

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540277

研究課題名(和文) 超弦のダイナミクスと物質の新しいユニバーサリティ

研究課題名(英文) Dynamics of superstrings and new universality of matters

研究代表者

川合 光 (Kawai, Hikaru)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80211176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：LHCによるヒ格斯粒子の質量をインプットとしてくりこみ群の解析を行うことにより、ヒグスポテンシャルがプランクスケールで平坦になることを発見した。また、そのような平坦性が、超弦の非摂動的ダイナミクスから自然に示唆される、時空のトポロジーのゆらぎの結果とみなせることを示した。さらに、この事実から、宇宙のインフレーションがヒ格斯場によって引き起こされた可能性があることや、ダークマターとして最も単純なヒ格斯ポータル型のを仮定した場合、その質量とトップクォーク質量の間に関係がつくことなど、多くの検証可能な予言がえられることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have examined the Higgs potential at high energy scale by using the recently observed value of the Higgs mass by LHC, and found that it becomes almost flat around the Planck scale. We then have shown that such flatness can be understood as a consequence of the fluctuation of the space-time topology, which naturally follows from the non-perturbative dynamics of string theory. Furthermore, we have discussed that such behavior of the Higgs potential indicates many testable predictions such as the possibility of the Higgs inflation and the relation between the top quark mass and the dark matter mass in the Higgs portal dark matter model.

研究分野：物理学

キーワード：超弦理論 量子重力 ヒ格斯場 時空の揺らぎ 最大エントロピー原理 多重臨界点原理 ヒグスイ
ンフレーション 暗黒物質

1. 研究開始当初の背景

超弦理論がはじまって既に 30 年が経つが、未だに素粒子物理学の根幹をなす基本理論には至っていない。一方、実験サイドからの重要な手掛かりとして、LHC による Higgs 粒子の発見と、TeV スケールまで新しい物理がないという事実の発見は、素粒子物理学がこれまでの考え方に捉われない新たな方向性を模索する時代へ入ったことを示している。それとともに、標準模型だけでは予言できない量(ニュートリノ振動や宇宙でのバリオン数非対称性)や、標準的な場の理論の考え方では理解できない問題(階層性問題や宇宙項問題など)も存在する。これらの諸問題を解決するためには、私たちの手中にある実験結果の意味を深く考察し、場の理論のダイナミクスや量子重力理論とのつながりを再検討することで、LHC 後の新しい素粒子論を構築することが重要となる。

2. 研究の目的

(1) 行列模型による時空と物質の創発: 超弦理論を完成させ、重力まで含めた究極の統一模型を構築する有力な候補が行列模型であるが、これまでは行列模型から標準模型を直接導出する試みはあまりシリアスになされていなかった。本研究では上記のような LHC から得られる知見をもとに、解析的・数値的両面から行列模型の性質をあらたに解析し、時空自身の生成からはじめ、標準模型が正しく再現されているかを調べる。

(2) 弦理論と場の量子論の非摂動効果の研究: 重力を不可避的に含む超弦を通じて、一連の時空パラメータと素粒子パラメータ間の相関を見出す。特に、TeV 領域までに新しい物理がないという事実は、標準模型の物理がプランクスケールの物理に直結している可能性を示唆している。その仮定から、どのような実証可能な予言ができるかを調べる。

(3) 自然性に対する新しい理解の試み: 従来、自然性は超対称性との関連で議論されることが多かったが、LHC の結果はより広い視野から議論しなおす必要性を示している。たとえば、量子重力において時空のトポロジーが揺らいでいる効果を取りいれたり、経路積分をカノニカルアンサンブル型から変形するなど、従来の局所場の理論を少しはみ出したような系を考える可能性がある。そのような場合、いわゆる Big Fix、すなわち、宇宙項をふくむすべての結合定数がダイナミカルに決まる可能性があるか検討する。

(4) 以上のほかにも、行列模型と超弦理論の関係を多種多様な側面から解析し、ダイナミクスを解明し、究極の理論の構築に迫る。

3. 研究の方法

数値的および解析的な考察を並行して進め

る一方で、研究会、セミナーなどを通じて、各地の素粒子物理、場の理論、物性理論、宇宙論、数理物理などの専門家たちと幅広く交流することによって、新しい視点を開き問題を解決する

4. 研究成果

(1) トップクォークの質量と、LHC によって測定されたヒグス粒子の質量をインプットとしてくりこみ群の解析を行い、ヒグスポテンシャルが高いエネルギースケールでどのように振舞うかを調べた。その結果、ヒグスポテンシャルはプランクスケールあるいはストリングスケール近辺で、ほとんど平坦になることを発見した。

(2) 次にそのような平坦性の起源について考察した。このような振る舞いは、宇宙項やヒグスの質量の自然性の問題と同じレベルの問題であり、通常の場合の理論の立場からは一見不可思議なものである。しかし、超弦の非摂動的ダイナミクスから自然に示唆されるような、時空のトポロジーの量子ゆらぎを考慮に入ると、その結果として自然性やポテンシャルの平坦性を説明できる可能性があることを議論し、その具体的なメカニズムをあたえた。

(3) さらに、この事実から、宇宙のインフレーションがヒグス場によって引き起こされた可能性があることや、ダークマターとして最も単純なヒグスポータル型のものを仮定した場合、その質量とトップクォーク質量の間に密接な関係がつくことなど、多くの検証可能な予言がえられることを示した。

(4) 以上の考察を一般化し、「低エネルギーの有効作用に現れるパラメータは宇宙の最終段階のエントロピーを最大にするように選ばれている。」という原理(最大エントロピー原理)を得た。この原理を検証するためには、宇宙の始まりから終わりまでの歴史を知っている必要があるか、いくつかのパラメータは、現在のわれわれの限られた知識の中でも議論できる。具体例として、ヒグスの真空期待値の関数として宇宙のエントロピーを評価し、確かにそれが 200GeV 程度のときに最大になっていることを示した。

(5) B 行列模型により曲がった時空がどのように生成されるかを調べた。特にマルチバースが自然に記述され、低エネルギーの有効理論が、自然に最大エントロピー原理を満たす可能性があることを示した。この方向の理論が完成した暁には、宇宙初期の時空構造をはじめ、今までの理論では考察できなかった時空の根本的構造にせまることができるようになると思われる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

Yoshinobu Habara, Hikaru Kawai, Masao Ninomiya,
A new mechanism of realizing
inflationary universe with recourse to
backreaction of quantized free fields,
JHEP 1502: 148-171, 2015

Yuta Hamada, Hikaru Kawai, Kin-ya Oda,
Seong Chan Park,
Higgs inflation from Standard Model
Criticality,
Phys. Rev. D91: 5-14, 2015.

Yuta Hamada, Hikaru Kawai, Kiyoharu
Kawana,
PTEP 2015 3 033B06:3-19, 2015.

Yuta Hamada, Hikaru Kawai, Kin-ya Oda,
Seong Chan Park,
Higgs Inflation is Still Alive after the
Results from BICEP2,
Phys. Rev. Lett 112: 21-24, 2014.

Yuta Hamada, Hikaru Kawai, Kin-ya Oda,
Predictions on mass of Higgs portal
scalar dark matter from Higgs inflation and
flat potential,
JHEP 1407: 026-045, 2014.

Yuta Hamada, Hikaru Kawai, Kiyoharu
Kawana,
Evidence of the Big Fix,
Int. J. Mod. Phys. A29: 17-48, 2014.

Yuta Hamada, Hikaru Kawai, Kin-ya Oda,
Minimal Higgs inflation,
PTEP 2014 023B02:1-23, 2014.

H.Kawai,
Low energy effective action of quantum
gravity and the naturalness problem,
Int. J. Mod. Phys. A28: 1340001, 2013.

Hikaru Kawai, Yoshinori Matsuo, Yuki
Yokokura,
A Self-consistent Model of the Black
Hole Evaporation,
Int. J. Mod. Phys. A28 (2013) 1350050.

Yuta Hamada, Hikaru Kawai, Kin-ya Oda,
Bare Higgs mass at Planck scale,
Phys. Rev. D87 (2013) 053009.

Y. Habara, H. Kawai, M. Ninomiya,
Y. Sekino,
Possible origin of CMB temperature
fluctuations,

Phys.Rev. D85 (2012) 104027.

Y. Asano, H. Kawai, A. Tsuchiya,
Factorization of the Effective Action in the
IIB Matrix Model,
Int. J. Mod. Phys. A27 (2012) 1250089.

Hikaru Kawai, Takashi Okada,
Solving the Naturalness Problem by
BabyUniverses in the Lorentzian
Multiverse,
Prog. Theor. Phys. 127(2012) 689-721.

Hikaru Kawai, Takashi Okada,
Asymptotically Vanishing Cosmological
Constant in the Multiverse,
Int. J. Mod. Phys. A26 (2011)3107-3120.
Nucl. Phys. B789: 209-224, 2008.

H. Kawai, S. Shimasaki, A. Tsuchiya,
Large N reduction on group manifolds,
Phys. Rev. D81 (2010) 085019.

H. Kawai, S. Shimasaki, A. Tsuchiya,
Large N reduction on group manifolds,
Int. J. Mod. Phys. A25(2010) 3389-3406.

〔学会発表〕(計 14 件)

2015 年
Standard Model and Planck Scale -3 years
after Higgs-,
KEK Theory Workshop 2015, 3 月 29 日.

Standard Model and Planck Scale,
The 2nd Joint Kyoto-NTU High Energy
Theory Workshop,
National Taiwan Univ., Taipei, 3 月 27 日,

2014 年
Naturalness and Higgs Inflation,
IAS Workshop on New Perspectives on
Cosmology,
The Hong Kong Univ. of science and
technology, Hong Kong, 5 月 21 日.

Phenomenological Description of the
Interior of the Schwarzschild Black Hole,
The 1st Joint Kyoto-NTU High Energy
Theory Workshop -Progress in String
Theory and Particle Phenomenology-,
京都大学, 9 月 10 日.

2013 年
Towards Unification of Spacetime and
Matter -prospect of string theory-,
Conférence de Physique, Ecole Normale
Supérieure, Paris, 2 月 28 日.

Higgs bare parameters at Planck scale,

Laboratoire de physique theorique
LNS, Paris, 3月6日.

A Self-consistent Model of the Black Hole
Evaporation.

Laboratoire de physique theorique LNS,
Paris, 3月14日.

Desert and the Big Fix,
KEK 理論研究会 2013, 3月21日.

Desert and the Naturalness,
基研研究会-素粒子物理学の進展 2013,
8月6日.

Large-N reduction and IIB matrix model I,
Large-N reduction and IIB matrix model II,

Corfu summer lectures on elementary
particles physics and gravity,
Corfu, Greece, 9月17日-18日.

2012年
行列型における自然性問題の解消,
研究会「行列型とその周辺」,
立教大, 2月20日.

Solving Naturalness Problem in Matrix
Model,
KEK 理論研究会 2012, 3月5日.

Quantum Gravity and the Naturalness
Problem,
The symposium at Osaka City University
on field theory,
大阪市大, 4月3日.

Low energy effective action of quantum
gravity and the Naturalness Problem,
IIP-ICTP school on gravity and string
theory,
Natal, Brazil, 5月17日.

Naturalness Problem and the Multiverse,
The Workshop on Theories and
Possibilities of Observations of Wormholes,
立教大学, 10月27日.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 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 件)

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

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
川合 光 (Hikaru KAWAI)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：80211176

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし