

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
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

欧州原子核共同研究機構（以下 CERN）における LHC 加速器を用いた ATLAS 実験に参加し、国際共同研究として最先端の高エネルギー素粒子実験研究を推進している。素粒子の標準模型を超える新粒子・新現象の発見に向けて、データ取得のためのトリガー増強からまったく新しい物理過程や解析手法を提案等、さまざま角度から取り組んでいる。LHC 加速器は 2015 年に重心系エネルギーを 13TeV に増強、その後 2017 年度も瞬間輝度を上げ、ATLAS 実験における解析積分データは合計で約 100fb^{-1} に達しつつある。LHC 加速器は 2018 年度も運転し、Run2 実験の最終データ量は $120\sim 150\text{fb}^{-1}$ を蓄積する予定である。ヒッグス粒子の発見によって標準模型で予言されている粒子はすべて出揃ったため、今後あらたに発見される粒子はまちがいないく、” Physics Beyond the Standard Model ” である。そこで 2017 年度はヒッグス粒子の物理に加え、それを越えた新粒子・新現象探索にさらに焦点を当てた研究展開を図った。また、今後の LHC 加速器の高エネルギー化 (13→14TeV) ・高輝度化 (現在の 2~3 倍) に伴うパイルアップ (1 衝突当たりの多重反応) 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 (FTK) の開発研究も引き続き行った。我々が開発してきたカスタム電子回路基板を ATLAS 検出器へ挿入し、さまざまな試験運転を進めた。ハードウェア開発構築だけでなく、実際の FTK からの飛跡情報の利用方法 (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。

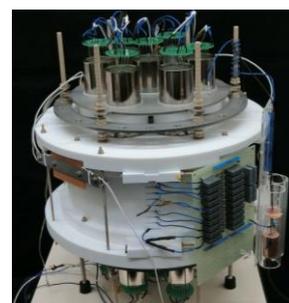
LHC/ATLAS 実験における早稲田大学の役割・貢献として 2017 年度に行った主な研究課題を以下に示す。それぞれの詳細については研究成果の項で記述する。

1. Single-/Di- τ トリガーの評価
2. 新粒子から崩壊する高運動量のヒッグス粒子が $\tau\tau$ に崩壊する過程の同定手法の開発
3. 新しい重粒子探索、とりわけ高運動量に “ブーストされたジェット” の評価・改善
4. 3 を踏まえた弱ボソンの散乱断面積測定
5. 新粒子 (超対称性長寿命粒子) 探索に向けた “消失飛跡” の研究
6. 高速飛跡再構成システム (FTK: Fast TracKer) の構築・挿入・運転

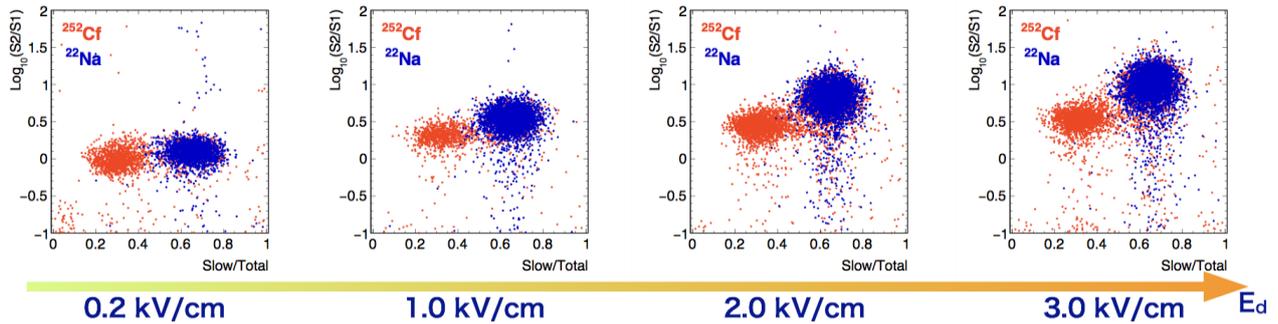
一方、暗黒物質探索を目的とした高感度検出器 (気液 2 相型アルゴン光検出器) の開発も行っている。低質量 WIMP 探索に向け、2017 年度は以下の項目に注力し研究を進めた。

- ① 有効質量拡張 + 多チャンネル PMT 読出しのための検出器構築
- ② 高電場下の Ar 応答特性、とくに消光や電離蛍光比 (S2/S1) の電場依存性
- ③ 電子反跳事象の理解と神岡地下環境での環境中性子測定

これまでの検出器を拡張し、右図にあるような上下 7 本ずつの PMT (3inch, R11065) を配備した TPC を構築した。これまで同様、高純度 Ar (電子減衰時定数で約 2ms) の安定運用を達成し、水平方向に位置分解能をもつことが背



景事象同定に有効なことをデータにより確認することができた。一方、コッククロフトウォルトン回路による電圧印加装置を利用し、先行研究にはない 1kV/cm から 3kV/cm までの S2/S1 発光特性を精査し、電離蛍光比による除去力性能が高電場で向上する知見を得た。

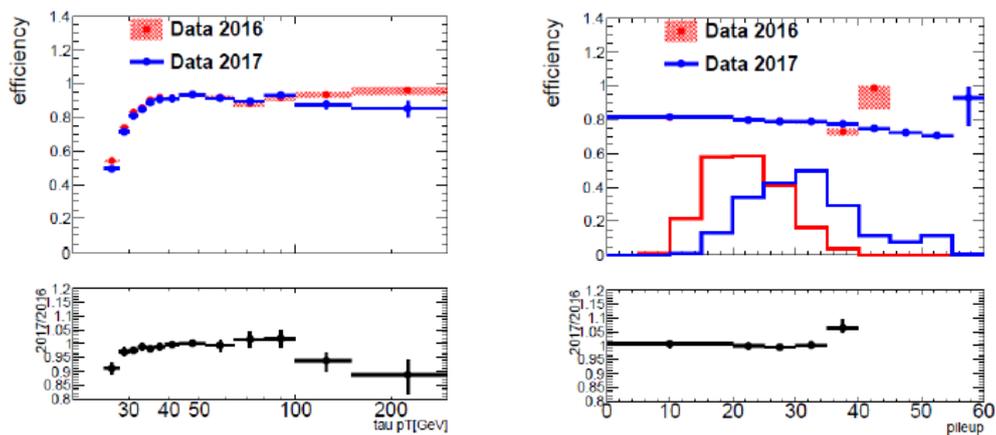


また地下実験に向けて、液体シンチレータを用いた神岡地下施設での環境中性子測定を行った。中性子測定コンソーシアムを通じて大阪大学や神戸大学とともに検出器の純化を進めている。これらの成果は学術論文、国際学会、国内学会において公表した。今後は地上での構築をさらに進めるとともに、地下実験に向けての詳細検討をさらに促進させる予定である。

2. 主な研究成果

2.1 τ トリガー構築・評価と高運動量ヒッグス粒子同定手法の研究

昨年度に引き続き、2017 年度に取得したデータに関する τ トリガーの性能評価を行った。2016 年度のデータと比較すると、おおよそ同等の性能が出ていることが確認できたが、一方で、信号取得効率に関して微小な差異を観測した。詳細を調べた結果、これは瞬間輝度増強に伴うパイルアップの影響が間接的に効いていることがわかった。しかし MC シミュレーションもこれを正しく再現しているため、ヒッグス粒子の解析等に使用するうえでは直接的に大きな悪影響を及ぼすことはない。ただし、今後 FTK を含めた飛跡の有効活用によってこのパイルアップ現象の抑制をする必要がある。

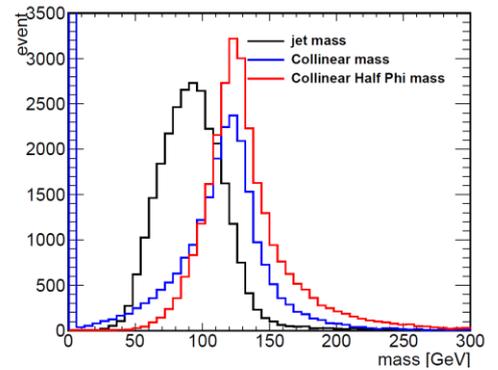


図： τ 粒子の取得効率（2016 年と 2017 年の比較）。左図は運動量、右図はパイルアップ

一方で τ 粒子が大きく絡む新物理として、重い新粒子から崩壊するヒッグス粒子 ($\rightarrow \tau \tau$) があげられる。例えば、1.5TeV 程度のグラビトンから崩壊するヒッグス粒子は高運動量をもつため、ヒッグスから崩壊する 2 つの τ 粒子は互いに近づき、これまでの同定手法では解析することができない。今後の探索方針・実行性を検討するため、そのような高運動量

ヒッグス粒子の同定、また質量再構成に関する研究をあらたに行った。

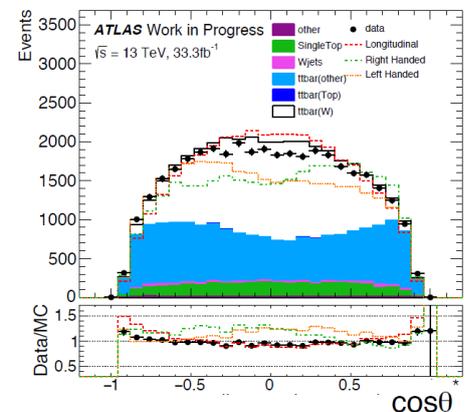
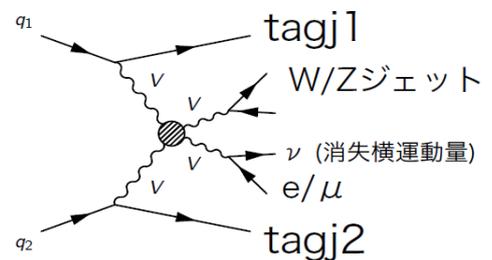
その結果、飛跡数の情報を使うことで非常にシンプルに信号と背景事象と分離できることがわかった。また、互いに近い2つの τ 粒子に関して、jet mass、collinear mass、さらに本研究で開発した half phi mass (消失横運動量を2つの τ 粒子の真ん中に補正する方法)を比べたところ、half phi mass が再構成率・質量分解能ともに最良な結果を与えることがわかった。引き続き手法を発展させ、今後、高統計でのヒッグス粒子が絡む新粒子探索の感度を上げていく必要がある。



2.2 弱ボソン散乱断面積測定の研究

もし新現象のエネルギースケールが LHC のエネルギーで届かない領域にある場合、位相空間上、新粒子の直接探索は不可能となる。また、電弱対称性の破れの根幹である弱ボソンの発散の抑制 (ヒッグス粒子によるユニタリティー回復) は弱ボソンの散乱断面積のエネルギー依存性を測定してはじめて検証可能なる。一方で、もし新現象のエネルギースケールが非常に高かった場合、その影響がこの弱ボソンの散乱断面積のエネルギー依存性に影響し、スペクトルが標準模型の予想からずれることが知られている。そこで、2017 年度は本格的にこの研究を行った。その結果、3つの崩壊過程を統合すれば 2018 年度までのデータで 5σ の発見が感度が期待できることがわかった。

一方で、高運動量の W ジェットに対し、縦波成分と横波成分が分離できることをトップクォークの崩壊する W の実データを用いて検証することができた。これらの結果は今後のエネルギーフロンティア実験の将来を決定するために重要な要素となるため、引き続き次年度以降も解析を続け、新現象の発見につなげる。



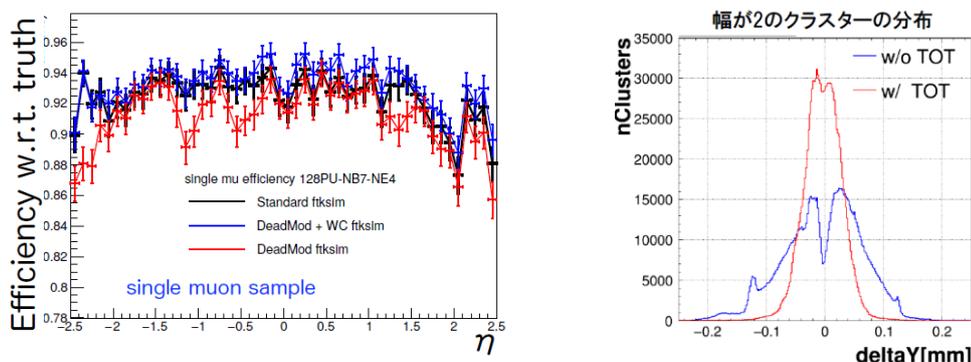
2.3 新粒子探索に向けた“消失飛跡”の基礎研究

昨年度から引き続き、飛跡検出器内数 cm で消失する飛跡の研究を行った。超対称性 (SUSY) 粒子はフェルミオンとボソンのスピンに対する対称性を課すことで、標準模型粒子とペアを組むような粒子が要請される。それに伴い Higgs 粒子の質量階層性問題、GUT スケールでの結合定数の統一、暗黒物質の候補など標準理論での問題点の解決が期待されている。この SUSY の枠組みの中で、暗黒物質の有力候補である Wino が LSP となるシナリオを扱っている。この場合、チャージーノ ($\tilde{\chi}_1^\pm$) とニュートラリーノ ($\tilde{\chi}_1^0$) の質量が縮退し、 $\tilde{\chi}_1^\pm$ が長寿命となる。そのため、内部飛跡検出器内で崩壊し、消失飛跡と呼ばれる特殊飛跡として検出される。

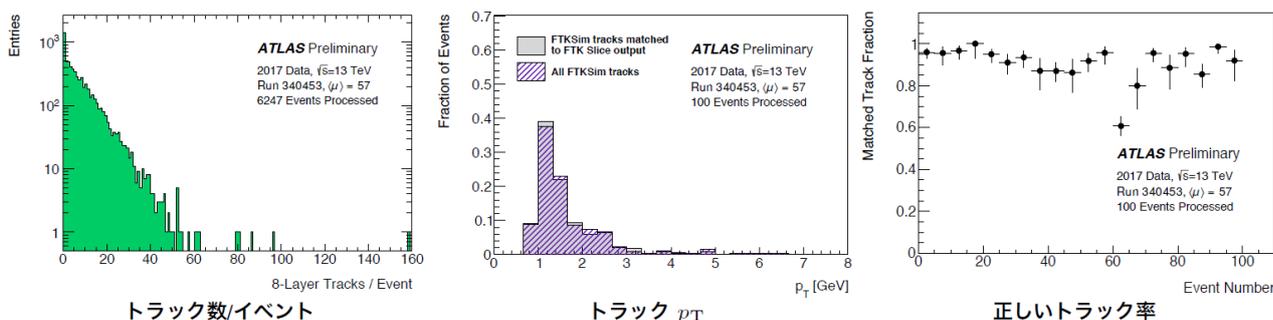
2017年度はさらに短い飛跡（衝突点とピクセル検出器2層やピクセル検出器3層）を再構成するための原理・実行性の検証を行った。また、Run2データを使った解析において、この信号として扱うのは不可能とされていた（より短い飛跡のため同定が困難な）higgsino探索に対する解析感度の再解釈を行い、論文にまとめた。

2.4 高速飛跡再構成システム (FTK: Fast Tracker) の構築・挿入試験

ATLAS UpgradeであるFast tracking triggerシステム (FTK) のCERN現地での運用試験を続けている。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の高速通信 (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、これまでプロトタイプを製作してテストを行ってきた。2017年度は、とくにATLAS検出器への挿入を進め、試運転を開始することができた (高エネルギーニュース)。以下、要点を簡単に整理する。ハードウェア動作試験、挿入作業、ATLAS Run Controlへの実装、実機で運用するパターン・コンスタント生成とチューニング (Wild Card Algorithm)、pixel-ToTを用いた実機変数の最適化とそれによる飛跡変化の評価Fast Simulationの構築などである。



左図：不感検出器に対してWCを用いた再構成率の回復 右図：TOTによる改善



このように、hardware, firmware, softwareの3本柱で挿入・試験を継続的に行っており、2018年には多くの飛跡がATLASトリガーで運用できることが期待できる。

このように2017年度は、トリガー回路・実装・評価から新しい解析手法の提案、暗黒物質や電弱対称性の破れの検証にくわえ、新しいエネルギースケールの発見に向けた基礎開発を並行して行うことができた。なお、早稲田大学の貢献度はここ数年毎年要求値の200%から300%となっている。

3. 共同研究者

田中雅士（国際理工学センター・准教授）

森永真央（理工研・次席研究員）

木村直樹（イタリア・ウディナーネ大学/CERN 研究員）

The ATLAS Collaboration（国際協力：CERN, Univ. of Geneva, Univ. of Melbourne etc）

ATLAS-FTK group（国際協力：Univ. of Chicago, Stanford Univ., INFN Pisa, Frascati etc）

東京大学素粒子国際研究センター（ICEPP）、京都大学

東京大学宇宙線研究所、神戸大学、名古屋大学、大阪大学

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

☆ 学外共同研究者は多数いるため、各個人の氏名は省略。

4. 研究業績

4.1 学術論文（主要なものを抜粋）

“Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), PRD97(2018), no.7, 072003

“Search for dark matter and other new phenomena in events with an energetic jet and large missing transverse momentum using the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), JHEP1801(2018) 126

“Search for additional heavy neutral Higgs and gauge bosons in the ditau final state produced in 36fb⁻¹ of pp collision at sqrt(s)=13TeV with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), JHEP1801(2018) 055

“Search for diboson resonances with boson-tagged jets in pp collisions at sqrt(s)=13TeV with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), PLB777(2018) 91-113

“Evidence for the H→b \bar{b} decay with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), JHEP1712(2017) 024

“Jet energy scale measurements and their systematic uncertainties in pp collisions at sqrt(s)=13TeV with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), PRD96(2017) no.7, 072002

“Top-quark mass measurement in the all-hadronic tt \bar{t} decay channel at sqrt(s)=8TeV with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), JHEP1709(2017) 118

“Performance of the ATLAS Trigger System in 2015”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), Eur.Phys.J. C77(2017) no.5, 317

“The ATLAS Fast Tracker Processing Units – input and output data preparation”

A. Bolz, K.Yorita et.al., PoS ICHEP 2016 (2017) 1233

“The ATLAS Fast Tracker System”

T. Iizawa, K. Yorita et.al., (ATLAS collaboration) PoS, TWEPP17, 139, 2018

“Search for direct pair production of higgsinos by the reinterpretation of the disappearing track analysis with 36.1fb⁻¹ of sqrt(s)=13TeV data collected with the ATLAS experiment”

T. Kaji, K. Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), ATL-PHYS-PUB-2017-019, 15.Dec.2017

“Status and prospect of the ANKOK project : Low mass WIMP dark matter search using double phase argon detector”

M. Kimura, M. Tanaka, K. Yorita, Journal of Physics: Conference Series (JPCS)

“Study of the low-energy ER/NR discrimination and its electric-field dependence with LAr”

T. Washimi, T. Kikuchi, M. Kimura, M. Tanaka and K. Yorita , Journal of Instrumentation, Volume 13, C02026, February 2018

*その他共著論文多数

4.2 講演

国際会議 :

(Invited) M. Morinaga for the ATLAS collaboration “Search for neutral and charged BSM Higgs Bosons with the ATLAS detector”, QCD2017, July3-7.2017, Montpellier, France

(Invited) T. Iizawa “The ATLAS Fast Tracker System” TWEPP2017, Sep.11-15.2017, UC-SC, USA

T. Nitta “Identification of Hadronically-Decaying W Boson and Top quark using High-Level Features as input to BDT and DNN in ATLAS at sqrt(s)=13TeV” July.16-21, 2017, BOOST2017, Buffalo USA

(Invited) T. Nitta “Identification of Hadronically Decaying W boson and Top quarks using Multivariate Techniques at ATLAS” August.21-25.2017, ACAT2017, Seattle, USA

T. Washimi, K.Yorita et.al.

“Study of the Low-Energy ER/NR Discrimination and its Electric-Field Dependence with Liquid Argon”, 2017/9/22, LIDINE2017 @ SLAC National Accelerator Laboratory, USA

M. Kimura, K.Yorita et.al.

“Status and prospect of the ANKOK project: Low mass WIMP dark matter search using double phase argon detector”

TAUP2017 XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics,
July 24-28, 2017, Laurentian University Sudbury, ON, Canada

日本物理学会：

2017年9月12-15日：日本物理学会秋季大会@宇都宮

加地俊瑛「LHC-ATLAS 実験における大きな dE/dx を持つ短い消失飛跡探索のための背景事象研究」

新田龍海「LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるハドロン崩壊を含む弱ボソン散乱過程の測定可能性」

飯澤知弥「LHC-ATLAS 実験における高速飛跡トリガー (FTK) の初期データ解析と本格運転への展望」

木村真人「ANKOK 実験 20：電子反跳事象分離能力の理解」

矢口徹磨「ANKOK 実験 21：本検出器に向けた光学過程の理解」

田中雅士「ANKOK 実験 22：現状の課題と今後の展望」

2018年3月22-25日：日本物理学会年次大会@東京理科大学

寄田浩平 シンポジウム講演 (ユニークな TPC 開発) 「気液 2 相型アルゴン TPC」

森永真央「LHC-ATLAS 実験における高速飛跡トリガー(FTK)の初期データ解析と本格運転への展望」

初山慶輔「LHC-ATLAS 実験における FTK 受信システムの性能評価」

加地俊瑛「LHC-ATLAS 実験における FTK 本格稼働のためのソフトウェア構築現状」

新田龍海「LHC-ATLAS 実験 Run2 における 1 レプトン終状態を用いた弱ボソン散乱過程の測定」

益田匠 「LHC-ATLAS 実験における高運動量 $h \rightarrow \tau\tau$ の同定と質量再構成の研究」

田中雅士「ANKOK 実験 23：気液 2 相型 Ar 光 TPC 検出器による暗黒物質探索」

武田知将「ANKOK 実験 24：ガス中 2 次蛍光の検出器内環境依存性」

菊地崇矩「ANKOK 実験 25：高電場下における Ar 蛍光特性」

木村真人「ANKOK 実験 26：高電場下における電子反跳/原子核反跳事象の分離」

竹村祐輝「ANKOK 実験 27：背景事象の低減と理解」

矢口徹磨「ANKOK 実験 28：TPC の拡張と今後の展望」

他研究会、国内シンポジウム等：

(招待講演) 寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索」

CRC タウンミーティング 東京大学柏キャンパス 2017年6月24-25日

(招待講演) 寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索」

東大宇宙線研究所共同利用研究成果発表会 東京大学 2017年12月8日

(招待講演) 寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索」

「極低放射能技術」研究会 天童, 山形県 2018年3月7-10日

(招待講演) 寄田浩平「FastTracKer」アトラス日本総会 宇都宮大学 2017年9月

(招待講演) 森永真央「FastTracKer」アトラス日本総会 東京理科大学 2018年3月
(招待講演) 鷺見貴生「気液2相型アルゴン検出器による低質量暗黒物質探索」
SMART2018、蔵王、山形県、2017年11月11日
(招待講演) 鷺見貴生「暗黒物質探索実験“ANKOK”」KEK超伝導コロキウム、KEK、2017年12月

ATLAS Boosted Object Workshop, 2017年4月24-27日, Brighton, UK
新田龍海, BDTs Trained in Data

FTK 2018 Kickoff Workshop, 2018年1月17-19日, CERN, スイス
森永真央, IM Review
加地俊瑛, FTK Offline Software 2017 Post-Mortem

中性子研究会 2018年1月26日、大阪大学
田中雅士「これまでの早稲田大学の取り組み」

アクティブ媒質 TPC 開発座談会 2017年11月11日、KEK
鷺見貴生「DM 探索 液体アルゴン技術開発」

Poster: The 1st KMI School “Dark Matter” 28.Feb-2.Mar.2018, Nagoya
M. Kimura, Particle Identification in Double Phase Argon Detector(ANKOK)

Poster: 地下素核研究会、2017年5月21-23日、岡山大学
矢口徹磨「30cm ドリフト TPC における電場形成と高純度アルゴン」

Poster: 地下素核研究会、2018年3月7-9日、山形県天童
飯島耕太郎「ANKOK 実験におけるシールド構築とその遮蔽について」

第9回新学術領域 B02 班若手研究会、2017年11月 早稲田大学
木村真人「ANKOK 実験における ER/NR 分離」
矢口徹磨「ANKOK 本実験に向けた新規検出器開発」
竹村祐輝「ANKOK 実験における内部放射線背景事象の理解と低減」
飯島耕太郎「ANKOK 実験 環境ガンマ線測定とその遮蔽」
菊地崇矩「TOF を用いた消光因子測定」

第10回新学術領域 B02 班若手研究会、2018年1月 大阪大学
木村真人「中性子 Calibration Try」

4.3 その他、学会および社会的活動等

2015年9月～2017年9月 高エネルギー委員・将来計画検討委員

2015年10月～現在 MOCAS International Conference, Program Committee
2016年2月～2017年9月 高エネルギー物理学研究者会議測定器開発優秀修士論文賞審査委員
2017年3月31日～2019年3月31日 日本物理学会 第73～74期 代議員
2016年～現在 早稲田大学重点研究領域「先端基礎物理学研究所」代表
2017年度 学術振興会特別研究員審査委員
2017年度 学術振興会外国人特別研究員審査委員
2017年度 高エネルギー加速器研究機構 CERN 派遣研修（技術・事務）候補者審査委員
2018年2月 筑波大学附属高校 SGH 特別講義講師
2018年3月 日本物理学会年次大会@東京理科大学 ヒッグスの物理セッション座長
2017年～現在 ICEPP シンポジウムプログラム委員
2017年11月 ICFA セミナー招待参加者（オタワ、カナダ）
2017年9月 北海道大学集中講義（非常勤講師）
2018年3月～現在 ATLAS-Japan 執行部
2017年～現在 ATLAS Overview Week Tokyo 2018 実行委員長
(アプトリーチ活動) 第一回 麗澤中学・高校サイエンスカフェ、2017年5月26日
飯澤知弥「宇宙のはじまりの謎 ダークマターって何だ？」
鷲見貴生「素粒子物理学の最前線」

4.4 受賞褒章・著書・寄稿

(著書・寄稿)

寄田浩平、田中雅士他、高エネルギーニュース 第36巻4号 p180-188 2018年1/2/3月
朝日新聞出版「AERA」掲載：2018年3月号 「階層を越えた最先端物理学」

4.5 学位論文

博士論文：

飯澤知弥「Construction of the fast track reconstruction system (FTK) at the LHC-ATLAS experiment」

三谷貴志、鷲見貴生 in progress(執筆中)

修士論文：

竹村 祐輝「ANKOK 実験における内部放射線背景事象の理解と低減」

菊地 崇矩「ANKOK 実験における高電場形成と消光因子測定」

益田 匠「LHC-ATLAS 実験における高運動量 $H \rightarrow \tau\tau$ の同定と質量再構成」

萩山 慶輔「LHC-ATLAS 実験における FTK 受信モジュール運用と機能最適化」

学士論文：

青山 一天「ANKOK 本実験に向けた Ar 蛍光の直接及び間接検出手法の研究」

植原 靖裕「LHC-ATLAS 実験におけるオフライントラックと FTK トラックの比較」

尾形 暢隆「LHC-ATLAS 実験におけるヒッグス- μ 粒子湯川結合の測定可能性に関する研究」

平良 文香「神岡地下での液体シンチレータ長期間測定データの解析」

武田 知将「ANKOK 実験における 2 次蛍光量の検出器内環境依存性」

鶴田 亮「LHC-ATLAS 実験 2017 年 RUN における τ トリガーの性能評価」

5. 研究活動の課題と展望

2017 年、LHC 加速器の瞬間輝度は 2×10^{34} に達し、高輝度実験として運転されている。今後の実験環境はさらに厳しくなることが予想される。これに伴う急務な課題として、FTK システムによる飛跡情報の利用である。加速器再開とともに磐石な状況を構築し、高輝度下でのオペレーションに対して十分な対策を講じることが重要である。この課題に対して、早稲田大学は包括的に取り組む予定である。また、標準模型を超える重粒子探索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。

また、早稲田大学独自発信の ANKOK 実験に関しても、これまでの成果を総括し、本格的な探索に移行するべく、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への参画をはじめ、国内外の研究者と協力しながら推進する。

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、まったく新しい発見、今後の素粒子・宇宙物理学の指針を見出していきたいと考えている。