

博士論文公聴会の公示（物理学専攻）

学位申請者： 芥川哲也

論文題目：QCD chaos in hadronic phase via holography

（ホログラフィー原理を用いたハドロン相における QCD のカオスの研究）

日時： 2021 年 2 月 4 日(木) 13:30 - 15:00

場所： 新型コロナウイルス感染防止のため、オンラインにより行う。URL 等については、学内の方は下記を参照。

<https://www.phys.sci.osaka-u.ac.jp/naibu/kouchoukai.html>

学外の方は主査橋本(koji[at]phys.sci.osaka-u.ac.jp [at]=@)に問い合わせること。

主査： 橋本幸士

副査： 大野木哲也、兼村晋哉、飯塚則裕、保坂淳

論文要旨：

本論文は QCD に存在するカオス、特にハドロン相のカオスについてホログラフィー原理を応用して解析した研究である。素粒子の標準模型の中でも QCD は強結合で非線形性の強い理論である。一方、カオスの指標は系の非線形性を評価できるため QCD の特徴を抽出できると期待される。高温度における QCD は半古典的な解析からカオスになると期待されているが、ハドロン相ではどのような性質を持っているか非自明である。

一般に量子系のカオスの評価は難しい。なぜなら、不確定性原理のためカオスの定義である初期値鋭敏性の評価が困難だからである。本研究ではこの問題の解決策の一つであるホログラフィー原理を用いてカオスの解析を行った。ホログラフィー原理はある d 次元の場の量子論と $(d+1)$ 次元の古典重力理論が等価であるという主張である。この原理を用いると量子論を双対な古典論で解析できるため、古典カオスの指標を適用出来る。

本論文ではハドロン相に着目し、メソン凝縮とウィルソンループ(またはクォーク間力)の古典カオスを解析した。メソン凝縮はカイラル対称性の自発的破れのオーダーパラメーターであるため、カイラル対称性とカオスの関係があらわに評価できると期待できる。また QCD は低エネルギーにおいて非局所的な物理量が重要であり、ウィルソンループはホログラフィー原理の辞書がよく知られている物理量である。

メソン凝縮は、低エネルギーにおいて 1 フレーバーの QCD に対応する D4/D6 模型を用いて評価できる。しかし、ブレーンの運動を直接評価することは困難であるため、本研究では同じ対称性の構造を持つ古典系の線形シグマ模型が D4/D6 模型の低エネルギー有効理論と仮定した。そして、D4/D6 模型のパラメーターで表現した線形シグマ模型の場の時間発展を評価した。エネルギーとクォーク質量を軸としてカオスの有無を相図に描くと、クォーク質量が大きくなるほどカオスになるとわかった。

次にウィルソンループ(またはクォーク間力)を閉じ込め時空として知られる D4-soliton 時空上の弦の運動から評価した。この際、静的な弦にパルス波を摂動として加えた後の時間発展を解析した。摂動の大きさとクォーク間距離を軸としてカオスの有無を相図に描くと、

クォーク間距離が大きくなるほどカオス的になりにくいとわかった。この結論は QCD 弦の端点がカオスの起源と考えたモデルと無矛盾である。

また、どちらの物理量についてもパラメータのスケールリング則から強結合になるほどカオス的になりにくいとわかった。異なるセクターを評価しているにも関わらず共通の結果が得られたことから、ハドロン相において QCD は強結合になるほどカオス的になりにくいと期待される。

一般に強結合であることは非線形性の寄与が大きくなるため、よりカオス的になると期待される。実際に Yang-Mills 理論において古典カオスを行った研究ではパラメータのスケールリング則から強結合であるほどカオス的になる。本研究ではその逆の性質が得られたため、ホログラフィー原理を通して量子系の非自明な性質を抽出できたと期待できる。