

## 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。本研究の目的は、世界屈指のエネルギーフロンティア実験 LHC/ATLAS 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。本研究課題の主軸は、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達成したうえで、その利用方法 (オンライントリガーでの  $\tau$  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) の開発も行っている。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。2014 年度には 75 リットルの容器を用いて、アルゴン蛍光  $\sim 10\text{ pes/KeVee}$  という世界最高の光検出効率を得ることに成功し、 $\gamma$  線源と中性子線源を利用して波形分別法による  $\gamma$  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。今後の本格的な探索のための極低バックグラウンド技術や地下実験に向けた検討を含め、東京大学宇宙線研究所共同利用に参画している。この研究に関する詳細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 4 つの項目に大別して記述する :

##### 1. ヒッグス粒子の $\tau$ -Yukawa 結合の証拠

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/WW 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。H→τ τ過程は、τの崩壊モードにより leplep, 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 lephad 過程を用いた。2013年度の成果をもとに2014年度はさらに解析の質をあげ、τ τに崩壊する過程の証拠を得て、学術論文で公表することができた。図1は、7/8TeV、5/20fb<sup>-1</sup>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の最終結果である。信号領域にあきらかな超過を観測することに成功した。図2は、横軸に質量をとった場合の統計的有意度である。標準模型からの期待値に比べ観測量の方が多結果となっており、最終的には4.5σの証拠を得た。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。これは、ヒッグス粒子がレプトンと結合すること、ダウントップの粒子と結合すること、レプトンユニバーサリティーを破ることの直接的証拠となっている点で物理的意義が非常に深い結果である。

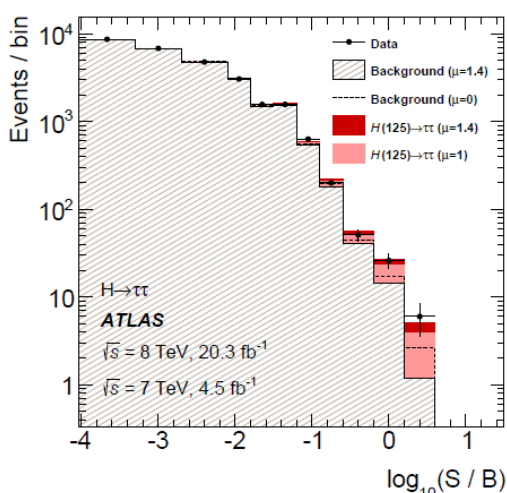


図1: H→τ τのBDT分布(最終結果)

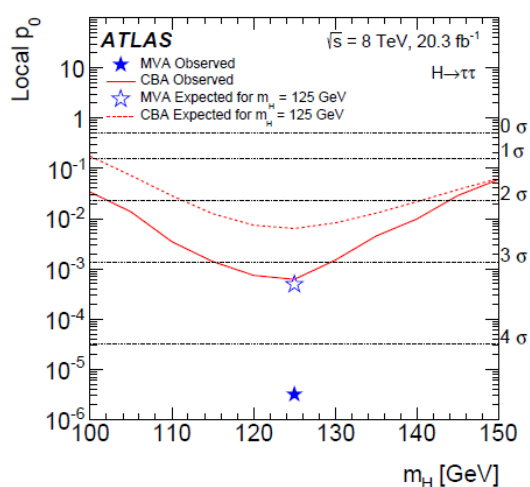


図2: 信号有意度の分布(最終結果)

## 2. H→τ τ崩壊過程におけるCP測定感度の評価物理解析

標準模型で予言されているヒッグス粒子はCP-evenの粒子であるが、その是非は実験的に確認すべき物理対象である。これまでZZ過程を用いてCP-odd stateを95%以上のCLで棄却しているが、2014年度のτ τ発見を踏まえて、新しくτ τ過程でCP測定を試みた。

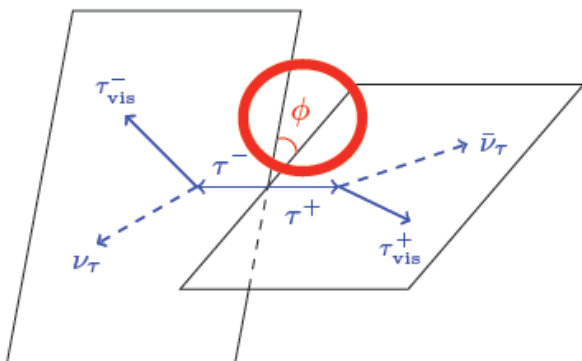


図3: τ τ崩壊過程の角度相関Φの定義

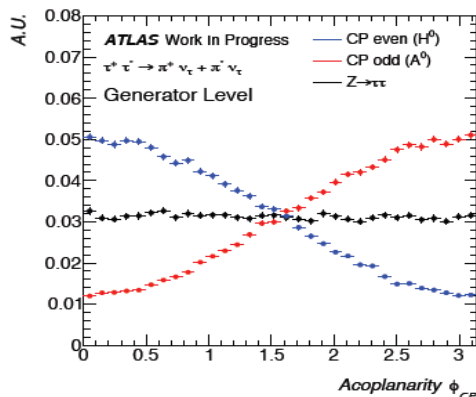


図4: CP-even/oddとZ生成のΦ分布

この崩壊課程での CP 測定を達成するためには、図 3 に示すような  $\tau$  それぞれの崩壊面を定義し、その間の角度相関 ( $\Phi$ ) を測定することが重要である。図 4 は generator level の  $\Phi$  分布であり、CP-add と even が明確に分かれていることが確認できる。実際にはニュートリノは測定できないため、インパクトパラメータを用いる方法と荷電  $\pi$  と中性  $\pi$  の成す平面で近似する方法を採用し、Run 1 データに適用したところ、56%信頼度で CP-odd を棄却できることがわかった。これを Run2 に外挿するとおおよそ 70~80fb<sup>-1</sup> のデータ量があれば、95% CL で棄却できる感度があることを算出することができた。また、今後を見据えて新しいニュートリノの再構成法の提案も並行して行っている。

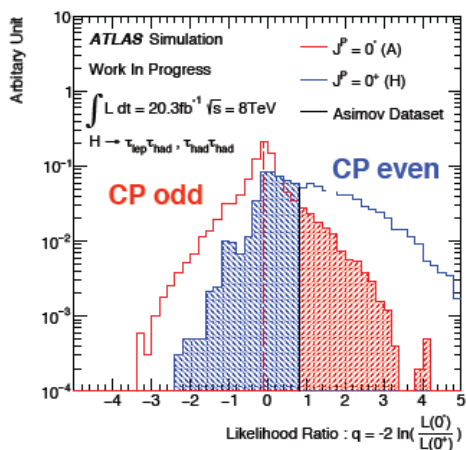


図 5: CP 測定に関する有意度

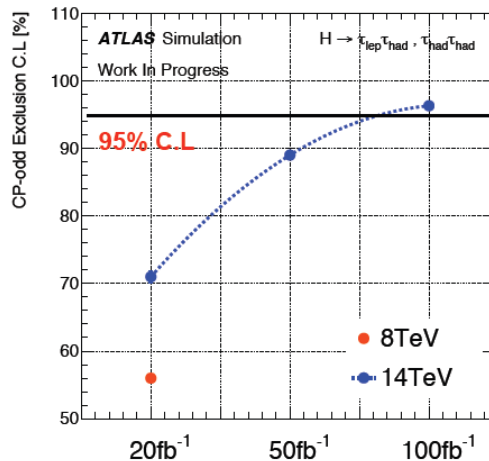


図 6: Run2 実験における CP 測定感度予想

### 3. ttH→alljets+ $\tau\tau$ 過程におけるトップ湯川結合測定の研究

ヒッグス湯川結合の中でもっとも興味深く、かつ解析が困難なのはトップクォークとの直接結合の探索・測定である。2014 年度はあらたに ttH→alljets+ $\tau\tau$  という過程を用いた解析を提案し、その実行性を確かめた。この解析は LHC 実験ではこれまで誰もしたことがない独創性の高い解析であり、発見できればきれいな  $\tau\tau$  ヒッグス質量の山が確認できる貴重なチャンネルである。解析はトリガー選択から始まり、バックグラウンドモデル、事象選択の最適化など多岐に渡るが、今年度は Run2 に向けた暫定的な研究を行った。その結果、他のチャンネルと同等かそれ以上の感度が期待できることがわかった。

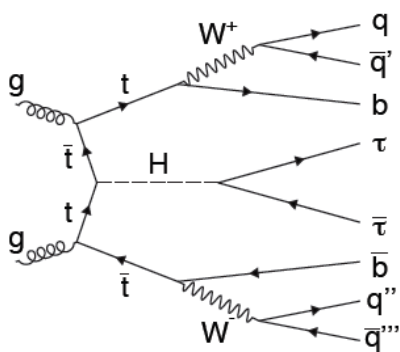


図 7: ttH→alljets+ $\tau\tau$  のダイアグラム

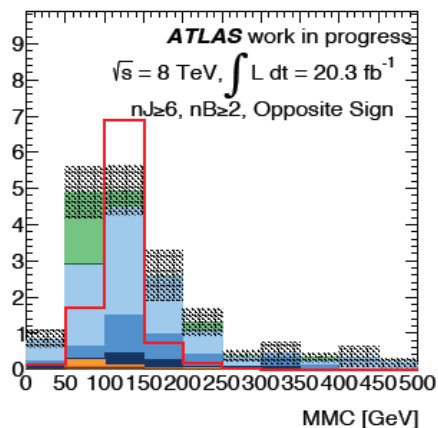


図 8:  $\tau\tau$  質量分布 (信号は赤で 30 倍)

#### 4. 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 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。



図 9: 最終版の IM ボード

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。2014 年度はこの設計を完遂し、最終実機 (v3.3+production) を製作 (図 9) し、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。また、CERN において一部実機テストを行い、量産要請を満たしていることを確認した。その後、ATLAS 実験の公式の Design review、Production review を経て、2015 年 2 月に IM80 台の量産を行った。私を含め、早稲田から数名の学生とともに製作会社に赴き、出来上がったばかりの IM をその場でテストし、フィードバックをかけながら慎重に量産手続きを行った。特に顕著であったのが、始め 5 台の量産機を丁寧に調査した結果、図 11 にあるような FMC ピンのコネクタ部に欠損があることがわかったことである。これを解決するため、業者と様々な角度で議論を行い、残り 75 台の量産時には FMC コネクタの下だけ半田の量を増やす工夫を行うように指示をした。その結果この問題は 0/75 台となった。



図 10: 量産中の IM ボード

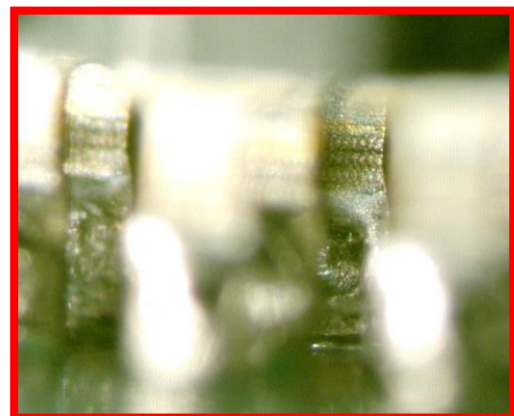


図 11: 量産中に発見した FMC コネクタ部の欠損

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うことができた。





図 12: 2015 年 2 月末に納品された 80 台の IM ボード

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 14C12 を参照のこと。

### 3. 共同研究者

田中 雅士 (理工学研究所・次席研究員)

木村 直樹 (5 月末迄早大助教→アリストテレス大学テサルニキ校・シニアフェロー)

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

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

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

東京大学宇宙線研究所共同利用

### 4. 研究業績

#### 4.1 学術論文 (主要なものを抜粋)

“Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector”

G.Aad, K.Yorita et. al., The ATLAS Collaboration, arXiv: 1501.04943[hep-ex]

→ JHEP04 (2015) 117 (2015 年 4 月受領)

“A neural network clustering algorithm for the ATLAS silicon pixel detector”

G. Aad, K.Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, JHEP 9 (2014) P09009

**“Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker”**

G. Aad, K.Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, CERN-PH-EP-064 (2014)

**“Search for susy in events with large missing transverse momentum, jets, and at least one tau lepton in 20 fb<sup>-1</sup> of 8 TeV pp collision data with the ATLAS detector”**

G. Aad, K.Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, JHEP 1409 (2014) 103

**“Search for the Standard Model Higgs Boson in the H to  $\tau+\tau-$  to lepton-hadron and hadron-hadron Decay Modes with the ATLAS Detector”**

Y. Sakurai, Nucl.Phys.Proc.Suppl. 253 (2014) 226, 10.1016/j.nuclphysbps.2014.09.061

**“Search for neutral MSSM Higgs Bosons in the h/A/H to  $\tau+\tau-$  Decay Mode with the ATLAS Detector”**

T. Mitani, Nucl.Phys.Proc.Suppl. 253 (2014) 220, 10.1016/j.nuclphysbps.2014.09.058

**“Performance of VUV-sensitive MPPC for Liquid Argon Scintillation Light”**

T. Igarashi, S. Naka, M. Tanaka, T. Washimi, K. Yorita,  
arXiv:1505.00091[physics.ins-det] <http://arxiv.org/abs/1505.00091>

\* その他共著論文多数

## 4.2 講演

### 日本物理学会：

2015年3月：日本物理学会年次大会@早稲田大学 21-24

(招待講演) 寄田浩平「ATLAS 実験 Run1 の成果」

白神賢、寄田浩平他「ATLAS 実験における FTK の開発試験状況と挿入に向けた今後の計画」

川口佳将、寄田浩平他「ATLAS 実験における受信モジュールの量産結果」

飯澤知弥、寄田浩平他「ATLAS 実験 Run2 での新粒子探索に向けた MET トリガーの改善」

桜井雄基、寄田浩平他「ATLAS 実験における  $H \rightarrow \tau\tau$  崩壊過程を用いたヒッグス粒子の CP 測定」

新田龍海、寄田浩平他「ATLAS 実験における  $H \rightarrow \tau\tau$  崩壊を用いた CP 測定のための  $\tau$  粒子再構成法の開発」

三谷貴志、寄田浩平他「ATLAS 実験 Run2 におけるトップ随伴生成による  $H \rightarrow \tau\tau$  過程探索」

藤崎薫、寄田浩平他「ANKOK 実験 1：気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索」

加地俊瑛、寄田浩平他「ANKOK 実験 2：原子核・電子反跳事象の分離能力評価」

川村将城、寄田浩平他「ANKOK 実験 3：背景事象の理解と低減」

木村真人、寄田浩平他「ANKOK 実験 4：現状の課題と今後の展望」

鈴木優飛、寄田浩平他「アルゴンを用いた検出器の方向感度化に関する基礎研究」

鷲見貴生、寄田浩平他「アルゴン蛍光 128nm に感度のある MPPC の性能評価」

**2014年9月：日本物理学会秋季大会@佐賀大学 18-21**

白神賢、寄田浩平他「ATLAS 実験における高速飛跡トリガー (FTK) の構築状況と今後の展望」  
昌子貴洋、寄田浩平他「ATLAS 実験における FTK 受信モジュールの統合試験結果及び量産計画」  
仲松弥、寄田浩平他「ATLAS 実験における FTK 飛跡を使ったトリガーシステムの改善」  
藤崎薫、寄田浩平他「気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索 (ANKOK 実験)」  
加地俊瑛、寄田浩平他「気液 2 相型アルゴン光検出器の蛍光 (S1・S2) 基礎特性」  
川村将城、寄田浩平他「気液 2 相型アルゴン光検出器における背景事象評価」  
鷺見貴生、寄田浩平他「ANKOK 実験 本検出器製作に向けた現状の課題と今後の展望」

**国際会議：**

Y. Sakurai for the ATLAS collaboration

Search for the Higgs boson in fermionic channels using the ATLAS detector  
PHENO2014, 2014年5月9日 ピッツバーグ (USA)

N. Kimura for the ATLAS FTK group

A Highly Parallel FPGA Implementation of a 2D-Clustering Algorithm for the ATLAS Fast  
Track (FTK) Processor  
19th IEEE Real-Time conference, 2014年5月24日, 奈良 (奈良県)

Y. Sakurai for the ATLAS collaboration

The ATLAS Tau Trigger performance during Run1 and prospects for Run2  
LHCP2014, 2014年6月4日, ニューヨーク (USA)

T. Iizawa for the ATLAS FTK group

The ATLAS FTK System: how to improve the physics potential  
ICHEP2014, 2014年7月2日, バレンシア (スペイン) (poster)

T. Mitani for the ATLAS collaboration

The ATLAS Tau Trigger performance during Run1 and prospects for Run2  
ICHEP2014, 2014年7月2日, バレンシア (スペイン) (poster)

T. Iizawa for the ATLAS FTK collaboration

ATLAS FTK: Fast Track Trigger  
Vertex2014, 2014年9月18日, プラハ (チェコ)

**他研究会、シンポジウム等：**

- (招待講演) 寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器を用いた暗黒物質探索」  
宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究会 大阪大学 2014年8月
- (招待講演) 寄田浩平「FastTrack」アトラス日本総会 長崎 2014年9月
- (招待講演) 寄田浩平「FastTrack」テラスケール研究会 大阪大学 2014年11月
- (招待講演) 寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器を用いた暗黒物質探索」  
東大宇宙線研究所共同利用研究成果発表会 東京大学 2014年12月

飯澤知弥「FTK Global Integration Report」ATLAS TDAQ Week コペンハーゲン 2014年7月

鷺見貴生「ANKOK 実験 : 2相型アルゴン検出器の光検出効率最大化」

21<sup>st</sup> ICEPP Symposium@白馬 2015年2月8-11日

加地俊瑛「ANKOK 実験におけるシミュレーションの構築」

21<sup>st</sup> ICEPP Symposium@白馬 2015年2月8-11日

白神賢「ATLAS 実験における高速飛跡トリガー (FTK) の開発、試験状況と量産」

21<sup>st</sup> ICEPP Symposium@白馬 2015年2月8-11日

藤崎薫、寄田浩平他 「ANKOK Phase-0」

高エネルギー春の学校 琵琶湖 2014年5月

五十嵐貴弘、寄田浩平他「Ar 赤外光の性質とその利用法の検討」

高エネルギー春の学校 琵琶湖 2014年5月

藤崎薫、寄田浩平他「Backgrounds in Ar double phase detector」

ポスター発表 極低バックグラウンド研究会 淡路島 2015年3月

#### 4.3 その他、学会および社会的活動等

2013年11月～現在 ATLAS-Japan 物理解析審査員

2014年9月「グローバル社会について～国際的素粒子研究を通して～」筑波大学附属高等学校

2014年9月 日本物理学会秋季大会@佐賀大学 暗黒物質探索セッション座長

2014年11月 早稲田大学物理学科創立50周年記念講演会 記念講演 早稲田大学

「ヒッグス粒子の発見とこれからの素粒子物理実験」

2015年1月 早稲田応物・物理会 会報第26号寄稿

#### 4.4 学位論文

##### 修士論文：

加地俊瑛「ANKOK 実験におけるシミュレーションの構築」

川村将城「ANKOK 実験のための地上環境中性子事象の測定と評価」

昌子貴洋「ATLAS 実験における FTK 受信モジュールのモニタリングシステムの構築と量産試験」

白神賢「ATLAS 実験における FTK 受信モジュールのハードウェアエミュレーションを用いた性能評価」

仲松弥「ATLAS 実験における FTK によるトリガーの改善とシミュレーションの高速化」

鷺見貴生「ANKOK 実験における大光量 2 相型プロトタイプ検出器の開発と性能評価」

##### 学士論文：

猪飼孝「Hadronic tau 粒子対と jet を終状態に含む事象のトリガー選択に関する研究」

川口佳将「ATLAS 実験における FTK を用いた一次衝突点再構成の事象トポロジー依存性の研究」

木村真人「2 相型 Ar 光検出器の電場最適化と電子比例蛍光発生機構の研究」

鈴木優飛「アルゴン中の柱状再結合効果を利用した検出器の方向感度化に関する基礎研究」

中新平「暗黒物質探索のための MPPC を用いた発光位置同定手法の基礎研究」

新田龍海「ATLAS 実験におけるハドロン崩壊する  $\tau$  粒子対を用いた Higgs 粒子の CP 測定感度の評価」

横山寛至「アルゴン中の U・Th 系列放射線核種の測定とその時間依存性」

亘龍太郎「GTP トランシーバを用いた FTK 受信モジュールの機能追加開発」



## 5. 研究活動の課題と展望

LHC 加速器は 2015 年 6 月を目処に重心系エネルギーが 13TeV (→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、FTK システムの各ボードの統合試験を行うこと、また我々が制作した電子回路ボードの ATLAS 検出器への挿入を完遂することである。加速器再開ととも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 4 名と修士課程学生 4 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  $\tau$  粒子対へ崩壊する過程での CP 測定、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とその性質解明を包括的に行う。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  $\gamma$  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、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、まったく新しい指針を見出していきたいと考えている。