



平成28年度（2016年度）
活動報告書

九州大学先端素粒子物理研究センター
Research Center for Advanced Particle Physics, Kyushu University

平成30年2月9日

目次

第1章	はじめに	2
第2章	構成員リスト	4
2.1	テラスケール物理実験部門	4
2.2	次世代加速器実験推進部門	4
2.3	テラスケール物理理論部門	5
2.4	先端素粒子物理研究センター委員会委員名簿	5
2.5	研究支援スタッフ	5
第3章	活動報告	6
3.1	LHC-ATLAS 実験	6
3.1.1	シリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良	6
3.1.2	検出器の状態の情報を保持するデータベースの管理	6
3.1.3	ヒッグス粒子の性質の研究	7
3.1.4	新粒子の探索	7
3.1.5	検出器アップグレード計画	8
3.1.6	研究業績	10
3.2	ILC 計画	23
3.2.1	位置感度のあるシリコン検出器の開発研究	23
3.2.2	シリコン電磁カロリメータ読み出し ASIC の性能評価およびプロトタイプ試験	23
3.2.3	ILC におけるクォーク識別ソフトウェアの改良	24
3.2.4	研究業績	25
3.3	その他の活動	27
3.3.1	J-PARC での素粒子実験	27
3.3.2	アウトリーチ活動	31
3.4	RCAPP プレプリント	32
3.5	競争的資金獲得状況	33

第1章 はじめに

九州大学先端素粒子物理研究センターは、ビッグサイエンスとしての素粒子物理学を推進するため、学内共同教育研究施設として2012年10月に設立されました。本報告書は、その発足から5年目にあたる、2016年度の活動記録をまとめたものです。ここでは、本センターに関する現在の状況を簡単に報告いたします。

テラスケール物理実験部門が推進するCERN研究所LHC加速器でのアトラス実験は、2015年から重心系エネルギー13 TeVでの衝突実験 (Run 2) を続けています。本部門の二人の助教が実験現場のCERNに常駐して重要測定器の運転の先頭に立ち、物理解析でも大きな貢献をしています。博士課程大学院生1名も常駐し、博士論文に向けた研究を行っています。アトラス実験は、ヒッグス粒子測定の精度向上と新たなチャンネルの開拓、新粒子探索の種類や質量領域の拡張など、最先端の成果を続々と生み出し、年間100本程度の学術論文を発表しています。LHC加速器は、衝突輝度を現在の約10倍に高める高輝度LHC計画を含めて、2030年台後半まで運転される予定です。今後も、アトラス実験はエネルギーフロンティアの素粒子実験として世界的な注目を集め続けるでしょう。その中で、本センターは、測定器の運転、物理解析、測定器アップグレードにおいて、貢献を続けていきます。

次世代加速器実験推進部門が推進する国際リニアコライダー (ILC) 計画は、文部科学省の元に設置された「ILCに関する有識者会議」での検討が続けられています。2017年11月に国際将来加速器委員会 (ICFA) とリニアコライダー会議 (LCB) が、ILCを重心系エネルギー250 GeVのヒッグス工場として始めること、並びに日本がリードする国際プロジェクトとして進めていくこと、を提案しました。ILCに関する有識者会議では、この新しい提案を受けて再検討を始めており、その結論は2018年夏までにまとめられると期待されています。本センターは、ILC計画の実現に向けて、そしてILCの物理と測定器の国際研究拠点を目指して、活動を継続しています。なお、2018年5月には、福岡国際会議場でリニアコライダーの国際会議 Asian Linear Collider Workshop 2018 (ALCW2018) の開催を予定しています。

本センターが運用する「次世代シリコン半導体検出器開発システム」は、2016年度から共同利用を開始し、学内、学外の関連分野、近隣分野のみなさんに、広く活用していただけることになりました。シリコン半導体検出器は、アトラス実験を含め、本センターが推進する複数の素粒子実験の成功の鍵を握るものです。本システムを用いてシリコン半導体検出器技術を基幹技術として蓄積し、各実験を主導的に推進していきます。

九州大学の研究者は、素粒子原子核物理だけでなく、物質生命科学の分野においても、東

海村 J-PARC の最先端加速器を用いた多彩な研究教育活動を行っています。これらの研究教育活動をさらに発展させていくため、その拠点となる九州大学分室を J-PARC に設置することが決定しました。2018 年 3 月 2 日に J-PARC で、久保千春九州大学総長と山内正則高エネルギー加速器研究機構長による分室設置の調印式が執り行われる予定です。

本センターの最初の時限は、2018 年 3 月末までとなっており、継続更新に向けて調整を進めています。現在の構想では、第 2 期の時限は 2018 年 4 月から 2028 年 3 月末までの 10 年間で、J-PARC における素粒子物理、物質生命科学のための部門を新設し、理論部門の名称を更新して、以下の 4 部門となっております。

- テラスケール実験部門：LHC 加速器でのアトラス実験に参加し、測定器の運転・データ収集と物理解析、および HL-LHC 計画のためのアトラス測定器アップグレードを行う。
- 次世代加速器実験推進部門：次世代加速器 ILC で行う実験のための物理研究と測定器の開発設計を行い、国際共同実験の中核を担う研究拠点の形成を推進する。
- 先端素粒子理論部門：素粒子物理の理論的研究。実験部門と協力して標準理論を超える新しい理論・モデルの構築等を行う。
- 大強度量子ビーム実験部門：J-PARC 実験施設で行う大強度量子ビームを用いた素粒子物理と物質生命科学の実験的研究を推進する。J-PARC の九州大学分室の運営を担当する。

引き続き、みなさまのご支援ご協力、よろしくお願いいたします。

2018 年 1 月

先端素粒子物理研究センター長 川越清以

第2章 構成員リスト

2.1 テラスケール物理実験部門

東城 順治	准教授	理学研究院 物理学部門	複担
織田 勸	助教	理学研究院 物理学部門	複担
音野 瑛俊	助教	先端素粒子物理研究センター	専任

2.2 次世代加速器実験推進部門

川越 清以 (センター長)	教授	理学研究院 物理学部門	複担
清水 洋	教授	理学研究院 附属地震火山観測研究センター	協力
塚原 健一	教授	工学研究院 附属アジア防災研究センター	複担
三谷 泰浩	教授	工学研究院 附属アジア防災研究センター	複担
渡邊 公一郎	教授	工学研究院 地球資源システム工学部門	協力
藤光 康宏	教授	工学研究院 地球資源システム工学部門	協力
高田 仁	教授	経済学研究院 産業マネジメント部門	複担
大枝 良直	准教授	工学研究院 環境社会部門	協力
外井 哲志	准教授	工学研究院 環境社会部門	協力
樋口 明彦	准教授	工学研究院 環境社会部門	協力
広城 吉成	准教授	工学研究院 環境社会部門	協力
吉岡 瑞樹	准教授	先端素粒子物理研究センター	専任
未原 大幹	助教	理学研究院 物理学部門	複担
杉山 晃	客員教授	佐賀大学 理工学部 物理科学科	

2.3 テラスケール物理理論部門

鈴木 博	教授	理学研究院 物理学部門	複担
原田 恒司	教授	基幹教育院 教育実践部	複担
大河内 豊	准教授	基幹教育院 教育実践部	複担
奥村 健一	助教	理学研究院 物理学部門	複担

2.4 先端素粒子物理研究センター委員会委員名簿

川越 清以 (センター長)	教授	理学研究院 物理学部門	複担
高田 仁	教授	経済学研究院 産業マネジメント部門	複担
鈴木 博	教授	理学研究院 物理学部門	複担
塚原 健一	教授	工学研究院 附属アジア防災研究センター	複担
三谷 泰浩	教授	工学研究院 附属アジア防災研究センター	複担
原田 恒司	教授	基幹教育院 教育実践部	複担
吉岡 瑞樹	准教授	先端素粒子物理研究センター	専任
東城 順治	准教授	理学研究院 物理学部門	複担
大河内 豊	准教授	基幹教育院 教育実践部	複担
森田 浩介	教授	理学研究院 物理学部門	
池田 伸夫	教授	工学研究院	
臼杵 純一	事務長	理学部等事務部	

2.5 研究支援スタッフ

重松 さおり [2014年4月1日～現在]

第3章 活動報告

3.1 LHC-ATLAS 実験

スイス・ジュネーブ郊外にある欧州合同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) において、国際共同研究 ATLAS 実験を推進している。LHC 加速器では、2015 年から設計値に近い重心系エネルギー 13 TeV での運転を再開した。今年度は、シリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良、検出器データベースの管理、ヒッグス粒子の性質の研究、超対称性粒子の探索、検出器アップグレード計画を遂行した。

3.1.1 シリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良

ビーム衝突点から発生する多数の荷電粒子の検出において、ATLAS 検出器最内層に配置した内部飛跡検出器が重要な役割を果たす。我々のグループは、内部飛跡検出器の 1 つであるシリコン半導体飛跡検出器 (SemiConductor Tracker : SCT) の運転に精力的に取り組んできた。SCT 検出器の運転に参加する国内研究機関の中で、九州大学は唯一スタッフが CERN に常駐する大学である。2013 年までは東城が国内研究機関が連携して研究を進める上での中心となり、それ以降は音野がその役割を引き継いでいる。音野は、2013 年 11 月より SCT data quality coordinator を務め、2015 年の LHC の運転開始以降、CERN に常駐をしている博士 2 年の調と共に、ビーム衝突時における SCT 検出器の性能評価を行い、順調なデータ取得を実現した。2016 年 2 月から、織田が SCT 検出器の offline software coordinator を務め、検出器ソフトウェア全般において責任を持っている。2016 年 6 月から音野は SCT 検出器の副運転責任者を務め、12 月までの LHC の運転期間において円滑なデータ取得を実現した。音野は 2017 年 1 月から運転責任者として 2017 年 5 月に再開する LHC の運転に向けた準備を進めている。我々のグループは、今後も引き続き SCT 検出器に高い性能を発揮させるべく、その運転に大きく貢献してゆく予定である。

3.1.2 検出器の状態の情報を保持するデータベースの管理

ATLAS 実験はその汎用検出器を構成する各検出器の時間的に変化し得る状態の情報を保持するために Conditions Database と呼ばれるデータベースを持っている。Conditions

Databaseはデータの取得、再構成、モニタリングやシミュレーションに用いられる。Conditions Databaseの各検出器の情報の更新や管理は、各検出器の担当者に任されている。Conditions Database全体の調整・管理役として、ATLAS実験のデータ準備部門(Data Preparation)に(Deputy) Conditions Coordinatorという役職が置かれている。織田は2016年の1年間はConditions Coordinatorを務め、円滑なデータ準備に貢献した。2016年に取得した重心エネルギー13 TeVでの陽子陽子衝突、重心エネルギー5.02 TeVと8.16 TeVでの陽子鉛原子核衝突の実データとそれらに対応するシミュレーション、将来の重心エネルギー14 TeVでの陽子陽子衝突のシミュレーションに用いるConditions Databaseの準備、運用を、大きな問題なく行うことができた。

3.1.3 ヒッグス粒子の性質の研究

我々のグループは、ヒッグス粒子が Z 粒子対に崩壊し、各 Z 粒子がレプトン(ℓ , 電子またはミューオン)対に崩壊する、4レプトンチャンネル($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$)の解析を2012年から行っている。このチャンネルには背景事象が少なく、ヒッグス粒子を完全に再構成できるという利点がある。織田はDAODと呼ばれる解析用データの作成を担当した。2016年7月までに取得した積分ルミノシティ 14.8 fb^{-1} の重心系エネルギー13 TeVのデータを用いた解析結果を2016年8月に結果を公表した。4レプトンの不変質量分布を図3.1に示す。質量118 GeVから129 GeVの領域に、質量125 GeVのヒッグス粒子の信号事象が22.3事象、背景事象が9.7事象期待されるところに、44事象が観測された。ヒッグス粒子を再発見することができたと言える。全生成断面積は $81_{-16}^{+18} \text{ pb}$ と求まり、標準模型に基づく予測値の $55.5_{-4.4}^{+3.8} \text{ pb}$ より大きい、その有意度は 1.6σ である。(図3.2) 質量が200 GeV以上の未知のスカラー共鳴状態の探索も行ったが、得られた結果は標準模型と 2σ の不定性の範囲で一致するものであり、新しい共鳴状態は発見されなかった。2016年10月までに積分ルミノシティ約 36 fb^{-1} のデータを取得し、その解析を進めた。

3.1.4 新粒子の探索

ヒッグス粒子の発見によって素粒子標準模型から未発見粒子は無くなったが、謎は依然として多く残されている。一例として、ダークマターは天体観測から存在が示唆されているが候補となる粒子は素粒子標準模型に無い。LHCではダークマターを直接生成できる可能性があるため、ATLAS実験はこれまでも精力的に探索を行ってきた。ただし、ATLAS実験の標準的な物理解析はヒッグス粒子のようにビーム衝突点で生成後に即座に崩壊する粒子をターゲットとしている。そこで、我々のグループではSCTの一層目のある300 mmまでを飛程とするような長寿命の新粒子の探索に2014年から取り組んでいる。音野は標準模型の枠組みにある粒子の超対称性パートナーが長寿命粒子となる可能性に着目した。Run1の取得

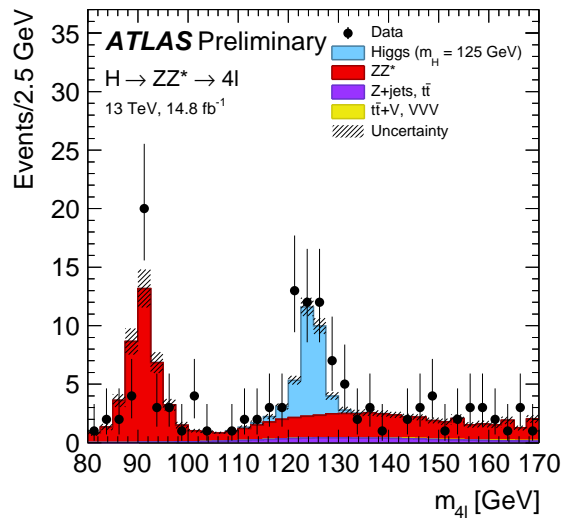


図 3.1: 4 つのレプトンの不変質量分布。黒色の点は 2016 年 7 月までに取得した 13 TeV のデータを表す。水色のヒストグラムは質量 125 GeV のヒッグス粒子の信号事象、赤色などそれ以外のヒストグラムは背景事象により期待される分布を表す。

データを用いて探索したが新粒子発見の兆候は残念ながら得られなかった。並行して、長寿命粒子を生む新たなシナリオを理論研究者らと考案し、2015 年に論文誌に受理されている。2016 年はこれらのシナリオについて実際に Run2 の取得データを用いて探索を進め、完了させた。発見には至らなかったが、2017 年 3 月の国際学会で結果を公表している。また、調は右巻きニュートリノに着目し、探索を開始した。右巻きニュートリノもダークマターの候補となり、同時にニュートリノの質量や宇宙のバリオン非対称性に説明を与えることができる。特に質量領域 2 - 30 GeV の右巻きニュートリノは長寿命となる。音野らの探索とは異なる終状態を持つため独自の発展が必要ではあるが、2017 年 3 月の日本物理学会ではシミュレーションを用いた再構成効率の見積もりを報告し、着実に研究を進めている。

3.1.5 検出器アップグレード計画

現行の LHC 加速器は、2023 年まで運転して積分ルミノシティ 300 fb^{-1} を実験に提供する予定である。その後は、加速器改良により瞬間ルミノシティを $(5 - 7) \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に増強し、2026 年から高ルミノシティ LHC (HL-LHC) として再稼働させ、エネルギーフロンティア物理をさらに推進する計画である。HL-LHC 計画に対応し、ATLAS 実験では検出器をアップグレードする計画を進めている。特に大規模な計画として、内部飛跡検出器全体を

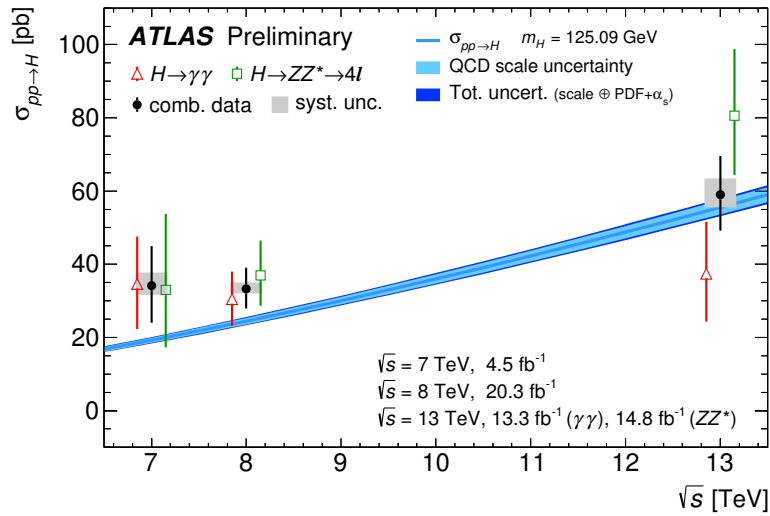


図 3.2: ヒッグス粒子の全生成断面積 ($\sigma_{pp \rightarrow H}$) の重心系エネルギー (\sqrt{s}) 依存性。緑色の点が 4 レプトンチャンネル ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$) での測定結果、赤色の点が光子対チャンネル ($H \rightarrow \gamma\gamma$) での測定結果、黒色の点が 2 チャンネルを統合した結果であり、青色の線は標準模型に基づく予測値である。13 TeV のデータ点は 2016 年 7 月までのデータを用いて新たに得たものである。

新型の高放射線耐性シリコン検出器にアップグレードする。我々のグループは、シリコン検出器のアップグレード計画に参画するため、開発設備である「次世代シリコン半導体検出器開発システム」を導入した。システムの導入により、アルミ線ワイヤーボンディング・センサーと読み出しチップのプローピング・多チャンネル電気特性評価とデータ収集・電子回路シミュレーションと設計・有限要素法による力学的および熱的設計・事象シミュレーションが可能となり、一環した開発環境を整備した。今年度は、システムを稼働させ、特に $25\ \mu\text{m}$ アルミ線ワイヤーの自動ボンディングを行えるように整備した。ピクセル検出器開発の一環として、読み出しチップに現状利用できる FE-I4 を採用し、FPGA を用いた読み出し試験を行った。読み出し試験の手法・環境を確保し、今後の検出器モジュールの開発に繋げる予定である。また、HL-LHC 計画における最重要課題の一つであるヒッグス粒子の自己結合の測定に向けたシミュレーション研究を行った。

3.1.6 研究業績

原著論文

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC,” *Nature Phys.* **13**, 852 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top quark spin observables in $t\bar{t}$ events using dilepton final states in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **1703**, 113 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair to Z -boson cross-section ratios at $\sqrt{s} = 13, 8, 7$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1702**, 117 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the prompt J/ψ pair production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 76 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using 2012 LHC proton-proton collision data,” *Eur. Phys. J. C*

77, 195 (2017).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 144 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $\psi(2S)$ and $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1701**, 117 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of charge and CP asymmetries in b -hadron decays using top-quark events collected by the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JHEP* **1702**, 071 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the ZZ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the $ZZ \rightarrow \ell^-\ell^+\ell'^-\ell'^+$ and $ZZ \rightarrow \ell^-\ell^+\nu\bar{\nu}$ channels with the ATLAS detector,” *JHEP* **1701**, 099 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for triboson $W^\pm W^\pm W^\mp$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 141 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W boson angular distributions in events with high transverse momentum jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **765**, 132 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for anomalous electroweak production of WW/WZ in association with a high-mass dijet system in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **95**, 032001 (2017).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to b -quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **765**, 11 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A measurement of material in the ATLAS tracker using secondary hadronic interactions in 7 TeV pp collisions,” *JINST* **11**, P11020 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ production cross sections in multilepton final states using 3.2 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 40 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 653 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^+W^- production in association with one jet in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **763**, 114 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a hadronically decaying vector boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **763**, 251 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of hard double-parton scattering in four-jet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment,” *JHEP* **1611**, 110 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Minimal Supersymmetric Standard Model Higgs bosons H/A and for a Z' boson in the $\tau\tau$ final state produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 585 (2016).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dark matter interpretations of ATLAS searches for the electroweak production of supersymmetric particles in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions,” JHEP **1609**, 175 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A measurement of the calorimeter response to single hadrons and determination of the jet energy scale uncertainty using LHC Run-1 pp -collision data with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 26 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $b\bar{b}$ dijet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 670 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in different-flavour high-mass dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 541 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of top quark pair differential cross-sections in the dilepton channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with ATLAS,” Phys. Rev. D **94**, 092003 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total cross section from elastic scattering in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **761**, 158 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying to a Z boson and a photon in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **764**, 11 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in events with hadronically decaying tau leptons, jets and missing transverse momentum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV recorded with the ATLAS detector,” Eur.

Phys. J. C **76**, 683 (2016).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $\ell^+ \ell^- b\bar{b}$, $\ell\nu b\bar{b}$, and $\nu\bar{\nu} b\bar{b}$ channels with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **765**, 32 (2017).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of exclusive $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ production and search for exclusive Higgs boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 032011 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass new phenomena in the dilepton final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **761**, 372 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs and Z Boson Decays to $\phi\gamma$ with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **117**, 111802 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet activity in top quark events using the $e\mu$ final state with two b -tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1609**, 074 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in a final state containing two photons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions at the LHC using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 517 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom squark pair production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 547 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson produced in association with a W boson and decaying to four b -quarks via two spin-zero particles

in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 605 (2016).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “The performance of the jet trigger for the ATLAS detector during 2011 data taking,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 526 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy long-lived charged R -hadrons with the ATLAS detector in 3.2 fb^{-1} of proton–proton collision data at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$,” *Phys. Lett. B* **760**, 647 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for heavy diboson resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **1609**, 173 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of Higgs bosons in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state using proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 052002 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $W^\pm Z$ boson pair-production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector,” *Phys. Lett. B* **762**, 1 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances in events with one lepton and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **762**, 334 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 052009 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in diphoton events at $\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **1609**, 001 (2016).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section using $e\mu$ events with b-tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **761**, 136 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Inelastic Proton-Proton Cross Section at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector at the LHC,” Phys. Rev. Lett. **117**, 182002 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV,” JHEP **1608**, 045 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for TeV-scale gravity signatures in high-mass final states with leptons and jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Lett. B **760**, 520 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson produced by vector-boson fusion and decaying to bottom quarks in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1611**, 112 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ dilepton channel from $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data,” Phys. Lett. B **761**, 350 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run-1 data,” Eur. Phys. J. C **76**, 666 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the double-differential high-mass Drell-Yan cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1608**, 009 (2016).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions at low transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 502 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the angular coefficients in Z -boson events using electron and muon pairs from data taken at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1608**, 159 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of gluinos decaying via stop and sbottom in events with b -jets and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032003 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the relative width difference of the B^0 - \bar{B}^0 system with the ATLAS detector,” *JHEP* **1606**, 081 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Transverse momentum, rapidity, and centrality dependence of inclusive charged-particle production in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV $p + \text{Pb}$ collisions measured by the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **763**, 313 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *New J. Phys.* **18**, 093016 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for gluinos in events with an isolated lepton, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 565 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 392 (2016).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1608**, 005 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with an energetic jet and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 032005 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavour-violating decays of the Higgs and Z bosons with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 70 (2017).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the charge asymmetry in top-quark pair production in the dilepton final state at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 032006 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $Z\gamma$ and $Z\gamma\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **93**, 112002 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for metastable heavy charged particles with large ionization energy loss in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS experiment,” Phys. Rev. D **93**, 112015 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the rare decays of B_s^0 and B^0 into muon pairs from data collected during the LHC Run 1 with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 513 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson decaying into $b\bar{b}$ produced in association with top quarks decaying hadronically in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1605**, 160 (2016).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of fiducial differential cross sections of gluon-fusion production of Higgs bosons decaying to $WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” JHEP **1608**, 104 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with a photon and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 059 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^\pm and Z -boson production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 601 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons produced in association with a top quark and decaying via $H^\pm \rightarrow \tau\nu$ using pp collision data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV by the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 555 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Beam-induced and cosmic-ray backgrounds observed in the ATLAS detector during the LHC 2012 proton-proton running period,” JINST **11**, P05013 (2016).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in the mass distribution of jet pairs with one or two jets identified as b -jets in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 229 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **76**, 292 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of high transverse momentum top quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 093 (2016).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 490 (2017).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions in pp interactions at $\sqrt{s} = 8$ TeV measured with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 403 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $W^\pm Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous gauge boson self-couplings,” *Phys. Rev. D* **93**, 092004 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of total and differential W^+W^- production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple-gauge-boson couplings,” *JHEP* **1609**, 029 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 13$ TeV in final states with jets and two same-sign leptons or three leptons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 259 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of event-shape observables in $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 375 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions,” *Phys. Lett. B* **757**, 334 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of a vector-like quark via a heavy gluon in the $4b$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *Phys. Lett. B* **758**, 249 (2016).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like quarks decaying into Wb in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 442 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP Invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson using the Optimal Observable method in the ditau decay channel with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 658 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC,” Phys. Lett. B **758**, 67 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charged-particle multiplicity inside jets from $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 322 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for top squarks with R-parity-violating decays to all-hadronic final states with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions,” JHEP **1606**, 067 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for an excited muon decaying to a muon and two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” New J. Phys. **18**, 073021 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing lepton flavour violation via neutrinoless $\tau \rightarrow 3\mu$ decays with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 232 (2016).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the CP-violating phase ϕ_s and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS,” JHEP **1608**, 147 (2016).

- H. Fukuda, N. Nagata, H. Otono, S. Shirai, “Higgsino Dark Matter or Not: Role of Disappearing Track Searches at the LHC and Future Colliders,” arXiv:1703.09675.
- H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata, H. Otono, “Extending the LHC Reach for New Physics with Sub-Millimeter Displaced Vertices,” arXiv:1702.08613.
- N. Nagata, H. Otono, S. Shirai, “Cornering compressed gluino at the LHC,” JHEP **1703**, 025 (2017).

海外での講演

- Couplings and mass with 13 TeV data :
Susumu Oda on behalf of the ATLAS and CMS Collaborations
52nd Rencontres de Moriond EW 2017, March 2017, La Thuile, Italy

国内での講演

- LHC-ATLAS 実験における長寿命中性レプトンの発見感度の研究 :
調翔平
日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月、大阪大学
- 2016 年 LHC 13 TeV 実験 : 実験状況と SM/Higgs 測定 :
織田 勸
日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月、宮崎大学
- LHC における SUSY ダークマターの新しい探索提案 :
音野瑛俊
日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月、宮崎大学

3.2 ILC 計画

本センターでは、ILC のための測定器、特に電磁カロリメータの開発をフランスの研究グループと共同で行っており、本年度は ILC 電磁カロリメータで用いる読み出し回路の開発および新型センサーの開発、プロトタイプの実験を行った。また、ILC で期待される物理性能の評価およびそのためのソフトウェアアルゴリズムの開発も行っており、本年度はヒッグス等の物理解析で重要となるジェットクラスタリング、ジェットフレーバー識別ソフトウェアの改良などを行った。

3.2.1 位置感度のあるシリコン検出器の開発研究

ILC の電磁カロリメータは、ジェット中の粒子を分離しエネルギー分解能を高めるため、微細分割されたカロリメータとなっている。センサーにはシリコンパッドが提案されており、センサーの安定性や組み立てのしやすさなど多くの利点がある。このシリコンパッドに位置情報が得られる PSD 機能を付与することで、飛来する光子の位置や方向を精度よく決める等画期的な機能を持ったカロリメータが実現できると考えられ、その研究を行っている。PSD 機能とは、シリコンパッドの電荷収集部を抵抗体とし、それを複数の電極へ分割して読み出しを行うことで、読み出された電荷の比を用いて入射位置を算出するデバイスである。本年度は小型のテスト PSD センサーを製作し、レーザー光を入射して、得られる位置の再現性や位置歪みの測定を行い、PSD 機能の実証に成功した (図 3.3)。今後、位置歪みの少ない抵抗パターンの開発、現実的な環境下におけるノイズの測定などを行い、さらに本格的な試作へと進む。

3.2.2 シリコン電磁カロリメータ読み出し ASIC の性能評価およびプロトタイプ試験

ILC のシリコン電磁カロリメータ (SiW-ECAL) は、20 ~ 30 レイヤのサンプリングカロリメータで、吸収体にタングステン、センサーに 5 mm 角程度に分割されたシリコンパッドを用いる。センサーは導電性接着剤で PCB に接着され、PCB の裏面に実装された ASIC で増幅・デジタル化が行われる。カロリメータ構造内に ASIC を閉じ込んでしまうことで外部への読み出しライン数を抑え、大量のチャンネルの読み出しを効率よく行うことができる。本読み出しのための ASIC は SKIROC2 というものがフランスで開発されており、本研究室では専用評価基板を用いて SKIROC2 の評価を行っている。SKIROC2 は BGA パッケージで提供されており、評価基板では BGA ソケット (直接半田付けも可能) を用いて疑似信号を入力した際の ASIC の信号雑音比の測定や時間分解能の測定などを行ってきた。本年度は SKIROC2 の改良バージョンである SKIROC2A と従来型の ASIC の比較を行い、信号雑音比等の基礎

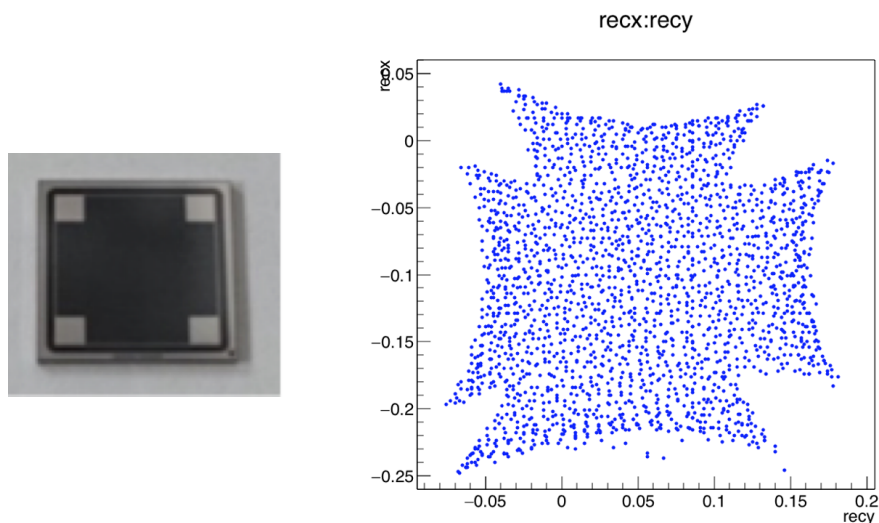


図 3.3: (左) テスト PSD センサー (7 mm 角)。端部の 4 つの電極から電荷を読み出す。端部以外の部分にレーザー入射可能。(右) レーザー位置スキャンを行い、得られた電荷から入射位置を計算したもの。PSD に特有の位置歪みが見られる。

特性において従来と同等の性能が得られることを示すとともに従来型の問題点としてあげられた、閾値コントロール機能の不備や信号入力後に偽信号が連続発生する現象について調べ、特に閾値コントロール機能が改善されたことを確認した。また、この ASIC を用いたプロトタイプ測定器の加速器ビームを用いた試験をフランスと共同で行っている。この試験はスイスの CERN 研究所 SPS ビームラインを用いて行われ、本年度はハドロンカロリメータとの協調動作を目指し、統合システムを構築して、ハドロンカロリメータとの同時試験を行った。(図 3.4) SiW-ECAL については、おそらくビームラインに起因するノイズが大きく従来のテストより性能が低下したが、協調動作には成功し、両カロリメータを貫くイベントの収集にも成功した。

3.2.3 ILC におけるクォーク識別ソフトウェアの改良

国内外の ILC 物理測定器研究者と共同で、ILC におけるクォーク識別ソフトウェアの改良を行っている。このソフトウェアは、ILC で得られると考えられるヒッグス粒子等による物理事象に対し、シミュレートされた各測定器の信号を解析し、測定器信号から元の事象を再構成するソフトウェアの一部で、特に重要なジェットの再構成およびフレーバーの特定を担うものである。本年度は本ソフトウェアが使用するライブラリの仕様変更によってフレー

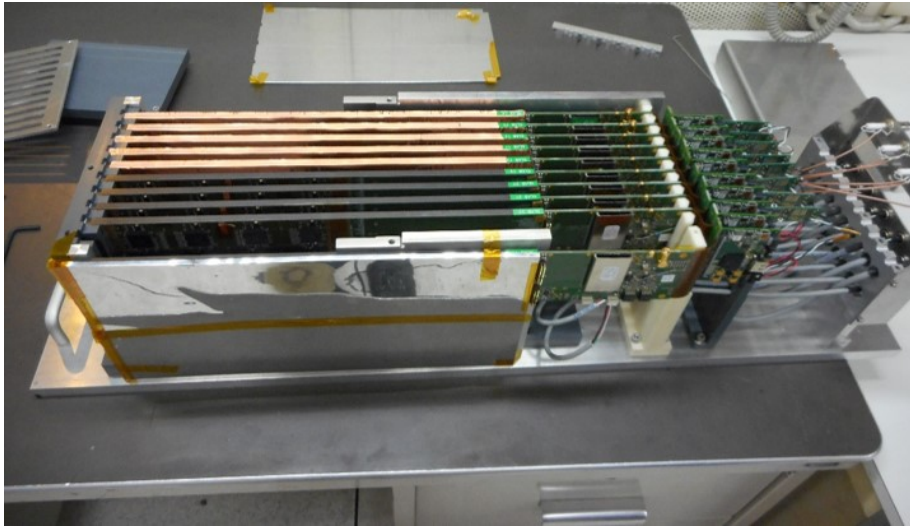


図 3.4: 2016 年のビームテストに用いられたシリコン電磁カロリメータプロトタイプ。

バー識別機能の性能が低下する問題を発見し、ライブラリの変更に取り組むとともに、新しいジェット再構成アルゴリズムの導入を行い、性能向上を図った。

3.2.4 研究業績

原著論文

- B. Freund *et al.* [CALICE Collaboration], “DHCAL with Minimal Absorber: Measurements with Positrons”, 2016 JINST **11** P05008.
- G. Eigen *et al.* [CALICE Collaboration], “Hadron shower decomposition in the highly granular CALICE analogue hadron calorimeter”, 2016 JINST **11** P06013.
- Z. Deng *et al.* [CALICE Collaboration], “Resistive Plate Chamber Digitization in a Hadronic Shower Environment”, 2016 JINST **11** P06014.

Proceedings

- Hiroaki Yamashiro, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Sudo Yuji, Hiroki Sumida, “Performance evaluation of PSD for silicon ECAL”, Proc. International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), arXiv:1703.08091

- I. Sekiya, H. Hirai, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe, “Performance study of SKIROC2 and SKIROC2A with BGA testboard”, Proc. International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), arXiv:1703.08105

海外での講演

- Towards a Technological Prototype for a High-granularity Electromagnetic Calorimeter for Future Lepton Colliders
Taikan Suehara on behalf of ILD SiW-ECAL group
CALOR2016, May 2016, Deagu, Korea
- CALICE DAQ Status and plans
Taikan Suehara
ECFA LC2016, June 2016, Santander, Spain
- LCFIPlus: Status & Plans
T. Suehara, T. Tanabe, M. Kurata, J. Strube
ECFA LC2016, June 2016, Santander, Spain
- Study of Direct top Yukawa Coupling Measurement at the ILC with $\sqrt{s} = 500$ GeV
Y. Sudo, T. Suehara
TopLC2016, July 2016, DESY, Hamburg, Germany
- Discussion on common DAQ
Taikan Suehara
CALICE Collaboration meeting, September 2016, Arlington, Texas, United States
- Performance evaluation of PSD for silicon ECAL
Hiroaki Yamashiro, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Sudo Yuji, Hiroki Sumida
International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), December 2016, Morioka, Japan
- Performance study of SKIROC2 and SKIROC2A with BGA testboard
I. Sekiya, H. Hirai, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe
International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), December 2016, Morioka, Japan

- Silicon sensor studies in Kyushu
T. Suehara, I. Sekiya, H. Yamashiro, T. Yoshioka, K. Kawagoe
CALICE Collaboration meeting, September 2016, Arlington, Texas, United States
- Study on Position Sensitive Detector
H. Yamashiro, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe
CALICE Collaboration meeting, March 2017, LLR, Palaiseau, France
- SKIROC2/2A study in Kyushu
I. Sekiya, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe
CALICE Collaboration meeting, March 2017, LLR, Palaiseau, France

国内での講演

- ダークマターの正体を探れ -地上実験による直接探索-
末原大幹
自然科学研究機構シンポジウム「現代天文学のフロンティア 第二の地球とダークな宇宙」, 2017年3月、東京
- シリコン電磁カロリメーターの読み出し ASIC、SKIROC2 と SKIROC2A の性能評価
関谷泉
日本物理学会第72回年次大会、2017年3月、大阪大学
- まとめと展望 (シンポジウム: 電子陽電子衝突実験 (ILC と SuperKEKB) の物理と展望 - LHC 13TeV の結果を受けて -)
川越清以
日本物理学会第72回年次大会、2017年3月、大阪大学

3.3 その他の活動

3.3.1 J-PARC での素粒子実験

本センターではLHC-ATLAS 実験や ILC 計画のような大規模実験以外にも、比較的小規模な素粒子実験も非常に重要なものと位置づけている。具体的には、茨城県東海村の J-PARC 加速器でのミューオンや中性子を用いた素粒子実験を推進している。

ミューオンを使った素粒子実験

本センターは、素粒子標準模型 (SM) を超える物理 (BSM) を探索するため、J-PARC におけるミューオンを用いた二つの素粒子実験を推進している。一つの実験は、ハドロン実験施設で建設が進んでいる世界最高強度のパルスミューオンビームを用いて、ミューオンが電子に転換する過程を探索する COMET 実験 (J-PARC E21 実験) である。もう一つの実験は、物質・生命科学実験施設 MLF において、ミューオンの異常磁気モーメント ($g-2$) と電気双極子モーメント (EDM) を測定する muon $g-2$ /EDM 実験 (J-PARC E34 実験) である。

ミューオン-電子 ($\mu-e$) 転換過程は SM で禁止されているため、BSM の探索に非常に有効である。LHC 加速器における BSM の直接探索で到達できるエネルギースケールは $\mathcal{O}(1)$ TeV であるが、 $\mu-e$ 転換過程を用いた間接探索では $\mathcal{O}(10^3)$ TeV まで到達できる。BSM の直接探索でその兆候がまだ見えていないため、 $\mu-e$ 転換過程を用いた間接探索が注目されている。実験計画は、Phase-I と Phase-II の二段階からなる。各段階での 1 事象発見感度は、Phase-I で $\mathcal{O}(10^{-15})$ 、Phase-II で $\mathcal{O}(10^{-17})$ であり、現在の上限値 7×10^{-13} (90% CL) を最終的に 10,000 倍向上させる計画である。第一段階 (Phase-I) では、円筒型ドリフトチェンバーとトリガー検出器を組み合わせた検出器システムが主要な役割を果たす。さらに、Phase-I で初めて生成するミューオンビームの性質を詳細に調べることが不可欠であり、その研究は Phase-II へ進むためにも重要である。Phase-I におけるミューオンビームの研究と Phase-II における物理測定では、ストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータを用いる計画である。

本センターの活動として、Phase-I の物理測定に用いるトリガー検出器の開発を進めている。電子をトリガーするため、UV アクリルをチェレンコフ輻射体とし、信号-背景比の向上とタイミング情報を得るため、プラスチックシンチレータを組み合わせる。光検出器としてファインメッシュ型光電子増倍管 (FM-PMT) を用いたプロトタイプ検出器の開発を進めた。主要な開発要素として、FM-PMT 後段に設置する前置増幅回路、放射線耐性、検出器筐体の設計がある。前置増幅回路の開発は、放射線耐性を残し、一定レベル完成した。放射線耐性については、実験で想定する中性子・ガンマ線量に対応して、検出器構成各部の性能の線量依存性を研究した。中性子は神戸大学のタンデム加速器、ガンマ線は九州大学の加速器・ビーム応用科学センターにあるガンマ線照射施設において、性能試験を行った。特に、前置増幅回路に用いるレギュレータの放射線耐性が懸案であり、性能試験を継続している。検出器筐体の設計も進行した。トリガー検出器全体を配置・支持し、実験環境下における背景事象の対する遮蔽、円筒型ドリフトチェンバー部のヘリウムに対する遮蔽を兼ね備えるデザインの開発が進行中である。

さらに、Phase-I 及び Phase-II で用いる電磁カロリメータとストローチューブ飛跡検出器の開発も行っている。電磁カロリメータは、高計数率環境下で信号電子のエネルギーを測定し、事象トリガーを生成するために重要な役割を果たす。磁場がある真空中で動作させ、高エネルギー分解能と速い時間応答を必要とするため、LYSO 結晶をアバランシェ・フォトダイ

オード (APD) で読み出す。昨年度の結晶選定後、実機を目指した試作機の開発を行なった。特に、検出器のモジュール構造の改良、APD 用測温抵抗の選定、較正モニタリング用 LED の選定、検出器構成要素の放射線損傷試験、真空フィードスルー回路の開発、前置増幅回路の改良を進めた。これらの要素を取り入れた試作機を製作し、東北大学電子光理学研究センターにおいてビーム試験を行った。ビーム試験は、ストローチューブ飛跡検出器の試作機も合わせて性能評価を行なった。そのため、荷電粒子の飛跡を検出するため、真空中で動作させるシンチレーションファイバー検出器の開発も行なった。データ解析の結果として、エネルギー分解能の向上を確認したが改良点も見出され、引き続き開発を進める予定である。

物質・生命科学実験施設 MLF における、ミュオンの異常磁気モーメント ($g-2$) と電気双極子モーメント (EDM) を測定する muon $g-2$ /EDM 実験 (J-PARC E34 実験) は、極冷ミュオンビームを用いた全く新しい測定原理に基づく実験である。異常磁気モーメントの測定は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E821 実験が 0.54 ppm の精度で SM から 3σ のずれを発表して以来、BSM の探索において注目を集めている。電気双極子モーメントの測定は、BNL E821 実験が $1.9 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm}$ の上限値を与えたが、有限の値が BSM の存在を示唆するため、感度を向上した測定が望まれている。J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験では、極冷ミュオンビームを用いて、収束電場なしで超高精度磁場中にミュオンを蓄積することにより、 $g-2$ を 0.1 ppm の精度で、EDM を $10^{-21} e \cdot \text{cm}$ の感度で、それぞれを分離して測定する。

本センターでは、本実験に用いるシリコンストリップ検出器を開発している。検出器は、ミュオンを蓄積する磁場内に設置し、ミュオンの崩壊で生成される陽電子の飛跡をヒット情報から再構成する。平均ヒット計数率は 1 ストリップあたり 1.2 MHz から二桁低い領域まで変動する。その環境下で計数率に対して安定であり、高検出効率が要求される。今年度は、シリコンストリップ検出器に用いる読み出しチップの開発を進めた。昨年度まで、64 チャンネルを有するアナログチップである Slit2013 の開発をしてきた。その後、Slit2013 の後継機として、アナログ部 Slit2014 とデジタル部 GM2DV2 を備えた混載チップの Slit128A を開発した。1 チップあたり 128 チャンネルを有し、実機仕様を目指して開発を行った。FPGA を搭載した評価基板を開発し、性能評価をした。この過程では、基板開発に加え、ベアチップを基板に実装し、「次世代シリコン半導体検出器開発システム」の自動式アルミ線ワイヤーボンダーを用いて $25 \mu\text{m}$ 径のアルミ線ワイヤーボンディングを行っている。その結果、信号・雑音比・ゲイン・ノイズ・ダイナミックレンジにおいて要求を満たすが、パルス幅とタイムウオークでは要求を満たさなかった。そのため、改良を加えた TEG を設計・製作し、実機仕様を目指した次期チップを開発する計画である。さらに、シリコンストリップ検出器に用いるシリコンセンサーの開発を進めている。今年度は、実機仕様のシリコンセンサーの設計と製作を行った。センサーは、 p -in- n 型の AC 結合で、6 インチウエハ上の最大面積を利用した。ピッチは $190 \mu\text{m}$ 、ストリップ数は 1024 本である。一つのデザインで二方向の読み出し、検出器モジュールのデザインと整合性を保つため、ダブルメタル手法を用いて読

み出しパッドをセンサー外縁部に配置した。そのため、センサーを 90° 回転した場合も読み出しパッドの位置は同一である。センサーのデザインを完了後、その製作を行い、基礎的な性能評価を行った。性能評価では、「次世代シリコン半導体検出器開発システム」のプロローブを用いて、センサー背面にチャックから高電圧を印加し、プローブによる直接接触により漏れ電流・静電容量を測定し、良好な結果を得た。今後、全ストリップを検査をするための測定系の開発を行い、より詳細な性能評価とセンサーの大量生産・検査に向けた準備を行う予定である。

中性子を使った素粒子実験

本センターでは、茨城県東海村 J-PARC/MLF に冷中性子ビームを用いて以下の基礎物理実験を推進している。

本センターでは茨城県東海村の J-PARC 加速器を用いて中性子崩壊寿命を高精度で測定する実験を推進している。中性子寿命を導出するためには中性子のフラックスと崩壊の量を知る必要があるが、これまで行われてきた実験では中性子と壁との相互作用やフラックスの系統誤差が問題となっていた。これに対し、我々の実験ではフラックスと崩壊電子を TPC 検出器で同時測定することにより、これまでの実験に伴っていた系統誤差を回避することが可能となる。我々は、この新たな手法を用いて 0.1% の精度で中性子の寿命を測定することを目指している。本年度は新たにデータ収集を行い、その取得データの解析を行った。その結果、検出器動作ガスで散乱された中性子が検出器壁面のフッ化リチウムに衝突することにより放出されたガンマ線が叩き出すコンプトン電子が主要な背景事象（以下、ガス起因事象）であることが判明した。ガス起因事象を定量的に評価するため、LiF の (n, γ) 反応事象のデータ収集を行い、解析を行った。また、ガス起因事象削減のため、新型検出器の開発および導入後の効果をモンテカルロシミュレーションにより評価した。新検出器の作製を行い、実機への導入作業を行った。

中性子吸収反応による複合核共鳴状態では部分波干渉によって空間反転対称性の破れが極めて大きく観測される場合が存在する。時間反転対称性の破れについても同様の増幅効果が現れる可能性が理論的に示唆されており、中性子の電気双極子能率を超えた感度を持ちうる。本実験は茨城県東海村の J-PARC にて行う計画だが、現在は J-PARC/MLF/BL04 で取得したデータによる標的核の選定および各種デバイス開発を行っている。本年度は、昨年度難点があることが明らかになったデータ収集系の改良を行った。また、データ解析に必要となるモンテカルロシミュレーションの開発を引き続き行った。また、標的核候補の一つであるスズを用いて予備データの取得を行い、必要な統計量を見積もった。

また、本センターは低エネルギーの中性子と希ガス原子の散乱によりナノメートルスケールで未知の相互作用を探索する実験計画を立案している。昨年度中に実験装置は全て J-PARC/MLF/BL05 に設置済みであり、実験装置は全て J-PARC/MLF/BL05 に設置済みで

あり、昨年度3月に初のデータ収集を行った。本年度はデータ収集を引き続き行い、従来の400倍のデータを取得できた。取得データの詳細な解析は現在進行中である。また、データ解析に必要なモンテカルロシミュレーションの開発を引き続きインディアナ大学と共同で行った。

研究業績

- H. Otono, “LiNA - Lifetime of neutron apparatus with time projection chamber and solenoid coil”, Nucl. Instrum. Meth. A **845**, 278-280 (2017).

3.3.2 アウトリーチ活動

サイエンスカフェ@ふくおか

福岡・佐賀に跨がる脊振山地が建設候補地の一つである国際リニアコライダー (ILC) 計画の周知・理解を目的として2012年8月より月1回の頻度でサイエンスカフェを開催してきた。2013年11月より、「九州大学を始め県内の科学リソースを使い、多くの県民の方に科学への興味、知的好奇心を持っていただくこと」を趣旨とし、テーマをILCに限定せずに分野の幅を広げた。本センターはサイエンスカフェの企画・立案、講師の選定・依頼、当日の司会進行までを一貫して責任担当している。これまでの参加者は、小学生から高齢者まで幅広く、毎月サイエンスカフェを楽しみにしている固定ファンの獲得にも成功している。

- 第44回 2017年2月24日
「色覚進化の謎に迫る！～霊長類の色覚の進化と多様性～」(参加者約40名)
講師：九州大学大学院芸術工学研究院 平松千尋
- 第43回 2017年1月20日
「新しい花の作り方の謎に迫る！～バイオテクノロジーを利用した新しい花の創出～」
(参加者約40名)
講師：農業・食品産業技術総合研究機構 佐々木克友
- 第42回 2016年12月9日
「材料の表面に迫る！～次世代材料の開発の鍵をにぎる精密合成・解析法～」(参加者約40名)
講師：九州大学先導物質化学研究所 平井智康

- 第 41 回 2016 年 10 月 14 日
「アナログとデジタルの関係に迫る！人の思考、コンピュータ、人工知能～」(参加者約 40 名)
講師：九州大学システム情報科学研究院 池田大輔
- 第 40 回 2016 年 8 月 26 日
「ナノパーティクルの化学に迫る！～持続可能な社会と触媒化学！～」(参加者約 40 名)
講師：九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 山内美穂
- 第 39 回 2016 年 7 月 8 日
「野生動物との共存に迫る！～狩猟を通して考える、人と野生動物の関係～」(参加者約 40 名)
講師：九州大学基幹教育院 安田章人
- 第 38 回 2016 年 5 月 27 日
「磁石の謎に迫る！ナノテクで切り拓く磁石の世界～」(参加者約 40 名)
講師：九州大学理学研究院物理学部門 大西紘平
- 第 37 回 2016 年 4 月 15 日
「宇宙のささやきを”聞く”！～天文学の新時代を切り開く重力波～」(参加者約 40 名)
講師：九州大学基幹教育院 佐合紀親

3.4 RCAPP プレプリント

- KYUSHU-RCAPP-2016-03
Ken-ichi Okumura (Kyushu U.), Hiroshi Suzuki (Kyushu U.), Aug 7, 2016. 10 pp.
“Fermion number anomaly with the fluffy mirror fermion”,
KYUSHU-HET-164.
- KYUSHU-RCAPP-2017-01
Natsumi Nagata (U. Tokyo), Hidetoshi Otono (Kyushu U.), Sathoshi Shirai (U. Tokyo). Jan 26, 2017. 19 pp.
”Cornering Compressed Gluino at the LHC”
- KYUSHU-RCAPP-2017-02
Hayato Ito (U. Tokyo), Osamu Jinnouchi (T. I. Tech), Takeo Moroi (U. Tokyo),

Natsumi Nagata (U. Tokyo), Hidetoshi Otono (Kyushu U.), Feb 28, 2017. 17 pp.
”Extending the LHC Reach for New Physics with Sub-Millimeter Displaced Vertex”

- KYUSHU-RCAPP-2017-03

Hajime Fukuda, Natsumi Nagata (U. Tokyo), Hidetoshi Otono (Kyushu U.), Satoshi Shirai (U. Tokyo), Mar 28, 2017, 7 pp.

”Higgsino Dark Matter or Not: Role of Disappearing Track Searches at the LHC and Future Colliders”

3.5 競争的資金獲得状況

- 平成 27-31 年度 科学研究費補助金・基盤研究 (S) 「ミュオン異常磁気能率の精密測定による新物理法則の探索」(分担：吉岡瑞樹)(平成 28 年度配分額：17,600 千円)
- 平成 28-30 年度 科学研究費補助金・基盤研究 (A) 「J-PARC 大強度パルス中性子を用いた中性子寿命の測定」(分担：吉岡瑞樹)(平成 28 年度配分額：3,400 千円)
- 平成 28 年度 住友財団基礎科学研究助成金 「世界最高精度での中性子寿命測定実験のための新型ガス検出器の開発研究」(代表：吉岡瑞樹)(平成 28 年度配分額：2,500 千円)
- 平成 27-28 年度 科学研究費補助金・若手研究 (B) 「ATLAS 検出器を用いた長寿命グルーノの探索」(代表：音野瑛俊)(平成 28 年度配分額：13,000 千円)