

CERN Summer Student Programme 2024 参加報告

東京大学 理学系研究科 物理学専攻 修士1年

田上 理沙子

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

2024年(令和6年)10月10日

1 はじめに

私は6月24日から8月16日までの8週間、CERN Summer Student Programme 2024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

プログラム前半の午前は素粒子理論から加速器・検出器まで、各分野の最前線で活躍される研究者の方々が行う講義を受講した。中には放射線医療に関する講義もあり、他ではなかなか聞くことのできない話が多く非常に貴重な体験であった。また、同時期に開催されているOpenLabの機械学習の講義も聴講した。

2.2 研究

プログラム前半の午後と後半終日はCERNでの研究に従事した。私はLHCの検出器の一つであるATLAS実験のデータ解析に参加した。ATLAS実験ではHiggsボソンが発見されてから[1]、Higgsボソンに関する研究、そして標準理論を超えた物理に関する研究が盛んに行われてきた。Vector boson scattering (VBS)は電弱対称性の破れのメカニズムを解明するのに役立つことが期待されている反応である。LHCのRun-2のデータで初めて、CMS[2]でVBS($WW+2$ jets)が観測されてから、他のベクトル粒子ペアの反応についても、解析が行われてきた。

今回私が参加した解析は、VBSの中でも WZ が衝突し2つのジェットを伴うイベントの解析である。主な目的はボソンのpolarizationを測ること、Run-3のデータを用いて高統計で電弱対称性の破れのメカニズムを検証することである。

ATLASでの $WZ+2$ jetsのVBSの解析はすでにRun-2のデータを用いて行われており[3][4]、本解析はこれをRun-3のデータを用いてさらに高統計で行うことを目指している。本解析でのシグナルは $WZ+2$ jetsのEW反応生成のもの(図1左)、最もドミナントなバックグラウンドは $WZ+2$ jetsのQCD反応生成のもの(図1右)である。

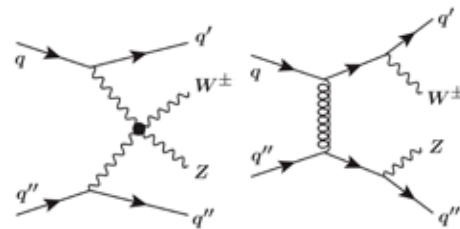


図1: シグナル($WZjj$ -EW)とドミナントバックグラウンド($WZjj$ -QCD)のファインマンダイアグラム。

最終生成物はレプトンが3つ(そのうち2つは Z ボソンから出た、フレーバーが同じで電荷は正負が異なるもの、残り1つは W ボソンから出たもの)、ニュートリノが1つ(実際には直接観測されず、transverse方向のmissing energyとして観測できる)である。これはシグナルとドミナントバックグラウンドの両者で共通であるため、両者の区別はキネマティクスによる分離などを用いるしかない。またVBSはそこまで頻度の高い反応ではないため、正確に測定を行うことは難易度が高い。不定性の低い解析を行うためには、以下のことが重要である。

- バックグラウンドのモデリングにミスがないよう確認すること(特に $WZjj$ -QCD)
- シグナルの割合が最大限多くなるようなイベントセレクションを設定すること
- シグナルとドミナントバックグラウンドをできる限り分離できるようなキネマティクス変数を探すこと

私は ATLAS Run-3 のデータを使った解析に向けてシミュレーションデータのバリデーションや最適化に携わった。

2.2.1 セレクション

解析を行うにあたり、データ内のシグナルの割合を高めるためにシグナルセレクションが設けてある。これにより最終結果のシグナルの不定性が下がるので、適切なセレクションを設定することは重要である。今回のセレクションは Run-2 での解析 [4] のものに従った。セレクションを通過したシミュレーションデータを 2022 年の luminosity に合わせたものを図 2 に示す。

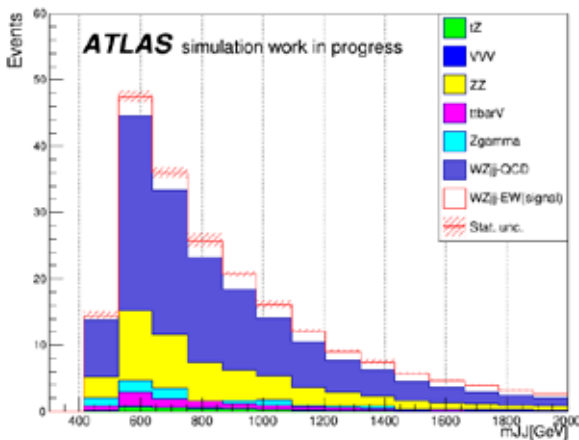


図 2: Signal Region での 2 つの tagging jets の不変質量のシミュレーションイベント。

これを見ると、WZjj-EW は頻度の低いイベントであること、WZjj-QCD がドミナントなバックグラウンドであることがわかる。

2.2.2 バックグラウンドモデリング

まず、バックグラウンドのモデリングを検証するために、それぞれのバックグラウンドの割合が増えるような Control region を図 3 に示す通りに設定した。

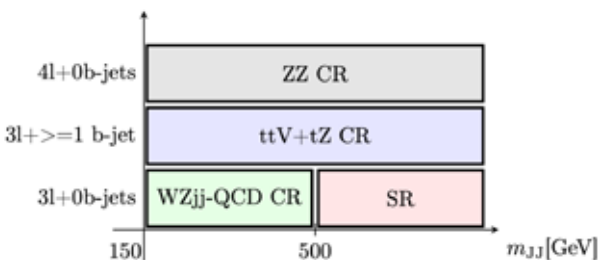


図 3: Control regions.

この Control region それぞれに対しシミュレーションとデータをプロットしバックグラウンドのモデリングを検証した。その結果、一つの Control region について正規化の問題があることがわかった。

2.2.3 Run-2 との比較

シグナルである WZjj-EW のシミュレーションモデリングを確認するために、Run-2 と Run-3 のシミュレーションの比較を行った。今回使用した Run-2 と Run-3 のシミュレーションの違いは以下の点である。

- center of mass energy (13 TeV / 13.6 TeV)
- Sherpa のバージョン (2.2.12, Rel.21 / 2.2.14, Rel. 22)

これらはいずれも大きな差ではないため、ジェットの運動量や角度分布などの変数も大きな差はないと考えられる。これらの変数における Run-2 と Run-3 のシミュレーションデータの差を実際に確認することで、Run-3 のデータのバリデーションを行った。また、セクション 2.2.1 で述べた通り WZjj-QCD のイベントは signal region で大きな割合を占めるため重要なので、こちらについても同様の比較を行った。この比較の結果、大半のモデリングは適切に行われていたが、no-tagged jet についての変数については Run-2 と Run-3 での差が大きいことがわかった。Truth レベルでこの違いはなく reconstruction 後のみに発生していた違いであり、no-tagged jet の取り扱いが η が大きい範囲において異なっていて修正が必要であることがわかった。

2.2.4 Tagging の最適化

Signal region でのシグナルの割合を増やす方法の一つとして、jet tagging の efficiency を最適化することがあげられる。今回のバックグラウンドの中では例えば ttV のイベントなどは b-jet が含まれやすいため、最適化された b-jet tagging アルゴリズムを使うことで、バックグラウンドは多く排除できるがシグナルイベントは排除しすぎず結果的にシグナルイベントの割合が多いような signal region を作る事ができる。

GN2v00 という b-tagging アルゴリズム [5] を使って、効率を 89%, 85%, 82%, 77%, 76%, 70%, 68%, 60% に変化したデータを用いてシグナルの割合を評価した。評価基準としては $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ (S: シグナルイベント数, B: バックグラウンドイベント数) と、再構成されたイベント数と生成されたイベント数の割合を用いた。全ての効率におけるプロットを図 4 に示す。図 4 より、b-tagging 効率は 77% が最適であると考えられる。

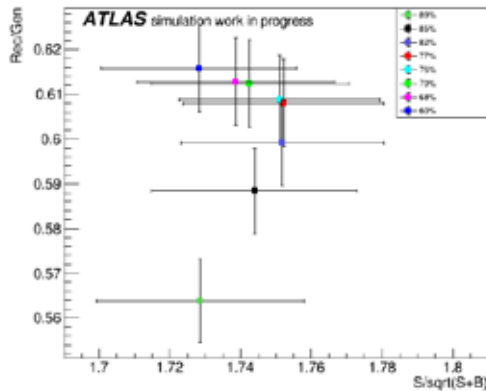


図 4: 各 tagging 効率それぞれにおけるシグナルの割合。図において右上に位置するものほど、シグナルの割合が多く、signal region が最適化されていると言える。

2.3 その他

CERN Summer Student Programme では学生向けにさまざまな Workshop が開催されている。私は Mad-Graph の Workshop と、WebApplication の Security に関する Workshop に参加した。Web ページがどのように表示され、どのような危険があるのか、例えばワンクリック詐欺がなぜ起きるのか、といった、身近でありながらこれまでなかなか知る機会のなかった内容が扱われ、非常に学びの多い経験となった。

また、Summer Student 向けの Poster Session にも参加した。プログラムの中盤での発表であったため、ポスターを準備することは自身の研究内容への理解を深める良い機会となった。英語で一對一での質疑応答を行うことが出来たのも非常に良い経験であった。

3 生活面でのエピソード

私のデスクは ATLAS の研究者が多くいるビルの廊下にあったのだが、正午近くになると毎日のように ATLAS の Fellow がやってきてランチに誘ってもらい、十数人の大所帯で食堂に向かっていった。ランチの間は学術的なことから雑談まで様々な会話を楽しんだ。Fellow たちは彼らの自国に関することから、他国の歴史や政治、さらには殺虫剤の成分に至るまで、幅広い知識を惜しげもなく披露しており、私も彼らのように深みのある会話によって多様なバックグラウンドを持つ人々と楽しく交流できるように精進したいと感じた。

4 今後の抱負、プログラムに望むこと

本プログラムへの参加を通して、国際的に活躍できる人材となるために英語の修練はまだ必要であることを痛感したので、今後も学習を続けていきたい。また、現在日本においても ATLAS の研究に関わっていることもあり、今回できた人との繋がりを引き続き大切にしていきたい。

今回私は 8 週間の参加となったが、もっと期間があればより深く研究が出来てさらに良い経験になったと思う。実現にむけては難点もあるだろうが、日本人参加者の参加期間にもう少し長い期間の選択肢が可能となることに期待したい。

5 謝辞

プログラム参加に際して多くのサポートをしてくださった KEK 職員の皆様、Supervisor として様々なことを教えてくださった Angela Maria Burger さん、お忙しい中推薦状を書いてくださった戸本教授、プログラム応募にあたり多くの助言をしてくださった石野教授に、心から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] ATLAS collaboration, 'Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC'. In: Physics Letters B 716.1 (Sept. 2012), pp. 1-29.
- [2] CMS collaboration, 'Observation of Electroweak Production of Same-Sign W Boson Pairs in the Two Jet and Two Same-Sign Lepton Final State in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV'. In: Phys. Rev. Lett. **120**(8 Feb. 2018).
- [3] ATLAS collaboration, 'Observation of gauge boson joint-polarisation states in $W\pm Z$ production from pp collisions at $s=13$ TeV with the ATLAS detector'. In: Phys. Rev. B **843**(2013).
- [4] ATLAS collaboration, 'Measurements of electro weak $W^\pm Z$ boson pair production in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector'. In: Journal of High Energy Physics **2024**(2024).

- [5] ATLAS collaboration, 'Graph Neural Network Jet Flavour Tagging with the ATLAS Detector'.
In: <https://cds.cern.ch/record/2811135>