

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540286

研究課題名(和文) Flavor Structure in String Theory

研究課題名(英文) Flavor Structure in String Theory

研究代表者

川野 輝彦 (Kawano, Teruhiko)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20292831

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：F-Theoryのコンパクト化において7ブレーンのWorldvolume理論がGUT理論のゲージ場などを与えるが、7ブレーンの交差しているところに局在しているクォークやレプトンなどの物質場の湯川相互作用はブレーン構造を理解する上で根幹をなす。これまでの研究により、場の3点相互作用について理解が進んできたが、物理的な湯川結合定数を求めるためには、場の理論の解析方法を開発する必要がある。このため、主に6次元 $N=(2,0)$ 理論と呼ばれる理論を「局所化」という手法を使って研究を進めた。

研究成果の概要(英文)：In a 4-dimensional compactification of F-theory for a phenomenological model, quarks and leptons localized on curves of 7-branes give rise to Yukawa couplings at intersection points of the curves, which are the key for understanding the Flavor structure of the standard model. Since the Yukawa couplings appear in physical quantities with the normalization of each of the kinetic terms of the matters, we also need to know the normalizations, but it is sometimes formidable to calculate it. Therefore, we have been trying to make our understanding of quantum field theory deeper for the computation. To this end, we have applied the localization method to 6-dimensional $N=(2,0)$ theory compactified with twist on the product space of a three-sphere and a Riemann surface to compute the partition function. It made a precious chance for me to learn more on partial twistings, which is a similar circumstance to 4-dimensional compactifications of F-Theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：String Theory F-Theory コンパクト化

1. 研究開始当初の背景

素粒子理論の標準模型は、これまで行われた実験結果を非常によく再現している優れた理論である。この理論はゲージ対称性を原理に構成されており、この部分に関しては理論的によく理解できていると言える。それゆえ、このゲージ対称性を拡張することで、標準模型を超えるモデルとして大統一理論などが提唱されている。

しかしながら、ゲージ対称性を原理にするだけでは理論的に理解できない部分も標準理論には存在する。それは、現在 CERN で実験が行われている LHC で明らかになるかもしれないが、電弱対称性の破れの機構やその破れのスケールの大きさなどがある。後者は階層性問題(Hierarchy Problem)と呼ばれており、現在のところ、ヒッグス場を素粒子ではなくパイオンのような複合粒子として扱う方法か、超対称性を理論に導入するかという二つの方法が知られている。また、湯川結合定数などのフレーバー構造(Flavor Structure)もほとんど理論的な理解が得られていない。それゆえ、Froggatt-Nielsen 機構などの試みがあるものの、基本的には、これらのパラメータは現象論的に実験結果に合わせることに以上、その値を予言したり、その構造を理論的に理解できる枠組ができていない。

また、超対称性は、大統一理論において標準模型のゲージ結合定数が一点において一致することをはじめとする多くの利点を持ち、多くの研究者に階層性問題の解決方法として有力視されていると言って良いであろう。しかしながら、超対称性を何らかの方法で破る必要があるが、この破れを表わす soft SUSY breaking term は、FCNC や CP の破れなどを一般に大きく破るため、超対称性の mediation の機構も含め、フレーバー構造を理解することがさらに難しい状況に陥ることがわかる。

このように、素粒子理論の標準模型のフレーバー構造を理論的に理解する試みは、現在行える実験の制約の問題も考慮すると、低いエネルギーからのアプローチ以外の可能性を探ることは自然に思われる。一方で、超弦理論は、プランクスケールでの量子重力をも含めた高エネルギーでの物理を記述していると多くの研究者に期待されている理論である。それゆえ、超弦理論のコンパクト化を通じて標準模型のフレーバー構造を理解する鍵を探そうとする試みは、考慮するに十分値すると考える。

実際に、1980 年代半ばからヘテロティック弦理論などのコンパクト化を用いて、大統一理論を作る試みがなされてきた。その結果、

MSSM に近い現象論的な要請を満たすモデルに近づく方向で研究が実際に進んでいるが、まだ必要な要素が抜けている。特に、ヘテロティック弦理論には、近年 Type II 弦理論で著しい発展を見た Flux コンパクト化が適用できないため、moduli 場と言われるゼロ質量の粒子が残るという moduli 問題が残されている。また、超対称性を保つコンパクト化にカラビ ヤウ多様体を用いており、この計量が一般には分からないために運動項を計算できないことから物理的な湯川結合定数をきちんと計算できないので、その予言を引き出せない。

私は、東大グループとともに F-Theory のコンパクト化を用いて大統一理論(GUT)のモデル作りの基礎になる部分について研究を重ねてきた。このような研究は、最近、Harvard 大の Vafa 氏を中心としたグループや Donagi 氏-Wijnholt 氏などによって始められた。

ヘテロティック弦理論などを使わずに F-Theory のコンパクト化を使うメリットはいくつかあるが、一つには Type II 弦理論の Flux コンパクト化が適用できることから、複素構造 moduli を固定する機構が知られていること、また、二つ目は Type II 弦理論では非摂動論効果によって湯川結合定数を計算せざるを得ないが、F-Theory では古典的なレベルで湯川結合定数が原理的に計算できることである。

我々は、特に、湯川結合定数の計算の仕方やこのコンパクト化を使って標準模型のフレーバー構造を再現する方法などに取り組んできた。この枠組みでは、湯川結合定数はブレインの交点からもたらされることがわかる。SU(5)を GUT 群にした場合には、up-type と down-type の湯川結合定数が必要であるが、down-type の湯川結合定数は Harvard 大グループや Donagi 氏-Wijnholt 氏が議論していたブレインの交わり方で導出できるが、up-type の場合には普通の状況ではもっと一般的な交わり方であることを我々は見出した。

このような湯川結合定数に関する計算方法はかなりの進展を見たが、それらを用いて観測量を計算するためには、それぞれの場の運動項を計算する必要がある。今の場合には超対称性をもつ大統一理論を考えているので、いわゆる、D-term を計算する必要がある。ブレインの交線にはクォークやレプトンを含む物質場が現れることが示せるが、これらの物質場の D-term をきちんと計算されたことはない。

2. 研究の目的

研究開始の背景で説明したように、F-Theory

を用いた大統一理論のもつ予言能力を引き出すためには、物質場の D-term を正確に計算する必要がある。しかしながら、超対称性をもつ理論においても、D-term を正確に計算することは、特別な場合を除いて、難しい。この研究課題の主な目的は、この困難を量子場の理解を深めることで新しいアイデアを見出し、これらの理論から得られるフレーバー構造から、素粒子の標準模型のフレーバー構造を説明できるかどうかを確かめたいことにある。

3. 研究の方法

まず、F-Theory におけるブレインの一般的な交わり方から湯川結合定数を計算する手法を我々はまだ十分には開発し切れていない。このような交点の近くでのブレインの交わり方は、ブレイン上のヒッグス場の超対称性を保つ解によって記述される。しかしながら、超対称性を保つ解の条件は、複素 3 次元 Hermitian Yang-Mills 方程式と呼ばれるものを複素 2 次元に dimensional reduction したのようになっており、複素一次元分高い Hitchin 方程式の様を呈している。現在のところ、Harvard 大グループや Donagi 氏-Wijnholt 氏が議論している特殊な解以外に、その非自明な解は知られていない。

しかしながら、この方程式の解を知らなくても、superpotential にある湯川結合定数はあるトポロジカルな数として計算できることが、よく理解されている特殊な交わり方についてはハーバード大のグループによって示された。それゆえ、この議論を我々が考察している一般的な交わり方に拡張する可能性を検討すること。

また、違う方法として、このような複素 3 次元 Hermitian Yang-Mills 方程式を数値的に解いてしまう方法をヘテロティック弦理論の場合に Douglas 氏を中心としたグループによって開発されてきた。このような数値的なアプローチを我々が求めたい複素一次元分高い Hitchin 方程式の解に適用する方法を検討すること。

さらに、上で述べたように、物理的な湯川結合定数を求めるためには、それぞれの場の運動項を計算する必要がある。今の場合には超対称性をもつ大統一理論を考えているので、いわゆる、D-term を計算する必要がある。ブレインの交線にはクォークやレプトンを含む物質場が現れることが示せるが、これらの物質場の D-term をきちんと計算されたことはない。このような計算も行い、物理的な湯川結合定数を求める基礎を固める研究も考えている。

このような計算を実行できる可能性を検討

するため、ここ数年のあいだ活発に研究されてきた「局所化」の方法を吟味することが望ましいと考え、超対称性を持つ量子場の理論において、「局所化」を実際に使って、現在の 7 ブレインと似ている状況であるツイストを使ったコンパクト化での「局所化」の方法が使えるかどうかを試行すること。

この D-term について、Kahler potential の高次の項まで計算することは、soft SUSY breaking term に直接繋がり、超対称性の破れの問題とその FCNC などのフレーバー問題が密接に関係する非常に重要な計算となり、F-theory のコンパクト化がこれらの項に対してどのような結論を持つかについて興味深いがまだきちんと議論されていない。さらには、どのような超対称性の破れの機構とその mediation が実験事実や宇宙論からの制限を満たしながら、この枠組みに自然に組み込むことができるかを明らかにすることも、CP の破れや FCNC の問題に必然的に関連することから、この課題研究のテーマであるフレーバー構造の問題として捉えており、研究を進めたい課題であった。

4. 研究成果

F-Theory での物質場は 7-brane の交差している場所に現れるが、7-brane を 4 次元多様体へツイストを加えてコンパクト化した場合に、この 7-brane のモデルから、交差曲線に局在化した物質場の低エネルギー有効作用を与えた文献がなかった。そこで、土屋氏と渡利氏と共同で、これらの運動項を解析して調べた。その結果、物質場の運動項が GUT 群が存在する 7-brane 上全体の積分で与えられるのではなく、その交差している複素曲線上の積分で実際に与えられることを明らかにした。

また、林氏と渡利氏と共同で、現象論的要請から GUT 群が存在する 7-brane のトポロジーに制限が付くことを明らかにした。GUT 群を標準模型のゲージ群に破るシナリオでは GUT 群が存在する 7-brane が Hirzebruch 曲面であることは、余計な Charged Matter が現れることから禁止される。また、Up タイプの湯川相互作用を与える codimension-3 の 7-brane 交差を 1 つにするため、discrete 群を使うシナリオでは、GUT 群が存在する 7-brane が del Pezzo 曲面であることは禁止される。

物質場の低エネルギー有効作用での運動項、すなわち、D-term が物質場が局在する複素曲線上の積分で書かれることがわかったが、さらに、具体的な形で評価する可能性を求めて、最近活発に研究されている「局所化」という手法について研究を進めた。

F-Theoryの4次元コンパクト化で素粒子理論の標準模型のフレーバー構造を解明するため、そこで生じる物質場の有効理論と同じ6次元である M5 プレイン上の理論を2次元リーマン面にコンパクト化した理論を考えることにした。この理論を考察する動機はもう一つある。それはA G T関係などの4次元ゲージ理論と2次元共形場理論との繋がりを与える理論であり、分配関数の正確な評価はこのような関係を理解する上で重要であると考えられる。特に、時間方向にコンパクト化した理論として5次元ヤン-ミルズ理論を丸い3次元球面と2次元リーマン面にコンパクト化した後、「局所化」を使って分配関数を具体的に求めることを試みた。これは4次元ゲージ理論の超対称性指数の計算に対応している。

そのため、6次元 $N=(2,0)$ 超重力理論から5次元へ次元を落として、系統的に5次元 SuperYang-Mills 理論の3次元球と2次元リーマン面ヘツイストを伴うコンパクト化した理論を構成する方法を研究した。

それを用いて、M5-brain上の理論を時間方向にコンパクト化した理論として5次元ヤン-ミルズ理論を丸い3次元球面と2次元リーマン面にコンパクト化した後、「局所化」を使って分配関数を具体的に求めることに成功した。

さらに、この成果を推し進めて、6次元 $N=(2,0)$ 超重力理論を5次元に落としたものを使って、系統的に、5次元 SuperYang-Mills 理論の3次元球と2次元リーマン面ヘツイストを伴うコンパクト化した理論について調べた。

丸い3次元球の場合にも、破れていない超対称性の数を変えるようなツイストの方法があり、上で述べた研究結果は $N=1$ ツイストに相当するコンパクト化に対応していたが、新たに、 $N=2$ ツイストに相当するコンパクト化について調べた。

また、3次元球が squash された球面上へのコンパクト化に拡張した。この場合にも、 $N=1$ ツイストと $N=2$ ツイストの場合があり、これらについて、「局所化」を用いた解析的な計算を行い、分配関数を正確に求めることができた。

さらに、ellipsoid 球面上へコンパクト化した場合についても研究を進め、 $N=2$ ツイストの場合に拡張することができなかったが、 $N=1$ ツイストの場合には、やはり、正確な分配関数を「局所化」を用いて計算することに成功した。この結果が4次元場の理論の超対称性指数の計算に一致していることも確かめた。

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6件)

川野 輝彦, 松宮 就章, 5D SYM on 3D Deformed Spheres, Nuclear Physics B 誌、査読有、第898巻、2015、456頁.
doi:10.1016/j.nuclphysb.2015.07.018

川野 輝彦, 中口 悠輝, 西岡 辰, Holographic Interpolation between a and F, The Journal of High Energy Physics 誌、査読有、第1014巻、2014、161頁.
doi:10.1007/JHEP12(2014)161

福田 泰嵩, 川野 輝彦, 松宮 就章, 5D SYM and 2D q-Deformed YM, Nuclear Physics B 誌、査読有、第869巻、2013、493頁.
doi:10.1016/j.nuclphysb.2012.12.017

川野 輝彦, 松宮 就章, 5D SYM on 3D Sphere and 2D YM, Physics Letter B 誌、査読有、第716巻、2012、450頁.
doi:10.1016/j.physletb.2012.08.055

川野 輝彦, 土屋 洋一, 渡利 泰山, A Note on Kähler Potential of Charged Matter in F-Theory, Physics Letter B 誌、査読有、第709巻、2012、254頁.
doi:10.1016/j.physletb.2012.02.016

林 博貴, 川野 輝彦, 渡利 泰山, Constraints on GUT 7-brane Topology in F-theory, Physics Letter B 誌、第708巻、2012、191頁.
doi:10.1016/j.physletb.2012.01.031

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川野 輝彦 (KAWANO, Teruhiko)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 20292831