



RESEARCH PROFILE

2023



世界はキャッチボールで満ちている

CONTENTS

03 DIRECTOR'S MESSAGE

「サイエンス百年の計」で真理と未来への扉を開く

04 COVER STORY

世界はキャッチボールで満ちている

14 HISTORY AND TREND

素粒子物理学の“今”を読み解く

16 COLLABORATION

国際共同研究で新たな物理学の地平を目指す

18 ATLAS EXPERIMENT

「真空・時空」の解明・初期宇宙の進化への実験的アプローチ

20 MEG EXPERIMENT

MEG実験をさらなる高みへ 大統一理論の証拠を探る

22 QUANTUM SCIENCE

量子コンピュータが導く未来の素粒子物理学

24 ILC PROJECT

素粒子の振る舞いをより細やかにとらえる

25 TABLETOP EXPERIMENT

多彩な技術で未知の物理現象を探究する

26 COLUMNS

もっと知りたい! 素粒子と実験装置の話

28 ICEPP UTOKYO

教育・組織概要

31 LAB GALLERY

ラボ風景



編集ディレクション 清水修 (ACADEMIC GROOVE MOVEMENT)
取材・文 清水修、豊原正剛
撮影 貝塚純一
アートディレクション 細山田光寛
デザイン 横山 曜 (細山田デザイン事務所)
Yo Hosoyamada
イラストレーション Yo Hosoyamada
秋本祐希 (マブチデザインオフィス)
協力 東京大学大学院理学系研究科・広報室

DIRECTOR'S MESSAGE

物理学は

新たな時代へ――

「サイエンス百年の計」で 真理と未来への扉を開く

東京大学素粒子物理国際研究センター長

浅井祥仁

SHOJI ASAI



素 粒子物理学は、物質や宇宙の成り立ちに迫る基礎科学です。小さな粒子を見るには大型の高エネルギー加速器が必要で、実験プロジェクトは大型化しています。それに対し、「社会の役に立つのか」と質問を寄せられます。多大な社会資源をつぎ込んで、どんな果実を社会にもたらすのか、と問われているのです。

この質問に、私はこう答えるようにしています。

5年や10年の短期間で、すぐに社会に役立つ何かをもたらすことはできません。ただ、私たちが取り組んでいるのは、「自分を取り巻く世界を知りたい」という人間の知的欲求を満たすための研究です。その価値を、どうかご理解いただきたい。

また、すぐには役立たないこの研究も、歴史を振り返れば、産業の基盤を成し、社会に大きな恩恵をもたらしています。物質の根源を探る研究から、電子の存在が100年前に明らかになり、エレクトロニクス（電子工学）産業が発展しました。X線や重粒子は医療で当たり前のように使われています。現代社会のインフラとなったインターネットのウェブ技術も、素粒子研究の総本山と言えるCERNで開発されたツールです。

大規模物理実験は、研究開発中の先端技術を導入するモデルケースにもなっています。基礎科学の研究から新たな技術が生まれ、基礎科学の発展のために、最先端の技術が積極的に導入される。素粒子物理学は、基礎科学であると同時に、「総合科学」であると言えます。

とはいえ、私たちがいま取り組む研究が、生活に役立つようになるには50年、100年の時間が必要になるかもしれません。言うならば基礎科学は、未来世代に向けた長期の投資です。「サイエンス百年の計」で、基礎科学へのご理解とご支援をいただけますと幸いです。

とかく基礎科学の分野では、先人たちが積み上げてきた蓄積が大きな意味を持ちます。2017年4月のセンター長就任以来、その蓄積を受け継ぎ、次代に受け渡すべく、これまでのセンターの歩みを踏まえて前に進んでいく所存です。

次代を担うのは、これから研究を始める学生のみなさんです。物理学の新時代を切り拓くべく、意欲と好奇心に満ちた学生の挑戦を歓迎します。「サイエンス百年の計」は、若き研究者の未来のためにも大きな意味を持つのです。

ICEPPのミッションは素粒子物理という基礎科学



世界はキャッチボールで満ちている

その昔、あらゆる物質は「原子」でできていると思われていました。しかし、やがて、原子が原子核と電子でできていることがわかりました。このうち、原子核は陽子と中性子からできていることがわかり、その陽子と中性子はクォークでできていることがわかりました。電子やクォークの内部構造は現在見つかっておらず、このような物質の最小単位となる粒子を「素粒子」と呼んでいます。銀河も太陽も地球も地球上のさまざまなモノも（私たちの身体さえも）この最小単位である素粒子が集まってできているのです。

一方、宇宙には4つの力が働いていると言われています。重力、電磁気力、強い力、弱い力……。このうち、「重力」と「電磁気力」は私たちも知っています。ニュートンが見た「木から落ちたリンゴ」は重力によって落ちたものですし、磁石と磁石は引き合ったり反発したりしています。さらに、私たちは日常生活では気づく機会がなかなかないですが、宇宙ではこの2つの力以外に「強い力」や「弱い力」もあります。実は、この4つの力は「素粒子のキャッチボール」で伝えられているのです。

長い年月をかけ、物理学者たちは「議論——意見のキャッチボール」をしながら、こうしたことを見つけてきました。そして、それが真実であることを「理論と実験のキャッチボール」で確かめてきました。

世界はキャッチボールで満ちている。
社会も学術も宇宙の法則も、みんなキャッチボールで動いていきます。

標準理論

4つの力は素粒子のキャッチボール

20世紀の物理学の到達点と言われる標準理論には「物質を作っている素粒子」と「力を伝える素粒子」の2種類が登場します。

「物質を作っている素粒子」はフェルミ粒子と呼ばれ、フェルミ粒子として6つのクォークと6つのレプトンが見つかっています。フェルミ粒子でできあがった物質には、4つの力が働きます。モノが地面に落ちたり、私たちが地面に立っているのは「重力」によるもの。そして、磁石が引き合ったり、しりぞけ合ったりするのは「電磁気力」によるものです。また、陽子や中性子ががちり結びついて原子核ができるのは「強い力」のおかげです。そして、地熱エネルギーのうちの一部は「弱い力」によって原子核が壊れた時に解き

放たれたエネルギーです。

もう1種類の「力を伝える素粒子」はボース粒子と呼ばれ、この4つの力を伝える役割を担います。特に電磁気力、強い力、弱い力を伝える素粒子は、ゲージ原理と呼ばれる理論が予言するボース粒子で、ゲージ粒子と呼ばれます。また、どんなゲージ粒子が力を伝えるかもわかってきています。電磁気力を伝えるのは光子（フォトン）、強い力を伝えるのはグルーオン、弱い力を伝えるのはW粒子とZ粒子です。

物質は相手の物質とゲージ粒子をキャッチボールすることで力を伝え合っています。宇宙というグラウンドの壮大なキャッチボールは、目には見えない極小のボールでプレイされています。

超対称性理論

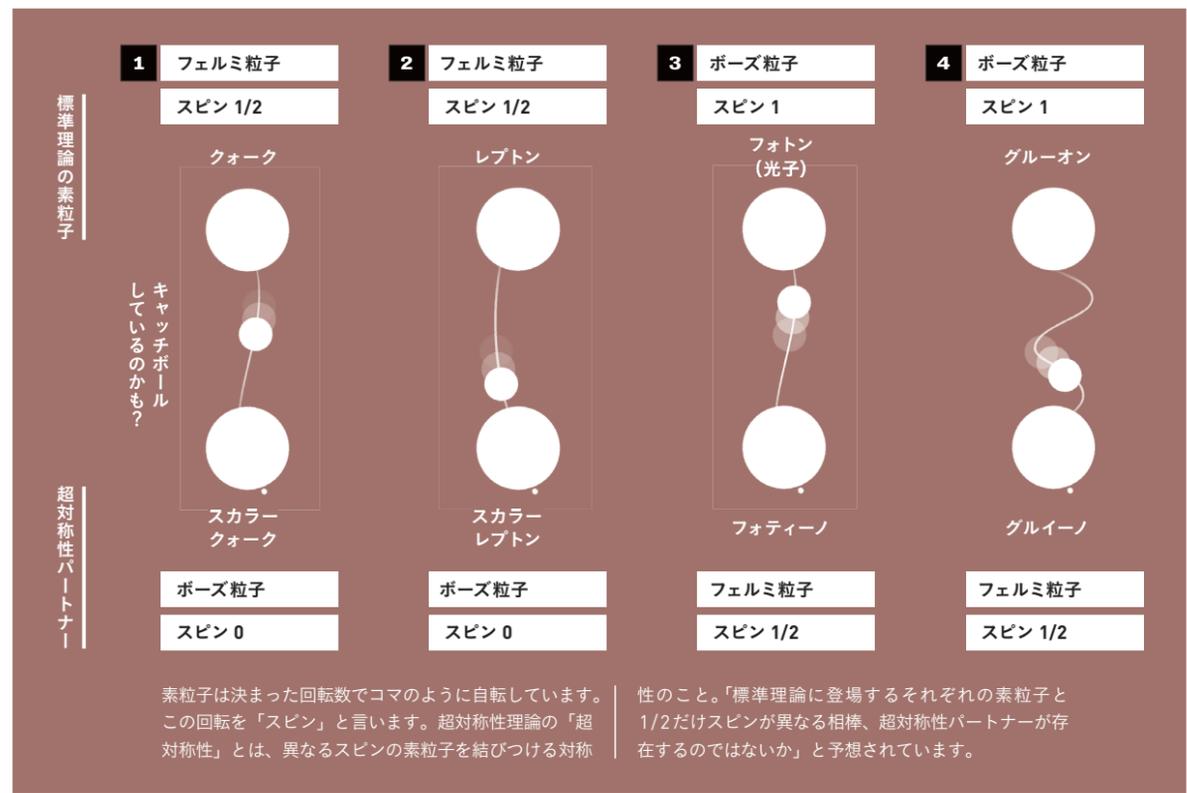
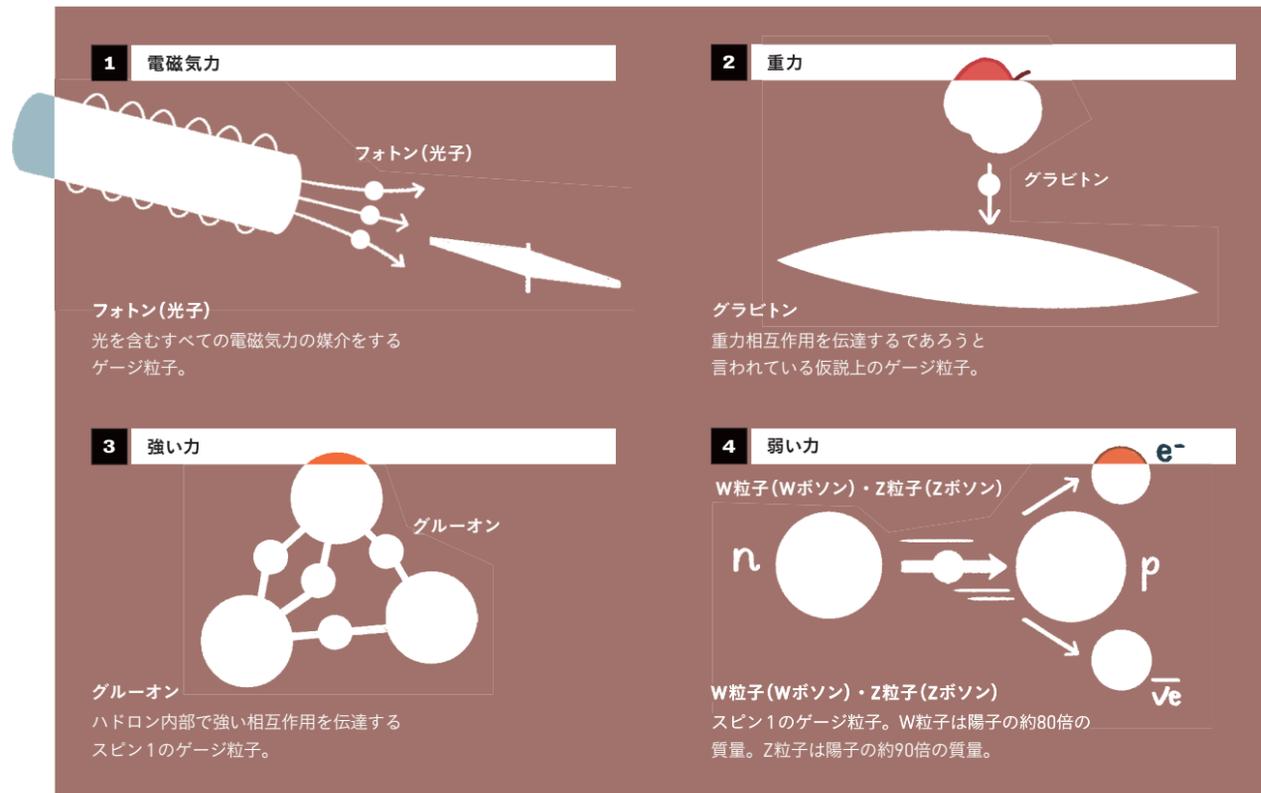
まだ見ぬキャッチボールの相手を探せ

現在知られている高エネルギー実験のほとんどを矛盾なく説明することができる標準理論は、世界中の物理学者たちが長い年月をかけて、宇宙の姿や仕組みを理論的に予言したものです。これは、極大（宇宙）から極小（素粒子）までの世界全体を貫く理論ですが、理論だけでは説明しきれない、物理現象があります。そこで、物理学者たちは標準理論を超える理論的枠組みの最有力候補のひとつとして「超対称性理論」を考え出しました。

この理論では、「きっと素粒子にはまだ私たちが見つけていない相棒がいるに違いない」というパートナーの存在を予言しています。クォークにはスカラークォークという「まだ見つからない相棒」がいるに違いない。同様にレプトンには

スカラレプトンという相棒が（例えば電子にはスカラ電子という相棒が、ニュートリノにはスカラニュートリノという相棒が）いるに違いないというわけです。そして、このまだ見ぬ相棒はこちらから投げたボール（ゲージ粒子）をキャッチしてくれるものと考えられています。現役の素粒子チームの各選手は、まだ見えない相棒とキャッチボールをしている可能性があるのです。その相棒を「世界で一番早く、実験で探し出したい」と願う研究者の熾烈な国際競争は続いています。

この「まだ見ぬキャッチボールの相手を探せ」という壮大なミッションが超対称性理論の実証実験には大きく作用し、高いエネルギースケールの実験が注目されているのです。



素粒子物理学者が 営々と編み上げてきた 「理論と実証の歴史」

浅井祥仁

現在、自然界には4つの力があると言われている。20世紀はじめの段階で、知られていた力は電磁気力と重力だけだったが、その後、素粒子の研究から、自然界にはさらに2つの力（強い力と弱い力）があることがわかった。強い力は陽子などの内部でクォークと

うしを結びつける力で、弱い力はベータ崩壊という現象が起きるときに働く。

この4つの力は、いずれも「ゲージ粒子」と呼ばれる粒子によって力が伝えられると考えられている。電磁気力はフォトン（光子）、重力はグラビトン、強い

力はグルーオン、弱い力はW粒子（Wボソン）とZ粒子（Zボソン）という粒子によって伝えられる。物理学者は昔から、複数の力を1つの理論で説明する方法を考えてきた。

19世紀後半、マクスウェルが電気のと磁気のと

を「電磁気力」としてまとめて説明できることを示した。アインシュタインは、一般相対性理論の発表後、重力と電磁気力の統一理論を目指して研究を続けたが、その夢は叶わなかった。ちなみに、アインシュタインが1916年、重力と時空に関する一般相対性理論で重

研究活動

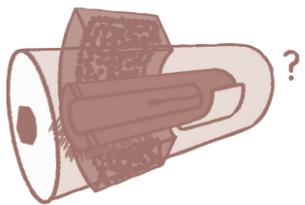
研究はキャッチボールで進んでいく

キャッチボールをしているのは素粒子だけではなく、素粒子を研究する物理学者たちもキャッチボールのように会話や議論をしながら研究

を進めていきます。日常のふとした何気ない言葉のキャッチボールから全く新しい研究テーマや手法が生み出されることもあるのです。



AYAKA MATSUSHITA
松下 彩華



Discussion 1

松下：MEG IIではRMD由来の低エネルギー由来のポジトロンを捕まえて、背景事象を理解することもやっています。
陳：しかもポジトロンが前後方に飛んでくるんだよね。下流は良いとして上流にはビームがいるんで、後ろに食らいながら前から来るポジトロンを検出するってやばいよね。
山本：検出器ビーム止めないように物質量の少ないガス検出器を開発中です。
陳：マテリアルを極限まで減らすって、できたらめっちゃくちゃかっこいいな。それは大きな変更聞こえるけど、追加するって感じなんだ。
古川：どんどん追加していくのってジブリみたいだね(笑)。



KENSUKE YAMAMOTO
山本 健介



Discussion 4

飯山：ミュオンビームが出るところって、PSIしかないの？
山本：そうです、しかも最強。
飯山：MEGのビームラインってもともとあったの？
山本：ビームラインは生命科学のために作られたもので、それを素粒子実験で応用してるんです。最近EDMを測定し始めたグループもいます。
飯山：生命科学って直流ビーム使うの？ミュオンを使って、ピラミッドとか透過して見るのはあるけど。
山本：PSIゲストハウスで偶然会った生命科学の人が説明してくれて、その時は「ん〜なるほど」と思ったんですけどね。
飯山：海外に行って違うフィールドの人と話すのは楽しいね。



MARIN FURUKAWA
古川 真林

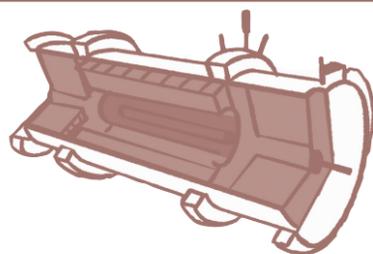
Discussion 2

陳：Run3の新しい検出器は、動いているの？
古川：えっ？動いてるか動いてないかって言うと、動いてるかもしれないけど。動かせるか動かせないかと言うと、動かしたくないかもしれない。
陳：新しいのはまだ走っていないってこと？
古川：一応レガシーシステムで走っていて、次のランに合わせたいけど、バレル方向のチャンネルだけ合えばいいと思ってます。

陳：そういう感じなんだ。LArはRun2とRun3の3年間くらいでアップグレードして、読み出し回路を全部替えようとしたけど、これやばいかもっていう先見の明がある天才がいて、万が一のためにレガシーシステムっていう古い検出器をキープしたんだよね。
寺師：もともとそうなんだよね。レガシーシステムって大きくしてるから。



TATSUMI NITTA
新田 龍海



KOJI TERASHI
寺師 弘二

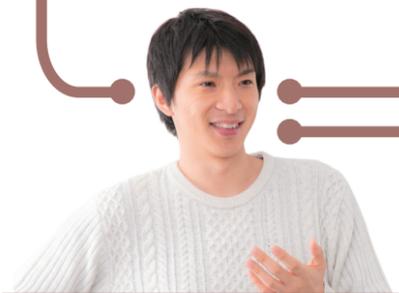


YUTARO IIYAMA
飯山 悠太郎

Discussion 5

新田：開発中のハードの性能はそこそこだけど、面白い物理に適用できれば。結構感度を高くしようとするとなoiseが乗りやすいし、素粒子のフォトンとか捕まえるときにはいいかもしれないパラメータってあるから。
永野：既に、ここを狙えば見つかるというペーパーは出てるんですか？
新田：全然出てないから計算するところから始めないといけないし、東大理論の研究者とコラボレ

ーションして色々と考えてる。素粒子と量子のオーバーラップは、意外に一番簡単なアイデアでも、結構それはいい！となりそうなのがする。
寺師：自分で量子ビット作ろうとしている人は確かに少ない。米国Fermilabは若干進めてるけど、実際に地下に持って行った人はいないし。素粒子の検出器としてやろうという雰囲気もでてるけど、論文もまだ数少ない。そういう自由度を出せるのは我々の強みなんじゃないかな。



SHION CHEN
陳 詩遠

Discussion 3

永野：ハードウェア研究の調子はどう？
新田：まあまあ。Googleが2029年までに開発を発表した100万Qbitだと後300年くらいはかかるけど、取り敢えず、量子ビットらしきものはできた。
永野：作るっていうのは設計して、企業に頼むんですか。
新田：全部自分で作る。浅野キャンパスにある武

田のクリーンルームが共同利用で使えるから。設計図を書いて写真みたいに描画・印刷するんだけど、それがナノメートルスケールだから、コントロールが凄く大変。同じことを繰り返して顕微鏡で見て、上手くできるパラメータを探すのが第一ステップ。
陳：新田さんはADMX実験出身だから、一緒にOISTに行ったり、ハード開発をやっています。



LENTO NAGANO
永野 廉人

力波 (アインシュタインが残した「最後の宿題」と言われている) の存在を予言し、2017年に米カリフォルニア工科大学のラリー・バリッシュ博士ら3人がノーベル物理学賞を受賞している。
4つの力をまとめて説明することができないか…、

物理学者たちがそう考えるなか、1967年にワインバーグらが電磁気力と弱い力を統一して説明できる「電弱統一理論」を提唱した。上で述べたW粒子とZ粒子はこの電弱統一理論の中で、弱い力を伝えるものとして予言されたもので、1983年にCERNのルビア博士

らの実験で発見され、電弱統一理論を実証した。
2012年7月にCERNのLHC加速器を用いた実験(ATLASとCMS)で発見されたヒッグス粒子は、この電弱統一理論で重要なものであった。実は電弱統一理論では、W粒子とZ粒子の質量はもともと0であり、

それが自発的対称性の破れによって質量をもつようになったと考えられている。提唱者(ヒッグス博士らは2013年ノーベル物理学賞を受賞)にちなんで「ヒッグス機構」といい、そこで出てくるのが標準理論で唯一見つかっていなかった「ヒッグス粒子」である。「物質

研究活動

たくさんのキャッチボールが 新たな知見を生み出していく

研究者のキャッチボールは1対1の対話ばかりではありません。数人の研究チームの会話から学会のような大人数の議論に至るまで、さまざまな

場面で多様な研究者たちの活発な言葉のキャッチボールによって、素粒子物理学の新たな知見が生み出されていくのです。

Elena あなたが開発した新しいトリガー回路の機能の使い方を教えてもらえるかしら？

もちろん！ 端末から回路にログインして、このコマンドを打つと、その新機能をスイッチオンできるよ。今一緒に試験してみようか？

Akihiro

Elena それはいいね。この前準備した試験用のデータがあるから…、データセット名を教えるからそれを使ってみよう。

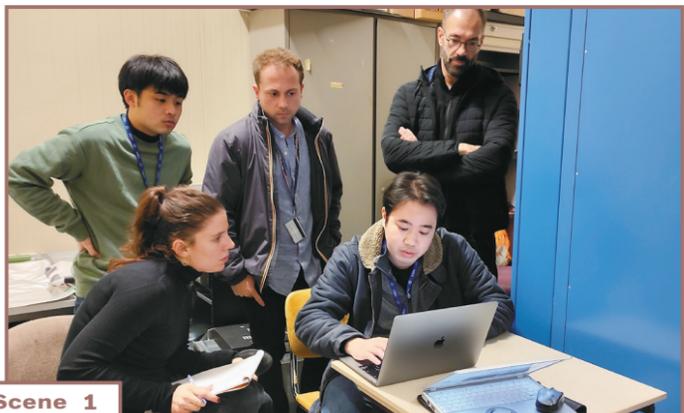
OK、ありがとう。それじゃあ、そのデータをトリガー回路に入れて試験してみよう。結果はすぐに出るよ。

Akihiro

Ricciardo 結果が出たね、どうかな？ お、シミュレーションで予定された通りの改善が見えるね！素晴らしい。これは大変優れた機能だなあ。

本当にありがとう。この機能、ローマ大学で私たちの装置にも実装してみるわ。また上手くいったら連絡するね！

Elena



Scene 1

ATLAS実験ミュオントリガーテストベットにて



Scene 2

ATLAS実験 コントロールルームにて

Clement お、LHCのステータス変わったぞ。次こそ来そうだ。システムは安定？

すべてグリーン（正常）！ **Adriana**

Yuji いよいよだね！今のところ大丈夫。衝突が起り始めたら、このカウンターが動き出す。どうかな、来るか？

（しばらくして…）

ATLASは準備OK？ **From LHC**

Jorge (オペレーション責任者) ATLAS 準備OK！

お、来た？このレートはCollision！上がってきたー！Event displayでるか？ **Yuji**

Yuji Tom, ケーブルタグ付け、手伝ってくれてありがとね。

いやいや、こういうのもいいよね。 **Tom**

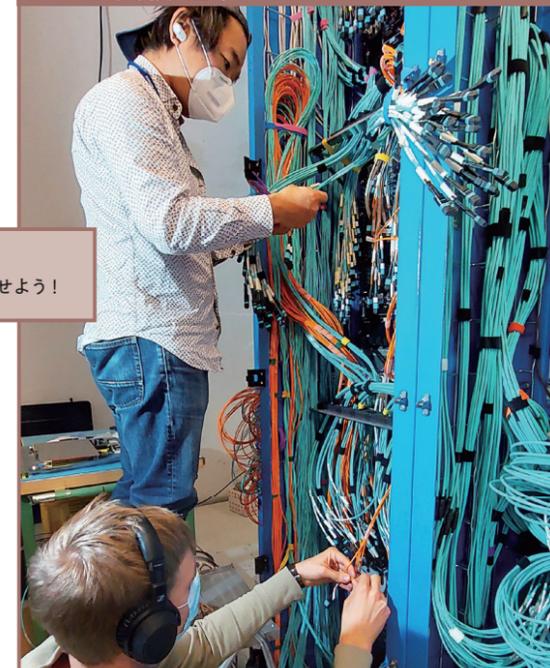
Yuji これがないと、今あるタグでも分かるんだけど、ボードの交換の時に間違えるかもしれないからね。

それにしてもATCAの冷却ファンはホントにうるさいよね。ノイズキャンセリングヘッドホン付けてもらうさい。 **Tom**

Yuji そうそう、骨に直接来るんだよね。90デシベルくらいあるからね。早く終わらせよう！

Scene 3

ATLAS実験 地下カウンティングルーム USA15にて



Joe さっき自転車に乗っているの見たけど、かなりスピード出してたね。

そう？そんなにでてないよ。 **Ethan**

Joe いや、30 km/sくらい出ていたよ。

じゃあ、僕たちは迷子になったね。(Then, we are lost now.) ※¹ **Ren**

Scene 4

CERNサマースチューデントプログラムにて



※¹ Heisenbergの提唱した不確定性原理によると、モノの位置と運動量（速度）は同時に決まらない。よって速度を決めると位置が決まらなくなった（迷子になった）という話。

Clement Graphana (モニタリング・ツール) でも見えてる。全リンク問題ない。Look, Got Event!

Whooooooo! パチパチパチ **みんな**

Nikiforos What's rate?

750 Hz.. Let's look at Histogram.. DT is stable, Timing, ok! **Clement**

すばらしい！これは我々すべてにとって価値のあることだ。過去最高エネルギーのビームが交差して世界最高エネルギーでの衝突をとらえた歴史的瞬間だ。ここにいるすべてのExpert、特に若い研究者にとってはLife time eventだ！

Andreas
(Spokes person)

「なぜ質量があるのか」という根源的な謎の解明に最初に道筋をつけたのは、南部陽一郎博士（2008年ノーベル物理学賞受賞）である。また、標準理論はクォークとレプトンが物質の基本粒子であると考え、これらの間に働く相互作用は電弱統一理論と量子色力学で記

述されるとする理論である。ヒッグス粒子発見の後、標準理論の背後に隠れていると確実視される新しい物理の発見に向けて各国の研究者が総力を上げて挑んでいる。標準理論では説明できない宇宙に存在する暗黒エネルギー、暗黒物質の

謎、また物質優勢宇宙の謎、宇宙初期には実現されていたとされる力の統一など、新物理の存在が不可欠と考えられる間接的な証拠が多く見つっている。それにも関わらず、これまでの実験データのほぼ全てが標準理論で説明可能であり、強固な標準理論の揺るぎな

いほころびの決定的証拠をあらゆる手段を尽くして、いち早く発見しようとする試みが繰り返されている。世界最高エネルギー加速器を用いてこれまで生成できなかった重い新粒子を探索する方法は素粒子物理学の王道であり、LHC加速器のRun3（2022年開始）と

素粒子物理学の進展

「理論と実験のキャッチボール」で 少しずつ謎は解明されていく

素粒子物理学者は統一された原理を構築すべく
営々と研究を積み重ねてきました。理論が提唱さ
れ、それを実験で確かめる。その結果を受けて新

たな理論が提唱される。そのような「理論と実験
のキャッチボール」によって、宇宙の根源的な謎
を解明してきました。

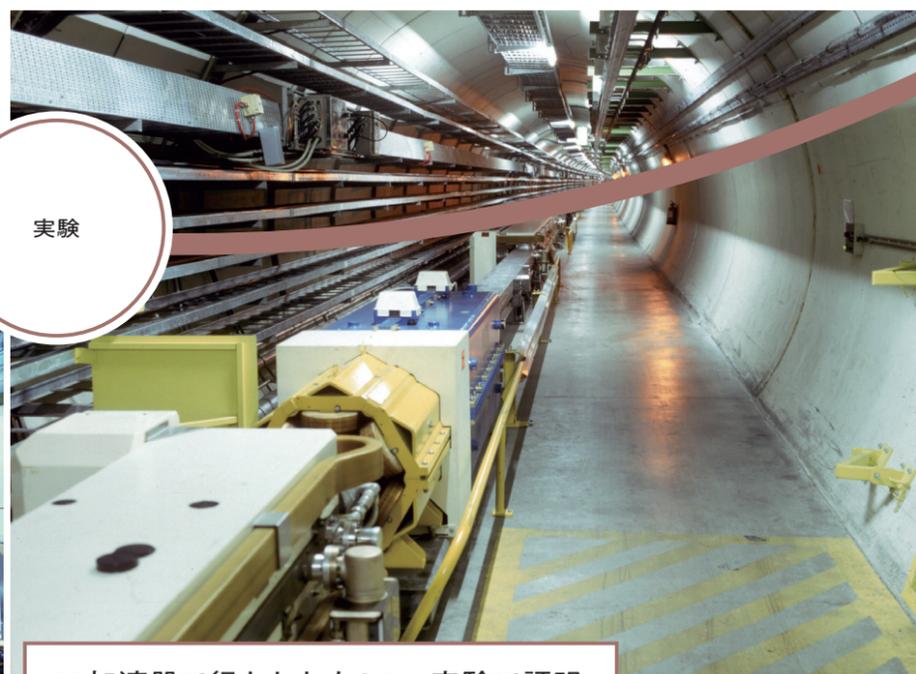
素粒子は3世代あると予言した小林・益川理論

私たちの目に見える世界では、重力も電磁気
力も左右の区別に関係なく同様に働きます。し
かし、極小の世界の「弱い力」は左右反転する
と違う動きをするという実験結果が出ました
(パリティ対称性の破れ)。その後、この理由とし
て「左右反転した粒子は反粒子だからだ」とさ

れました(CP対称性)。ところがさらに、CP対
称性も破れていることが実験で明らかになりま
した。そこで出てきたのが「小林・益川理論
(1973年)」です。「素粒子は3世代あるはずだ
。そう考えればCP対称性が破れていても良いこ
とになる」という理論でした。



理論



実験

LEP加速器で行なわれたOPAL実験で証明

CERNのLEP加速器(1989年完成)は円
周27kmの加速器です。4つの検出器
(ALEPH、DELPHI、OPAL、L3)が設置
され、このうち、OPALを用いた国際
共同実験にICEPPの研究者が参加し
ました。OPALグループは小林・益川
理論の予言通り、素粒子が3世代ある
ことを実験によって突き止めました。

LEP加速器

OPAL実験の検出器

高輝度化(2029年開始予定)の後、ヒッグス粒子の詳
細な研究を通して新物理を探索する電子陽電子衝突型
加速器が最優先で、100TeVを目標にする未来の円型
加速器(FCC)計画も真剣に検討することが、更新さ
れたヨーロッパの高エネルギー物理に関するロードマ

ップ「ヨーロッパ戦略」にも明記されてい
る。
一方、大強度加速器を用いて超高エネルギー領域で
稀に起こる新物理現象を量子効果を通して発見するべ
く、B中間子の精密測定を行なうBelle II実験、K中間

ヒッグス機構で存在が

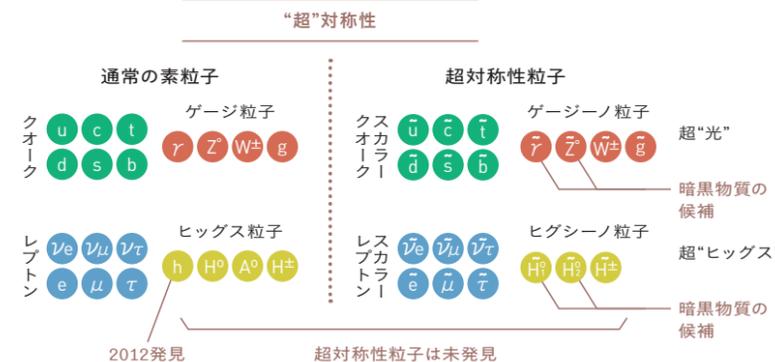
予言されたヒッグス粒子

1964年、ヒッグス博士らによって質量の起源を説明
する理論「ヒッグス機構」が提唱されました。「弱い力」
を伝えるゲージ粒子(Wボソン・Zボソン)と12種類のフ
エルミ粒子に質量があることを自発的対称性の破れか
ら説明するものでした。この理論では未知の素粒子
「ヒッグス粒子」の存在が予言されていました。



理論

研究者は超対称性理論の証明に挑む!



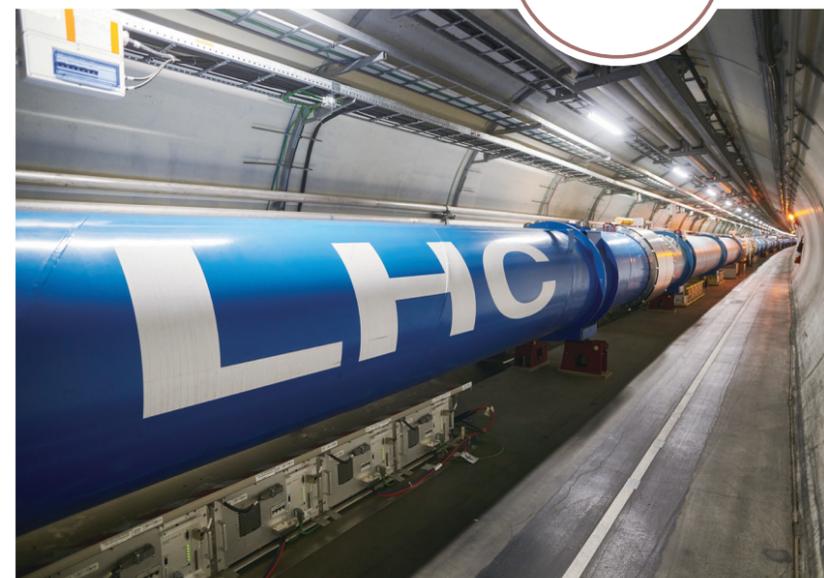
- 超対称性で考える利点
- 宇宙の暗黒物質の解明
 - 力の大統一理論
 - ヒッグス粒子が存在できる
 - 小さい宇宙(素粒子)が見ている時空

いまここ!!
理論

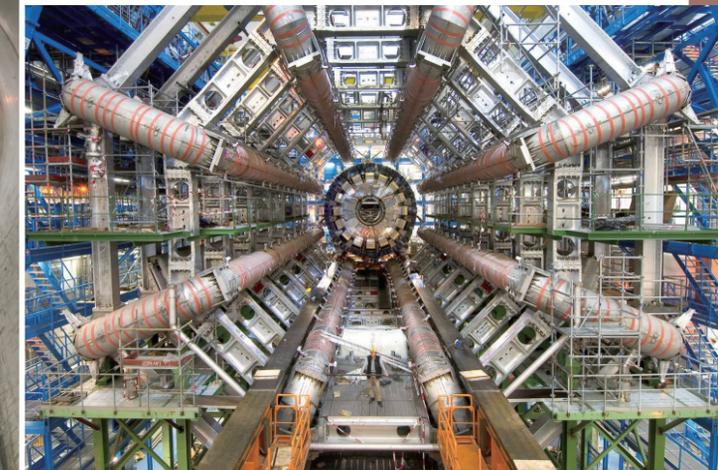
LHC加速器で行なわれた

ATLAS実験とCMS実験で発見

2012年、CERNのLHC加速器を用いたATLAS実験と
CMS実験でヒッグス粒子が発見されました。本セン
ターの研究者たちはATLAS実験グループを主導し、
教科書を変える発見に大きく貢献しました。



LHC加速器



ATLAS実験の検出器

子の精密測定、大量のミュー粒子を使った実験等も
精力的に行なわれている。超対称大統一理論や余剰
次元、超対称シーソー理論などから予言されている
レプトンフレーバーを破るミュー粒子稀崩壊を探索
する実験MEG IIもついに2022年より始まっている。

物理学者は宇宙や自然の成り立ちを根本から分か
りたいという人類共通のテーマに挑むため、次に立
ち向かうべき理論や実験、そして世界第一線の研究
者や次代を担う若い世代に熱いボールを投げ続けて
いく。

微細な素粒子の世界を切り拓いてきたのは、100年以上にわたる物理学者たちの絶えざる営みだ。素粒子物理学の“今”に至るまでの道のりと、“今”の素粒子物理学が取り組む最前線のテーマを読み解く。

1 原子の内部構造

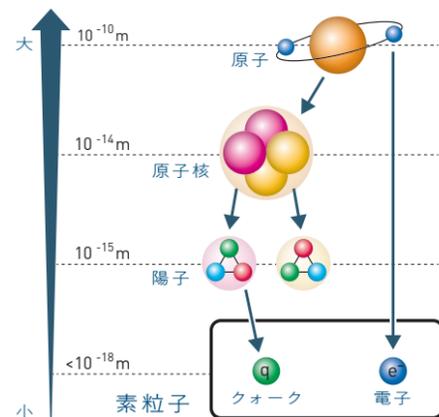
原子は素粒子できている

物質の最小単位は「原子」ではない。そのことが分かったのは、20世紀の幕開けを目前に控えた1897年のことだ。「電子」の存在が発見され、原子に内部構造があることが明らかになった。1911年には、「原子核」が発見され、その周りを電子が回っていることが突き止められた。

物理学者の探求は、原子核そのものへと向かう。1919年に「陽子」が、1932年には「中性子」が発見され、原子核が陽子と中性子によってできていることが解き明かされた。

だが、その後の宇宙観測技術や加速器 (p26参照) 実験技術の発達により、より小さな粒子が存在することが徐々に明らかになる。1964年、「陽子」や「中性子」を構成する「クォーク」という「素粒子」の存在が予想され、1969年にはアメリカの加速器実験で「クォーク」が存在する証拠が検出された。

こうした研究の積み重ねにより、物質の最小単位としての「素粒子」の正体が明らかになった。なお、「電子」も素粒子のひとつである。



2 標準理論とは何か

20世紀の物理学の到達点

標準理論とは、現代素粒子物理学の基本的な枠組みのことだ。1970年代半ばに体系化され、「20世紀の物理学の到達点」とも言われるこの理論には、17の素粒子が登場する。

当初、「クォーク」は3つの種類があると考えられていたが、1973年には6種類のクォークの存在が予想された(小林・益川理論)。同様に、電子の仲間である「レプトン」も6種類あるとされ、すべて20世紀のうちに発見された。自然界には物質と物質の間に力が働き、そうした力も素粒子が媒介すると考えられている。電荷を持つ素粒子どうしに働く「電磁気力」は、「光子(フォトン)」が伝える。電気や磁石の力を生み、原子核と電子を結びつける「光子」の存在は、20世紀はじめから知られていた。

クォークが陽子や中性子を構成し、陽子や中性子が原子核にまとまるのは、「強い力」が働くからだ。その力は、「グルーオン」が媒介する。クォークやレプトンに作用し、原子核の崩壊現象を引き起こす「弱い力」は、2種類の「ウィークボソン」によって伝達される。これら2つの力は、1970年代から80年代にかけて存在が突き止められた。なお、日常生活で身近な「重力」も同様に「重力子」によって媒介されると考えられるが、重力は素粒子の世界では弱すぎて無視できるとして、標準理論では扱われていない。

1964年に質量の起源と予想されたヒッグス粒子は、標準理論のなかでも特殊な素粒子だ。2012年の発見で標準理論の最後のピースは埋まったかに見えた。

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ u ダウン d	チャーム c ストレンジ s	トップ t ボトム b
レプトン	eニュートリノ e 電子	μ ニュートリノ μ ミュー粒子	τ ニュートリノ τ タウ粒子
強い力	グルーオン g		
弱い力	Wボソン W Zボソン Z		
電磁力	光子 γ		
	ヒッグス粒子 H		
	ヒッグス場に伴う粒子		

力を伝える粒子

標準理論に含まれる素粒子

3 標準理論の限界

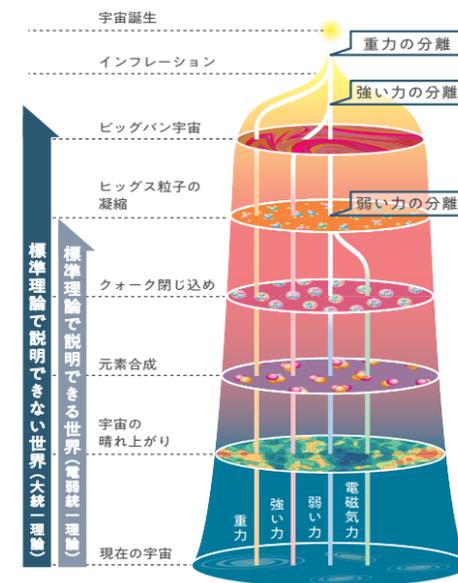
標準理論が直面するいくつかの限界

標準理論は、早くから限界も指摘されてきた。そのひとつが、既に見たように「重力」を扱えないことだ。

現代の物理学では、「重力」、「電磁気力」、「強い力」と「弱い力」の4つの力を統一的に説明する究極の理論の構築を目指している。138億年前の原初宇宙では、ただ1つの力が存在し、時間とともに4つの力に分岐したのではないかと考えられている。その謎を解く鍵を素粒子が握っているとされるが、「重力」は標準理論の射程外とされているだけでなく、「重力」以外の3つの力を統一する理論(大統一理論)もまだ完成していない。

もうひとつの限界は、宇宙に存在すると考えられる物質やエネルギーのうち、標準理論で説明可能なのはわずか5%にすぎないことだ。天文観測技術の発達により、宇宙には目に見えない(光を発しない)大量の謎の物質「暗黒物質(ダークマター)」が存在することが1960年代半ばに明らかになった。さらに1998年には、宇宙が現在、加速膨張していることが突き止められたが、その理由が解明されておらず、正体不明のエネルギー「暗黒エネルギー(ダークエネルギー)」の存在が指摘されている。それぞれ、宇宙の27%と68%を占めるとされる。

さらに、LHCで発見されたヒッグス粒子の質量が、大統一理論や究極の理論のエネルギースケールに比べてはるかに軽いという謎がある。さまざまな点で、標準理論を超える理論が求められている。



4 標準理論を超えて

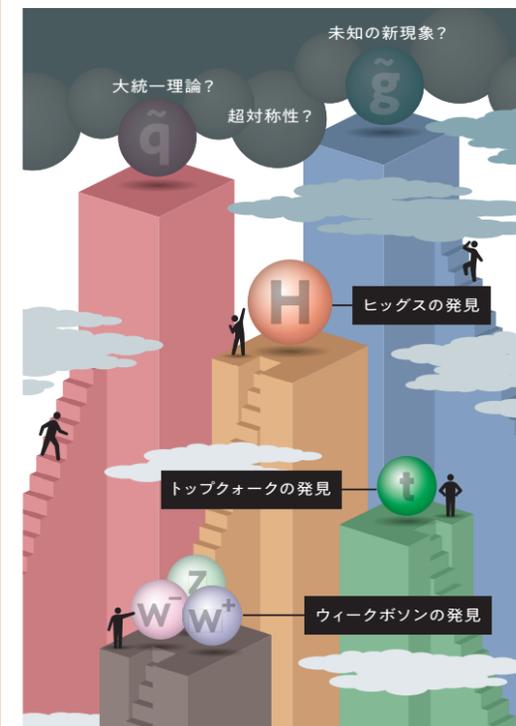
標準理論を超える究極の理論とは

素粒子物理学は、標準理論を拡張する新たな理論の構築と、それを証明する観測や実験に挑み始めている。

研究者たちの期待を集めているのが、「超対称大統一理論」だ。この理論では、標準理論に登場する17の粒子に加え、各粒子に対してパートナーとなる粒子「超対称性粒子」の存在を予言している。

もっとも軽い「超対称性粒子」は「暗黒物質(ダークマター)」の候補であり、ヒッグス粒子の質量の軽さを自然に説明することもできる。重力を除く3つの力を統一的に理解する「力の大統一」も可能になる。研究者たちが次に狙うのは、「超対称性粒子」の発見であり、「超対称大統一理論」を実証する現象の捕捉だ。東京大学素粒子物理国際研究センターが力を入れて取り組む実験も、そのためのものだ。

さらに、厄介な「重力」をも統合する究極の理論も提唱されている。それが、素粒子を振動する「ひも」ととらえる「超ひも理論(超弦理論)」だ。この理論を実証する実験方法ははまだ考え出されていないが、素粒子物理学の歴史は、先人たちの予言を実証する実験技術の発展の歴史でもある。素粒子物理学がその地平に辿り着く日も、そう遠くはないかもしれない。



本 センターは、国内外の研究機関と協力し、素粒子物理学の国際共同実験を行なっています。主な取り組みは、右に挙げたATLAS実験、MEG実験、ILC計画、Tabletop実験（主に国内での研究）の4つの実験・計画と、先端戦略分野の量子AI研究です。

本センターの歴史は、1974年まで遡ることができます（下図参照）。小柴昌俊先生が前身組織である理学部附属高エネルギー物理学実験施設を創設されてから約50年間、研究の卓越性を追求し続けています。

その後、世界最高エネルギーの加速器を用いた国際共同実験を展開するため、5度の改組を経て現在に至ります。1994年には理学部を離れて大学直轄の全国共同利用センターとなり、2010年には文部科学省から「共同利用・共同研究拠点」の認定を受けました。2022年には認定が更新されて新たな6ヶ年が始動し、国内外の研究機関・研究者との連携をなおいっそう強めるとともに、拠点機能の拡充に努めています。

PAGE 18
ATLAS実験

ATLAS実験は、スイスのジュネーブ市郊外、スイスとフランスの国境に位置するCERN（欧州合同原子核研究機構）で行なわれている国際共同実験です。

CERNは、素粒子物理の研究のため、1954年に欧州各国の共同出資で設立されました。世界の素粒子物理学研究者の半数以上（約1万人）が訪れ、世界最高水準の研究が進められています。本センターも1980年代から共同実験に参加しています（下図を参照）。

CERNが誇る、世界最高の衝突エネルギーの円形加速器LHC（大型ハドロン衝突型加速器）では、本センターが参加するATLAS実験が執り行なわれ、さまざまな素粒子現象の解明を目指します。昨年より第3期実験を開始し、LHCの高輝度化に向けた開発研究も推進しています。



欧州合同原子核研究機構（CERN） ©CERN

PAGE 20
MEG実験

MEG実験では、「標準理論」を超える「超対称大統一理論」を検証します。電子の仲間の「 μ 粒子」が引き起こす非常に稀な現象の観測を目指しています。2008年から、スイス・チューリッヒ郊外のPSI（ポールシェラー研究所）で実験を行なっています。PSIは、 μ 粒子や中性子の生成装置、自由電子レーザーや放射光施設など、独自の研究設備を保有しています。

MEG実験は、本センターの研究者が中心になって設計・提案し、イタリア、スイス、アメリカ、ロシアの研究者たちと取り組んでいます。2013年夏に第1期実験を終え、結果を2016年3月の国際会議で発表しました。観測感度を1桁高める第2期実験（MEG II）を昨年開始し、本格的なデータ取得により、世界に先駆けて前人未至の領域を探索します。

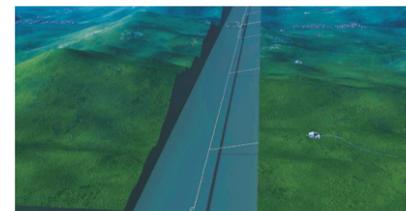


ポールシェラー研究所（PSI） ©PSI

PAGE 24
ILC計画

ILC計画は、次世代の加速器建設プロジェクトです。アジア・欧州・北米の研究者たちが共同し、2030年代後半の稼働を目指して検討・準備が進められています。ILCは、CERNのLHCと異なる線形の加速器で、このタイプで世界最高エネルギーとなる予定です。加速器の性質上、LHCより高精度の実験が可能となるため、ヒッグス粒子の詳細な性質の解明が進み、新物理の手掛かりが得られると期待されています。

ILCの建設は、日本の北上山地が有力候補地に挙がっています。計画が実現すれば、日本の素粒子物理学研究はもとより、関連する科学技術産業や周辺自治体にも大きな波及効果をもたらします。本センターの研究者たちが計画検討組織の要職に就任し、精力的に活動しています。

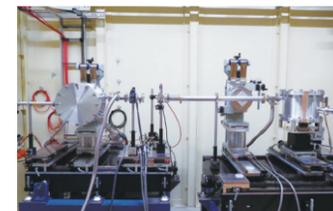


ILC 完成予想図 ©Rey.Hori

PAGE 25
TABLETOP実験

Tabletop実験では、大型加速器を使わずに、低エネルギーでも独創的なアイデアと多彩な実験手法を駆使して隠れた素粒子現象を探ります。目指すは「真空」の複雑な構造の解明です。

実験の鍵は2つあり、ひとつは「光」の技術の活用です。X線、可視光、赤外線レーザーや電波、ミリ波光源など、多様な光を組み合わせることで実験を行ない、真空の歪みの検出を目指します。もうひとつは、電子と陽電子のペアからなる粒子「ポジトロンウム」です。この粒子のなかには光や真空と似た性質を持つものがあり、それらの違いを精密に調べ、真空の性質を明らかにします。



Tabletop実験の実験装置のひとつ



センターの歩み

「真空・時空」の解明 初期宇宙の進化への実験的アプローチ

ATLASとは、CERNのLHC加速器を用いて行なわれている実験プロジェクトであり、素粒子を探索する検出器の名称でもあります。ATLAS検出器は、全長46m・直径25m・重さ約7,000トン、1億チャンネルのセンサーが組み込まれた巨大な精密測定装置で、ヒッグス粒子を発見した2台の検出器のうちのひとつです。

LHCは、陽子を世界最高エネルギーまで加速して衝突させ、素粒子現象を実験的に観測するための円形衝突型加速器です（p26-1参照）。陽子同士の衝突エネルギーは、ヒッグス粒子発見時（2012年）で8 TeV（テラ電子ボルト）。当時すでに世界最高でしたが、2015-2018年の第2期実験（Run2）には13 TeVで運転し、2022年から始まった第3期実験（Run3）では13.6 TeVに到達しました。

2019-21年の加速器運転停止期間中に、入射加速器群を大幅に改良した結果、年間蓄積データ量を大幅に増加できることが2022年度の運転で実証できました。Run3のデータを使って、暗黒物質（ダークマター）の候補となる超対称性粒子の発見や、ヒッグス粒子の自己結合定数の測定に向けた研究を加速させます。宇宙初期に生じたと考えられる宇宙進化の鍵を、直接的に実験的に研究していきます。

ATLAS実験は、世界42ヶ国から181の大学・研究機関が参加する国際共同研究プロジェクトです。約1,200人の大学院生を含む約3,000人の研究者が携わり、ヒッグス粒子の精密測定や「標準理論」を超える新物理の探索に力を注いでいます。日本の13の大学・研究機関からも、研究者・学生およそ180人が参加し、「ATLAS日本グループ」として海外の一流の研究者たちと肩を並べ、最先端の研究を進めています。そのうち30人ほどの研究者・学生が本センターから参加しています。

「ATLAS日本グループ」は、1994年4月の発足以来、実験の中心的役割を担っています。ATLAS

検出器の立案設計に関わったほか、日本企業の協力のもと、超伝導ソレノイド、シリコン飛跡検出器、ミュオン検出器などを建設してきました。また、2009年からの本格的な衝突実験データ取得に合わせ、本センターに「ATLAS地域解析センター」（p26-2参照）を構築し、物理解析を推進してきました。ヒッグス粒子発見における日本の物理解析チームの貢献は、世界的に高く評価されています。

Run3のデータ取得・物理解析と並行して、2029年開始予定の高輝度LHC実験の準備も進めています。高輝度LHCでは陽子衝突頻度を現在の約3倍に高め、ATLAS検出器や計算機システムの性能を大きく向上させます。これらの改善により、Run3完了時までには得られるデータ量の10倍相当を蓄積することが可能となり、さらなる高感度探索、高精度の測定を進めていきます。本センターは、高速・高効率・高精度を実現する新しいトリガーエレクトロニクスや、人工知能・量子コンピュータ技術の開拓による次世代コンピューティングモデルの開発に挑戦しています。



LHC加速器
LHCは地下100mのトンネル内にある。ここで生まれる高エネルギー状態は、宇宙誕生直後に起きたビッグバンに匹敵する。

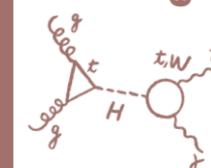


石野雅也 教授

- ATLAS日本グループ共同代表者
- ATLAS実験 運転総責任者（2017-18年）
- ミュオントリガーアップグレード責任者
- ATLAS実験執行委員会メンバー

略歴

- 2000年 博士(理学)
- 2001年 東京大学素粒子物理国際研究センター助手
- 2009年 高エネルギー加速器研究機構(KEK)素粒子原子核研究所准教授
- 2011年 京都大学大学院理学研究科准教授
- 2016年 東京大学素粒子物理国際研究センター教授



MEG実験をさらなる高みへ 大統一理論の証拠を探る

MEG実験とは、電子の仲間である「 μ 粒子」が、 γ 線を放出しながら電子に崩壊する「 $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊」という事象を観測するための実験プロジェクトです。「 μ 粒子」とは、電子と性質がほぼ同じで電子の200倍の質量を持つ「荷電レプトン」に属する素粒子のことです(p27-5参照)。「 $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊」は、「標準理論」では起こりえないと考えられていますが、宇宙や素粒子に働く力をより包括的に説明する「超対称大統一理論」(p15参照)では、数千億~数十兆回に1回程度という非常に小さい確率で起こることが予想されています。その観測に成功すれば超対称大統一理論の実証につながりますし、それが観測されなければ超対称大統一理論の見直しを迫ることになります。いずれにしても、素粒子物理学の新たなパラダイムを構築する足がかりとなる重要な実験と位置づけられています。

MEG実験は、本センターの研究者が中心になって設計・提案した国際共同研究プロジェクトです。実験の重要性を認識したイタリア、スイス、アメリカ、ロシアの研究者たちが加わり、約70人体制でスイスのポールシェラー研究所 (PSI) を拠点に、2008年から研究が始まりました。

きわめて稀にしか起こりえない「 $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊」を観測するには、大量の μ 粒子が必要です。それを可能にするのが、世界で唯一、1秒間に約1億個もの μ 粒子をつくり出すことのできるPSIの「陽子サイクロトロン」です。日本の研究チームは、陽電子(プラスの電荷を持つ電子、 e^+)の性質を測定する「COBRA陽電子スペクトロメータ」や、 γ 線を検出する「液体キセノン γ 線検出器」をはじめ、実験の主要部分を発案して開発するとともに、研究グループ全体を主導する役割を担っています。

これまでの実験の結果、「 $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊」は2.4兆回に1回未満の確率でしか起こらないことが明らかになりました。これは超対称大統一理論をは

じめ、標準理論を超える新たな理論に対するきわめて厳しい制限で、さらに高い精度で新物理の妥当性を検証することが急務となっています。そのため検出器性能を大幅に改善し、PSIの最大ビーム強度をフル活用することで観測感度を1桁高め、数十兆回に1回の頻度で「 $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊」が起こるかを確かめるMEG II実験を、2022年から開始しました。すでにMEG 実験の探索感度を凌駕するデータを得ており、さらに4年程度の実験で目標分岐比感度に到達見込みです。PSIは毎秒100億個までの μ 粒子を作り出す将来計画を準備中で、MEG IIで期待される発見の後、詳細研究する実験の検討も始まっています。

MEG実験は、 μ 粒子を使って素粒子物理学の新理論を検証する「荷電レプトンフレーバー物理」と呼ばれる分野を開拓しました。現在、3つの大規模な実験計画が日・欧・米で進んでいます(COMET、Mu3e、Mu2e)。実験グループを一堂に集めた国際研究会の開催など、グローバルな枠組みで超対称大統一理論の検証に挑んでいます。



陽子サイクロトロン
世界最大強度の μ 粒子ビームを生み出すPSIの陽子加速器。
©PSI



森 俊則 教授

- ICFA (国際将来加速器委員会) 日本代表
- JAHEP (高エネルギー物理学研究者会議) 委員
- MEG実験代表者

略歴

- 1989年 米国ロチェスター大学大学院Ph.D.、東京大学理学部附属素粒子物理国際センター助手
- 1994年 東京大学大学院理学系研究科助手
- 1994年 東京大学素粒子物理国際研究センター助手
- 1996年 東京大学素粒子物理国際研究センター助教授
- 2003年 東京大学素粒子物理国際研究センター教授



量子コンピューティングが導く 未来の素粒子物理学

量子コンピュータは、問題によっては古典コンピュータよりもはるかに高速に解けることが知られています。古典コンピュータが情報を0か1の「ビット」で処理するのに対し、量子コンピュータでは0と1の重ね合わせを表現できる「量子ビット」を使って計算します。量子ビットが50個あれば、原理的には1,000兆通りもの状態を同時に表現することが可能です。この表現能力の高さはミクロな実体としての量子の波動性を利用したものです。本センターが取り組む素粒子実験はまさにミクロな粒子としての素粒子を扱っており、その素粒子の複雑な振る舞いを量子コンピュータを使うことで上手く計算できるようになるのではないかと考えています。現在の量子コンピュータは実用的な問題を解くには課題も多いですが、400を超える量子ビットを備えた量子コンピュータも実現されており、将来に備えた準備が急務です。

本センターは主に3つのテーマで研究を進めています。1つ目は「量子AI (人工知能) の研究」です。AIという言葉は多義に使われますが、素粒子実験では特に機械学習を指します。加速器が作る大量のデータから、シグナル (未知の粒子を含む現象) とバックグラウンド (すでに存在が分かっている現象) を高い精度で効率よく区別する必要があり、そうした解析には機械学習技術が必須です。2029年開始予定の高輝度LHC実験ではデータ量がさらに一桁以上増えるため、量子コンピュータを活用した量子機械学習が期待されています。2つ目は「素粒子反応の量子シミュレーション研究」です。加速器の中ではさまざまな素粒子が生成され、それらが別の素粒子へと変換・崩壊する過程を起こします。こうした反応過程には、量子コンピュータによって古典計算よりも非常に効率的にシミュレートできる部分が含まれています。現在の量子コンピュータを使ってその基礎反応を計算する手

法を研究し、より複雑な多次元反応へと拡張する取り組みを進めています。3つ目は「量子コンピュータのハードウェア研究」です。開発した量子AIアルゴリズムや量子シミュレーションを量子コンピュータで動かすには、ハードウェアへの効率の良い実装と制御が欠かせません。専用超伝導量子ビットの開発やその物理実験への応用、最低3準位を利用した量子トリット制御の実装など、ハード面からの研究開発も進めています。

一連の研究は、LHC-ATLAS実験を基点に国際共同研究で進めています。米国のLBNLとシカゴ大学、スイスのCERNの3つが大きな軸となっています。また、本学が2019年に締結したIBMとのパートナーシップに基づき、知識集約型社会へのパラダイムシフトを目指す「東京大学量子イニシアティブ構想」にも関わっています。基礎研究から技術実証、オープンイノベーション、人材育成に至るまで産学官で取り組み、国際的な連携と新たな戦略で未来に繋げる時代に突入しています。



IBM Quantum System One
IBMと始動させた日本初の商用量子コンピューティング・システム。

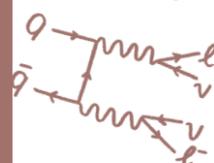


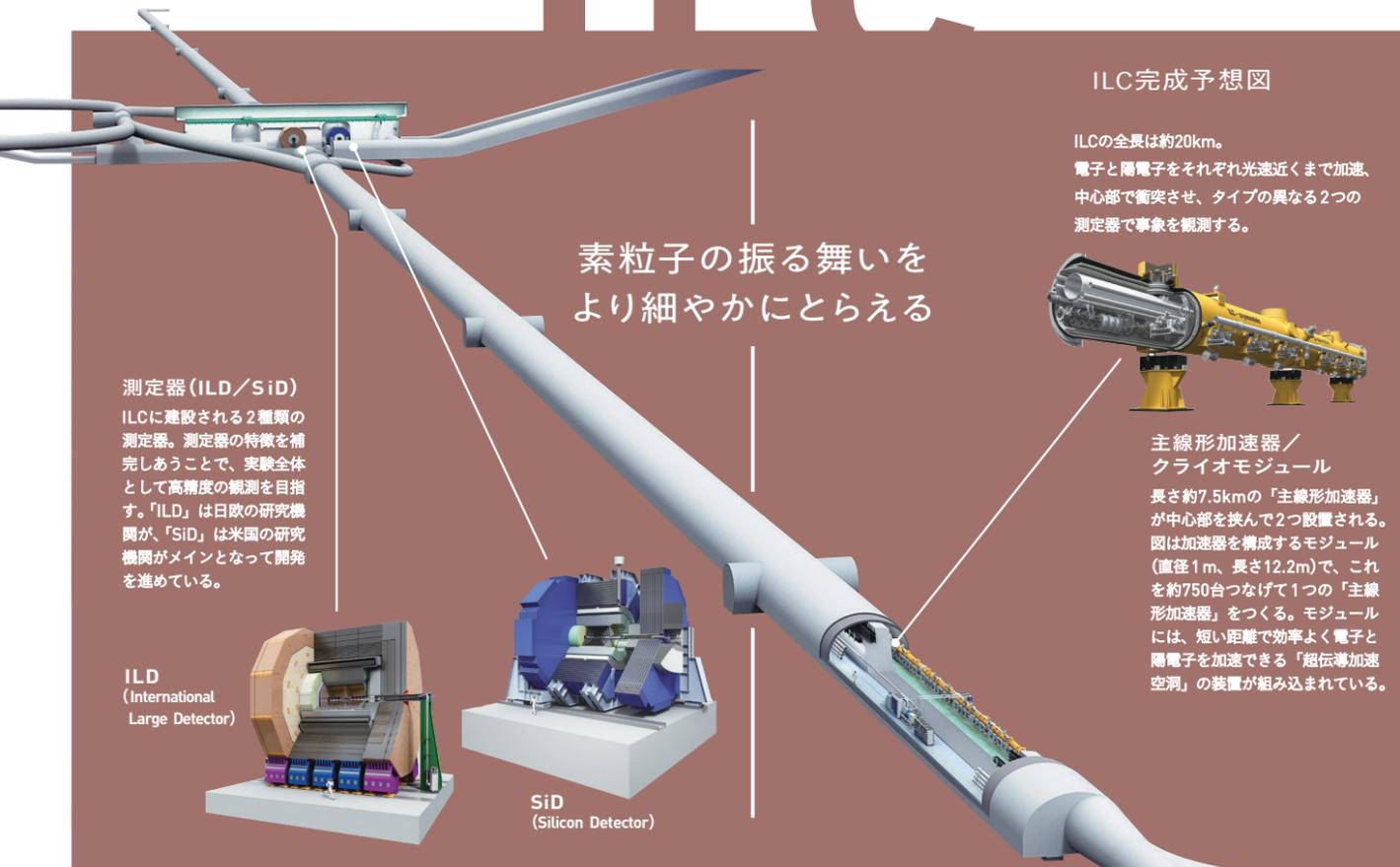
寺師 弘二 准教授

- CERN Quantum Technology Initiative プロジェクトコーディネータ
- 量子技術イノベーション拠点推進会議 国際連携分科会委員

略歴

- 2000年 博士(理学)、米国ロックフェラー大学高エネルギー物理学研究室研究員
- 2007年 東京大学素粒子物理国際研究センターリサーチフェロー
- 2009年 東京大学素粒子物理国際研究センター助教
- 2021年 東京大学素粒子物理国際研究センター准教授





素粒子の振る舞いをより細やかにとらえる

ILC完成予想図

ILCの全長は約20km。電子と陽電子をそれぞれ光速近くまで加速、中心部で衝突させ、タイプの異なる2つの測定器で事象を観測する。



主線形加速器／クライオモジュール

長さ約7.5kmの「主線形加速器」が中心部を挟んで2つ設置される。図は加速器を構成するモジュール(直径1m、長さ12.2m)で、これを約750台つなげて1つの「主線形加速器」をつくる。モジュールには、短い距離で効率よく電子と陽電子を加速できる「超伝導加速空洞」の装置が組み込まれている。

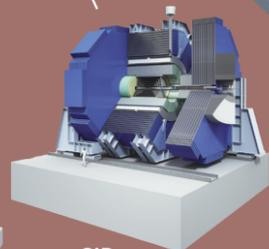
測定器 (ILD/SiD)

ILCに建設される2種類の測定器。測定器の特徴を補完しあうことで、実験全体として高精度の観測を目指す。「ILD」は日欧の研究機関が、「SiD」は米国の研究機関がメインとなって開発を進めている。

ILD (International Large Detector)



SiD (Silicon Detector)



2 030年代後半の稼働を目指すILC (国際リニアコライダー) は、全長約20 kmの線形加速器です。電子と陽電子 (電子の反粒子) を最高エネルギーで加速衝突させ、宇宙誕生から1兆分の1秒後のビッグバンを再現し、素粒子と宇宙の謎に迫ります。CERNのLHCが「複合粒子である陽子どうしを衝突させる」のに対し、「素粒子である電子と陽電子を衝突させる」のがILCの特徴です。複合粒子と素粒子はそれぞれ大福餅と小豆に例えられます。大福餅どうしをぶつけると餡が飛び散り、衝突の際に多くのゴミが出ますが、小豆どうしの衝突ならば、衝突の様子をクリアにとらえることができます。(p27-4参照) ヒッグス粒子を大量に生成して詳しく調べるには「ヒッグス・ファクトリー (工場)」計画の早期実現が重要ですが、ILCはそのために最も優れた加速器です。ILCではヒッグス粒子を詳細に調べることで、素粒子の質量や宇宙の物質の起源の解明を目指します。さらには、軽い暗黒物質の探索など、超対称性理論や力の大統一の検証につながる未知の新

粒子の発見も期待されています。ILC計画は、2020年にICFAにより国際推進チーム (IDT) が設置され、最終設計完了・建設開始に向けた新たな国際的枠組みの準備が進んでいます。ICFAの日本代表は本センターの森俊則教授が務め、IDT科学セクレタリとして大谷航准教授が入り、国内のILC推進母体であるILC-Japanは浅井祥二センター長がスポークスパーソンとして率いています。世界中の知恵と技術を結集し、本センターの研究者も力を合わせて取り組んでいきます。



大谷 航 准教授

■ ILC国際推進チーム (IDT) 科学セクレタリ

略歴
1998年 博士(理学)、理化学研究所基礎科学特別研究員
2000年 東京大学素粒子物理国際研究センター助手
2007年 東京大学素粒子物理国際研究センター助教
2010年 東京大学素粒子物理国際研究センター准教授

小 規模ながらも、ユニークなアイデアと多彩な実験手法を駆使して未知の現象に迫る。それがTabletop実験です。大型加速器では難しい実験を高い精度で行なうために特殊な粒子ビームやセンサーを開発・利用します。光子は、陽子や電子とは異なり、同じ量子状態を複数の粒子が占めることができます (コヒーレント状態)。近年、「コヒーレントな光」は、その精度・強度・波長・偏光を自由自在に操れるようになりました。現在、物理学の描く「真空」は仮想粒子が生成と消滅を繰り返す複雑な構造をしていますが、その真空にコヒーレントな光や強力な磁場などで電磁場を集中させると、真空が異方性を持ち、歪んだ状態になります。この歪みの観測を目指しています。歪みの検出にも光を利用します。赤外線レーザーを、鏡で数十万回も往復して蓄積することで、偏光のズレを増幅します。また、X線レーザーどうしをぶつけて歪みを検出する実験も行なっています。電子の反粒子である陽電子のビームを使い、「反物質を含んだコヒーレント状態」を作る実験も行なっています。陽電子と電子が対となった準安定な複合粒子である「ポジトロニウム」は、密

度を高めて冷却すると、単一な量子状態に縮退すると考えられています (ボース・アインシュタイン凝縮)。この状態を作り出せれば、物質と反物質の対称性の解明やガンマ線レーザーの実現が可能となります。ポジトロニウムを冷却するために特殊なレーザー光源を自作して冷却実験を行なっています。非常にエネルギーの低い中性子ビーム (超冷中性子ビーム) を利用した実験も行なっており、重力の影響による落下を測定できます。私たちはいろいろなアイデアで、世界最高レベルの感度の実験を行なっています (p27-6・7に装置を掲載)。



浅井祥仁 センター長

■ JAHEP (高エネルギー物理学研究者会議) 委員長

略歴
1995年 博士(理学)、東京大学素粒子物理国際研究センター助手
2003年 東京大学素粒子物理国際研究センター助教
2007年 東京大学大学院理学系研究科准教授
2013年 東京大学大学院理学系研究科教授
2017年 東京大学素粒子物理国際研究センター長(兼務)

多彩な技術で
未知の物理現象を探索する

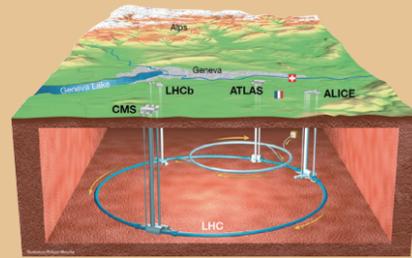
すべてのイラストは ©Rey.Hori



1 巨大加速器がもたらすものとは

素粒子物理学の歩みは、加速器技術の進展とともにあった。加速器とは、粒子を加速させて運動エネルギーを高める装置のこと。高いエネルギーを持った粒子を衝突させれば、大きな質量を持った粒子が生まれてくる。1930年代ごろから、素粒子の研究に加速器が使われるようになった。微細な粒子を「見る」には、より高いエネルギーが必要で、加速器は次第に大型化していった。加速器は「巨大な顕微鏡」ともたえられる。ヒッグス粒子発見の舞台となったCERNの円形加速器LHCは、全周約27 kmと世界最大を誇る。LHCでは、複合粒子である陽子を時計回りと反時計回りに、それぞれ光速近くまで加速して正面衝突させ、世界最高エネルギーを実現している。LHCは2029年を目標に、粒子の衝突輝度を高めるHL-LHC（高輝度LHC）にアップグレードされる。LHCで作り出される高エネルギー状態は、138億年前の宇宙誕生時に起きたビッグバン直後の状態に近いと考えられている。宇宙誕生から約1兆分の1秒後の世界を再現し、現在の宇宙ではほとんど見られない粒子や状態を観測することができる。それを検出するのが、ATLASやCMSなど、LHCに設置され

た検出器だ。LHCでつくられたヒッグス粒子を、ATLASとCMSで検出して世紀の発見に至った。LHCの次を見据えた動きもある。全周約90 km、衝突エネルギーはLHCの約7倍の、FCC（未来型円形衝突型加速器）の議論が、2040年ごろの運転開始を目標に進んでいるのだ。高エネルギー加速器は、新物理開拓の最有力手段である。



LHC全景イメージ図。4つの巨大な検出器ATLAS、CMS、ALICE、LHCbが、衝突によって生まれた粒子をとらえる。

物理解析の一翼を担うATLAS地域解析センター

「ATLAS地域解析センター」は、本学に設置されたATLAS実験のデータ解析拠点だ。CERNの計算機センターを頂点（Tier 0）に、世界42カ国170の研究機関のシステムが階層構造で配備された「WLCG（世界LHC計算グリッド）」の一部を担う。その計算機資源は、Tier 2と呼ばれる階層で世界最大規模を誇り、ATLAS実験の全メンバーに開放されている。

地域解析センターは2007年1月に稼働し、年間稼働時間は約8,700時間に上る。これまで処理された解析ジョブ数は、WLCG全体で10位の座を占め、ヒッグス粒子発見につながるデータ解析への貢献も認められている。2021年度の実績で、国内の研究機関に所属する利用者は120人、外国の研究機関に所属する利用者は1,000人に及ぶ。

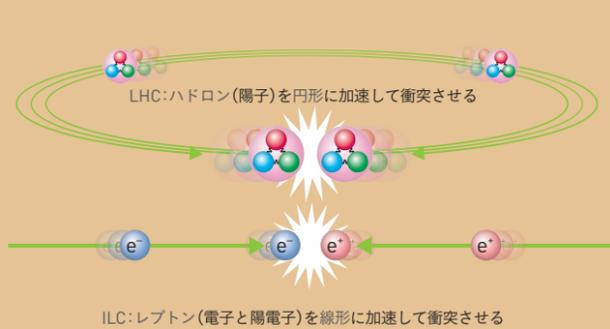
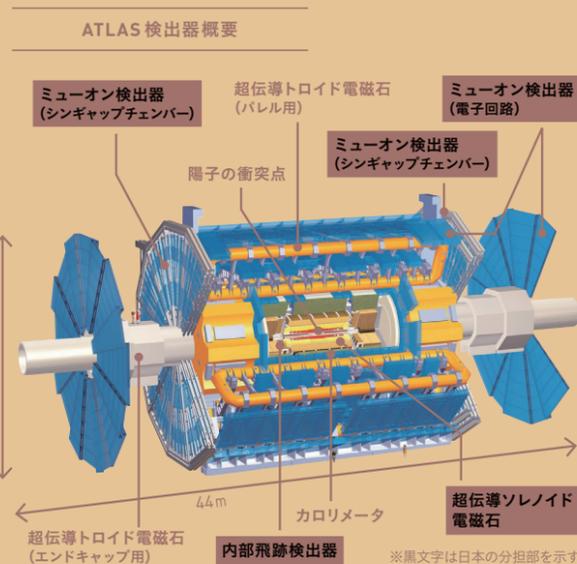


2

ATLASの挑戦 新粒子の発見を目指す

LHCでは、ATLAS検出器中央で陽子同士を1秒間に10億回以上衝突させる。これだけ多く陽子を衝突させても、ヒッグス粒子が生成されるのはせいぜい数秒に1個程度である。ATLAS検出器とコンピューターシステムを連動・協力させて、これらの稀にしか起こらない新粒子を逃さずに捉えようとしている。

ATLAS検出器は大きく8つの検出器からなる（右図参照）。黒い文字で記した箇所が、日本チームが建設し、運転を担っている箇所だ。なかでもミュオン検出器（シンギャップチェンバー／電子回路）は、石野教授が中心になって日本とイスラエルが共同開発した。ミュオンはヒッグス粒子が崩壊する際に放出され、その検出がヒッグス粒子発見の手掛かりのひとつとなる。超対称性粒子をはじめとする新粒子探索においても、ミュオンは重要な手掛かりであり、ミュオン検出器の性能向上が、新物理の開拓につながっていく。Run3と続く高輝度LHC実験では、LHCを増強して陽子の衝突頻度をさらに高める。新物理の兆候を見つけ出すため、検出器とコンピューターシステム役割はますます大きくなる。



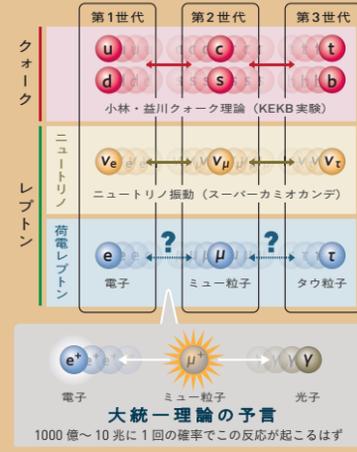
LHCとILCの加速器の性質の違い。ILCは、単体の素粒子（電子と陽電子）を衝突させるため、素粒子の詳細な性質を調べるのに適している。

4 加速器の形の違いは何を意味するのか？

加速器は、「円形」か「線形」か、「ハドロン型」か「レプトン型」かで大きく分けることができる。陽子どうしを衝突させるLHCは「円形」で「ハドロン型」、電子と陽電子を衝突させるILCは「線形」で「レプトン型」の加速器だ。「ハドロン」とは、複数の「クォーク」が「グルーオン」（強い力を生み出す素粒子）によって結び付けられている複合粒子のことである。加速器は、「線形」から「円形」へと発展し、大型・高エネルギー化してきたが、「円形」加速器にはひとつの制約があった。電子や陽電子は質量が軽いため、曲がる際に放射光を出してエネルギーを失ってしまうのだ。そのため、大型化した「円形」加速器の主流は「ハドロン型」だった。ただし、「ハドロン型」は、本来調べたい事象のほかに、さまざまな現象が同時に起こるため、素粒子の細かい性質を調べるには必ずしも適していない。ILCのように、「線形」の「レプトン型」の加速器で、TeV（テラ電子ボルト）単位の高い衝突エネルギーを実現するのは、素粒子物理の研究者たちの長年の夢である。

素粒子の世代に潜む謎

1970年代初頭に発見されていたクォークは3種類しかなかった。その時代に、小林 誠・益川敏英先生の二人は、3つの「世代（フレーバー）」に分類される6種類のクォークがあることを予言した。その後すべてのクォークが発見され、さらにKEKの実験などで、クォーク世代間の転換（混交）が、「小林・益川理論」の予言どおり起こることが確認された。二人は2008年にノーベル物理学賞を受賞した。続いて、ニュートリノでも世代混交が起こることが突き止められた。これは本学研究者の功績が大きい。本センターを創設した小柴昌俊先生は、カミオカンデの実験で1987年に超新星爆発によるニュートリノを世界で初めて捉え（2002年ノーベル物理学賞）、さらに観測性能を高めたスーパーカミオカンデの実験で、本学の梶田隆章先生が1998年にニュートリノ振動の確かな証拠を挿込んだ（2015年ノーベル物理学賞）。MEG実験は、荷電レプトンで世代混交が起こるかを探索する。「超対称大統一理論」ではμ粒子と電子の間の転換が予想され、成果は世界の研究者から注目されている。



クォークとニュートリノでは、世代混交（フレーバー転換）が起こることが確認されている。MEG実験では、荷電レプトンでも稀に（十兆回に一回程度）世代混交が起こる（荷電レプトンフレーバー保存の破れ）とする「超対称大統一理論」の検証を目指している。

6

光による真空の歪みの検出



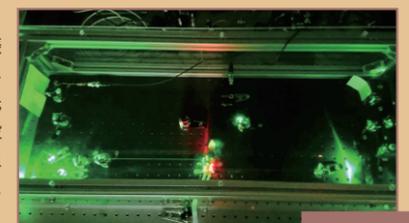
強磁場による真空の歪みを探索する装置。強磁場中を通過しわずかに偏光が変わった赤外線レーザーが、左奥の丸い窓から出てくる。手前に配置された光学素子でその微小な変化を検出する。

大強度赤外線レーザーを集中させて真空を歪め、X線の散乱で歪みを検出する。赤外線レーザーは写真左奥から供給され、四角い容器内で集中させる。X線は右のパイプから送られてくる。理研の「X線自由電子レーザー施設（SACLA）」を利用する。



ポジトロニウムの冷却実験

ポジトロニウム冷却用レーザーの生成装置。光共振器と増幅器、変調器を組み合わせて、特殊なレーザー光をつくり出す。後段に多段増幅器と波長変換装置を組み合わせて、ポジトロニウム冷却光源として利用する。



ポジトロニウム冷却実験装置。黒いガイドコイル中を左から薄かれた陽電子ビームが、銀色のチェンバー中でポジトロニウムを生成する。右から紫外レーザーを照射することで、ポジトロニウムを冷却する。

7

3

逞しき「知のプロフェッショナル」を育成する

本センターのミッションは、研究と教育の両輪にあります。本センターが国際共同研究に力を入れるのは、学生たちが海外の実験に参加し、各国の研究者と切磋琢磨して実践的な力を養うためでもあります。世界で通用する広い視野を持ったサイエンティストやリーダーを育てるため、大学院修士課程より本センターの各研究室で学生を受け入れて指導にあたります。

まずは、国内の小さな実験で計画立案から測定器開発までを自力で行ない、実験研究者としての基礎力を身につけます。次に進んだ博士課程では、ATLASのように世界各国から研究者が集う国際共同実験に参加し、外国人研究者と交わりながら日夜研究に取り組みます。そこでの学びや経験をもとに博士論文を書き上げ、独立した研究者になるための総合力を磨き上げます。

本センターが力を入れて取り組む研究のほとんどは、世界を舞台に行なわれています。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。

卓越大学院プログラム

変革を駆動する先端数学・物理学プログラム (FoPM)

2019年度に文部科学省に採択された本プログラムは、数



学・物理の教育を通じ、基本原理に基づく論理的かつ柔軟で偏りのない思考法を身に付け、科学フロンティアの開拓に挑み、激変する社会の課題解決に貢献する人材の育成を目指しています。

プログラム生は、5年の修博一貫プログラムのもと、海外の一流の研究者との共同研究や、海外企業における体験実習のための旅費等に加え、学業・研究に専念できるようRAの委嘱など、経済的支援を受けられます。

英語力アップのための講義やセミナーもあります。

コーディネータの村山斉特別教授を中心に、本センター教員も含む国内外の教員約100名で、プログラム生の「未来社会と先端科学」の橋渡しを支援しています。

大学院生受け入れの推移

(単位:人)

	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和1年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
研究室数	8	9	9	7	8	8	9	8
修士課程	24	19	18	16	17	21	20	18
博士課程	18	22	24	22	21	19	16	17
合計	42	41	42	38	38	40	36	35

学位取得の推移

(単位:人)

	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和1年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
修士課程	13	10	10	8	5	7	13	7
博士課程	1	6	6	2	8	7	2	4
合計	14	16	16	10	13	14	15	11

スーパーグローバル大学創成支援

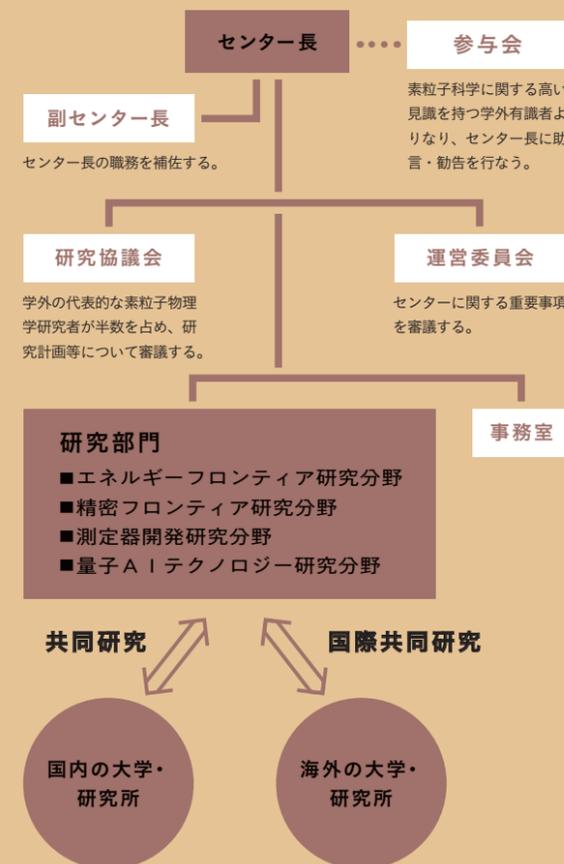
戦略的パートナーシップ
大学プロジェクト

文部科学省採択の「東京大学グローバルキャンパスモデルの構築」の柱は、海外大学との緊密で特別な協力関係、「戦略的パートナーシップ」の確立です。関係部局が協力し、各大学との共同事業を大学全体で支援します。

本センターは、スイス連邦工科大学チューリッヒ校(ETHZ)、シカゴ大学、パリ・グランゼコール群とのプロジェクトに参加し、理学系・工学系・情報理工学系・宇宙線研究所等とともに分野横断的な交流を推進しています。ETHZと関係性の深いスイス・PSIでは、教育・研究の国際協力を一体的に進めています。MEG II実験をベースとした学生プログラムの共同運営のほか、学生交流や質の高い教育を実践し、国際的に活躍できる理系人材を育成します。



組織図



組織人員

(単位:人)

	内訳				
	現数	女性	外国人	若手	客員
教授	3	0	0	0	2
准教授	4	0	0	1	2
助教	13	0	1	4	0
特任助教	6	0	2	6	0
特任研究員	2	0	1	2	0
特別研究員	1	0	1	1	0
技術職員	1	0	0	0	0
事務職員	5	5	0	1	0
合計	35	5	5	15	4

■本センターは、35人体制で運営しています(令和5年5月現在)。
■若手研究者(※20代・30代)が約4割を占めています。

COLUMN

センターのロゴに込めた決意

本センターは、1974年に前身となる理学部附属高エネルギー物理学実験施設が創設されて以来、日本の素粒子物理学をリードすべく、数多くの国際共同研究に取り組んできました。その道を切り拓いたのは、2002年にノーベル物理学賞を受賞された小柴昌俊先生です。

その歴史とミッションをあらためて胸に刻み、未来を目指す羅針盤として、センターのロゴを作成しました。素粒子衝突実験で粒子が飛散する様子を表した「イベントディ

スプレイ」と、東大マークのシンボル「銀杏」のモチーフを融合させ、意匠として表現しました。真のグローバル大学を目指す東大で、素粒子物理学の最先端を切り拓き、新たな「知」を創出し続ける強い決意を表しています。

略式ロゴに記載した「ICEPP」の文字は、センターの英語名称「International Center for Elementary Particle Physics」の頭文字で、国内外の研究者にこの略称で広く親しまれています。

スタンダード



ロゴのメインデザインと組織の正式名称(和・英)の組み合わせ

シンプルデザイン



ロゴのメインデザインと組織の省略を縦・横に組み合わせた2パターン

文部科学省認定「共同利用・共同研究拠点」として

文部科学省が認定する「共同利用・共同研究拠点」は、我が国の学術研究の発展のため、個々の大学の枠を越え、大型設備や資料・データを共同で利用・研究するための枠組みです。

本センターは、平成22年度に「最高エネルギー素粒子物理学研究拠点」として認定を受けました。世界最先端の加速器施設で行なわれる素粒子物理学研究の我が国の中心拠点となり、国際共同実験を主導・実施することが求められています。令和3年度に2度目の認

定期間が終了し、拠点としての重点取組や研究成果、優れたリーダーシップが高く評価され（最高区分S）、令和4年度より認定が更新されました。

今後もCERNのATLAS実験を最重要プロジェクトに位置づけ、スイスのPSIでのMEG実験も推進し、超対称性粒子の探索や力の大統一など、標準理論を超える新たな物理学の発見を目指します。また、先端戦略分野の量子AIテクノロジー研究部門では学術的価値の創造と人材育成を一体的に進めます。

研究者コミュニティのための貢献

■ 利用環境設備の充実

- ・ ATLAS 地域解析センター (p26 参照)
- ・ CERN サテライトシステム
- ・ PSI 設置 MEG 実験システム

■ 研究会・講習会の開催

- ・ 理論・実験合同研究会 (年2～3回、右記参照)
- ・ コンピューティングスクール(右記参照)

■ 独自の若手育成プログラム

- ・ ICEPP フェロウシップ
将来を担う若手研究者が、最先端の研究を行なう海外の研究機関に長期滞在し、研究に打ち込めるよう支援をしています。
- ・ ICEPP シンポジウム(右記参照)
素粒子物理学分野の研究者(特に大学院生)どうして交流を深めるため、毎年2月頃にウィンタースクールを開催しています。

一般社会に向けた研究成果発表等

- 一般公開講演会
- オープンキャンパス
- センター見学(右記参照)、アウトリーチ活動等

素粒子理論・実験合同研究会



素粒子物理学を中心に、卓越性の高い研究分野をテーマにした研究会を年に数回開催し、理論と実験の国内外の研究者間で情報交換や議論を行なう場を設けています。大学や個人の連携が生まれ、研究力向上や学術的発展を支える基盤形成の役割も果たしています。

粒子物理コンピューティングスクール



大量のデータを扱う大規模物理実験では、コンピューティングの高度利用が不可欠です。KEK(高エネルギー加速器研究機構)や全国の大学とともに、次代の研究者のためのスクールの平成29年度より開催しています。多変量解析や機械学習、検出器シミュレーションなどの先端ソフトウェア、グリッドやクラウドなど分散コンピューティング技術を学習できます。

ICEPPシンポジウム

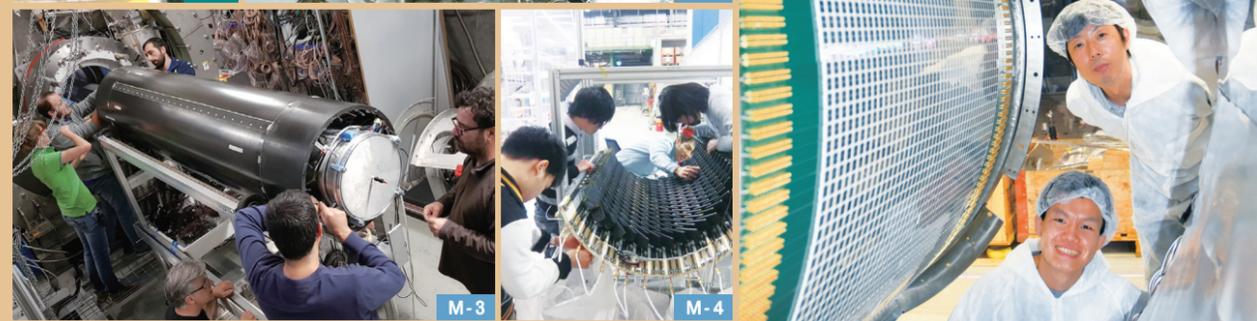
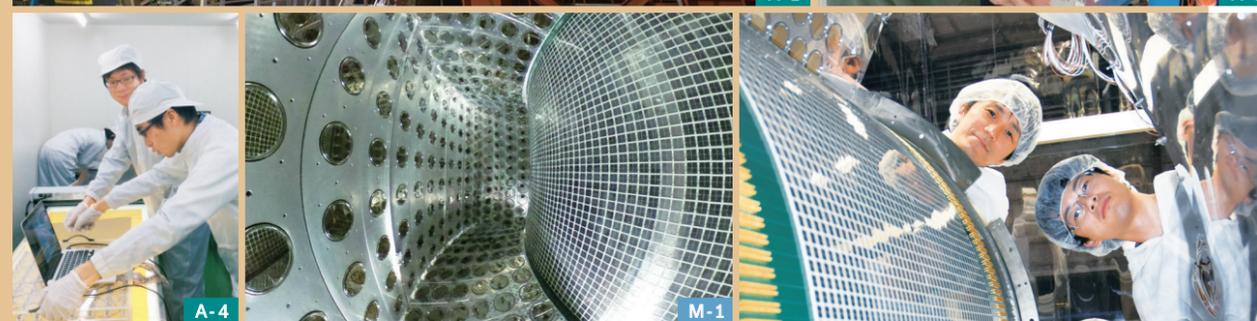
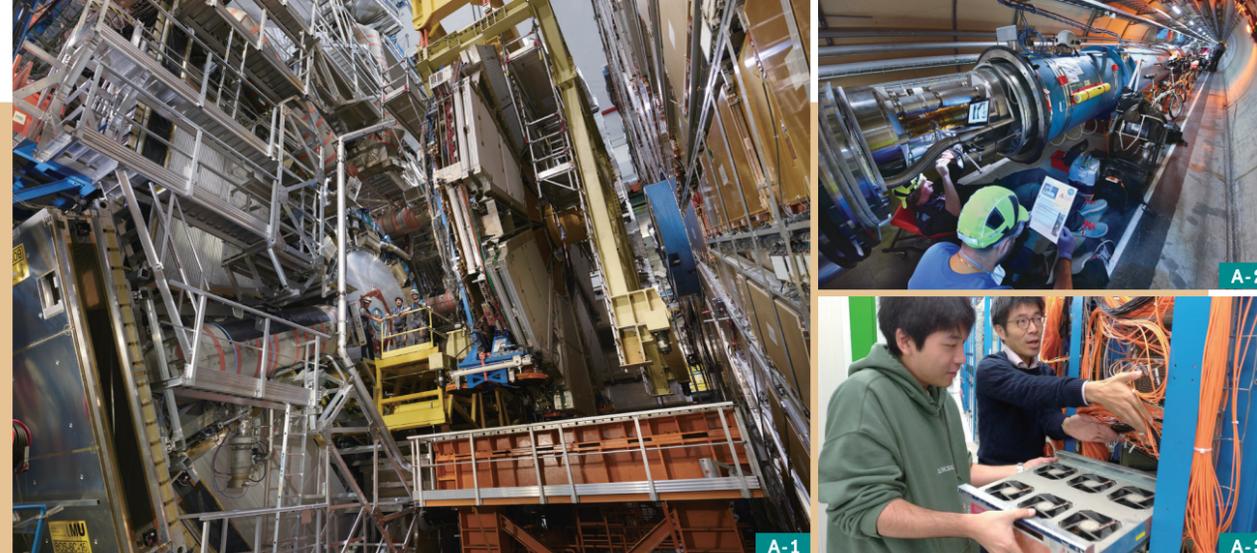


全国の大学で物理学を学ぶ大学院生を対象に、独自のウィンタースクールを毎年2月に実施しています。素粒子・原子核・宇宙物理など、分野の垣根を越えて学生が一堂に集い、多様な研究成果を発表し合います。令和4年度で第29回目を数え、さまざまな交流が生まれています。

センター見学



これから大学進学を目指す方々を対象に、センターの見学会を開催しています。教員による模擬講義では、素粒子物理学の基礎知識や学問的な意義、センターが取り組む国際共同実験などを分かりやすく説明します。見学者には大学のキャンパスを体感できる機会となり、大変好評です。



ATLAS

A-1 LHCの運転停止期間中、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。**A-2** LHCの1,200台以上のマグネットを、より安定・安全に動作させるための作業。**A-3** 第3期実験で導入した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。**A-4** 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。

MEG

M-1 **M-2** 日本チームが開発する液体キセノンγ線検出器。M-1の写真右側とM-2の写真左側が新開発した光センサーMPPC。M-1の写真左側は従来の光センサーPMT。**M-3** イタリアの研究チームが開発するドリフトチェンバー。**M-4** 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。

ILC

I-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ビーム試験。試験はCERNで実施した。**I-2** **I-3** 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。**I-4** 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。

