

平成30年 5月30日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2017

課題番号：24540279

研究課題名(和文) 超弦の行列模型からの標準模型の出現に関する研究

研究課題名(英文) Studies on the appearance of the standard model from the matrix model describing superstrings

研究代表者

青木 一 (AOKI, Hajime)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80325589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論の非摂動的定式化としての行列模型から、素粒子の標準模型がいかに現れるかについて研究した。弦理論での交差Dブレーンや磁場を持つDブレーンに対応する行列配位を構成し、標準模型の物質要素が行列模型で実現できることを示した。さらに、行列模型が作用も測度も明確に定義された理論であるという利点を活かして、標準模型やその拡張模型の弦理論での実現確率を評価した。また、標準模型と行列模型を結びつける際重要な、自然さ問題、階層性問題について再考し、暗黒エネルギーが場の量子揺らぎで与えられる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We studied how the standard model of particle physics appears from the matrix model as a nonperturbative formulation of superstrings. We constructed matrix configurations that correspond to the intersecting D-branes and the magnetized D-branes in string theories, and showed that matter content of the standard model can be realized in the matrix model. Moreover, using the advantage of the matrix model with a definite measure as well as action, we estimated probabilities of the appearance of the standard model and its extensions in the string theory. We also reconsidered the naturalness problem, or the hierarchy problem, which is important for connecting the standard model with the matrix model, and showed a possibility that the dark energy is given by quantum fluctuations of fields.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：超弦理論 行列模型 標準模型 自然さ問題・階層性問題

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型は、その提唱以来半世紀にわたり、膨大な実験データと高い精度で一致することが示されてきた。ちょうど本研究を始めたころ、LHC 実験でヒッグス粒子が発見された。しかし、超対称性などの単純な拡張は苦しくなり、標準模型を超えた現象論的模型の探索をするには新たな視点が必要となってきた。

一方、超弦理論は重力まで含めた万物の究極理論として期待されているが、様々な時空構造や物質要素をもつ真空が多数見つかリ、それらの解析が困難となってきた。そのためには、個々の真空をまとめて扱える、弦理論の非摂動的定式化が必要であり、行列模型がその候補として有望とされている。

そこで、本研究では行列模型と標準模型を結びつける研究を遂行することにより、両者の進展をはかろうとした。

2. 研究の目的

超弦理論において、コンパクト化された時空と広がった4次元時空、及びその上での標準模型の物質要素が実現される多くの状況が示されているので、それらに対応する行列模型における行列配位を構成し、行列模型で標準模型が実現できることを示す。

さらにそのような行列配位の実現確率を求め、標準模型やその拡張模型の弦理論における実現確率を評価する。行列模型は作用も測度も明確に定義された理論なので、このような研究が可能である。従来の弦理論の定式化では、個々の真空が個別に定式化されており、それらを比較することができなかったが、行列模型では可能であり、その利点を活かした研究である。

行列模型による弦理論の定式化が提唱されて20年以上がたつが、行列模型が本当に弦理論を内包するか、行列の中に時空や物質の自由度がいかにか埋め込まれているかなどの重要な問題について、精力的に研究がされてきたにもかかわらず、明確な理解は得られていない。行列模型での現象論的研究を遂行することにより、このような行列模型の基礎的問題への理解が進められることも期待している。

3. 研究の方法

標準模型の重要な特徴に、ゲージ群に対するフェルミオンの表現がカイラルであることがある。このカイラルなゲージ対称性はフェルミオンの質量が軽いことを保証している。

高次元の理論から、カイラル・フェルミオンを得る標準的な方法は、余剰次元空間に非自明なトポロジータを持たせ、非ゼロのインデックス(カイラル零モードの数の差)を与え、我々の住む4次元時空上にカイラルな零質量のフェルミオンを得るというものである。超弦理論での、オービフォールド、カラビヤ

オ・コンパクト化、交差Dブレーン、磁場を持つDブレーンなどの、様々な技法を用いたカイラル・フェルミオンや標準模型の実現も、この例にあたる。

有限自由度の行列模型でのトポロジータの定式化は困難と思われていたが、格子理論で発展したギンスパーク・ウィルソン関係式を行列模型に適用することにより、トポロジータの記述方法やダイナミクスの解析が可能であることがわかってきた。そこで得た知見をもとに、オービフォールド、交差Dブレーン、磁場を持つDブレーンなどに対応する、行列模型での行列配位を構成し、カイラル・フェルミオンや標準模型の物質要素が実現できることを示す。

そのような行列配位の実現確率の評価に関しては、行列模型が経路積分で量子化されて系として、その作用も測度も明確に定義されているので、場の量子論や統計系でよく知られた手法、例えば、半古典近似、平均場近似、モンテカルロ・シミュレーションなど、を適用することができる。

4. 研究成果

(1) 磁場を持つ2次元非可換トーラスやそのテンソル積として得られる高次元トーラスの、行列模型での定式化を以前の研究で行ったので、それをを用いて4次元時空上に標準模型の物質要素を与える行列配位を構成した。これは、弦理論の文脈では、磁場を持つDブレーンの状況に対応する。

さらに、パティ・サラム模型のような、標準模型の拡張模型を与える行列配位を構成し、ある条件のもとで可能な全ての行列配位を系統的に調べ尽した。

また、これらの行列配位の古典作用を計算し、これらの配位の出現確率を半古典近似で評価した。

これにより、行列模型で標準模型やその拡張模型が実現できることや、その実現確率の評価ができることが示された。とくに、実現確率の評価は、今までの弦理論の研究ではできなかった、新たな成果である。

しかしながら、この研究ではトーラス時空をユニタリ行列により表したが、超弦理論の行列模型はエルミート行列で書かれているので、両者の関係を明らかにしなければならない。

また、標準模型でのゲージ場やフェルミオン場は表せたが、ヒッグス場に関しては問題が残る。ヒッグス場と同じゲージ群の表現を持つスカラー場は出現するが、それ以外のスカラー場も現れてしまう。一般にスカラー場は輻射補正により重い質量を得てしまうが、ヒッグスに相当するスカラー場だけが軽く保たれる機構を考えなければならない。

(2) 2次元ファジー球面の行列模型での表現はよく知られており、それに関する研究も多く行ってきたので、そのテンソル積で得ら

れる4次元球面と、別の2次元球面が、6次元空間の中の点で交差している状況を表す行列配位を構成した。

弦理論では、交差するDブレーンを考えると、その交差点でカイラル・フェルミオンが得られることが知られている。上記の行列配位はその状況に対応しており、実際、交差点でカイラル・フェルミオンが現れることを示した。さらに、標準模型の物質要素や世代数が得られる行列配位を構成した。

(3) 標準模型のヒッグス場がスカラー場であることがLHC実験から示されたが、スカラー場の質量は一般に輻射補正を受けて重くなってしまうので、いかにして軽く保つかという、いわゆる自然さ問題、階層性問題が重要になる。この問題は、標準模型を超える模型を探索するときも、重要な鍵を与える。弦理論の文脈で現象論的研究を行う際も重要である。実際、上記(1)の最後の段落で述べたように、行列模型での現象論的模型の研究をする際も、この問題に直面する。

そこで、場の理論の枠組みでウィルソンの繰り込み群の手法を用いて、自然さ問題を再考した。場の理論の2次発散はサブトラクトすればよく、言い換えれば、パラメタ空間での座標の取り方を替えればよく、問題ではない。むしろ、理論の中に高いスケールがある場合、それが対数的発散を通して低いスケールに補正を与えてしまうというのが、本当に物理的な自然さ問題である、ということを示した。

このように問題を正しく捉えた上で、標準模型を超える模型を考案する際の可能性をまとめた。一般には自然さ問題の帰結として、新スケールはTeV程度で、あまり高くできないと言われているが、それ以外の可能性があることを示した。

(4) 自然さ問題、階層性問題として、ヒッグス場の質量と並び、宇宙項、または暗黒エネルギーの値をプランク・スケールに比べて非常に小さな値に保つことが必要である。ここでは、宇宙項・暗黒エネルギーを真空エネルギーとして解釈できないかという問題を、曲がった空間上での場の理論の枠組みで検討した。

宇宙初期のインフレーション期に増幅された場の量子揺らぎが、ホライズンより長距離に引き伸ばされて凍結し、後に再びホライズンの中に入ってきて、今日観測される宇宙背景輻射や銀河分布などの揺らぎの種を与えたというのは標準的な考えだが、この揺らぎのエネルギーが今日観測される暗黒エネルギーを与える可能性を検討した。例としてスカラー場を考え、インフレーション期、輻射優勢期、物質優勢期と続く宇宙の歴史の中での揺らぎの時間発展を計算し、そのエネルギー密度を求めた。

現在のハッブル・パラメタ程度の軽い質量

を持つスカラー場が存在し、かつインフレーション期のe-フォルディングが非常に大きいか、または通常のインフレーション期の前にプランク・スケール程度の大きなハッブル・パラメタをもつインフレーション期があれば、現在の暗黒エネルギーをこの真空エネルギーで説明できることがわかった。

さらに、通常のインフレーションの前のインフレーション期の例として、エタernal・インフレーションのような状況を考えて。ド・ジッター膨張する親真空から子真空が泡生成で生じたと仮定し、親真空で生成された量子揺らぎが子真空に与える真空エネルギーを評価した。このような泡生成による遷移は、ランドスケープと呼ばれる、ポテンシャルが山や谷をもつ弦理論の真空構造では、生じていると一般に思われている。

このような設定でも現在の暗黒エネルギーの値が得られること、少し過去に遡るとエネルギー密度が通常の宇宙項と異なる時間依存性を示すこと、その違いが将来の天体観測で観測可能であることなどを示した。

このような研究は、弦理論や行列模型でも重要な問題であり、今後それらと絡めて研究を進めていきたい。

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8件)

H. Aoki, S. Iso, D. Lee, Y. Sekino and C. Yeh, Vacuum fluctuations in an ancestor vacuum: A possible dark energy candidate, *Physical Review D* 97 (2018) 043517 (22pages), 査読有,

DOI: 10.1103/PhysRevD.97.043517

H. Aoki and S. Iso, Evolution of Vacuum Fluctuations of an Ultra-Light Massive Scalar Field generated during and before Inflation, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* (2015) 113E02 (28 pages), 査読有,

DOI: 10.1093/ptep/ptv150

H. Aoki, S. Iso and Y. Sekino, Evolution of vacuum fluctuations generated during and before inflation, *Physical Review D* 89 (2014) 103536 (29pages), 査読有,

DOI: 10.1103/PhysRevD.89.103536

H. Aoki, Phenomenological studies in the matrix models, *Proceedings of the Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity*, Corfu, Greece,

Fortschritte der Physik 62, No. 9-10 (2014) 771-775, 査読無,
DOI: 10.1002/prop.201400030
H. Aoki, J. Nishimura and A. Tsuchiya, Realizing three generations of the Standard Model fermions in the type IIB matrix model, Journal of High Energy Physics 1405 (2014) 131 (30pages), 査読有,
DOI: 10.1007/JHEP05(2014)131
H. Aoki, Probability distribution over some phenomenological models in the matrix model compactified on a torus, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2013) 093B04 (31 pages), 査読有,
DOI: 10.1093/ptep/ptt068
H. Aoki, Probability of the standard model appearance from a matrix model, Physical Review D87 (2013) 046002 (11pages), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.046002
H. Aoki and S. Iso Revisiting the naturalness problem: Who is afraid of quadratic divergences?, Physical Review D86 (2012) 013001 (10pages), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.013001

[学会発表](計11件)

青木一, 磯暁, Da-Shin Lee, 関野恭弘, Chen-Pin Yeh, Vacuum fluctuations in ancestor vacuum: A possible dark energy candidate, KEK Theory Workshop 2017, 2017年11月
青木一, 磯暁, Da-Shin Lee, 関野恭弘, Chen-Pin Yeh, Vacuum fluctuations in ancestor vacuum: A candidate for dark energy, 日本物理学会秋季大会, 宇都宮大学峰キャンパス, 2017年9月
青木一, 磯暁, Da-Shin Lee, 関野恭弘, Chen-Pin Yeh, Vacuum Energy in a Universe Created by Bubble Nucleation, 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス, 2016年3月
青木一, 磯暁, Evolution of Vacuum Fluctuations of an Ultra-Light Massive Scalar Field generated during and before Inflation, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 2015年3月
Hajime Aoki, Evolution of Vacuum Fluctuations of an Ultra-Light Massive Scalar Field generated during and before Inflation, KEK Theory Workshop 2015, 高エネルギー加速器研究機構, 2015年1月
青木一, 磯暁, 関野恭弘, Evolution of vacuum fluctuations generated during and before inflation: Implications for

dark energy, 日本物理学会秋季大会, 佐賀大学本庄キャンパス, 2014年9月
Hajime Aoki, Phenomenological studies in the matrix models, Workshop 2014 "TeV-scale physics after the discovery of the Higgs particle", 東京女子大学, 2014年3月
Hajime Aoki, Evolution of vacuum fluctuations generated during and before inflation, KEK Theory Workshop 2014, 高エネルギー加速器研究機構, 2014年2月
Hajime Aoki, Phenomenological studies in the matrix models, Corfu Summer Institute 2013, Corfu, Greece, 2013年9月
青木一, How the standard model and some phenomenological models appear from the matrix models, KEK 理論研究会 2013, 高エネルギー加速器研究機構, 2013年3月
青木一, How the standard model can appear from the matrix models, 研究会「離散的手法による場と時空のダイナミクス」, 理化学研究所(和光本所), 2012年9月

[その他]

アウトリーチ活動など

青木一, 素粒子物理と弦理論, 平成29年度佐賀県高等学校理科教育研究大会物理分科会, 佐賀県立唐津西高等学校, 2017年11月
Hajime Aoki, Particle physics, String theory and Matrix model, 13th Yonsei-Saga Joint Seminar, 佐賀大学, 2017年1月
Hajime Aoki, Standard Model and String Theory, 11th Yonsei-Saga Joint Seminar, 佐賀大学, 2015年1月
青木一, 素粒子物理学の現状~標準模型と弦理論~, 第53回九州高等学校理科教育研究会物理分科会, 佐賀市文化会館, 2014年8月
青木一, 宇宙の究極的な姿~素粒子論とひも理論~, サイエンスカフェ in SAGA, 佐賀ワシントンホテルプラザ カフェ・ド・パリ, 2014年7月
青木一, How the standard model appears from the matrix models, 京都大学素粒子論研究室セミナー, 2013年1月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木一 (AOKI, Hajime)
佐賀大学・工学系研究科・教授
研究者番号: 80325589