

ご注文は新粒子ですか？

— LHC 750 GeV 二光子アノマリ—顛末記 —

KIAS (韓国高等科学院)

西脇 健二

nishiken@kias.re.kr

2016年(平成28年)11月7日

1 初めに

素粒子実験及び現象論の研究において、最も重要なことの一つは、既に確立された理論では説明できない現象が発見された際にどうするかである。特に現象論を研究する人間にとって、もし観測された事象が真に新しい物理の存在を示しているなら、この事象を説明することは素粒子の標準模型を超えた理論を構築する際の指導原理となるので、非常に大きな意味を持つ。もちろん、発見された現象の特性により、どのような新しい物理が望ましいかは大きく異なってくるが、2015年12月に ATLAS, CMS 両実験グループにより発表された、「750 GeV 近辺に現れた二つの光子から構成される不変質量のピークの存在」[1, 2, 3] は、以下の二つの理由で多くの現象論研究者の関心を呼んだ。一つは、特定の性質を持つ新粒子を導入すれば、比較的容易に無矛盾な説明が可能なこと、もう一つは、今まで研究されてきた多くの現象論モデルのセットアップに(必要なら模型を拡張して)埋め込めることである。

本稿では、2015年12月中旬から2016年8月初旬にかけて、両実験グループから公式に否定的見解を出されるまで続いた、最終的に400本以上の論文が発表される結果となった、素粒子現象論における“お祭り”現象に関して振り返ってみたい¹。

本稿の構成は以下の様になっている。まず2章で750 GeV のピークにまつわる物理の基本的事項を、続く3章で最も単純かつ無矛盾な説明の方法を解説する。その後、4章で現象論研究者がいかに“より良い”説明を模索していったのかを具体例を中心に解説した後に、5章で当時の状況を、考察を交えながら振り返る。最後に6章で、この一連の顛末から、我々が何を学ぶことができるかに関して簡単にコメントさせていただく。

2 新粒子としての解釈

2.1 粒子の基本性質

750 GeV 近辺に出現した二つの光子から構成される不変質量のピークの解釈として最も素朴かつ自然なものは、「質量750 GeV 程度の粒子が存在し、これが光子対に崩壊した」と考えることである。2012年7月4日に質量(およそ)125 GeV のヒッグス粒子の存在が ATLAS 及び CMS 実験により確立したことにより、標準模型には未発見の粒子が含まれなくなったので、このような粒子の出現は、ほぼ必然的に標準模型を超えた物理の存在を示唆していることになる。

ここで、この粒子の持つスピンの値に関して考察してみよう。スピン1/2のフェルミオンはフェルミ統計性から明らかに矛盾し、スピン1の粒子は光子対に崩壊できないという Landau-Yang の定理の存在を念頭に置くと否定される。ここで、残るスピン0(スカラー粒子、ヒッグス粒子が一例)やスピン2(テンソル粒子、重力子[未発見]が一例)などのボソンが候補になるが、以下では導入が簡単な、スカラー粒子を候補に考えることにする。

光子は電荷を持った粒子と結合できるが、光子自身は電荷を持っていない。一方で、電荷の保存則により、元の750 GeV の粒子は電荷的に中性でなければならない事が分かる。よって、750 GeV の新粒子は光子と直接結合することはできない。しかし、このことは、このスカラー粒子が光子対と結合できないことを意味するわけではない。仮にこの粒子が、何か電荷を持った粒子と結合するなら、図1のように1ループの過程を通して崩壊が可能だ。崩壊前の生成過程に関しても同様に、スカラー粒子がクォークの様にカラー荷を持つ粒子と結合するなら、グルーオン対と図1と同様のダイアグラムを通して結合できる。グルーオンは陽子内部に仮想的に存在しているから、以上の事柄が実現していれば、750 GeV のスカラーは LHC における陽子-陽子衝突過程から生成

¹ 関連論文のほぼ完全なリストは、以下のリンクから入手可能 [4]。

され、その後光子対に崩壊可能と結論できる。

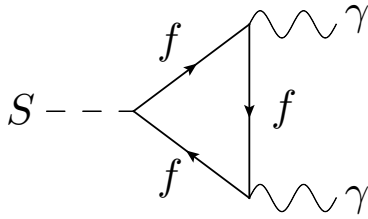


図 1: 750 GeV スカラー粒子 (S) が二つの光子 (γ) に、電荷を持ったフェルミオン (f) を通して崩壊する過程の例。

2.2 奇妙な点 1: 何故他のチャンネルが無いのか?

前述の過程はヒッグス粒子の発見の際にも議論されたので、ご存知の方も多いのではないだろうか。しかし、今回の場合とヒッグス粒子の場合では、決定的に違う点がある。それは、「光子対に行く過程以外からは、750 GeV 近辺にピークが見つかっていない」ことである。このことは、この粒子の起源を考える上で重要なヒントとなる。一般に物質のゲージ相互作用の形は、対応するゲージ変換の下での変換性 (ゲージ群の表現) を決めれば決定される。仮に、このスカラーが標準模型と同じハイパー電荷 $1/2$ を持つゲージ群 $SU(2)_L$ の二重項を起源とすると、 W 及び Z ボソンと直接結合を持つことになる。そしてその結合の強さは、電荷的に中性な粒子の場合、一般に摂動の高次である 1 ループからしか実現できない光子対との結合より強いと予想される。

例えば、750 GeV スカラーと標準模型に含まれるクォークやレプトンとの湯川結合が標準模型と同じであると想定すると、750 GeV スカラーの W ボソン対への崩壊率は 58.6%、 Z ボソン対へは 29.0%、光子対に対しては $1.79 \times 10^{-5}\%$ となる [5]。ここで、750 GeV スカラーがヒッグス粒子対に崩壊する過程はないものとした。一方、2015 年度における 13 TeV での実験で新粒子が W ボソン対、 Z ボソン対に行く兆候が何もなかったことから、750 GeV のボソン粒子が LHC で生成され、 WW 及び ZZ の崩壊過程をたどる場合の散乱断面積は強く制限されており、それぞれ順に 95% の信頼度でおよそ 257 fb [6]、221 fb [7] 以下でないといけないことが解析結果から要求される (これらは 13 TeV ATLAS 実験の結果)²。一方で、750 GeV にピークのある光子対の散

²実際には、より強い散乱断面積への制限が 8 TeV の実験結果から課される。ATLAS が 8 TeV の実験データから得た具体的な (8 TeV での) 散乱断面積への上限の大きさは、35 fb (WW) [8]、12 fb (ZZ) [9] である。[10] の一般論より、陽子内部のグルーオンとの結合により 750 GeV スカラーが生成される場合、13 TeV での散乱断面積の大きさは、対応する 8 TeV の大きさの約 4.7 倍に増幅されるが、上の

乱断面積は 5 fb 程度であると観測されている [12]。この散乱断面積における光子対と W 、 Z ボソン対の比率 ($\sim 5/250$) は、上述の崩壊率に対する比率 ($\sim 10^{-7}/0.6$) に比べて大き過ぎるため、このような可能性は棄却される³。

以上から、候補として適当なスカラー粒子は、 W 、 Z ボソンと直接結合できない、「ハイパー電荷を持たない、ゲージ群 $SU(2)_L$ の一重項」の様に振る舞うものとなる。

2.3 奇妙な点 2: 全崩壊幅は広い?

二光子対の様な綺麗なイベントで不変質量にピークが発見されれば、その横幅から粒子の全崩壊幅 (Γ) の情報を得ることが可能である。ATLAS は 2015 年 12 月の段階から、質量 m が 750 GeV 程度の際に、比 Γ/m の 13 TeV の運転で得られたデータでの最確値をおよそ 6% ($\Gamma \sim 45$ GeV) [1, 14]、後に CMS は 2016 年 3 月に 1.4% ($\Gamma \sim 11$ GeV) と発表した [12]。なお CMS は同時に、8 TeV のデータも考慮に入れた場合の最確値も公表しており、この場合は $1.4 \times 10^{-2}\%$ ($\Gamma \sim 100$ MeV) となっている [12]。

ここで先程と同様に、標準模型的な 750 GeV スカラー粒子の場合を再度考察してみよう。この場合、全崩壊幅は 247 GeV と大きいのが、光子対への崩壊幅は 1 ループ過程への抑制効果が効いてわずか 0.04 MeV。グルーオン対への崩壊幅も、対応する崩壊率が $2.55 \times 10^{-2}\%$ から 63 MeV と算出できる [5]。もちろん、この 750 GeV スカラーが、ヒッグス粒子とトップクォークとの湯川結合 (大きさは大体 1 程度) よりも、遥かに強くループを回るフェルミオンと相互作用している場合も考えられるが、摂動の有効性より結合の大きさには上限がかかることから、それでも (少なくとも) ATLAS の 45 GeV という値は、非常に大きいように見える。

3 最小模型の構築

実は先の議論で示唆した「ハイパー電荷を持たない、ゲージ群 $SU(2)_L$ の一重項」スカラー粒子を加える模型は、標準模型に単にこのスカラー粒子を加えるだけでは話は終らない。というのも、前章で述べた通り、750 GeV の粒子に対して光子とグルーオンとの結合にはそれぞれ電荷、カラー荷を持つ粒子を媒介する必要がある、標準

13 TeV でのデータの制限は、8 TeV の制限の 4.7 倍より弱い (値としては大きい)。このことは、主に解析に使用しているデータ量が大幅に 8 TeV の場合の方が多いために起因する [8 TeV: 20.3 fb⁻¹, 13 TeV: 3.2 fb⁻¹]。更に補足すると、最も顕著な制限は $Z\gamma$ への崩壊過程から来る (8 TeV で 4.0 fb) [11]。

³上で示した光子対過程の散乱断面積の目標値は CMS 実験の公式見解であるが、これが発表されたのは 2016 年 3 月である。それ以前の研究には、ATLAS, CMS 非公式の global fit で得られた値などが目標値で使用されていた (例えば [13])。

模型の範囲内ではクォークとレプトンが候補になる。しかしながら、ヒッグス粒子の場合とは異なり、 $SU(2)_L$ 一重項スカラーは、標準模型のフェルミオンと湯川結合を持つことが以下の理由で不可能だからだ。一般に湯川結合の構成には、カイラリティの左巻き成分と右巻き成分の両方が必要になるが、標準模型は左巻きと右巻きがそれぞれ $SU(2)_L$ の違う表現に属している (左巻き: 二重項, 右巻き: 一重項) ため、 $SU(2)_L$ ゲージ変換の下で不変な形で項が構成できないと結論される (ヒッグス粒子は $SU(2)_L$ の二重項に属するため、ゲージ不変な形で湯川結合が構成可能)。

従って、模型を考える際には、標準模型には存在しない電荷、カラー荷を持つ粒子を模型に導入することが要求される。ここで最も単純な可能性は、右巻き、左巻きともに、同じ $SU(2)_L$ の表現、同じハイパー電荷の値を持つ新種のクォーク、更にはレプトンを導入する事である⁴。この場合なら一重項スカラーとも無矛盾に湯川相互作用を構成できて、光子対の不変質量に発見された 750 GeV ピークを説明する為の準備が整ったことになる。図 2 に、今の反応全体を表す模式図を載せておく。

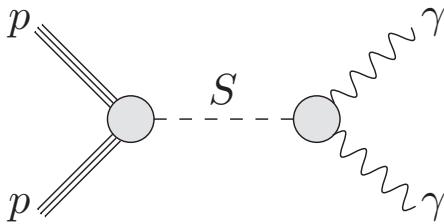


図 2: 最小模型での 750 GeV スカラー粒子 (S) の生成の模式図。左の丸印で S は陽子 (p) 内のグルーオン対と新しいクォークを通して、右の丸印で S は崩壊先の光子 (γ) 対と新しいクォーク及びレプトンを通して相互作用する。

新しいクォーク、レプトン共に $SU(2)_L$ 一重項とするのが一番単純な場合の一つである。この単純な場合でも、湯川結合の摂動がギリギリ有効な値 (4π) を取る場合に、実験結果を無矛盾に説明できるパラメータ領域 (既存の新種のクォーク、レプトン探索の結果から来る制限とも無矛盾な領域) が存在することが示されている [15]。ただし、ATLAS 実験の分解能から推定される全崩壊幅の 5.3 GeV 程度を実現することはできても、45 GeV を今の模型で矛盾なく説明することは非常に難しいようである。ここで関連して、現象論研究者により提案された数多くの模型では、「ATLAS の 45 GeV の全崩壊幅の値は実際にはもっと小さいはずで、限られたデータ量での解

⁴ これら結合の導入のための粒子は、原理的にはスカラー粒子でも良い。また、新たなクォークだけ導入しても 750 GeV スカラーの光子とグルーオンとの結合は生成可能だが、レプトンも同時に導入すると二つの結合を別々に操作することができるので、より観測結果に合わせる事が容易になる。

析の結果たまたま大きく見えているのだ」との解釈をとり、より小さな全崩壊幅の値をターゲットにしたものが多いことを補足させていただく⁵。

4 最小模型を超えるには

さて前章において、実験結果を無矛盾に説明するための処方箋を示したが、これが非常に人工的に見えた方も多いのではないだろうか。その原因のほとんどは、最小模型において、750 GeV のスカラー粒子、新しいクォーク、レプトン共に、単に現象を説明するために最も都合の良い配位を持ってきているだけだと感じられる点であろう。しかし、現象論の模型に要求される最重要課題は、“観測された真実”を記述することである。如何に“人工的”に見えようとも、この発見が真実である可能性が以上、無矛盾かつ最小限度の説明を考察することは、現象論的考察の第一歩として非常に重要と考えられる。

とはいえ、その第一歩の後には、現象論研究者はより良い理論を構築するよう努める必要がある。“より良い”の持つ意味合いに関しては、

1. 750 GeV スカラーの寄与で、750 GeV のピーク以外の事象をも同時に説明できるもの、
2. 750 GeV 近傍に現れたピークの説明として、今までに無かった視点を提唱してくれるもの、
3. 750 GeV のピークが説明できないこと以外の標準模型における“問題点”にも光を当てるもの、

など色々な考え方があると思うが、本稿では上記 1, 2 の二つの視点を取り上げて話を進めることにする。ここで方向性 3 にそった研究では、今まで様々なモチベーションで研究されてきた“標準模型を超える素粒子模型” (例: 超対称性模型) の枠内で、どの様にこのピークの存在を説明するかという点が追求されていることを補足させていただく。それでは以下で、現象論研究者が如何に模型を“改良”していくかを、各項目の具体例の解説を通して見ていただくことにしよう。

観点 1 の立場でより良い理論を構築する上での要点は、750 GeV スカラーを他のどの物理の説明に使用するかに帰着される。

以下では一例として、[17] の議論を取り上げる。初めに、750 GeV スカラーはピークの説明のため、電荷、カラー荷を持った粒子と結合していることが要求され、これらは原理的にはスカラー粒子でも良いことに目を向け

⁵ 750 GeV スカラーが暗黒物質の対に大きな崩壊幅で崩壊しているような状況を考えると、全崩壊幅の値をかさ上げできる。しかしこれは、このスカラーが光子対に行く比率が減少することも意味するので、望ましい光子対の生成断面積と 45 GeV の崩壊幅を同時に実現させるのはそれ程単純ではない (例えば [16])。

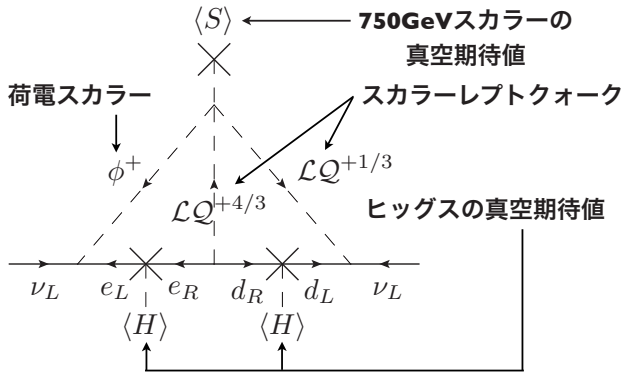


図3: [17]で考察された2ループで出現するニュートリノ (ν)のマヨラナ質量項の模式図。eは電荷-1の荷電レプトン, dは電荷-1/3のクォーク, L/Rはカイラリティの左巻き/右巻きを表す。フェルミオンの世代に関しては, 書くことを省略した。

よう。ここで電荷 1, 4/3, 1/3 の三つの $SU(2)_L$ 一重項のスカラー粒子を導入し, 後者二つはクォークと同様にカラー荷も持つとしよう。この様な電荷とカラー荷を持つスカラー粒子を, (スカラー)レプトクォークと呼ぶ。面白いことに, これらの電荷, カラー荷を持つ $SU(2)_L$ 一重項スカラーは, クォーク, レプトンと結合できる。すると図3の様に, 2ループの段階で, ニュートリノと反ニュートリノが750 GeV スカラーが出現する粒子 S を通して結合し, S がヒッグス粒子の様に真空期待値を持つなら, これは標準模型では実現できないニュートリノに質量を与えるマヨラナ質量項が量子効果で生成された事を意味する。都合の良いことに, この質量項の大きさは2ループで抑制されるため, 各種結合の大きさを極端に小さくしなくても微小なニュートリノ質量の値を無矛盾に説明することが可能である。この模型は, ピークの特性から要求される状況と, 「スカラーは真空期待値を持てる」というスカラー粒子最大の特性をうまく組み合わせ, 750 GeV のピークの説明と同時に, 観測されているニュートリノの配位を説明可能という点で, 最小模型を超えた模型となっている事が分かる。

次に観点2の立場から説明を再考してみよう。一つの重要な視点は, 理論により記述される散乱反応の素過程が, そのまま加速器で見えるとは限らないことだ。

面白い一つの可能性として, 図4で描かれた素過程を見てみよう [18]。ここで σ が750 GeV のスカラーで, η は $\mathcal{O}(1)$ GeV 以下の軽いスカラー粒子であるとし, それぞれが二つの光子に崩壊するとする。ポイントになるのは, 重たい粒子の崩壊から出現したこの様な軽い粒子は非常に高い運動量を持つため, 次の崩壊過程で生まれる二つの光子は互いに非常に近接し, 加速器での識別が難しくなることだ。結果として, このような二つ重なった光子は, 一つの光子として実験では観測される。一般

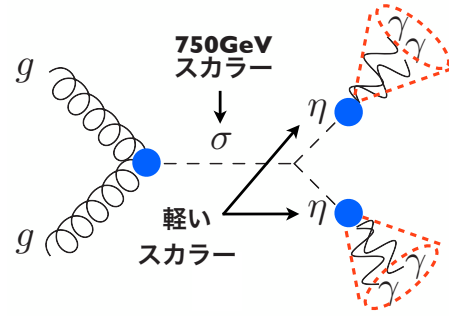


図4: “縮退した光子”による“二光子”イベントを表すダイアグラム。gは入射陽子内に仮想的に存在するグルーオンを示し, スカラーは, グルーオン及び光子と, ループ過程等を通して有効相互作用(青丸)を持つとする。赤点線のコーンは, LHC 実験では近接した二つの光子 (γ) は, 一つに見えることを表現している。

に粒子が(二体)崩壊する際には, 自分の質量の半分より重い同種粒子対には崩壊が不可能なので, この場合, η から W や Z ボソン対に行くような過程は自然に禁止される。また, σ が2つの η と強く結合していれば, 安全に散乱断面積の値を稼ぐことも可能だ。このような仕事は, 「素過程が最も単純な解釈から離れる」という論点それ自体が刺激的で面白いが, さらに新たな解釈の提供は現象論の可能性を広げるという意味で極めて重要と考えられる^{6, 7}。

他の興味深い過程として, 750 GeV スカラー粒子の生成過程も二つの光子との結合から発生したとする可能性がある。この場合, 図2から分かる通り, 始状態の二つの光子は(グルーオンの場合と同じく), 二つの加速された陽子内部にそれぞれ仮想的に存在する粒子となる。通常の場合, カラー相互作用は電磁相互作用と比較して遥かに強いため, 光子が始状態の散乱過程は粒子の生成断面積に殆ど寄与しない。しかしここで, グルーオンと750 GeV スカラーとを媒介するカラー荷を持つ粒子が存在せず, 他方で750 GeV スカラーが光子対とは何かの荷電粒子を介して強く結合している状況を考えてみよう。このような場合は, 光子が始状態の生成反応が主要生成過程になり, またその生成断面積もそれなりの大きさになってもおかしくはない。[23]によると, この場合の終状態が二光子対への散乱断面積は

$$9.1 \text{ fb} \times \left(\frac{\Gamma_S}{100 \text{ MeV}} \right) \times \text{Br}^2(S \rightarrow 2\gamma) \quad (1)$$

程度となる。ここで Γ_S は750 GeV スカラー S の全崩壊幅, $\text{Br}(S \rightarrow 2\gamma)$ は S の二光子対への崩壊分岐比を表す。注目すべき点は, 例えばもし $\text{Br}(S \rightarrow 2\gamma) \sim 60\%$

⁶この方向性の仕事として, 他にも例えば [19, 20, 21] がある。

⁷具体的な模型での例を挙げると, 例えば次最小超対称標準模型(NMSSM)の特定のパラメータ領域で, この可能性は実現できる(例として [22])。

程度、 $\Gamma_S \sim 100$ MeV を実現できれば、説明に必要な ~ 5 fb の散乱断面積は十分に稼げることだ。この研究も、状況に即した新しい可能性の扉を開くという点で非常に面白い⁸。

最後にスペースの関係上、ここでは発表された論文のごく一部しか取り上げていないことを申し添える。より詳細な状況に興味の有る方は、レビュー [25, 26, 27] をご覧頂きたい。

5 今振り返ってみると

前章までの記述で、我々は関連する物理の基本事項の解説を交えながら、現象論研究者が 750 GeV 近傍に光子対の不変質量に現れたピークの存在を示す実験結果が発表された際に、どの様に考察し仕事を進めていったのかを、具体例を通して見てきた。この章では、その当時の状況を振り返ってみたい。

2015 年 12 月 15 日、グリニッジ標準時で午後二時から午後四時まで CERN で開催された、ATLAS 及び CMS 実験グループによる 750 GeV ピークの存在を告げるセミナーの終了とともに、本トピックの現象論的研究の開始を告げるゴングは正式に鳴り響いたが、状況は当初から凄まじい様相を呈していた。詳細は [28] に詳しいが、事前に噂を聞きつけて準備していたグループ等による関連論文が、セミナー当日の午後九時までの間に 10 本、翌日にも 8 本もの数プレプリントサーバ (arXiv.org) に投稿された。論文投稿の勢いはその後も止まらず、2015 年内だけで投稿された論文総数は 120 本以上にも及び、最終的には 400 本を超える原稿が発表された。補足として、発表論文数の推移の状況が [29] において、[30] に基づく発表論文の予測曲線と共に公開されていること、更に [31] で、関連論文の総引用数、総本数ごとの研究者ランキング (上位三人) が作成されていることを述べさせていただく。

この凄まじい論文ラッシュの大きな原因を二つ挙げると、

- 2011 年に 125 GeV ヒッグス粒子の兆候が見え始めた際にも二光子への崩壊プロセスに標準模型の予言値からの超過が報告され、似たような議論が既に数多くなされていたこと、
- ピークの説明に要求されるセットアップが特に困難なものではなく、様々な模型で考察が可能だったこと、

が挙げられる。具体的な模型に即しての研究は、750 GeV ピークの説明としては基本的に“最小模型”の考えのま

⁸他方でこの様に 750 GeV スカラーが、具体的な模型で光子対と無矛盾に強く結合できるのかという疑問も残る。私は共同研究者とこの論点を深めて論文にまとめた [24]。

まのものの数も多かったが、他方で 4 章で幾つか例示した、最小模型を超える“より良い”方向性の第一報の数多くが、2015 年 12 月の内に提案された事も興味深い事実である。

一方この流行には、ビジネスライクな側面も確かにあったと思われる。その理由は、現象論的観点から素朴に考えると、この実験結果には以下の様な疑わしいかつ悩ましい点が存在すると考えられるからである。

- 摂動の高次 (ループ過程) からしか通常生じない崩壊過程が非常に増幅されるような状況は人為的で、(他の物理との絡みを考えられるにしても) 不自然に見えること、
- 統計量が少ない段階では統計ゆらぎが大きく、偽のピークが見えてしまうことは大いにあり得ること。

この事から、このピークの存在を信頼性が高いものだと考えていた関係者の数は、限られていたと想像される。しかし、自然は人間が素直に“自然”と思えるような世界を構築したとは必ずしも考えられないし、何より仮に実験結果が真実を示していた場合のメリットを思えば、参加障壁の低さから考えても、「参加しない理由がないという理由で参加する」というのは、打算的な側面もあるにしる、研究者として十分合理的な判断だと思われる。データが蓄積されて解析されるまで、本当の事は誰にもわからないのだから。かくして、数多くの現象論関係者が我先にと研究を遮二無二進め、結果として 400 本以上の論文が発表されることと相成ったのである⁹。

6 結び

今まで見てきた“お祭り騒ぎ”も、2016 年 8 月上旬にあっさりとその幕を下ろした [32, 33]。シカゴで開催された世界的な国際会議 ICHEP2016 にて、2016 年度に実施された 13 TeV の実験データを加味して再解析を行った結果、750 GeV 付近の顕著なピークが消えたとの報告が ATLAS, CMS 実験グループ共からなされたのである。かくして、山の様に書かれた論文の、当初の意義は完全に失われてしまった。しかしこれらの研究過程で得られた、特に 4 章の観点 2 で議論されたような、新しいものの見方を提供するような研究結果は、その全てが無駄に失われるわけではなく、将来において有効活用できると信じている。

今後、例え今回の様に“華々しい”ものではなくても、新しい物理を表すと解釈できる実験結果が出る度に、

⁹特に先取権争いの激しかった始めの内は、昼夜問わず猛烈に仕事を進めていたグループが多数あったと思われる。かくいう私も、2015 年 12 月中に原稿を完成させるため最後の方はほぼ徹夜で仕事を続け、結果的に年末に日本の実家に帰る飛行機を寝過ごしました…ただ、出たばかりの実験結果に即座に反応するタイプの研究をしたのは私にとって初めての経験で、とても刺激的で楽しくもありました。

例えそのデータが多少疑わしく見えるとしても、同じような“ゲーム”は繰り返されると考えられる。そしてそれは、現象論の研究においては一つの正しい方向性なのだ。なぜなら、真実を記述する理論を“追求”することこそ現象論研究における最大の命題であり、その直接的な手がかりは実験結果からしか得られないからである。

謝辞

この様な貴重な機会を私に与えて頂いた高エネルギーニュースの編集委員の皆様、特に原稿執筆に関して数々の貴重なアドバイスを頂いた奥木敏行氏(高エネルギー加速器研究機構准教授)、さらに、本稿を書かせて頂くきっかけとなった講演に私を講演者として推薦して下さった兼村晋哉氏(富山大学准教授)並びに藤井恵介氏(高エネルギー加速器研究機構教授)、また、原稿を読んで有益なコメントを頂いた坂本真人氏(神戸大学准教授)並びに渡邊諒太郎氏(モントリオール大学研究員)に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2015-081.
- [2] CMS Collaboration, CMS-PAS-EXO-15-004.
- [3] 寺師弘二, 高エネルギーニュース, 34 巻 4 号 (2016) .
- [4] <http://inspirehep.net/search?ln=ja&p=refersto%3Arecid%3A1410174&sf=earliestdate>.
- [5] S. Heinemeyer *et al.* [LHC Higgs Cross Section Working Group Collaboration], arXiv:1307.1347 [hep-ph].
- [6] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2015-075.
- [7] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2015-071.
- [8] G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], JHEP **1601**, 032 (2016).
- [9] G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], Eur. Phys. J. C **76**, no. 1, 45 (2016).
- [10] R. Franceschini *et al.*, JHEP **1603**, 144 (2016).
- [11] G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], Phys. Lett. B **738**, 428 (2014)
- [12] CMS Collaboration, CMS-PAS-EXO-16-018.
- [13] D. Buttazzo, A. Greljo and D. Marzocca, Eur. Phys. J. C **76**, no. 3, 116 (2016).
- [14] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2016-018.
- [15] S. D. McDermott, P. Meade and H. Ramani, Phys. Lett. B **755**, 353 (2016).
- [16] D. Barducci, A. Goudelis, S. Kulkarni and D. Sengupta, JHEP **1605**, 154 (2016).
- [17] W. Chao, Nucl. Phys. B **911**, 231 (2016).
- [18] P. Agrawal, J. Fan, B. Heidenreich, M. Reece and M. Strassler, JHEP **1606**, 082 (2016).
- [19] W. S. Cho, D. Kim, K. Kong, S. H. Lim, K. T. Matchev, J. C. Park and M. Park, Phys. Rev. Lett. **116**, no. 15, 151805 (2016).
- [20] J. E. Kim, Phys. Lett. B **755**, 190 (2016).
- [21] J. H. Collins, C. Csaki, J. A. Dror and S. Lombardo, Phys. Rev. D **93**, no. 11, 115001 (2016).
- [22] U. Ellwanger and C. Hugonie, JHEP **1605**, 114 (2016).
- [23] L. A. Harland-Lang, V. A. Khoze and M. G. Ryskin, JHEP **1603**, 182 (2016).
- [24] S. Kanemura, K. Nishiwaki, H. Okada, Y. Orikasa, S. C. Park and R. Watanabe, Accepted to PTEP, arXiv:1512.09048 [hep-ph].
- [25] F. Richard, arXiv:1604.01640 [hep-ex].
- [26] A. Strumia, arXiv:1605.09401 [hep-ph].
- [27] K. Fujii *et al.* [LCC Physics Working Group Collaboration], arXiv:1607.03829 [hep-ph].
- [28] <http://astrumia.home.cern.ch/astrumia/InstantPaper.html>.
- [29] <http://cp3.irmp.ucl.ac.be/~mbackovic/>.
- [30] M. Backović, arXiv:1603.01204 [physics.soc-ph].
- [31] <http://resonaances.blogspot.kr/2016/06/game-of-thrones-750-gev-edition.html>.
- [32] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2016-059.
- [33] CMS Collaboration, CMS-PAS-EXO-16-027.