

素粒子の世界から宇宙へ



研究室紹介

細谷 裕*

From Particle Physics to the Universe

Key Words : particle physics, Higgs boson, extra dimensions, dark matter

1. 私たちの研究室

自然界を構成する基本物質は何なのか、それらはお互いにどのように相互作用しあうのか、見えない基本粒子をどのようにして見るのか、隠れた力をどのように断定するのか、自然現象、宇宙現象はすべて理解できるのか、宇宙の誕生から今日までの歴史は説明できるのか、素粒子物理学はこれらの問いに答えます。私たちの研究室もしく、これらの問いかけを追いかけしています。

私たちの研究室は、豊中キャンパス、理学研究科物理学専攻の建物H棟の7階にあります。典型的に、大学の研究室のユニットは教授+准教授+助教+研究員+大学院生で構成されますが、素粒子論研究室は3つのユニット（東島研究室、大野木研究室、細谷研究室）が合体して一丸になって教育研究活動に従事しています。30人以上の大所帯です。

2. 法則を探求する

現在の素粒子の標準理論によると、自然界の基本構成粒子はクォークとレプトンであり、少なくとも5つの相互作用があります。その相互作用とは、重力、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、それにヒッグス相互作用で、最初の4つは直接的に確認されていますが、ヒッグス相互作用だけはまだよくわかっていません。このヒッグス相互作用とそれを

媒介するヒッグスポソンを直接発見、検証する実験が今、スイスのジュネーブ近郊にある研究所 CERN の大加速器 LHC で始まっています。今後5年の物理の中心課題の一つです。

では、現在の標準理論と言われるものは、それで最終のものでしょうか。答えは、多分に NO です。私は、標準理論のほころびがヒッグス粒子の部分に最初にできると推測しています。様々な可能性がある中で、私はヒッグスポソンがゲージ場と高次元時空で統一される可能性も探っています。良く見れば、我々の時空には5次元目、6次元目と言った余剰次元があり、ゆくゆくは、素粒子がひも状になっているのがわかってくるのではないかと。このような描像をフィクションとしてではなく、サイエンスとして確認する、その手がかりが今、見つかるかもしれないのです。

3. 全ては簡単に、そして美しく

自然の根源を記述する物理の法則は簡単明瞭です。これは、我々物理屋の信念ですが、これこそ、我々を物理へ、物理的思考へ駆り立てる原動力です。物理の法則を記述するには「言葉」が必要です。それは、数学を使った表現です。誰もがわかる訳ではありませんが、「基本言語」さえマスターすれば、物理法則はいたって簡単になります。アインシュタインはそれを「美しい」と表現しました。

すくなくとも4つの力があることが確認されています。強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、そして重力です。このうち、電磁相互作用と弱い相互作用は統合されて電弱相互作用となります。大統一理論では強い相互作用も統合されます。重力をも組み入れるには、超弦理論が必要だと考えられています。

強い相互作用はQCD（量子色力学）という



* Yutaka HOSOTANI

1951年12月生
 東京大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程（1979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 物理学
 TEL : 06-6850-5340
 FAX : 06-6850-5340
 E-mail : hosotani@phys.sci.osaka-u.ac.jp

SU(3) ゲージ理論で記述されます。これに対し、電弱相互作用はSU(2)xU(1) ゲージ理論で記述されることが、ほぼ検証されています。19世紀後半より、電磁相互作用がマクスウェル理論というU(1) ゲージ理論で記述されることは良く知られていました。QCD や電弱統一理論はこのマクスウェル理論を拡張したものになっています。

4. 力の統合とヒッグスポゾン

電弱統一理論はほぼ確立されていますが、一つ重要な粒子がまだ見つかっていません。それが、ヒッグスポゾンです。何故、ヒッグスポゾンが必要なのでしょう。

力の統合、つまり異なる相互作用の統一は、素粒子論の世界では、隠れた対称性を見つけることによって成し遂げられます。もう少し具体的にいうと、電磁相互作用は光子(光の粒子)によって媒介されます。この光子は、ゼロ質量の粒子で、いつも光速で伝播します。それに対し、弱い相互作用はWボゾンとZボゾンによって媒介されます。WボゾンとZボゾンはそれぞれ陽子の90倍、100倍ほどの質量を持つ重い粒子です。電磁相互作用と弱い相互作用を統一するという事は、もともと、WボゾンとZボゾンは光子と同じようにゼロ質量であっ

たが、それがダイナミックスのおかげで大きな質量を持った粒子になると考えます。対称性の言葉でいうと、もともとSU(2)xU(1)の対称性があったが、それが、U(1)対称性にまで「自発的に破れる」と考えるのです。標準理論ではこの対称性の自発的破れは「ヒッグスポゾン」によって引き起こされると想定されています。だから、ヒッグスポゾンが必要なのです。

5. 真空は空っぽでない

このとき、ヒッグスポゾンは宇宙にどっかり海のように埋まっていると考えねばなりません。つまり、真空は空っぽではないのです。素粒子の世界の真空は、媒質であって、この媒質が対称性を自発的に破っているのです。

力の統一、対称性の自発的破れ、そして真空が空っぽでないこと、これらの概念、場の理論による記述、自然界における実現を明らかにされたのが南部陽一郎先生で、2008年、ノーベル物理学賞を受賞されました。南部先生は招へい教授として、毎年数ヶ月、私たちの研究室におられます。図1の写真は南部先生が2009年5月に大阪大学理学研究科でノーベル賞受賞記念講演をなさった時、研究室で撮った集合写真です。



[図 1] 南部先生ノーベル賞受賞記念講演会(大阪大学理学研究科2009年5月13日)のうちに研究室にて

6. 次の鍵はヒッグスポゾン

上に述べた電弱統一理論はゲージ相互作用の部分が高い精度で既に検証されています。しかし、統一の要となるヒッグスポゾンはまだ見つかっていません。このヒッグスポゾンを発見しようという実験がスイスにある加速器 LHC で始まっているのです。ヒッグスポゾンの発見は統一理論の確立の上で必須のことです。

しかしながら、現在の標準理論におけるヒッグスポゾンには、いろいろと不自然な点があります。光子、W ボゾン、Z ボゾンに比べると任意性が多く、基本となる原理がないのです。本当に標準理論は正しいでしょうか。ヒッグスポゾンを見つけ、その性質を調べることは現在物理学の最重要課題の一つです。

7. 我々の時空に 5 次元目がある

私は、我々の時空は 4 次元だけでなく、5 次元目があり、ヒッグスポゾンは実は光子、W ボゾン、Z ボゾンの仲間、ゲージボゾンの 5 次元目成分そのものであり、ゲージ相互作用の結果、対称性が自発的に破れるという理論を 1983 年に発表しました。当時は、どのように左右非対称な「カイラル」フェルミオンをいれたらいいのかわからなかったのですが、20 年の後、多くの研究者の努力により、現実的な理論を書き下すことができるようになりました。それが、ゲージヒッグス統合理論です。

観測実験からの制約を考慮して作りあげたものが $SO(5) \times U(1)$ ゲージヒッグス統合理論です。驚くべきことに、この理論から、ゲージ相互作用の部分は標準理論とほぼ同じだが、ヒッグスポゾンの部分は、標準理論から大きくずれ、実験観測で確かめることができるということがわかります。

8. 謎の 2 粒子は同じ? 暗黒物質 = ヒッグスポゾン

理論を詳細に調べていく過程で、2008 年から 2009 年にかけて、私たちは驚くべきことを発見しました。なんと、ヒッグスポゾンが安定になるのです。これは、4 次元の理論ではありえないことですが、高次元ゲージ理論では自然に起こりうるのです。対称性を自発的に破り、万物に質量を与えながら、同時に安定な粒子になる。今まで、誰も気がつかなか

った可能性が実現されるのです。

もしそうだとすれば、LHC の実験のやり方も変えねばなりません。ヒッグスポゾンが安定ならば、LHC でヒッグスポゾンを生成しても、崩壊しないため、実験的には今のやり方では「見えない」からです。

もう一つ、重要な帰結があります。現在の宇宙には暗黒物質が満ちています。全エネルギーのうち我々が知っている物質で説明できるのは 4% です。23% は暗黒物質で、残りは暗黒エネルギーといわれるもので説明されます。銀河内の星の運動や、重力レンズ効果、銀河生成のメカニズム、そして WMAP による宇宙背景輻射の観測から、暗黒物質の存在は疑う余地はありません。でも、何が正体なのかわかっていないのです。

ヒッグスポゾンと暗黒物質、この二つの謎の粒子が実は同じものであるという予言が私のゲージヒッグス統合理論からでるのです。これから 5 年、10 年の観測実験が待ち遠しいです。

9. 素粒子は 10 次元時空のひも

我々の時空は 4 次元でなく、5 次元目、6 次元目があるという、びっくりする人もいるかもしれませんが、これはお話ではありません。重力の理論をミクロな世界まで適用できるようにしようとすると、どうも、10 次元時空での超弦理論に行き着くのです。素粒子は、実は、ひも状で、時空の次元が 10 でないと整合性のある理論が作れないのです。素粒子論研究室の中の同僚には超弦理論の研究に打ち込んでいる人が何人もいます。

私が研究している 5 次元のゲージヒッグス統合理論も、最終理論ではなく、ゆくゆくは超弦理論に組み入れられると考えています。実験的には、まず、ゲージヒッグス統合理論の予言を確かめるところから出発せねばなりません。

10. 研究室は自由たれ

フロンティアの研究には挑戦が必要です。他の人にできないことをする能力と執念が必要です。学生も教員も自由な発想が求められます。私たちの研究室では、教員、研究員、学生がそれぞれ、独自に、或は、小グループを組んで、自由に研究活動に従事しています。