

大阪科学・大学記者クラブ 御中
(同時提供先：文部科学記者会、科学記者会)

2024年6月12日
大阪公立大学

素粒子の3世代構造が自然に統一される 6次元ゲージ・ヒッグス大統一理論を発見

<ポイント>

- ◇素粒子の3世代が統一された6次元ゲージ・ヒッグス大統一理論^{*1}から、5次元ゲージ・ヒッグス大統一理論を導く理論を探索
- ◇SU(14)^{*2}対称性により、物質粒子の3世代構造が自然に実現されることを発見

<概要>

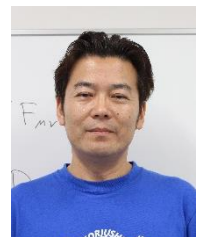
物質のもっとも小さい構成要素である素粒子と、その相互作用についての研究は、素粒子論と呼ばれ、宇宙の起源を解き明かそうと多くの研究が行われています。これまでに、17種類の素粒子が発見され、「標準模型」^{*3}が完成しています。現在は、強い力、電磁気力、弱い力の3つの相互作用（ゲージ粒子）を1つにまとめて考える「大統一理論」^{*4}の研究や、5次元以上の空間においてヒッグス粒子^{*5}を統一的に記述する「ゲージ・ヒッグス大統一理論」の研究も進められています。また、標準模型において、物質をつくる素粒子が質量の違いにより3世代構造になるメカニズムについても探求されています。

大阪公立大学大学院理学研究科 名古 竜二郎 大学院生（博士前期課程2年）、丸 信人教授らの研究グループは、6次元のゲージ・ヒッグス大統一理論から、5次元のゲージ・ヒッグス大統一理論を導く理論を探索し、SU(14)という非常に大きな対称性を持つ理論から、3世代構造が自然に実現されることを発見しました。3つの相互作用、3世代の物質粒子およびヒッグス粒子を統一的に記述する6次元ゲージ・ヒッグス大統一理論は、世界で唯一の極めて独創的な理論です。物質粒子の世代構造の起源について、さらに理解が深まることが期待されます。



本成果は、2024年6月7日に「Physical Review D」にオンライン掲載されました。

以前から取り組みたかった課題「世代の統一」について研究でき、第一歩となる成果を出せたことに満足しています。共同研究者の大学院生が主要な結果を発見したことは、何よりも素晴らしいです。今後は、実験データを説明・予言できる、さらに現実的な理論の構築を目指します。



丸 信人教授

<研究の背景>

素粒子論は、分割不可能な基本粒子（素粒子）の存在とその素粒子が受ける相互作用の基本法則について明らかにする研究です。現在までのところ、クォーク^{※6}とレプトン^{※7}と呼ばれる基本粒子と、強い相互作用^{※8}・弱い相互作用^{※9}・電磁相互作用の3つの相互作用を媒介するゲージ粒子と、素粒子に質量を与えるヒッグス粒子が素粒子として知られています。これらの素粒子と3つの相互作用は「標準模型」に記述されており、実験データを矛盾なく説明しています。しかし、素粒子の数が17種類、その内に相互作用が3種類あることは、より統一的な理論の観点から考えると複雑です。1つの素粒子、1つの相互作用で記述することが期待されている究極の統一理論の構築が、素粒子論研究における重要な研究テーマの1つです。

3つの相互作用およびクォーク・レプトンを統一的に記述する大統一理論は従来から研究されており、水素の原子核である陽子が崩壊する現象が代表的な予言として、岐阜県神岡鉱山に建設されたスーパーカミオカンデにおいて探索されています。一方、5次元以上の理論に拡張することによって、ヒッグス粒子も統一的に記述するゲージ・ヒッグス大統一理論を本研究グループは研究しており、より大きな統一理論の構築を追求しています。

また、標準模型の未解決問題の1つに「世代の謎」があります。クォークとレプトンが質量の違いにより3つの繰り返し（3世代）構造を持っており、なぜ3世代構造なのか解明されていません。

<研究の内容>

本研究では、3世代構造を内包する大きな対称性を持つ6次元ゲージ・ヒッグス大統一理論から出発し、余分な空間を1つ丸めた後に、3世代のクォーク・レプトンを過不足なく含む5次元ゲージ・ヒッグス大統一理論を導く理論を探索しました。その結果、SU(14)という非常に大きな対称性を持つ理論から、3世代構造が自然に実現されることを発見しました。3つの相互作用、3世代クォーク・レプトンおよびヒッグス粒子を統一的に記述する6次元ゲージ・ヒッグス大統一理論は、現時点では世界で唯一の理論であり、極めて独創的です。クォーク・レプトン世代構造の起源について、さらに深く理解できると考えられます。

<期待される効果・今後の展開>

本結果により、唯一残された相互作用である重力を含めた更なる統一理論構築へのヒントを提供することが期待されます。また、究極理論の最有力候補である弦理論^{※10}から導かれる可能性に新たな道筋を開いたこととなります。

今後は、今回発見した6次元理論を用いて、素粒子標準模型では計算できないクォーク・レプトンの質量に関する特徴的なパターンや、大統一理論の予言である陽子崩壊の主崩壊モードの予言について研究を進めます。また、本成果の6次元理論では、3世代のクォーク・レプトンを導く素粒子が複数含まれるため、より少ない素粒子から3世代構造が導かれるシンプルな理論を構築していきます。

<用語解説>

- ※1 ゲージ・ヒッグス大統一理論：大統一理論にヒッグス粒子も含め、統一的に記述する高次元理論。
- ※2 SU(14)：14次元特殊ユニタリー群。14次元複素ベクトルの長さを変えない対称性。
- ※3 標準模型：素粒子（クォーク・レプトン）と3つの相互作用（強い力、電磁気力、弱い力）を記述する理論。
- ※4 大統一理論：強い力、電磁気力、弱い力の3つの相互作用を1つの相互作用として、クォーク・レプトンをより少ない素粒子として統一的に記述する理論。
- ※5 ヒッグス粒子：標準模型で用いられるヒッグス機構において、質量の起源として作用する粒子。
- ※6 クォーク：原子核を形成する陽子や中性子を構成する6種類の素粒子の総称。

- ※7 レプトン：電子やニュートリノなどの 6 種類の素粒子の総称。クォークとともに物質の基本的な構成要素となる。
- ※8 強い相互作用：原子核を構成する陽子や中性子にクォークを閉じ込める力を引き起こす相互作用。
- ※9 弱い相互作用： β 崩壊に代表される原子核を変える反応を引き起こす相互作用。
- ※10 弦理論：分割不可能な基本構成単位が粒子でなく弦と考える理論。全ての素粒子、相互作用を弦の振動で記述する。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Physical Review D

【論文名】 Attempt at constructing a model of grand gauge-Higgs unification with family unification

【著者】 Nobuhito Maru and Ryujiro Nago

【掲載 URL】 <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.115005>

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院理学研究科

教授 丸 信人（まる のぶひと）

TEL : 06-6605-2539

E-mail : nmaru@omu.ac.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課

担当：谷

TEL : 06-6605-3411

E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp