

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)



2023年3月8日
大阪公立大学

素粒子ニュートリノの謎にランダム行列理論で迫る！

<ポイント>

- ◇素粒子物理学者の多くが注目：レプトンの特異的な「世代間混合の大きさ」の解明へ。
- ◇素粒子物理に「数学理論」を用いた画期的な手法で、本現象の説明に新展開！

<概要>

すべてのものは細かく砕いていくと最終的には「素粒子」になります。素粒子は現時点で12種類あり、クォーク（6種類）とレプトン（6種類）に分けられます。また、それぞれ質量だけが異なる3回のコピー構造（3世代構造）をとります（図1）。

大阪公立大学大学院 理学研究科 波場 直之教授らの研究グループは、レプトンに属しているニュートリノの質量行列の各要素を解析し、レプトンの世代間混合^{*1}が大きくなることを理論的に示しました。さらに、3世代のニュートリノ質量の2乗差計算が、タイプ1シーソー機構^{*2}の場合の実験結果とほぼ一致する理由を、

数学のランダム行列理論を用いることで、現段階で、でき得る限り証明できました。

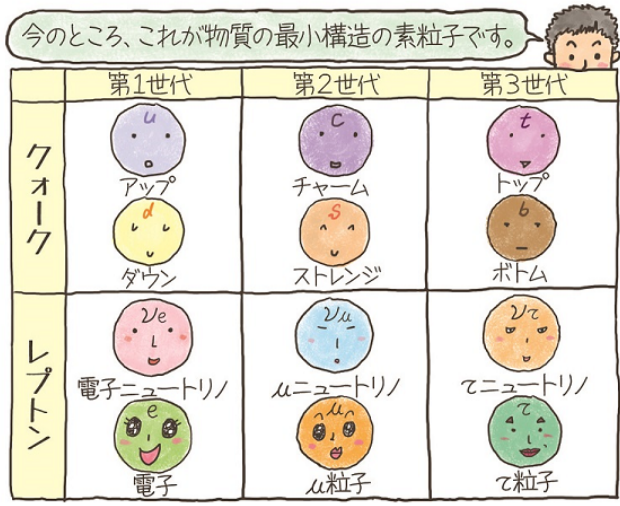
本研究成果は、未だ謎の多い素粒子論研究のさらなる発展に貢献することが期待できます。

本研究成果は、2023年1月19日に国際学術誌「Progress of Theoretical and Experimental Physics」にオンライン掲載されました。

素粒子の性質を明らかにすること、すなわちミクロの世界の探求は、宇宙の探求、ひいては我々がどこから来たのかという壮大なテーマに繋がります。標準模型の謎の先には、新しい物理の世界が広がっているはずです！
ノーベル賞を受賞された恩師・南部陽一郎先生を追いかけ、このエキサイティングな挑戦を続けていきます。



波場 直之教授



コダマアキコさん作画「素粒子の探究で宇宙がみえてくる(丸善出版)波場直之著」より

図1: 物質の素粒子イメージ図

<研究の背景>

すべてのものは、どんどん細かく砕いていくと最終的にはこれ以上分解できない粒子となり、これを「素粒子」といいます。素粒子物理学の理論的な枠組みである「標準模型^{*3}」は、素粒子実験で得られる現象をほぼ全て説明することができます。しかし、標準模型には未解決の謎が多くあることから、標準模型の背後には「新しい物理」理論があるとも言われており、その発見に世界中の研究者が挑戦を続けています。

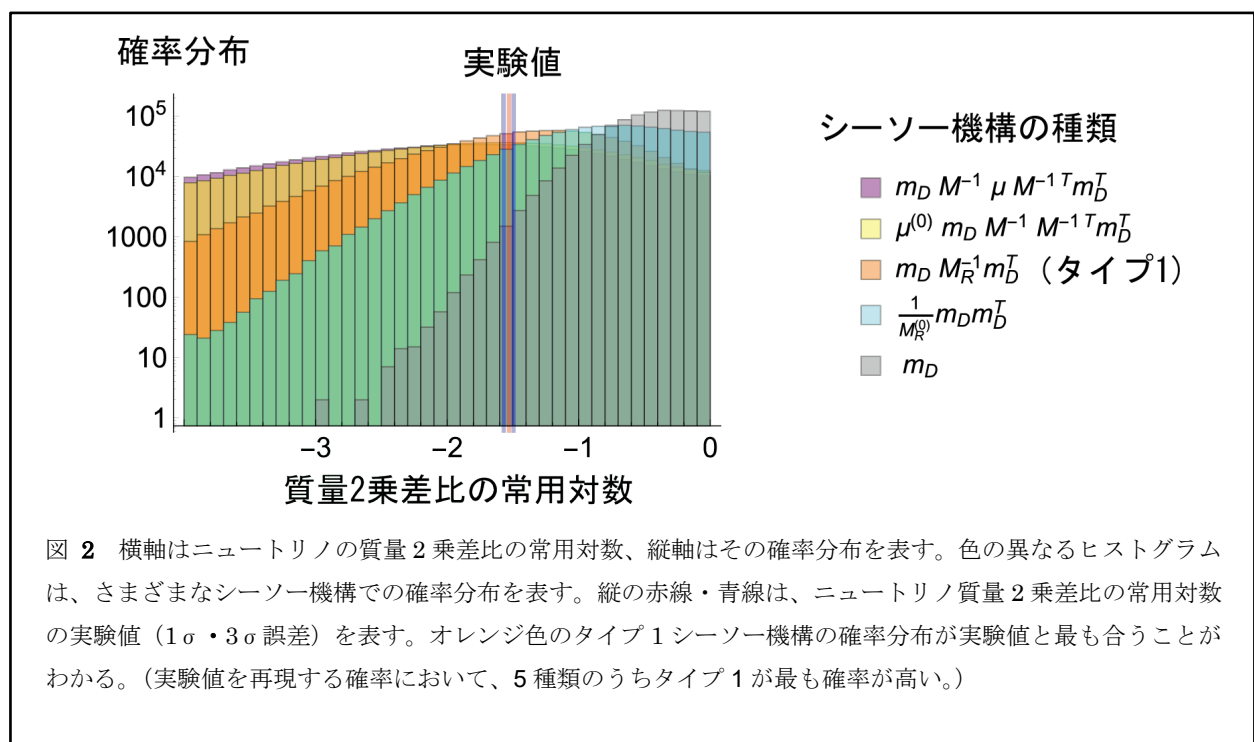
素粒子は現時点で12種類あり、クォーク(6種類)とレプトン(6種類)に分けられます。さらに、クォークとレプトンには質量だけが異なる3回のコピー構造があり、これを世代と呼びます。ニュートリノ以外のクォークとレプトンは、第1世代、第2世代、第3世代の順番に質量が重くなっています。ニュートリノだけは、他の素粒子に比べて非常に軽く、世代間の質量差も小さいという特徴があります。

<研究の内容>

標準模型では、3世代あるニュートリノの質量は 3×3 の行列で表されます。ニュートリノは他の素粒子に比べて世代ごとの質量差が少ないことが分かっていることから、本研究チームは、「ニュートリノは世代間で質量がおおむね等しい」という原理があると考え、ニュートリノ質量行列の各要素をランダムに振り分けて解析しました。

解析の結果、レプトンの世代間混合が大きくなることが明らかになりました。これは本研究チームのメンバーが以前に行った研究結果と一致します。また、タイプ1シーソー機構が働くとした場合、3世代のニュートリノの質量の2乗差が実験結果とほぼ一致することが、研究成果(N. Haba and H. Murayama, Phys. Rev. D 63 (2001) 053010)にて提案されていましたが、その理由は明らかになっていませんでした。

そこで本研究では、タイプ1シーソー機構以外のニュートリノ質量行列についても検討を行い、3世代のニュートリノの質量の2乗差を計算したところ、タイプ1シーソー機構の場合が実験と最も合うことが明らかになりました(図2)。さらに、数学のランダム行列理論を用いて、その理由を现阶段ででき得る限り証明しました。今後、ランダム行列理論の発展により、厳密に証明されることが期待されます。



<期待される効果・今後の展開>

本研究では、ニュートリノ質量の階層性を、ランダム行列理論を用いて数学的に説明できることを明らかにしました。しかし、この証明は数学的に完全ではなく、ランダム行列理論の発展により、厳密に証明されることが期待されます。今後、未だ理論的にも実験的にも全くその本質が分かっていない素粒子の3世代コピー構造解明へ向け、挑戦を続けていきます。

<資金情報>

本研究は JSPS 科研費(JP21H00076, JP19K14710) の助成を受けたものです。

<用語解説>

- ※1 世代間混合：クォークとレプトンにおける質量と弱い相互作用の固有状態のミスマッチのこと。それらは 3×3 行列で表され、クォークでは、「カビボ・小林・益川行列」と呼ばれ、レプトンでは、「ポンテコルボ・牧・中川・坂田行列」と呼ばれる。クォークではこのミスマッチが小さく、レプトンでは大きい、その理由は未だ解明されていない。
- ※2 タイプ1シーソー機構：ニュートリノの極微質量が実現されるメカニズム。シーソー機構にはいくつかのタイプがあり、タイプ1はその中のひとつ。
- ※3 標準模型：「物質の素粒子（クォークとレプトン）」、「力の素粒子（ゲージ粒子）」、「質量の起源となる素粒子（ヒッグス粒子）」の3つのパーツから構成された理論。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Progress of Theoretical and Experimental Physics

【論文名】 Neutrino mass square ratio and neutrinoless double beta decay in random neutrino mass matrices

【著者】 Naoyuki Haba, Yasuhiro Shimizu, and Toshifumi Yamada

【掲載 URL】 <https://doi.org/10.1093/ptep/ptad010>

【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：波場 直之（はば なおゆき）
TEL：06-6605-2538
E-mail：haba@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：國田（くにだ）
TEL：06-6605-3411
E-mail：koho-list@ml.omu.ac.jp