

ヒッグス粒子「発見」の意味と、本当の発見に向けて



兼村 晋哉

富山大学大学院理工学研究部（理学）

2012年7月にCERN（欧州原子核研究機構）のLHC実験で発見された新粒子は、その後の解析でヒッグス粒子と断定された。ヒッグス粒子は素粒子の世界を記述する「標準理論」と呼ばれる理論の中で、電弱対称性の自発的破れを引き起こし、素粒子に質量を与える特別な粒子として予言されていた。長らく未発見だったが、LHC実験によってついに標準理論最後のミッシングピースが埋められたのである。

標準理論は素粒子の相互作用を記述するゲージ理論の美しい構造とゲージ対称性の自発的破れの2本の柱からなる。ヒッグス発見以前の標準理論の検証は主に第一の柱に関するものであった。今回の発見により第二の柱が確かに「ある」ことが確認され、この意味で標準理論は確立した。2013年、この粒子の存在を予言したアングレール氏とヒッグス氏にノーベル物理学賞が授与された。

しかしながらヒッグス粒子発見の意義は単に標準理論の第二の柱を確認したにとどまらない。その真の意義は標準理論を超えた新しい物理理論に迫るための確固たる足がかりが得られたという点にある。

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、電磁力、弱い力、強い力を記述する理論であり、電磁力と弱い力の統一的記述には成功したが、強い力との大統一には至っていない。統一という物理学の歴史の流れの中で見れば、標準理論は明らかに暫定的な理論である。また、標準理論の建設以来現在までの数十年の間に、宇宙の物質・反物質の非対称性、ニュートリノ振動、暗黒物質や暗黒エネルギーの存在など、標準理論では説明不可能な現象が知

られてきた。標準理論に代わってこれらの現象を説明できる新理論が必要である。

標準理論を超えた新物理学の探究においてヒッグスセクターの構造は鍵である。標準理論ではアイソスピン2重項スカラール場が1種類導入されるが、ヒッグス場の個数を決める原理は無いため、これは仮定にすぎず、第2、第3のヒッグス場が存在する可能性は排除されない。むしろこれまで提案された新物理理論には特徴のある拡張されたヒッグスセクターを導入するものが多く、将来実験でヒッグス粒子の個数や性質を明らかにすることは極めて重要である。

また、ヒッグス・スカラール場は階層性問題と呼ばれるファインチューニングの問題を引き起こすことが知られている。この問題を解決するために、超対称性や、ヒッグス場が複合場である可能性、ヒッグス場が余剰次元のゲージ場の成分である可能性等、数々のアイデアが提案された。これらの新パラダイムのそれぞれは、ヒッグスの本質が何かという問いの異なる答えに対応する。

このように、ヒッグスセクターの形とヒッグス粒子の本質を明らかにすることが、新しい物理学を探究するために重要なのである。

本稿のタイトルにある「本当の発見」とは、発見されたヒッグス粒子の詳細研究によってヒッグスセクターの真の構造やヒッグス粒子の本質、背後の物理が明らかになることであり、それによって新しい素粒子物理学のパラダイムが決定されることを意味している。2012年のヒッグス粒子発見は、まさにそのための橋頭堡を我々に提供してくれた。全てはここから始まるのである。

—Keywords—

LHC:

Large Hadron Colliderの頭字語。主に陽子と陽子を衝突させる円形加速器。素粒子標準理論において唯一未発見であったヒッグス粒子を発見した。重心系でのエネルギーは当初7 TeV、後に8 TeVであった。2015年度より13あるいは14 TeVのエネルギーで衝突実験を再開する。

標準理論:

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ に基づく相対論的ゲージ場の量子論で記述される理論。この $SU(2)$ をアイソスピンと呼ぶこともある。基本粒子としてスピン1/2のクォーク6種と荷電レプトン3種とニュートリノ3種およびスピン0のヒッグス粒子($SU(2)$ 2重項)を含む。18のパラメータで加速器実験の全てのデータを説明する。しかし、種々の問題を抱えていて、何らかの意味で整備拡張は必要と考えられている。

ヒッグス粒子:

ゲージ対称性の破れを司る粒子。自身の真空期待値が破れの秩序変数であり、また破れた対称性に対応するゲージ粒子に質量を与える役割をする。超伝導でいうクーパーペアであるが、標準理論においてはスピン0の素粒子。具体的には $SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)$ という破れを引き起こす $SU(2)$ 2重項。さらにクォークと荷電レプトンにも質量を与える。

ヒッグスセクター:

ヒッグス粒子間の相互作用を記述するラグランジアン(ハミルトニアン)の部分。標準理論では二つパラメータを含み、一つは弱い相互作用の強さから決まり、一つはヒッグスボソンの質量から決まる。

本記事の長さは通常の解説記事の規程を超過しておりますが、編集委員会の判断によりこのまま掲載しています。