



令和2年度（2020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12月22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	新粒子の探索	9
3.1.3	検出器アップグレード計画	9
3.1.4	研究業績	10
3.2	ILC 計画	18
3.2.1	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	19
3.2.2	ILC カロリメータにおけるタイミング再構成アルゴリズムの開発	20
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	20
3.2.4	研究業績	21
3.3	J-PARC での素粒子実験	23
3.3.1	ミューオンを使った素粒子実験	23
3.3.2	中性子を使った素粒子実験	26
3.4	その他の活動	30
3.4.1	LHC での FASER 実験	30
3.4.2	アウトリーチ活動	31
3.5	競争的資金獲得状況	32

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）3年目に当たる2020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2021年12月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。現在、日本においては新規感染者数が激減し小康状態にあるようにも見えますが欧米ではまだ猛威を奮っており、新たな変異株の影響も含め、まだ予断を許さない状況です。私たちの取り組む素粒子実験はほとんどが国際共同実験ですが、自由に海外渡航ができるまでにはまだ時間を要し、もうしばらく対面での国際的活動が制限されることなるでしょう。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 Run2 実験

のデータ解析と2022年に開始予定の次期実験（Run 3）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。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、2029年に開始予定（当初予定から18ヶ月遅れ）、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）計画については、2020年8月に国際将来加速器委員会（ICFA）のもとにILC国際推進チーム（International Development Team: IDT）が設立されました。この組織はILC計画が想定する4段階の最初のステップを担うものであり、ILC準備研究所設立に向けた準備を任務としています。

1. ILC国際推進チーム（1～1.5年）
2. ILC準備研究所（4年程度）
3. ILC研究所による建設（10年程度）
4. ILC研究所による運用（20年以上）

次のステップとなるILC準備研究所は研究所間のMoUで設立し、ILC建設のために必要となる技術開発とエンジニアリングを完了するための組織です。2021年6月には国際推進チームが「ILC準備研究所の提案」を公表し、日本の研究者コミュニティによる「ILC計画に関する主な課題について」（文科省有識者会議や日本学術会議が指摘した課題へのILC計画提案者からの回答）とともに文科省に提出されました。これを受けて、2021年7月に文科省が「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議（第2期）」を立ち上げました。現在も議論が続けられており、2021年度中に議論のまとめが公表される予定です。それより前のこととなりますが、2021年2月に萩生田文科大臣（当時）の「ILC計画については、準備研究所のみならず、ILC計画本体について、国際分担や技術的成立性を含めた様々な課題が解決されるとともに、国内外の幅広い協力が必要である。」などの国会答弁があり、準備研究所の提案書通りに進まないことが予想されます。その一方、2021年秋にILC計画に関する米国、英国、ドイツ、フランスとの政府レベルでの議論が再開されるなどの進展もあります。研究者コミュニティにおいては、国内研究者向けの「ILC夏の合宿2021」（九州大学が主催、9月）や国際会議「ILCX2021」（国際推進チームが主催、10月）がオンラインで開催され、どちらも多くの参加者を集めました。これまでに日本がホストした経験のない規模の

国際大型科学プロジェクトの実現にはまだ長い道のりがあると実感しておりますが、本センターは、研究者としての学術的研究はもちろんのこと、国内外の様々なセクターと協力し、ILC計画の実現に向けた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 2 名の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。ミュオンの物理については特別推進研究「ミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の超精密測定」(2020-2025 年度、吉岡准教授が研究分担者)と特別推進研究「大強度ミュオン粒子源で挑む荷電レプトンフレーバ研究」(2021-2025 年度、東城准教授が研究分担者)、中性子の物理については基盤研究 (A)「ソレノイド磁場で実現する新しい手法による中性子寿命問題の解明」(2021-2024 年度、吉岡准教授が研究代表者)などの外部資金を得て、実験準備を進めています。なお、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 分室の管理を本センターで行なっておりますが、この分室は九州大学全体で共同利用することになっています。皆様幅広くご利用いただけると光栄です。

まだ次ページ以降の 2020 年度構成員リストには載っておりませんが、2021 年度から理学研究院物理学部門の山本一博教授に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。山本教授の専門は宇宙物理理論です。素粒子と宇宙という研究対象はそれぞれ物理学が扱う小ささと大きさの極限ではありますが、宇宙の観測から素粒子のことがわかり、素粒子の研究から宇宙のことがわかる、という密接な関係があります。九州大学の素粒子原子核物理、そして宇宙物理の研究分野においても、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。また、2020 年 2 月末本センターの副担教員を務めていただいた織田勸助教(理学研究院)が産業界に転出されました。織田助教は 2020 年の ATLAS 実験 Outstanding Achievement Awards を受賞するほど、素晴らしい業績を残しておられます。織田助教の後任として森津学助教が 10 月に理学研究院に着任し、本センターの複担教員にもなっていただきました。理論部門からは本センターの奥村健一特任准教授が 2021 年度に岩手医科大学准教授に栄転されました。新天地でのご活躍を祈念する次第です。

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。

2021 年 12 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
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
津村 浩二	准教授	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	特任准教授	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	先導物質化学研究所 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	先端物質化学研究所	センター部門担当
津村 浩二	准教授	理学研究院	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、Run3 に向けた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。2015 年から 2018 年の実験第二期において、LHC は設計の 2 倍を超える瞬間輝度 (単位時間あたりの陽子同士の同時衝突数) を達成し、検出器にとっては厳しい環境となったが、ハードウェアおよびソフトウェアに様々な改善を施すことで安定したデータ取得を実現した。2020 年は、実験第三期に向けた検出器較正アルゴリズムの改善に着手している。実験第一期の開始以前から大きな見直しをすることなく使用してきたが、放射線損傷による性能変化を踏まえ、実験第三期の最後まで適用可能な検出器較正アルゴリズムの確立を目標としている。その他、SCT 検出器の一部が運転不可能となった際の物理解析に与える影響の評価、検出器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、検出器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 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確実視されているが、候補となる粒子は素粒子標準模型に無い。LHC 加速器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、2014 年から我々のグループでは、ビーム衝突点で生成後に即座には崩壊しない長寿命をもった新粒子の探索に取り組んでいる。このような新粒子探索には、SCT 検出器の高い性能が特に重要となる。これまで新粒子の発見には至っていないが、超対称性粒子や右巻きニュートリノなど様々な物理シナリオに強い制限を与えることに成功してきた。音野は 2020 年からは、近年ダークマターの候補として注目が集まっているヒグシーノ (ヒッグス粒子の超対称性パートナー) の探索を開始した。特にヒグシーノに伴って 1 MeV 程度の低い運動量の荷電粒子がビーム衝突点から離れて生成することに着目し、これまで全く感度がなかった質量領域の開拓を目指している。また、理学研究院物理学部門素粒子実験研究室と協力して、ウィーノ (W 粒子の超対称性パートナー) の探索を進めている。ウィーノも長寿命となる性質を持つと期待されるが、従来の探索では SCT 検出器には到達しない程度の飛程を仮定してきた。解析手法の開発に取り組むことで、SCT 検出器にも到達するようなウィーノに対する感度向上に挑戦している。

3.1.3 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 年から高輝度 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、特に接着剤の選定でほぼ最終的な段階に至った。組立における接着では、パターン形成したステンレスシートを用いるステンシル法を採用し、最小物質量・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、高精度機械

加工により治具を製作し、改良を重ねつつ、繰り返し位置精度の要求値である $30 \mu\text{m}$ 以内を達成することに成功した。ワイヤー保護は、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、候補が見つかっていない。そのため、低物質量材料による保護機構とパリレンコーティングによる保護性能の研究を進めている。検出器の最終仕様に向けた各開発は完了する見通しであり、今後は量産体制を構築していく予定である。

3.1.4 研究業績

原著論文

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with an energetic photon in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **02**, 226 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 139 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector,” JHEP **02**, 143 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson production in association with a high-energy photon via vector-boson fusion with decay into bottom quark pairs at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 268 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Dark Matter Produced in Association with a Dark Higgs Boson Decaying into $W^{\pm}W^{\mp}$ or ZZ in Fully Hadronic Final States from $\sqrt{s} = 13$ TeV pp Collisions Recorded with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **126**, no.12, 121802 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for phenomena beyond the Standard Model in events with large b -jet multiplicity using the ATLAS detector at the LHC,” Eur. Phys. J. C **81**, no.1, 11 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Medium-Induced Modification of Z -Tagged Charged Particle Yields in $Pb+Pb$ Collisions at 5.02 TeV with the ATLAS Detector,”

Phys. Rev. Lett. **126**, no.7, 072301 (2021).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for type-III seesaw heavy leptons in dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, no.3, 218 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of light-by-light scattering and search for axion-like particles with 2.2 nb^{-1} of Pb+Pb data with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 243 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of hadronic event shapes in high- p_T multijet final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **01**, 188 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **812**, 135980 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of WH and ZH production in the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay channel in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, no.2, 178 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of single top-quark production in association with a W boson in the single-lepton channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, no.8, 720 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential cross-section measurements for the electroweak production of dijets in association with a Z boson in proton–proton collisions at ATLAS,” Eur. Phys. J. C **81**, no.2, 163 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair single- and double-differential cross-sections in the all-hadronic channel in pp collisions at $\sqrt{s} =$

- 13 TeV using the ATLAS detector,” JHEP **01**, 033 (2021).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Longitudinal Flow Decorrelations in Xe+Xe Collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.44$ TeV with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **126**, no.12, 122301 (2021).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the jet mass in high transverse momentum $Z(\rightarrow b\bar{b})\gamma$ production at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **812**, 135991 (2021).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation and Measurement of Forward Proton Scattering in Association with Lepton Pairs Produced via the Photon Fusion Mechanism at ATLAS,” Phys. Rev. Lett. **125**, no.26, 261801 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a photon and a hadronically decaying Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **125**, 251802 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions recorded by ATLAS in Run 2 of the LHC,” JHEP **10**, 062 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with one lepton, missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into two b -jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.8, 691 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for $t\bar{t}t\bar{t}$ production in the multilepton final state in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.11, 1085 (2020).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction and identification of boosted di- τ systems in a search for Higgs boson pairs using 13 TeV proton-proton collision data in ATLAS,” JHEP **11**, 163 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation of the ATLAS trigger system in Run 2,” JINST **15**, no.10, P10004 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances decaying into a weak vector boson and a Higgs boson in the fully hadronic final state produced in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **102**, no.11, 112008 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Alignment of the ATLAS Inner Detector in Run-2,” Eur. Phys. J. C **80**, no.12, 1194 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential cross-sections of combined $t\bar{t}\gamma$ and $tW\gamma$ production in the $e\mu$ channel at 13 TeV with the ATLAS detector,” JHEP **09**, 049 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section in the lepton+jets channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **810**, 135797 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new non-resonant phenomena in high-mass dilepton final states with the ATLAS detector,” JHEP **11**, 005 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pairs of scalar leptoquarks decaying into quarks and electrons or muons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 112 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks in events with a Higgs or Z boson using 139 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS

- detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.11, 1080 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into two new low-mass spin-0 particles in the $4b$ channel with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. D **102**, no.11, 112006 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the missing transverse momentum triggers for the ATLAS detector during Run-2 data taking,” JHEP **08**, 080 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for $t\bar{t}$ resonances in fully hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 061 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the $Z\gamma$ decay mode of the Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **809**, 135754 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the upgraded PreProcessor of the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger,” JINST **15**, no.11, P11016 (2020).
 - G. Aad *et al.* [CMS and ATLAS Collaborations], “Combination of the W boson polarization measurements in top quark decays using ATLAS and CMS data at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” JHEP **08**, no.08, 051 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet resonance search with weak supervision using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions in the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **125**, no.13, 131801 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy diboson resonances in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,”

Eur. Phys. J. C **80**, no.12, 1165 (2020).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a scalar partner of the top quark in the all-hadronic $t\bar{t}$ plus missing transverse momentum final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.8, 737 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2,” JINST **15**, no.09, P09015 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 005 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ CP Properties of Higgs Boson Interactions with Top Quarks in the $t\bar{t}H$ and tH Processes Using $H \rightarrow \gamma\gamma$ with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **125**, no.6, 061802 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the Higgs boson inclusive and differential fiducial cross sections in the 4ℓ decay channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **80**, no.10, 942 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Higgs boson production cross-section measurements and their EFT interpretation in the 4ℓ decay channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.10, 957 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Lund Jet Plane Using Charged Particles in 13 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **124**, no.22, 222002 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs Boson Decays into a Z Boson and a Light Hadronically Decaying Resonance Using 13 TeV pp Collision Data from

- the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **125**, no.22, 221802 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived, massive particles in events with a displaced vertex and a muon with large impact parameter in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **102**, no.3, 032006 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the production cross-section for a Z boson in association with b -jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 044 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of azimuthal anisotropy of muons from charm and bottom hadrons in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **807**, 135595 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Higgs bosons decaying into two tau leptons with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. Lett. **125**, no.5, 051801 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dijet resonances in events with an isolated charged lepton using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collision data collected by the ATLAS detector,” JHEP **06**, 151 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of the associated production of a top quark and a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 124 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson in the $H \rightarrow \tau\tau$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **805**, 135426 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ process via vector-boson fusion production using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with

- the ATLAS detector,” JHEP **07**, 108 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino-neutralino production with mass splittings near the electroweak scale in three-lepton final states in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **101**, no.7, 072001 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the transverse momentum distribution of Drell–Yan lepton pairs in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.7, 616 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS data quality operations and performance for 2015–2018 data-taking,” JINST **15**, no.04, P04003 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for electroweak production of two jets in association with a $Z\gamma$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **803**, 135341 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section and lepton differential distributions in $e\mu$ dilepton events from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.6, 528 (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], “Determination of jet calibration and energy resolution in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.12, 1104 (2020).
 - G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with same-sign leptons and jets using 139 fb^{-1} of data collected with the ATLAS

detector,” JHEP **06**, 046 (2020).

- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light long-lived neutral particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV and decaying into collimated leptons or light hadrons with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.5, 450 (2020).
- G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral Higgs bosons produced in association with b -quarks and decaying into b -quarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **102**, no.3, 032004 (2020).
- M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair spin correlations in the $e\mu$ channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV using pp collisions in the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.8, 754 (2020).

国内での講演

- LHC における soft displaced track を用いたヒグシーノの新しい探索手法について
音野 瑛俊
日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催
- Fundamental Physics at Colliders
東城 順治
KEK 研究会「素粒子・原子核コライダー物理の交点」、2020 年 8 - 9 月、オンライン開催

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、昨年度に引き続き ILC 電磁カロリメータのための新型センサーの開発、プロトタイプの改良を行い、改良したセットアップで再度ビーム試験を行った。また、昨年度に引き続き深層学習を用いた崩壊点検出アルゴリズムの開発を行うとともに、カロリメータにおけるタイミング再構成の最適化研究に取り組んだ。

3.2.1 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。2019年度に東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)にてビーム試験を行い、100 fC以上(増幅後)の信号に対して385ピコ秒という時間分解能を得たが、目標とする数10ピコ秒の時間分解能を得るためには、読み出しノイズの低減が必要であった。本年度はセットアップを改良し、シールドボックスを用いてノイズを軽減するとともに、マルチセルのセンサーも用いて粒子の通過位置に対する依存性の取得も試みた。2021年2月にELPHにて行ったビーム試験により、時間分解能に関しては、30~45 fCの信号に対して約270ピコ秒の分解能を得た(図3.1)。この時間分解能は未だに読み出し回路のノイズに起因する成分が大きく、今後さらに改善を目指す。

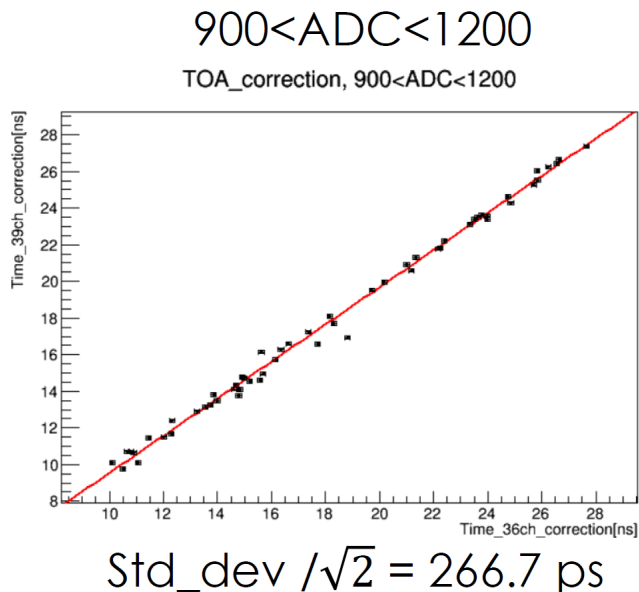


図 3.1: APD (S8664-50K) の同時計測による時刻相関。2つのセンサーの信号が30~45 fC程度の場合を選別した。

3.2.2 ILC カロリメータにおけるタイミング再構成アルゴリズムの開発

上述の高時間分解能センサーによるカロリメータが実現した場合、ハドロンや光子の反応により生じる多数の測定点から効率的に時間情報を取り出すアルゴリズムが必要である。従来のアルゴリズムはらせん状に並んだ中央の測定点のみを平均していたが、周辺の多数の測定点を利用しないことで情報ロスが生じている。本年度は、シミュレーションデータを用いて測定点の利用基準を見直し、多数の測定点の分布からタイミングの再構成を行う手法を開発した。時間情報からハドロンの粒子識別を行う方法について、センサーの想定される時間分解能に応じて柔軟に基準を変更することで、50 ピコ秒の時間分解能で 5 GeV 程度、20 ピコ秒の時間分解能で 10 GeV 程度までパイ中間子と K 中間子の分離が可能であることを示した。今後、深層学習を用いた測定点の識別・再構成手法の開発を行い、さらなる性能向上を目指す。

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、末原が共同研究者と開発した「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 フレームワークを用いて、任意のトラック数を取り扱うためリカレントニューラルネットワークを用いた崩壊点の組み合わせ再構成手法を開発した。独自にセル構造を改良した LSTM(Long Short-term Memory) アルゴリズムと Attention 機構を組み合わせた手法(図 3.2)と、飛跡ペアに対する全結合型ネットワークを組み合わせた手法の開発に成功し、C++のフレームワークで動作するようアダプタの設計も行った。性能においては従来の LCFIPlus と比べ、偽の崩壊点を構成する確率はやや上がるが真の崩壊点をより効率良く再構成できるアルゴリズムを開発できた。今後、フレーバー識別と組み合わせでさらなる性能向上を目指す。

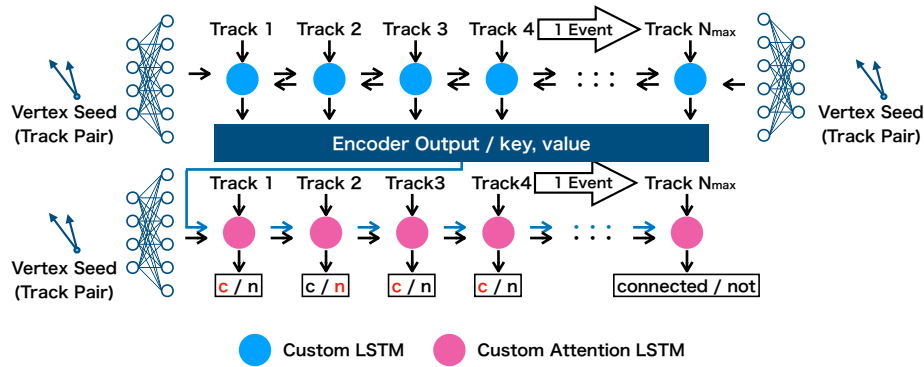


図 3.2: 崩壊点への飛跡の結合を行うネットワーク。崩壊点の元となる飛跡対に対し、各飛跡が結合するかどうかを Attention つきのカスタム LSTM で判定する。

3.2.4 研究業績

原著論文

- K. Goto, T. Suehara, T. Yoshioka, M. Kurata, H. Nagahara, Y. Nakashima, N. Takemura, M. Iwasaki, “Development of a Vertex Finding Algorithm using Recurrent Neural Network”, arXiv:2101.11906.
- T. Suehara, Y. Deguchi, Y. Uesugi, Y. Kato, R. Yonamine, “Development of novel silicon sensors with high time and spatial resolution”, 2019 annual report of Research Center for ELeCtron PHoton Science (ELPH), Tohoku University, arXiv:2101.01996.
- LCC Physics Working Group, K. Fujii *et al.*, “ILC Study Questions for Snowmass 2021”, DESY 20-112, KEK Preprint 2020-8, IFIC/20-34, LCTP-20-14, SLAC-PUB-17543, arXiv:2007.03650.
- The CALICE Collaboration, D. Boumediene *et al.*, “Particle identification using Boosted Decision Trees in the Semi-Digital Hadronic Calorimeter prototype”, 2020 JINST **15** P10009.
- Y. Uesugi, R. Mori, H. Yamashiro, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe, “Study of position sensitive silicon detector (PSD) for SiW-ECAL at ILC”, 2020 JINST **15**

C05033.

- Y. Deguchi, K. Kawagoe, E. Mestre, R. Mori, T. Suehara, T. Yoshioka, “Study of silicon sensors for precise timing measurement”, 2020 JINST **15** C05051.

海外での講演

- Development of a Vertex Finding Algorithm using Recurrent Neural Network
K. Goto, T. Suehara,
Linear Collider Workshop 2021, Mar. 2021, Online
- Optimization of K/pi separation using timing information with ILD simulation
M. Kuhara, T. Suehara, K. Kawagoe, T. Yoshioka, D. Jeans,
CALICE Collaboration Meeting, Mar. 2021, Online
- Summary of the LGAD test beam at ELPH, Tohoku University
Taikan Suehara,
CALICE Collaboration Meeting, Mar. 2021, Online
- News on technological developments within CALICE
Taikan Suehara on behalf of CALICE Collaboration,
International Workshop on Circular Electron-Positron Collider, Oct. 2020, Shanghai
and Online
- LGAD/PSD development
T. Suehara,
CALICE Collaboration Meeting, Sep. 2020, Online

国内での講演

- The International Linear Collider (ILC) Project
K. Kawagoe,
KMI Colloquium, Nagoya University (online), Feb. 2021.

- Detector Overview
T. Yoshioka
加速器・物理合同 ILC 夏の合宿、2020 年 9 月、オンライン
- 趣旨説明 - ILC が切り拓く新技術とその多彩な応用の新展開 -
末原大幹
日本物理学会 2020 年秋期大会、2020 年 9 月、オンライン
- Future Lepton Colliders for Energy Frontier Studies
末原大幹
高エネルギー将来計画勉強会、2020 年 4 月、オンライン

3.3 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。

3.3.1 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 加速器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) を測定するミューオン $g-2$ /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こともあり、 $\mu-e$ 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。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、新しいチェレンコフ輻射体の研究、検出器構造体の設計に重点を置いた。前置増幅回路の開発では、これまでに開発してきた試作機と信号の読み出しにも用いるトリガー回路 COTTRI を合わせたシステムを動作させる試験を行った。特に、複数の前置増幅回路と COTTRI の接続と運用、COTTRI に要求される TDC の実装が進展した。新しいチェレンコフ輻射体としてエアロジェルを提案し、宇宙線を用いた光量測定を行った。光量が比較的少ない暫定的な結果を得たが、継続して研究を進めることとした。実験初期にはチェレンコフ輻射体を用いず、プラスチックシンチレータと SiPM 光検出器を用いる設計もある。その両方を満たす検出器構造体の設計を進めた。

さらに、Phase-I のミューオンビームの研究、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 結晶をアバラシエ・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、ビーム試験を完了させた。ビーム試験では、ストローチューブ飛跡検出器の試作機を組み合わせ、性能評価を行い、良好な結果を得ている。今年度は Phase-I に用いる実機の建設に向けて、検出器構造体の設計と製作を行った。ECAL 検出器を検出器ソレノイド電磁石の内部に設置することを提案し、また、Phase-I で導入できる LYSO 結晶の数量に限りがあるため、それらを考慮した設計を完了させた。その設計に基づいて検出器構造体を製作し、J-PARC 加速器施設内に設置した。

COMET 実験における J-PARC メインリング (MR) の運転では、ミューオン-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、 $1.2 \mu\text{sec}$ 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、 $\mathcal{O}(10^{-11})$ 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も得て、その研究を行ってきた。広いダイナミックレンジが要求される extinction を測定する検出器を開発・製作し、

J-PARC 加速器で extinction を測定する準備を行った。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 検出器を用いた。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完成度を向上させ、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) を測定するミューオン $g-2$ /EDM 実験 (J-PARC E34 実験) は、これまでとは異なる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 から約 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。ミューオン $g-2$ /EDM 実験では、低エミッタンスのミュー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ー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、ミューオンを蓄積する磁場内に設置し、ミュー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。我々が要求する仕様に対して、SliT128C はほぼ満たすことを示した。残る課題として、複数チャンネルに信号が入射する際に波形が歪むことが見つかった。そこで、主にチップ内のバイアス回路をマイナー修正した SliT128D を設計し、実機用として量産を完了させた。今後性能評価を進めるとともに、プローブステーションを用いたチップ毎の品質保証のためのセットアップ・環境を整備し、検出器の実機建設に移行する予定である。

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を完了し、量産を継続的に行っている。読み出し ASIC は SliT128C の開発は完了し、SliT128D の量産を完了した。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を用いる。基板試作機を開発・製作し、今後はその性能評価を行う。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・ライン数の FPC で技術な難易度が高いが、その開発と量産を完了した。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・試作機の開発を進めるとともに、シミュレーションによる性能評価は継続的に進めている。ベーンの製作におけるセンサーの接着では、1 μm の位置精度を要求しており、難易度が高い。今年度は開発中の治具や接手法を用いて、3 μm の位置精度を達成した。今後、さらに改良を加える予定である。また、電気的な性能を試験するため、センサー・FPC・チップから構成する試作機を製作し、その評価を行った。ノイズ性能で改善が必要であることが分かり、ベーンの実機開発に向けて今後検討する必要がある。熱的・機械的な試作機も並行して製作し性能評価を行っており、今後も継続する予定である。

低エミッタンスの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加速器の開発を行っている。製作した低電力モデルの固有状態の周波数と電場分布の測定を完了し、ビーム輸送をシミュレーションも用いた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た。基礎設計を完了させ、実機製作に向けた詳細な設計を継続して行う予定である。

3.3.2 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 にて冷中性子ビームを用いた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。本年度は既取得のデータ解析を行い、初期結果を投稿論文として公表した。また、これらのデータ解析より、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。昨年度までに、作製した検出器実機とソレノイド磁石との統合試験を高エネルギー加速器研究機構にて行い、良好な結果が得られている。本年度は、別の背景事象である宇宙線ミュオン粒子を排除するため、プラスチックシンチレータと半導体光検出器 MPCC を組み合

わせた宇宙線カウンターの作製を行った。九州大学にて宇宙線カウンターを計 32 本作製し、性能評価を行った。その後、作製した宇宙線カウンターを J-PARC に輸送して、検出器群に組み込んだ。宇宙線ミュー粒子を用いた性能評価を行い、所期の性能を達成していることを確認した。

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、インジウムのデータ取得およびデータ解析を行った。特に、スズに関しては解析が完了し、実験感度推定のために必須である未知パラメータを世界で初めて決定することに成功した。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。九州大学にて動的核偏極装置の整備を行っており、主要装置であるレーザー、電磁石、核磁気共鳴装置の整備はすでに完了している。本年度は、ペンタセン分子を導入したパラ・ターフェニル結晶をブリッジマン法およびゾーンメルト法によって製成する結晶作製装置の整備を行った。

また、本センターは低エネルギーの中性子の散乱分布を精密に測ることによって、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。これまでは中性子とキセノン原子の散乱データの解析により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。探索感度向上のため中性子とナノ粒子との散乱による新規実験の検討をしており、今年度はナノ粒子作製の検討を行った。核散乱による背景事象を著しく抑制するため、バナジウムとニッケルおよびアルミニウムの合金を用いることを検討しており、ナノ粒子の試作および評価を行っている。

研究業績

原著論文

- K. Ueno, E. Hamada, M. Ikeno, S. Mihara, H. Nishiguchi, M. Shoji, T. Uchida, Y. Fujii, R. Kawashima and K. Oishi, *et al.* “Design of Radiation Tolerant Electronics for StrECal System in COMET Experiment,” PoS **EPS-HEP2019**, 175 (2020).
- H. Nishiguchi, P. Evtoukhovitch, Y. Fujii, E. Hamada, N. Kamei, S. Mihara, A. Moiseenko, K. Noguchi, K. Oishi and J. Suzuki, *et al.* “Construction on vacuum-compatible straw tracker for COMET Phase-I,” Nucl. Instrum. Meth. A **958**,

162800 (2020).

- T. Yoshioka *et al.* [J-PARC muon $g-2$ /EDM Collaboration], “Positron Tracking Detector for Muon $g - 2$ /EDM Experiment at J-PARC,” JPS Conf. Proc. **33**, 011108 (2021).
- T. Kishishita, Y. Sato, Y. Fujita, E. Hamada, T. Mibe, T. Nagasawa, S. Shirabe, M. Shoji, T. Suehara and M. M. Tanaka, *et al.* “SliT: A Strip-sensor Readout Chip with Subnanosecond Time-walk for the J-PARC Muon $g - 2$ /EDM Experiment,” IEEE Trans. Nucl. Sci. **67**, no.9, 2089-2095 (2020).
- Y. Sato *et al.* [J-PARC muon $g-2$ /EDM Collaboration], “Development of a front-end ASIC for silicon-strip detectors of the J-PARC muon $g - 2$ /EDM experiment,” Nucl. Instrum. Meth. A **969**, 164035 (2020).
- T. Aoyagi, Y. Honda, H. Ikeda, M. Ikeno, K. Kawagoe, T. Kohriki, T. Kume, T. Mibe, K. Namba and S. Nishimura, *et al.* “Performance evaluation of a silicon strip detector for positrons/electrons from a pulsed a muon beam,” JINST **15**, no.04, P04027 (2020).
- J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, “Measurement of γ rays from ${}^6\text{LiF}$ tile as an inner wall of a neutron-decay detector”, Journal of Instrum. **16**, P02001 (2021).
- K. Yano, T. Yoshioka *et al.*, “Precise neutron lifetime measurement: An integration test with a gaseous and a solenoidal magnet”, JPS Conf. Proc. **33**, 011117 (2021).
- H. Yoshikawa, T. Yoshioka *et al.*, “S-wave resonance analysis of ${}^{139}\text{La}$ and ${}^{109}\text{Ag}$ in the compound nuclear process towards T-violation search”, JPS Conf. Proc. **33**, 011136 (2021).
- M. Hiromoto, T. Yoshioka *et al.*, “Proof-of-principle experiment for the study fo a new intermediate range interaction using coherent neutron scattering”, JPS Conf.

Proc. **33**, 011118 (2021).

- J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, “Study for the experimental sensitivity of T-violation search in compound nuclear reaction of ^{117}Sn ”, JPS Conf. Proc. **33**, 011137 (2021).
- T. Okudaira, T. Yoshioka *et al.*, “Measurement of angular distribution of γ -rays from $^{139}\text{La}+n$ to excited states of ^{140}La ”, JPS Conf. Proc. **33**, 011121 (2021).
- “Study of γ -ray from 4.53 eV p-wave resonance of ^{111}Cd using compound nuclear reaction”, S. Makise, T. Yoshioka *et al.*, JPS Conf. Proc. **33**, 011138 (2021).
- N. Sumi, T. Yoshioka *et al.*, “Precise neutron lifetime measurement using pulsed neutron beams at J-PARC”, JPS Conf. Proc. **33**, 011056 (2021).
- H. Takeshita, T. Yoshioka *et al.*, “Thick target neutron yields from LiF, C, Si, Ni, Mo, and Ta bombarded by 6.7 MeV/u deuterons”, Nucl. Instrum. Meth. A **983**, 165482 (2020).
- “Neutron lifetime measurement with pulsed cold neutrons”, K. Hirota, T. Yoshioka *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 123C02 (2020).
- T. Yamamoto, T. Yoshioka *et al.*, “Transverse asymmetry of γ rays from neutron-induced compound states of ^{140}La ”, Phys. Rev. C **101**, no.6, 064624 (2020).
- S. Takada, K. Tateishi, Y. Wakabayashi, Y. Ikeda, T. Yoshioka, Y. Otake and T. Uesaka, “Polarized proton spin filter for epithermal neutrons based on dynamic nuclear polarization using photo-excited triplet electron spins”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 123G01 (2020).
- T. Yoshioka, “Fundamental physics using neutron at J-PARC and accelerator-driven neutron source”, JAEA Conf **2020-001**, 21 (2020).

国内での講演

- 次世代中性子技術を用いた高精度中性子寿命測定実験
吉岡瑞樹
日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

3.4 その他の活動

3.4.1 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 480 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。

本センターでは 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 4088 個で構成され、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 20 cm で長さ約 1 m 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 24 cm × 24 cm 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。

2020 年は 3 つの飛跡検出器の製作を進めた。地上での試運転において実験に向けた要求を満たしていることを確認し、構造体と統合した。そして LHC-ATLAS 実験の衝突点から 480 m 離れた実験区域に 3 つの飛跡検出器を移設し、運転を開始している。ソフトウェアの開発も順調に進み、地上からの遠隔操作、飛跡の再構成などを既に実現している。

海外での講演

- The recent status of the FASER experiment
Hidetoshi Otono
ASPEN 2021 - A rainbow of Dark Sectors, March 2021, Online

国内での講演

- FASER 実験：LHC-Run3での新粒子探索および高エネルギーニュートリノ測定に向けたストリップ型シリコン検出器の開発
音野瑛俊
日本物理学会 2020 年秋期大会、2020 年 9 月、オンライン開催

3.4.2 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。2020 年度はコロナ禍であったため、オンラインで開催した。

- 第 75 回 2020 年 7 月
「熱を電気に変換する分子ロボットの謎に迫る！～熱応答性分子科学を導入した熱化学電池の開発～」
講師：東京大学大学院理学系研究科 山田鉄兵
- 第 76 回 2020 年 9 月
「ブラックホールの謎に迫る！～見えるの？見えないの？～」
講師：国立天文台 町田真美
- 第 77 回 2020 年 12 月
「ふたごの個性の謎に迫る！～遺伝子にはスイッチがついている？～」
講師：九州大学生体防御医学研究所 鶴木元香

- 第78回 2021年3月
「万能薬にもなるメッセンジャー RNA の謎に迫る！～コロナウイルスに対する救世主～」
講師：京都府立医科大学 内田智士

3.5 競争的資金獲得状況

- 令和2-7年度 科学研究費補助金・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」(分担：吉岡瑞樹)(令和2年度配分額：7,500千円)
- 令和2-6年度 科学研究費補助金・基盤研究(B)「FASER 実験における未開拓エネルギー領域でのニュートリノ研究」(分担：音野瑛俊)(令和2年度配分額：6,900千円)
- 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)(令和2年度配分額：400千円)
- 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)(令和2年度配分額：200千円)
- 平成31-令和3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)(令和2年度配分額:500千円)
- 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)(令和2年度配分額：1,500千円)