

International Center for Elementary Particle Physics, THE UNIVERSITY OF TOKYO

東京大学 素粒子物理国際研究センター

2022

大学院進学案内



物理学を切り拓く、若き力

DIRECTOR'S MESSAGE



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。

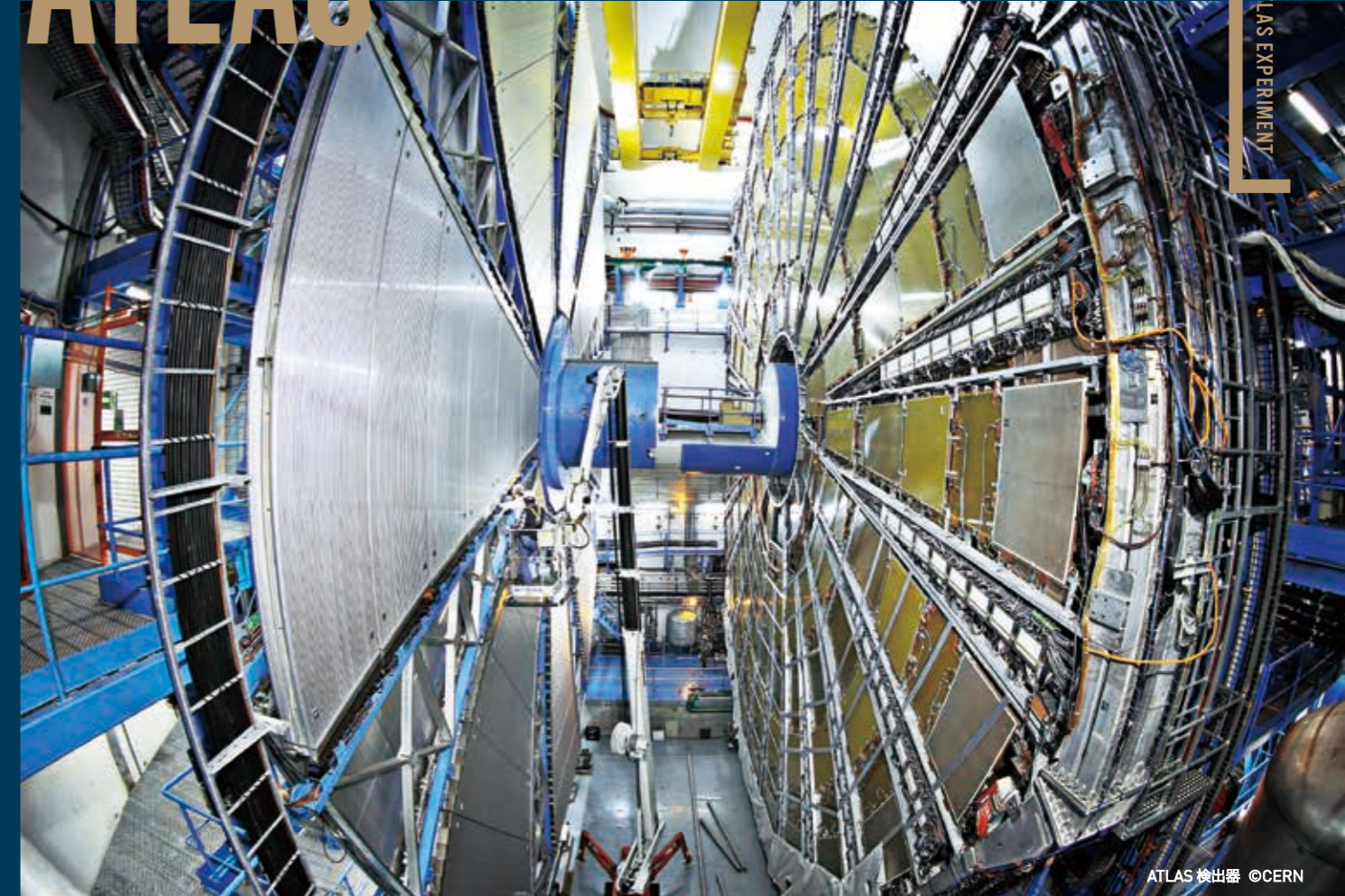
もうひとつの軸は、独自の知見と斬新な発想で研究分野そのものを開拓し、本質的な物理に特化した実験を行なうアプローチです。この系譜に連なるPSIでのMEG実験からは、多くの研究者が育

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 EXPERIMENT



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。

これまでに第1期実験と第2期実験を終え、2022年から第3期実験を再開する。LHCのエネルギー・ルミノシティの増強に対応するため、検出器もアップグレード済みだ。さらにその先には、粒子の衝突頻度を高める「高輝度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

LHC第2期実験で真空・時空に関する新たな知見を得られ、我々の宇宙が準安定状態にあることが明らかになりました。この結果は新粒子・新現象の存在を強く示唆しており、宇宙初期における相互作用の統一の理解や宇宙に存在する暗黒物質の発見への期待が高まっています。2022年には第3期実験が、2029年には高輝度LHC (HL-LHC) 実験が計画され、ハード・ソフトの両面で準備研究が着実に進んでいます。

世界の学術フロンティアを切り拓く卓越した研究成果を生み出すには、革新的な計算機技術の導入が重要な鍵となります。これまでの活発な国際研究交流に基づく日欧米の大局的な国際戦略で、複雑なビッグデータを精細に表現する量子コンピュータ技術の開発に取り組んでいます。日本陣営がヒッグス粒子発見に継ぐ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、新しいメインストリームを切り拓いていきます。



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かけています。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。

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

田中純一 教授

ATLAS実験で、標準理論では説明できない物理の直接的な手がかりを発見することを目指しています。今年から第3期実験が始まり、心機一転、新物理の発見を目指し研究をブーストする開発に取り組めます。

素粒子物理学実験の習得のみならず、ATLAS実験を通じて、自分に合った専門技術を磨いてもらいます。たとえば、人工知能・深層学習をデータ解析に応用する技術力は、どの分野でも重宝されます。さらに、高輝度LHC (2029年開始予定) や将来の大規模実験に向けたコンピュータ科学の研究 (スパコン、クラウド等を用いた拡張) や量子コンピュータ・量子センサーの開発に意欲のある学生さんも歓迎します。

標準理論は手ごわく、残念ながらこれまでのデータ量や解析手法では新物理は見つかっていません。視点を変えると、これから研究を開始する皆さんに発見のチャンスがあります。



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170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

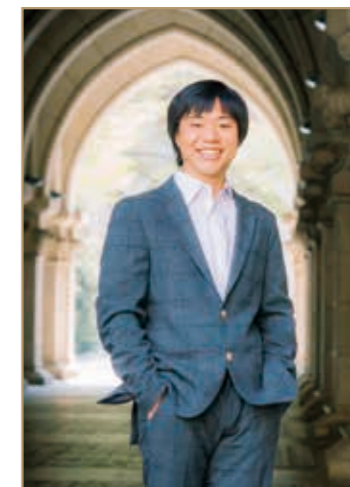
奥村恭幸 准教授

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

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。2029年に開始される高輝度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することで、予想外の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物理シミュレーションの研究に取り組んでいます。また、

量子センサーを用いた精密測定によって、暗黒物質など新しい物理の世界を探索することも視野に入れていきます。量子計算機技術を社会実装するべく、進展させることも目標のひとつです。

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。



齊藤真彦 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。



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の運用。ATLAS実験内の解析サブグループを主導した。



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。



SANMAY GANGULY 特任助教

深層学習の素粒子物理学への応用研究に従事する。グラフネットワークをベースにアテンションなどを駆使して、ヒッグス粒子対生成事象の再構成や、より一般的な対称性の抽出手法の開発に取り組む。



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。



増渕達也 助教

CERN

ヒッグスがWボソン対、ボトムクォーク対に崩壊するモードを解析し、初観測に貢献。500名のATLASヒッグス解析グループのリーダーを務め、ヒッグス粒子の精密測定に挑む。ミュオン検出器の改良にも取り組む。



齋藤智之 助教

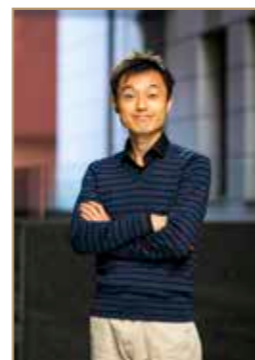
CERN

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。量子デバイスの制御から、基本的な量子アルゴリズム、アプリケーション開発に至るまで、素粒子物理の知見を取り入れた研究を展開する。



陳詩遠 特任助教

NISQ時代の超伝導量子コンピュータの系を使った量子多体効果の実験と、それを実現するための量子デバイスと回路の開発に携わる。ATLAS実験における超対称性粒子探索では、日本グループ解析チームを率いる。



新田龍海 特任助教

超伝導量子ビットを用いた量子センサーの開発を行なう。また、量子センサーを用いた基礎物理実験をはじめ、暗黒物質アクセオンや高周波数重力波の探索などを模索している。量子コンピュータ実習等の教育も担う。



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、量子多体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。



WAI YUEN CHAN 特任研究員

量子コンピュータの素粒子物理研究への応用を目指す。量子アーキテクチャと機械学習による粒子飛跡再構成に取り組む。また、ハドロンジェットの再構成やフレーバー同定への応用を模索している。



検出器の理解を深め、将来の物理解析に活かす

—— 研究内容を教えてください。

将来のLHC-ATLAS実験で使われる検出器の研究に取り組んでいます。CERNのLHCでは、陽子と陽子を世界最高エネルギーで衝突させて、新粒子の探索や標準模型の精密測定などをする実験が行なわれています。2022年度から第3期実験が始まりますが、さらにその先、2029年度から第4期の「高輝度LHC」実験が計画されています。これは現在の約3倍の輝度（ビーム中の粒子同士が衝突する頻度を表す値）を実現するもので、ATLAS検出器も大部分を一新するアップグレードが行なわれます。私はこの研究に携わっています。

LHC-ATLAS実験では、約1,000億個の陽子が入ったバンチ（塊）同士が25ナノ秒ごとに衝突し（毎秒4,000万回の衝突）、さまざまな粒子が生成されます。そのすべての事象を記録するのは不可能なうえ、興味がある事象は非常に稀にしか起こりません。そのため、興味深いと思われる事象だけを判定・選択して記録するトリガー（引き金）システムが非常に重要になります。

ATLAS検出器の最外層には、陽子同士の衝突によって発生したミュオンをとらえるシンギャップチェンバー（TGC）検出器があります。私はTGC検出器のトリガー機構などに関係するエレクトロニクスの刷新に取り組

ATLAS実験（石野研究室）
博士課程1年

青木匠

TAKUMI AOKI



んでいます。具体的には、ミュオンが発生した興味深い事象はどの陽子バンチ衝突に由来するかを正確に決めるため、検出器の前段回路のクロックの位相を20ピコ秒の刻み幅で制御・測定するシステムを開発しました。さらに前段回路、後段回路を含めたTGC検出器の全回路のエレクトロニクスの統合試験なども行ない、システム全体が正しく動作するかどうかを検証しました。

システム開発は、自分で回路をプログラミングし、その動作を確認して、エラーが出れば問題点を見つけ出して改善することの繰り返しです。非常に時間がかかりますが、自分のプログラミングによって実際の回路の動作が変わっていく点は非常におもしろいです。

—— ICEPP（本センターの略称）に進学された理由は？

大学院で素粒子実験をしたいと思っていましたが、LHC-ATLAS実験の中で日本グループがどんなことをしているのかは詳しく知りませんでした。ですがICEPPの進学ガイダンス終了後の懇談会で、現在の指導教員である石野教授にトリガーの重要性について教えていただきました。現行のATLAS実験において実際に記録されるのは全事象のわずか4万分の1であるということに驚き、実験の成否を左右するトリガー機構の研究がICEPPで行なわれていることに強く興味を持ちました。

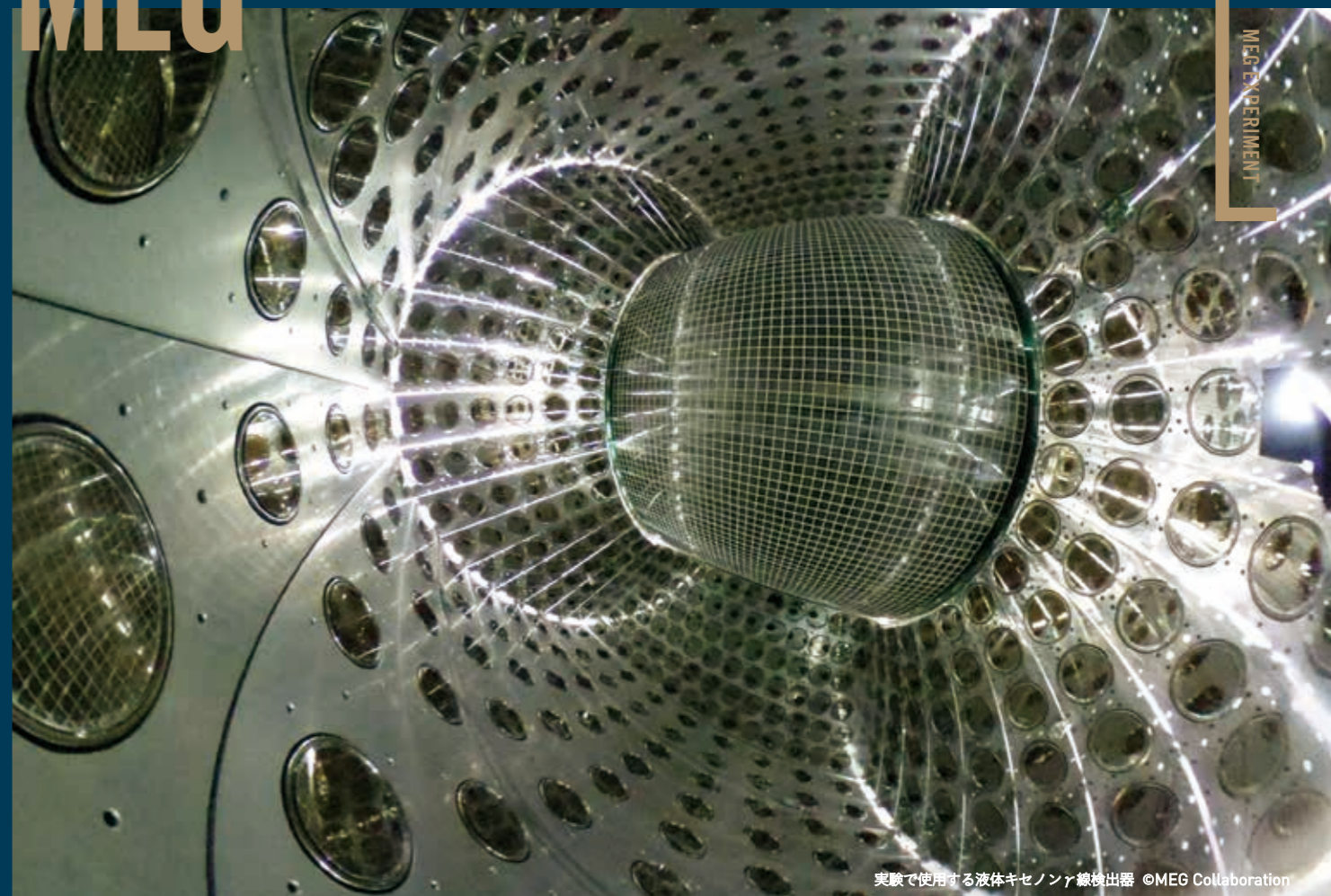
LHC-ATLAS実験のような巨大な素粒子実験に加わって、大学院生が何をできるのか、不安に思う学生は少なくないかもしれません。ですがICEPPでは、私の現在の研究テーマのように、大学院生がさまざまな人と協力しながら主体的に進めることができ、しかも実験の遂行に不可欠な、重要な部分を任せてもらえます。

—— 今後の展望を教えてください。

博士課程では、現在のハードウェアの研究から、実験データの物理解析を行なう研究に少しずつシフトする予定です。大胆なことを言えば、それこそ世界で初めての発見ができるような研究がしたいと思っています。

物理解析を行なう上では、検出器に対する深い理解が大事になります。たとえばトリガー機構がどうなっていて、どのような事象が選り出されて記録されているのかが分かっているなければ、適切な物理解析はできません。ですから将来は物理解析を行ないたいと考える方も、一度ハードウェアに携わり、検出器の仕組みや動かしかを理解し、新しいシステムの開発などを行なうのも良いと思います。ICEPPはそれができる研究機関ですので、ぜひとも進学先の候補として考えてみてください。

MEG EXPERIMENT



実験で使用する液体キセノン線検出器 ©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回程度起こると言われる。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実験を開始しようとしており、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、高エネルギー物理学研究者会議（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。

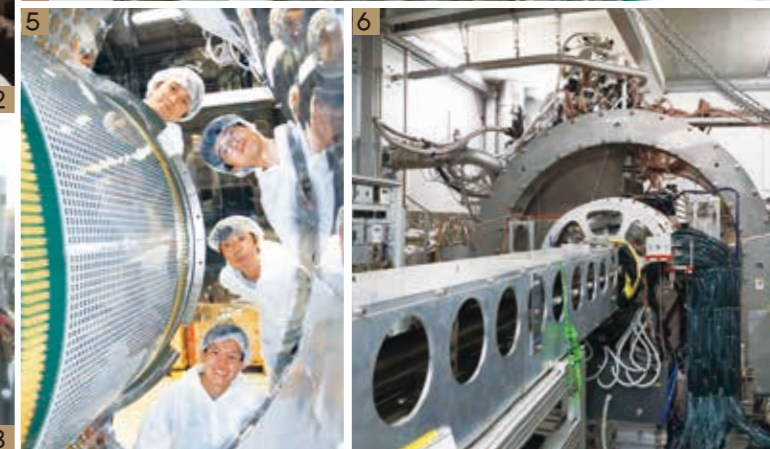
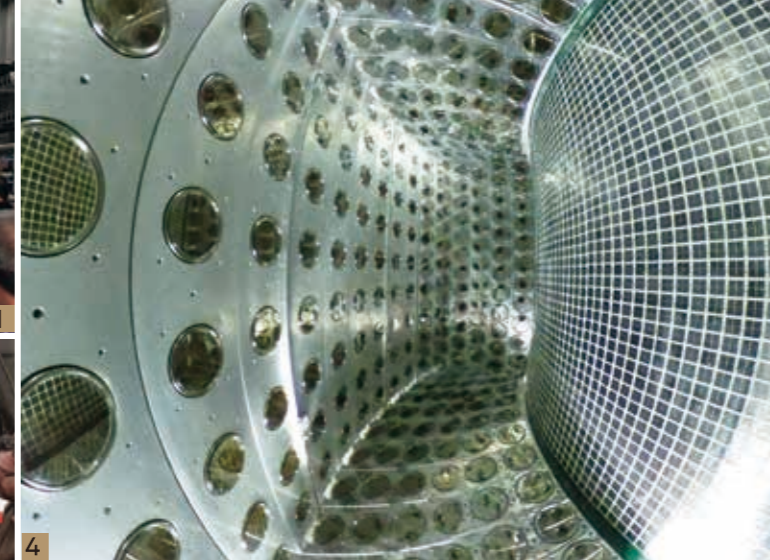
探索感度の向上には、PSIの陽子サイクロトロンで生成可能な最大強度の μ 粒子ビームを使用する必要があります。第1期実験と比べてビーム強度が増加するため、信号と背景事象をより精度よく分

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・運用を主導しています。

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。



互いに助け合い、国際共同実験に取り組む喜び

— どのような研究に取り組まれていますか？

スイスのポールシェラー研究所 (PSI) を拠点に行なわれるMEG II実験の準備や立ち上げに携わっています。MEG実験は電子の仲間である μ 粒子が、陽電子と γ 線に崩壊する「 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊」を探索する実験です。標準理論では起こらないとされるこの現象を確認できれば、新物理の大きな兆候となります。MEG実験をアップグレードしたMEG II実験は、2022年度からのスタートを目指しています。

$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の探索には、 γ 線のエネルギーと運動量を正確に知る必要があります。その検出を行なうのが液体キセノン γ 線検出器です。私は検出器の時間分解能をより正確に知るための研究をしています。

検出器の較正には、チャージエクスチェンジ (電荷交換) が利用されます。これは、液体水素のターゲットに π 粒子のビームを当てると、2つの γ 線がそれぞれ正反対の方向に放出される反応です。2つの γ 線の一方を、液体キセノン γ 線検出器の反対側にあるカウンターで測定し、カウンターと液体キセノン γ 線検出器の測定値から、液体キセノン γ 線検出器の時間分解能を求めます。

その際に私は、液体キセノン γ 線検出器側にも同じカウンターを製作して設置しました。これにより、従来は

MEG 実験 (大谷研究室)
修士課程2年

松下彩華

AYAKA MATSUSHITA



シミュレーション値を用いていたターゲット上での相互作用の大きさを実測値に置き換え、時間分解能をより正確に知ることができるのです。

チャージエクスチェンジのエンジニアリングランは2021年12月に実施されましたが、思わぬトラブルもありました。他国のグループが行っていた液体水素のターゲットの準備が難航してスケジュールが遅れ、十分なデータ数を得られなかったのです。しかし、自分が製作したカウンターでデータが取得できたことは喜びであり、またトラブルも貴重な経験になったと思っています。

— ICEPPに進学し、MEG実験を選んだ理由は？

子供のころから算数や数学が好きでしたが、高校のときに数学を究めるよりも数学を使う学問に興味を持ち、大学は物理系に進みました。宇宙や素粒子に興味があり、当初は理論志望だったのですが、学部2年の夏にKEKの一般公開に行き、加速器や測定器の実物を見て、素粒子の実験に興味を持つようになりました。

素粒子実験のなかで候補を絞る際には、実験に関わる全員の「顔」が分かる、つまり各自が何を担当しているかが分かるくらいの規模の実験をしたいと考えました。中規模のMEG実験はそれに最適だと思ったのです。さらにMEG II実験はスタート目前であり、今後のデータ取得にも関わることができるという絶好のタイミングでしたので、MEGに来たくてICEPPを選びました。

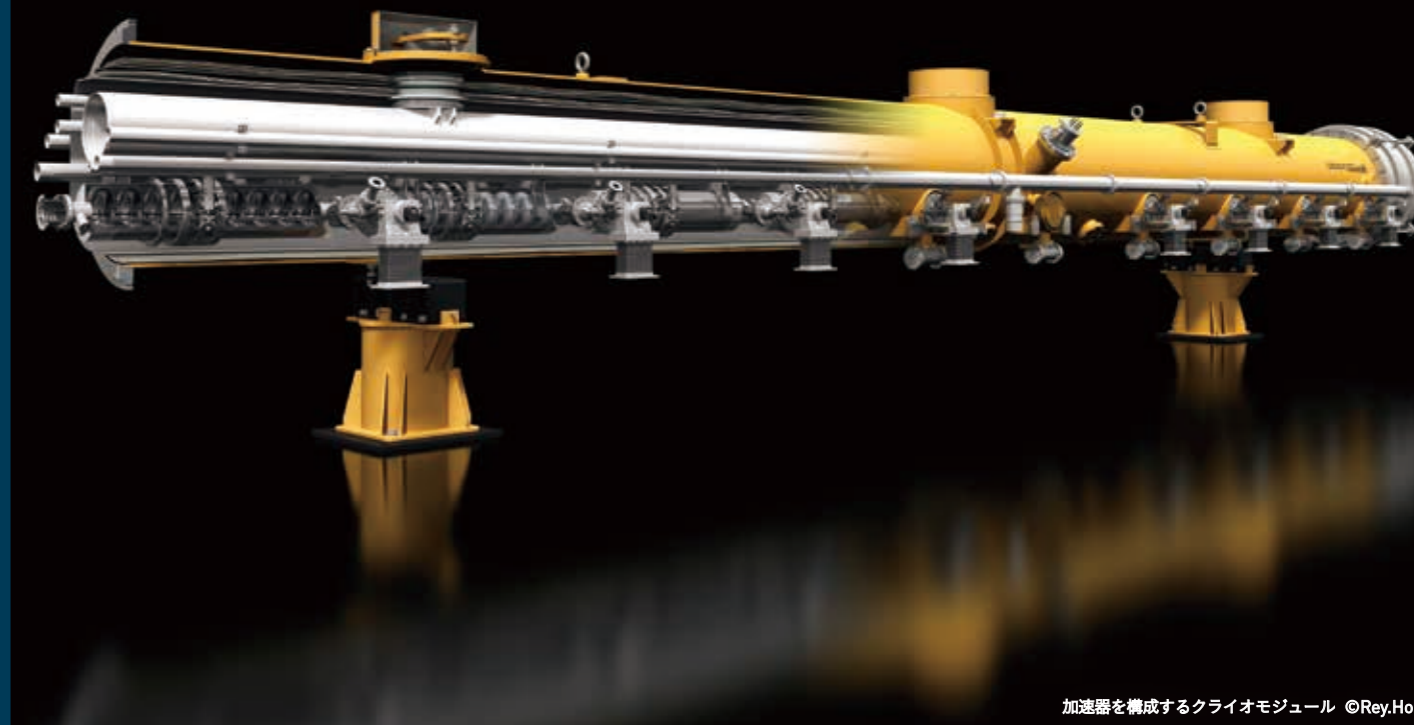
— 実際に進学してみて、ICEPPやMEGの印象は？

ICEPP進学がコロナ禍と重なったため、いつPSIに行けるのかが当初は分かりませんでした。そこで東京で検出器のデバイスの挙動について調べたり、MEG II実験のさらに先の実験についての研究を始めたりしていました。秋になってようやくPSIに行けることになり、初めての海外生活を送ることになりました。

さまざまな国から来ている研究仲間はみなフレンドリーで、初めて来た私のことを気にかけてくれ、アドバイスをもらえています。それぞれが分業制で研究を行ないつつ、互いに助け合って実験全体を進めていく国際共同実験がとても楽しく、MEGに来て良かったと思います。

今後はMEG II実験のスタートに向けて、液体キセノン γ 線検出器の時間較正をより精密に行なっていきます。またMEG IIの先の実験計画についての研究も進めたいです。博士課程に進学希望なので、そのころには実験がスタートし、物理データの取得が本格的になっているといい、それも大変楽しみです。

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

ヒッグ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、日本の北上山地が挙がる。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 (高エネルギー物理学研究者会議) 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の実現に向けて力を尽くしています。ILCは日本のイニシアチブで進めています。

ILCは衝突エネルギー250GeV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優れた性能を示します。拡張性も高く、新粒子・新現象を発見するために効率良くエ

ネルギーを増強することができます。この優れた性能により、JAHEPはILCの日本建設を提案し、それを受けてICFAはILCを日本で早期実現するよう声明を出しました。

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、国内の研究者、産学連携、そして国際協力のもと計画を進めています。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。基礎科学の振興に意義があるだけでなく、科学技術の発展や人材育成にも資するプロジェクトです。そのことの理解促進を図り、実現を目指した活動を

展開しています。

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、素粒子物理学や加速器を用いた科学研究への社会の関心と理解を高める活動にも数多く取り組んでいます。



研究室

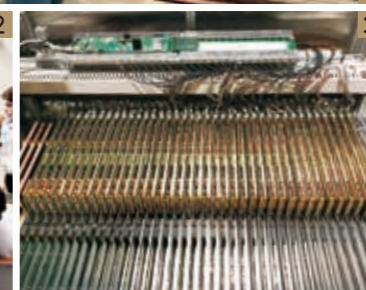
大谷 航 准教授

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高精細カロリメータです。約一千万チャンネルの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 ILC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実験。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。

さまざまな強みを持つ仲間恵まれている

— どんな研究をされていますか？

ILCで使われる測定器の研究開発を行なっています。2030年代後半の稼働開始を目指すILCでは、電子と陽電子を光速近くまで加速して正面衝突させて、ヒッグス粒子を始めとするさまざまな粒子を作り出します。それを詳細に観測して、標準理論を超える新物理や新粒子を見つけ出したり、宇宙や物質の誕生の謎に迫ったりすることがILCの大きな目的です。

ILCで作られる2種類の測定器のうち、日欧が中心となって開発しているのがILD (International Large Detector) です。これは複数の測定装置が層状に重なった構造をしていて、そのうちの1つが電子や光子のエネルギーを測定する電磁カロリメータ (ECAL) です。私はECALの候補の1つであるシンチレータ電磁カロリメータ (ScECAL) を研究しています。

ScECALは、検出層部分にシンチレータ (荷電粒子との相互作用で光を発する物質) を用いるECALです。シンチレータが励起されることで生じる光 (シンチレーション光) を、半導体光センサーであるシリコン光電子増倍管 (SiPM) を用いて信号として読み出すことでエネルギーを測定します。しかしSiPMに一度に大量の光子が入射すると、検出上限を超えて飽和してしまいます。そ

ILC 計画 (大谷研究室)
博士課程1年

村田樹

TATSUKI MURATA



こで、SiPMに光子を直接当てて飽和現象を起こし、その飽和曲線を測定する研究が以前も行なわれていました。これに対して私は、シンチレータに光子を打ち込んでシンチレーション光を発生させ、それをSiPMで検出するという、実際の環境により近い飽和曲線を測定することに成功しました。この成果を使うことでより正確なエネルギー再構成が可能になると期待されます。

また私は、中国で建設されているScECALの大型プロトタイプの性能検証試験にも携わっています。そこで使われているシンチレータは45mm×5mmのストリップ状で、縦横交互に並べて格子状にすることで仮想的な5mm角の超高精細度が実現できます。そのシンチレータのどこにSiPMを取り付けるとより高い精細度が実現できるかについても、修士課程で研究しました。

— ICEPPに進学した理由を教えてください。

もともと宇宙や素粒子に興味があり、大学院ではそうした研究をしたいと考え、さまざまな分野の説明会に参加したり、先生方に話を聞きに行ったりしました。そうしたなか、ICEPPの説明会でILCの話聞いたのですが、それまでILCの存在は知っていたものの、もっと将来の計画なのかと思っていました。ですが建設候補地が決まっていたり、すでにILCの研究室もあるということに恥ずかしながら初めて知りました。素粒子研究であれば標準理論を超える新物理の探索をぜひしたいと思っていたので、それが可能なILCに行くしかないと思いました。自国の日本で大規模な国際素粒子実験ができるという点も志望理由の1つでした。

— ICEPPの魅力はどこにあると思いますか？

ICEPPではATLASやMEGの国際共同実験や、最近では量子コンピュータの研究なども行なわれています。そうしたILC以外の研究をしている同期や先輩、先生方と話す機会が多いので、別の視点から自らの研究のアイデアをもらえることが多々あります。

たとえばATLASの研究をしている同期からは、素粒子実験のノウハウを聞くことができました。ATLAS実験は歴史が長く、素粒子実験の流れが確立していますので、非常に参考になります。またMEGや量子コンピュータに関わっている同期からは、私が解析方法で悩んでいる時にアドバイスをもらいました。身近にさまざまな強みを持つ仲間がたくさんいるメリットを活かして、ScECALがILDに採用されるように、博士課程でも研究に励みたいと思います。

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。



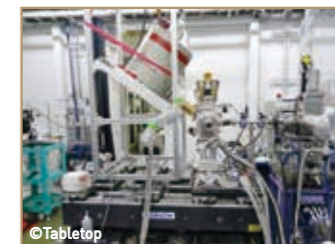
難波俊雄 助教

量子ビームや量子センサーを利用し、標準理論を超えた物理現象を探索する。小規模ながら高感度でユニークな実験により、暗黒物質の正体や真空の構造などを解明する。



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ク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)

暗黒物質の正体が隠れたセクターのU(1)ゲージボソンとなる隠れた光子 (hidden photon) を想定した検出実験や、SOPIX検出器を利用した太陽アクシオン検出実験など携わる。

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。



CAMPUS LIFE

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)

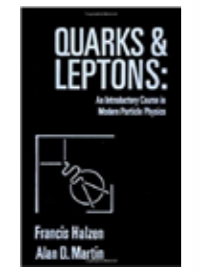
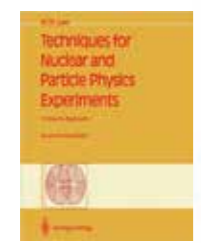


撮影・尾関祐治



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



ALUMNI'S VOICE



PROFILE

2013年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻（川本研究室）修士課程修了。16年同博士課程修了。同年より高エネルギー加速器研究機構（KEK）研究員、特任助教を経て、2022年4月より現職。博士（理学）。

自分の貢献やアイデアを活かして問題解決する喜びは、ICEPPで知った

標 標準型を超えた物理を探す大きな国際的研究をしたいと考え、ICEPPに進学したのは2011年のことです。ちょうど、CERNのLHCでヒッグス粒子や超対称性粒子等の新粒子発見が期待される頃でした。

修士課程では素粒子実験の基礎を学ぶため、当時行なわれていた「TREK実験」に参加しました。これは時間反転対称性の破れを測ろうとするもので、K中間子が π 中間子と μ 粒子、ニュートリノに崩壊する現象を調べます。そのためのドリフトチェンバー（飛跡検出器）の評価が、私の担当でした。カナダの研究所で検出器のビーム試験を行ない、データを解析してシミュレーションと比較しました。自分で検出器を使って実験し、データを取得する経験を積めたことは非常に有意義でした。

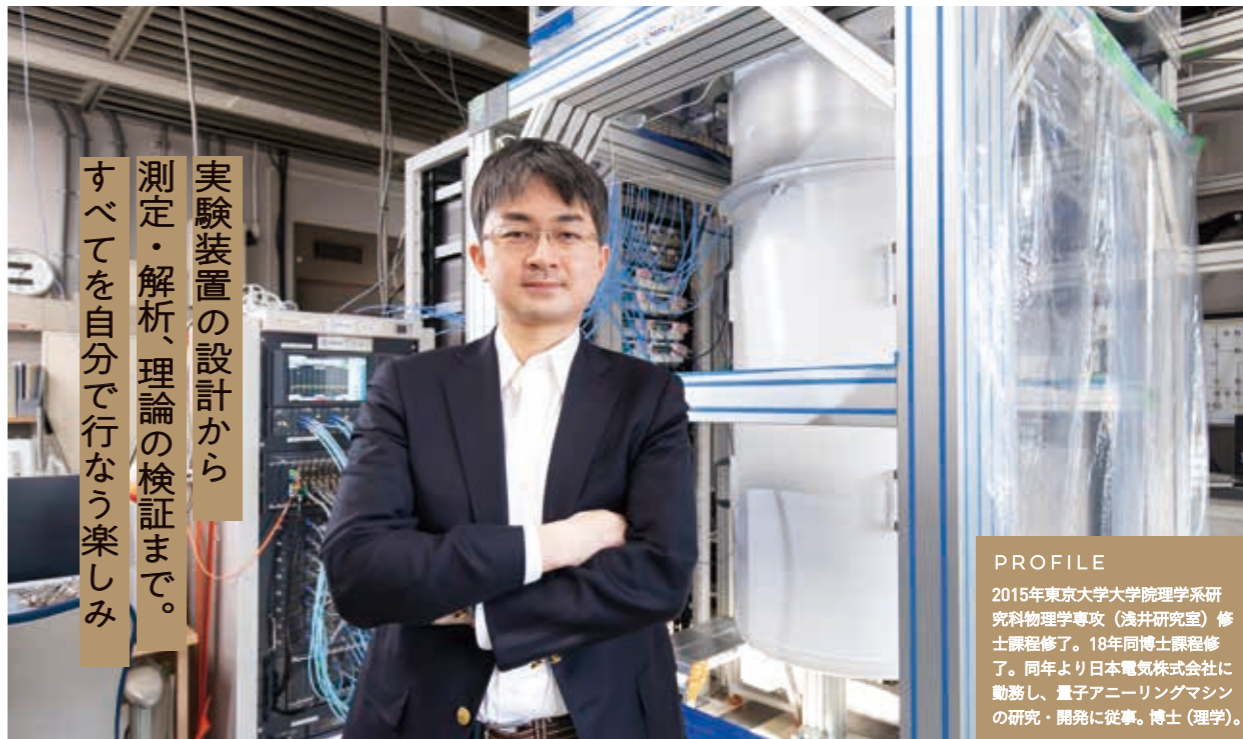
2013年に博士課程に進学し、LHC-ATLAS実験に参加しました。まず行なったのは、bクォークの識別手法の評価です。LHCのRun1では、bクォークの識別の不定性が物理解析の大きな系統誤差の要因でした。これを改善するため、飛跡情報を用いたbクォークを精度良く識別できる手法を評価しました。続いて博士論文のテーマとして「トップクォーク対に崩壊する重い新粒子の探索」に取り組みました。その際には、効率が向上したbクォークの識別を使って発見感度を向上させることができました。2015年に始まったRun2の初年度データを解析し

た結果、新粒子の兆候は得られなかったものの、その制限の更新に成功しました。自分が評価したものや自分のアイデアを研究に活かして一定の成果を上げることができたのは、非常に面白い経験だったと考えています。

現在は、茨城県東海村のJ-PARC（KEKと日本原子力研究開発機構の共同運営）で、円形加速器Main Ring（MR）の大強度化に向けたビームの運動力学に関する研究に取り組んでいます。ICEPPでの研究を通して加速器自体に興味を持ち、その開発やアップグレードに携わることによって新物理の発見に貢献したいと考えたことが、ここに来た大きな理由です。

MRで3 GeVから30 GeV（光速の99.95%）まで加速された大強度の陽子ビームは、ニュートリノやK中間子などの素粒子・原子核の実験を行なう施設に送られます。MRの大強度化はビームのパワーを現在の約2.5倍に増強する計画ですが、その実現に必須となるビームロス的大幅な低減が私の研究テーマです。ビームの調整方法の改善や、ビーム不安定性の原因の評価・対策などを行なうことで、大強度化達成を目指しています。

自分の貢献やアイデアを活かして未解決の問題に取り組める現在の状況は、ICEPP在籍時と重なるものです。研究の基礎や姿勢を教えてくださいましたICEPPの指導教員やスタッフ、先輩、仲間たちに感謝しています。



PROFILE

2015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。18年同博士課程修了。同年より日本電気株式会社に勤務し、量子アニーリングマシンの研究・開発に従事。博士（理学）。

実験装置の設計から測定・解析、理論の検証まで。すべてを自分で行なう楽しみ

学 部時代は東京大学理学部物理学科に所属し、大学院では万物の基本構成要素である素粒子を研究したいと思っていました。進学のタイミングがヒッグス粒子発見の時期に重なったこともあり、素粒子実験に行こうと考えてICEPPを選びました。

理学部物理学科では、学部4年生が研究室に仮所属し、実験や理論研究・勉強会などを行なう制度があります。私はそこで、オルソポジトロニウム（電子と陽電子が束縛されてできる、一種のエキゾチック原子）の精密分光というTabletop実験を行ないました。実験系のセットアップを自分で考え、シミュレーションと実測を比較して理論の検証を目指しました。ICEPP進学後も、非加速器の小規模実験に取り組み続けました。実験装置の設計から、測定・解析、理論計算やシミュレーションまで。全てを自分で行なうTabletop実験は非常に面白く、修士課程から博士課程まで一貫して続けました。

修士課程から博士課程前半までは、光子・光子散乱現象の探索実験を行ないました。量子電磁気学で预言される、実光子同士が仮想電子を介して散乱を起こすこの現象は、いまだ直接観測に至っていません。私は大強度X線自由電子レーザーであるSACLA（理化学研究所）を用いて実験を行ない、直接探索実験でX線領域では初の光子・光子散乱に対する断面積制限を得るという成果を挙

げました。博士課程後半は、未知の粒子であるALP（アクシオン様粒子）の探索に取り組みました。標準理論を超えた理論の中には、光と弱く結合する粒子の存在を预言するものがあり、その1つがALPです。私は放射光施設SPRING-8（SACLAに隣接）の強力なX線を用いて、結晶中の周期電場を利用してALPを探索しました。新粒子発見には至らずも、以前の直接探索実験では調べられてこなかった新しい領域に制限を与えることができました。

卒業後は企業研究者として新たな挑戦をしたいと考えてNECに入社しました。現在は産総研との連携研究室で、量子アニーリングマシンの研究・開発に従事しています。このマシンは「組み合わせ最適化問題」の高速処理などが期待されている、特化型の量子コンピュータです。私はハードウェアの担当で、超伝導体を使った回路の設計、理論計算、測定、解析などを行なっています。「最初から最後まで自分でほぼ全部やる」という今の業務スタイルはTabletop実験と同じだと言えます。

素粒子物理実験と量子アニーリングマシンや量子コンピュータは親和性が高く、シナジーを感じています。またTabletop実験でハードウェアからソフトウェアまですべてを一通り経験することは、後に大規模加速器実験で解析等を担当する場合も、あるいは企業研究者になる場合にも、ともに大きな強みになると思います。

TOMOHIRO YAMAJI
山道智博

TABLETOP実験
日本電気株式会社（NEC）
セキユアシステムズプラットフォーム研究部 主任

AINE KOBAYASHI
小林愛音

ATLAS実験
高エネルギー加速器研究機構（KEK）
加速器施設 助教

ALUMNI'S CHOICE

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。

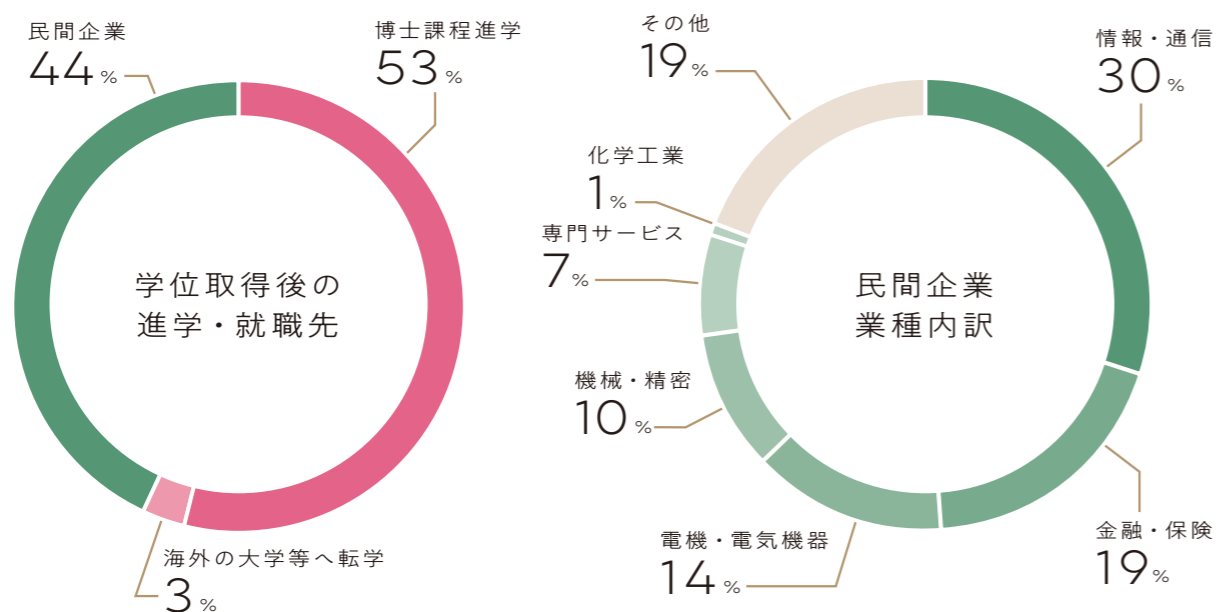
かつてなら、博士号取得者はそのまま研究の道に進むのが当たり前でしたが、今では民間企業への就職も増えています。それだけではなく、博士号を持つ卒業生のなかには、自ら会社を立ち上げた人もいます。

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

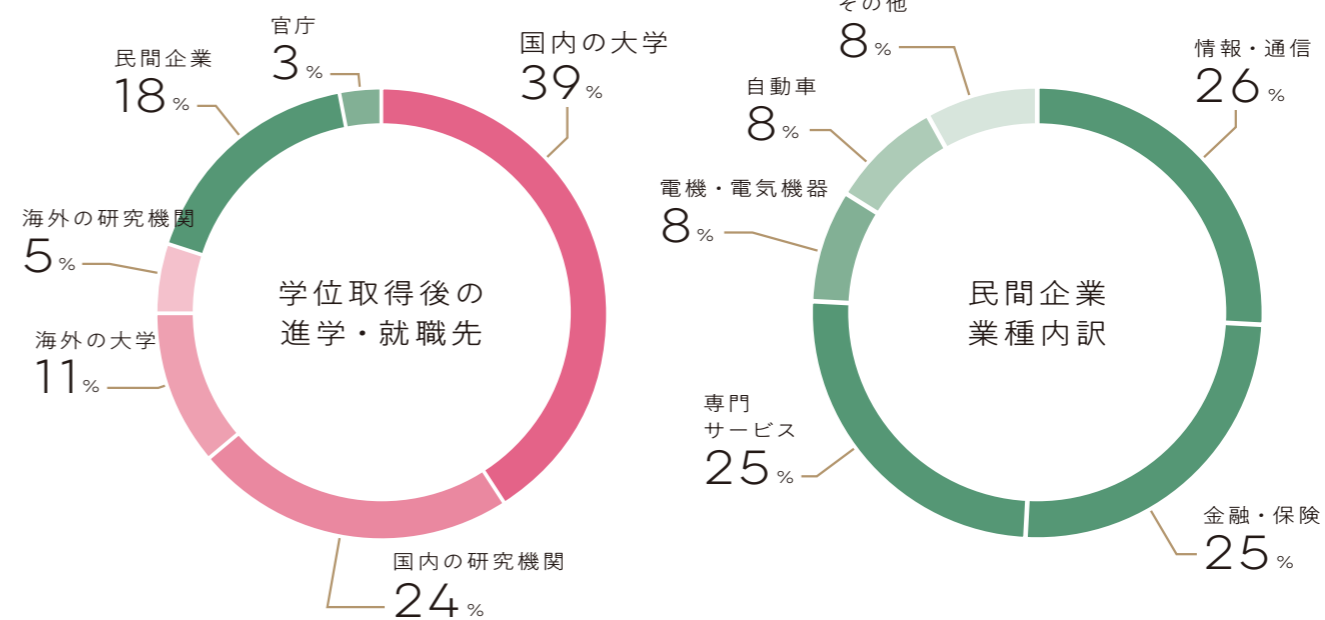
修士課程

※ 2000～2021 年度調べ



博士課程

※ 2000～2021 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、任天堂株式会社
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、株式会社三菱UFJ銀行、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
専門サービス	株式会社野村総合研究所、監査法人
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
国内の研究機関	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)、理化学研究所 (RIKEN)
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
電機・電気製品	矢崎総業株式会社
金融・保険	野村証券株式会社、BNPパリバ証券株式会社
専門サービス	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

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



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4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