

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

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：23104010

研究課題名（和文）テラスケール物理から超弦理論への展開

研究課題名（英文）From Telescale Physics to String Theory

研究代表者

渡利 泰山 (Watarai, Taizan)

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：40451819

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,100,000 円

研究成果の概要（和文）：素粒子物理の現象論や模型構築というアプローチは、低エネルギー有効局所場の理論を言語とする。そのため、この理論的枠組みの持つ限界から逃れられない。今回の研究では、超弦理論を用いて、その限界を打破する試みを2通りの方法追及した。

1つは、超弦理論のコンパクト化を用いるものである。フラックスコンパクト化の解の統計学をF-理論で適用可能にすることにより、ゲージ群、湯川結合定数などの分布関数を導いた。もう1つは、AdS/CFTを用いたハドロン高エネルギー散乱の理論的枠組みの拡張。2体から2体への散乱ながら、非弾性散乱でも扱えるように拡張し、一般化されたパートン分布関数の定性的性質を弦理論を用いて導いた。

研究成果の概要（英文）：Phenomenology and model building approaches to particle physics rely on the language, low-energy effective local field theory. It means that the limited capability of this language also applies to the two approaches above. In the current research project under the public funding, we used string theory in two distinct ways to overcome the limitations.

One is to use string compactification. By making the statistical study of flux vacua applicable to F-theory compactifications, we derived distribution functions of such observables as gauge groups and Yukawa couplings in low-energy action. The other is extension of theoretical framework for hadron high-energy scattering using AdS/CFT correspondence. We extended the framework so it can cover 2-body to 2-body processes that are not elastic, and derived qualitative properties of generalized parton distribution function by using string theory.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子理論 超弦理論 統一理論 ハドロン散乱

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理のフロンティアを前進させることができるのは究極的には実験である。その中でも加速器実験は重要な位置を占める。一方で、加速器実験でエネルギーの一段高い世界に踏み込んでいくには、非常に長い時間を要する。ゆえに、実験から直接的に分かることだけでなく、その意味するところを十二分に引き出す理論的試みが重要な意味を持つことになる。

そのような理論的試みの中で、実験にもっとも近いところに寄り添うアプローチは、現象論とか模型構築とか呼ばれている。そのアプローチの基本言語は、低エネルギー有効局所場の理論である。そして、このアプローチの限界は2つある。1つは、局所場の理論が許す自由度があまりに大きく、標準模型を超える模型を構築するにあたって、理論的に許される自由度が大きすぎるのである。そしてもう一つは、加速器実験で解析できる事象が、場の理論の摂動的取扱が可能なものに限られていることである。クォークやグルーオンなどの大角度高エネルギー散乱は摂動計算扱えるが、終状態としてハドロンを含むような過程は、摂動計算では扱えない。

超弦理論は、低エネルギー有効局所場の理論を超える理論的枠組みである。であるから、上記の2つの低エネルギー有効局所場の理論の限界を弦理論を用いて乗り越えようとするアプローチが試みられてきた。

(1) 模型構築のアプローチの限界を超えようとする試みとして、超弦理論のコンパクト化が1980年代半ばから研究されてきた。しかし、90年代半ばに起きた超弦理論の理解の飛躍的進歩により、80年代からの蓄積は大幅なバージョンアップが必要になった。そのバージョンアップが00年代半ばに始まり、理論的基礎での不明な部分が大方片付いたのが、当該科研費補助事業の「研究開始当時」の状況である。

しかし、超弦理論のコンパクト化の現象論のための理論的基礎の理解が固まることと、それを用いて低エネルギーの物理に有用な洞察をもたらすことの間にはまだ相当の距離があった。

(2) 加速器実験での事象の解析を局所場の理論の摂動計算に依拠する、という限界を超えようとする試みとしては、AdS/CFT 対応の応用の研究がなされてきた。

90年代末から00年代にかけては、AdS 空間上の重力理論を用いて、ハドロンの質量や結合定数、形状因子を計算する手法が開発された。これは、AdS/CFT 対応のハドロン物

理への応用において基礎中の基礎になる事項である。

一方、質量や形状因子は、ハドロンの静的、もしくはそれに準ずる低エネルギー領域での性質である。ハドロンの純高エネルギー散乱では、パートンの描像がよい近似になることが知られており、また、散乱の重心系エネルギーが大きいかいれども運動量移行が小さい場合(Regge 領域と呼ばれる)には、ハドロン描像とパートン描像の中間・折衷的な性質をもった理論が必要であることが知られている。ゆえに、さらなる理論開発が必要なのである。

2002年の Polchinski Strassler, および2006年の Brower Polchinski Strassler Tan (BPST) の論文は、この方面において突破口を開くものであった。AdS/CFT の枠組みの中でどのようにパートンを扱うべきか、そして Regge 領域の散乱を取り出すには、超弦理論のどのような近似計算を行うべきか、の指針を明らかにしたのである。ただし、06年のBPST論文は、2つのハドロンの間の弾性散乱のみを扱う理論的枠組みの提示にとどまった。多種多彩なハドロンの高エネルギー散乱現象を理解するための理論的枠組みとして使えるようになるには、まだ相当の理論の開発が必要、というのが、「研究開始当時」の状況である。

2. 研究の目的

新学術領域「テラスケール」のB03班では、上記(1)、(2)の試みを追及していくことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 当該科研費補助事業の開始時点で懸案であったのは、「コンパクト化に導入可能な位相的フラックスを、特異点を持つ多様体においてどう記述するか」という技術的問題である。位相的フラックスは低エネルギー有効理論の物質場の世代数も決定するし、コンパクト化多様体の形状も決定する、ひいては低エネルギー有効理論の結合定数を決定する、というものであるから、まずはここを攻略せねばならない。我々は、05年のAspinwall Kallosh 論文、11年のEsole Yau 論文を徹底的に読み込むことから開始した。

そこから得られた理解を基に、次は、03年のAshok Douglas, 04年のDenef Douglas 論文における弦理論の解の統計分析を拡張一般化し、統計分析の手法をF-理論コンパクト化にも適用できるようにした。

これらの段階を乗り越えたうえで、F-理論の

フラックスコンパクト化で得られる低エネルギー有効理論の統計を調べ、その結果を、ゲージ群、世代数、結合定数など低エネルギーで観測可能な物理量の関数求めるところまで持ち込んだ。結果は次の項で記す。

この超弦理論の真空の統計分布を調べることが可能になることによって、模型構築のアプローチにおいて通常用いられる「自然さ」という考え方に対して、科学的基礎づけを与えることが可能になる。超対称統一理論におけるフレーバー構造の起源についても、この統計に基づいた洞察を超弦理論から引き出せるようになる。

(2) まずは、02年 Polchinski Strassler 論文、そして 06年 BPST 論文を精読し消化するところから我々は研究を開始した。

この両論文のあいまいな箇所、論理の不備などに修正を加える一方で、我々は この手法を深部仮想的コンプトン散乱過程と呼ばれる高エネルギーハドロン散乱過程に適用した。必要は発明の母である。具体的な物理過程を対象とすることにより、理論的枠組みのどこが拡張再構築を必要としているかが明らかになるので、一石二鳥の狙いである。

深部仮想的コンプトン散乱過程の記述は、摂動計算と一般化されたパートン分布関数(GPD)と呼ばれる3変数非摂動関数の組み合わせによってなされるのだが、弦理論(AdS/CFT)に基づいた手法の強みは、[理論的枠組みがきちんと整備拡張された場合に]この非摂動関数の部分について定性的な予言を出すことができることである。この非摂動関数部分は、摂動計算の過程で複雑な畳み込み積分に使われるため、実験データから直接フィットするわけにはいかない。フィットの前に、理論に基づく媒介変数表示を与える必要があるため、この弦理論に基づくアプローチは、その面での進歩をもたらさう。

4. 研究成果

(1) まずは、フラックスコンパクト化による多様体の形状の安定化機構は、本質的に代数幾何におけるネーター・レフシェッツ問題と等価であるという観察に基づき、まずは F-理論の $K3 \times K3$ コンパクト化のフラックス存在下での安定解を調べた。 $K3$ 多様体の場合にはネーター・レフシェッツ問題を具体的に手で取り扱うことができる。一方でこの同じ設定に対して、Douglas Ashok Denev の統計的手法を F-理論用に一般化した解析を行うことにより、ネーター・レフシェッツ問題を扱う手法と、統計的手法が同じ結果を与えることを確認した。かくして、汎用性が高い(と目される)Douglas らの手法を、F-理論の一般的なコンパクト化にも用いてよいことが

示された。

なお、この過程で、ヘテロ弦理論と F-理論の間の 8次元での双対性対応が、離散モジュラー群のとり方まで含めて成立していることを(ついでに)厳密に示した。

Douglas らの統計的手法を F-理論の一般のコンパクト化に用いる場合、4次コホモロジー群を縦成分、横成分、その他成分に分割し、それぞれの成分の次元を求める必要があることも明らかにした。我々は、この各成分の次元を求める数学公式をも導いた。これにより、低エネルギー有効理論の物理量に対して、F-理論のフラックスコンパクト化の数がどのような統計分布を示すかを計算できるようになった。

一般的な結果として、次のことが分かった。まず、有効理論の物質場の世代数に関しては、ガウス分布であり、分散は $O(1)$ 程度。これは、現実世界の3世代という値と大きな乖離はない。次に、ゲージ群のとり方に関しては、乱暴に言って、統一理論のようなゲージ群を持つ解は、全くゲージ群がない解に比べて、10のマイナス1000乗程度、もしくはもっと、という信じがたい小さな比率であることが分かった。

宇宙定数の値が現在の宇宙での値ほどに小さい確率は、10のマイナス100乗程度、という問題がよく知られているが、この問題の発見のインパクトはその上に行くものである。この結果のインパクトから、MIT の研究者は多様体の4次コホモロジーの横成分の次元の計算を多くの例について調べ、30万次元ほどの大きさの横成分があるものを発見した。このことは、上記の比率が、10のマイナス1000乗などでは全く済まないことを示している。

この大きな問題をわきにおけば(人間原理という解がないわけではないので)、この統計分布を用いて、現実世界のフレーバー構造の起源のいくつかの仮説について、優劣の判定をつけることができる。ある仮説については、1万分の1の真空で成り立つのに対し、別の仮説は、10のマイナス1万乗の比率の真空でしか成り立たないということを示した。

(2) 02年 Polchinski Strassler 論文および 06年 BPST 論文を精読し、改良を加えた。その結果、パートン分布関数を2変数関数に拡張したもの(縦方向運動量 x とローレンツ不変運動量移行 t)について、クロスオーバー転移が存在することを指摘した。

また、06年 BPST 論文の弾性散乱用開発された手法を一般化して、2体から2体への散乱ながら、始状態と終状態で質量が違いうる

場合にも適用できるように拡張した。この結果、深部仮想コンプトン散乱にこの AdS/CFT を用いた手法が適用可能になった。

その手法を用いて、3変数(x, t そしてよじれ具合 eta)に依存する非摂動関数、一般化されたパートン分布関数を求めて、そのいろいろな性質を導いた。

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 19件)

以下、すべて査読あり。

また、これらの論文はすべて、

<http://inspirehep.net/>

で入手可能である。 発表順。

R. Nishio and T. Watari “High-energy Photon-Hadron Scattering in Holographic QCD,” Phys.Rev. D84 (2011)075025.

R. Nishio and T. Watari “Investigating Generalized Parton Distribution in Gravity Dual,” Phys.Lett. B707 (2012) 362-368.

H. Hayashi, T. Kawano and T. Watari “Constraints on GUT 7-brane Topology in F-theory,” Phys.Lett. B708 (2012) 191-194.

T. Kawano, Y. Tsuchiya and T. Watari “A Note on Kahler Potential of Charged Matter in F-theory,” Phys.Lett. B709 (2012) 254-259.

R. Nishio, T. Watari, T. Yanagida and K. Yonekura, “Naïve Dimensional Analysis in Holography,” Phys.Rev. D86 (2012) 016010.

A. Braun and T. Watari “On Singular Fibres in F-theory,” JHEP 1307 (2013) 031.

A. Braun, Y. Kimura and T. Watari “The Noether-Lefschetz problem and gauge group resolved landscapes: F-theory on $K3 \times K3$ as a test case,” JHEP 1404 (2014) 050.

A. Braun and T. Watari “Distribution of the Number of Generations in Flux Compactifications,” Phys.Rev. D90 (2014) 121901.

Y. Chung and C. Lin “Topological Inflation with Large Tensor-to-scalar

Ratio,” JCAP 1407 (2014) 020.

A. Braun and T. Watari “The Vertical, the Horizontal and the rest: anatomy of the middle cohomology of Calabi-Yau fourfolds and F-theory applications,” JHEP 1501 (2015) 047.

R. Nishio and T. Watari “Skewness Dependence of generalized parton distributions, conformal OPE and the AdS/CFT correspondence,” Phys.Rev. D90 (2014) 125001.

B. Henning, J. Kehayias, H. Murayama, D. Pinner and T. Yanagida, “A keV string axion from high-scale supersymmetry,” Phys.Rev.D90 (2015), 4, 045036.

S. Hellerman, J. Kehayias and T. Yanagida, “Chaotic inflation from non-linear sigma models in supergravity,” Phys. Lett. B742 (2015) 390-393.

T. Watari “Statistics of F-theory flux vacua for particle physics,” JHEP 1511 (2015) 065.

[学会発表](計 13件)

国際会議 String Phenomenology 2011. 11年 8/22-8/26, 米国ウイスコンシン州マディソン、ウイスコンシン大学にて。 “Studying GPD in holographic QCD” Taizan Watari

国際会議 Elastic and Diffractive Scattering. 11年 12/16-12/20, ベトナム、Qui Nhon 市。 “Studying GPD in Gravity Dual” Taizan Watari

国際研究集会 CERN Theory Institute 2012 on String Phenomenology. 12年 7/9-7/20。スイス、ジュネーブ、CERN 研究所にて。 “Note on Kahler Potential of Charged Matter in F-theory” Taizan Watari

国際研究集会 “Relation of string theory to gauge theories and moduli problems of branes.” 12年 9/10-9/14。ロシア、モスクワ、ステクロフ数学研究所にて。 “Particle Physics and Geometric Data for String Compactifications” Taizan Watari

国際研究集会 “New Challenges for String Phenomenology” 12年 9/26-9/28。スペイン、マドリッド、マドリッド自治大学

にて。 ”Challenges for Stringphenomenology after String Revolution,” Taizan Watari

国際会議 “Geometry and physics of F-theory” 14年 2/24-2/27。ドイツ、ハイデルベルグ、ハイデルベルグ大にて。 “Noether-Lefschetz problem and gauge group resolved landscape” Taizan Watari

国際研究集会 “Fine-tuning, Anthopics and String Lanscape” 14年 10/8-10/10 スペイン、マドリード、マドリード自治大にて。 ”Statistics of Gauge groups and Number of generations,” Taizan Watari

国際研究集会 “Rikkyo MathPhysics 2015” 15年 1/10-1/12 東京、立教大学にて。 “Geometry of elliptic K3, elliptic Calabi-Yau fourfolds and F-theory” Taizan Watari

国際会議 “Physics and Geometry of F-theory” 15年 2/23-2/26。ドイツ、ミュンヘン、マックスプランク研究所にて。 ”Geometry of elliptic K3 and Heterotic-F-theory Duality” Taizan Watari

国際研究集会 “String/M-theory compactification and moduli stabilization” 15年 3/4-3/7。米国、ミシガン州アナーバー、ミシガン大学にて。 ”Some thoughts on Complex Structure Moduli Inflation” Taizan Watari

国際会議 “String Phenomenology 2015” 15年 6/8-6/12。スペイン、マドリード、マドリード自治大学にて。 ”Statistics of Effective Theories in F-theory Flux Compactifications,” Taizan Watari

国際研究集会 “Spinfest 2015” 15年 7/22。茨城県、東海村、KEK 東海事業所。 ”Skewness dependence of GPD in AdS/QCD” Taizan Watari

国際会議 “F-theory at 20” 16年 2/22-2/26。米国カリフォルニア州パサデナ、カリフォルニア工科大にて。 ”Heterotic string soliton and degeneration of K3 surface” Taizan Watari

国内研究会は集計に含めず。

〔その他〕

研究会開催

“Holography and QCD---Recent Progress

and Challenges” 2013 9/24—9/28, 東大柏キヤンパスにて。他財源と共催。参加者は内外から59名。研究会 web page は、<http://indico.ipmu.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=9>

アウトリーチ

一般向け：IPMU News Letter に寄稿
「ニュートリノ振動大角度混合の衝撃」

理数系教養以上向け：雑誌「数理科学」寄稿
2012年12月号、「F-理論の数理」

物理学会会員向け：日本物理学会誌解説記事、
2016年6月号 「超弦理論のコンパクト化 After Thirty Years」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡利 泰山 (WATARI, Taizan)
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：40451819

(4) 研究協力者： 科研費補助事業期間を通して、常時4-5人で推移した。
(多少の入れ替わりあり)

大河内 豊 (OOKOUCHI, Yutaka)
九州大学・基幹教育院 自然科学理論系部門・准教授
研究者番号 40599990

高柳 匡 (TAKAYANAGI, Tadashi)
京都大学, 基礎物理学研究所, 教授
研究者番号 10432353

Yu-Chieh Chung
現所属・不明
研究者番号 40624135

John Kehayias,
Vanderbilt 大学・物理天文学科・特任研究員
研究者番号 30624142

西尾 亮一 (NISHIO, Ryoichi)
SmartNews, Inc.・社員
研究者番号 なし

Dong-Min Gang,
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・
特任研究員
研究者番号 50748853

Matthias Weissenbacher
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・
特任研究員
研究者番号 80775677