

## 論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 ( 理 学 )	氏名	高 木 堅 太
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 ①・② 項該当		
論文題目			
Phenomenology for the Lepton Flavor Mixing (レプトン世代混合の現象論)			
論文審査担当者			
主 査	准教授	両角 卓也	
審査委員	教 授	稲垣 知宏 (情報メディア教育研究センター)	
審査委員	教 授	小 嶋 康史	
審査委員	教 授	志垣 賢太	
〔論文審査の要旨〕			
<p>レプトン (荷電レプトンおよびニュートリノ) にはそれぞれ 3 つの種類があり, 電子と電子ニュートリノ, ミュー粒子とミューオンニュートリノ, タウレプトンとタウニュートリノのように 3 種類 of 荷電レプトンに付随して 3 種類のニュートリノが存在する。このような, 荷電レプトンに付随した 3 種類のニュートリノの状態をフレーバー (香り) の固有状態と呼んでいる。ニュートリノ振動現象はニュートリノの種類がその伝搬中にある種類 (例えばミューオンニュートリノ) から別の種類 (例えば電子ニュートリノ) に転換する現象である。振動現象が意味することはフレーバーの固有状態 (電子ニュートリノ, ミューオンニュートリノ, タウニュートリノ) がそれぞれエネルギーの固有状態からずれていることを意味している。運動量が決まっていればエネルギーの固有状態は質量固有状態を意味するので, 結局フレーバーの固有状態は異なる質量をもつ質量固有状態の重ね合わせになっていることを意味する。これをレプトンの世代混合と呼んでいる。</p> <p>フレーバー固有状態と質量固有状態はユニタリ行列で関係しており, 3 種類のニュートリノの場合 <math>3 \times 3</math> のユニタリ行列であらわされ, 3 つの混合角, 1 つないし 3 つの CP 対称性の破れの位相であらわすことができる。(PMNS=ポンテコルボ, 牧 中川 坂田行列)。これらの混合角や位相は, ニュートリノ振動実験やニュートリノレス 2 重ベータ崩壊実験の観測量に密接に関係しており, ニュートリノ振動実験から得られるニュートリノの質量 2 乗差とともに, その測定精度が精密になっている。</p> <p>本論文では, 以上のようなニュートリノに関する現状を踏まえ, ニュートリノの世代混合を説明する理論を構築している。模型構築の指針としてニュートリノ振動実験の結果と矛盾しない模型を構築し, CP 対称性の破れをはじめとする, 実験的にはまだ測定されていない物理量を预言している。</p> <p>論文では, 離散対称性に基づく理論として <math>A_4 \times Z_3</math> のフレーバー対称性を持つ模型を研究している。</p> <p>先行研究の混合角に関する预言の一つが実験の中心値より大きく, 観測との矛盾が生じは</p>			

じている。本研究では、世代混合を決めるフラボンと呼ばれるスカラー場の性質を改良することで混合角のとりうる領域が広がり、最新の実験結果とも無矛盾なモデルを提案している。

次に、最小シーソーモデルを考察し、このモデルにおけるニュートリノ振動における CP の破れとバリオン数非対称性の関係を研究した。

3つ目のアプローチでは、フラボンを導入した理論とは対照的に、新たな力学的自由度を導入しない方法を研究している。この方法では、ニュートリノ質量や混合角をきめる(湯川)結合定数はモジュラー形式と呼ばれる複素数の関数で与えられる。この関数の形はモジュラー対称性で制限される。本論文では、ニュートリノの質量の起源としてシーソー機構、ワインバーグオペレーター、ディラック型ニュートリノの3つの場合にレプトン混合角とニュートリノ質量を数値的に求め、実験を再現するモデルのパラメーター領域を決めた。

以上のように本論文では異なるアプローチ(離散対称性、最小シーソーモデル、モジュラー対称性)に基づいてニュートリノ質量行列を決定する結合乗数への制限を議論した。

これに加えてニュートリノ振動に関する混合行列やニュートリノ質量の実験的な制限を考慮することでモデルのパラメーターを決めている。ここで採用されたアプローチはパラメーターの数が対称性の制限などにより少ない。このことにより、まだ測定されていない物理量(CP 対称性の破れやニュートリノレス 2 重ベータ崩壊など)に関する予言が可能になっている。実験との整合性に注意を払い、それをモデルの改良や新たなモデルの開発に役立てている点で非常に優れた論文であり、素粒子の世代構造や世代混合の起源の解明に貢献している。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士(理学)の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

1. Revisiting  $A_4$  model for leptons in light of NuFIT 3.2  
S. K. Kang, Y. Shimizu, K. Takagi, S. Takahashi and M. Tanimoto  
PTEP **2018** (2018) no.8, 083B01.
2. Towards the minimal seesaw model via CP violation of neutrinos  
Y. Shimizu, K. Takagi and M. Tanimoto  
JHEP **1711** (2017) 201.
3. Modular  $A_4$  invariance and neutrino mixing  
T. Kobayashi, N. Omoto, Y. Shimizu, K. Takagi, M. Tanimoto, and T. H. Tatsuishi  
JHEP **1811** (2018) 196.

参考論文

1. Neutrino CP violation and sign of baryon asymmetry in the minimal seesaw model  
Y. Shimizu, K. Takagi, M. Tanimoto  
Phys. Lett. B **778** (2018) 6.
2.  $A_4$  lepton flavor model and modulus stabilization from  $S_4$  modular symmetry  
T. Kobayashi, Y. Shimizu, K. Takagi, M. Tanimoto and T. H. Tatsuishi  
Phys. Rev. D **100** (2019) no.11, 115045.