

高エネルギー素粒子物理学実験研究

研究代表者 寄田 浩平
理工学術院総合研究所（先進理工学部物理学科） 准教授

1. 研究課題

現代の素粒子物理学は LHC 実験のような高エネルギー加速器を用いたエネルギーフロンティア実験によってテラスケール (TeV 領域) の現象を観測することが可能となり、その発展が急速に進んでいる。本研究は、世界屈指のエネルギーフロンティア実験に参加し、ヒッグス粒子の性質解明、また超対称性粒子に代表される全く新しい現象を発見することにより、より深い素粒子像、宇宙像を解明することにある。2012 年 7 月、欧州原子核共同研究機構 (以下 CERN 研究所) における LHC 加速器を用いた ATLAS/CMS 実験で発見されたヒッグス粒子は、今後の素粒子物理学の方向を位置付ける上で重要な意義をもっている。本研究課題は、ATLAS/LHC 実験を利用したさらなるヒッグス粒子の精密測定 (=ヒッグス機構の解明) に向け、湯川結合・質量・スピン・パリティ等のパラメータの多角的な検証や新粒子・新現象探索を行うことである。また、今後の LHC 加速器の高エネルギー化・高輝度化に伴うパイルアップ問題を解決するための新しいトリガーハードウェアシステムの開発構築を主軸として、その利用方法 (オンライントリガーでの τ 識別や衝突点再構成) についても新しいアイデアを提案しながら、より汎用的な研究を展開している。

一方、暗黒物質探索を目的とした高感度検出器 (気液 2 相型アルゴン光検出器) の開発も進めた。この検出器は、ニュートリノ CP 位相測定や陽子が K 粒子とニュートリノに崩壊する過程での陽子崩壊探索にも特に有用であるが、本研究の主目的としては低質量領域 ($\sim 10\text{GeV}$) 暗黒物質発見 (又は棄却) に向けた高感度化開発に焦点を当てている。2013 年度には 75 リットルの容器を用いて、アルゴン蛍光 7.3 pes/KeVee という世界最高峰の光検出効率を得ることに成功し、 γ 線源と中性子線源を利用して波形分別法による γ 事象と信号事象の識別能力も評価した。その結果、ターゲットとしている低質量領域の暗黒物質をとらえるための条件をクリアする目処をつけることができた。この研究に関する成果は共同研究者である理工研次席研究員・田中雅士氏の年次報告に記述されているため、この報告書では詳細を割愛することとする。

2. 主な研究成果

2.1 ATLAS/LHC 実験 (重心系エネルギー 8TeV の陽子・陽子衝突型実験)

ATLAS 実験における早稲田グループの成果を以下の 3 つの項目に大別して記述する：

1. ヒッグス粒子が τ レプトン対に崩壊する過程の物理解析 (= τ -Yukawa 結合測定)

2012 年度までに発見されていた“ヒッグス粒子”は、主に $\gamma\gamma$ と ZZ 崩壊過程の解析からであり、その粒子はスピン・パリティも含め、標準理論と矛盾しないことを示すことができていた。無論、ヒッグス粒子のゲージ結合やループ効果の議論も重要だが、もっとも大事な検証はヒッグス粒子とフェルミオンとの直接結合 (湯川結合) を確認することである。これまでの研究成果を活用し、2013 年度は特に $\tau\tau$ に崩壊する過程の探索を進めた。 $H \rightarrow \tau\tau$ 過程は、 τ の崩壊モードにより $lelep$, $lephad$, $hadhad$ の三種類に分類できるが、

早稲田大学はその中でも最も発見感度の高い $lep\text{-}had$ 過程を用いた。図 1 は、8TeV、20fb-1 のデータに対して多変量解析を駆使して事象ごとにその“信号らしさ”を計算、そのスコア毎の S/B 比の対数をとった分布である。結果として、信号領域にあきらかな超過を観測することに成功し、その優位度は 3.2σ であった。図 2 は、S/B で重み付けしたときの $\tau\tau$ 質量分布であり、他チャンネル同様、125GeV の質量を示唆するものである。これらの結果から、ヒッグス粒子の τ レプトン対崩壊過程の世界初の証拠を示すことができた。

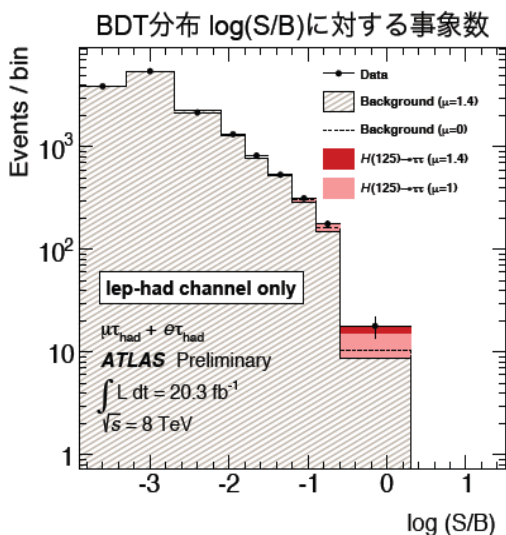


図 1: $\tau\tau$ ($lep\text{-}had$) 過程の BDT 分布

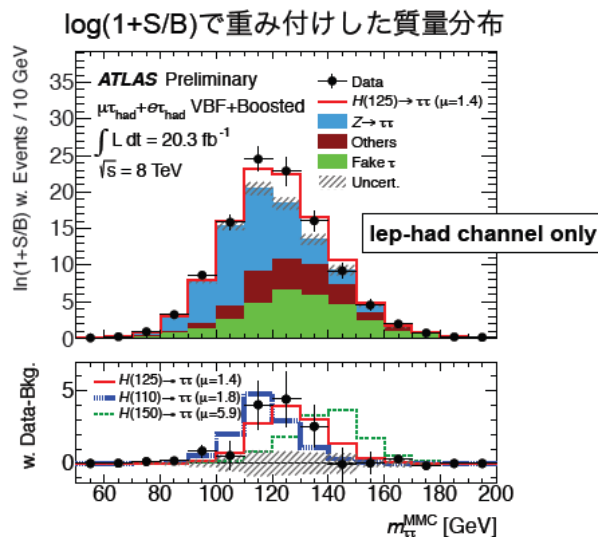


図 2: S/B で重み付けした $\tau\tau$ 質量分布

2. 新しい高速飛跡トリガー回路システム (FTK) の開発・構築

ATLAS Upgrade として 2014 - 2015 年を目途に挿入が計画されている Fast tracking trigger システム (FTK) のエレクトロニクス回路開発を行っている。本プロジェクトは ATLAS 実験で正式承認されている増強計画の一つである。我々早稲田グループは、実機開発として特に FTK システムの最上流でシリコン検出器から 40MHz という高速通信 (optical fiber) で送信されるヒット情報を受信し、クラスタ化する機能をもつ受信カードの設計を行い、プロトタイプを製作してテストを行ってきた。2013 年度はこの設計をほぼ完遂し、最終実機 (v3.2) を製作 (図 3) し、夏に完成した ATCA 規格で実装されるマザーボード (DF:Data Formatter) との接続テストを行った (図 4)。また、CERN において一部実機テストを行い、これまでの開発が実際に実機レベルで動くことを確認することができた。



図 3: 設計した最終 12 層 IM ボード (v3.2)



図 4: ATCA 規格で実装される DF と 4 つの IM

早稲田大学に構築したテストベンチで debug/monitoring のためのスキームを高速シリアル通信 (I2C) などを利用して確立した。この開発テストと CERN 現場での実装試験を相互に行うことで、効率的で確実な開発を行っており、今後の量産、他システムとの統合試験に万全な体制を整えることができた。

3. FTK のトリガーでパフォーマンスの評価と種々トリガーチェーンでの実装

LHC 実験は現在シャットダウン中であり、2015 年春から 13(→14) TeV の重心系エネルギーで再運転する予定である。より多くの統計量が必要となるため、瞬間輝度は現在よりも増強される予定である。この環境では、パイルアップ現象を効率よく排除し、種々の信号事象を効率的にトリガーする戦略をたてることが重要となる。とくに今後ヒッグス粒子の物理を進める上で重要な課題は、ハドロン崩壊する過程 τ 粒子や b ジェットのトリガー条件を整えることである。そこで本研究は、FTK からの飛跡情報を最大限利用し、とくにパイルアップ現象の効果を汎用的に抑制するための衝突点再構成法の確率と τ 粒子トリガーの新しい実装方法を検討した。

衝突点再構成は、その性能や分解能も重要であるが、トリガーでもっとも重要なことは処理スピードである。一般にオフラインで実装されるアルゴリズムは処理時間が～1 秒程かかるため、トリガー実装には不向きである。そこで、トリガーで実装可能な高速アルゴリズム Fast Vertex Fitter (FVF) を開発した。図 5 は、オフラインで再構成された衝突点 (x 軸) と FVF で再構成された衝突点 (y 軸) の相関図である。FTK は横運動量 1GeV 以上の飛跡に限って再構成を行うため、オフラインとの差 (オフセット) は出てしまうが、この強い相関を利用してパイルアップ効果を事象毎に補正することが可能である。また、FVF の実装時間に関しても概ね 1 ミリ秒以下の処理時間 (Intel Xenon 3.3GHz CPU) で計算できることから、トリガーレベルでも現実的な実装が可能だということを示すことができた。

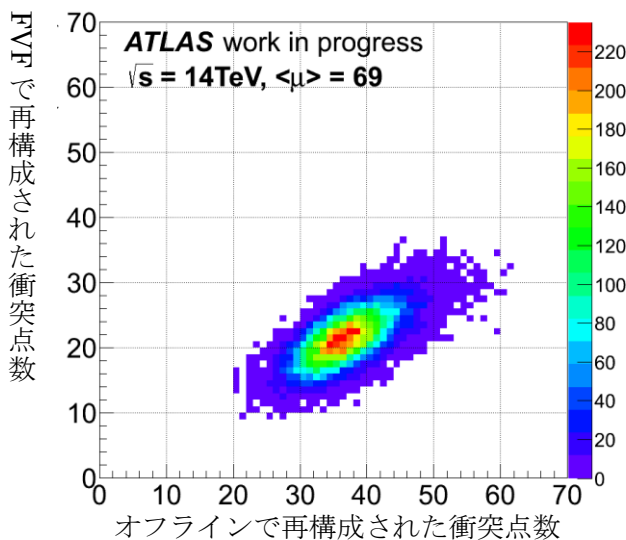


図 5: 再構成された衝突点の比較

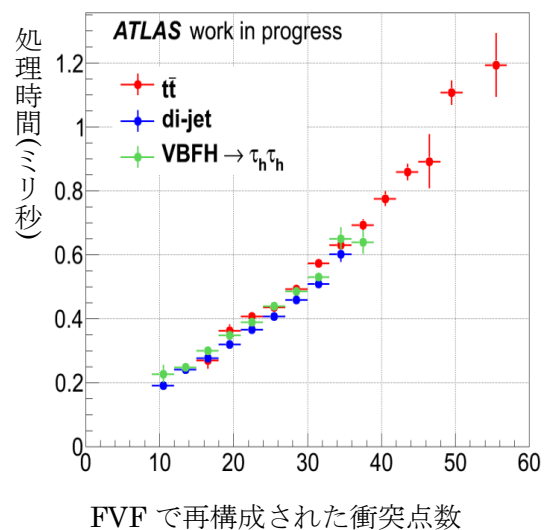


図 6: 衝突点再構成にかかる処理時間

これまでの ATLAS trigger システムではこの事象ごとの衝突点数の情報は使用することができなかったが、FTK システムの導入によりその利用性を議論することができるようになった。したがって今後の Run2 実験で実装されるすべてのトリガーチェーンでのパイルアップ依存性を解消できる可

能性の高い汎用的で強固なツールを供給することができたと考えている。

次にヒッグス機構のさらなる解明や新現象に重要なハドロン崩壊する τ 粒子のトリガー方法の改善も試みた。FTK 飛跡を使うことでこれまで使用できなかった領域の飛跡も使用できることから、 τ 粒子同定に非常に強いインパクトを与えることができる。トリガー初段階で飛跡の数のみを使って背景事象のジェットを棄却し、トリガー効率を飛躍的に効率させるためのアルゴリズムを確立した。図 7、8 はそれぞれ信号効率とジェットフェイク率を示したものである。それぞれに FTK がある場合とない場合の比較がなされている。FTK 導入により、フェイク率を維持・向上させたまま、とくに低い運動量領域の信号事象の選択効率を格段に改善することができることを示した。

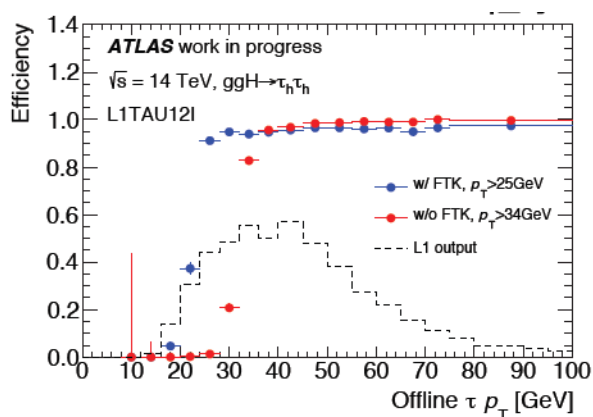


図 7: ハドロニック τ の信号効率

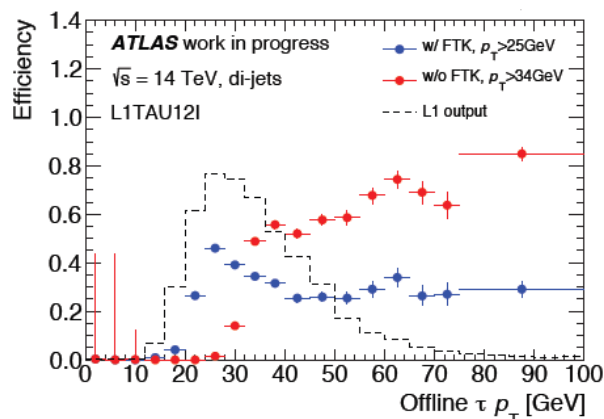


図 8: ジェット \rightarrow τ のフェイク率

大規模国際協力実験の中でトリガー回路基板の開発・製作とアルゴリズムの提案から物理解析まで同時に遂行している。こういった研究をさらに進め、本格的なヒッグス粒子探索、ヒッグス機構の検証や Run2 での 13TeV というエネルギーフロンティアでの新物理・新現象の発見を行うのが次年度以降の課題である。

*なお 2 相型 Ar 光検出器による暗黒物質探索については、年次報告 13C09 を参照のこと。

3. 共同研究者

木村 直樹 (先進理工学部・物理学科 助教)

田中 雅士 (理工学研究所・次席研究員)

The ATLAS Collaboration (国際協力: CERN, Switzerland)

ATLAS-FTK group (国際協力: University of Chicago, INFN Pisa 等)

The CDF Collaboration (国際協力: FNAL, USA)

4. 研究業績

4.1 学術論文 (主要なものを抜粋)

“Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data”

G. Aad, K. Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, Phys.Lett. B726 (2013) 120-144.

“Combination of searches for the Higgs boson using the full CDF data set”

T. Aaltonen, K.Yorita et. al., [CDF Collaboration], Phys. Rev. D 88, 052013 (2013)

“A fast hardware tracker for the ATLAS trigger system”

J. Anderson, K.Yorita et.al., Nucl.Instrum.Meth. A718 (2013) 258-259.

“Status of R&D on double phase Argon detector: the ANKOK project”

M.Tanaka, K.Yorita et.al., J.Phys.Conf.Ser. 469 (2013) 012012.

“A fast hardware tracker for the ATLAS trigger system”

N. Kimura for ATLAS TDAQ Collaboration, Nucl.Instrum.Meth. A731 (2013) 224-228.

“Fast Tracker: a hardware real time track finder for the ATLAS trigger system”

N. Kimura, K.Yorita et.al., JINST 9 (2014) C04012.

* その他共著論文多数

4.2 講演

日本物理学会：

2014年3月：日本物理学会年次大会（東海大学）

塙慶太、寄田浩平他「LHC最新結果報告：タウ粒子対へ崩壊するヒッグス粒子探索」

桜井雄基、寄田浩平他「ATLAS実験における $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{lep-had}$ 過程を用いたヒッグス粒子探索」

三谷貴志、寄田浩平他「LHC-ATLAS Run2 実験に向けた τ 粒子トリガーの開発構築」

木村直樹、寄田浩平他「ATLAS実験における高速飛跡トリガー（FTK）の開発現状と今後の展望」

飯澤知弥、寄田浩平他「ATLAS実験でのFTK受信モジュール設計開発及びシステム統合動作試験」

山崎友寛、寄田浩平他「ATLAS実験におけるFTKを用いた一次衝突点再構成とトリガーへの応用」

田中雅士、寄田浩平他「気液2相型アルゴン光検出器を用いた暗黒物質探索（ANKOK実験）」

鷺見貴生、寄田浩平他「ANKOK実験の光検出効率」

橋場裕之介、寄田浩平他「ANKOK実験における背景事象の理解とその分離能力の評価」

五十嵐貴弘、寄田浩平他「アルゴン蛍光の赤外成分の詳細研究」

2013年9月：日本物理学会秋季大会（高知大学）

郡川智洋、寄田浩平他「ATLAS実験における高速飛跡トリガー（FTK）の開発現状と今後の展望」

白神賢、寄田浩平他「ATLAS実験におけるFTK受信モジュールの開発構築と実機試験」

桜井雄基、寄田浩平他「ATLAS実験での $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{lep-had}$ 崩壊過程を用いたヒッグス粒子探索」

三谷貴志、寄田浩平他「LHC Run2 実験での $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊過程探索のための高速飛跡トリガーを用いた τ 粒子トリガーの開発」

藤崎薫、寄田浩平他「気液2相型アルゴン光TPC検出器を用いた暗黒物質探索（ANKOK実験）」

加地俊瑛、寄田浩平他「ANKOK実験のための光検出効率の最適化」

川村将城、寄田浩平他「ANKOK実験における背景事象評価の現状」

鷺見貴生、寄田浩平他「MPPCや赤外光を用いたアルゴン蛍光の新しい検出方法の開発」

国際会議 :

Masashi Tanaka, Kohei Yorita et.al., for the ANKOK group
"Status of R&D on double phase Argon detector: the ANKOK project"
4th Workshop on Directional Detection of Dark Matter : Cygnus 2013
2013年6月 Toyama, Japan

Naoki Kimura for the ATLAS FTK group (招待講演)
Fast Tracker : A Hardware Real Time Track Finder for the ATLAS Trigger System
13th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors (IPRD13)
2013年10月7日-10日 Siena, Italy

他研究会、シンポジウム等 :

2013年4月 桜井雄基 「tau trigger@ATLAS」 ATLAS- τ workshop@ギリシャ
2013年4月 寄田浩平 「気液2相型Ar光TPC検出器」
第一回極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会@富山
2013年5月 木村直樹 「Fast Tracker」 テラスケール物理@名古屋
2013年7月 寄田浩平 「LHCの最新結果と今後」 LHC-ILC workshop@早稲田大学
2014年2月 鷲見/加地 (2講演) 「ANKOK実験」 ICEPP シンポジウム@白馬
2014年3月 寄田浩平 「Search for other Higgs at Run2(+)」 テラスケール研究会@東京大学

4.3 その他、学会および社会的活動など

2013年10月27日ノーベル賞記念一般講演会「ヒッグス粒子発見」井深大記念ホール
2014年11月～現在 ATLAS-Japan 物理解析審査員
2013年11月 ATLAS-Upgrade International Review@KEK
2013年12月 卓越シンポジウム@早稲田大学
2013年12月 読売オンライン寄稿「新たな謎を生む「ヒッグス粒子発見」」
http://www.yomiuri.co.jp/adv/wol/opinion/science_131216.html
2014年1月 物理教育学会への記事寄稿「ヒッグス粒子の発見」
2014年1月 高圧ガス製造保安責任者資格取得(地下施設での暗黒物質探索のため)
2014年3月 日本物理学会年次大会 暗黒物質探索セッション座長

5. 研究活動の課題と展望

2014年は、まずこれまでの解析結果をさらに精査(系統誤差の改善等)し、7TeVのデータも加えてヒッグス粒子が $\tau\tau$ に崩壊する過程の証拠($\sim 4\sigma$)を示す学術論文を出版する。一方、LHC加速器は2015年春を目処に重心系エネルギーが13TeV(\rightarrow 14TeV)に増強され、さらに瞬間輝度も上昇させて運転を再開する。これに伴う急務な課題としては、FTKシステムの各ボードの統合試験を行うこと、また我々が制作している電子回路ボードの量産・テスト、それらを踏まえて秋頃にはATLAS検出器への部分挿入を完遂することである。加速器再開前に磐石な状況を構築し、2015年度のコミッショニングに備えることが重要である。この課題に対しては、早稲田大

学として私を含め博士課程学生 3 名と修士課程学生 2 名のメンバーを総力して、包括的に取り組む予定である。一方、ヒッグス粒子が c 粒子対と b クォーク対へ崩壊する過程やトップクォークとの随伴生成過程を探索し、ヒッグス機構の本質的な検証であるフェルミオンの湯川結合の測定を包括的に行う。そのためにも FTK システムの構築やその前後でのトリガーパフォーマンスの研究が必須である。また、ヒッグス粒子探索のみならず、トップクォークの性質測定や超対称性粒子に代表される新現象探索も現地海外研究者との密な議論を行った上で、早稲田独自の大きな役割を果たしていく。

暗黒物質探索のための気液 2 相型アルゴン光検出器の構築をすすめる。特に γ 線と WIMP の識別能力の定量評価と中性子背景事象の評価を行ったうえで最適な検出器を設計構築し、(可能であれば) 神岡地下施設で予備実験を行い、物理感度を算出、本実験へつなげる計画である。

LHC 加速器を利用した最先端素粒子物理学と非加速器実験による暗黒物質探索を並行して行うことで、新たな指針を見出していきたいと考えている。