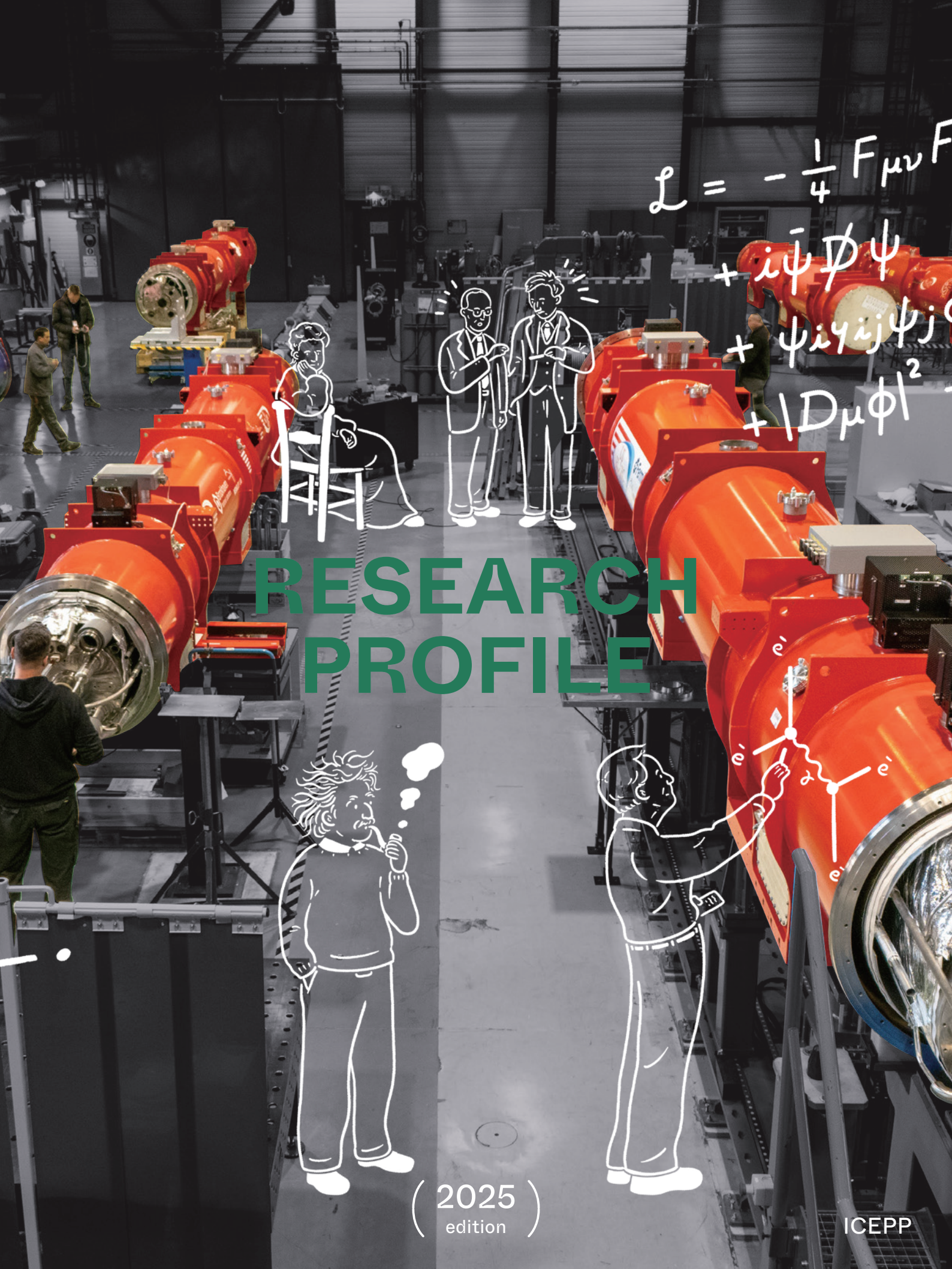




$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \psi i \gamma_5 \not{A} \psi + |D_\mu \phi|^2$$

RESEARCH PROFILE



(2025
edition)

ICEPP

CONTENTS

03

DIRECTOR'S MESSAGE

素粒子・宇宙からの宿題に
素粒子物理学で答え、人類の知に貢献したい

04

QUANTUM WORLD

素粒子で紐解く量子の世界

14

HISTORY AND TREND

素粒子物理学の“今”を読み解く

16

COLLABORATION

素粒子物理国際研究センターの取り組み

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

量子コンピューティングが導く素粒子物理学の未来

24

ILC PROJECT

ヒッグス粒子の精密測定を介して時空の謎に挑む

25

TABLETOP EXPERIMENT

多彩な技術で未知の物理現象を探索する

26

COLUMNS

もっと知りたい！素粒子と実験装置の話

28

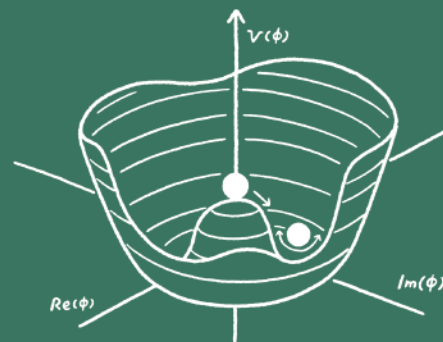
ICEPP UTOKYO

教育・組織概要

30

LAB GALLERY

ラボ風景



DIRECTOR'S MESSAGE

素粒子・宇宙からの宿題に

素粒子物理学で答え、

人類の知に貢献したい



MASAYA ISHINO

石野雅也

東京大学
素粒子物理国際研究センター長

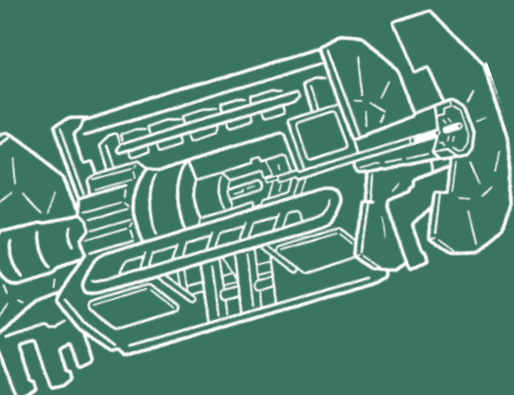
宇宙はいかに始まり、その姿を変えてきたのか？
物質を構成する基本要素は何なのか？

人類の多くが考えたことのある問いに正面から向き合い、最先端の技術と無限のアイデアを総動員して解明しようとするのが、素粒子物理学です。

ICEPPの基幹プロジェクトであるLHC-ATLAS実験では、周長27kmの大型加速器を使い、世界中から集まる3,000人の仲間と共同研究を進めています。これは典型的な大規模サイエンスのひとつであり、最先端を切り拓くツールとしての必然的な発展形です。2012年に発見したヒッグス粒子は、この宇宙の真空に関するサイエンスの扉を開け、まさに宇宙の進化・発展の姿についてのヒントを与え、新たな疑問も提示しました。まさにこれが学問の進歩であり、今後もこのようなアウトプットを出し続けて、人類の知へ貢献したいと考えます。

ICEPPは量子コンピュータと量子センサーの応用研究にも取り組んでいます。サイエンスの変革という観点において大きな可能性を持つ量子技術ですが、量子現象そのものである素粒子のふるまいを表現するという応用例、量子センサーを使った新しい素粒子実験の研究、これらを通じて、量子計算機・技術の発展に貢献することを目指しています。

物理学の本質は、一見異なるように見える複数の事象に宿る本質的な部分を見極めることで、それらを統一的に理解する学問です。この基本的な概念を軸に研究を進め、素粒子・宇宙からの宿題に答えていきたいと思います。そして、そのために我々が開発する広い意味での技術とあわせて、人類の知に大きく貢献していくこと、それらを世界的な規模で実現できる人材を次々と送り出すことで、ICEPPの価値を更に高めていく所存です。



編集ディレクション 清水修 (ACADEMIC GROOVE MOVEMENT)
取材・文 荒松良孝、清水修
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 松本歩 (細山田デザイン事務所)
イラストレーション 藤田翔、秋本祐希
協力 東京大学大学院理学系研究科・広報室

QUANTUM WORLD

素粒子で紐解く量子の世界

01 THE BIRTH OF QUANTUM MECHANICS

現代物理学を支える量子力学の誕生

20世紀前半、物理学のあり方を大きく変える2つの理論が誕生した。

1つは、アルバート・アインシュタインが提唱した相対性理論。もう1つは微小な世界での運動の様子を記述する量子力学だ。

量子力学の誕生によって、原子の構造についての理解が進み、原子を構成する粒子の振る舞いを調べられるようになり、素粒子物理学の発展へとつながっていく。量子力学の萌芽を振り返っておこう。

量子力学は連続しないとびとびの量「量子」の発見から始まった。量子力学が登場するまでは、物理学で扱う量はすべて連続しているものだった。しかし、19世紀の終わり頃から、その考えでは解けない問題が出てきた。

有名なのは、溶鉱炉の中の鉄の温度だ。当時、溶鉱炉の中の鉄の色と温度に何らかの関係があることは、経験的に知られていたものの、その原理を説明できず、正確な温度がわからなかった。

その問題を解いたのが、マックス・プランクだ。1900年、彼は、鉄をはじめとする物体の温度と、そこから放出される光の色（波長）の関係を数式で表現した。ただし、このプランクの式は、光として放出されるエネルギーに「最小の単位」があると考えないと成り立たない。そのため、プランクはエネルギーには最小単位があるという「量子仮説」を提唱した。

量子力学を創始したハイゼンベルクらの記念碑的論文から100年。

ユネスコは2025年を「国際量子科学技術年」と定め、“QUANTUM100”の空前のブームが巻き起こっている。一方、量子コンピュータに目を向けると、欧米中の覇権争いが激化し、日本でも実用化に向けた国産コンピュータ開発のニュースが注目の的だ。ICEPPはこれまで量子力学を礎とする素粒子物理の研究を行っており、2021年には量子プロジェクトの組織を立ち上げ、国内外屈指の大学・研究機関やIT企業との連携を強化してきた。

サイエンス雑誌とは違った視点の必読「ICEPP×量子特集」をお届けしよう。

1905年には、アインシュタインが「光量子仮説」を発表した。波として考えられていた光を、波長ごとに異なるエネルギーを持つ粒子として考えることで、金属から電子が飛び出す「光電効果」を説明した。

また、原子について研究が進むと、原子の中でもエネルギーがとびとびの値を取っていた。1913年にニールス・ボーアは、電子は原子核の周囲の決まった軌道上しか移動できない原子モデルを発表。原子核の周りを電子が回り続けられる理由を示した。

1923年には、フランスのルイ・ド・ブロイが「物質波」の概念を示し、粒子だと思われていた電子も波の性質を持つと主張。この主張は当時の常識を覆すものだったが、後に実験で電子に波の性質もあることが明らかになった。

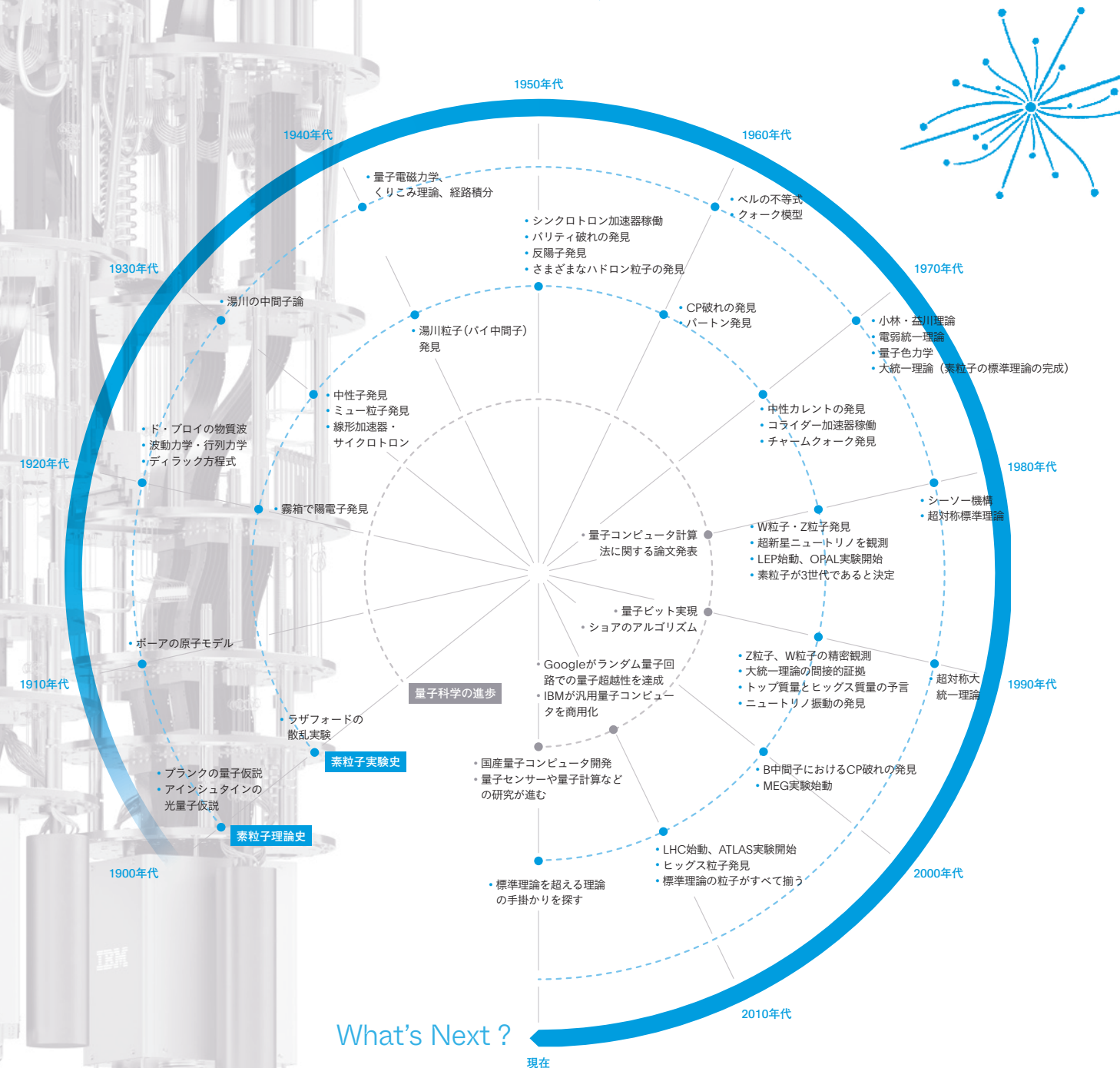
そして、1925年から26年にかけて、ヴェルナー・ハイゼンベルクとエルヴィン・シュレーディンガーが、

それぞれ独立に原子内の電子の状態を計算する方法をつくりあげ、量子力学の幕が開けた。ハイゼンベルクの手法は行列力学、シュレーディンガーの手法は波動力学と呼ばれている。2人の理論は違うように見えたが、アプローチが異なっているだけで、本質的には同じものであることが、シュレーディンガー自身により確かめられている。

1928年には、ポール・ディラックは、相対性理論の関係式を満たす波動方程式（ディラック方程式）を発見した。電子の振る舞いをより正確に表現できるようになったとともに、反粒子である陽電子の存在も予言した。

その後、物質をつくる素粒子に加えて、相互作用（力）をつかさどる素粒子の理解も進んだ。電磁気学を「量子化」した量子電磁力学（QED）では、光子が電磁気の力を媒介し、量子色力学（QCD）ではグルーオンが陽子や中性子を作り上げる強い力を媒介する。

量子力学の世界では、重ね合わせや量子もつれなど、私たちの日常生活とはかけ離れた現象が起きる。これらの現象は、セキュリティが堅固な量子通信や、超高速な量子計算へとつながり、量子情報科学という新たな分野を築いている。



02 THE SCIENTIFIC LEGACY OF OPAL

素粒子の標準理論の確立に貢献したOPAL実験

量子力学の誕生と発展により、素粒子の世界の理解も大きく進み、素粒子物理学を大きく発展させた。加速器を使った高エネルギー実験は、いくつもの新粒子の発見とともに、既知の素粒子の精密な測定により、素粒子の標準理論の構築と確立に大きく貢献してきた。20世紀の終わり頃に実施されたOPAL実験の創設メンバーの1人である川本辰男先生に、OPAL実験について伺った。



TATSUO KAWAMOTO
川本辰男
中国科学技術大学

古代ギリシャの哲学者デモクリトスが唱えたアトモス（原子）はそれ以上、分割することのできない物質の基本的な構成要素でした。デモクリトスの考えた原子は、概念上のものでしたが、20世紀の初め頃に、原子が実在していることが確認されました。しかし、実際の原子は原子核と電子に分割でき、原子核は陽子と中性子に分けられるというように、さらに小さな粒子があることもわかってきたのです。結局のところ、原子はアップクォーク、ダウルクォーク、電子の3種類の素粒子で構成されています。

物質を構成する粒子の仲間は、すべてスピン1/2を持つフェルミオンであり、全部で12種類あります。そして、原子を形成するために、電磁気力、強い力、弱

い力が働いており、それらの力はまた別の素粒子によって媒介されていることが明らかになりました。力を媒介する粒子の仲間はゲージボソンと呼ばれる種類です。

量子電磁力学（QED）、電弱統一理論、量子色力学（QCD）はゲージボソンがどのように働いているのかをうまく説明し、合わせて素粒子の標準理論と呼ばれます。素粒子の標準理論は、特殊相対性理論、量子力学、ゲージ原理を理論的柱としています。

ゲージ原理は、時空の各点でゲージ変換をしても物理はかわらないというゲージ不変性から、相互作用とその媒介粒子を導き出すものです。例えば、電磁気力の媒介粒子である光子は、電子と電磁場を量子化した場の理論であるQEDによって導かれます。

1989年から2000年にかけて活躍した電子・陽電子衝突型加速器LEPは、弱い力を媒介するZ粒子とW粒子を精密に測定することにより、ゲージ原理が量子補正も含めて正しいことを証明し、素粒子の標準理論の基盤を確立しました。

LEPでは4つの実験が採択されました。その1つが、東京大学グループが国際チームと共同で提案したOPAL実験です。

LEPは1989年7月14日に電子と陽電子の最初のビームを周回させ、その年の9月から本格的な物理実験が始まりました。1995年までの実験期間で、OPAL検出器は約450万のZ粒子の生成崩壊過程を記録し、それを詳しく分析しました。

これにより、それまでの実験結果の1,000倍の精度でZ粒子の質量を決め、物質をつくる素粒子の世代数が3であることを明らかにしています（図1）。さらに、Z粒子生成に関わる量子力学の高次効果（量子補正）から、当時まだ発見されていなかったトップクォークの質量を173GeV付近であると算出しました（図2）。トップクォークは1995年に発見され、その質量はOPAL実験の予想通りの約175GeVと、標準理論が量子力学の高次効果も含めて正しいことを証明したのです。

1996年からは、加速器のエネルギーを増強したLEP IIが稼働し、W粒子を対生成することに成功しました。電子・陽電子の衝突からW粒子が対生成する過程は3つあり、そのうちの1つはこれまで知られていないゲージボソン（ZとW）同士の相互作用の情報を持ってい

ます。そして、標準理論の予言と観測結果は精密に一致することが確かめられました。

当時、ヒッグス粒子はまだ発見されていませんでしたが、LEP/LEP IIでほぼ確実に見つかるものと考えられていました。そこで徹底的な探索を行ないましたが、残念ながら発見されず、その結果ヒッグス粒子は114.4GeVより重いことがわかったのです（図3）。

一方、さらに量子補正の精度を上げ、それまでのOPAL実験の結果やトップクォークの質量などのデータをもとに標準理論を使って分析したところ、ヒッグス粒子の質量は285GeVより軽いことがわかりました。

これにより、ヒッグス粒子の質量範囲を絞り込んだことになります。ヒッグス粒子は結局、LEPの運転終了後に建設された大型ハドロン衝突型加速器（LHC）での実験で発見され、その質量が約125GeVであることがわかりました。OPAL実験はほんの10GeVだけエ

図1：素粒子の世代数を3と決定

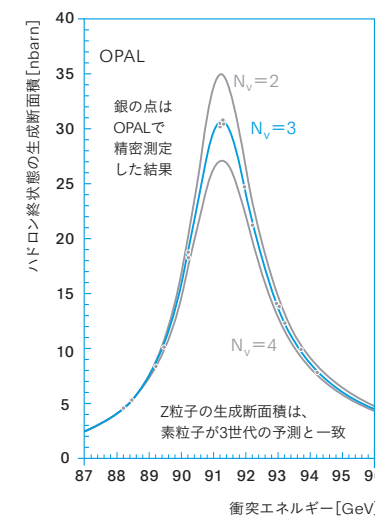


図3：ヒッグス粒子の質量領域の限定

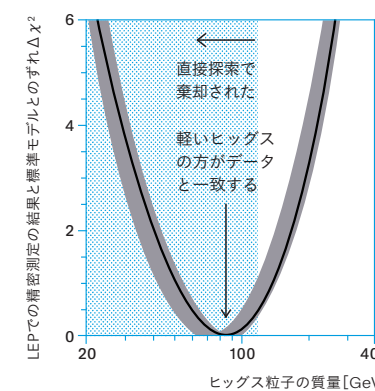


図2：トップクォークの質量

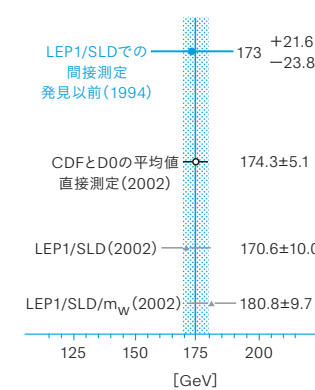
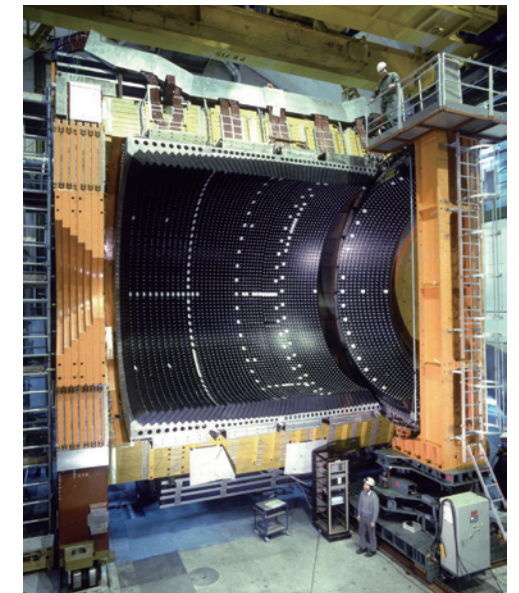
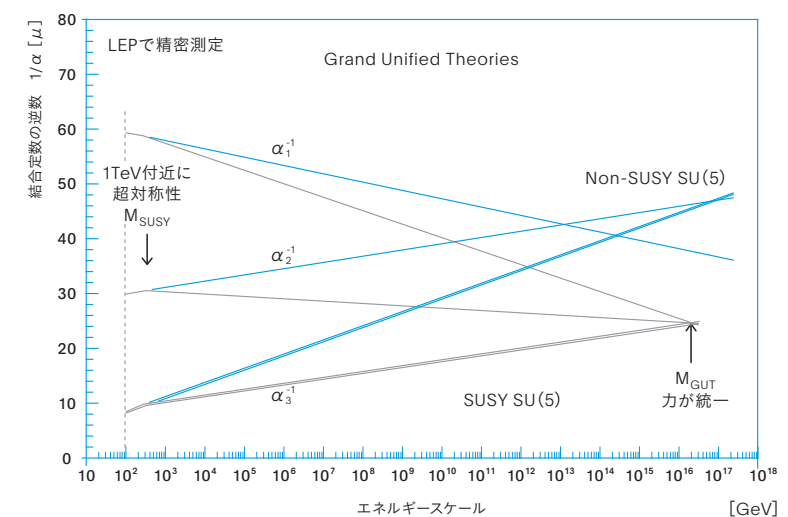


図4：力の大統一の可能性（超対称性粒子を示唆）



OPAL検出器最重要部分の1つである電磁シャワーカロリメーター。東大グループが担当した。約1万本分の鉛ガラスカウンターからなり、LEP加速器の運転終了まで10年以上高性能を保ち続けた。



03

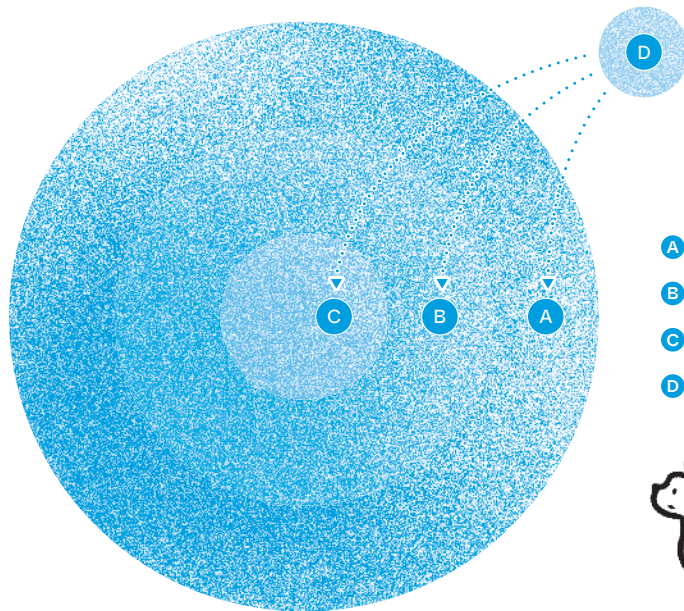
KNOWN AND UNKNOWN QUESTIONS

01

ニュートリノの質量

素粒子の標準理論では、ニュートリノの質量が0とされていた。だが、スーパーカミオカンデなどによる観測により、質量があることが示された。ニュートリノには電子、ミュー、タウの3種類あることが知られているが、飛行している間にニュートリノの種類が変化するニュートリノ振動が観測されたためだ。これにより、3種類のニュートリノがそれぞれ異なる質量を持つことがわかり、標準理論の綻びを示す実験結果のひとつとなった。ニュートリノ質量の起源は現在でも未解決の謎のひとつであり、その解明のためさまざまな研究が行なわれている。C

現在の素粒子物理学で説明できない難問の多くは宇宙や重力、量子といった研究分野と密接に関連しており、量子コンピュータや量子デバイスなどの最先端の技術を取り入れながら謎を解明してゆく必要がある。



- A 現代物理の問題
- B 量子力学の根本的問題
- C 素粒子物理の問題
- D 技術的な問題



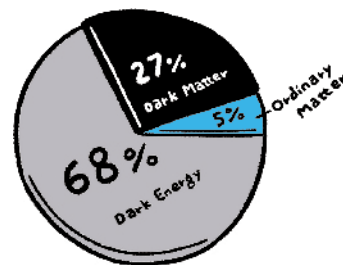
現代物理学に残る難問

この50年間、研究者たちの努力により、物理学は大きく発展し、さまざまなことがわかってきた。だが一方で、新たな謎も生まれている。現代物理学が取り組む謎をいくつか紹介する。

02

暗黒エネルギー・暗黒物質

素粒子の標準理論は、物質を構成する粒子、重力以外の力を媒介する粒子、それらに質量を与えるヒッグス場で構成される。しかし、銀河や超新星などの観測から、その範囲に収まらないものの存在もわかっている。それが、暗黒物質と暗黒エネルギーだ。暗黒物質は未知の粒子である可能性もあるが、暗黒エネルギーの正体はまったくわかっていない。A C



03

重力の量子化

この宇宙の中に作用している力を整理すると、電磁気力、弱い力、強い力、重力の4種類となる。この中で素粒子の標準理論に組みこまれているのは、電磁気力、弱い力、強い力の3種類だけで、これらは量子場の理論で記述される。一方、重力は一般性相対理論で記述され、時空の歪みとされている。重力を他の力と統一的に扱うためには、量子化が必要となるが、量子

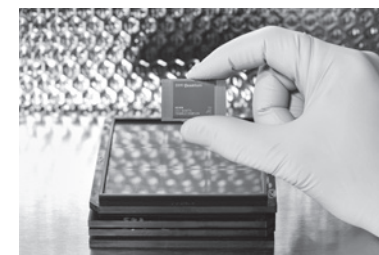


場の理論で記述しようとすると計算に無限大が現れてしまう。そのため、さまざまな方法が考えられているが、そのような理論は未だに完成していない。A B

05

新粒子・新現象を探索する
新しい手法の開発

素粒子の研究ではLHCのような大型加速器を使った高エネルギー実験で新たな粒子をつくり出したり、MEG II 実験などで稀に起こる現象を観測したりしている。これら2つの方法とは異なり、これまで観測が難しかった新粒子・新現象を新しい技術によって発見するアプローチとして、量子デバイスを使う方法が最近注目されている。D



IBM

04

標準理論を超えた
新たな理論の構築

1970年代にその枠組みが確立した素粒子の標準理論は、その後の加速器実験による新粒子や新現象の発見によってその土台を堅固にし、精密な科学理論となった。2012年にCERNのATLAS実験とCMS実験がヒッグス粒子を発見したことにより、素粒子の標準理論は完成したといわれるが、実は根本的なところがよくわかっていない。例えば、ヒッグスの本質、ヒッグス粒子は一種類だけなのか、なぜ重力のゆらぎに相当するエネルギースケールより遥かに軽いのか、は解明されていない。そこで、世界中の物理学者が構築を目指す新たな理論のひとつが、電磁気力、弱い力、強い力を完全に統一する超対称大統一理論だ。超対称大統一理論では、標準理論には含まれていない粒子の存在が想定されていて、その中には暗黒物質候補も含まれる。また、3つの力に加えて重力までも統一的に説明できると期待される超弦理論の研究も進められている。C

06

古典コンピュータで
解けない問題を解く

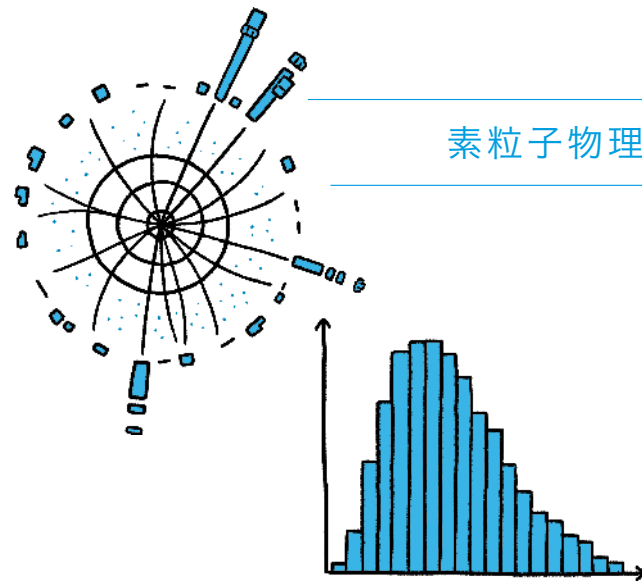
コンピュータは、素粒子物理学の発展を支えている技術のひとつだ。コンピュータが発達し、情報処理能力が上がったことで、私たちはさまざまな問題を解けるようになった。しかし、量子力学をベースとする素粒子の振る舞いを解き明かすには、現在の古典コンピュータでは不十分だ。古典コンピュータでは量子状態を直接扱う代わりに、確率的な足し上げにより計算を行なう方法を用いることがあるが、足し上げる量の確率解釈が破綻してしまう場合には、符号問題と呼ばれる困難が生じてしまう。一方、量子コンピュータは量子状態を直接扱えるので、より自然に量子系の振る舞いを計算できるのではないかと期待されている。B D

04 QUANTUM LEAP BY QUANTUM TECHNOLOGY

量子技術で物理学にブレイクスルーを

発足から50年、加速器を使った高エネルギー実験を中心に素粒子を研究してきたICEPP。

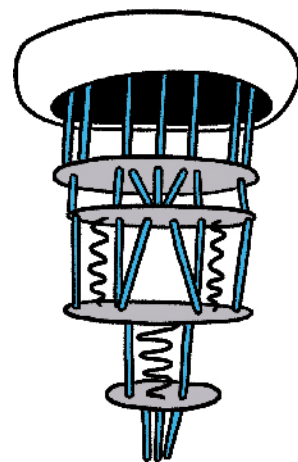
計算やデバイスに量子力学の知見を使うことで、素粒子の難問にどのように立ち向かうのか？を見ていこう。



素粒子物理学実験の課題

現在の素粒子実験では、それぞれのセンサーが光子をはじめとする粒子のある、なしを判定し、その情報を記録する。粒子のある、なしというのは古典的な情報の記録であり、高エネルギーの環境では、粒子を古典的に扱うことで十分な精度が得られる場合も多い。一方で、実験データが膨大になってくると、低いエネルギーでの粒子反応を取り入れた解析が重要になり、そこでは量子もつれなど粒子の量子力学的な性質が現れてくる。

ICEPPでは、高輝度LHC-ATLAS実験に備えて、実験データを解析するために量子コンピュータで機械学習を行なう量子機械学習の研究も進めている。実用化までにはまだ時間が必要だが、実験データの特徴に合わせて、どのように量子計算を使うことができるか探究していく。



素粒子物理学の研究にコンピュータは欠かせない存在となっている。ヒッグス粒子を発見したことで知られるLHCのATLAS実験では、これまで500ペタバイトものデータが蓄積されている。この膨大なデータを処理、解析するために、世界中に分散した計算資源をネットワークで接続するグリッドコンピューティングが採用された。

ただ、LHCの実験データ量は増加傾向だ。2030年に加速器と検出器を大幅にアップグレードした高輝度LHC-ATLAS実験がスタートすると、データ量が1桁増え、エクサバイトが当たり前になってくる。このままでは従来の古典コンピュータ技術では対応できなくなる日がくるかもしれない。

ICEPPで量子コンピュータを研究し始めた動機のひとつはここにある。膨大な実験データを処理できるようになれば、新たな発見につながるのではないかと期待された。そこで、検出器データの情報を組み合わせ、作られた粒子を再構成する方法の研究を進めてきた。

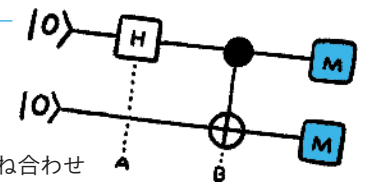
素粒子の挙動を時系列に解き明かす

現在、量子コンピュータの活用法として期待されているのが、複雑な素粒子の世界のシミュレーションだ。素粒子物理学のシミュレーションは、格子ゲージ理論を基礎にして、古典コンピュータでも行なわれ、大きな成果を上げている。だが、現状では計算できないパラメータ領域があったり、素粒子同士の相互作用を計算したりするのは難しい。

古典コンピュータでは、素粒子の運動などはラグランジアン形式で記述され、計算される。時間と空間を一括して扱い、その中での場の運動の歴史を記述する。量子力学での粒子の振る舞いが確率でしか表現できない理由はここに起因する。モンテカルロ法を用いて素粒子の相互作用などを計算しようとしても、古典コンピュータで効率的な計算をするのは難しい。

それに対し量子コンピュータは、重ね合わせや量子もつれを利用して、計算対象となる粒子の量子状態やその変化を表現することができるので、粒子の動きや相互作用を時系列に記述、計算していくハミルトニアン形式と相性がいい。量子コンピュータが発達することで、素粒子のさまざまな状態や相互作用なども精密に計算できるのではないかと期待される。

量子コンピュータはまだ黎明期で、基礎的な研究が積み重ねられている段階だ。ICEPPでは、素粒子物理学のシミュレーションを実現するために必要な量子計算システムの見積、素粒子の現象をハミルトニアン形式で表現するための定式化、量子コンピュータに実行させるアルゴリズムの開発など、さまざまな側面からの研究を進めている。



量子デバイスで新たな実験手法を提案

量子コンピュータは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する。この量子ビットは計算だけでなく、センサーとしても活用できる。ICEPPでは、新しい素粒子の検出法を確立しようと、超伝導量子ビットの開発を独自に進めている。

超伝導量子ビットはマイクロ波をとらえやすい性質をもっていて、この特性を利用して暗黒物質を探索する新たなデバイスとして使用できると期待されている。超伝導量子ビットは、他の方式の量子ビットよりも実用化が進んでいるが、数年前までは作製方法自体が秘匿されていた。

だが、この数年で、量子ビットのつくり方の知見を公開し、共有しようという動きが進み、現在ではつくり方を記した論文がたくさん発表されている。ICEPPでは

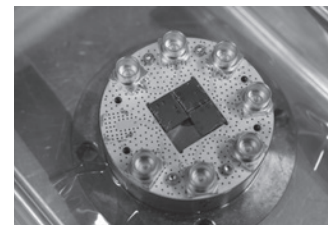
それらの論文を参考にしながら、量子ビットの開発にいち早く取り組んできた。その開発の速さにIBMの技術者も驚いたという。超伝導量子ビットセンサーによる検出が期待されているもの

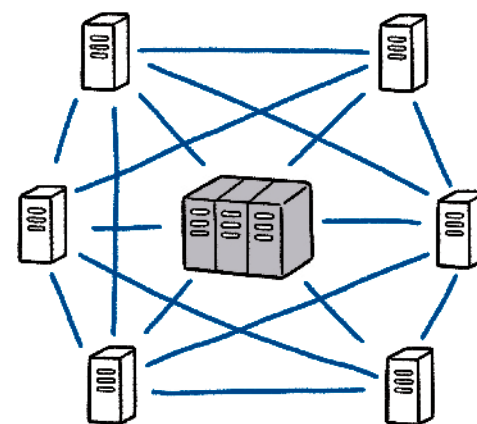
が、暗黒物質候補のひとつである未知の粒子アクシオンだ。暗黒物質は、WIMPと総称される反応性の低い重い粒子が候補のひとつとして考えられており、加速器実験でも探索されている。それに対しアクシオンは質量が軽く、加速器実験では検出しにくい、超伝導量子ビットは軽い質量の粒子の検出に向いている。

量子ビットやそれを並べた量子デバイスをつくることは、量子コンピュータをつくることと深いつながりがある。しかし、量子コンピュータは外界と遮断し、磁場の影響を受けないようにすることが重要なのにに対し、アクシオンを探索するセンサーとして用いるためには外界に開き、磁場の中でも高い性能を出すことが求められる。

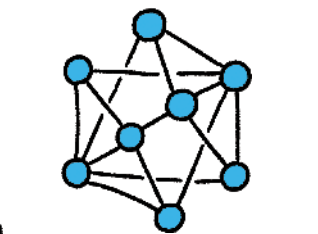
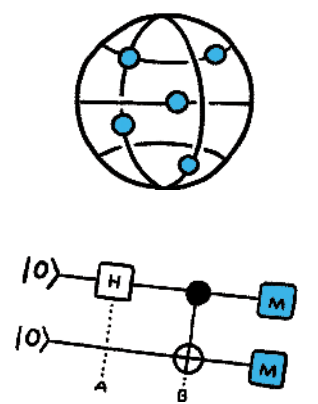
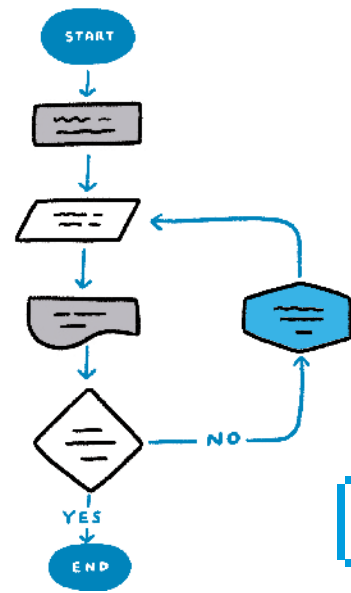
このような違いを克服し、高性能の量子センサーが開発され、アクシオンが検出されれば、新たな素粒子理論を構築するための大きな一歩となる。磁場耐性量子センサーが実現すれば、高エネルギー実験をはじめ、幅広い物理実験で新たな検出装置として使用できると注目されている。量子デバイスがどのような物理学を切り開いていくのか、期待が高まる。

©ICEPP





先端計算技術



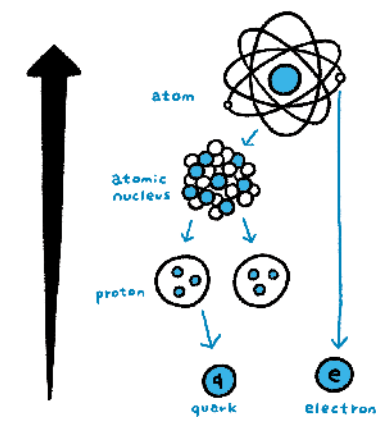
ひろがる!

素粒子

つながる!

物理

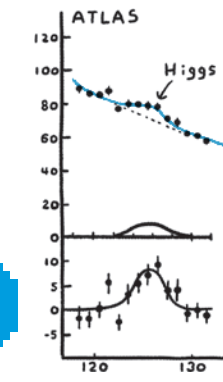
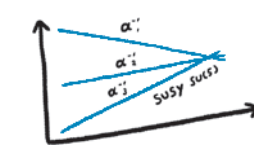
監修：奥村恭幸 (ICEPP)



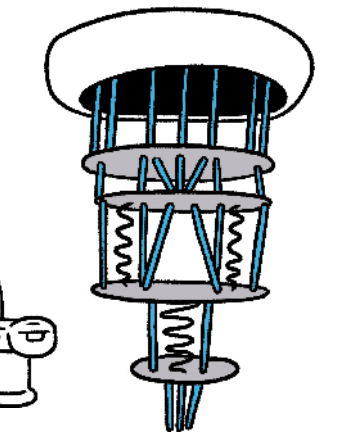
粒子を使う

調べる

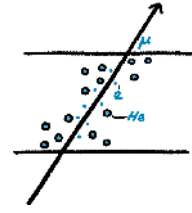
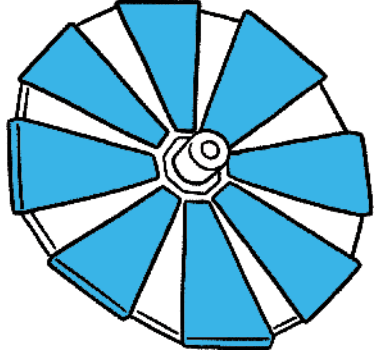
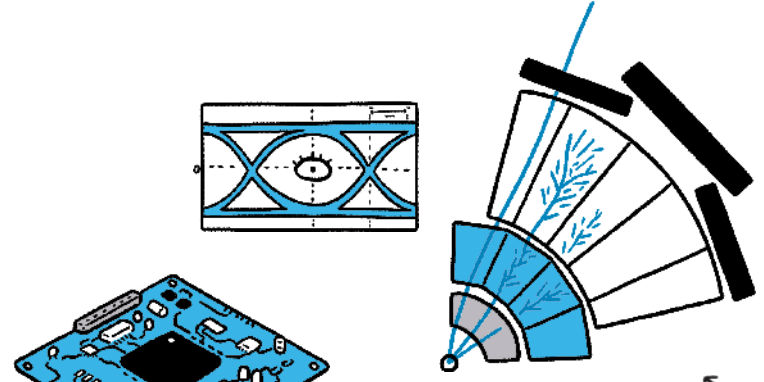
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \psi\bar{\psi}\phi + h.c. + |D_{\mu}\phi|^2 - V(\phi)$$



社会応用

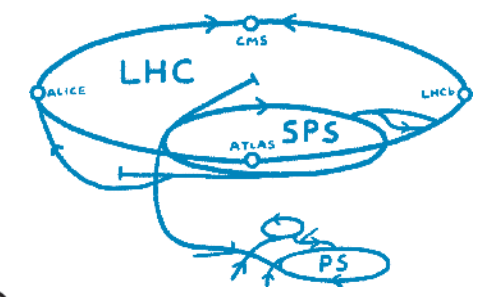
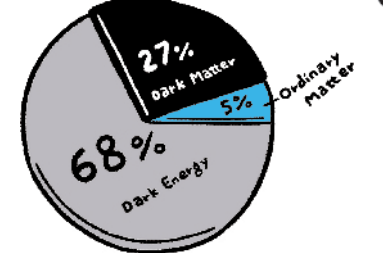
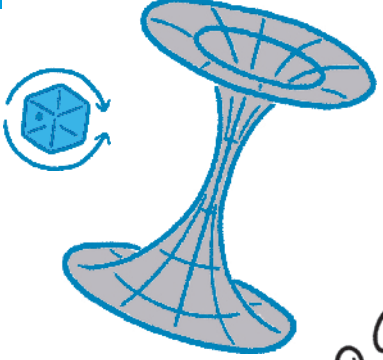
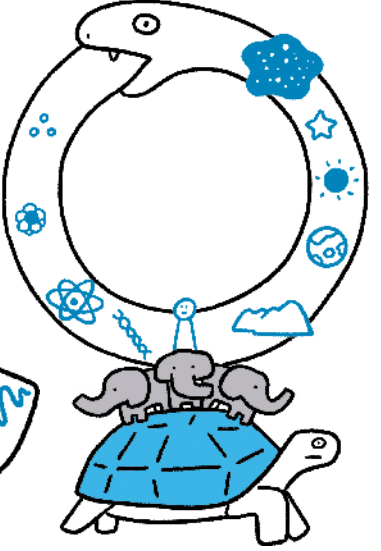
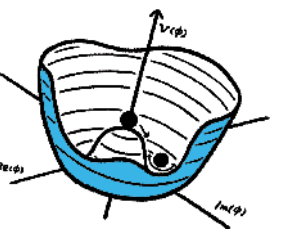
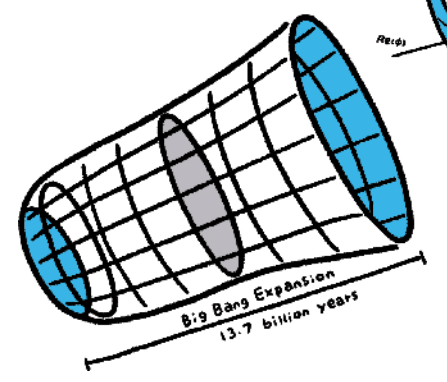


実験技術

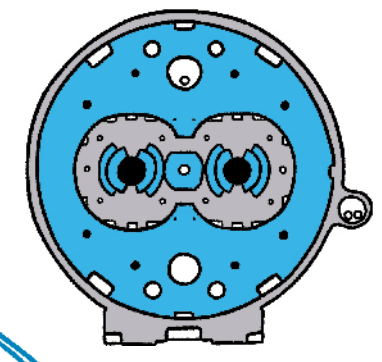


素粒子・宇宙の

サイエンス



加速器



素粒子物理の「つながる」話

最高のサイエンスのためには先端技術の導入と応用が欠かせません。産業界や工学分野で培われた高度な技術を積極的に取り入れ、大発見を目指します。AI等の高度なデータ解析技術を用いた微弱な信号の検出、量子コンピュータ技術を用いた新粒子検出手法の探究、高速エレクトロニクス技術の実験への応用等は、我々の研究の主要なテーマの一角を成します。さらに、加速器や検出器の先端技術は、工学や医療などさまざまな分野に活用されています。素粒子物理学の研究は、学術の枠を超え、社会や産業とも深く結びついて展開されているのです。

素粒子物理の「ひろがる」話

素粒子物理学は、物質の究極の姿を解明し、素粒子間の相互作用を研究する学問です。加速器などを使って実験室で粒子を詳細に観測・解析することによって、自然界の根本的な仕組みに迫ります。その対象は単に粒子そのものにとどまらず、宇宙の起源や進化といったスケールへと広がっています。特にヒッグス粒子の発見を契機として、素粒子物理は「この宇宙はどのようにして誕生したのか?」という根源的な問いに挑む学問へと進化しました。また、宇宙観測により存在が示唆されている暗黒物質を、素粒子物理の言葉で説明しようとする挑戦も続けられています。

素粒子物理学の
“今”を読み解く

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。

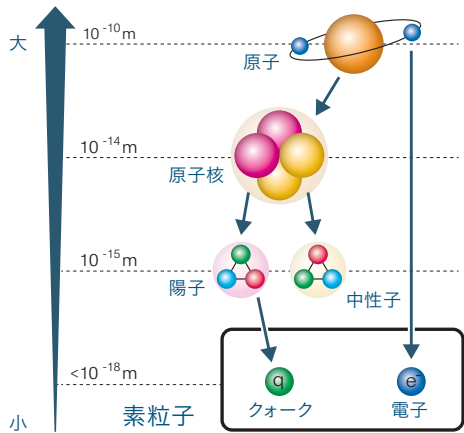
01	原子の内部構造
	原子は素粒子で できている

物質の最小単位は「原子」ではない。そのことがわかったのは、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（p.26・1参照）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」の存在が预言され、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。



02	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预言された（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年に質量の起源と预言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	チャーム c	トップ t
	ダウン d	ストレンジ s	ボトム b
レプトン	eニュートリノ ν _e	μニュートリノ ν _μ	τニュートリノ ν _τ
	電子 e	ミュー粒子 μ	タウ粒子 τ
物質粒子			
強い力 g グルーオン		弱い力 W ⁺ W ⁻ Z Wボソン Zボソン	電磁力 γ 光子
力を伝える粒子			H ヒッグス粒子
			ヒッグス場に 伴う粒子

標準理論に含まれる素粒子

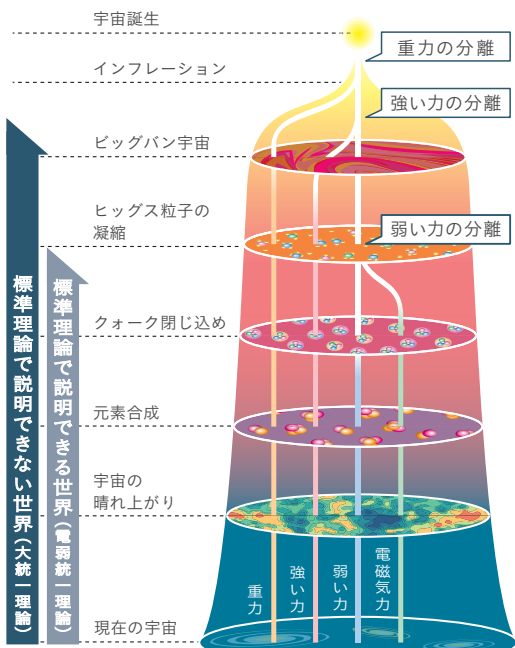
03	標準理論の限界
	標準理論が直面する いくつかの限界

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。



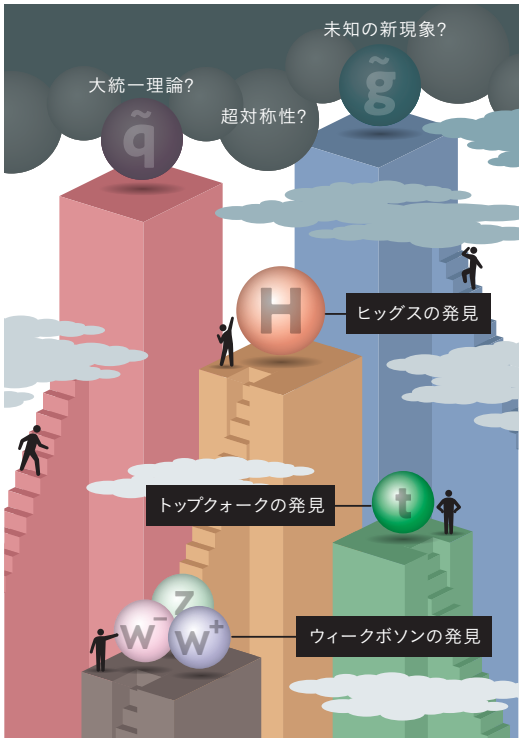
04	標準理論を超えて
	標準理論を超える 究極の理論とは

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」の存在を预言している。

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いまだ考え出されていないが、素粒子物理学の歴史は、先人たちの预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。





素粒子物理国際研究 センターの取り組み

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50年以上、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一層強めるとともに、拠点機能の拡充に努めています。

センターの歩み

ATLAS実験

Page_18

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。2022年に第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

MEG実験

Page_20

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、イギリス、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2022年に開始し、本格的なデータ取得により、世界に先駆けて前人未到の領域を探索します。



ポールシェラー研究所（PSI）

©PSI

ILC計画

Page_24

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。この国際的なプロジェクトが実現すれば、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

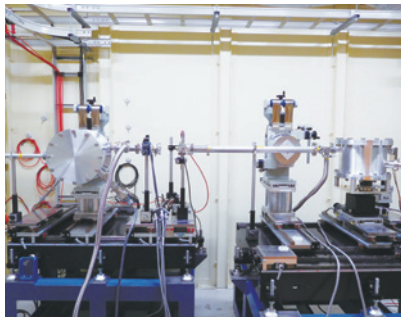
©Rey,Hori

TABLETOP実験

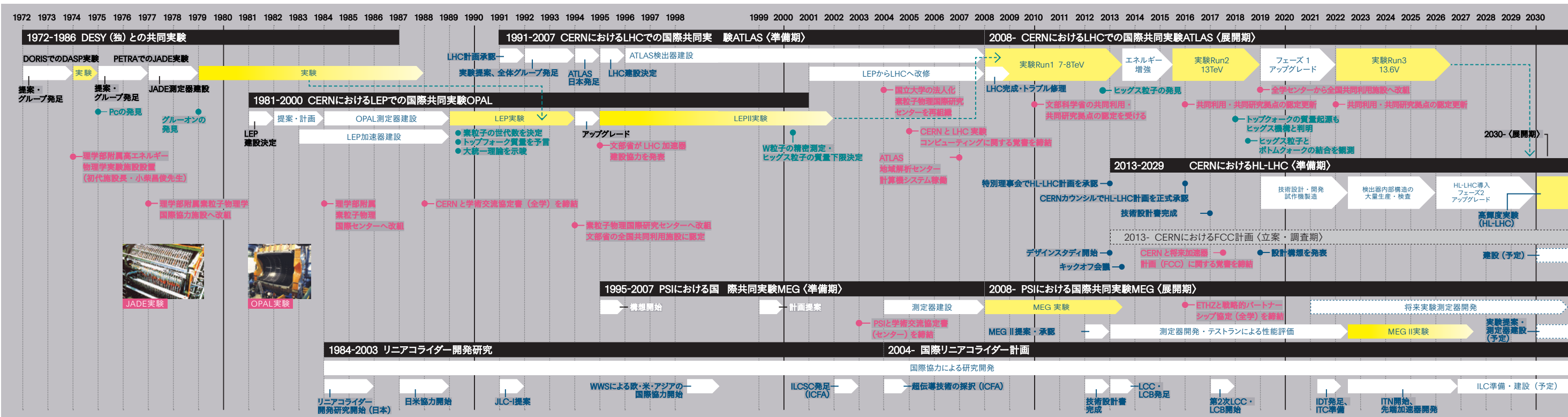
Page_25

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て実験を行ない、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「ボジトロニウム」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



ATLAS EXPERIMENT

ICEPP
RESEARCH PROFILE
2025

「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（p.26-1参照）。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、2015-18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、検出器もトリガーを中心としたデータ収集系のアップグレードを行なった結果、Run3のデータ収集は目標を大きく上回るレベルで推移しています。このデータを使って、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、直接的かつ実験的に研究していきます。

ATLAS実験は、世界40ヶ国から177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。大学院生・技術専門家を含む約5,900名の研究者が携わり、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160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。そのうち約40人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」（p.26-2参照）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、2030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倍に高めると同時に、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、高輝度LHC実験では積分輝度にして3,000 fb⁻¹に相当するデータの蓄積が可能となり、新粒子探索範囲のさらなる拡大、測定の高精度化を進めていきます。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。



田中純一 教授

≫ ATLAS日本グループ共同代表者（2024年4月より）
≫ ATLAS Higgs $H \rightarrow \gamma\gamma$ 解析グループ責任者（2011年10月より1年間）

略歴

2002年 博士(理学)
2004年 東京大学素粒子物理国際研究センター助手
2010年 東京大学素粒子物理国際研究センター准教授
2018年 東京大学素粒子物理国際研究センター教授

MEG EXPERIMENT

ICEPP
RESEARCH PROFILE
2025

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（p.14参照）。

$\mu \rightarrow e\gamma$ 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、宇宙の始まり（ビッグバン）を包括的に説明する「超対称大統一理論」（p.15参照）では、数千億～数十兆回に1回程度という非常に小さな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なります。一方、観測されなければ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。

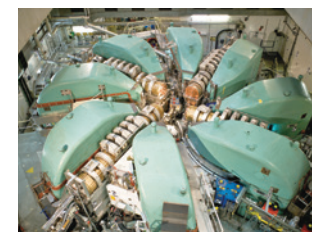
MEG実験は、本センターの研究者が中心になって設計・提案した国際共同研究プロジェクトです。実験の重要性を認識したイタリア、スイス、アメリカ、ロシア、イギリスの研究者たちが加わり、約70人体制でスイスのポールシェラー研究所（PSI）を拠点に行なっています。

きわめて稀にしか起こらない $\mu \rightarrow e\gamma$ 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（電子の反粒子でプラスの電荷を持つ、 e^+ ）を計測する「COBRA陽電子スペクトロメータ」や、 γ 線を測定する「液体キセノン γ 線測定器」をはじめ、実験の主要部分を担当するとともに、研究グループ全体を主導する役割を担っています。

MEG実験は、その最終結果として $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が2.4

兆回に1回未満の確率でしか起こらないことを明らかにしました。これは超対称大統一理論をはじめ、標準理論を超える新理論を厳しく制限するもので、さらに高い精度で新理論の妥当性を検証することが急務となっています。そのため測定器性能を大幅に改善し、より高いビーム強度でデータ取得を行なうことで観測感度を1桁高め、約20兆回に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、2021年から開始しました。すでに2022年までの取得データを用いてMEG実験を大きく上回る感度で探索を行ない、6.7兆回に1回未満の頻度でしか起こらないことを示しています。今後2026年までデータ取得を続け、目標の実験感度で探索することで $\mu \rightarrow e\gamma$ の発見を目指します。

$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊がMEG II実験で発見されれば、次はその詳細研究が必要です。PSIではさらに100倍多くの μ 粒子を作り出せる新しいビームラインが2028年から稼働予定であり、本センターの研究者が中心となって次世代実験の実現を目指した国際的な研究開発を進めています。本センターはMEG・MEG II実験によって、 μ 粒子など荷電レプトンを使って新理論を検証する素粒子物理学の新分野「荷電レプトンフレーバー物理」を切り拓きました。現在、3つの大規模な実験計画が日・欧・米で進んでおり（COMET、Mu3e、Mu2e）、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。



©PSI

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。



大谷 航 教授

≫ MEG・MEG II 実験物理解析責任者
≫ ILC国際推進チーム（IDT）科学セクレタリ
≫ 国際測定器開発コラボレーションDRD6
執行部メンバー

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
2025年 東京大学素粒子物理国際研究センター教授

QUANTUM SCIENCE

ICEPP
RESEARCH PROFILE
2025

量子コンピューティングが導く

素粒子物理学の未来

IBM Quantum

量子コンピュータには、古典コンピュータよりもはるかに高速に解ける問題があ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だけでなく、0でも1でもない状態を「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、1,000個を超える量子ビットを備えた量子プロセッサも実現されており、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「量子アルゴリズムの研究」です。特に量子AI（人工知能）に重点を置き、物理データの量子機械学習やAI応用の研究を進めています。また中長期的な量子コンピュータへの拡張を見据え、最先端の理論手法を開拓し、基礎物理での計算可能領域を広げる取り組みも行なっています。2030年開始予定の高輝度LHC実験ではデータ量がさらに1桁以上増えるため、量子コンピュータを活用した解析手法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、より複雑な高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「量子デバイスの開発・応用研究」です。超伝導量子ビットに焦点をあて、大型量子コンピュータの実現に向けた研究やコンポーネント開発を行なっています。また本センターの強みとして、量子ビット技術を使った暗黒物質の探索や人工ブラックホールの生成など、素粒子・宇宙物理への応用研究も強力に進めています。

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Fermilab、シカゴ大学、スイスのCERNの4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 教授

- ≫ CERN Quantum Technology Initiative
プロジェクトコーディネーター
- ≫ 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
- ≫ IBM東大ラボ長

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 |
| 2024年 | 東京大学素粒子物理国際研究センター教授 |

ILC PROJECT

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。

ILD (International Large Detector)

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。

SiD (Silicon Detector)

ヒッグス粒子の精密測定を介して

時空の謎に挑む

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) を加速し、最高エネルギーで衝突させ、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。ILCは素粒子物理の次世代基幹プロジェクトであり、2030年代後半の稼働を目指しています。CERNのLHCは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たとえられます。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 (p.27-4参照)。ヒッグス粒子を詳しく調べるには、大量に生成できる

「ヒッグス・ファクトリー (工場)」加速器が必要です。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、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、長年の国際共同研究を経て、技術設計書 (TDR) が2013年に完成しています。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・建設開始に向けた準備が進んでいます。IDT科学セクレタリに大谷航准教授、国内のILC推進母体であるILC-Japanに石野雅也センター長がスポークスパーソンに率いています。次世代の素粒子物理を牽引する基幹プロジェクトの実現に向けて、本センターの研究者も力を合わせて取り組んでいます。



末原大幹 特任准教授

- ≫ ILC-Japan 物理ワーキンググループ 座長
- ≫ 高エネルギー物理学研究者会議 将来計画検討委員会委員

略歴

2008年 博士(理学)、東京大学素粒子物理国際研究センター 特任研究員
2013年 東北大学大学院理学研究科物理学専攻助教
2013年 九州大学大学院理学研究院物理学部門助教
2023年 東京大学素粒子物理国際研究センター特任准教授

ICEPP
RESEARCH PROFILE
2025

TABLETOP EXPERIMENT

多彩な技術で未知の物理現象を探索する

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。特殊な粒子ビームや特別なセンサーを開発・利用することで、大型加速器では難しい実験を高い精度で行ないます。

「コヒーレントな光」は、有力な実験手段です。光子は、陽子や電子とは異なり、全く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)。近年の量子光学技術の急速な進展により、レーザーに代表される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ることができるようになりました。強いエネルギーを一点に集中させたり、干渉の効果を利用して微小な変化を観測することもできます。

もし、「真空」の一部にエネルギーを集中すると何が起こるでしょうか。現代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。そのような真空中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実験を行なっています。

歪みの検出にも光を利用しています。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、微小な歪みの検出には波長が短いX線が有利であるため、理化学研究所のX線自由電子レーザー (SACLA) も利用します。SACLAでは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。

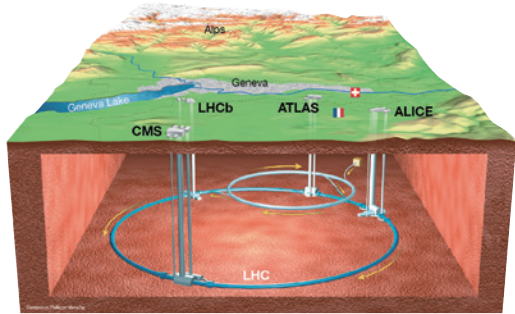
電子の反粒子である陽電子のビームを使い、「反物質を含んだコヒーレント状態」を作る実験も行なっています。陽電子と電子が対となった準安定な複合粒子であるポジトロニウムは、密度を高めて冷却すると、単一な量子状態に縮退すると考えられています (ボース・アインシュタイン凝縮)。この状態を作り出せば、物質と反物質の対称性を詳細に調べたり、ガンマ線レーザーの源として利用することができます。ポジトロニウムに特殊な紫外線レーザーを照射し、世界初のレーザー冷却を行なうことに成功しました。現在、密度を高めるために、ポジトロニウムを封入する物質の開発に取り組んでいます。いろいろなアイデアで、世界最高レベルの感度の実験を行なっています。

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」ともたとえられる。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2030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でつく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。全長約80km、衝突エネルギーは

最終的にLHCの約6倍を目指しているFCC（将来円形衝突型加速器）の議論が、2040年代後半の第一期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。



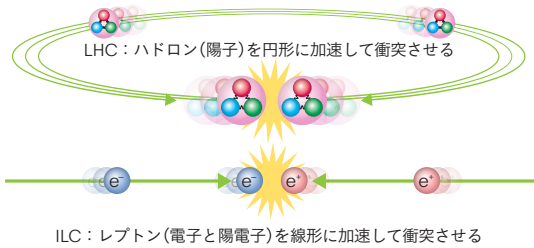
LHC全景イメージ図。4つの巨大な検出器ATLAS、CMS、ALICE、LHCbが、衝突によって生まれた粒子をとらえる。

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陽子のような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」加速器には本質的な制約がある。電子や陽電子は質量が軽く、曲がる際に放射光を出してエネルギーを失ってしまう。そのため、最高エネルギーの円形加速器はハドロン型となっている。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のような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。



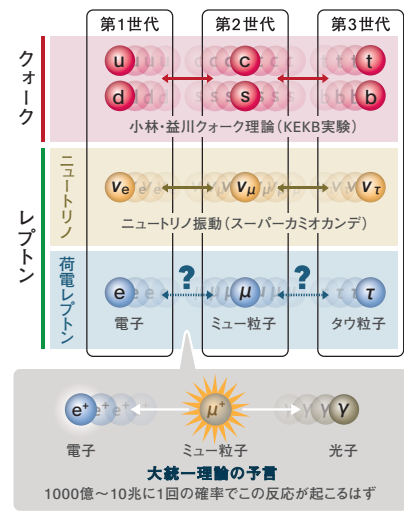
LHCとILCの加速器の性質の違い。ILCは、単体の素粒子(電子と陽電子)を衝突させるため、素粒子の詳細な性質を調べるのに適している。

5

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掴んだ（2015年ノーベル物理学賞）。MEG実験は、「超対称大統一理論」が予想する μ 粒子と電子の間の世代混交を世界最高感度で探索しており、その成果は世界の研究者の大きな注目を集めている。

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」の検証を行なっている。



2

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相互に接続した「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第2位で、ATLAS実験の全メンバーに開放されている。

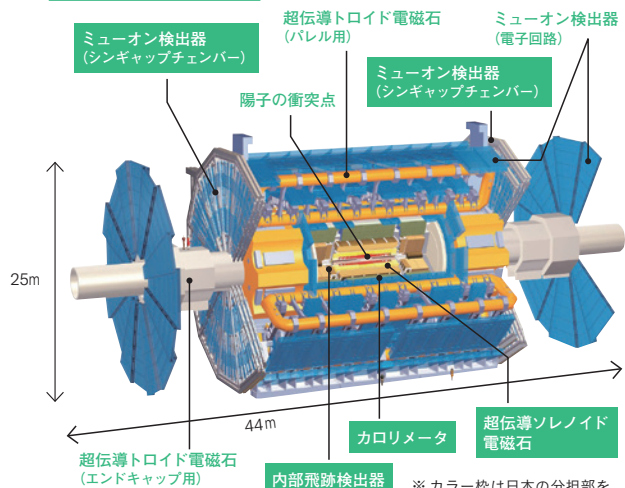
地域解析センターは2007年1月に稼働し、年間稼働時間は約8,700時間に上る。これまで処理された解析ジョブ数は、WLCG全体で上位クラスにあり、ヒッグス粒子発見につながるデータ解析への貢献も認められている。2024年度の実績で、国内の研究機関に所属する利用者は120人、外国の研究機関に所属する利用者は1,000人に及ぶ。

3

新粒子の発見を目指す ATLASの仕掛け

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）。カラー枠で記した箇所が、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の役割はますます大きくなる。

ATLAS 検出器概要



※ カラー枠は日本の分担部を示す。カロリメータはアップグレード実験に向けた追加開発。

6

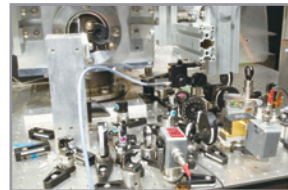
素粒子の世代に潜む謎

真空回折実験の集光部分



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。

真空複屈折実験の検出部分



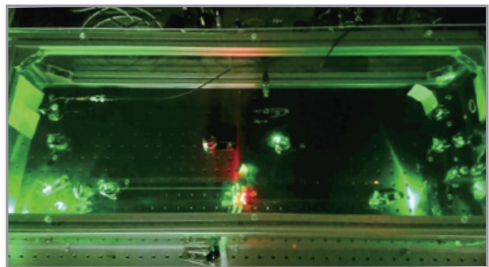
強磁場による真空の歪みを探索する装置。強磁場中を通過しわずかに偏光が変わった赤外線レーザーが、左奥の丸い窓から出てくる。手前に配置された光学素子でその微小な変化を検出する。

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導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。

ポジトロニウム冷却用レーザー生成装置



光共振器と増幅器、変調器を組み合わせ、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、ポジトロニウム冷却光源として利用する。

学問と未来を広く俯瞰できる教育研究体制

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。研究視野を広げるための研究室ローテーション、副指導教員制度なども充実しています。

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 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	令和 5 年度	令和 6 年度
研究室数	9	7	8	8	9	8	8	8
修士課程	18	16	17	21	20	18	23	20
博士課程	24	22	21	19	16	17	17	20
合計	42	38	38	40	36	35	40	40

学位取得の推移

(単位：人)

	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	令和 5 年度	令和 6 年度
修士課程	10	8	5	7	13	7	10	12
博士課程	6	2	8	7	2	4	1	3
合計	16	10	13	14	15	11	11	15

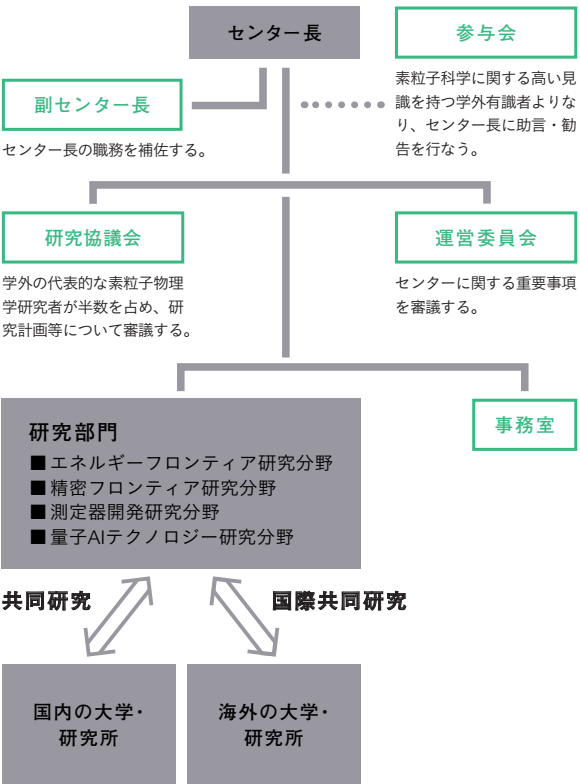
次世代研究者挑戦の研究プログラム

グリーントランスフォーメーション (GX) を先導する高度人材育成



2021年秋より理学系研究科が開始した国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の事業で、東京大学のすべてのアセットを投入し、GX実現に向けて活躍する人材を広範囲な専門分野で規模感をもって輩出することを目的にしています。GXに関する俯瞰講義、全学レベルの学生交流を通じて自らの研究とGXの関係を見出すグリーン未来交流会、多様な分野の最先端研究とGXの関わりを気づかせるGXインスパイア講義の3つの基幹プログラムのほか、高度スキル養成プログラムもあり、充実の支援体制が取られています。毎年、公募制でプロジェクト生を募集しており、採択された本センター研究室の大学院生は自らの研究とGXのつながりに対する観察力や洞察力を高めるとともに、好奇心をもって挑戦的・創発的研究に取り組んでいます。

組織図



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年度より新たな6カ年のビジョンに基づく活動を続けています。

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。

組織人員

(単位：人)

		内訳			
	現数	女性	外国人	若手	客員
教授	4	0	0	0	3
准教授	3	0	0	1	2
特任准教授	1	0	0	0	0
助教	12	1	2	5	0
特任助教	7	0	2	7	0
特任研究員	5	0	2	4	0
技術職員	1	0	0	0	0
学術専門職員	1	1	0	1	0
事務職員	4	4	0	1	0
合計	38	6	6	19	5

■ 本センターは、38人体制で運営しています (令和7年7月現在)。
■ 若手研究者 (※20代・30代) が半数を占めています。

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 (p.26参照)
- 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)
- 粒子物理コンピューティングスクール

独自の若手育成プログラム

- ICEPPフェロシップ
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シンボジウム
素粒子物理学分野の研究者 (特に大学院生) と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

オープンキャンパス

センター見学、アウトリーチ活動等

ウェブサイト、刊行物、SNS



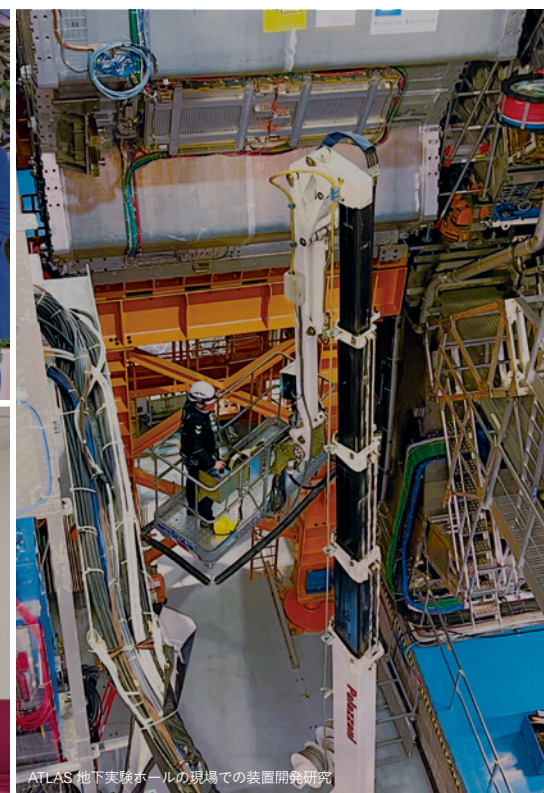
CERNでHL-LHC ITリングの相互接続作業が開始



2025年2月 ATLAS Thesis Award 2024受賞



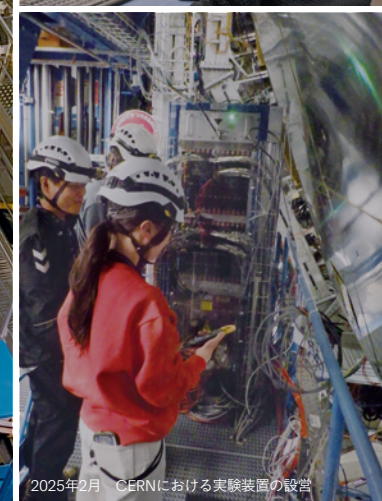
ATLASフロントエンドのデジタルエレクトロニクス(PSボード)の量産作業



ATLAS 地下実験ホールの現場での装置開発研究



ATLASコントロールルームでモニターする学生



2025年2月 CERNにおける実験装置の設置



2024年8月 ベトナムで開催されたAxion国際会議で招待講演



2024年7月 シカゴ大学とのASPIREキックオフミーティング



2024年7月 東京大学でのILC国際会議(LCWS2024)



MEG II実験液体キセノン測定器のコミッショング



MEG II実験陽子タイミングカウンター



MEG II 実験背景事象削減に向けた開発



希釈冷凍機の複雑な配線作業



米国LBNL研究者との量子アルゴリズムミーティング



IBM Eagleプロセッサ



2024年11月 ICEPP創立50周年記念式典・シンポジウム



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7年7月4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