

論文内容要旨 (和文)

平成²⁷年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学 専攻 物理学 分野

氏 名 岡田 里見



論文題目 Dark Matter in the Minimal $U(1)_X$ Extended Standard Model
(最小 $U(1)_X$ 拡張標準模型におけるダークマターの研究)

素粒子理論における標準模型は、素粒子、および、素粒子の間に働く基本的な相互作用（強い、弱い、および、電磁気相互作用）を記述するうえで最良の理論であり、多くの実験結果と非常に高い精度で合致している。しかし、その成功にもかかわらず、標準模型の枠組では説明することができない、観測からの問題点がある。ひとつは、ニュートリノ振動現象から要請されるニュートリノの質量と世代間混合である。ニュートリノ振動は観測されている現象であるが、ニュートリノ振動が起きるにはニュートリノに質量と世代間混合が存在する必要がある。しかし、標準模型においてニュートリノには質量がないため、世代間混合もない。もうひとつは、ダークマター候補である。ダークマターは観測により存在が確認されているが、標準模型にはその候補が存在しない。これらの観測と理論の間にある不整合を説明するためには、標準模型を超えた枠組が必要となる。

当博士論文では、標準模型を超えた枠組として二つの模型を考えた。ひとつは標準模型に含まれる大局的B-L（「バリオン数」マイナス「レプトン数」）対称性をゲージ化（局所化）した「最小B-L拡張標準模型」であり、もうひとつは、それを一般化した「最小 $U(1)_X$ 拡張標準模型」である。これらの模型にもとづいて、ダークマターの問題を扱い、観測や実験の結果と比較した。

最小B-L拡張標準模型では、理論的整合性を保つための3世代の右巻きニュートリノ、および、ゲージ化にともなうB-Lゲージボソン (Z_{B-L} ボソン) が新たに標準模型に加わる。さらに、B-Lヒッグス場を導入する。このB-Lヒッグス場が真空期待値を持つことで、B-L対称性が自発的に破れる。これにともない、 Z_{B-L} ボソンが質量を、右巻きニュートリノがマヨラナ質量を獲得する。より低エネルギーになって標準模型の電弱対称性が自発的に破れると、標準模型の粒子、特に標準模型のニュートリノも質量を獲得し、ニュートリノの小さな質量を生成するシーソー機構が起きる。本研究では、この模型にさらに離散的対称性である Z_2 パリティを課す。ひとつの右巻きニュートリノに Z_2 奇、他のすべての場は Z_2 偶を課すことで、前者はダークマター候補となる。この模型において、 Z_2 偶のふたつの右巻きニュートリノによって、最小シーソー（ニュートリノ振動からの観測データを再現するために要請される、最小の模型）が実現される。ダークマター粒子がおもに Z_{B-L} ボソンを通して標準模型粒子と相互作用する場合、ダークマターの残存量は、3つのパラメーター（B-Lゲージ結合定数、 Z_{B-L} ボソン質量、およびダークマター質量）によって決まる。当論文では、ダークマターの現在の残存量におけるプランク衛星による宇宙観測からの上限を用いて、 Z_{B-L} ボソン質量の関数として、B-Lゲージ結合定数の下限を求めた。一方、 Z ボソンの共鳴現象を探索している最近のLHC Run-2の結果から、 Z_{B-L} ボソン質量の関数として、B-Lゲージ結合定数の上限を評価した。これら二つの制限を相補的に評価し、この“ Z_{B-L} ポータル” ダークマターのシナリオにおいて許されるパラメーターの範囲を同定し、 Z_{B-L} ボソン質量の下限を3.6 TeVと求めた。

最小B-L拡張標準模型を一般化した最小 $U(1)_X$ 拡張標準模型で、同様の議論をおこなった。この模型に含まれる粒子は、最小B-L模型と同じである。ただし、 $U(1)_X$ ゲージボソンは Z ボソンと呼ぶ。 $U(1)_X$ ゲージ対称性は、標準模型の $U(1)_Y$ ハイパーチャージと $U(1)_{B-L}$ ゲージ対称性の線形結合で表される。この一般化にともない、標準模型のヒッグス場の $U(1)_X$ チャージが新たなパラメーターとして導入される。このチャージがゼロの極限では、最小B-L模型と一致する。

氏 名 岡田里見

最小B-L模型の場合と同様に、 Z_2 パリティを課し、 Z_2 奇を課したひとつの右巻きニュートリノがダークマター候補となる。ダークマター粒子がおもにZボソンを通して標準模型粒子と相互作用する“Zポータル”ダークマターの物理は、4つのパラメーター ($U(1)_X$ ゲージ結合定数、Zボソン質量、ダークマター質量、および、標準模型のヒッグス場の $U(1)_X$ チャージ) によって制御されている。いくつかの現象論的な制限をふまえ、特に重要なふたつの制限 (ダークマターの現在の残存量における宇宙観測からの制限、およびZボソンの共鳴現象の探索におけるLHC Run-2の結果からの制限) から、許されるパラメーター領域を同定し、Zボソン質量の下限を2.7 TeVと求めた。将来的なLHCの実験では、現在の許されるパラメーター領域全体をカバーし、近い将来、最小 $U(1)_X$ 拡張標準模型が検証される可能性がある。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 30 年 2 月 9 日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

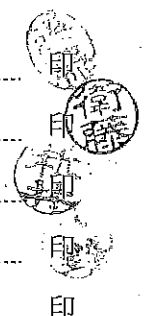
主査 遠藤 龍介

副査 衛藤 稔

副査 新井 真人

副査 佐野 隆志

副査



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	地球共生圏科学専攻・物理学分野	岡田 里見
論文題目	Dark Matter in the Minimal $U(1)_X$ Extended Standard Model (最小 $U(1)_X$ 拡張標準模型におけるダークマターの研究)	
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日 平成 30 年 1 月 29 日～ 平成 30 年 2 月 6 日
論文公聴会	平成 30 年 2 月 6 日	場 所 理学部 11 番教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日 平成 30 年 2 月 6 日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

物質の基本構成要素である素粒子とそれらの間に働く力は、素粒子の標準模型でほとんど説明することが出来る。最近発見されたヒッグス粒子もこの模型によって予言されていたものである。しかし、この標準模型でも説明出来ない現象が残されている。ニュートリノに質量があることと、宇宙におけるダークマターの存在である。これらの現象の一方あるいは両方を説明するためには、標準模型の拡張を考えなければならない。

本研究では、 $U(1)$ 拡張と呼ばれる最も簡単な形での拡張模型の範囲内で、両方の問題を同時に解決することを目指している。2 種類の $U(1)$ 拡張標準模型を調べており、どちらの模型も 3 種類のニュートリノが質量を持ち、そのうちの一種類がダークマターの候補となり得ることを論じている。この模型は複数個のフリーパラメーターを含むが、申請者は、宇宙の観測結果と矛盾せず、しかも LHC 加速器実験とも矛盾しないパラメーター領域が確かに存在することを示している。

提出された学位論文の精査、公聴会での発表 (1 時間) と質疑応答 (30 分) によって、学位論文審査基準を満たしているかを判定した。本学位論文で扱っているニュートリノの質量とダークマターの問題は、現在の素粒子物理学と宇宙物理学における重要な課題であり、この二つを最小の拡張模型で同時に解決できる可能性を示したことは新規性・独自性が見られ、学術的価値のあるものと認められる。学位論文の構成・体裁も適切であり、研究の背景や目的も論理的に明解に述べられている。また、本理論から予測される結果を宇宙観測と LHC 加速器実験のデータと比較することで、許されるパラメーター領域を導く解析も明確に述べられている。質疑応答でも、この分野の研究に必要な専門知識を十分にもっていることはもちろんのこと、申請者の理論の強みと弱みを適確に理解しており、今後の進むべき方向を把握していることが判定できた。以上のことにより、本学位論文は学位論文審査基準を十分に満たしているものと判断し、審査委員全員一致で合格と判定した。

本論文は、研究倫理または利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

最終試験は、公聴会終了後に、学位論文と公聴会の発表資料に関連する事項について、口頭ならびに筆答によって行った (1 時間)。口頭試問では、学位論文で扱っている素粒子物理学、標準模型、素粒子論的宇宙論に関する基本的、および専門的な知識等を問い、口頭および数式や図などは板書による筆答で回答してもらった。受け答えはいずれも適正であり、申請者は博士の学位にふさわしい十分な専門知識と能力を有していることが確認できた。これらにより、最終試験も審査委員一同、合格と判定した。