

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740145

研究課題名(和文) 新たな宇宙の姿から探る超対称模型

研究課題名(英文) Search for the Supersymmetric Models through the Universe with Dark Matter

研究代表者

小池 正史 (Koike, Masafumi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10447279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の暗黒物質の正体と、宇宙初期に合成されたリチウムの量の不足問題を同時に解決する素粒子模型を探求した。研究期間中に発見されたヒッグス粒子の質量125GeVをも模型探索の制限に加えた。探索では素粒子標準模型を拡張した次最小超対称標準模型を仮定した。新奇な超対称粒子が宇宙初期にリチウムと相互作用して一部を壊し、副産物がダークマターとして残存するシナリオを探った。模型の任意パラメータを動かしながら初期宇宙における素粒子・原子核反応をシミュレートし、暗黒物質およびリチウムの残存量を計算した。観測に適合する領域をパラメータ空間内に示し、このシナリオが現象論的に許されることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We searched for the models beyond the Standard Model that resolve the following two major cosmological problems: (1) the abundance of the dark matter in the universe, and (2) the possible deficit of the abundance of primordial lithium. We also put the constraint on the mass of Higgs particle to be 125 GeV. Our scenario is build around the next-to-minimal supersymmetric standard model. The next-to-lightest supersymmetric particles (NLSP) interact with the lithium nuclei during the nucleosynthesis and destroy part of them. The NLSP's eventually decay to the lightest supersymmetric particles, left as the stable dark matter to date. Varying the values of model parameters, we simulated the reactions of the particles and nuclei during the nucleosynthesis and calculated the relic abundance of the lithium and the dark matter. We showed the parameter region that is consistent with all the phenomenological constraints, and thereby proved that our senario is indeed viable.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 超対称模型 標準模型をこえる物理 ビッグバン元素合成 リチウム問題 レプトンフレーバー

1. 研究開始当初の背景

米国 WMAP 衛星による高精度宇宙観測は我々の宇宙像を一新した。我々が理解している宇宙の構成要素、バリオンは宇宙のわずか4%程度を占めるに過ぎず、残り23%の暗黒物質と約70%の暗黒エネルギーの正体は謎である。さらに、標準ビッグバン理論によるリチウム存在比は金属欠乏銀河の観測による直接推定の半分程度となる食い違いが明らかになってきた。この結果は素粒子標準模型で説明できず、未知の物理を示唆する宇宙論的問題として注目された。標準模型を超えた素粒子模型により、これらの問題を統一的に解決する可能性に興味向けられた。

2. 研究の目的

- (1) 宇宙の精密観測が提示した暗黒物質の問題と始原リチウム欠損問題を同時に解決し、素粒子論的に一貫した宇宙史を提示する。
- (2) ビッグバン元素合成を分析し、宇宙観測による軽元素合成比と暗黒物質質量を同時に説明する超対称素粒子模型の可能性を拡大する。
- (3) 有望な素粒子模型(次最小超対称標準模型など)に基づき、元素合成を通じて宇宙の成り立ちを解き明かす。

3. 研究の方法

- (1) 本研究では、最小超対称模型(MSSM)に1重項超場を加えた次最小超対称標準模型(NMSSM)に焦点を当て、宇宙観測および素粒子実験に矛盾しない模型の探索を目指した。設定はMSSMを分析した先行研究に倣う。スレプトンセクターにはフレーバー混合を想定し、最軽超対称粒子(LSP)がニュートラリーノで、次に軽い超対称粒子(NLSP)はスレプトンとなる模型を考察する。
- (2) LSPと仮定するニュートラリーノの主成分がシングリーノである場合(シングリーノ的ニュートラリーノ)とビーノである場合(ビーノ的ニュートラリーノ)を分析する。
- (3) 考察するシナリオは次のとおりである。
 - ① 元素合成期に残存するスレプトンが、元素合成過程で生成されたリチウム原子核と相互作用し、その一部を破壊する。
 - ② スレプトンは、その後安定なニュートラリーノに崩壊して、ダークマターとして現在まで残存する。
- (4) このシナリオが成立し、かつ現象論的に有望な模型として成立するように、模型に対する要請を整理する。

- ① 本研究のシナリオが成立するためには、スレプトンの寿命が適切な範囲にあることを要請する。その指針は次の通りである。

- 初期宇宙の元素合成期までにスレプトンが崩壊し切ることなく、十分な量のスレプトンが残存する必要がある。
- 原子核と反応するに要する時間スケールよりもスレプトンの寿命が長い必要がある。

- ② 加速器実験によりヒッグス粒子が発見され、その質量が約125ギガ電子ボルトと明らかになった。そこで、この値を再現することを要請する。
- ③ 宇宙の軽元素の存在比が観測値を正しく再現することを要請する。

- (5) (4)の要請を満たすように、模型のパラメータ領域を絞り込む。
- (6) (5)で得られた領域からベンチマークポイントを定め、スレプトンと原子核の反応ネットワークを計算する。始原リチウムとダークマターの残存量が観測に合致するパラメータを探索する。

4. 研究成果

(1) 探索した模型

本研究では、NMSSMの中でも典型的な模型を探索する。対象は下記のように整理できる。

- まず、LSPと仮定するニュートラリーノの主成分がシングリーノである場合(シングリーノ的ニュートラリーノ)とビーノである場合(ビーノ的ニュートラリーノ)にわけられる。
- シングリーノ的ニュートラリーノのケースでは、さらに1重項場の結合定数が比較的小さい場合と比較的大きい場合の2ケースがある。
- ビーノ的ニュートラリーノの場合は、結合定数が大きい場合のみ考える。ビーノ的ニュートラリーノで結合定数が小さい場合は、MSSMに帰着するからである。

(2) パラメータ領域の絞り込み

はじめにリチウム欠損問題に着目する。この問題を解決するためには、スレプトンの寿命に制限がつく。さらに、この制限から、模型に含まれる1重項場の結合定数への制限をつける。該当する結合定数は2つある: (1) 1重項場とヒッグス2重項との間の結合定数 λ 、(2) 自己結合定数 κ である。この2つの変数のパラメータ空間で、レプトンの寿命が制限を満たす領域をプロットした。

「シングリーノ的ニュートラリーノで結合定数が比較的小さい場合」の探索例を図1に

示す。横軸が λ 、縦軸が κ で、赤く示した領域が本シナリオの制限を満たす領域である。

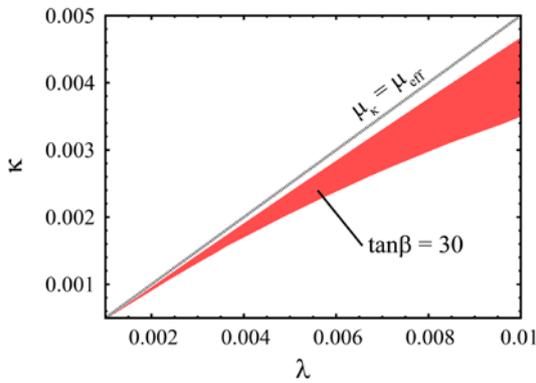


図 1. 本研究のシナリオに適合するようなスレプトンの寿命を与えるパラメータ領域。LSP がシングリーノ的ニュートラリーノで結合定数が比較的小さい場合の結果。本シナリオの制限を満たす領域を赤色で示す。

(3) 宇宙論的制限を満たす模型

(2) で得たパラメータ領域からベンチマークポイントを選び、元素合成の反応ネットワークをシミュレートし、現在の観測結果と矛盾しないパラメータ領域を探索した。パラメータ空間として、スレプトンとニュートラリーノの質量差と、元素合成開始時のスレプトンの数密度をエントロピー密度で規格化した値をとった。このパラメータ空間内の各点で元素合成の反応ネットワークをシミュレートし、現在のダークマターおよび軽元素の残存量と矛盾しない領域を探った。このとき、最も軽いヒッグス粒子の質量が約 125 ギガ電子ボルトになるようにパラメータをとった。図 2 に「シングリーノ的ニュートラリーノで結合定数が比較的小さい場合」の例を示す。赤で示した領域が観測値と矛盾しないパラメータ領域である。

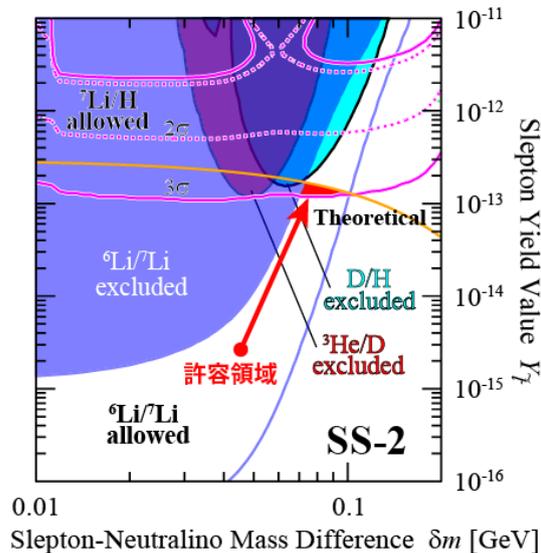


図 2. 現在での暗黒物質の存在量とリチウムの存在量の観測結果のいずれとも矛盾しないパラメータ領域。LSP がシングリーノ的ニュートラリーノで結合定数が比較的小さい場合の結果。

例示した「シングリーノ的ニュートラリーノで結合定数が比較的小さい場合」のほか、「シングリーノ的ニュートラリーノで結合定数が比較的大きい場合」「ビーノ的ニュートラリーノで結合定数が比較的大きい場合」のそれぞれで、同様な許容領域を得た。これにより、本研究で提示したシナリオによって、「暗黒物質の存在量」「始原リチウムの欠損」を同時に説明する可能性を提示した。

(4) 展望

本研究により、NMSSM の範疇で現象論的に有望な模型を提示できた。暗黒物質の問題と始原リチウム欠損問題を同時に解決でき、さらにヒッグス粒子の質量が 125 ギガ電子ボルトであることも組み込めた。本シナリオでは、適切な長さのスレプトン寿命がポイントの 1 つであった。元素合成時のスレプトンの残存量を決定し、現在の暗黒物質とリチウムの残存量に直接影響する。スレプトンの寿命に大きく影響する要因の 1 つが、フレーバー混合である。本研究では小さなフレーバー混合を仮定したが、現象論的な知見は今後に俟つところが大きい。本シナリオの予言がレプトンフレーバー混合に大きく影響されることから、さらなる模型の絞り込みにはフレーバー物理の進展が不可欠であり、レプトンフレーバー混合の探索研究と新奇な模型の探索は、両輪として進めていくことが望ましい。レプトンフレーバー混合の探求はニュートリノ振動や荷電レプトンフレーバー非保存探索を通して行われると考えられる。今後、フレーバー物理の展開が素粒子論の宇宙論的アプローチと融合することを期待したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Yasufumi Konishi, Shingo Ohta, Joe Sato, Takashi Shimomura, Kenichi Sugai, and Masato Yamana, “Big-bang nucleosynthesis through bound state with a long-lived slepton in the NMSSM”, *Physical Review D* **90**, 035003-1–20 (2014).

DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.035003>

- (2) Toshifumi Jittoh, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Joe Sato, Kenichi Sugai, Masato Yamanaka, and Koichi Yazaki, “Big-bang nucleosynthesis with a long-lived CHAMP including ^4He spallation process”, *Journal of Physics: Conference Series* **485**, 1–6 (2014).
DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/485/1/012020>
- (3) Toshifumi Jittoh, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Joe Sato, Kenichi Sugai, Masato Yamanaka, and Koichi Yazaki, “Big-bang nucleosynthesis with a long-lived massive particle including He-4 spallation processes in a bound state”, *AIP Conference Proceedings* **1467**, 298–301 (2012).
DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4742122>

〔学会発表〕（計 7 件）

- (1) 小池正史, “Matter effect in long baseline neutrino oscillation”, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2014, 2014 年 12 月 21 日, 富士 Calm (山梨県富士吉田市)
- (2) 小池正史, 太田俊彦, 齋藤雅子, 佐藤丈 “非一様な物質密度がニュートリノの振動確率に及ぼす効果のフーリエ解析”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 18 日, 佐賀大学本庄キャンパス (佐賀県佐賀市)
- (3) 太田慎吾, “Allowed parameter region in NMSSM with a long-lived slepton from a 125GeV Higgs boson and light elements abundances”, *High Energy Physics in the LHC Era*, 2013 年 12 月 18 日, Valparaiso (Chile)
- (4) 郡和範, 小池正史, 小西康文, 太田慎吾, 佐藤丈, 下村崇, 須貝顕一, 山中真人, “次最小超対称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 125GeV のヒッグスボソン”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 22 日, 高知大学朝倉キャンパス (高知県高知市)
- (5) 太田慎吾, “Big-bang nucleosynthesis with a long-lived slepton and a 125GeV ヒッグス boson in the NMSSM”, 19th International Summer Institute on Phenomenology of Elementary Particles and Cosmology, 2013 年 8 月 20 日, Jirisan National Park, Gurye (South Korea)

- (6) 郡和範, 小池正史, 小西康文, 太田慎吾, 佐藤丈, 下村崇, 須貝顕一, 山中真人, “Big-bang nucleosynthesis with a long-lived slepton and a 125 GeV Higgs boson in the NMSSM”, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学 (広島県東広島市)
- (7) 山中真人, “Big-bang nucleosynthesis with a long-lived CHAMP including He4 spallation process”, PASCOS 2012: 18th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology, 2012 年 6 月 5 日, Merida (Mexico)

〔図書〕（計 0 件）
該当事項なし。

〔産業財産権〕
○出願状況（計 0 件）
該当事項なし。

○取得状況（計 0 件）
該当事項なし。

〔その他〕
ホームページ等
該当事項なし。

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
小池正史 (KOIKE MASAFUMI)
宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10447279
- (2) 研究分担者
該当事項なし。
- (3) 連携研究者
該当事項なし。