 ($|\eta| < 1.0$) での Fake Rate(比較)。

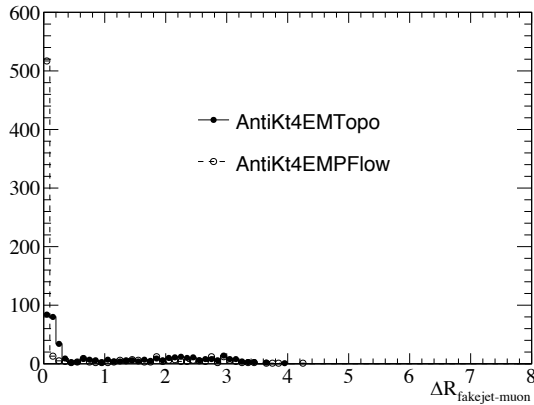


図5 中央部での fake jets とミューオンとの距離。

2.2.2 MET performance

今回の滞在中に MET (missing transverse momentum) についてもいくつかの量について多くの図をプロットして様々検証しましたが、最終週にそれまでのプロットが不要になるほどの重大な欠陥を発見することができたのでここではそれについて書きます。その欠陥というのが図6に示してあります。PF+SK について線形に MET (の Z ボソン軸への射影) が遷移していますが、これは MET について jet からの寄与が考慮されていないことを示しています。

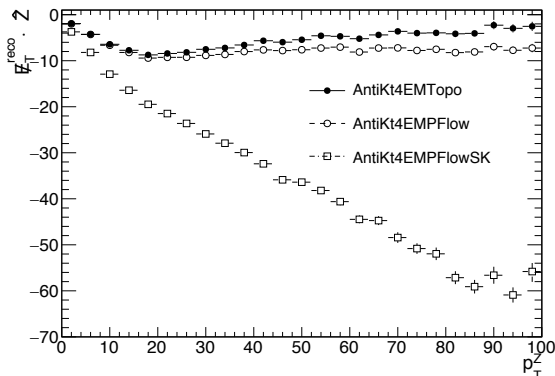


図6 MET の Z ボソン軸への射影 ($Z \rightarrow ee$ イベント)。

2.2.3 その後

私が CERN を発ったちょうど次の週、TJ は研究会のためにトロントに向かいました。そこでは、これまであまりなされてこなかった PF+SK のパフォーマンスに関する私たちの結果について、多くの方が興味を持ってくれたそうです。

3 CERN での生活について

私は普段 CERN の敷地内にあるホステルに滞在していました。ホステルの隣にあるレストランには

卓球台があり、夜に友人と卓球を楽しんだり、仕事の後時間があれば遅くまで週末の旅行の計画をしたりしていました。St. Genis で BBQ も楽しみました。それぞれ宗教上の都合で食べられないものがバラバラな人たちとの BBQ はとても興味深い体験でした。また、滞在中に 3 人の友人の誕生日をお祝いしたのはとてもよく覚えています。最終日に、マレーシアの友人がジュネーブ大学病院に運ばれ、みんなで夜中に駆けつけるという大変稀有な経験もしました(友人はその日のうちに退院できました)。

週末には色々なところに友人と出かけ、CERN での研究の話に加え、それぞれの国での生活や今後の自分のキャリアの話など、大変いい交流をできたように感じます。これからも長く付き合っていくであろう親友たちに出会ったことは、CERN での研究に加え、かけがえのない宝物であると胸を張っていることが出来ます。



図7 友人たちと旅行した Charmonix での一枚。

4 今後の抱負とプログラムへ望むこと

私はスイスに行く前、自分の英会話力について多少の自信がありましたが CERN での滞在中に自分の英語力がまだまだ足りないことを痛感しました。帰国後も友人たちとテレビ電話などで交流を続け、東大の留学生たちとも積極的に交流しています。研究については、素粒子という分野自体は自分の専門である重力波と異なりますが、解析を通じて学んだプログラミング言語や ROOT のようなソフトウェア、TJ に教わったプレゼンで自分の意見をうまく伝えるコツなど、直接的に活かせることもたくさん学んだので、自らの研究にも多く活かしていきたいです。

今後このプログラムに望むこととして、普段の lecture に加えディスカッション型の lecture というものがあればより良いように感じました。多くの友人とそれぞれの研究について教えあうことはありましたが、そのための機会というのがそれほど頻繁に

あるようには感じなかったからです。私も所属グループのミーティングでプレゼンテーションしましたが、そこに Summer Student は私しかいませんでした。

5 謝辞

本プログラム参加にあたり、関わってくださったすべての方々に心より感謝します。本プログラムを勧めてくださった京都大学の中家剛教授、指導教官である東京大学の梶田隆章教授、推薦してくださった先生方、KEK の皆様、特に宮居さんと現地で大変お世話になった甲木さん。プログラムが始まる前だというのに日本に来た際わざわざ時間を取って研究内容について教えてくれた CERN での指導教員の TJ と TJ が不在の間多くの時間を割いて議論してくれた Christopher。

最後に、一緒に日本から参加したおけちゃん、とも、かずきを含め、現地で忘れられないような思い出をいくつもくれた多くの友人たちに心からありがとう。

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, "Jet reconstruction and performance using particle flow with the ATLAS Detector", Submitted to Eur. Phys. J. C (2017)
- [2] M. Cacciari, G. P. Salam and G. Soyez, "SoftKiller, a particle-level pileup removal method", CERN-PH-CH-2014-116
- [3] D. Lopez-Mateos and J. Roloff, "SoftKiller with PFlow", presentation on September 23, 2016