

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：82118

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23104006

研究課題名（和文）テラスケール物理の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical Study of the Physics at Tera Scale

研究代表者

野尻 美保子 (Nojiri, Mihoko)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：30222201

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 37,400,000 円

研究成果の概要（和文）：[1]LHC 実験の新粒子探索では、大きなバックグラウンドとなるQCD 相互作用が問題になるが、その QCD の特性を研究し新粒子を探索する新しい方法を多数提案した。[2]宇宙に存在することが明らかな暗黒物質を含む模型について総合的に検討を行い、LHC での模型の検証可能性を明らかにした。[3]ヒッグス粒子の発見に伴い Randall-Sundrum 模型、超対称模型等について Higgs の性質の測定で新物理を詳細を明らかにできることを示した。電弱対称性の破れの背後の物理や標準理論で説明できない諸現象（暗黒物質、バリオン数生成、ニュートリノ質量）とヒッグス物理の関係を研究した。

研究成果の概要（英文）：1) At the the LHC experiment, QCD interaction is dominant background process. We have studied the nature of QCD interaction and proposed new method for the new physics searches based on the knowledge. 2) The density of the universe is dominated by the dark matter whose nature is not yet known. We study the model involving dark matter and proposed several ways to reveal the nature at LHC by directly producing them. [3] Because Higgs boson is discovered at the LHC, we study the connection between the Higgs nature and new physics. We also studied the dynamics of the Higgs sector and proposed potential connections between the phenomena yet to be understood (such as dark matter Baryogenesis, neutrino mass) and Higgs physics.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 素粒子模型 コライダー実験

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準理論の最大の謎である、ゲージ対称性の自発的破れや宇宙における暗黒物質の存在などは、テラスケールに新しい自然法則が存在することを示唆している。このテラスケール物理によって、ゲージ対称性が破れ、超高エネルギーでの力の統一理論から現在の自然界の多様性が生み出されたと考えられている。この研究計画実施時にこのテラスケール物理を探る LHC (Large Hadron Collider) 実験が CERN で開始された。

LHC 実験では Higgs 粒子の発見によって、標準理論を完成させるほか、最大で数 TeV までの新粒子の探索することができる。このように高い成果が期待される LHC 実験ではあるが、ハドロンコライダーであるために、非常に多くのバックグラウンドがあり、たとえ新しい現象が存在しても、その発見は容易ではない。(LHC でのバックグラウンドの特徴は、多数のジェットが同時に生成される事象が多く、LHC での最新の実験結果をふまえた研究を理論・実験グループが緊密な連携をとって行う必要があった。LHC で発見が期待されている新しい素粒子現象は、標準理論からの分布のズレである。様々な分布を精密に検討することで、発見された事象の背景にある素粒子現象を理解し、テラスケールの新しい物理を解明することが二つ目の目的である。また、LHC で発見が確実と考えられる Higgs 粒子についてはその性質をより幅広い視点から検討する必要があった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の3つである。(1) QCD の理論的研究を行い LHC 実験でのテラスケール物理探索のバックグラウンドを解明する。この研究により計画研究 A01~A04 が LHC 実験で新しい現象を確実に発見することをサポートする。(2) 標準模型からの分布のズレから新粒子の断面積、崩壊パターン、スピン、質量を測定する新しい解析方法を考案する。(3) テラスケールでの新物理を新しいパラダイム(時空、宇宙、宇宙など)に転換する研究を行い、この実験的検証にむけた現象論的研究を行う。

### 3. 研究の方法

高次補正を取り入れた QCD の研究を行う。特に摂動部と非摂動部の切り分けを理論的に行い理論的に安定な予言を導きデータとの比較を行う。

- (1) 様々なモデルやパラメータが予言する信号のトポロジーを研究して信号から背後の物理を逆にたどることができるようにする。
- (2) 運動量分布、不変質量分布やその組み合わせの分布やエッジから、新粒子の質量、スピン、崩壊分岐比を決める方法を複数確立する。

- (3) ヒッグス粒子の発見能力や測定精度を向上させるため、H23 年度の QCD の研究を基に、サブジェット解析等の研究を行う。標準理論を超えたヒッグス粒子の研究を行い発見されたヒッグスの性質を探る。

- (4) 発見された新現象の背後に潜む原理や理論を探る。特に暗黒物質の物理や、ヒッグス粒子の決定する真空の構造や安定性と関わる物理を研究する。

上記のような研究を行うためには最新の計算機が存在が必須であり、コア数の多い計算機の購入を行った。また、最初の2年は暗黒物質の物理に詳しい長尾氏、最後の3年間はヒッグス粒子の性質や複合模型に明るい阿部氏を雇用し連携研究者とした。また高エネルギー加速器研究機構の萩原教授を連携として、Madgraph 等の高エネルギー物理関連ツールの利用や、QCD の高次計算について、適切な助言が受けられるようにした。研究体制としては、KEK の学生の久保田と Higgs 粒子と Radion 粒子の混合模型についての研究、KEK の学生の坂木氏と Jet の内部構造について研究を行った。また、IPMU では、学生の飛岡氏(現 Weisman 研究員) 張ヶ谷氏(現 バークレー研究員)、福田氏(現東大院生) IPMU 准教授の松本氏、PD の Mandal, Mukhopadhyay, Bhattacharjee, 竹内、Han 各氏と暗黒物質や、ジェット構造についての共同研究を行った。

また、兼村は Higgs 粒子の発見を受けて、2011 年から 2015 年の期間に、富山大学でヒッグス物理やテラスケール物理に関する研究会と国際会議を4回主催した。また新ヒッグス勉強会(New Higgs Working Group)を主宰し2012年以降2015年までに16回の定例会を富山大学で開催してレポートをまとめるとともに、多くの論文を執筆し発表を行った。

LHC 実験の理論的研究をしている研究者は欧米に多数いるため、研究会を開催したり、外国人ピジターを招聘する等した。特に、研究代表者が関わった主たる研究会として B4 班と共同で開催した “Physics Opportunities at LHC” 2012 年 2 月 16 日-18 日(KEK で開催) “Higgs as a Probe of New Physics 2013” 2013 年 2 月 13 日-16 日がある。

また、LHC の物理現象をモデル化する MC simulation は大変重要であるため、国際的なスクールを開催した。研究代表者が世話人として関わったものに、Monte Carlo Tools for LHC” School and Workshop を 2011 年 9 月 5 日-10 日に京都で開催)、School on the Future of Collider Physics (16-19 July 2013, 東京大学 KIPMU) 2015 年には LHC RunII の開始をうけ、LHC 関係のツールの講習会(Collider 勉強会)を東京大学の諸井氏等(B05 班)の協力を得て5回開催した。

#### 4. 研究成果

野尻は科研費の研究期間中に18件の原著論文を発表した。

[top partner の探索と性質の解明]

- (1) スカラートップ粒子崩壊から生成されトップ粒子の偏曲を利用して、スカラートップ粒子の右左混合を図る方法を研究した。特にジェットの内部構造を利用した再構成方法の枠内でハドロニックなトップの崩壊についても偏曲の測定が可能であることを示した。
- (2) 多くの標準模型を超える物理において、top 粒子のパートナー粒子であるフェルミオンの存在が予想される。このような粒子は、 $ht$ ,  $Zt$ ,  $bW$  といった終状態に崩壊することが期待されるが multi  $b$ -jet の final state に着目することが、このような信号を取り出すことができることを明らかにした

[Higgs 粒子の性質]

- (3) LHC RUN1 でヒッグス粒子の分岐比にたいして標準模型からのずれがある可能性が指摘されたため、余剰次元模型の予言する Radion 粒子とヒッグス粒子の混合によってこのような異常がおりうることを指摘した。その後この研究を進展させ、より高い精度の測定が期待できる ILC 実験によって Radion の質量が  $10\text{TeV}$  をはるかに超える場合でも、標準模型からのずれを測定できることを示した。
- (4) LHC 実験の成功にともなって、ILC 実験が LHC 実験の後でも新物理探索に有効であるかを検討する必要が生じた。Higgs 粒子の精密測定によって明らかになる標準模型を超える物理の例として、超対象模型に着目し、スカラートップ粒子が LHC 実験で発見できないような場合でも、Higgs 粒子の分岐比の標準模型からのずれが ILC で観測できることをあきらかにするとともに、真空の安定性の制限や、 $B$  の希少崩壊からの制限が Higgs 分岐比の標準模型からのずれを制限していることを明らかにした。

[jet の物理の研究]

- (5) quark から生成されるジェットと gluon から生成されるジェットでは、charged track の数やジェットの広さなどの性質が異なっている。このような性質を捉えて jet の起源を解明すれば new physics への感度を向上できると期待されるため、アルゴリズムの改善を行うとともに、縮退領域にある超対称模型において、実際に感度向上に役に立つことを指摘した。

[LHC 実験での新物理の兆候の研究]

- (6) LHC Run I 実験において  $2\text{TeV}$  の gauge boson 信号に過剰があるという報告がなされた。この粒子は、主に  $W, Z$  の 2 体粒子に崩壊すると考えられた。この粒子の  $13\text{TeV}$  での探索感度について検

討を行うとともに、jet substructure を使った方法で、jet 内の number of charged track を background の評価に加えると background rejection の効率に大きな不定性がある問題を指摘した。

- (7) LHC Run II 実験のデータにおいて Diphoton イベントの過剰が報告された。重たいカラーをもつ粒子と暗黒物質が  $Z_2$  parity odd であるような模型において、heavy quark が束縛状態として生成され、それが、2 photon に消滅する場合に、このような信号が得られることを指摘した。さらに暗黒物質密度が適切な値であるためには、質量が縮退している必要があることを示し、LHC において、このような模型のパラメーターが mono jet search によって制限されていることを指摘した。また、 $750\text{GeV}$  の信号を説明することができるパラメーターがこのような制限のもとで、exclude されていないことを示した。

兼村は以下のような研究を行った。

- (1) 発見されたヒッグス粒子の性質からヒッグスセクターの構造、ひいては新物理学の方向性を決定するための理論研究：2012年にLHCでヒッグス粒子は一つ発見されたが、ヒッグスセクターの構造は未知であり様々な拡張されたヒッグスセクターの可能性もある。本研究では、超対称性や複合ヒッグス模型等の新物理モデルに基づくヒッグスセクターや、一般の拡張ヒッグスセクターを考えた時、ヒッグス粒子の結合定数がどのようなパターンでずれるかを系統的に研究した。特に標準理論のヒッグス 2 重項場に付加的なヒッグス場が一個加わった拡張ヒッグスセクターに基づいてヒッグス結合に対する輻射補正を研究し、将来の加速器実験でヒッグス結合が精密に測定され、標準理論からのズレが検出された時に、そのズレのパターンからヒッグスセクターの構造、ひいては新物理理論の方向性を決定する可能性を明らかにした。

- (2) 第2のヒッグス粒子の探索に関する理論研究：

様々な新物理モデルに導入される拡張ヒッグスセクターには特徴のある付加的ヒッグス場が現れる。本研究では、超対称性模型等に現れる輻射シーソーモデルなどに現れるヒッグス 2 重項場が 2 個あるモデルに出てくる第2のヒッグス粒子の LHC や ILC での探索可能性について系統的に研究した。また、タイプ 2 シーソー模型に現れるトリプレット場は複荷電ヒッグス場を予言するが、このようなエキゾチックな場が LHC でどのように検証されるかを研究し、ダイボソン崩壊が支配的なシナリオにおける LHC からの

質量のバウンドを正解で初めて求めた。  
(3)様々な新物理パラダイムにおけるヒッグスポテンシャルの研究と、

実験での検証可能性の研究：

ヒッグス粒子の発見によって、ヒッグス機構や湯川相互作用等の標準理論の質量生成機構は実証された。しかし、電弱対称性の破れを担うヒッグスポテンシャルや背後のダイナミクスは依然として未知である。本研究では、軽いヒッグスを予言するが高エネルギーでヒッグスダイナミクスが強結合になるモデルの詳細を研究し、ランダウポールの上の UV 理論の構築、低エネルギーでの現象論、ニュートリノ輻射生成や電弱バリオン数生成のシナリオの実現可能性を調べた。また古典的共形不変性に基づく電弱対称性の破れのモデルを研究し、そのヒッグスセクターの一般的性質を明らかにした。さらに最小複合ヒッグス理論のヒッグスセクターの性質を詳細に検討し、その現象論と加速器実験での検証可能性を明らかにした。

(4)ニュートリノ質量、暗黒物質、バリオン数生成に関するモデル構築とその現象論の研究：

B-L ゲージ対称性の自発的破れが引き金となって暗黒物質質量やニュートリノ質量が生成されるモデルを構築しその現象論を研究した。超対称性の枠組みで輻射シーソーモデルを構築し、このモデルに現れるマルチコンポネント暗黒物質の性質を調べ、検証可能性を研究した。電弱バリオン数生成のモデルを研究し、このシナリオの一般的特徴である強い一次的電弱相転移の実験的検証に関して、HL-LHC や ILC 等の将来加速器実験におけるヒッグス自己結合の測定と eLISA 計画などの将来重力波実験でのスペクトル測定による検証を研究し、その相補性を明らかにした。

5年間のこれらの成果は、約 50 報の査読付き論文として出版するとともに多数の学会、国際会議で発表した。

科研費研究員として雇用したのは長尾氏と阿部智弘氏であり、このうち長尾氏の雇用期間中の論文は 2 件 阿部氏の雇用期間中の原著論文は 6 件であり、このうちの一件は野尻との共著である。阿部氏の研究のなかで、主たる成果は以下の通りである。

(1)部分的に複合モデルであるモデルを構築し、その現象論的特性を明らかにし、とくに、Higgs 発見当初に話題になっていた、Higgs 粒子が 2photon mode に崩壊する分岐比率にみられる excess が説明可能であることを明らかにした。また 2TeV の diphoton についても、実験データの示唆する信号をこのモデルで説明で

きるかを精密測定 of 制限をいれて調べ、13TeV の LHC 実験での検証可能性を明らかにした。

(2) two Higgs doublet モデルで期待される EDM モデルの two loop の寄与を求めた

(3) Higgs 粒子にのみ暗黒物質が結合するようなモデルを暗黒物質となる粒子の spin によって分類し、暗黒物質が LHC や ILC で探索可能かを調べるとともに、暗黒物質密度や、その相互作用などをあきらかにした。

(4) Type X の two Higgs doublet モデルの実験的制限を詳細に調べ、LHC 等でのシグナルを検討した。なおこの研究によって阿部氏は素粒子メダル奨励賞を受賞した  
[http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~sg.www/syorei\\_s/result15/Smedal15.html](http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~sg.www/syorei_s/result15/Smedal15.html)

## 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 55 件)

### 主な論文

Chengcheng Han, Koji Ichikawa, Shigeki Matsumoto, Mihoko M. Nojiri, 他. “Heavy fermion bound states for diphoton excess at 750 GeV — collider and cosmological constraints”

JHEP 1604 (2016) 159, 1 査読あり

DOI: 10.1007/JHEP04(2016)159

Tomohiro Abe, Teppei Kitahara and Mihoko M. Nojiri.

“Prospects for Spin-1 Resonance Search at 13 TeV LHC and the ATLAS Diboson Excess” JHEP 1602 (2016) 084 査読あり  
DOI: 10.1007/JHEP02(2016)084

Tomohiro Abe, Ryo Nagai, Shohei Okawa, Masaharu Tanabashi, “Unitarity sum rules, three-site moose model, and the ATLAS 2 TeV diboson anomalies”

Phys.Rev. D92 (2015) 055016, 1-14, 査読あり

DOI: 10.1103/PhysRevD.92.055016

Tomohiro Abe, Ryosuke Sato, Kei Yagyu. “Lepton-specific two Higgs doublet model as a solution of muon  $g - 2$  anomaly”

JHEP 1507 (2015) 064, 査読あり

DOI: 10.1007/JHEP07(2015)064

Biplob Bhattacharjee, Satyanarayan Mukhopadhyay, Mihoko M. Nojiri, 他, “Associated jet and subjet rates in light-quark and gluon jet discrimination”,

JHEP 1504 (2015) 131. 査読あり

DOI: 10.1007/JHEP04(2015)131

Tomohiro Abe, Ryosuke Sato, “Quantum corrections to the spin-independent cross section of the inert doublet dark matter”  
JHEP 1503 (2015) 109, 査読あり  
DOI: 10.1007/JHEP03(2015)109

Tomohiro Abe, Ryuichiro Kitano, Ryosuke Sato “Discrimination of dark matter models in future experiments”  
Phys.Rev. D91 (2015) no.9, 095004, 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.095004

Shinya Kanemura, Koji Tsumura, Kei Yagyu, and Hiroshi Yokoya, “Fingerprinting nonminimal Higgs sectors”,  
Physical Review D90, 075001-1, 075001-10 (2014). 査読有り  
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.075001

Biplob Bhattacharjee, Sourav K. Mandal and Mihoko M. Nojiri, “Top Polarization and Stop Mixing from Boosted Jet Substructure”,  
JHEP 1303 (2013) 105. 査読あり  
DOI: 10.1007/JHEP03(2013)105

Shinya Kanemura, Kei Yagyu, Hiroshi Yokoya, “First Constraint on the Mass of Doubly Charged Higgs bosons in the same sign diboson decay scenario at the LHC”, Physics Letters B726, 316-319 (2013). 査読あり  
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.08.054

Keisuke Harigaya, Shigeki Matsumoto, Mihoko M. Nojiri, and Kohsaku Tobioka, “Search for the Top Partner at the LHC using Multi-b-Jet Channels”,  
Phys.Rev. D86 (2012) 015005. 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.015005

Shinya Kanemura, Takehiro Nabeshima, Hiroaki Sugiyama, TeV Scale Seesaw with Loop Induced Dirac Mass Term and Dark Matter from  $U(1)_{B-L}$  Gauge Symmetry Breaking,  
Physical Review D85, 033004-1 033004-9 (2012). 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.033004

Mayumi Aoki, Shinya Kanemura, Kei Yagyu, “Testing the Higgs triplet model with the mass difference at LHC”,  
Physical Review D85, 055007-1 055007-15 (2012). 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.055007

Shinya Kanemura, Osamu Seto, Tadashi Shimomura, “Masses of Dark Matter and Neutrino from TeV scale Spontaneous B-L symmetry breaking”, Physical Review D84, 016004-1 016004-5 (2011). 査読有り  
DOI: 10.1103/P

[学会発表](計 67 件)

Shinya Kanemura, Higgs potential, future colliders, and future GW interferometers,  
国際会議 Scalars 2015  
2015年12月3日~7日  
ワルシャワ、ポーランド

Shinya Kanemura, Radiative Corrections to the Yukawa coupling constants in BSM  
国際会議 Higgs Couplings 2014  
2014年10月1日-3日  
Torino, イタリア

野尻美保子 “Expectation for e+e- colliders” Recontres du Vietnam 2014; Physics at LHC and beyond, Quy Nhon, Vietnam. 2014年8月10日~17日

野尻美保子 19th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (Pascos 2013) 2013年11月20日~2013年11月26日 Taipei, Taiwan

Shinya Kanemura, Higgs in BSM models  
国際会議 Tohoku Forum for Creativity ==Particle and Cosmology after the discovery of a Higgs boson==  
2013年10月21日-25日  
東北大学, 宮城県仙台市  
Shinya Kanemura,

野尻美保子, “Theoretical Results on PHysics Beyond the Standard Model, XVI International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LeptonPhoton 2013), 2013年6月24日~2013年6月29日 San Francisco, CA, USA

Shinya Kanemura Higgs/EWSB Summary  
国際会議 LCWS2012  
2012年10月21日-26日  
テキサス大学アーリントン校、アメリカ  
兼村晋哉

軽いヒッグスの物理 (シンポジウム「ヒッグスとコライダー」)  
日本物理学会 2012年秋季大会  
2012年9月11日-14日  
京都産業大学、京都府京都市

野尻美保子, “Reconstructing SUSY”, Supersymmetry 2011, 2011年8月28日から2011年9月2日 フェルミ国立研究所, バタビア, IL, USA

[図書](計 件)

[産業財産権]  
出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：

権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

2011 IPMU-YITP School and Workshop on  
Monte Carlo Tools for LHC, 5-11, Sep 2011  
[http://www.hep.phy.cam.ac.uk/theory/mcsc  
hool11/](http://www.hep.phy.cam.ac.uk/theory/mcsc<br/>hool11/)

“Physics Opportunities at LHC” 2012 年 2  
月 16 日-18 日

[http://research.kek.jp/people/nojiri/shingak  
ujyutu/index.html](http://research.kek.jp/people/nojiri/shingak<br/>ujyutu/index.html)

School on the Future Collider Physics

KIPMU, 16-19 July, 2013

<http://member.ipmu.jp/rie.ujita/school.htm>

“collider 勉強会”

[http://research.kek.jp/people/nojiri/collider.  
html](http://research.kek.jp/people/nojiri/collider.<br/>html)

冬の富山素粒子宇宙研究会 2012

[http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/works  
hop12/index.html](http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/works<br/>hop12/index.html)

HPNP2013

[http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/HPNP  
2013/index.html](http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/HPNP<br/>2013/index.html)

BURI 研究会

[http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/works  
hop14/index.html](http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/works<br/>hop14/index.html)

HPNP2015

[http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/HPNP  
2015/index.html](http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/HPNP<br/>2015/index.html)

新ヒッグス勉強会（定例会を 2012 年から年  
4 回のペースで実施）

[http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/NHW  
G/index.html](http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/NHW<br/>G/index.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

野尻美保子（NOJIRI, Mihoko）

大学共同利用機関法人・高エネルギー加速器  
研究機構・素粒子原子核機構・教授

研究者番号：30222201

(2)研究分担者

兼村晋哉（KANEMURA, Shinya）

富山大学・大学院理工学研究部・准教授

研究者番号：10362609

(3)連携研究者

阿部智広（ABE, Tomohiro）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器

研究機構素粒子原子核研究機構 素粒子原

子核研究所 研究員

研究者番号：70712727