

研究会・学会スケジュール

平成25年度日本分光学会NMR分光部会講習会
—NMR研究発信拠点としての名古屋を目指して—

開催日：2013年10月16日(水)
開催場所：名古屋大学ES総合館1階セミナー室
主催：日本分光学会NMR分光部会
名古屋大学理学部附属構造生物学研究センター
問い合わせ：武田光広 理学研究科 特任助教
takeda.mitsuhiro@a.mbox.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6474

第13回名古屋国際数学カンファレンス
Perspectives of Representation Theory of Algebras
—Conference honoring Kunio Yamagata on the occasion of his 65th birthday—

開催日：2013年11月11日(月)～15日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：名古屋大学大学院多元数理科学研究科
問い合わせ：伊山 修 多元数理科学研究科 教授
iyama@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2816

素粒子宇宙起源研究機構国際シンポジウム2013
KMI International Symposium 2013
“Quest for the Origin of Particles and the Universe”

開催日：2013年12月11日(水)～13日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館
主催：名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構
問い合わせ：國枝秀世 素粒子宇宙起源研究機構 副機構長
kunieda@u.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5823

南半球宇宙観測研究センター国際シンポジウム
“Birth and death of high-mass stars:
probing newly explored phases of the interstellar medium”

開催日：2014年1月7日(火)～11日(土)
開催場所：名古屋大学理学南館
主催：名古屋大学大学院理学研究科附属南半球宇宙観測研究センター
問い合わせ：立原悟 理学研究科 准教授
k.tachihara@a.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2839

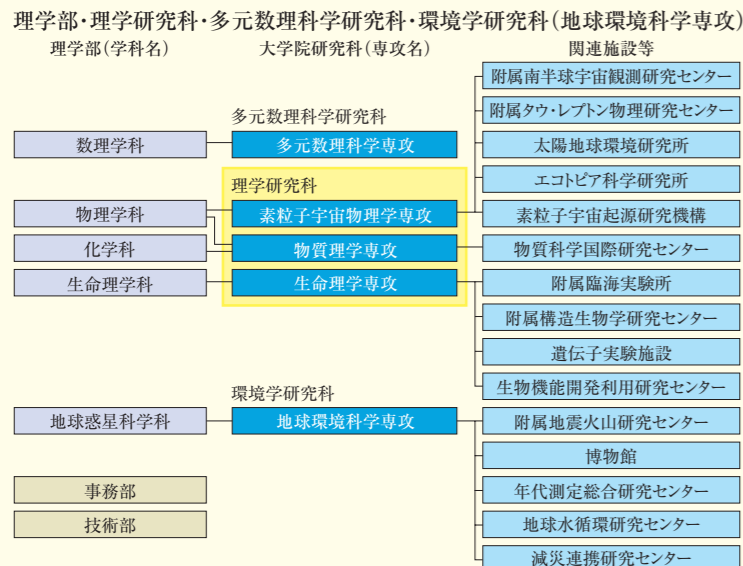
北海道大学冬季シンポジウム
“The impact of galactic structure on star formation”

開催日：2014年2月16日(日)～21日(金)
開催場所：北海道大学
主催：北海道大学
協賛：若手研究者戦略的海外派遣事業費補助金
(広域赤外・CO輝線観測と理論に基づいた星・惑星形成の連携研究)
問い合わせ：竹内 努 理学研究科 准教授
takeuchi.tutomu@g.mbox.nagoya-u.ac.jp / 052-788-2475
http://astro3.sci.hokudai.ac.jp/igssf2014/

日本化学会第94春季年会

開催日：2014年3月27日(木)～30日(日)
開催場所：名古屋大学東山キャンパス
主催：日本化学会
問い合わせ：渡辺芳人 物質科学国際研究センター 教授
p47297a@cc.nagoya-u.ac.jp / 052-789-3049

組織図



編集だより

今回の特集は、ヒッグス粒子と見られる新素粒子が、ようやく見つかったとの報告である。史上最高のエネルギーを実現する加速器の建設によってこれが可能になった。当事者の生々しい報告によって、世界中の研究者の多大な労苦の末に、膨大な資源を使ってこの成果は得られたことが伝わってくる。今後の地味で膨大な追作業によって、新粒子の「顔」がさらに詳しく見えてくることだろう。ヒッグス粒子への長年の待望の末に、「この発見はむしろ静穏に迎えられた」と感じたのは、私ひとりであろうか。時期を同じくして、新たな宇宙背景放射の高精度観測も発表された。それによると、宇宙の年齢はこれまでの137億年から少し伸びて138億年とすべきだろうとのことである。「基礎物理学はこれから何をめざすのか」、人類にとっての大きな宿題と思われる。(福井康雄)

表紙説明

2012年7月、スイス・ジュネーブのLHC実験でヒッグス粒子が発見されたとの発表があった。表紙背景の図は、その時のヒッグス粒子による事象の候補の一例である。ヒッグス粒子の発見により素粒子物理学を新しい局面へと導く「7月革命」が起こった。



理 *philosophia* — No.25
autumn-winter 2013
2013年10月10日発行

広報委員 篠原久典(研究科長)
松本邦弘(副研究科長)
杉山 直(評議員)
糸 健太郎(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
戸本 誠(物理学科)
出口和彦(物理学科)
山口潤一郎(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
瀧口金吾(生命理学科)
古本宗充(地球惑星科学科)
斉藤 肇(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
〒464-8602 名古屋市千種区不老町

ご意見、ご感想をお待ちしています。
本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。
広報委員会までご連絡ください。
なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
次号は2014年4月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通
編集協力 株式会社コミニケ
デザイン 株式会社ティ・エム・シー

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。 ISSN 1884-8486

URL <http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/> E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp FAX 052-789-2800 TEL 052-789-2394

理

名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌
[理フィロソフィア]
autumn-winter 2013

25

philosophia

特集

「素粒子物理の7月革命 —ヒッグス粒子発見—」

04 — 素粒子、物質、宇宙の質量の謎◇久野純治

08 — ヒッグス粒子の発見とさらなる新粒子を求めて◇戸本 誠

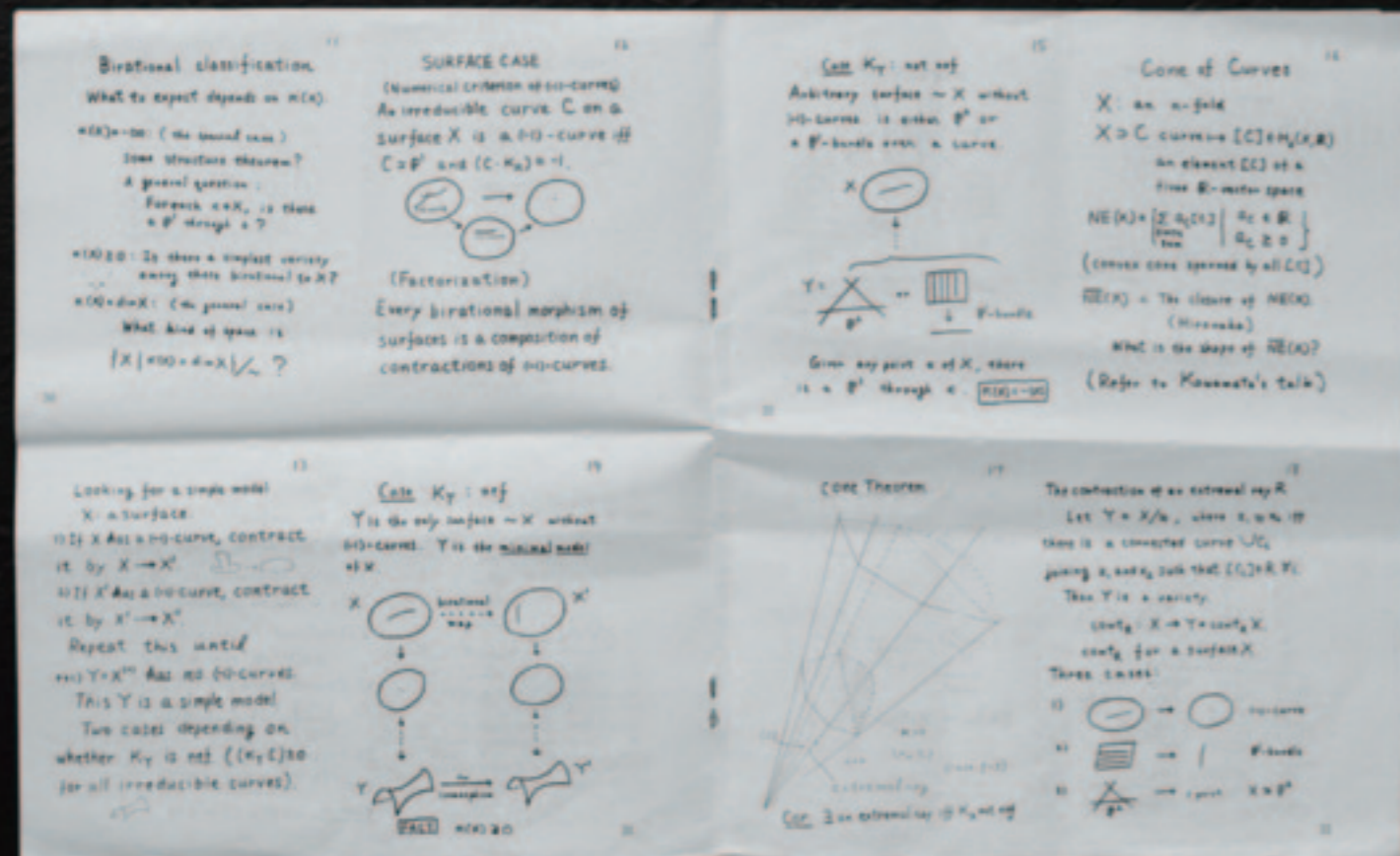
02 — 時を語るもの(森 重文博士)◇梅村 浩

03 — 理のエッセイ◇松原隆彦

12 — 理の先端をいく◇唯 美津木/井上摩耶・谷本昌志/渡邊誠一郎

18 — 理学部交差点

森重文博士 — 3次元極小モデル理論の完成



代数幾何学とよばれる数学の分野では、多項式で記述される図形、代数多様体を研究する。19世紀ドイツではすでに、1次元の代数多様体を考えることと、その上の関数全体を考えることは同値であることが認識されていた。同種の問題を2次元で考察するのは、きわめて困難であって、絶望的かと思われたこともあった。しかし、19世紀末から20世紀にかけて、イタリア学派はこの困難を克服し、2次元の極小モデル理論を完成した。

それでは3次元の場合はどうであろうか。幾多の研究

がなされたが、高次元特有の難しい問題が行く手を阻んでいた。そんな状況にあった1979年、森重文はハーツホーン予想を解決する。この予想の証明の過程で得られた独創的なアイデアは、3次元極小モデル理論にまったく新しい視点を開くものであった。これを機に各国の数学者も加わり、1988年に3次元極小モデル理論が完成する。この一連の業績に対して森重文は1990年フィールズ賞を受賞した。

(梅村浩 名古屋大学名誉教授)



もり しげふみ
森 重文 (1951-)
元名古屋大学理学部講師(1980-1982)
同助教授(1982-1988)
同教授(1988-1990)
京都大学数理解析研究所教授(1990-)
名古屋大学特別教授(2010-)
日本学士院賞(1990)
フィールズ賞(1990)
文化功労者(1990)



◇写真の説明
1990年8月21日から8月29日まで国立京都国際会館で第21回国際数学者会議(ICM90)が開催された。世界中から4000人が参加し、9日間におよんだ会議のハイライトは森重文博士が受賞したフィールズ賞の授与式であった。左の写真は受賞記念講演で使用された手書きスライドの写し(日本数学会出版の講演録画ビデオの添付資料)。上の写真は授与式での森博士。下の写真は2011年4月に開催された名古屋大学数理論科学同窓会総会における記念講演の様子。



◎理のエッセイ

すべての星が1カ所に集まると

松原隆彦 素粒子宇宙物理学専攻准教授



Illustration: Junichi Kishi

普段は理学系の学生を相手に講義などを行っているが、非理工学系の学生や一般向けの講義・講演をすると、意外な質問や感想が出てきて、新鮮な感じを受けることがある。とくに私の専門である宇宙論の話をした後は、たまに面白い意見が出てきて興味深い。

「すべての物体が万有引力で引き合っているのなら、宇宙のすべての星はいずれ1カ所に集まってしまい、空間がなくなってしまうのではないですか」。この学生は物質の広がりがないければ空間の広がりもいっしょになくなると考えている。ビッグバン宇宙論の立場では自然な考えである。物質と空間は一体であるということを知っているようだ。

また、「私が死んで魂がなくなった後にも世界は存在し続けるのですか。本当はそうでないような気がします」という学生の感想は妙に印象に残っている。量子論の基礎的な観測問題に切り込んできたからである。

私たち物理の研究者はニュートン力学から入って一通りの物理を学んでしまっているため、物理について何の知識ももたない状態での発想を忘れがちである。研究においても、自分の知識をいったんすべて忘れて、その上で発想をすることも必要であり、学ぶ前に抱いていた素朴な発想を忘れたくないものだ。

ところで、最近は物理学科への進学を第一志望にする学生の数が減っていて、物理学科教員はみな悲しい思いをしている。物理を学ぶモチベーションをもっていない学生からは「物理は摩擦を無視するなどの非現実的で理想の場合ばかり扱っていて、一体何の役に立つのですか」といわれることがある。この学生の場合、意味もわからず落体運動などの計算をさせられたという苦い記憶があるらしい。何事も第一印象が大事だ。星が1カ所に集まると空間もなくなるのではないかと、という素朴な発想をもつ学生を理工学系の分野に惹きつける努力が必要かもしれない。

Takabiko Matsubara

1966年長野県生まれ。京都大学理学部卒、広島大学大学院修了。東京大学大学院助手、ジョンズホプキンス大学研究員などを経て、現在名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻准教授。専門は宇宙論・宇宙物理学。著書に「現代宇宙論」(東京大学出版会2010)、「宇宙に外側はあるか」(光文社新書2012)など。

この宇宙のあらゆるものを構成している最小単位は素粒子である。

素粒子には種類があり、その個性をあらわす量として「質量」がある。

なぜいろいろな質量をもつ素粒子が存在するのか。その質量の起源はなにか。

その答えの鍵を握っているのが「ヒッグス粒子」である。

2012年7月、このヒッグス粒子がスイス・ジュネーブのLHC実験で発見された。

この発見は「7月革命」と呼ばれるほど、今、素粒子研究は盛り上がりを見せている。

ヒッグス粒子の不思議な性質と発見までの物語、そして、発見によって拓かれた

素粒子研究の新たな可能性について、最前線で活躍する2人の研究者が読み解いていく。

(2013年6月8日、第22回理学懇話会より)

素粒子、物質、宇宙の質量の謎

久野純治 素粒子宇宙物理学専攻教授

質量のエネルギーとは

スイスのジュネーブ郊外にあるCERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)*¹において、加速した陽子同士の衝突から生じる素粒子を観測する実験、LHC (Large Hadron Collider)*²実験が行われています。実験の紹介は戸本誠先生にお任せし、ここではそこで明らかにしようとしていることについて解説します。

LHC実験には2つの大きな目的があります。1つは「素粒子の質量の起源の解明」です。素粒子の運動は素粒子標準理論*³ (以下、標準理論) により非常によく説明できることがわかっています。しかしその理論における「素粒子の質量の起源」を検証するためにはヒッグス粒子*⁴を発見する必要がありました。さらに、標準理論で素粒子物理が終わりだとは我々は思っていない。この理論を超える「未知の素粒子物理現象の探索」がLHC実験のもう1つの目的になっています。

2012年7月4日、「素粒子の質量の起源」の解明につながるヒッグス粒子が発見されたと報告がありました。「質量」についてまずは述べたいと思います。

質量とは何かを説明するときに重要な方程式があります。E=mc² (E: エネルギー、m: 質量、c: 光の速度) です。「光の速度は不変



Junji Hisano

1968年栃木県生まれ。東北大学理学部卒業(1990)、同大学院理学研究科物理学専攻修士(1995)。博士(理学)。1997年、高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所助手。2002年、東京大学宇宙線研究所助教授。2010年より現職。専門は素粒子論。素粒子標準理論を超える物理を求めてさまざまな可能性を探っている。

であること」を仮定することで導かれたアインシュタイン*⁵の特殊相対性理論に登場することの方程式は、「質量はエネルギーである」ことを説明しています。

質量のエネルギーは静止した物体がもつ全エネルギーです。質量のエネルギーをより具体的にみるため、水素原子について考えて

みましょう。水素原子の中心に陽子があり、電子がそのまわりをまわっています。静止した水素原子の全エネルギーの内訳をみてみます。まず、水素原子を構成する陽子および電子の質量のエネルギーがあります。また、水素原子が静止していても電子は陽子のまわりをまわっているから、電子の運動エネルギーがあり

ます。さらにもう1つ、電子と陽子がバラバラになってしまわないよう電気による引力が働いており、電子と陽子の間の相互作用のエネルギーが存在します。これら4つを足したものが静止した水素原子の全エネルギー、すなわち水素原子の質量のエネルギーとなります。質量のエネルギーは、単に構成粒子の質量の和ではなく、運動や相互作用のエネルギーも寄与します。

素粒子はそれより小さい構造をもたないので、その質量の起源は水素原子の質量とは異なると考えられています。後に説明するとおり、標準理論において素粒子は「真空」との相互作用により質量を獲得します。

さて、この素粒子の世界を研究する上で必要な学問が量子力学です。量子力学において素粒子は粒子としての性質と波としての性質の両方もちます。我々はこれを「粒子と波の二重性」といっています。光は波であると同時に光の素粒子「光子」が集まった状態であり、また、素粒子である電子は波としての性質もっています。

量子力学を踏まえて小さな世界を探る方法を考えます。小さいものを観測する顕微鏡の解像度を決めているのは光の波長で、それより小さいものはみえません。量子力学においてより短い波長はより高いエネルギーに対応し、解像度を良くするには高いエネルギーの状態を用意する必要があります。加速器実

験は、電子や陽子を加速して高エネルギーにし、ぶつけ合うことで小さな世界で何が起きているかをみる実験です。加速器実験であるLHC実験は10¹⁸mよりも小さな領域をみようとして試みています(図1)。



量子世界での相互作用

相互作用が水素原子の質量のエネルギーに寄与していることを先にみましたが、相互作用とは何かについてもう少し説明をしたいと思います。

磁石の力や天体の間の重力は、物体間に何もなくても伝わる「遠隔力」として昔より不思議な存在でした。遠隔力の不思議を説明するものは「場」という概念です。

電磁相互作用についてみてみましょう。正や負の電荷があるとそのまわりの空間の各点には電場が生じます。コイルに電流を流すと

磁場が発生します。電場や磁場は空間的に向きのある場で、電流や荷電粒子はその場所にある電場、磁場の大きさとその向きに従って力を受けます。これにより一見遠隔力とみえる現象が起こります。

遠隔力は量子力学ではもっと単純な描像で説明できます。光は光子という素粒子の集まりであるといいました。そして光は電場や磁場の波であるため、電磁相互作用というのは光の素粒子、光子によって生じます。電荷をもった電子同士が散乱を起こすのは、その間で光子を交換するからです(図2)。

*1 CERN (欧州合同原子核研究機構) 1954年に設立されたスイス ジュネーブ近郊の国際共同研究機関。最先端の加速器を用いて素粒子の基本法則や現象を探索することを主目的とする研究所。W粒子、Z粒子の発見などの基礎科学としての偉大な業績があるだけでなく、ウェブ発明などの基礎研究を超えた分野でも優れた実績をもつ。

*2 LHC (大型ハドロン衝突型加速器) ヒッグス粒子や超対称性粒子などの新しい素粒子の発見をめざして建設された陽子・陽子衝突型加速器。周長27キロメートルの加速器によって最高で7兆電子ボルトの陽子同士の衝突を実現する。加速器をLHC加速器とよび、LHC加速器を用いた実験をLHC実験とよぶ。陽子の衝突点は4カ所あり、アトラス実験、CMS実験、ALICE実験、LHCb実験のLHC実験が稼働中である。

*3 素粒子標準理論 素粒子物理学において、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の3つの基本的な素粒子の相互作用を記述するための理論。標準模型または標準モデルともいう。

*4 ヒッグス粒子 1964年にP.ヒッグスが提唱した素粒子の質量の起源を説明する「ヒッグス機構」の存在を予言した素粒子。

*5 A.アインシュタイン (1879-1955) ドイツ生まれの物理学者。ノーベル物理学賞(1921年)を受賞。

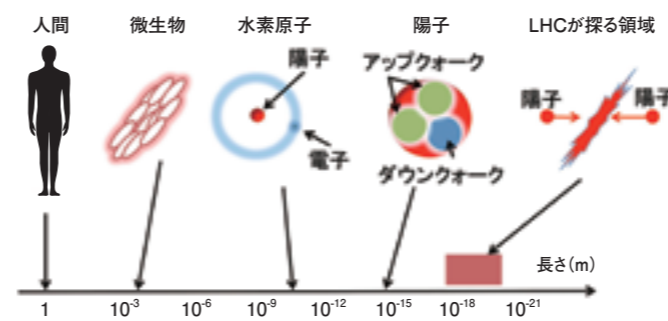


図1 LHC実験が探る世界

物質は原子から、その原子は正の電荷をもつ原子核と負の電荷をもつ電子からできている。さらに、原子核は正の電荷をもつ陽子、電荷をもたない中性子からなるが、その陽子、中性子はクォークからできている。電子およびクォークの内部構造がみつからないことからそれらは素粒子と考えられている。標準理論は素粒子の反応を記述する理論である。LHC実験は標準理論の確立および標準理論を超える理論の探索を行っている。

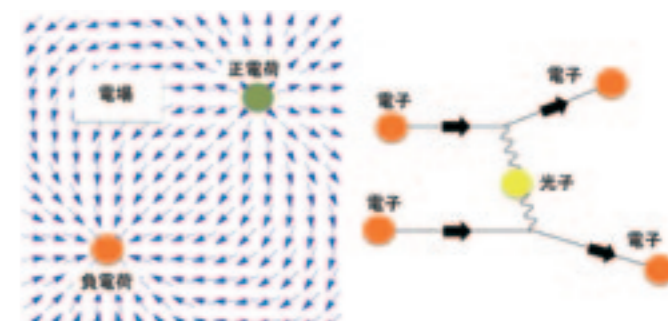


図2 遠隔力の起源

電気力や磁力のような遠隔力は空間の各点に存在する物理量である場によって生じる(左)。光は電場、磁場の波であるが、量子力学では粒子と波の二重性によりこれらは光の素粒子、光子からなる。量子力学において荷電粒子の反応は光子の交換によって生じる(右)。

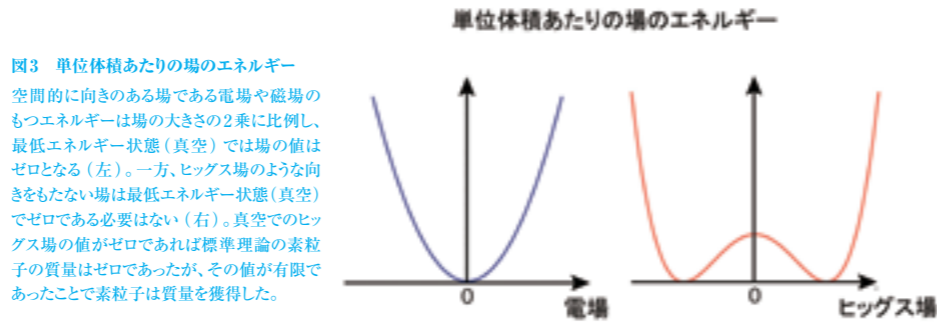


図3 単位体積あたりの場のエネルギー
空間的に向きのある場である電場や磁場のエネルギーは場の大きさの2乗に比例し、最低エネルギー状態（真空）では場の値はゼロとなる（左）。一方、ヒッグス場のような向きをもたない場は最低エネルギー状態（真空）でゼロである必要はない（右）。真空でのヒッグス場の値がゼロであれば標準理論の素粒子の質量はゼロであったが、その値が有限であったことで素粒子は質量を獲得した。

物質の質量の起源は強い相互作用

ヒッグス粒子は素粒子の質量の起源に関係しますが、我々のまわりにある物質の質量の起源には必ずしも直結しません。物質は素粒子からなることを考えると不思議に思えるかもしれませんが、物質の質量がどのように発生しているかをみてみましょう。

物質は原子であり、原子は陽子と中性子でできている原子核と、そのまわりをまわる電子によって構成されます。従って、物質の質量のほとんどは陽子や中性子の質量で決まります。しかし、陽子や中性子はさらに小さな素粒子からできていることがわかっています。その素粒子はクォークとよばれています。

クォークは実験的に直接単体で観測されることはありません。クォークは電磁相互作用以外にグルーオン場による「強い相互作用」を感じ、それによって陽子や中性子の中に閉じ込められています。電磁場に対して光子が素粒子であったように、グルーオン場に対してグルーオンという素粒子が存在します。グルーオンは、やはり光子と同じく電荷ゼロ、質量ゼロの素粒子です。クォーク間に働く強い相互作用は陽子よりも小さな距離ではあまり「強く」なく、電磁相互作用と同じくらいです。しかし、その間を陽子よりも大きく延ばそうとすると、バネのように長さに比例して強くなります。そのためクォークを引き離すことはできなくて陽子の中に閉じ込められています。



弱い相互作用の不思議

電磁相互作用と強い相互作用はよく似ており、空間的に向きのある場で記述され、質量ゼロ、電荷ゼロの素粒子が関係しています。ここで新しい相互作用が出てきます。弱い相互作用です。弱い相互作用は今まで出てきた2つとはまるで質が違います。弱い相互作用は粒子の種類を変える相互作用だからです。

中性子は真空中では不安定で、弱い相互作用により崩壊します。中性子はより軽い陽子に変わり、その際ニュートリノと電子を放出します。この過程をベータ崩壊とよびます。ベータ崩壊はダウンクォークがアップクォークに

変わることで生じ、そこにはW粒子という素粒子が関わっています。W粒子はグルーオンや光子と異なり、陽子の約80倍の質量をもち、さらに電荷をもっています。

中性子の中にW粒子ができるのであればエネルギー保存が破れているようにみえます。量子力学にはエネルギーと時間の不確かさの積に下限があるという不確定性原理があります。非常に短い時間ならばエネルギーが大きく不確定になり中性子の中に重い粒子が存在してもよく、それにより中性子はベータ崩壊します。W粒子が陽子よりも非常に重いので反応が起きる確率は非常に小さくなります。反応が起る確率が小さい、すなわち相互作用が弱いという意味で「弱い相互作用」とよばれています。弱い相互作用を起こす粒子はW粒子の他にZ粒子があります。これは電気的に中性で、質量は陽子の約90倍という重い素粒子です。

ヒッグス機構・ヒッグス場・ヒッグス粒子

素粒子の個性はどこから来たのか、実は素粒子が伝搬する真空が各素粒子を区別しているのではないか、それが自発的対称性の破れです。これはノーベル賞を受賞された南部陽一郎先生が素粒子物理に導入したアイデアです。このアイデアを実際に素粒子の質量に応用したのがヒッグス機構です。

もし真空が何も無い空っぽの状態であったならば光子もW粒子、Z粒子も、そしてクォーク

も電子もすべて質量がありませんでした。ところが、実際の我々の宇宙の真空は弱い相互作用の「電荷」をもつ場、ヒッグス場で満ちています。これはヒッグス場がない状態よりヒッグス場で満ちている状態の方が、エネルギーが低いからです（図3）。W粒子、Z粒子はヒッグス場で満ちている「真空」を飛んでおり、その結果、「弱い相互作用の強さ」×「ヒッグス場の大きさ」に比例した質量を獲得しました。さらにヒッグス場はクォークや電子とも相互作用しており、クォークや電子も質量を獲得しました。つまり、真空との相互作用によってこれらの素粒子は質量を獲得していました。一方、ヒッグス場は電荷をもたないため、光子は空間にヒッグス場があることを感じる事ができず、光子は質量をもたないというわけです。

先に場の例として電場、磁場を導入しましたが、ヒッグス場はそれらとは決定的に違う性質をもっています。電場、磁場は空間的に向きをもっていますが、ヒッグス場は向きをもたない

場です。向きをもつ場が空間に一様にあると空間の特定の方向が意味をもつため、観測と合わないからです。

電場、磁場に対応して光子という素粒子がありました。ヒッグス場に付随してヒッグス粒子の存在が予言されます。LHC実験ではこのヒッグス粒子を発見しました。向きのない場に対応した素粒子の発見は人類史上はじめてとなります。

素粒子標準理論の先へ

ヒッグス粒子の発見によって標準理論は完成を迎えようとしています。標準理論は数学的にも実験的にも矛盾のない理論としてこれまで成功しています。有限個のインプットパラメーターを決めれば、すべての素粒子の現象は予言可能であり、現在まで予言と観測の間に矛盾が生じていません。

しかしこの理論はまだ問題点があります。複数の相互作用、多数の素粒子の存在はな

ぜでしょう（図4）。また、重力が含まれていません。これらの問題を解決する理論がより高いエネルギーに存在すると期待されています。しかし、高エネルギーの理論の存在を仮定したとき、真空のヒッグス場の値がどのように決まったのか、別の言い方をすると、標準理論の素粒子の質量がその高エネルギーの理論のエネルギースケールよりも十分に小さいのは何故かという謎が現れます。たとえていうなら、紙でつくった家を溶鉱炉の中に入れても燃えてなくならないような「不自然さ」をそこには感じます。

この「不自然さ」を解消するためにはヒッグス場のような向きのない場を扱う理論が必要であると考えられており、そのために提唱されている理論の1つが超対称標準理論です。「超対称性」は時空間の拡張で、この理論では向きをもたない場が自然に導入され、「不自然さ」の問題が解消されることが指摘されています。

この理論は宇宙の暗黒物質を説明するかもしれません。現在の宇宙には、暗黒物質とよばれる、正体がわからない質量をもったものが大量に存在します。暗黒物質の正体は初期宇宙につくられた素粒子ではないかと考えられています。超対称標準理論は安定な素粒子の存在を予言し、その粒子が暗黒物質の候補と考えられています。LHC実験は超対称性の予言する新粒子探索をしており、ここで暗黒物質の素粒子が発見されるかもしれません。

物質の素粒子	クォーク属	第1世代	アップクォーク	ダウンクォーク
		第2世代	チャームクォーク	ストレンジクォーク
		第3世代	トップクォーク	ボトムクォーク
	レプトン属	第1世代	電子	電子ニュートリノ
		第2世代	ミューオン	ミューニュートリノ
		第3世代	タウレプトン	タウニュートリノ
力の素粒子	電磁相互作用	光子	素粒子質量の起源	
	強い相互作用	グルーオン		
	弱い相互作用	W粒子、Z粒子		
				ヒッグス粒子

図4 標準理論に登場する素粒子
物質を構成する素粒子は強い相互作用をしないか、クォーク属、レプトン属に分類される。それぞれ「世代」とよばれる構造をもち、世代があがるほど重くなる。電磁、強い、弱い相互作用は力の素粒子を交換することで生じる。光子とグルーオンは質量をもたないが、W粒子、Z粒子は質量をもつ。ヒッグス粒子は素粒子の質量を説明するヒッグス機構において存在が予言されていた素粒子である。



Makoto Tomoto

1971年生まれ。2001年名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了、博士(理学)。高エネルギー加速器研究機構研究員、米国フェルミ研究所リサーチ・アソシエイトを経て2006年より現職。専門は、高エネルギー加速器を用いた素粒子実験。長年の夢であったヒッグス粒子の発見が達成され、次は標準模型にない新粒子の発見をめざす。

ヒッグス粒子の発見とさらなる新粒子を求めて

戸本 誠 タウ・レプトン物理研究センター准教授

2012年7月4日

本日の理学懇話会のタイトルは「素粒子物理の7月革命—ヒッグス粒子発見—」です。私は、その革命の舞台であるCERNのLHC実験に携わっています。LHC実験は、2012年7月4日、ヒッグス粒子と思われる新しい粒子を発見したと発表しました。その発表会の場では、新粒子発見の報告がされると立ち上がって拍手が贈られました。名古屋大学でもその発表会の様子を生中継し、偉業を祝福しました。翌日の朝刊は、この発見を1面記事として大きくとりあげました。世界中の研究者だけでなく、一般の方々までも巻き込んだ世紀の大発見となったわけです。

久野純治先生の講演では、理論的な観点からヒッグス粒子のお話をしていただきました。私は、そのヒッグス粒子を実験的にどうやって作り出し、観測し、そして発見に至ったのか説明します。そして、この発見によってこれから素粒子研究がどう発展していくのか紹介します。

ヒッグス粒子をつくる加速器

ヒッグス粒子が未発見であったのは、これま

での実験ではつくりだすことが難しいほど重たい粒子であったためです。重たい未知の粒子をつくるにはどうすればよいか考えてみます。電子と陽電子をぶつけると電子と陽電子はともに消滅しますが、衝突点では電子と陽電子がもともともっていたエネルギーが残ります。有名な「 $E=mc^2$ 」の関係式によると、ここで残ったエネルギーだけの質量をもつ粒子をつくるのが可能であることがわかります。重たい粒子をつくりたいならば、粒子をより加速させてぶつければ良いのです。

粒子の加速には単純な電磁気を用います。プラスの電極板とマイナスの電極板の間にプラスに帯電した荷電粒子を置けば、粒子は電場によってマイナスの電極の方向に力を受け加速します。N極とS極の磁石で挟まれた間で荷電粒子を動かすと、粒子は磁場によって円運動をはじめます。磁場が強く、円運動の半径が大きいほど、より加速された粒子を円運動させておくことができます。円形加速器は、円周上に並べられた電磁石と加速用の電極からなります。円形加速器の電磁石に一樣な磁場をかけると、荷電粒子は一定の運動量でまわります。その状態で加速用電極

に電場をかけると、電極を通過した荷電粒子は加速します。加速した荷電粒子の円運動の半径が変わらないように電磁石の磁場を強くします。予定しているエネルギーに達するまで、加速用電極で加速して磁場を強くすることを繰り返します。この原理を用いた最先端の円形加速器がスイスとフランスの国境にあるLHC加速器です(図1)。LHC加速器は周長が27キロメートルで、地下100メートルに設置されています。長さ15メートルの超電導磁石を1232本使って、光速近くまで加速した陽子を磁場の中で円運動させます。



図1 CERNとLHC加速器
CERNはスイスとフランスの国境にあるLHC加速器を有する国際共同研究機関。周長27キロメートルのLHC加速器には、4つの衝突点があり、そこでさまざまな素粒子実験が行われている。名古屋大学はアトラス実験で活躍している(写真提供:CERN)。

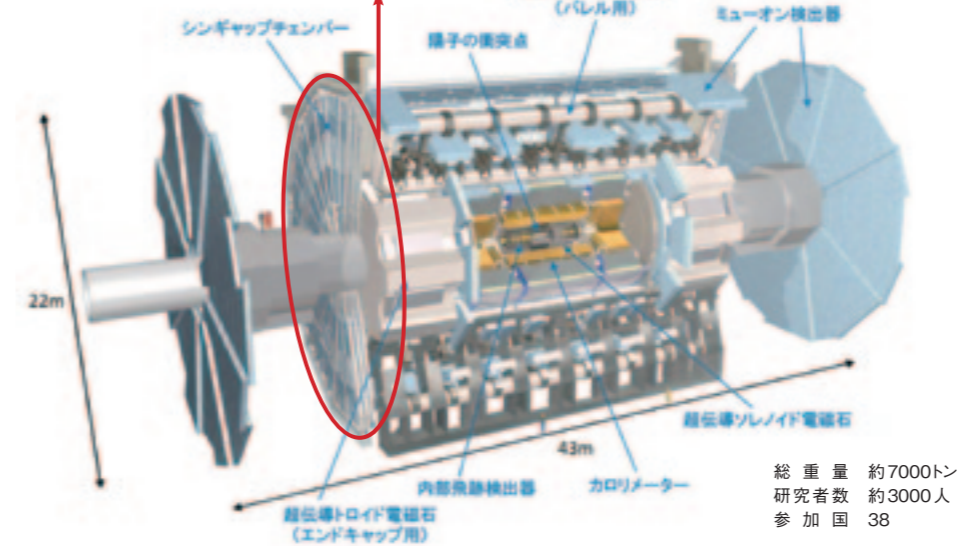
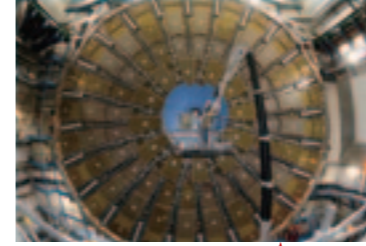


図2 アトラス検出器

下図はアトラス検出器の概念図。陽子と陽子の衝突点を囲むように複数種類の検出器が重ねられ、直径22メートル、長さ43メートルの円筒形を形成する。名古屋大学は円筒形のふた部分に位置するミュオン検出器の建設や運転で活躍している(写真提供:CERN-ATLAS実験)。

陽子を1個ずつ加速させるのではなく、1000億個の陽子の塊(バンチとよぶ)をまとめて加速させます。27キロメートルの加速器の中を1380個のバンチが15メートルの間隔でなっています。現在のLHC加速器は、陽子を光速の99.999997%の速さになるまで加速させます。このときの陽子のエネルギーは4TeV^{*1}です。この強力な加速器によって加速した陽子を正面衝突(衝突エネルギーは8TeV)させてヒッグス粒子がつけられます。

ヒッグス粒子を捕まえる検出器

陽子の衝突点に設置した直径22メートル、長さ43メートルの巨大円筒形をしたアトラス検出器^{*2}によって、LHC加速器でつくられたヒッグス粒子を観測します(図2)。陽子と陽子の衝突によってヒッグス粒子などの重たい粒子ができますが、重たい粒子は不安定ですぐに安定粒子に崩壊します。これらの安定粒子たちを検出器で捕らえて運動量やエネルギーを測定することによって衝突点でどんな反応が起きたか調べます。

アトラス検出器は、一番内側の荷電粒子の運動量を測定する「飛跡検出器」、電子や

光子のエネルギーを測定する「電子・光子検出器」、クォークによってできている粒子(ハドロンとよぶ)のエネルギーを測定する「ハドロン検出器」、一番外側のミュオンの運動量を測定する「ミュオン検出器」の検出群で構成されています。どの検出器に信号を残したかを測定することで粒子の種類がわかります。

名古屋大学は、円筒形のアトラス検出器のふたの部分にある直径22メートルの円盤形をしたミュオン検出器の建設を担当しました(図2)。検出器の建設だけでなく、32万チャンネルの信号を扱うための回路系や膨大な量のケーブルの設置も行いました。大学院生たちがすごく頑張ってくれました。実験という白衣を着ているイメージがあるかもしれませんが、素粒子実験では、ヘルメットを被って安全靴まで履いて土木工事的なこともしています。こうした努力がヒッグス粒子発見という偉大な物理成果に結びつくことになるわけです。

ヒッグス粒子の生成と崩壊

まったく同じように2つのボールをぶつけるといつも同じ方向にボールが飛んでいくことが



想像できます。しかし陽子の衝突の場合はそんなに簡単ではありません。まったく同じように陽子をぶつけているにも関わらず、あるときは軽いクォークやグルーオンの反応が起こり、あるときはトップクォークの反応が起こり、あるときはヒッグス粒子が生成し、次にどんな反応が起こるか予測できません。ただし、標準模型の計算からそれぞれの反応の起こる頻度はわかります。LHC加速器では、毎秒5000万回程の頻度で軽いクォークやグルーオンの反応が起こります。それに対してヒッグス粒子が生成される頻度は100秒間に1回程度です。つまりLHC加速器で起こる反応の中で、50億回に1回の頻度でしかヒッグス粒子は生成されません。

陽子は素粒子でなく、クォークやグルーオンが集まった複合粒子であることがヒッグス粒子の探索をさらに難しくします。ヒッグス粒子の生成反応は、陽子の中の一部のクォークあるいはグルーオンのみによって引き起こされ、陽子の中の残りのクォークやグルーオンは、別の反応を起こして多数の安定粒子に崩壊します。さらに、バンチの中の別の陽子も同時に衝突して別の反応を起こし多数の安定粒子に崩壊します。

ヒッグス粒子も生成すると直ちに安定粒子に崩壊します。生成したヒッグス粒子が何に崩壊するか予測することはできませんが、

*1 TeV(テラ電子ボルト)
素粒子実験で用いられるエネルギーの単位。1ボルトの電位差の中で電子が獲得するエネルギーは1eV(=1.60217733×10¹⁹ジュール)。これより大きな単位としてGeV(ギガ電子ボルト)=10⁹eV、TeV(テラ電子ボルト)=10¹²eVなどがよく用いられる。陽子の質量はおおよそ1GeV。

*2 アトラス(ATLAS)検出器
LHC実験の1つであるアトラス(ATLAS)実験で用いる検出器。アトラス実験はヒッグス粒子や超対称性粒子などの新しい素粒子の発見を主目的に進められている。A Toroidal LHC Apparatusの略称。

標準模型によって崩壊頻度を計算することはできます。ヒッグス粒子の崩壊の中で、2つの光子に崩壊する頻度は低いのですが、光のエネルギーを高分解能で効率よく測定できるため、実験的な感度が最も高いです。光子に崩壊するヒッグス粒子を例に、ヒッグス粒子をどのように測定するか説明します。

ヒッグス粒子をみつける

陽子と陽子の衝突でヒッグス粒子が生成され2つの光子に崩壊した事象を探します。2つの光子は、先に紹介した「電子・光子検出器」に大きな信号を残します。信号の大きさから、光子のエネルギーと運動量が測定できます。図3のような事象を沢山集めれば多数のヒッグス粒子を捕まえることができそうです。しかしながら、陽子と陽子の衝突からヒッグス粒子を経ずに直接2つの光子を生成する偽物が桁違いに多く存在します。偽物も「電子・光子検出器」で光子が2つ検出されるので、みかけは図3と同じで本物と区別がつかません。では、どのように本物と偽物とを区別するのでしょうか。検出器で測定された2つの光子のエネルギーの大きさと運動量の向きと大きさから(2つの光子のエネルギー総和の2乗) - (2つの光子の運動量の和の2乗)で定義される「不変質量」の2乗を用いてヒッグス粒子を再構成します。相対性理論を考慮すると、この「不変質量」はもとの粒子の質量になります。

つまり、ヒッグス粒子が2つの光子に崩壊した事象では、「不変質量」は必ずもとの粒子であるヒッグス粒子の質量という決まった値になります。陽子と陽子の衝突からクォークやグルーオンなどによる反応を経て2つの光子がつくられた事象では、2つの光子が決まった粒子から生成されているわけではありませんので、「不変質量」は無作為な値となります。

2012年の7月に発表した2つの光子で「不変質量」の分布(図4)をおみせします。偽物の予測は「不変質量」が低い値から高い値に向けて右下がりの分布をしています。図3の「不変質量」が126GeVあたりに盛り上がりが見えます。データ点から偽物の予想を引いた分布をみるとより顕著に盛り上がりが見えます。この盛り上がりが統計的なふらつきによってたまたま盛り上がりが見える確率を、統計学に基づいて数値化すると30万分の1でした。素粒子実験では、この確率が740分の1以下だと、統計的なふらつきでは考えられない何か新しい物の「兆候」がみえたと表現し、350万分の1以下だと何か新しい物を「発見」として表現します。2012年7月の時点では、光子対に崩壊する新しい粒子の「兆候」がみえたことになりました。結果は2013年の3月に更新されました。統計のふらつきによって盛り上がりが見えている確率は、1兆分の1以下となりました。したがって、光子対に崩壊する新粒子を「発見」といえます。

革命はさらにつづく

2012年7月4日、光子対に崩壊する事象とZ粒子対に崩壊する事象(図5)から質量が126GeVの新粒子の「兆候」がみえ、その2つの結果を足し合わせて新粒子を「発見」としました。さらには、アトラス実験の競争相手であるCMS実験^{*3}でも、まったく同じ現象が観測されました。以上の観測事実を踏まえて、「ヒッグス粒子と思われる新しい粒子」を発見したと発表しました。

その後のさらなる研究によって、W粒子対に崩壊する事象からも新粒子の「兆候」が

みえました。さらに、この新粒子は、先ほどの久野先生の講演であった「向きなしの場」に対応する粒子である可能性が高いということ、重たい粒子と反応する頻度が高そうであることがわかってきました。2013年3月14日、LHC実験は「新しく出てきた新粒子はヒッグス粒子であることを示唆している」と発表しました。

しかし、発見された粒子が、標準模型が予言するヒッグス粒子かどうかということはまだわかりません。それがわかるためには、ヒッグス粒子の性質を実験的に精査していく必要があります。久野先生の講演に出てきた「向きなしの場」に対応する粒子であることを確定させなければなりませんし、トップクォーク、ボトムクォーク、タウ粒子などの反応頻度を精密に測定する必要があります。そもそも、「向きなしの場」に対応するヒッグス粒子は、クォークでもレプトンでもゲージ粒子でもない新しいタイプの素粒子であり、実験が主導してこの新しいタイプの素粒子の性質を調べていく必要があります。そして、その先には、「超対称性粒子」などの標準模型にはない新しい素粒子が存在するはずだと思われる。

LHC実験は2015年の再開を目指し、現在、加速器と検出器のアップグレードを行っています。陽子のエネルギーを4TeVから7TeVに上げ、より高い衝突エネルギー(14TeV)のデータをより多く集めます。それらのデータから、ヒッグス粒子の性質を測定するとともに、「超対称性粒子」などの新しい素粒子の直接探索をめざします。またLHC実験の先の新たな計画として「国際リニアコライダー計画」があります。これは全長30キロメートルほどの直線加速器で電子と陽電子を加速してぶつける実験です。ヒッグス粒子の性質を詳しく調べ上げるのに不可欠です。

ヒッグス粒子が発見され、実験主導の新しい時代が幕開けしました。実験によって、ヒッグス粒子の性質に関する新たな知見が得られ、さらなる新粒子が発見されそうです。そして、これらの実験結果から新しい素粒子理論が生まれることでしょう。これからの素粒子物理学はもっと面白くなりそうです。

^{*3} CMS実験
LHC実験の一つで、アトラス実験と同様にヒッグス粒子や超対称性粒子などの新しい素粒子の発見を主目的に進められている実験。Compact Muon Solenoidの略称。

◎参考記事
本誌17号P.4特集「小林・益川理論を超えて」

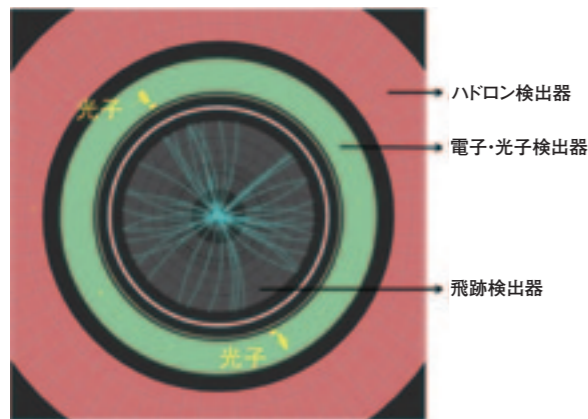


図3 ヒッグス粒子が2つの光子に崩壊した事象の候補
円筒形のアトラス検出器を輪切りにした断面からみた検出器内での様子。円の中心が陽子の衝突点。2つの光子の通った跡には「電子・光子検出器」に明らかな信号(黄色で示される)を残すが、「飛跡検出器」や「ハドロン検出器」には信号を残さない。こうした事象をたくさん集めることでヒッグス粒子の候補を探す(図提供:2011年ATLAS実験)。

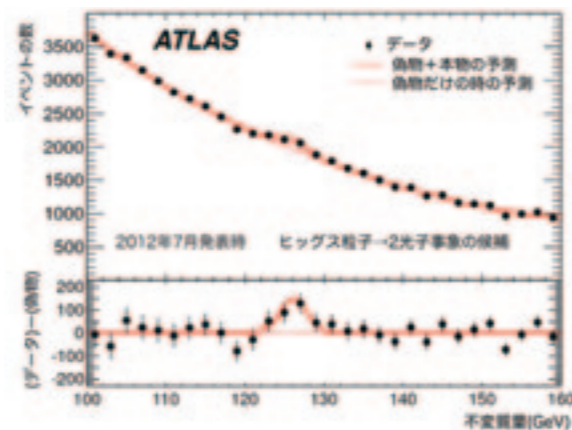


図4 2つの光子の「不変質量」分布
2つの光子がある事象の光子のエネルギーと運動量から算出した「不変質量」の分布(上)とデータから偽物の予想をひいた分布(下)。2つの光子が陽子と陽子の衝突からヒッグス粒子を経ずに直接出てきた偽物は、赤点線のような分布になることが予想されるが、2つの光子がヒッグス粒子から出てきている本物であれば、「不変質量」分布の決まった位置にピークをつくる。データは126GeV付近に新しい粒子によるピークがあることを示唆している(Physics Letters B 716 (2012) pp. 1-29より)。

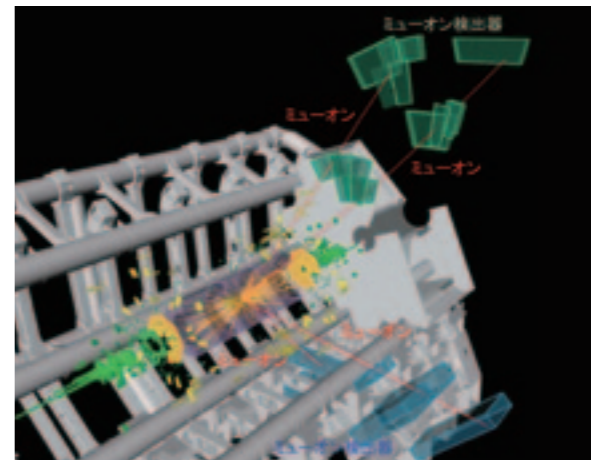
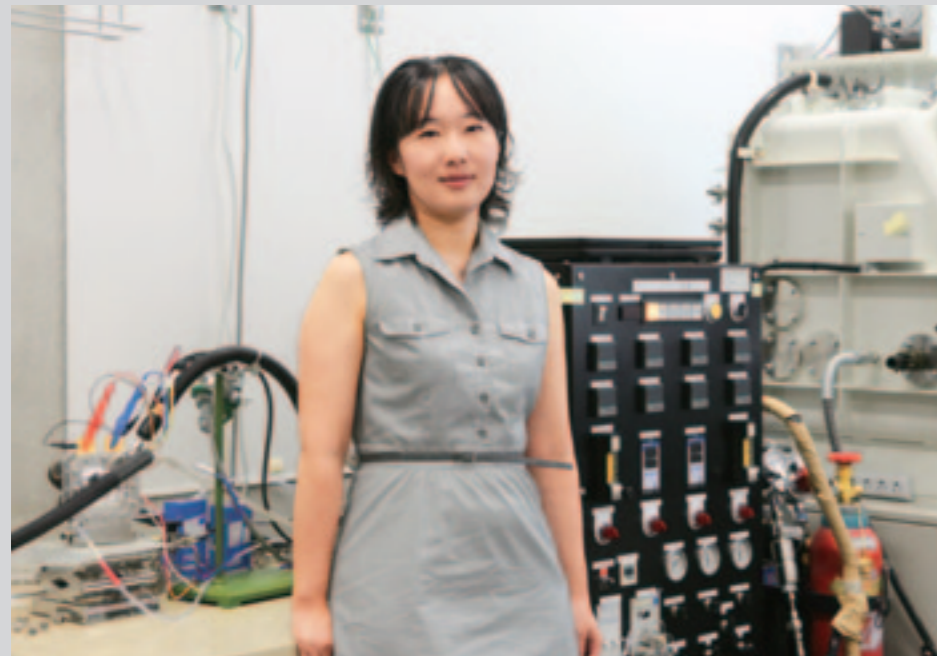


図5 ヒッグス粒子が2つのZ粒子に崩壊した事象の候補
ヒッグス粒子が2つのZ粒子に崩壊し、その後、2つのZ粒子がともに2つのミュオンに崩壊した事象の候補。信号を残した検出器のみを明示している。水色の直方体や緑色の台形がミュオン検出器で、これらの信号によって4本のミュオンの飛跡が測定された(赤色の線)。図2のミュオン検出器でもミュオンを捕らえており、名古屋大学がヒッグス粒子の発見に貢献していることがわかる(図提供:2011年ATLAS実験)。

触媒のブラックボックスに迫る

唯 美津木 物質科学国際研究センター教授



Mizuki Tada

1979年生まれ。2004年東京大学大学院理学系研究科博士課程中退。同助手（助教）、准教授を経て、2008年より分子科学研究所准教授。2013年4月から現職。専門は、触媒化学・錯体化学・X線分光学。

身近に存在する触媒

私たちの生活には実に多くの化学物質（化合物）が使われている。化学物質というと、有害、環境に悪いとネガティブなイメージをもたれるかもしれないが、私たちの生活は化学物質なしでは成り立たない。普段手にするペットボトル、自動車のガソリン、薬、これらはみな人工的につくられた化合物からできている。化合物をつくり出すために使われるのが、「触媒」である。ペットボトルの原料となる化合物を合成する、その原料を重合させてプラスチックをつくる、ガソリンを精製する、自動車の排気ガスを無害化する、葉っぱの中の光合成をする、胃の中で食べ物を分解する、これらはすべて触媒によってなされている。

触媒は、反応の前後でそれ自身はかたちを変えないが、化学反応を促進するのを助ける物質とされている。触媒自身は変わらないのに物質間で起こる反応を根底から変えてしまう、不思議な物質である。

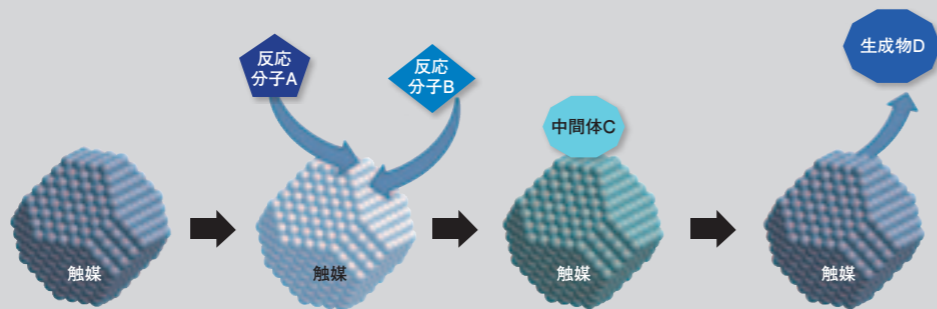


図1 触媒反応のイメージ

触媒表面で分子が活性化され、いくつかの中間体を経て、生成物が得られる。この間、反応分子、中間体は触媒表面と結合し、触媒自身の電子状態や配位構造が変化する。生成物が脱離して元の触媒構造に戻れば、触媒は一見何も変化していないようにみえてしまう。

触媒のかたちや働きをみる

しかしながら、これは真実ではない。実際、触媒は反応中何度もその構造を変えている。ある分子の結合を切り、また別の分子と反応して、新しい分子をつくり出す。一連の反応後に触媒構造が元に戻れば、全体として一見変化していないように見えるのである（図1）。本当に触媒を理解するためには、触媒がどのように構造を変え、分子を活性化し、反応を進行させるか、触媒反応の時間スケールで触媒構造にアプローチすることが必要である。

私たちは、新しい触媒表面の構築をめざしつつ、エネルギーの高いX線を利用したX線吸収微細構造（XAFS）法を使って、固体触媒の構造とそのダイナミックな動きを解明することに取り組んでいる。エネルギーの高いX線を用いたXAFS法による触媒構造解析は、触媒がどのような構造を有しているか、その構造と反応分子がどれくらいの時間で作用して反応するか、反応の進行とともに触媒の構造がどのように変化していくかなどの基礎的な問題に対する答えを与えてくれる。現在は、X線を使って、世界中で触媒のミクロな構造や動きを理解しようとする研究が進められている。

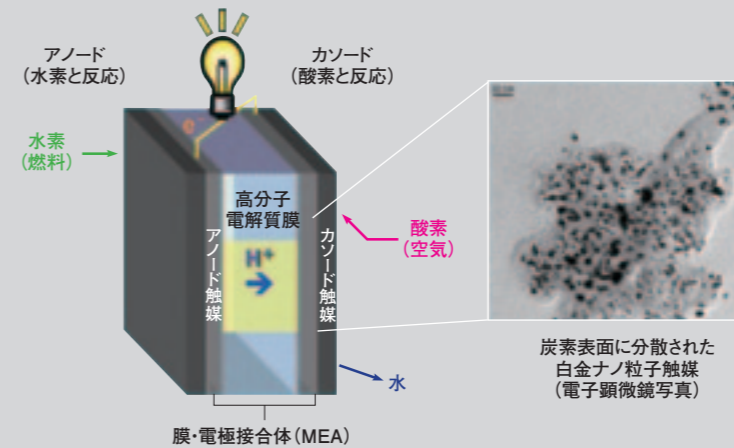


図2 固体高分子形燃料電池のしくみ

アノードの電極触媒によって、水素はプロトン（ H^+ ）と電子（ e^- ）に分解される。 H^+ は、高分子電解質膜を通過して、カソードの電極触媒（白金系ナノ粒子触媒）表面で、酸素と反応し、水を生成する。電子顕微鏡観察からは、白金ナノ粒子の分布を可視化することができるが、その化学状態の情報は得られない。

燃料電池触媒の劣化を可視化する

燃料電池は、次世代のエネルギー源としての期待が大きい。その電極反応を担うのは、白金などのナノ粒子触媒であるが、電解質膜を挟んで電極触媒をサンドイッチした膜・電極接合体（MEA）内では、運転条件によって電極触媒の活性低下や溶出劣化が起こる。高価な白金使用量の低減とともに、運転時の触媒劣化を抑制することが急務であるが、MEA内部における触媒の動き、劣化について、その詳細を直接捉えることは困難であった。

私たちは、高速でXAFSスペクトルの測定ができる時間分解XAFS法を用いて、燃料電池の運転に伴う電圧サイクル過程において、白金系触媒がどのように酸化/還元されていくかをとらえ、その速度定数の解析を通じて、白金の合金化が電極触媒の構造変化に与える影響を明らかにした。白金にコバルトなどの金属を合金化すると、電圧サイクルの還元過程における白金-白金結合再形成が相対的に速くなり、結果として白金合金触媒の溶出の抑制につながっている可能性が示唆された（図2）。

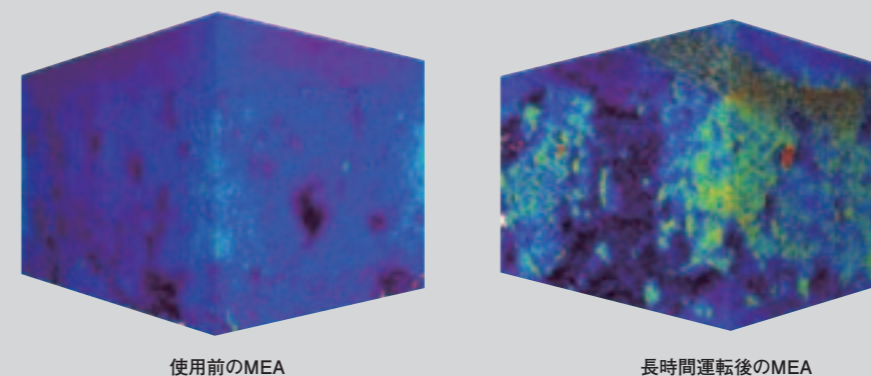


図3 X線ラミノグラフィ-XAFS法で可視化した燃料電池MEA内部の白金触媒の分布。左の使用前のMEAでは、MEAのカソード触媒層全体に白金触媒が分散しているのに対し、右の長時間運転後のMEAでは、白金触媒が不均一に存在していることがわかる。赤色、黄色、緑色、青色の順番に白金触媒の分布密度が高い。

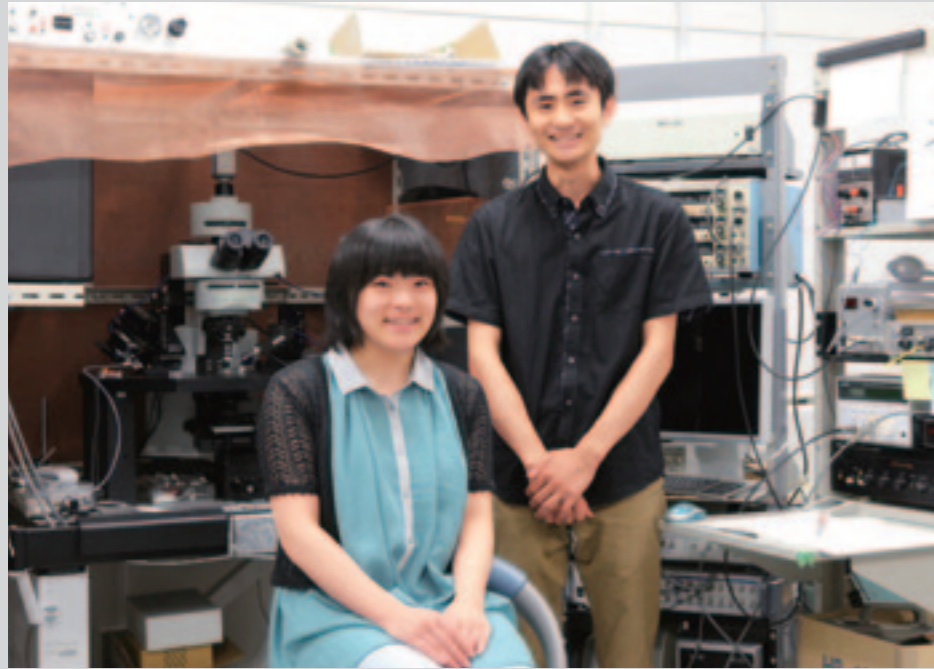
また、最近、X線ラミノグラフィ-XAFS法という新しいイメージング分光法をSPring-8*1と共同で開発した。この方法は、燃料電池MEAを破壊することなくその構造の3次元イメージングができるだけでなく、1次元のエネルギー軸を加えることで計4次元の分光イメージングを実現したものであり、内部の金属触媒の分布や構造を3次元的に可視化できる。これまでに、MEA内部で電極触媒が劣化して溶出した様子を可視化することに成功した（図3）。今後、様々な発電条件での電極触媒の様子をイメージングすることで、燃料電池の中で何が起きているかを観て、理解し、それを基盤として次の触媒・材料開発にフィードバックしていきたい。

目に見えるものだけが素晴らしいとは限らない。それでも、ブラックボックスであり続けた触媒のかたちや動きを目で見えるかたちで理解することは、化学の夢である。そして、その知を触媒の多様な動きを生み出す原動力としたい。

*1 SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) 兵庫県の播磨科学公園都市内にある大型放射光施設。電子を加速・貯蔵するための加速器群と発生した放射光を利用するための実験施設および各種付属施設からなる。

小さな耳石の大きな働き

井上 摩耶 生命理学専攻博士後期課程2年
 谷本 昌志 生命理学専攻助教



Maya Inoue

1988年生まれ、愛知県出身。2010年名古屋大学理学部生命理学専攻卒業。同年名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程入学。2012年名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程進学。同年日本学術振興会特別研究員(DC1)。

Masashi Tanimoto

1984年愛知県生まれ。2011年名古屋大学大学院理学研究科生命理学専攻修了。博士(理学)。専門は神経科学。日本学術振興会特別研究員(DC2)、(PD)を経て現職。

聴覚と平衡感覚を分けるもの

我々の耳の中には石があるという話をご存じだろうか。耳石とよばれる炭酸カルシウムでできた石が、耳の奥の内耳の耳石器官に存在する。耳石器官は、頭にかかる加速度を検出し、頭の向き(傾き)やどう動いているかといった平衡感覚に役立っている。直径数十マイクロメートルの小さな石が、我々にとって非常に重要な役割を果たしている。

哺乳類は三半規管で頭の回転を感知し、耳石器官で線形加速度と重力、^{かまゆ}蝸牛で音を感知する。興味深いことに、魚類は蝸牛をもたず、耳石器官を用いて音と平衡感覚の両方を受容している(図1)。まったく

異なる感覚として知覚される聴覚と平衡感覚だが、その受容メカニズムは共通であり、感覚受容細胞である有毛細胞が数ナノメートルという毛の動きを感知している。魚類の耳石器官の卵形囊と球形囊は、どちらも耳石と有毛細胞から構成されるよく似た構造の感覚器官である。各部位の切除が行動に及ぼす影響から、卵形囊が平衡感覚、球形囊が聴覚に寄与することが示唆されているが、よく似た構造の器官を用いて、一体どのように聴覚と平衡感覚を受容し分けているのだろうか。この疑問を解決するため、我々はゼブラフィッシュ仔魚(受精後5日)を実験に用いた(図2)。

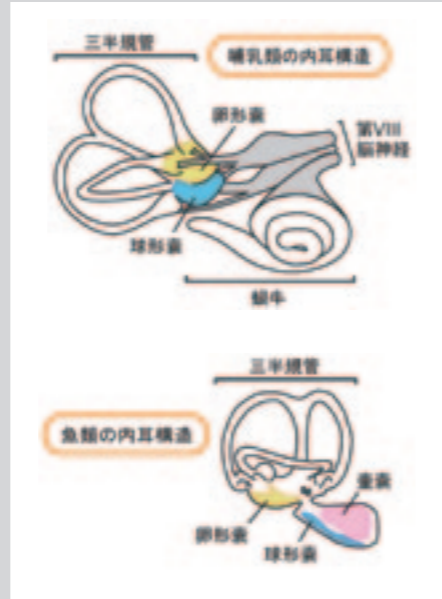


図1 哺乳類の内耳構造と魚類の内耳構造
 哺乳類の内耳は三半規管、耳石器官(卵形囊・球形囊)、蝸牛からなる。三半規管は頭の回転を感知し、耳石器官は線形加速度と重力を感知する。蝸牛は音を感知する器官である。魚類の内耳には蝸牛は存在せず、三半規管と耳石器官(卵形囊・球形囊・壺囊)からなる構造である。三半規管は哺乳類と同様、頭の回転を感知する器官である。耳石器官では、一般的に卵形囊で平衡感覚、球形囊と壺囊とで聴覚の受容がなされている。内耳の各器官における感覚受容はすべて有毛細胞が担う。

耳石の大きさが感度を決める

まず、卵形囊と球形囊が音刺激を受容し分けるのかどうかを調べるため、有毛細胞の音に対する応答(マイクロフォン電位)を記録した(図3)。正常個体で得られた応答が卵形囊と球形囊のどちらから得られるのかを調べるため、ガラス微小管を用いた微細手術によって耳石を有毛細胞上から除去し、それぞれの耳石器官の動きを阻害した。その結果、球形囊の有毛細胞が音を選択的に電気信号に変換することが示された。

卵形囊と球形囊はどちらも有毛細胞と耳石からなる共通した構造にも関わらず、なぜ球形囊のみが音刺激に応答するのだろうか。

観察の結果、受精後5日のゼブラフィッシュにおいて、球形囊の耳石は卵形囊の耳石に比べて2.5倍大きいことがわかった。耳石が大きく重いほど慣性により耳石がその場にどまり、有毛細胞との動きのずれが大きくなるため、大きな耳石をもつ球形囊の方が、音のような微小な振動を受容するのに適していると考えられる(図4)。そこで、耳石が大きくなれば本来音刺激を受容できない卵形囊も音刺激に応答するのではないかと考えた。

卵形囊の耳石を巨大化するため、受精後1日に微細手術を施して球形囊の耳石を卵形囊の耳石に接触させた。その個体を受精後5日まで育成すると、接触させた2つの耳

石が融合し、卵形囊の有毛細胞上に巨大な卵形囊+球形囊の耳石が形成された。この卵形囊+球形囊の耳石をもつ個体を用いて、音刺激に対するマイクロフォン電位を記録したところ、驚くべきことに、本来音に反応しない卵形囊の有毛細胞が音に反応するようになった(図3)。このことから、大きな耳石によって、有毛細胞の音への感度が向上することが示された。

10マイクロメートルの謎

本研究により、耳石の大きさが音の受容に重要な役割を果たし、その大きさが変わってしまえば、受容する感覚の種類にまで影響を及

ぼすことが示された。サカナが正しく感覚を受容するためには、耳石の形成を精密に制御する必要があるが、その機構にはまだまだ謎が多い。耳石の形成機構を知ることは、サカナだけにとどまらず、ヒトの疾患にも関わる話である。実は、めまいを起す疾患のうち、耳石が原因となるものが一番多い。耳石が有毛細胞上から移動してしまい、三半規管に入り込むことで、めまいや嘔吐などが起こる。

耳石はたった数十マイクロメートルという小さな石だが、その果たす役割は非常に大きく、解明すべき謎も多い。生物の緻密さ・繊細さに驚かされながら、これからも研究に邁進していきたい。

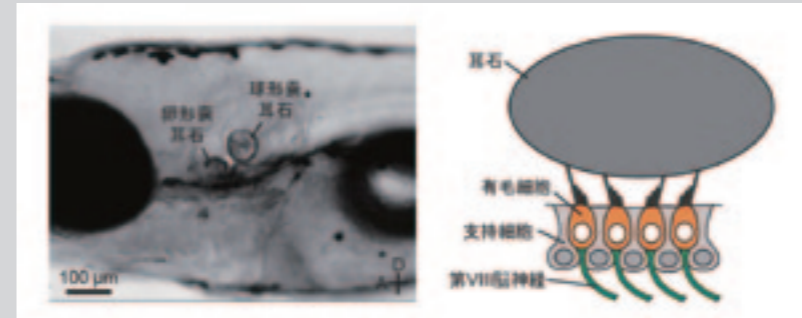


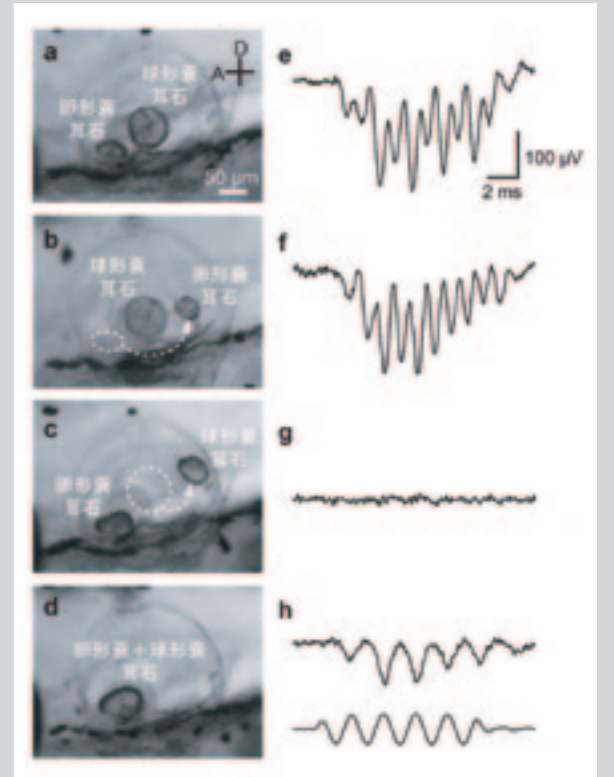
図2 受精後5日のゼブラフィッシュの側方図と耳石器官の構造
 受精後5日のゼブラフィッシュの耳(耳の原基)の中には、2つの耳石器官(卵形囊と球形囊)しか存在しない。それぞれの耳石器官は、一塊の耳石(炭酸カルシウムの結晶)と感覚受容細胞である有毛細胞で構成される。音や頭の傾きは有毛細胞の毛を傾け、その際有毛細胞に発生する電気信号が第VIII脳神経を介して脳へと伝えられる。

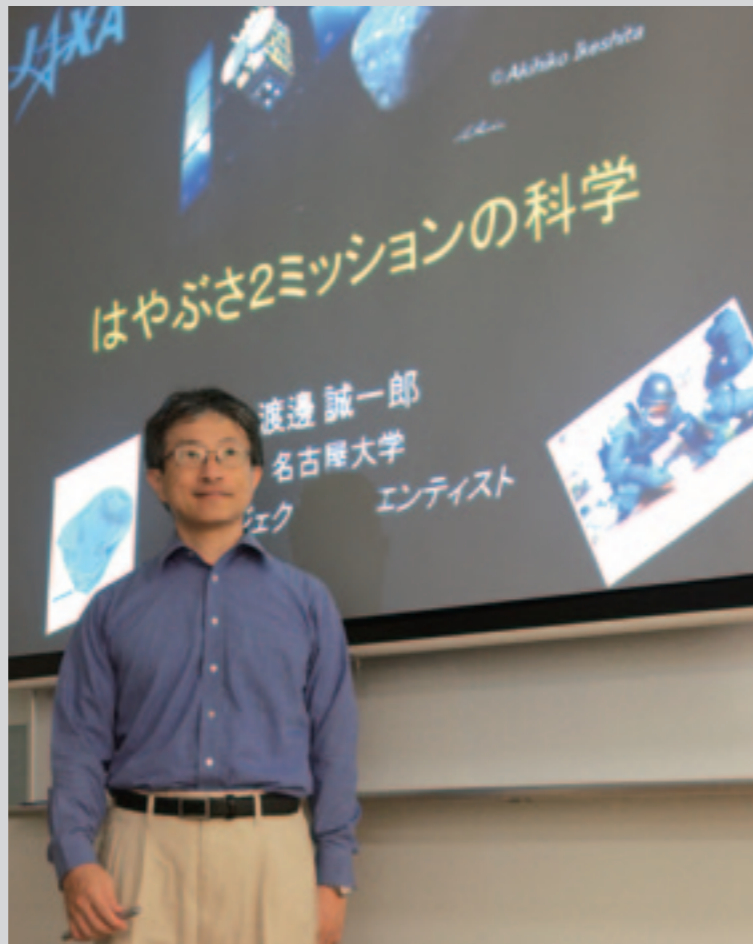


図4 耳石器官における音刺激の受容
 耳石が大きいくほど、慣性によって有毛細胞との動きの差が大きくなる。

図3 耳石の操作が音の受容に及ぼす影響

耳石の側方図(a~d)と、音刺激(500 Hz、5 サイクル、108 dB 音圧レベル; h下部の波形)を与えた時に生じたマイクロフォン電位の波形(e~h)。マイクロフォン電位は、耳石器官の有毛細胞が刺激を受容する際にイオンが有毛細胞に流れ込むことで生じる細胞外電場電位であり、耳石に記録電極を刺入して記録した。それぞれ正常個体(a, e)、卵形囊耳石除去個体(b, f)、球形囊耳石除去個体(c, g)、卵形囊+球形囊耳石個体(d, h)における結果を示す。耳石器官における刺激の受容は、有毛細胞と耳石の動きのずれによって有毛細胞の毛が倒れることにより起こるため、耳石を有毛細胞上から取り除くことで耳石器官の働きが阻害される。





Sei-ichiro Watanabe

1990年東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻博士課程中退。山形大学理学部助手、名古屋大学理学系研究科助教授、同大学院環境学研究科助教授等を経て、2008年より現職。専門は惑星科学。2012年10月より、「はやぶさ2」プロジェクト・サイエンティスト。

地球の水と生命の源を探る「はやぶさ2」計画

渡邊 誠一郎 地球環境科学専攻教授

隕石と小惑星

2013年2月15日、中央ロシアのチェリャビンスク州周辺の上空で隕石が分裂してまばゆく輝き、その衝撃波で多くの建物が被害が生じ、多くのけが人が出た。回収された破片の分析から、この隕石は地球へよく落下する普通コンドライトとよばれる球状粒子(コンドライト)を含む岩石質の隕石であると確認された。大気圏突入時の直径は20m弱と推定されている。実は、この隕石落下からほんの約16時間後、2012 DA₁₄という仮符号をもつ直径45m程度の小惑星が地球表面からわずか2万8000km(地球直径の2倍程度)

の高さをかすめて通過した。この小惑星とチェリャビンスク隕石は軌道が大きく異なるので、時間的接近は偶然の一致だろう。しかし、より広い意味で、隕石と小惑星の間には密接な関係がある。つまり、地球に落下する隕石の多くは小惑星の破片なのだ。

「はやぶさ」から「はやぶさ2」へ

小惑星探査機「はやぶさ」が地球に戻ったときのことを覚えているだろうか。2010年6月13日、大気圏に突入した機体は夜空に鮮やかな橙や青の光の尾を引いて燃え尽きたが、そこから切り離された耐熱カプセルがパラ

シュートを広げて南オーストラリア州の砂漠に舞い降り、無事に回収された。カプセルに格納された小惑星イトカワの表面の微粒子が、S型小惑星*1と普通コンドライトの関係を明らかにした。はやぶさはまさにイトカワから飛来した「人工隕石」だった。

さて、われわれは現在、宇宙航空研究開発機構(JAXA)のプロジェクトとして、はやぶさの後継機である小惑星探査機「はやぶさ2」を開発している(図1)。有機物や含水鉱物を含むC型小惑星の1つである1999 JU₃という地球接近小惑星を調べ、表面試料をもち帰ることが目標である。2014年に打ち上げ、

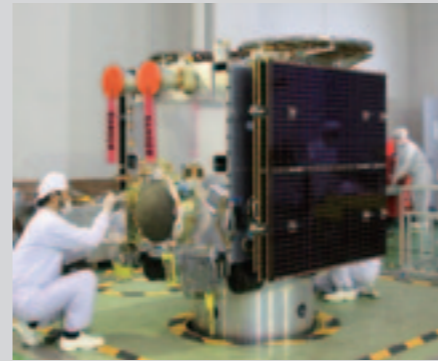


図1 試験のため組み立てられた「はやぶさ2」
右側面に折りたたまれている黒い板が太陽電池パネル、左側面の中央下の円形のもが試料を格納して地球に投下する再突入カプセル(写真提供:JAXA)。

2018年に現地に到着、2020年末に地球帰還を計画している(図2)。イトカワには水や有機物はほとんど存在しなかったが、「はやぶさ2」が行くC型小惑星は炭素質コンドライトとよばれる水や有機物を含む始原的隕石と関連があり、海や生命の起源を解き明かす鍵が得られるかも知れないと期待している。



図2 小惑星にランデブーする「はやぶさ2」の想像図
小惑星に接近し、小型衝突装置(母船の左下の円筒状の物体)を切り離した状態。この装置は、母船が小惑星の陰に退避した後に爆発し、質量2kgの銅板を半球殻状に加速成形させ、小惑星表面に打ち込み、人工のクレーターを形成する予定である。これにより地下から掘り起こされた新鮮な試料の獲得を目指している。母船には青色の太陽電池パネルや2つの円形の高利得アンテナ、イオンエンジンのスラスタなどが見えている(イラスト©池下章裕)。

火の鳥「はやぶさ」の光芒

火星と木星の軌道の間にある小惑星帯にはたくさんの小惑星があり、互いにつぶかっけてより小さな破片がつくられている。直径10kmに満たない小惑星は自らが出す熱放射で軌道が変化して、中には木星などの重力作用を受けやすい領域(共鳴領域)に移動し、軌道楕円の細長さ(軌道離心率)が増大した結果、地球に接近するようになる天体もある(図3)。これが地球接近小惑星で、中には地球や月などにつぶかるものもある。地球ができてしばらくは、今よりもずっと多くの小惑星が地球に衝突していたことは、月のクレーターの分布とアポロが持ち帰った月面試料の年代測定とを組み合わせた解析から明らかになっている。

こうした小惑星帯からの物質供給システムを理解することは地球の進化を考える上で重要だ。形成期には、地球表面は高温高压の状態で、有機物は分解されてしまう。表面温

度が十分に低下した段階になって、小惑星帯から飛来した隕石が水や有機物などの生命につながる物質をもたらしたはずだ。惑星形成期には、半減期の短い放射性核種(²⁶Alなど)の崩壊熱などで、小惑星においても、熱水と鉱物が関与した反応で、さまざまな有機物がつくられていた可能性がある。「はやぶさ2」が持ち帰る由来が明確で汚染のない試料の分析により、小惑星での生命材料の準備過程を解明したいと考えている。

手塚治虫の『火の鳥②未来編』において、赤茶けた大地をさまよう山之辺マサトが目にした夜空の光芒一火の鳥一が、長い長い生命史の新たな輪廻の出発点であった。「はやぶさ2」もまた、生命の起源を探るわれわれにとって、火の鳥としての使命を果たしてくれるだろう。

*1 S型小惑星
小惑星は表面反射スペクトルにより分類される。カンラン石や輝石の吸収がある明るい表面をもつS型小惑星、有機物や含水鉱物を含む暗い表面をもつC型小惑星などがある。

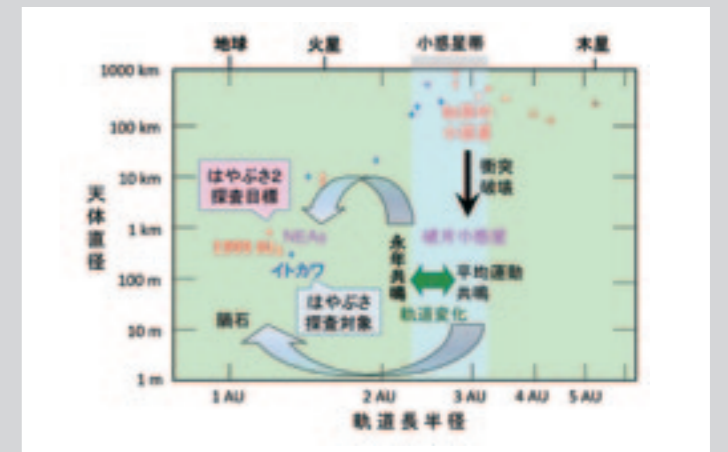


図3 小惑星帯からの物質供給過程
太陽からの平均距離(横軸)と天体直径(縦軸)の面上に各領域の最大小惑星を+で表示。色は小惑星のスペクトルによる分類(青:S型小惑星、赤:C型小惑星、茶:その他の型の小惑星)。小惑星帯の始原的小惑星が、衝突破壊による破片生成(黒の矢印)、破片小惑星の熱放射による軌道変化(緑の両矢印)と惑星摂動による急激な軌道変化(2つの水色の矢印)によって、1999 JU₃やイトカワなどの地球接近小惑星(NEAs)となり、一部が隕石として地球に衝突する。急激な軌道変化は、小惑星と木星の軌道周期の比が簡単な整数比となる領域で生ずる平均運動共鳴と、小惑星と土星の軌道楕円の軸の回転周期が一致することで生ずる永年共鳴とによって引き起こされる。

同窓生から

「一石投じ家」の存在意義

株式会社イブシ・マーケティング研究所代表取締役社長
野原佐和子 (Sawako Nohara)

私は1980年に名古屋大学理学部化学科個体研究室を卒業したが、現在は化学とは無縁の毎日を送っている。ITおよびインターネットビジネスに関する調査・戦略コンサルティングを提供する株式会社イブシ・マーケティング研究所社長をしながら、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特任教授、NECおよびNKSJホールディングス等の社外取締役を兼務、さらに、各府省庁の審議会委員も多数務め、政策提言も積極的に行っている。

社外取締役としても、政府の審議会委員としても、専門のIT分野に関するテーマだけでなく幅広い領域について議論をする機会が多いが、そういう場での私の役割は「一石投じ家」だと自任している。

会議は、各業界、専門領域を代表する人々がメンバーとなるため、議論が専門的かつ近視眼的になりやすい。そういうときに、命題の基本に立ち返り、より大局的な視点で、あるいは今日のかつグローバルな視点で、新たな（時にはちゃぶ台返しの）切り口をコメントするのが私の役割である。

IT化やグローバル化の進展に伴って、研究領域や事業領域の変化が日に日に激しくなっている。イノベーション創出には、複眼的なアプローチがますます必要とされている。慶應義塾大学にとどまらず、母校の次代を担う研究者たちに、こんな「一石投じ家」の問題意識と思考法を伝授し意見交換してみたい。



キャンパス通信

理系女子の夢を育む

生命理学専攻博士後期課程1年
小田春佳 (Haruka Oda)

あかりんご隊は、理系学部の中で少数派になりがちな女子学生の交流や支援を目的として2007年に設立された。互いに就職や進路についての悩みや不安を語り合ったり、さまざまな分野で活躍しているOGに話を聞く機会を設けたりするなどの活動を行っている。現在約20人が在籍している。

せっかく理系学生が集まっているのだからメンバー同士の交流だけでなく、理科の楽しさや魅力を伝えるイベントをやってみようと考え、子供向けの出張実験「科学の祭典」や「女子中高生理系進学推進セミナー」などを開催するようになった。昨年は、酸とアルカリの反応を利用した入浴剤づくりや、両眼視差を利用して3D立体絵を描くといった内容の出張実験を行うとともに、就職・進学といった進路を考えるセミナー「理系人の人生ガイド」や、理系女性のための「エンカレッジ交流会」などを開催した。

2012年の3月にはメンバーのうち3人が内閣府主催の「第1回女性の活躍促進プラン学生コンペティション」で決勝戦に進出し次点（2位）に選ばれた。こうした成果と過去5年間にわたる活動に対して、平成24年度名古屋大学総長顕彰を受賞することができた。

メンバーは意欲的で個性的な人ばかりであり、私も活動を通じてたくさん刺激を受けている。今後も、活躍する理系女性の輪を広げていきたいと考えている。

あかりんご隊ホームページ
<http://acalingo.jimdo.com/>



2012年10月6日・7日に名古屋市科学館で開催された「青少年のための科学の祭典」に参加した様子

書籍紹介

『ヒッグス粒子のを見つけ方
—質量の起源を追う』

生命理学専攻助教
瀧口金吾 (Kingo Takiguchi)

今最もホットな話題ヒッグス粒子について、その探索現場に関わる物理学者によるクールな一般向け解説書である。科学書にある、どこがエレガントなのかよくわからない方程式やかえってわかりにくい身近な例も一切出てこない。

まず導入部で質量についての説明をし、量子力学、一般相対論、そしてゲージ対称性といった現在の物理学を支える3つの原理によって今のところすべての現象が正確に予言できていることが紹介される。そしてゲージ対称性が成立するには、力を媒介する粒子の質量がゼロでなければならないことに読者を導く。しかし、弱い相互作用を媒介する粒子は質量ゼロどころかとても重たいことが大きな壁となる。この矛盾を解決するために物理学者たちは考えた。いや、それらの粒子の質量はやはりゼロで何か質量があるようにふるまわせているだけなのだ。まるでいたずらをした子どもが苦しまざれにつくウソのような話である。もちろん書中では、ヒッグス粒子が多くの研究成果の積み重ねの結果予想されていること、そして2つの章を割いて、見つけ出すための装置やその仕組み、どんな結果から見つかったといえるのかが説明されていく。

本当にわかりやすく書かれた解説書であり、著者らの苦心がうかがえる。本書が平易で面白すぎると感じた方にはぜひ名古屋大学理学部の物理で学ぶことをおすすめしたい。



『ヒッグス粒子のを見つけ方
—質量の起源を追う』
戸本 誠
花垣和則
山崎祐司 著
丸善出版 / 2012年12月発行
1900円（税別）

キャンパス通信

ピエール・カルティエ教授
講演会を開催

多元数理科学研究科長
菅野浩明 (Hiroaki Kanno)

20世紀に活躍したフランスの数学者集団である「ブルバキ」は、ヒルベルトの公理主義の理想の下、当時の数学を公理に基づき厳密に構築しようとした『数学原論』の出版で知られる。このブルバキのメンバーであるピエール・カルティエ教授を招いた講演会が、2013年6月12日、理学南館の坂田・平田ホールにおいて開催された。

最初に「The Great Mathematical Revolution of the 20th Century by Hilbert and Bourbaki: Where Are We Now?」（ヒルベルトとブルバキによる20世紀の偉大な数学革命—今、数学はどこに？）と題してカルティエ教授が講演を行った。続いて、青本和彦本学名誉教授が1968年に起きた「5月革命」時にパリに滞在した思い出を交え、「マーサーの定理と中山の補題」と題して当時の研究を紹介した。講演会は、ブルバキの中心的メンバーで京都賞を受賞したアンドレ・ヴェイユの自伝の翻訳を手がけた稲葉延子カリタス女子短期大学教授による「ヴェイユ家の物語」で締めくくられた。同教授はアンドレの妹の思想家シモーヌ・ヴェイユの研究者として、ヴェイユ家の人々との心暖まる交流を紹介した。講演でカルティエ教授も指摘したように、21世紀の現代、数学の研究も研究者人口の増大・国際化や計算機・インターネットの発達といった社会情勢から大きな影響を受けている。この講演会の講演は、いずれも数学の研究と社会の関わりについて考えさせるものであった。



ピエール・カルティエ教授