

## 「量子力学」と「一般相対性理論」を統合する 「量子重力」の性質を明らかにする枠組みを構築

重力そのものが量子重ね合わせ状態にある必要がなく、同じ物理的予測を再現することが可能

### ポイント

- ① 現代物理学の二大柱、量子力学と一般相対性理論は単一の理論に統合する方法がまだ確立されていない
- ② 本研究では「時空の重ね合わせの相対性 (Relativity of Spacetime Superpositions)」の理論的枠組みを構築し、時空の特定の量子的重ね合わせを伴ういくつかのシナリオが、量子重力理論を仮定することなく再解釈できることを示した
- ③ 重力の量子的な性質を発見したことを証明する証拠が何であるかを解明することにつながる

### 概要

原子以下の世界の振る舞いを説明する「量子力学」と、星や銀河の動きを支配する「一般相対性理論」は現代物理学の二大柱であり、これらを単一の理論に統合する方法については、まだ合意が得られていません。量子重力理論においては重力が量子重ね合わせの状態、つまり異なる状態を同時にとっているようなシナリオが想定されるべきであるという理論が、広く受け入れられています。近年、いくつかの理論的実験において、重力を介して相互作用する量子粒子の振る舞いを通じて、そのような効果を間接的に観測できる可能性が示唆されており、重力場の量子重ね合わせという概念を検証するための最も単純な手法を提供するものであるため、大きな関心を集めています。こうした実験の結果を解釈することは依然として大きな課題で、量子重力現象の真の証拠とは何であるかを理解するための新たな枠組みの開発が求められています。

本研究では、九州大学高等研究院稲盛フロンティアプログラムのフー・ジョシュア准教授の研究グループがストックホルム大学のマグダレナ・ジッチ博士、ウォータールー大学の研究者と共同研究を行い、「時空の重ね合わせの相対性 (Relativity of Spacetime Superpositions)」と呼ばれる理論的枠組みを構築しました。これは、時空の特定の量子重ね合わせを含む特定のシナリオが、量子重力理論を必要とせずどのように再解釈できるかを記述するものです。これらのシナリオでは、重力そのものが量子重ね合わせ状態にある必要がなく、同じ物理的予測を再現することができます。この枠組みを、重力による量子もつれ (エンタングルメント) や重力によるデコヒーレンスを伴う実験を含む、いくつかの有力な提案に適用したところ、量子重力効果の証拠として一般的に解釈されている多くのシナリオには、本質的な曖昧さが存在することが判明しました。

本研究は実験を設計するための指針を提供し、どの観測が重力の古典的記述と量子的記述を区別できるかを特定することで、現代科学において最も注目されている理論の一つに関する証拠の探索範囲を絞り込みます。

本研究成果は「npj Quantum Information」に2026年5月13日(水)に掲載されました。

### 研究者からひとこと：

重力と量子力学がどのように結びついているかを理解することは、物理学における最大の課題の一つです。重力の量子的な性質を検証する前に、まず、それを発見したことを証明する証拠が何であるかを把握する必要があります。私たちの研究は、その疑問を解明するのに役立ちます。(フー・ジョシュア)

## 【研究の背景と経緯】

現代物理学の二大柱は、原子以下の世界の振る舞いを記述する「量子力学」と、星や銀河の動きを支配する「一般相対性理論」です。両理論とも目覚ましい成果を上げていますが、これらを単一の理論に統合する方法についてはまだ確立されていません。量子重力理論においては、重力が量子重ね合わせの状態、つまり異なる状態を同時にとっているようなシナリオが想定されるべきであるというのが、広く受け入れられている見解です。近年、いくつかの理論的提案において、重力を介して相互作用する量子粒子の振る舞いを通じて、そのような効果を間接的に観測できる可能性が示唆されています。これらの提案は、重力場の量子重ね合わせという概念を検証するための最も単純な手法を提供するものであるため、大きな関心を集めています。こうした実験の結果を解釈することは依然として大きな課題であり、量子重力現象の真の証拠とは何であるかを理解するための新たな枠組みの開発が求められています。

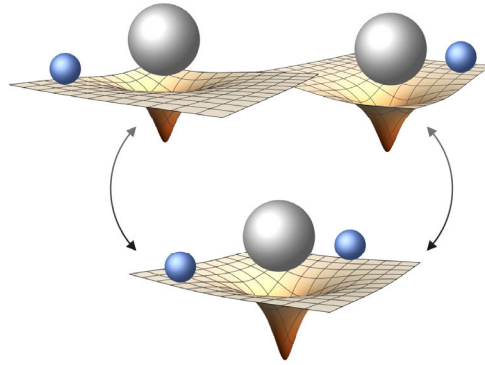
## 【研究の内容と成果】

現代物理学の中心的な目標の一つは、重力そのものが量子重ね合わせ状態で存在し得るかどうかを明らかにすることです。近年、重力を介して相互作用する量子粒子を用いてこの考えを検証できると示唆する、いくつかの影響のある提案がなされています。これらの提案は、しばしば重力場の量子重ね合わせを伴うものと解釈され、量子重力を検証するための最も単純な道筋と見なされています。しかし、そのような解釈が一意的なものなのか、あるいは同じ物理的状況を別の方法で記述できるのかについては、依然として不明なままでした。我々は、「重力（すなわち時空）の量子重ね合わせ」の物理的意味を明確にし、提案されている実験からどのような結論を正当に導き出せるかを明らかにするために、本研究を行いました。我々の目標は、どの兆候が量子重力の真の証拠となり得るか、またどの兆候には別の説明が可能であるかを特定することでした。

当研究チームは、「時空重ね合わせの相対性 (Relativity of Spacetime Superpositions)」と呼ばれる理論的枠組みを構築しました。これは、時空の特定の量子重ね合わせを含む特定のシナリオが、量子重力理論を必要とせずどのように再解釈できるかを記述するものです。これらのシナリオでは、重力そのものが量子重ね合わせ状態にある必要なく、同じ物理的予測を再現することができます。この枠組みを、重力による量子もつれエンタングルメントや重力によるデコヒーレンスを伴う実験を含む、いくつかの有力な提案に適用したところ、量子重力効果の証拠として一般的に解釈されている多くのシナリオには、本質的な曖昧さが存在することが判明しました。同じ観測結果は、物理的には同等であるものの、二つの異なる方法で理解することができます。一つ目は重力の量子重ね合わせを伴うものであり、二つ目は古典的な重力背景上を移動する量子粒子を記述するものです。

## 【今後の展開】

本研究成果は研究者たちに実験を設計するための指針を与えるものです。どの観測が重力の古典的記述と量子的記述を真に区別できるかを特定することで、現代科学において最も注目されている理論の一つに関する証拠の探索範囲を絞り込みます。重力と量子力学がどのように結びついているかを理解することは、物理学における最大の課題の一つであり重力の量子的な性質を検証する前に、それを発見したことを証明する証拠が何であるかを把握する必要があります。



#### 【参考図】

同じ物理的状況を、異なる視点から見た二つの解釈の図。重力場または時空の量子重ね合わせ（上）、通常の重力場における位置の量子重ね合わせにある「試験」粒子（下）。この重力場は、星やブラックホール、あるいは別の量子「源」粒子によって生み出されたものである可能性がある。

#### 【謝辞】

本研究はカナダ自然科学・工学研究評議会、バンティング博士研究員フェローシップ、クヌート・アノンド・アリス・ワレンバーグ財団（2021.01.19）、の助成を受けたものです。

#### 【論文情報】

掲載誌：npj Quantum Information

タイトル：Relativity and decoherence of spacetime superpositions

著者名：Joshua Foo, Cendikiawan Suryaatmadja, Robert B. Mann, and Magdalena Zych

D O I : 10.1038/s41534-026-01234-x

#### 【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 高等研究院 稲盛フロンティアプログラム 准教授 フー・ジョシュア

Mail : foo.joshua.403@m.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