

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14301

研究課題名（和文）共形ブートストラップで解く量子色力学のカイラル相転移現象

研究課題名（英文）Conformal bootstrap and chiral phase transition in quantum chromodynamics

研究代表者

中山 優 (NAKAYAMA, Yu)

立教大学・理学部・准教授

研究者番号：40722195

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：高次元の共形場理論は臨界現象を特徴づける臨界指数などを決定する強力な手法である。本研究では、共形ブートストラップという共形場理論における相関関数の無矛盾性を調べることで量子色力学のカイラル相転移の性質を調べ、臨界指数が満たすべき不等式を得た。同じ手法を用いることで、ホログラフィーの観点から量子的なブラックホールの性質についての制限を与えることにも成功した。また、理論にスケール対称性がある場合に、共形対称性が成立する条件や、量子異常と共形対称性の関係などを研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

臨界現象は普遍的な性質をもち、例えば本研究で調べられた量子色力学のカイラル相転移の性質は、カイラルな磁性体でも現れることが知られている。そのため、本研究で調べられた制限は一つの模型を超えて普遍的な理論の制限と考えることができる。同じような現象はホログラフィーを通じて量子的なブラックホールにも適用でき、量子重力理論への制限は本研究ではじめて得られたものである。量子色力学の相転移は初期宇宙で起こったと考えられ、わたしたちの住む宇宙の物質の起源を解明する一方、カイラルな磁性体は実験室でも作れると考えられ、新しい物質創生に役立つことが期待される。

研究成果の概要（英文）：Conformal field theories in higher dimension are new powerful techniques to determine important physical quantities characterizing critical phenomena such as critical exponents. In this research, I used the conformal bootstrap method, which is based on the consistency of correlation functions in conformal field theories, to investigate the properties of chiral phase transition in quantum chromodynamics and obtain the inequality for the critical exponent. By using the same technique, I also succeeded in finding constraints on properties of quantum blackholes from the view point of holography. I have also studied the condition on conformal symmetry from scale symmetry and quantum anomalies in conformal field theories.

研究分野：理論物理学

キーワード：共形場理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の学術的背景

我々の宇宙がどこからやってきて、どこへ行くのか？その根源的な疑問の答えを与えようとするのが現代素粒子物理学である。素粒子に働く力は、重力、電気力、弱い力、強い力と4種類知られているが、核力をつかさどる強い力は文字通り結合定数が大きく、その量子力学的な性質を第一原理から理解することは困難であった。私達の世界の質量の99%は強い力によって生まれているが、その起源は、強い力によって引き起こされる「カイラル対称性の自発的破れ」であると考えられている。しかし、実はカイラル対称性の自発的破れが宇宙の歴史でどのように実現されたかは理解されていない。特に、その相転移が潜熱を伴う1次相転移であるか、伴わない2次相転移であるかは、未だに理論物理学者の間で喧々諤々の議論が繰り返されていった。

(2) 国内外の研究状況

本研究では、従来のモンテカルロ・シミュレーションによるQCDの直接計算とは全く異なる、「共形ブートストラップ」と呼ばれる新手法を用いて、カイラル相転移の物理を解明することを目指した。共形ブートストラップは、プリンストンやCERNに代表される海外の幾つかのグループによって、近年技術的に目覚ましい進展があった。たとえば、現在、人類が知っている3次元イジング模型の臨界指数の最良の理論的予測は共形ブートストラップによって与えられている。一方で、3次元イジング模型など自明に適用ができる場合の他には、QCDのカイラル相転移のような「面白くて未だ決着のついていない」物理系への応用はまだ数少なく未開の宝庫であった。私はこの共形ブートストラップの発展に最初期から興味を持ってきて、2016年当時、日本国内で共形ブートストラップの研究が行われているのは数少なく、代表者の研究は独走的な地位を占めていた。

2. 研究の目的

本研究では、量子色力学(QCD)のカイラル相転移現象を共形ブートストラップの方法を用いて解明することを目的とする。共形ブートストラップは、共形対称性と臨界現象の普遍性の概念に基づく、場の理論の非摂動的な知見を与える新しい道具である。共形ブートストラップの方法を用いて、これまでの直接的な計算機実験では判定が難しかったQCDのカイラル相転移が1次相転移であるか2次相転移であるかをこの新手法を用いて決定し、その相転移の性質と背後にある物理を明らかにする。本研究の目的をより広い見地から眺めると、場の量子論の繰り込み群的な普遍性を具現化することで、私達が住む宇宙において、物質の創造の瞬間に一体何が起こったのか？を理解するための新しい知見が得られることになる。また、共形ブートストラップの基礎となる共形場理論の性質を深く理解し、他の様々な物理系に応用することで、理論物理学の諸問題に対する新しい解決法を提案する。

3. 研究の方法

本研究において中心的な役割を果たしたのが高次元の共形対称性に基づく共形ブートストラップの方法である。経験的に多くの臨界現象においてスケール対称性よりも大きな対称性である共形対称性が成り立つことが知られている。共形対称性がある系では、相関関数の無矛盾性から共形ブートストラップ方程式と呼ばれる無限次元の拘束条件を臨界指数に課することができる。

一定の物理的な仮定のもとでこの拘束条件を(数値的に)解くことにより、特定の臨界現象における臨界指数を決定することができる。

本研究では、この方法を QCD のカイラル相転移をはじめ多くの非自明な系に適用することによって従来の方法では得ることができなかった臨界指数に対する不等式や予言を行うことができた。さらに、共形場理論の変形やその量子異常の考察をすすめることによって、共形場理論のより深い理解を得るとともに、共形場理論の方法の基礎を確立することを試みた。

4. 研究成果

本研究の眼目は共形対称性を元にしてQCDのカイラル相転移などの物理的に重要な相転移の性質を求めることである。4年間の研究期間において、QCDのカイラル相転移の解明を目指すために共形ブートストラップの方法を実装すると同時に、共形場理論の理論的な側面や共形場理論の基礎となる共形対称性がいかに実現されるか、またその障害となるアノマリーの構造を調べ、共形場理論の特別な変形や共形ブートストラップの方法の応用を模索した。

- (1) 共形対称性を持った場の理論の性質を解明した。例えば、射影空間上での共形場理論の性質や、あるいはポワソナレ対称性がないような場の量子論においての共形対称性の定義やその性質など、新しい場の理論の知見を得ることに成功した。共形場理論ではこれまで重点的に研究されてきた非局所な相関関数の他にアノマリーに深く関係する局所的な相関関数がある。その性質を特にCPが破れている場合について研究した。
- (2) 共形場理論の変形を理解する。特に、特別なTJ変形という操作を施した共形場理論をホログラフィーとして高次元の重力理論として実現する方法を提案した。TJ変形された共形場理論と very special relativity との関係性を考察した。また、KPZ方程式という確率過程において離散的なスケール不変性、共形対称性が現れるのか? について研究を行った。
- (3) QCD のカイラル相転移が持つ対称性の性質を理論的に理解する。格子シミュレーションの専門家と共同で、QCD のカイラル対称性が過去に考えられていた SU(2)の対称性の回復に伴って、アノマリーで破れていた U(1)対称性も回復するのではないか? という知見を得て、それが共形場理論に対してどのように影響を与えるのか調べた。また、QCD の拡張としてフレーバーの数を増やしていった時にどのような性質の共形場理論が現れるのか、あるいは、高次元で同じようなことが起こるのかと言う観点からも数値的な理解を進めた。
- (4) 高次元の共形場理論は共形ブートストラップという強力な手法を用いてその性質を数値的に理解できる。この手法をつかって共形場理論の一般的な性質を調べた。特に、異常次元と呼ばれる量をどれくらい大きく取ることができるか? というのは共形場理論における重要な問題であり、それを系統的に調べることに成功し、自由フェルミオンからなる複合演算子の性質と比較を行った。また、この制限はホログラフィー、AdS/CFT対応を用いて量子的なブラックホールの性質に対する制限と解釈することができ、その性質を解明した。
- (5) 高次元の共形場理論の世界で最初の教科書を上梓した[1]。

<引用文献>

[1] 「高次元共形場理論への招待 3次元臨界 Ising 模型を解く」中山 優、サイエンス社 2019/11

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakayama Yu	4. 巻 13
2. 論文標題 On the Trace Anomaly of the Chaudhuri-Choi-Rabinovici Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 276 ~ 276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym13020276	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 Nakayama Yu, Nishida Yusuke	4. 巻 103
2. 論文標題 Efimov effect at the Kardar-Parisi-Zhang roughening transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 12117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.103.012117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakayama Yu	4. 巻 102
2. 論文標題 Conformal invariance from scale invariance in nonlinear sigma models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 65018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.065018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakayama Yu	4. 巻 808
2. 論文標題 Bootstrap bound on extremal Reissner-Nordström black hole in AdS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135677 ~ 135677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakayama Yu	4. 巻 100
2. 論文標題 Holographic dual of conformal field theories with very special TJ deformations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 8011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.086011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Edery Ariel, Nakayama Yu	4. 巻 2019
2. 論文標題 Critical gravity from four dimensional scale invariant gravity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2019)169	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yu Nakayama	4. 巻 35
2. 論文標題 Exclusion inside or at the border of conformal bootstrap continent	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IJMPA	6. 最初と最後の頁 2050036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X20500360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakayama Yu	4. 巻 98
2. 論文標題 Local field theory construction of very special conformal symmetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 25007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.025007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakayama Yu	4. 巻 98
2. 論文標題 Realization of impossible anomalies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 85002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.085002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Edery Ariel, Nakayama Yu	4. 巻 98
2. 論文標題 Gravitating magnetic monopole via the spontaneous symmetry breaking of pure R2 gravity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.064011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakayama Yu	4. 巻 786
2. 論文標題 Gravity dual for very special conformal field theories in type IIB supergravity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 245 ~ 248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.09.051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Nakayama	4. 巻 33
2. 論文標題 Bootstrap experiments on higher dimensional CFTs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X18500367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Nakayama	4. 巻 97
2. 論文標題 Very special conformal field theories and their holographic duals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.065003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Nakayama	4. 巻 97
2. 論文標題 Canceling the Weyl anomaly from a position-dependent coupling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.045008	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Nakayama, Chika Hasegawa	4. 巻 33
2. 論文標題 Three ways to solve critical ϕ^4 theory on ϵ dimensional real projective space: perturbation, bootstrap, and Schwinger-Dyson equation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X18500495	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中山 優	4. 発行年 2019年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 167
3. 書名 高次元共形場理論への招待	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------