



Title	The study on quantum field theories from numerical approaches(Abstract_要旨)
Author(s)	Kawai, Daisuke
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2018-03-26
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k20901
Right	学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要旨は2018-04-01に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	none

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	川井大輔
論文題目	The study on quantum field theories from numerical approaches		

(論文内容の要旨)

近年の素粒子論の研究において重要な問題の一つに、場の量子論の非摂動論的な解析手法の開発がある。この問題は、超弦理論や量子色力学(QCD)等の研究において、強結合領域の物理を考える上で重要である。本論文は、数値計算技術を用いてそれらの場の理論の非摂動論的な解析を行った、申請者の研究成果に基づいている。第1章では、格子QCDに関する議論がなされている。具体的には、HAL QCD Collaborationで研究されているポテンシャル法(HAL QCD法)に基づいて、 $\pi\pi$ 衝突の散乱振幅のエネルギー依存性を計算し、 ρ 中間子の存在を示す結果を得ている。第2章では、弦理論・M理論について考察し、弦やsupermembraneの古典解にカオス的な振る舞いを示すものが存在することを示し、AdS/CFT対応に基づくゲージ理論での解釈についても議論した。

近年数値計算に用いられる大型計算機の性能は飛躍的に向上している。この10年で計算速度は数十倍に向上し、この性能を活かし現在のlattice QCD計算では現実に近いパラメータで計算を行うことが可能になっている。本論文では、そのような計算資源を用いて π の4点相関からアイソスピン1の $\pi\pi$ 衝突の散乱位相差を取り出す手法について議論している。その中心的な問題は、どのようにして4点相関を計算するコストを下げるかということである。それは、通常のHAL QCD法に基づく計算により散乱位相差を取り出すことは原理的には可能であるが、アイソスピン1以下の π 4点関数に対して素朴にこの方法を適用すると、非常にコストが高くなってしまうからである。本論文では、このコストを下げるためにLaplacian Heaviside(LapH) smearing法をHAL QCD法と組み合わせる手法を提案している。その結果、通常のHAL QCD法では1年以上かかる計算を数日で終わらせることに成功した。しかしながら、その一方で、HAL QCD法で計算されるポテンシャルが、考える演算子に大きく依存性してしまうという問題が生じた。申請者は、アイソスピン2の $\pi\pi$ 散乱の散乱位相差についての解析から、この依存性は、散乱位相差に忠実な非局所ポテンシャルを微分展開を用いて局所的なポテンシャルで近似したために生じたものであり、next-to-leading orderまで考えて非局所ポテンシャルを展開することにより、通常のHAL QCD法で計算した結果と 1σ の誤差範囲で一致させることができることを示した。また、低エネルギーでは、散乱位相差がLapH smearingによりどの程度演算子が広がりを持っているのかに大きく依存するのに対して、高エネルギーでは、微分展開の次数に対する依存性が大きくなる系統的な振る舞いを明らかにした。

この統計的振る舞いに対する理解のもと、本論文ではアイソスピン1の $\pi\pi$ 散乱の位相差を計算し、HAL QCD法に基づいた計算からも ρ メソンの存在を示す結果が得られることを示した。また、このチャンネルに関して得られたポテンシャルを用いて複素平面でS-matrixのpoleをBreit-Wignerのようなフィットに依らずに直接探索し、second Riemann sheetにpoleが存在することを示した。Poleの位置はLüscherのfinite volume methodに基づいて得られた値とは若干の隔たりが存在するが、本論文はHAL QCD法が共鳴状態に対しても使えることを示した初の研究であり、HAL QCD法に基づいた一連の解析手法が、共鳴状態の質量や崩壊幅等の様々な物理量を計算する上で有用であることを示した点で非常に有用である。

第2章では申請者が行った古典弦に生じるカオス的な振る舞いについて議論されて

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

いる。まず、本論文では $\text{AdS}_5 \times \text{T}^{1,1}$ 時空のnear Penrose limitでカオス的な振る舞いが存在することをPoincaré sectionを調べることにより示した。 $\text{AdS}_5 \times \text{T}^{1,1}$ 上の古典弦にはカオス的な解が存在することが知られている一方、Penrose limitでは $\text{AdS}_5 \times \text{T}^{1,1}$ でも $\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$ 同様pp-wave backgroundに還元され、その時空上の古典弦は解析的であることが知られている。 $\text{AdS}_5 \times \text{T}^{1,1}$ 時空において、この中間にあたる極限が本論文で議論されている背景時空であり、本論文の研究によりnear Penrose limitまでカオス的な振る舞いを示す古典弦が存在することが示された。この結果は、AdS/CFT対応に基づくと $N=1$ super conformal field theoryにalmost BPSでありカオス的な振る舞いを示す演算子が存在することを示している。AdS/CFT対応では通常重力理論の弱結合領域とゲージ理論の強結合領域の間の対応を考えるために、古典解と演算子の1対1対応を決定するのは一般に困難であるが、BMN limitではこの対応があらわにつけられる古典解と演算子が存在する。本論文で議論しているカオス的な古典解はBMN limitに近いパラメータ領域に存在し、今後カオス的な古典解と演算子の対応を考える上で有為な結果である。

加えて、本論文では同様のカオス的な古典解の探索法を用いてBMN行列模型の古典解に存在するカオス的な振る舞いを議論している。Poincaré sectionとLyapunov spectrumの計算からいくつかの古典解がカオス的な振る舞いを示す一方、解析計算から可積分な解も存在することを示した。BMN行列模型はpp-wave backgroundでのsupermembraneを記述するため、本論文の結果はこれらの古典解にカオス的な振る舞いを示すものである。このように、本論文では超弦理論で考えられる対象には広くカオス的に振る舞うものが存在することを、数値的手法を用いることで示している。

以上のように、本論文は、場の理論の解析的手法では計算が困難である部分、特にゲージ理論の強結合領域に対して数値計算手法により取り組み、素粒子論分野の研究の進展に向け有為な結果を得ることに成功している。今回得られた結果は、特に今後のハドロンスペクトラムの解析、AdS/CFT対応の非解析的領域における研究に対してより深い理解を与えるものであると考えられる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年1月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2018年 4月 1日以降