

氏名	太田 慎吾
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記号番号	博理工甲第 936 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Big-bang nucleosynthesis with a long-lived slepton and a 125 GeV Higgs boson in the(next-to-)minimal super symmetric standard model ((次)最小超対称標準模型における長寿命スレプトンがビッグバン元素合成に与える影響と質量 125 GeV のヒッグスボソン)
論文審査委員	委員長 准教授 佐藤 丈 委員 教授 井上 直也 委員 教授 谷井 義彰 委員 教授 飛田 和男

## 論文の内容の要旨

本論文では、最小超対称標準模型 (Minimal Supersymmetric Standard Model; MSSM) に singlet supermultiplet を導入し、 $Z_3$  対称性を課した模型を次最小超対称標準模型 (Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model; NMSSM) の枠組みにおいて、実験、観測から知られている以下の量をすべて同時に説明できるような模型のパラメータ領域が存在することを示す：

- (i) 暗黒物質残存量
- (ii) 宇宙初期における軽元素合成量
- (iii) ヒッグス粒子の質量

現在、精密な宇宙論的観測のデータに基づき、暗黒物質 (Dark Matter; DM) や宇宙初期に合成された軽元素の存在量が明らかになっている。その一方で、宇宙初期のビッグバン元素合成 (Big-Bang Nucleosynthesis; BBN) を説明する標準的な理論では、それらの観測結果を全ては説明できていない。特に、 ${}^7\text{Li}$  存在量の理論値は観測値の 3-4 倍も大きく見積もられてしまうことが知られている ( ${}^7\text{Li}$  問題)。また、その理論は素粒子の標準型 (Standard Model; SM) に基づくものであるが、SM には観測から存在が明らかな DM の候補となる粒子が存在しない。

そこで、SM の拡張模型においてこれらの問題を解決し、その模型に対する制限を与えるようなシナリオが考えられてきた。その中で [1] は、これらの問題が R-パリティの保存を課した一般的な MSSM における共対消滅シナリオにより同時に解決され得ることを示した。このシナリオでは、最も軽い超対称性粒子をニュートラリーノ ( $\tilde{\chi}_1^0$ )、その次に軽い超対称性粒子をスタウ ( $\tilde{\tau}$ ) としている。そして、それらの間の質量差  $\delta m$  がスタウの主要な崩壊モードを禁止するほど小さくなると、スタウは BBN の時代まで生き残るほ

ど長寿命になり得る。すると、スタウは軽元素核と束縛状態 ( $\tilde{\tau}$  Nucleus) を形成し、内部転換過程

$$(\tilde{\tau}^7\text{Be}) \rightarrow \tilde{x}_1^0 + \nu_\tau + {}^7\text{Li}, (\tilde{\tau}^7\text{Li}) \rightarrow \tilde{x}_1^0 + \nu_\tau + {}^7\text{He}$$

を通して  ${}^7\text{Li}$  の存在量が減少することで、 ${}^7\text{Li}$  問題が解決される可能性がある。また、[2] では  ${}^6\text{Li}$  存在量の理論値が観測値に比べて小さく見積もられてしまうことも問題視 ( ${}^6\text{Li}$  問題) した上で、[1] と同様なシナリオでスタウの世代間混合を考慮した場合 (スレプトンと呼ぶ) において、(i), (ii) が同時に説明されることが示された。

一般に、MSSM で実験値と同程度に大きなヒッグス粒子の質量を得るのは難しいが、MSSM においてはヒッグスセクターに singlet scalar が含まれ、MSSM の場合に比べて大きなヒッグス粒子の質量が得られる。そこで、本論文では [1]、[2] で扱われたような MSSM を  $\mathbf{Z}_3$  対称性を課した NMSSM へと拡張する、その上で、(i), (ii) が同時に解決されるようにスレプトンの寿命、内部転換過程のタイムスケール、ニュートラリーノの成分の割合に対して制限を課した MSSM 特有のパラメタ領域上でそれらを満たす領域を調べる。そして、許容領域上で実際に (i)-(iii) の量を計算し、実験、観測と無矛盾な値が得られる領域が存在することを示す。

[1]T. Jittoh et al, Phys.Rev. **D82** (2010) 115030,

[2]K. Kohri et al, Phys.Rev. **D86** (2012) 095024

## 論文の審査結果の要旨

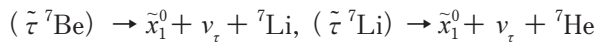
素粒子標準模型に超対称性を導入して拡張する模型のうち、最小限の拡張で済ませた模型最小超対称標準模型 (Minimal Supersymmetric Standard Model; MSSM) という。さらにこの模型に gauge singlet 粒子を導入し、 $Z_3$  対称性を課した模型を次最小超対称標準模型 (Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model; NMSSM) という。MSSM は標準理論を超える物理模型の最有力候補として欧州にある LHC (Large Hadron Collider) をはじめとする素粒子実験において精力的に探索が行われている。また LHC でヒッグス粒子が見つかったが、それが MSSM で期待される質量の上限に近いことから、この値を説明しやすいとされている、NMSSM にも大変注目が集まっている。

このような時代背景の元、本論文で申請者は (N) MSSM の枠組みにおいて、実験、観測から知られている以下の量をすべて同時に説明できるような模型のパラメータ領域が存在することを示した。

- (i) 暗黒物質残存量
- (ii) 宇宙初期における軽元素合成量
- (iii) ヒッグス粒子の質量

現在、精密な宇宙論的観測のデータに基づき、暗黒物質 (Dark Matter; DM) や宇宙初期に合成された軽元素の存在量が明らかになっている。しかし、素粒子の標準理論においては、暗黒物質の候補となる粒子が存在しない。また、これらが精緻に測られるようになったことで、素粒子の標準理論を元に宇宙初期のビッグバン元素合成 (Big-Bang Nucleosynthesis; BBN) を説明する標準的な理論では、それらの観測結果を全ては説明できないことが明らかとなりつつある。特に、 ${}^7\text{Li}$  存在量の理論値は観測値の 3-4 倍も大きく見積もられてしまうことが知られている ( ${}^7\text{Li}$  問題)。

そこで、SM の拡張模型においてこれらの問題を解決し、その模型に対する制限を与えるようなシナリオが考えられてきた。その中で、これまでに、これらの問題が R-パリティの保存を課した一般的な MSSM における共対消滅シナリオにより同時に解決され得ることを示した。このシナリオでは、最も軽い超対称性粒子をニュートラリーノ ( $\tilde{\chi}_1^0$ )、その次に軽い超対称性粒子をスタウ ( $\tilde{\tau}$ ) としている。そして、それらの間の質量差  $\delta m$  がスタウの主要な崩壊モードを禁止するほど小さくなると、スタウは BBN の時代まで生き残るほど長寿命になり得る。すると、スタウは軽元素核と束縛状態 ( $\tilde{\tau}$  Nucleus) を形成し、内部転換過程



を通して  ${}^7\text{Li}$  の存在量が減少することで、 ${}^7\text{Li}$  問題が解決される可能性があることが示されていた。

本論文ではこれを拡張し、 ${}^6\text{Li}$  存在量の理論値が観測値に比べて小さく見積もられてしまう  ${}^6\text{Li}$  問題 (これはまだ確定していない問題であるが) をも解決した。考え方はこれと似たシナリオではあるが、従来のそれと違い、ニュートリノ振動から示唆されるレプトンフレーバーの混合をもとにスタウの世代間混合を考慮すると (スレプトンと呼ぶ)、触媒融合反応を通して  ${}^6\text{Li}$  の生成があるパラメータ領域では適切に行われ、(i) と  ${}^6\text{Li}$  も含めた (ii) が同時に説明されることが示した。

さて、一般に、MSSM で実験値と同程度に大きなヒッグス粒子の質量 (125GeV) を得るのは難しい。それは、摂動の 0 次でヒッグスの質量が Z ボソンの質量 (91GeV) とほぼ同じになるからである。実際は量子補正があり大きくなるのだが、現在の観測値は MSSM で得られるほぼ上限である。しかし、NMSSM においてはヒッグス粒子の質量に singlet scalar の影響が含まれ、MSSM の場合に比べて大きなヒッグス粒子の質量が得られる。

そこで、本論文では 上で説明した手法を、 $Z_3$  対称性を課した NMSSM へと拡張したモデルに適用し、(i), (ii), (iii) が同時に解決されるようなパラメタ領域が存在するかを調べた。このモデルでは、暗黒物質の候補となる粒子が複数になること、しかもその候補の一つがゲージ相互作用をほとんどしない粒子となることから、スレプトンの寿命、内部転換過程のタイムスケール、などが劇的に替わる可能性が有り、それに伴いパラメタ領域も当初想定したよりも狭いことなどを見いだした。

まずは、暗黒物質の存在量が正しく計算される (つまり、(iii) の条件を満たす) パラメタ領域において、さらにヒッグスの質量が正しく出る (つまり (i) を満たす) ことを条件にパラメタを絞った。その上で、スレプトンの寿命及び内部転換に必要な時間、さらにヘリウムの破反応、触媒融合反応の時間など、このシナリオに特有の物理量を計算し、(ii) の元素合成の条件を満たす領域を探し出した。

このようなシナリオに現れるスレプトンは素粒子としては大変長寿命 (桁として 10000 秒) である。このような粒子の探索は LHC 実験の主要なテーマの一つとなっており、それを要請する物理が背後にあることを様々なシナリオで示したことは大変重要なことである。さらに、日本で発見されたニュートリノ振動の物理とも関連する可能性が有り、発展性の高いものである。

このような研究の結果を研究論文および博士論文としてまとめた申請者の研究能力は大変高いものがある。また、査読制度のある大変格式の高い学術誌に、極最近掲載が決定した論文を含めて一連の研究が 2 編掲載されており、さらに 3 編目ももうすぐ投稿する予定であるなど、研究意欲も高い。博士論文には関係ないので申請書には出ていないが、他にも全く違うテーマで研究していたことも有りそれらについての論文も持っている。また、積極的に国内海外を問わず発表を重ねてきており、そういった意味でも博士論文には裏付けがある。以上により本論文は十分学位論文に値すると認め、合格と判定した。