

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400272

研究課題名(和文) ヒッグス結合による素粒子模型の検証と新理論の構築

研究課題名(英文) Test of models of particle physics by Higgs couplings and new theory

研究代表者

石田 宗之 (Ishida, Muneyuki)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：80366913

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子標準模型を超える新理論として、超対称性は当時最も有力な可能性であり、パラメタの超微細調整の必要のないnatural SUSYは最も期待される模型であった。私はnatural SUSY模型で、ヒッグス粒子の質量を3次の量子補正まで満たしつつ、ヒッグスの様々なチャネルへの崩壊幅を予言した。この予言をLHC実験の最新のデータと比較すれば、natural SUSY模型が実現されていないと結論される。この研究は超対称性は電弱スケールでは実現されていないことを明白に示す。新理論を構成する新しい数学的枠組みとしてFinsler幾何学に着目し、これを用いて統一模型構築を試みた。

研究成果の概要(英文)：Supersymmetric standard models were the models beyond the standard model of particle physics, and the natural SUSY model, which is free from the fine tuning of parameters, was the most promising candidate among them. I investigate the properties of Higgs boson predicted by natural SUSY scenario including the 3-loop quantum corrections to the mass. My predictions are compared with the experimental results of LHC, and the natural SUSY scenario was excluded. As a new mathematical framework of building new theory beyond the standard model, I focus on the Finsler geometry, and tried to make a unified model.

研究分野：素粒子理論

キーワード：超対称性 ヒッグス粒子 Finsler 幾何学

## 1. 研究開始当初の背景

欧州で稼働する Large Hadron Collider (LHC)によって、素粒子標準模型で唯一未発見であったヒッグス粒子とみられる粒子が質量  $125 \text{ GeV}$  付近に発見され、この新粒子が標準模型が半世紀前に予言し、探し求め続けられてきたヒッグス粒子なのかを判定するために、様々なチャネルでの生成・崩壊結合定数の精密測定が計画され、次々と新データが報告されつつあった。

素粒子標準模型はこれまでの実験結果のほぼすべてを矛盾なく説明する模型であるが様々な点から不完全、不満足であると考えられ、これを究極の理論と考える研究者はほとんどいない。LHC 稼働開始以前に標準模型を超える新理論として最も有力視されていた可能性は超対称性であり、中でも最小超対称標準模型 (MSSM) は真剣にそれが  $1 \text{ TeV}$  以下のエネルギー領域で実現していると信じられ、その検証が計画されていた。しかし LHC の最新の結果で、当初期待された  $1 \text{ TeV}$  以下での超対称性の実現は否定されてしまった。余剰次元模型はもう一つの有力な可能性であったが、5次元の Randall-Sundrum 模型をはじめとしてパラメタに大きな制限が付き、共形対称性をもつテクニカラー理論も最も自然で美しい形での実現は否定されてしまった。LHC 実験の結果、素粒子現象論の従来の予測はことごとく外れる観があった。

まず本当に超対称標準模型 (MSSM) が実験で否定されたのか精査する必要があった。標準模型を超える統一模型を構築するために、現段階で可能な理論的可能性を整理し、あるべき方向性を再考する必要に迫られていた。

## 2. 研究の目的

標準模型は、その華々しい成功にもかかわらず、多くの不自然さを持っており、必ずこれを超える素粒子新理論が高エネルギー領域に存在するに違いない。エネルギー数  $\text{TeV}$  程度で標準模型は新理論に移行し、十分 LHC で検証可能と考えられる。LHC はヒッグスを発見したが、今後の LHC 実験で、 $125 \text{ GeV}$  ヒッグス粒子の様々なチャネルへの結合定数の値が正確に測定され、その標準模型の予言値からのずれも、明らかになってくると予想される。LHC によるヒッグス結合定数の測定は、LEP の電弱理論の精密測定 (Electroweak precision measurements) と同じように非常に高い精度で行われ、数年のうちに”ヒッグス精密測定 (Higgs precision measurements)”と呼ぶべき状況になると考えられる。

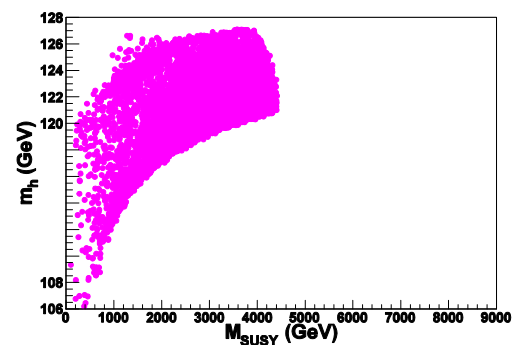
LHC でのヒッグス結合定数の測定を手掛かりに現在ある素粒子模型を検証し、あるべ

き方向性を探り、素粒子新理論を構成する手掛かりを得ることが目的である。そのためにまず、超対称標準模型が本当に誤りであるのか、誤りでないとすれば、どのパラメタ領域で実現可能なのかをはっきりさせなければならない。

## 3. 研究の方法

(1) 当時の LHC の最新の実験結果と LEP の電弱精密測定等あらゆる実験結果を考慮し、かつパラメタの超微細調整の必要のない自然な模型であるという条件のもとで、超対称標準模型は、当時、”自然な超対称模型 (natural SUSY)”とよばれるパラメタ領域が有力なものと考えられていた。この自然さ (naturalness) を要請すれば標準模型粒子の超対称性パートナーはやはり  $10 \text{ TeV}$  以上の質量を持つのは不自然で、軽い超対称性粒子の存在は、ヒッグス結合の値の標準模型からのずれを予言する。この観点から natural SUSY シナリオから許されるパラメタ領域でのヒッグス粒子の様々なチャネルへの崩壊幅の標準模型の予言との比率を予言する。

ヒッグス粒子の質量  $125 \text{ GeV}$  が超対称標準模型からすると当初の予想よりもかなり大きいことが問題であった。大きいヒッグス粒子の質量は超対称性の回復するエネルギー・スケール  $M_{\text{susy}}$  を押し上げる。私はヒッグスの質量について3次の量子補正まで考慮した精密計算を行い、許される  $M_{\text{susy}}$  の値の検討を行った。



上は 2013 年 1 月に出版した 3 次の量子補正を考慮したヒッグスの質量の計算結果であるが実験値の  $125 \text{ GeV}$  に達するには超対称性の破れのスケール  $M_{\text{susy}}$  が最低でも  $1 \text{ TeV}$  以上であることが必要だとわかる。ヒッグス粒子の最新の質量測定値を再現するようにパラメタの値に拘束をつけ、上記の様々なチャネルへの崩壊幅の予言を行った。標準模型の予言値との比率を求める。結果は逐一更新される LHC の最新の実験結果と比較検討される。この方法で超対称標準模型の真偽に決着をつけることが可能になる。LHC で標準模型からのずれが報告されれば、たちどころに natural SUSY のパラメタに大きな情報が得られ、他の超対称粒子の質量の予言も可能

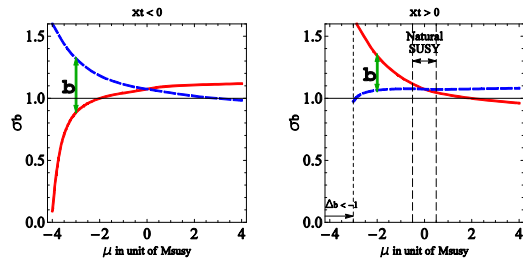
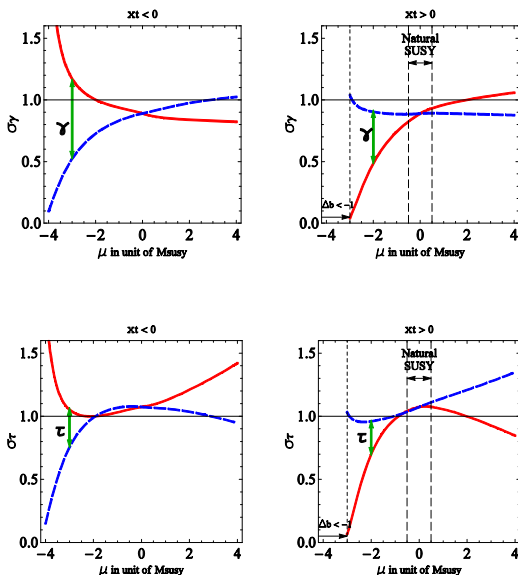
となるだろう。

(2) 研究計画のもう一本の柱は新たな素粒子モデルの構築である。上記の検証の結果は超対称標準模型に否定的であり、素粒子新理論を構築するための新たな方向性が必要になった。素粒子統一モデルの構成にはまったく新しい数学的枠組み、アプローチが必要であると考えられた。Finsler 幾何学に着目した。Finsler 幾何学は修正重力理論の候補と考えられていたが、広大な可能性を持っており、重力を含む統一モデルを記述する枠組みとなりうるようになってきた。専門家に情報提供を求めて、Finsler 幾何学に基づき統一モデルの構築を試みる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 最小標準模型、natural SUSY の否定

上に説明したパラメタの超微細調整の必要のない natural 超対称性モデルの予言するヒッグスの崩壊幅と標準模型の予言値の比率を以下の図に示す。1 行目が 2 光子崩壊、2 行目が  $b\bar{b}$  崩壊、3 行目が  $\tau\tau$  崩壊を示す。縦軸 1 の横線が標準模型の予言値を表す。横軸  $\mu$  は超対称模型の予言するヒグシーノの質量を表すパラメタであり、この値を変えると崩壊幅は大きく変化し、もう一つのパラメタ  $X_t$  正負に応じて赤青 2 本の線の間の値が予言される。Naturalness を考慮すると、ヒグシーノの質量  $\mu$  は 500GeV 以下に予言され、LHC で直接検証できる。グラフの  $X_t$  正の右側のグラフの  $\mu=0$  付近の狭い領域が natural SUSY の予言となる。小さいヒグシーノ質量の効果はヒッグス結合の標準模型の予言 1 からずれを予言する。



以上は 2013 年 1 月に出版され、さらに検討を加えて、2013 年 9 月に成果をまとめて第 37 回理論物理国際研究会 "Matter to the Deepest" Ustron, Poland において講演発表を行った。

その後 LHC による Higgs 結合の測定は徐々に精密化された。ヒッグス結合の測定値はことごとく標準模型が予言する値と一致し、その比率の 1 からのずれは観測されなかった。LHC が発見した新粒子は標準模型のヒッグス粒子であり、それ以上の新理論の必要性は見つからなかった。軽いヒグシーノは発見されなかった。

私の研究は超対称性モデルが当初期待された形では実現されていないことを示す、すなわち単純な超対称標準模型が誤っていたことを示す重要なものだと位置づけられる。同時に自然さ (naturalness) の議論を作業原理として素朴に適用することが新理論を構築する際に如何に危険であることを示すことにもなると思う。パラメタの階層性は何かの必然的理由があると考えられる。

##### (2) 新理論の構築に向けて : Finsler 幾何

LHC の結果が単純な標準模型の拡張である最小超対称標準模型とならなかったことで、素粒子物理は新たな方向性を探らねばならなくなった。新理論構築には新しい数学的枠組みが必要と考えられる。私はリーマン幾何学を拡張した Finsler 幾何学に着目した。Finsler 幾何では計量テンソルがリーマン幾何のように座標のみでなく変位にも依存するように書き換えられ、修正重力理論の候補として考えられていた。私は数学の専門家に情報提供を受け、Finsler 幾何学の基礎を習得した。手始めに Finsler 幾何学を用いて対称性と保存則の議論を行い、これを場の理論である、河口幾何学に拡張した。保存則が従来のものよりも簡単に得られる方法を説明する論文を共同研究者とともに論文として出版した。ついでこの方法を重力場に適用し、重力のもつエネルギー・運動量に関する古典的問題にひとつの解釈を与える論文を出版した。最近 Finsler 幾何学を拡張した河口幾何学が時空の創生を含むあらゆる素粒子、宇

宙の統一模型の枠組みを提供する可能性が  
あることが明らかになってきた。現在この方  
向に研究を進めている。

## 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 2 件 )

大塚隆巧、矢萩量子、石田宗之、田中恵  
理子、”Energy-momentum conservation  
laws in Finsler/Kawaguchi Lagrangian  
formulation ”, 36 pp.

Class.Quant.Grav. 32 (2015) no.16,  
165016 .

DOI: 10.1088/0264-9381/32/16/165016

石田宗之、”125 GeV Higgs Boson and  
Radiative Natural SUSY”, ACTA  
PHYSICA POLONICA B, Vol. 44  
(2013), 2129-2137. (第37回国際研究  
会”Matter to the Deepest” 研究会報  
告：査読なし)

DOI: 10.5506/APhysPolB.44.2129

[ 学会発表 ] ( 計 1 件 )

石田 宗之、  
第37回国際研究会”Matter to the Deepest”  
Ustron, Poland, September 1-6, 2013.

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

石田 宗之 ( ISHIDA, Muneyuki )

明星大学・理工学部・

総合理工学科・准教授

研究者番号：8 0 3 6 6 9 1 3