

超対称模型と暗黒物質

Supersymmetric models and dark matter

二瓶武史¹

Takeshi Nihei¹

Abstract: The standard model of particle physics has great success in explaining a huge number of experimental data. However, the standard model can not explain dark matter of the Universe, hence it needs to be extended. We consider supersymmetric models in which there exists a symmetry interchanging bosons and fermions, and discuss that supersymmetry provides a suitable framework for new physics beyond the standard model. The lightest supersymmetric particle, typically the neutralino, is a promising candidate for cold dark matter. We have shown that the neutralino dark matter can explain the observed dark matter abundance at present Universe. We have obtained the lower limit of neutralino dark matter detection cross section by using various experimental and cosmological constraints. Supersymmetry also enables grand unification of three kinds of gauge interactions. Supersymmetric grand unified models predict proton decay. We have found that the main decay mode in the minimal model typically involves the tau-neutrino as well as the muon-neutrino.

1. はじめに

我々の宇宙がどのような物質から構成され、それらの間にどのような力（相互作用）が働くのか。それを追求する学問が素粒子物理学である。数多くの実験データや物理現象は素粒子物理学の「標準模型」と呼ばれる理論によって高い精度で説明されてきた（図1）。標準模型によれば、物質を構成する素粒子はクォークとレプトンという2種類に分類され、それらの間に働く力はゲージ粒子と呼ばれる素粒子を媒介として生じる。また、これらの素粒子の質量はヒッグス粒子と呼ばれるものが引き起こす自発的な対称性の破れによって生じる。このヒッグス粒子が大型加速器実験LHCで最近発見され[1]、これで標準模型に含まれる全ての素粒子が発見されたことになる。

このように標準模型は大きな成功を収めたが、一方でいくつかの深刻な問題点を抱えている。一つ目は、ヒッグス粒子に関する問題である。実験によると、その質量は 125 GeV（陽子質量の約 1.25 倍）であるが、標準模型でこのヒッグス質量の値を実現するには 14 桁もの非常に不自然なパラメータの微調整が必要である。

二つ目は、暗黒物質の問題である。近年の宇宙観測の結果から、宇宙には光を発していない「暗黒物質」と呼ばれる物質が通常の物質の 5 倍以上ものエネルギーを担って存在していることが判明した[2, 3, 4]。これは宇宙の全エネルギーの約 22% である。ところが、

標準模型には暗黒物質になりうるような素粒子は含まれていない。すなわち、暗黒物質を説明するためには、未知の素粒子を含む理論が必要なのである。

三つ目として、標準模型の複雑さが挙げられる。標準模型が 6 種類のクォークと 6 種類のレプトン、3 種類のゲージ粒子という多様な粒子から成る事実は、背後により単純な理論（大統一理論）が存在する可能性を示唆している。

物質粒子			力を伝えるゲージ粒子	
クォーク	u	c	強い力	g
	d	s	弱い力	$W^+ W^- Z^0$
レプトン	e	μ	電磁気力	γ
	ν_e	ν_μ		
質量を生み出す粒子				
ヒッグス粒子				H

Figure 1. The standard model of particle physics.

2. 超対称模型

標準模型を越えるより優れた理論として現在最も有力視されているのが、超対称模型である[5]。あらゆる素粒子は電子などのようにパウリの排他律に従う「フェルミ粒子」と、その制約を受けない「ボーズ粒子」のどちらかに分類されるが、フェルミ粒子とボーズ粒子の間のある種の入れ換えの下で物理が不変であること（超対称性）を要請した理論が超対称模型である。

1 : 日大理工・教員・物理

標準模型の粒子	超対称パートナー
クォーク q	スクォーク \tilde{q}
レプトン l	スレプトン \tilde{l}
ゲージ粒子 g	ゲージノ \tilde{g}
ヒッグス粒子 H	ヒッグシーノ \tilde{H}

Figure 2. The minimal supersymmetric standard model.

この対称性を実現するために、標準模型に含まれる全ての粒子に対して、対になるパートナー粒子が導入される (図 2)。フェルミ粒子であるクォーク、レプトンに対して、スクォーク、スレプトン、と呼ばれるボーズ粒子が導入され、ボーズ粒子であるゲージ粒子、ヒッグス粒子に対して、ゲージノ、ヒッグシーノ、と呼ばれるフェルミ粒子が導入される。

超対称模型では、上で述べた一つ目の問題 (ヒッグス粒子の質量に関する不自然な微調整の問題) が解消される。ヒッグスの質量に対する量子効果を計算すると、ボーズ粒子とフェルミ粒子が逆符号の寄与を与えて大部分が相殺し、このため、ヒッグスの質量が自然に陽子質量の 1.25 倍程度になりうる。

超対称模型によれば、未知の超対称粒子が加速器実験で検出される可能性がある。現在までのところその兆候はないが、LHC 実験等において探索が続けられている。

3. 暗黒物質

宇宙観測の解析から、暗黒物質の大部分 (冷たい暗黒物質) は、電子などよりも重い安定な粒子からなると考えられている。また、光を発しないことから電氣的に中性でなければならず、強い相互作用をしない必要がある。

このような性質を持つ素粒子は標準模型の中には存在しないが、超対称模型の中に登場する「ニュートラリーノ」と呼ばれる中性のマヨラナ型フェルミ粒子が、暗黒物質の候補としてふさわしい性質を持つ。超対称模型では最も軽い超対称粒子 (LSP) が安定となるが、典型的なパラメータを選ぶと、ニュートラリーノが LSP になる。ニュートラリーノは中性ゲージノ (典型的には U(1)ゲージ場のパートナーであるビーノ) と中性ヒッグシーノの混合である。本研究では、このニュートラリーノが暗黒物質であるシナリオに基づき、超対称理論が暗黒物質に関する観測結果をうまく説明しうるかどうかにについて考察する。

3-1. 残存量

現在の宇宙における暗黒物質の残存量は、次のようにして計算される。暗黒物質粒子 χ は初期宇宙に熱平衡状態にあったと考えられるが、宇宙膨張に伴って、その対消滅反応

$$\chi \chi \rightarrow f_1 f_2$$

(ここで、 f_1, f_2 は標準模型の粒子) が凍結する。このため、暗黒物質は膨張宇宙に伴って薄められていくだけとなり、現在における暗黒物質の残存量 (宇宙の全エネルギーの内暗黒物質が占める割合) が次のように求められる。

$$\Omega = 2 \times 10^{-37} \text{ cm}^2 / \langle \sigma v \rangle$$

ここで、 σ は暗黒物質の対消滅過程の断面積、 v は衝突する暗黒物質の相対速度で、 $\langle \sigma v \rangle$ はそれらの積の熱平均である。対消滅断面積が大きいと対消滅が起きやすいので、暗黒物質の残存量が少ないはずであるが、上の式によれば確かにそうになっている。宇宙観測の結果 $\Omega \sim 0.22$ を説明するためには、 $\langle \sigma v \rangle \sim 10^{-36} \text{ cm}^2$ ($= 1 \text{ pb}$) でなければならない。

超対称模型におけるニュートラリーノ暗黒物質の対消滅過程の振幅は多くのファインマン図に対応し、一般にはそれらを全て考慮する必要がある [6]。暗黒物質が軽い領域はすでに LEP 等の加速器実験から排除されている。暗黒物質が重い場合の典型的な (暗黒物質がビーノ的) パラメータ領域では、対消滅断面積が小さすぎ、観測と矛盾する。宇宙論的制限 $\Omega \sim 0.22$ を満たすためには、対消滅断面積が増幅される特殊な状況を考える必要がある。

この増幅は、次の 3 つの領域において実現される:

- (a) 暗黒物質がヒッグシーノ的である領域、
- (b) 擬スカラーのヒッグス生成による共鳴領域、
- (c) LSP の次に軽い超対称粒子 χ' が暗黒物質とほぼ同じ質量で、共消滅過程 $\chi \chi' \rightarrow f_1 f_2$ が重要になる領域。

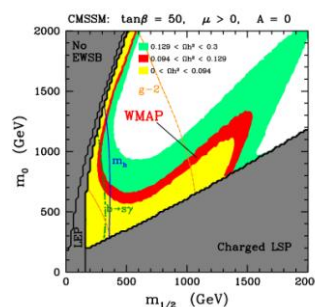


Figure 3. Relic abundance of dark matter in the minimal supersymmetric model.

図 3 に示したのは、超対称模型の予言の一例である。図の縦軸はスクォークの質量パラメータ、横軸はゲージノの質量パラメータであり、赤で塗られた領域が、観測値 $\Omega \sim 0.22$ を満たす部分である。このように、確かに超対称理論で暗黒物質を説明することが可能である。この結果は、さらに LHC 実験でのヒッグス粒子や超対称粒子探索の結果と合わせて、模型の検証に有用である。

また、我々のグループは暗黒物質の残存量に対する CP 対称性の破れの効果を初めて考察し、残存量を大きく変える場合があることを示した [7]。

3-2. 直接検出

暗黒物質は我々の身のまわりにも存在しているはずで、1 秒間に 1 cm^2 を 1~10 万個もの暗黒物質が通過していると見積もることができる。このため、実験室での暗黒物質の直接的な検出を試みる実験も行われている。暗黒物質が検出器内の陽子や中性子と弾性散乱する際の陽子や中性子の反跳エネルギー (1~100 keV 程度) を、様々な方法で検出する。

現在までのところ、暗黒物質と思われるシグナルは検出されていないが、より精度の高い実験が計画中であり、近い将来、2桁ほど精度が上がると期待されている。それに伴って、より詳しく包括的な理論的解析が必要となるため、我々は現在その研究を進めている。

ニュートラリーノ暗黒物質は原子核と非常に弱く相互作用する。その相互作用は、非相対論的な極限ではスピンに依存しない相互作用とスピンに依存する相互作用の 2 種類に分けられる。このうち、スピンに依存しない相互作用は原子核の質量数に比例するため、重い原子核を用いることにより、検出感度を高めることが出来る。

スピンに依存しない相互作用に関して、現在までの直接検出実験と理論計算の結果を比較したものを図 4 に示す。縦軸は暗黒物質と核子との散乱断面積で、横軸は暗黒物質の質量である。実線はこれまでの実験から得られている断面積の上限値で、点線は近い将来の実験で探索できる範囲を表している。ピンク色で塗られているのは DAMA 実験での「検出」領域であるが、これは他の実験と矛盾している。ここでは、暗黒物質 χ と核子 N との散乱断面積に $\sigma_{\chi N} < 10^{-7} \text{ pb}$ という制限が得られていると考える。

これに対して、黄色の領域が制限の強いミニマル超対称模型の予言であり [8]、水色の領域がより一般的な場合の我々の予言である [9]。一般的な場合には質量

パラメータを大きくすると断面積を限りなく小さく出来そうに思えるが、我々の解析では他の実験や宇宙観測 (B 中間子の輻射の崩壊、ミュオン粒子の異常磁気能率、暗黒物質の残存量) から得られる制限を用いて、断面積に下限値 $\sigma_{\chi N} > 10^{-12} \text{ pb}$ があることが示された。

この結果は、暗黒物質探索実験が目指すべき検出感度の指標を与えることとなった。

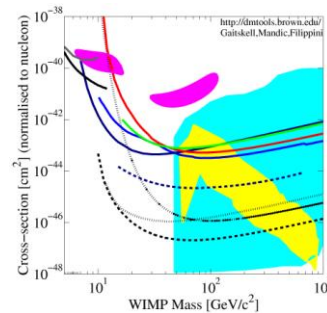


Figure 4. Cross section of dark matter elastic scattering off nucleon in the minimal supersymmetric model.

3-3. 間接検出

銀河中心や太陽などのような重力源には、重力によって束縛された暗黒物質が蓄えられていると考えられる。このため、現在の宇宙では凍結している暗黒物質の対消滅が、そのような場所でのみ起こり得る。その生成物としてガンマ線やニュートリノ等の宇宙線が放出されるので、これを観測することによって暗黒物質の存在を間接的に検出することが出来る。

これまでの人工衛星を用いた宇宙線観測実験において、陽電子やガンマ線等の宇宙線のフラックスに過剰成分が検出されている。これが銀河内での暗黒物質の対消滅に由来するものである可能性があるが、それを調べるためには宇宙線のフラックスの天文学的な理解 (バックグラウンドの理解) が重要と思われる。

4. 大統一理論

標準模型の場合と異なり、超対称模型では 3 種類の相互作用の強さが高エネルギーで一致する (図 5)。このため、超対称模型では 3 つの相互作用を統一的に扱う大統一理論を構築することが可能となる。大統一理論では、力の統一に加えてクォークとレプトンが統一的に扱われ、標準模型の複雑さの問題が軽減される。

大統一理論では、標準模型では安定なはずの陽子が崩壊する可能性が出てくる。陽子はクォーク 3 個から構成されているが、大統一理論ではクォークとレプトンが本来は対等なものとして扱われるため、陽子中の

クォークのうち1個がレプトンに変化することが可能となり、陽子崩壊が引き起こされる。

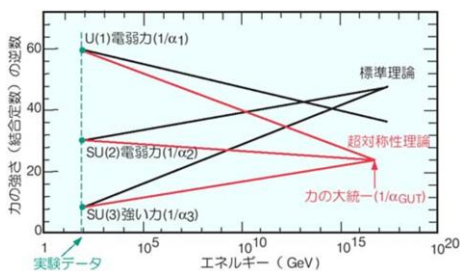


Figure 5. Unification of three gauge couplings.

日本のスーパーカミオカンデ実験などで陽子崩壊の探索が行われているが、現在までのところ陽子の崩壊は観測されておらず、崩壊寿命が 10^{34} 年程度よりも長くなければならないことが分かっている。一方、超対称大統一理論では、特に最も簡単な SU(5) 模型の場合に陽子崩壊に関する数多くの研究がなされてきた。従来の解析ではミュー型ニュートリノが出る崩壊モードが支配的であるとされていたが、我々が過去の解析で見落とされていた寄与を取り入れて再解析したところ、タウ型ニュートリノが出るモードも同程度に重要であることが分かった[10]。また、現在の陽子崩壊の実験と矛盾しないためには、スクォークやスレプトンの質量が 10 TeV 程度より重くなければならないことが示された。図6に陽子崩壊実験の結果から得られる制限を示す。これは強い相互作用をする重いヒッグスの質量の下限値をスクォークの質量の関数として図示したものであるが、我々の結果(実線)が従来の結果(破線)と大きく異なっていることが分かる。

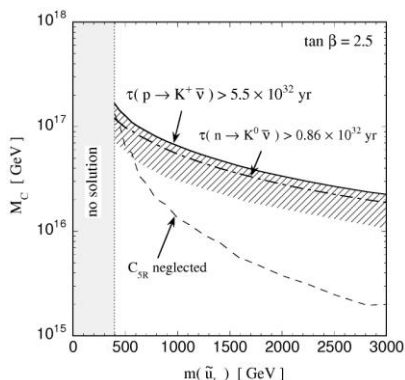


Figure 6. Proton decay constraints on the minimal SU(5) supersymmetric grand unified theory.

5. まとめ

超対称模型におけるニュートラリーノは、暗黒物質の最も有力な候補の一つである。超対称暗黒物質は現

在の宇宙における残存量を説明しようと共に、将来の暗黒物質直接検出実験において検出可能なシグナルを预言する。この結果はLHC実験におけるヒッグス粒子や超対称粒子の探索の結果と合わせてモデルの検証に有用である。また、超対称性を導入することにより、3つの相互作用の大統一理論を考えることが出来るが、最も簡単な模型は陽子崩壊実験の結果から強い制限を受けている。

以上のように、暗黒物質の正体を探ることは、大宇宙の理解を深めるのみならず、素粒子のミクロな世界の解明にも大きな役割を果たす。我々の研究が、標準理論を越える新しい素粒子理論を構築する上で何らかの示唆を与えることが出来ればと期待している。

謝辞

日頃お世話になっております物理学科・量子科学研究所の先生方、並びに事務の方々に感謝申し上げます。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金・若手B(研究課題番号:18740159)の助成を受けた。

6. 参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B716 (2012) 1, CMS Collaboration, Phys. Lett. B716 (2012) 30.
- [2] D. N. Spergel et al, Astrophys. J. Suppl. 148 (2003) 175.
- [3] A. G. Riess et al, Astron. J. 116 (1998) 1009; S. Perlmutter et al, Astrophys. J. 517 (1999) 565.
- [4] D. Clowe et al, Astrophys. J. 648 (2006) L109.
- [5] H. P. Nilles, Phys. Rept. 110 (1984) 1; H. E. Haber, G. Kane, Phys. Rept. 117 (1985) 75.
- [6] T. Nihei, L. Roszkowski, R. Ruiz de Austri, JHEP0105 (2001) 063; L. Roszkowski, R. Ruiz de Austri, T. Nihei, JHEP 0108 (2001) 024; T. Nihei, L. Roszkowski, R. Ruiz de Austri, JHEP 0207 (2002) 024.
- [7] T. Nihei, M. Sasagawa, Phys. Rev. D70 (2004) 055011; T. Nihei, Phys. Rev. D73 (2006) 035005.
- [8] J. R. Ellis, K. A. Olive, Y. Santoso, V. C. Spanos, Phys. Rev. D71 (2005) 095007.
- [9] Y.G. Kim, T. Nihei, L. Roszkowski, R. Ruiz de Austri, JHEP0212 (2002) 034.
- [10] T. Goto, T. Nihei, Phys. Rev. D59 (1999) 115009.