

東京大学 素粒子物理国際研究センター



INTERNATIONAL CENTER FOR
ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS,
THE UNIVERSITY OF TOKYO

2021 大学院進学案内



物理学を切り拓く、若き力



素粒子物理学を
志す君たちへ

東京大学素粒子物理国際研究センター長

浅井祥仁
SHOJI ASAI

本センターは、世界最先端の素粒子物理学実験を行なうための研究施設です。1974年の創設以来、日本の中核をなす研究拠点として国際共同研究に力を入れ、2つの軸で素粒子物理学の研究と教育を進めています。

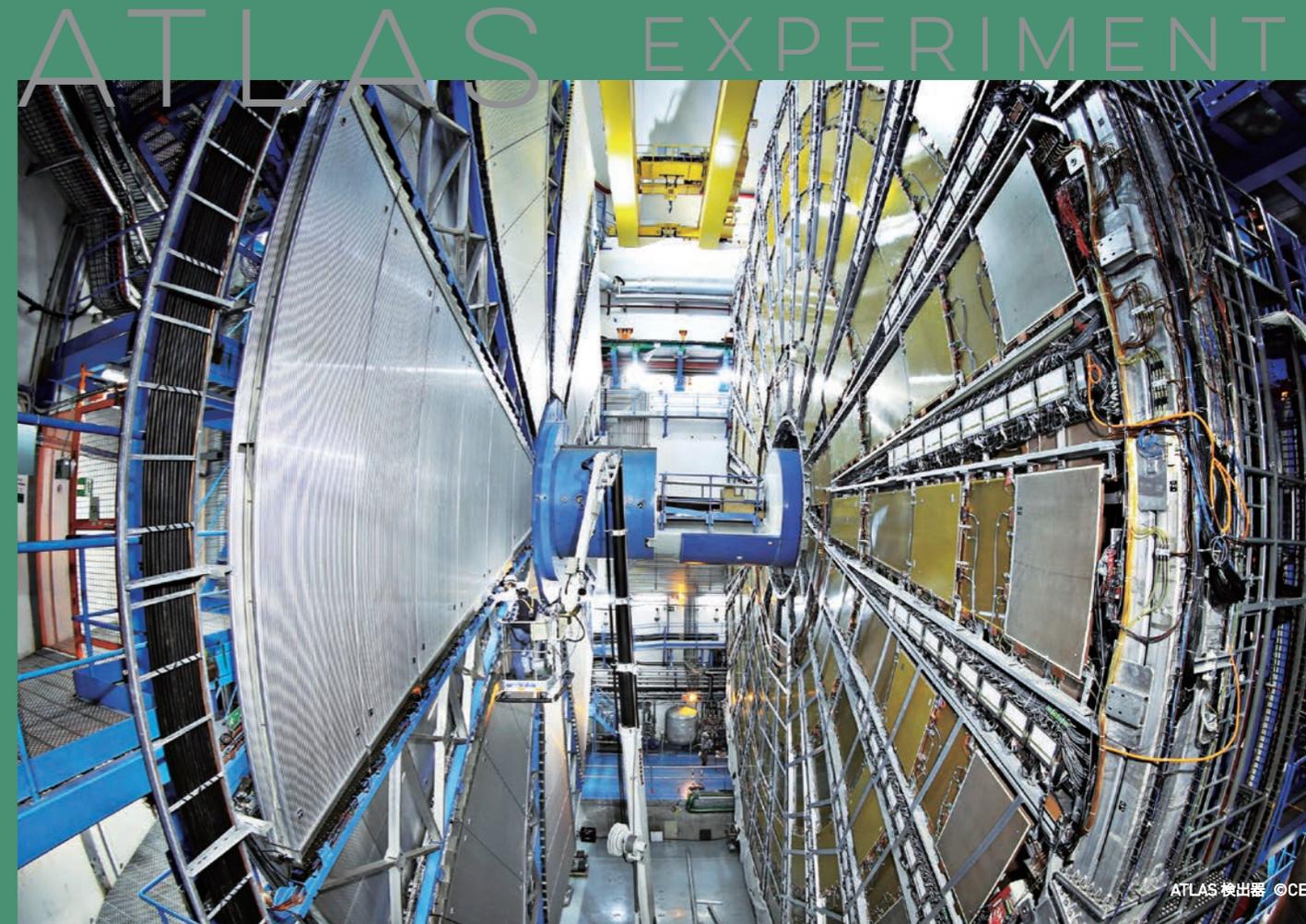
ひとつの軸は、「エネルギーフロンティア」と呼ばれる大型・高エネルギー実験施設での国際共同研究に、日本人研究者が主導権を持って参加することです。2012年7月の、CERNのLHC-ATLAS実験でのヒッグス粒子発見は、その最大の成果です。「エネルギーフロンティア」をさらに切り拓くと期待されるILC計画にも、世界を主導する立場で取り組んでいます。

もうひとつの軸は、独自の知見と斬新な発想で研究分野そのものを開拓し、本質的な物理に特化した実験を行なうアプローチです。この系譜に連なるPSIでのMEG実験からは、多くの研究者が育

ち、世界を舞台に活躍を見せています。

長期・大型の実験プロジェクトが多い素粒子物理の分野では、育成現場にも多様なビジョンが求められます。世界一流の研究者と対等に渡り合える人材や、デジタル革新で新しい価値を生み出せる人材を輩出するのも本センターの重要な目標です。学生たちが海外の実験で各国の研究者と切磋琢磨して実践的な力を養う場や、量子ネイティブ育成の場を設けています。包括的な視野を持った研究者やリーダーを育てるため、大学院修士課程以降の学生を受け入れ、指導にあたります。

素粒子物理学の研究は、世界が舞台です。各国の研究者たちとときには競争し、ときには手を取り合いながら、研究力とともに人間力を磨く「最高の学び場」が、ここにはあります。日本の、そして世界の素粒子物理学の次代を担う気概を持った君たちの、果敢な挑戦を心待ちにしています。



ATLAS 検出器 ©CERN

素粒子物理学の次なる次元へ

素 粒子物理学の「エネルギーフロンティア」の最前線、宇宙の起源と自然界の基本法則の解明を目指す。それがATLAS実験の目的だ。ヒッグス粒子発見に大きく貢献した。

舞台はスイスのCERN（欧州合同原子核研究機構）。世界の素粒子物理学研究者の半数以上（約1万人）が集結する、紛れもない世界最高水準の研究拠点だ。そのCERNが誇る世界最高エネルギーの加速器LHC（大型ハドロン衝突型加速器）を用い、宇宙と物質の原初の姿に迫る。

2013年2月に第1期実験を終え、2015年6月から第2期実験を実施。現在はLHCの運転を止め、エネルギーをさらに増強する第3期実験の準備が進む。その先には、粒子の衝突頻度を高める「高輝度LHC（HL-LHC）」の計画も進行中だ。ここで、LHCの当初デザイン値の数倍に及ぶ高感度測定が可能になる予定だ。

本センターは1980年代からCERNの国際共同実験に参加し続け、今も研究者や学生をCERNに派遣している。

研究室 〈理学系研究科〉
浅井祥仁 教授

CERNのLHCでは、2015年から2018年末にかけて第2期運転が行なわれました。ATLAS実験で、2018年に過去最高の積分ミノシティに到達したのは想像以上の成果です。2022年には第3期運転が、2027年には高輝度LHC (HL-LHC) が計画され、ハード・ソフトの両面で準備が進んでいます。

ATLAS日本グループでは、2015年にグループの共同代表に就任しました。日本陣営がヒッグス粒子発見に継ぎ貢献を

果たせるよう、国際的な激しい競争の中で研究をリードしていきます。

LHCの実験データは今後10年で飛躍的に増大し、現在の100倍の計算機資源が必要になります。新しい計算機モデルを確立するため、機械学習や量子コンピュータを素粒子研究に応用する開発プロジェクトにも力を入れています。

素粒子現象の背景に潜む「真空・時空」の解明に向け、新しいパラダイムを切り拓く先端的な研究を推進していきます。



真下哲郎 准教授

LHCの世界最高エネルギーでの実験は、データの収集や解析にチャレンジングな技術が求められます。ATLAS実験で得られるデータ量は、高い衝突エネルギーと頻度により未曾有の規模に及び、単一の計算機システムが処理可能な水準を大幅に超えています。

そのため、世界150以上の研究機関のシステムを広域ネットワークで接続し、ミドルウェアと呼ばれる共通のソフトウェアを導入して、あたかも単一の計算機

システムのように扱える計算グリッド技術が導入されています。CERNの計算機センターを頂点 (Tier 0) に、階層構造で配備されたシステムは「WLCG (世界LHC計算グリッド)」と呼ばれ、世界初の実用レベルで配備されたグリッド技術です。日本では、2007年1月に本センターで稼働開始した「ATLAS地域解析センター計算機システム」(Tier 2) がその役割を担い、国内外の研究者コミュニティに計算機資源を提供しています。



研究室 石野雅也 教授

世界最高エネルギーの粒子加速器LHCを使って人工的に再現した宇宙初期の様子を観察しています。その成果として、新たな物理法則や新粒子を発見することを追い求めています。新発見には、「世界最高の実験装置」、「優れたアイデア」、「幸運」の3点セットが必要です。

LHCを使うことで1つ目の条件は自動的にクリア、しかも圧倒的な世界一。

検出器の信号を高速処理する最先端エレクトロニクスの応用研究を通じて、新

しい物理を捉えるためのアイデアを実現し、継続的に改良を重ねながら実験データを集めることで、2つ目の条件をクリアしようとしています。

そして、この最高の研究環境に世界最優秀の若者が集い、議論・競争・協力しながら一緒に新しいことを知ろうとしています。日々のクリエイティブな雰囲気は最高です。「幸運」はきっとこんなところに訪れると信じています。

一緒にLHC実験をやきましょう！



研究室 奥村恭幸 准教授

全く新しい自然法則の証拠を素粒子実験データから見つけるべく、ATLAS実験に参加し、国際協力・国際競争の中で研究を展開しています。

実験データを用い、素粒子の相互作用に関する考察から、時空構造・真空構造・対称性を切り口に新しい自然観の確立を目指します。実験装置の運転・開発も、実験の専門家として必要不可欠な技能です。現行システムの大規模装置の運用と、将来の実験基盤技術の開拓を、同

時に最前線で進める層が厚くかつ機動的なチームで研究を進めています。最先端の装置開発、実験データ収集から物理データ解析までを通じ、総合的な研究力を持つ人材の育成を目指します。

研究は日進月歩。日々生じる問題と向き合い、実験チームで知恵を絞ってアイデアを出し、限られた時間内に解決する。小さくとも確実な一歩を、スピード感を持って進めていく。そんな研究をCERNの実験現場で目一杯楽しみましょう。



研究室 田中純一 教授

ATLAS実験に参加し、新物理を探索しています。研究テーマは大きく3つです。

まずデータ解析です。標準理論を超えた物理の直接的な手掛かりを求め、2つ目のヒッグス粒子や超対称性粒子の探索など、新しいアイデアで取り組んでいます。

検出器のアップグレードに向けた研究開発も大きなテーマです。現在、液体アルゴン電磁カロリメータのトリガー読み出しのコミッションング、エネルギー計算のためのFPGAファームウェアの開発

などを行なっています。2022年以降は新しいテーマにも挑みます。

コンピュータ科学も、物理解析で重要なテーマです。2027年度からの高輝度LHCや将来の大規模実験では、解析データ量が膨大に増えます。そうした事態に備え、人工知能や量子コンピューティング、クラウドコンピューティングなど、最先端のコンピューティング技術の研究開発も進めています。柔軟な発想による新しいアイデアが必要な研究分野です。



研究室 澤田 龍 准教授

CERNのATLAS実験で、新粒子、特に超対称性理論から予想される暗黒物質候補の発見を目指しています。また、ATLAS地域解析センター計算機システムの運用に加え、高輝度LHCへ向けた計算機利用能力向上の研究も行なっています。

新粒子探索では、新粒子の寿命が長くなるようなモデルに着目しています。また、機械学習や量子コンピュータを素粒子物理学に応用することに力を入れています。機械学習を用いたソフトウェアに

よるトリガーを開発し、新粒子の探索能力を向上させることを狙っています。さらに、素粒子研究に応用できる量子アルゴリズムの研究と、それを実際に量子コンピュータで実行するための計算技術開発も行なっています。

こうした革新的な研究を進めるには、創意工夫と最新のデータ解析手法の融合が欠かせません。最先端のコンピューティング技術を習得・応用し、新物理を発見する意欲のある方の挑戦を応援します。



研究室

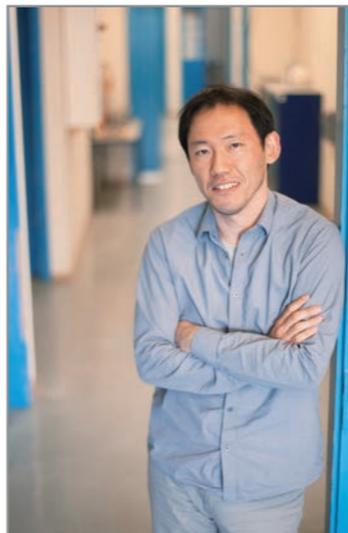
寺師弘二 准教授

ATLAS実験に参加し、超対称性粒子や余剰次元の探索など物理解析を主導してきました。2027年に開始されるHL-LHCでは、現在のデータ量の数十倍に匹敵するデータを取得し、予想もしていない大発見が起こるかもしれません。その発見を確実にするには、新しいコンピューティングパラダイムが必要です。

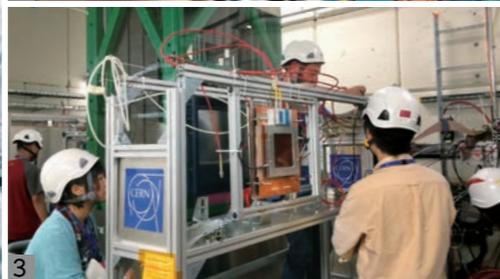
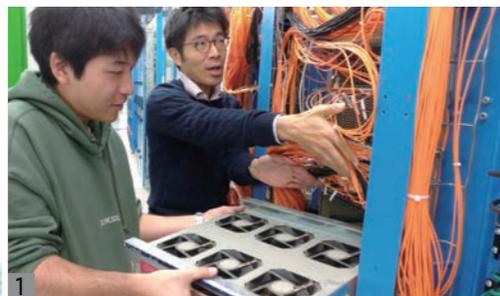
そのために、量子コンピュータを応用した量子機械学習や量子シミュレーションの研究に取り組んでいます。また、量

子センシングによる精密測定によって、電弱スケールを超えるエネルギー領域を探索することも視野に入れています。量子コンピュータの基礎科学への応用と社会実装の実現を目指します。

量子コンピュータを含む量子情報処理技術の進展は目覚ましいですが、私たちはこの技術が切り拓く世界の入り口に立っているに過ぎません。この未踏の世界に飛び込んで、新しい研究領域を開拓しようと思う方の挑戦を待っています。



1 第3期実験で新たに導入するミュオントリガーシステムの、制御用ソフトウェア開発の準備。ミュオンに崩壊する新粒子を確実にキャッチする。2 ミュオンを検出するマイクロメガス検出器の表面抵抗検査の様子。3 CERNで行なわれた試作チェンバーの放射線耐性テスト。4 LHCの運転停止期間中、ATLAS検出器の中心部にアクセスするために、ミュオン検出器を地下約100mから地上につり上げようとしている。



江成祐二 助教

CERN

素粒子の質量起源について考察を深める。ヒッグスと第三世代のボトム、トップクォークとの結合定数の精密測定などを行なう。液体アルゴン電磁カロリメータの改良や、将来を見据えた検出器の開発にも取り組む。



増淵達也 助教

CERN

ヒッグスがWボソン対に崩壊するモードを解析、ヒッグス粒子発見に貢献。ヒッグスのボトムクォークへの崩壊モード発見にも大きく貢献した。ヒッグス粒子の精密測定を進める。ミュオン検出器の改良も行なう。



齋藤智之 助教

CERN

超対称性粒子や暗黒物質の発見により、素粒子物理学の新たな展開や宇宙創成の謎の解明を目指す。より高いエネルギースケールの物理を探索するため、検出器やトリガーエレクトロニクスアップグレードに取り組む。



飯山悠太郎 助教

量子コンピュータや機械学習を素粒子物理学に応用する手法を模索する。また、高輝度LHCによりATLAS実験で処理するデータ量の大幅な増加に備え、計算機システムの改良や新たなデータ解析手法の開発に取り組む。



岸本 巴 特任助教

生成される大量のデータを扱うため、世界規模の計算処理とデータ保持・利用を目的としたグリッド計算機システムの構築と運転を行なう。データ量の大幅な増加に備え、機械学習の研究にも取り組む。



野辺拓也 特任助教

CERN

余剰次元など標準理論の枠組みを超えた新物理の探索と、ボソン対終状態を用いたヒッグス機構の検証を行なう。データ取得のためのオンライントリガーシステムを運用。ATLAS実験内の解析サブグループを主導した。



齋藤真彦 特任助教

機械学習や量子コンピュータなど、新たな技術を応用することにより、ATLAS実験における新物理現象の発見能力拡大を目指す。大規模データを処理するため、グリッドシステムの運用・改良にも取り組む。



森永真央 特任助教

予測していない新物理現象の発見を補助するような新しいタイプの人工知能や機械学習アルゴリズムを開発する。飛跡検出器の運用や超対称性理論から予測される暗黒物質候補の探索も行なう。



永野廉人 特任研究員

量子コンピュータを用いた場の量子論、多体量子系のシミュレーションを目指し、手法の提案や改良、解析する物理量の提案などを行なう。また、計算資源やエラーの見積もりも行ない、それらの削減方法も研究する。



手厚い教育環境で、大きな成長を実感

— どんな研究をされていますか。

CERNのLHC-ATLAS実験に参加し、2027年から開始予定の「高輝度LHC」に向けた実験装置開発に携わっています。2021年1月時点で、CERNのLHCでは第3期実験（2022年開始予定）の準備が進んでおり、高輝度LHCはその先の第4期実験となります。高輝度LHCでは、現行LHCの設計値に対して5倍の輝度（ビーム中の粒子同士が衝突する頻度を表す値）を実現、標準理論を超える新物理が予言する新粒子を探索します。

高輝度LHCの運転開始に合わせて、ATLAS検出器は大部分を一新するアップグレードを行ないます。ATLAS検出器の一部であり、ミューオンを検出するTGC (Thin Gap Chamber) 検出器でも、そのエレクトロニクスシステムを一新します。私はTGCフロントエンドエレクトロニクスの制御システムの開発に取り組んでいます。

LHCでは陽子同士を衝突させ、そこで生成された新粒子の崩壊によって生じるミューオンなどの粒子を検出することで、未知の粒子を探します。高輝度LHC-ATLAS実験では、TGCによって生成されるすべての信号が、FPGAという特殊な集積回路を新しく搭載した読み出しボードを経て、ATLASが設置されている実験室から60m以上離れた回路室に送られます。そこで、その衝

ATLAS 実験 (石野研究室)
博士課程1年

田中 碧人
AOTO TANAKA

突事象を記録するかどうかの「トリガー判定」が行なわれる仕組みです。

FPGAは、ユーザーによる内部のデジタル回路の書き換えが可能な集積回路です。一般的な書き換え作業やその後の試験は、ユーザーがFPGAの近くにパソコンを持って行き、短いケーブルを接続して行ないますが、読み出しボードのFPGAは物理的に近くまで立ち入れない位置に設置されています。そのため、遠隔で研究が行なえる制御システムが必要になります。これを実現するため、私はTGCの外周部に設置する新たな制御回路 (JATHub) を開発し、遠隔でFPGAを書き換えることに成功しました。この制御技術を用いればCERNにあるエレクトロニクスを、日本からでも使えるようになります。

— ICEPP (本センターの略称) に進学された理由は？

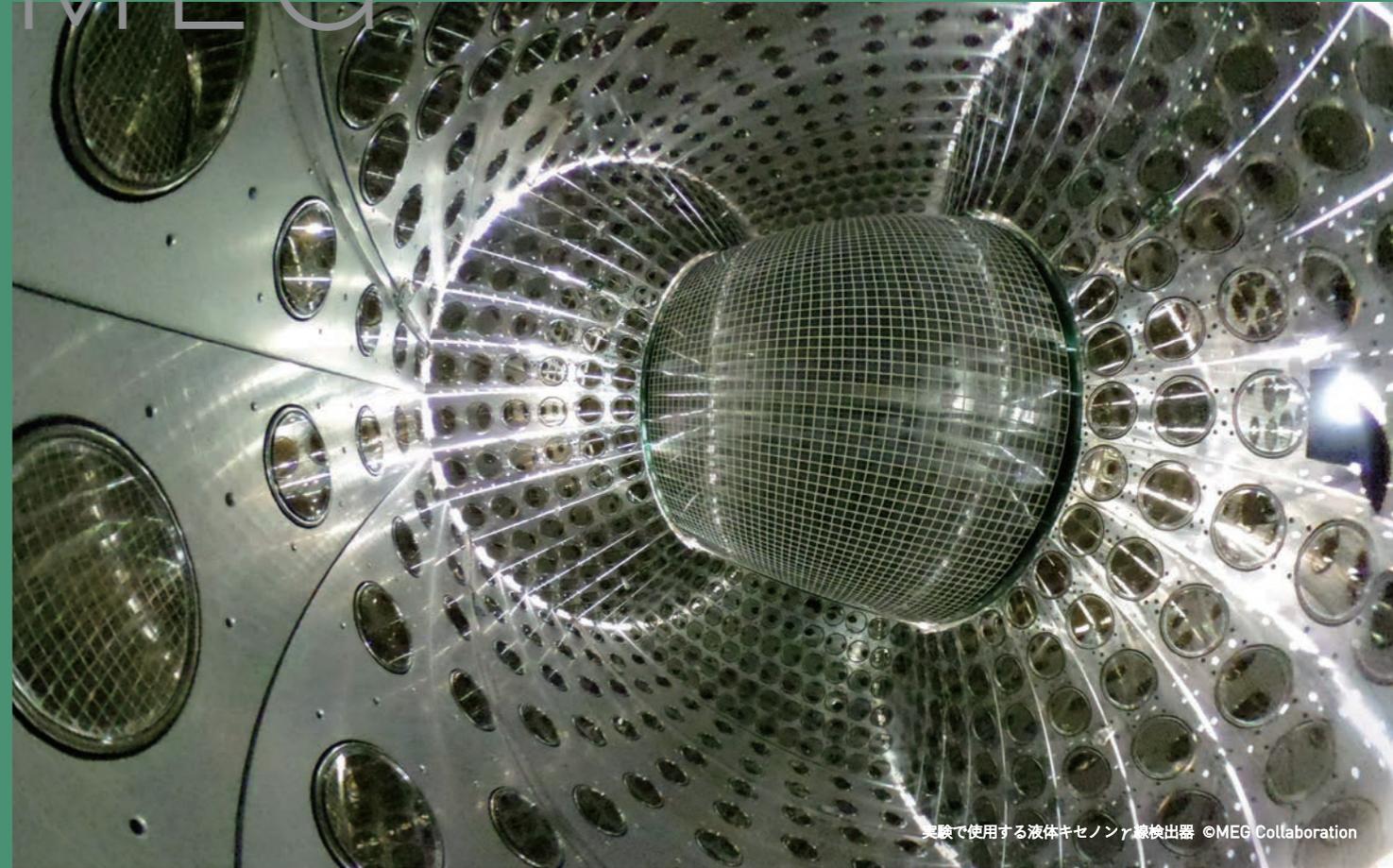
中高生時代にジュネーブを訪れて、CERNを見学する機会がありました。巨大な装置を使い、どんなことをしているのかと素粒子実験に興味を持ちました。大学は慶應義塾大学理工学部物理学科に進学し、主に機械学習を学びましたが、素粒子実験への想いが断ち切れず、機械学習を活用してデータ解析の研究をしたいと思うようになりました。ICEPPの存在を知ったのは、東大の大学院ガイダンスがきっかけです。自分がかつて見学したCERNのLHC-ATLAS実験に、ICEPPが参画していることを知り、ICEPPへの進学を決めました。

— ICEPPの印象はどうか？

教育体制がとても手厚いです。指導教員の石野先生と、共同で研究を行なう奥村先生は、“実験を遂行する上で重要な意義のある課題を与える”という教育方針のもと、学生たちの現状の能力より少し上の課題を与え続け、学生を鍛えてくださいます。そのおかげで、修士の2年間で自分も大きく成長できたと実感しています。また、新型コロナウイルスが発生する昨年3月までは、何度もCERNに行き、現場で経験豊富な人たちとやりとりしながら新しいスキルを習得し、大きな自信になりました。

石野研究室と奥村研究室は密接に連携していて、同期や後輩とも日々綿密な情報共有や活発な議論を行ない、互いに成長し合える環境となっています。ICEPPの他のプロジェクトでも、研究室の枠を超えた連携が日常的に行なわれており、研究の層の厚さを感じます。日々の研究では、大勢の人の前で研究成果を発表するスキルを磨く環境も用意されています。その成果として、昨年の日本物理学会秋季大会では、学生優秀発表賞を受賞できました。このようにICEPPは、非常に幅広い能力を習得できる素晴らしい環境だと感じています。

MEG EXPERIMENT



実験で使用する液体キセノン検出器 ©MEG Collaboration

新理論の手掛かりを掴め

スイスのPSI (ポールシェラー研究所) を舞台に行なわれるMEG実験の目的は、標準理論を超える新理論「超対称大統一理論」の検証にある。本センターの研究グループが設計・提案し、趣旨に賛同したイタリア・スイス・アメリカ・ロシアの研究者たちと2008年から取り組む国際共同実験だ。

目指すのは、電子の仲間「 μ 粒子」が γ 線を出しながら電子に崩壊する、「 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊」事象の観測だ。これは標準理論では起こりえないが、「超

対称大統一理論」では数千億～数十兆回に1回程度起こると予言される。事象が観測されてもされなくとも、MEG実験の結果は、その理論の正否を問うことになる。 μ 粒子の振る舞いが、新理論の方向性を左右する。

2013年夏に第1期実験を終え、観測感度を1桁高めた第2期実験 (MEG II) を、2022年から開始する予定だ。MEG II実験でも先の基本戦略を継承・発展し、日本の研究チームが主要部分を担当するとともに、研究グループ全体を統括する。

研究室

森 俊則 教授

スイス・PSI（ポールシェラー研究所）を拠点に国際共同実験MEGを推進しています。宇宙初期に実現していたとされる素粒子と力の大統一（超対称大統一理論）を検証するべく、標準理論では起こりえない μ 粒子の崩壊を探索しています。MEG実験は、大統一理論やニュートリノのシーソー理論など、超高エネルギーの物理から期待される崩壊分岐比に到達した唯一の実験として世界的な注目を集めています。現在、MEG実験を発展

させたMEG II実験を準備しており、実験感度を上げて新しい物理の兆候を得ることを目指しています。私自身は、国際共同研究グループ全体を統括する実験代表者/スポークスパーソンとして、MEG/MEG II実験の物理研究を主導しています。また、高エネルギー委員会（JAHEP）委員長や国際将来加速器委員会（ICFA）などの委員を務め、国内外の高エネルギー物理学の将来計画の戦略立案にも携わっています。

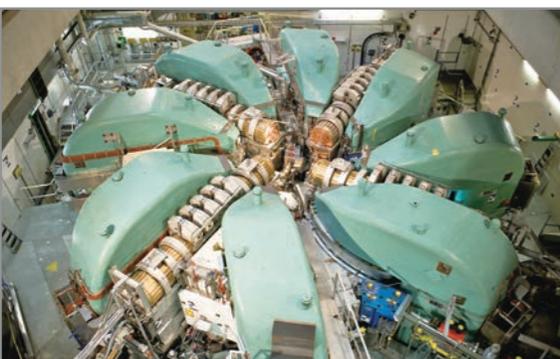


研究室

大谷 航 准教授

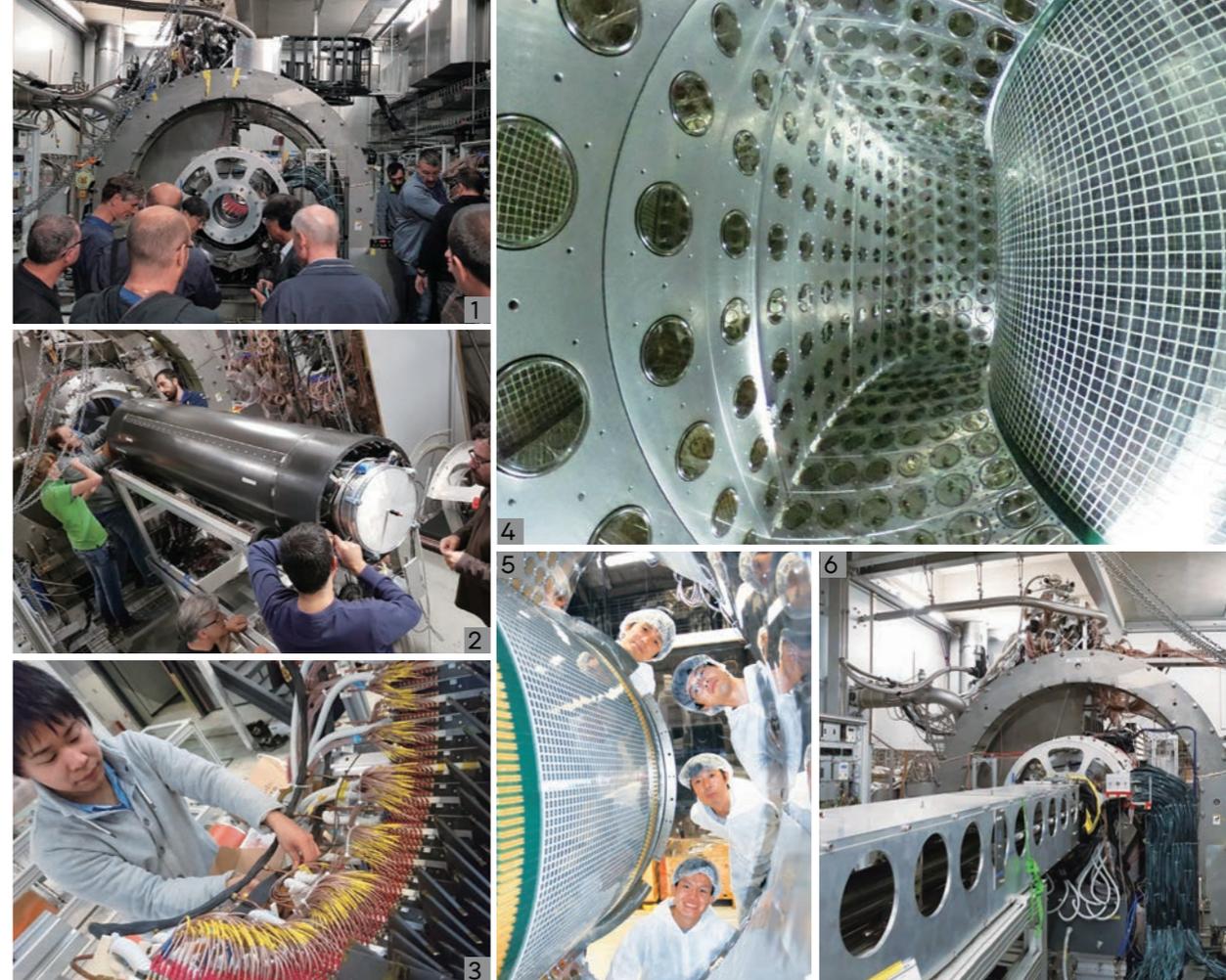
MEG実験の物理解析責任者として国際グループを牽引。第1期実験では先行実験を30倍上回る感度で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を探索しました。来る第2期実験（MEG II）で探索感度を究極まで高めるため、検出器の改良に取り組んでいます。探索感度の向上には、PSIの陽子サイクロトロンで生成可能な最大強度の μ 粒子ビームを使用する必要があります。第1期実験と比べてビーム強度が倍増するため、信号と背景事象をより精度よく分

離するには、検出器のエネルギー・時間・位置の分解能をそれぞれ2倍改善することが求められました。実験の鍵を握る新しい液体キセノン γ 線検出器と陽電子タイミングカウンターを提案。その開発を主導しています。MEG II実験の遂行と並行して、将来の $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験に向けた研究開発にも取り組んでいます。探索感度をさらに向上させ、未知の物理現象の発見を目指しています。



ポールシェラー研究所 (PSI)

スイス・チューリッヒ郊外にある国立研究機関。世界最大強度の μ 粒子ビームや超冷中性子を生み出す陽子サイクロトロン（写真）に加え、スイス自由電子レーザー施設（SwissFEL）など、独自の研究設備がある。



1 ガス検出器の専門家らで組織された国際評価委員会によるドリフトチェンバーのレビュー。2 イタリアの研究チームが開発するドリフトチェンバー。3 陽電子の発生時刻を測定するタイミングカウンターの開発風景。4、5 日本チームが開発する液体キセノン γ 線検出器。4の写真右側と5の写真左側が新開発した光センサーMPPC。4の写真左側は従来の光センサーPMT。6 MEG II実験に向けた装置のインストール作業の様子。

岩本敏幸 助教

PSI

MEG II実験のランコーディネータ、テクニカルコーディネータとして実験を推進、液体キセノン γ 線検出器の運転・較正も担当する。観測感度をさらに高め、超対称大統一理論などが予測する新物理の発見を目指す。



内山雄祐 特任助教

PSI

MEG II実験に備え、崩壊する μ 粒子から放出される陽電子の振る舞いを、最高精度で観測する新たな検出器を開発。ソフトウェアコーディネータとして、計算機を用いた高効率・高精度なデータ解析の実現にも取り組む。



潘 晟 特別研究員

PSI

光センサーMPPCのアーニリングによる検出効率の回復手法を開発。長期的に安定した実験遂行に貢献する。また、MPPCの非線形応答の補正や画像認識による γ 線のパイルアップ事象の除去など高精度な解析も目指す。



多くの人と協力して、一つのことを成し遂げる喜び

— どのような研究に取り組まれていますか？

MEG実験をアップグレードさせたMEG II実験の準備・立ち上げに参加しています。MEG実験は、 μ 粒子が γ 線と陽電子のペアに崩壊する「 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊」という未発見の物理現象を探索します。この現象は標準理論では起こりませんが、超対称大統一理論では数千億～数十兆回に1回程度起こると予想されています。

μ 粒子の通常の崩壊では、1つの陽電子と2つのニュートリノが生じ、3粒子は異なる3方向へ飛びます。一方、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊では陽電子と γ 線がそれぞれ逆方向に飛ぶという違いがあります。したがって目的の事象の探索には、陽電子や γ 線が出た方向や発生時間、エネルギーなどを高精度に検出することが重要です。

私は修士の頃から一貫して、MEG II実験用の液体キセノン γ 線検出器の研究に取り組んできました。この検出器は、 γ 線と液体キセノンとの相互作用によって生じたシンチレーション光を内壁の光センサーで検出し、 γ 線の位置やエネルギー、時間を再構成します。前身のMEG実験では、PMT（光電子増倍管）を光センサーに使っていましたが、MEG IIではその一部をより小型のMPPCという半導体光センサーに置き換えます。これにより、観測する γ 線の位置やエネルギーの分解能を大き

MEG 実験（森研究室）
博士課程3年

小林 暁

SATORU KOBAYASHI



く向上させることができます。

検出器はすでに建設されていますが、私は γ 線の測定精度をさらに改善するため、MPPCやPMTの応答の校正を行ったり、MPPCを500 μ mの精度で配置するための測定方法を開発したりしました。そして実際にビームを使って位置分解能の性能評価を行なった結果、位置分解能が従来の2倍向上したことが確かめられました。

その成果を日本物理学会2020年秋季大会で発表したところ、学生優秀発表賞を受賞することができました。新たに創設されたこの賞の最初の受賞者に選ばれたことは大変光栄であり、うれしく思います。

— ICEPPに進学された理由を教えてください。

小学生の頃から両親に日本科学未来館や科学技術館などに連れて行ってもらい、科学の面白さを知りました。やがて、すべての現象を扱える物理学に興味を持つようになり、東京大学理学部物理学科に進みました。

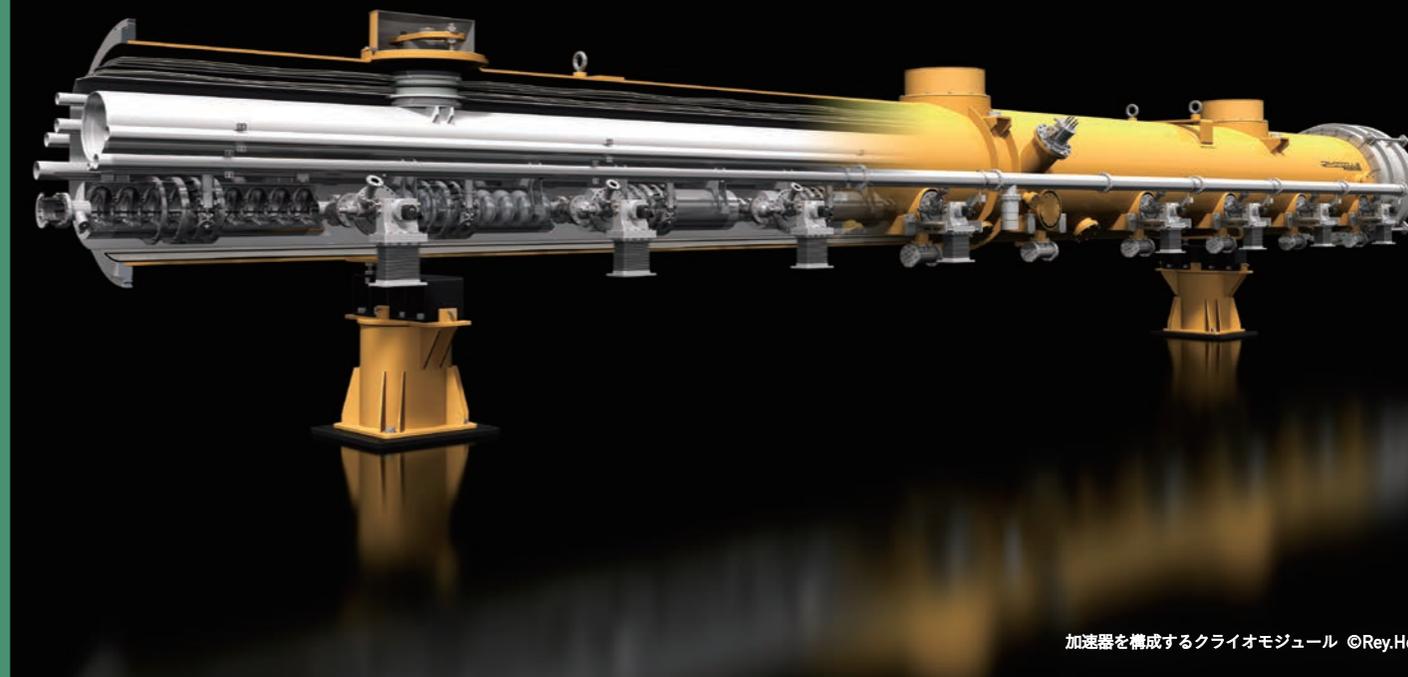
素粒子については昔から関心が高かったものの、物理分野の中で何をやりたいかは決まっていませんでした。ですが学部3年生の時、前センター長の駒宮先生から「研究室紹介」を受けた際、研究内容とユーモアを交えたトークが非常に面白くて、駒宮先生の研究室に入りました。そこで分かったことは、素粒子実験は多くの人が携わって一つのことを成し遂げる研究分野だということでした。学部生の時に体育会系の部活に打ち込んでいたこともあり、組織のなかで仕事をするには多少自信がありました。研究内容が魅力的なのはもちろん、自分の適性も活かすことができる素粒子実験の分野が自分に向いていると思い、ICEPPへの進学を決めました。

実際にICEPPに進学して、生まれて初めての一人暮らしをスイスで行ないながら、各国からやって来た研究者やスタッフと議論を重ね、協力してMEG II実験の準備を進めており、非常に充実感を覚えています。

— 今後の展望を教えてください。

MEG II実験で取り組んでいる物理は、「荷電レプトンフレーバー保存の破れ」という未知の現象を探索するものです。こうした実験は現在、MEG以外にも世界で大きなものが複数進行中です。標準理論を超える新物理を探る上で、「レプトンフレーバー物理」は近年一層重要視されています。今後どのような新物理モデルが正しいことになっても、MEG II実験でやっている物理は必ず重要となるので、大きなやりがいを感じています。そうした新しい実験を行なうには、新しい機械や技術、新しいコンセプトが必要なので、それらを貪欲に吸収して成果を挙げたいと思います。

ILC PROJECT



加速器を構成するクライオモジュール ©Rey.Hori

新物理を探索する次代の切り札

ヒ ックス粒子の詳細研究を筆頭に、新物理探索の切り札と期待される素粒子物理学の次世代基幹プロジェクト。「International Linear Collider（国際リニアコライダー）」の略称で、LHCとは異なるタイプの線形加速器の建設を目指す現在進行形の計画だ。

電子と陽電子を衝突させるエネルギーは、線形加速器で世界最大のTeV（テラ電子ボルト）スケールを目指す。単体の素粒子どうしの衝突は高精度の実験を可能とし、CERNのLHCでもとらえき

れない事象を明らかにすると期待される。世界中の素粒子物理学者たちが実現を長く夢見てきたプロジェクトで、日本でも約30年にわたって検討・準備が進められてきた。

ILCの有力候補地として、日本の北上山地が拳がる。本学・本センターの研究者が計画検討組織の要職に就き、日本誘致と2030年代後半の稼働を目指して精力的に活動している。日本でILC建設が決まれば、世界の人材と企業が集結する一大グローバル科学都市が日本に誕生することになる。

研究室

森 俊則 教授

ICFA（国際将来加速器委員会）日本代表やJAHEP（高エネルギー委員会）委員長を務め、エネルギーフロンティアの世界的な次期基幹計画であるILCの実現に向け力を尽くしています。ILCは、日本がイニシアチブを取って進めています。

ILCの衝突エネルギーは250 GeVから始め、ヒッグス粒子を大量生産し詳細に調べるヒッグスファクトリーとして、ILCは優れた性能を示します。ILCは拡張性も高く、新粒子・新現象を発見する

ために効率的にエネルギーを増強させることもできます。こうした性能は広く認められ、JAHEPでILC250の提案がなされ、続いてICFAはILCの早期実現を奨励する声明を発表しました。

ILCは、ヒッグス粒子がどのように宇宙の相転移を引き起こし、現在の複雑で豊かな宇宙を作り上げたのか、その謎を解くために必須の加速器です。研究室では、ILCに必要な測定器と物理の研究にも取り組んでいます。



山下 了 特任教授

ILCは、次世代のエネルギーフロンティアを担う加速器実験計画の最有力候補です。私もプロジェクトを率いる中心的役割を担い、欧・米・アジアの国際協力のもと計画を進めています。現在、研究開発とともに国際的な組織間で合意形成を進めており、計画の根幹を決める重要なフェーズにきています。日本の北上山地が有力候補として挙がっており、日本誘致にも力を入れています。また、昨年、JAHEPの下に設立したILC推進パネルの

委員長に就き、コミュニティを主導しています。

研究面では、ILD測定器の開発に参加し、ターゲットとなる物理現象のシミュレーションや測定性能評価を牽引しています。また、国内の大強度陽子加速器施設であるJ-PARCにて、世界最高強度での超低エネルギー中性子を用いた素粒子実験も行なっています。学外で出張授業を開催し、素粒子物理学への社会の関心と理解を高める活動にも注力しています。



研究室

大谷 航 准教授

次世代エネルギーフロンティア実験ILCの早期実現に向け、かつてない性能を持ったILC用測定器の開発と、ILCで期待される物理研究に取り組んでいます。

ILCでは、レプトン(単体粒子)である電子と陽電子を衝突させるため、背景事象の少ない環境で精密な測定を行なえるのが特徴です。その特徴を十分に活かすため、ILC測定器への導入が検討されているのが、「Particle Flow Algorithm (PFA)」という画期的な手法です。測定器内で発

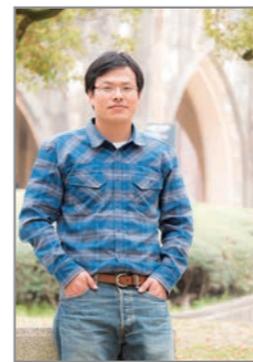
生した粒子のエネルギーを粒子の種類ごとに個別に測定し、エネルギー分解能を高めるのが狙いです。それにより、ヒッグス粒子の精密測定が可能になります。

ILC用測定器の要となるのが、粒子のエネルギーを測定するカロリメータです。約一千万チャンネルの高精細シンチレータと新型半導体光センサーから得られた信号を、高密度集積回路で読み出す革新的な測定器システムです。本研究室はその国際的な研究開発を主導しています。



田 俊平 助教

ILCの物理および測定器最適化に携わる。ILCの物理的意義を高めるため、電弱対称性の破れの謎に迫るヒッグス自己結合について研究している。また、ILD測定器の物理研究能力を高めるため、最適化にも取り組んでいる。



1 ILD測定器に搭載予定のハドロンカロリメータの大型プロトタイプのビーム試験。試験はCERNで実施した。2 東京大学で開催された、ハドロンカロリメータの実験データ解析ワークショップの様子。世界から研究者が集まった。3 4 5 ハドロンカロリメータの大型プロトタイプ。東京大学を含む国際共同チームが開発した。

将来のキャリアを見据えて、ILCという道を歩む

—— 研究内容を教えてください。

ILCで使用する測定器の開発に携わっています。ILCの主目的は、光速近くまで加速した電子と陽電子を衝突させ、大量につくり出したヒッグス粒子の性質を精密に測定することです。これにより、標準理論を超える「新物理」や「新現象」を発見し、質量の起源や宇宙の誕生といった根源的な謎を解き明かすことを目指しています。

このILCでは、日本とヨーロッパが中心となって、「ILD (International Large Detector)」という検出器を開発しています。ILDには、電磁カロリメータ (ECAL) とハドロンカロリメータ (HCAL) が搭載される予定です。前者は電子や光子のエネルギーを、後者は陽子や中性子などのエネルギーを測定する装置です。

HCALで重要な役割を果たすのが「シンチレータ」です。シンチレータとは、荷電粒子との相互作用で蛍光を発する物質のことです。粒子がシンチレータにぶつかって生じる光の量から、元の粒子のエネルギー総量を決定するために、シンチレータを使用します。HCALでは、粒子のエネルギーを高い精度で測定するため、検出層に30 mm角のタイル状のシンチレータを並べる設計にして

ILC計画 (大谷研究室)
博士課程3年

辻 直希

NAOKI TSUJI



あります。

私は修士課程で、シンチレータを60 mm角に大型化する研究を行ないました。シンチレータを大きくすれば、一般的には粒子の位置や時間を測定する精度は落ちます。しかし先行研究では、シンチレータの一部を大きくしても全体の性能は変わらず、シンチレータの枚数や読み出しチャンネル数などの減少によるコスト削減につなげられると考えられていました。私はこれを実証するため、60 mm角のプロトタイプで性能評価を行ない、さらに60 mm角タイルを用いた検出層を製作して、大型技術試作機での試験を行ないました。これらの研究により、60 mm角タイルのシンチレータでも、30 mm角と同等の性能が得られることを実証しました。

博士課程では研究対象を少し変え、ECALのシンチレータストリップ技術の開発研究に取り組んでいます。これは、縦5 mm×横45 mmの細長いシンチレータストリップを、縦方向に並べた層と横方向に並べた層とを交互に配置し、仮想的な5 mm角の超高精細度を実現する独創的なアイデアです。HCALの研究で培った経験と技術を活かし、ECALでも高精細カロリメータを完成させたいと考えています。

—— ICEPPに進学し、ILCを選んだ理由は？

もともと宇宙に興味があり、宇宙の起源や構造を解明したいと考えていました。九州大学在籍時には物理学科に進学して物理を学ぶうち、素粒子の研究が宇宙の起源の探求と密接に関わっていることを知り、素粒子物理に興味を持つようになりました。そして、自分の手で新物理や未知の現象を観測・発見したいとの思いから、素粒子実験に携われるICEPPへの進学を決めました。

ILCを選んだことにも明確な理由があります。素粒子実験の新たな国際研究施設が日本に建設される可能性があり、そこで活躍したいと思ったからです。ILCでの実験が盛んに行なわれる時期が、自分が将来、研究職として最前線で活動するであろう時期と重なると考えました。自分の将来のキャリアの中枢に、ILCを見据えています。

——ICEPPの魅力はどこにありますか？

ICEPPには、幅広い分野に精通している万能型の研究者もいれば、ある分野に特化したエキスパートもたくさんいます。ですから、研究で困難に直面しても、そうした人たちに相談してアドバイスをもらうことで、困難を乗り越え、自分を成長させることができます。ここに集まる学生たちも研究者志望の人が多く、お互いに切磋琢磨できる良い環境に恵まれています。おかげで、充実した博士課程を送れています。

テーブル トップ 実験

標準理論を超える新物理は、実験室でも見つかるかもしれない。素粒子現象を直接探るには、大型加速器の高エネルギーが必要だが、低エネルギーでもユニークなアイデアと多彩な実験手法を駆使すれば、間接的に素粒子現象を探ることができる。テーブルトップ実験は、少数精鋭の研究グループで、隠れた素粒子現象や未解明の宇宙誕生の謎に迫る。

その他の 素粒子 実験

未知の素粒子、素粒子の知られざる性質、素粒子が引き起こす不可思議な現象、素粒子の世界では弱すぎる「重力」。素粒子について解明されていないことは多い。素粒子研究にも、多様なアプローチが残されている。

研究室

浅井祥仁 教授
(理学系研究科)

「光」と「真空」をテーマに、新しいアイデアで斬新な素粒子実験を行なう。徹底した技術開発により、加速器で到達不能な高いエネルギー領域の物理を間接的に検証する。



難波俊雄 助教

一対の電子と陽電子だけからなる最軽量の原子、ポジトロニウムを用い、標準理論とズレのある事象の観測を目指す。将来のブレークスルーとなる検出器の開発も行なう。



稲田聡明 特任助教

量子コンピュータに纏わる超伝導・光デバイスの開発を行なう。また量子センサーを用いて、人工ブラックホールや重力の量子性に関する研究およびアキシオンの探索を行なう。



X線どうしをぶつけて真空を歪ませ、歪みをX線で検出する装置。実験には、理研の「X線自由電子レーザー施設 (SACLA)」を利用する。

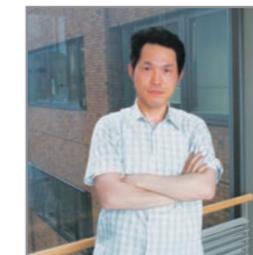
神谷好郎 助教
(理学系研究科)

低速中性子等を用いた重力の検証、未知の相互作用と新粒子探索、高強度レーザー場の下での非摂動論的非線形QEDの研究、次世代量子検出技術の開発などに取り組む。



井上慶純 助教
(理学系研究科)

隠れた光子 (hidden photon) を想定した暗黒物質の検出実験、小型ニュートリノ検出器の開発に加え、それらを活用した雷雲次世代量子検出技術の開発などに携わる。



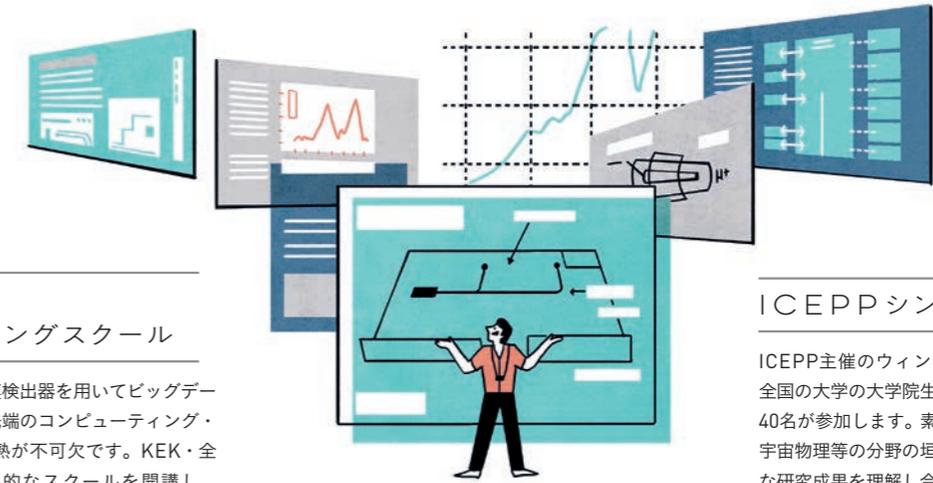
小貫良行 助教
(理学系研究科)

B中間子を用いた物質反物質対称性の破れ測定や未知の素粒子探索実験などで、標準理論を超えた現象の発見を目指す。将来実験で使用する半導体放射線検出器の開発にも取り組む。



ICEPPでの1年の過ごし方

本センターでは、1年間を通してさまざまな教育プログラムがあります。「国際研究センター」の名が示すとおり、国際的な研究拠点に研究者や学生を派遣し、国際共同実験に参画しているのが特徴です。



ICEPPシンポジウム

ICEPP主催のウィンタースクールで、全国の大学の大学院生・若手研究者約40名が参加します。素粒子・原子核・宇宙物理等の分野の垣根を越えて多様な研究成果を理解し合い、相互交流を深めるユニークな場を提供します。



日本物理学会 秋季大会

授業A Semester
(9~1月)

粒子物理 コンピューティングスクール

粒子物理分野では大規模検出器を用いてビッグデータを収集するため、最先端のコンピューティング・ソフトウェア技術の習熟が不可欠です。KEK・全国の大学とともに専門的なスクールを開講し、ATLAS実験の修士課程大学院生が参加しています。



高エネルギー物理春の学校

素粒子物理学の面白さを伝え、若手研究者同士の繋がりを広げる機会となるよう、有志の世話人（国内の大学・研究機関の教員）の支援により毎年5月に開催されています。修士1年を中心に約80名が参加し、入学後のスタートアップとなっています。



入学式

新入生ガイダンス

授業S Semester (4~7月)

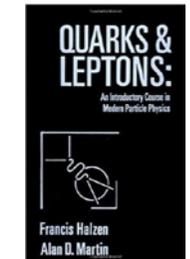
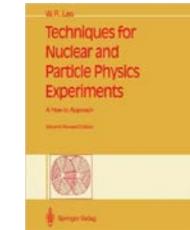


撮影・尾関祐治



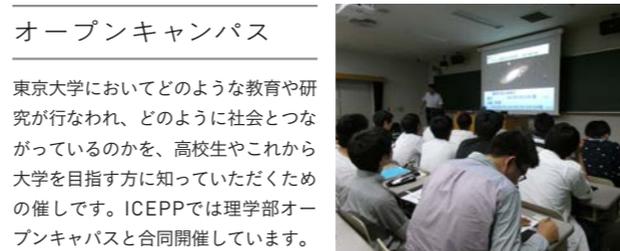
MOゼミ (教科書輪講)

1週間に3時間程度、素粒子物理学実験の基礎を学びます。



オープンキャンパス

東京大学においてどのような教育や研究が行なわれ、どのように社会とつながっているのかを、高校生やこれから大学を目指す方に知っていただくための催しです。ICEPPでは理学部オープンキャンパスと合同開催しています。



CERN夏の学校、 PSIサマープログラム

修士1年の夏に、ATLAS実験の学生はCERNに、MEG実験の学生はPSIに約1カ月滞在します。現地の実験装置や加速器施設を自分の目で確かめ、第一線で活躍する研究者との交流を通して知識を深めると同時に、国際的視野を広げる経験を積みます。



論文審査 (修士課程2年・ 博士課程3年)

日本物理学会年次大会

学位記授与式 (修士課程2年・博士課程3年)



撮影・尾関祐治



ICEPPでは修士の時にTabletop実験に取り組み、博士ではATLAS実験に参加して、2012年7月のヒッグス粒子の発見にも立ち会いました。

修士時代のTabletop実験では、ポジトロニウムという電子と陽電子からなる「最小の原子」を研究しました。ポジトロニウムを磁場の中に置き、崩壊時の量子振動の様子から「超微細構造定数」を求めます。その実測値は、理論値と乖離していることが知られており、それを手掛かりにして新たな物理学を発見する糸口を探っていました。実験装置の図面を引き、電子基板を自作して解析を行ない、論文を書く。これらすべてを自分の手で行なえたことは貴重な経験になりました。

博士課程では、進学がLHCの稼働開始のタイミングと重なったこともあり、ATLAS実験に参画しました。最初はLHCで生成が期待されていたマイクロブラックホールの分析をしましたが、途中から超対称性粒子の探索に移りました。超対称性粒子の崩壊時にレプトンが1つ現れる「1レプトンモード」での解析研究がテーマでした。国際チーム内で、誰が最高の解析結果を出せるかを競い合う環境のなか、現在の仕事にも役立つ仮説検証能力を鍛えられたのは大きな財産になっています。

修士・博士で基礎研究をひと通り経験し、次は社会と

のつながりを持ちたい、ICEPPで学んだ技術を社会に還元したいと思うようになりました。当時からAI（人工知能）、特にディープラーニングに関心があり、将来はAIで起業することも視野に入れ、まずはマッキンゼーでビジネスの基礎を学ぼうと考えて入社しました。同社では、クライアントのコスト分析やサプライチェーンの最適化などのコンサルタント業務が主な仕事でした。

その後、ディープラーニングに特化したAIベンダーに転職して働いていたころ、マッキンゼー時代の上司に誘われて、2018年6月に現在の会社のCTOの職に就きました。当社はAIを活用し、画像や動画における物体検知、人物認識、種類別などの多様な製品を開発しています。その祖業は、AIがほとんど使われていなかったファッション分野から始まりました。ディープラーニングでファッショントレンドを解析するサービスの商品化に成功し、そこからAIの適用範囲を広げてきました。

素粒子実験では、技術を駆使して未開の領域を進むことが求められます。これは現職における商品開発と非常に近いと感じています。両者に共通して必要なのは、限らない探究心と、何が何でもやり抜くメンタリティです。それを今も持ち続けられているのは、ICEPPで経験し、学んだことが非常に大きいと実感しています。



「大事だと思ったことを
きちんとやる」
その大切さをICEPPで学んだ

ILC計画⇒ATLAS実験⇒
国立天文台 重力波プロジェクト
特別研究員（PD）⇒
東京エレクトロン株式会社SDC
AI開発部
サイエンティスト

小坂井千紘
CHIHIRO KOZAKAI

PROFILE

2014年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻（駒宮研究室）修士課程修了。18年同博士課程修了。日本学術振興会特別研究員（所属は高エネルギー加速器研究機構および国立天文台）を経て、2021年より東京エレクトロン株式会社に勤務。博士（理学）。

TABLETOP実験⇒ATLAS実験⇒
株式会社ニューラルポケット
取締役CTO（最高技術責任者）

佐々木雄一
YUICHI SASAKI

PROFILE

2010年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻（浅井研究室）修士課程修了。13年同博士課程修了。マッキンゼー・アンド・カンパニー日本支社、AIベンダーを経て18年に株式会社ニューラルポケット（現）に参画。博士（理学）。

素粒子実験で培った
メンタリティで、
AIプロダクトの開発に挑む

私の出身高校では理科・社会の全科目が必修で、物理もそのひとつとして学びました。高校で学ぶ物理は運動方程式や重力の方程式など、非常に基礎的で単純です。でも単純な数式で、世界のさまざまな現象を記述できる。その素晴らしさに感動したのが、物理に魅了されたきっかけでした。

東大理科I類に入学後は、物理に限らず幅広く勉強しました。また物理学科に進学後も、3年次には宇宙物理のゼミに参加するなど、その時々で最も面白いと思うことに取り組んできました。最終的に大学院に進む際に、最も基本的・根源的な対象である素粒子の研究をしたいと思い、駒宮先生の研究室を選んだのです。

修士ではILC計画に参加しました。研究テーマには複数の選択肢があり、選んだのは放射線による検出器のダメージ測定・評価のための研究です。他のテーマは既存のデータを解析するものでしたが、私は自分でデータを取って解析したかったことが理由でした。

次いで博士課程では、CERNのLHCの第2期実験開始と重なったので、新たな発見を期待してATLAS実験に参画しました。LHCの目標の1つは、新物理で理論的に存在が予想されている超対称性粒子の発見です。複数ある理論モデルの1つでは、チャージノという超対称性粒子が生成された場合、検出器内を10 cm 程度飛んで

から崩壊することが予想されていました。この様子を捕らえてチャージノを発見するという研究に取り組んだのです。

CERNには2年ほど長期滞在して、海外の研究者とともに研究を進めました。現地のアマチュアオーケストラでピオラを弾いたのも良い思い出です。残念ながらチャージノの発見には至りませんでした。現在も後輩たちが同じテーマに取り組んでいます。

博士課程を2018年に修了した後は、重力波望遠鏡KAGRAでの研究を選びました。2015年の重力波初検出からまもない時期で、非常に新しい研究分野であることが最大の魅力でした。望遠鏡（干渉計）のキャリブレーション（校正）装置や、雷や地震等による突発的なノイズを解析・判定する仕組みを作ったりしました。

ICEPP時代を振り返ると「自分が大事だと思ったことをきちんとやる」ことの大切さを学んだと思います。分からないことはきちんと勉強する。手を動かさないと理解できない場合には手を動かす。必要な場面では他人としっかりとコミュニケーションをとる。そうしたことを積み重ねていけば、遠く思える目標にも到達できることをICEPPで教えてもらえたと思っています。

2021年4月からは、半導体製造装置メーカーでデータサイエンティストとして、心新たに働きます。

ICEPPから巣立つ先輩たち 進路データ

本 センターで受け入れた大学院生の半分以上は、修士課程修了後に博士課程へと進学し、博士課程修了者の大半は、国内外の研究機関に進みます。それは、本センターが次代の研究者養成に力を入れていることの実証です。

しかし、卒業生のキャリアはかつてないほど多様化しています。修士課程修了者の半数近くは民間企業へと就職し、就職先も、情報通信、電機、機械、金融、サービスなど多岐にわたります。その傾向は、博士課程修了者にもあらわれています。

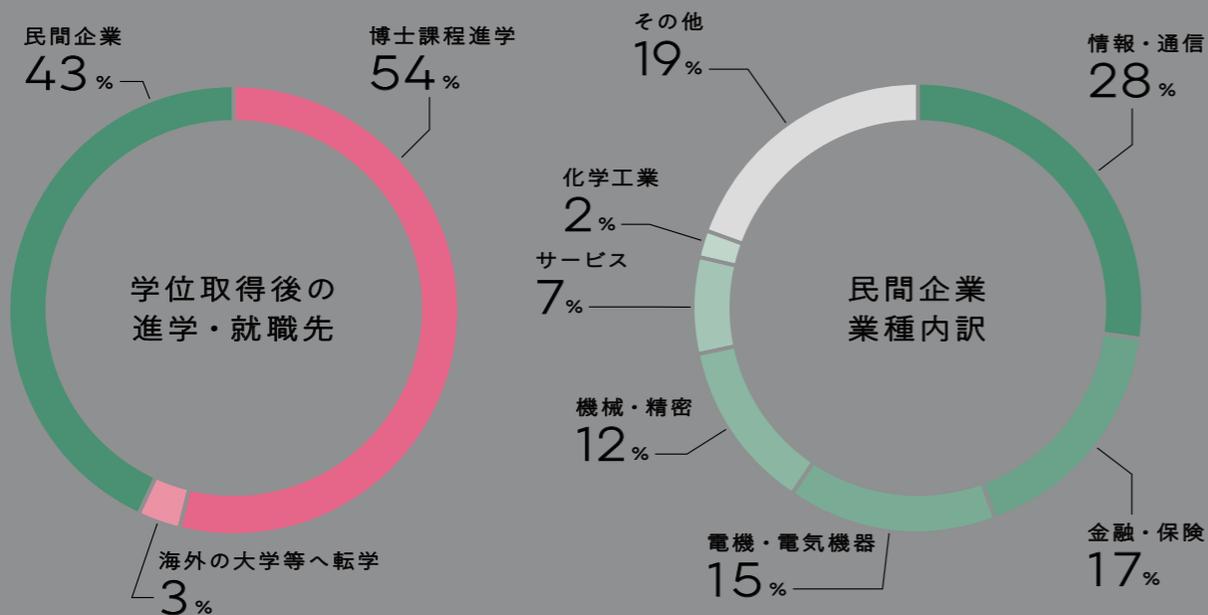
かつてなら、博士号取得者はそのまま研究の道に進むのが当たり前でしたが、今では民間企業への就職も増えています。それだけではなく、博士号を持つ卒業生のなかには、自ら会社を立ち上げた人もいます。

また、博士号取得者が研究職に就く際にも、実に多彩な道が拓けています。国内の大学や研究機関はもちろん、米国・欧州・中国などさまざまな国の大学や研究機関で、先輩たちは研究者として活躍しています。

研究者だけではない、多様化する卒業生たちのキャリア

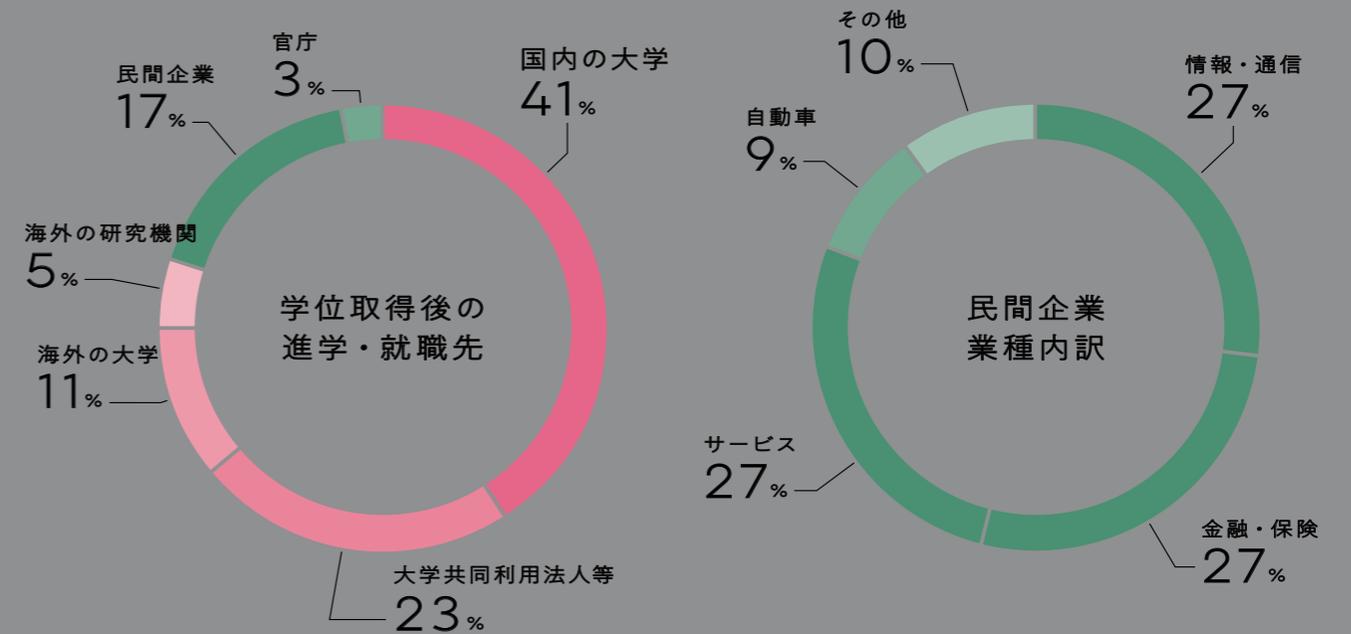
修士課程

※ 2000～2019年度調べ



博士課程

※ 2000～2020年度調べ



主な民間企業就職先

情報・通信	日本電気株式会社、日本IBM株式会社、株式会社NTTデータ、富士通株式会社、ヤフー株式会社
金融・保険	みずほ証券株式会社、ゴールドマン・サックス証券株式会社、三菱UFJモルガン・スタンレー証券株式会社、SMBC日興証券株式会社、東京海上日動火災保険株式会社、明治安田生命保険相互会社
電機・電気機器	三菱電機株式会社、ダイキン工業株式会社、住友電気工業株式会社
機械・精密	株式会社日立製作所、キヤノン株式会社、株式会社キーエンス
サービス	株式会社野村総合研究所
化学工業	住友化学株式会社

主な大学・研究機関

国内の大学	東京大学、京都大学、大阪大学、名古屋大学、東北大学、早稲田大学、新潟大学
大学共同利用法人等	高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
海外の大学	カリフォルニア大学バークレー校、ペンシルバニア大学、中国科学院、上海交通大学
海外の研究機関	欧州合同原子核研究機構 (CERN)

主な民間企業就職先

情報・通信	日本電気株式会社
金融・保険	野村證券株式会社、BNPパリバ証券株式会社
サービス	マッキンゼー・アンド・カンパニー日本支社
自動車	トヨタ自動車株式会社



東京大学素粒子物理国際研究センター

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

発行日/令和3年5月27日

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

東京大学(本郷キャンパス内)理学部1号館西棟10F

編集ディレクション… 萱原正嗣(チーム・バスカル)

取材・文… 中村俊宏、萱原正嗣(チーム・バスカル)

撮影… 貝塚純一

アートディレクション… 細山田光宣

デザイン… 横山 曜(細山田デザイン事務所)

イラストレーション… Yo Hosoyamada

協力… 東京大学大学院理学系研究科・広報室

