

三重項ヒッグス粒子を導入する模型

兼村 晋哉 〈富山大学〉

柳生 慶 〈国立中央大学〉

2012年7月欧州原子核研究機構(CERN)のLHC実験で約126 GeVの質量を持つ新粒子が発見されたという報告が、ATLASとCMSの両実験グループによってなされた。¹⁾その後現在までのより詳細な解析によると、新粒子のスピンは0でかつCP量子数は偶である可能性が高いことが明らかになっている。さらに新粒子は、様々な素粒子と結合していることから素粒子の質量起源を担うとされるヒッグス粒子であることが分かる。しかも126 GeVという質量は、10年ほど前に行われたLEP実験での結果とも矛盾しないことから素粒子標準模型(SM)の予言するヒッグス粒子であることを示唆する。ともかくも、SMに登場する全ての素粒子が発見され、その意味においてSMは確立された。

ではこの結果はSMが究極的に正しい理論であることを意味するのであろうか？答えは否である。なぜなら、SMでは説明することができない様々な現象が既に知られているからである。例えば、これまでの宇宙線観測の実験でニュートリノ振動が発見され、ニュートリノは微小質量を持つことが明らかになった。しかしながらSMのニュートリノは質量を持たず、ニュートリノ振動を説明できない。また、WMAP等での宇宙マイクロ波背景放射の観測により、宇宙のエネルギー密度の95%以上は暗黒物質や暗黒エネルギーで占められていることが分かった。しかしながらSMには暗黒物質の候補となる粒子は存在せず、暗黒エネルギーの本質は全く分かっていない。さらに、星や我々を形成しているのは物質であり、現在の宇宙に反物質はほとんどない。この物質と反物質の非対称性を説明するには、初期宇宙でバリオン数が生成される必要があるが、SMの枠内では、その起源を説明することができない。

上記の諸現象を説明するために、SMを超える様々な新物理模型が考えられてきた。それらの模型では、SMで単に仮定されているアイソスピン2重項場1個からなる最小ヒッグスセクターから拡張された構造がしばしば導入される。付加的な1重項、2重項または3重項スカラー場が導入される拡張ヒッグスセクターでも、発見されたヒッグス粒子をSMと同程度に説明することができるので、これらの可能性は全く排除されない。したがって、ヒッグスセクターの構造を決定することが、新物理模型の方向性を決定する上で極めて重要な鍵となる。

一般に拡張ヒッグスセクターを加速器実験で検証する方法として、直接的検証法と間接的検証法がある。前者は、荷電ヒッグスボソンなどの付加的なヒッグスボソンを直接発見する方法である。後者は、昨年発見されたヒッグス粒子の様々な結合定数を精密に測定する方法である。結合定数の精密測定は将来の高輝度LHC実験や国際線形加速器(ILC)実験で行われると期待されている。特に、ILC実験ではパーセントレベルの精度で測定される。したがって、様々なヒッグス結合定数のSMの予言からの微妙なずれと将来の精密測定のデータとを“指紋照合”することにより、模型を間接的に検証することができる。

本稿では、興味深い拡張ヒッグスセクターの例であるアイソスピン3重項場が導入される模型を議論する。この模型を考える意義は、ニュートリノ微小質量の起源を単純に説明できることにある。最初に模型の概要について紹介し、加速器実験での直接的検証法及び間接的検証法について説明する。

—Keywords—

素粒子標準模型：

SU(3)×SU(2)×U(1)に基づく相対論的ゲージ場の量子論で記述される模型。基本粒子としてスピン1/2のクォーク6種(u, d, c, s, t, b)と荷電レプトン3種(e, μ, τ)とニュートリノ3種(ν_e, ν_μ, ν_τ)及びスピン0のヒッグス粒子(SU(2)2重項一つ)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優れものだが、種々の問題を抱えていて、何らかの意味で整備拡張(つまり新物理)は必要と考えられている。

ヒッグス粒子：

ゲージ対称性の自発的破れを担う粒子。ヒッグス場の真空期待値が破れの秩序変数であり、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果たす。超伝導というクーパーペアであるが、標準理論ではSU(2)2重項でスピン0のヒッグス場がSU(2)×U(1)→U(1)という破れを引き起こす。その結果としてヒッグス機構によりゲージ粒子に、湯川相互作用を通してクォークと荷電レプトンに質量が与えられる。

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2個パラメータを含み、1個は弱い相互作用の強さから決まり、1個はヒッグス粒子の質量から決まる。ヒッグス場を複数個含むようにした場合は、一般にはより多くのパラメータを含むようになる。

アイソスピン：

ここでは上記のSU(2)のこと。