

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2010

課題番号：19540272

研究課題名（和文） 弦の場の理論の量子論的解析

研究課題名（英文） Quantum Analysis of String Field Theory

研究代表者

加藤 光裕 (KATO MITSUHIRO)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：80185876

研究成果の概要（和文）：

あらゆる素粒子と時空を統一的に説明する「弦理論」の有力な定式化のひとつである「弦の場の理論」について、ミクロな世界を支配する法則である「量子力学」にもとづく取り扱い方法を開発した。これによって、様々な量子力学的反応過程の性質を調べたり、近似に頼らない計算法を編み出すための基礎を与えることができた。従来の計算法の問題点を回避する方法も与えた。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a quantum mechanical formulation of the string field theory, which is a natural candidate framework of the string unifying every elementary particles and space-time. This enables us to study properties of various quantum processes and also to give a basis toward the development of non-perturbative methods. We also have given a way to avoid known problem in the conventional method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：素粒子論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：弦理論、超弦理論、弦の場の理論、ゲージ固定、タキオン凝縮、物理的散乱振幅

1. 研究開始当初の背景

超弦理論は、重力の量子論あるいは重力を含む素粒子の統一理論として、殆ど唯一の有力で無矛盾な基本的理論であるが、その非摂動的な定式化は未だに解決されていない難問である。その中で、通常の場合の理論の自然な拡張としての弦の場の理論は、ひとつの候補あるいは少なくともひとつのステップであると考えて良い。その技術的煩雑さのため、

本来の目的である非摂動的な解析への応用が長い間進んでいなかったが、この数年タキオン凝縮の問題へ応用されて成果を挙げ、有力な手法のひとつとして再び注目を浴びている。特に Schnabl (arXiv:hep-th/0511286) によるタキオン真空の解析解の発見は、重要なコーナーストーンとなる可能性を秘めており、今後この分野で大きな進展が期待されている。

弦の場の理論のひとつの強みは、他の提唱されている定式化に比べ、その基礎付けが明確であり、摂動論の結果を再現することも含めて、正当化されていない仮定が非常に少ない点にある。しかしながら、弦の場の理論が本来弦の第二量子化を目指したものであるにも拘わらず、現段階での非摂動的解析は古典解あるいは半古典的解析に限られており、量子論としての物理はあまり深められてはいないと言えよう。

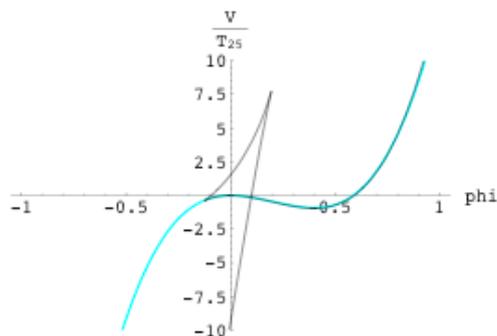
このような現状の中で、本研究が目指すのは、弦の場の理論の量子論的な側面に焦点を当てて解析を行おうという試みである。ひとくちに量子論といっても様々な側面があり、それらを網羅的に扱うことはもちろん不可能である。ここでは、次の二つの問題に重点を置いて研究を進めることにした。

- ・タキオン凝縮の量子論的解析
(一般化された共変ゲージ、レベル切断近似、解析解とその揺らぎモードの探求)
- ・非局所場理論としての弦の場の理論
(時間変数の問題、相互作用の非局所因子、非可換場の理論との類似性)

2. 研究の目的

(1) タキオン凝縮の量子論的解析

タキオン凝縮について既存の解析は、従来からのレベル切断近似を用いた数値的解析と最近の解析解にもとづく解析があるが、後者はごく最近端緒についたばかりである。前者についても古典解あるいは古典的真空の解析がなされているにすぎない。その理由は、レベル切断近似を行う際に、ゲージ固定をする必要があるが、弦の場の理論では共変性を保つ実用的なゲージとしては従来 Siegel ゲージしか知られておらず、これを用いた計算では、有効タキオンポテンシャルに分岐点が見れ、摂動的真空から(準)安定な真空までの古典軌道がかろうじて入る狭い範囲しか、信頼できる結果を得ることができなかったためである。これは、古典軌道以外の様々な経路を扱う必要のある量子論を考えるため



には致命的な欠陥であった。

これに対し最近、申請者は大阪府大の浅野雅子氏との共同研究により、より一般の共変的ゲージを見つけ、それをタキオン凝縮の問題に応用した結果、タキオンポテンシャルの有効な範囲を劇的に広げること成功した。これによって古典軌道以外の経路についても調べることが可能になり、量子論的な性質、例えば量子的揺らぎモードやトンネリング、真空の波動関数などの解析に道を開くことができる。

また Schnabl の解析解においても、Siegel ゲージを場の3点積を単純化する共形フレームに移した類似のゲージを用いているが、これも我々の新しいゲージで解析することで、より拡張性の高い議論が展開できる可能性がある。特に新しいゲージの中でも Landau 的ゲージを用いると弦の場のモードのかなりの部分が運動項に微分を持たない形になるため、より解析がしやすくなり、空間依存性のある次元の低いD ブレイン解を始め、時間依存性のあるローリング解なども解析的に扱える可能性が出てきた。

(2) 非局所場理論としての弦の場の理論

弦の場の理論は、本質的に非局所場の理論である。そのため、単純な正準量子化が適用できない。第1には、弦の括がりのため、共变的に扱う場合、時間方向にも括がりが有り、正準形式の基礎となる時間変数のとり方が問題になる。第2に、こちらにも弦の括がりが起源であるが、相互作用項に非局所因子が現れていて、こちらにも取り扱いを慎重に行う必要がある。そのため、従来摂動論においては、形式的な経路積分公式からファイマン則を導きそれを用いて第1量子化の振幅と比較している。また、タキオン凝縮の真空解の場合には、静的なセクターを調べるので非局所因子が効かずにすんでいた。

これらの問題に対して、何らかの知見あるいは解決策を見出したいというのが、最終的な目標である。しかしながら、これは一筋縄では行かない問題であり、ここではもう少し限定された問題に挑戦してみたい。時間変数の問題に対しては、以前の研究(M.Asano, M.Kato and M.Natsuume, JHEP)において、この問題を解決する可能性のある chronological gauge の物理的状態表現を詳しく調べ、このゲージでの量子化に向けた準備研究をおこなった。しかし、この結果を弦の場の理論に使うためには、BRST 形式に拡張しておく必要がある。一方、相互作用項の非局所因子の問題に対しては、我々の Landau 的ゲージを

用いると、多くの場のモードが運動項に微分を含まないため、この非局所因子からくる微分を完全に分離して解析することが可能になるであろう。これら2点について、解析を進めたい。特に後者は、タキオン凝縮の問題中の時空依存性のある解の解析と原理的な部分で関係しており、基礎的問題と応用的問題とを相互に絡めて議論を進めていくことで、単独では見えてこない知見があるのではないかと期待をしている。また、非局所性に絡んだ弦の場の理論の一連の性質は、非可換場の理論の持つ性質と類似しており、こちらとの対比も重要な手掛かりになる。

3. 研究の方法

- (1) レベル切断近似の範囲内でさらに高次の計算を進め、Siegel ゲージにおけるブランチの構造を調べ、相互作用を含めた場合のゲージ固定不定性（つまり通常のゲージ理論における Gribov 問題）の構造を明らかにする。
- (2) ランダウ型ゲージにおける安定性を利用し、ポテンシャルの高精度化と、真空のエネルギーなどの物理量の高精度化をはかる。
- (3) ゲージ固定条件の一般化して Schnabl フレームへ拡張する。
- (4) 摂動的振幅を求め、量子補正の一般的計算法を一般のゲージを開発する。
- (5) 非摂動的な解析を、新しいゲージの特徴を生かして試みる。

4. 研究成果

論文(4)では、通常のゲージ理論における共変ゲージの1パラメータ族に対応した、弦の場の理論のゲージ固定条件の1パラメータ族を開発した(a-gauge)。これは、従来の Siegel ゲージ (Feynman ゲージ) を特別な場合を含み、またゲージ理論における Landau ゲージに対応するゲージも含む。ゲージ理論との対応を見る上で、極めて有用なゲージである。このゲージは、その後 Kishimoto-Takahashi らによって、ゲージ不変オーバーラップなどの計算に応用され、有用であることが示された。

論文(3)では、a-gauge をタキオン凝縮の問題に適用してその有用性を直接確かめた。特に、このゲージはレベル切断と相性がよく、また、従来の Siegel ゲージで知られていた問題点は、ゲージ固定の Gribov 的不定性に起因すること、また Landau 型ゲージ付近を選ぶことで回避できること等を示すことができた。

その後、論文(1)において、a-gauge をさらに拡張した一般線形ゲージを開発した。これは、我々の a-gauge のみならず、Zwiebach らによ

って提唱された Linear-b gauge をも包含する極めて一般的なゲージである。このゲージを用いて、物理的振幅のゲージ不変性を弦の場の理論の任意のファイマングラフに対して証明した。

これらの成果をふまえて、正準量子化などにより根源的な問題や、Schnabl フレームへの適用などの解析解を扱うための拡張などにも挑戦しているが、これらの課題は現在も研究中である。特に、ランダウ型ゲージでは作用の構造がシンプルになるため、例えば光円錐ゲージや chronological ゲージなどとの関係など、従来はとっかかりすら不明な問題にも手掛かりが得られつつある。

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4件)

- (1) Masako Asano and Mitsuhiro Kato, "General Linear Gauges and Amplitudes in Open String Field Theory," Nucl. Phys. B807 (2009) 348-372. (査読有)
- (2) Mitsuhiro Kato, Makoto Sakamoto and Hiroto So, "Taming the Leibniz Rule on the Lattice," JHEP 0805 (2008) 057. (査読有)
- (3) Masako Asano and Mitsuhiro Kato, "Level Truncated Tachyon Potential in Various Gauges," JHEP 0701 (2007) 028. (査読有)
- (4) Masako Asano and Mitsuhiro Kato, "New covariant gauges in string field theory," Prog. Theor. Phys. 117 (2007) 569-587. (査読有)

[学会発表] (計5件)

- (1) 加藤光裕、坂本真人、宗博人「格子超対称性、ライプニッツ則および結合則」日本物理学会秋季大会、2008年9月20日、山形大学
- (2) 浅野雅子、加藤光裕「弦の場の理論のループ振幅のゲージ依存性」日本物理学会秋季大会、2008年9月23日、山形大学
- (3) 加藤光裕 "Covariant gauges in string field theory" 理研シンポジウム「弦の場の理論 07」(招待講演), 2007年10月7日、理化学研究所
- (4) 浅野雅子、加藤光裕「弦の場の理論における共変ゲージと振幅」日本物理学会第62回年次大会、2007年9月21日、北海道大学
- (5) 加藤光裕、坂本真人、宗博人「格子超対称性の行列表示」日本物理学会第62回年次大会、2007年9月21日、北海道大学

[図書] (計1件)

- (1) 加藤光裕、編集委員会代表広中平祐、丸

善「第2版現代数理科学事典」2009年 1454
頁 (p.15-21)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 光裕 (KATO MITSUHIRO)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：80185876

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：