



平成31年度（2019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

令和3年2月2日

目次

第1章	はじめに	2
第2章	構成員リスト	5
2.1	テラスケール物理実験部門	5
2.2	次世代加速器実験推進部門	5
2.3	先端素粒子物理理論部門	6
2.4	大強度量子ビーム実験部門	6
2.5	先端素粒子物理研究センター委員会委員名簿	7
2.6	研究支援スタッフ	7
第3章	活動報告	8
3.1	LHC-ATLAS 実験	8
3.1.1	シリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良	8
3.1.2	ヒッグス粒子の性質の研究	9
3.1.3	新粒子の探索	9
3.1.4	検出器アップグレード計画	10
3.1.5	研究業績	11
3.2	ILC 計画	24
3.2.1	シリコン電磁カロリメータプロトタイプの開発	24
3.2.2	高時間分解能、高空間分解能のシリコン検出器の開発研究	26
3.2.3	ILC における深層学習を用いた崩壊点検出アルゴリズムの開発	26
3.2.4	研究業績	26
3.3	その他の活動	30
3.3.1	J-PARC での素粒子実験	30
3.3.2	LHC での FASER 実験	37
3.3.3	アウトリーチ活動	38
3.4	競争的資金獲得状況	39

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（時限は2018年3月まで）。本報告書は、2018年4月に始まる本センター第2期（5年間）2年目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。

本センター第2期では、実験3部門、理論1部門の組織構成で研究活動を行なっております。各部門名とその役割は以下の通りです。

1. **テラスケール物理実験部門**：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。
2. **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。
3. **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。
4. **先端素粒子物理理論部門**：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。

2020年初頭から新型コロナウイルスの感染が世界的に拡大し、私たちを取り巻く環境は一変しました。その中で、各部門は研究活動を続けています。以下に、各部門の現状について、簡単な説明を加えます。

テラスケール物理実験部門が推進する LHC のアトラス実験では、2015年に始まった Run 2 実験が 2018年に完了し、2019年から長期シャットダウンに入りました。現在は Run 2 実験のデータ解析と次期実験（Run 3）開始のための準備を進めています。新型コロナウイルスの影響は欧州において日本以上に深刻であります。音野助教は2019年から帰国なしで現在も常駐し、CERNでの研究活動を続けています。なお、新型コロナウイルスの影響で LHC の運転計画も変更となり、Run 3 実験は当初の計画から1年遅れ、2022年から始まることになりました。LHC の

衝突輝度を現在の約 10 倍に高める高輝度 LHC 計画 (HL-LHC) が決まっております、2030 年台後半まで運転される予定です。本センターでは、HL-LHC での実験に備え、検出器のアップグレード計画、特に新型シリコンピクセル検出器の開発・製作を行なっています。アトラス実験は最先端の成果を続々と生み出し、年 100 本程度の学術論文をコンスタントに発表しています。これらの学術論文は引用数も多く、九州大学の評価を高める上でも十分な貢献をしていると自負しております。本センターは、アトラス測定器の運転、物理解析、測定器アップグレードにおいて今後も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) 計画について、2020 年も大きな進展がありました。2019 年 3 月に東京で開催された LCB 会議において、文部科学省による ILC 計画に対する見解について初めて発表がありましたが、2020 年 2 月に米国 SLAC で開催された LCB 会議で文部科学省と ILC 議連から進捗報告があり、その後、国際将来加速器委員会 (ICFA) のもとに ILC 国際推進チームが設立されました (2020 年 8 月)。ILC 国際推進チームは日本の ILC 準備研究所設立に向けた準備を任務としており、これによって ILC 計画は新たなフェーズに入りました。2020 年 6 月に公表された欧州素粒子物理戦略の更新では、「電子陽電子ヒッグスファクトリーが、最も優先度の高い次のコライダーである」、そして「日本における電子陽電子国際リニアコライダー (ILC) のタイムリーな実現は、この戦略に適合するものであり、その場合、欧州の素粒子物理学コミュニティは協働することを望む」と明記されました。また、昨年から米国エネルギー省、国務省は日本で行う ILC 計画を強く支持することを表明しています。日本では、高エネルギー研究者コミュニティ (高エネルギー物理学研究者会議) を代表する高エネルギー委員会が、ILC 推進パネルを設立しました。ILC 推進パネルの任務は、ILC 計画の時宜を得た実現のために日本の高エネルギー研究者コミュニティを主導することであり、私も委員 (幹事) として活動しています。このように、ILC の日本誘致にはまだ至っておりませんが、各方面で着実に進展しています。本センターは、ILC 計画の実現に向けて、研究者としての学術的研究はもちろんのこと、様々な推進活動を今後も展開していきます。

大強度量子ビーム実験部門では、東海村 J-PARC の最先端加速器を用いて、素粒子原子核物理だけでなく、物質生命科学の分野にまたがる多彩な研究教育活動を行っています。コロナ禍にあっても J-PARC での研究活動レベルは保たれており、J-PARC に常駐して研究活動に邁進する博士課程大学院生を含め、精力的に活動を行なっています。吉岡准教授が研究分担者を務める特別推進研究「ミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の超精密測定」が 2020 年度から新規採択されたことも嬉しいニュースです。J-PARC での研究教育活動の拠点として設置された九州大学の J-PARC 分室の管理は本センターで行なっておりますが、九州大学全体で共同利用することになっています。皆様に広くご利用いただくと光栄です。

2019 年度、理学研究院物理学部門に津村浩二准教授が着任されました。津村准教授は実験

との強い関係を持つ素粒子現象論が専門で、2020年度から先端素粒子物理理論部門の複担教員になっていただきました。理学研究院の「素粒子原子核研究特区」においても議論していることですが、九州大学の素粒子原子核物理の研究分野において、実験と理論の連携をさらに強化して行きたいと存じます。

本センターの吉岡准教授は、2020年4月から本学社会連携推進室の「科学コミュニケーション推進グループ長」に就任しました。吉岡准教授は2012年から「サイエンスカフェ@ふくおか」を主催してきましたが、大学の正式なバックアップを得て、科学コミュニケーションの分野においても、さらに活躍の場が広がるものと期待しています。また、2017年から本センターの特任助教を務めていただいた山中隆志氏が、2020年4月に本学基幹教育院助教に着任されました。山中氏とは、今後も大強度量子ビーム実験部門で協力関係を続けていきます。

最後になりますが、昨年11月に素晴らしい知らせがありました。本センター大強度量子ビーム実験部門で複担教員を勤めていただいている、先導物質化学研究所の高原教授が、「中性子反射率測定によるソフト界面の構造評価」というテーマで2020年度の日本中性子科学会学会賞を受賞されたのです。日本中性子科学会の学会賞は、中性子科学の進歩発展に寄与しその業績が顕著な者に対して授与されるものであり、先生の業績に、あらためて敬意を表させていただきます。また、テラスケール物理実験部門の織田助教が、2020年のATLAS実験のOutstanding Achievement Awardsを受賞しました。これは、著者数3000人のATLAS実験の中で特に顕著な活躍を示した個人やグループに与えられるもので、「ATLASソフトウェアへの顕著な貢献、特にAthenaのマルチスレッド移行」という織田助教の業績が高く評価されました。

引き続き、みなさまのご支援ご協力、よろしく願いいたします。

2021年2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	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
末原 大幹	助教	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	協力
三谷 泰浩	教授	工学研究院 附属アジア防災研究センター	協力
山中 隆志	特任助教	先端素粒子物理研究センター	専任
杉山 晃	教授	佐賀大学 理工学部 物理科学科	客員
房安 貴弘	准教授	佐賀大学 理工学部 物理科学科	客員

2.3 先端素粒子物理理論部門

鈴木 博	教授	理学研究院 物理学部門	複担
肥山 詠美子	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	特任助教	先端素粒子物理研究センター	専任

2.4 大強度量子ビーム実験部門

安中 雅彦	教授	理学研究院 化学部門	複担
高原 淳	教授	先端物質化学研究所 分子集積化学部門	複担
渡辺 幸信	教授	総合理工学研究院 エネルギー科学部門	複担
田中 敬二	教授	工学研究院 応用化学部門	協力
吉岡 瑞樹	准教授	先端素粒子物理研究センター	専任

2.5 先端素粒子物理研究センター委員会委員名簿

安中 雅彦	教授	理学研究院	センター部門担当
池田 伸夫	教授	工学研究院	
大河内 豊	准教授	基幹教育院	センター部門担当
川越 清以	教授	理学研究院	センター部門担当・センター長
鈴木 博	教授	理学研究院	センター部門担当
師富 洋	事務長	理学部等事務部	
高田 仁	教授	経済学研究院	センター部門担当
高原 淳	教授	先導物質化学研究所	センター部門担当
東城 順治	准教授	理学研究院	センター部門担当
原田 恒司	教授	基幹教育院	センター部門担当
肥山 詠美子	教授	理学研究院	センター部門担当
森田 浩介	教授	理学研究院	
渡辺 幸信	教授	総合理工学研究院	センター部門担当
吉岡 瑞樹	准教授	先端素粒子物理研究センター	大強度量子ビーム実験部門

2.6 研究支援スタッフ

重松 さおり (テクニカルスタッフ)

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、ATLAS 実験を推進している。LHC 加速器では、2015 年から重心系エネルギー 13 TeV での運転を再開し、2018 年に実験第二期である Run2 を完了した。2018 年 1 月からは、加速器整備・検出器アップグレードのため、約 3 年間のシャットダウン期間を設ける。その後、2022 年から現行計画の最終段階である第三期 Run3 を遂行し、大規模な加速器増強・検出器アップグレードを経て、2027 年からさらにエネルギーフロンティア物理を推進する計画である。今年度は、Run2 におけるシリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良、ヒッグス粒子の性質の研究、新粒子の探索、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 年から始まった LHC の運転において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。Run3 において計算機資源を効率的に使うために、SCT のソフトウェアのマルチスレッド化に取り組み、ATLAS 検出器を構成する検出器群のうちで最初に完了させた。音野は 2016 年 6 月から SCT 検出器の副運転責任者、2017 年 1 月から 10 月まで運転責任者を務めた。2018 年末までの Run2 において、LHC の単位時間あたりの陽子同士の同時衝突数 (瞬間輝度) は $21.0 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ に到達し、設計値 $10 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ を大きく超えて、3 年間で 156 fb^{-1} のデータを供給した。検出器にとっては厳しい環境の中、SCT が原因で取得できなかったデータの割合は 0.1% 以下、取得データのうち SCT の問題で物

理解析に使用できなかった割合も 0.1% 以下に留めることができた。ATLAS 実験全体としてのこれらの割合は、5.7% 及び 5.4% であることから SCT が優れた性能を発揮できていることがわかる。Run3 における SCT の安定した運転を目指し、2019 年から様々な活動を開始した。今後の放射線損傷を踏まえた運転計画の策定、SCT の性能の変化を早急に検知し原因を突き止めるためのツール開発、データの物理解析への使用の可否を決める基準の再考などを進めている。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 ヒッグス粒子の性質の研究

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 ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$) 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。2018 年 10 月 までに取得した積分ルミノシティ 139 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 2019 年 7 月にヨーロッパ物理学会 (EPS-HEP2019) において織田が初めて公表した。4 レプトンチャンネルでは、4 レプトンの質量が $115 \text{ GeV} < m_{4\ell} < 130 \text{ GeV}$ の範囲に 316 事象を観測した。 ZZ^* への崩壊分岐比を含めた、ヒッグス粒子のグルーオン融合過程による生成断面積は $1.15 \pm 0.13 \text{ pb}$ であり、素粒子の標準模型に基づく理論計算の結果 $1.17 \pm 0.08 \text{ pb}$ と不定性の範囲内で一致した。ベクトルボソン融合過程による生成断面積の観測値は $130 \pm 45 \text{ fb}$ であり、理論値 $92.0 \pm 3.1 \text{ pb}$ と不定性の範囲内で一致した。4 レプトンの横運動量やジェットの数の微分生成断面積の観測値も理論値と良い一致を示した。

3.1.3 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。新粒子の発見には至らなかったが、論文を 2018 年に出版している。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新たな開発が必要となるが、事象の再構成効率や背景事象の見積もり、系統誤差の評価などを着実に進めた。2016 年までの取得データの解析において新粒子の発見には至らなかったが、探索結果について論文を 2019 年に出版している。織田は東京工業大学に異動した理学府物理学専攻の調らとともに、Run2 全データを用いた右巻きニュートリノの探索を開始した。以前の解析に含まれていなかった電子ニュートリノと結合する右巻きニュートリノも探索できるように、解析方法を更新し、背景事象の見積もりを進めた。連携して活動している理学府物理学専攻の山口は長寿命チャージノの探索に着手した。特に、質量差が小さいニュートラリーノへ崩壊するものに注目すると、内部飛跡検出器内で崩壊し、飛跡が消失するという特徴を有する。解析手法の開発により探索領域を拡張できる可能性が高く、今後の進展が期待できる。

3.1.4 検出器アップグレード計画

現行の LHC 加速器は、2024 年まで運転して積分ルミノシティ 350 fb^{-1} を ATLAS 実験に提供する予定である。その後、加速器増強により瞬間ルミノシティを $(5-7) \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に向上させ、2027 年から高ルミノシティ LHC (HL-LHC) として再稼働させる計画である。HL-LHC 計画に向けて、ATLAS 実験では検出器アップグレード計画を遂行している。我々のグループは、現行の内部飛跡検出器 (ID) を高放射線耐性シリコン検出器 (ITk) にアップグレードする計画に参画している。ITk 検出器のうち、特に、新型のシリコンピクセル検出器の開発・製作を担当している。シリコンピクセル検出器は、センサー・読み出しチップ (ASIC) をバンプボンディング接合したセンサーモジュール、ASIC 制御用のフレキシブル基板、冷却機構との接触部である TPG セル、の 3 つの構成要素を持つ。検出器組立の開発要素として、放射線耐性、高位置精度の接着、ワイヤーボンディング、ワイヤー保護、放電抑制のためのパリレンコーディング、品質管理のための検出器読み出し手法がある。放射線耐性については、東北大学 CYRIC 加速器施設の陽子ビームを用い、陽子線照射による検出器部材の性質を研究した。特に、接着剤・封止剤については、海外共同研究者とも協力して多くの知見を得た。最終的な選定に至るまで、今後もこの研究を重視して進める計画である。組立における接着では、ステンシル法の開発を進めてきた。ステンシル法は、レーザー加工でステンレスシートにパターンを形成し、そのシートを用いて塗布を行う手法であり、量産に向いている。多様なパターンを試みて、最小物質質量・接着剤の厚み・一様性・気泡排除・熱応力等の要求を満たすことを実証してきた。高位置精度の組立では、治具の開発が重要である。高精度機械加工により治具試作機を製作・改良し、繰り返し位置精度の要求値である

30 μm 以内を達成することに成功した。この結果を受けて、接着・組立手法について、ITk ピクセル検出器全体で我々のグループが開発した手法が標準手法として採用された。海外共同研究者と協力して、量産体制に進める計画である。ワイヤー保護には通常は封止剤を用いる。CERN 研究者とも協力し、放射線耐性と熱サイクルの要求を満たす封止剤を研究してきたが、これまでのところ残る候補がない状況である。今後は低物質量の材料を用いた保護機構も含めて検討する計画である。検出器読み出しは、昨年度に国内共同研究者と協力して構築した環境を用い、検出器開発・製作全体の工程で稼働させてきた。今後、最終仕様の検出器に向けた開発を完了させ、検出器の製作、CERN 現地での検出器全体の組立に活動を広げていく予定である。

3.1.5 研究業績

原著論文

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of soft-drop jet observables in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **101**, 052007 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of isolated-photon plus two-jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 179 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for electroweak production of supersymmetric particles with compressed mass spectra in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **101**, 052005 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived neutral particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV decaying into displaced hadronic jets in the ATLAS inner detector and muon spectrometer,” *Phys. Rev. D* **101**, 052013 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct stau production in events with two hadronic τ -leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **101**, 032009 (2020).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $Z(\rightarrow \ell^+ \ell^-) \gamma$ production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 054 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the azimuthal anisotropy of charged-particle production in Xe+Xe collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.44$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **101**, 024906 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections for single diffractive dissociation in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions using the ATLAS ALFA spectrometer,” JHEP **02**, 042 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Transverse momentum and process dependent azimuthal anisotropies in $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 8.16$ TeV p +Pb collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, 73 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ Z boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV measured by the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **802**, 135262 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances in mass distributions of jet pairs using 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 145 (2020).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of J/ψ production in association with a W^\pm boson with pp data at 8 TeV,” JHEP **01**, 095 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson decays $H \rightarrow ee$ and $H \rightarrow e\mu$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **801**, 135148 (2020).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **101**, 012002 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of azimuthal anisotropy of muons from charm and bottom hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 082301 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of electron and photon triggers in ATLAS during LHC Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 47 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral currents in processes with one top quark and a photon using 81 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **800**, 135082 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of charginos and sleptons decaying into final states with two leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 123 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant Higgs boson pair production in the $bbl\nu\ell\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **801**, 135145 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for displaced vertices of oppositely charged leptons from decays of long-lived particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **801**, 135114 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for lepton-flavour-violating decays of the Higgs boson in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **800**, 135069 (2020).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of long-range two-particle azimuthal correlations in Z -boson tagged pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 64 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for Higgs boson pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **800**, 135103 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Magnetic Monopoles and Stable High-Electric-Charge Objects in 13 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 031802 (2020).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fluctuations of anisotropic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 051 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential and double-differential cross-sections in the ℓ +jets channel with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 1028 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of angular and momentum distributions of charged particles within and around jets in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **100**, 064901 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom-squark pair production with the ATLAS detector in final states containing Higgs bosons, b -jets and missing transverse momentum,” *JHEP* **1912**, 060 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive isolated-photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using 36 fb⁻¹ of ATLAS data,” *JHEP* **1910**, 203 (2019).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron and photon performance measurements with the ATLAS detector using the 2015 - 2017 LHC proton-proton collision data,” *JINST* **14**, P12006 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of K_S^0 and Λ^0 production in $t\bar{t}$ dileptonic events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 1017 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^\pm boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 935 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive cross-section for the production of jets in association with a Z boson in proton-proton collisions at 8 TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 847 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of flow harmonics correlations with mean transverse momentum in lead-lead and proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 985 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS b-jet identification performance and efficiency measurement with $t\bar{t}$ events in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 970 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^\pm -boson and Z-boson production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 901 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Resolution of the ATLAS muon spectrometer monitored drift tubes in LHC Run 2,” *JINST* **14**, P09011 (2019).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of boosted Higgs bosons decaying into b -quark pairs with the ATLAS detector at 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 836 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Properties of jet fragmentation using charged particles measured with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **100**, 052011 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for diboson resonances in hadronic final states in 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1909**, 091 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a heavy charged boson in events with a charged lepton and missing transverse momentum from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **100**, 052013 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for excited electrons singly produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 803 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak production of a same-sign W boson pair in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, 161801 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of distributions sensitive to the underlying event in inclusive Z -boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 666 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral leptons in decays of W bosons produced in 13 TeV pp collisions using prompt and displaced signatures with the ATLAS detector,” *JHEP* **1910**, 265 (2019).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the electroweak diboson production in association with a high-mass dijet system in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **100**, 032007 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of ZZ production in the $\ell\nu\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **1910**, 127 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of fiducial and differential W^+W^- production cross-sections at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 884 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Modelling radiation damage to pixel sensors in the ATLAS detector,” *JINST* **14**, P06012 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top-quark mass in $t\bar{t} + 1$ -jet events collected with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JHEP* **1911**, 150 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a right-handed gauge boson decaying into a high-momentum heavy neutrino and a charged lepton in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **798**, 134942 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-section and charge asymmetry of W bosons produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 760 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for invisible Higgs boson decays with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **122**, 231801 (2019).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of light-by-light scattering in ultraperipheral Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, 052001 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the production of three massive vector bosons with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **798**, 134913 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the production of three massive vectorbosons in pp collisions with the ATLAS detector,” *PoS DIS 2019*, 135 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross section for a Higgs boson in association with a vector boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **798**, 134949 (2019).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass dilepton resonances using 139 fb^{-1} of pp collision data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **796**, 68 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $VH, H \rightarrow b\bar{b}$ production as a function of the vector-boson transverse momentum in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **1905**, 141 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet-substructure observables in top quark, W boson and light jet production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1908**, 033 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of prompt photon production in $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV p +Pb collisions with ATLAS,” *Phys. Lett. B* **796**, 230 (2019).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on mediator-based dark matter and scalar dark energy models using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data collected by the ATLAS detector,” JHEP **1905**, 142 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy particles decaying into a top-quark pair in the fully hadronic final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 092004 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Comparison of Fragmentation Functions for Jets Dominated by Light Quarks and Gluons from pp and Pb+Pb Collisions in ATLAS,” Phys. Rev. Lett. **123**, 042001 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for third-generation scalar leptoquarks in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1906**, 144 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Combinations of single-top-quark production cross-section measurements and $|f_{LV}V_{tb}|$ determinations at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments Combinations of single-top-quark production cross-section measurements and $|f_{LV}V_{tb}|$ determinations at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments,” JHEP **1905**, 088 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the four-lepton invariant mass spectrum in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 048 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $W^{\pm}Z$ production cross sections and gauge boson polarisation in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 535 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron reconstruction and identification in the ATLAS experiment using the 2015 and 2016 LHC proton-proton collision data

at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **79**, 639 (2019).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived neutral particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS calorimeter,” Eur. Phys. J. C **79**, 481 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy charged long-lived particles in the ATLAS detector in 36.1 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. D **99**, 092007 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for scalar leptoquarks and differential cross-section measurements in dilepton-dijet events in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” Eur. Phys. J. C **79**, 733 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for low-mass resonances decaying into two jets and produced in association with a photon using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **795**, 56 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet azimuthal correlations and conditional yields in pp and p+Pb collisions at $\sqrt{s}=5.02\text{TeV}$ with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **100**, 034903 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the ratio of cross sections for inclusive isolated-photon production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ and 8 TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 093 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for scalar resonances decaying into $\mu^+\mu^-$ in events with and without b -tagged jets produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1907**, 117 (2019).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **99**, 072009 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top-quark decays $t \rightarrow Hq$ with 36 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1905**, 123 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for large missing transverse momentum in association with one top-quark in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1905**, 041 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak $W^\pm Z$ boson pair production in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **793**, 469 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino and neutralino production in final states with a Higgs boson and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **100**, 012006 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like quarks decaying into Wb in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1905**, 164 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the rare decays of B_s^0 and B^0 mesons into muon pairs using data collected during 2015 and 2016 with the ATLAS detector,” *JHEP* **1904**, 098 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}\gamma$ production in leptonic final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV in ATLAS,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 382 (2019).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}$ production with additional heavy-flavour jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 046 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $WW^{(*)}WW^{(*)}$ decay channel using ATLAS data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JHEP **1905**, 124 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of τ -leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 072001 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $b\bar{b}WW^*$ decay mode at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 092 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Production of a Long-Lived Neutral Particle Decaying within the ATLAS Hadronic Calorimeter in Association with a Z Boson from pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. Lett. **122**, 151801 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of W and Z boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 128 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Majorana or Dirac neutrinos and right-handed W gauge bosons in final states with two charged leptons and two jets at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1901**, 016 (2019).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for invisible Higgs boson decays in vector boson fusion at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **793**, 499 (2019).

- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of top-quark and W -boson tagging with ATLAS in Run 2 of the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 375 (2019).
- E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata, H. Otono, R. Ruiz De Austri, “Sampling the $\mu\nu$ SSM for displaced decays of the tau left sneutrino LSP at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 934 (2019).
- H. Fukuda, N. Nagata, H. Oide, H. Otono and S. Shirai, “Cornering Higgsino: Use of Soft Displaced Track,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 101801 (2020).

海外での講演

- Higgsino ; jet + soft displaced track
Hidetoshi Otono
Searching for long-lived particles at the LHC: Sixth workshop of the LHC LLP Community, November 2019, Ghent, Belgium
- Measurement of cross sections in Higgs boson decays to four leptons with the ATLAS detector
Susumu Oda
European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2019), July 2019, Ghent, Belgium
- Searches for supersymmetric particles with macroscopic or stable lifetimes using the ATLAS detector
Hidetoshi Otono
27th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY2019), May 2019, Corpus Christi, Texas, USA

国内での講演

- LHC-ATLAS 実験シリコンストリップ検出器のオフラインソフトウェアのマルチスレッド化
織田 勸
日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学
- LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるストリップ型シリコン検出器 (SCT) の性能評価
音野 瑛俊
日本物理学会 2019 年秋季大会、2019 年 9 月、山形大学
- LHC における長寿命中性レプトンの探索
織田 勸
新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 2019、2019 年 6 月、伊賀、三重
- 趣旨説明
東城 順治
測定器開発プラットフォーム・シリコン検出器、2019 年 9 月、高エネルギー加速器研究機構、つくば、茨城

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、昨年度開発した ILC 電磁カロリメータの新バージョンの問題点を改善し、再度ビームテストを行って性能評価を行った。また、カロリメータにさらなる時間分解能や空間分解能を付与する新型センサーの開発を進め、初のビーム試験を行い時間分解能の評価を行った。並行して、シミュレーションを用いた ILC 事象再構成の改善に取り組んでおり、本年度は深層学習を用いた崩壊点再構成アルゴリズムの開発をはじめた。

3.2.1 シリコン電磁カロリメータプロトタイプの開発

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(特定用途向け集積回路)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。

このプロトタイプを組み立てはこれまでフランスで行われてきたが、昨年度より国内の技術を用いて九州大学においてもプロトタイプの生産・組み立てを行っている。本年度は、昨年度九州大学で製作したプロトタイプの電圧供給不安定性の問題を解決するため、フレームへの固定方法の改良等を行い、ドイツのDESY研究所にて2019年7月にビーム試験を行い安定動作を確認した。合わせて、時間測定(TDC)機能の試験も行い、はじめてビームを用いた複数レイヤにおける時間同期測定を行った(図3.1)。また、従来からの問題であるリトリガリング現象(トリガーが二重・三重に発生しメモリが埋まってしまう問題)の特徴的なパターンを発見し、問題解決への道筋を開いた。2020年3月にもビーム試験を行う予定で追加のプロトタイプの製作・単体試験も行ったが、Covid-19の影響でビーム試験は2021年5月に延期された。

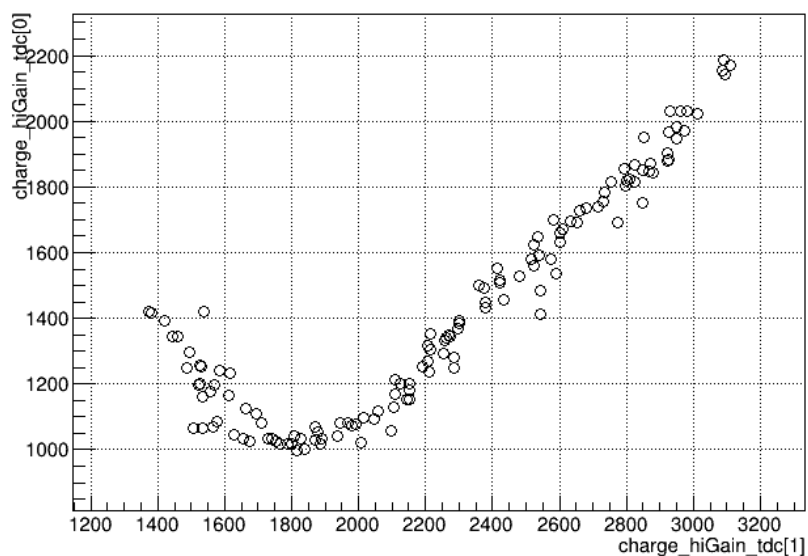


図 3.1: 2つのレイヤー間でのTDC同期測定。10カウントが約1ナノ秒に相当する。

3.2.2 高時間分解能、高空間分解能の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。センサーに用いるシリコンパッド検出器のオプションとして、高時間分解能および高位置分解能 (のいずれか) を持たせたセンサーの研究を行っている。高位置分解能センサーには LGAD と呼ばれるアバランシェゲインを持つセンサーを用いる。LGAD を用いると検出層を薄くすることができ時間分解能が大幅に向上する。すでに数 10 ピコ秒の分解能を持つセンサーが開発されており、実用に向けた研究が進んでいる。本年度は東北大学光電子理学研究センター (ELPH) にてビームテストをはじめて行い、LGAD と同等の構造を持つ APD センサーに電子ビームを照射しその応答を調べた。特に複数のセンサーを貫く事象を用いて、時間分解能の評価を行い、100 fC 以上 (増幅後) の信号に対して 385 ± 94 psec という結果を得た (図 3.2)。また、ガンマ線やベータ線源を用いて、ゲインと電圧の関係やゲインの安定性の評価などを行った。

また、シリコンセンサーに PSD による位置感度を付加して、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の製作を検討している。PSD 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 PSD に対する放射線源を用いた測定を行い、高抵抗のサンプルで十分な信号分離比が得られることを放射線源で初めて確認した (図 3.3)。

3.2.3 ILC における深層学習を用いた崩壊点検出アルゴリズムの開発

ILC における二次・三次崩壊点の検出は、ジェットフレーバーの識別等に重要な役割を果たし、その性能は ILC において特に重要な物理であるヒッグスの精密測定等の性能を制限する最重要の要因の一つである。これまでの崩壊点検出は、本センターのメンバーを含めたチームが開発した「LCFIPlus」というソフトウェアが国際研究で利用されているが、このソフトウェアは従来型の場合分けによる方法を用いており、近年急速に進歩した深層学習の手法を使うことで性能を飛躍的に改善することが期待できる。本年度は、Tensorflow/Keras と GPU を用いた深層学習の研究環境の構築を行うとともに、飛跡のペアが二次崩壊点から発生しているかどうかを判別する深層ニューラルネットワークの設計・性能最適化を開始した。

3.2.4 研究業績

原著論文

- The ILD Collaboration, “International Large Detector: Interim Design Report”, DESY 20-034, KEK 2019-57, arXiv:2003.01116.

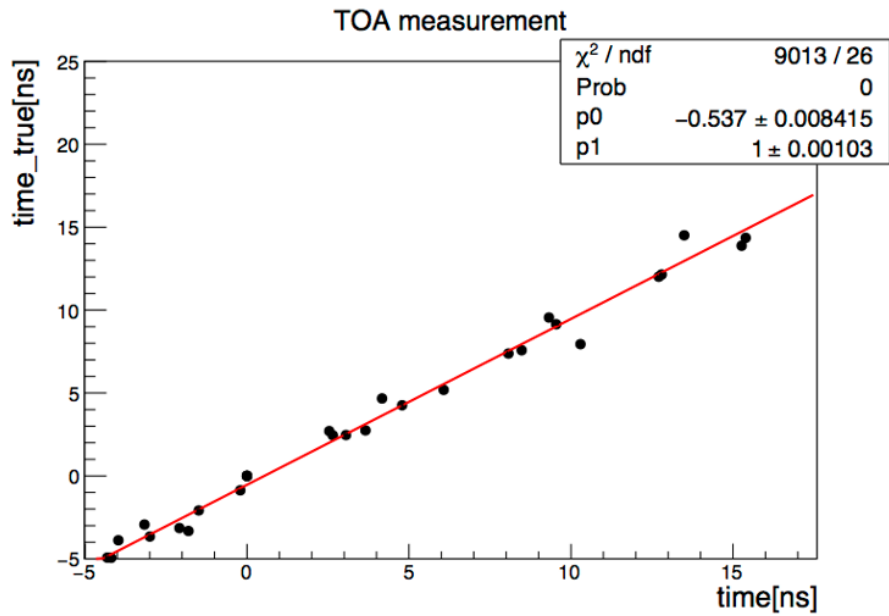


図 3.2: APD (S2384) の同時計測による時刻相関。2つのセンサーの信号が 100 fC 以上の場合のみを選別した。

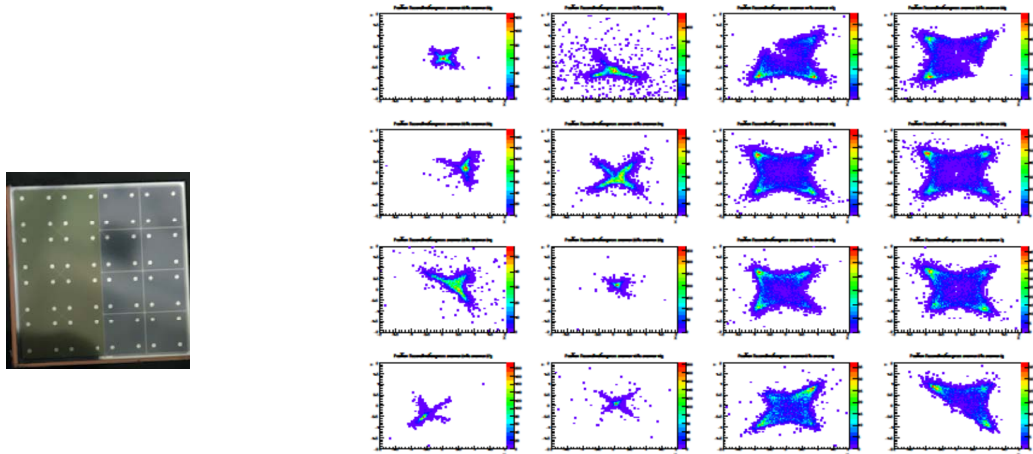


図 3.3: 左: 本センターで開発した 16 セル PSD。右: PSD のベータ線源に対する応答。左側の 8 セルは抵抗値が十分でないため中心に信号が集まっており、十分に位置を再構成できないが、右側の 8 セルは抵抗値が左側の 10 倍であり、広い分布が得られている。

- K. Kawagoe, Y. Miura, I. Sekiya, T. Suehara, T. Yoshioka, A. Irls *et al.*, “Beam test performance of the highly granular SiW-ECAL technological prototype for the ILC”, Nucl. Instrum. Meth. **A 950** (2020) 162969.
- P. Ahlburg, J. Dreyling-Eschweiler, T. Suehara *et al.* “EUDAQ – A Data Acquisition Software Framework for Common Beam Telescopes”, 2020 JINST **15** P01038.
- K. Fujii, C. Grojean, M. E. Peskin, T. Barklow, Y. Gao, S. Kanemura, H. Kim, J. List, M. Nojiri, M. Perelstein, R. Poeschl, J. Reuter, F. Simon, T. Tanabe, J. D. Wells, J. Yu, J. Tian, T. Suehara, M. Vos, G. Wilson, J. Brau, H. Murayama, “Tests of the Standard Model at the International Linear Collider”, DESY 19-146, KEK Preprint 2019-22, SLAC-PUB-17467, arXiv:1908.11299.
- The CALICE Collaboration, G. Eigen *et al.*, “Characterisation of different stages of hadronic showers using the CALICE Si-W ECAL physics prototype”, Nucl. Instrum. Meth. **A 937** (2019) 41.

Proceedings

- Yu Kato, Kiichi Goto, Taikan Suehara, CALICE SiW-ECAL group, “Analysis of SiW-ECAL technological prototype beam test with electron beam”, Proc. CHEF2019, arXiv:2002.12019.
- Y. Uesugi, R. Mori, H. Yamashiro, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe, “Study of position sensitive silicon detector (PSD) for SiW-ECAL at ILC”, Proc. CHEF2019, 2020 JINST **15** C05033.
- Y. Deguchi, K. Kawagoe, E. Mestre, R. Mori, T. Suehara, T. Yoshioka, “Study of silicon sensors for precise timing measurement”, Proc. CHEF2019, 2020 JINST **15** C05051.

海外での講演

- ILC Physics and Detectors:
K. Kawagoe,
WHEPP 2019, Dec. 2019, Guwahati, India

- Exploring the structure of hadronic showers and hadronic energy reconstruction with highly granular calorimeters:
K. Kawagoe,
29th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies,
Aug. 2019, Toronto, Canada
- Toward realistic implementation of large imaging calorimeters:
K. Kawagoe,
29th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies,
Aug. 2019, Toronto, Canada
- Technologies in ILC detectors:
T. Suehara,
KAIST-KAIX Workshop for Future Particle Accelerators, Jul. 2019, Daejeon, Korea
- HEP_07: SiW ECAL:
T. Suehara on behalf of SiW-ECAL group,
TYL/FJPPL/FKPPL workshop, May 2019, Jeju island, Korea
- Study on silicon sensors with high timing/position resolution:
T. Suehara, R. Mori, Y. Deguchi, Y. Uesugi,
CALICE Collaboration Meeting, Apr. 2019, Utrecht University, Netherlands
- FEV13 at test beams:
T. Suehara, Y. Miura,
CALICE Collaboration Meeting, Apr. 2019, Utrecht University, Netherlands

国内での講演

- ILC が切り拓く新技術とその多彩な応用: 趣旨説明
末原大幹
日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月

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。

COMET 実験 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、現在の上限值 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。信号の電子をトリガーするため、UV アクリルを電子同定用チェレンコフ輻射体として用いる。さらに、信号-雑音比とタイミング情報を向上させる得るため、プラスチックシンチレータを組み合わせる。光検出器にはファインメッシュ型光電子増倍管 (FM-PMT) を用い、その後段には前置増幅回路を設置する。今年度は、昨年度に引き続き、プロトタイプ検出器の開発を進めた。特に、前置増幅回路、放射線耐性、検出器筐体の設計に重点を置いた。前置増幅回路の開発では、その信号を用いてトリガーを生成し、信号の読み出しも行うためのトリガー回路 COTTRI の開発も平行して進めた。特に前置増幅回路と COTTRI の接続に

において、耐放射線を確保するための部品交換による影響と通信手法について開発し、良好な結果を得た。また COTTRI に要求される TDC 実装についても着手した。光検出器の代替案として、設置場所を変えて SiPM 検出器を用いる案を再検討し、その放射線損傷試験を行った。研究は進行中であり、来年度に向けて結論を得られる見込みである。トリガー検出器全体の設計は第一案としては完成し、今後は詳細なシミュレーション等による研究でその最適化を進める予定である。

さらに、Phase-I のミュオンビームの研究、及び、Phase-II の物理測定に用いる、電磁カロリメータ (ECAL) の開発を進めている。ECAL 検出器は、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、高い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。これまでの開発では、LYSO 結晶を選定し、ほぼ実機仕様である試作機を開発・製作して、東北大学電子光物理学研究センター等においてビーム試験を行ってきた。ビーム試験では、ストローチューブ飛跡検出器の試作機も導入し、両検出器を組み合わせて性能評価を行い、良好な結果を得た。今年度は実機建設に向けて、さらに廉価な LYSO 結晶を入手し、その性能評価を行った。これまでに用いてきた結晶とほぼ同等の性能を得られることが分かった。さらに、実機建設の際に行う結晶の検査項目・手法についてもさらに研究を進めた。これらの結果から、現実的にコストを削減して建設へ向かえる見通しができた。実機の筐体の設計も進行中であり、来年度は設計完了し、筐体の製作を進める予定である。

COMET 実験における J-PARC メインリング (MR) の運転では、ミュオン-電子転換過程の探索感度を向上させるため、8 GeV まで加速し、1.2 μsec の陽子ビームバンチ間隔を用いる。バンチの陽子数に対する、バンチ間に漏れる陽子数である extinction は、Phase-I, Phase-II 実験における感度を確保するためには、 $O(10^{-11})$ であることが要求される。この要求を満たす MR の運転を確立するため、加速器研究者の協力を得て、その研究に着手した。シミュレーションによる運転パラメータの調整、及び、通常の 30 GeV 運転における加速器調整の期間における調整と測定を行った。また、広いダイナミックレンジを持つ必要がある extinction を測定する検出器の開発にも着手した。検出器には、プラスチックシンチレータ、及び、光検出器として光電子増倍管と SiPM 検出器を用いる。今後、8 GeV 運転における extinction の調整と実測を遂行するため、運転パラメータの研究と検出器の開発を進めつつ、J-PARC プログラムへの提案書を作成し、来年度には実験を行う計画である。

Muon $g-2$ /EDM 実験 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。シリコンストリップ検出器は、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1.4 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。その検出器に用いる読み出しチップ(ASIC)の開発を進めている。これまでに、64チャンネルのアナログチップ Slit2013、128チャンネルのアナログ部 Slit2014 とデジタル部 GM2DV2 の混載チップ Slit128A、Slit2014 に改良を加えたアナログチップ Slit2016TEG、アナログ・デジタル混載チップ Slit128B、Slit128C を開発・製作してきた。Slit128B の性能評価では期待される動作をしないことが判明し、Slit128C の性能評価を重点的に行った。特に、Slit128A では要求を満たさなかったタイムウォークの性能を改善するために、微分回路を導入してゼロクロッシングを用いている。その性能評価のため、評価基板を設計・製作し、ベアチップ実装をワイヤーボンディングにより行った。基本性能は要求を満たすことが分かった。残る課題としてバイアス供給等があり、回路シミュレーションを用いた開発・設計を進め、成功すれば最終版となるチップを製作する予定である。

シリコンストリップ検出器の実機に向けた試作機の開発を進めている。検出器の構成要素として、シリコンセンサーはその開発で一定の完成を収め、量産を開始した。読み出し ASIC は Slit128C の開発までは完了し、それを改良した最終チップの設計・製作を進めている。センサーと ASIC の接続には、銅-ポリイミドの大型・高密度フレキシブル基板(FPC)を用いる。センサー部に用いる FPC は、設計・試作・評価を経て開発を完了し、量産も完了した。ASIC を搭載する基板は実装度が高い多層リジッド基板とする方針を固め、基板レイアウトの概念設計を完了させた。最終版の ASIC に合わせて設計をさらに進める予定である。センサー部 FPC と ASIC 部基板の接続にも、ピッチ変換をするための FPC を用いる。技術限界レベルの狭ピッチであり、ライン数が非常に多いため、FPC の製作技術としては、難易度が高い。試作機の開発に成功し、量産を開始した。検出器全体は複数のベーン構造から構成される。低物質量のベーンと支持構造体の設計・試作機の開発も並行して進めている。ベーン数は、現実的な支持構造体の設計とシミュレーションによる性能評価により決めた。また、ベーンの試作機を製作し、センサーの接着等組み立て手法の研究にも着手した。高位置精度の組立、ノイズ評価、熱設計等の各開発要素が同時に進行中である。今後、機械的・電気的な要求を満たすベーン試作機を開発していく計画である。

冷却ミュオンビームの開発は、本実験を原理的に成功させる最も重要な要素の一つである。開発中の冷却ミュオン源から供給される低エミッタンスのミュオンビームを3段階

の線形加速器を用いて加速する計画である。第 1 段階には RFQ 加速器、第 2 段階は上流側から IH-DTL 加速器と DAW 加速器から構成し、第 3 段階には電子加速器を用いる。これらの加速器のうち、第 2 段階の DAW 加速器の開発に着手した。製作した低電力モデルの固有状態の周波数をベクトルネットワークアナライザーで、また、電場分布をビーズ摂動法を用いて測定した。低電力モデルの測定結果を用いて、また、加速器コンプレックス全体のビーム輸送をシミュレーションにより研究し、DAW 加速器の実機の設計を開始した。DAW 加速器の加速空洞、及び、それらを接続して駆動するためのブリッジカプラーの設計を平行して進めている。来年度には設計を完了させ、実機サイズの試作機を製作する予定である。

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入射中性子の流量と β 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入射中性子の流量の系統誤差が問題となっていた。これに対し、我々の実験では入射中性子の流量と β 崩壊電子をガス検出器である Time Projection Chamber (TPC) 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。本年度はデータ収集を引き続き行い、また、既取得データの解析を行なった。データ解析より、検出器動作ガスで散乱された中性子が検出器壁面の LiF 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ている。ガス起因事象を低減するために、ソレノイド磁場を用いた新規実験の検討を行っている。ソレノイド磁石がある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) に昨年度作製した TPC 実機を輸送し、統合試験を行った。磁場印加時においても、TPC が所期の性能を満たしていることが分かった。また、ソレノイド磁場が本実験現場周辺の電子機器に影響を与えることが懸念される。その対策として磁気遮蔽体の設計・作製を行い、J-PARC ビームラインへ設置した。KEK での統合試験後、ソレノイド磁石および TPC 検出器を J-PARC に輸送し、ビームライン上に設置した。ビームライン上でソレノイド磁石の励磁試験を行い、安全審査に合格した。その後、中性子ビームを入射し、初のデータ取得に成功した。

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探索実験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、標

的核候補の一つであるスズ、カドミウム、インジウムのデータ取得およびデータ解析を行った。今後はより詳細な解析ののち、未知パラメータの決定を目指す。並行して、光三重励起状態を用いた動的核偏極法による中性子偏極装置の開発を行っている。本年度は作製した結晶の偏極実験を行った。また、装置一式を理化学研究所の小型中性子発生ビームラインに設置し、中性子照射試験を行った。取得データの解析結果は投稿論文として纏めた。また、九州大学にて同様の動的核偏極装置の整備を行っている。電磁石、レーザーの設置および動作確認を行い、続いて陽子による核磁気共鳴の確認を目指している。

また、本センターは低エネルギーの中性子とキセノン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を推進している。取得データの解析の結果ナノメートル以下で世界最高感度を達成し、すでに投稿論文として公表している。本年度は系統誤差の理解のため、キセノン原子以外の希ガスで収集した取得データの解析を行い、投稿論文として纏めた。また、中性子とナノ粒子の散乱による新規実験の検討を進めた。

研究業績

原著論文

- R. Abramishvili *et al.* [COMET Collaboration], “COMET Phase-I Technical Design Report,” PTEP **2020**, no. 3, 033C01 (2020).
- H. Nishiguchi, P. Evtoukhovitch, Y. Fujii, E. Hamada, N. Kamei, S. Mihara, A. Moiseenko, K. Noguchi, K. Oishi, J. Suzuki, J. Tojo, Z. Tsamalaidze, N. Tsverava, K. Ueno, A. Volkov, “Construction on vacuum-compatible straw tracker for COMET Phase-I,” Nucl. Instrum. Meth. A **958**, 162800 (2020).
- T. Yamanaka *et al.*, “Positron tracking detector for J-PARC muon $g-2$ /EDM experiment,” Nucl. Instrum. Meth. A **958**, 162786 (2020).
- Y. Tsutsumi, T. Kishishita, Y. Sato, M. Shoji, M. M. Tanaka, T. Mibe and J. Tojo, “Prototype Front-end ASIC for Silicon-strip Detectors of J-PARC Muon $g-2$ /EDM Experiment,” PoS TWEPP **2018**, 090 (2019).
- M. Abe *et al.* [J-PARC $g-2$ /EDM Collaboration], “A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment,” PTEP **2019**,

no. 5, 053C02 (2019).

- P. Strasser *et al.* [MuSEUM Collaboration], “New precise measurements of muonium hyperfine structure at J-PARC MUSE,” EPJ Web Conf. **198**, 00003 (2019).
- Y. Sato *et al.* [J-PARC g-2/EDM Collaboration], “Development of Silicon Strip Detector for J-PARC muon g-2/EDM Experiment,” PoS ICHEP **2018**, 541 (2019).
- K. Hirota, T. Yoshioka *et al.*, ”Design and Construction of an Imaging beamline at the Nagoya University Neutron Source”, EPJ Web of Conferences 231, 05002 (2020).
- C. Haddock, T. Yoshioka *et al.*, ”Measurement of the total neutron-scattering cross-section ratios of noble gases of natural isotopic composition using a pulsed neutron beam”, Phys. Rev. C 100 (6), 064002 (2019).
- R. Kitahara, J. Koga, A. Morishita, H. Otono, N. Sumi, T. Tomita, T. Yoshioka *et al.*, ”Improved accuracy in the determination of the thermal cross section of $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ for neutron lifetime measurement”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019 (9), 093C01 (2019).
- C.Haddock, T. Yoshioka *et al.*, ”A search for deviations from the inverse square law of gravity at nm range using a pulsed neutron beam”, EPJ Web of Conferences 219, 05002 (2019).
- J. Koga, S. Takada, T. Yoshioka *et al.*, ”Measurement of the angular distribution of prompt gamma-rays emitted in the $^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$ reaction for a T-violation search”, EPJ Web of Conferences 219, 09004 (2019).
- N. Nagakura, J. Koga, A. Morishita, H. Otono, N. Sumi, T. Tomita, H. Uehara, T. Yoshioka *et al.*, ”New project for precise neutron lifetime measurement at J-PARC”, EPJ Web of Conferences 219, 03003 (2019).

- S. Endo, T. Yoshioka, S. Takada, J. Koga *et al.*, "Measurement of the angular distribution of γ -rays emitted from the compound state after neutron capture by ^{81}Br for a search of T-violation", EPJ Web of Conferences 219, 09003 (2019).
- T. Okudaira, S. Takada, J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, "Measurement of the angular distribution of γ -rays after neutron capture by ^{139}La for a T-violation search, EPJ Web of Conferences 219, 09001 (2019).
- T. Yamamoto, S. Takada, J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, "Measurement of P-Violation in $^{139}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$ - a first step towards a T-Violation search", EPJ Web of Conferences 219, 09002 (2019).

海外での講演

- Introduction, Welcome and Themes
Junji Tojo
3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation, June 2019, Fukuoka, Japan
- Positron Tracking Detector for Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC
Tamaki Yoshioka
3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), September 2019, Tsukuba, Japan
- Development of Positron Tracking Detector for Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC (poster)
Takashi Yamanaka
3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation, June 2019, Fukuoka, Japan
- Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC
Takashi Yamanaka
2019 Korean Physical Society Spring Meeting, April 2019, Daejeon, Korea

国内での講演

- J-PARC muon g-2/EDM 実験：崩壊陽電子飛跡再構成アルゴリズムを用いた測定精度の見積もり
山中 隆志
日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学
- Fundamental physics using neutron at J-PARC and accelerator-driven compact neutron source
吉岡瑞樹
2019 年度核データ研究会、2019 年 11 月、九州大学

3.3.2 LHC での FASER 実験

FASER 実験は LHC-ATLAS 実験の衝突点からビーム軸方向に 470 m 地点において検出器を設置し、衝突点で生成する MeV から GeV 程度の質量を持つ未知粒子や TeV 領域の高エネルギーニュートリノを捕らえることを目指している。ATLAS 実験はビーム衝突点を囲うように検出器を配置しているがビーム軸上には無いため、FASER 実験は小規模でありながら相補的な役割を果たす。2018 年に未知粒子探索について Letter of Intent (LoI) と Technical Proposal (TP) を CERN に提出し、2019 年 3 月に CERN より承認がおり正式に FASER 実験が発足した。ニュートリノ研究については 2019 年に LoI と TP を提出し、2019 年 12 月に承認を得た。2022 年から開始する Run3 に向けて実験準備を進めている。

本センターは ATLAS 実験のシリコン半導体飛跡検出器 (SemiConductor Tracker : SCT) の運転を主導してきた経験を生かし、FASER 実験の飛跡検出器の開発に取り組んでいる。SCT は約 6 cm × 12 cm のモジュールを 4088 個用いて構成され、約 400 個のモジュールをスペアとして保管している。このスペアの一部を用いることで FASER 実験が必要とする検出器が十分に製作できることに着目し、120 個のモジュールを FASER 実験が使用する許可を 2019 年に得た。

FASER 実験は内径 20cm で長さ約 1m のダイポール磁石を 3 つ並べ、挟むように 4 つの飛跡検出器を配置する。それぞれの飛跡検出器は 3 層構造を持ち、1 層あたり 8 個のモジュールを用いている。飛跡検出器の面積は 24cm × 24cm でありダイポール磁石の内径を十分に覆う構造となっている。2019 年は構造体、電源系、データ取得系、制御系の試作を進め、1 層の安定した運転に成功した。4 つの飛跡検出器を作成するための量産は構造体を除いて完了し、実験準備は順調といえる。

原著論文

- A. Ariga *et al.* [FASER Collaboration], "FASER 's physics reach for long-lived particles", Phys. Rev. D **99**, 095011 (2019).
- H. Abreu *et al.* [FASER Collaboration], "Detecting and studying high-energy collider neutrinos with FASER at the LHC", Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.1, 61

国内での講演

- FASER 実験における新粒子探索：2020 年のインストールに向けた準備状況
音野瑛俊
日本物理学会 2019 年秋期大会、2019 年 9 月、山形大学

3.3.3 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 73 回 2020 年 1 月
「ニラマタンの謎に迫る！～南太平洋バヌアツ共和国タンナ島の伝統建築を科学で分析する～」(参加者約 40 名)
講師：京都大学防災研究所 西嶋一欽
- 第 72 回 2019 年 12 月
「宇宙の謎にみんなで迫る！～市民と研究者の架け橋～」(参加者約 40 名)
講師：高エネルギー加速器研究機構 上野一樹、高橋将太

- 第71回 2019年11月
「つぶつぶの物理に迫る！～混ぜても混ぜても分離する??～」(参加者約40名)
講師：九州大学理学研究院 稲垣紫緒
- 第70回 2019年10月
「プラズマプロセス技術に迫る！～スマートフォンからエネルギー問題・食糧問題まで～」(参加者約40名)
講師：九州大学大学院システム情報科学研究所 鎌滝晋礼
- 第69回 2019年9月
「光の可能性に迫る！～色と光とエネルギー～」(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 高橋幸奈
- 第68回 2019年8月
「透視はもはや超能力ではない!?～地球上のどこでも・なんでも透視する技術：ミュオグラフィ～」(参加者約40名)
講師：九州大学大学院総合理工学研究院 金政浩
- 第67回 2019年6月
「再生可能エネルギー量を引きあげろ！～蓄エネルギーはどうするのがいいか考えよう～」(参加者約40名)
講師：九州大学大学院工学研究院 立川雄也
- 第66回 2019年5月
「線香花火の不思議に迫る！～江戸時代からの謎がいま明らかに！～」(参加者約40名)
講師：九州大学大学院工学研究院 井上智博
- 第65回 2019年4月
「数学的に美しい!?～バラ曲線とフィボナッチ～」(参加者約40名)
講師：九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 富安亮子

3.4 競争的資金獲得状況

- 平成31-令和3年度 科学研究費補助金・基盤研究(A)「J-PARC パルス中性子ビームを用いた中性子寿命の測定：中性子寿命問題の解明」(分担：吉岡瑞樹)(平成31年度配分額：3,600千円)

- 平成 31-令和 3 年度 科学研究費補助金・基盤研究 (B) 「中性子・ナノ粒子散乱による未知相互作用の探索」(分担：吉岡瑞樹)(平成 31 年度配分額：480 千円)
- 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 31 年度配分額：7,800 千円)
- 平成 29-31 年度 科学研究費補助金・基盤研究 (B) 「時間反転対称性の破れの探索のための、偏極中性子による原子核反応の精密測定」(分担：吉岡瑞樹)(平成 31 年度配分額：350 千円)
- 平成 30-令和 2 年度 科学研究費補助金・基盤研究 (B) 「ソレノイド磁場と新型ガス検出器を組み合わせた高精度中性子寿命測定実験」(代表：吉岡瑞樹)(平成 31 年度配分額：4,400 千円)
- 平成 31 年度 カリフォルニア大学アーバイン校:受託研究「FASER: Tracker Mechanics, Trigger, and Detector Support」(代表：音野 瑛俊)(平成 31 年度配分額：3,240 千円)
- 平成 31 年度 九州大学:QR プログラム「FASER 実験による長寿命の新粒子の発見を目指した飛跡検出器の開発」(代表：音野 瑛俊)(平成 31 年度配分額：1,600 千円)
- 平成 31-33 年度 科学研究費補助金・基盤研究 (B) 「LHC 陽子衝突点超前方における高エネルギーニュートリノ研究」(分担：音野 瑛俊)(平成 31 年度配分額:500 千円)
- 平成 30-31 年度 科学研究費補助金・若手研究「ストリップ型シリコン検出器と超伝導磁石を用いたミュオンラジオグラフィーの新展開」(代表：音野瑛俊)(平成 31 年度配分額：1,500 千円)