



分野:自然科学系 キーワード:素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理、素粒子(理論)、相対論・重力(理論)

# 物質の根源クォークにひそむ複雑性を発見 ～宇宙を形作る素粒子の運動におけるカオスの指標の定式化～

## 【研究成果のポイント】

- ◇ 物質素粒子クォーク<sup>※1</sup>の複雑性を示す、カオスの指標の計算に世界で初めて成功
- ◇ 力を媒介する素粒子だけに適用できていた従来の理論を、物質素粒子に拡張
- ◇ 我々の世界を構成する素粒子の標準理論の複雑性を解明する一つのステップとなる成果

## ❖ 概要

橋本 幸士(大阪大学大学院理学研究科教授)は、村田 佳樹(慶應義塾大学日吉物理学教室助教)、吉田 健太郎(京都大学大学院理学研究科助教)との共同研究により、物質素粒子クォークの力学における複雑性の指標を計算することに、世界で初めて成功しました。

運動の複雑さは、カオス理論<sup>※2</sup>で指標化されます。この世界を形作る素粒子の運動に対して、カオス理論を適用した例は、力を媒介する素粒子(ボソン)に対してだけでした。一方、17種類発見されている素粒子のうち、物質を構成する元となっているクォークなどの「物質素粒子」(フェルミオン)に対しては、カオス理論の適用は困難でした。

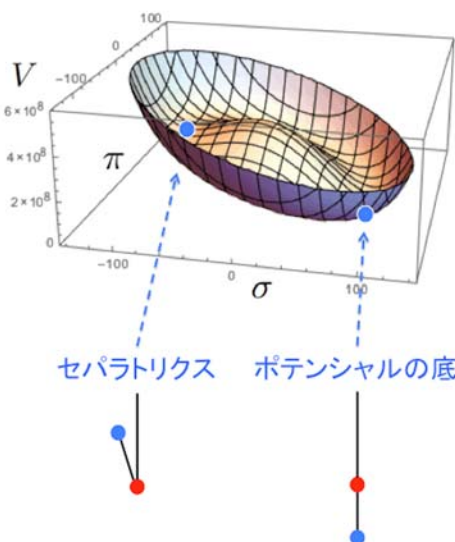
本研究では、素粒子理論で近年発展した「ホログラフィー原理<sup>※3</sup>」という新たな手法を用いることで、この困難を解決しました。この手法を用いると、クォークの運動を仮想的なボソンの運動に等価変形して書き換えることができます。この書き換えにより、カオスの指標であるリアプノフ指数<sup>※4</sup>を物質素粒子に対して計算することに成功し、クォークの運動にカオスが存在することを示しました(図1、図2参照)。

我々の世界の複雑性は、根源的にはどのように説明されるのか?世界を構成する素粒子を司る「素粒子の標準理論<sup>※5</sup>」は、その数式は既に知られていますが、そこからどのように複雑性が現れるのかは未知です。複雑性を計算できるカオス理論の適用範囲が、量子力学的に解析することの大変困難な物質素粒子クォークにまで広がることは、素粒子の標準理論の複雑性を解明するための一つのステップと言えます。本研究を契機として、素粒子の標準理論を自然が選んでいる理由について、より深く理解されていくことが期待されます。

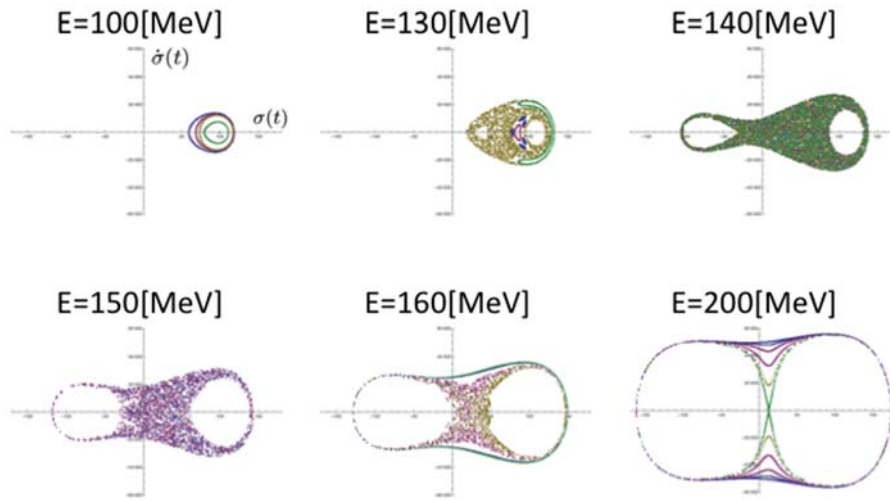
本研究結果は、2016年11月30日(米国時間)に「Physical Review Letters」のオンライン版に掲載されました。

【図1】

クォークは単体では運動できず閉じ込めの状態にあるので、反クォークと一体となり、湯川秀樹の導入した中間子メソン( $\pi$ ,  $\sigma$ )を形成している。 $\pi$ と $\sigma$ が取りうる値によって、ポテンシャルエネルギー  $V$  がどのように変化するかが左図に表されている。 $\pi$ と $\sigma$ の運動は、ポテンシャル曲面の中で運動するボールのように取り扱うことができる。現在の宇宙で実現されている最も低い底(ポテンシャルの底)の他に、セパトトリクスと呼ばれる、馬の鞍の形をした「鞍点」が存在することがわかる。セパトトリクスがあると、運動の分岐が存在し、カオスを生成する源となる。図の下部には、カオスを発生することで有名な「二重振り子」との対応を示す。



## ポアンカレ断面 ( $\pi(t) = 0$ ) の様子



【図2】

運動の規則性を表す「ポアンカレ断面」を、様々なエネルギーについて示す。エネルギー  $E$  が小さいときや大きい時は規則的な線を描いているが、中間のエネルギーでは細かな点で埋め尽くされる。この出現がカオスを表す。

### ❖ 研究の背景

運動の複雑性を表すカオス理論には、「リアプノフ指数」と呼ばれる複雑性の大きさを表す数が知られています。リアプノフ指数が大きいほど、複雑な運動をするため、指数は将来を予測することの難しさを知る重要な数値です。しかし、リアプノフ指数は、粒子の運動においてその場所や速度を元に計算されるため、それらが特定できないミクロな物理系での計算の困難が知られていました。

ミクロな物理系では、量子力学と呼ばれる原理が適用され、場所と速度を同時に測定することはできません。特にクォークは、量子力学の効果が非常に大きく、そのためその運動が大変奇妙であることが知られています。クォーク単体では運動できず、複数個で閉じ込められてしまいます。したがって、リアプノフ指数の計算をする状況が知られていませんでした。

本研究では、超弦理論で近年発展してきた「ホログラフィー原理」を用いることで、クォークに関わる運動において、量子力学の効果は保ったまま、場所と速度の情報を取り入れることができることを示しました。橋本教授らはこの手法を用い、クォークの有効模型である線形シグマ模型<sup>※6</sup>と超対称量子力学<sup>※7</sup>において、リアプノフ指数を具体的に計算しました。その結果から、クォークの力学にカオスが存在することを示し、その大きさを評価しました。

### ❖ 本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）

我々の体や宇宙を構成する物質素粒子クォークについては、その発見から数十年経つものの、運動の力学は解明されていません。静的なクォーク結合状態については、スーパーコンピュータ「京」などの大規模数値計算で明らかにされつつありますが、クォークの運動に関わる複雑性は、理解されていません。

人類の英知の結集である「素粒子の標準理論」は、南部陽一郎博士(大阪大学特別栄誉教授、2008年ノーベル物理学賞受賞)の導入した「自発的対称性の破れ<sup>※8</sup>」が基礎になっていますが、なぜ特定の素粒子理論が自然に選ばれるか、という動的な理由は謎のままです。本研究を契機にして、素粒子の根源に迫る理解の発展が期待されます。

## ❖ 特記事項

本研究成果は、2016年11月30日(米国時間)に「Physical Review Letters」に掲載されました。

論文番号: Phys. Rev. Lett. 117, 231602(2016)

タイトル: Chaos in Chiral Condensates in Gauge Theories

筆者: Koji Hashimoto, Keiju Murata, and Kentaroh Yoshida

## ❖ 用語説明

### ※1 物質素粒子クォーク

知られている素粒子のうち、陽子や中性子、中間子を構成して物質の基礎を形作る素粒子のこと。

### ※2 カオス理論

運動方程式の複雑性、特に、初期値をほんの少し変えるだけで最終結果が大きく変わってしまう予測不能性を表す理論のこと。

### ※3 ホログラフィー原理

強く量子力学的に振る舞う素粒子の理論が、ある極限操作をとることにより、仮想的な高次元空間の重力理論と同じになってしまうこと。超弦理論の発展の中で発見された。

### ※4 リャプノフ指数

カオス理論において、初期値の微小なズレが時間発展で増幅される度合いを示す数。

### ※5 素粒子の標準理論

17種類の素粒子を記述し、それらがお互いどのように相互作用するかを表す理論。

### ※6 線形シグマ模型

クォークからなる中間子(メソン)の運動を、エネルギーが低い場合に近似的に記述する理論。

### ※7 超対称量子力学

クォークと、その間の力を媒介するグルーオンの理論は量子色力学と呼ばれるが、それに仮想的に超対称粒子を付加した理論。

### ※8 自発的対称性の破れ

素粒子の標準理論の基礎となる考え方で、対称性を持った理論において、その真空状態が対称性を破ってしまう現象。