

国際リニアコライダー

その展望とKEKの取組み

VOL

---

02 ILCの物理

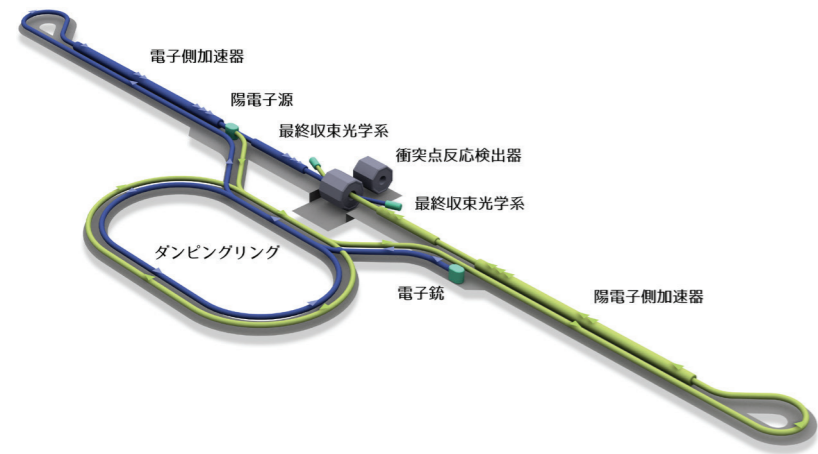
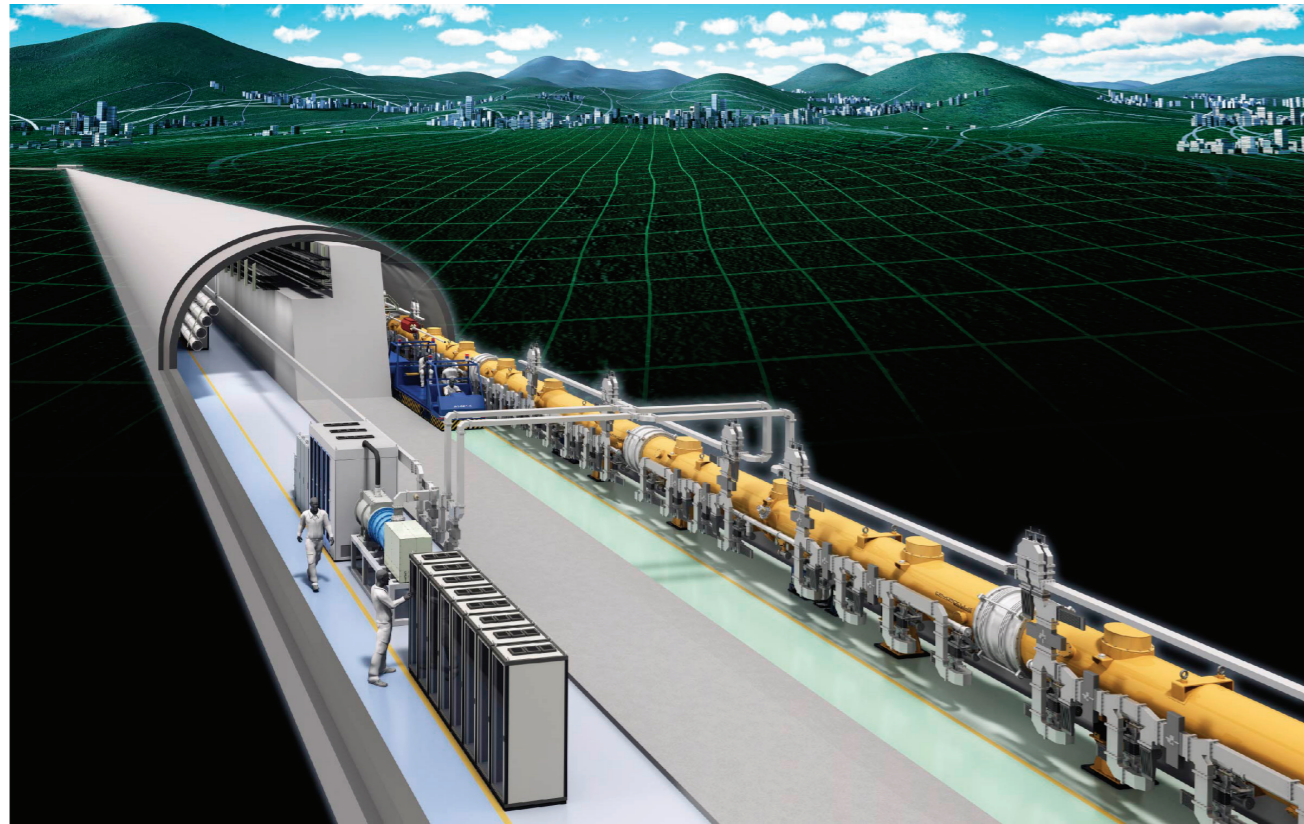
## この冊子について

この冊子は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)で行なっている活動を中心に、国際リニアコライダー(ILC)計画の概要とその意義を解説するものです。

4分冊構成になっており、第1分冊では全ての項目を網羅した概要を解説しており、第2～第4分冊では各項目をより深く解説しています。

## TABLE OF CONTENTS 目次

- 01 第一分冊 概要**  
 ILCがもたらす知の革命  
 ILC提案のこれまでの歩み  
 ILCのインパクト  
 ILC実現に向けて
- 02 第二分冊 ILCの物理**  
 素粒子物理学の目指すもの  
 加速器実験  
 標準理論:物質粒子と力の粒子からなる世界像  
 標準理論の成功と限界、残された深い謎  
 岐路に立つ素粒子物理学  
 三つの道と残された謎  
 ILCが探索するエネルギー領域  
 ILCの卓越した能力  
 ILCがもたらす知の革命
- 03 第三分冊 ILCの加速器・測定器**  
 実験装置の概要  
 ILC加速器の特色、構成、役割  
 ILC加速器を支える技術  
 物理実験・測定器技術  
 建設実現への道
- 04 第四分冊 ILCの波及効果**  
 ノーベル賞への波及  
 知の拠点と未来の人材育成への波及  
 産業への波及  
 イノベーションへの波及  
 ILC準備において、すでに表れている波及効果



上 / ILC完成予想図  
左 / ILC模式図 ©Rey. Hori

国際リニアコライダー (International Linear Collider、ILC) は、地下約100メートルのトンネルに設置する将来型電子・陽電子衝突加速器です。世界最高エネルギーまで「電子」とその反粒子「陽電子」を正反対の方向からそれぞれ直線状に加速して正面衝突させ、そこから引き起こされる素粒子反応を研究します。ILCは全長20キロメートル、重心系エネルギー250ギガ電子ボルト(Gev)の加速器として開始する計画です

## 巻頭言

### ILC: 第二加速器文明の入口となる実験装置



今、私たちは20世紀から21世紀にかけての科学技術真っ盛りの時代を生きていますが、この時代を可能にした発明の一つが加速器であろうと思います。初期の加速器の代表格は1930年代に原子核のことを調べるために作られた小さなサイクロトロンでした。その後加速器は極めて大きな進歩を遂げ、大きさでいえば周長が山手線と同じくらいのもまで作られています。これによって非常に小さな極微の世界、1センチの十億分の一のさらに十億分の一くらいの素粒子の世界を支配する法則が良くわかるようになりました。また、このことは同時に、宇宙の誕生のごく初期に何が起こったのかを自信をもって説明できるようになったことを意味します。

それだけではありません。加速器からの光や中性子を使って実際に目に見える物質がどのような構造をしているかがわかるようになり、さらに生命体のような非常に複雑な分子がなぜ多様な機能を持つかなどということも明らかになってきました。

加速器のもたらす恩恵は科学においてだけにとどまりません。工業的利用や医療への応用などもどんどん広がりを見せていて、人間の生活にも現実的な貢献ができるようになってきました。これら加速器がもたらした成果を数百年後の子孫が振り返ったとすれば20世紀から21世紀にかけては加速器の急速な進歩によって人類の自然理解が急速に深まり、さまざまな応用によって人類に恩恵をもたらした、いわば加速器文明の時代だったということになる

と思います。この文明のけん引役を果たしてきたのが素粒子などの科学研究に使われてきた先端性の高い大型加速器です。ここで開発された技術の波及によって多様な加速器が実現されてきたのが加速器文明の歴史であるといつてよいと思います。

その大型加速器は今、絶頂にあります。円形の加速器、特に電子加速器においては限界が見えだしたのも事実です。ここに大きな希望となるのが直線型的大型加速器で、円形加速器が80年かかって挙げてきた大きな成果を、次にまっすぐな加速器が受け継いで次の100年でさらに大きく発展させ、その波及によって新しい加速器の歴史が始まるという、いわば第二加速器文明の入り口となるのがこの冊子で説明する国際リニアコライダー (ILC) です。

ILCは重要な発見によって素粒子物理学の発展に大きく寄与することが期待されますが、ここから始まる第二加速器文明によって我々の想像をはるかに超えた大きな成果がもたらされるに違いありません。80年前にサイクロトロンを発明したローレンス博士は加速器文明がここまで到達することはおそらく想像しなかったと思います。これからの第二加速器文明についてもいったい何が起きるか、全貌が見えるのは100年先かもしれませんが、後進に夢を託して走り始めることが転換期にある文明を担う我々の使命ではないかと思っております。

山内 正則

高エネルギー加速器研究機構 機構長  
ILC推進準備室 室長

## 02 ILCの物理

素粒子物理学の目指すもの	....6
加速器実験	....10
標準理論:物質粒子と力の粒子からなる世界像	.....16
標準理論の成功と限界、残された深い謎	.....18
岐路に立つ素粒子物理学	.....18
三つの道と残された謎	.....18
ILCが探索するエネルギー領域	.....18
ILCの卓越した能力	.....18
ILCがもたらす知の革命	.....18

## 第二分冊：はじめに

国際リニアコライダー（International Linear Collider：ILC）は、世界最高エネルギーまで「電子」とその反粒子である「陽電子」を正反対の方向からそれぞれ直線状に加速し正面衝突させ、そこで起こる素粒子反応を研究する実験施設です。究極の自然法則と宇宙の始まりの謎の解明を目指します。次世代エネルギーフロンティア加速器実験施設として、電子-陽電子リニアコライダーが必要であることから、世界の高エネルギー物理学研究者コミュニティは、長らく国際的な枠組みで研究開発と設計作業を行ってきました。科学的意義と実験施設構築の技術的完成度から判断して、今、実現に向けて踏み出すべきだと考えます。

高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、日本の加速器科学の総合的発展の拠点として、新しいサイエンスや応用研究のフロンティアを推進してきました。5年間の具体的な研究計画で「KEKロードマップ」を策定、ILC計画については「日本がホストするILC計画を推進するために国際準備組織を立ち上げ、装置、施設・設備、研究所組織の詳細設計などに取り組み、国際協力の枠組みによる建設着手を目指す」としました。KEKはILC推進準備室（室長：山内正則機構長）を設置し、機構内外と連携してILC計画実現に向けた活動を行っています。今回はILC計画の理解増進活動の一環として、本冊子を編纂しました。

素粒子物理学は、究極の自然法則と宇宙の始まりの謎の解明を目指す学問であり、これまでの研究の集大成として「標準理論」を完成させました。第2分冊では、標準理論の世界像と、標準理論では説明できない残された深い謎について紹介します。そして、ILCがその解決に向けどのような役割を果たせるのかを見ていきます。

# 1. 素粒子物理学の目指すもの

宇宙はどのように始まり、これからどうなるのか？  
 宇宙はどんな仕組みで、何でできているのか？  
 私たちはなぜこの宇宙に存在しているのか？

このような疑問は神話の時代より人類が共通に抱いてきたものです。素粒子物理学は極微の世界を探求することでその答えを追っています。

宇宙は、今からおよそ138億年前に、「ビッグバン」と呼ばれる大爆発で始まったと考えられています。ビッグバン直後の宇宙は、超高温・超高压の超高エネルギー状態で、様々な素粒子が光の速さで無秩序に飛びかう世界でした。その後、宇宙が膨張して温度が下がるとつれ、飛びかっていた素粒子がまとまって物質を構成し、現在の夜空に見える星々や銀河のなすパターンを形成するに至ったのです。

素粒子物理学は、宇宙誕生の瞬間へと時間をさかのぼり、宇宙創成の謎、ひいては、我々を含めた万物の存在そのものの起源を解き明かし、また、遙か未来、宇宙の行く末をも見通そうとする壮大な試みです。そして、物質、力、さらには時間と空間をも含めた宇宙の全ての、統一的理解を目指します。

それはアインシュタインが一生をかけて追い求め果たせなかった夢でもあります。素粒子物理学の究極の目標は宇宙の全てを一つの原理にまとめるこの「統一理論」を完成させることなのです。

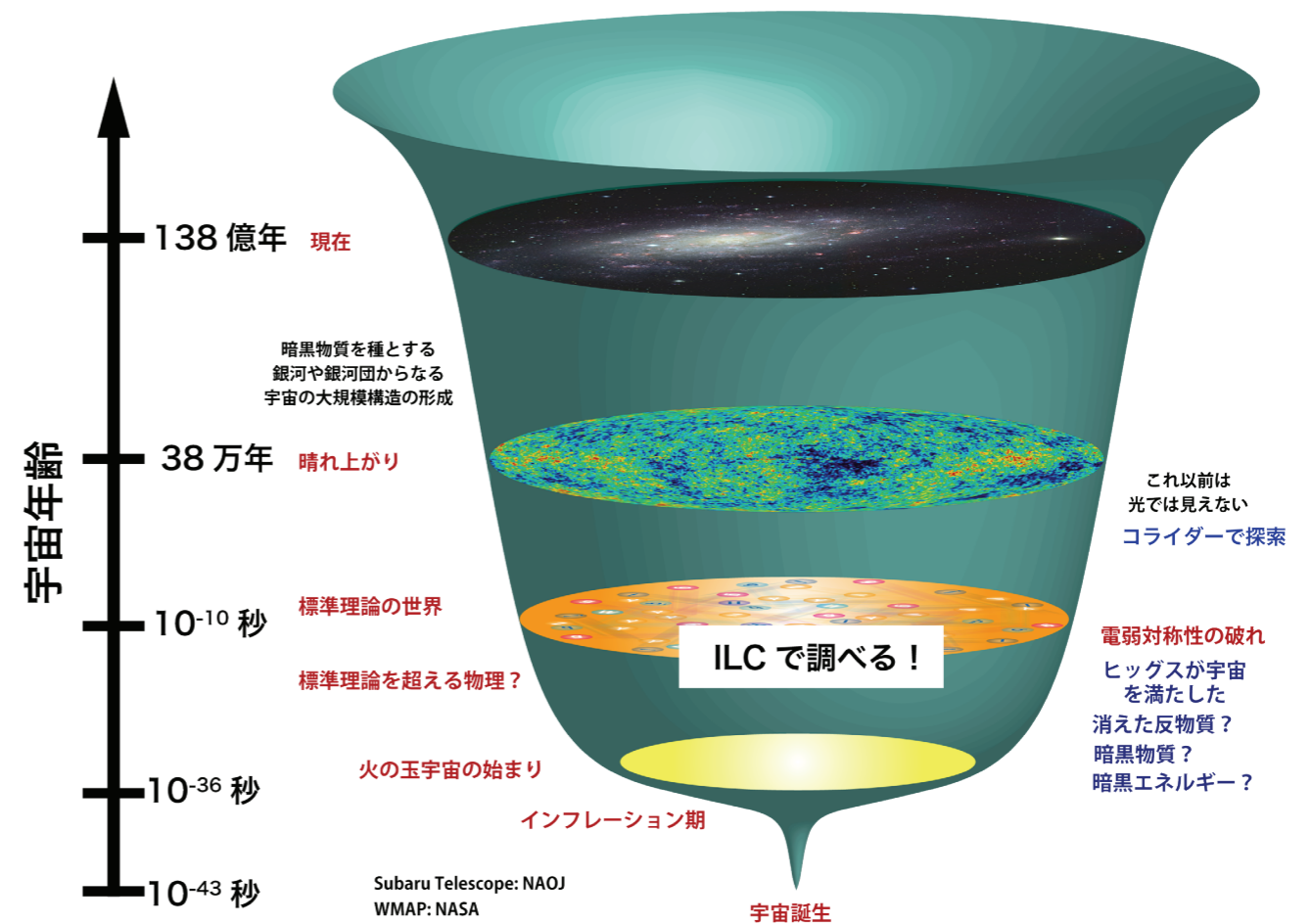


図1 / ビッグバン宇宙像

宇宙は今から138億年前に量子揺らぎにより無から生まれ、インフレーションと呼ばれる急激な膨張を経て、いわゆるビッグバン宇宙（火の玉宇宙）となった。そこは様々な素粒子が無秩序に飛び交う超高温・超高压状態だった。宇宙誕生後100億分の1秒後、ヒッグス場が宇宙を満たし、電弱対称性の破れと呼ばれる真空の相転移が起こった。ILCはこの電弱相転移の背後に隠された新しい物理を解明する

## 2. 加速器実験

高エネルギー加速器は、星や銀河、それどころか原子や原子核が生まれる前の、ビッグバン直後の超高エネルギー状態を実験室内に再現する装置です。ビッグバン直後の宇宙には、現在の宇宙には見当たらない多くの素粒子が存在していました。

高エネルギー加速器の本格的な運用が開始され、ビッグバン直後の状態を実験室で再現できるようになり、多くの素粒子が発見され実験的に詳細に調べられてきました。そうした実験結果の背後にある素粒子の運動を支配する原理を解明し、まとめたものが「標準理論」です。それによって、素粒子の性質やそれらが引き起こす現象を理論計算で予測できるようになりました。

標準理論の要となる粒子のいくつかは、宇宙初期にしか存在しなかった粒子です。これらの粒子を実験室で作るには、加速器ビームのエネルギーをより効率的に粒子生成に使える衝突型加速器が必要です。そして、より高いエネルギーの衝突型加速器が出現するたびに標準理論を構成する粒子とその

役割についての知見が蓄えられてきたのです。

現在、CERNで稼働している大型加速器LHCも、日本誘致が検討されている国際リニアコライダー（ILC）も衝突型加速器です。ポイントは、加速器実験では衝突エネルギーなどの実験条件をそろえて能動的に繰り返し実験ができるため、法則の発見や理論の検証が極めて効率的にできる点にあります。加速器実験が持つこの特長は、標準理論の構築と検証に本質的な役割を果たしました。

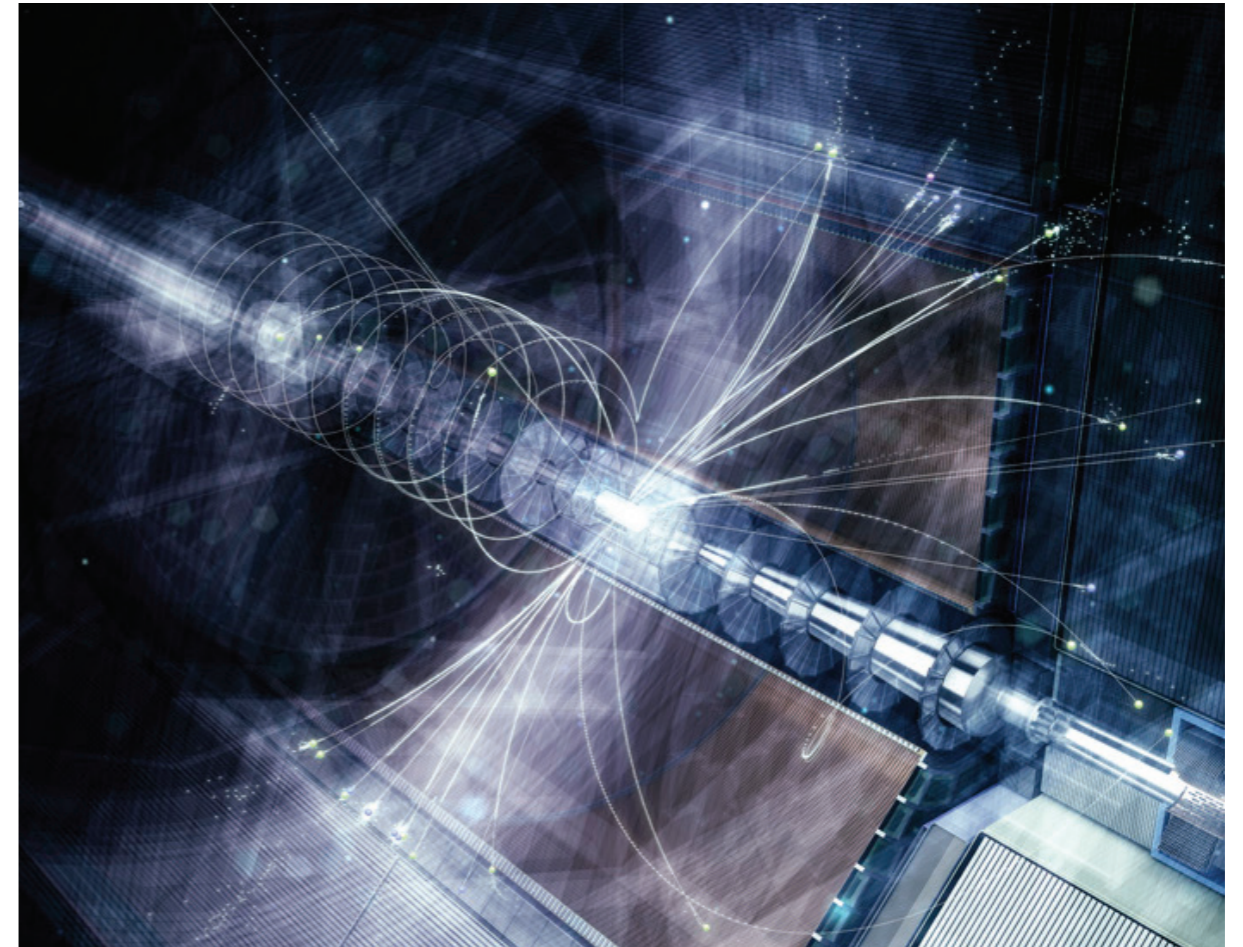
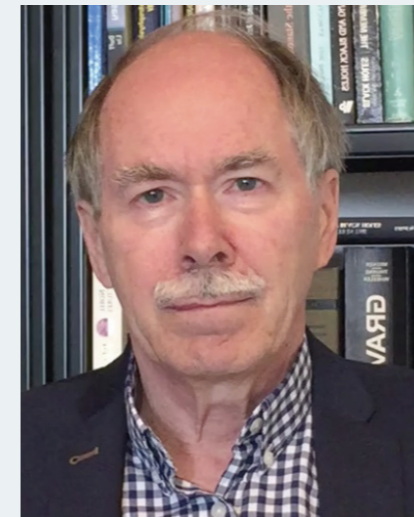


図2 / 衝突型加速器による素粒子実験

電子と陽電子の衝突点では、ビッグバン直後の超高エネルギー状態を実験室で再現する。対消滅した電子と陽電子は純粋なエネルギーの塊となり、そこから生まれる素粒子が、様々に姿を変え衝突点から飛び出す。これらの粒子を検出器で捉え記録する。加速器を用いた素粒子実験では、実験条件をそろえ、繰り返し実験することで、素粒子の性質や法則を効率よく探求できる



自然は、私たちよりはるかに賢くて、自然について単に考えているだけでは全く答えは出てきません。私たちには実験から得られる情報が必須なのです。

新しい粒子「ヒッグス粒子」の存在が明らかになりました。その粒子があることは期待していたのですが、その詳細はまだ理解されていません。例えば日本に建設されるかもしれない新しい直線型加速器は、私たちに更なる詳細について教えてくれるでしょう。

自然の法則を理解することは、人類にとって、極めて役に立ってきました。事実、今日の私たちのあり方を築いてきたのです。

ジェラルド・トフーフ博士(1999年ノーベル物理学賞)

ILC応援メッセージより抜粋

### 3. 標準理論

#### 物質粒子・力の粒子・ヒッグス粒子からなる世界像

高エネルギー加速器による素粒子の研究は、1960年代後半から1970年代後半にかけて確立した「素粒子の標準理論」を理論的指針として進められてきました。標準理論は、物質を構成する「物質粒子」、それらの間に働く力を伝える「力の粒子」、そして素粒子に質量を与える役割を担うヒッグス粒子で構成されています。

#### 物質粒子

物質粒子は、強い力が働く「クォーク」と働かない「レプトン」に分類されます。そして、これらのクォークとレプトンは、それぞれ質量が異なる3つの「世代」と呼ばれる、神秘的なパターンを持っています。

レプトンは、電磁気力が働く電子の仲間の「荷電レプトン」と電気的に中性で弱い力のみが働く「ニュートリノ」に分類されます。荷電レプトンは、それぞれ対応するニュートリノと対をなしています。クォークもまた、3つの対をなしています。例えば、原子の中心にある原子核は、陽子と中性子でできていますが、陽子や中性子そのものは素粒子ではなく、アップクォークとダウンクォークが強い力で結びついてできています。このアップクォークとダウンクォークも対をなしています。

#### 力を伝える粒子

標準理論では、力の粒子が物質粒子の間を飛び交うことで力が働くとして説明します。自然界には、日常生活でも馴染み深い重力や電気・磁気の力(電磁気力)の他に原子核の大きさ以下のミクロな世界でのみ働く「強い力」と「弱い力」があります。これら4種類の基本的な力のうち、重力を除く3つを標準理論では説明できます。電磁気力を媒介するのは「光子」、強い力は「グルーオン」、弱い力は「WおよびZ粒子」が媒介します。

#### ヒッグス粒子とヒッグス場

グルーオンは、光子と同様質量がゼロの粒子ですが、単独で分離して観測できず、高エネルギー衝突で粒子が複数ジェット状になって生成されるジェット事象として観測されます。一方、W粒子、Z粒子はともにとても重く、素粒子であるにもかかわらず、それぞれ陽子の約90倍、100倍もの質量を持っています。

標準理論では、物質粒子や力の粒子は本来、質量を持っていません。しかし、標準理論の多くの粒子は質量を持っています。どのようなしくみで質量

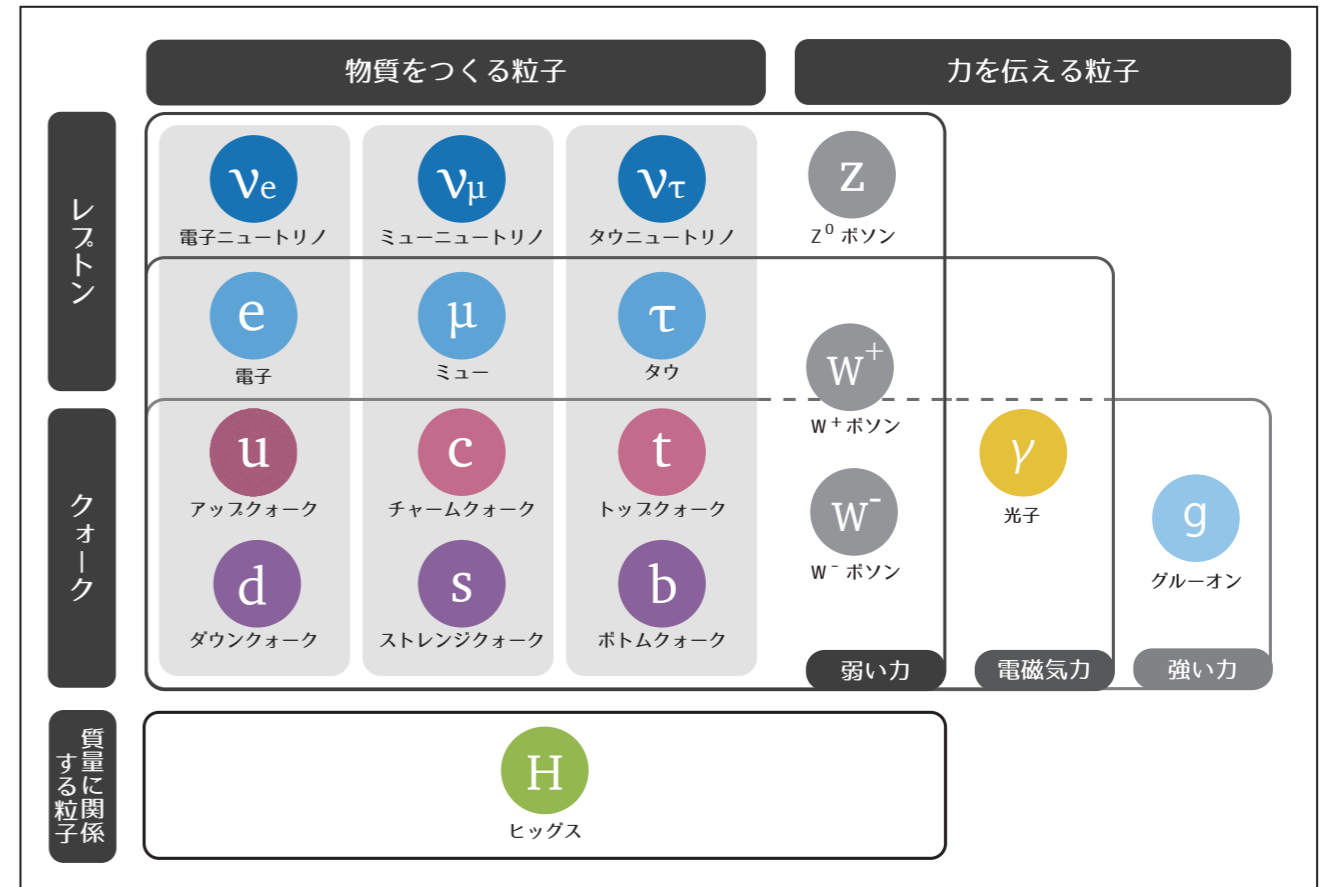
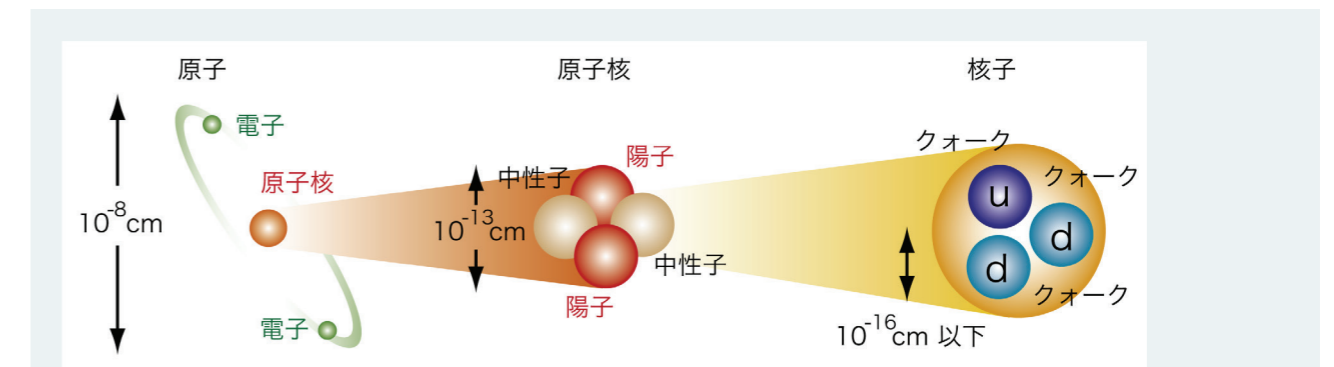


図3 / 標準理論表

素粒子の標準理論は物質粒子、力の粒子、ヒッグス粒子で構成されている。ヒッグス粒子は、標準理論の素粒子全てに質量を与えるという特別な役割を担っている。標準理論は自然界の4つの力のうち重力を除く3つの力を統一的な数学的枠組みで記述する



#### 素粒子とは？

原子は、プラスの電荷を持った原子核と、その周りを回るマイナスの電荷を持った電子から構成されます。電子には内部の構造は見られませんが、原子核は陽子と中性子からできています。陽子や中性子には内部構造があり、クォークと呼ばれる粒子3つからできています。

物質を構成する最小単位である素粒子は、これまでのところ、電子の仲間のレプトン族とクォークの仲間のクォーク族からなると考えられています。これらを総称し「物質粒子」と呼びます。物質粒子は、それらの間に力を媒介する素粒子(力の粒子)が飛び交うことで相互作用します。

が発生するのか、標準理論と整合性を保つにはどうすればよいのか、という難問に対する解決案の一つが「ヒッグス機構」です。これは標準理論に「ヒッグス場」とそれに対応する「ヒッグス粒子」の存在を導入する考えです(コラム「場と粒子」参照)。

ヒッグス粒子は「スピン0」の粒子であるとされました。2012年のLHC実験で発見された新粒子はまさにスピン0の粒子でした。素粒子には、一般に自転するコマのような性質があり、自転の激しさを「スピン」という量で表します。標準理論では力の粒子のスピンの大きさは全て1で、物質粒子のスピンの大きさは1/2です。ヒッグス粒子だけが、標準理論の中で唯一スピンの大きさが0なのです。

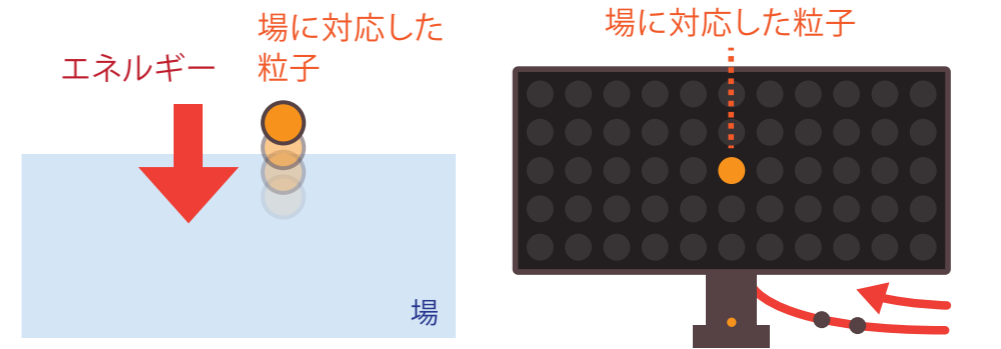
ヒッグス粒子は標準理論の粒子の中でも特殊な存在で、宇宙を理解するために特別な意味を持つ粒子であることから、発見の翌年にヒッグス機構を提唱したピーター・ヒッグス、フランソワ・アンゲレール両博士にノーベル物理学賞が授与されました。しかし、発見されたヒッグス粒子の詳細はまだ

わかっていません。

ヒッグス粒子の発見により、標準理論は一応の完成をみました。この過程で大きな役割を果たしたのが粒子加速器です。陽子や中性子がクォークでできていることが加速器実験で明らかになりました。また、衝突型加速器の実験によって、第2世代のクォークや第3世代のクォーク、第3世代の荷電レプトンが発見され、物質粒子には3世代あることが解明されました。特に、トップクォークは飛び抜けて重く、素粒子でありながら金原子とほぼ同じ質量を持っています。このように重い粒子は、衝突型加速器で高いエネルギーの実験が可能になったことで初めて発見できました。

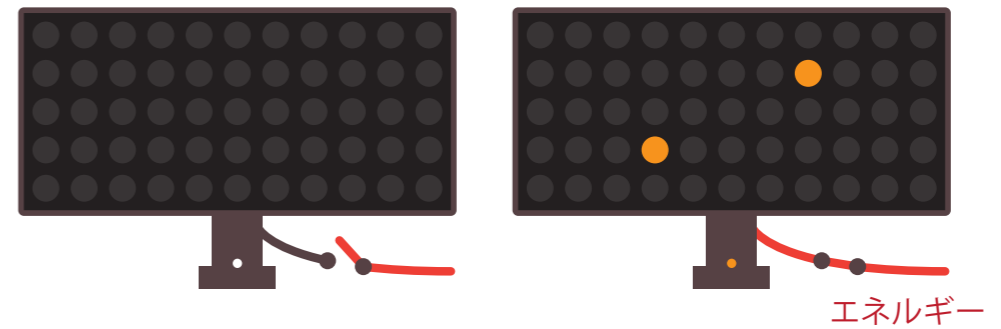
### 弱い力と太陽エネルギー

対をなす物質粒子は、W粒子による弱い力が作用すると、お互いに移り変わります。例えば、アップクォークがプラスの電荷を持つW粒子とダウンクォークになったり、ダウンクォークがマイナスの電荷を持つW粒子とアップクォークになる反応が起きるのです。太陽は、陽子(アップクォーク2つとダウンクォーク1つ)が中性子(ダウンクォーク2つとアップクォーク1つ)になることでエネルギーを放出しています。この弱い力の作用は太陽のエネルギー源になっているのです。



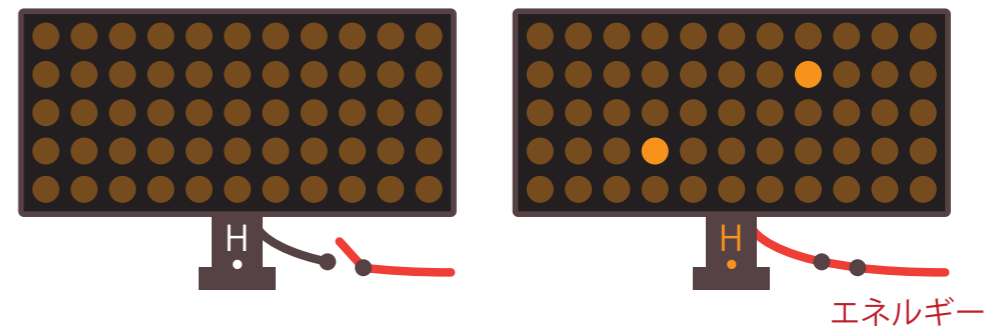
「場」にエネルギーを入れると「粒子」が飛び出す  
これは電光掲示板の1点が点灯することに対応

### 通常の場合



通常の場合はエネルギーを与えるまでは、何も無い状態  
電光掲示板が完全に消えている状態に対応

### ヒッグス場



ヒッグス場はエネルギーを与えなくても、電光掲示板がうっすらと転倒した状態  
ただしヒッグス粒子を作り出すには(電光掲示板の一点をはっきりと点灯させるには)  
エネルギーを注入する必要がある

### 場と粒子

標準理論は、相対性理論と量子力学を組み合わせた相対論的量子場理論という数学的な枠組みで記述されます。相対論的量子場理論では、全ての素粒子に対応する量子場の存在を仮定します。この量子場は時空の各点が持つ素粒子を作ったり消したりする能力を表したものと考えられます。中でも、ヒッグス場だけは、非常に特殊な性質を持っています。



## 4. 標準理論の成功と限界 残された深い謎

素粒子物理学のこれまでの実験結果は、標準理論の予測と非常に高い精度で合致しています。これまで発見された素粒子に対して、標準理論は素晴らしい成功を収めてきました。前節で述べたように、標準理論で存在が予測され、唯一発見されていなかったヒッグス粒子も、2012年にLHC加速器の実験で確認されました。こうして標準理論は一応の完成を見ました。

しかし、標準理論が説明できるのは宇宙の5%にすぎません。宇宙の大半は、通常物質の数倍におよぶ未知の見えない物質「暗黒物質(ダークマター)」と、残りの7割を占める真空中に蓄えられた謎のエネルギー「暗黒エネルギー(ダークエネルギー)」から構成されています(図4)。ダークマターについては天文観測から徐々に理解が進んでおり、銀河団からなる宇宙の大規模構造の形成に本質的な役割を果たしたと考えられます。一方、ダークエネルギーについてはほとんど解明されていません。

また、宇宙初期には、粒子だけではなく反粒子も大量に存在したはずだと考えられます。しかし、私たちの宇宙はなぜか物質だけで構成されているように見えます。反粒子はどこに行ったのでしょうか？その理由もわかっていません。ダークマターやダークエネルギー、消えた反物質の謎は標準理論で説明できません。私たちは、宇宙についてまだほとんど知らないのです。

前節で述べたように、クォークとレプトンには、世代の繰り返し、神秘的なパターンが存在します。

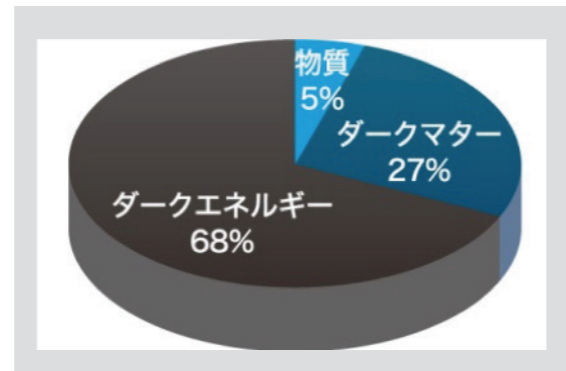


図4 / 宇宙の組成  
2013年に発表された天文衛星「プランク」の観測結果から算出した、物質、ダークマター、ダークエネルギーの割合

なぜ質量だけが異なる3世代が存在するのでしょうか？トップクォークが飛び抜けて重いのはどうしてでしょうか？ニュートリノは3世代とも他の素粒子と比べて極端に軽いのはなぜでしょうか？また、力についても多くの謎があります。三つの力は統一されるのでしょうか？その先に重力も含めた力の統一はあるのでしょうか？

これらの謎の重要な鍵を握るのがヒッグス粒子です。そしてそのヒッグス粒子自身にも深い謎があるので。

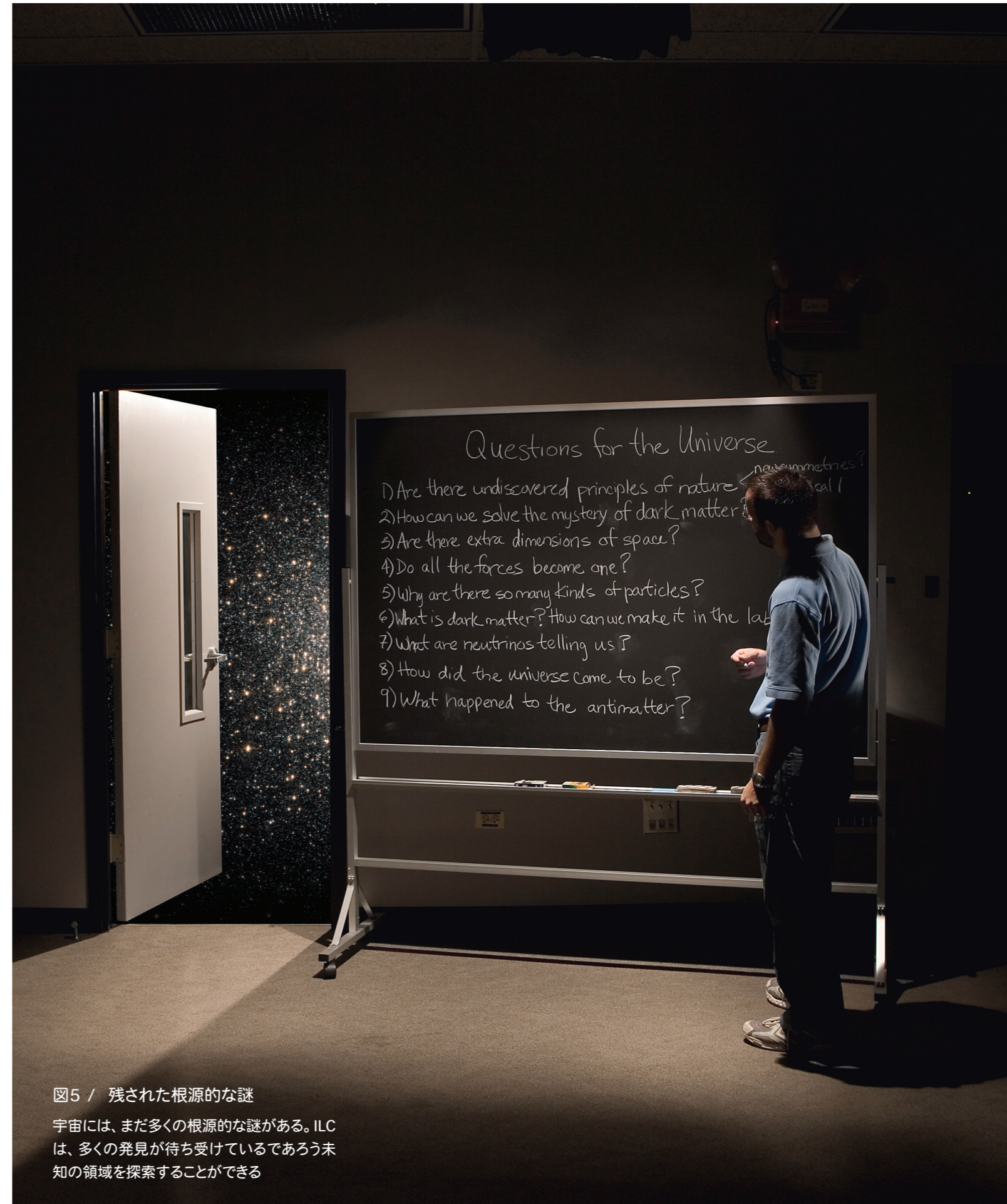


図5 / 残された根源的な謎

宇宙には、まだ多くの根源的な謎がある。ILCは、多くの発見が待ち受けているであろう未知の領域を探索することができる

## 真空中に凝縮したヒッグス場の謎とILCの役割

標準理論では、宇宙誕生の100億分の1秒後に、ヒッグス場が宇宙を満たしたとされます。それは、「電弱相転移」と呼ばれる特別な出来事です。電弱力が電磁気力と弱い力に分かれ、素粒子が質量を持ち、宇宙に秩序がもたらされた特別な瞬間です。この電弱相転移を引き起こした原因はわかっていません。標準理論では、宇宙をあまねく満たすヒッグス場の存在を単に仮定しているに過ぎないのです。

ヒッグス場の正体は何か、そしてそれがなぜ、その時宇宙を満たしたのか？ヒッグス場が宇宙を満たさなければ、物質粒子に質量はありません。まとまって構造を作ることさえできず、私たちを構成する原子も存在できません。つまり、これは私たちの存在理由にも関わる根源的な問いなのです。ILCは、電弱相転移の瞬間に隠されたその答えを探求することができる加速器なのです。

すでに紹介したように、この宇宙は物質粒子、その間の力(相互作用)を媒介する力の粒子、ヒッグス粒子からなる、と考えるのが標準理論の世界像です。ヒッグス粒子は標準理論の中で唯一自転しない「スピン0」の新しいタイプの粒子です。この不思議な粒子は素粒子なのか、それともより小さな新し

い未知の素粒子からなる複合粒子なのか、可能性はこの二つです。ヒッグス粒子が複合粒子である場合には、自然には「より深い未知の階層」が存在することになります。一方、素粒子の場合には、それが本当に自転していないのか、「異次元」方向に自転しているためスピン0に見えているだけなのかの二通りの可能性があります。どちらが正しいのか、ヒッグス粒子の性質が標準理論の予測値とどう違うのか、その違いの大きさやパターン(標準理論の予測からどのようにズレているのか)で分かります。

標準理論では、素粒子の質量は真空中に充滿した一種類のヒッグス場との相互作用で生じるとされています。その結果、標準理論の素粒子はヒッグス場との相互作用の強さに比例した質量を持ちます。標準理論を超える新しい物理には、いろいろな可能性がありますが、その違いは、この比例関係からのズレのパターンの違いとして現れます。ILCはヒッグス粒子の「精密検査」を通してその違いを明らかにします。

次項ではILCでのパターンのズレの探索から見えてくる、新たな素粒子物理の道について解説します。

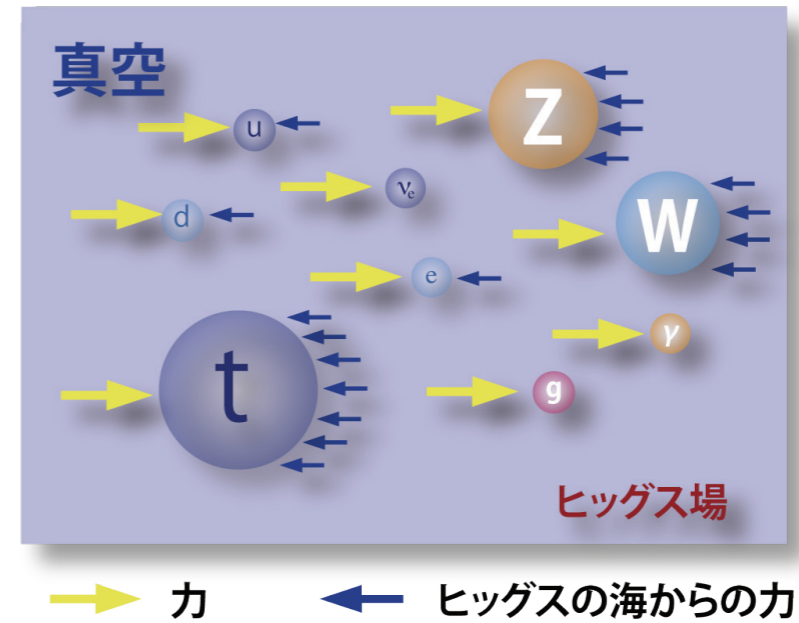


図6 / 宇宙を満たすヒッグス場  
電弱相転移が起こる前に自由に飛び交っていた素粒子のいくつかはヒッグス場と衝突するようになった。ヒッグス場と衝突しやすい粒子ほど大きな質量を持つ。W粒子やZ粒子、トップクォークは大きな質量をもち、ヒッグス場と衝突しない光子は質量ゼロである

### 南部陽一郎と真空の相転移

0度を境に水が氷になるように、ある温度を境に物質の性質が不連続的に変化する現象は、日常生活の中でも見られます。相転移と呼ばれる現象です。超伝導物質の温度を下げていくと、ある温度を境に突然電気抵抗がなくなるのも典型的な相転移の例です。

標準理論では、宇宙誕生の100億分の1秒後、宇宙の温度が1000兆度程度まで下がったところにヒッグス場が宇宙を満たしたとされます。この「電弱相転移」と呼ばれる現象は、超伝導物質が相転移を起こして超伝導状態になると同様の現象が真空に対して起こったものだと考えられます。相転移の概念を初めて素粒子物理学に応用したのが南部陽一郎です。この業績は、2008年のノーベル賞受賞につながりました。真空は空っぽの空間ではなく、超伝導物質のように相転移を起しうる豊かな性質を持った物であるとの認識は、その後の素粒子物理学の発展に大きな影響を与えました。

# 5. 岐路に立つ素粒子物理学

## ILCによるヒッグス粒子の精査が示す新たな道

### 3つの道

ダークマターやダークエネルギー、消えた反物質の謎、宇宙をあまねく満たすヒッグス場の謎など、標準理論では答えられない深い謎に挑戦するいくつかの新しい理論が提唱されています。LHCの実験でヒッグス粒子が発見されれば、どの理論が正しいのか見通しが得られると考えられていました。しかし、予想に反して、LHCが発見したヒッグス粒子の質量はこれらの理論のどれにもすんなりと当てはまらなかったのです。このため、宇宙の仕組みとして三つの可能性(道)が残りました。謎に対する答えは、どの道が正しいかに大きく依存します。つまり、今、素粒子物理学は宇宙の認識を劇的に変革させるかもしれない分岐点に立っているのです。ILCは、ヒッグス粒子を精密測定し標準理論の予想からのズレを調べることで、どの可能性が正しいのか明らかにします。

### 第一の道 「新たな次元」

新たな次元の道には二つの可能性があります。

一つ目は、アインシュタインの相対性理論の基礎となる時空(縦・横・高さの空間3次元と時間の1次元)の他に、隠された次元「余剰次元」が存在する可能性です。ヒッグス粒子が余剰次元方向に自転しているため、あたかも自転していないように見える場合に対応します。

二つ目の可能性は、物質粒子と力の粒子を入れ替える新しい種類の次元(超対称性)が存在する場合です。この場合、ヒッグス粒子は本当に自転していないことになります。実際、超対称性の場合、全ての物質粒子にスピン0の相棒粒子の存在が予言され、スピン0粒子はありふれたものとなります。その意味で、超対称性はスピン0粒子の存在論理を与えるとと言えます。

現在、LHCにおいて、超対称性粒子の探索が精力的に続けられていますが、今のところ、その兆候は見えていません。このため、LHCでは発見が難しいタイプの超対称性粒子の探索がILCに期待されてい

ます。

新しい次元の存在は、ヒッグス粒子の性質の標準理論の予測からの特徴的なパターンを持ったズレとして現れると考えられます。LHCの精度ではそのズレが小さ過ぎて見えない可能性もあります。ILCでのヒッグス粒子の「精密検査」は、その微妙なズレを明らかにします。

第一の道の特徴は、ヒッグス粒子に仲間の素粒子がたくさん存在することです。LHCで発見されたヒッグス粒子はそれらの新粒子のうちの最初の一つだということになります。

余剰次元や超対称性は、究極理論の候補である超弦理論(ひも理論)へと自然につながります。ILCによるヒッグス粒子の精密検査、新粒子探索により余剰次元や超対称性の証拠が見つければ、これは時空概念に革命をもたらす、重力も含めた統一理論、究極理論に向けた大きな一歩となります。

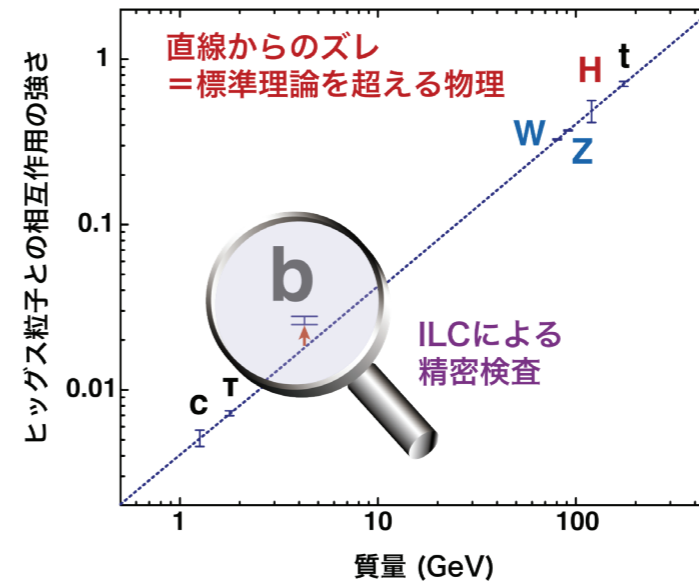


図8 / ヒッグス粒子との相互作用の強さと質量の関係  
ヒッグス場と衝突しやすい、つまりヒッグス場との相互作用が強い粒子ほど加速させにくく、質量が重くなる。標準理論ではヒッグスとの相互作用の強さは質量に比例する

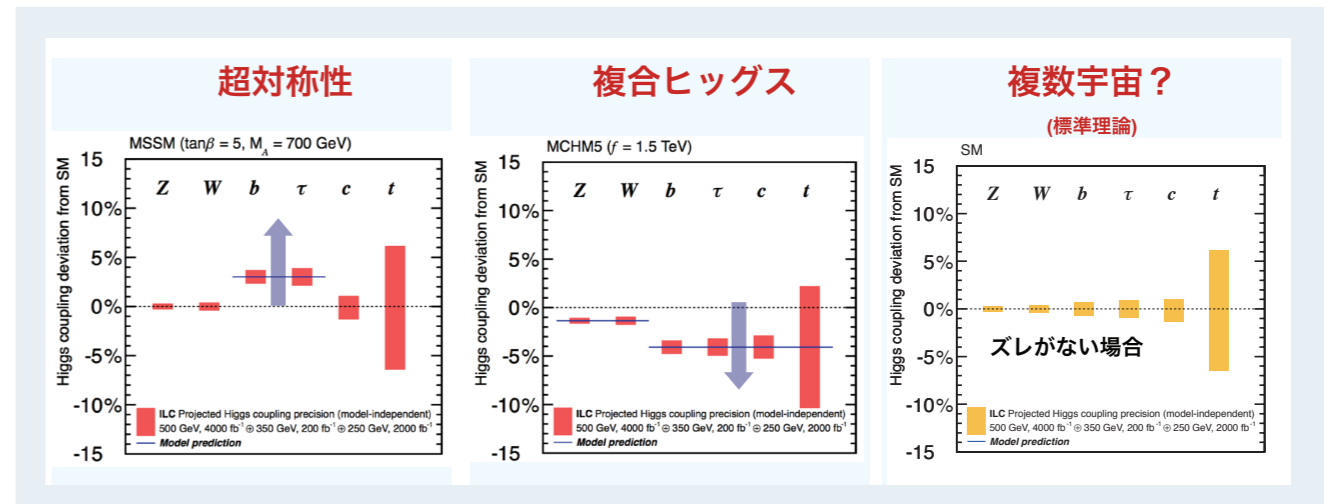


図9 / 測定される結合定数と標準理論予測のズレのパターン  
ヒッグスに中間粒子があったり、ヒッグス粒子が複合粒子である場合、ヒッグス粒子との相互作用の強さ(結合定数)は質量と比例しない。この図では、図8の比例関係からのズレを、三つの場合について示している。ILCはパターンの違いからどの道に進むべきか、素粒子物理学の進路の指針となる

### 超弦理論

究極理論の有力候補として「超弦理論(ひも理論)」があります。超弦理論では、素粒子は物質粒子も力の粒子も、点状ではなく非常に小さな「ひも(超弦)」だと考えます。素粒子の違いはひもの振動の仕方の違いに対応します。さらには時間、空間もひもの集合体として説明します。こうして宇宙の存在の全てを「ひも」からできたものとして統一的に記述します。

超弦の超は超対称性の超です。超弦は、本来10次元時空に存在すると考えられます。私たちが知っている時間1次元+空間3次元の4次元以外に6次元分の余剰次元の存在を仮定しています。そこで、第一の道の超対称性や余剰次元は、どちらも超弦理論へと自然につながっていきます。超弦理論は、無数(10の500乗)の宇宙が存在する可能性も示唆します。そこで第三の道の場合にも、超弦理論への道筋が見えてくるかも知れません。

### 第二の道 「より深い階層」

「より深い階層」とは、ヒッグス粒子が素粒子ではなく、内部に構造を持つ複合粒子である可能性があります。スピンのゼロの素粒子は存在せず、スピンのゼロのヒッグス粒子は、スピンを持った新しい素粒子が全体としてスピンのゼロになるように組み合わせられてきている可能性があります。この場合、ヒッグス粒子は素粒子リストからは消えてしまいます。

この場合には、標準理論では想定されない深い自然の階層があり、その階層を支配する新しい力が存在することになります。この新しい力は、ヒッグス粒子の性質に標準理論の予測からの特徴的なズレとして現れます。この場合、新しい素粒

子が新しい力で結びついてできる、構造を持った重い新粒子がテラ電子ボルト(TeV)を超えた領域に多数存在することが予見されます。

素粒子物理学は、これら多くの新粒子を発見しながら深い階層を支配する新しい力を解明することになります。こうして自然のより深い階層を理解することで究極理論への新たな突破口が開けるのです

### 第三の道：「複数宇宙、あるいは新しい原理の存在」

ヒッグス粒子が、本当にただ一つのスピンのゼロの特別な素粒子である場合、ILCの高精度の観測をもってしても、ヒッグス粒子の性質に標準理論の予測からのズレは見つからず、新粒子も発見されません。これは標準理論が究極理論と直結している可能性を示唆します。このようなことが起こるには、宇宙の法則が信じられないほど絶妙に調整されている必要があります。そのような絶妙な調整がどうすれば可能なのか？ 答えは、全くの偶然か、あるいは未知の全く新しい原理によるかのいずれかです。

前者の場合、私たち人間や地球の存在すらこの微調整の偶然の産物ということになります。この偶然に「合理的」な説明を与える理論の一つ

に「複数宇宙の存在」があります。もし宇宙の一つではなく十分たくさんあれば、その中には絶妙に調整された宇宙も存在するはずですが、私たちは、この調整された宇宙にしか存在せず、私たちが観測する宇宙は必然的に絶妙に調整された宇宙になるという理論です。

このような考え方を人間原理と言います。第三の道では、このような驚くべき考えが真実になるかも知れません。そうでなければ、究極理論に組み込まれた新しい原理によって、見かけ上の微調整が生じていることになります。

トップクォークの質量の精密測定がこの見極めの鍵になると期待されています。

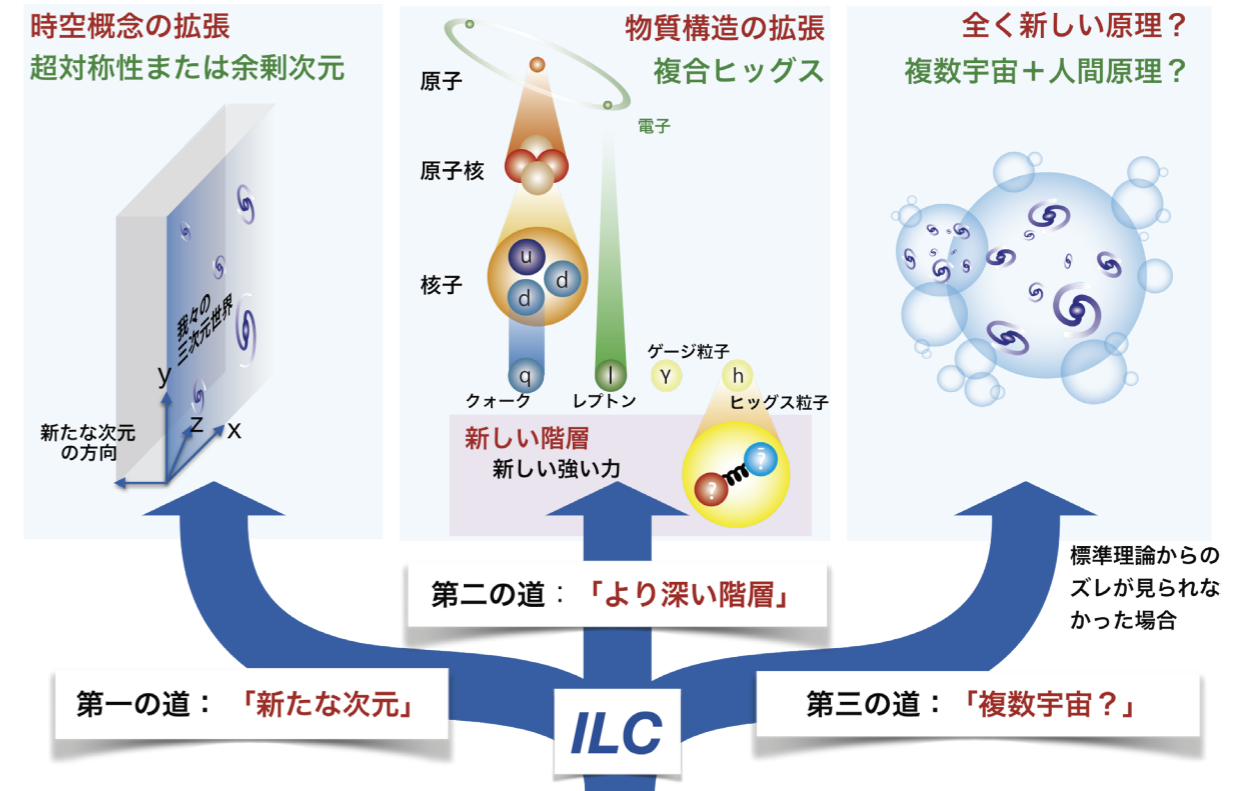


図8 / ILCが決める素粒子物理学の進路

ILCの実験結果は、3つの道のうちのどれが正しいのかを指し示す。人類の自然理解を新しい時代に導き「宇宙の常識」を様変わりさせる可能性を秘めている

#### 人間原理

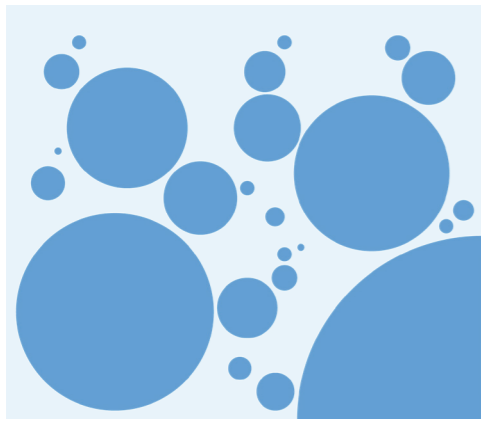
物理法則には、任意の値を取っても良いと思われるパラメータが、しばしば含まれます。標準理論に現れるヒッグス粒子の質量もそんなパラメータの一つです。第一の道、第二の道では、ヒッグス粒子の質量が観測されているような特定の値になる理由を、ヒッグス場を真空に充滿させた原因である標準理論を超える物理に求めます。一方、第三の道では、その理由を知的生命の存在条件に求めます。

ヒッグス粒子の質量が現在の観測値から大きく外れているような宇宙では、星や銀河は存在しません。逆に、人類のような知的生命が存在する宇宙では必然的にヒッグス粒子の質量値は観測された質量値を含む狭い範囲に限られることになります。物理法則のパラメータ値は常に物理法則を探求するような知的生命体の存在を許す範囲に限られるとする考え方を人間原理と言います。

## 6. 三つの道と謎の解明

4節に列記した標準理論で説明できない様々な謎の答えは、三つの道のどれが正しいかに大きく依存します。この節では、ILCで三つの道のどれが正しいかが分かることによって、私たちの自然理解がどのように進むのかを見ていきます。

### ヒッグスは消えた反物質の謎と関係しているか？



電弱相転移が起きる前には、粒子と反粒子が同数大量に存在したはずですが、電弱相転移でヒッグス場が宇宙を満たした際わずかな差が生じ、大多数の粒子と反粒子が対消滅してしまい、わずかに多かった粒子だけが残されたとする理論があります。この理論が成立するためには、相転移が非常に激しく起こることと、粒子と反粒子の性質にわずかだが十分な差があること(粒子と反粒子の性質の差を「CPの破れ」と呼びます)が必要です。

標準理論は、この条件を満たしません。ヒッグス場が宇宙を満たす原因となった新しい力や新しい粒子の性質によっては、これが可能です。「新たな次元の道」、「新しい階層の道」の場合には、その可能性があります。その場合、ヒッグス粒子の精密検査で、標準理論からのズレが見つかるはずですが、特に、ヒッグス粒子とそれ自身との間で働く力(ヒッグス自己相互作用)、あるいはヒッグス粒子と弱い力の粒子であるW粒子やZ粒子との間に働く力に標準理論からのズレが現れると期待されます。ILCはそのズレを探し「消えた反物質の謎」に挑みます。

図10 / 電弱相転移の際にできた秩序の新しい粒子や力のせいで泡の生成が激しく湧き立つように起こり、十分大きなCPの破れがあれば、消えた反物質の謎が解ける可能性がある

### ヒッグスはダークマターと関係しているか？

銀河や銀河団、宇宙背景放射の観測から通常物質の5倍もの「ダークマター」が存在することは確かです。しかしダークマターの正体は謎です。ダークマターは超対称粒子か、それともヒッグス粒子のみ、あるいは主にレプトンまたはW/Z粒子と相互作用するような新しい物質か、これら3つの道のどちらに進むかによってダークマターの性質は違ってきます。

ILCはヒッグスがダークマターへと崩壊するかどうか圧倒的な感度で検証し、電子・陽電子衝突でのダークマターの直接生成を探索して、ダークマターの発見とその性質解明を目指します。

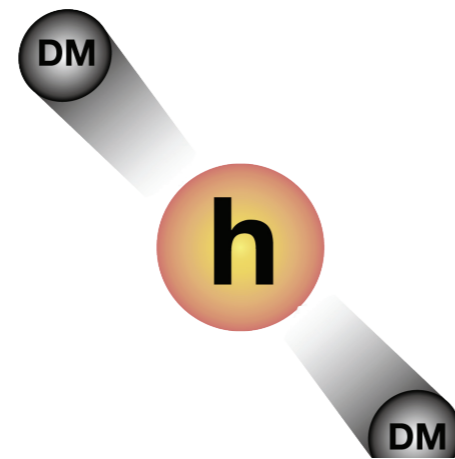


図11/ ヒッグス粒子の暗黒物質粒子対への崩壊: ヒッグスが暗黒物質を作ったか? 図中DMはダークマター

### ヒッグスはダークエネルギーと関係しているか？



宇宙をあまねく満たすヒッグス場同様、ダークエネルギーも宇宙をあまねく満たしていると考えられています。そしてそのダークエネルギーが現在の宇宙の加速膨張の原動力だとされます。一方、ヒッグス場が誕生直後の宇宙をものすごい勢いで加速膨張させた原動力であったとする理論的可能性も指摘されています。しかし、現在のダークエネルギーが宇宙を満たすヒッグス場のもつエネルギーだとすると理論予想と全く合いません。

現在ダークエネルギーの正体は全く不明ですが、ILCで三つの道のどれが正しいかははっきりすれば、ダークエネルギーに対する正しいアプローチの仕方も分かること期待されます。

図12/ 宇宙の加速膨張のイメージ図 ILCで未知のエネルギー解明の糸口がつかめるかもしれない © NASA's Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab

### 統一理論

いずれの道も自然界の4つの力(重力、電磁気力、強い力、弱い力)、12個の物質粒子を統一する統一理論につながっていると考えられます。特に「新たな次元の道」、とりわけ超対称性が正しい道であった場合には、三つの力の大統一、さらには重力をも含めた超大統一実現へのはっきりとした道筋が見えてくることでしょう。

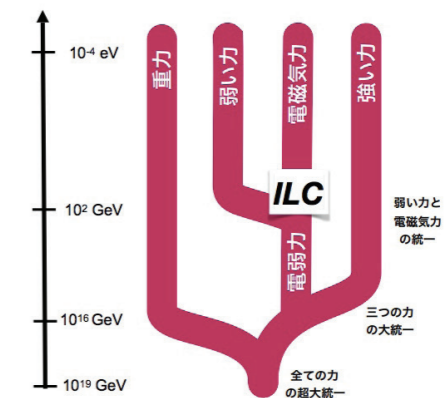


図13/ 全ての力の統一へ

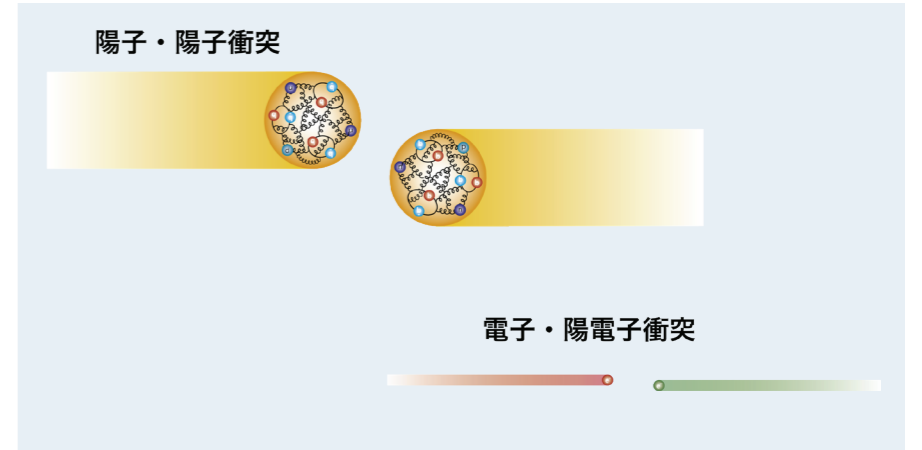


図14/ 陽子・陽子衝突と電子・陽電子衝突の違い

## 7. ILCが探索するエネルギー領域

LHCは世界最高の衝突エネルギーを誇る強力な加速器です。ILCでは生成できない重い新粒子を生成する能力を持っています。しかし、陽子という構造を持った粒子同士を衝突させるので、陽子を構成するどの粒子がどういうエネルギーで衝突したのかは不明です。また、反応は一般に複雑で、新粒子以外の多数の粒子が同時に生成されます。さらに、陽子を構成するクォークやグルーオンは強い相互作用をするので新粒子生成とは無関係なノイズ事象も大量に起こります。そこで新粒子の発見には強い相互作用に起因するノイズ事象に隠されないような「際立った特徴」が必要です。

これに対してILCは、電子と陽電子という構造を持たない素粒子同士の衝突なので、反応の初期状態が明確に分かっており、新粒子と無関係な粒子が同時に生成されることがありません。また、電子や陽電子は強い相互作用をしないので圧倒的にノイズの少ない高感度の探索や精密測定が可能です。

望遠鏡に例えれば、LHCは視野の広さに優れた装

置で、ILCは集光力に優れた装置と言えます。ILCは標準理論を超える物理のかすかな信号も見逃しません。

2012年のヒッグス粒子発見以降、LHC実験では、標準理論を超える新しい物理の発見を目指してさらなる探索が続けられています。2015年からは、衝突エネルギーが8TeVから13TeVへと大きく上がり、超対称性粒子などの新粒子の発見が期待されました。しかし、これまでのところヒッグス粒子以外の新しい粒子の兆候や、ヒッグス粒子の性質の標準理論からの有意なズレも見つかっていません。これは、標準理論からのズレがあるとしても、その大きさはLHCの現在の測定精度以下であることを示唆しています。この状況は、ILCにおけるヒッグス粒子の精密検査、とりわけ250GeVでヒッグス粒子を大量生産して詳細に調べる「ヒッグスファクトリー実験」の重要性がこれまで以上に高まったことを意味します。

250GeVでのヒッグス粒子の精密検査の結果と、

予定されているビーム強度の増強後のLHC実験(HL-LHC実験)やKEKで進んでいるSuperKEKB実験の結果と組み合わせることで、標準理論を超える物理の手がかりが得られ、新しい物理の探索に必要なエネルギーについて確かな指針が得られると期待されます。

「第一の道：新たな次元」の場合には、250GeV実験で、LHCでは微弱な信号しか残さない超対称性粒子やダークマターが発見される可能性もあります。この場合には、それらの新粒子の精密測定によって、付随する他の新粒子の質量が推測できます。

「第二の道：より深い階層」の場合には、TeVを超えた領域に複数の新しい複合粒子の存在が予想されます。

線形加速器であるILCは円形加速器と違い、トンネルの延長や新しい加速技術の導入で、より高いエネルギーへと段階的に衝突エネルギーを増強できる拡張性を持っています。新粒子発見が期待されるエネルギーがはっきりすれば、そのエネルギーに向かってILCのエネルギー増強、さらに次世代の加速器建設を目指すことになるでしょう。ILCのエネルギーを350GeV以上に増強し、トップクォークの精密測定をすることもできます。

250GeVでのヒッグス粒子の精密検査の結果によっては、電弱相転移の瞬間、つまりヒッグス場が真空を満たした瞬間に反物質が消えて物質優勢の宇宙が生まれたとするシナリオを裏付ける証拠が得られるかもしれません。この場合、ILCのエネルギーを500GeVまで増強してヒッグスの自己相互作用を測定し、標準理論からの大きなズレを確かめることになります。

もし、ILCの精度をもってしても標準理論を超える物理の兆候が全く見つからなかったら「第三の道：複数宇宙、あるいは全く新しい原理の存在」の可能性を確かめるため、ILCのエネルギーを350GeVに増強し、トップクォークの質量の精密測定を行うことになります。

こうして、250GeVでのILC実験は、三つの道の分岐点に立つ素粒子物理学を正しい道に導き、素粒子物理学の未来を切り開く突破口となるのです。

## 8. ILCがもたらす知の革命

素粒子物理学は、ヒッグス粒子の発見以降、未知の領域に突入しました。進路は大きく三つに分岐しています。ILCは、最高エネルギーの電子・陽電子衝突によるヒッグス粒子の精密測定、ダークマター粒子を始めとする新粒子探索を通して、究極の統一理論に向けて素粒子物理学の進路を決める加速器です。

一般に、エネルギーを高くしていけば、自然

界のより微細な階層が見えてきますが、ILCはそのための単なる一歩ではありません。三つの道のどれをたどるにせよ、ILCは、人類の自然理解を新しい時代に導き、「宇宙の常識」を様変わりさせる、知の革命をもたらす可能性を秘めているのです。

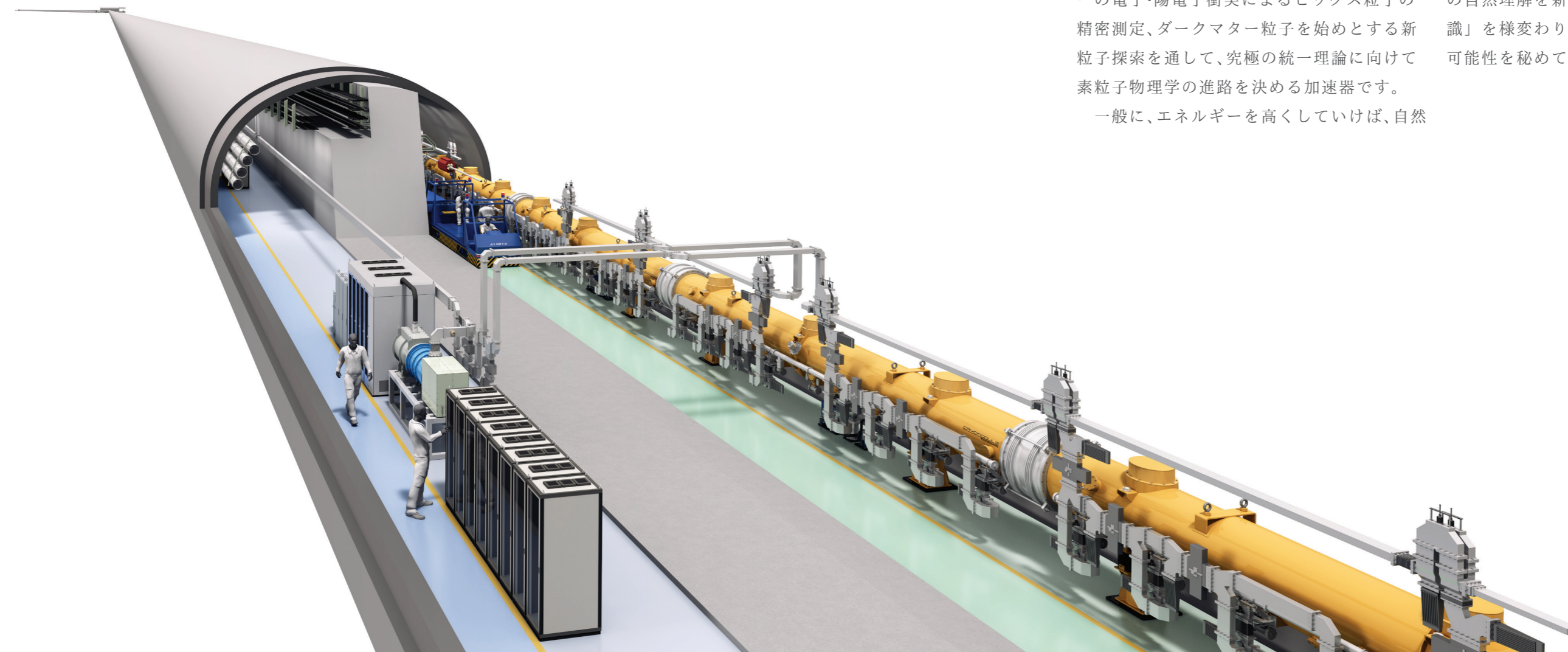


図15/ ILC完成予想図  
© Rey. Hori

## 参考文献

---

- [1] Linear Collider Collaboration (LCC), ILC technical design report, 2013  
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] Linear Collider Collaboration (LCC), 宇宙の素材の物語, 2016



# 国際リニアコライダー KEKの取組と展望

KEK REPORT 2017-XXXX

---

高エネルギー加速器研究機構  
ILC推進準備室  
〒305-0801  
茨城県つくば市大穂1-1

Email  
ilc-cu@ml-post.kek.jp  
Tel  
029-879-6291