

学生海外調査研究	
LHC-ATLAS 実験におけるウィークボソン散乱過程を用いた レプトンフレーバーの破れの探索	
氏名 浅井 香奈江	理学専攻
期間	2019年7月9日～2019年9月9日
場所	スイス・ジュネーヴ
施設	欧州原子核研究機構(CERN)

内容報告

1. 研究背景

1970年代に素粒子標準模型は体系化され、2012年にLHC実験においてヒッグス粒子が発見されたことにより、標準模型が予言する全ての素粒子が発見された。標準模型には、電子、ミューオン、タウレプトンという3種類の荷電レプトンが存在し、3世代を構成する。世代の違いは、ヒッグス場を介して与えられる質量によってのみ特徴付けられるため、ヒッグスセクターをより詳細に調べることは、質量の起源や、素粒子の世代構造の理解に繋がる。

ニュートリノ振動の結果から、ニュートリノには有限の質量があることが示された。フェルミオン間の質量階層性問題を理解するためには、ヒッグス粒子による質量起源の問題を理解する必要がある。とりわけ、ニュートリノの質量は、その小ささから、全く質量起源の問題については不明である。荷電レプトンフレーバーの破れ(charged Lepton Flavor Violation: cLFV)を見ることによって、レプトンセクターの質量問題を紐解く研究がなされている[1]。図1のように、陽子から放射されたWボソンがニュートリノを介して散乱し、そこに荷電ヒッグス粒子がループ効果として現れることを想定する。すると、荷電ヒッグス粒子とタウレプトンの質量差による抑制の緩和、湯川相互作用の大きさが粒子の質量に比例すること、2つの真空期待値の比($\tan\beta$)の効果によって、観測に掛かる可能性がある」と指摘されている。

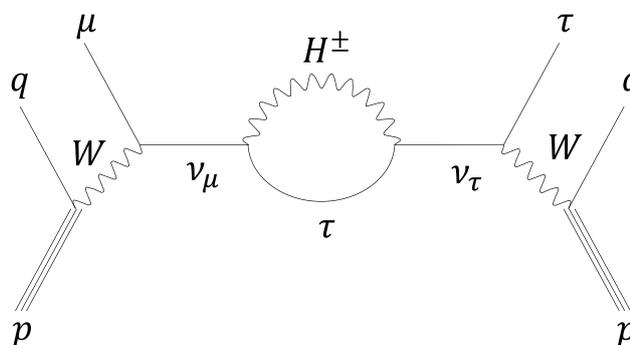


図1. ニュートリノ振動を介した cLFV 事象.

電弱対称性の破れは真空期待値 246 GeV のエネルギースケールで起こるため、世界最高エネルギー13 TeVでの陽子陽子衝突事象を観測しているLHC-ATLAS実験で観測できる可能性がある。よって申請者は、LHC-ATLAS実験において、陽子・陽子衝突によって生成されたウィークボソンがニュートリノ振動を介して散乱し、荷電レプトンフレーバーが破れる事象を探索する。終状態の荷電レプトンの1つである高運動量のタウレプトンは、ハドロニック崩壊する際、崩壊粒子は非常に細いジェットとして観測され、荷電粒子の飛跡を再構成するピクセル検出器の分解能を超えて、2つ以上の粒子が同時に同じピクセル($50\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$)を通過してしまう。この場合、荷電粒子の飛跡は同一に見えてしまうため、正しく2つ以上の荷電粒子飛跡として再構成されない。そこで、これまで解析に用いられてこなかった、ピクセル検出器のエネルギー損失量(dE/dx)の情報を積極的に使う新しい解析手法を開発し、既存の物理解析のアルゴリズムに組み込むことで、タウレプトンの同定効率を向上させる。これによって新物理への感度を最大化し、世界で初めて、荷電レプトンフレーバーの破れが起こる事象を発見することを目指す。

ピクセル検出器は最内層に位置するため、高い放射線を受ける。放射線損傷により、電荷収集効率が低下すると、荷電粒子が通過した際に生じる信号の電荷量が不足し、荷電粒子のヒットの情報を失

う可能性がある。すると飛跡検出効率が下がったり、飛跡の位置分解能が悪化するため衝突点の特定能力が低下したりする。物理解析の精度を良くするためには、ピクセル検出器の全データ収集期間にわたる安定した性能が重要となる。よって、現在開発中の放射線損傷のシミュレーションサンプルと実験データを比較することでピクセル検出器の放射線耐性の理解を深め、全期間に渡ってピクセル検出器を安定して運転するための研究を行う。

本研究は、LHC-ATLAS 実験におけるデータ解析を行うため、現地に長期滞在して、頻繁に研究打ち合わせや議論を重ねる必要がある。この度は、平成 31 年度お茶の水女子大学文部科学省特別経費（国立大学機能強化分）「グローバル女性リーダー育成カリキュラムに基づく教育実践と新たな女性リーダーシップ論の発信」プロジェクト「学生海外派遣」プログラム「学生海外調査研究」の援助により、調査を行なった。

2. LHC 実験

Large Hadron Collider(LHC)は、スイス・ジュネーヴ近郊にある欧州原子核研究機構(CERN)に設置されている大型陽子陽子衝突型円形加速器である。LHC は地下 100 m の位置に建造されており、その周長はおよそ 27 km で、異なる加速器を組み合わせることで段階的にエネルギーを上げていき、最終的に 7 TeV まで加速させることができる。電子に比べて十分重い質量を持った陽子を加速させるため、シンクロトロン放射によるエネルギー損失が小さく、重心系エネルギー 14 TeV という世界最高エネルギーでの陽子衝突を可能にする。陽子ビームは、バンチと呼ばれる陽子の固まりを 1 つの集合体とし、バンチ同士を衝突点でしばって衝突させる。

LHC は、2010 年に重心系エネルギー 7 TeV で Run1 の稼働を開始し、2012 年には 8 TeV で運転した。2013 年から 2 年間の長期シャットダウン後、2015 年から 2018 年まで 13 TeV での Run2 の運転を行なった。今後は、長期シャットダウン後、2021 年から 2023 年の Run3 を経て、2026 年からはルミノシティを大幅に増強した High-Luminosity LHC が稼働し、最終的に 3000 fb^{-1} のデータ取得を予定している。

LHC 実験の主な目的は、標準模型の精密測定や、それを超える新しい物理現象の探索を行うことである。図 2 をみてわかるように、反応断面積はエネルギー依存性があるため、非常に高いルミノシティに加え、重心系エネルギーが大きくなることで、ヒッグス粒子の探索や TeV 領域にあると思われる超対称性粒子や余剰次元の直接探索が可能になる。

3. ATLAS 検出器

LHC には 8 つの衝突点があり、そのうちの 1 つに、ATLAS(A Troidal LHC ApparatuS)検出器が設置されている。ATLAS 検出器は 2010 年から 2018 年までの間に、重心系エネルギー 7 TeV で 5.3 fb^{-1} 、8 TeV で 21.7 fb^{-1} 、13 TeV で 148.6 fb^{-1} のデータを記録した。生成される粒子を全て検出して、それぞれの種類のエネルギーと運動量を測定するために、衝突点に近い側から内部飛跡検出器、ソレノイド電磁石、カロリメータ、トロイド電磁石、ミュオン検出器というように、色々な検出器を組み合わせ配置している。高エネルギー、高ルミノシティを誇る LHC の環境で安定して粒子を検出し続けるためには、耐放射線性の高い電子機器とセンサーが必要不可欠である。

4. ピクセル検出器

本研究で使用するピクセル検出器は、衝突点に最も近い位置に設置されている検出器で、バレル部 3 層、エンドキャップ部 3×2 層から構成されている。バレル部は内側から、B-Layer, Layer1, Layer2, エンドキャップ部は内側から、Disk1, Disk2, Disk3 と呼ばれる。ピクセル検出器にはシリコンセンサーが用いられている。荷電粒子がシリコンセンサーを通過すると、エネルギーを損失した分に比例して電子正孔対を生成する。生成された電子たちは電場をかけることで電極に収集され、設定した閾値を超えた信号がヒットとして記録される。信号の読み出しは、特定用途向け集積回路(Application Specific Integrated Circuit:ASIC) を用いて行われる。LHC では、2015 年からルミノシティを $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に引き上げて運転を再開したが、既存の検出器は $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティに対応するよう作られているため、衝突事象の増加によって ASIC のデータ転送帯域が不足してしまうことが分かっていた。また、放射線損傷により B-Layer が動かなくなることが想定されていたため、以上の問題を補うために、Run1 と Run2 の間のシャットダウン中に Insertable B-Layer(IBL)と呼ばれる新規のピクセル検出器を、既存のピクセル検出器のさらに内側にインストールした。IBL は検出効率の維持だけでなく、衝突点により近い位置から検出できるようになるため、飛跡と崩壊点の再構成能力が大幅に向上し、物理解析の精度を上げることも期待されている。

5. ピクセル検出器の放射線損傷問題

ピクセル検出器は陽子陽子衝突点に最も近いいため、放射線損傷の影響を受けやすい。図 2 は Run2 の間の各層の積算放射線量の変動を示しており、衝突点に近いほど放射線損傷の影響が大きいということがわかる[2]。シリコンセンサーが放射線を受けると、原子をはじき出して格子欠陥を生成したり、核反応により原子を核変換する。それに伴って、内部電場が変化し、電子のドリフトが変わったり、電子が捕獲されることによって、全空房化電圧が増加したり、電荷収集効率が下がる。電荷収集効率が低下すると、荷電粒子が通過した際に生じる信号の電荷量が不足し、荷電粒子のヒットの情報を失う可能性がある。すると飛跡検出効率が下がったり、飛跡の位置分解能が悪化するため衝突点の特定能力が低下したりするため、安定した運転を維持することが物理解析の精度を良くする鍵となる。上記のようなセンサー内部の電子正孔対、信号生成モデルは、ATLAS 実験で独自に開発が行われている[2]。ピクセル検出器の安定した運転を維持するためには、ピクセル検出器を放射線損傷が考慮されていない既存のシミュレーションと、放射線損傷が考慮された現在開発中のシミュレーションサンプルを実験データと比較することで、放射線耐性の理解を深めることが必要不可欠である。

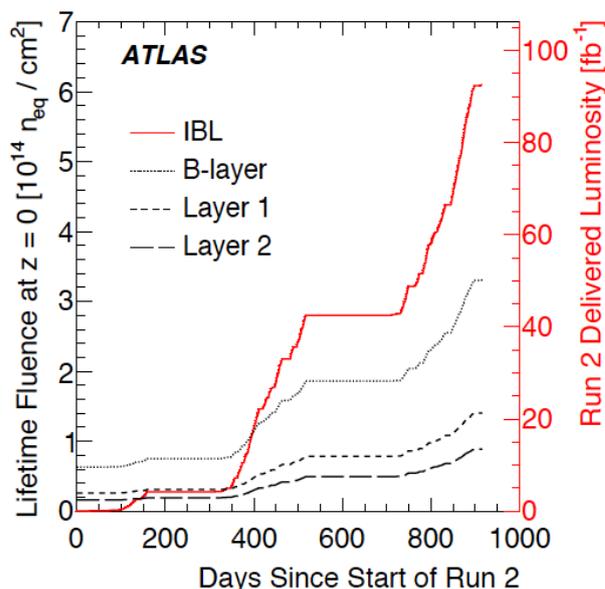


図 2. Run2 における積算放射線量の推移[2].

6. 放射線損傷の測定方法

放射線損傷の測定として、これまでは漏れ電流とローレンツ角の測定が行われてきた。漏れ電流とは、格子欠陥によって結晶中のエネルギー準位が変化し、絶縁体から漏れ出す電流のことである。ローレンツ角とは、電荷収集の際にローレンツ力によって正孔の移動方向が曲げられた角度のことである。どちらも、放射線損傷の影響を間接的に精度よく測定することが可能である。

執筆者は、上記の従来の方法に加えて、ピクセル検出器で測定された dE/dx の情報を用いた電荷収集効率の測定を、新たな放射線損傷の測定方法として提案する。4章で説明したように、シリコンセンサー内で生成される電荷量は、 dE/dx に比例する。また、 dE/dx はベーテ・ブロッホの式によって理論的に予想可能である。よって、実際に測定された dE/dx と理論値の比をとると、電荷収集効率を求めることができる。5章で説明したように、電荷収集効率は放射線損傷に直接的に効いてくる量であるため、従来の間接的な測定方法と組み合わせることで、放射線耐性の理解に対して、相乗的な効果が得られることが期待される。

7. 電荷収集効率の導出方法

ベーテ・ブロッホの式によると、低運動量領域での dE/dx と運動量の関係は、粒子の種類によって異なる。電荷収集効率は粒子に依らず一定であるため、複数の粒子の情報を使用した場合、各々から求まる電荷収集効率は厳密に一致する必要がある。本研究では、低運動量領域における質量の異なる飛跡の情報を積極的に利用し、パイ中間子、K 中間子、陽子の 3 つの粒子の電荷収集効率が一意に決まるように較正することで、精度よく、センサー内で生成された収集電荷量を基準とする絶対的な電荷収集効率を求める手法の開発した。

まず、運動量と dE/dx の 2 次元分布を作る。放射線損傷に依る電荷収集効率の経年変化は入射粒子の全運動量領域に渡って一様であると仮定し、ベーテ・ブロッホの式の形は変えずにスケールのみが変わるとして 2 次元分布をワンパラメータでカイ自乗フィットする。その際、放射線損傷に依る効果のみを取り出すために、理論予想が測定値に合うように補正を行なう。

①ベーテ・ブロッホの式をピーク位置に補正する

ベーテ・ブロッホの式は dE/dx の平均値を予想するが、薄いセンサーを通過する荷電粒子の dE/dx の分布は非対称な形の分布になるため、平均値とピーク位置が異なるため、ベーテ・ブロッホに似た関数系でパラメータ化する。

②理論予想が測定値に合うように補正

理論値と測定値は以下の要因によってずれが生じる：

- ・ 閾値や飽和効果によって一部の電荷の情報が失われる
- ・ シミュレーションの計算精度
- ・ 飛跡再構成はパイ中間子を仮定して行われるため、K 中間子や陽子の飛跡は低運動量領域でバイアスされる

上記の効果は、放射線損傷が考慮されていないシミュレーションサンプルの情報を用いて補正した。

補正①、②を行なった結果、図 3 のように補正前と比べて理論曲線がピークに綺麗に乗るように改善された。

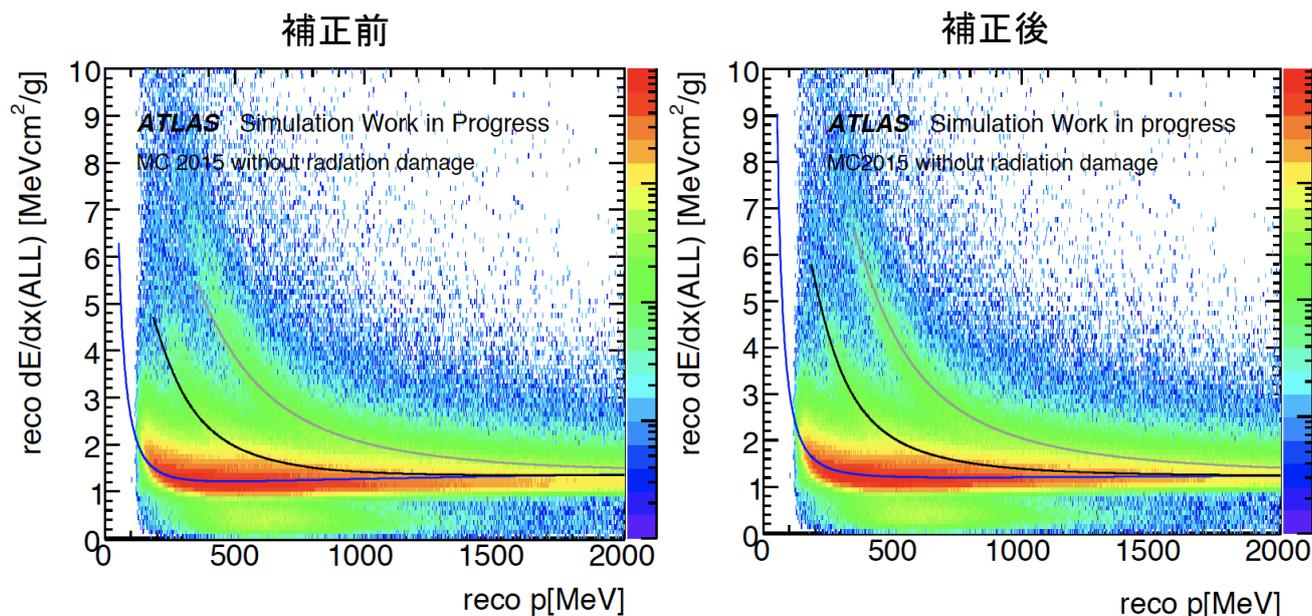


図 3. 補正前(左)と補正後(右)のフィット結果の比較。

8. 系統誤差の評価

上記の電荷収集効率の測定方法は以下のような原因で誤差が生じるため、その大きさを見積もった。

①ASIC 側の電荷補正による系統誤差：

ASIC が放射線損傷を受けると、図 6 のように収集電荷量がドリフトしてしまうため、数日おきに電荷補正を行なっている。使用した実験データは、電荷補正直後以外のものも含まれているため、そのふらつきを系統誤差とした。

②フィット・モデルの系統誤差：

7 章で説明した補正を行うことで、放射線損傷の効果のみを取り出した電荷収集効率が測定できるので、フィット・モデルが正しければ、放射線損傷を考慮していないシミュレーションサンプルでフィットした場合は、電荷収集効率は厳密に 1 になるはずである。よって、フィットして得られた結果の 1 からのずれを系統誤差とした。

①、②の方法で系統誤差を評価した結果、電荷補正の系統誤差は約 1%程度であることが分かった。また、衝突点に近い内側の検出器ほど、放射線損傷の影響が大きく、短期間で収集電荷量がドリフトしてしまうため、電荷補正の系統誤差が大きい傾向にあることが分かった。また、各層のごとのフィット・モデルによる系統誤差は約 8%程度と大きいですが、全層のエネルギー損失量の合計値を通過距離の合計値で割った飛跡の dE/dx に関する系統誤差は約 1%まで抑えられることが分かった。カイ自乗フィットは dE/dx の分布がガウス分布であることを仮定しているが、7 章で説明したように、センサーが薄いと非対称な分布になってしまうため、各層の場合はフィット・モデルの不備によって系統誤差が大きくなってしまう。一方で、飛跡の dE/dx は、全層の通過距離の合計値であるためセンサー厚を稼ぐことができ、 dE/dx の分布がガウス分布に近づくため、系統誤差が小さくなる。この事実は、今後、各層のフィット関数を非対称な形に改善することで、系統誤差が小さくなる可能性があることを示している。

9. 研究経過及び得られた結果

このような測定を、Run2の間に収集された実験データと放射線損傷ありのシミュレーションサンプルに適用し、ピクセル検出器の積算放射線量に対する電荷収集効率の依存性を調べた(図4)。1層目のIBLは4章で説明したように、Run2から新しく挿入された検出器であるため除外して比較を行なった。電荷収集効率は、データもシミュレーションも下降傾向であり、2~3層目が一直線上に並んでいる。これは、シミュレーションがデータの傾向を良く再現できており、かつ、電荷収集効率の導出方法の妥当性を示している。また、データに対してシミュレーションがコンスタントに大きいことが分かる。これは、2~3層目はRun1から使用しているためRun2開始の時点で放射線損傷をある程度受けているのに対し、シミュレーションはRun2開始の時点で各層の放射線損傷がないことを仮定しているのが原因である。これらの結果をまとめて、日本物理学会2019年秋季大会にて発表した[3]。

本海外調査研究は、博士論文を詳細にするだけでなく、その後の研究内容を展望できるものとなった。また、現地で活躍する女性研究者と面会できたことは、執筆者にとって大きな刺激となった。そうした点から、国際的な女性リーダーの育成に関わる本海外調査研究の目的は、達成されたといえる。

9. 今後の展望

今後、Run3において、 220 fb^{-1} のデータ収集が見込まれている[4]。9章の結果から、Run3終了時点での電荷収集効率は約70%程度になることが予想される。これは、1つのピクセルに生成された電荷が全て収集される場合は問題がないが、複数のピクセルに跨って収集された場合、ヒット検出効率が低下し、物理解析に影響を与える可能性がある。よって、Run3開始前までに閾値を変更するなどの対応を考える必要がある。Run3開始までに、8,9章で述べたようなフィット・モデル及びシミュレーションの問題点の改善を行い、本研究を論文にまとめ、Run3から放射線シミュレーションを実装する予定である。

10. 謝辞

本研究を進める上でお世話になった方々に、この場を借りて深くお礼申し上げます。平成31年度お茶の水女子大学文部科学省特別経費(国立大学機能強化分)「グローバル女性リーダー育成カリキュラムに基づく教育実践と新たな女性リーダーシップ論の発信」プロジェクト「学生海外派遣」プログラム「学生海外調査研究」に採択いただき、貴重な調査研究を実現させていただきました。指導教員である河野能知准教授には、研究の進め方や考え方についてご指導いただきました。現地において、KEKの津野総司講師には、研究に関することをはじめ、発表の際も親身になって指導していただきました。KEKの田窪洋介助教には、ピクセル検出器の解析について、様々なアドバイスを頂きました。ATLAS実験ピクセルグループのMartin Kocian氏、Marco Battaglia氏には、ピクセル検出器に関する詳細なアドバイスをいただきました。ICEPPの江成祐二助教、奥村恭幸准教授には、物理解析に関して、初歩的などころからアドバイスをいただきました。最後に、ご協力頂いた全ての方々に重ねて深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] B. Aubert et al. (BABAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. 104, 021802 (2010)
- [2] ATLAS Collaboration, arXiv:1905.03739 (JINST に投稿中)
- [3] 浅井香奈江, 河野能知, 津野総司, 田窪洋介, 陣内修, 他 ATLAS 日本シリコングループ, 「LHC-ATLAS 実験ピク

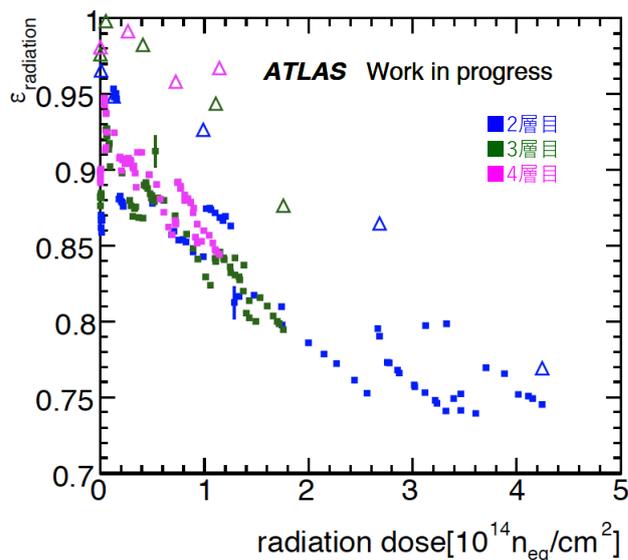


図.4 Run2における積算放射線量に対する電荷収集効率の変動。四角が実験データ、三角が放射線損傷ありのシミュレーションサンプル。

セル検出器のエネルギー損失量を用いた放射線耐性に於ける特性研究」,日本物理学会 2019 年秋季大会, 山形大学, 2019 年 9 月[口頭・査読なし]

[4] N. Karastathis et al., presented at 9th LHC Operation Evian Workshop (2019)

あさい かなえ／お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科 理学専攻

指導教員によるコメント

CERN 研究所に滞在中、浅井さんは ATLAS 実験で 2015～2018 年にかけて取得された素粒子反応のデータを基に、その期間中のピクセル検出器の性能について詳細な解析を行いました。特に、データ取得に伴う放射線損傷により検出器の性能が劣化していく様子を、収集電荷効率を測定することで定量的に調べました。放射線損傷による性能劣化を示す明確な結果を得て、帰国後にこれらの結果をまとめて、9 月中旬に行われた日本物理学会にて口頭発表をしました。

博士課程を通して、浅井さんは ATLAS 実験で取得されたデータを使ってレプトン・フレーバーの破れを引き起こす素粒子反応過程を探索する解析をする予定です。そこではピクセル検出器の電荷量を利用した解析方法を開発する予定で、今回の滞在中にピクセル検出器の性能を詳しく理解できたことは今後の研究にも大いに役立つものになったと思います。

(お茶の水女子大学基幹研究院自然科学系・河野 能知)

Search for the Charged Lepton Flavor Violation Using the Scattering of Weak Boson

Kanae Asai

All particles of the standard model was completed discovery in 2012. The standard model has three types of charged leptons: electron, muon, and tau. These differences are only characterized by the mass given through the higgs field. Therefore, a studying the higgs sector leads to an understanding of the origin of mass. I search for the violation of the charged lepton flavor, assuming that the W boson emitted from the protons scatters through the neutrino and the charged higgs particle appears as a loop effect there. As the first step, in order to improve the accuracy of physical analysis, I will study the radiation resistance of pixel detectors.