

特集：Higgs 粒子発見の意義

ヒッグス粒子は素粒子の標準模型において唯一最後まで未発見となっていた粒子である。その上、すべての物質の質量の起源を与える粒子でもある。人類が長い間追い求めてきたこのヒッグス粒子を、2012年にCERNのLHC加速器での実験グループがついに発見した。この結果、ヒッグス機構の提唱者であるヒッグス氏とアングレール氏とが2013年度のノーベル物理学賞を受賞した。この歴史的発見に当たって、LHC加速器という実験装置の観点と、理論的理解へのインパクトの観点の両面からそれぞれ、ヒッグス粒子発見の意義を解説したのが本特集の論文である。

CERNのLHC加速器は計画から約30年を経て完成した。ヒッグス粒子の発見以後、エネルギーを上げる改良を施すために約2年間は運転停止の時期に現在入っている。本特集のEvans氏の論文では、このLHC加速器建設に関わってきた著者によって、図に示したLHC加速器建設の計画段階から設計上の工夫が詳しく語られ、さらに実際の加速器の仕様や建設と運転の歴史が解説されている。特に運用開始後間もなくの時期に、思いがけない事故によってLHCは約1年2か月間停止を余儀なくされた。こうした問題をいかにして克服し、運転再開以後の順調な運用をいかに確保したかも述べられている。高エネルギー実験物理学者以外の広い分野の人々にとっても、こうした歴史的規模の実験施設がどのようにして完成し、運用されているのかを知ることができる興味深い論文である。

理論面でも、唯一未発見であった粒子の存在が確認され標準模型が最終的な確立に至ったという意味で、ヒッグス粒子の発見は非常に重要な成果である。しかしながら、現時点では発見された粒子が標準模型の予言するヒッグス粒子なのか、あるいは標準模型を超える何らかの理論が予言した粒子なのかははっきりしない。殆どの標準模型を超える理論は、比較的低エネルギーでは実質的に標準模型の様に振る舞うからである。

そもそも、標準模型を超える理論の多くは、標準模型が抱えるヒッグス粒子にまつわるいくつかの基本的かつ重要な問題、特に「階層性問題」と呼ばれているヒッグス質量に関する問題を解決すべく提唱されたものであるが、これらの問題が最終的にどのような形で解決されるのか、更にはヒッグス粒子自身の起源についても未だに確固とした理解は得られていない。そうした意味では、ヒッグスの物理は今やっと出発点に立ったと見なすべきかも知れない。

本特集の林氏の論文では、こうした観点から、標準模型を超える理論の候補として1998年頃から盛んに研究されている高次元理論の立場からヒッグスの物理を論じている。まず、いくつかの代表的な高次元理論および密接に関連する4次元時空上の理論について概観しているが、これらはいずれも階層性問題の解決を目指したものである。

それらの中で、論文では特にヒッグスの起源に関し、①ゲージボソン②南部・ゴールドストーンボソン、という二つの可能性に焦点を当てて議論している。これらのシナリオはそれぞれ、ゲージ・ヒッグス統一理論、リトル・ヒッグス理論と呼ばれる。前者は

高次元の理論であるのに対し後者は4次元時空上で定式化出来る理論であり一見全く独立なシナリオに見えるが、実はこれらは互いに密接に関係している。こうしたシナリオでは、ヒッグス粒子は単なるスピンのゼロの素粒子ではなくそれぞれ特徴的な起源を持つ。その結果、標準模型の場合とは質的に異なる性質を预言する。

例えばゲージ・ヒッグス統一理論ではヒッグス粒子を表す場は、ゲージ場の余剰次元方向(周期的と仮定している)の成分なので、諸々の物理量がヒッグス場に関して周期的になる、という標準模型にはない顕著な特徴が生じる。実は、この周期性はリトル・ヒッグス理論にも共通する性質である。この為に、例えばクォークやレプトンとヒッグス粒子との相互作用の強さを表す湯川結合定数が標準模型の预言値からずれるといったヒッグスの“異常相互作用”が预言される。標準模型を超対称にした最小超対称標準模型においても、ヒッグス場の自由度が標準模型の場合の2倍に拡張されるために、やはり標準模型の预言値からのずれが一般に生じるが、こちらの“異常性”はクォーク質量に依存しない普遍的なもので、上述の高次元理論が预言するクォーク質量(世代)に依存する異常性とは性質が異なっている。

ヒッグス粒子探索では、2光子への崩壊過程が重要な役割を果たす。これについても標準模型には存在しない新粒子の寄与によって、ゲージ・ヒッグス統一理論では特徴的な预言が得られることも議論されている。

ヒッグス粒子の存在が確立したので、今後の研究の力点は湯川結合といったヒッグス相互作用の検証に移ることになる。特に、計画されている線形加速器ILCでの実験においては、その精密テストが可能になると期待される。その観点からも、上述の様な標準模型の预言と異なる特徴的な预言をする理論が存在するという事実は、標準模型を超える理論の方向性を決定し、ひいてはヒッグス粒子の起源に迫るという観点から大変重要な意味を持つものと思われる。

原論文

The Higgs particle and higher-dimensional theories, C. S. Lim, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 02A101 (2014). Doi:10.1093/ptep/ptt083

The Large Hadron Collider, a personal recollection, L. Evans, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 02A102 (2014). Doi:10.1093/ptep/ptt117

問い合わせ先 :

林青司(東京女子大学 現代教養学部 教授)

電話 : 03-5382-6405, 電子メール : lim@lab.twcu.ac.jp

<http://lab.twcu.ac.jp/lim/>

Lyndon Evans(セルン及びインペリアル・カレッジ 教授)

電子メール : Lyn.Evans@cern.ch

图：LHC 加速器

