総 説

ヒッグス粒子発見とその後の展開

浅井祥仁[†]

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

[†] shoji.asai@cern.ch

LHC (Large Hadron Collider) で2012年ヒッグス粒子が発見された。ヒッグス粒子の発見は、「標準理論」最後の未発見粒子が発見されたというだけの話ではない。真空の概念を変えるこの発見は、時空や真空への物理へとパラダイムシフトへの幕開けである。この新しいパラダイムでは、宇宙の暗黒物質や暗黒エネルギーの理解や、宇宙誕生の謎に迫ることが期待されている。本解説では、ヒッグス粒子の基礎と、実験でどのように発見したかを解説する。

Key Words: LHC, Higgs Boson, particle physics

1. α, β, γ 崩壊と力を伝える素粒子

私もアイソトープのお世話になっている。²²Naの陽電子線源でポジトロニウムを作って研究を行ったり、検出器の校正に、¹³⁷Csなどを使っている。アイソトープとしてお世話になるようなものだと、半減期は日から数十年程度がほとんどで、長いものから短いものまで様々ある。特に β 崩壊関係のものは、一般に長い。残念な話ではあるが、福島原発事故で有名になった、¹³⁷Csは半減期が約30年、¹³¹Iは、約8日であり、素粒子の反応という観点から言うと、破格の長さである。

α, β, γ 線の放出される機構は、力の種類と関係している。図1に、これまでにわかっている4つの力をまとめる。重力波が最近発見されたが、重力は極めて弱く、一般の素粒子現象には、重力は気にしなくていい。残り3つの力が、我々には身近なものであり、それぞれが、 α, β, γ 線の放出される機構と関係している。

強い力は、グルオンと呼ばれる素粒子が伝える。グルオンは、クォークやグルオン自身の間を飛んで、これらを結びつける。1フェムトメートル ($1\text{ fm}=10^{-15}\text{ m}$) より長い距離では、「閉じ込め」と言う現象が起こるため、原

子核サイズ (1 fm) より遠距離では、あまりメジャーな存在ではない。一方原子核内の近い距離 ($<1\text{ fm}$: 量子力学を考えると、近い距離は、高いエネルギーに対応している) では、一番強く、核子をまとめ上げるうえで鍵となっている。 α 崩壊は、核子の組み合わせが変わって起こる現象である。核子の内部では、強い力が働いて短い時間スケール (10^{-23} 秒程度) で反応が起きている。しかし、核子から、別の核子と α 線になる途中の状態が起こりにくいため (トンネル効果で起きている) 寿命が極端に長くなっている。

一方、 γ 崩壊は、 α や β 崩壊に続いて、比較的短い時間で生じる。 γ 線 (光) は、図1の電磁力を伝える素粒子である。電磁気力は、「閉じ込め」のような機構がなく、無限遠方まで届くため、重力と並んで、体で感じることができる力である。重力にくらべて、電磁気力は40桁も大きい。暑い夏の日電車で、隣におじさんが座った時をイメージする。おじさんの熱気 (赤外線であり、電磁気力) を感じるがあっても、重力を感じることはないことを思えば、重力が如何に弱いかがわかると思う。日頃重力が実感できるのは、相手が地球などといった大きなものだからある。

図1 4つの力の種類と性質、力を伝搬する素粒子があり、図2の下に示したように、この素粒子を交換することで、粒子が反応している。この力を伝える素粒子は、「ゲージ原理」と言う性質で、質量がゼロであり、無限に遠くまで力を伝えることができる。しかし、弱い力では、W粒子やZ粒子が質量をもつため、伝搬できない。 α, β, γ 崩壊は、重力を除く3つの力と深く結びついている (Color online)

最後の β 崩壊は、電子（または陽電子）とニュートリノを放出する過程で、半減期は、数日から数(十)年と他の力の現象に比べて破格に長寿命である。「弱い力」だから、弱いのだけれども、それにしても何十桁も破格に弱い。何故弱いのか？ W粒子やZ粒子が弱い力を伝えている。このW粒子やZ粒子が、他の力を伝える素粒子と異なり、唯一質量を持っている。しかも破格に重い質量である。伝える素粒子が重くて、なかなか作り出せず、結果弱い力が、弱くなっているのである。「重い」から「弱く」なっているのである。

力を伝える素粒子は、無限まで力を伝達しないと、力の元となっている電荷が保存しなくなる（ゲージ原理と言う。詳しくは文献1, 3, 4）。光や重力のように力を伝える素粒子は、無限遠 ∞ まで伝達し、電荷などが保存している。しかし質量がある粒子の伝搬は $e^{-r/R}$ となるので、実質 R （質量の逆数）しか届かず、弱くなってしまうので、力を伝える素粒子に質量はあってはならない。では、何故、W粒子やZ粒子だけが質量をもつのか？ この解

説記事の主人公である、ヒッグス粒子や真空が、この原因である。

2. 物質を形作る素粒子

1章で述べた「力を伝える素粒子」以外に、「物質を形作る素粒子」があり、これまで素粒子は二つのグループに大別されていた（図2）。

左側の物質を形作る素粒子（レプトンとクォーク）はスピン1/2をもつフェルミ粒子である。一方、力を伝える素粒子（光、グルオン、 Z^0 , $W^\pm$ 粒子：それぞれ電磁気力、強い力、弱い力を伝える）は、ゲージ粒子と呼ばれ、スピン1のボーズ粒子である。図2の右に示している。

図2左側、物質を形作っている素粒子（クォーク、レプトン）を考える。スピン1/2のフェルミ粒子なので、スピンを持っている。スピンの向きを粒子の運動方向で考えた（量子化した）場合、運動方向とスピンの同じ向き（右巻きRと呼ぶ）と逆向き（左巻きL）が可能である（図3上）。一番身近な電子で考えると、ある状態の電子には、二つのスピン状態、すな

図2 標準理論を構成する2つの枠：物質を形成する素粒子（左側：クォークとレプトンと呼ばれるセットが3セットある）と、力を伝える素粒子（右側：ゲージ粒子）がある。ゲージ粒子を2つの粒子間で交換することで、この2粒子間に力が働く（Color online）

図3 フェルミ粒子の質量（左巻き（Lと添え字）質量）と、右巻き（Rと添え字）質量）があると、光速より遅くなり、追い越されると、左巻きが右巻きになってしまう。質量があることで、二つの状態が混合する：フェルミ粒子の質量は、混合パラメーターの役割である。実際、左下のように、真空と弱い力の場を相互作用すると、右下のように、左巻きが右巻きになり、また左巻きへと混合を繰り返して進まなくなる。これが質量であると同時に、光速より遅くなる理由である（Color online）

わち上向き下向きがあることに対応している。

同じ電子の違う状態のように思っ、物性分野では、電子の二価性とよんでいるが、しかし、弱い力に対する性質がこの二つは全く違う。左巻き粒子は、弱い力の電荷を持っているが、右巻きは持っていない。これがパリティの破れの原因である。右巻きと左巻きは鏡に映した関係（パリティ対称）になっているが、弱い力の電荷が異なり対称性は破れている。こ

のように右巻きと左巻きは二価なのでなく、実は“赤の他人”なのである。

もしこれらの粒子に質量があると、図3上に示した通りに、光速で追い越す（「ローレンツ変換」することに対応している）と、運動の方向が逆転するが、スピンの方向は変わらず、結果として、右巻きと左巻きが入れ替わってしまう、右巻きと左巻きが混合してしまう。このように質量があることはまずい。

図4 素粒子：標準理論の概念図物質を形成するフェルミ粒子と力を伝えるゲージ粒子以外のヒッグス場という新しい三極を導入した。ヒッグス場真空に存在して、フェルミ粒子やゲージ粒子に質量を与えている (Color online)

2015年のノーベル物理学賞が梶田先生（スーパーカミオカンデグループ）のニュートリノの質量の発見であったことは、記憶に新しい。昔は、ニュートリノは弱い力にしか関係していなく、したがって「左巻き」状態しかなく、質量がないと皆思っていた。しかし、スーパーカミオカンデグループの発見は、ニュートリノにも質量があり、結果として右巻きニュートリノの存在があることを「発見」したのである（右巻きニュートリノ自身は重くて直接は見つかっていないが、必ず存在することを発見した）。

話を戻すと、物質を形成している素粒子の質量はゼロであり、光速で運動していなければならない。しかし質量がある現実世界と矛盾する。

3. 標準理論：第3極としてのヒッグス場

1, 2章で述べたように、物質を形成しているフェルミ粒子、力を伝えるゲージ粒子、共に質量があってはマズイ。しかし、多くの場合は観測と矛盾する。この矛盾を環境（真空）に押しつけてしまうのが、ヒッグス機構である。素粒子研究者は、原理主義者である。現実合わないなら、考えている原理が間違っていると考え

えるべきであるかもしれないが、ヒッグス機構では、物質を形成している素粒子の質量がない原理（カイラル対称性）や力を伝える素粒子の質量がない原理（ゲージ対称性）の他、いろいろなことが説明できる。おまけに“綺麗”なのである。物理学者は、綺麗なモノに弱い。だから、二つの原理を遵守したまま、すべての問題点を、ヒッグス粒子に押しつけてしまう。図4に模式的に、フェルミ粒子（物質）、ゲージ粒子（力）と、ヒッグス場（真空）の3極の関係を示す。

ヒッグス粒子を取り入れて標準理論を確立した、ワインバーグ（1974年 ノーベル物理学賞受賞）は、「標準理論を家に例えると、ヒッグス粒子は、さながらトイレ」と例えた。お食事の方は申し訳ないが、ヒッグス粒子は、これらの美しい原理を守るための、汚れ役なのである。どう言うことかと言うと、“ゲージ粒子は質量がゼロ”である。しかし我々の住んでいる真空が対称性を破った状態にあるため、もっと具体的に言うと、弱い力の電荷がまった状態が真空になっており、その中を伝わる Z^0 や $W^\pm$ 粒子（弱い力を伝える）は“一見質量を持った様”になる。図4では、模式的に第3極としてヒッグス場を表しているが、その実

態は、クォーク・レプトンやゲージ粒子を包んでいる全体の容れものである。

ここで注意したいのは、主人公は「ヒッグス粒子」なのでなく、「ヒッグス場」である。この違いを皆さんに身近な磁場を例に考える。磁場が、時間変動、空間変動しないで宇宙全体に様に存在しているような感じがヒッグス場である（磁場はスピン1で方向があるが、ヒッグス場はスピン0で方向がない）。その磁場にエネルギーを与え（励起させ）、時間・空間的に変化するようにすると、電磁場（量子化すると光子）として観測される。同様に、宇宙様に満たされているヒッグス場にエネルギーを与えて、励起すると「ヒッグス粒子」として取り出すことができる。素粒子に質量を与えているのは、励起されたヒッグス粒子ではなく、様に存在しているヒッグス場の方である。

我々の住んでいる真空が、弱い力の電荷をもった状態（ヒッグス場が弱い力の電荷を担っている）であることで質量の矛盾も解決できる。真空に満ちているヒッグス場とフェルミ粒子の左巻き・右巻き粒子が結合すると仮定する。この反応の形は湯川先生の予言した核力モデルと同じ形なので湯川型結合と呼ばれている。図3下に示すように、この反応で、右巻き粒子が真空から弱い電荷をもらって左巻きになり、また左巻きだった粒子が真空に電荷を戻して右巻きになったりする。この反応で直進できなくなり、結果として光速より遅く質量が生じているように見える。これにより右巻きと左巻きが混合し、混合パラメータが質量である。一挙にふたつの質量の矛盾（ゲージ対称、カイラル対称性）を解決できる。ヒッグス場は、なかなか素敵なトイレなのである。

ここで少し余談であるが、特殊相対論を学んだとき、「光」だけが、特別な扱いをうけている感じがして、何か頂けない感じを受けた方もいると思う。実は光速は、この質量ゼロの素粒子が運動する共通の速度であり、光だけが特別なのでなく、光はヒッグス場と結合しないの

で、従来の速度を守ったままなのである。フェルミ粒子は、右巻きになったり左巻きになったりまっすぐ進めない、W粒子やZ粒子は、真空中のヒッグス場を振動させてしまうため、遠くに進まず力尽きてしまうのである。

光速 c ってなんなのだろうか？ 時間や空間を区別しないのが、「特殊相対論」の精神であり、この二つ軸の長さを関係づけるパラメータである。時間軸 t に c をかけると、長さ軸 x に対応するようになっている。一方、光速 c は、真空の性質にも依存している。真空に「弱い電荷」が溜まっている。電磁気学の電荷は真空に溜まっていないが、仮想的に電子と陽電子の生成や消滅が絶えず起こっており、この効果で透磁率 μ や誘電率 ϵ をもつようになり、 $c=1/\sqrt{\mu\epsilon}$ になっている。真空の性質と時空の構造、素粒子が密接に結びついている。

脱線ついでに、我々が住んでいる真空が、弱い力の電荷だけでなく、他の電荷もたまっていたらどうなるだろう？ その問いが、南部先生のアイデアの礎となった。真空が、そんな特殊な状況に自然になるのだろうか？ それこそが、南部先生が唱えた「自発的対称性の破れ」である。南部先生の発想の道筋に沿って、超伝導で考える。超伝導体の中という“特殊な環境”の中では格子効果で、電子同士が緩やかな束縛状態になりクーパーペア（マイナス2の電荷）ができる。電子が通ると、結晶をつくっている格子状に並んでいる原子がひきずられる。この効果で、次の電子も、同じような場所を通りやすくなる。これで、電子2個が緩やかな（結晶格子10個ぐらいの遠い）状態でクーバー対に結合して、合成系がボーズ統計に従い、極低温で最低エネルギー状態（基底状態）に縮退する。こういうことが自然（自発的）におきる。このマイナス電荷の基底状態では、電磁気力のゲージ粒子である光が質量を持ったように見えて伝搬できなくなる（マイスナー効果）。

このマイナス電荷の基底状態の不自然さが

図5 ヒッグス場をエネルギーで励起する(左)と、時間的に空間的に局所的に高い状態ができるこれがヒッグス粒子であり、すぐに二つの粒子と反粒子になってしまう(右)(Color online)

図6 LHCトンネル内部の写真：(地下100m一周27km) 青い管が加速管(提供：CERN)(Color online)

南部先生の心にひかかり、その理解の過程から「自発的対称性の破れ」に到達した。南部先生のすごい所は、超伝導体と言う特殊な環境でおこっていることを、“宇宙全体に適用し、宇宙が変な基底状態(真空)になる”ことを示した所にある。この応用が自然観に大きな変革をもたらした。

4. LHC加速器(ヒッグス粒子を作り出す)

3章で述べたように、我々の世界(真空)がヒッグス場に満たされていると言う仮定で「標準理論」と呼ばれる枠組み(図4と図2)ができた。物理学は実証学問であり、本当にそんな真空に住んでいるかは実験で確かめなければ何の価値もない。相手は宇宙全体に一樣な状態で

ある「真空」であり、かつ弱い力しか感じない場である。どうやって検証するか？

3章で磁場と光の粒子の関係を述べた。場があれば、エネルギーを与えてやれば粒子として励起させることができる。世界で一番有名な式と言われる $E=mc^2$ が意味するように、エネルギーは粒子になるので、ヒッグス場にエネルギーが与えられ、励起されるとヒッグス粒子になるのである(図5左)。具体的には大型の加速器で高いエネルギーの粒子同士を衝突・対消滅させ、エネルギーだけを真空に残して、ヒッグス場を励起するのである。

LHCはジュネーブ郊外にあるCERNで建設された一周27kmの大型加速器(図6トンネル内部と加速器)であり、光速の99.999997%ま

図7 ATLAS 検出器中心から外側に向かって、内部飛跡検出器（シリコン半導体）、ソレノイド磁石、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミュオン検出器、トロイド磁石が設置されている（提供：ATLASグループ）（Color online）

で加速した陽子同士を衝突させる。2012年は、エネルギー $E=4\text{TeV}$ （テラ電子ボルト）の陽子同士を衝突させる。

陽子は、加速器の中の二つのリングを反対向きに廻っているが、一周のうち4か所でリングを交差させて衝突が起きるようにしている。この4か所に検出器を配置して、衝突反応で出てくる粒子の種類・運動量を精密に測定し、どのような反応が起こったかを調べる。4つのうちATLAS検出器（図7）とCMS検出器の2つは、ヒッグス粒子を狙うライバルである。ATLAS検出器に日本から16研究機関約110名の研究者が参加しており、検出器の製作や、ヒッグス粒子探索競争で大きな貢献をした。

重心系エネルギー $4+4=8\text{TeV}$ で陽子同士を衝突させているが、陽子が直接素粒子反応にあずかるわけではなく、“パートン”と呼ばれる陽子を構成している素粒子（クォークやグルオンなど）が反応を行う。弱い力しか感じないう

えに、大きなエネルギーを担っているパートンは多くないので、ヒッグス粒子生成の反応はなかなかおきない。そこで、衝突頻度（ルミノシティ）を高める必要がある。2011+2012年には合わせて、約2500兆回も陽子と陽子を衝突させた。

5. ATLAS検出器（ヒッグス粒子の痕跡をとらえる）

ヒッグス粒子は、ヒッグス場、すなわち真空が励起した状態なので不安定である。 10^{-21} 秒ぐらいの短い時間で、粒子・反粒子に壊れてしまう（図5右）。どんな粒子対に壊れやすいかは、どれだけヒッグス場と強く結合するかによる。ヒッグス場との結合は質量に比例するので、重い粒子対に壊れやすい。ボトムクォーク対（58%）、 W^+W^- （20%）、グルオン対（9%）、 $\tau^+\tau^-$ （7%）、チャームクォーク対（3%）、 Z^0Z^0 （3%）、 $\gamma\gamma$ （0.2%）の7つ粒子対に崩壊するパ

ターンがある。(カッコで示した数字は質量が125 GeVの場合の崩壊分岐比)。どの崩壊パターンを探すかが研究者の腕のみせどころである。

直接ヒッグス粒子を捕まえることができないので、代わりに崩壊で放出された粒子対をとらえて、その運動量、エネルギーを測定する。そのベクトル和が崩壊前ヒッグス粒子の4次元運動量になり、その不変質量がヒッグスの質量になる。このようにヒッグス粒子を探索する。

崩壊で放出された粒子の種類、エネルギー・運動量を精密に測定する必要がある、ATLAS検出器がその役割を担っている。図7にATLAS検出器を示す。検出器の大きさは、直径22m, 長さ44m重さ7000tと大型である。何故こんなに大型になるかと言うと、同じ小さなサイズの検出素子でも、遠くにおいて測定すると、より細かく、より高い精度で測定できるからである。だから大型化しているのである。大きいばかりでなく、1億数千万個のセンサーの集合体である。図7のように絵で見ると、何も感じないかもしれないが、是非CERNを訪ねて実物を見ていただきたい。大きさに驚くばかりでなく、びっしりと高圧電源線、信号線、ガスの配管などが張り巡らされている。これを作り、運用しているだけでも、すごいと感動できる。

6. ついに発見

ヒッグス粒子以外の反応過程から同じ粒子対がでることも多く、これらはバックグラウンドとなる。LHCでは、反応しやすい陽子同士を衝突させているので圧倒的にバックグラウンドが多い。バックグラウンドが比較的少なく、なおかつ高い測定精度(測定精度が高いと、ヒッグス粒子の信号はその質量の狭い領域に集まるので、相対的にS/Nがよくなる。)が期待できるパターンが有利なので、 γ 線やレプトン(電子や μ 粒子)が最終状態であるような崩壊パターンが高感度になる。バックグラウンドまで加味して、どの崩壊パターンが、発見能力が高いかを並べると、ヒッグス粒子が125 GeV

の時は、(1)ヒッグス($H \rightarrow \gamma\gamma$) (2) $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ レプトン (3) $H \rightarrow WW \rightarrow 2$ レプトン+2ニュートリノ (4) $H \rightarrow \tau\tau$ (5) $H \rightarrow b\bar{b}$ の順になる。

世界中の研究者は、みんなヒッグス粒子を発見したい。だから協力して、LHCやATLAS・CMS検出器を開発した。これが国際協力である。しかし観測したデータの中から(2500兆回の衝突、データは10ペタバイトを遙かにこえる)、ヒッグス粒子を探すのは、国際競争である。みんな一番に発見したい。これが研究者のサガである。

私は、日本の研究を束ねる立場だったので、ヒッグス粒子の質量を120 GeVにヤマをはって(1) $H \rightarrow \gamma\gamma$ (2) $H \rightarrow WW \rightarrow 2$ レプトン+2ニュートリノ (3) $H \rightarrow \tau\tau$ の3つが一番先に発見できると踏んで、日本の全資源(人と計算機)をこの3つにつぎ込んだ。結果は、125 GeVで少しずれていたため、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ レプトンでの発見はできなかったが、 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow WW \rightarrow 2$ レプトン+2ニュートリノ, $H \rightarrow \tau\tau$ は日本が主要な成果をあげることができた。激しい国際競争の研究は、ヤマを張って、資源を集約しないといけない。これをやれないと必ず負ける。

図8 観測された事象の例： $H \rightarrow \gamma\gamma$ 事象の候補。中央の飛跡検出器で観測されている粒子は、エネルギーの低いヒッグス粒子生成とは無関係の粒子である(提供：ATLASグループ)(Color online)

図9 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 2光子の不変質量分布：黒実験データ（2011+2012年）赤実線（バックグラウンド+ヒッグスシグナル）、赤点線（バックグラウンド）、125 GeVの所に綺麗なピークが観測されている（提供：ATLASグループ）（Color online）

まず、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ を考える。図8に実際に観測された事象を示す。図7のATLAS検出器を真ん中で輪切りにしたものを横から見ている図である。中央が運動量測定装置であり、陽子の中のエネルギー低いパートン同士が衝突して、運動量の低い粒子が多数出ている（気にしないでいい）。その外側に光や電子をとらえる電磁カロリメータがある。5時と11時の方向の箇所に細長い塊が見えるのが、 γ 線が観測されていることを示している。このように γ 線2つが観測されている事象を約2500兆回の衝突の中から選んでくる。光子の方向とエネルギーを精密に測定する。

図9に $H \rightarrow \gamma\gamma$ の実験結果を示す。横軸は観測された二つの γ 線の4次元運動量から再構成した質量である。検出された二つの γ 線が一つの粒子の崩壊で生じている場合は、その粒子の質量に相当する位置に信号が生じる。一方、二つの γ 線がお互いに関係ない過程から出た場合、その不変質量はランダムになり連続分布のバックグラウンドを構成する。 γ 線のエネルギー測定精度が高いため、質量測定の分解能（ $\sigma = 1.7 \text{ GeV}$ ）が高く、バックグラウンドの連続分布の上に綺麗なピークになる。図に示すように、125 GeVにきれいなピークが観測され

図10 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{レプトン}$ ：4レプトンの不変質量分布：（黒点）実験データ2011+2012年、（赤色ヒストグラム）バックグラウンド、（灰色ヒストグラム）ヒッグスの期待される信号、データ125 GeVの所にピークが観測されており、ヒッグス粒子の予言とはほぼ一致している（提供：ATLASグループ）（Color online）

た。

たまたま、連続分布がふらついて、こんなピークのようにみえてしまうこともある。統計現象が怖いのは、研究者の皆さんなら痛感していることと思う。だから、違う方法で裏を

取らねばならない。図10に他の崩壊過程の探索結果として、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{レプトン}$ の結果を示す。Z粒子の質量は91 GeVなので、ヒッグス粒子の質量が125 GeVとすると、古典的にZ粒子2個に壊れるのは不可能であるが、Z粒子は寿命（崩壊幅 $2.5 \text{ GeV} \sim 10^{-23} \text{ 秒}$ ）が短く量子力学の効果で壊れることが可能である。Z粒子はいろいろな崩壊パターンがあるが、エネルギー測定精度が高い電子対かミューオン対に壊れたパターンを選び出す。この割合（それぞれ3%）がかなり少ないために、事象の数は減ってしまうが、質量測定の分解能（ $\sigma=3 \text{ GeV}$ ）が高く、ほとんどバックグラウンドがないため、きれいなピークが125 GeVに観測された。これでヒッグス粒子が発見された。

7. ヒッグス粒子と宇宙初期

17番目の素粒子が発見されて、何故そんなに盛り上がるのか？ 図4に示したように、ヒッグス粒子(場)は、新しい第3極なのである。これまでの素粒子（フェルミ粒子やゲージ粒子）とは何もかも違う。

質量の起源の解明がヒッグス粒子発見の大事な意義であるが、ヒッグス粒子発見の本当の意義は、「相転移を宇宙全体に応用（適用）」したことの初めての実験的な証拠である。相転移と真空のエネルギーによって宇宙が誕生・進化してきたと言う現代宇宙論の基幹をなすアイデアの初めての実験的な証拠が、このヒッグス場の発見である。

宇宙初期には何も詰まっていなかった、綺麗な真空にあったと考えられている。宇宙が冷却すると相転移を起こし、ヒッグス場のような場（インフラトン場と呼ばれている）が満ちたと考えている。この相転移で放出されるエネルギーで、ビッグバンが起こり、エネルギーと物質にみちた宇宙ができたと考えられている。

ヒッグス粒子の発見は、真空が特殊な状態にあり、そのことで素粒子に新たな性質が付加されたり、真空のエネルギーがインフレーション

やビッグバンのエネルギーの源になる（インフレーションやビッグバンの種は今回見つかったヒッグスではないが、アナロジーで考えられる）ことを示すのである。

真空に何か場がある。この場はエネルギーを持っている。力学や電磁気学で、エネルギー・ポテンシャルに、一定値を加えても何も起きず、差だけが大事だと教わった。ポテンシャルの差でいろいろな現象が起こる。しかし、重力では事情が異なる。エネルギーがあれば、時空が曲がるというのがアイシュタイン方程式である。宇宙一様の場合があって、それが相転移したり、エネルギーを持っているのだから、宇宙の時空に大きな影響を及ぼす。実は及ぼしていないことが全く不思議である。ヒッグス場のエネルギー密度は、(250 GeV)である。同様に推測されるインフラトンの密度は(10^{16} GeV)であるが、宇宙の曲がり方は、暗黒エネルギーの発見などが示すように(meV)なので50桁以上、インフラトンに至っては112桁の開きがある。場のエネルギーと重力(時空)の繋ぎの解明が今後の鍵になる。すなわち時空と真空のつながりがテーマになる⁴⁾。

8. ヒッグス粒子の兄貴分か？

LHCは2013, 14年の間に停止して加速器の性能を向上させて、2015年に再稼働した。衝突エネルギーを8 TeVから13 TeVに2倍近く増強している。エネルギーをあげると、より重い粒子まで生成することができるようになる。

2015年のパイロット実験で約300兆回陽子と陽子を衝突させてみた。いろいろな研究を行っているが、図8のヒッグス粒子を探した時のように、光二つを選び、不変質量を組んでみたのが図11である。750 GeVの所に何かピークのようなものが観測された。しかし、図9の時と違って、まだ統計的に不十分な状態で綺麗なピークとは言えない。これだけみると、 3.9σ で結構高いピークであるが、こんなふらつきはどこで起きててもよく、「どこでも効果(Look

図11 ATLAS実験 光二つの不変質量分布（2015年の約300兆回の衝突データ）。750 GeV付近に、弱いピークが示唆された（提供：ATLASグループ）（Color online）

Elsewhere Effect)」を考慮すると 2σ 程度である。100回やれば2,3度ぐらい起きてしまう程度である。真つ当な物理学者は、これでは、まだ平静のままである。しかし、同じような所に、CMSグループも、見えている。ATLASほどは綺麗でなく、2012年と2015年あわせて 3.4σ , LEEをいれると 1.6σ 程度ではある。また、ATLASの2012年の8 TeVのデータにもあるような（ 1.9σ ）感じに見えないこともない。この結果が、公表された2015年12月から世界中がヒートアップしている。

私も、日本の研究者を総動員して、ヒッグスの時のように、W粒子対に行っていないか、トップ対にいったいないか？本当に光2つだけなのか？多数の光に壊れているのでは？などいろいろな可能性を調べ上げている。まだ、何も裏をとれていない。

どんな可能性があるか？ まだただの統計的なふらつきの可能性も十分ある。神様は非情なさいころ遊びをすることもある。

もし、本当の現象だったら、1) 超対称性などが予言する「ヒッグスの兄貴分」の可能性が

ある。2) 別の可能性は、ヒッグス粒子は、素粒子ではなく複合粒子で、いろいろな状態の複合ヒッグスが見える可能性 3) この宇宙が四次元でなく、五次元以上でできている効果（余剰次元）など、いろいろ考えられている。すでに300以上の論文が発表され、さまざまな可能性が提案されている。

どうなるか？ 2016年には2500兆回の陽子・陽子衝突を予定している。この原稿が、世に出る頃には白黒ついていることと思う。統計的なふらつきとして消えてしまっても、「ああでもない、こうでもない」といろいろアイデアをだして調べるこの時間が本当に楽しい。実験屋さんになって、幸せに思う瞬間である。（追記：2016年の夏までに、1300兆回の陽子・陽子衝突を行い、そのデータの中には、ATLAS, CMS両グループとも、750 GeVの新粒子の兆候はなく、以前のデータにあったピークは、統計的なふらつきと考えられる。「統計の怖さ」を改めて実感した。）

文 献

- 1) 特集記事「LHC実験が始まる」, 日本物理学会誌, **62**, 907–948 (2007)。加速器・検出器・物理などをすべてを網羅してあります。
- 2) 浅井祥仁, ヒッグス粒子発見とその意味, 日本応用物理学会誌, **82**, 643–648 (2013)
- 3) 拙著「ヒッグス粒子の謎」(祥伝社新書, 2012) 量子力学・電磁気学を全く学んだことのない方は、こちらをどうぞ。
- 4) 拙著「LHCの物理：ヒッグス粒子発見とその後の展開（基本法則から読み解く物理学最前線）(共立出版, 2016) 量子力学・電磁気学を学んだことのある方は、こちらをどうぞ。

Abstract

Discovery of the Higgs Boson and Perspectives

Shoji ASAI[†]: Department of Physics, School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

The Higgs Boson was discovered at LHC (Large Hadron Collider) in 2012 and Theorists proposed BEH mechanize

won the Nobel Prize of Physics in 2013. Why the Higgs boson is so important? The Higgs boson is not ordinary elementary particles such as electron or photon, (composite matter or mediate force). The Higgs boson is a clear evidence that our vacuum is fulfilled with a strange field with weak charge. This field works as "the origin of mass" and

"origin of evolution of our Universe". Spontaneous change of the field makes phase transition of our Universe, In this article, I introduce "how to produce and detect the Higgs boson?" and also give the short introduction of Supersymmetry, which is the next main target of LHC.