

昨年7月4日、ついにヒッグス粒子が発見されました。全断面積は 25 fb^{-1} まで増え、その結果をうけた3月のMoriond会議でのATLASグループの発表は、記憶に新しいところです。質量は 125.6 GeV 、スピンも0であることがほぼ確認され、Higgs-like particleはA HiggsからThe Higgsへなろうとしています。もう一つの注目すべき成果はLHCb実験です。超対称模型で大きな増幅が期待される $B_s \rightarrow 2\mu$ 崩壊分岐比が、標準模型の予言($\sim 3 \times 10^{-9}$)どおりに観測され、低エネルギー超対称模型に対する強い制限を与えました。

このような状況で、「標準模型以外に何も面白くない」と言った悲観的感想を耳にすることがあります。以下では、現在の状況をじっくり眺めることで見えてくる“もう一つの見方”を紹介し、今ほど素粒子物理が面白い時代はない、ことを伝えたいと思います。

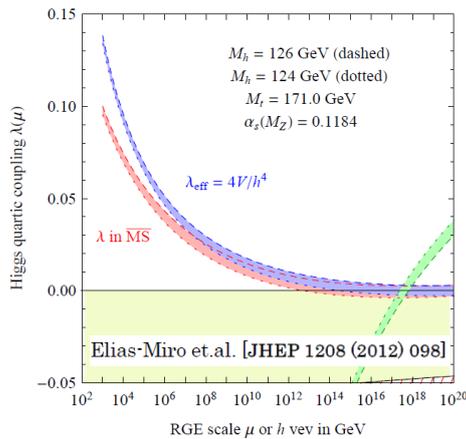
標準模型が完成した後の素粒子物理学は、次の大きな流れに基づいて発展してきました。

ゲージ相互作用の大統一 \Rightarrow Naturalness (階層性問題) \Rightarrow TeV の超対称性

弱い力と電磁気力は、電弱理論で統一されます。強い力も 10^{16} GeV のGUTスケールで統一するはずだという考えは、相互作用のエネルギー変化や電荷の量子化、量子異常の相殺などを自然に説明する魅力的な考えです。しかしGUTスケールの存在は、電弱対称性の破れとの間にある14ケタものスケールの乖離(階層性)が不自然であるというNaturalness問題を誘発し、それを「美しく」解決する解として超対称模型が提案されました。超対称模型は、相互作用の統一を精密化し、暗黒物質候補を持つことから、多くの研究者を惹きつけています。このような発想の流れは、標準模型を超える物理への王道(素粒子物理学のセントラルドグマ)です。しかし代償として、数多くのパラメータが導入され、その結果FCNC問題などが発生します。そして、LHC実験により、超対称模型の構築に対する予想以上の厳しい制限が与えられることとなったのです。

それならば今いちど、“素粒子のセントラルドグマ”を見直してみてもはどうでしょうか。GUTスケールは、量子重力の効果で時空そのものが大きく揺らぐプランクスケール M_{Pl} と「たかが2ケタ」しか違いません。そもそも量子重力はよく理解されていませんので、GUTと M_{Pl} が同じスケールをもつ可能性も否定できません。階層性問題も見直しが必要です。標準模型では、ほとんど全ての質量が、電弱対称性の破れに起因します。唯一の例外は、破れ自体の原因となるヒッグス粒子の(負の)質量項です。この質量項の存在が、階層性問題の原因となります。ならばいつそのこと「質量項が無い」理論を考えたらどうでしょう。すると、超対称性が無くても、標準模型が M_{Pl} の物理と自然に繋がるのがわかります。

もう一つ重要なのは 126 GeV というヒッグス粒子の質量です。これは、ヒッグスの4点自己相互作用の大きさに関係しており、標準模型を量子重力と結びつける大事なヒントが隠されています。この値を繰り込み群で高エネルギーへ外挿します。すると、とても不思議なことに、 M_{Pl} でこの値が0になります。下の図を見ると、自己相互作用が M_{Pl} で漸近的に0へ近づくことがわかります。(この振る舞いは、ヒッグスやトップクォークの質量、



強い相互作用定数に大変敏感です。例えば $M_t=173$ GeV を使うと、 10^{11} GeV で0を切りま
す。この場合は、新物理の出現を示唆しますので、
今後の M_t の詳細測定がとても重要です。) この
図の様に振舞う時は、ヒッグス場のポテンシャル
が、「安定性ぎりぎりの境界」にあることを意味
します。

質量項もなく4点結合がMPLで0となるなら
ば、「ヒッグス場がMPLで完全に平坦なポテンシ
ヤルを持つ」ことを示唆します。では電弱対称性

はどう破れるのでしょうか。その一つが輻射補正を使う可能性です。これは
Coleman-Weinberg 機構とよばれますが、標準模型だけでは機能しません。更に重要な
のは、自然は標準模型だけでは説明不可能という事実です。ニュートリノ振動、宇宙のバリ
オン数非対称性、さらに暗黒物質の存在も同様です。つまり標準模型は必ず拡張が必要で
す。昨年、磯と折笠は、この様な考えに基づき、超対称性無しでも階層性問題を持たず、
自然現象を必要十分な簡潔さで説明できる模型を提唱しました。この模型は、数TeVのZ' 粒
子と右巻きニュートリノ、Z'より一桁軽い(標準模型の電荷をもたない)スカラー場の存在
を予言します。(S. Iso, Y. Orikasa, PTEP 2013 (2013) 023B08)

この考え方の特徴は、電弱理論(とその仲間のTeVでの拡張)が、MPLのUV理論と直
接つながっている点です。つまり両者の間に大砂漠が存在することを要請します。その結
果、途中で邪魔者がいなくなり、MPLの物理が見通しよく観察できるようになるのです。
これまでの弦理論では、MPLで超対称性が保たれたまま10次元から4次元へコンパクト化
する模型が構築されてきました。一方、MPLで超対称性も大統一も同時に破れて4次元が
生まれる可能性はほとんど議論されてこなかったのです。さらに、“MPLでヒッグス場のポ
テンシャルが平坦”という条件は、弦理論の解析に新たな方向性を与えます。この考えが
正しいならば、弦理論特有の機構によって、平坦なポテンシャルもつスカラー場(ヒッグ
ス場)を作り出すことが、これからの弦理論の重要な課題となります。

「標準模型があまりに正しくそこから一切のずれが見つからない」ことは、これまで支
配的だった思考に対する見直しを迫っているに過ぎません。決して、標準模型で素粒子物
理学が終わりであることを意味しません。惑星の運動を説明するため、円運動を組み合わ
せて複雑な天体模型を構築したプトレマイオスの模型がありました。しかし天動説から地
動説というガリレオの発想の転換が、より単純な天体模型を導きました。自然はやはり美
しく単純です。素粒子物理学のセントラルドグマが正しかったのか、それとも何か発想の
転換が必要なのか、その(部分的)判定は3年後、14TeVのLHCとSuper KEKBが動き出
した時に下されるのではないのでしょうか。これが、素粒子物理学が今ほど面白くわくわく
する時代はない、と考える理由です。(文責: 磯 暁)