

令和 2 年 9 月 8 日現在

機関番号：82118

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2019

課題番号：15KK0176

研究課題名（和文）格子QCDで探るアクシオン宇宙（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Axion cosmology on the lattice QCD(Fostering Joint International Research)

研究代表者

北野 龍一郎 (Kitano, Ryuichiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：50543451

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,300,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：素粒子の相互作用はゲージ理論に従っている。その主役となるゲージ場は、ゲージ変換しても物理を変えない（つまり同じ）であるという原理に従い、これにより、多彩なトポロジ的性質を持つ。本研究では、強い相互作用におけるトポロジ的性質を調べ、宇宙の暗黒物質の候補であるアクシオンの性質について新しい知見を得た。特に、格子ゲージ理論のシミュレーションにより、アクシオン質量の初期宇宙での変化についての計算結果を発表した。また、ゲージ理論のトポロジ的性質を理論的に調べ、カラー閉じ込めとの関係や、3次元ゲージ理論の双対性との関連についての新しい研究結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙や素粒子の世界は謎だらけである。現在最大の謎の一つが、宇宙の暗黒物質の正体であろう。強い相互作用のトポロジに関連した仮想粒子アクシオンはその候補であるが、その性質はあまりよく理解されてはいなかった。特に、初期宇宙の高温の環境においてどのような性質を持つか、特に質量の変化は現在の存在量を見積もる上で必要な情報となる。本研究では、質量の温度変化を格子シミュレーションにより計算し、新しい結果を発表した。また、一般にゲージ理論のトポロジ的性質に関するミステリーを理論的に考察し、興味深い結果を得た。

研究成果の概要（英文）：Interactions of the elementary particles are described by the gauge theories. The gauge fields, which are the fundamental object in the gauge theories, are obeyed by the principle that the gauge transformed gauge fields describe the same physics. This property leads to the topologically rich nature of the theory. In this research project, we investigated the topological properties of the strong interactions, and obtained new knowledge on the axion, which is the hypothetical particle to explain dark matter of the Universe. In particular, by the simulation of the lattice gauge theory, we published the results on how the axion mass changes in the early Universe. Also, the theoretical research on the topology in the gauge theory has been conducted, and obtained new results such as the relation between the topology and the quark confinement, and the relation to the duality among three dimensional gauge theories.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論

様式 F - 19 - 2

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用において CP 対称性が不自然に保たれている問題「強い CP 問題」は、仮想粒子アクシオンが存在すれば解決されるが、興味深いことに、同時に暗黒物質の候補ともなる。アクシオンの現在の存在量の計算には、強い相互作用によるアクシオンの質量の温度変化がインプットとなる。研究開始当初、研究代表者と KEK の山田氏は、格子ゲージ理論のシミュレーションによりこれを決定する研究を行っていた [1]。この研究はアメリカ・ヨーロッパとの国際競争となっていて、精度よく高温領域へ計算を広げる方法が必要となっていた。

2. 研究の目的

アクシオン質量の温度変化に関しては、非常に高温の領域で準古典的近似計算が有効となると信じられている。そこで、準古典的計算と格子計算を比較し、どの温度領域から近似が正当化されるか探る研究が有用となる。本研究の目的は、準古典的近似であるインスタントン計算と格子計算を比較する手法の開発にある。また、一般に準古典的近似によらないゲージ理論のトポロジ的性質を理解し、素粒子論・宇宙論に有用な知見を得る。

3. 研究の方法

インスタントンはゲージ理論の非自明なトポロジ的性質により存在する、古典的運動方程式の解であり、空間的、時間的にも局所的なゲージ場の塊である。この塊が真空エネルギーに寄与する程度が、アクシオンの質量と直結する。準古典的インスタントン計算では、インスタントンが時間的にも空間的にも十分離れていると仮定し、その程度を見積もる。

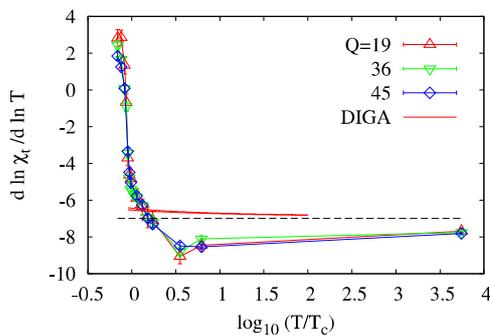
一方、格子ゲージ理論では、局所的情報ではなく、整数値をとるトポロジ荷を全時空の積分として得て、最終的に平均値や分散から物理量を引き出す。このため、結果の比較は可能であるが、実際のメカニズムとして、局所的なインスタントンの描像が正しいかどうかの判別は困難である。

そこで、格子ゲージ理論において、トポロジ荷密度分布に関する情報を引き出す手法を開発した。グラディエントフローと呼ばれる、格子シミュレーションで得られた配位からそれに近い古典解を引き出す手法を用い、それを用いた相関関数からインスタントン描像で計算可能な局所的情報をうまく引き出し、比較を行う。

格子シミュレーションだけでなく、ゲージ理論のトポロジ的性質に関する研究を幅広く行う。

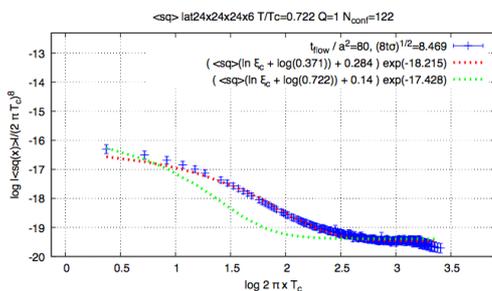
4. 研究成果

アクシオン質量の温度変化に関して、高温領域になると質量が非常に小さくなり、測定が困難となる問題があった。そこで、質量自体ではなく、その温度微分ならばうまく高温領域まで測定可能となる手法を開発し、シミュレーションを行った。

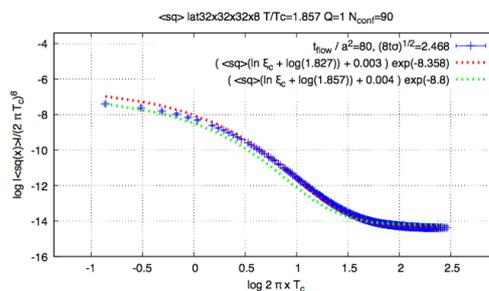


左図が新手法により得られた結果で、うまく高温領域までの計算ができていることがわかる。DIGA の実線が準古典的インスタントン計算の結果であり、高温で大まかには一致しているが、低温では乖離が見られる。どの領域から信頼できるのかははっきりとしない [2]。

そこで、局所量での比較計算を行った。この計算で重要となるのが、インスタントンの大きさである。インスタントンは古典的にはどんな大きさで



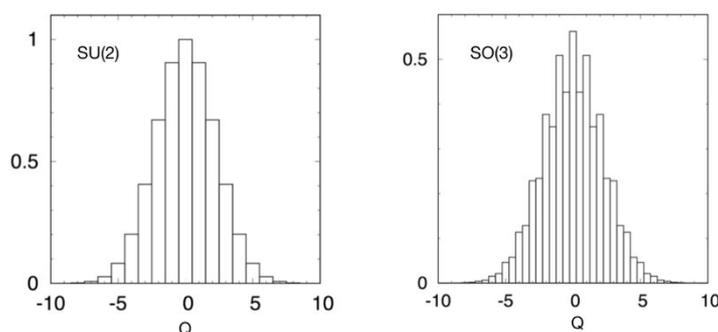
(a) $24^3 \times 6$ with $T/T_c \approx 0.72$



(b) $32^3 \times 8$ with $T/T_c \approx 1.9$

も運動方程式を満たし、量子論的考察をすると、温度の逆数程度の大きさのインスタントンが主要な寄与をする。下図が格子計算で、グラディエントフローにより古典的配位を抜き出し、グルーオン密度とトポロジー密度の相関関数を計算したものである。右の図は高温領域で、インスタントン計算（点線）の予言とよく一致しているが、温度を下げると左図のように乖離が見られ、準古典的計算の正当性が徐々に失われている様子がわかった [4]。

また、ゲージ理論のトポロジー的性質に関する理論的研究も行った。アクシオン場の値に相当するパラメータを大きくしていくと、真空はどう振る舞うかは、それほど明らかにはなっていなかったが、トラス上の $SU(N)/Z_N$ ゲージ理論の考察から、 $SU(N)$ ヤン=ミルズ理論の θ の点で真空エネルギーは滑らかに繋がらず、自発的 CP の破れ、もしくは質量ギャップの消滅（つまり非閉じ込め相転移）が起こることを確認した [3]。この驚くべき結論は、インスタントン出現を稀だとする準古典的近似では説明することができない。また一方でトポロジーが真空の構造に深く関わっていることを意味する。具体的に、トポロジー荷の出現に関して、トポロジーを除けば等価な理論、 $SU(2)$ 理論と $SO(3)$ 理論でどのように異なるべきか、予言を与えた（下図）。



また、QCDにおけるカイラル相転移と3次元ゲージ理論の双対性に関する新しい提案を行った。QCDにおけるベクトル中間子（ ρ と ω 中間子）が、実はグルーオンと双対の関係にあるのではないかという仮説である。空間1次元をコンパクト化したときに、ベクトル中間子で作るトポロジカル場の理論とグルーオンで作るトポロジカル場の理論が、双対な関係として一致する可能性を指摘した。

引用文献

- [1] R.Kitano and N.Yamada, "Topology in QCD and the axion abundance," JHEP 1510 (2015) 136.
- [2] J.Frison, R.Kitano, H.Matsufuru, S.Mori and N.Yamada, "Topological susceptibility at high temperature on the lattice," JHEP 1609, 021 (2016).
- [3] R.Kitano, T.Suyama and N.Yamada, " $\theta = \pi$ in $SU(N)/Z_N$ gauge theories," JHEP 1709, 137 (2017).
- [4] S.Mori, J.Frison, R.Kitano, H.Matsufuru and N.Yamada, "Instanton effects on CP-violating gluonic correlators," EPJ Web Conf. 175, 12009 (2018).
- [5] N.Kan, R.Kitano, S.Yankielowicz and R.Yokokura, "From 3d dualities to hadron physics," [arXiv:1909.04082 [hep-th]].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 14件）

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Eijima Shintaro, Kitano Ryuichiro, Yin Wen | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Throwing away antimatter via neutrino oscillations during the reheating era | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics | 6. 最初と最後の頁 048 ~ 048 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1088/1475-7516/2020/03/048 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Ema Yohei, Kitano Ryuichiro, Terada Takahiro | 4. 巻 2018 |
| 2. 論文標題 Unitarity constraint on the Kähler curvature | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 75 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2018)075 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Hamada Yuta, Kitano Ryuichiro, Yin Wen | 4. 巻 2018 |
| 2. 論文標題 Leptogenesis via neutrino oscillation magic | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 178 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2018)178 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Mori Shingo, Frison Julien, Kitano Ryuichiro, Matsufuru Hideo, Yamada Norikazu | 4. 巻 175 |
| 2. 論文標題 Instanton effects on CP-violating gluonic correlators | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences | 6. 最初と最後の頁 12009 ~ 12009 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817512009 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Shingo Mori, Julien Frison, Ryuichiro Kitano, Hideo Matsufuru, Norikazu Yamada | 4. 巻 175 |
| 2. 論文標題 Instanton effects on CP-violating gluonic correlators | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences | 6. 最初と最後の頁 12009 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817512009 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Julien Frison, Ryuichiro Kitano, Norikazu Yamada | 4. 巻 175 |
| 2. 論文標題 Topological susceptibility with a single light quark flavour | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences | 6. 最初と最後の頁 14017 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817514017 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Ryuichiro Kitano, Takao Suyama, Norikazu Yamada | 4. 巻 1709 |
| 2. 論文標題 = in SU(N)/Z(N) gauge theories | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 137 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2017)137 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Hiroshima Nagisa, Kitano Ryuichiro, Kohri Kazunori, Murase Kohta | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 High-energy neutrinos from multibody decaying dark matter | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 23006 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.023006 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Ryuichiro Kitano, Masafumi Kurachi | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 More on Electroweak-Skyrmion | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|------------------|
| 1. 著者名 Ryuichiro Kitano, Masafumi Kurachi | 4. 巻 1607 |
| 2. 論文標題 Electroweak-Skyrmion as Topological Dark Matter | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 37 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2016)037 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Julien Frison, Ryuichiro Kitano, Norikazu Yamada | 4. 巻 2016 |
| 2. 論文標題 Nf=1+2 mass dependence of the topological susceptibility | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 PoS LATTICE | 6. 最初と最後の頁 323 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|------------------|
| 1. 著者名 Yuta Hamada, Ryuichiro Kitano | 4. 巻 1611 |
| 2. 論文標題 Primordial Lepton Oscillations and Baryogenesis | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2016)010 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|------------------|
| 1. 著者名 J. Frison, R. Kitano, H. Matsufuru, S. Mori, N. Yamada | 4. 巻 1609 |
| 2. 論文標題 Topological susceptibility at high temperature on the lattice | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 21 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2016)021 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Ryuichiro Kitano, Ryuji Motono, Minoru Nagai | 4. 巻 94 |
| 2. 論文標題 MSSM without free parameters | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 115016 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.115016 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

[学会発表] 計8件(うち招待講演 7件/うち国際学会 7件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ryuichiro Kitano |
| 2. 発表標題 ニュートリノで拓く素粒子と宇宙 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年)(招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 北野龍一郎 |
| 2. 発表標題 Neutrino Physics and the origin of the Universe |
| 3. 学会等名 International workshop on "Unification and Development of the Neutrino Science Frontier" (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 北野龍一郎 |
| 2. 発表標題 physics and axion |
| 3. 学会等名 International workshop on "Axion Physics and dark matter cosmology" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 北野龍一郎 |
| 2. 発表標題 physics |
| 3. 学会等名 Topological Science Symposium 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 北野龍一郎 |
| 2. 発表標題 Strong CP problem on the lattice |
| 3. 学会等名 Johns Hopkins Workshop Series on Current Problems in Particle Theory Summer 2017, "Beyond the Standard Model - Exploring the Frontier" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 北野龍一郎 |
| 2. 発表標題 Primordial Lepton Oscillation and Baryogenesis |
| 3. 学会等名 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 北野龍一郎 |
| 2. 発表標題 From 3d dualities to hadron physics |
| 3. 学会等名 International Joint Workshop on the Standard Model and beyond (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 北野龍一郎 |
| 2. 発表標題 Leptogenesis via Neutrino Oscillation Magic |
| 3. 学会等名 Intensity Frontier in Particle Physics: Flavor CP Violation and Dark Physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| <p>格子QCDで探るアクシオン宇宙 http://research.kek.jp/people/kitano/axion/</p> |
|---|

| 6. 研究組織 | | | |
|-------------------|---------------------------------------|--|----|
| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
| 主たる渡航先の主たる海外共同研究者 | <p>ダイン マイケル</p> <p>(Dine Michael)</p> | <p>カリフォルニア大学サンタクルツ校・Physics Department・Professor</p> | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------------------|-----------------------------------|--|----|
| 主たる渡航先の主たる海外共同研究者 | ルーティー マーカス (Luty Markus) | カリフォルニア大学デービス校・Physics Department・Professor | |
| 主たる渡航先の主たる海外共同研究者 | 野村 泰紀 (Nomura Yasunori) | カリフォルニア大学バークレー校・Physics Department・Professor | |
| 主たる渡航先の主たる海外共同研究者 | ペスキン マイケル (Peskin Michael) | S L A C 国立線形加速器研究所・Theory Division・Professor | |
| その他の研究協力者 | フリソン ジュリアン (Frison Julian) | I F T マドリード・postdoctoral researcher | |