

論文の内容の要旨

論文題目「魔方陣とニュートリノ質量行列」

学位申請者 兵藤 悠太

キーワード: ニュートリノ質量行列、ニュートリノ混合、魔方陣、
ディラック粒子、マヨラナ粒子

ニュートリノは極めて透過性の高い素粒子である。宇宙に満ち溢れており、1秒間におおよそ 100 兆個のニュートリノが私たちの体を通り抜けている。3種類のニュートリノが発見されており、これらのニュートリノは量子力学的混合している。この混合の様子は、数学的には行列で表現されている。

3種類のニュートリノは自由に混ざり合うのではなく、何らかの規則に従って混ざっているようである。だが、この規則がまだ明らかになってはいない。多くの理論的な研究では、ニュートリノの混合現象に内在する規則を見出すために群論が用いられている。群論では、行列の集合が持つ規則を数学的に表現できるからである。だが、この群論を用いた研究が20年以上も精力的に行われているにもかかわらず、ニュートリノ混合規則はニュートリノ物理学の最重要な未解決問題のままである。このことは、群論ではない別の手法や観点から、ニュートリノ混合規則を明らかにすべきであることを示唆しているのかも知れない。

本研究では、一般的に用いられている群論ではなく、数字の組み合わせを扱う数学分野の一つである数論を用いてニュートリノ混合規則の解明を試みた。数論に着目した理由は、不思議な数の並びが、我々の住む自然界の現象に顔を出すことがあるためである。例えば、フィボナッチ数と花びらの数との関係や、素数と素数ゼミの一生のサイクルとの関係などが知られている。本論では、特殊な数の組み合わせである「魔方陣」に着目した。魔方陣とは、 $n \times n$ のマス目の中に自然数を配置し、各列、各行、両対角線の和が等しくなっているものである。

魔方陣とニュートリノとの関係を最初に調査したのは Harrison 等である (P.F. Harrison, D. H. Perkins, and W. G. Scott, Phys. Lett. B 530, 167 (2002))。今から20年以上前の2002年に、彼らはニュートリノ質量行列の一部が魔方陣の性質を満たしていることを指摘した。だが、実験精度が向上した今日では、ニュートリノ質量行列の値が2002年とは異なることが明らかになっている。したがって、Harrison 等の発見が今でも有効であるのか、Harrison 達の発見をさらに発展させることができるのかを調べることは、魔方陣とニュートリノ混

合現象との関連を理解する上で不可欠である。本論文の目的は、ニュートリノ質量行列と魔方陣の関係を多角的に調査することである。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、序論としてニュートリノ混合の研究状況を述べた後、魔方陣が持つ規則性に着目してニュートリノ混合の研究を行う動機を述べた。

第2章では、ニュートリノと魔方陣の基礎を解説した。特にニュートリノ混合現象について詳しく解説した。また、ニュートリノ混合現象を数学的に表現できる行列の1つであるニュートリノ質量行列の値と、ニュートリノ実験から得られる物理量との関係を解説した。

第3章では、ニュートリノがマヨラナ粒子である場合のニュートリノ質量行列と魔方陣との関係性を述べた。魔方陣の性質の一部をもつニュートリノ質量行列の形(テクスチャー)はマジックテクスチャーとよばれている。本章では、2002年にHarrison達が発見したマジックテクスチャーが現在でもある範囲では有効であることを示した。さらに、Harrison達によるマジックテクスチャーの他にも、複数の新たなマジックテクスチャーが数学的には作れることを指摘した。そして、本研究によって新たに発見された複数のマジックテクスチャーのうち、ニュートリノ混合実験を再現可能なテクスチャーが存在することを明らかにした。

第4章では、ニュートリノがディラック粒子である場合のニュートリノ質量行列と魔方陣との関係性について調査をした。この場合でも、有効なマジックテクスチャーが存在することを示した。

第5章では、魔方陣に基づく数論的な視点から、マヨラナニュートリノ質量行列とディラックニュートリノ質量行列の類似性を調査した。マヨラナニュートリノ質量行列は対称行列になるため、ディラックニュートリノ質量行列に比べて単純な形になる。このため、マヨラナニュートリノ質量行列とディラックニュートリノ質量行列との類似点が見つければ、複雑なディラックニュートリノ質量行列の形を単純なマヨラナニュートリノ質量行列を使って制限できる。本研究により、いくつかのタイプのマジックテクスチャーが、2つの質量行列の類似性を向上させることが明らかにした。

第6章では、本論文のまとめと今後の展望を述べた。本論文では、ニュートリノがマヨラナ粒子である場合、従来から知られているマジックテクスチャーとは異なる、新たなマジックテクスチャーが存在可能であることを明らかにした。そして、ニュートリノ質量行列が魔方陣の性質の一部を満たす場合には、ニュートリノの質量順序が通常の場合の質量順序である可能性を指摘した。さらに、ニュートリノがディラック粒子である場合でも、有効なマジックテクスチャーが存在し、ニュートリノの質量順序は通常の場合の質量順序が支持されることを示した。また、いくつかのタイプのマジックテクスチャーでは、マヨラナニュートリノ質量行列とデ

イラックニュートリノ質量行列の類似性が向上することを明らかにした。今後の展望として、魔方陣以外の数論にも着目し、ピタゴラス数とニュートリノ混合との関係を調査予定であることを述べた。