

2013年ノーベル物理学賞 —ヒッグス粒子と CERN/LHC 実験—

金谷 奈央子

Kanaya Naoko

2013年度のノーベル物理学賞はフランソワ・アンブレール（ベルギー・ブリュッセル自由大学）とピーター・ヒッグス（英エディンバラ大学）の両氏に授与された。受賞理由は“素粒子の質量の起源に関する機構の理論的発見”である。この受賞を後押ししたのは、欧州原子核研究機構（CERN）で行われている2つの実験グループ、ATLAS（A Trodial LHC Apparatus）実験とCMS（Compact Muon Solenoid）実験における新粒子発見であると言っても過言ではない。本稿では質量獲得の機構とそのインパクト、実験・理論双方における日本人の貢献について紹介したい。

素粒子の相互作用を記述する標準理論では、素粒子（電子などの“物質粒子”と光子などの“力を伝える粒子”）は本来、質量ゼロを持つと予言しているのに対し、実験はこれを否定しており、当時の多くの物理学者が頭を悩ませていた。この難問を解決する仕組みがヒッグス機構である。この理論は1964年、ロバート・ブラウト氏（故人）を含めた3人の理論物理学者によりほぼ同時に提案されたので、ブラウト=アンブレール=ヒッグス機構とも言われる。

標準理論におけるヒッグス機構は我々の真空に対する考えをがらりと変える。真空は文字通りの“真のカラ”ではなく、真空にはヒッグス場が存在しており、水が氷になるのと同様に相転移によりその性質を変えることができるというものだ。真空の状態が変わってしまったため質量を持ってしまった、つまり質量は素粒子固

有の性質ではなく後天的に付加されたものである、というのがヒッグス機構の考えである。この機構は2008年にノーベル物理学賞を受賞された南部陽一郎博士が発見した“自発的対称の破れ”という普遍的な原理を出発点にしている。また、南部博士はピーター・ヒッグス博士の論文の査読に関わり、アンブレール博士とブラウト博士の論文にはない“新粒子（ヒッグス粒子）の存在”を示唆する加筆を提案したとも言われている。

宇宙の時間軸で考えると、ビッグバン直後には素粒子は質量ゼロであったが、およそ 10^{-12} 秒後、宇宙が膨張し冷却するとともにヒッグス場が凝縮し素粒子が質量を獲得、これをきっかけに138億年後の現在、我々が知る多彩な宇宙を形成するに至った。もしヒッグス場が存在しなければ、電子やクォークなどの素粒子は質量を持たない。もし電子の質量がゼロ若しくは511 keVより小さければ原子のサイズは今よりずっと大きく、また陽子が中性子より重たくなることにより陽子は不安定で、原子を形成することすらできなかったであろう。

ヒッグス機構ではヒッグス粒子という粒子の存在が予言されており、この粒子を発見することでヒッグス機構の正しさを証明できる。“ヒッグス粒子”らしき新粒子の発見は、2012年7月4日にATLAS実験とCMS実験グループによって報告された。両実験はLHC加速器における高エネルギー衝突反応を調べることで宇宙と物質の根源に迫ることを主目的としている大

規模な国際共同実験で、共同研究者の数は合わせておよそ 6,000 人である。

LHC 加速器とは地下 100 m のトンネル内に建設された円周 26.7 km の陽子-陽子衝突型円型加速器であり、超伝導磁石を駆使した世界最大の加速器である。2011~2012 年の最高重心系エネルギーは 8 TeV。光速の 99.999997% で動いている陽子の軌道を曲げるために、長さ 15 m、約 8 テスラの強力な超伝導偏向磁石 1,232 本が LHC 加速器トンネル内に敷き詰められている。LHC 加速器は国際協力で建設されたが、ヘリウム冷凍システム ((株)IHI)、ビーム収束用超伝導磁石 ((株)東芝)、超伝導磁石のケーブル (古川電気工業(株)) など、日本の貢献は非常に大きく、LHC のプロジェクトマネージャーは「日本の技術なくして LHC はできなかった」と述べている。

高エネルギー衝突反応から生じた膨大な数の粒子を捉え、その同定と運動量測定を行うためには複雑で巨大な検出器が必要となる。東京大学、高エネルギー加速器研究機構をはじめ、日本の 17 機関から約 120 人の日本人研究者が ATLAS 実験に参加し、検出器の開発から物理解析まで第一線で活躍している。検出器開発でも日本企業の貢献は大きい。浜松ホトニクス(株)製の光センサーは日本が参加していない ATLAS 実験以外にも用いられていることから、日本の技術力の高さが伺える。「技術力もさることながら、無理難題にも応じようとする、そのプロ意識がすごい」と CMS 実験の 1 人から話を聞いたこともあった。

ヒッグス粒子の質量は標準理論では予言されており、実験で決定しなければならない物理量である。“素粒子の質量”とは“ヒッグス粒子との結合”であり、LHC 実験でヒッグス粒子がどのように生成・崩壊するか予想できる。ヒッグス粒子は LHC で生成されてもすぐに崩壊するため(寿命 10^{-22} 秒)、崩壊で生じた粒子の測定からヒッグス粒子を同定する。ヒッグス粒子が光子対に崩壊した場合(光子の質量は

ゼロであるが、量子効果を通して光子対への崩壊が生じる)、2つの光子の運動量から計算された不変質量の頻度分布はヒッグス粒子の質量付近にピークを持つ。陽子-陽子衝突から光子対を生じるバックグラウンドはヒッグス粒子生成率の約 1,000 倍にも及ぶが、不変質量分布には何の構造も持たない。よって、なだらかで膨大なバックグラウンド分布の上にヒッグス粒子のこぼを見付ける。2つの独立した実験が同じ質量スケールに新粒子を発見、また生成事象数がほぼ標準理論の予言どおりだったことから“ヒッグス粒子らしき”新粒子発見の信頼度を高めた。

発見された新粒子がヒッグス粒子であると同定するためにはその粒子の量子数(スピンやパリティ)やほかの素粒子との結合定数などを測定する必要がある。発見の報告から更にデータを蓄積し、発見された新粒子が標準理論で予言されるパリティが偶でスピンの 0 である粒子であると確定し、またその質量を 0.2% の精度で決定した (125.6 ± 0.3 GeV)。

標準理論では 17 種類の素粒子が予言されており、ヒッグス粒子が唯一未発見の粒子であった。今回の発見により標準理論が完成したと言えることから、そのインパクトは大きい、より重要なポイントは“ヒッグス場の謎の幕開け”という点にある。確かにヒッグス機構は素粒子に質量を与えたが、物質粒子に対する結合定数は予言されておらず、またヒッグス粒子自身の質量が不安定性という問題もあり、質量発生のメカニズム自体は謎のままである。ヒッグス粒子は、1988 年ノーベル物理学賞受賞者レオン・レーダーマン博士らの著書にちなんで“God particle”(神の粒子)と紹介されることがあるが、全ての不都合をヒッグス場に押し付けたと考えれば、著者が最初に付けた呼称(しかし編集者の意向で却下された)、“Goddamn Particle”(クソ忌々しい粒子)の方がしっくりくる。ヒッグスの謎とともに標準理論にはまだ問題があり、宇宙の根源を説明できる究極の理

論であるとは考えにくい。これを解明するのが LHC 実験の次なる目標である。

LHC 加速器は重心エネルギーを設計値の 14 TeV に上げるため、2013~2014 年はその稼働を休止している。実験再開の予定は 2015 年春である。標準理論の問題点を解決できる超対称性理論や余剰次元理論が正しければ、テラスケール質量の新粒子が LHC 実験で発見される可

能性があり、これは宇宙観測における長年の未解決問題“暗黒物質”の解決につながるかもしれない。あるいは全く予想していなかった新しい物理現象や新粒子が観測されるかもしれない。LHC 実験の更なる結果に是非注目していただきたい。

(東京大学 素粒子物理国際研究センター)

5 版 やさしい放射線とアイソトープ

編集・発行 公益社団法人日本アイソトープ協会【2014 年 1 月発行】

A5 判・135 頁 定価 1,400 円+税 会員割引価格 1,200 円+税



これから放射線や放射性同位元素の取扱いを始める人、消防署、警察署、自治体で放射線と関わりのある人、学校の先生、その他放射線について勉強したい一般の人を対象とした 28 年前からのロングセラー入門書。イラストや内容を全面的に見直し、より最新の情報をやさしく解説しました。この 1 冊で放射線の基礎、利用、人体への影響、安全管理まで幅広く理解できます。“講義で使える素材集 (CD-ROM)” 付きで、放射線教育を行う立場の先生方にも最適な 1 冊。

【2 色刷・カラー口絵付き】



公益社団法人

日本アイソトープ協会

Japan Radioisotope Association

〒113-8941 東京都文京区本駒込 2-28-45

TEL (03) 5395-8082 FAX (03) 5395-8053

◆ご注文はインターネットまたは FAX にてお願いいたします。

JRIA BOOK SHOP : <http://www.bookpark.ne.jp/jria>

BookPark サービス : FAX (03) 6674-2252

◆書店でご注文の際は「発売所 丸善出版」とお申し付け下さい。