

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13483

研究課題名(和文)カオスと超弦理論による場の量子論の選別

研究課題名(英文) Selection of quantum field theories by chaos and superstring theory

研究代表者

橋本 幸士 (Hashimoto, Koji)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：80345074

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：QCDの低エネルギー有効作用である線形シグマ模型においてカオス解析を行い、QCD相転移のエネルギースケールでカオスが発生していることを発見した。これは、QCDという量子性が強い場の量子論において、カイラル凝縮というゲージ不変演算子の真空期待値の時間依存性に、カオスが現れることを解析できることを示している。また、ホログラフィー原理を用いることにより、超対称性を持つQCDにおいて同様の解析を行うことができ、その結果、カオスを示すリアプノフ指数が計算された。このリアプノフ指数は、ゲージ群SU(N)のNが大きくなればなるほど小さくなるというスケーリング則を満たしており、カオスの減少が発見された。

研究成果の概要(英文)：We have performed a classical chaos analysis in the linear sigma model which is a low energy effective theory of QCD. We have found that the chaos appears when the spatially homogeneous configuration of the linear sigma model field has an energy density which is roughly equal to the energy scale of QCD phase transition at finite temperature. This result shows, first that, the chaos analysis is in general possible for strong coupling quantum theories, and second, that the chaos analysis of gauge invariant operator is possible. Furthermore, we have used the AdS/CFT correspondence to analyze the chaos for strongly coupled supersymmetric Yang-Mills and QCD. The Lyapunov exponent, which shows the strength of the chaos, is explicitly calculated, and is found to show a scaling law according to the rank of the gauge group and the coupling constant of the theory. In fact, the Lyapunov exponent decreases for larger N.

研究分野：超弦理論

キーワード：カオス 超弦理論 場の量子論

1. 研究開始当初の背景

超弦理論の「ゲージ重力(AdS/CFT)対応」原理は、強結合のゲージ理論を古典的に解析する手法として確立しつつあった。一方で、素粒子標準模型を導出する試みは、良い指標の発見が長く待たれている。そこで、問題意識として、「素粒子の標準模型を記述する場の量子論はどのように導出できるか?」「更に一般に、様々な物理系を記述する場の量子論の間の選別や優位性の指標を定義できるか?」という一般的な問いを立てた。この問いは、どのような場の理論がどの程度の複雑さを持つかという一般指標を与えるものであり、研究開始当初は、そのような研究は存在していなかった。

2. 研究の目的

本課題における、上記の問いへのアプローチ、そして解決手法として、強結合の場の量子論に超弦理論のホログラフィー原理を適用し、古典カオスの指標を抽出することで、場の理論それぞれにエントロピーを定義し選別する、ということを目指した。

この意義は、まず、様々な物理の理論同士の比較を可能にする新パラダイムが提起されること、そして超弦理論の AdS/CFT 対応を用い、強結合の場の量子論の古典重力双対で、モジュライ空間(理論の真空)のカオス性を評価することができること、である。特にカオス度を測るコルモゴロフ=シナイ エントロピーを、場の量子論のラグランジアンごとの指標とし、場の量子論を選別することを目的とする。

3. 研究の方法

研究は二つの段階に分けて実施した。まず第一段階として、カオスモデルの解析と確立を行なった。超弦理論の AdS/CFT 対応で最もよく使われている場の量子論を用い、カオスが発生する理論とその原理を解析した。次に第二段階として、モデルの普遍化を行なった。超弦理論で取り扱える一般的な場の量子論について、カオスの度合い、コルモゴロフ=シナイ エントロピーの指標化を行った。

本研究は、超弦理論で発展した AdS/CFT 対応原理を用いることで、強結合の場の理論を古典重力にマップし、そこで、カオスを測定する。どのような古典重力系でカオスが発生しうるか、また、発生したカオスの状況や特徴付けなどを研究するため、超弦理論/力学系/可積分系の3分野の協力で進める。

(1)カオスモデル：閉じ込め時空におけるプローブD プレーンの運動

強結合のゲージ理論で、ゲージ対称性の大きくなる極限(ラージN 極限)をとると、一般

に AdS/CFT 対応によって重力双対があることが期待できる。双対重力は、場の量子論側が閉じ込めを起こす場合には、有限の箱の形をすることが知られている。また、場の量子論の一部の自由度を抜き出した場合(例えばクォークや、ゲージ群を分割した場合)、その自由度は箱の中を運動するプローブの D プレーンであることが知られている。すなわち、閉じ込め相のクォーク(その閉じ込め状態であるメソン)や余剰 U(1)ゲージ場に付随するスカラー場などの真空期待値は、ある特殊な箱の中を運動する粒子の場所、と読み替えることができる。AdS/CFT を用いると、場の量子論のモジュライ(スカラー場の真空期待値)が、カオスの舞台となる。

(2)プローブ D プレーンの運動とリャプノフ指数

プローブ D プレーンが、双対時空内を運動する際の運動方程式は、超弦理論で書き下すことができる。最も簡単な閉じ込め時空として AdS ソリトン解があり、そこでのプローブ D3 プレーンの有効作用を、第一モデルとして解析する。適当な初期状態から時間発展させると、ラージ N の極限ではプローブ D プレーンは摩擦も無く箱の中を運動する。ポアンカレ=ベンディクソンの定理から、運動を 2 次元に制限した時にはカオスは発生しないが、一般の重力双対は 6 次元空間での粒子の運動となるので、一般にカオスが発生しうる。この運動のリャプノフ指数を数値解析で読み取り、古典カオスがこの量子論(強結合のゲージ理論)に発生しているかを評価する。我々の例は、量子論における古典カオスの初めての例となる。古典ゲージ理論のカオス(B. Muller, A. Trayanov, Phys. Rev. Lett. 68(1992)3387)は、重イオン衝突の熱化と関連した発展(T. Kunihiro et al., Phys. Rev. D82(2010)114015)が知られているが手法も意義も異なる。

(3) 様々な場の量子論の重力双対のカオス評価

第一段階で詳査したモデルは特殊な場の量子論であり、その様々な一般化や変形について、重力双対が知られている。また、次元の変更や、グローバル対称性の変更などは超弦理論で容易に出来る。これらの場の量子論の変更や変形を行うことと、理論のカオス性を比較し、場の量子論の強結合におけるカオス性のユニバーサルティを発見する。

(4)カオス指標としてのコルモゴロフ=シナイ エントロピーの計算と、場の量子論間の比較

リャプノフ指数から、コルモゴロフ=シナイ エントロピーが計算できる。カオス的力学系の測度不変量は、基準指標の最も自然なものである。場の量子論が一つ与えられると(ラグランジアンが一つ与えられると)それに対

応してエントロピーが与えられるため、理論の指標となる。

4. 研究成果

主要な研究成果の一つは、主な発表論文における雑誌論文であり、これを中心に述べる。

素粒子の標準模型は、QCD に代表されるような非可換ゲージ理論であり、量子性が大きいいため、通常の古典カオスの手法ではカオスの定義であるリアプノフ指数すら計算が困難である。一方で、強結合極限をとれば、それが違う意味で古典化するため、量子性の極限が古典カオスを定義できる土壌となる。この方法をカオスの定義に用いることで、場の量子論にカオスを導入することができる。

まずは標準模型に近い場の量子論での解析が必要であるため、その低エネルギー有効模型であるカイラル有効理論（シグマ模型）において、古典カオスの解析を行った。この低エネルギー極限は、おおよそ、強結合極限に対応し、また QCD のラージ N 極限は、メソンの間の相互作用を小さくするため、シグマ模型の古典極限に対応している。空間的に一様なシグマ模型の古典場のカオスを解析した所、興味深いことに、QCD の相転移点のエネルギー近傍で、一般的に古典カオスが発生することが判明した。

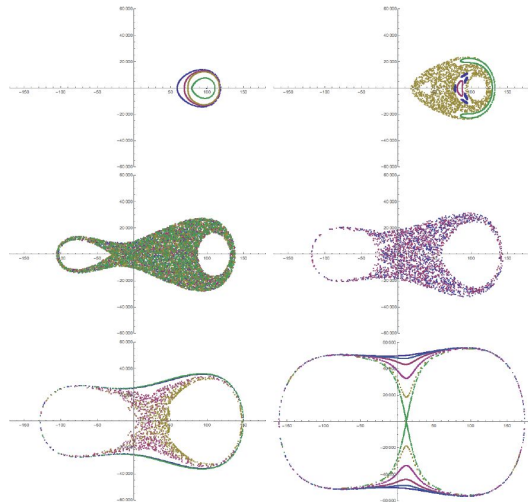


図1 シグマ模型のカオス。

図1では、左上から下に向かう順で、100, 130, 140, 150, 160, 200[MeV]の単位体積あたりのエネルギー密度 $E^{1/4}$ のそれぞれにおいて、カオスが発生しているかどうかを示すポアンカレセクションである。中領域のエネルギーにおいて、プロットが散乱しており、カオスが発生していることが見て取れる。

このように発現したカオスのエネルギー依存性を数値解析すると、確かに中エネルギー領域においてカオスが発生していることが見て取れ、この領域が通常の QCD の相転移の

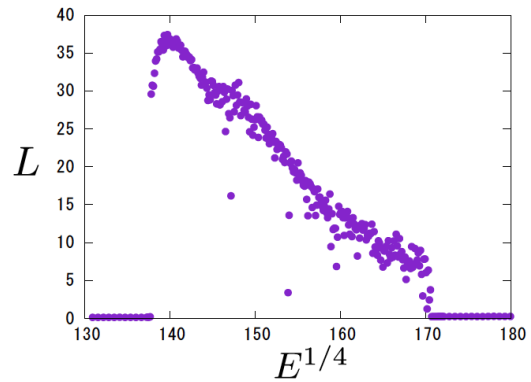


図2 シグマ模型のリアプノフ指数。

エネルギー領域と似た領域であることが発見された。(図2を参照。)

さらに、これらリアプノフ指数の、結合定数やN依存性を見るために、超対称性のあるQCD模型で、ホログラフィーを用いて同様の解析を行った。その結果、SU(N)ゲージ群のNを大きくすればするほど、リアプノフ指数が小さくなり、カオスが弱くなることを発見した。直感的にはNが大きくなるとカオスが小さくなるように期待できるが、非可換ゲージ理論ではそのようにならない場合があることを示した。すなわち、ゲージ群が大きければ大きいほど場の量子論が複雑であるとは言えないことを示した。

この研究には様々な観点が絡んでおり、例えば有限温度系との関連、初期条件との関連、が存在し、それぞれがどのようにカオスと関連しているのかを研究して初めて、場の量子論の全体としてのカオス性を比較することが可能となる。したがって、雑誌論文以外に、有限温度の場合のカオス(すなわち AdS 重力側ではその地平面近傍におけるカオス)の調査研究、そして、初期条件としてシステムにどのように外場をかけるかの研究、を実施した。それらの成果は、前者は雑誌論文、後者は として出版した。また、一般の量子力学系におけるカオスの調査研究の結果、強結合極限などの極限が取れない場合はカオス性を読み取ることが難しいことを発見した(雑誌論文)。

以上の成果は、日本物理学会において成果発表を行なっている。

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 8 件)(全て査読付き)
 “Time evolution of complexity in Abelian gauge theories”, Koji Hashimoto, Norihiro Iizuka, Sotaro Sugishita, Published in Phys.Rev. D96 (2017) no.12,

126001 DOI: 10.1103/PhysRevD.96.126001
"Out-of-time-order correlators in quantum mechanics", Koji Hashimoto, Keiju Murata, Ryosuke Yoshii, Published in JHEP 1710 (2017) 138 DOI: 10.1007/JHEP10(2017)138
"Holographic Floquet states I: a strongly coupled Weyl semimetal" Koji Hashimoto, Shunichiro Kinoshita, Keiju Murata, Takashi Oka, Published in JHEP 1705 (2017) 127 DOI: 10.1007/JHEP05(2017)127
"Universality in Chaos of Particle Motion near Black Hole Horizon" Koji Hashimoto, Norihiro Tanahashi, Published in Phys.Rev. D95 (2017) no.2, 024007 DOI: 10.1103/PhysRevD.95.024007
"Chaos in chiral condensates in gauge theories" Koji Hashimoto, Keiju Murata, Kentaroh Yoshida, Published in Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.23, 231602 DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.231602
"Speed limit in internal space of domain walls via all-order effective action of moduli motion", Minoru Eto, Koji Hashimoto, Published in Phys.Rev. D93 (2016) no.6, 065058 DOI: 10.1103/PhysRevD.93.065058
"Conic D-branes" Koji Hashimoto, Shunichiro Kinoshita, Keiju Murata, Published in PTEP 2015 (2015) DOI: 10.1093/ptep/ptv105
"Universal Turbulence on Branes in Holography" Koji Hashimoto, Mitsuhiro Nishida, Akihiko Sonoda, Published in JHEP 1508 (2015) 135 DOI: 10.1007/JHEP08(2015)135

〔学会発表〕(計 16 件)

日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 23 日、東京理科大学) "Complexity の時間発展について" 橋本幸土、飯塚則裕、杉下宗太郎
日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 23 日、東京理科大学) "ブラックホール時空で運動する元のカオスの普遍性" 棚橋典大、橋本幸土、村田佳樹
日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 23 日、東京理科大学) "QCD カオスのパラメータ依存性" 芥川哲也、太田敏博、橋本幸土、宮崎剛
日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 23 日、東京理科大学) "D プレーンの高次元運動による QCD カオス" 芥川哲也、太田敏博、橋本幸土、宮崎剛、村田佳樹
日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12 日、宇都宮大学) "カオス、クォーク、ブラックホール - AdS/CFT 対応

による新たな創発時空の特徴づけについて -" 橋本幸土

日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12 日、宇都宮大学) "Out-of-time order correlator でカオスは測れるか?" 橋本幸土、村田佳樹、吉井涼輔

日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12 日、宇都宮大学) "Time evolution of complexity" 杉下宗太郎、橋本幸土、飯塚則裕

日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 14 日、宇都宮大学) "ブラックホール時空で運動する元のカオスの普遍性" 棚橋典大、橋本幸土、村田佳樹

日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 14 日、宇都宮大学) "量子カオスにおける非時間順序相関" 橋本幸土、村田佳樹、吉井涼輔

日本物理学会第 72 回年次大会(2017 年 3 月 19 日、大阪大学) "ブラックホール地平面におけるカオスの普遍性について" 棚橋典大、橋本幸土

日本物理学会 2016 年秋季大会(2016 年 9 月 22 日、宮崎大学) "回転電場で作るホログラフィックワイル半金属" 橋本幸土、木下俊一郎、村田佳樹、岡隆史

日本物理学会 2016 年秋季大会(2016 年 9 月 22 日、宮崎大学) "Phase diagram of holographic QCD in rotating electric fields" 橋本幸土、木下俊一郎、村田佳樹、岡隆史

日本物理学会第 71 回年次大会(2016 年 3 月 20 日、東北学院大学) "AdS/CFT 対応におけるラッティンジャー定理" 橋本幸土

日本物理学会 2015 年秋季大会(2015 年 9 月 26 日、大阪市立大学) "ソリトンの内部もジュライの有効作用は南部後藤作用になるか?" 衛藤稔、橋本幸土

日本物理学会 2015 年秋季大会(2015 年 9 月 26 日、大阪市立大学) "Conic D-branes" 橋本幸土、木下俊一郎、村田佳樹

日本物理学会 2015 年秋季大会(2015 年 9 月 26 日、大阪市立大学) "ホログラフィック QCD における AC 電場への応答" 橋本幸土、木下俊一郎、村田佳樹

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://kabuto.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~kaji>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

橋本 幸士 (Hashimoto, Koji)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：80345074

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

吉田 健太郎 (Yoshida, Kentaroh)
京都大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：30544928

佐々 真一 (SASA, Shin-ichi)
京都大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：30235238

(4)研究協力者

なし