

令和 3 年 4 月 16 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 31 年度

受付番号 201960073

氏名 野辺 拓也

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ジュネーブ （国名： スイス連邦 ）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
TeV スケールにおける電弱対称性の破れの解明
3. 派遣期間：平成 31 年 4 月 1 日 ~ 令和 3 年 3 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名
受入機関名：ジュネーブ大学
部局名：Département de physique nucléaire et corpusculaire
5. 所期の目的の遂行状況及び成果...書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

所期の目的の遂行状況及び成果

ジュネーブ大学ATLASグループの一員として、ジュネーブにあるCERN研究所の大型ハドロン加速器LHCにおけるATLAS実験に参加した。LHCにおけるWボソン対散乱断面積は、標準模型ではヒッグス粒子の寄与によりユニタリティが保たれる。ヒッグスとWボソンの結合定数が標準模型と少しでもズレていたり、電弱対称性破れの起源が最も単純なヒッグス機構ではない場合、TeVスケールの質量領域で特徴的な散乱断面積が予想される。本研究はLHC Run3データを用いたWW散乱断面積のTeVスケールにおける初測定と、そのための実験ツール準備を目的とする。

標準模型の予言ではTeVスケールの散乱断面積は極めて小さいので、信号数を稼ぐため崩壊分岐比の大きいWボソンのハドロン崩壊モードを用いる。TeVスケールにおけるWボソンのハドロン崩壊は、ローレンツブーストファクターによって2本のハドロンジェットとして再構成できない。そこでWからの全てのハドロンを1本のジェットとしてまとめて再構成し、その「内部構造」からバックグラウンドを強力に抑制する手法を導入した。

これまでの研究ではカロリメータの信号のみを用いていたが、カロリメータ読み出しセル以上に細かいジェット内部構造を測定できない問題があった。そこでカロリメータの信号に加え、内部飛跡検出器の情報も組み合わせた新手法を開発した。内部飛跡は高運動量で運動量分解能が悪くなっていくが、角度分解能は非常に良い。両検出器の特性を理解し、得意な領域を組み合わせた。Wボソンの運動量が比較的低めの場合、飛跡の測定を優先的に使う。これをPFlowアルゴリズムと呼ぶ。運動量が非常に高い領域では荷電粒子のエネルギーはカロリメータで、角度は飛跡で測定する。これをTCCアルゴリズムと呼ぶ。本研究ではPFlowとTCCを適切なパラメータで組み合わせ、図1に示すように全運動量領域でベストなパフォーマンスを達成した。これをUFOアルゴリズムと呼ぶ。開発結果を以下の学術論文で発表した。

- T. Nobe et. al., ATLAS Collaboration, Optimisation of large-radius jet reconstruction for the ATLAS detector in 13 TeV proton-proton collisions, accepted by European Physics Journal C, 2020. [arXiv:2009.04986](https://arxiv.org/abs/2009.04986).

このUFOアルゴリズムは、これから始まるLHC Run3でATLAS実験の標準ツールとして使用される見込みだ。現在、実験グループ内のジェットキャリブレーションチームの責任者に就任し、実

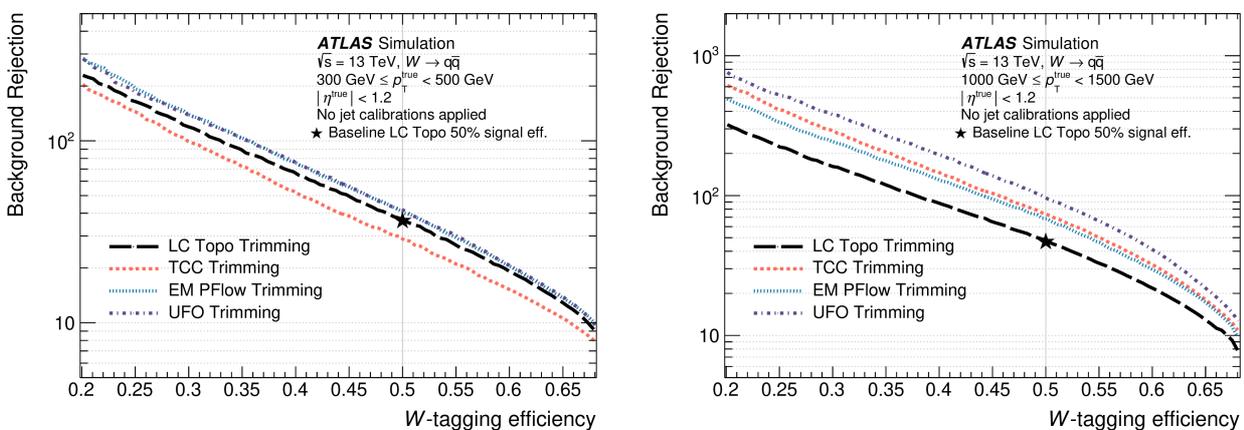


図1: Wボソン信号検出効率と背景事象削減率の比較。左図で低運動量領域、右図で高運動量領域を示す。従来のLC Topoアルゴリズム、TCCアルゴリズム、PFlowアルゴリズムに比べて、UFOアルゴリズムで全ての運動量領域で良いパフォーマンスを得られた。高運動量領域では信号取得効率50%とするとUFOはLC Topoよりも約2倍背景事象を削減できる。

データを用いた較正を主導している。その一環として、UFOアルゴリズムの前段階であるTCCアルゴリズムを用いたWボソン同定器のキャリブレーション結果を以下のATLAS実験報告書としてまとめた。現在、UFOアルゴリズムを用いた同様の解析を行っている。

- **ATLAS Collaboration, A W/Z-boson tagger using Track-CaloCluster jets with ATLAS, [ATL-PHYS-PUB-2020-008](#). (査読無し)**

Wボソン散乱断面積測定 of 物理解析も順調に進めている。Run2データの一部 (36/fb) を用いた途中経過を以下の学術論文で報告した。この論文では、カロリメータのみを用いた従来のジェットアルゴリズムを使用した。WW/WZ/ZZ終状態を組み合わせて2.6 σ の精度で散乱断面積を測定した。この結果をICHEP2020国際会議で発表した。現在Run2全データを用いた解析を進めている。

- **T. Nobe et. al., ATLAS Collaboration, Search for the electroweak diboson production in association with a high-mass dijet system in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector, Physics Review D100 (2019) 032007.**
- **Takuya Nobe for the ATLAS Collaboration, Observations of weak boson scattering with the ATLAS detector, 40th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2020), online, July 2020. (口頭発表)**

同時に、新しいジェットアルゴリズム of 物理解析への応用を推進した。Run2全データを用いたボソン対共鳴探索ではTCCアルゴリズムによってTeVスケールでの感度改善を達成し、以下の学術論文にまとめた。実験グループの代表として、この結果をCERN-LHCセミナーで発表した。

- **T. Nobe et. al., ATLAS Collaboration, Search for heavy diboson resonances in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector, European Physics Journal C80 (2020) 1165.**
- **Takuya Nobe for the ATLAS Collaboration, Searches for high-mass resonances with the ATLAS detector, CERN-LHC seminar, April 2020, online. <https://indico.cern.ch/event/868253/> (口頭発表)**

以上のように、所期の研究計画は概ね達成できたと考えている。

さらに、上記のジェット内部構造のエキスパートとしての経験を活かし、ジュネーブ大学の別プロジェクトにも貢献した。この研究はジュネーブ大学の物理科と情報科のコラボレーションプロジェクト (RODEM) の一環として行った (ただし、資金援助等は受けていない)。

本研究計画で新しく開発したUFOアルゴリズムによってジェット内部構造がより細かく測定可能になった。新物理信号と背景事象のより小さな差異を捉えられるようになったことを活かし、新物理が作り出す未知のジェット内部構造を模型に依らず探索する異常検知アルゴリズムの開発を行った。

異常検知アルゴリズムとして機械学習の生成モデルの一種であるVariational Autoencoder (VAE)に着目した。VAEはエンコーダとデコーダの2つのパートからなる。エンコーダは背景事象のジェット内部構造を大量に学習し、その特徴を潜在変数として落とし込む。デコーダでは潜在変数からサンプリングした量からインプットのジェットを再構成する。トレーニングはインプッ

トジェットとデコーダで再構成したジェットの差異を最小化するように行う。すなわち、

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2$$

を最小化する。ここでNはインプットジェット内部の粒子数、 x_i はi番目の粒子の観測量、 \hat{x}_i はデコーダで再構成したジェット内部のi番目の粒子の観測量だ（正確にはこれに加えて、潜在変数をレギュレートする損失関数も同時に用いる）。トレーニングしたアルゴリズムに、新物理事象のような学習に用いていないデータを入力すると、デコーダが潜在変数から入力データをうまく再構成できずMSEが大きくなる。これを用いて新物理信号を、学習した背景事象ジェットの平均的特徴からの「外れ値」として検知する。

図2左では、背景事象(QCD)に対して、トップクォーク(Top)やとある新物理信号(StealthB)のMSEが大きくなることを示す。すなわち、このプロトタイプアルゴリズムは新物理信号を残しつつ背景事象を大幅に落とすことができる。しかし、MSE分布とジェット質量に強い相関が認められた。図2右に示すようにMSEにカットをかけると背景事象の質量分布が高いほうにバイアスしてしまう。これは、質量の低い新物理信号は検出できないことを示唆する。よりモデルに依らずに信号を検知できるよう、質量に依存しないアルゴリズムの開発を進めている。また、開発したVAEアルゴリズムをベースに、敵対的生成ネットワーク (GAN) や可逆ニューラルネットワーク (INN)を組み合わせたよりよい異常検知アルゴリズムの構築を目指している。

ここまでの結果を論文にまとめ、NeurIPS2020国際会議に提出した。また、途中経過をグループの代表としてAMLD2020国際会議でポスター発表した。

- T. Golling, T. Nobe, et. al., The Mass-ive Issue: Anomaly Detection in Jet Physics, in proceeding of 3rd Workshop on Machine Learning and the Physics Sciences (NeurIPS2020), 2020.
- Takuya Nobe, et. al., VAEs for Anomalous Jet Tagging, Applied Machine Learning Days (AMLD) 2020, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Jan 2020 (ポスター発表).

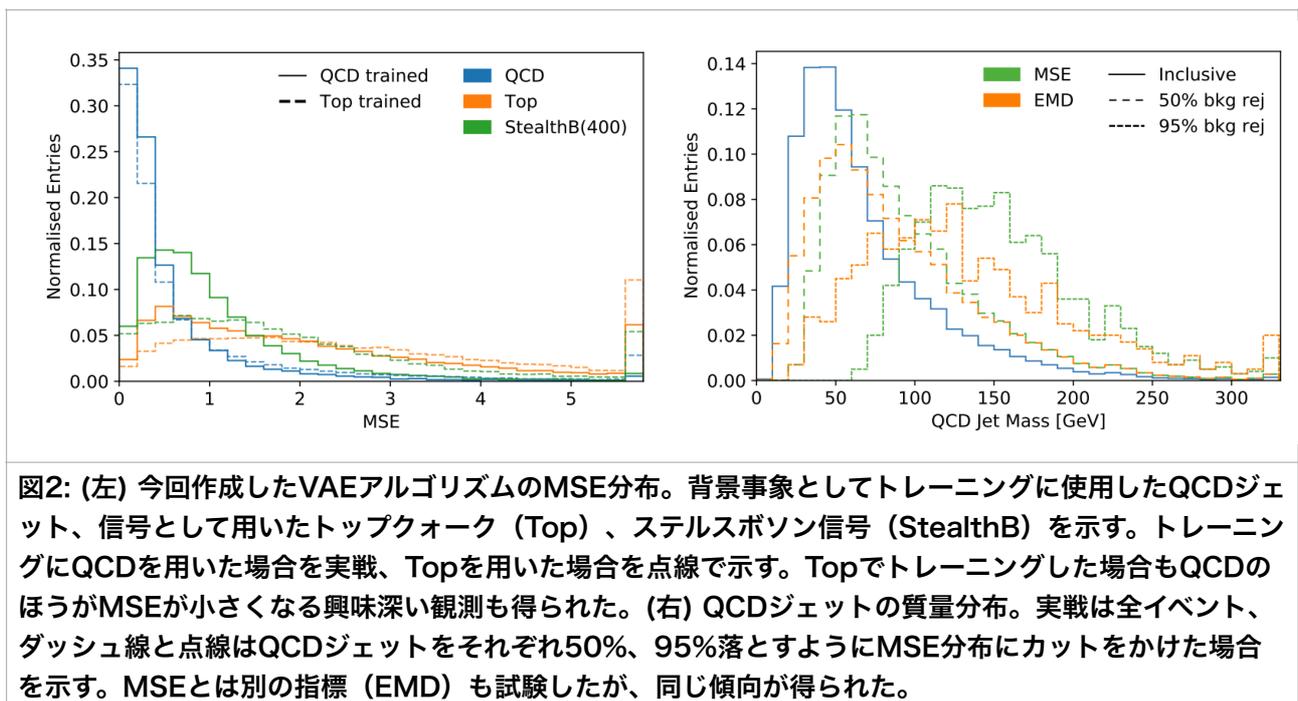


図2: (左) 今回作成したVAEアルゴリズムのMSE分布。背景事象としてトレーニングに使用したQCDジェット、信号として用いたトップクォーク (Top)、ステルスボソン信号 (StealthB) を示す。トレーニングにQCDを用いた場合を実線、Topを用いた場合を点線で示す。Topでトレーニングした場合もQCDのほうがMSEが小さくなる興味深い観測も得られた。(右) QCDジェットの質量分布。実線は全イベント、ダッシュ線と点線はQCDジェットをそれぞれ50%、95%落とすようにMSE分布にカットをかけた場合を示す。MSEとは別の指標 (EMD) も試験したが、同じ傾向が得られた。