

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340047

研究課題名(和文) テラスケールの素粒子模型と暗黒物質の正体の解明

研究課題名(英文) Particle physics at TeV scale and the dark matter in the universe

研究代表者

久野 純治 (Hisano, Junji)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60300670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の暗黒物質の正体は素粒子標準模型を越えるTeVスケールの新物理の未知の粒子(ウィンプ)であると期待されている。LHC実験の結果をもとに暗黒物質の背後にある超対称標準模型、拡張ヒッグス模型などの可能性をしらべ、その現象論を研究した。また暗黒物質の直接のためのウィンプ・核子散乱断面積の精密評価、間接探索のためのガンマ線へのウィンプ対消滅断面積の評価、原子ハローのサイズの評価を行った。

研究成果の概要(英文)：The dark matter may be unknown elementary particles, called as Weakly-interacting massive particles (WIMPs), in physics beyond the standard model at TeV scale. We studied models beyond the standard model with the dark matter candidates, such as supersymmetric standard models and extended Higgs models, based on the LHC results. We also studied the nucleon-WIMP scattering cross section for the dark matter direct detection, the WIMP-pair annihilation cross section into gammas for the indirect detection, and also size of protohalos based on the WIMP hypothesis.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子模型 暗黒物質 テラスケール 超対称性

## 1. 研究開始当初の背景

1934年ツビッキーによって提案された未知の物質、暗黒物質の存在は今日疑いようがない。宇宙はインフレーションにより一様・平坦になった熱い宇宙から始まり、宇宙は冷え、非相対論的な運動をする物質が宇宙膨張を支配して以降、重力的に物質が集まり銀河、銀河団といった構造が形成された。現在の様な宇宙が実現するにはこの構造形成過程で暗黒物質の存在が不可欠である。暗黒物質の量は、WMAP衛星に代表される宇宙マイクロ波背景放射の精密測定などにより評価され、宇宙のエネルギーの約22%であることが分かっている。その存在が確立した暗黒物質であるが、その正体は現在も全くの謎であり、物理学におけるビッグミステリーの1つである。

冷たい暗黒物質の正体は未知の素粒子である可能性、特にテラスケール ( $\text{TeV}=10^{12}$ 電子ボルト)にある素粒子標準模型を超える理論の予言する安定の素粒子である可能性に多くの研究者が注目している。ヒッグス粒子はクォーク、レプトンやW/Zゲージボゾンなどの素粒子の質量の起源を説明するが、その質量のもつエネルギースケールの自然さの問題から、テラスケールには素粒子標準模型を超える理論があると期待されている。様々な素粒子模型の提案がなされているが、多くの模型が(ウィンプと呼ばれる)通常物質と弱い相互作用をする安定な素粒子の存在を予言している。このウィンプは、宇宙が熱かったとき熱的過程により大量に作られ、現在の宇宙でも対消滅しきらず残る(熱的残存仮説)。ウィンプの質量がテラスケールにあるのであれば、その残存量がちょうど現在の観測されている暗黒物質の量をうまく説明できることがわかっている。このことはウィンプの奇跡と呼ばれ、テラスケールに新物理を考える1つの原動力になっている。

ウィンプの奇跡の実験的検証が、現在3つのアプローチで進められている。1つはLHC加速器実験によるテラスケールの物理の直接検証である。これによりウィンプの性質を直接調べることができる。我々の周りに存在するウィンプと通常物質との反応を捉えるのが、2つ目の地上での暗黒物質の直接探索である。世界中で現在30を超える実験が計画、もしくは実施段階にある。3つ目、太陽や銀河などの質量が集中しているところに暗黒物質は大量に存在し、そこではウィンプの対消滅が頻繁に起きている。そこから生じるガンマ線、陽電子、ニュートリノなどを捉える間接探索は、Fermiガンマ線望遠鏡衛星などによる宇宙線観測やSuperKamiokandeやIceCubeといった大型ニュートリノ検出器により進められている。

## 2. 研究の目的

平成24年度は、それまでのLHC実験結果から期待されるテラスケール模型の構築とその検証の可能性の研究、ウィンプ・核子散乱断面積の精密評価、ウィンプ対消滅起源のガンマ線観測からの制限、原子ハローのサイズの評価などの準備研究を行い、平成25、26年度は、前年度までの7TeVの重心系エネルギーのLHC実験で新物理の明確な兆候がみえた場合と見えなかった場合に合わせて、そこから期待されるテラスケール模型が導くウィンプの物理の研究を行う。

## 3. 研究の方法

1) LHC実験結果から期待されるテラスケール模型の構築とその検証の可能性の研究  
テラスケールにおける素粒子標準模型を超える物理として最も有望とされている超対称標準模型を、LHC実験結果をもとに現実的な模型に再構築し直し、そこから期待されるウィンプが導く暗黒物質の物理を明ら

かにする。

Constrained Minimal Supersymmetric Standard Model (略して CMSSM) は少ないインプットで模型を記述できることから、ベンチマーク模型としてその暗黒物質の物理を含む現象論的解析が多くの研究者によりなされてきた。その一方で、平成 23 年現在までの LHC 実験で新物理が発見されてなかったことから CMSSM を仮定した時、軽い超対称粒子を预言するパラメータ領域は厳しく制限が付き始めている。一方、一般的な超対称標準模型では LHC 実験では制限が付きにくい領域がある。その一つがカラーを持った素粒子とウィンプの質量が縮退しているような場合で、シグナルがバックグラウンドと区別が付きにくくからだ。久野は、協力研究者の石渡、永田とともに、そういった領域は暗黒物質の直接探索実験で測定されるウィンプと核子散乱断面積が飛躍的に大きくなることを示した。縮退した質量を预言するような超対称模型の構築を今後行うとともに、その模型に対して LHC 実験や暗黒物質直接探索以外の実験からの制限といった現象論を行う。これにより、縮退した質量をもつ超対称標準模型の可能性をより明らかにする。

一般的な超対称標準模型において熱的残存仮説により暗黒物質の量を説明できるパラメータ領域を同定し、それらの領域の LHC 実験や、暗黒物質直接、間接探索実験でウィンプの存在が検証できるかどうかを明らかにする。

## 2) ウィンプ・核子散乱断面積の精密評価

ウィンプ・核子散乱断面積は暗黒物質直接探索で測定される量である。ウィンプの存在する素粒子模型からの散乱断面積の预言の信頼性が重要である一方、散乱過程に QCD が絡むことから計算方法に混乱が生じている。

久野はこれまで石渡、永田とともにウィンプ・核子散乱断面積の信頼できる計算方法の開発を行ってきた。これにより、すくなくとも QCD 補正も含め主要部分に対して、信頼できる計算方法を確立し、超対称標準模型や普遍余剰次元模型の预言するウィンプに対して評価を行った。一方、twist-2 演算子の行列要素の繰り込みスケールの取り方、QCD の高次補正の取り扱いなどはまだ不明であり、今後それらを明らかにする。

上記の計画に加え、暗黒物質直接探索におけるウィンプ・核子散乱断面積の評価のさらなる精密化を図る。また、暗黒物質直接探索に対する大気ニュートリノ起源のバックグラウンドを評価し、その軽減の方法を検討する。

また、余剰次元模型、リトルヒッグス模型における暗黒物質に対しても、超対称標準模型と同様の研究を行う。

## 3) ウィンプ対消滅起源のガンマ線観測からの制限

Fermi ガンマ線望遠鏡衛星によりウィンプの対消滅起源のガンマ線の探索が様々な天体に対してなされている。特に、銀河系近傍の矮小銀河の観測から導かれた制限は、数 10GeV 程度の軽いウィンプの対消滅断面積は熱的残存仮説と矛盾するという報告がなされている。また、地上のチェレンコフ望遠鏡、HESS は銀河中心域のガンマ線の観測よりテラスケールの質量をもつウィンプに対して、対消滅断面積が熱的残存仮説から期待される値の 10 倍程度以下であることを明らかにした。これらの結果の妥当性の検証を行う。

## 4) 原子ハローのサイズの評価

宇宙の構造形成は小さなスケールより揺らぎが非線形に成長し、現在の宇宙になっ

たとえられている。最も小さい暗黒物質からなるハロー（原子ハロー）のサイズは暗黒物質の平均自由行程によって決まる。原子ハローのサイズは、暗黒物質起源のガンマ線、特に銀河や銀河団のハロー域からのガンマ線の流量を予言する際重要であることが議論されている。久野は門田とともに、宇宙初期、熱浴との運動平衡からウィンプが外れる温度とのウィンプ・核子散乱断面積との相関を調べ、原子ハローのサイズを暗黒物質直接探索から評価できるかを明らかにする。また、LHC 実験によりウィンプの熱浴との運動平衡がきれる温度が決められるかを検討する。

#### 4. 研究成果

3年間の主な成果は以下の通りである。

##### 1) LHC 実験結果を受けた暗黒物質を持つ素粒子モデルの構築とその現象論

標準モデルのヒッグスボゾンが発見された。それを受けて次の研究を行った。標準モデルからヒッグスセクターを拡張する方法の一つの方法に、パラメータが1であることを予言するSU(2)<sub>7</sub>次元ヒッグスの導入を行った。ゲージ場とともに物質場に質量を与えるようSU(2)<sub>2</sub>次元および7次元ヒッグスの両方を導入するためにはその間を繋ぐ新粒子の導入が必要であり、自然な拡張としてそれらはZ<sub>2</sub>離散対称性のもと奇となることを示した。これらは暗黒物質の候補となる。

発見されたヒッグスボゾンが超対称標準モデルの予言するヒッグスボゾンだとすると、その質量には大きな量子補正が必要であり、その起源として重い超対称粒子の可能性がある。この場合、暗黒物質の候補は、SU(2)電荷をもつウィノ的、もしくはヒッグシーノ的なニュートラリーノとなる。我々はそれらが宇宙の暗黒物質の候補である場合、

原子核との散乱断面積の評価を行った。特に、ニュートラリーノの質量が重くなっても小さくならない散乱への高次補正を取り込み、精度良い計算を行った（後述）。その結果を使い、将来の検証可能性を議論した。重い超対称粒子の場合、LHC 実験で発見が困難であるが、暗黒物質直接探索ならば発見の可能性はある。

10 ~ 100 TeV 程度の質量をもつスクォーク、スレプトンをもつ超対称モデルは、ヒッグス粒子の質量、暗黒物質の観点から注目されており、その理論における電気双極子能率、陽子崩壊を議論した。

電弱相互作用をするような暗黒物質のヒッグス場との結合を表す有効理論を導いた。これにより、ヒッグス粒子の2光子崩壊への暗黒物質の寄与、暗黒物質のヒッグス交換による直接探索、電気双極子能率への暗黒物質の寄与などの現象論的な研究が高エネルギーの理論によらず可能となる。特に電子の電気双極子能率の実験から制限が一般的に強い制限を与えることを示した。

##### 2) ウィンプ・核子散乱断面積の精密評価

電弱相互作用をするような暗黒物質と原子核との散乱はパートンレベルでは電弱ゲージボゾンのループ過程によって生じる。我々は以前散乱断面積をQCD結合定数による摂動のリーディングで評価を行った一方で、偶発的はダイアグラム間の相殺により予言の不定性が大きく、信頼できる予言を与えるには高次補正の評価をする必要があった。我々は、軽いクォークの寄与に関する高次補正の評価を行い、その寄与が優位であることをみた。これにより高次補正を入れた信頼性の高い結果を得ることができた。特に超対称標準モデルにおいてSU(2)三重項のウィノが暗黒物質である場合、熱的残存仮説から期待さえるウィノの質量は3TeVあたりで、その時でも散乱断面積はニュー

トリノバックグラウンドより大きいことを示した。

また、暗黒物質が実スカラー粒子、マヨラナフェルミオン粒子、実ベクター粒子の場合に着目し、カラーを持った粒子を交換することで散乱が起きる場合の系統的な散乱断面積の評価方法を与えた。

### 3) ウィンブ対消滅起源のガンマ線観測からの制限

暗黒物質対消滅起源の線ガンマ線は宇宙線観測による暗黒物質探索において暗黒物質の存在の決定的証拠になると考えられている。TeV スケールを超える質量をもつ電弱相互作用をするような暗黒物質が対消滅する場合、電弱相互作用による非摂動的効果によりその断面積が大きくなることを我々は以前示した。その一方で、その予言が電弱相互作用による高次補正により $O(1)$ の不定性があることが指摘されている。この評価は数値的に行われており、大きな高次補正の起源が明らかではなかった。我々は解析的に高次補正を導き大きな補正の起源を明らかにするとともに、先行研究の評価の問題点を明らかにした。

### 4) 原子ハローのサイズの評価

宇宙初期に作られ、宇宙の構造の種になる原子ハローのサイズの評価を行った。宇宙初期、熱浴との運動平衡からウィンブが外れる温度によってそのサイズは決まるが、その評価において、クォーク・ウィンブの寄与を取り込み、精度の良い評価を行った。また、原子核・暗黒物質の散乱を見る暗黒物質直接探索と原子ハローのサイズとの関係を議論した。

## 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10件)

1) J.Hisano, K.Ishiwata, N.Nagata.  
QCD Effects on Direct Detection of Wino Dark Matter.  
arXiv:1504.00915 [hep-ph].  
(JHEP 掲載決定)

2) J.Hisano, Y.Muramatsu, Y.Omura, M.Yamanaka.  
Flavor violating  $Z'$  from  $SO(10)$  SUSY GUT in High-Scale SUSY.  
Phys.Lett. B744 (2015) 395-400.  
DOI:10.1016/j.physletb.2015.04.020.  
(査読あり)

3) J.Hisano, R.Nagai, N.Nagata.  
Effective Theories for Dark Matter Nucleon Scattering.  
JHEP 1505 (2015) 037.  
DOI: 10.1007/JHEP05(2015)037  
(査読あり)

4) J.Hisano, D.Kobayashi, N.Mori, E.Senaha.  
Effective Interaction of Electroweak-Interacting Dark Matter with Higgs Boson and Its Phenomenology.  
Phys.Lett. B742 (2015) 80-85.  
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.01.012  
(査読あり)

5) QCD Corrections to Quark (Chromo)Electric Dipole Moments in High-scale Supersymmetry.  
K.Fuyuto, J.Hisano, N.Nagata, K.Tsumura.  
JHEP 1312 (2013) 010.  
DOI: 10.1007/JHEP12(2013)010  
(査読あり)

6) J.Hisano, D.Kobayashi, T.Kuwahara, N.Nagata.  
Decoupling Can Revive Minimal Supersymmetric  $SU(5)$ .  
JHEP 1307 (2013) 038.  
DOI: 10.1007/JHEP07(2013)038  
(査読あり)

7) J.Hisano, T.Kuwahara, N.Nagata.  
Grand Unification in High-scale Supersymmetry.  
Phys.Lett. B723 (2013) 324-329.  
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.05.017  
(査読あり)

8) J.Hisano, K.Tsumura.  
Higgs boson mixes with an  $SU(2)$  septet representation.  
Phys.Rev. D87 (2013) 053004.  
(査読あり)

9) J.Hisano, K.Ishiwata, N.Nagata.  
Direct Search of Dark Matter in  
High-Scale Supersymmetry.  
Phys.Rev. D87 (2013) 035020.  
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.035020  
(査読あり)

10) P. Gondolo, J.Hisano, K.Kadota.  
The Effect of quark interactions on dark  
matter kinetic decoupling and the mass of  
the smallest dark halos.  
Phys.Rev. D86 (2012) 083523.  
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.083523  
(査読あり)

〔学会発表〕(計7件)

1) J.Hisano.  
Review of Electric Dipole Moments (EDM).  
Rencontres De Moriond “Electroweak  
Interactions and Unified  
Theories” (2014/3/14-2014-3/21, La  
Thuile, Aosta, Italy)

2) J.Hisano.  
Tasks in Next 10 years -A personal view  
on future of searches for beyond the  
standard model-.  
KMI International Symposium 2013 on  
“Quest for Origin of Particles and the  
Universe” (KMI2013)  
(2013/12/11-2013/12/13, Nagoya  
university).

3) J.Hisano.  
EDMs and beyond the standard model.  
日本物理学科 2013 秋期大会 (2013/9/23,  
高知大学)

4) J.Hisano.  
Direct Detection of Wino Dark Matter.  
PACIFIC 2014 (A UCLA Symposium on  
Particle, Astrophysics and Cosmology  
including Fundamental Interactions)  
(2014/9/15-2014/9/20, Moorea, French  
Polynesia)

5) J.Hisano.  
Probing the TeV scale and beyond.  
RCNP 研究会「CP violation in elementary  
particles and composite system」  
(2014/11/10-2014/11/11, 大阪大学核物  
理学研究センター)

6) J.Hisano.  
Probing the TeV scale and beyond.  
4th KIAS Workshop on particle physics and  
cosmology (2014/10/27-2014/10/31, KIAS,  
韓国)

7) J.Hisano.  
QCD Effects on Direct Detection of Wino  
Dark Matter.  
Portoroz 2015 (2015/4/7-2015/4/10,  
Portoroz, Slovenia)

〔その他〕

アウトリーチ活動

1) 久野純治, NHK 文化センター名古屋教  
室 「眺めのいい宇宙」講座 2014 年 10  
月 15 日 「ヒッグス粒子発見のムコウ側～  
素粒子標準模型を超える新物理探索～

2) 久野純治, 半田高校 「知多で学ぶサイ  
エンスコミュニケーション」 2014 年 3 月  
14 日 「宇宙の暗黒物質は未知の素粒子  
か？」

3) 久野純治, NHK 文化センター名古屋教  
室 「渦巻く宇宙」講座 2013 年 7 月 17  
日 「ヒッグス粒子発見のムコウ側～素粒  
子標準模型を超える新物理探索～」

4) 久野純治, 栄中日文化センター 「宇  
宙 138 億年の歴史～素粒子でみる宇宙の  
誕生から現在そして未来～」講座 2013 年  
12 月 14 日 「宇宙の暗黒物質は未知の素粒  
子か？」

5) 久野純治, NHK 文化センター名古屋教  
室 「衝突にみちた」講座 2012 年 10 月 3  
日 「宇宙の暗黒物質は未知の素粒子か？」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久野 純治 (Hisano, Junji)  
名古屋大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 60300670

(2) 連携研究者

杉山 直 (Sugiyama, Naoshi)  
名古屋大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 70222057

(3) 研究協力者

門田 健司 (Kadota, Kenji)  
津村 浩二 (Tsumura, Koji)  
石渡 弘治 (Ishiwata, Koji)  
永田 夏海 (Nagata, Natsumi)  
瀬名波 栄問 (Senaha, Eibun)