

氏名・(本籍)	みず 水	た 田	さと 智	し 史
学位の種類	博士(理学)			
学位記番号	理博第1299号			
学位授与年月日	平成5年3月25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)原子核理学専攻			
学位論文題目	Relic Abundance of Neutralinos in the Minimal Supersymmetric Standard Model (超対称性標準模型におけるニュートラリーノの宇宙残留密度)			
論文審査委員	(主査) 教授 柳田 勉 教授 吉村 太彦 助教授 日笠 健一			

## 論 文 目 次

1. Introduction
  2. Dark matter problems
  3. Supersymmetry and R-parity conservation
  4. Neutralino and Chargino
  5. Relic abundance of the lightest neutralino
  6. Co-annihilation effects on the relic abundance of the lightest neutralino
  7. Results of numerical calculation
  8. Concluding remarks
- A. LEP constraints
- B. Top-stop loop corrections to Higgs masses and self-couplings

## 論文内容の要旨

銀河回転の観測を初めとして、多くの宇宙論的な観測結果が、宇宙の質量の90%あるいはそれ以上が光を発していない物質、すなわち、暗黒物質で構成されているということが示唆されている。その物質が具体的に何であるかは今のところ明らかにされてはいず、「暗黒物質問題」と呼ばれている。現在、暗黒物質の正体として様々な候補が挙げられ、それぞれについて詳しい議論がなされているが、そのひとつとして超対称性理論によって予言される粒子であるニュートラリーノが考えられている。本論文では、このニュートラリーノに着目し、それが暗黒物質を構成し得るかどうかに関するこれまでの議論を再考し、さらに、これまでの議論には取り入れられていなかった co-annihilation の効果に関して議論を展開する。

まず初めに超対称性とは何か、そしてなぜ超対称性が導入されたかについて簡単に説明をする。標準模型にはヒッグスボソンという基本的なスカラー粒子が存在するが、その質量の2乗は輻射補正によって高エネルギーの物理で決定されるカットオフ運動量の2次の補正を受ける。一方、ヒッグスボソンの物理的な質量は、 $Z^0$ -ボソンの質量の測定値と、標準模型において摂動論が定義できるという要請から数 TeV 以下でなければならないので、もし標準模型が大統一理論のエネルギースケール、 $\sim 10^{16}$  GeV、まで正しい理論だとすると、およそ24桁の微調整を行う必要があり、非常に不自然であると考えられている。超対称性理論はフェルミオンとボソンの間に対称性を持たせ、両者のループの寄与によって先のスカラー粒子の質量の2次発散を相殺させる。そうすることによって、24桁の微調整という標準模型に内在する不自然さの問題を解決するというものである。

今述べたように、超対称性はフェルミオンとボソンの間に対称性であるが、標準模型の中にはスピンを除いてすべて等しい量子数を持つフェルミオンとボソンの組は存在しない。従って、標準模型を超対称化するためには、標準模型に含まれるフェルミオンに対しては新たなボソンを、ボソンに対しては新たなフェルミオンを導入することになる(新たに導入された粒子を“スーパーパートナー”と呼ぶ)。その中で  $U(1)_Y$  ゲージボソン、 $SU(2)_L$  の中性ゲージボソン、及び2つの中性ヒッグスボソンのそれぞれのスーパーパートナーである、ピーノ、中性ウィーノ、2つの中性ヒッグシーノは質量項で混合し、ニュートラリーノと呼ばれる4つの物理的な状態を作る。その内、最も軽いニュートラリーノは超対称性粒子の中でもまた最も軽い粒子(lightest-superparticle, LSP)であると考えられている。また、超対称性理論における陽子の寿命の予言が観測結果と矛盾しないように、通常、超対称性理論において仮定される R-パリティの保存は、LSP が比較的重い粒子( $\sim O(100\text{GeV})$ )であると考えられているにもかかわらずその安定性を保証するので、最も軽いニュートラリーノは暗黒物質の候補となり得るのである。特に、ある種の超対称性大統一理論におけるワインバーグ角の予言が、最近の LEP での観測値と非常に高い精度で一致したということで、標準理論を超える理論としての超対称性理論に対する期待が高まっており、同時にニュートラリーノも最も興味深い暗黒物質の候補のひとつと考えられるようになって

きた。従って、今、ニュートラリーノの残留密度を計算し、暗黒物質になり得るかどうかを検討することは非常に重要であると思われる。

それでは宇宙初期に生成されたニュートラリーノがどのような機構で現在まで残存しているか、また、その残留密度はどのように決まるかについて議論する。宇宙の温度が十分高い時には、 $H \ll \langle \sigma v \rangle n_x$  が成り立っているので、ニュートラリーノは熱平衡状態を保っているものと考えられる。ここで、 $H$  は宇宙の膨脹率を表すハッブルパラメータで、 $\langle \sigma v \rangle$  はニュートラリーノの対消滅断面積（を熱平均したもの）、 $n_x$  はニュートラリーノの個数密度で、右辺はニュートラリーノ対消滅の反応率を示す。ところが、 $H$  は  $T^2$ 、 $n_x$  は  $\exp\left(-\frac{m_x}{T}\right)$  と変化するので（ $T$  は宇宙の温度、 $m_x$  はニュートラリーノの質量）、やがて宇宙の温度が下がってくると、ある温度  $T_f$  で  $H \sim \langle \sigma v \rangle n_x$  となり、それ以降ニュートラリーノの数が凍結される。従って、ニュートラリーノの質量密度  $m_x n_x$  は  $\langle \sigma v \rangle$  に反比例し、 $\langle \sigma v \rangle$  が計算できればニュートラリーノの残留密度が得られることになる。

これまで多くの著者によって、標準模型を最小限に超対称化し、さらに大統一理論を仮定した極小超対称性大統一理論、あるいはそれに超重力を結合させた模型の枠組みの中でニュートラリーノの残留密度が計算されてきた。これまでなされてきた計算の結果は以下の通りである。

まず、最も軽いニュートラリーノの成分が主にビーノであった場合、 $t$ -または  $u$ -チャンネルでスクォークまたはスレプトン（それぞれクォーク、レプトンのスーパーパートナー）を交換してクォーク、レプトン対に対消滅する過程が主なものになる。ところが、その断面積は小さく、従ってニュートラリーノは十分な量残存しているものと考えられるので、暗黒物質になり得る。

次に主な成分がヒッグシーノの場合であるが、この場合はニュートラリーノの質量が  $W$ -ボソンより重い場合と軽い場合で様子が大きく異なる。 $W$ -ボソンより軽い場合は、 $S$ -チャンネルで  $Z^0$ -ボソンを交換してクォークまたはレプトン対に対消滅する過程が主なものになるが、 $Z^0$ -ボソンと2つの最も軽いニュートラリーノとの結合がきびしく抑制されていること、そしてニュートラリーノがマヨラナ粒子であるために対消滅が  $p$ -波でしか起こらないという2つの理由から、その対消滅断面積は小さくなる。従って、ビーノの場合と同様に暗黒物質になり得る。一方、 $W$ -ボソンより重い場合は、ニュートラリーノは  $W$ -ボソン対に対消滅する事が可能になるが、何の制限もないのでその断面積は大きい。従って、残留密度は小さく暗黒物質にはなり得ない。ただし、ニュートラリーノの質量が数  $\text{TeV}$  程度になると、伝搬関数の運動量の寄与でその対消滅断面積は小さくなるので、再び暗黒物質となり得るようになる。

また、ビーノ、中性ウィーノ、そしてヒッグシーノが同程度混合している場合は、様々な過程が関与するのでその対消滅断面積は比較的大きく、暗黒物質にはなり得ない。

以上がこれまでに得られている結果である。

では次の本論文の主題である co-annihilation の効果に関する議論にうつる。これまでに得られたニュートラリーノの残留密度に関する結果は上述の通りであるが、ここで注意しなければならないのは、これまでの計算では対消滅断面積を計算する際に、最も軽いニュートラリーノの同士

の対消滅過程のみが考慮に入れられていることである。ところが、最近 Griest と Seckel によって次のことが指摘された。それは、最も軽いニュートラリーノと次に軽い超対称性粒子 (next-to-the-lightest-superpartides, NSPs) の質量がほぼ縮退している場合、それらはニュートラリーノが熱平衡から離脱する時期に数においてほぼ同程度存在することになる。よってニュートラリーノとそれらとの間の対消滅断面積がニュートラリーノ同士の対消滅断面積に比べて非常に大きい場合は、ニュートラリーノとそれらとの対消滅過程 (co-annihilation) がニュートラリーノ残留密度に大きな効果を及ぼす、というものである。

実際に、上に挙げた co-annihilation が大きな効果を持つための条件、最も軽いニュートラリーノとほぼ縮退した他の超対称性粒子が存在すること、そして最も軽いニュートラリーノ同士の対消滅断面積に比べて、最も軽いニュートラリーノとその超対称性粒子との対消滅断面積が非常に大きいこと、がヒッグシーノ領域 (最も軽いニュートラリーノの主な成分がヒッグシーノであるようなパラメータ領域)、ただしニュートラリーノが W- ボソンより軽い場合で実現しているということが、我々を初めとしていくつかのグループによって指摘された。

まず最初の条件であるが、この領域では NSP はもうひとつの中性ヒッグシーノと荷電ヒッグスボソンのスーパーパートナーである荷電ヒッグシーノである。2つの中性ヒッグシーノ、及び荷電ヒッグシーノの3つは  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  が破れる以前は完全に縮退していたので、弱い相互作用のエネルギースケールに比べて超対称性理論のパラメータの値が非常に大きいときには、それら3つの粒子の質量の違いは小さいものと考えられる。数値的には今考えているパラメータ領域ではそれら3つのヒッグシーノはほぼ20%以内に縮退しているということがわかった。

それでは対消滅断面積はどのようなものであるかという、この場合も対消滅は S-チャンネルで  $Z^0$ -ボソンを交換してクォーク、レプトン対に対消滅する過程が主な寄与を与えるが、重い中性ヒッグシーノ・軽い中性ヒッグシーノ・ $Z^0$ 、及び、荷電ヒッグシーノ・軽い中性ヒッグシーノ・ $Z^0$  の結合は抑制されない。さらに、この場合異なる粒子の対消滅なので S-波で消滅する事が可能となり、その対消滅断面積は軽いヒッグシーノ同士の対消滅断面積にくらべてほぼ1000倍以上大きくなるのである。

そこで我々は、それらの co-annihilation 過程を考慮にいれてニュートラリーノの残留密度を計算したところ、W-ボソンより軽いヒッグシーノ領域においては、これまで考えられていた値のほぼ1/100以下の残留密度になることがわかり、W-ボソンより軽いヒッグシーノは暗黒物質 (の主成分) にはなり得ないという結果が得られた。

## 論文審査の結果の要旨

この宇宙の大部分の質量は光らない物質、いわゆる暗黒物質によって占められていることが、多くの観測事実等からわかってきている。この暗黒物質の正体を明らかにしていくことは、素粒子論にとって重要であると同時に、宇宙の構造形成の議論等宇宙論にとっても重要である。これまで多くの暗黒物質の候補が提案され、その性質等が研究されてきた。このうち銀河形成等をうまく説明できると考えられている冷たい暗黒物質の候補は、電弱標準模型の中には含まれていない。したがって、冷たい暗黒物質のシナリオは何か新しい物理を必要とする。超対称化された標準模型は、ゲージ・ヒエラルキー問題を解決する可能性を持っているのみならず、自然に暗黒物質の候補を与える。すなわち、R-パリティの保存のため、最も軽い超対称粒子は安定であり、したがってそれは暗黒物質の候補である。

本論文の目的は、超対称標準模型におけるニュートラリーノの宇宙残留密度を計算し、それが宇宙の暗黒物質になる可能性を明らかにすることである。ここでニュートラリーノとは、中性のゲージノ（ゲージ・ボソンの超対称対）と中性のヒグシーノ（ヒッグス・ボソンの超対称対）の適当な線型結合であり、これまでの研究によって、超対称標準模型においてニュートラリーノ以外の超対称粒子が暗黒物質になる可能性は否定されている。

宇宙の残留密度を計算するにあたっては粒子の消滅断面積を知らなければならない。本論文以前の研究においては、最も軽いニュートラリーノ同士の消滅過程のみを考えて、その消滅断面積を用いて残留密度の計算をしている。それによるとビーノやヒグシーノがニュートラリーノの主成分であるときには残留密度が宇宙の臨界密度近くになり、暗黒物質になることが指摘されていた。

最も軽いニュートラリーノの質量が他の超対称粒子の質量に近いときには、これらの粒子との消滅過程（co-annihilation）を考慮しなければならない。特にヒグシーノがニュートラリーノの主成分である場合には、co-annihilationの効果は非常に重要になる。本論文では、このことを指摘し、このco-annihilationの効果を取り入れて宇宙の残留密度を数値的に計算した。この結果ヒグシーノ領域においては、残留密度が小さくなり、いかなる形の暗黒物質にもなり得ないことを明らかにした。一つの暗黒物質の候補を除去し、その結果ビーノが暗黒物質の候補として唯一残ったことは物理的に意味深い、また本論文で用いられた数値解析には、非常に複雑な、あらゆる消滅過程が取り入れられており、将来、加速器実験で超対称粒子が発見されたときに、高い精度でニュートラリーノの残留密度を予言することができる優れたものである。

このように本論文では、ニュートラリーノの宇宙残留密度の計算が非常に系統的に行われている。特にヒグシーノが暗黒物質にならないことを初めて示す等、新しく得られた知見も多い。

本論文は、水田君がこの分野で自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、水田智史提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。