

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03679

研究課題名(和文) 時間発展の切り口で深化する共形場理論の包括的理解

研究課題名(英文) Comprehensive understanding of conformal field theories from various time developments

研究代表者

多田 司 (TADA, Tsukasa)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・副主任研究員

研究者番号：10322603

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)：量子物理系の時間発展は、系のエネルギーと直接結びつく最も基本的な特質であるにもかかわらず、多くの場合時間発展は予め定まっていることが多く、しばしば見過ごされることのある論点であった。本課題では、弦理論や物質の臨界現象で大きな役割を果たす2次元の共形場理論と呼ばれる量子系について、通常考えられている時間発展以外の時間発展をも考慮した上でこれを分類し、共形場理論の様々な側面について相互の関連など包括的な理解をさらに深めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子場の理論は、現代の理論物理学の根幹をなしているが、その中で高い対称性を持つ共形場理論は、最も基本的な量子場の理論と言え、特に重力を含む統一理論の候補である弦理論や物性系における臨界現象の研究において大きな役割を果たしている。そのような共形場理論の量子化について新規かつ深い視点を提供した本課題は、今後弦理論や臨界現象を含む物性系の理解を大きく進めることに寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：Although the time evolution of quantum systems is the most fundamental property of quantum systems, which is directly related to the energy of the system, it is often overlooked because the time evolution is predetermined in many cases. In this project, we classified two-dimensional quantum systems called conformal field theories, which play a major role in string theory and critical phenomena of matter, by taking into account time evolutions other than those usually considered, and further deepened our comprehensive understanding of various aspects of conformal field theories, including their interrelationships. We were able to deepen our comprehensive understanding of various aspects of conformal field theory, including their interrelationships.

研究分野：素粒子理論

キーワード：共形場理論 Sine-square deformation

1. 研究開始当初の背景

共形場理論は、時空の対称性が高く、量子場の理論の中でもその根幹をなすものである。とりわけ2次元の共形場理論は自然界のすべての相互作用を統一的に理解する理論の候補である弦理論の研究、また実験的にもよく調べられることがおおい、低次元の量子多体系の臨界現象においてもその理解において基本的な役割を果たすものであり、これまで詳しく研究されてきているとともにまた2次元共形場理論の様々な側面は現在も盛んに研究されている。このようにすでに基礎が確立した上で研究が展開されていると考えられていた共形場理論であるが、物性系で発見された Sine-square deformation とよばれる現象を共形場理論に適用することにより、これまでの共形場理論の議論の枠に収まらない性質が見えてきた。研究代表者らによる研究によって、この Sine-square deformation は、通常の radial 量子化による量子化を考えるのではなく、特殊かつ、対称性の議論からは自然に出てくる時間発展によって量子化したものと考えられることがわかってきた。このとき系の空間的な大きさが無限大になり、連続の変数をとる Virasoro 代数が現れるなどの現象がおこる。また別の時間発展の変更を Wen, Ryu, Ludwig らは考え、これとエンタングルメントエントロピーとの関係を議論した。従って、2次元の共形場理論において、通常の radial 量子化以外の時間発展を考えることにより、通常有界である系の空間的な大きさを無限大にしたり、エンタングルメントエントロピーの計算を行うことができる可能性が理解されつつあった。

2. 研究の目的

このように少なくとも2次元の共形場理論の研究においては、時間発展の切り口を変えることに着目することで、これまで考えられてこなかった現象が見つかったり、また系の性質として重要なエンタングルメントエントロピーなどの物理量との関係が見通せたりすることから、2次元共形場理論における時間発展の視点から共形場理論の性質の包括的な理解をさらに推し進めることを目的とした。

3. 研究の方法

時間発展は量子系においてはハミルトニアンを同定することに対応するが、一般的な時間発展を行って、共形場理論の持つ対称性が見えにくくなり、また量子化も困難となる。そこでこれまで詳しく研究されてきた通常の radial 量子化の場合を含み、かつ先述の Sine-square deformation で現れてきた時間発展や、Wen, Ryu, Ludwig の指摘したエンタングルメントエントロピーと関連する時間発展をも含んだ時間発展を、共形対称性の部分対称性として整理・位置づけた。この部分対称性 ($SL(2, C)$ 対称性) はリー代数の構造を持つが、代数構造と共形場理論を考える時空の構造を照らし合わせることにより、時間発展の性質を議論・整理した。すなわち時間発展の切り口の変え方についての代数的、系統的な理解の下で、その性質を共形対称性に基づいて議論した。またさらに包括的な理解を目指して共形場理論を考える時空も最もよく考えられている Riemann 球面だけでなく、他の種数を持つ2次元面、あるいは Euclid 計量だけではなく、Lorentz 計量をもつ時空についても調べることにした。

4. 研究成果

Wen, Ryu, Ludwig らによるエンタングルメントハミルトニアンとの関係の洞察を受け、対応するハミルトニアンを包含する形の Virasoro 代数を具体的に構成することができた。これは通常の Virasoro 代数と同様離散的な Virasoro 代数であったが、その際の時間発展の幾何学的考察から、その Virasoro 代数が実は球面上のものとは異なり、弦理論で言う one-loop に対応するトラス上の Virasoro 代数となることを示すことができた。これはハミルトニアンに対応する演算子の定数だけのシフトとして現れるので、通常はほぼ同型の Virasoro 代数として扱われることが多いが、時間発展の切り口で整理することによりその意味付けがより深く理解された。またそのシフトは空間の中に穴をあけ、cut-off を導入する必要性に付随するものであり、そのトポロジーの変化が場の量子論の基礎である作用素代数的に理解しうる可能性をしさするものである。またこの解析は Riemann 球面以外における時間発展について調べることを企図したものではなかったが、はからずも Riemann 面として Riemann 球面以外では最も簡単なトラスの場合の解析も同時に達成されたことになった。一方 Lorentz 計量の時空については、これまでの Euclid 計量をもつ Riemann 面上の量子化とこ

となり、むしろ相対論的場の量子論の方法論に基づく量子化手続きをふむことにより、連続の Virasoro 代数を含む Virasoro 代数をそれぞれの時間発展の場合について構成することに成功した。これによりその物理的意味について議論することができ、Euclid 計量の場合とのそれぞれの対応について統一的に理解することができた。特に Luscher と Mack によるローレンツ計量の空間における共形場理論の 普遍被覆構造について包括的に議論することができた。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Liu Xun, Tada Tsukasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Analysis for Lorentzian conformal field theories through sine-square deformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 061B01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa077	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 Tada Tsukasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Time development of conformal field theories associated with L_{-1} and L_{-1} operators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	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） 10.1088/1751-8121/ab8c63	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0件

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------