

## 論文審査の結果の要旨

氏名：首 藤 健 太

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：暗黒物質対消滅における電弱制動放射の効果

審査委員：（主査） 教授 仲 滋 文

（副査） 教授 出 口 真 一

教授 藤 井 紫麻見

准教授 二 瓶 武 史

素粒子物理学における標準模型は、物質の根源であるクォークとレプトン、物質の間に働く力を媒介するゲージ粒子、質量を生成するヒッグス粒子を用いて記述される。標準模型は膨大な実験データを精度良く説明できる優れた理論であり、最近の大型加速器実験におけるヒッグス粒子の発見により、この模型が予言する全ての素粒子の存在が実証された。しかしながら、標準模型も完璧なものではなく、この模型では説明のつかない問題も残されている。

その一つとして、宇宙における暗黒物質の問題が挙げられる。近年までの宇宙観測の結果から、宇宙には暗黒物質と呼ばれる光を発しない物質が存在し、通常物質よりも多くのエネルギーを担っていることが明らかにされてきた。この暗黒物質の主要な成分は冷たい暗黒物質と呼ばれるものであるが、その構成要素として相応しい粒子が標準模型には含まれておらず、そのような粒子を含む新たな理論が模索されてきた。

標準模型を越える模型として最も有望なものの一つが、標準模型を超対称性を持つように拡張した最小超対称標準模型（以下、単に超対称標準模型と呼ぶ）である。超対称性とはボーズ粒子とフェルミ粒子の間の変換に対する対称性であり、この対称性が標準模型の抱える二次発散の問題を解決するとともに、力の統一理論をも可能にする。

さらに、超対称標準模型では標準模型に含まれる粒子の各々に対して超対称粒子と呼ばれる新たな粒子が導入され、そのうちの 하나가暗黒物質の候補となり得る。超対称粒子の中でも、特にニュートラリーノと呼ばれる中性のフェルミ粒子が暗黒物質である場合が最も精力的に研究されてきた。

暗黒物質の研究における重要なテーマの一つが、銀河中心や太陽中心などにおける暗黒物質粒子の非相対論的な対消滅である。その反応の断面積の計算に関して、単純化された模型を用いた近年の先行研究において、重いゲージ粒子（Wボソン、Zボソン）の放出を伴う電弱制動放射と呼ばれる三体終状態過程が重要となる可能性が指摘されてきた。

以上のような背景に鑑み、申請者は超対称標準模型におけるニュートラリーノが暗黒物質となる場合を考え、この模型における電弱制動放射の効果を初めて明らかにしている。

本論文は、全6章と付録2節からなっている。それらの概要と評価は以下の通りである。

第1章では、論文の導入として、暗黒物質と超対称性の研究の意義に続いて、超対称模型における暗黒物質の解析に電弱制動放射を考慮する研究の動機が手際良く述べられている。暗黒物質を構成する粒子を検出する手法の一つに、銀河や太陽の中心における暗黒物質の対消滅から生じる宇宙線を調べる間接検出と呼ばれる方法がある。本論文では、特に宇宙線ニュートリノを用いた間接検出に着目している。暗黒物質の対消滅に関するほとんど全ての研究では、解析が簡単な二体終状態過程のみが考慮されてきた。ところが、ヘリシティー抑制と呼ばれる機構により、この二体過程にニュートリノは含まれないことが知られている。このため、過去の研究においては、他の二体過程に含まれる不安定粒子から生成される二次的なニュートリノのみが考慮されていた。これに対して、電弱制動放射ではニュートリノを直接放出することが出来る。申請者は、電弱制動放射に関する過去の研究について参考文献を交えて手短かに紹介しつつ、超対称模型における暗黒物質の先行研究では電弱制動放射が考慮されていないことを指摘し、これを行うことが本研究の目的であると説明している。

第2章は4節からなっており、暗黒物質に関する観測結果や検出実験等について手際良く述べられている。第1節では暗黒物質が存在すると考えられるようになった根拠となる宇宙の観測について記されており、特に宇宙全体のエネルギーのうち暗黒物質が占める割合が26.8%であることが紹介

されている。第2節では暗黒物質の構成要素である素粒子が持つべき性質が説明されている。第3節では暗黒物質の素粒子を実験的に検出しようとする試みについて直接検出と間接検出に分けて論じられ、特に宇宙線ニュートリノを用いた間接検出実験について、最新の実験データが紹介されている。第4節では膨張宇宙におけるボルツマン方程式を用いて現在の宇宙における暗黒物質の残存量を理論的に計算する手法が簡潔に記述され、26.8%という残存量の観測値と比較するための準備が行われている。

第3章は5節からなっており、一般的な超対称模型の定式化と本論文で用いる超対称標準模型の必要十分なレビューに充てられている。第1節では超対称性を導入する理由が簡潔に述べられている。第2節では超対称模型の構造を規定するラグランジアン構成方法について、超場と呼ばれる形式を用いて議論されている。第3節では本論文で用いる超対称標準模型の全容がまとめられている。標準模型に登場するクォーク、レプトン、ゲージ粒子、ヒッグス粒子と対をなす形で、スクォーク、スレプトン、ゲージノ、ヒッグシーノと呼ばれる超対称粒子が導入される。また、超対称性のソフトな破れと呼ばれる現象論的に必要な効果について、相互作用の形やパラメータが説明されている。第4節ではラグランジアンを質量項を対角化して得られる質量固有状態（実際に観測される粒子）が求められており、特に暗黒物質の素粒子であるニュートラリーノについて、パラメータの値に応じてどのように性質が変化するかが分かりやすく説明されている。第5節では後の数値解析のための準備として、加速器実験から得られている超対称粒子の質量に対する制限が端的にまとめられている。

第4章は本論文の主な成果の基礎となる部分であり、5節からなっている。第1節では暗黒物質が対消滅して2つの粒子に変化する二体過程について述べられている。ニュートラリーノが粒子と反粒子の区別がないマヨラナ粒子と呼ばれるフェルミ粒子であることから、ヘリシティー抑制により、非相対論的な対消滅反応が強く抑制されることが分かりやすく説明されている。第2節では光子の放出を伴う通常の制動放射について述べられている。光子のスピンの影響でヘリシティー抑制が起こらず、制動放射は二体過程よりも大きな寄与を与える。第3節では重いゲージ粒子を放出する電弱制動放射について定性的な説明が与えられ、Wボソンのスピンの影響でヘリシティー抑制が起こらず、特にニュートリノのスペクトルに対して大きな寄与が期待されることが述べられている。第4節は本研究の課題であるWボソンとレプトン対を放出する電弱制動放射について、微分断面積の解析的な表式が得られている。特に右巻きと左巻きのスレプトンの混合を含めた相互作用が考慮されており、これは電弱制動放射に関する先行研究には取り入れられていない効果である。第5節では電弱制動放射や二体過程の中に含まれる不安定粒子の崩壊によって生成される二次的なニュートリノの寄与を、PYTHONと呼ばれる数値計算コードを利用して評価する方法が説明されている。

第5章は前章で得られた結果の数値解析によって電弱制動放射の重要性が具体的に示される部分であり、2節からなっている。申請者は、第1節で電弱制動放射と通常の二体過程の断面積を比較することにより、加速器実験や残存量の制限を満たしつつ電弱制動放射が主要な寄与を与えるパラメータ領域を明らかにしている。加速器実験の制限を満たすためにスクォークが重い場合を考えているが、スレプトン質量を比較的小さくすることで電弱制動放射の効果が大きくなる。第2節では、暗黒物質の対消滅によって生成されるニュートリノのエネルギースペクトルを数値的に評価している。申請者は、電弱制動放射の効果により、二体過程のみから得られるスペクトルが大きく変更を受けることを明解に示している。特に電弱制動放射に由来するニュートリノが高エネルギー領域で主要な寄与を与えることを強調している。これらのことは、二体過程のみしか考慮されていない超対称標準模型の既存の解析が不十分であることを意味する。

第6章はまとめに充てられており、本論文で新たに取り入れられた効果とその数値的な結果について、もう一度わかりやすく整理している。特に宇宙線ニュートリノに対する電弱制動放射の影響について、要領良くまとめられている。さらに間接検出実験において期待されるニュートリノのフラックスを評価することが今後の課題であると述べている。最後に、付録2節では超対称標準模型の相互作用と二体過程の断面積について述べ、本文に対する補足を行っている。

以上のように、本論文は、標準模型を越える理論の候補である超対称標準模型において、電弱制動放射の効果を初めて明らかにした。特に様々な加速器実験や残存量の制限を満たしつつ、ニュートリノスペクトルに対する影響が大きいことを数値計算により具体的に示している。このように、本論文は二体過程のみしか考慮されていない既存の多くの解析の変更を迫る内容となっており、暗黒物質の

研究はもとより，素粒子物理学の発展に寄与するところが少なくない。

このことは，本論文の提出者が自立して研究活動を行い，またはその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は，博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成26年2月13日