

II. 素粒子実験グループ

教授	受川 史彦
准教授	武内 勇司, 原 和彦
講師	佐藤 構二
助教	飯田 崇史, 廣瀬 茂輝
特命教授	金 信弘
准教授	池上 陽一 (クロスアポイントメント教員)
大学院生	17名
学群4年次生	1名

素粒子実験グループは陽子衝突型加速器 LHC を用いた国際共同実験 ATLAS に参加し、エネルギー・フロンティアでの素粒子実験研究を遂行している。また、宇宙背景ニュートリノ探索実験 COBAND のための高分解能光検出器 STJ の開発、SOI や LGAD 技術を用いた次世代半導体粒子検出器の開発、ニュートリノのマヨラナ性を探る実験のためのシンチレータの開発などの検出器開発を行っている。本グループの教員は宇宙史研究センターにも所属し、国内外の機関との連携を深めた研究を強力に推進するための組織整備を行っている。

【1】 陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は、米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり、日本をはじめアジア、北米、欧州の計 14ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれた。2001 年度より Run II 実験が遂行されてきたが、2011 年 9 月 30 日に加速器・検出器ともにその運転が終了した。最終的に CDF 検出器により記録されたデータ量は約 10 fb^{-1} である。この全データを用いた物理解析もそのほとんどが終了した。

2022 年春には、Run II 実験の全データを用いた W ボソン質量の精密測定の結果が公表された [1]。 W ボソンは素粒子の弱い相互作用を媒介するゲージ粒子で、およそ $80 \text{ GeV}/c^2$ の質量を持つ。その測定は、素粒子標準理論の基本パラメータの決定、および、トップ・クォーク、ヒッグス粒子の質量の情報と組み合わせ、量子効果による新粒子・新物理の寄与を探るうえで、重要である。

今回の結果 (図 1) は、単独の測定でこれまでの世界平均の精度を上回るものであり、また、標準理論の予言と食い違うことから、新聞・テレビでも報道され、注目を集めた。

理論との不一致の原因については様々な解釈が可能であるが、当面は、他実験で同程度の精度を持つ測定が得られるのを待つのが正しい姿勢であると思われる。

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州原子核研究機構 CERN の Large Hadron Collider (LHC) は、世界最高エネルギーでの陽子・陽子衝突型加速器である。本研究室では、LHC 実験でデータを取得している ATLAS 実験に参加して来た。LHC で陽子・陽子衝突を測定している ATLAS と CMS 両実験は、2012 年にヒッグス粒子を発見した。その後も LHC 加速器は運転を続け、ヒッグス粒子や標準理論の精密測定、新物理の探索などさまざまな素粒子物理の研究を続けて来た。今後も、加速

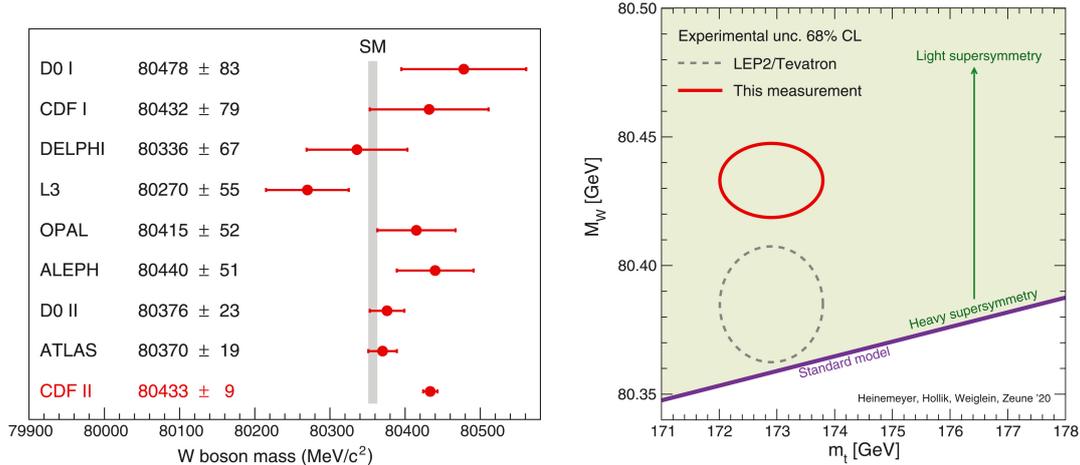


図 1: (左) W ボソン質量について、2022 年の CDF 実験の結果と他の測定の比較。(右) W ボソン質量とトップ・クォークの質量の関係。実線の楕円が実験値の確度 68% の範囲を示し、今回の CDF 実験の結果を踏まえたもの。斜めの帯が標準理論の予言（ヒッグス粒子質量は実測値を反映）。ともに文献 [1] より。

器と検出器をアップグレードしながら 2030 年代まで稼働を続け、より高い精度での研究を行う計画である。

LHC 加速器と ATLAS 実験は、2019 年から 2021 年にかけて 3 年間シャットダウンし、高輝度化のためのアップグレードを行った。2022 年からは、新たな Run-3 運転期間が始まった。Run-3 は、重心系エネルギー 13.6 TeV で衝突実験を開始し、2025 年までの 4 年間で 250 fb^{-1} のデータを取得する計画である。Run-3 運転終了後は長期シャットダウンを再度行い、2029 年からは現在よりも瞬間輝度を 2.5 倍に高輝度化した HL-LHC 実験を開始する。

2022 年度には、2018 年までの Run-2 で得られていたデータを用いた様々な物理解析が進んだ。同時に、Run-3 の運転により新しく得られたデータの解析も始まり、すでいくつかの物理結果を公表した。ここでは、2022 年度に公表された中から、もっとも興味深い物理成果のうちのいくつかを紹介する。筑波大学グループでは、シリコンストリップ検出器の運転を行っており、また 2029 年からの HL-LHC 実験に向けたシリコン検出器の開発も行っている。

(1) LHC-ATLAS 実験の現状と将来計画

2011-2012 年の Run-1 実験では、重心系エネルギー 7 ~ 8 TeV での陽子・陽子衝突を行った。Run-1 後も LHC は、2013-2014 年のエネルギー増強のための改良を経て、2015 年から 2018 年の Run-2 実験では、重心系エネルギーを 13 TeV に上げて衝突実験を行った。Run-1 では 7 TeV、8 TeV のデータをそれぞれ 4.57 fb^{-1} 、 20.3 fb^{-1} 、Run-2 では 13 TeV のデータを 139 fb^{-1} 取得した。

2019 年から 2021 年の間は、加速器と検出器のアップグレードのためのシャットダウン中であった。シャットダウン中の 2020 年にコロナウィルスのパンデミックが起こった。当初 2021 年度から開始予定であった Run-3 の 1 年間の後ろ倒しが決定するなど、大きな影響があったが、ウィズ・コロナの生活形態が広まり、現在の研究環境は平時と同様に戻っている。今回のシャットダウンで、ATLAS 実験では、加速器での瞬間ルミノシティの増強に伴うバックグラウンド・レートの増加に対応するためのトリガーのアップグレードを行った。バックグラウンドとなる QCD ジェットをいままで以上に効率よく排除しながら電子とミュオン

にトリガーをかけるために、カロリメータ・トリガー用電子回路と、超前方のミュオン・トリガー検出器のアップグレードが主な作業であった。

2022年7月5日には、重心系エネルギー 13.6 TeV で Run-3 の物理 Run が開始した。図 2 に 2022 年の ATLAS 実験の運転状況を示す。2022 年には、LHC は 38.5 fb^{-1} の積算輝度に相当する陽子・陽子衝突を配り、そのうち 35.7 fb^{-1} を ATLAS 検出器は記録した。Run-3 では、バンチごとの陽子数を Run-2 時よりも増加させたため、バンチクロッシングごとの陽子・陽子衝突反応数も増加した。

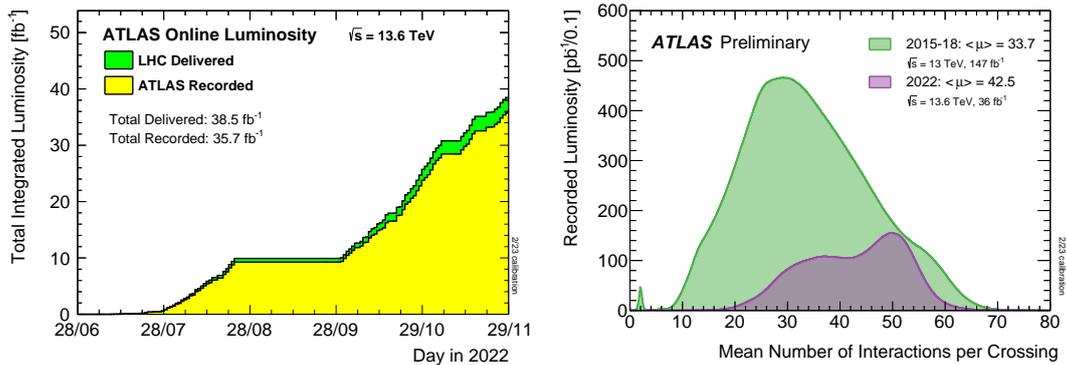


図 2: 2022 年の ATLAS 実験のデータ取得の状況。(左) 加速器が配った積算輝度と、ATLAS 検出器で記録した積算輝度の推移。(右) バンチクロッシングごとの陽子・陽子衝突の反応数の分布。Run-2 時 (2015 - 2018) の分布を比較のために重ねて表示している。

今後は、2025 年まで Run-3 実験を続行し、 250 fb^{-1} の陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。2026-2028 年には、再び加速器と検出器のアップグレードが予定されており、2029 年からは瞬間輝度を Run-3 の 2.5 倍に上げる HL-LHC 実験が開始される。HL-LHC 実験は、10 年間かけて 3000 fb^{-1} の大規模データセットを取得する計画である。

(2) Run-3 データの解析

ATLAS 実験では、多くの物理トピックで Run-2 データの解析を続けているが、Run-3 のデータの解析もすでに始まっている。2022 年に取得したデータについて、暫定結果がすでにいくつか公表されている。

図 3 に、Run-3 データを使って観測された $Z \rightarrow ee$ および $Z \rightarrow \mu\mu$ の不変質量ピークを示す。図 4 には、 Z ボソンと $t\bar{t}$ の生成断面積の測定の様子を示している。この解析では、異なるフレーバーの 2 レプトン系の事象数をフィットすることでこれらの生成断面積を $\sigma_{Z \rightarrow \ell\ell}^{\text{fid.}} = 751 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 15(\text{syst.}) \pm 17(\text{lumi.}) \text{ pb}$ 、 $\sigma_{t\bar{t}} = 859 \pm 4(\text{stat.}) \pm 22(\text{syst.}) \pm 19(\text{lumi.}) \text{ pb}$ と測定した。また、 Z ボソンと $t\bar{t}$ の生成断面積比を $R_{t\bar{t}/Z} = 1.144 \pm 0.006(\text{stat.}) \pm 0.022(\text{syst.}) \pm 0.003(\text{lumi.}) \text{ pb}$ と測定した。

図 5 には、2022 年に得られたデータを用いた $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊事象の解析結果を示す。重心系エネルギー 13.6 TeV の陽子・陽子衝突でのヒッグス粒子生成断面積を 31.4 fb^{-1} のデータを用いて、 $\sigma(pp \rightarrow H + X) = 67_{-11}^{+12} \text{ pb}$ と測定した。標準理論の予言値 $59.8 \pm 2.6 \text{ pb}$ とよく一致している。

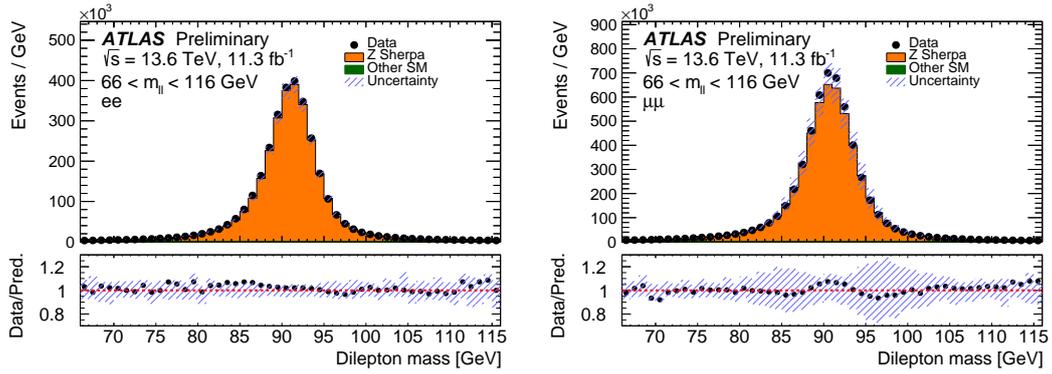


図 3: 2022 年に取得したデータで観測された $Z \rightarrow ee$ (左) および $Z \rightarrow \mu\mu$ (右) の不変質量ピーク。

(3) W ボソン質量測定

2022 年 4 月に、CDF 実験が $80,433.5 \pm 6.4(\text{stat.}) \pm 6.9(\text{syst.}) = 80,433.5 \pm 9.4 \text{ MeV}/c^2$ という W ボソン質量の測定結果を公表した。CDF 実験は、2011 年に稼働を終了した Tevatron 加速器でデータを収集していた実験で、本研究室でも参加していた国際共同実験である。単一実験での測定結果としては最高精度の結果であると同時に、標準理論から 7σ 外れた結果であった。

ATLAS 実験では、2011 年に取得した重心系エネルギー 7 TeV のデータを使って $80,370 \pm 7(\text{stat.}) \pm 11(\text{exp.syst.}) \pm 14(\text{mod.syst.}) \text{ MeV}/c^2 = 80370 \pm 19 \text{ MeV}/c^2$ の W ボソン質量の測定結果を、2018 年に論文発表していた。ATLAS 実験は改善されたフィット手法と、最新のデータも記述するように精度を上げた PDF 関数を使用しながら同じデータを解析しなおし、2023 年 4 月に $80,360 \pm 5(\text{stat.}) \pm 15(\text{syst.}) = 80360 \pm 16 \text{ MeV}/c^2$ の暫定結果を公表した。2018 年に公表した結果と矛盾なく、測定精度が 15% 改善された。また、標準理論ともよく一致する測定結果である。図 6 に、これら最新結果を含めた W ボソン質量測定の状況を示す。

(4) ヒッグス粒子の精密測定

2022 年は、2012 年に ATLAS と CMS 両実験でヒッグス粒子が発見されてからちょうど 10 周年であった。この 10 年でヒッグス粒子の性質の測定精度が精密測定の領域に達し始めている。LHC 実験での重要なテーマのひとつは、発見したヒッグス粒子の性質を詳しく測定し、標準理論を厳しく検証することである。2022 年には ATLAS 実験では、ヒッグス粒子のさまざまな性質を、Run-2 で得られた全データを用いて測定し公表した。

図 7 に、ヒッグス粒子のさまざまな過程での生成断面積と崩壊分岐比の測定結果を示す。

ヒッグス粒子の重要な性質は、フェルミオンとの湯川結合の強さがフェルミオン質量に比例すると標準理論で予言されていることである。また標準理論によると、ゲージ粒子は、電弱対称性が破れる際に質量を獲得したのであり、そのヒッグス粒子との結合が標準理論通りであるかどうかを検証することは意義深い。図 8 にヒッグス粒子とさまざまな粒子との間の結合の強さの測定結果を示す。Run-2 データを解析することで測定精度が上がってきたが、いまのところ測定結果は標準理論とよく一致している。

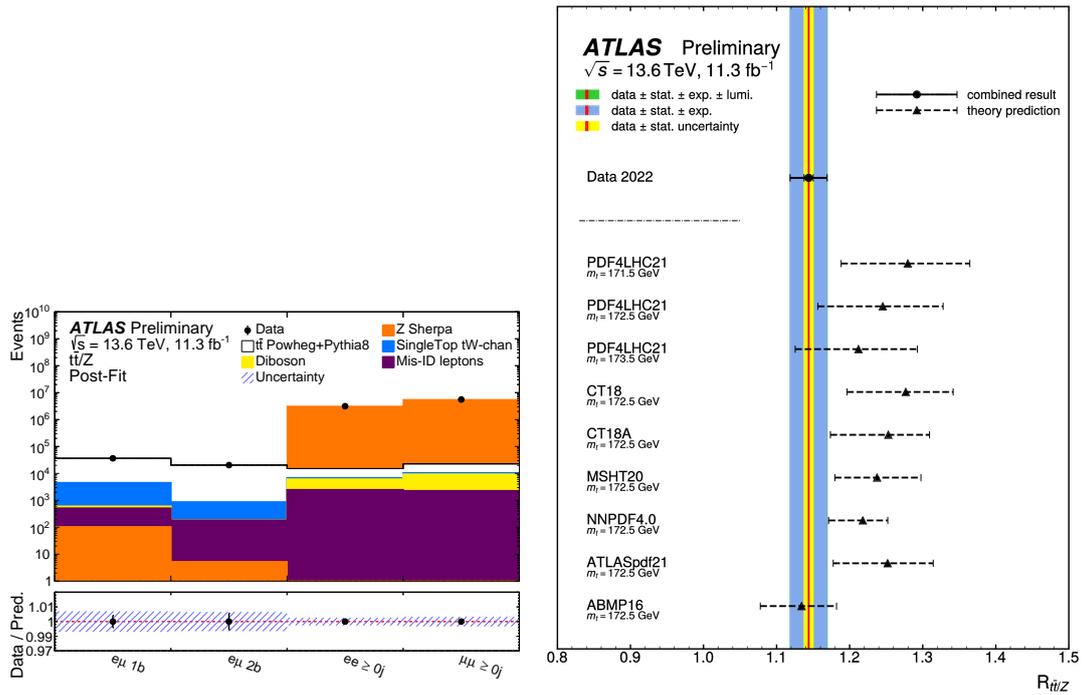


図 4: 2022 年に取得したデータを用いた Z ボソンと $t\bar{t}$ の生成断面積の測定 (左)。 Z と $t\bar{t}$ 事象の生成断面積比の測定結果とさまざまな PDF 関数を使用した理論予想の比較 (右)。

ATLAS 実験では、ヒッグス粒子の生成断面積だけでなく、運動学的な領域ごとの生成頻度も測定している。LHC で生成されたヒッグス粒子はさまざまな終状態に崩壊するが、1 つの終状態だけでは事象が少ないところを、いろいろな終状態を統一的に解析することで運動学的領域ごとの生成断面積を測定することに成功している (図 9)。この結果もいまのところは標準理論とよく一致している。

(5) ヒッグス粒子が 2 個同時に生成される過程の探索

ヒッグス粒子が 2 つ同時に生成される事象は、LHC では図 10 に示す生成過程が考えられる。標準理論通りであれば左と中の 2 つの過程が混ざりあって生成するが、こうした事象を発見し精密に測定することでヒッグス粒子の自己相互作用を測定できる。一方で、標準理論を超える理論では、ヒッグス粒子 2 つに崩壊する重い新粒子を预言する理論も多い。そうした新粒子が存在すれば、2 ヒッグス事象は標準理論の预言する頻度よりもはるかに頻繁に起こりうる。

ATLAS 実験 Run-2 のデータを使用し、ヒッグス粒子が 2 つ同時に生成される事象を $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$, $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$ の各崩壊モードで探索した。3 チャンネルとも、データ内に有意な信号の寄与が確認されなかった。これら解析で得られた 2 ヒッグス生成事象の生成断面積の上限値を標準理論预言値で規格化して示したのが図 11 (左) である。3 つの解析チャンネルをコンバインした結果の上限は、標準理論の値の 2.4 倍まで迫ってきている。標準理論では、図 10 の左図と中図の過程が混ざりあって 2 ヒッグス事象は生成されるが、ヒッグス粒子の自己結合の強さ (λ) によってこの混ざり具合が変わり、事象の特徴にも違いが生まれる。図 11 (右) は、さまざまな自己結合 (λ) を仮定したときに得られた 2 ヒッグ

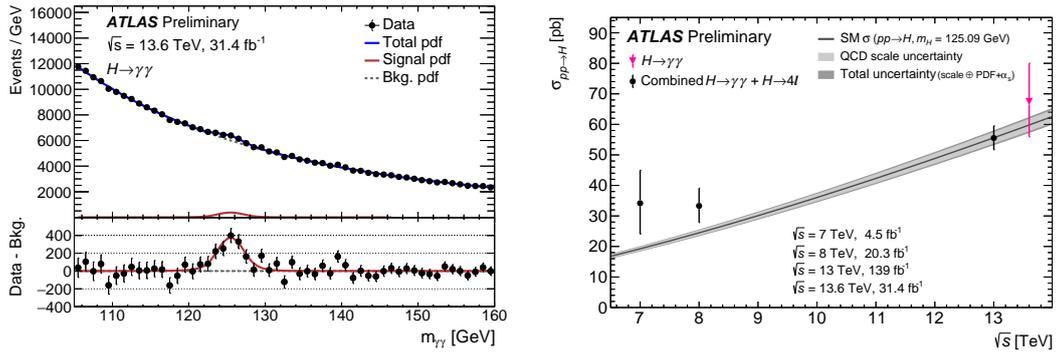


図 5: 2022 年に取得したデータを使った $H \rightarrow \gamma\gamma$ 過程の測定。(左) 2 光子の不変質量分布。(右) ATLAS 実験で測定したヒッグス粒子生成断面積を陽子・陽子衝突の重心系エネルギーの関数としてプロットしている。

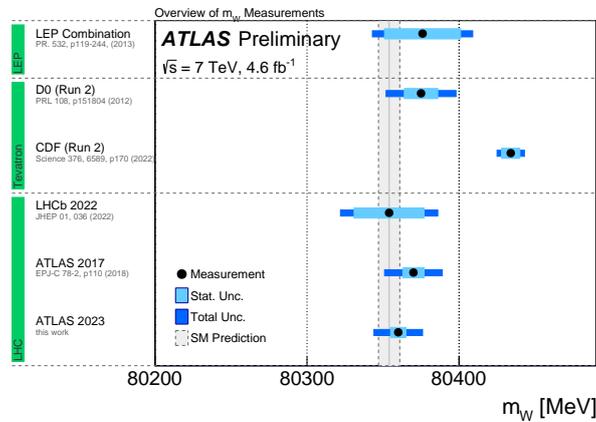


図 6: W ボソンの質量測定の現状。過去のさまざまな加速器実験での測定結果を比較している。ATLAS 実験の 2023 年 (最新) と 2017 年の測定は同じデータを用いた結果である。

ス過程の生成断面積に対する上限を示している。自己結合の値の標準理論値との比に対する 95% 信頼区間は、 $-0.4 < \kappa_\lambda (= \lambda/\lambda^{SM}) < 6.3$ である。

Run-3 とそれに続く HL-LHC で多くのデータを蓄積し、2 ヒッグス事象を発見し、ヒッグス粒子の自己相互作用の測定を行うことは、標準理論の新しい一面を検証することになるため重要である。

(6) 標準理論を超えるヒッグス粒子の探索

標準理論では、ヒッグス場としてアイソスピン・ダブレットを 1 個導入し、単一の中性電荷のヒッグス粒子が予想されていた。標準理論を超えるさまざまな素粒子理論で、複数の種類のヒッグス粒子の存在が提唱されている。ヒッグス場にアイソスピン・ダブレット 2 個を導入する 2HDM モデルは、興味深い素粒子理論として取り上げられることが多い。有望視されている超対称性理論でも、ヒッグス・ダブレットを複数導入する必要がある。最小限の超対称性理論である MSSM (Minimum Supersymmetric Standard Model) でも、2 個のヒッグス・ダブレットを導入する。LHC での標準理論を超えるヒッグス粒子探索では、2HDM や MSSM のさまざまなシナリオを考えて研究を行う場合が多い。

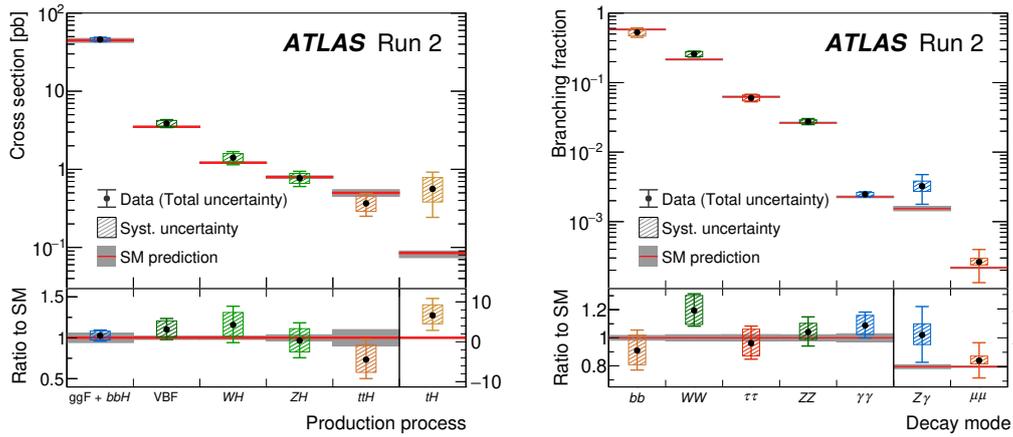


図 7: さまざまな過程でのヒッグス粒子の (左) 生成断面積と (右) 崩壊分岐比の測定結果。

2つのヒッグス・ダブレットを導入するMSSMでは、3つの荷電中性なヒッグス粒子 h 、 H 、 A と正と負の荷電を持ったヒッグス粒子 H^+ 、 H^- の計5つのヒッグス粒子が予言されている。これまでの実験データとの整合性から、すでに発見されている $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子は h である可能性が高く、他の4つのヒッグス粒子は h よりも重い可能性が高い。

ATLAS実験では2021年には、トップクォークを随伴して生成し、 $H^\pm \rightarrow tb$ 崩壊する荷電ヒッグス粒子をRun-2全データを用いて探した解析結果を公表した。本研究室では、引き続きRun-2データを解析を行っており、ブーストしたジェットを再構成する手法を新たに荷電ヒッグス粒子探索に用いて研究を続けている。2022年度には $H^\pm \rightarrow tb$ 解析の新結果はなかったが、他の解析チャンネルによるMSSMのヒッグス粒子探索にいくつかアップデートがあった。ATLAS実験におけるさまざまな重いヒッグス粒子の直接探索解析によって得られた h_{MSSM} シナリオに対する棄却領域をまとめたのが図12である。

[3] ATLAS シリコンストリップ検出器の運転

筑波大グループでは、ATLASシリコンストリップ検出器(SCT)の建設およびその後の検出器運転において、重要な貢献を続けてきた。これまで10年以上にわたってLHCの厳しい実験環境下で運転されてきたSCTセンサーは、大きな放射線損傷を受けており、例えば漏れ電流は運転開始当初の約10,000倍にまで増加している。SCTはRun3運転期間(2022-2025)終了時まで、荷電粒子の特定や運動量測定に必須な検出器であるため、Run3期間においてはこれまで以上に慎重に検出器の状態を監視しながら運転する必要がある。

LHC Run3運転は、ヒッグス粒子発見10周年の翌日である、7月5日に本格的に開始された。2018年以来約3年ぶりのATLAS検出器全体を使った本格的なデータ収集であったためか、実験開始直後はミュオントリガー用ガス検出器に対する高電圧が適正にかからずトリガー効率が出なかったり、ルミノシティが上がると一部の検出器の同期がずれてしまうなど、データ収集上の問題がいくつか露見したが、その中でもSCTは大きな問題もなく立ち上がり、2022年のデータ収集期間を走り切った。

一方で、あとからデータを詳しく解析すると、2022年10月頃から放射線量が多い領域で検出効率の低下が見られ、データ収集終了時には通常よりも約1%低下していた。これは荷電粒子のトラッキング効率に影響するものではないものの、一度検出効率の低下が始まる

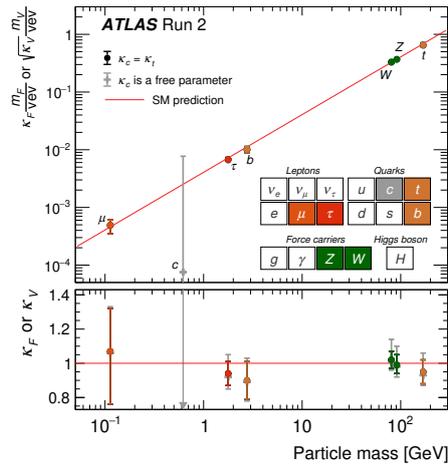


図 8: ヒッグス粒子のさまざまな粒子との結合の強さの測定結果。さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を粒子の質量の関数としてプロットしている。フェルミオンに対しては測定された湯川結合を、ボソンに対しては標準理論の予言がフェルミオンに対する予言と同じ直線に乗るように次元を合わせてプロットしている。下部のパネルは、測定結果と標準理論予言値の比を表示している。

と、1ヶ月程度の時間スケールでどんどん下がっていくこともわかり、Run 3 期間ではこれまで以上に検出効率を注意深く監視する必要があるという教訓となった。

このように、SCT に用いられているシリコンセンサーに対する放射線損傷は徐々に深刻になっている。今後、Run 3 終了まで SCT を高効率で安定に運転するには、現在のシリコンセンサーの特性をよく理解しておく必要がある。SCT では、センサーからの生信号を検出器モジュール上の集積回路ですぐにデジタル化し、バイナリデータのみを読み出しているため、測定できる情報は限られる。しかし、印加電圧や閾値をスキャンしながら検出効率などを測定することで、センサーのアナログ特性を推定できる。図 13 (左) は、印加電圧を変えながら測定した検出効率の印加電圧依存性を示す。放射線損傷を受けたシリコン中の実効アクセプター濃度の推移を記述するハンプルクモデルによると、2022 年時点での全空乏化電圧は約 60 V と予想されるが、図 13 (左) の印加電圧 60 V のあたりを見ると、2022 年 7 月の時点での検出効率は 20% にも満たず、99% 前後の高い検出効率を出すには約 140 V の電圧を印加する必要があることが読み取れる。一方で、閾値スキャンからは、高い荷電粒子検出効率に対して直接的に影響する、1 粒子あたりの電荷収集量を見積もることができる。2022 年には、初めて閾値 4 fC 付近までスキャンを行った (図 13 (右))。これにより、検出効率が 50% となるときの閾値から、平均電荷収集量を見積もることが可能となり、2022 年の時点で約 3 fC 程度であるとわかった。これは SCT 用シリコンセンサーの R&D 時のテスト実験結果と大きく変わらない結果である。ただし、図 13 (右) は、シリコンセンサーに対してさまざまな入射角で入射する荷電粒子を含んでしまっている。入射角が大きい荷電粒子の場合、センサー通過距離が長くなるため、電荷収集量も大きくなる。したがって、今後はできるだけ直角にセンサーに入射する荷電粒子候補のみを使って、図 13 (右) のような評価を行う予定である。

放射線損傷によるシリコンセンサーの特性変化を、センサー中での電荷分布のレベルで理解し、Run 3 最終年までの性能変化を予想するために、TCAD シミュレーションを行った。まず、放射線損傷によるアクセプター準位の増加量を、漏れ電流や完全空乏化電圧など

ATLAS Run 2

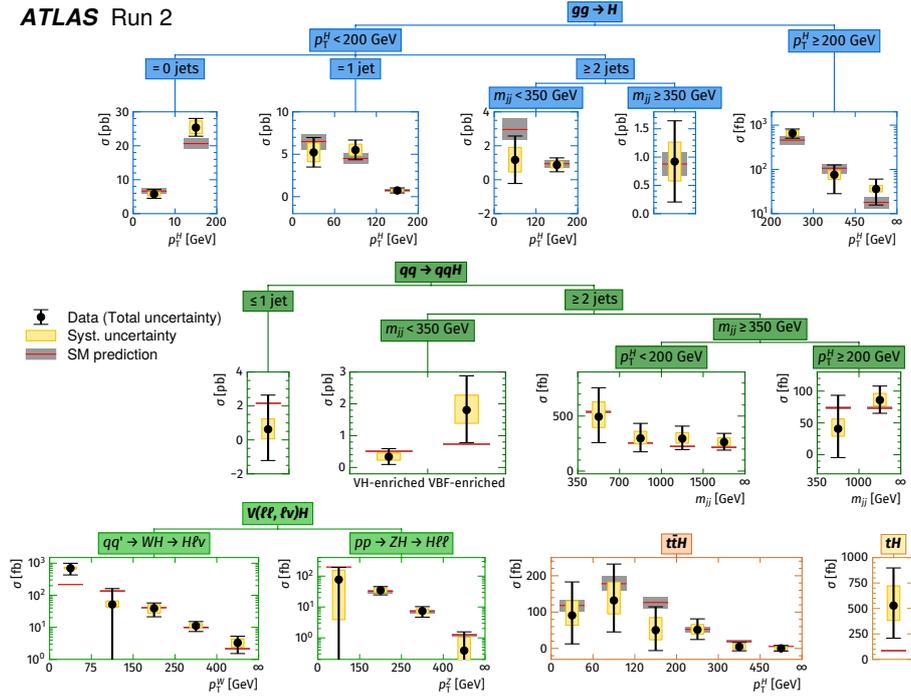


図 9: ヒッグス粒子生成過程の運動学的な領域ごとの生成断面積の測定結果。

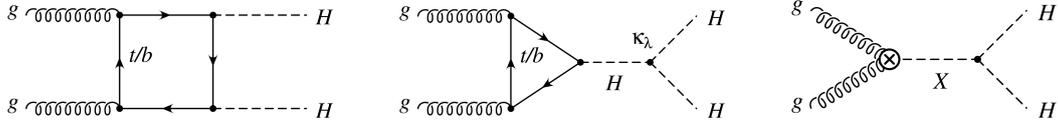


図 10: LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

の実測値を利用して調整した上で、内部電場構造や電荷分布を詳細に調べた。図 14 は空間電荷分布のバイアス電圧依存性を示す。シリコンセンサー全体がおおむね空乏化した後も、ストリップ直下に空乏化していない部分が残っており、そこで信号電荷を損失していたために検出効率が十分に出ていなかったことが推測される。表面まで完全に空乏化するには、ハンプルクモデルで予想される完全空乏化電圧よりも相当高い電圧をかける必要がある。このシミュレーション結果から、Run 3 時点で表面空乏化に必要な電圧は 250 V と予想される。一方で、SCT は 500 V まで印加可能であるため、Run 3 終了まで問題なく運転可能である。ただし、印加電圧スキャンの結果 (図 13 (左)) によると、表面空乏化に必要な電圧約 100 V に対してさらに高い、140 V 程度を印加しないと検出効率が 99% (プラトー) に到達していない。この差についてのより正確な理解は、今後の課題である。

【4】 HL-LHC ATLAS 実験用シリコン飛跡検出器の開発

2029 年より、LHC は瞬間ルミノシティを $7.5 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$ に引き上げた高輝度運転に入る (High-Luminosity LHC)。劇的に増加するデータ量および放射線量に対応するため、

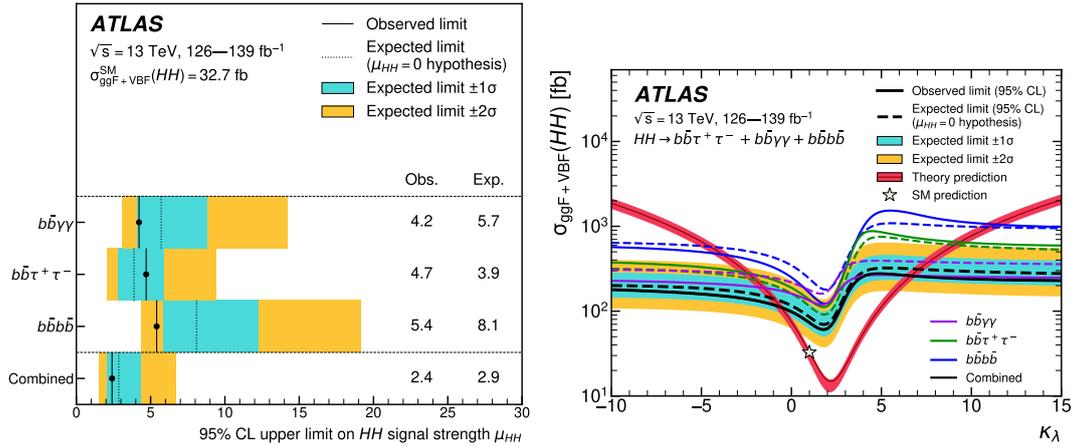


図 11: (左) 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。解析チャンネルごとに得られた上限を、標準理論の予言値で規格化して表示している。(右) さまざまな自己結合を仮定したときに得られた 2 ヒッグス事象の生成断面積に対する上限。自己結合の値は、標準理論の値との比 $\kappa_\lambda (= \lambda/\lambda^{SM})$ で表示している。

現行 ATLAS 検出器に対する大幅なアップグレードが予定されており、SCT を含めた内部飛跡検出器は、新しいシリコン飛跡検出器である Inner Tracker (ITk) に置き換えられる。バレル部は全 9 層で構成され、内層 5 層は $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ (最内層のみ $25 \times 100 \mu\text{m}^2$) のピクセルセンサー、外層 4 層は約 $75 \mu\text{m}$ ピッチのストリップセンサーで構成される。合計 180 m^2 もの体積をもつ世界最大級のシリコン飛跡検出器であり、2028 年の完成を目指していよいよシリコンセンサー量産、および実機シリコンモジュールの量産を開始するフェーズに入りつつある。筑波大では、主にシリコンストリップおよびシリコンピクセルセンサーの量産時性能評価、およびピクセルモジュールの量産に向けた準備を、国内外の大学および研究機関と協力しながら進めている。

(1) シリコンストリップセンサー量産

2025 年までに、合計 20,100 枚の ITk 用シリコンストリップセンサーが量産される。この中で、日本グループは全体の約 3 割に相当する 6,350 枚のセンサーを担当し、筑波大は高エネルギー加速器研究機構と共同で

- シリコンセンサー全数に対する品質保証測定 (形状測定およびストリップ特性測定)
- 性能テスト専用小型シリコンセンサー構造を用いた放射線耐性試験

を行ってきた。ストリップセンサーの量産は 2021 年 7 月に開始され、2022 年度までに 3,568 枚の生産を完了した (図 15)。2022 年度には、量産初期におけるセンサー品質検査の状況が、リソースやスループットの観点も含めて総合的にレビューされ、大きな問題がないことが確認された。ただし、2022 年初頭からストリップ間の分離が悪く、電氣的に導通してしまっているセンサーが頻繁に見つかるようになった。これはセンサー輸送中に蓄積された静電気が、梱包を開封して治具を用いて引き上げる際、治具との接触部分でストリップ間を導通させてしまうということまで、原因として突き止められている。幸い、深紫外線やイオンガンを短時間照射することで、再び良好なストリップ間分離を得られるということがわかったが、この回復作業のため、各サイトにおける品質保証測定の作業負荷が増大している。本

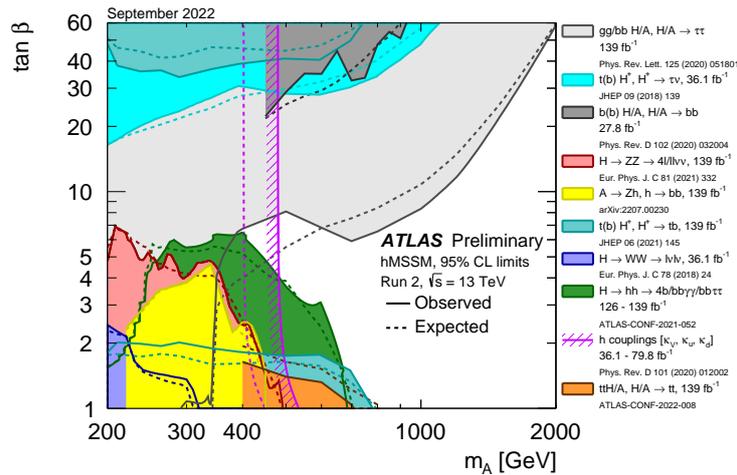


図 12: ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見された $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

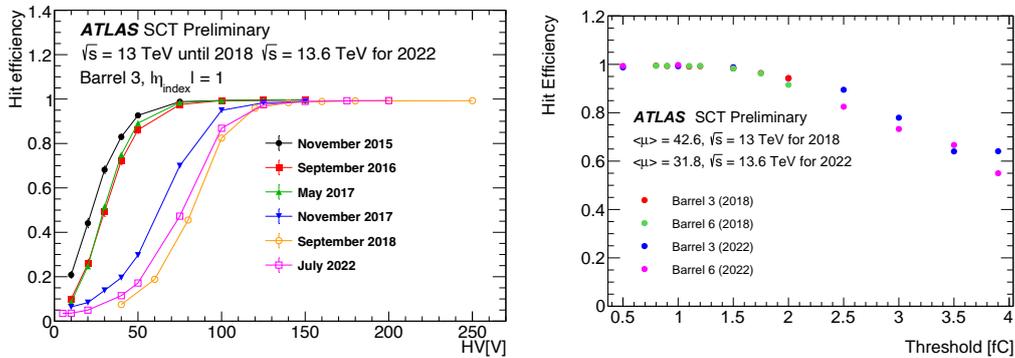


図 13: 印加電圧スキャン (左) および閾値スキャン (右) の結果。

質的な解決には、輸送中の静電気対策が不可欠であり、現在センサー製造元の企業と協議中である。

放射線耐性試験については、2022年7月と2023年1月の2回に分け、合計69枚のテスト構造に対して、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターにおいて70 MeV陽子線の照射試験を行った。合計8個の測定項目のうち、特に荷電粒子検出効率に対して重要となる、電荷収集効率の測定結果を図16(左)に示した。照射前には23,000 e^- 程度の電荷収集量があったが、照射後にはどのサンプルも12,000 e^- 程度となっており、これは期待通りの結果である。サンプルごとのばらつきも概ね10%以内となっており、良い一様性も確認できた。

量産時品質保証のために大量のシリコンテスト構造に対する放射線照射を行うことを利用し、海外大学・研究機関とも協力しながら、より詳細なシリコンセンサーの放射線損傷に関する研究も行っている。例えば、図16(右)はバイアス抵抗値の温度依存性を、様々な放射線種および照射量において測定したものである。バイアス抵抗値の絶対値のばらつきは個体差として期待される程度のものであり、放射線損傷の程度や種類によらず、同様の温度依存性を示すことを確認した。

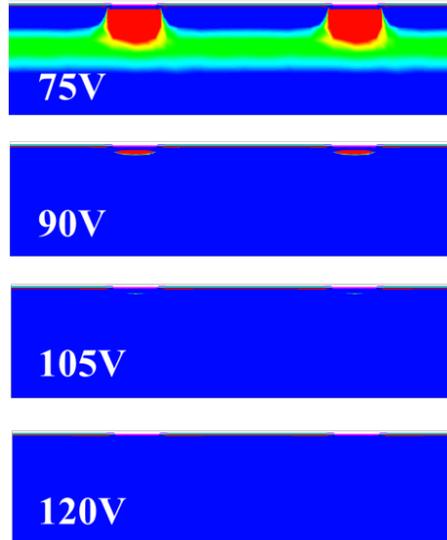


図 14: TCAD シミュレーションによる、Run 2 運転終了時（2018 年 11 月）時点でのセンサー内空間電荷分布の見積もり。青色の部分（空間電荷がほぼゼロ）が空乏化した領域、赤色や緑色の部分は $O(10^{11} / \text{cm}^3)$ の空間電荷が存在する領域を示し、特に赤色となっているのはストリップ（80 μm 間隔）に対応する。

(2) シリコンピクセルセンサー量産および試作モジュール性能評価

ITk シリコンピクセル検出器については、日本グループ（筑波大の他 KEK など 8 大学・研究機関が参加）がシリコンピクセルセンサーの性能評価からモジュール製造までを一貫して担当する。特に 2022 年度は、ピクセルモジュールの各構成部品の試験量産あるいは本量産が本格的に始まる重要な 1 年となった。

ITk 用シリコンピクセルセンサーは、 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ のサイズに 50 μm 角のピクセルを形成した構造を持つ。そこに 2 cm 角の信号処理回路（ASIC）合計 4 枚をバンプボンディングにより貼り合わせる（フリップチップ）。この時点では、信号の読み出しや電源供給を行うためのフレキシブル基板が未装着のため、“ベアモジュール”と呼ばれる。ベアモジュール製造時、フリップチップ工程において不良があるとシリコンセンサーの特性を悪化させてしまう可能性があるため、ベアモジュールの電圧電流特性（IV 特性）を確認する必要がある。ただし、この時点ではピクセルセンサーへの電源供給に必要なフレキシブル基板が取り付けられていないため、そのままでは IV 特性を測定できない。そこで、プローバーを用いた IV 特性測定用セットアップを構築した。プローバーの用いる場合、ニードルとピクセルセンサーとの安定かつ安全な接触手順の策定や周辺温湿度のコントロールなど、大量のベアモジュールを系統的に試験するには様々な難しさを伴うが、試行錯誤の末に安定かつ迅速に IV 特性を測定可能なセットアップ及び測定手順を策定することができた。図 17（左）は最初の 1 ロット 20 個分のベアモジュールの測定結果を示す。ピクセルセンサーの時点では IV 特性が良好なもののみを選別してフリップチップを行ったのであるが、フリップチップ後は 9 個のベアモジュールについて、わずかなバイアス電圧を印加しただけで大きな漏れ電流が流れ、ブレークダウンする傾向を示した。この結果はすぐに製造元にフィードバックし、次ロットからは良品率が大幅に向上した。

ベアモジュールおよびフレキシブル基板は、その形状に異状があると、両者を貼りあわせてモジュール化する際にうまく接着できなかつたり、モジュール化後の特性が悪くなつたりする可能性があるため、その形状を正確に測定しておく。形状測定結果の一例として、試験

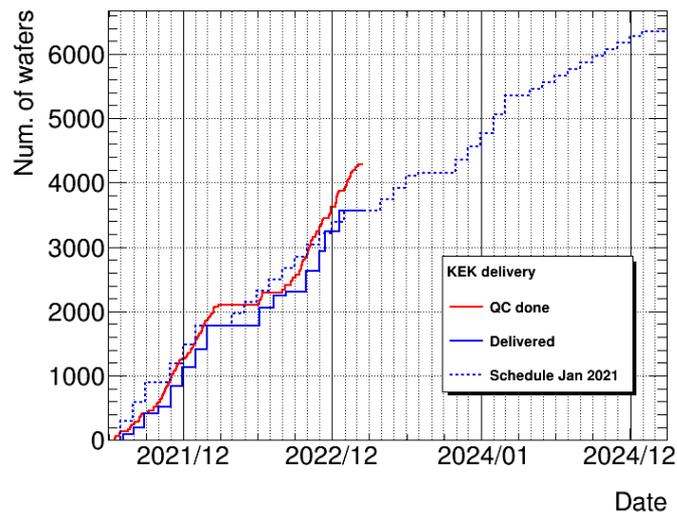


図 15: シリコンストリップセンサー量産中の品質保証測定枚数（赤実線）および納入枚数（青実線）の推移（日本担当分）。青点線は量産開始当初の納入予定曲線を示す。

量産されたベアモジュール全体の厚み測定結果（初期の 20 個分）を図 17（右）に示す。要求値は 235–365 μm であるが、実際には許容範囲に比べて十分に良い一様性が出ている。また、このときに表面の様子を写真撮影し、傷や汚れなどを記録することで、以後のピクセルモジュール製作過程で何か問題が見つかったとき、ベアモジュール時点での状態を確認できるようにする。形状測定および写真撮影の全工程で、1 ベアモジュール当たり 1 時間程度での測定を可能とした。

ベアモジュールおよびフレキシブル基板を接着し、ピクセルモジュールをつくる。2022 年度は、モジュールの試験量産を開始するための準備として、本番用と同等の機能を持った ASIC である ITkpix-v1 を用いたプロトタイプモジュールを複数製造し、その性能を詳細に試験した。ITk 用ピクセルモジュールにおける懸念事項の一つとして、使用中の温度変化などによりメカニカルな負荷がかかるとバンプボンディング部がはがれてしまい、信号を読み出せなくなるという問題があった。これまでの研究で、モジュール完成後に高電圧の放電防止用として施されるパリレンコーティングが、メカニカルな変形を抑制してバンプはがれを防ぐということがわかってきていた。2022 年度には、統計量を増やしてこの手法の有効性を検証するため、実機と同仕様のモジュール 11 個を製造し、それらにパリレンコーティングを施した。これらに対して、実際の実験環境で想定されるものに対して、十分に保守的な実験となるよう、 -55°C から 60°C の温度変化を 100 サイクル以上にわたって与えながら、正しく信号を読み出せるピクセル数を計測した（図 18）。結果、11 個すべてのモジュールにおいて、バンプはがれピクセル数の有意な増加は見られず、パリレンコーティングの有効性を示すことができた。さらに、4 個のモジュールに対して、高輝度 LHC 実験期間中に想定される放射線量を与えたうえでさらに熱サイクルを継続したが、やはりバンプはがれピクセルは増加せず、パリレンコーティングが十分な放射線耐性を有することも確認した。この結果を受けてモジュールの設計が確定され、現在は 2023 年度の量産開始に向けた体制づくりが進んでいる。

さらに、筑波大グループは KEK グループと協力し、独自で ITk ピクセルモジュールのテストビームによる性能評価実験を、アメリカ・フェルミ国立加速器研究所で行った。この中では、120 GeV の高運動量で良質な陽子ビームを用い、有用なデータを取得することがで

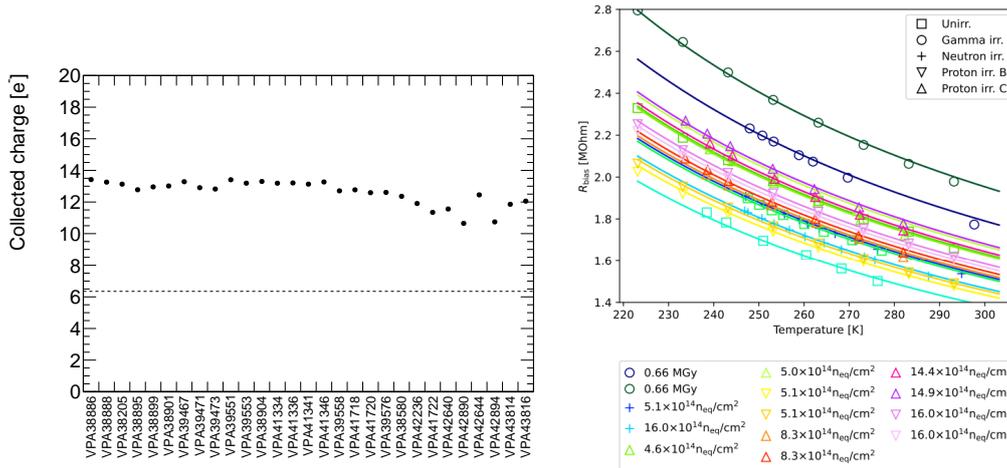


図 16: (左) 2022 年度に照射および測定したサンプルで得られた電荷収集量。VPA で始まる横軸のインデックスは、ストリップセンサーの製造バッチを示す。(右) バイアス抵抗の温度依存性測定結果。ガンマ線、中性子線、陽子線を照射した結果であり、特に“Proton irr. C” が、筑波大グループが中心となって照射実験を行った結果である。

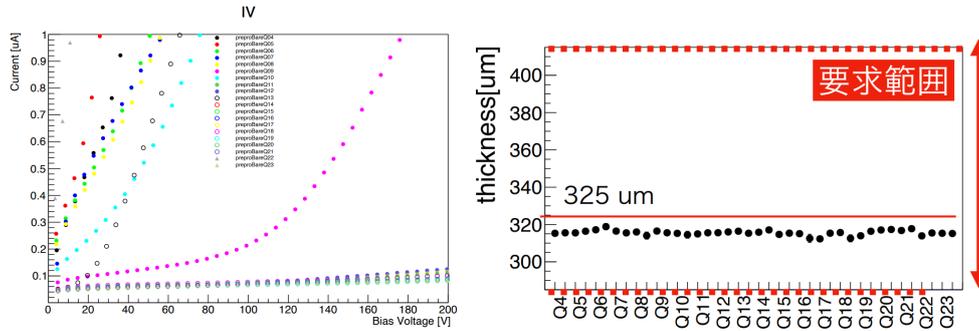


図 17: ベアモジュールの品質測定結果。(左) ベアモジュールの IV 測定結果。ブレイクダウン電圧が、別途測定した完全空乏化電圧 (70 V 前後) からさらに +70 V 以上であることが要求されるが、いくつかのモジュールが早い段階でのブレイクダウンを示している。(右) ベアモジュールの厚さ測定結果。

きた一方で、途中で検出器同士のタイミング同期がずれてしまうなど、DAQ 上の問題もわかり、これらは ITk ピクセル検出器の DAQ 開発チームにフィードバックした。データ解析は現在鋭意進行中であり、早期の結果公表を目指している。

[5] COBAND 実験

COBAND は、筑波大学素粒子実験室を中心とする国際共同プロジェクトであり、現在観測値として与えられているニュートリノ寿命下限値 10^{12} 年を超える感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を探索する実験を計画中である。我々のグループでは、観測ロケット実験で使用予定のニオブ (超伝導ギャップエネルギー $\Delta = 1.55$ meV, $T_c = 9.23$ K) を超伝導体、アルミニウム ($\Delta = 0.172$ meV, $T_c = 1.20$ K) を準粒子トラップ層として用いた超伝導トンネル接合素子 Nb/Al-STJ (Superconducting Tunnel Junction) や、更に衛星実験での使用を念頭に置いた超伝導ギャップエネルギーが更に小さいハフニウム ($\Delta = 20$ μ eV, $T_c = 0.165$ K) を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。

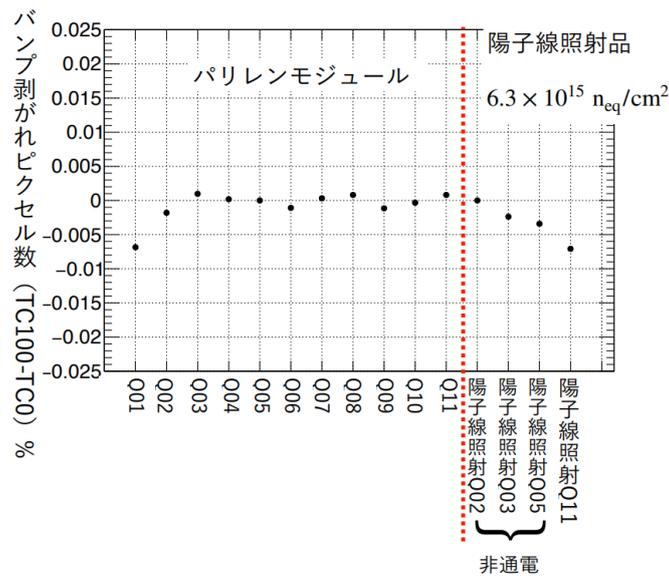


図 18: 今回試作した 11 個のモジュールにおいて、熱サイクル 100 回終了後にパンプはがれピクセルと判定されたものの割合。Q02、Q03、Q05、Q11 の 4 モジュールに関しては、陽子照射後にさらに 100 回の熱サイクルを実施した後の結果を示す。

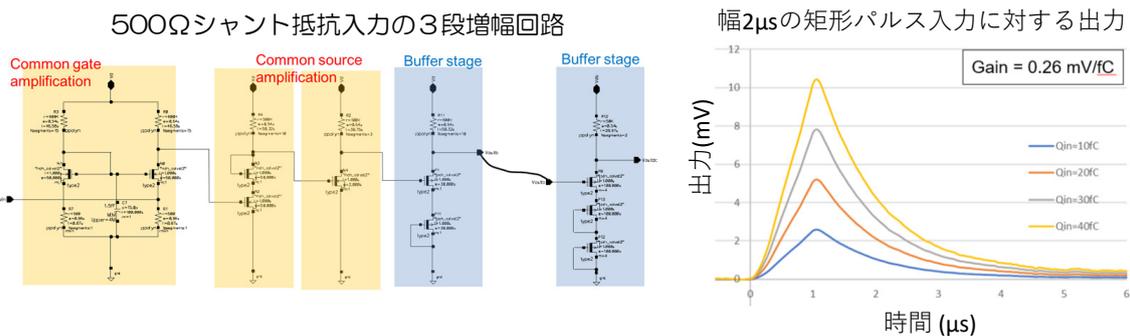


図 19: STJ 信号の読み出しに用いる前置増幅器として設計した回路 (左図)。増幅回路の室温における性能評価。幅 $2 \mu\text{s}$ の矩形パルス入力に対する応答を示す (右図)。

現在、産総研 CRAVITY (現 QuFab) との共同研究によって、漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発が行われ、要求される低漏れ電流性能をほぼ達成した Nb/Al-STJ 素子が得られている。しかしながら、冷凍機内の極低温ステージ上の STJ からの信号の読み出しは (a) 0.4 mV 程度という微小で正確な定バイアス電圧が、長い冷凍機配線の先に接続された Nb/Al-STJ 素子を動作させるために必要、(b) 検出目標となるニュートリノ崩壊光の単一光子 ($E_\gamma \sim 25 \text{ meV}$) に対する期待される出力電荷は、約 $250 e$ (0.04 fC)、(c) STJ からの信号の時定数は数 μs と比較的速く、対して STJ 自身の静電容量は、数十 pF ~ 数 nF と大きい、という理由により、そう単純ではなく、むしろチャレンジングと言える。そこで、我々のグループでは STJ 素子のすぐ近くで信号を増幅可能な読み出し系として KEK, JAXA, 静岡大等との共同研究による FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行っている。これまでの研究成果として、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いたソース接地増幅回路の比較的簡単な増幅器の試作、及び極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号を同じ極低温ステージ上での増幅読み出しや、容量性負帰還をもつ差動増幅回路によって実現さ

れた低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器を試作し、極低温での動作及びSTJ信号の電荷読出し試験等の実績がある。これらによって得られた知見のもと、可視光～近赤外域の単一光子を十分に検出可能な性能をもつ増幅回路を設計し、SOIウェハのMPWランに参加して製作した。今回製作した回路は、(i)0.5 k Ω のシャント抵抗を入力としゲート接地段を初段に持つ3段増幅の電流電圧変換増幅器、(ii)カスコード型ミラー回路の差動増幅器をカスケード接続することにより、1 MHz帯域までの高利得を確保したオペアンプの容量性負帰還による電荷積分型増幅器の二種類である。これらの回路では、回路内のMOSFETのゲート端子が外部に接続する箇所全てにESD保護回路を搭載させ、静電気による故障の可能性が低減することを期待した。また出力部にこれまでより電流駆動能力の高いバッファ回路を導入し、0.5 nF程度ある冷凍機配線の寄生容量に対して1 MHz帯域までドライブ可能とした。(i)の電流電圧変換増幅器の回路、及び室温での実測による評価を図19に示す。入力信号として2 μ sの矩形パルスを使用し、最終段のバッファ段は、使用していない条件でのテストであるが、オシロスコープ入力負荷(1M Ω , 50pF)に対し、良好な周波数帯域を示している。但し、信号利得はシミュレーションで期待されたものに対して、約1/10となっており、設計・シミュレーションの見直しが必要であることが判明した。また、極低温での動作の検証も今後の課題である。

また、Hf-STJの開発においては、韓国IBSのグループとの共同研究によってX線に対する応答を無冷媒断熱消磁冷凍機を用いて測定し、Hf-STJとして世界で初めて ^{55}Fe からのX線域単一光子に対する応答信号を分解能6.7%で確認することに成功し、この成果について、論文執筆のための測定データ解析を進めている。

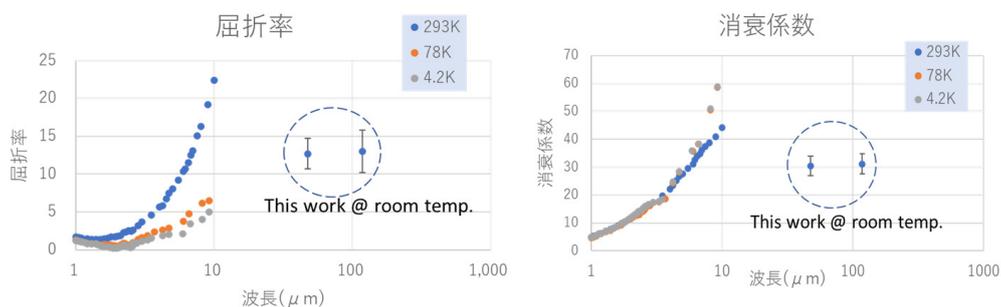


図 20: 福井大遠赤センターにおいて遠赤外分子レーザー光源(波長 47 μm , 118 μm)を用い、エリブソメトリ法により測定されたニオブの屈折率, 消衰係数。

Nb/Al-STJ + 極低温読出によって 25 meV の単一光子検出が実現すれば、アレイ状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の一光子分光が可能となる。ロケット実験に向けた望遠鏡の光学系及び Nb/Al-STJ による分光測定のための回折格子を含むロケット実験用の光学系の開発も福井大, 中部大, 関西学院大等との共同研究により進められている。これまでの成果として、波動光学シミュレーションに基づいた 50 μm 域回折格子設計・製作、及び福井大の遠赤外線分子レーザーによる回折格子の性能を確認している。また、光学シミュレーションによる望遠鏡光学系の設計、及びミラーの一部の試作、並びに焦点位置で回折限界 400 $\mu\text{m}\Phi$ の広がりを持つ像を 40 μm 角 STJ 表面に集めるための集光器, STJ 素子表面に施す反射防止膜の開発を行っている。

2022 年度における成果としては、反射防止膜最適化のため Nb の極低温・遠赤外域での光学定数測定 (n, k) を目指し、予備測定として、室温・遠赤外光(波長 47 μm , 118 μm) での

光学定数測定を自作の装置でのエリプソメトリ法により行った(図 20)。光源としては、福井大学の遠赤外領域開発研究センターの遠赤外分子レーザーを用いた。

また、同じく、遠赤外レーザーを用い、Nb スパッタ膜の表面に接着された 10 μm 厚の単結晶シリコン薄膜の反射防止効果を測定した。

【6】 LGAD を用いた 4 次元飛跡検出器の開発

LGAD (low-gain avalanche diode) は、読み出しの n^{++} 電極の直下に高濃度の p^+ 層を形成することで、アバランシェ増幅を起こさせる増幅機能を持たせたシリコン検出器である。信号量が増えることに加え増幅率が 10 倍程度の低ゲインでは SN 比も向上する。信号形成が薄い pn 接合部で局所的に起きるため時間分解能も飛躍的に向上する。LGAD では荷電粒子に対して 30 ps 程度の時間分解能が達成できる。高輝度 LHC (HL-LHC) やさらに高輝度の加速器実験 (FCC 等) では、膨大な数の粒子生成の環境下での飛跡再構成が要求されるので、時間情報に加え半導体検出器の優れた位置分解能を実現できれば、有効な検出器となると期待できる。

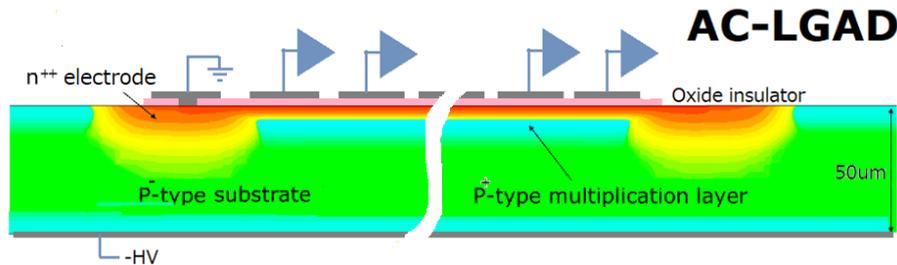


図 21: AC-LGAD 構造の概念図。一様な増幅層で生成される信号を酸化膜を介して細分化して配置した AC 電極から読み取る。

LGAD を飛跡検出器とするためには電極の細分化が必要である。そのために、増幅層と読み出し電極を酸化膜を介した AC 結合にする AC-LGAD の設計・試作を 2019 年度から開始し、2022 年度には要求を満たすセンサーが実現できた。図 21 に AC-LGAD の概念図を示す。最も重要な設計パラメータは増幅層の濃度で、 n^+ 濃度が高いままだと誘起された信号電荷が広がりすぎて位置情報を失う傾向になるが、低すぎると増幅が十分でなくなる。 n^+ 濃度、 p^+ 濃度、酸化膜厚をパラメータとして浜松ホトニクスで試作を実施し、 β 線や東北大 ELPH の電子ビーム、パルスレーザーを用いて評価を進めた。また、放射線耐性に関しても東北大 CYRIC の陽子線を通じて評価した。

n^+ 濃度と接合容量の組み合わせのうち表 1 で作成したピクセルセンサーの応答を ^{90}Sr の β 線を用いて評価した。E600 型のピクセルに対する応答を図 22 左に示す。 β 線が読み出し領域外を通過したノイズピークと信号分布がきれいに分離できている。図 22 右には、信号分布の最頻値 MPV を表 1 の全組み合わせに対して比較した。期待通り、大きな C_{cp} と n^+ 抵抗において MPV が最大になる。図 22 左から、信号波高はピクセルピッチにほとんど依らず、電極細分化が問題なく達成できている。

表 1: n^+ 抵抗と接合容量 C_{cp} の異なるサンプル例

n^+ 抵抗 [Ω/sq]	C_{cp} [pF/mm^2]		
	600	240	120
1600	E600	E240	E120
400	C600	C240	C120

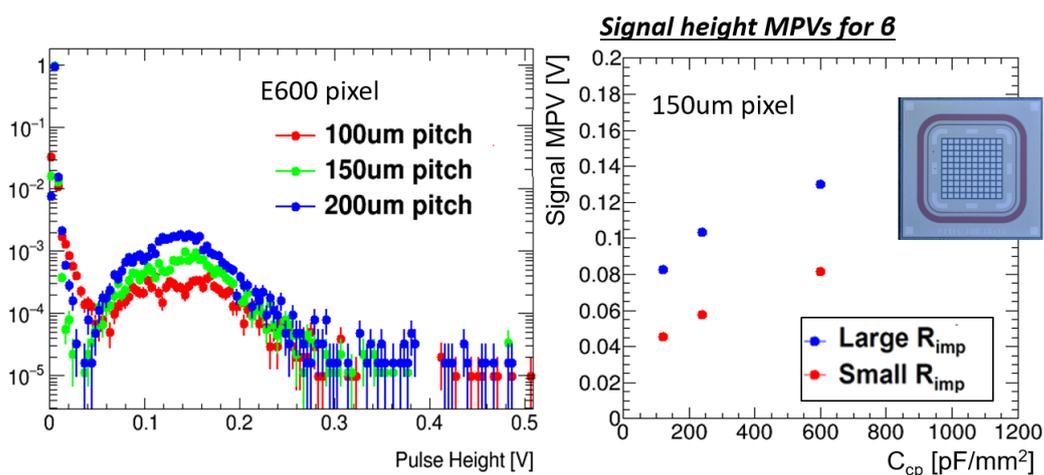


図 22: (左) E600 型のピクセルセンサーの β 線に対する波高分布。3 種類のピクセルピッチの比較。(右) 150 μm ピッチのピクセルセンサーでの波高分布の MPV を表の全組み合わせについて示す

80 μm ピッチで 10 mm 長の電極を配したストリップ型についても同様にベータ線に対する応答を評価した。図 23 左は連続する 16 チャンネルを読み出した際の最大信号の波高分布を示す。MPV はピクセルと比較すると約 1/3 であるが、これはストリップ電極の長さにより隣接チャンネルへのクロストーク量が無視できないためである。図 23 右は最大波高のチャンネルからの距離の関数としてクロストーク波高を比として示すもの（横軸単位は 80 μm ）で、隣接には平均して 6 割が読み出される。このようにストリップでは複数チャンネルに信号が分割されるが、左図のようにピクセルと同様に優れた信号分離が達成できている。

実際に異なるストリップ長のサンプルを用いて、MPV とクロストーク比 (= 両隣波高の和/最大波高) を測定した結果を図 24 に示す。ピクセルサイズ (100–200 μm) の長さになると、ピクセルと同等の信号と小さなクロストーク比が実現できている。

AC-LGAD の時間分解能を 500 μm 電極幅のセンサーに対して β 線と赤外パルスレーザーを用いて評価した。信号がある電圧に達するまでの時間精度が時間分解能であるが、これは主に 3 つの要素により決定される。(1) タイムウォーク (TW: 信号波高が小さいと到達時間が遅くなる)、(2) ジッター (ノイズにより波高がぶれると到達時間もぶれる)、(3) ランダウ (経路に沿って信号を生成する荷電粒子の場合、場所によって異なる信号量を生成する。増幅層までの距離で時間差が異なるので、この影響により信号波形 (= 到達時間) は事象ごとにふらつく)。TW は最大波高の一定割合の波高を基準電圧にとることでほぼ除外できる。赤外レーザーでは経路により発生信号量が一定なので、ジッター効果のみが時間分解能に影響する。また、ランダウはセンサーの厚みに依存する。

図 25 左にはセンサー厚が標準の 50 μm に加え 30 μm と 20 μm の場合で測定した時間分

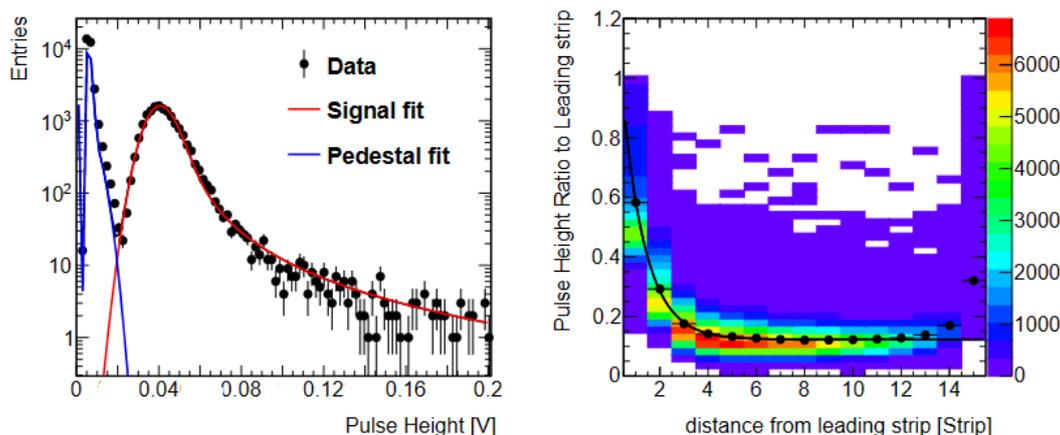


図 23: (左) E600 型のストリップセンサーの β 線に対する波高分布。(右) ストリップセンサーでのクロストークを最大波高チャンネルからの距離で示す ($80 \mu\text{m}$ ピッチ)。

解能のバイアス電圧依存性を示す。右表にはそれぞれの厚みでの最小の時間分解能をまとめるが、ジッターは赤外レーザーでの値から評価し、ランダウの影響は β 線と赤外レーザーでの測定値の差として求めた。信号の立ち上がり速度が速いほどジッターは小さく、信号量の多い $50 \mu\text{m}$ 厚が最小である。これに対して β 線に対する寄与はランダウが顕著であり、それは薄い $20 \mu\text{m}$ 厚が最小となる。

将来の加速器実験で用いるには検出器の放射線耐性は不可欠である。LGAD は増幅層である p^+ 不純物密度が照射により減少しその結果、増幅に必要なバイアス電荷が照射量に比例して増加する問題がある。海外の研究では、照射により格子からボロンが外れ非活性化することとそれらがウェハ内の酸素と結合してドナー準位を形成することを要因とした。実際に炭素を注入し酸素と結合させることで、放射線耐性の改善に成功している。実用にはさらなる耐性向上が必要である。浜松ホトニクスと協力し (1) 補償法 (ボロン除去は濃度を高くすると少なくなることが分かっているので、ボロン濃度を高くする。 p^+ 不純物密度を一定に保つためにリンも注入して補償させる試料)、(2) 部分活性ボロン法 (熱処理を調整することで最初に多めに注入したボロンの一部は非活性化させる。これらは酸素と結合するので照射により BO が増加することを防ぐ)。2つの方法による試料を CYRIC で $3 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ までの陽子線照射をしたところ、(1) は改善ならなかったが、(2) は極めて顕著な改善の初期評価結果を得た。今後は、より詳細に評価をし、炭素注入などもからめた改善法を研究する。

本研究は科研費および日米技術協力の枠組み (代表 高エネルギー加速器研究機構中村浩二助教) で、米国のフェルミ研究所、LBL 研究所、UCSC 大学と連携しながら開発研究を推進してきた。

【7】 SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発

Silicon-On-Insulator (SOI) は、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシリコン層に電子回路を作製する技術である。我々は将来の素粒子実験に用いることのできるピクセル検出器として、BOX 層下のシリコン基板を高抵抗の粒子検出部とし

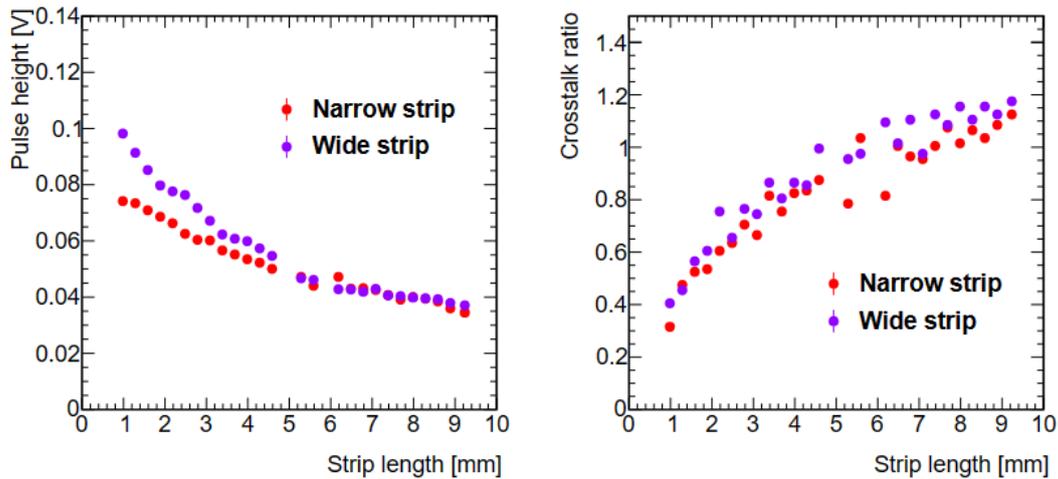


図 24: (左) E600 型のストリップセンサーの波高 MPV および (右) クロストーク比のストリップ長依存性。ストリップピッチ $80 \mu\text{m}$ に対して電極幅は Narrow で $40 \mu\text{m}$ 、Wide で $60 \mu\text{m}$ 。

た読み出し回路一体型ピクセルセンサーを実現する全く新しいタイプの検出器を Lapis セミコンダクター社の $0.20 \mu\text{m}$ SOI プロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で開発研究してきた。

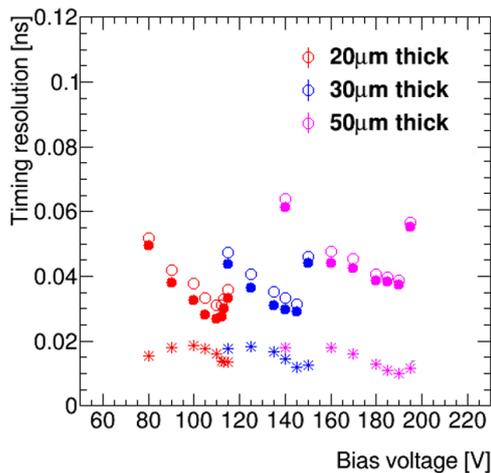
(1) KEK AR-TB に用いるトラックー開発

SOI ピクセルセンサーの特長として高位置分解能と低物質量化が可能であることが挙げられる。KEK は 2022 年度に AR 蓄積リングに最大 5 GeV の電子ビームラインの運用を開始した。これは世界的にはドイツ DESY 研究所のラインに匹敵する電子テストビームラインとなる。このエネルギー領域の電子はクーロン多重散乱の影響を受けやすく、SOI ピクセルを用いることで同ビームラインの性能を最大限発揮できるトラックーが実現できる。INTPIX4NA は $17 \mu\text{m}$ のピクセルサイズをもつ厚さ $300 \mu\text{m}$ の積分型 SOI センサーである。これを 32 mm 間隔に 5 台配置したトラックーを製作した。2021 年度に、東北大 ELPH の $200 \sim 820 \text{ MeV}/c$ 陽電子ビームでトラックー性能を評価したのに引き続き、AR-TB の $1 \sim 5 \text{ GeV}/c$ 運動量領域で性能評価した。

5 台のセンサーの内、1 台を試験用検出器 (DUT) と見なし、残りのセンサーで飛跡を再構成し DUT のヒット位置との残差をもとめる。多重散乱のために、台数を含めた飛跡再構成法は最小の残差を得るために重要で、ELPH での評価から DUT の直前 2 台と直後 1 台で飛跡を再構成する方式 (2*-1 法) は有効であることが分かっている。図 26 は 2*-1 法で評価した ELPH、AR-TB での残差の標準偏差の測定値を示す。120GeV 陽子のクーロン散乱の無視できる測定値と ELPH データを

$$\sigma_{\text{res}}(p) = \sqrt{\sigma_0^2 + (k/p)^2} \quad (1)$$

でフィットした関数も示した ($\sigma_0 = 1.92 \pm 0.19 \mu\text{m}$ 、 $k = 9, 25 \pm 0.09 \mu\text{m} \cdot \text{GeV}/c$)。データがこの関数で表せられることは AR-TB や ELPH ではクーロン散乱の影響が支配的であることを示すが、AR-TB のデータはフィット関数よりやや上振れしている。



	50um	30um	20um
Timing resolution	38.8ps	31.5ps	31.2ps
Jitter	9.8ps	11.8ps	15.9ps
Landau noise	37.5ps	29.2ps	26.8ps

図 25: (左) 時間分解能のバイアス電圧依存性を 3 種類のセンサー厚で測定した。白抜き: β 線による測定、*: 赤外レーザー、塗りつぶし: ランダウの効果を推定した値 (右) β 線による時間分解能が最小となる電圧での時間分解能、ジッター、ランダウによる寄与の各センサー厚での値。

5 GeV/c 電子で 3 μm 程度の再構成精度 (DUT 自体の不確かさを含む) は世界最高位置分解能である。

再構成の際のさまざまな要素を検証をしたが、AR-TB データがフィット関数より上振れしていることは説明ができない。例えば、各センサーの位置合わせ精度は 1 μm 以内であり、1 GeV/c での 11 μm の測定値に有意な影響を与えない。3 台目と 4 台目の間に 4 mm 厚のアルミを挿入し、散乱角を求めることで運動量を評価した。図は 4 GeV/c に対する GEANT4 シミュレーションと AR-TB データとの比較である。散乱角の標準偏差は 1.11 ± 0.01 mrad, 1.38 ± 0.03 mrad と有意な差がある。ELPH の 820 MeV/c 電子に対しては両者は一致しているため、AR-TB の運動量絶対値にずれがあるものと思われる。

[8] PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究

ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の観測は、ニュートリノのマヨラナ性や、物質の起源解明に関わる重要な研究である。もし発見されれば現在の宇宙が反物質でなく、物質で形成されている事実を理論的に説明することが出来る。また、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊率はニュートリノ有効質量二乗に比例するため、その半減期を測定すれば、素粒子標準理論の粒子で唯一未決定のニュートリノ質量も測定可能である。ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊 ($2\nu\beta\beta$) が究極のバックグラウンド (BG) となるが、それを防ぐためにはエネルギー分解能を高める必要がある。また、極稀な $0\nu\beta\beta$ を測定するためには、大量の標的核を必要とする。半導体を用いた実験なども存在するが、シンチレータを用いたシンプルな実験は大型化の際に有利である。二重ベータ崩壊は ^{48}Ca , ^{96}Zr , ^{160}Gd 等、十数種類の特定の原子核のみで観測可能である。我々は、 $\text{Ce}:\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}$ (以下、GAGG) という無機シンチレータを用いて、 ^{160}Gd の二重ベータ崩壊探索実験 (PIKACHU 実験) を計画している。 ^{160}Gd の二重ベータ崩壊探索では、2001 年にウクライナで GSO シンチレータを用いて行われた実験がこれまでの最高感度である。二重ベータ崩壊実験では大量の標的核を用いることが重要であるが、この実験で用いられた GSO に含まれる ^{160}Gd の量は 100g と少ないことで感度が制限されている。さらに内部の放射性不純物によるアルファ線がバックグラウンド

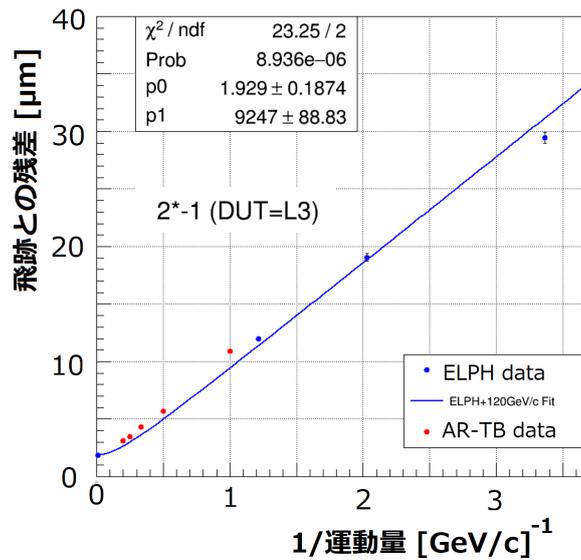


図 26: 2^*-1 法による再構成飛跡の残差分布の標準偏差を運動量逆数の関数で示した。曲線は ELPH と 120 GeV 陽子での測定値のフィット。

として多く存在し、それによって感度が制限されている。我々はこの二点を解決して、最高感度での ^{160}Gd 二重ベータ崩壊探索を目指している。

(1) 高純度 GAGG 結晶の開発

本研究では、ウラン・トリウム (U/Th) 系列の放射性不純物を極力含まない、高純度な GAGG 結晶の開発に取り組んだ。そのため結晶育成に際して、4 種類の結晶原料 (Gd_2O_3 , Ga_2O_3 , Al_2O_3 , CeO_2) に対して、高純度なものを検討した。原料に含まれる不純物濃度は、筑波大学アイソトープ動態研究センターおよび東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の所有するゲルマニウム (Ge) 半導体検出器を用いて測定した (図 28 左)。

Ge 検出器による測定の結果、 Ga_2O_3 と CeO_2 の二種類に関しては、現在用いている原料が十分に高純度であることが確認できたため、今後もそのまま用いることになった。 Al_2O_3 に関しては、現状のもの以外に 3 種類の異なる製品を取り寄せて、Ge 検出器でその純度を比較した。その結果、最も高純度なものは現状の Al_2O_3 に比べて一桁近く良い純度であることが判明し、今後はその原料を用いることを決定した。最も不純物を多く含んでいたのは Gd_2O_3 原料であった。そこで、日本イットリウム社と協力して、イオン交換樹脂により U/Th 不純物を選択的に取り除く作業を行った。 Gd_2O_3 と Al_2O_3 の原料に含まれる U/Th 系列の放射性不純物量について、現状のもの、新しく高純度にしたものの二種類を表 2 で比較する。とりわけ重要となる ^{238}U 系列の不純物量は、どちらも一桁以上の低減に成功したことが分かる。この高純度な原料と、共同研究を行っている東北大学金属材料研究所の炉 (図 28 右) を用いて、チョクラルスキー法によって 2 インチサイズ GAGG 単結晶の育成に成功した (図 29)。

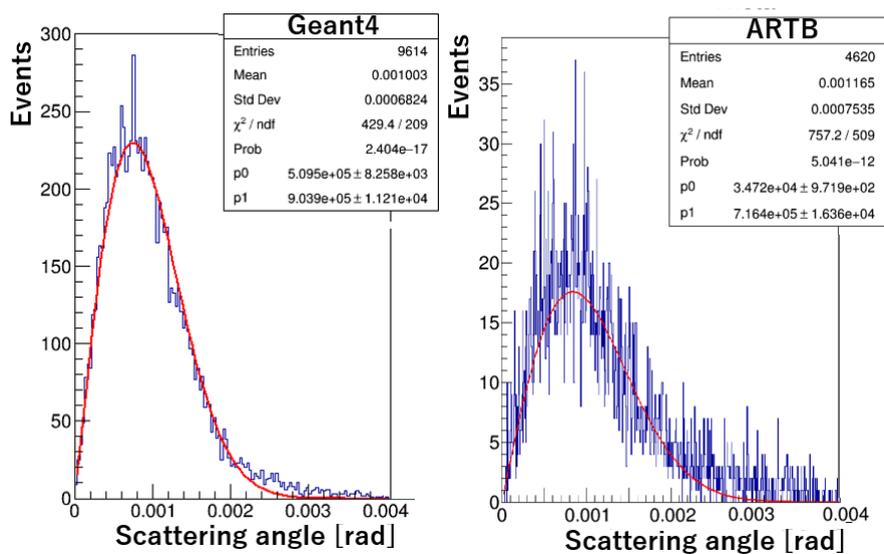


図 27: 4 mm 厚のアルミを挿入した場合の上流 2 台、下流 2 台それぞれの飛跡の散乱角分布を 4 GeV/c で評価。(左) GEANT4、(右) AR-TB。

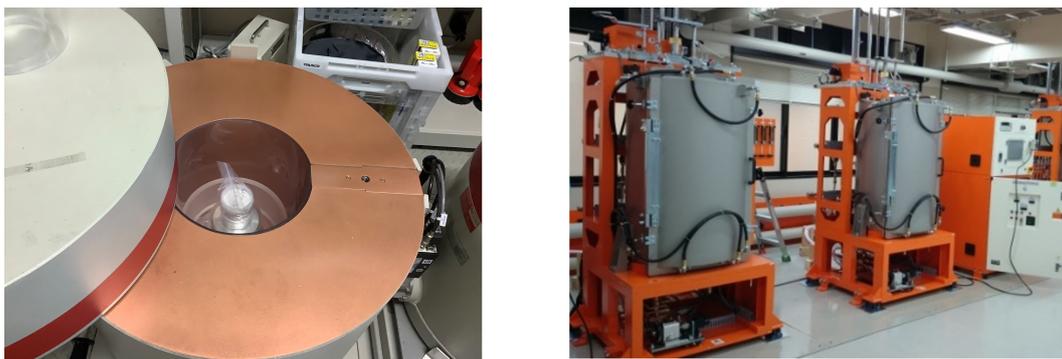


図 28: (左) Ge 検出器内に測定用結晶原料サンプルを設置したところ。(右) 東北大金研のチョコラルスキー単結晶育成装置。

(2) 高純度の GAGG 結晶の性能および BG 評価

製作した高純度 GAGG 結晶を切断加工したのち、テフロン反射材を巻き、アクリル製ライトガイド、光電子増倍管と組み合わせたモジュールを作製した。外部からアルファ線およびガンマ線の放射線源を照射し、シンチレータ性能（エネルギー分解能、波形弁別能）の評価を行った。さらに鉛シールド内に設置し、1 日程度の長時間測定を行い。その結果から U/Th 系列のアルファ線のレートを求めた。その結果を純化前の結晶と比較し、どれだけの高純度化を実現できたかを見積もった。

高純度 GAGG 結晶に ^{137}Cs の 662 keV の γ 線を照射した際のスペクトルを図 30 (左) に示す。光電ピークをガウシアンでフィットし、そのエネルギー分解能を求めた。その結果 $\Delta E/E = 3.7\%$ という値が得られた。これは先行研究の GSO 結晶でのエネルギー分解能よりも良い値である。次にアルファ線とガンマ線をそれぞれ照射したときの波形を 1000 事象程度平均したときの、粒子ごとの平均波形を図 30 (右) に示す。赤がガンマ線、黒がアルファ線である。このように粒子の種類によって大きく異なる波形をしており、極めて高い波形弁

表 2: 結晶原料に含まれる不純物量の新旧比較。単位は [mBq / kg]。

	Gd ₂ O ₃ (新)	Al ₂ O ₃ (新)	Gd ₂ O ₃ (旧)	Al ₂ O ₃ (旧)
²³⁸ U 系列	< 81.9	< 28.3	1750 ± 221	476 ± 44
²³⁵ U 系列	< 5.36	< 3.54	130 ± 40	< 13.0
²³² Th 系列	4.31 ± 2.04	5.85 ± 2.80	270 ± 12	16.0 ± 24.4
⁴⁰ K	20.9 ± 11.2	< 36.6	84.8 ± 28.7	< 96.5

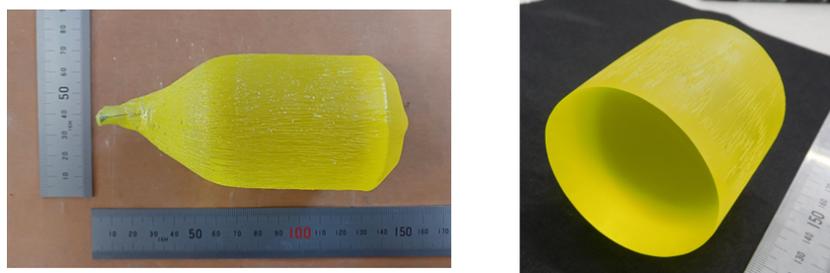


図 29: 育成した高純度 GAGG 結晶。右は結晶を切断および研磨した後。

別 (PSD) 能を持つことを確認した。

また、筑波大学の鉛シールドに設置し長時間取得したバックグラウンドデータから、PSD でアルファ線を抜き出したときのエネルギースペクトルを次ページの図 31 に示す。青が純化前の旧結晶、赤が高純度結晶のものである。横軸はガンマ線源でキャリブレーションしたエネルギー、縦軸は結晶の重量とデータ取得時間で規格化したものである。青の旧結晶に比べ、赤の新結晶ではアルファ線のレートが大きく低減していることが分かる。このエネルギー範囲でアルファ線の量を比較した結果、ほぼ一桁の低減が認められた。

以上のように、本研究では ¹⁶⁰Gd の二重ベータ崩壊の研究に向けた高純度 GAGG 結晶の開発に取り組んでいる。今年度は原料の純化などを行ったうえで、新たな高純度 GAGG 結晶の作製を行った。その結晶の性能やバックグラウンドの調査を行ったところ、優れたエネルギー分解能と、純度の一桁向上が確認された。今後は開発した高純度 GAGG 結晶の大型化、さらなる高純度化に取り組んでいく予定である。

〈 競争的資金 〉

1. 科学研究費 基盤研究 (B) 「超伝導体素子による極低閾値検出器開発と sub-GeV 領域暗黒物質探索への展開」 2020-2022 年度, 研究代表者: 武内勇司 5,070 千円 (直接経費: 3,900 千円、間接経費: 1,170 千円) (2022 年度) (2023 年度へ 1,900 千円を繰越)
2. 科学研究費 基盤研究 (B) 「高時間分解能を併せもつ高位置分解能 4 次元半導体検出器の実現」, 2019 - 2022 年度, 研究代表者: 原和彦, 3,120 千円 (直接経費 2,400 千円、間接経費 720 千円) (2022 年度)
3. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「PIKACHU 実験によるガドリニウ

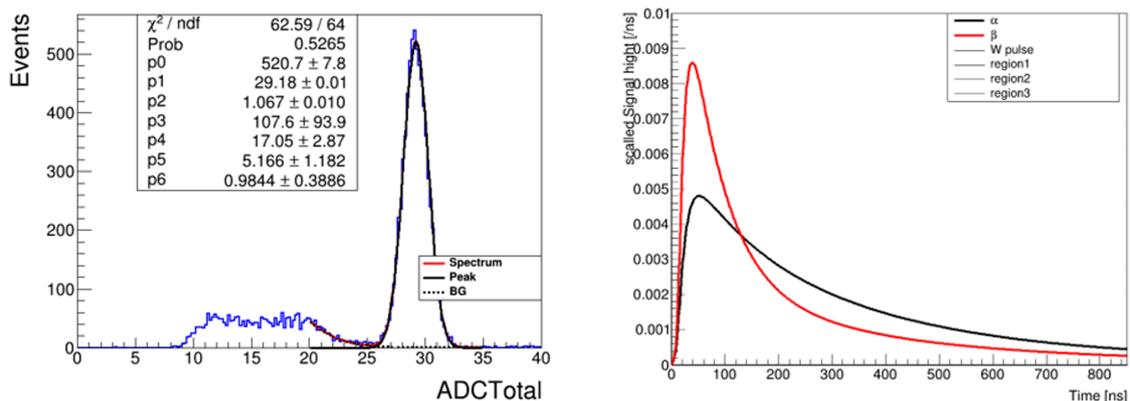


図 30: (左) 高純度結晶に ^{137}Cs 線源を照射したときのスペクトル。横軸は校正前の ADC カウント値。(右) アルファ線 (黒) とガンマ線 (赤) を照射した場合の平均波形。大きな違いが見て取れる。

ム 160 の二重ベータ崩壊の研究」, 2022 - 2023 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 3,250 千円 (直接経費: 2,500 千円、間接経費: 750 千円) (2022 年度)

4. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「異分野連携で挑む革新的水シンチレータの実現」, 2021 - 2022 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 1,170 千円 (直接経費: 900 千円、間接経費: 270 千円) (2022 年度)
5. 公益財団法人コニカミノルタ科学技術振興財団/コニカミノルタ画像科学奨励賞 「放射線粒子の色を見る! 革新的シンチレーション検出器の開発」, 2022 - 2024 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 500 千円 (直接経費: 500 千円、間接経費: 0 千円) (2022-2024 年度)
6. 公益財団法人旭硝子財団/物理・情報分野 研究奨励 「材料科学・機械学習との融合による新しいシンチレーション検出器と粒子識別手法の開拓」, 2022 - 2023 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 1,900 千円 (直接経費: 1,900 千円、間接経費: 0 千円) (2022-2023 年度)
7. 公益財団法人島津科学技術振興財団/研究開発助成 (領域全般) 「無機シンチレータでの発光波長と応答波形を用いた粒子識別技術の開拓」, 2021 - 2024 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 1,000 千円 (直接経費: 1,000 千円、間接経費: 0 千円) (2021-2024 年度)
8. 科学研究費 研究活動スタート支援 「高輝度 LHC における高精度ヒッグス粒子測定に向けたシリコン飛跡検出器開発」, 2020 - 2022 年度, 研究代表者: 廣瀬茂輝, 437 千円 (2022 年度, 繰越)

〈 受賞 〉

1. 飯田崇史 「放射線粒子の色を見る! 革新的シンチレーション検出器の開発」 コニカミノルタ画像科学奨励賞, 令和 4 年度

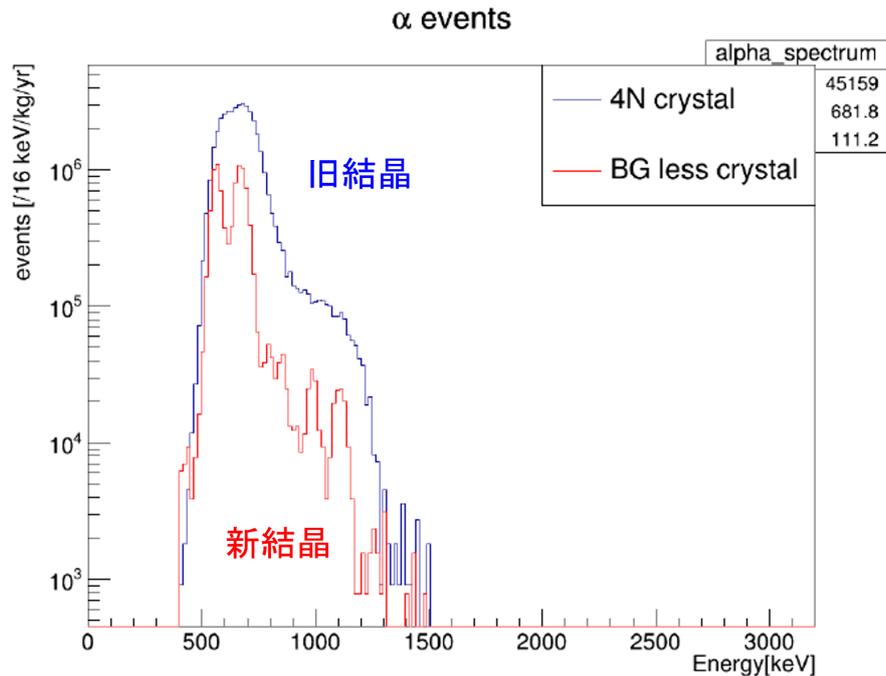


図 31: 環境放射線を防ぐ鉛シールド内で丸一日程度測定したバックグラウンドデータから、PSD でアルファ線を選び出したときのエネルギースペクトル。エネルギーはガンマ線で較正している。

2. 北彩友海, 日本物理学会学生優秀発表賞 (素粒子実験領域), 2022 年秋季大会

〈 国際会議の実施 〉

1. Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2022, Universe Evolution and Matter Origin, September 27, 2022, online.
2. The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), Local Organizing Committee Chair: Kazuhiko Hara, October 24–28, 2022, Tateyama, Japan.

〈 論文 〉

(査読論文)

1. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* (CDF Collaboration), “High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector,” *Science* **376**, 170 (2022).
2. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 087 (2022)
3. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for neutral long-lived particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS calorimeter,” JHEP **06**, 005 (2022)

4. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for events with a pair of displaced vertices from long-lived neutral particles decaying into hadronic jets in the ATLAS muon spectrometer in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV,” Phys. Rev. D **106**, 032005 (2022)
5. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of jet observables sensitive to b -quark fragmentation in $t\bar{t}$ events at the LHC with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **106**, 032008 (2022)
6. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of differential cross-sections in top-quark pair events with a high transverse momentum top quark and limits on beyond the Standard Model contributions to top-quark pair production with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JHEP **06**, 063 (2022)
7. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the polarisation of single top quarks and antiquarks produced in the t-channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV and bounds on the tWb dipole operator from the ATLAS experiment,” JHEP **11**, 040 (2022)
8. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for invisible Higgs-boson decays in events with vector-boson fusion signatures using 139 fb^{-1} of proton-proton data recorded by the ATLAS experiment,” JHEP **08**, 104 (2022)
9. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant pair production of Higgs bosons in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **105**, 092002 (2022)
10. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for type-III seesaw heavy leptons in leptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **82**, 988 (2022)
11. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Two-particle Bose–Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV measured with the ATLAS detector at the LHC,” Eur. Phys. J. C **82**, 608 (2022)
12. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the Higgs boson inclusive and differential fiducial cross-sections in the diphoton decay channel with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **08**, 027 (2022)

13. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of WWW Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **129**, 061803 (2022)
14. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Direct constraint on the Higgs-charm coupling from a search for Higgs boson decays into charm quarks with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 717 (2022)
15. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Higgs boson production cross-sections in the $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 175 (2022)
16. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of a vectorlike T quark decaying into a Higgs boson and top quark with fully hadronic final states using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **105**, 092012 (2022)
17. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature using 136 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 606 (2022)
18. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the two bottom quarks plus two photons final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **106**, 052001 (2022)
19. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the parton distribution functions of the proton using diverse ATLAS data from pp collisions at $\sqrt{s} = 7, 8$ and 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 438 (2022)
20. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Modelling and computational improvements to the simulation of single vector-boson plus jet processes for the ATLAS experiment,” *JHEP* **08**, 089 (2022)
21. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for an unexpected asymmetry in the production of $e^+ \mu^-$ and $e^- \mu^+$ pairs in proton–proton collisions recorded by the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **830**, 137106 (2022)
22. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral-current interactions of a top quark and a gluon in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 334 (2022)

23. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for associated production of a Z boson with an invisibly decaying Higgs boson or dark matter candidates at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **829**, 137066 (2022)
24. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on Higgs boson production with large transverse momentum using $H \rightarrow b\bar{b}$ decays in the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **105**, 092003 (2022)
25. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of azimuthal anisotropies of jet production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **105**, 064903 (2022)
26. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of Higgs boson decay into b -quarks in associated production with a top-quark pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 097 (2022)
27. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs bosons decaying into new spin-0 or spin-1 particles in four-lepton final states with the ATLAS detector with 139 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **03**, 041 (2022)
28. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the energy asymmetry in $t\bar{t}j$ production at 13 TeV with the ATLAS experiment and interpretation in the SMEFT framework,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 374 (2022)
29. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into a pair of pseudoscalar particles in the $b\bar{b}\mu\mu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **105**, 012006 (2022)
30. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on Higgs boson properties using $WW^*(\rightarrow e\nu\mu\nu)jj$ production in 36.1 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 622 (2022)
31. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the c -jet mistagging efficiency in $t\bar{t}$ events using pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 95 (2022)
32. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for exotic decays of the Higgs boson into $b\bar{b}$ and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 063 (2022)

33. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker in LHC Run 2,” *JINST* **17**, P01013 (2022)
34. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “AtlFast3: the next generation of fast simulation in ATLAS,” *Comput. Softw. Big Sci.* **6**, 7 (2022)
35. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak production of two jets in association with an isolated photon and missing transverse momentum, and search for a Higgs boson decaying into invisible particles at 13 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 105 (2022)
36. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the nuclear modification factor for muons from charm and bottom hadrons in Pb+Pb collisions at 5.02 TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **829**, 137077 (2022)
37. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy particles in the b -tagged dijet mass distribution with additional b -tagged jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **105**, 012001 (2022)
38. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the energy response of the ATLAS calorimeter to charged pions from $W^\pm \rightarrow \tau^\pm(\rightarrow \pi^\pm\nu_\tau)\nu_\tau$ events in Run 2 data,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 223 (2022)
39. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The ATLAS inner detector trigger performance in pp collisions at 13 TeV during LHC Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 206 (2022)
40. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in three- or four-lepton events in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **824**, 136832 (2022)
41. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavor-violation in Z -boson decays with τ -leptons with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 271801 (2022)
42. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Level-1 topological trigger in Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 7 (2022)
43. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Emulating the impact of additional proton–proton interactions in the ATLAS simulation by presampling sets of inelastic Monte Carlo events,” *Comput. Softw. Big Sci.* **6**, 3 (2022)

44. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single top-quark production via flavour-changing neutral currents at 8 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 55 (2016) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **82**, 70 (2022)]
45. P. Allport, K. Hara, S. Hirose, T. Ishii, K. Saito *et al.*, “Pre-production results from ATLAS ITk Strip Sensors Quality Assurance Testchip”, *JINST* **17**, C11002 (2022).
46. D. Rousso, K. Hara, S. Hirose, T. Ishii, K. Saito *et al.*, “Test and extraction methods for the QC parameters of silicon strip sensors for ATLAS upgrade tracker”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1045**, 167608 (2023).
47. Y. Unno, K. Hara, S. Hirose *et al.*, “Specifications and pre-production of n⁺-in-p large-format strip sensors fabricated in 6-inch silicon wafers, ATLAS18, for the Inner Tracker of the ATLAS Detector for High-Luminosity Large Hadron Collider”, *JINST* **18**, T03008 (2023).
48. S. Kita, I. Goya, K. Hara *et al.*, “Optimization of capacitively coupled Low Gain Avalanche Diode (AC-LGAD) sensors for precise time and spatial resolution”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1048**, 168009 (2023).
49. R. Heller, I. Goya, K. Hara, S. Kita *et al.*, “Characterization of BNL and HPK AC-LGAD sensors with a 120 GeV proton beam”, *JINST* **17** (2022) P05001.
50. O. Jennifer, I. Goya, K. Hara, S. Kita *et al.*, “Investigation of signal characteristics and charge sharing in AC-LGADs with laser and test beam measurements”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1045**, 167541 (2023).
51. T. Iida *et al.*, “Gamma and neutron separation using emission wavelengths in Eu:LiCaI scintillators”,
Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2023, Issue 2, February 2023, 023H01
52. S. Umehara, T. Iida *et al.*, “Status of 48 Ca double beta decay search with CANDLES”,
PoS (PANIC2021)/(380), May, 2022
53. M. Yoshino, T. Iida *et al.*, “Comparative pulse shape discrimination study for Ca(Br, I) scintillators using machine learning and conventional methods”,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 1045, (2023), 167626
54. 伏見賢一, 飯田崇史, *et al.*, “高純度ヨウ化ナトリウムの結晶育成”,
日本結晶成長学会誌/49(4)/pp.26-34, 2023年1月

(査読なし論文, 解説記事等)

1. 受川史彦, 「CDF 実験による W ボソン質量の測定」, *高エネルギーニューズ* **41**, 54 (2022).

2. 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 吉田拓生, 他 COBAND collaboration, “宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験”, 観測ロケットシンポジウム 2021 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2020 SA6000162000, II-4 (2022)

〈学会・研究会発表〉

(国内)

1. 金 信弘：COBAND 実験のための反射防止膜の開発,
宇宙史研究センター 2022 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2022 年 6 月 24 日), 筑波大学 (ハイブリッド開催)
2. 原和彦：時間分解能にも優れた高位置分解能 半導体飛跡検出器 AC-LGAD の開発 — 4 D 飛跡検出器, 第 1 回 TIA 光・量子計測 MG 研究会 (招待講演) (2022 年 9 月 1 日), KEK
3. 守屋佑希久：COBAND 実験のための極低温増幅器の研究開発,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大学
4. 柏木隆城：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索のためのサブミリサイズ遠赤外集光器と反射防止膜の開発,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大学
5. 比江森友太：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの試作量産品における放射線耐性評価,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大学
6. 柳瀬健太郎：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの放射線耐性評価のための冷却システムの開発とその自動制御方法の確立,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大学
7. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産時品質保証に向けた 3 次元測定システムの開発と測定精度の検証,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大学
8. 石井達也：高輝度 LHC ATLAS 実験シリコンストリップセンサーの実機量産中の品質評価,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大学
9. 北彩友海：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の電極細密化に関する研究,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大学
10. 飯田崇史：PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究 2—高純度結晶の開発—,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大学
11. 原和彦：CDF での W ボゾン質量の精密測定, 基研研究会 素粒子物理学の進展 2022 (2022 年 8 月 29 日-9 月 2 日), 京都大学

12. 飯田崇史, 「シンチレータを用いた素粒子実験と機械学習の融合」,
計算・材料・物理による融合領域創成のための研究会, 2022年9月7-8日 岡山市第一セントラルビル2号館セントラルフォレスト
13. 飯田崇史, 「新しいシンチレータを創ろう!」,
新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」公募研究セミナー. 2022年10月5日
オンライン
14. 廣瀬茂輝: ATLAS 実験シリコンストリップ検出器 Run 2 運転までのまとめと Run 3
運転の状況, OpenIt 計測システム研究会 2022(2022年11月16-17日), KEK 東海キャンパス
15. 飯田崇史, 「PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の探索」,
第8回極低放射能技術 研究会, 2022年11月24日 つくば国際会議場 中会議室 202
16. 原 和彦: Vertex2022 を終えて, 宇宙史研究センター 2022 年度第2回構成員会議・成果報告&交流会 (2022年11月28日), 筑波大学 (ハイブリッド開催)
17. 佐藤構二: ATLAS 実験の最近の物理成果,
宇宙史研究センター 2022 年度第2回構成員会議・成果報告&交流会 (2022年11月28日), オンライン開催
18. 飯田崇史, 「(Poster) Eu:LiCaI シンチレータの発光波長情報を用いた粒子識別」,
Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2022), 2022年12月17~19日 徳島大学
19. 大森匠, 「(Poster) PIKACHU 実験における GAGG シンチレータの性能評価」,
Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2022), 2022年12月17~19日 徳島大学
20. 高橋光太郎, 「(Poster) Geant4 による PIKACHU 実験用 GFAG シンチレータのバックグラウンド事象の評価」,
Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2022), 2022年12月17~19日 徳島大学
21. 鈴木尚紀, 原和彦: SOI ピクセル検出器高精度テレスコープシステム ELPH 820MeV/c
陽電子ビームテストによる性能評価,
AR テストビームライン研究会, 2022年1月13日, KEK.
22. 柏木隆城: ニュートリノの崩壊探索のための反射防止膜の開発,
SAT テクノロジー・ショーケース 2023(2023年1月26日), つくば国際会議場
23. 守屋佑希久: ニュートリノ崩壊探索のための超伝導素子読み出し極低温増幅器の開発,
SAT テクノロジー・ショーケース 2023(2023年1月26日), つくば国際会議場
24. 金 信弘: 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験,
第5回観測ロケットシンポジウム (2023年2月28日-3月1日), JAXA/ISAS, オンライン開催

25. 守屋佑希久：COBAND 実験に向けた高利得広帯域な極低温電荷・電流増幅器の性能評価,
宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ素粒子部門 (2023 年 3 月 16 日), オンライン開催
26. 柏木隆城：COBAND 実験における反射防止膜の開発,
宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ素粒子部門 (2023 年 3 月 16 日), オンライン開催
27. 武内勇司：系外銀河による宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索感度への影響, 宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ素粒子部門 (2023 年 3 月 16 日), オンライン開催
28. 大森匠：Performance evaluation of telescope system with SOI pixel sensors by 1-5 GeV/c electron beam, 宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ光量子部門 (2023 年 3 月 17 日), 筑波大学
29. 北彩友海：Recent results of timing resolution and radiation tolerance of finely segmented LGAD sensor (AC-LGAD), 宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ光量子部門 (2023 年 3 月 17 日), 筑波大学
30. 鈴木尚紀：Impact of radiation damage on SCT during Run3 operation estimated with TCAD simulation, 宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ光量子部門 (2023 年 3 月 17 日), 筑波大学
31. 廣瀬茂輝：Progress on production of silicon strip sensors for HL-LHC ATLAS ITk, 宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ光量子部門 (2023 年 3 月 17 日), 筑波大学
Preparation of pixel module production for the HL-LHC ATLAS ITk, 宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ光量子部門 (2023 年 3 月 17 日), 筑波大学
32. 飯坂俊介：HL-LHC ATLAS 実験に用いるピクセルセンサーの量産に向けた放射線照射前後での性能評価,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
33. 熊倉泰成：HL-LHC ATLAS 実験に向けたピクセルモジュールの信号遅延時間の測定およびそれを考慮した閾値の測定手法の確立,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
34. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュールの形状測定の精度と試験量製品の品質評価,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
35. 鈴木尚紀：LHC-ATLAS 実験におけるシリコンストリップ検出器の TCAD シミュレーションによる放射線損傷の見積もり,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
36. 比江森友太：ワイヤ保護機構を搭載した HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの熱サイクル耐性評価,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催

37. 柏木隆城：COBAND 実験のためのサブミリサイズ遠赤外集光器と反射防止膜の性能評価，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
38. 守屋佑希久：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XV，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
39. 北彩友海：新型 LGAD 飛跡検出器 (AC-LGAD) の電極細密化と時間分解能の研究，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
40. 今村友香：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の放射線耐性の研究，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
41. 大森匠：電荷積分型 SOI ピクセル検出器 INTPIX4NA を用いたテレスコープシステムの 1-5GeV 電子ビームによる性能評価，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
42. 飯田崇史：PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究 3—高純度結晶開発の現状—，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催
43. 高橋光太郎：PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究 4—結晶内バックグラウンドの評価—，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン開催

(国際会議・研究会)

1. Kazuhiko Hara, “Welcome to Vertex2022”, The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), 24-28 Oct. 2022, Tateyama, Japan.
2. Shigeki Hirose, “ATLAS ITk strip sensor quality assurance tests and results of ATLAS18 pre-production sensors”, The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), 24-28 Oct. 2022, Tateyama, Japan.
3. Sayuka Kita (K. Hara), “Development of AC-LGAD detector with finer pitch electrodes for high energy physics experiment”, The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), 24-28 Oct. 2022, Tateyama, Japan.
4. Kazuhiko Hara, “Summary Talk”, The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), 24-28 Oct. 2022, Tateyama, Japan.
5. Takashi Iida, “Review of Neutrino-less double beta decay experiment”, Vietnam School on Neutrinos (VSON2022), July 10 – 22, 2022, ICISE center, Quy Nhon, Vietnam (Hybrid) (招待講演)
6. Takashi Iida, “Study of Gd-160 double beta decay by PIKACHU experiment”, Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2022), June 13 – 15, 2022, Tokyo Univ. of Science (ポスター)

7. Kazuhiko Hara, “Improvement of timing resolution and radiation tolerance for finely segmented AC-LGAD sensors”, 19th “Trento” workshop on advanced silicon radiation detectors (TRED2023), Feb. 28 – Mar. 2, 2023.

〈 学位論文 〉

(修士論文)

大学院 理工情報生命学術院 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム, 2023年2月

1. 飯坂 俊介 : HL-LHC ATLAS 実験に用いるピクセルセンサーの量産時品質保証システムの構築と試作量産品の性能評価
2. 石井 達也 : HL-LHC ATLAS 実験用ストリップ型半導体センサーの量産品性能評価と測定の効率化
3. 柏木 隆城 : COBAND 実験のための反射防止膜とサブミリサイズ遠赤外集光器の開発
4. 北 彩友海 : 高位置・高時間分解能を併せ持つ半導体飛跡検出器 AC-LGAD の電極細密化に向けた研究開発
5. 熊倉 泰成 : HL-LHC ATLAS 実験 内部飛跡検出器用ピクセルモジュールの信号閾値の測定手法確立
6. 守屋 佑希久 : COBAND 実験に向けた高利得広帯域な極低温電荷・電流増幅器の性能評価

〈 構成員の異動 〉

原和彦准教授が, 2023年3月末をもって定年退職した。