

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740169

研究課題名(和文) LHC実験を踏まえたILC実験における暗黒物質探査

研究課題名(英文) Dark matter searche at the ILC based of latest LHC results

研究代表者

松本 重貴 (Matsumoto, Shigeki)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：00451625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は互いに密接した以下の二つにより構成されている。一つ目は現在までのLHC実験の結果を鑑み、その背後にある新物理を精査し、魅力的な暗黒物質候補を提案する事で、二つ目はこれらの暗黒物質候補の検証においてILC実験がどのような役割を果たし得るかを明らかにする事である。様々な成果を上げられたが、その中で最も大きな研究成果は最小超重力誘導型超対称理論を提案した事である。その結果、中性ウィーノ暗黒物質が予言され、その質量1TeV程度以下となるため十分にILC実験で検証可能である事が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is composed of the following two things which are closely related with each other. One is to propose attractive dark matter candidates based on latest LHC results and winnowing good particle physics models out. Second is to clarify the role of the ILC experiment in the search and the measurement of the candidates. Among several achievements I did, the most outstanding one is the proposal of the pure gravity mediation model of SUSY breaking. The neutral wino, which is the SUSY partner of the neutral weak gauge boson, is predicted to be dark matter in this model, and its mass is about 1TeV or less. It then turned out that the ILC has enough capability to explore the dark matter candidate.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学

キーワード：暗黒物質 ILC LHC 新物理模型 超対称模型

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は大型ハドロン衝突型加速器(LHC)実験が重心系エネルギー7 TeVでの運転を開始しており、年度内にヒッグス粒子や素粒子標準模型を超える新物理発見の兆候が現れるとの期待で満ち溢れていた。本研究課題は正しくこの状況を踏まえて提案されたが、その大きな動機は、暗黒物質の正体解明において、LHC 実験より得られる情報を踏まえた上で日本の重要な将来計画の一つである国際線形加速器(ILC)実験の果たす役割を明らかにする事であった。

2. 研究の目的

上述の背景及び動機に基づき、以下の通り、二つの具体的な研究目的を設定した。

(1) LHC 実験から得られる情報を基にその背後にある新物理模型を特定し、それらの模型が予言する暗黒物質候補を明らかにする。また同時にその性質(質量、スピン、量子数や相互作用定数)について、LHC 実験はもとより他の素粒子実験・宇宙観測をも利用してこれらの性質を絞り込む。

(2) 上記研究で得られた結果を用いて、ILC 実験における暗黒物質生成及びその性質の定量的な確定に関して研究を行う。特にどのようなシグナル・プロセスに注目すべきかを具体的に明らかにし、ILC 実験の新物理ワーキング・グループへ提供する。

3. 研究の方法

上記研究目的を効率的に遂行するために、具体的な素粒子模型(新物理模型)に基づいた研究(Model-dependent approach)と、特定の素粒子模型に基づかず場の理論の枠内で一般的に暗黒物質の性質等の議論を行う研究(Model-independent approach)の両方をほぼ同時並行で行った。各研究において、上述の研究目的に沿って研究を進めたので以下でその具体的な内容について記す。

(1) 研究開始当初は具体的な素粒子模型として、超対称模型、複合ヒッグス模型、及び余剰次元模型を考える予定であった。その後LHC 実験におけるヒッグス粒子の発見、そして特に PLANCK 観測におけるインフレーションシナリオへの強い支持(4次元時空における単純明快なインフレーション模型への支持)が得られるに当たり、テラスケールの余剰次元模型は前者2つの模型(超対称模型と複合ヒッグス模型)に比べその動機がやや薄れたため研究項目から外した。従ってModel-dependent approachでは超対称模型と複合ヒッグス模型(特にリトル・ヒッグス模型)について、LHC等の素粒子実験や宇宙論・

天文観測の結果を踏まえて絞り込み、有力な暗黒物質候補を特定する計画を立てた。その後この暗黒物質の ILC 実験での検証可能性について調べ、どのシグナル過程に注目すべきかを明らかにする研究を行った。

(2) 模型に依存しない手法を用いた研究計画は以下の通りである。まず暗黒物質 + 標準模型の最も単純なシステムを考え、標準模型のゲージ対称性が許す次元5までの全ての相互作用を書き下す。その後LHC等の実験結果を考慮し、この単純模型の模型パラメータを制限した上で ILC 実験におけるシグナル探査の可能性について調べる。次に上記とは独立な研究として、暗黒物質が弱い相互作用をする場合に焦点を当てる。このとき荷電パートナーが暗黒物質と同じ質量スケールに存在する。その結果 ILC 実験において暗黒物質は、荷電粒子の生成とその崩壊により生成される。この過程を詳細に調べ、どの程度の精度で暗黒物質の性質が決定され得るのかについて定量的に調べる。またこれらの研究を行う傍ら、暗黒物質粒子の安定性の観点から、B-L ゲージ対称性(Bはバリオン数でLはレプトン数)の重要性に気づき、その結果、模型の詳細に依存しない形で非対称(Asymmetric)暗黒物質の実現可能性を明らかにする事が出来た。このため非対称暗黒物質についても研究を行い、その検出に向け ILC 実験が定量的にどのような役割を果たし得るのかについても研究を行った。

4. 研究成果

幸いにも上記研究計画をほぼ完全な形で遂行し、それぞれの研究で重要な結果を得る事が出来た。以下ではそれらの成果を4つのカテゴリー、超対称模型を用いた研究、リトルヒッグス模型を用いた研究、模型の詳細に依存しない暗黒物質研究、そして非対称暗黒物質の研究に分け、成果論文を次項目、(主な発表論文等)〔雑誌論文〕より適宜引用して報告する。尚、理論研究の常として、上記研究計画は、時間順序に沿って行われたものではない事をここに明記する。

(1) 超対称模型を用いた研究

超対称模型は LHC 実験の2つの重要な結果、標準模型のヒッグス粒子と強く示唆される新粒子が126 GeVの質量で見つかった事と新物理シグナルの兆候が見つからなかった事を受け、非常に大きな影響を受けた。これらの結果はクォークの超対称パートナー(スクォーク)が重い事を意味する。従って現在最も魅力的な超対称模型として、スクォークがテラスケールより重い一方レプトンの超対称パートナー(スレプトン)やゲージ粒子の超対称パートナー(ゲージノ)がテラスケールにある場合、あるいはゲージノのみが

テラスケールにある場合が挙げられ、これらに注目が集まっている。

そこでまず前者を実現するゲージ相互作用誘導型超対称性模型を(次項目の雑誌論文及び に対応)、後者を実現する超重力誘導型超対称模型(次項目の雑誌論文 と に対応)を構築し研究を行った。前者では重力子の超対称パートナー(グラビティーノ)が非常に軽く予言され、その結果 ILC 実験でスレプトン生成とその(グラビティーノへの)崩壊が検出可能であり、模型の検証に非常に大きな役割を果たす事が判明した。一方この模型では暗黒物質は標準模型粒子やその超対称パートナーには存在せず、他のセクター(超対称の破れの伝達セクター等)に存在すると考えられる。その様な場合には暗黒物質の生成は ILC では難しいと言える。

一方後者は、模型自身がとても単純なものとなる一方、これまで行われてきた全ての実験・観測と無矛盾である事から、世界中で広く受け入れられる事となった。この模型では暗黒物質は中性ウィークゲージボソンの超対称パートナーである中性ウィーノとなり、その質量は 1 TeV 弱と予言される。そのため ILC で荷電ウィーノ生成を通じて検証が可能である事が判明した。同時に将来の宇宙観測でもシグナルが受かり、ILC 実験と宇宙観測双方でのシグナルを比べる事により、暗黒物質の性質が非常に精度よく決定される事を明らかにした。下図(図 1)はその検出可能性を示したものである。

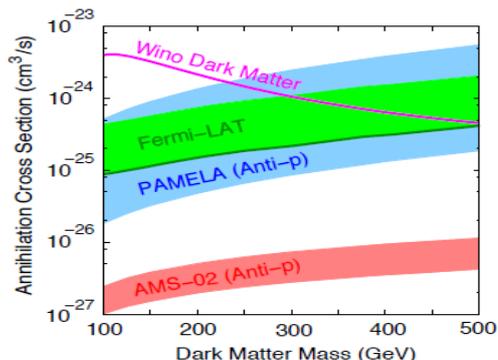


図 1 : ウィーノ暗黒物質の各質量に対する対消滅断面積(マゼンタ線)と宇宙観測による検出可能性。ILC 実験では上記図全ての質量領域で検証が可能である。

(2) 複合ヒッグス模型を用いた研究

複合ヒッグス粒子模型も LHC 実験の結果に大きな影響を受けた模型の一つである。ヒッグス粒子が比較的軽いと判明したため、その正体はこの模型の範囲内では擬 NG 粒子の可能性が高まった。そのような模型の具体例はリトルヒッグス模型(次項目雑誌論文の と に対応)である。この模型の予言の一つとして、テラスケールのトップパートナーの存在が挙げられる。この新粒子はカラー荷を持つ

ため LHC 実験で効率的な生成が可能である。現在までの所この新粒子発見の兆候はないため、新たな解析方法(トップパートナーがその崩壊の終状態で多くの b ジェットを出す事を利用した解析)を提案した上で、その質量に制限を付けた。

またリトルヒッグス模型の最も大事な予言の一つに、トップパートナーの質量とヒッグス粒子との相互作用の強さに一定の関係がある事が挙げられる。そこでトップパートナーが LHC で見つかればその質量が ILC で充分生成可能な領域にあると仮定した上で、ILC 実験でどの程度の精度でこの関係を検証できるかについて研究を行った。下図(図 2)はその結果であり、トップパートナーの閾値付近での対生成を用いて約 10% の制度で検証可能である事が判明した。

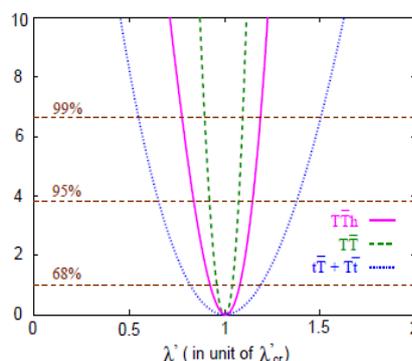


図 2 : ILC におけるリトルヒッグスの結合定数 λ' の測定精度。この模型では λ' は上記図で 1 に予言される。尚 t と T はトップクォークとトップパートナーを表す。

(3) 模型に依存しない暗黒物質研究

模型に依存しない暗黒物質研究では、まず暗黒物質が標準模型のゲージ電荷を持たない場合に注目した(次項目雑誌論文の に対応)。この場合、暗黒物質はそのスピンに関わらず、ヒッグス粒子を通じてのみ標準模型の素粒子と相互作用する。このため実験・観測ではその検出は極端に難しくなる。そこで ILC 実験を含む線形電子・陽電子加速器実験において最も効率の良い測定方法(シグナル過程)を探した結果、Z ボソンフュージョン過程からの暗黒物質生成である事が判明した。この過程を用いると、どの程度のデータ量を貯めるかには依存するが、暗黒物質が 100 GeV 以下の質量では何とかその兆候を探れる事を明らかにした。

また暗黒物質が標準模型の弱い相互作用の電荷を持つ場合についても研究を行った(次項目雑誌論文 に対応)。この場合には、暗黒物質の SU(2)パートナーとして電荷を持った新粒子が予言され、その質量は暗黒物質と同程度である。このため ILC 実験ではこの荷電粒子を効率的に生成可能であり、またこの粒子の崩壊で必ず暗黒物質が生成されるた

め非常に精度よく暗黒物質の検証が可能となる。実際この研究は ILC の実験グループとともに現実的なシミュレーションも含め行い、実際非常に高い精度で質量等を決定でき、さらにスピンも決定可能である事が判明した。この結果は ILC のレポートにも引用され、世界中で広く知られる事となった。下図(図3)は重心系エネルギー1 TeV で積分ルミノシティ500/fb を仮定した際の暗黒物質とその SU(2) パートナーの質量測定精度をまとめたテーブルであり、非常に高い精度で決定される事が見て取れる。

	Physics model	$\sigma_s = 200$ fb	$\sigma_s = 40$ fb
M_{χ^\pm} (GeV)	IH-like	232.9 ± 0.1	231.8 ± 0.4
	SUSY-like	232.7 ± 0.1	232.2 ± 0.5
	LHT-like	232.1 ± 0.1	231.5 ± 0.5
M_{χ^0} (GeV)	IH-like	44.2 ± 0.6	46.2 ± 1.9
	SUSY-like	43.6 ± 0.7	45.8 ± 2.3
	LHT-like	43.8 ± 0.5	45.9 ± 1.8

図3: ILC 実験における暗黒物質(χ^0)とその SU(2) パートナー(χ^\pm)の質量測定精度。IH, SUSY, LHT-like はそれぞれスピン 0, 1/2, 1 の暗黒物質に相当する。

(4) 非対称暗黒物質の研究

上記の模型に依存しない研究において重要な暗黒物質候補としてにわかに浮かび上がってきたのが非対称暗黒物質である。暗黒物質の性質で最も大事なものの一つにその安定性がある。暗黒物質粒子の安定性の背後には何か対称性が有ると期待されるが、その第一候補は B-L ゲージ対称性である。標準模型の素粒子達は、この対称性の電荷に対して偶数のボソンか奇数のフェルミオンしか持たないため、暗黒物質が B-L 電荷偶数のフェルミオンか奇数のボソンであるとその安定性が自動的に保証される。上記までの研究では主に B-L 電荷 0 のフェルミオンが念頭にあったと言える。一方 B-L 電荷が 0 でない暗黒物質候補を考えると、それは非対称暗黒物質となり(次項目雑誌論文 と に対応)、その質量は模型の詳細によらずギガスケール(1-10 GeV)となる事を証明した。

一方その低い質量スケールから、運動学的な観点からは、ILC 実験においてその生成が容易と期待される。しかしながら、これまでの実験(LEPにおけるZボソン探査や暗黒物質の直接探査)と無矛盾であるためには、非対称暗黒物質は標準模型のゲージ電荷を持ってはいけない事も判明する。これらの事を踏まえると、暗黒物質の質量自身が軽いという事を除けば上記(3)での研究と繋がるため、この暗黒物質が ILC 実験でどの様に探査されるかについても研究を行う事とした。この場合、最も大事なシグナルはヒッグスからこの暗黒物質への崩壊であり、観測量としてはヒッグスのインビジブル崩壊となる。ILC 実験ではこの観測を極めて得意としており、非対

称暗黒物質の検出で非常に大きな役割を果たす可能性を指摘した。

また一方で、ヒッグスのインビジブル崩壊を引き起こす相互作用は、暗黒物質の直接探査で重要な暗黒物質と原子核の散乱を生み、こちらもまた近い将来において重要な検証手段となり得る。つまり ILC 実験と直接探査の両方において強いシグナルが期待され、両者を比較する事により、ILC 実験で作られた新粒子が本当に暗黒物質である事が確認可能となる。下図(図4)はその事実を端的に示したもので、横軸を媒介スカラー粒子(非対称暗黒物質の対消滅断面積生成のために必ず導入される粒子)の質量、縦軸にこの媒介粒子とヒッグス粒子の混合角(電弱相転移により起こる)を書いたもので、理論的に自然なパラメータ領域はこの角度が 0.001 程度以上と見込まれる。このため ILC 実験及び直接測定実験の両方で非対称暗黒物質探査が可能である事が判明した。

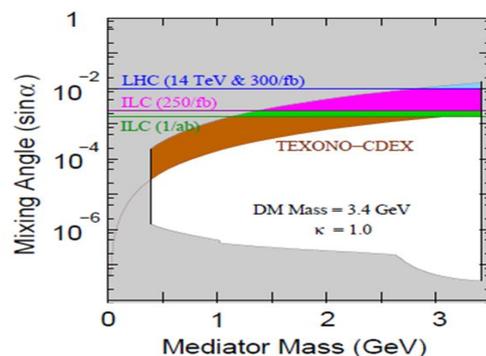


図4: 非対称暗黒物質の ILC 実験及び暗黒物質の直接測定実験(TEXONO-CDEX)での検出可能性。灰色の領域は既に他の素粒子実験及び宇宙観測で排除された領域。また理論的に自然なパラメータ領域は混合角が 10^{-3} 程度以上。

上記4つの項目が本研究課題遂行に当たり得られた研究成果である。これらの研究は次項目主な発表論文等〔学会発表〕において報告されている通り国内外にコンファレンスやワークショップで報告を行い、広く周知徹底を図った。またこれらの発表講演は全て招待講演である事をここで明記しておく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

- M. Ibe, S. Matsumoto, S. Shirai, T. T. Yanagida, AMS-02 Positrons from Decaying Wino in the Pure Gravity Mediation Model, JHEP 1307 (2013) 063 査読有, DOI: 10.1007/JHEP07(2013)063
- B. Bhattacharjee, S. Matsumoto, S. Mukhopadhyay, M. M. Nojiri, Phenomenology of light fermionic asymmetric dark matter, JHEP 1310 (2013) 032, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP10(2013)032

M. Ibe, S. Matsumoto, T. T. Yanagida, N. Yokozaki, Heavy Squarks and Light Sleptons in Gauge Mediation: From the viewpoint of 125 GeV Higgs Boson and Muon $g-2$, JHEP 1303 (2013) 078, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP03(2013)078

K. Harigaya, S. Matsumoto, M. M. Nojiri, K. Tobioka, Search for the Top Partner at the LHC using Multi-b-Jet Channels, Phys. Rev. D86 (2012) 01500, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.86.015005

M. Ibe, S. Matsumoto, T. T. Yanagida, Pure Gravity Mediation with $m_{\{3/2\}} = 10-100\text{TeV}$, Phys. Rev. D85 (2012) 095011, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.85.095011

K. Harigaya, S. Matsumoto, M. M. Nojiri, K. Tobioka, Testing Little Higgs Mechanism at Future Colliders, JHEP {¥bf 1201} (2012) 135, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP01(2012)135

M. Asano, T. Saito, T. Suehara, K. Fujii, R. S. Hundi, H. Itoh, S. Matsumoto, N. Okada, Y. Takubo, H. Yamamoto, Discrimination of New Physics Models with the International Linear Collider, Phys. Rev. D84 (2011) 115003, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.84.115003

S. Kanemura, S. Matsumoto, T. Nabeshima, H. Taniguchi, Testing Higgs portal dark matter via $\$Z\$$ fusion at a linear collider, Phys. Lett. B701, 591 (2011), 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2011.06.040

S. Matsumoto, T. Moroi, Studying Very Light Gravitino at the ILC, Phys. Lett. B701 (2011) 422, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2011.06.010

N. Haba, S. Matsumoto, "Baryogenesis from Dark Sector, Prog. Theor. Phys. 125, 1311 (2011), 査読有, DOI: 10.1143/PTP.125.1311

[学会発表](計 10 件)

S. Matsumoto, Revisiting Wino Dark Matter, The 3rd KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology, 2013.11.14, KIAS, Korea

S. Matsumoto, Constraints on WIMP dark matter from collider experiments, 2013.9.20, JPS conference, Kochi U.

S. Matsumoto, A dark matter charged under $U(1)_{\{B-L\}}$, 2013.7.3, FLASY13, Niigata U.

S. Matsumoto, Phenomenology of Wino Dark Matter, 2013.6.7, Tohoku Workshop on Higgs and Beyond, Tohoku U.

S. Matsumoto, Phenomenology of Pure Gravity Mediation, 2012.8.30, SKKU Symposium on Astrophysics and

Cosmology, Sungkyunkwan U., Korea

S. Matsumoto, Phenomenology of the Wino Dark Matter, 2012.8.23, Summer Institute 2012, Sun Moor Lake, Taiwan.

S. Matsumoto, Current Status of Dark Matter Studies, 2012.8.2, Summer School, Fuji-Yoshida, Yamanashi

S. Matsumoto, The GeV-scale dark matter with B-L asymmetry, 2012.2.21, Workshop on Particle physics and cosmology, Toyama U.

S. Matsumoto, The GeV-scale dark matter with B-L asymmetry, International Workshop on Neutrino Physics, 2011.11.5, Dark Matter and Gamma Rays, National Chiao Tung University

S. Matsumoto, Dark matter and Baryon asymmetries from sneutrino condensate, 2012.10.19, Dark matter and new physics, KITPC, Beijing China

[その他]

6 . 研究組織

(1)研究代表者

松本 重貴 (MATSUMOTO, Shigeki)
 東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授
 研究者番号：00451625