

R-parity violating

NMSSM

Supersymmetry

# RESEARCH PROFILE

Gravitino DM

Q-balls

R-parity Conserving

Solitonic DM

Dynamical DM

MACHO

UED DM

Primordial Black Holes

Quark Nuggets

6d

5d

RS DM

T-odd DM

Extra Dimensions

2026 edition

Warped Extra Dimensions

Little Higgs

Littlest Higgs



ICEPP

Based on the work by  
Tim M. P. Tait and  
Jen Christiansen

## 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

### SHED LIGHT ON DARK MATTER

暗黒物質の正体を解明せよ

16

### EXPANDING FRONTIERS

ひろがる! つながる! 素粒子物理

18

### HISTORY AND TREND

素粒子物理学の“今”を読み解く

20

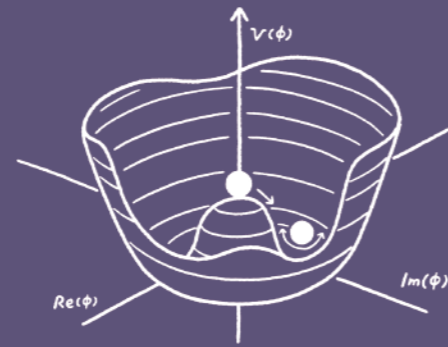
### COLLABORATION

素粒子物理国際研究センターの取り組み

22

### 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



24

### MEG EXPERIMENT

MEG実験をさらなる高みへ  
大統一理論の証拠を探る

26

### 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

28

### ILC PROJECT

ヒッグス粒子の精密測定を介して  
時空の謎に挑む

29

### TABLETOP EXPERIMENT

多彩な技術で未知の物理現象を探索する

30

### COLUMNS

もっと知りたい!  
素粒子と実験装置の話

32

### ICEPP UTOKYO

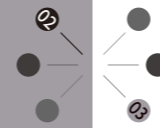
教育・組織概要

34

### LAB GALLERY

ラボ風景

編集ディレクション 清水修 (ACADEMIC GROOVE MOVEMENT)  
取材・文 荒船良孝  
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 グスマ・クリスチャン (細山田デザイン事務所)、  
河村織恵  
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



## 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えます。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。



# SHED LIGHT ON DARK MATTER

## 暗黒物質の正体を解明せよ

正体不明の謎の物質、暗黒物質。  
未だに解き明かされていないミステリーの1つだ。  
謎に満ちて、ミステリアスな雰囲気纏う暗黒物質という言葉は、  
たくさんの人たちの興味を惹く。  
暗黒物質は、物理学者にとってどんな存在なのだろうか。

**現** 在の宇宙論では、原子などでできている通常  
の物質は宇宙の全エネルギーの5%に満たな  
いという。残りの95%の内訳は、ダークマター（暗黒  
物質）が27%ほど、ダークエネルギー（暗黒エネルギー）  
が68%ほどとなっている。

どちらも、名前がついているものの、その正体は不明。  
ダークには、「何もわからない」という意味もあり、謎  
の物質、謎のエネルギーと表現した方が実情に沿って  
いるだろう。

暗黒物質は、何らかの物質であると考えられている  
が、それ以上のことはわかっていない。電磁波を放出  
しないので、望遠鏡などで直接とらえることはできない。  
しかし、さまざまな観測結果から、その存在は確実視  
されている。暗黒エネルギーは宇宙を加速膨張させる  
原因と考えられているが、その物理的性質は明らかにな  
っていない。

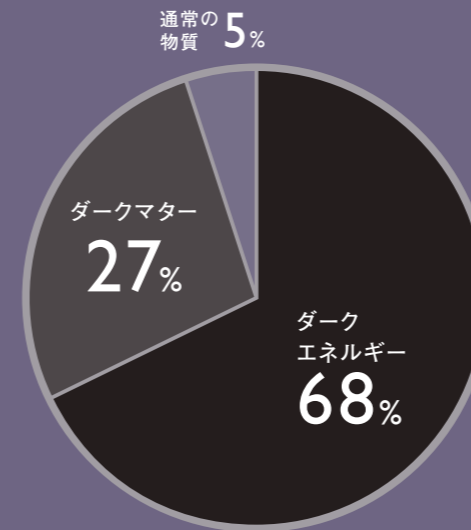
暗黒物質の歴史は意外と古く、1930年代前半までさ  
かのぼる。まず、オランダの天文学者ヤン・オールド  
が星の運動速度から質量を割り出したところ、「星の明  
るさから計算した質量よりも重かった」と発表した。

1933年にはスイスの天文学者フリッツ・ツビッキーが  
銀河団の質量を計算してみると、運動速度から求めた  
数値が、星の明るさから求めた数値の400倍も重かった。

これらのずれは、「ミッシング・マス（失われた質量）  
問題」とも呼ばれた。このミッシング・マス問題を説  
明するために、ツビッキーが考えたものが暗黒物質だ。  
ツビッキーは1937年に暗黒物質に関する論文を発表し  
たが、あまり注目されず、発表から40年ほど経っても、  
10回ほどしか引用されなかった。この頃、暗黒物質の  
議論が盛り上がらなかったのは、その存在を検証する  
ための観測技術がなかったという事情もある。

暗黒物質が再び天文学の話題に上るようになったの  
は、1970年代になってからだ。アメリカの天文学者ヴ  
ェラ・ルービンが銀河の中の星の動きを測定し、銀河  
の回転速度を求めたところ、不可解な結果が出た。銀  
河は中心部分から離れるほど星の数が少なくなる。重  
力の理論に従えば、星の数が少ない場所は回転速度が  
遅くなるはずだ。しかし、中心から離れても回転速度  
は変わらなかった。この結果から、ルービンは銀河の  
質量は見えている星の質量の5倍ほどであると結論づけ、

## 1980年代以降、定説となった 宇宙の組成



村山斉特別教授(東京大学)は、暗黒物質を「私たちの生  
き別れのお母さん」と表現しています。暗黒物質は宇宙  
の構造形成で重要な役割を果たしており、暗黒物質がな  
ければ銀河も星も私たちが生まれていなかったのです。

暗黒物質が存在することの説得力が増した。

また、1979年に、クェーサーの観測から重力レンズ  
効果が、初めて観測されたことも、暗黒物質の研究に  
追い風となった。重力レンズ効果とは、質量の大きな  
ものによって光が曲げられる現象だ。この重力レンズ  
効果を活用することで、望遠鏡では直接見ることので  
きない暗黒物質が宇宙のどこに、どのくらいあるのか  
を見積もることができる。

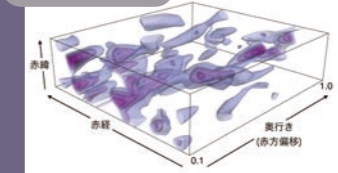
すばる望遠鏡をはじめとする大型望遠鏡がたくさん  
の銀河を観測し、暗黒物質の分布マップをつくってい  
る。2026年1月には、ジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡  
の観測結果から、これまでよりも解像度の高い分布マ  
ップが作成され、話題になった。ちなみに、ICEPPの  
研究者を紹介している『All Researchers' Book 2026』  
の表紙は、現在判明している「暗黒物質分布を示す3D  
マップ」をビジュアル化したものである(右図)。

この宇宙の中に暗黒物質が存在することは、間違い  
ない。しかし、その正体につながる情報は、まだほと  
んどない。現在も、世界中の研究者がその正体に迫る  
うと研究を続けている。

## 暗黒物質を取り囲む グローバルな探索網

### 望遠鏡でのぞきこむ

すばる望遠鏡



ジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡

アタカマ天文台

暗黒物質フィラメント

暗黒星

### 宇宙線から探る

CTAO

Super-Kamiokande

IceCube

### 地下で待ち伏せ

XENONnT

XMASS

NEWAGE

### 加速器でつくる

LHC

WIMPs

### 量子技術の応用

DarQ

ADMX

アクシオン

ダークフォトン

● =ICEPPが手掛ける  
プロジェクト

# 暗黒物質は新たな粒子？

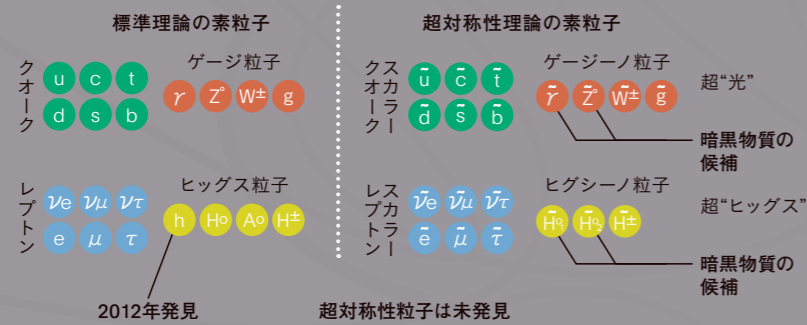
暗黒物質は光のように簡単に消滅・生成しないことから、何らかの物質であると考えられている。しかも、素粒子の標準理論の範囲に納まらないことから、まだ私たちが知らない未知の粒子である可能性が高い。

## 標準理論から超対称性理論へ

素粒子物理学は、この宇宙を構成する物質や力が素粒子によるものであることを明らかにし、素粒子の標準理論として体系化した。そして、2012年にヒッグス粒子が発見されたことで、標準理論は完成した。だが、標準理論で説明できる範囲は、この宇宙の5%ほど。暗黒物質や暗黒エネルギーにつ

いては、理論の範囲外だ。そのため、暗黒物質や暗黒エネルギーなど含めて、宇宙のしくみを説明できる新たな理論の構築が求められている。その有力な候補の1つが超対称性理論だ。素粒子物理学の世界には、さまざまな対称性がある。例えば、電荷 (Charge)、パリティ (Parity)、時間 (Time) など

関する対称性がある。超対称性理論は、物質を構成するフェルミオンと力を媒介するボソンを入れ替える対称性だ。超対称性の導入により、フェルミオンとボソンのそれぞれに超対称性のパートナーとなる新たな粒子があるはずで、それらの粒子の中には、暗黒物質の候補と考えられるものがある。



## WIMPとは？

暗黒物質の候補はいくつか考えられているが、その中でも特に有力だと目されているのがWIMPだ。WIMPはWeakly Interacting Massive Particlesの略で、日本語では「弱く相互作用する重い粒子」となる。ただ、

この名前も、特定の粒子を指しているわけではなく、これまでの研究結果から想定される暗黒物質の性質を現しているにすぎない。その正体を明らかにするために、今、この瞬間も世界中の研究者が実験や観測を続けている。

## WIMPの奇跡

暗黒物質がWIMPだと仮定すると、現在の宇宙におけるWIMPの残存量が、実際に観測された暗黒物質の量と見事に一致する。これを「WIMPの奇跡」という。

## ICEPPのもうひとつの挑戦

### アクシオン ダークフォトン

WIMPは重い粒子だが、質量が軽い暗黒物質候補もある。アクシオンとダークフォトンだ。ICEPPでは量子ビットを使ってこれらの粒子を観測する研究も進められている。

ICEPPはこれ！

### LHC

CERNの世界最高エネルギー加速器。光速に近い速度に加速した陽子どうしを衝突させ、さまざまな粒子を作る。そのなかに暗黒物質の候補が期待されている。

### XENON

イタリアの地下で実施されている国際共同研究。巨大なタンクを液体キセノンで満たし、暗黒物質がキセノン原子と衝突する反応を直接観測することを目指す。

### 宇宙ガンマ線観測

暗黒物質が対応する反粒子と対消滅してガンマ線やニュートリノなどが発生すると考えられている。それらを観測することで、暗黒物質の正体に迫っていく。

## 暗黒物質探索LHC座談会

# 謎に包まれた暗黒物質の正体を探る研究者たち

暗黒物質の正体の解明は、現代物理学の抱える大きなテーマの1つだ。世界中の研究者が大きな関心を持ち、研究を進めている。暗黒物質の研究に取り組んでいる研究者や学生が集まり、暗黒物質やそれぞれの研究などについて語り合った。

©CERN

## 宇宙物理学と素粒子物理学の要

齋藤 私は学生時代から暗黒物質に興味を持ちました。当時、NASAのWMAP衛星の観測結果から、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の全天マップを作成し、宇宙の年齢や構成成分などが具体的な数値として示されたのです。原子でできた物質が宇宙の5%ほどしかなく、残りは正体不明の暗黒物質と暗黒エネルギーだったという解析結果に、とても惹かれました。正体不明のものの量を正確に測ったことに衝撃を受けました。

三野 素粒子の標準理論では説明できない問題はいろいろありますが、その中でも暗黒物質は特異な存在ですよね。天文学的にあることがわかっているけど、正体がわかっていない。そういうところから、暗黒物質に興味を持ち、探索を続けたいと考えています。

齋藤 当時は研究者になって、暗黒物質の正体をすぐに解明して、暗黒エネルギーも研究したいと漠然と考えていました。暗黒物質は宇宙物理学と素粒子物理学の共通課題として、現在も興味深いテーマですね。

杉崎 私は「正体不明」という言葉に好奇心をくすぐ

られます。確かに暗黒物質は、宇宙物理学と素粒子物理学の中で要のような存在です。その正体がわかれば、どちらの研究分野でも芋づる式にいろいろなことがわかってくると思います。かなり重要な存在ですし、そこが惹かれる理由です。

齋藤 ちなみに、杉崎さんはなぜ、素粒子物理学を選んだのですか。

杉崎 宇宙の起源に焦点を置くと、物質とは何なのかという話になってきます。物質の起源を研究するのは素粒子物理学かなという気持ちからです。

齋藤 私は進路を選ぶときに、それぞれの分野の境界や違いがよくわかっていませんでした。どの道を選ぶのかは、難しいですね。

杉崎 私は大学4年生までは理論研究をしていましたが、実験の方が面白そうだと思うようになり、大学院から実験に取り組んでいます。人生は本当に何があるかわからないですね。

## 宇宙と量子力学と素粒子物理学

成川 杉崎さんは、宇宙の何に惹かれたのですか。  
杉崎 最初は、「何で自分はここにいるのだろう。何のために生きているのだろう」という疑問からです。哲学的ですけど。そこからどんどん突き詰めていって、「なぜ、宇宙がはじまったのか」という問いにたどり着いたという感じです。

成川 私も小さい頃は、そういうことに興味があったのですが、考えると怖くなっていました。杉崎さんがよく向き合いながら興味を持ち続けていたという話を

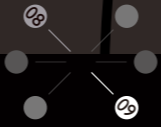


TOMOYUKI SAITO

## 齋藤智之

助教 ATLAS

ポスドクからICEPPへ。CERN常駐の研究者としてATLAS実験の各種コーディネータを歴任。ATLAS Outstanding Achievement Award 2018および同2025を受賞。二度の受賞はATLASコラボレーション(約3,000人)で史上5人目の快挙。



聞いて、「カッコいいな」と思いました。

三野 杉崎さんの疑問の持ち方は、他の分野に興味を持っていいように感じます。最終的に素粒子物理学を選んだ理由を知りたいです。

杉崎 それは宇宙に興味があったからです。まず、自分が地球上にいて、地球は宇宙の中にあるという感じで、なぜ宇宙があるのかが気になりました。宇宙のはじまりを研究する分野は物理学であり、素粒子物理学であったという流れです。

成川 私は、大学で習ってきた物理学を実感できたことが大きいですね。高校までの物理学は、ボールを投げたら何秒後にどこにあるとか、実感を伴って未来予知できるもので、そこに面白さを感じていました。しかし、大学で量子力学を本格的に学ぶようになると自分で確かめようのない世界に入ってしまったように感じるようになったのです。でも、学部生の頃にミュオンの寿命測定の実験を行ったときに、電子の時間分布が本当に理論通りの結果となったことで、量子力学の基礎が成り立っていることを実感し、素粒子物理学を選ぶ大きなきっかけになりました。

齋藤 山下さんはどうですか。

山下 私はファンタジー小説が好きで、日常生活とかけ離れた世界に憧れや面白さを感じてきました。その延長線上で宇宙にも興味を持ち、図鑑などを眺めていました。小中学生の頃から宇宙にロマンを感じていましたし、その頃から一番大きな課題として暗黒物質という言葉とよく出会っていました。中学生の頃、理科の先生に「暗黒物質を探したいな」と冗談のように言っていました。今、実際に取り組んでいて、何だか不思議な気持ちになります。

暗黒物質は実在する？

成川 基本的なことですが、皆さんは、暗黒物質の存在はどこまで信じていますか。銀河の回転速度から暗黒物質の存在がわかってきたという話は聞いていますが、私の中では存在しているという実感が薄いです。杉崎 暗黒物質自体は、100%あると思っています。それが素粒子かどうかはわかりませんが。

三野 暗黒物質の存在は、回転銀河だけでなく、2つ



YUYA MINO

## 三野 裕哉

特任研究員 量子ハードウェア

京都大学にて博士号取得後、ICEPPへ。第27回(2025年度)高エネルギー物理学奨励賞を受賞。

の大きな銀河団が激しく衝突したことで生まれた弾丸銀河団、重力レンズ効果など、複数の観測結果から示されています。それらを合わせると、ないと言うのは難しいと思います。

山下 いろいろな現象を一番合理的に説明できるものが暗黒物質であるなら、あると考えるのが妥当かなと思いますし、あると思って研究を進めています。

齋藤 これまでの研究から、暗黒物質と名前をつけた存在は、宇宙のどこにどれだけあるか、重力に対してどのように振る舞うかなどがわかってきました。それらの結果は、物質のような振る舞いをしているので、何らかの粒子と考えるのが第一候補ですね。もちろん、第二候補としては原始ブラックホールなど、粒子以外のものでも問題ありません。どちらが正しいかは、私の中では半々くらいですね。

成川 私たちは今、LHCのATLAS実験で暗黒物質探索をしています。ATLAS実験で必ずしも暗黒物質が見つからなくてもいいわけですよ。

齋藤 加速器で見つかれば嬉しいけれど、他の方法で発見されても大きなインパクトがあります。最近は、私たちが思い描いているような粒子でなくてもいいのかもしれないという気持ちも大きくなっています。

三野 暗黒物質の質量が重くなるほど、加速器のエネルギーを上げたり、データ量を増やしたりする必要があります。加速器実験で暗黒物質を作り出すのは大変になります。その点、宇宙観測での暗黒物質探索は、質量が重くても難易度は変わりません。そういう意味では探索しやすいのは宇宙観測ですね。

杉崎 ただ、地球の周りに暗黒物質がどのくらいあるのか、わかっていません。たまたま地球の周りに暗黒物質がまったくなかったら、地下の暗黒物質探索実験では検出できません。暗黒物質を直接つくることのできるのはATLAS実験の大きな強みですし、他の暗黒物

質探索とは、それぞれの弱点を補いあう相補的な関係と言えますね。

三野 そうですね。暗黒物質の性質などを精密に測定するためには、加速器実験が必要になります。暗黒物質の正体を確実に明らかにするには、複数の手法で観測する必要があると思います。

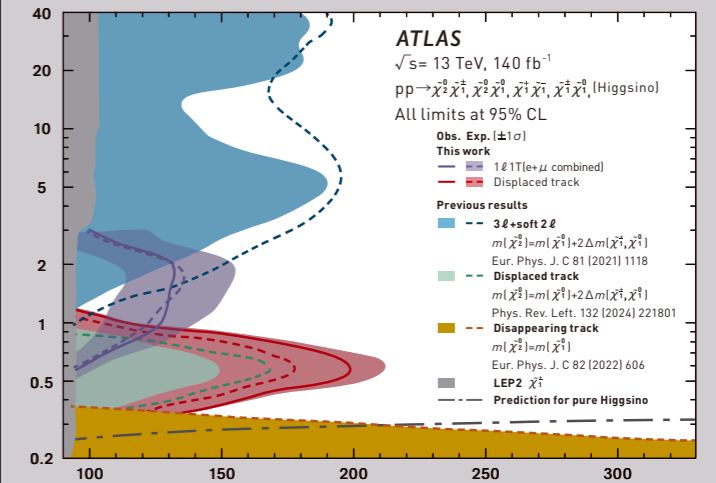
齋藤 加速器実験では、粒子を実際に作り出します。重力以外でどのような相互作用をするのか検証できることが大きな強みになりますね。

ATLAS実験での暗黒物質探索

山下 私たちの世代は、中学生や高校生ときにヒッグス粒子の発見やノーベル賞受賞のニュースがあり、それがとても印象に残っています。人類が作った実験施設で新粒子を作り、探索できるということが、私にはとても衝撃的でした。

成川 私はATLAS実験で、暗黒物質が通過した痕跡のようなものを検出することを夢見ています。私が仮定しているのは、超対称性粒子などの新粒子が検出器を通過した後に、暗黒物質を生成するような信号です。新粒子が通過した痕跡を再構成するのは、加速器実験しかできません。そのような信号を実際に見たいですね。今、100 $\mu$ m角の小さなシリコンチップでできたシリコンストリップ飛跡検出器に着目しています。この検出器は、荷電粒子が通過したときのエネルギーをとらえるので、エネルギーの大きさから、どんな粒子が通ったのかを見分けられます。このとき、とても大きなエネルギーを検出すると、新粒子が通った証拠になるので、そのような信号を探せるように研究しています。ミクロな物理を正確に理解して、解析できるようになると、宇宙の大きな構成成分である暗黒物質の探索につながります。そのつながりが面白いですよ。齋藤 暗黒物質は、光などを出さないで、直接、検出することができません。暗黒物質の正体を明らかにするために、どの検出器の何の情報を得て、解析するのかに、それぞれの研究者の個性が出ますね。

山下 私は、暗黒物質を直接検出することができない



2025年にATLAS実験グループが発表したヒグシーノ探索の最新結果。LHC第2期運用での実験データを機械学習も使い解析して、ヒグシーノが存在する可能性のある領域を狭めた。杉崎研究員の貢献が高く評価されている。

状況を逆にとり、平面上で左側だけエネルギーが欠損しているような不均衡が生じる事象を手がかりにして、暗黒物質の探索をしています。暗黒物質の探索はたくさんの人が、さまざまなモデルを使って研究してきた歴史があり、加速器で発見しやすいモデルは探索し尽くしています。ニッチな部分を探索していますが、発見するのが難しい状況です。

杉崎 私は、暗黒物質候補の中でもヒグシーノを探索しています。ヒグシーノが生成され、崩壊する現象は、ATLAS実験では電子やミュオンなどの2つのレプトンが発生する現象として観測できます。

ただし、ヒグシーノの崩壊によって発生するレプトンはエネルギーがとても低いです。ATLAS検出器では、低エネルギーの粒子が大量に発生します。その中から、電子やミュオンを識別することがとても難しく、私は機械学習を活用して、電子やミュオンの飛跡とノイズとなる他の粒子の信号を区別して、探索の感度を上げていく研究をしていました。今は暗黒物質の質量



KAITO SUGIZAKI

## 杉崎 海斗

ペンシルベニア大学 ポスドク

ATLAS

大学院からICEPPへ。博士号取得後、渡米。ATLAS Thesis Award 2024、第27回(2025年度)高エネルギー物理学奨励賞を受賞。

や結合定数がまったくわかっていません。膨大な時間と労力をかけて、工夫しながら解析しないといけないところが大変ですし、苦労している点です。

山下 チームを組んでいる同僚は機械学習を使っていますが、機械学習はブラックボックスになる面もあるので、私は手動でもとの粒子を再構成して、人間が理解できる形の探索方法を模索しています。機械学習が狙っている点と少し離れたところで、機械学習よりも感度を出せそうなデータの選別方法ができたときは嬉しかったですし、達成感がありました。ATLAS実験という巨大プロジェクトの一員として役に立てたことにも、喜びがあります。

齋藤 加速器での衝突実験は大量のデータを手に入れることができるので、機械学習との相性はいいと思います。機械学習をいかに使いこなすかが重要になってきますね。

成川 ATLAS実験では、さまざまな国の研究者とグループを組んで研究しています。共同研究者とは単に協力するだけでなく、日々コミュニケーションを取って信頼関係を築きながらも、自分たちのやりたいことを主張していく競争のような局面もあります。そのあた

りに大規模実験ならではの楽しさがあります。

杉崎 コミュニケーションは大切ですね。私は、アメリカにすることが多いので、CERNにいる仲間に常にメッセージを送るなどして、存在感を示すようにしています。私たちは、ATLAS検出器に異常検知トリガーを導入するように機器を開発しています。初めて入れる機器なので、抵抗もあることは感じますが、アメリカの人たちの「とりあえずやっちゃえ」という精神に学びながら、交渉しています。

### これからの暗黒物質探索

齋藤 皆さんは、今後、暗黒物質の解明に向けて、どんなことに取り組みたいと考えていますか。

杉崎 私は引き続き、超対称性粒子に焦点を当てていきたいと考えています。先ほども触れましたが、今、異常検知トリガーを開発しています。これまでは、モデルを仮定して、そこから発見できそうな信号を選び出すためのトリガーをつくるというコンセプトでしたが、異常検知トリガーはモデルの仮定を必要としません。長年蓄積されたデータを学習したAI（機械学習）によって、これまで起きたことのない異常な現象を検知して記録します。物理学の他の分野では、モデルに基づかないデータ収集や解析を行う流れがあり、ATLAS実験でもそのアイデアを取り入れた暗黒物質探索ができればいいなと考えています。

成川 現在、LHCは2030年から運転予定の高輝度LHCの準備期間にあたり、ATLAS検出器もアップグレード



ERIKA YAMASHITA

## 山下恵理香

博士課程3年（奥村研究室）

大学院からICEPPへ。ATLAS Week 2025 in Paestum で Poster Award を受賞。



ATLAS検出器。全長46m、直径25m、重さ7000トンもある巨大な装置で、1億チャンネルものセンサーが組み込まれている。写真は第3期運用が始まる直前の様子。

の時期を迎えています。高輝度LHCが稼働したら、新しい検出器で、これまで探索されていなかった領域で暗黒物質を探せるのではないかと感じています。

齋藤 LHCが稼働してから、テラ電子ボルトオーダーの物理を明確なモデルとともに語れるようになってきました。この10年間で暗黒物質探索も大きく進んでいます。2030年に高輝度LHCが稼働することで、次の10年も世界で最高の衝突エネルギーを実現できる環境です。世界最先端の実験施設で研究できることは、エキサイティングですし、大きな刺激を受けますよね。

山下 これから研究室を決める学生は、修士課程や博士課程に入る頃には高輝度LHCが稼働する時期に当たるので、面白くなるでしょう。私自身、高輝度LHCに向けた研究にも携わっているので、実際にどういうデータが得られるかを楽しみにしています。

プログラミングなど技術や問題解決能力などは必要

になった時点で学び、使っていくことで身につくので、今は自分の興味の赴くままに基礎的な勉強をがんばればいいのではないかと思います。

成川 研究をするためには、内発的な好奇心を抱くのはとても大切です。自分が興奮して、ドーパミンが出まくるようなトピックを演繹的に検証していくプロセスを繰り返していくことが、研究をさらに推し進める燃料となります。自分の内なる好奇心を研究の推進力にできる人は、研究者に向いていると思います。

杉崎 私も同じ意見です。研究者にとって、自分が面白いと思えるものを見つけることが一番大切だと思います。興味がないと、研究するのがだんだんしんどくなっていくでしょう。

三野 私は今、加速器実験を離れ、量子ビットを使った暗黒物質探索の研究に移っています。学生時代は加速器が中心で、量子ビットや量子コンピュータの勉強をあまりしてきませんでした。他の人が何年もかけて積み上げてきたことを2年くらいで習得しなければならなくなり、とても大変でしたが、振り返るといろいろな分野の勉強ができたのは、結果的に面白かったですし、自分のためにもなったなと思っています。

山下 付け加えるとすれば英語をがんばって欲しいですね。今、私が英語で苦労しているので。



YOSHIFUMI NARUKAWA

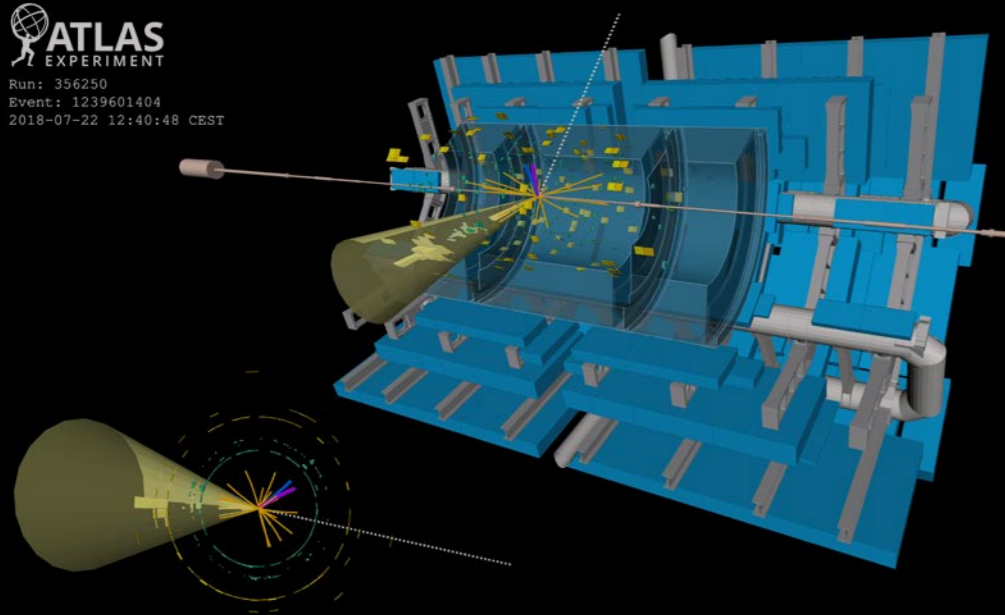
## 成川佳史

博士課程3年（奥村研究室）

大学院からICEPPへ。ATLAS TDAQ Week 2023 で Poster Award を受賞。



Run: 356250  
Event: 1239601404  
2018-07-22 12:40:48 CEFT



LHCのATLAS検出器で実施したヒグシーノ探索。ヒグシーノが崩壊したときに発生する電子やミュオンなどを検出器でとらえることで、ヒグシーノの存在を探っていく。

# 量子センサーで暗黒物質を探せ

暗黒物質の探索にはいくつかのアプローチがある。ICEPPで新しく取り組み始めたのが、量子ビットを活用する手法だ。従来から実施されていた加速器による粒子の衝突実験とは何が違うのか。三野裕哉特任研究員に聞いた。

## アクシオンとは

暗黒物質の候補はWIMPだけではない。その1つがアクシオンだ。アクシオンは標準理論の未解決問題の1つである「強いCP問題」を解決するために考えられた粒子。1つ1つのアクシオンはとても軽いものの、十分な量があれば暗黒物質の正体となり得る。

## ダークフォトンとは

ダークフォトンとは超弦理論のモデルなどから予測される粒子で、微小な電磁場(通常の光子)の成分を持つと考えられている。光子とは異なり、質量を持つと考えられることから、暗黒物質の候補に挙げられている。

## 量子センサーとは

量子センシングとは、量子効果を活用して微小な物理量を測定する計測技術である。量子コンピュータに使われる超伝導量子ビットは量子センサーの1つである。量子センサーを暗黒物質探索のデバイスとして活用することで、アクシオンやダークフォトンによる微弱な電磁波を検出できると期待されている。



## DarQ Experiment

(DarQ : Dark matter search using Qubits)



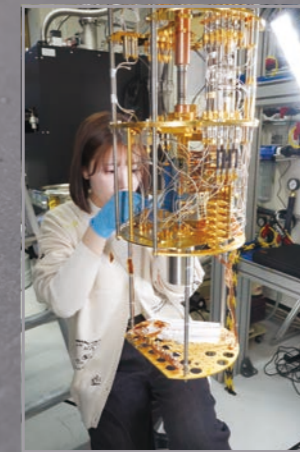
東京大学、京都大学、理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構(KEK)などの研究者が参加するDarQコラボレーションによって進められている、量子ビットを活用した暗黒物質探索実験プロジェクト。1つの量子ビットを利用した手法や量子コンピュータを活用した手法など複数のアプローチから研究が進められている。

### DarQ-Direct

量子ビットをそのまま暗黒物質センサーとして使う直接探索。

### DarQ-Lamb

量子ビットのLambシフトでチューニングする次世代キャビティ型暗黒物質探索。



詳しくはこちら



©DarQ Experiment

## INTERVIEW

### 世界初の観測に、装置作りから挑む

私は高校生のときに高エネルギー加速器研究機構(KEK)を見学し、スイスに欧州合同原子核研究機構(CERN)という大型研究施設があることを知り、加速器や素粒子物理学に興味を持ちました。大学院ではATLAS実験に参加し、加速器を

使って暗黒物質探索をしていました。私が博士課程を修了する時期は、ちょうど量子コンピュータの研究が再び盛り上がってきた時期でした。指導教員だった方が量子コンピュータの研究をしていた影響もあり、私の関心もその方向に向かっていたのです。量子技術が暗黒物質探索にも活用できることを知り、学位を取得した後に研究分野を変更し、量子ビットによる暗黒物質探索を始めました。量子技術と暗黒物質の両方を探求できる道に進んだのです。

研究の柱となる量子ビットは、量子コンピュータの最小単位となる素子です。私たちは、量子ビットをデザインするところから研究しています。DIY (Do It

Yourself) をするように、実際にクリーンルームに入り、自分の手で量子ビットを作ります。量子ビットができると、自分で測定します。量子ビットで探索できるのは、軽い暗黒物質候補のダークフォトンとアクシオンです。ダークフォトンとは、ほんの少しだけ電磁場の成分を持っているため、すごく小さな電磁場を作っているはず。量子ビットが置いてある場所にダークフォトン由来の電磁場がやって来ると、量子ビットの状態が変化します。

量子ビットの使い方は1つだけではありません。量子ビットそのものを検出器として使う場合もあれば、検出器の周波数を変化させるチューナーとして使うこ

ともあります。1人1人の研究者がそれぞれの目的に合わせて、量子ビットのデザインを工夫し、製作しています。

大規模な加速器実験では、加速器や検出器は既に作られていて、自分で工夫できるのは解析などの限られた範囲だけでした。現在は実験についてすべてのことを自分で決めることができます。これは大きなやりがいであり魅力の1つですが、苦勞する部分と表裏一体です。

量子コンピュータ技術の研究は、民間企業でも進んでいて、世の中にはさまざまな情報にあふれています。その中から、暗黒物質探索に活用できるものを探し出すことも、この分野の難しいところ。私たちが開発している量子ビットは、民

間企業が開発しているものとは少しタイプが違います。企業が開発しているものは、量子コンピュータとして使うために外部から遮断する必要があります。外部の電磁波から守るためです。しかし、暗黒物質探索では、暗黒物質由来の電磁波を感知するように外部の電磁場と適度に相互作用する構造になっているのです。

これまで試行錯誤を繰り返してきたことで、量子ビットを製作するためのノウハウも積み上がってきており、量子状態を100μ秒くらい保つことのできる量子ビットの作成にも成功しています。今後は長い寿命を持つ量子ビットを安定的に製作する技術を身に付け、暗黒物質探索を進められればと考えています。ゆくゆ

くは量子ビットの数を増やすことで、エンタングルメント(量子もつれ)の効果も活用し、より量子コンピュータに近い形で探索できればいいですね。暗黒物質探索に使う量子ビットを作製する際には、自分たちだけでは解決できない問題も出てくるので、企業の方々と議論しながら開発していき、世界初の観測に挑んでいきます。

観測装置を自分で1から作りながら暗黒物質を探求できる環境は、世界でも珍しいと思います。私たちの研究室では、ハードウェアからソフトウェアまで幅広く研究できます。量子コンピュータや素粒子物理学の研究に興味があれば、一緒に研究を進めていきましょう。



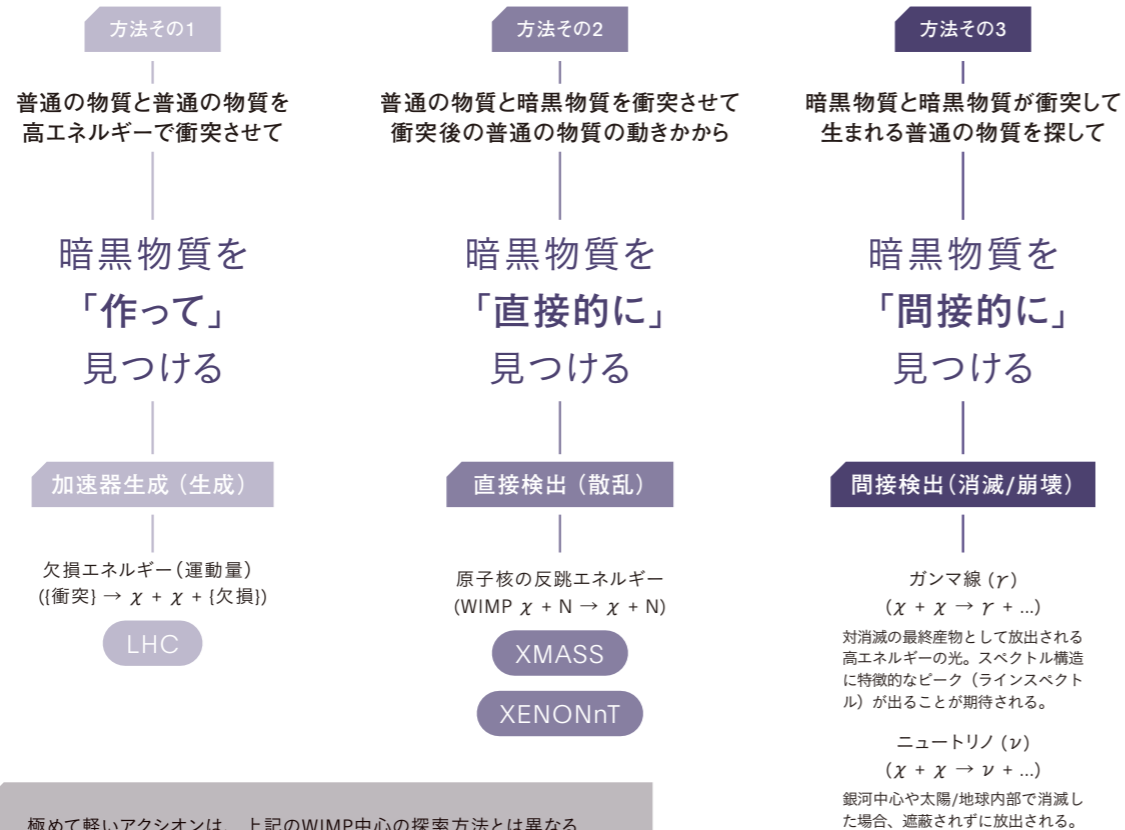
YUYA MINO  
三野裕哉

特任研究員

暗黒物質探索方法の比較表

さてさて、  
どんな手を使って見つけようか

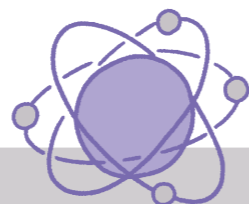
光などを出さず、他の物質とあまり相互作用をしない暗黒物質をとらえるのは至難の業だ。  
現在、大きく分けて3つのアプローチで暗黒物質を見つげようと、研究が進められている。それぞれのアプローチを整理しよう。



極めて軽いアクシオンは、上記のWIMP中心の探索方法とは異なる特殊な検出手法が用いられる。強い磁場中で、アクシオンがマイクロ波の光子に変換される現象 (プリマコフ効果) を検出する。

検出方法	特徴
① 共振空洞法 (ADMX)	光を貯めて増幅する。
② 量子ビット	電磁場との結合が強い。弱い信号でも検知できる。
③ ①と②を組み合わせた方法	①の欠点を②で補う。

ICEPPで行われている実験



暗黒物質候補の比較表

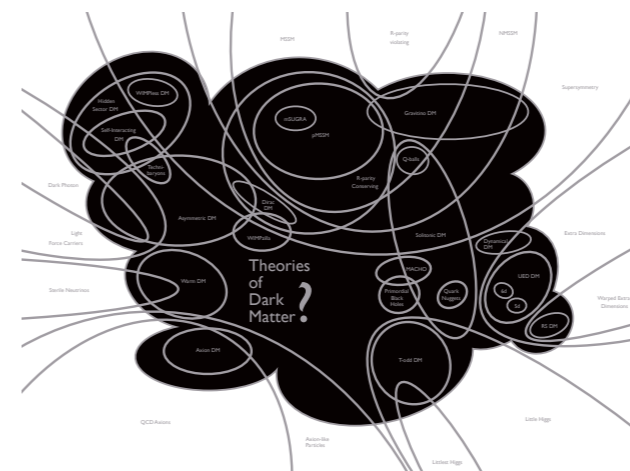
候補はいろいろ。  
それぞれ違いがある

今、世界中の研究者が、その正体を暴こうとしている暗黒物質。性質がほとんどわからないながらも、個性的な粒子の名前が候補として挙がっている。それぞれの粒子がどのような特徴を持っているのか、まとめてみた。

	ニュートラリーノなどのWIMP	アクシオン	ステライルニュートリノ	ダークフォトン
質量範囲 (目安)	10GeV~100TeV	$10^{-6}$ eV~ $10^{-3}$ eV	1keV~100keV	$10^{-22}$ eV~1GeV 非常に広い質量範囲を、多様な実験手法で探索
相互作用の強さ/種類	弱い相互作用 (WIMPミラクル)	極めて弱い相互作用 (光子との混合)	重力と活性ニュートリノとの混合のみ	極めて弱い電磁気力 (光子とのキネティック・ミキシング)
宇宙論的振る舞い	冷たい暗黒物質 (CDM)	冷たい暗黒物質 (CDM)	温かい暗黒物質 (WDM)	媒介粒子としての探索が主流
素粒子としての役割	標準模型を超えた超対称性粒子	強いCP問題を解決するために導入された粒子	ニュートリノ質量を説明するシーソー機構などで予言	暗黒セクターと標準模型を繋ぐ力の媒介粒子

表紙コラム：暗黒物質の理論のベン図

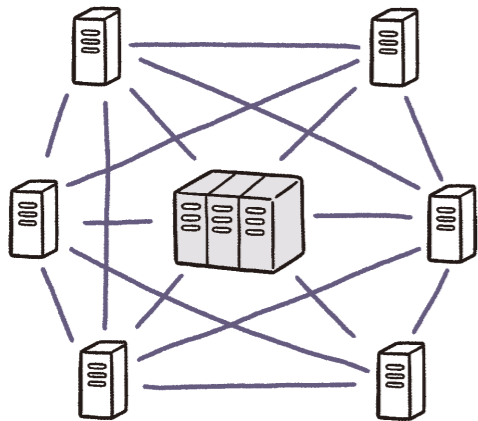
宇宙の「黒幕」はどれだ？



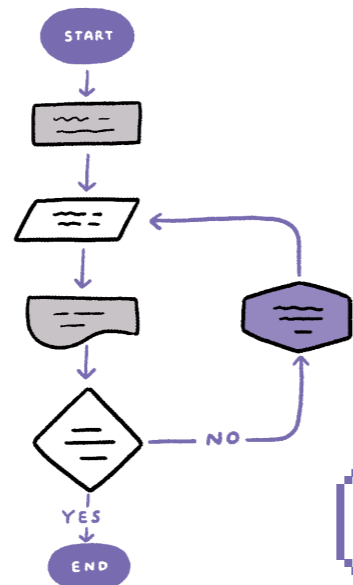
本冊子の表紙のモチーフに使われているのは、UC Irvineの理論高エネルギー物理学者、T. M. P. Tait博士が作成したベン図だ。暗黒物質を説明するさまざまな選択肢 (図中の楕円) があり、それらの仮説が複雑に重なり合っていることを示している。中心部の雲のようなモクモクとした囲みは、暗黒物質を説明できる理論を示す (Theories of Dark Matter)。その外側は説明できない理論にあたる。

我々が有力な暗黒物質候補として探索しているのは、WIMP、アクシオン、ダークフォトンの3つである (上の表参照)。WIMPが示すここでの範囲は広く、図の中心から右側にかけて、超対称性 (Supersymmetry)、余剰次元 (Extra Dimensions)、小ヒッグス粒子 (Little Higgs) が含まれる。量子センサーで探索しているアクシオンは図の左下 (Axion)、ダークフォトンは左側 (Dark Photon) の領域にあたる。

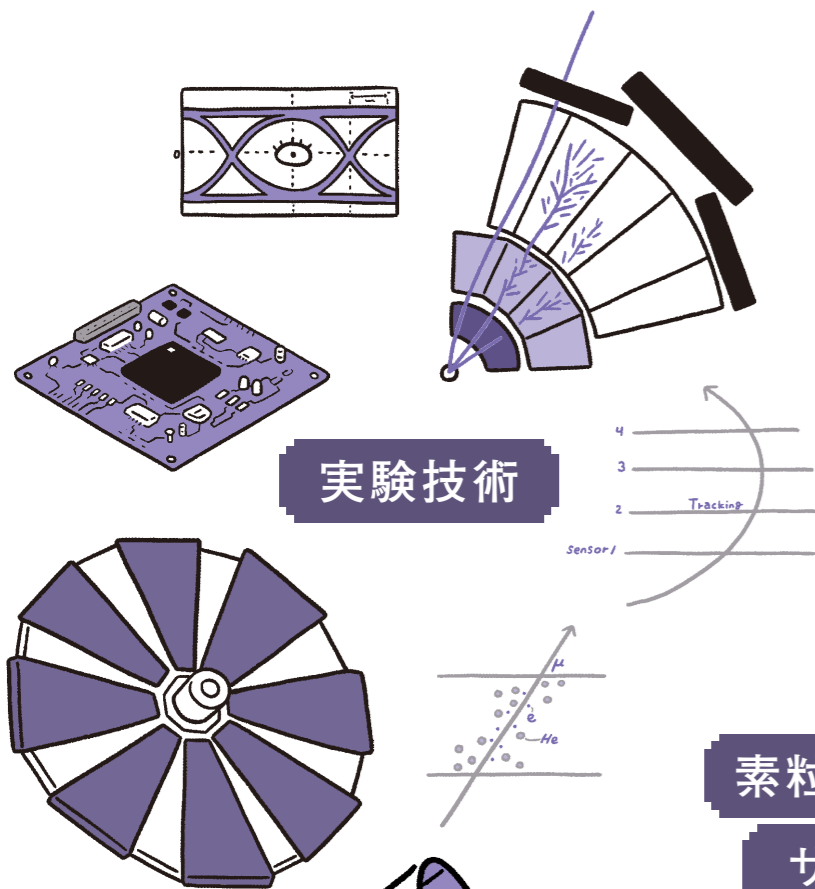
詳しくは、"What If We Never Find Dark Matter?" (Scientific American, August 20, 2024)をご覧ください。



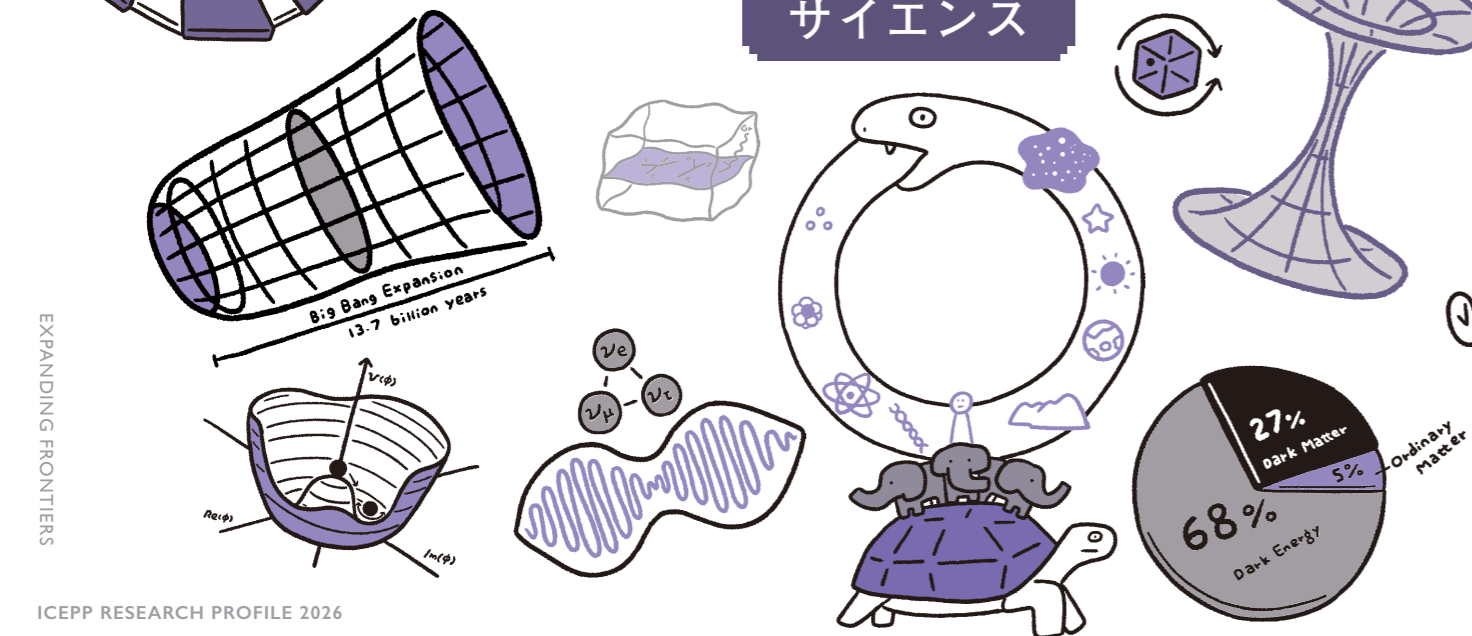
先端計算技術



実験技術



素粒子・宇宙のサイエンス

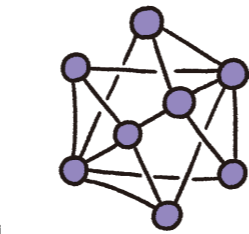


素粒子

物理



監修：奥村恭幸 (ICEPP)



ひろがる!

つながる!

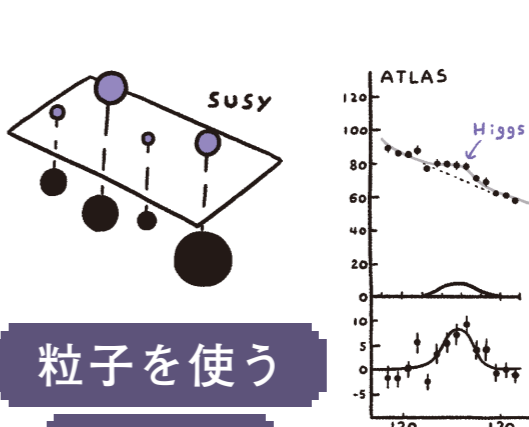
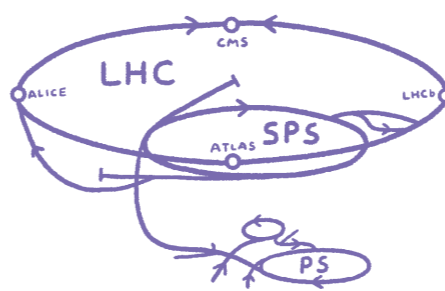
粒子を使う

調べる

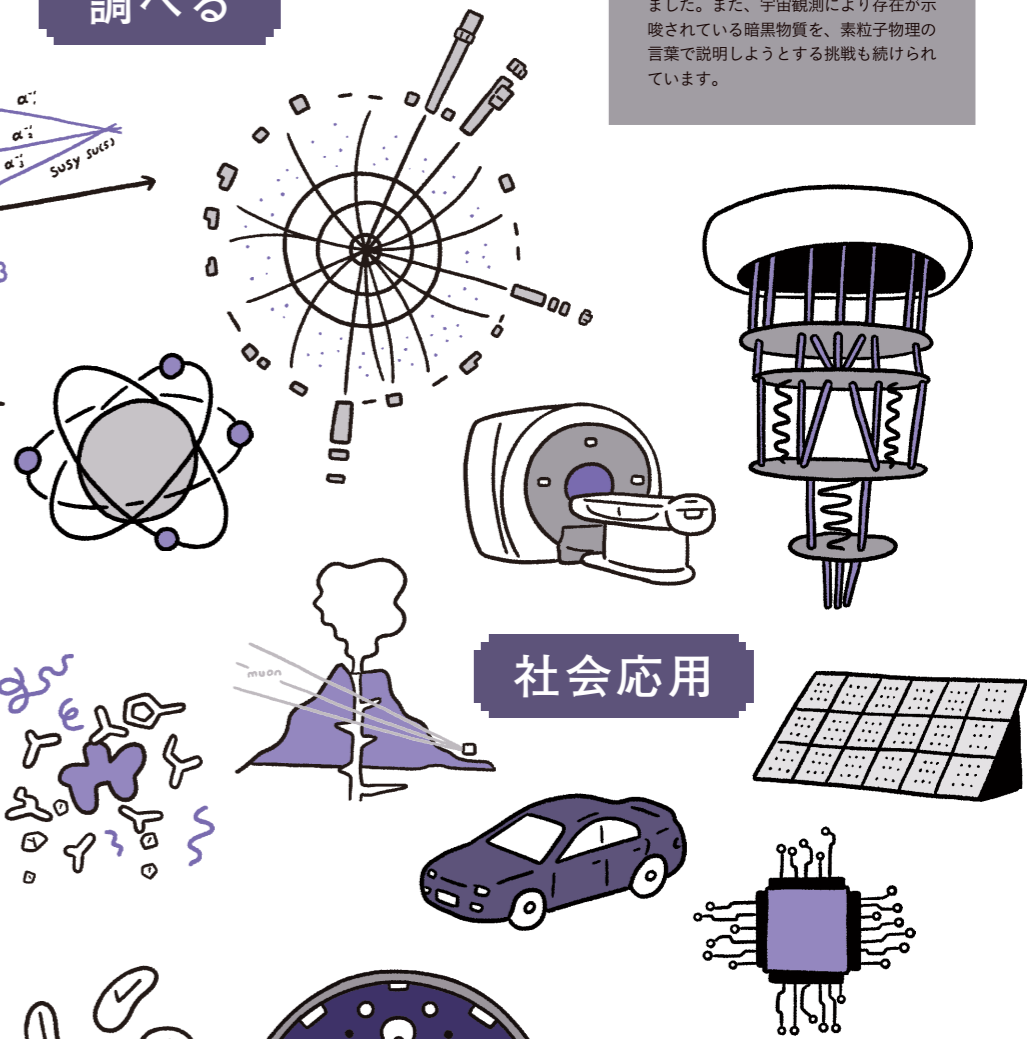
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{\partial}\psi + \psi_i\gamma_j\psi_j + h.c. + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$



加速器



社会応用



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

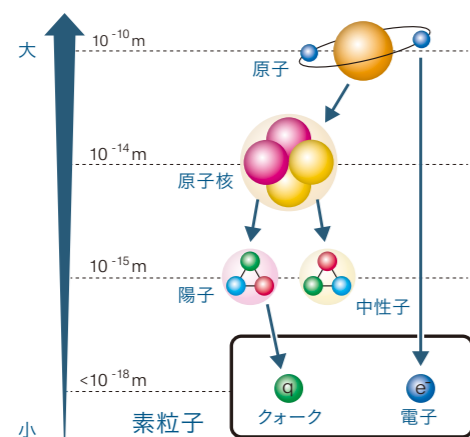
— 原子は素粒子でできている

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.30-1参照) 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。



### 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予言された (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年に質量の起源と予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) 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 電子 (e)	μニュートリノ ミュー粒子 (μ) 物質粒子	τニュートリノ タウ粒子 (τ)
強い力	弱い力 (Wボソン, Zボソン)		電磁力 (光子)
グルーオン (g)	Wボソン (W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> ) Zボソン (Z)		光子 (γ)
			ヒッグス粒子 (H) 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

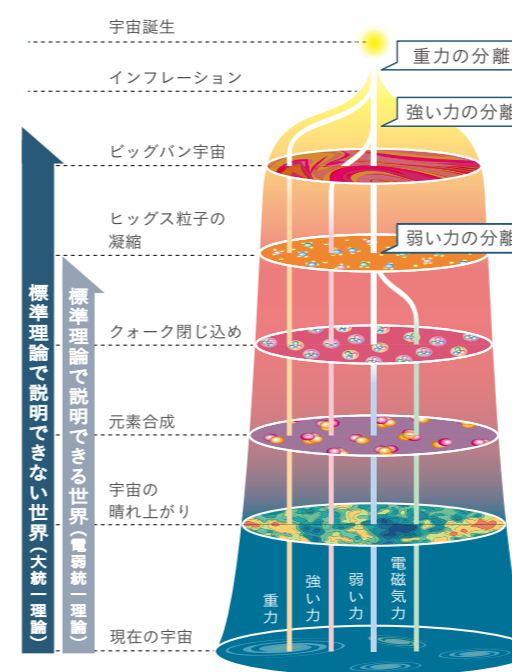
— 標準理論が直面するいくつかの限界

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。



## 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っています。主な取り組みは、右に挙げたATLAS実験、MEG実験、量子AI研究、ILC計画の4つの実験・計画と、主に国内で研究を行うTabletop実験です。

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。

### ATLAS実験 Page\_24

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、素粒子物理学の研究のため、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年以降の第3期実験は終盤を迎えており、LHCの高輝度化に向けた研究開発を推進しています。



欧州合同原子核研究機構 (CERN) ©CERN

### MEG実験 Page\_24

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「 $\mu$ 粒子」が引き起こす非常に稀な現象 $\mu \rightarrow e\gamma$ 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）で実験を行っています。PSIは、 $\mu$ 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、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、ロシアの研究者と取り組んでいます。2022年から観測感度を1桁高めた第2期実験MEG IIを開始し、前人未踏の感度で $\mu \rightarrow e\gamma$ の観測を目指しています。並行して、2029年に100倍に増強される新しい $\mu$ 粒子ビームを用いた将来実験実現に向けた研究開発も進めています。



ポールシェラー研究所 (PSI) ©PSI

### 量子科学 Page\_26

量子コンピュータ、量子暗号、量子センサーなど、私たちの身近なところで「量子」という言葉を耳にする機会が増えてきました。これらは、量子技術の中核に据えた次世代の先端テクノロジーです。

令和3年度に先端戦略分野として新設した量子AIテクノロジー研究分野では、ソフトウェア・ハードウェア両面にわたる基礎研究から、サイエンスへの応用研究までを一体的に推進しています。また、量子ネイティブ育成センターを設立し、学部生から大学院生までを対象に量子技術を自在に活用できる人材の育成に取り組んでいます。

さらに、海外の卓越した大学・研究機関・IT企業と連携した研究・教育活動を展開し、パートナー企業との協働を通じて、産学協創による社会課題の解決を目指しています。



IBMテストベッド (東京大学) ©IBM

### ILC計画 Page\_28

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。

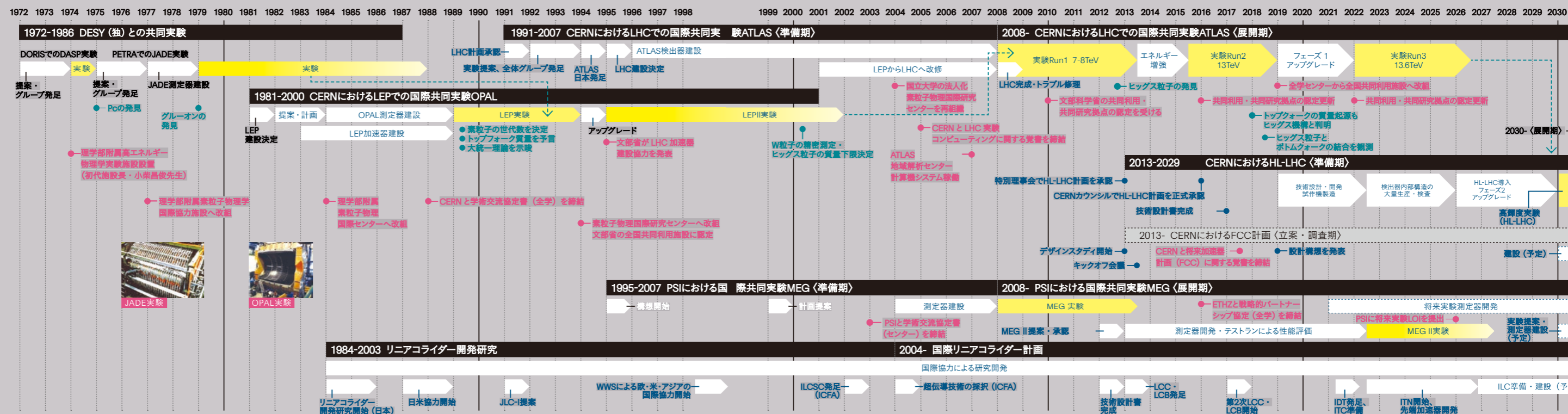
ILCは、CERNのLHCと異なる線形の加速器で、このタイプで世界最高エネルギーとなる予定です。加速器の性質上、LHCより高精度の実験が可能となるため、ヒッグス粒子の詳細な性質の解明が進み、新物理の手掛かりが得られると期待されています。

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

### センターの歩み



# 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

ATLASとは、CERNのLHC加速器を用いて行われている実験プロジェクトであり、LHCにおける世界最高エネルギーの衝突で起こる素粒子現象を観測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、約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 (p30-1参照)。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8TeV (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13TeVで運転し、2022年から始まった第3期実験 (Run3) では13.6TeVに到達しました。

2019-2021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、またATLAS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った結果、年間蓄積データ量を大幅に増加してRun3のデータ収集を行っています。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てきました。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40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

得に向けて、2006年度に「ATLAS地域解析センター」(p30-3参照) をセンター内に構築し、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。現在に至るまでRun2, Run3の実験データを用いたデータ解析を進めてきており、ヒッグス粒子の性質の測定や、超対称性粒子の探索をはじめとする多く



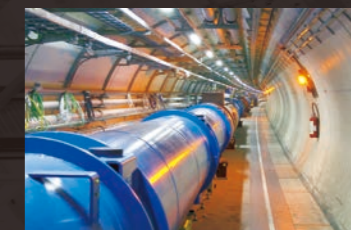
田中純一 教授

▶ 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



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。

の優れた成果を発表してきました。

現行実験のデータ取得・物理解析と並行して、2030年開始予定の高輝度LHC (HL-LHC) 実験の準備も進めています。HL-LHCでは陽子衝突頻度を現在の約3倍に高めると同時に、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、HL-LHC実験では積分輝度にして $2,500\text{fb}^{-1}$ に相当するデータを蓄積することが可能となり、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。

# MEG EXPERIMENT

MEG実験をさらなる高みへ  
大統一理論の証拠を探る



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

MEG実験とは、電子の仲間である「 $\mu$ 粒子」が $\gamma$ 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。「 $\mu$ 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.18参照)。

$\mu \rightarrow e\gamma$ 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.19参照)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、英国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 $\mu$ 粒子が必要で、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 $\mu$ 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、 $\gamma$ 線を測定する「液体キセノン $\gamma$ 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たな理論を厳しく制限するものであり、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うことで観測感度を1桁高め、およそ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アップグレード実験MEG IIを、2021年から開始しました。すでに2022年までに取得したデータを用いてMEG実験を大きく上回る感度で探索を行い、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行い、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 $\mu$ 粒子を作り出せる新しいビームラインが2029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、 $\mu$ 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。



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
- ≫ ILC-Japan測定器ワーキンググループ座長

#### 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

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である量子の特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。現在では、数百個の量子ビットを持つ量子コンピュータが実現しており、通常の(古典)計算機では扱うことが難しい領域に突入しています。この新しい計算パラダイム

の到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、量子加速を実現する量子理論・計算アーキテクチャと、その応用としての量子AI(人工知能)に重点を置いた研究を進めています。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、基礎物理学での計算可能領域を広げる取り組みを行っています。2030年開始予定の高輝度LHC実験、さらに将来の大型加速器実験ではデータ量が飛躍的に増えるため、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



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。

分が含まれています。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・量子センシングへの応用研究」です。超伝導量子ビット技術に焦点をあて、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・宇宙物理学への応用研究を強力に進めています。また、誤り耐性量子コンピュータの早期実現に向けたデバイス開発、量子アルゴリズムによる強化型量子センシングの研究も行っています。

一連の研究は、LHC-ATLAS実験を基点に、米国のLBNL、FNAL、シカゴ大学、スイスのCERNの4つを大きな軸として、国際共同研究の形で進めています。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、産学官の連携と、国際共同研究を主導していくことで、社会課題の解決と新たなサイエンスの創出を進めていきます。



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学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学国際研究センター助教
- 2021年 東京大学素粒子物理学国際研究センター准教授
- 2024年 東京大学素粒子物理学国際研究センター教授

# ILC PROJECT

## 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で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.31-4参照)。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・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科学セクレタリには大谷航教授が、国内のILC推進母体であるILC-Japanスポークスパーソンには石野雅也センター長が就いています。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

すべてのイラストは©Rey.Hori

### 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。

### 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)

### 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。

28

29

# 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j利用して微小な変化を観測したり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るのでしょうか。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。

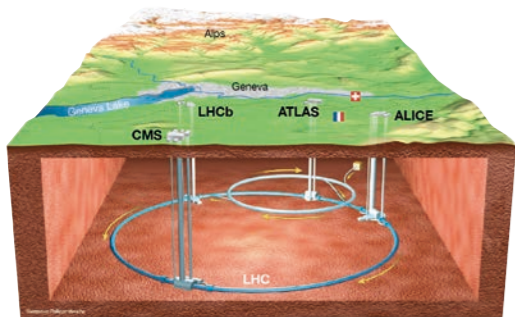
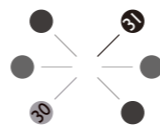
そのような真空中にコヒーレントな光や強力な磁場などで電磁場を集中させると、真空が異方性を持ち、歪んだ状態になります。この歪みの観測を目指して実験を行っています。歪みの検出にも光を利用しています。赤外線レーザーを鏡で数十万回も往復して蓄積することで、偏光のズレを増幅します。また、微小な歪みの検出には波長が短いX線が有利なため、理化学研究所の「X線自由電子レーザー (SACLA)」も利用します。SACLAではX線レーザーどうしをぶつけて歪みを検出する実験も行っています。電子の反粒子である陽電子のビームを使い、「反物質を含んだコヒーレント状態」を作る実験も行っています。陽電子と電子が対となった準安定な複合粒子である

「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)。この状態を作り出すことができれば、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。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っています。超冷中性子は非常に速度が遅いため、重力の影響による落下を測定することができます。時間感度を持ち、精密な位置情報を取得できる中性子検出器を開発することで、量子系における弱い等価原理の検証を目指しています。

そのほかにも、ミリ波の超伝導検出器を利用しての暗黒物質探索など、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っています。

ILC / TABLETOP

# もっと知りたい！素粒子と実験装置の話



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。

## 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。1950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でつくり出したヒッグス粒子を、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90km、衝突エネルギーは最終的にLHCの約7倍を目指す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。

## 2

## 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1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。

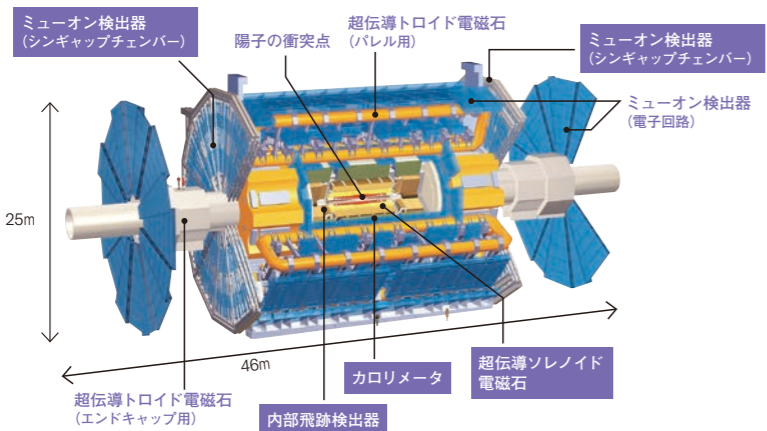
ATLAS検出器は大きく8つの検出器からなる（下図参照）。カラー枠で記した箇所を、日本チームが建設し、運転を担っている。なかでもミュオン検出器（シンギャップチェンバー/電子回路）は、石野教授が中心になって

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

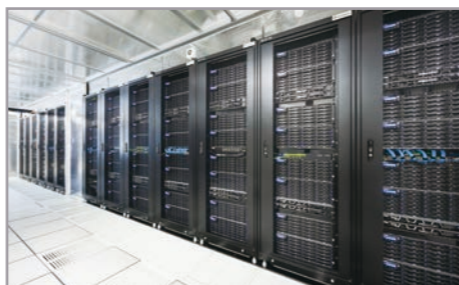
※ カラー枠は日本の分担部を示す。カロリメータはアップグレード実験に向けた追加開発。



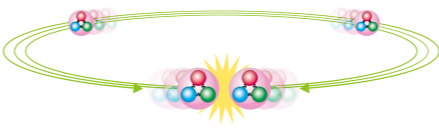
## 3

## 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。2025年度の実績で、国内の研究機関に所属する利用者は130人、外国の研究機関に所属する利用者は1,100人に及ぶ。



## 4



LHC：ハドロン（陽子）を円形に加速して衝突させる



ILC：レプトン（電子と陽電子）を線形に加速して衝突させる

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。

## 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。

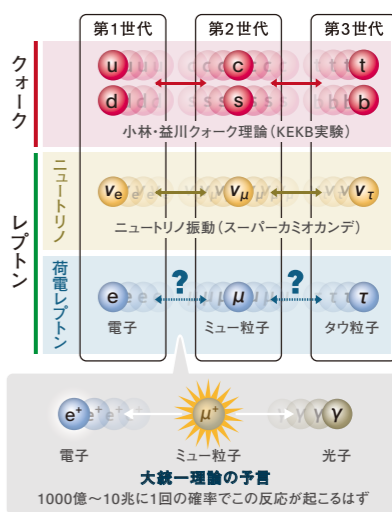
## 5 素粒子の世代に潜む謎

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」の検証を行っている。



## 6

## 光による真空の歪みの検出

### 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

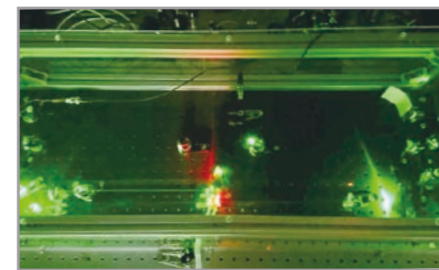


強磁場による真空の歪みを探る装置。強磁場中を通過しわずかに偏光が変わった赤外線レーザーが、左奥の丸い窓から出てくる。手前に配置された光学素子でその微小な変化を検出する。

## 7

## 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

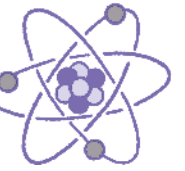


光共振器と増幅器、変調器を組み合わせ、特殊なレーザー光を作り出す。この装置の後段に多段増幅器と波長変換装置を組み合わせて、ポジトロニウム冷却光源として利用する。

### 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。



## 学問と未来を広く俯瞰できる教育研究体制

### 遅しき「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

大学院生受け入れの推移 (単位:人)

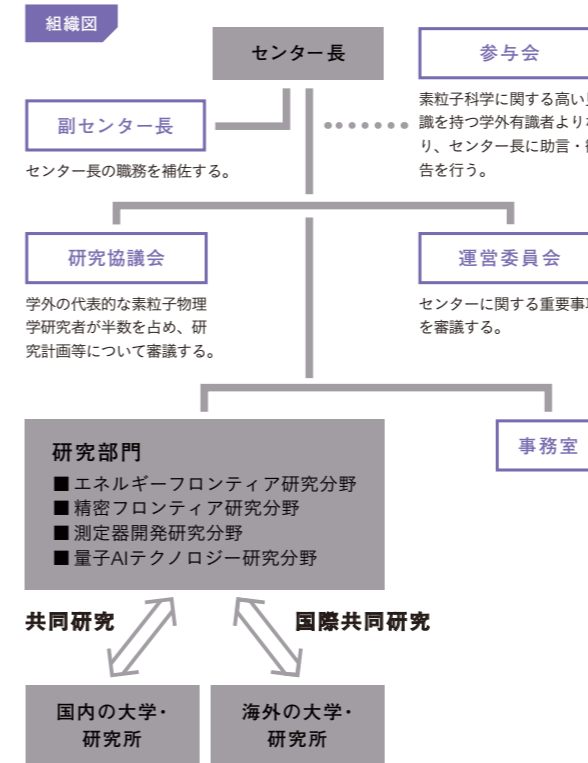
	令和1年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度
研究室数	8	8	9	8	8	8	8	9
修士課程	17	21	20	18	23	20	26	31
博士課程	21	19	16	17	17	20	14	17
合計	38	40	36	35	40	40	40	48

でを自力で行い、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。

学位取得の推移 (単位:人)

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



組織人数 (単位:人)

	現数	内訳			
		女性	外国人	若手	客員
教授	4	0	0	0	3
准教授	4	0	0	0	2
特任准教授	1	0	0	0	0
助教	12	1	2	4	0
特任助教	8	1	3	7	0
特任研究員	6	1	2	5	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	41	8	7	18	5

■本センターは、41人体制で運営しています(令和8年5月現在)。  
■若手研究者(※20代・30代)が半数を占めています。

### 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。

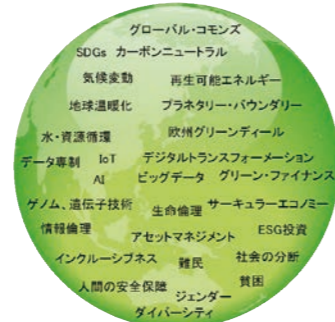
### 次世代研究者挑戦的研究プログラム

### 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本事業は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の支援のもと、東京大学の全学的な教育・研究資源を結集し、GX(グリーントランスフォーメーション)実現を担う人材を、幅広い専門分野から規模感をもって育成・輩出することを目的としています。

GXに関する俯瞰的視点を養う「GX俯瞰講義」、自らの研究とGXとの関係を見出す全学横断型の「グリーン未来交流会」、多様な先端研究とGXの接点に気づきを与える「GXインスパイア講義」の3つを基幹プログラムとし、これに高度スキル養成プログラムを加えた充実した教育・支援体制を整えています。

本事業では毎年、公募によりプロジェクト生を募集しており、これまでに全学で1,300名を超える学生が参加しています。そのうち、本センター研究室からも10名(ATLAS、MEG、量子科学ほか)が参画しています。参加する大学院生は、自身の研



### ICEPP学生の採択者数 (全体の約30~40%)

(単位:人)

令和6年度	7
令和7年度	9
令和8年度	10

### SPRING GXが目指す育成像

- ① 好奇心を忘れず、常に挑戦的に研究を進める研究者
- ② グリーントランスフォーメーション(GX)が人類社会の営みそのものであることに鑑み、専門以外の多様な分野を知り、高度で幅広い教養を身に付けた人材
- ③ そのうえで、さまざまな分野の研究者と創発的研究が積極的に行えるGX人材

究とGXとのつながりに対する観察力・洞察力を高めながら、好奇心を原動力に、挑戦的かつ創発的な研究に取り組んでいます。

### 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.30参照)
  - CERNサテライトシステム
  - PSI設置MEG実験システム
- ☑ 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  
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。
- ☑ 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
  - ヒッグスファクトリー夏の学校

### 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  
高校生を中心に、独自の一般公開(Summer Open Day、8月初旬頃)を開催するとともに、SSH校などの課外活動を支援しています。
- ☑ ウェブサイト、刊行物、SNS

# LAB GALLERY



2026年2月 CERNのマーク・トムソン新所長が東京大学で講演



加速器性能を向上させ、2030年以降の発見可能性を高めるHL-LHC



HL-LHCのためにKEKが開発する大型超伝導ダイポール磁石



データ監視の心臓部、ATLASコントロールルーム



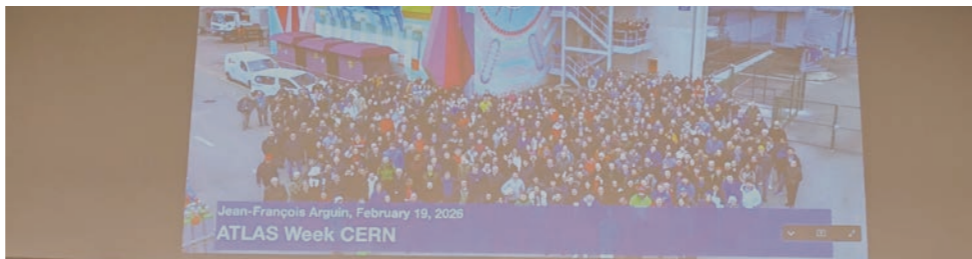
ATLAS実験で活躍する博士課程学生



2026年3月 都内の高校生がPSIを見学



2025年6月 ATLAS Outstanding Achievement Award 2025受賞



2026年2月 ATLAS Thesis Award 2025受賞



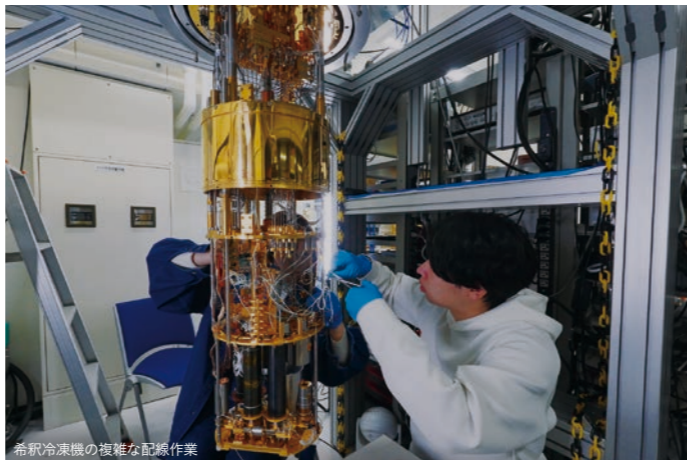
2025年12月 シカゴ大学でのASPIREワークショップ



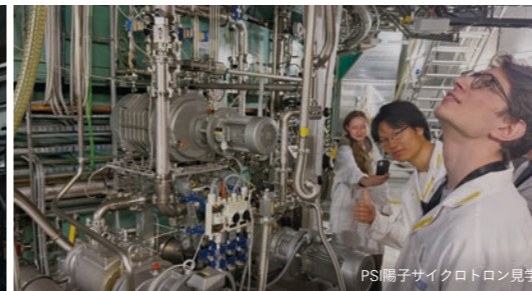
2025年10月 日本とスイスの学術交流の懸け橋BRIDGE2025



2025年11月 東京大学でのILANCE国際会議



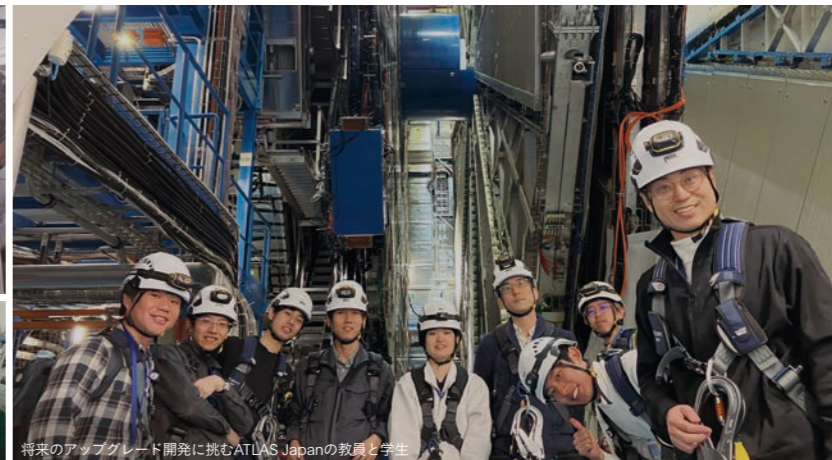
希釈冷凍機の複雑な配線作業



PS陽子サイクロトロン見学



自作の超伝導量子ビット



将来のアップグレード開発に挑むATLAS Japanの教員と学生



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8年6月15日

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

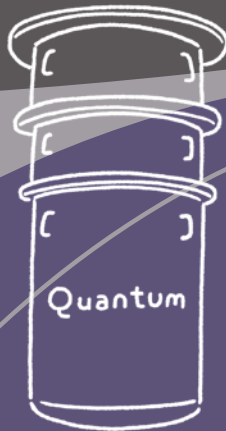
東京大学(本郷キャンパス内) 理学部1号館西棟10F

MSSM

Dark Photon

Light  
Force Carriers

Sterile Neutrinos



QCD Axions

Axion-like  
Particles

# Theories of Dark Matter ?

