

# 論文内容の要旨

論文題目： Observation of Higgs Boson with  
Di-photon Events in Proton-Proton Collisions  
(陽子・陽子衝突を用いたヒッグス粒子の二光子事  
象の観測)

氏名： 山口洋平

標準理論は素粒子と、素粒子間の相互作用を記述する理論である。これまで標準理論は 100 GeV 以下のエネルギー領域において、あらゆる実験結果をよく記述している。標準理論では、弱い力を媒介する  $W$ ,  $Z$  ボソンと物質を形成するフェルミオンの質量は、Brout-Englert-Higgs 機構によって与えられる。この機構は単純にヒッグス機構とも呼ばれ、 $SU(2) \times U(1)$  対称性が成り立っている系に、スカラー場であるヒッグス場を導入する。このヒッグス場のポテンシャルが変化し、場が 0 でない真空期待値を持つことで、対称性が  $U(1)$  に自発的に破れる。失われた対称性は  $W$ ,  $Z$  ボソンの質量に変化し、フェルミオンの質量も同じヒッグス場から生成される。したがってヒッグス場は質量の起源とみなされ、標準理論において極めて重要な役割を果たす。ヒッグス場の揺らぎから生じるヒッグス粒子はヒッグス場の存在を立証するものであり、標準理論の検証のために 50 年に渡って探索されてきた。しかし LEP や Tevatron における探索の結果にもヒッグス粒子の兆候は観測されず、標準理論の最後の未発見粒子となっていた。

Large Hadron Collider (LHC) は欧州原子核研究機構 (CERN) に建設された直径 26.7 km の陽子・陽子衝突型円型加速器であり、2011 年には衝突エネルギー 7 TeV, 2012 年には 8 TeV と、世界最高エネルギーでの衝突実験を行っている。本論文では LHC の A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS) 実験における、ヒッグス粒子が二光子に崩壊する事象を用いたヒッグス粒子の探索と、その性質測定について記述する。測定される性質は質量、結合、自然幅である。

ヒッグスの質量は標準理論のインプットパラメータであり、予言不可能であるため、実験からその値を決定する必要がある。ヒッグスの質量によって、標準理論を越えた新物理に対して制限を与えることができ、またヒッグスポテンシャルのパラメータが決定される。ポテンシャルが決定することで、対称性の破れのダイナミクスや真空の安定性が議論可能となる。一方結合については新物理が存在した場合、一般にその影響はループに顕著に表れる。ヒッグス粒子は質量を持たない粒子とは直接は結合しないため、二グルーオン

や二光子とのループを介した結合にその効果が見えやすい。本論文で扱う二光子への崩壊事象解析では、ヒッグス粒子の生成と崩壊過程の両方にループの効果が表れるので、その意味で新物理に感度が高い。二グルーオンからヒッグスを生成する過程に対しては他の崩壊事象からも観測が行えるが、二光子への崩壊事象を扱うことで、色荷を持たない新粒子にも感度を持たせられる。このように二光子への崩壊事象はヒッグス粒子の研究に非常に強力な利点を持つ。

二光子への崩壊事象を用いたヒッグス粒子探索では、二光子が終状態に存在する事象を探し、それらで不変質量を組む。この質量分布において、高質量側に緩やかに下降する背景事象に対し、信号事象はヒッグス質量に鋭いピークを形成する。主な背景事象は二光子事象、光子とジェットが生成し、ジェットが光子に誤って同定される事象、ジェット二つが誤って光子と同定される事象の三種類で、断面積は  $1 : 10^4 : 10^7$  程度異なっている。ピークの発見感度を高めるために検出器には光子に対する検出効率、エネルギー分解能、そして光子とジェットの分離能がそれぞれ高水準で求められる。そのため本論文では  $Z \rightarrow ll\gamma$  事象を用いた光子に対する検出器性能の評価、光子とジェットの分離手法の開発、信号事象の検出効率の系統誤差の改善を述べる。

本論文では ATLAS 検出器が取得した 2011 年、2012 年の衝突データを使用した。対応する積分ルミノシティは衝突エネルギー 7 TeV に対して  $4.8 \text{ fb}^{-1}$ 、8 TeV に対して  $20.3 \text{ fb}^{-1}$  である。そしてこの解析によって、 $7.4\sigma$  の有意性で二光子への崩壊事象単独でのヒッグス粒子発見に成功した。さらにヒッグス粒子の性質として、ヒッグス質量  $m_H$ 、signal strength  $\mu$  および全崩壊幅  $w$  を測定した。ここで signal strength はヒッグス粒子の断面積と二光子への崩壊分岐比で積を取り、標準理論の予言値で規格化した量である。自然幅については分解能より有意に広い幅が得られなかったため、95 %信頼度で上限値を評価した。また signal strength を様々な生成過程に対して独立に測定を行い、それぞれ一貫性の高い結果を得た。以下が測定結果となる。

$$m_H = 126.8 \pm 0.2 \text{ (stat.)} \pm 0.7 \text{ (syst.) GeV}$$

$$\mu = 1.65 \pm 0.24 \text{ (stat.)} \begin{matrix} +0.25 \\ -0.18 \end{matrix} \text{ (syst.)}$$

$$w < 1.8 \text{ GeV (observed)}$$

$$w < 5.8 \text{ GeV (expected)}$$

標準理論では、質量測定からヒッグスポテンシャル  $V(\phi)$  が決定される。

$$\begin{aligned} V(\phi) &= \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 \\ &\simeq -(90 \text{ GeV})^2 \phi^\dagger \phi + 0.133 (\phi^\dagger \phi)^2 \end{aligned}$$

この結果から四点自己結合  $\lambda$  に対して繰り込み群方程式を計算すると、 $\lambda$  はプランクスケールで負になる。したがって真空はこのスケールで無限の負に落ちる可能性があり、安定ではない。しかしそれにはトンネル効果が必要であり、その確率は十分低いと質量測定結果から評価された。したがって真空は準安定といえ、標準理論のプランクスケールまでの破綻は、真空の安定性からは確認されなかった。

Signal strength は  $2.3\sigma$  で標準理論と一致しているが、最尤値は 1 より大きい。もし標準理論からのずれが存在する場合、ヒッグス生成過程によらず一定の signal strength が得られていることから、崩壊過程のループにおける新粒子の影響が示唆される。すなわち電荷を持ち、色荷を持たない新粒子が候補となる。荷電スカラー、重い荷電フェルミオン、重い荷電ゲージボソンなど、様々なモデルが提案されている。今後は複数のヒッグス崩壊

過程を組み合わせた解析と、統計を増やして個々の崩壊過程の解析精度を向上させることで、これらのモデルの検証を進める。

標準理論最後の粒子であるヒッグス粒子を発見したことで、ヒッグス粒子を用いた素粒子物理学が始まった。ヒッグス粒子の性質研究は、標準理論を越えた物理を探っていく上で極めて重要である。