

令和元年6月20日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14303

研究課題名（和文）CP対称性の破れを担うアクシオン場の現象論的研究

研究課題名（英文）Phenomenological studies of axion and CP violation

研究代表者

大塚 啓 (Otsuka, Hajime)

早稲田大学・理工学術院・助教

研究者番号：80777988

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：超弦理論の有効理論に普遍的に現れるアクシオン場の素粒子現象論を研究することで、超弦理論特有の性質に注目した現象論的考察を行った。本研究で対象とした余剰次元空間の計量に由来するアクシオン場は、ゲージ場との結合だけでなく、素粒子間の湯川結合を通じて素粒子と結合し、湯川結合のCP位相を決定する特徴がある。本研究では、湯川結合のCP位相を担うアクシオン場が引き起こすバリオン数非対称性機構、アクシオン場の期待値の決定機構を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子統一理論の候補である超弦理論の有効理論には、アクシオン場は不変的に現れる。本研究では、超弦理論由来のアクシオン場の中でも、特にCP対称性の破れを担うアクシオン場に注目した。本研究課題は、プランク衛星を初めとする宇宙論観測とLHC実験を初めとする加速器実験の双方において、アクシオン探索の研究分野を開拓する学術的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：We studied phenomenological aspects of axions, which appear in the low-energy effective action of string theory. We focused on the axion originating from the internal space, appearing in Yukawa couplings among elementary particles, rather than the gauge coupling of the standard model. We have proposed a new mechanism to generate the baryon asymmetry induced by the axion dynamics and stabilization mechanism of the axion.

研究分野：素粒子理論

キーワード：アクシオン CP対称性の破れ 超弦理論

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型には、強い CP 問題、宇宙のバリオン数非対称の起源、暗黒物質候補や重力相互作用を含まないといった理論的・実験的問題点が存在するため、素粒子標準模型の背後に基本理論の存在が示唆されていた。アクシオン場は高次元のベクトル場・テンソル場に付随して現れるという点で、6次元の余剰次元空間を予言する超弦理論及び高次元模型において、普遍的に現れる。とりわけ量子重力の最有力候補である超弦理論には、複数のアクシオン場が4次元有効理論に存在することが知られていた。そのため、超弦理論由来のアクシオン場は、素粒子標準模型の強い CP 問題の解決に期待された QCD アクシオンだけでなく、A)初期宇宙の加速膨張期の存在により標準宇宙論の理論的問題点を解決する機構(インフレーション機構)を担うアクシオン場、B)暗黒物質候補になるアクシオン場、C)初期宇宙の磁場を生成するアクシオン場等、様々な高エネルギー実験・宇宙論観測において、注目を集めていた。

IIB 型超弦理論とヘテロ型超弦理論において、余剰次元空間の計量に由来するアクシオン場は、背景磁場によってプランクスケール程度の質量を持ち、加速器実験における素粒子現象論に影響を与えないと考えられていた。しかしながら、様々なアクシオン・インフレーションに関する先行研究では、背景磁場によってプランクスケール程度の質量を持たない軽いアクシオン場が存在し、従来想定されていたアクシオン・インフレーションの予言と異なることが示された。それ故、インフレーション機構を問わず、余剰次元空間の計量に由来するアクシオン場が加速器実験における素粒子現象に影響を与える可能性を検証する着想に至った。

トラスやカラビ・ヤウ多様体上における IIB 型超弦理論とヘテロ型超弦理論の次元縮約を行った際、素粒子間の湯川結合は高次元のゲージ対称性とローレンツ対称性によって、アクシオン場の依存性は摂動的に禁止される。しかし、余剰次元空間がゲージ背景磁場を持つトラスの場合及び特定のカラビ・ヤウ多様体上のヘテロ型超弦理論の場合、非摂動効果やゲージ背景磁場によって、湯川結合定数に余剰次元空間の計量に由来するアクシオン場の依存性が生じることが示された。特に、余剰次元空間の計量に由来するアクシオン場は湯川結合定数の CP 位相を担うことが明らかになっていた。

2. 研究の目的

本研究は、理論的・実験的問題点が指摘されている素粒子標準模型の拡張に当たり、ゲージ及び重力相互作用を統一的に記述し素粒子統一理論の候補と期待される超弦理論に注目する。特に、超弦理論の有効理論に普遍的に現れるアクシオン場の果たす役割に焦点を合わせ、超弦理論特有の性質に注目した現象論的な考察を行うことを目的とした。その目的のために、二つの目標(i)超弦理論が予言する余剰次元空間とアクシオン場の崩壊定数の関連性の解明、(ii)アクシオン場の期待値がもたらす CP 対称性の破れの検証を掲げた。

3. 研究の方法

(1) 第一の目標である「超弦理論が予言する余剰次元空間とアクシオン場の崩壊定数の関連性の解明」を達成するために、まず超弦理論に基づく有効理論の導出を行う。特に、モジュライ場及びアクシオン場に対する高次の相互作用が低エネルギー有効理論に現れる依存性を確認する。低エネルギー有効理論に無視できない寄与を与える場合は、高次の相互作用を取り入れた有効理論の導出を行う。

(2) 第二の目標である「アクシオン場の期待値がもたらす CP 対称性の破れの検証」を達成するために、宇宙論観測で示唆されているバリオン数非対称性に注目する。バリオン数生成の有力なモデルあるアフレックダイン機構では、CP 対称性の破れのパラメータは定数であると仮定されていたが、アクシオン場が力学的に変動する場合、CP 位相は時間変化する。CP 位相の時間変化を考慮したバリオン数の生成量は、従来の予言とは異なることが期待されるため、アクシオン場特有の事象が検証可能となる。

4. 研究成果

(1) 超弦理論の有効理論に普遍的に現れるアクシオン場の素粒子現象論を研究することで、超弦理論特有の性質に注目した現象論的な考察を行うことを目標としていた。CP 対称性の破れを担うアクシオン場の現象論を展開する上で重要なアクシオン場の崩壊定数を評価することを目標の一つとしていた。その際、弱結合極限のみならず、強結合極限におけるアクシオン場の崩壊定数の理解が本研究課題を行う上で重要であることを再認識した。そのため予定を変更し、IIB 型超弦理論の強結合極限を記述する F 理論に基づき、モジュライ・アクシオン場の期待値の決定手法を本間良則氏と共に解析した。その結果、ミラー対称性の手法を用いた閉弦・開弦

モジュライ・アクシオン場の固定手法が発表論文[7]で明らかになった。強結合極限におけるアクシオン場の崩壊定数の理解に留まらず、F 理論に基づく素粒子現象論及び初期宇宙論に対して予言を行う際の第一歩になると期待される。

また、弱結合極限においても、IIB 型超弦理論に基づき、輻射補正を用いた新しいモジュライ決定機構を提案し、軽量アクシオン場が現れることを小林達夫氏、大本直哉氏、立石卓也氏と共に発表論文[5,8]で明らかにした。軽量アクシオン場は、暗黒物質候補だけでなく、プランク衛星を初めとする宇宙論的観測に影響を与えるため、今後の宇宙論観測において計量アクシオン場の探索が期待される。

(2) アクシオン場の期待値がもたらす CP 対称性の破れを検証するにあたり、宇宙論観測で示唆されているバリオン数非対称性に注目した。バリオン数非対称性の有力な機構であるアフレック・ダイン機構において、アクシオン場が力学的に変動する場合を考慮し、バリオン数生成量を再評価した。その結果、超対称 DFSZ 模型においては、宇宙論観測で制限されているアクシオン場の揺らぎが抑えられると同時に、アクシオン場が暗黒物質の候補になり、宇宙論観測と整合するバリオン数非対称性が生成されることが明らかになった。同成果を秋田健介氏との共同研究に基づき、論文は査読付き学術誌[2]に掲載された。

また、アクシオン場と素粒子間の結合を明らかにするために、高次元場の理論に基づく高次の結合定数の構造を解析した。その結果、ゲージ背景磁場のある様々な余剰次元空間において、高次の結合定数は湯川結合を用いて記述されることが[3]で明らかになった。同研究は、小林達夫氏、本多正樹氏との共同研究に基づく。

その際、ゲージ背景磁場が余剰次元空間にもたらす補正の理解が、本研究課題を行う上で重要であることを再認識した。そのため、計画していた予定を変更し、トロイダルオービフォルドやその特異点を解消したヘテロ型弦理論において、ゲージ背景磁場が及ぼす余剰次元空間の計量への影響 Leung Pompey 氏と共に解析した。ヘテロ型弦理論の有効理論では、ゲージ背景磁場は弦の補正として現れる。その結果、背景磁場の大きさに依存して、余剰次元空間の計量が変更され、ワープ計量をもつ余剰次元空間になることが[1]で明らかになった。

(3) アクシオン場と素粒子間の結合を明らかにするために、様々な余剰次元空間上の $S_0(32)$ ヘテロ型弦理論に基づき、素粒子標準模型の導出を行った。ウィルソン・ラインを用いた模型構築は限定されたカラビ・ヤウ多様体でしか実行できない(発表論文[6])。それゆえ、ゲージ背景磁場のみを用いて、3世代のクォーク・レプトン及びヒッグス粒子を含むアノマリーのない模型を系統的に探索した。ゲージ背景磁場は素粒子の世代数だけでなく、アクシオン場と素粒子間の結合を決定する重要な性質を持つことがわかった(発表論文[4])。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

[1] Pompey Leung, [Hajime Otsuka](#), “Heterotic Stringy Corrections to Metrics of Toroidal Orbifolds and Their Resolutions”, *Physical Review D* **99** (2019) 126011, 査読有, doi: 10.1103/PhysRevD.99.126011, [arXiv:1903.12144 [hep-th]].

[2] Kensuke Akita, [Hajime Otsuka](#), “Affleck-Dine baryogenesis in the SUSY Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky axion model without R-parity”, *Physical Review D* **99** (2019) no.5, 055035, 査読有, doi: 10.1103/PhysRevD.99.055035, [arXiv:1809.04361 [hep-ph]].

[3] Masaki Honda, Tatsuo Kobayashi, [Hajime Otsuka](#), “Zero-mode product expansions and higher order couplings in gauge backgrounds”, *Physical Review D* に掲載決定済, 24 page, 査読有, [arXiv:1812.03357 [hep-th]].

[4] [Hajime Otsuka](#), Kenta Takemoto, “ $S_0(32)$ heterotic standard model vacua in general Calabi-Yau compactifications”, *Journal of High Energy Physics* **1811** (2018) 034, 査読有, doi:10.1007/JHEP11(2018)034, [arXiv: 1809.00838 [hep-th]].

[5] Tatsuo Kobayashi, Naoya Omoto, [Hajime Otsuka](#), Takuya H. Tatsuishi, “Radiative Kähler moduli stabilization”, *Physical Review D* **97** (2018) no.10, 106006, 査読有, doi: 10.1103/PhysRevD.97.106006, [arXiv: 1711.10274 [hep-th]].

[6] [Hajime Otsuka](#), “ $S_0(32)$ heterotic line bundle models”, *Journal of High Energy*

Physics **1805** (2018) 045, 査読有, doi: 10.1007/JHEP05(2018)045, [arXiv: 1801.03684 [hep-th]].

[7] Yoshinori Honma, Hajime Otsuka, “ On the Flux Vacua in F-theory Compactifications ”, Physics Letters **B774** (2017) 225-228, 査読有, doi: 10.1016/j.physletb.2017.09.062, [arXiv: 1706.09417 [hep-th]].

[8] Tatsuo Kobayashi, Naoya Omoto, Hajime Otsuka, Takuya H. Tatsuishi, “ Supersymmetry preserving and breaking degenerate vacua, and radiative moduli stabilization ”, Physical Review **D96** (2017) no.4, 046004, 査読有, doi: 10.1103/PhysRevD.96.046004, [arXiv: 1704.04875 [hep-th]].

〔学会発表〕(計13件)

[1] 大塚啓, Leung Pompey, “ Heterotic Stringy Corrections to Metrics of Toroidal Orbifolds and Their Resolutions ”, 日本物理学会第74回年次大会, 2019年3月14日~2019年3月17日, 九州大学.

[2] Hajime Otsuka, “ On the vacuum structure of F-theory compactifications ”, KEK Theory Workshop 2018 (招待講演), 2018年12月17日~2018年12月20日, KEK, Japan.

[3] 大塚啓, “ Hypercharge flux in $S0(32)$ heterotic string theory ”, 素粒子物理学の進展2018, 2018年8月6日~2018年8月10日, Kyoto Univ., Japan.

[4] Hajime Otsuka, “ Hypercharge flux in $S0(32)$ heterotic string theory ”, Strings and Fields 2018, 2018年7月30日~2018年8月3日, Kyoto Univ., Japan.

[5] 大塚啓, 小林達夫, 大本直哉, 立石卓也, “Radiative Kähler moduli stabilization ”, 日本物理学会第73回年次大会, 2018年3月22日~2018年3月25日, 東京理科大学.

[6] Hajime Otsuka, “ Axion decay constants at special points in type II string theory ”, Mini-workshop on inflation, mirror symmetry and F-theory (招待講演), 2018年3月20日, KEK, Japan.

[7] Hajime Otsuka, “ Radiative Kaehler moduli stabilization ”, Focus Meeting: new perspectives on light particles (招待講演), 2017年11月27日~2017年12月1日, IBS, Korea.

[8] 大塚啓, “ $S0(32)$ heterotic line bundle models ”, 日本物理学会第2017年秋季大会, 2017年9月12日~2017年9月15日, 宇都宮大学.

[9] Hajime Otsuka, “ Three-generation models in $S0(32)$ heterotic string theory ”, Summer Institute 2017, 2017年8月25日~2017年8月31日, Fuji-Yoshida, Korea.

[10] Hajime Otsuka, “ $S0(32)$ heterotic line bundle models ”, Strings and Fields 2017, 2017年8月7日~2017年8月11日, Kyoto Univ., Japan.

[11] Hajime Otsuka, “ On the Flux Vacua in F-theory Compactifications ”, Exceptional Groups as Symmetries of Nature, 2017年7月19日~2017年7月19日, KEK, Japan.

[12] Hajime Otsuka, “ On the Vacuum Structure of F-theory Compactifications ”, String Phenomenology 2017, 2017年7月3日~2017年7月7日, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA.

[13] Hajime Otsuka, “ On the vacuum structure of F-theory compactifications ”, PASCOS 2017, 2017年6月19日~2017年6月23日, IFT, Madrid, Spain.

6. 研究組織

(1)研究分担者: なし