

サイエンス・プラザ

2013年ノーベル物理学賞 ヒッグス粒子に迫る！

日本科学未来館・科学コミュニケーター 福田 大展

「なぜ質量があるのか」。あって当たり前の問いと真剣に向き合った科学者がいる。2013年ノーベル物理学賞に輝いた、エディンバラ大学名誉教授のピーター・ヒッグス博士と、ブリュッセル自由大学名誉教授のフランソワ・アングレール博士だ（ロバート・ブラウト博士も研究に携わった一人だが、残念ながらすでに亡くなっている）。受賞理由は「素粒子の質量の起源に関するメカニズムの理論的発見」。長いがさらにこう続く。「そのメカニズムは、CERNのLHCを用いたATLAS実験とCMS実験により、予言された素粒子が発見されたことで確認された」。メカニズムの象徴的存在である「ヒッグス粒子」は、提唱から半世紀後によく見つけられた。異例の長さの受賞理由からも、理論と実験の両方でいかに重要な発見だったかがうかがえる。この発見はこれまでの物理学の集大成であるとともに、これからはじまる新しい物理学の幕開けでもある。

標準模型の最後のピースが埋まる！

身の回りのものは、何でできているのか——。その答えとして「標準模型」という考え方がある。標準模型では、この世の物質をつくる最小の粒である素粒子が、17種類あると考えられている（図1）。詳しく見ると、物質をつくる素粒子「フェルミ粒子」、力を伝える素粒子「ゲージ粒子」、質量を与える素粒子「ヒッグス粒子」に分けられる。そして、最後まで見つけられなかったのがヒッグス粒子。今回の発見で、標準模型のピースがすべて埋まった。



図1 標準模型における素粒子の種類

◆ も く じ ◆

サイエンス・プラザ	ポケットで育てる My クラゲ……………	12
2013年ノーベル物理学賞ヒッグス粒子に迫る！	トピックス	
……………	気体から固体への状態変化を何というか？…	14
細胞内輸送の交通整理のメカニズム……………	高校生へ私が選んだ1冊の本	
授業実践	重力とは何か……………	16
「モルグリコ」……………		9

4つの力と質量の起源

机の上に、消しゴムを置いてもらいたい。手を触れないで消しゴムを動かすことはできるだろうか。もしあなたが地球にいるのであれば、机を傾けると消しゴムは滑って床に落ちるだろう。「場の力」のひとつである「重力」によるものだ。触れていないのに力が伝わるというのは、いささか不気味だ。しかし実は、力を伝える粒子が存在しているのだ。

世の中には4つの「場の力」がある(図2)。馴染み深い「重力」と「電磁気力」、ミクロの世界だけにはたらく「強い力」と「弱い力」だ。強い力はクォークを結びつける力で、弱い力はフェルミ粒子を変える力のことだ。4つの力それぞれに、力を伝えるゲージ粒子がある。電磁気力は「光子」、弱い力は「Wボゾン」と「Zボゾン」、強い力は「グルーオン」といった具合に。

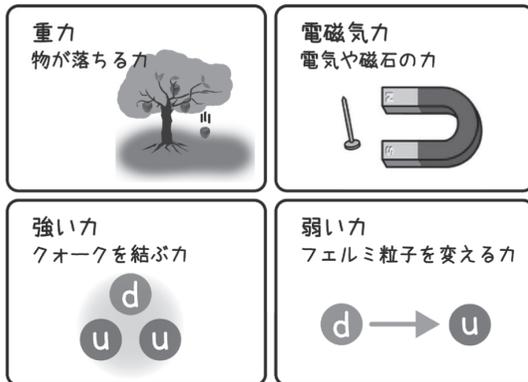


図2 4つの場の力

これらの力は宇宙ができたばかりのころ、同じものだったと考えられている。さまざまな理由があって、4つに分かれた。そして、今回ノーベル賞を受賞した研究は、電磁気力と弱い力が分かれた瞬間と深いつながりがあるのだ。電磁気力を伝える光子には質量がないが、弱い力を伝えるWボゾンとZボゾンには質量がある。しかし、標準模型によると、宇宙ができたばかりのころはどちらも質量がなかったとされる。宇宙ができて1兆分の1秒後、WボゾンとZボゾンが質量を持つようになり、電磁気力と弱い力が分かれたと考えられている(図3)。

「なぜWボゾンとZボゾンは質量を持ったのか？」その疑問に答えたのが、今回受賞した「素粒

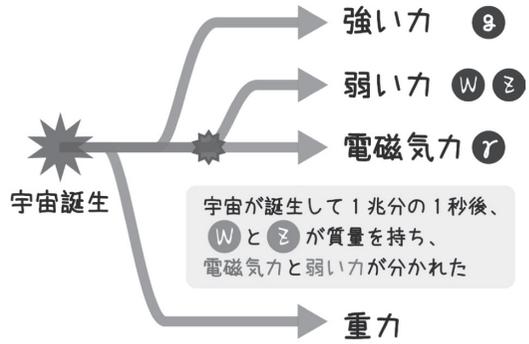


図3 4つの力の分かれ方

子に質量を与えるメカニズム」だ。そして、ヒッグス博士は1964年、もしこの考え方が正しいならば、質量を持つ素粒子があると予言した。その素粒子こそが「ヒッグス粒子」だ。半世紀ほどの時を越えてようやく発見されたことで、「素粒子に質量を与えるメカニズム」が正しいと証明されたのだ。

ヒントは超伝導にあり！

今年のノーベル物理学賞では、日本人の受賞者はいなかったが、実はある日本人と深いつながりがある。2008年に同賞を受賞した南部陽一郎博士だ。受賞テーマの「対称性の自発的破れ」が、先ほどの「なぜWボゾンとZボゾンは質量を持ったのか？」という問いと密接な関係があるのだ。

南部博士は1957年、金属などがある温度より冷えると電気抵抗がゼロになる「超伝導」の理論に興味を持った。超伝導状態では、磁場が超伝導体の中に入り込めなくなり、磁石のN極を近づけても、S極を近づけても反発する「マイスナー効果」が生じる。南部博士は磁場が入り込めなくなる理由をこう考えた。「超伝導体の中では、光子は質量を持つ！」

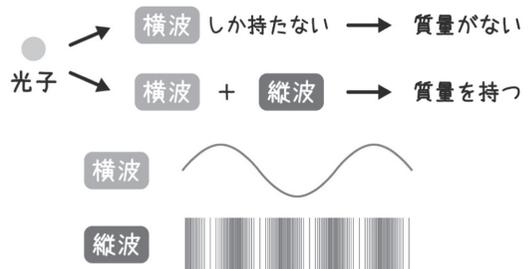


図4 縦波と横波

休み時間のにぎやかなときは…
(超伝導で温度が高いときは…)

卒業式の静かなときは…
(超伝導で温度が低くなると…)

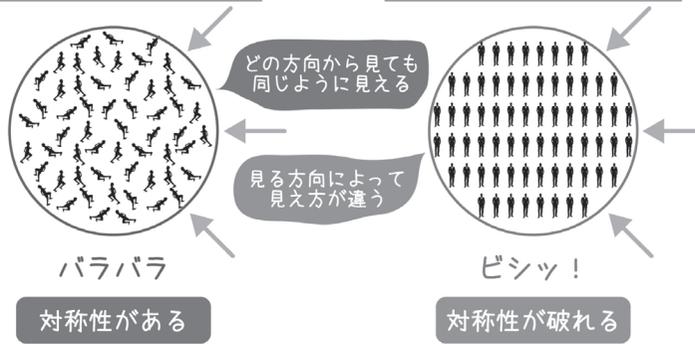


図5 対称性の自発的破れの考え方

電磁気力を伝える光子には質量がない。だから電磁気力は無限に遠くまで伝わる。しかし、光子が質量を持つと電磁気力が伝わる距離が短くなり、磁場が入り込めなくなると考えた。

それでは、光子はどのように質量を持つのだろうか。光子は波として通常、横波しか持たないので質量がない。横波だけでなく縦波も持つと、自由度が増えて、超伝導体の中の電子のペアと相互作用する。すると、光子がまっすぐに進めなくなり、動きにくくなることで質量を持ったように見える(図4)。そしてこの縦波が生じる理由と対称性の自発的破れとの間に、つながりがあるのだ。

対称性の自発的破れとは

対称性の自発的破れとは何だろうか。難しい概念だが、南部博士は「体育館にいる人の向き」を例えに説明するそうだ。ある小学校の体育館を想像してほしい。まず最初に休み時間。大勢の子もたちが鬼ごっこをして走り回っている。それぞれが思い思いの方に走っている、どの方向から見ても見え方に違いがない。この状態を「対称性がある」という(図5左)。

次に、卒業式を想像してみよう。全員が規則正しく同じ方向を向き、静まり返っている。先ほどの休み時間と違い、見る方向によって見え方が違う。この状態を「対称性が破れる」という(図5右)。

先ほどの超伝導体の中でも、同じようなことが起こっている。温度が高いときは、電子の位相がいろんな方向を向き、どの方向から見ても同じように見え

る。しかし、温度が下がって超伝導状態になると、電子の位相がそろい同じ方向を向く。全体で見た場合に向きがあり、見る方向によって見え方が違う。つまり「対称性が破れる」のだ。

光子が質量を持つ理由

もう一度体育館での卒業式の例えに戻ろう。みんなが静まり返り、同じ方向を向いている。そんなときに、自分だけ後ろを向いて激しい動きをすることはできるだろうか。よほどの強い心の持ち主でなければ、かなりの心のエネルギーがいるだろう。しかし、1mmたりとも体を動かさないのも難しい。少しは体を崩して微妙に動いてしまうだろう。

実は、超伝導体の中でも同じようなことが起こっている。電子の位相がそろって同じ方向を向いているが、かすかに向きが変わる。そのわずかな動きが全体に伝わり「さざ波」ができるのだ(図6)。

このさざ波こそが、光子に質量を与えた正体。光子が超伝導体の中に入ると、さざ波が光子の縦波と

わずかな動きで“さざ波”が生まれる!

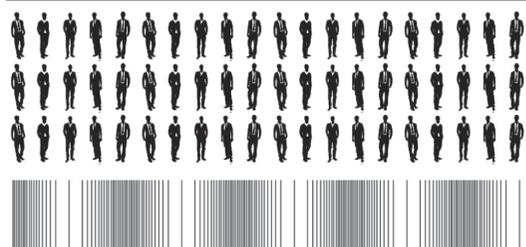


図6 対称性の自発的破れで生じるさざ波

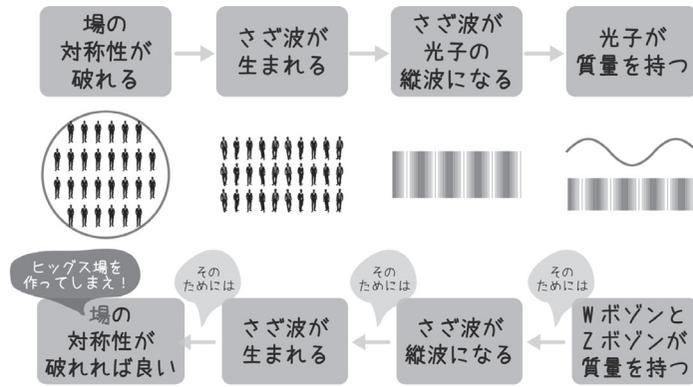


図7 素粒子が質量を持つ仕組み

なり、横波と縦波の両方を備えるため、質量を持つようになる (図7上)。

WボゾンとZボゾンが質量を持った理由

いよいよ核心に迫る。最初に挙げた「なぜWボゾンとZボゾンが質量を持ったのか」という問いに、超伝導体の中で光子が質量を持つ理論が深く関係している。前述の3人の博士は、WボゾンとZボゾンの質量を説明するために、光子が質量を持つプロセスの逆の流れを考えた。WボゾンとZボゾンに質量があるということは、縦波となるさざ波があるはずだ。つまり、なんらかの「場」の対称性が破れているはずだ (図7下)。そこで大胆な予想を立てた。場が必要ならば、作ってしまえ。「世界は『ヒッグス場』で満たされている！」

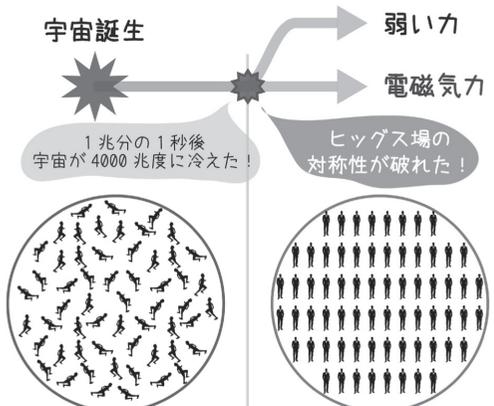


図8 ヒッグス場の対称性が破れた

最初の宇宙は高温で、ヒッグス場に対称性があつた。しかし、宇宙ができて1兆分の1秒後、宇宙の

温度が4000兆度まで低下 (まだまだ熱いようだが、宇宙規模ではこれでも冷えている)。ヒッグス場は同じ方向を向いて“凍りつき”対称性が破れたのではないかと考えた (図8)。

こんな考えは机上の空論で、証明する方法がないかのように思える。しかし、ヒッグス博士はこう予言した。「ヒッグス場があるならば、質量を持つ粒子が現れるはずだ」。それが象徴的存在となったヒッグス粒子だ。ヒッグス粒子が存在することを確認できれば、ヒッグス博士の理論が正しいことが証明される。そして、「素粒子はなぜ質量を持ったのか」という問いに迫るために、長く険しい道のりとなるヒッグス粒子の探索が始まった。

巨大加速器でのヒッグス粒子の探索

ヒッグス粒子を探しだす実験装置は、巨大だ。世界最大の衝突型円型加速器「LHC」は、リング状で1周の長さが27kmもある。円周34.5kmの山手線と比べたら、大きさが実感できるだろうか。このトンネルの中で、陽子を光速近くまで加速して回転させる。そして、逆回転している陽子と正面衝突。超高エネルギー状態を作り出す。

「 $E=mc^2$ 」という式を聞いたことがあるだろうか。Eはエネルギー、mは質量、cは光速。つまりこの式は「エネルギーと質量はお互いに変換できる」ことを意味する。なので、ヒッグス粒子の質量に見合ったエネルギーを衝突で生み出せば、ヒッグス粒子が飛び出てくるのである。

素粒子物理学の世界では、存在する確率が

99.9999% 以上でないと、新しい粒子を「発見」したとは言えない。実験グループが陽子を衝突させた回数は約 2000 兆回。そのうち 1000 個に満たないヒッグス粒子の候補を探し出し、ようやく発見にこぎつけた。

検出器のひとつ「ATLAS」を使った実験には、38 力国から 3000 人ほどの研究者が集結。日本の研究機関からも 100 人以上が参加している。また、古河電工や新日本製鉄、浜松ホトニクスなどの日本企業は、実験装置の開発に貢献している（図 9）。

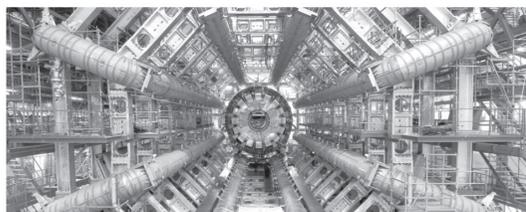


図 9 日本の技術が詰まった検出器 ATLAS (CERN 提供)

新しい物理学の幕開け

素粒子の世界の基本原理を表す標準模型が完成し、これで物理学の謎は解けてしまったのだろうか。欧州合同原子核研究機構 (CERN) のホイヤー機構長は、ヒッグス粒子の発見を伝える会見でこう語った。「It is a historic milestone but only the beginning. (今回の発見は歴史的快挙だが、始まりにすぎない)」

今回説明したメカニズムは、ゲージ粒子である W ボゾンと Z ボゾンに質量を与えるものだ。フェルミ粒子もヒッグス場の影響を受けて質量を得たと考えられているが、詳しくは分かっていない。さらに、それぞれの粒子の質量は実験で分かっているが、なぜその値になるのかは説明できない。実は、標準模型を拡張する理論のひとつである「超対称性理論」では、ヒッグス粒子は複数あると考えられている。フェルミ粒子には、

別のヒッグス場が質量を与えた可能性もあるのだ。

さらにもうひとつ、ヒッグス粒子には驚くべき特徴がある。ヒッグス粒子以外の素粒子は、アイススケートの選手のようにクルクル回る「スピン」という運動をしている。しかし、ヒッグス粒子は回っていない。初めてスピンのゼロの粒子が見つかったのだ。

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (カブリ IPMU) の村山斉機構長はこう語る。「今回の発見は新しい世界への窓口。スピンのゼロの粒はたくさんあって、最初に見つかったのがヒッグス粒子かもしれない。調べると仲間が見えてくる可能性がある。その中に暗黒物質があるかもしれない」。

学校の授業では「すべてのものは原子でできている」と習う。しかし、実際には宇宙にある原子をすべて集めても、全体のたった 5%。宇宙の大部分は、未だによく分からない暗黒物質と暗黒エネルギーが占めている。これらの正体が、ヒッグス粒子の仲間なのかもしれないのだ。宇宙にはまだまだ謎がある。標準模型の最後のピースは埋まったかもしれない。しかし、それは先に続く新たな理論のひとつのピースにすぎない (図 10)。宇宙をさらに深く知るための、新しい物理学の幕開けなのだ。



図 10 標準模型はひとつのピース (ノーベル財団提供)

ヒッグス粒子でダイエットできるの？

ノーベル賞の発表の前後、ツイッターでこのようなつぶやきを多く見かけた。「ヒッグス場の影響をなくせば、ダイエットができるのでは」。もし可能なら、多くの人の悩みを解決できそうだ。しかし、そんなことをしたら 10 倍、いや 100 倍返して不幸が返ってくる。私たちの体をつくる原子は、原子核の周りを電子が回っているものだ。もしヒッグス場がなかったら、電子の質量がゼロになり、光の速さでどこか遠くにすっ飛んでいってしまう。10 億分の 1 秒という一瞬で、体がバラバラになってしまうのだ！ どうやら運動と食事を大切に、地道にダイエットに励むほうが良さそうだ。