

■ 談話室

CERN Summer Student Programme 2019 参加報告

ブリティッシュコロンビア大学修士 1 年

若井 美帆

miho@phas.ubc.ca

2019 年 10 月 10 日

1 はじめに

2019 年の 6 月 24 日から 8 月 28 日までの 10 週間、スイスのジュネーブに位置する高エネルギー研究所の CERN で Summer Student Programme に参加した。300 人近くの学生が世界中から集まり、講義を受けながら研究に励み、密度の濃い時間を過ごした。私は ATLAS 実験の標準模型を超える物理の研究の 1 つである非共鳴 di-tau 生成の解析の研究に従事した。研究内容と CERN での生活を報告する。

2 活動内容

2.1 講義

プログラムの最初の 5 週間は毎日午前中に講義が開かれた。学生のようなバックグラウンドを考慮し、素粒子物理だけでなくソフトウェアや医療物理まで幅広い内容で講義が行われた。特に FCC や ILC については学生の多くが議論をし、どちらが CERN にとって為になるのかなど、未来を見据えた熱弁をした。CERN での幅広い研究内容を詳しく学べた良い機会となった。

2.2 研究

私は ATLAS 実験の exotics group の解析チームに所属し、リヴァプール大学の Dr. Carl Gwilliam と Prof. Monica D'Onofrio の元で ATLAS 実験の di-tau 事象の感度の研究に関わった。

2.2.1 概要

標準模型は現在の素粒子物理の理論を 1 つにまとめた模型となっているが、自然現象を完全に説明できないケースが多くある。ATLAS では、その理論と自然現象の違いを説明する為の事象を発見すべく、多くの解析が行われている。そのうちの 1 つが陽子と陽子を衝突させた時に 2 つのタウ粒子が生み出される di-tau 事象である。タウ粒子は第 3 世代のレプトン粒子であり、近年 B factory の研究結果が第 3 世代の粒子に新しい物理が存在することを示唆している為[1]、今回はハドロン的に崩壊するタウ粒子に着眼した。また、新しい物理が生成されるエネルギーのスケールが LHC 質量中心エネルギーよりも高い場合の非共鳴探索に対する関心が高まっている。非共鳴探索では粒子を直接観測することはできないが、図 1 でわかるように

不変質量分布の標準模型からの偏差を見て、ヒストグラムの「尾部」に注目することで観測可能な範囲内で新しい物理が現れ始める痕跡を見ることができる。ATLAS では以前、di-muon および di-electron 事象、また di-jet 事象に対して非共鳴探索を行ったが、di-tau は今回が初めてであった。さらに、第 3 世代は他の世代より重い質量を持ち、したがってヒッグス粒子と強く結合することから ATLAS にとっては重要な事象と考えられる。もし ATLAS で di-tau 事象が見られるのならば、どのような特徴を持ったものなのかをシミュレーションを用いて色々な角度から研究した。信号事象、また背景事象のモンテカルロデータはすべて積分ルミノシティが 139 fb^{-1} である Run-2 データと同じになるようスケールされている。

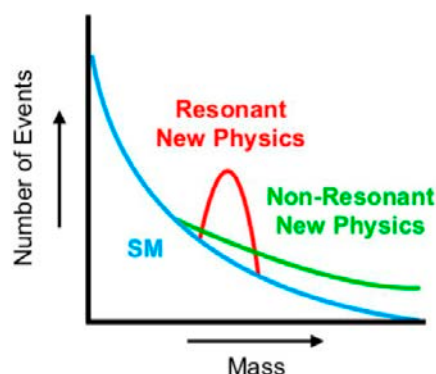


図 1 非共鳴と共鳴のヒストグラムの違い。

2.2.2 信号事象

研究をしていた信号事象は、最終的に 2 つのタウ粒子が生成される接触相互作用の事象である。さらに、信号事象と背景事象が建設的、相殺的に干渉し、異なる感度を示すことからこれらの違いも研究した。右巻き、左巻きとカイラリティにおいても組み合わせがあるため、8 つの異なるカイラル構造を考察した。非共鳴探索であることから、エネルギースケールの Λ を 1 TeV から 30 TeV に設定し、感度の研究を行った。今回の研究では主に接触相互作用の s チャンネル図を探索したが、メディエーターがレプトクォークになる t チャンネル図も将来は探索する可能性がある。

2.2.3 背景事象

背景事象は以下である。

- $Z \rightarrow ee + \text{jets}$
- $W \rightarrow \tau\nu + \text{jets}$
- $tt \rightarrow b\bar{b}W^+W^- \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-\nu\bar{\nu}$
- $Z \rightarrow \tau^+\tau^- + \text{jets}$
- $qq/gg/qg$ (multi-jets)

背景事象は Z ボソン, W ボソンなどの崩壊による事象がほとんどであり, 唯一完全に根絶することのできない背景事象は Z ボソンからタウ粒子が 2 つ生成される事象である。その他の事象はすべて適切な事象選別をすることによって減らすことができる。

2.2.4 解析フレームワーク

解析はすべて ATLAS SUSY Simple Analysis Framework というフレームワークを使い, ニュートリノなどの見えない粒子を考慮しない visible tau の事象再構築を行なった。さらに, 検出器の smearing や, ジェットがタウ粒子に見える場合の偽タウ粒子なども考慮した検出器の反応も解析に取り入れた。

2.2.5 事象選別

研究の結果, 最適な事象選別は以下になった。

- ハドロン的に崩壊するタウ粒子の数が 2 以上
- B-jet の数が 0
- MET Significance が $3.5 \text{ GeV}^{\frac{1}{2}}$ 以下
- エネルギー値が高い方のタウ粒子の Transverse Momentum が $40 \text{ GeV}/c$ 以上

タウ粒子はレプトン的にもハドロン的にも崩壊することができるが, ハドロン的なタウ粒子しか扱わないため, ハドロン的なタウ粒子の数を選別に使った。MET Significance とは, 失われた横方向運動エネルギーを事象当たりの横方向運動エネルギーの和の平方根で割った値である。これを用いてニュートリノにより失われた横方向運動エネルギーが多い $W \rightarrow \tau\nu$ 事象を減少させた。B-jet 数の選択は, 少なくとも B-jet が 2 つある tt バックグラウンドを減らすことができる。信号事象を減らさずに $Z \rightarrow \tau\tau$ 背景事象を減らすには, エネルギー値が高い方のタウ粒子の Transverse Momentum が $40 \text{ GeV}/c$ 以上であることを要求するのが最適である。

2.2.6 結果

信号事象と背景事象を分けるために使用した変数の中で重要な変数が 3 つあった。それは, 不変質量, $\cos(\theta^*)$, χ である。 $\cos(\theta^*)$ は, タウ粒子がコリンズスーパーフレーム内にあるときの, 入ってくるクォークに対するタウ粒子の放出角であり, この変数は信号事象を見極める為に驚くほど良い効果を示した。 χ は以下の式に沿ってタウ粒子の rapidity の差 (y^*) を使って計算された。

$$\chi = e^{2|y^*|}$$

これらの変数の有意性は, 信号事象の数をとり, それを背景事象の総数の平方根で割った性能指数 (figure of merit) を用いて評価した。

図 2 で示しているのは不変質量のヒストグラムである。背景事象が塗りつぶされたものであり, 赤い線が信号事象の感度を表している。信号事象の不変質量が上がるにつれ性能指数が良くなっていく状態は, 共鳴が LHC における感度範囲を超える為, その共鳴の始まりである「尾部」が見える状態である。さらに, 建設的干渉よりも, 相殺的干渉の方が感度がよく, これは以前行われた di-lepton の解析結果と反対の結果が出た。さらに性能指数を高める為, $\cos(\theta^*)$ として χ も含めた解析を進めた。

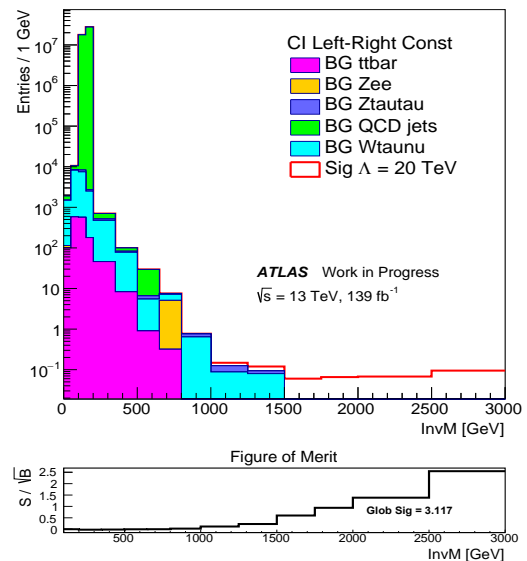


図 2 両方のタウ粒子のカイラリティが右巻きであり, 建設的干渉を起こしている場合の不変質量のヒストグラム。 Λ スケールは 20 TeV に設定されている。

$\cos(\theta^*)$ として χ の研究については不変質量の選別を先にした上でモンテカルロデータの解析を進めた。図 3, 4 では選別を二重にすることで, 性能指数を改善できることが判明し, また $W \rightarrow \tau\nu$, $Z \rightarrow \tau\tau$ の背景事象が一番多いことも明らかになった。

$\cos(\theta^*)$ は新たに導入した変数であったが, 分布が一番特徴的であること, また性能指数が一番良いことから 3 つの変数のうち一番有効であると考えた。さらに, 不変質量のしきい値を高くすればするほど選別ははっきりとすることもわかった。

今回の研究では ATLAS で接触相互作用による di-tau 事象の解析が初めてであったが, ATLAS に感度があることがわかった。不変質量だけを見ると, Λ スケールは 10 TeV くらいまでしか見られないが, χ , $\cos(\theta^*)$ を組み合わせることにより 30 TeV までの感度があると結論した。さらに, High Luminosity LHC においても期待ができそうな研究内容となった。

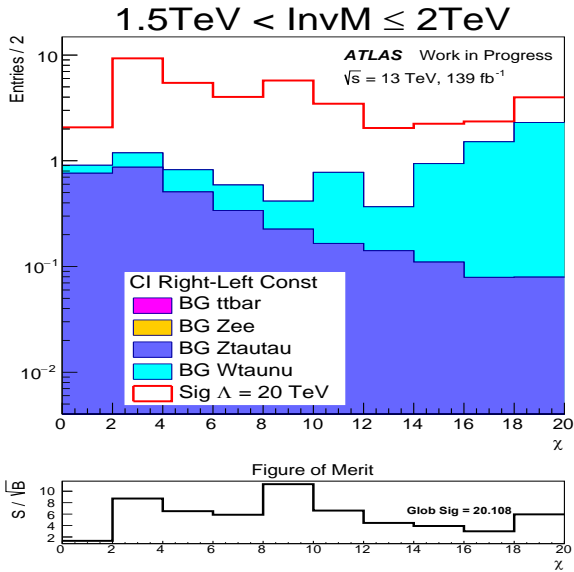


図 3 タウ粒子のカイラリティが右巻きと左巻きで異なり、建設的干渉を起こしている場合の χ 変数のヒストグラム。 Λ スケールは 20 TeV に設定され、不変質量に 1.5 TeV 以上 2 TeV 以下の選別が加えられた。

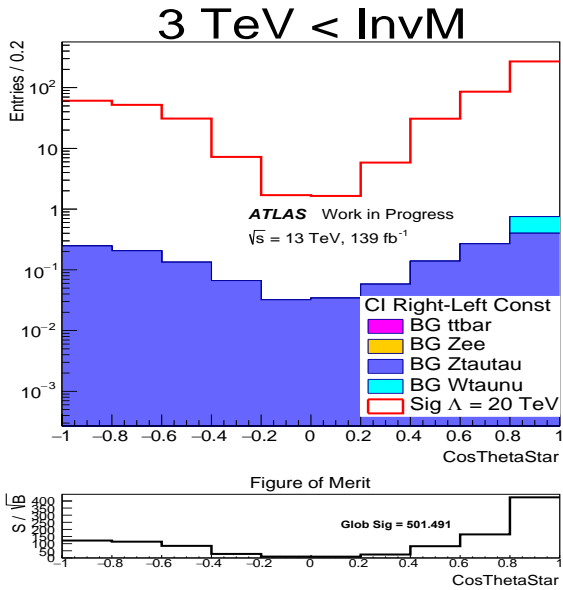


図 4 タウ粒子のカイラリティが右巻きと左巻きで異なり、建設的干渉を起こしている場合の $\cos(\theta^*)$ のヒストグラム。 Λ スケールは 20 TeV に設定され、不変質量に 3 TeV 以上の選別が加えられた。

2.2.7 これから

今回の解析はシミュレーションのモンテカルロデータだけであったが、もしこれからデータを解析することになると、どのように非共鳴の分布をデータから読み取るのか、どのようにヒストグラムなどに fitting を行うのかなどの統計における問題点が生じる。また topology の違うレプトクォークなどの事象も研究材料として残っている。もしかしたらこれが誰かの博士号の研究になるかもしれないため、今後どのように解析が進むのかを見るのが楽しみである。

3 CERN での生活

高校生の頃から憧れていた CERN Summer Student Programme に参加できて本当に嬉しく思い、有意義な夏が過ごせた。物理学の世界で同志が世界中にできたことがこれからの自分の人生においてとても貴重になっていけらるうと感じた。平日は研究に勤しみ、週末は観光をして楽しむというバランスのとれた生活ができて充実した毎日が送れた。大学院で研究をする身として今回の経験が良い活力となった。



図 5 CMS のツアーに行った時の様子。著者は前列の右から 3 番目である。

4 今後の抱負、プログラムへ望むこと

今回の研究で培った技術をぜひ今後の自分の研究に活かして行きたいと思った。個人的にはまだまだ自分の知らない研究分野があり、色々な分野に興味を持つことが大事であることがわかった。

今後もっと参加者が増えること、また様々な分野から日本人が選出されることを望む。海外在住の日本人を含め、たくさんの学生が色々な大学からこのプログラムに関心を持ってもらえれば良いと思う。過去の参加者として自分もたくさんの人にこのプログラムを広めていこうと思う。

5 謝辞

CERN Summer Student Programme に参加するにあたり、多くの方にお世話になりました。応募するにあたり推薦状を書いてくださった香取先生、花垣教授にお礼を申し上げます。また KEK の皆さま、特に野村様、甲木様、大変お世話になりました。指導教官として研究を見てくださった Carl Gwilliam 氏と Monica D’Onofrio 氏は忙しい中いつも丁寧に指導をして下さり大変感謝しています。最後に、日本からの参加者である皆さんのおかげでいい夏が過ごせました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

[1] Suzanne Klaver. Lepton flavour universality in charged-current B decays. In 17th Conference on Flavor Physics and CP Violation (FPCP 2019) Victoria, BC, Canada, May 6-10, 2019, 2019.