

氏 名	須貝 顕一
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 939 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	A first evidence of the CMSSM is appearing soon (制限性最小超対称性標準模型の早期発見に対する予言)
論 文 審 査 委 員	委員長 准 教 授 佐藤 丈 委 員 教 授 鈴木 健 委 員 教 授 谷井 義彰 委 員 教 授 飛田 和男

## 論文の内容の要旨

現在の素粒子物理には素粒子標準模型が存在する。この模型は素粒子実験の結果と整合性高く一致しており、非常に優れた模型である。しかし、この模型の枠組みにおいて尚、説明不可能な事象が複数存在する。そのため、素粒子物理において、これらの事象を解決すべく様々な拡張模型が提唱されている。

本研究では、これらの拡張模型の中の一つである制限性最小超対称性標準模型を使用する。そして、以下の事柄に着目し、その達成を条件として、模型のパラメータ空間を絞り込む。

- ・暗黒物質問題の解決
- ・リチウム問題の解決
- ・ヒッグス質量 125 GeV の実現

以下、これらの事柄について説明を行う。暗黒物質問題とは、宇宙において観測によりその存在自体が確認されているものの、理論的にその存在の正体が不明である問題である。この問題は素粒子標準模型の枠組みでは未解決である。また、リチウム問題とは、素粒子標準模型を基盤とする標準初期宇宙元素合成理論から予言されるリチウム存在量とリチウムの観測量との間の矛盾をいう。理論から予言されるリチウム存在量は観測量と比較して、3-4 倍過大であると報告されている。この問題もまた、素粒子標準模型の枠組みでは未解決である。ヒッグス質量については、2012 年にその存在が発見され、また質量値は上記のように明らかにされた。本研究では、これらの問題の解決、及び質量の再現を条件として模型のパラメータを絞り込む。以下では、これらの条件が如何にパラメータ空間を絞り込むか、我々のシナリオに沿って説明を行う。

本研究で使用する模型には、素粒子標準模型に存在する粒子と、そのパートナー粒子（超対称粒子）が存在する。そして、それら超対称粒子の内、最軽量超対称粒子は暗黒物質の性質を満たすため、暗黒物質の候補として考えられる。しかし、単純計算より、この最軽量超対称粒子の残存量理論値は、暗黒物質の観測値と比較して過大と確認されている。そのため、本研究では、この矛盾を解消すべく、“共対消滅機構”を導

入する。この機構の下、最軽量超対称粒子の残存量理論値は減少し、その結果、観測値と整合する事が確認されている。

一方、この機構の中では、電荷を有する次最軽量超対称粒子が長寿命化すると推測される。そして、この粒子が初期宇宙に存在する軽元素原子核と束縛状態を形成すると、標準的な模型では存在し得ない新奇な元素合成反応が生じる。以下がその新奇な元素合成反応である。

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

ここで丸括弧 ( ) は束縛状態を、丸括弧内の第一記号は次最軽量超対称粒子を、右辺第一記号は最軽量超対称粒子を表している。これらの反応が効果的に生じるため、リチウムの存在量理論値は標準的な理論値よりも減少し、観測値と整合し得る。しかし、この粒子の存在を起因として生じる新奇な元素合成反応は上記した反応だけではなく、以下の反応も考えられる。

$$\begin{aligned} (\tilde{\tau}^4\text{He}) + d &\rightarrow {}^6\text{Li} + \tilde{\tau}, \\ (\tilde{\tau}^4\text{He}) &\rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \nu_\tau + X, \\ X &\in \{(t+n), (d+n+n), (p+n+n+n)\}. \end{aligned}$$

これらの反応も有意に生じるため、これらの反応を通して各軽元素の存在量も標準的な理論の予言値は変化すると推測される。上記した反応の反応率は主に a) 次最軽量超対称粒子の個数密度、b) 次最軽量超対称粒子の寿命、の二点に依存する。さらに、b) について、寿命は最軽量超対称粒子と次最軽量超対称粒子の質量差に依存する。

上記を考慮し、本研究では制限性最小超対称性標準模型のパラメータを使用して、各粒子の質量、及び暗黒物質の残存量を数値計算する。そして、前述した各問題、及びヒッグスボソンの質量を全て説明可能なパラメータ領域を導出する。このようにして、我々は制限性超対称性標準模型における有望なパラメータ領域を求めた。

本研究ではさらに、導出したパラメータ領域上で各超対称粒子の質量、ミューオン粒子の異常磁気モーメント、B-中間子の希少崩壊分岐比を数値計算し、それらの物理量を現在の実験から得られる制限と比較し、無矛盾である事を確認した。また、同様に暗黒物質と陽子/中性子との散乱反応の断面積を計算し、それを暗黒物質直接検出実験から得られる制限と比較し、将来的に本シナリオが検証可能である事を確かめた。最後に、本研究では大型ハドロン衝突型加速器実験 (Large Hadron Collider; LHC) において生成されるだろう最軽量超対称粒子、及び次最軽量超対称粒子のイベント数を数値計算した。そして、本シナリオの下では近い将来の LHC 実験において、模型の存在を確証するだろうイベントの検出を予言した。

## 論文の審査結果の要旨

現在の素粒子物理には素粒子標準模型が存在する。この模型は素粒子実験の結果と整合性高く一致しており、非常に優れた模型である。しかし、この模型の枠組みにおいて尚、説明不可能な事象が複数存在する。そのため、素粒子物理において、これらの事象を解決すべく様々な拡張模型が提唱されている。

本研究では、これらの拡張模型の中の一つである制限された最小超対称性標準模型を使用する。そして、以下の事柄に着目し、その達成を条件として、模型のパラメータ空間を絞り込んだ。

- (i) 暗黒物質問題の解決
- (ii) リチウム問題の解決
- (iii) ヒッグス質量 125 GeV の実現

暗黒物質問題とは、宇宙において観測によりその存在自体が確認されているものの、理論的にその正体が不明な物質が存在するという問題である。この問題は、候補となる粒子が素粒子標準模型に存在しないため、この枠組みでは解決できない。

リチウム問題とは、素粒子標準模型を基盤とする標準初期宇宙元素合成理論から予言されるリチウム存在量とリチウムの観測量との間の矛盾をいう。理論から予言されるリチウム存在量は観測量と比較して、3-4倍過大であると報告されている。この問題もまた、素粒子標準模型の枠組みでは解決できない。

ヒッグス質量については、2012年にその存在が発見され、また質量値は上記のように明らかにされた。これは標準理論では、単なるパラメータとして与えられるが、他の物理量との相関が強いので、他の問題が解決されるよう模型を拡張するのを困難にすることが多々あることがわかっている。

本研究では、これらの問題の解決、及び質量の再現を条件として模型のパラメータを以下の手順で絞り込んだ。

本研究では、(i) の問題を解決するためなどいくつかの理由から、素粒子標準模型を超対称性が表れるよう拡張する模型（最小超対称標準模型、Minimal Supersymmetric Standard Model, MSSM）を扱った。

この模型には標準理論に存在する粒子と、そのパートナー粒子（超対称粒子）が存在する。そして、それら超対称粒子の内、最軽量超対称粒子は暗黒物質の性質を満たすため、暗黒物質の候補として考えられる。しかし、単純計算より、この最軽量超対称粒子の残存量理論値は、暗黒物質の観測値と比較して過大と確認されている。そのため、本研究では、この矛盾を解消すべく、“共対消滅機構”を導入した。この機構の下、最軽量超対称粒子の残存量理論値は減少し、その結果、観測値と整合する事が確認されている。

一方、この機構の中では、電荷を有する次に軽い超対称粒子が長寿命化することが分かる。その長寿命化によって元素合成が始まる時期まで存在が可能となり、元素合成に影響を与えうる。実際、この粒子が初期宇宙に存在する軽元素原子核と束縛状態を形成すると、標準的な模型では存在し得ない新奇な元素合成反応が生じる。以下がその新奇な元素合成反応である。

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

ここで丸括弧 ( ) は束縛状態を、丸括弧内の第一記号は次最軽量超対称粒子を、右辺第一記号は最軽量超対称粒子を表している。これらの反応が効果的に生じるため、リチウムの存在量理論値は標準的な理論値よりも減少し、観測値と整合し得る。しかし、この粒子の存在を起因として生じる新奇な元素合成反応は上記した反応だけではなく、以下の反応も考えられる。

$$(\tilde{\tau}^4\text{He}) + d \rightarrow {}^6\text{Li} + \tilde{\tau},$$

$$(\tilde{\tau}^4\text{He}) \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \nu_\tau + X, X \in \{(t+n), (d+n+n), (p+n+n+n)\}.$$

これらの反応も有意に生じるため、これらの反応を通して各軽元素の存在量も標準的な理論の予言値は変化する。上記した反応の反応率は主に a) 次最軽量超対称粒子の個数密度、b) 次最軽量超対称粒子の寿命、の二点に依存する。さらに、b) について、寿命は最軽量超対称粒子と次最軽量超対称粒子の質量差に依存する。

上記を考慮し、本研究では制限された最小超対称性標準模型 (Constrained Minimal Supersymmetric StandardModel, CMSSM) のパラメータを使用して、各粒子の質量、及び暗黒物質の残存量を数値計算した。そして、前述した各問題、及びヒッグスボソンの質量を全て説明可能なパラメータ領域を導出する。このようにして、我々は制限性超対称性標準模型における有望なパラメータ領域を求めた。

本研究ではさらに、導出したパラメータ領域上で各超対称粒子の質量、ミューオン粒子の異常磁気モーメント、B-中間子の希少崩壊分岐比を数値計算し、それらの物理量を現在の実験から得られる制限と比較し、無矛盾である事を確認した。また、同様に暗黒物質と陽子/中性子との散乱反応の断面積を計算し、それを暗黒物質直接検出実験から得られる制限と比較し、将来的に本シナリオが検証可能である事を確かめた。最後に、本研究では大型ハドロン衝突型加速器実験 (Large Hadron Collider; LHC) において生成されるだろう最軽量超対称粒子、及び次最軽量超対称粒子のイベント数を数値計算した。そして、本シナリオの下では近い将来の LHC 実験において、模型の存在を確証するだろうイベントの検出を予言した。

LHC において超対称性を探索するというのは最優先課題で有り、この研究でその模型の枠組み内で超対称粒子の間に大変強い関係性を与えることに成功した。これは観測を勧める上での大きな指針となるであろう。さらに、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。

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。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。