

# ヒッグス粒子の物理から標準理論を超える新物理へ



研究ノート

兼村晋哉\*

From physics of the Higgs boson to new physics beyond the standard model

Key Words : Higgs boson, new physics, colliders, gravitational waves

## はじめに

万物の根源、すなわち物質の究極の構成要素は何かという問いは古くギリシャ時代に遡る。素粒子論はこの問いを引き継いで発展してきた。阪大(当時は大阪帝国大学)は湯川秀樹博士が中間子論を提唱し発展させた所であり近代素粒子論発祥の地の一つとして知られている。

ビッグバン宇宙論によると宇宙の始まりは超高温、超高エネルギー状態であり、万物の根源たる素粒子が跋扈する世界だった。宇宙の成り立ちと発展を識るには、素粒子とその間に働く力の根本的な理解が不可欠である。

現在、われわれには標準理論と呼ばれる実験的に成功した理論がある。この理論で重要な役割を果たす「電弱対称性の自発的破れ」を引き起こすヒッグス粒子が2012年に発見されたことにより、標準理論は確立した。

しかし標準理論には種々の問題がある。より美しい基礎理論が背後に潜んでいるはずだ。実験的にも標準理論の枠内では説明ができないニュートリノ振動、バリオン数非対称性、暗黒物質、インフレーション等の諸問題が知られている。これらの諸問題を解決する新しい理論の構築とその検証が今日の素粒子論の大きな目標である。

## 標準理論とヒッグス粒子の発見

物質の究極の構成要素としてクォークやレプトンという素粒子がある。それらに働く力はゲージ場により媒介される(電磁力の媒介ゲージ場は光子)。今の所、標準理論は素粒子の振る舞いを記述する最良の理論である<sup>1)</sup>。

標準理論は二本の柱からなる。第一の柱は素粒子の相互作用のあり方を決める「ゲージ原理」である。理論に課した局所的ゲージ対称性によって相互作用の有り様がかっちり決まるという理論の美しい部分である。1956年に阪大理学部教授の故内山龍雄博士が世界に先駆けて提唱したように重力を含む基礎的な力は全てゲージ相互作用である。(重力は他の力に比べて無視できるので標準理論には含まれない。)標準理論のこの第一の柱は徹底的に実験で検証され20世紀中には確立した。

ゲージ原理は相互作用を美しく説明するが素粒子の質量を説明できない。電子は $0.5 \text{ MeV}/c^2$ の質量を持ち、弱い相互作用を媒介する弱ゲージ場は $100 \text{ GeV}/c^2$ 近い質量があるが、ゲージ理論ではこれらは全て質量ゼロとなる。そこで第二の柱「電弱対称性の自発的破れ」が導入された<sup>2)</sup>。これは理論の作用積分がゲージ対称性を保ちゲージ原理で相互作用が決まる一方で、真空(基底状態)において電弱ゲージ対称性が破れているとする考え方である。電弱ゲージ変換に共変なスカラー場がゼロでない真空期待値をとることで対称性が自発的に破れ、真空期待値から素粒子が質量を獲得できる(ヒッグス機構)。

対称性の自発的破れは、故南部陽一郎博士(阪大特別栄誉教授)が導入した素粒子の質量を説明するための鍵となるアイデアだが、ゲージ原理と違って様々な不定性がある。例えばヒッグス場は素スカラー場である必要はなく、未知の粒子による複合場でも構わない。またヒッグス場の個数を規定する原理



\* Shinya KANEMURA

1966年9月生まれ  
大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻  
攻博士後期課程(1996年)  
現在、大阪大学大学院理学研究科 物理学専攻 教授 理学博士  
TEL : 06-6850-5340  
FAX : 06-6850-5537  
E-mail : kanemu@phys.sci.osaka-u.ac.jp

も無い。そこで標準理論では最も単純なアイソスピン2重項スカラー場1個（ヒッグス場）の模型を仮定している。ヒッグス場の真空期待値の周りの量子ゆらぎがヒッグス粒子である。

ヒッグス粒子は、標準理論が提唱されて以来長らく探索が続けられてきた。ようやく2012年に欧州原子核研究機構（CERN）のLHC実験で2光子終状態に現れた共鳴から新粒子の存在が確認され、その後の慎重な解析によりこの新粒子がヒッグス粒子であると同定された<sup>3)</sup>。

ヒッグス粒子の発見によって標準理論の第二の柱も確かに在ることが実証された。LHC実験ではヒッグス粒子以外に新粒子は一切発見されておらず、標準理論は現在実験で到達しているエネルギー領域までの物理を記述する理論として確固たる地位を占めるに至った。

### ヒッグスセクタの謎と未解決問題

標準理論はその成功にもかかわらず暫定的な有効理論であり遅かれ早かれより根本的な基礎理論に置き換わると考えられている。標準理論には重力が含まれていない、相互作用が統一されていない、クォークやレプトンがなぜ3世代あるのか説明されない等の問題があるためである。

さらに標準理論のヒッグスセクターにも問題がある。前述したようにヒッグスセクターの構造を決める原理がない。ヒッグス場がどのような表現で何個あるべきか、ヒッグスポテンシャルがどのような機構によりワインボトル型になるのか等は理論からは決まらない。背後にこれらを決める未知の美しい原理が潜んでいるはずである。

標準理論には階層性問題と呼ばれる問題もある。ヒッグス場の質量の量子補正を計算すると2次の発散が現れる。標準理論はくりこみ可能なのでこの2次発散はくりこめるが、それはプランク質量（ $10^{18}$  GeV/c<sup>2</sup>）程度の巨大な量の引き算で100 GeV/c<sup>2</sup>程度の質量を得ることに対応し、極めて不自然で解消すべき問題だというのである。

さらにすでに述べたようにニュートリノ振動や物質反物質非対称性（バリオン数生成問題）、暗黒物質等、標準理論が提唱されてから長い年月の間に様々な新しい現象の存在が明らかになった。標準理論の枠内ではこれらの現象は何一つ説明できないことが

分かっている。

### 標準理論を超える新物理学のシナリオ

階層性問題の解消を目標に様々なアイデアが提案されてきた。その代表は「超対称性」（ボソンとフェルミオンの対称性）や複合ヒッグス場による「動的対称性の破れ」である。これらに基づく理論ではヒッグスセクターの構造が規定される。例えば超対称標準理論ではヒッグス2重項場が2個あるヒッグスセクターが予言される。

超対称性模型の場合、階層性問題を解決する条件の下では標準理論的なヒッグス粒子の質量は大体120 GeV/c<sup>2</sup>以下と予言された<sup>4)</sup>。一方で動的対称性の破れの模型ではヒッグス粒子は数100 GeV/c<sup>2</sup>よりも重い。発見されたヒッグス粒子の質量は皮肉にも中間の125 GeV/c<sup>2</sup>であり、どちらの理論もそのままではこれを説明できない。

超対称模型では理論に含まれる超対称パートナー粒子が数10 TeV程度に重いとヒッグス質量125 GeV/c<sup>2</sup>を説明できるがこれでは階層性問題を解決したことにならない。しかしこの重い超対称粒子というシナリオは、LHCで新粒子が一切発見されていない事実と符合している。

理論が間違っているのか、階層性問題に対する考え方に問題があるのか、現状を克服するためには何か新しい理論のアイデアなりさらなる実験からのインプットが必要である。特に未解明のヒッグスセクターの形を実験で決定し、そこから新物理に迫る方法が重要になる。

### 拡張されたヒッグスセクターの物理

ヒッグス粒子は発見されたがヒッグスセクターの構造と性質は未知である。ヒッグススカラー場が複数ある場合を考えると、単純なヒッグス場1個の標準理論には無い様々な興味深い物理を考えることが可能になる。例えば追加された新スカラー粒子は暗黒物質候補となり得る。また拡張されたヒッグスセクターには小林益川行列以外の新しいCPの破れの源が含まれる。さらに標準理論では電弱相転移はクロスオーバーだが、拡張ヒッグスセクターでは強い1次的相転移になり得る。新しいCPの破れや強い1次的相転移によってバリオン数生成の謎を解く有力なシナリオ「電弱バリオン数生成」が可能になる<sup>5)</sup>。

このようにヒッグスセクターの形（ヒッグス場の個数や相互作用等の性質）に関する知識を得ることは、階層性問題をとく新物理模型や未解決の現象を説明する新模型を洞察する上で決定的に重要であり、1個目のヒッグス場が見つかった今、第2のヒッグス場が存在してヒッグスセクターが拡張されているかに注目が集まっている。

**実験での検証に向けて**

第2のヒッグス粒子や未知の新粒子を求めて、LHC 実験は現在の Run2 から将来の Run3 へ、そして陽子ビームの衝突頻度を約 10 倍に増強する HL-LHC 実験 (2028 ~) へと進化しながら探索が続けられるだろう。

ヒッグスセクターを探求するもう一つの方法として、粒子の生成や崩壊現象の精密測定により標準理論の予言からのずれを調べる間接的な方法がある。特に発見されたヒッグス粒子の様々な生成、崩壊過程を精密に測定して新しい場の混合や量子効果による標準理論からのずれを検出できれば、そのずれのパターンから真のヒッグスセクターの構造と性質を明らかにすることができる<sup>6)</sup>。そこから標準理論を超える新物理に迫ることができる。

LHC 実験は陽子と陽子を 13-14TeV のエネルギーで衝突させるハドロンコライダーなので、大質量の新粒子の発見には適しているが、大きな QCD バックグラウンドや運動学的制約等から精密測定には限界がある。計画中の国際リニアコライダー (ILC) では LHC に比べてはるかに精密な測定が可能となる。ILC は偏極させた電子と陽電子を 250 GeV で衝突させる線形加速器である<sup>7)</sup>。実現すれば 2030 年代には実験が始まる。ILC におけるヒッグス粒子 h の生成過程  $e^+e^- \rightarrow Z h$  の断面積はエネルギー 250 GeV で最大になり、数十万個という大量のヒッグス粒子が作られるので、結合定数は 1% 程度以上の精度で決定できる。ILC は標準理論からのずれを探る上で決め手となる役割を果たす。(HL-) LHC と ILC は互いに相補的であり、両者が同時期に実施されることで、大きな相乗効果が期待できる。

最後に、重力波という加速器実験とは全く異なる新しいヒッグスセクターの検証手段について述べる。重力波は 2016 年に LIGO により初めて直接検出さ

れた。これはブラックホール連星の合体で発生した重力波である。その後ブラックホール連星や中性子連星からの重力波が何例も発見され、重力波の詳細からブラックホールや中性子星の知見が得られる重力波天文学の時代が拓かれた。

重力波は天体現象のみならずビッグバン直後の初期宇宙の現象を探究することにも利用できる。電弱バリオン数生成のシナリオが要求するように電弱相転移が強い 1 次的相転移であれば、相転移の際には対称性の破れた真空の泡が多数発生し互いに衝突する。その時特徴のあるスペクトルの重力波が発生する。この重力波はミリヘルツからデシヘルツ領域の振動数を持つ。この振動数帯の重力波は地上干渉計では検出できないが、2034 年から始まる LISA 実験や DECIGO 計画等の宇宙における重力波実験で検出できる。1 次的電弱相転移由来の重力波が発見されればヒッグスポテンシャルに関する重大な知見が得られ、バリオン数生成の謎に大きく迫ることができる<sup>8)</sup>。

一つだけ具体例を示そう。標準理論に一重項スカラー場が 1 個追加されたモデルを考えると、電弱バリオン数生成が要求する強い一次的相転移が可能になる。発生した重力波は LISA/DECIGO による重力波実験でサーベイできる。そのスペクトルの詳細からこのモデルを検証することができる。さらに強

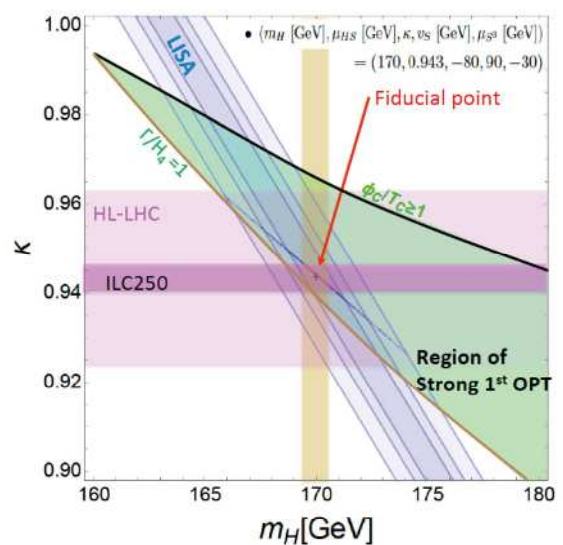


図1：緑は強い一次的相転移が生じる領域。HL-LHC での第2のヒッグス粒子 H (質量  $m_H$ ) の直接探索 (黄)、ILC でのヒッグス結合定数  $\kappa$  の精密測定 (マゼンタ)、LISA の重力波実験 (青) を用いて電弱相転移を立体的に検証できる。

い1次相転移は2つのヒッグス場の混合効果によって生じるので、ヒッグス粒子の他の粒子との結合定数( $\kappa$ )や未発見の第2のヒッグス場Hの質量( $m_H$ )に制限を与えるから、HL-LHC実験におけるHの直接探索、ILCにおける結合定数 $\kappa$ の精密測定、そしてLISA/DECIGOでの重力波スペクトルの測定によって、モデルを立体的に検証することができる<sup>9)</sup>(図1)。

### おわりに

ヒッグスセクターは標準理論を超える新物理に迫る鍵である。2030-40年代に実施される3つの実験、すなわちHL-LHC実験で継続される新粒子の直接探索、ILC実験における超精密測定、そしてLISA/DECIGOの重力波実験を用いた電弱相転移の検証には、素晴らしい相乗効果がある。ヒッグス解明の黄金時代の到来に向けて、多くの研究が急ピッチで展開されているところである。

### 参考文献

- 1) S. L. Glashow, Nucl. Phys. 22 (1961) 579; S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264.
- 2) F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Lett. 13 (1964); P. W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132.
- 3) G. Aad, et al., Phys. Lett. B 716 (2012) 1; S. Chatrchyan, et al., *ibid.* 716 (2012) 30.
- 4) Y. Okada, M. Yamaguchi and T. Yanagida, Prog. Theor. Phys. 85 (1991) 1.
- 5) A. D. Sakharov, Eksp. Theor. Fiz. 5 (1967) 32.
- 6) S. Kanemura, K. Tsumura, K. Yagyu and H. Yokoya, Phys. Rev. D 90 (2014) 075001.
- 7) H. Baer et al., The International Linear Collider Technical Design Report-Volume 2.
- 8) P. A. Seoane, et al., [eLISA Collaboration], arXiv:1305.5720
- 9) K. Hashino, M. Kakizaki, S. Kanemura, P. Ko and T. Matsui, Phys. Lett. B 766, (2017) 49.

