

## 自然法則に現れる「自由に選べる数」の由来に迫る ～量子重力における自由パラメータの謎に新たな手掛かり～

### ポイント

- ① 自然現象を記述する理論には、値を変えても同じ性質を保つ「自由に調整できる“つまみ”」のような数が現れることがあります。その起源を特定することは、量子重力（※1）の理解にも関わる重要な問題でした。
- ② 研究グループは、この“つまみ”の値が少しだけ異なる2つの理論をつなぐ「界面」に注目しました。この界面を少し動かしたときの応答から、“つまみ”を操作する役割をもつ演算子を構成し、「自由に選べる数」の起源を特定しました。
- ③ 本成果は、「量子重力には外から自由に選べる連続パラメータが存在しない」という考え方を支え、アインシュタイン以来の根本的な問いの理解につながる重要な手がかりになると期待されます。

### 概要

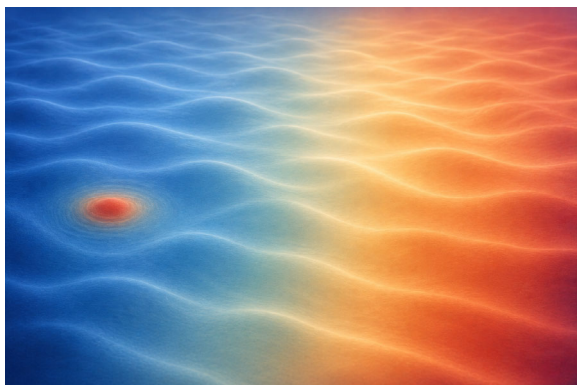
自然界を記述する理論には、拡大・縮小しても同じ性質が保たれるものがあり、これを「共形場理論（※2）」と呼びます。さらに、一部の共形場理論では、ある種のパラメータを調整することで、共形対称性（※3）を保ったまま理論を少しずつ変化させることができます。このとき、理論を連続的に変えるパラメータはどこからやって来るのか、という根本的な問いが生じます。

本研究では、連続パラメータを動かす役割を担う局所演算子を理論の中で構成することで、連続パラメータの起源を明らかにしました。

九州大学高等研究院の楠亀裕哉准教授（理化学研究所（理研）数理創造研究センター客員研究員を兼務）、欧州原子核研究機構（CERN）の小松尚太助教、トリノ大学の Marco Meineri 助教、カリフォルニア工科大学の大栗博司教授（東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授と理研開拓研究所客員主幹研究員を兼務）からなる国際共同研究グループは、2つの共形場理論を「界面」でつなぐ状況を解析しました。その結果、界面をわずかに動かしたときの応答を適切に取り出すと、2つの理論の違いを生む局所的な演算子が得られることを示し、それを具体的に構成する方法を与えました。

今回の成果は、「量子重力には外から自由に選べる連続パラメータが存在しない」という予想を裏付けるものとなっており、量子重力の根本問題の理解につながると期待されます。

本研究成果は、米国の学術誌「Physical Review Letters」に2026年6月16日（火）（現地時間）に掲載されました。



理論の変形を担う局所演算子

…左側の理論のある点を、右側の理論に対応する理論に変える役割をもつ局所演算子を構成した。

### 研究者からひとこと：

自然法則には、外から自由に選べる“つまみ”のような数が本当にあるのでしょうか。今回私たちは、2つの理論をつなぐ「境目」に注目しました。その境目の応答を調べることで、理論を変える担い手が理論の中から現れることを示しました。これは、量子重力における「自由パラメータ」の問題を考えるうえでも、重要な手がかりになると考えています。（楠亀裕哉）

## 【研究の背景と経緯】

物理の世界では、観測するスケールを変えるとふるまいが変わるのが一般的です。しかし、相転移が起こる点などでは、拡大・縮小しても同じ性質が見える特別な状態が現れます。このような性質をもつ理論を「共形場理論」と呼びます。共形場理論は、臨界現象、弦理論、量子重力の研究などに広く使われる基礎的な枠組みです。共形場理論の中には、調整可能なパラメータを含み、そのパラメータを変化させることで、共形対称性を保ちながら異なる理論へと連続的に移ることができるものがあります。このとき、この連続パラメータの起源は一体何なのか、という根本的な問いが生じます。

この問いは、量子重力の考え方とも深く関係します。量子重力では、自然法則の基本方程式に、外から自由に選べる連続的な数が含まれるべきではないという考え方があります。しかし、この問題を量子重力そのものから直接調べるのは容易ではありません。そこで手がかりになるのが、量子重力を共形場理論として記述する AdS/CFT 対応（※4）です。この対応を用いれば、共形場理論において理論を連続的に変える仕組みを理解することで、量子重力における自由パラメータの問題を考えるための重要な手がかりが得られます。

本研究では、この問題を調べるために、互いに近い2つの共形場理論をつなぐ「界面」に注目しました。2つの理論を徐々に近づけて同じ理論にすると、やがて界面は消えるはずですが、研究グループは、その消えていく界面の中に、理論を連続的に変える情報が残るかを調べました。

## 【研究の内容と成果】

共同研究グループは、共形多様体（※5）の上で互いに近い2つの共形場理論を考え、その間に共形界面（※6）が存在すると仮定しました。界面があると、界面に垂直な方向の並進対称性は一般に破れます。この破れに対応して現れるのが「変位演算子（※7）」です。これは、界面を少し動かしたときに理論がどのように応答するかを表す界面上の演算子であり、2つの理論の違いを測る手がかりになります。

共同研究グループは、この変位演算子を適切に規格化し、2つの理論の差をゼロに近づける極限を調べました。その結果、二次元共形場理論について、一定の仮定のもとで、この変位演算子が、共形対称性を保ったまま理論を連続的に変える局所的な演算子「厳密にマージナルな演算子（※8）」になることを示しました。

これは、2つの理論の違いが、外から与えたパラメータの違いとしてだけでなく、理論の中にある局所演算子によって生み出される変化として記述できることを意味します。言い換えると、連続パラメータに沿って理論が変わる方向を、理論内部の演算子として取り出せることを示したものです。

## 【今後の展開】

量子重力の観点から見ると、本成果は「自然界の基本法則には、自由に調整できる“つまみ”のような数が本当に存在するのか」というアルベルト・アインシュタイン以来の根本的な問いに関係しています。理論に現れる連続的なパラメータが、外から自由に決められる単なる数なのか、それとも理論の中の力学的な場として説明されるものなのかは、量子重力を考えるうえで重要な問題です。

AdS/CFT 対応を用いると、共形場理論において厳密にマージナルな演算子に由来する連続パラメータは、量子重力における場の真空期待値に対応します。この対応を本結果とあわせて考えると、量子重力における連続パラメータは、外から自由に与えられるのではなく、力学的な場によって説明されるべきものであることが示唆されます。これは、量子重力として成立する理論と、見かけ上はもっともらしくても量子重力とは両立しない理論を見分けようとするスワンプランド・プログラム（※9）の理解につながると期待されます。

【参考図】

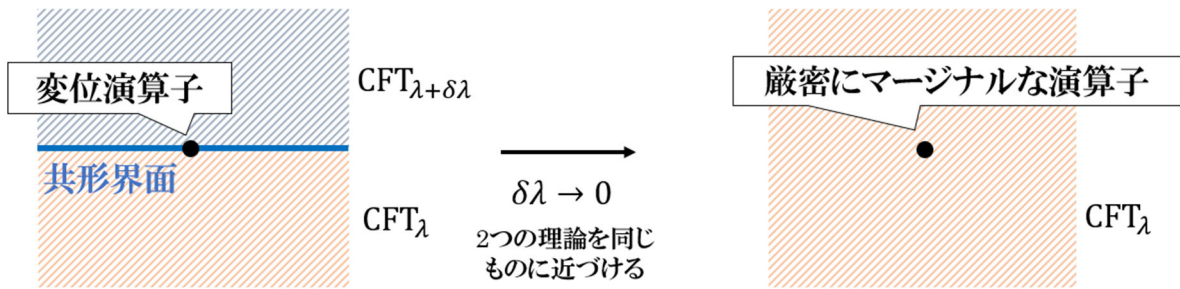


図1 界面の応答から理論を変える演算子を取り出す概念図

近い2つの共形場理論 (CFT) を「共形界面」でつなぐ。2つの CFT を同じものに近づけると、厳密にマージナルな演算子を変位演算子から構成できることを示した。

【用語解説】

※1：量子重力 (Quantum Gravity)

量子論と一般相対性理論を統一的に扱うことを目指す理論。量子重力では、理論を定めるために外から自由に選ぶ連続的な数 (自由パラメータ) は存在せず、見かけのパラメータは力学的な場の値から説明されるべきだという考え方がある。本研究では、この考え方を AdS/CFT 対応を用いて共形場理論側から検証している。

※2：共形場理論 (Conformal Field Theory, CFT)

拡大・縮小を含む、角度を保つ変換 (共形変換) のもとで不変な場の量子論。くりこみ群の固定点や臨界現象、弦理論、ホログラフィー原理などで中心的な役割を果たす。

※3：共形対称性 (Conformal symmetry)

拡大・縮小を含む、角度を保つ変換 (共形変換) に対して物理法則が変わらないという性質。

※4：AdS/CFT 対応

反ド・ジッター空間 (AdS) と呼ばれる時空の量子重力理論が、その境界にある共形場理論で記述できるという対応関係。量子重力を、重力を含まない場の量子論から調べる強力な手法として使われる。

※5：共形多様体 (Conformal manifold)

共形対称性を保ったまま、パラメータを連続的に変えられる共形場理論の集まり。多様体上の1点1点が、それぞれ1つの共形場理論に対応する。

※6：共形界面 (Conformal interface)

2つの共形場理論を貼り合わせる壁のようなもの。壁があっても共形対称性の一部が保たれる場合に、共形界面と呼ぶ。

※7：変位演算子 (Displacement operator)

界面の位置を少し動かしたとき、理論がどのように応答するかを表す界面上の演算子。本研究では、この応答を手がかりに、理論を連続的に変える演算子を取り出した。

※8：厳密にマージナルな演算子 (Exactly marginal operator)

共形場理論としての性質を壊さずに、理論を少しずつ変形させる役割を担う局所的な演算子。

※9：スワンプランド・プログラム

量子重力理論として統合的な理論と、一見すると量子場理論として成り立つが量子重力には埋め込めない理論を区別しようとする研究プログラム。距離予想や、量子重力における自由パラメータやグローバル対称性の不在予想などが含まれる。

#### 【謝辞】

本研究は、米国エネルギー省科学局高エネルギー物理学部門（DE-SC0011632）およびカリフォルニア工科大学ウォルター・バーク理論物理学研究所の支援を一部受けて実施されました。楠亀准教授は、カリフォルニア工科大学 Brinson Prize Fellowship、九州大学稲盛フロンティアプログラム、JSPS 科研費（JP23K20046）の支援も受けています。大栗教授は、カリフォルニア工科大学 Leinweber Forum for Theoretical Physics、Simons Investigator Award（MP-SIP-00005259）、JSPS 科研費（JP23K03379）の支援も受けています。

本研究の一部は、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU, WPI）、カリフォルニア大学サンタバーバラ校カブリ理論物理学研究所（KITP、NSF PHY-2309135）、アスペン物理学センター（NSF PHY-1607611）、理化学研究所開拓研究所において実施されました。Meineri 助教は、イタリア大学研究省（MUR）の FIS grant BootBeyond（CUP: D53C24005470001）および INFN “Iniziativa Specifica” ST&FI の支援を受けています。小松助教と楠亀准教授は、京都大学基礎物理学研究所およびワークショップ “Progress on Theoretical Bootstrap” のホスピタリティに謝意を表しています。

#### 【論文情報】

掲載誌：Physical Review Letters

タイトル：Continuous Family of Conformal Field Theories and Exactly Marginal Operators

著者名：Shota Komatsu, Yuya Kusuki, Marco Meineri, Hiroshi Ooguri

D O I : 10.1103/4759-7qj2

#### 【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 高等研究院 准教授 楠亀裕哉（クスキ ユウヤ）

TEL : 092-802-4084

Mail : kusuki.yuya@phys.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

理化学研究所 広報部

TEL : 050-3495-0247

Mail : ex-press@ml.riken.jp