

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月12日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22740140

研究課題名（和文）

超対称な素粒子模型が描く新たな宇宙像

研究課題名（英文）

Dark matter and nucleosynthesis under supersymmetric models

研究代表者

小池 正史 (KOIKE MASAFUMI)

埼玉大学・理工学研究科・非常勤講師

研究者番号：10447279

研究成果の概要（和文）：

宇宙の暗黒物質の存在量と、始原リチウム7の欠損問題を同時に解決する提案として、最小超対称標準模型におけるビッグバン元素合成を分析した。本シナリオで両問題の同時解決の鍵となる負荷電スタウの初期宇宙における存在量をボルツマン方程式により追跡するとともに、スタウと原子核の相互作用としてヘリウム4の破砕反応およびスタウのフレーバー非保存過程を新たに考慮した。両問題を同時に説明しうるパラメータ領域があることを示した。その許容領域は小さく、本シナリオは最小超対称標準模型の制限力が高いシナリオといえる。また、本研究に関連してレプトンフレーバーの破れを探索しうる新たな過程を提案した。

研究成果の概要（英文）：

We proposed a new scenario that can simultaneously explain the abundance of the dark matter and the deficit of the primordial lithium 7. Assuming the Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM), we calculated the number of negatively-charged staus, which play a key role in our scenario to solve the two problems, in the early universe with the aid of Boltzmann equations. We also accounted for the two processes that have not been included so far: the spallation processes of helium 4 nuclei due to their interaction with staus, and the interactions that does not conserve the lepton flavor of staus. We found that a parameter region exists that simultaneously solves both problems. The region is small; this scenario gives a strong constraint to the MSSM. In relation, we proposed a new process to search for the lepton flavor violation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（理論），ビッグバン元素合成

1. 研究開始当初の背景

● 宇宙の暗黒物質と暗黒エネルギー

米国の WMAP 衛星が高精度の宇宙観測データをもたらした。我々の宇宙像は大きく塗り替えられた。なかでも大きな驚きは、宇宙の構成要素のうち通常の物質であるバリオンはわずか 4%程度で、残りは 23%の暗黒物質と約 70%の暗黒エネルギーで占められることである。暗黒物質の候補となる粒子は、素粒子標準模型の中に存在しない。従って、この観測結果は、これまで圧倒的な成功を収めてきた素粒子標準模型の変更ないし拡張を迫るものと理解されている。

● リチウム 7 の欠損問題

バリオン数密度の観測結果と標準ビッグバン理論とを合わせて宇宙の軽元素の存在比を見積もると、リチウム 7 の理論的予測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ないもので、標準模型を超えた物理を示唆するものとして、その解明に注目が集まる。

以上の結果は、いずれも素粒子標準模型を超えた物理の可能性を示唆するものと考えられる。標準模型を拡張する可能性の中でも、超対称模型は最も有望なもの 1 つと考えられて盛んに研究されている。素粒子実験物理学においても、欧州で建設が進められている LHC 加速器の大きな目標の 1 つとして、超対称性の探索が挙げられている。宇宙観測分野における上記の新たな展開が、超対称模型においてどのように位置づけられるか、興味が集まっている。

2. 研究の目的

未解決である以下の 2 つの宇宙論的問題の同時解決に挑む：

- (1) 軽元素存在比の観測と理論予測の不一致。
- (2) 暗黒物質の正体と起源の解明。

具体的な目標は次の通りである。

- 超対称模型のもとでビッグバン元素合成を分析し、軽元素の存在比と暗黒物質の起源を同時に説明する。
- 宇宙観測論的に有望な超対称模型を絞り込み、それが描き出す宇宙の進化を探る。
- 模型に対する宇宙論的制限を調べ、加速器実験で検証可能な予言を考察する。

3. 研究の方法

超対称な素粒子模型のもとで、宇宙の発展が従来の標準模型における発展とどのような違いが生じるか。この鍵になるのは、宇宙初期における超対称粒子の果たす役割である。本研究では、元素合成に際して超対称粒子が大きな役割を果たす可能性を追求する。超対称粒子は一般に質量が大きく、速やかに熱平衡から離脱して、宇宙年齢 1 秒程度の元素合成時にはボルツマン因子の抑制によって存在量が小さくなると期待される。この制限を逃れるため、本研究では次のようなシナリオを考える。最も質量の小さい超対称粒子としてニュートラリーノを仮定し、その次に質量が小さい超対称粒子をスタウと想定する。両者の質量差は小さいために、スタウの崩壊が抑制されて寿命が長くなる。かつスタウは荷電粒子であるため、原子核と相互作用して元素合成に影響を与えるというものである。このとき、リチウム 7 はスタウとの相互作用によって一部破壊されて残存量が減る。また、スタウは、より軽い唯一の超対称粒子であるニュートラリーノに崩壊する。ニュートラリーノは電荷をもたない安定粒子で、その後の宇宙に存在し続け、現在暗黒物質として観測される。

このようなシナリオが実際にうまく働く可能性を探るため、まず元素合成開始時（宇宙年齢 1 秒程度）でのスタウの存在比 Y を評価する。この量は、元素合成時にスタウとの相互作用により破壊されるリチウム 7 の量と直結しており、リチウム 7 欠損問題を解決する際、決定的に重要である。この量はスタウの寿命によって決定するものであり、模型のパラメータとしてはスタウとニュートラリーノの質量差 δm によって支配される。先行研究では Y と δm の両方を自由パラメータとして扱ってきた。しかし、実際には δm が決まっていれば、宇宙の発展を追跡することで Y を評価できるはずである。このような考察から、本研究ではまず軽元素合成以前の宇宙の熱史を解析する。特に注目するのはスタウとニュートラリーノの間の熱平衡からの離脱である。スタウが熱平衡から離脱する温度領域でボルツマン方程式を数値的に解き、 Y を模型のパラメータ δm の関数として評価する。これにより、宇宙観測による Y への制限を素粒子模型に対する制限と結びつける。

元素合成時点でのスタウ存在量と並んで重要なのが、スタウと原子核の相互作用を正

確に評価することである。本研究では、スタウの相互作用について2つの展開を念頭に置く。第1は、レプトンフレーバーに混合がある場合の影響である。レプトンフレーバーに混合がある場合はスタウの寿命が短くなる可能性が生じるとともに、スタウとニュートラリーノの間の平衡反応にも影響を生じる可能性があるため、議論が必要である。第2に、スタウと原子核の相互作用として、以下のように新たな過程を取り込む。本研究では、スタウの寿命が長い一方で、原子核との相互作用は適切に進行するというシナリオを築く。これを可能にするため、原子核とスタウの相互作用は束縛状態の形成を経て進むとする。先行研究ではベリリウム7との束縛状態を中心に考察した。本研究では、これに加えてヘリウム4がスタウとの束縛状態をへて破碎される反応を考察する。このとき重陽子及び三重陽子を生ずる反応が可能であり、これらが宇宙初期に過剰に生成されると、現在の観測に矛盾する可能性がある。そこで、この反応を含めた解析を行い、観測に矛盾しない超対称模型が存在するか、するとしたらそれは模型にどのような制限を模型に制限を加えるかを示す。

4. 研究成果

初期宇宙において超対称性模型での負荷電スタウの存在量を追跡した。スタウとニュートラリーノの質量差を模型のパラメータ他とし、スタウが熱平衡から離脱する温度領域でボルツマン方程式を数値的に解いた。これにより、元素合成の際のスタウの数密度 Y を模型のパラメータ δm の関数として評価することができた。先行研究 [1, 2] では Y と δm をともに任意パラメータとして、観測に矛盾しない領域（許容領域）を δm - Y 平面上に図示していた。ここに、本研究で得られた Y と δm の関係を表す曲線を重ねて示すことで、先行研究での許容領域が素粒子模型で実現しうるかどうか分かる。結果は肯定的なものであり、本研究で得た曲線は、先行研究における許容領域を通るものであった（発表論文5）。この結果は、超対称標準模型によって、リチウムの欠損と暗黒物質の存在量を同時に説明できる可能性があることを示すものである。また、レプトンフレーバーの混合の影響についても考察し、混合パラメータに対する上限を議論した（発表論文5; 学会発表2）。

今後の新たな展開を見据えた研究発表も行った。レプトンフレーバー非保存過程 (LFV)

が存在する場合、本研究のシナリオに大きな影響がある。超対称な模型ではLFVは自然に入りうるため、本シナリオの可能性をいっそう広げる可能性がある。また、LFVの実験探索の計画が国内外で進んでおり、近い将来に大きな進展が期待できることから分析を進めた。LFVの実験探索の新たな可能性として「 μ 粒子原子における、原子軌道の μ 粒子と電子のLFV相互作用反応過程」を提案した。従来考察されてきた μ 粒子原子におけるLFV探索は、 μ 粒子と原子核の間の新奇な相互作用を探索するものであるのに対し、本提案では μ 粒子と軌道電子との相互作用を考察する点が新しい。現在わが国で進められている高輝度 μ 粒子線源により、この探索ができる可能性を報告した（発表論文2, 3; 学会発表4, 5, 6）。

続いて、負荷電スタウと原子核との相互作用を拡大し、これまで考えていなかった過程をとり上げて観測との整合性を考察した（発表論文1, 4; 学会発表1）。本研究で新たに考察したのは、ヘリウム4原子核が負荷電スタウとの束縛状態を経て破碎される過程である。これまで、ヘリウム4と負荷電スタウの束縛状態は、重陽子と核融合する「スタウ触媒核融合反応」を起こすものが圧倒的に多いと考え、ヘリウムの破碎は無視できるとしてきた。しかし、実は宇宙初期には環境中に重陽子の存在量が少ないために核融合反応は進まず、破碎反応が重要な役割を果たすことがわかった。終状態としては3種類が考えられる；それぞれ陽子、重陽子および三重陽子を含む状態である。このことから、破碎反応は重陽子や三重陽子を生成する新たなチャンネルとなり、標準的なビッグバン元素合成理論に比べてこれらの存在量は大きくなる。過剰に生成されると観測的制限に抵触するため、模型に対する制限をつける必要がある。そこで、スタウの反応経路としてヘリウム4の破碎を組み込み、元素合成の解析を再度行った。解析の結果、暗黒物質およびリチウム7の残存量をこれまで通り説明し、かつ重陽子・三重陽子が観測に矛盾しないようなパラメータ領域があることがわかった（発表論文2, 5; 学会発表7）。その許容領域は小さく、本シナリオは最小超対称標準模型の制限力が高いシナリオといえる。

宇宙観測により明らかになった暗黒物質の存在は、素粒子標準模型の拡張を迫っている。最も有望な拡張の1つは超対称模型である。本研究では、最小超対称標準模型にもとづき、暗黒物質の存在を説明しながら、初期宇宙における元素合成理論がどのような変更を迫

られるのか考察してきた。この際、始原リチウムの欠損問題を同時に説明しうる可能性を追求し、宇宙観測にたいして素粒子論的に一貫した説明を試みて新たな宇宙像を描き出そうとした。本研究を通して、観測論的な諸制限を満たすようなパラメータ領域が存在することがわかり、最小超対称模型によって新たな宇宙像を提示することができたものとする。パラメータ空間の許容領域は小さかったことから、今後は、最小超対称模型をさらに拡張した模型で、本シナリオの可能性を広げることが課題と考えられよう。

〔参考文献〕

- [1]Toshifumi Jittoh, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Joe Sato, Takashi Shimomura, and Masato Yamanaka, “Possible solution to the ${}^7\text{Li}$ problem by the long lived stau”, *Physical Review D* 第 76 号第 125023-1 頁-7 頁 (2007 年).
- [2]Toshifumi Jittoh, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Joe Sato, Takashi Shimomura, and Masato Yamanaka, “Big-bang nucleosynthesis and the relic abundance of dark matter in a stau-neutralino coannihilation scenario”, *Physical Review D* 第 78 号第 055007-1 頁-4 頁 (2008 年).

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 5 件)

1. Toshifumi Jittoh, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Joe Sato, Kenichi Sugai, Masato Yamanaka, and Koichi Yazaki, “Big-bang nucleosynthesis with a long-lived charged massive particle including ${}^4\text{He}$ spallation processes in a bound state”, *AIP Conference Proceedings* 第 1467 号 298 頁-301 頁 (2012 年).
2. 小池 正史, 「 $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$: 荷電レプトンフレーバーを破る新たな過程」, *素粒子論研究* C79 号 119 頁 (2011 年).
3. Masafumi Koike, Yoshitaka Kuno, Joe Sato, and Masato Yamanaka, “A new idea to search for charged lepton flavor violation using a muonic atom”, *AIP Conference Proceedings* 第 1382 号 242 頁-244 頁 (2011 年).
4. Toshifumi Jittoh, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Joe Sato, Kenichi Sugai, Masato Yamanaka and Koichi Yazaki “Big-bang nucleosynthesis with a long-lived charged

massive particle including ${}^4\text{He}$ spallation process”, *Physical Review D* 第 84 号 035008-1 頁-11 頁 (2011 年).

5. Toshifumi Jittoh, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Joe Sato, Takashi Shimomura, and Masato Yamanaka, “Stau relic density at the big-bang nucleosynthesis era in the coannihilation scenario and a solution to the ${}^7\text{Li}$ Problem”, *Physical Review D* 第 82 号 115030-1 頁-10 頁 (2010 年).

〔学会発表〕 (計 6 件)

1. 実藤俊史, 郡和範, 小池正史, 佐藤丈, 須貝顕一, 山中真人, 矢崎紘一, 「長寿命スタウによるヘリウム 4 原子核破碎反応が初期宇宙元素合成に与える影響」, 日本物理学会 2011 年秋季大会 (2011 年 9 月 18 日, 弘前大学文京町キャンパス, 青森県弘前市)
2. 郡和範, 小池正史, 太田慎吾, 佐藤丈, 下村崇, 須貝顕一, 山中真人, 「長寿命スレプトンのレプトンフレーバー数非保存過程が影響する軽元素合成に対する可能なパラメータ領域の探索」, 日本物理学会 2011 年秋季大会 (2011 年 9 月 18 日, 弘前大学文京町キャンパス, 青森県弘前市)
3. 郡和範, 小池正史, 太田慎吾, 佐藤丈, 須貝顕一, 山中真人, 「長寿命スレプトンのレプトンフレーバー数非保存過程が及ぼす軽元素合成への影響」, 日本物理学会第 66 回年次大会 (2011 年 3 月 27 日, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟県新潟市)
4. 小池 正史, “New Process for Charged Lepton Flavor Violation Searches: $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ ”, 基研研究会「素粒子物理学の進展 2011」(2011 年 3 月 10 日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都府京都市)
5. 小池 正史, “New Process for Charged Lepton Flavor Violation Searches: $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ ”, KEK 素粒子現象論研究会 KEK-PH2011 (2011 年 3 月 4 日, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市)
6. 小池 正史, “New Process for Charged Lepton Flavor Violation Searches: $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ ”, KEK Mini-Workshop on Precision Physics and Muonic Atom (2011 年 3 月 1 日, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市)

〔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)

埼玉大学・理工学研究科・非常勤講師

研究者番号：10447279

(2)研究分担者

なし.

(3)連携研究者

なし.