

PRESS RELEASE (2026/04/15)

巨視的な鏡の量子的重ね合わせを作る新手法を提案

～重力の量子性の検証実験の新しい戦略に～

ポイント

- ① 巨視的な鏡とレーザー光が結合する光学機械振動子系（以下、オプトメカ系(※1)）の量子制御は量子技術のフロンティア
- ② 巨視的な鏡の運動量の量子揺らぎが標準量子限界を超えて小さくなる「運動量スクイーズド状態」(※2)を理論的に発見
- ③ この現象は重力が誘起する重力誘起エンタングルメント(※3)を大きく強められるため、検出実験への応用が期待される

概要

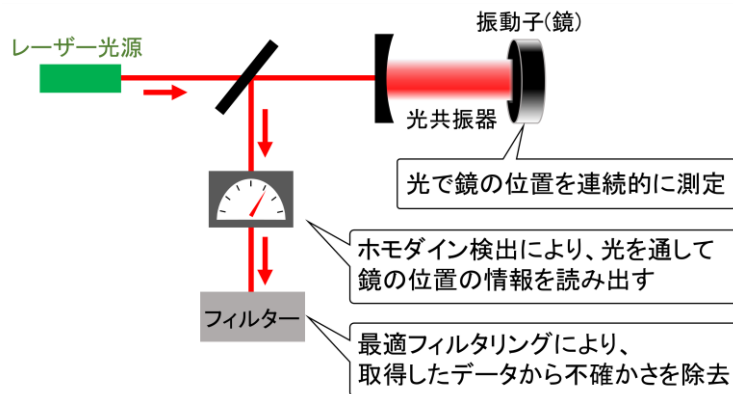
量子力学では、物理量が同時に異なる状態をとる「量子的重ね合わせ」という性質が成り立ちます。この基本的性質がどこまで成り立つのかは現代物理学の重要な研究課題です。特に重力にも量子的重ね合わせが成立するのかという「重力の量子性」が大きな関心を集めています。二つの物体が重力のみを介して量子もつれを作る「重力誘起エンタングルメント」が観測されれば、重力がこの量子的性質を持つことを示す重要な証拠となります。

巨視的な鏡とレーザー光が結合するオプトメカ系は、この問題を実験的に検証する有力な手法として注目されています。九州大学大学院理学府の福澄諒太郎さん、畠山広聖さん、同大学院理学研究院の山本一博教授とカリフォルニア工科大学の三木大輔さんの研究グループは、オプトメカ系において鏡の運動量の量子ゆらぎを強く抑えた状態（運動量スクイーズド状態）が実現可能であることを世界で初めて示しました。さらに、この状態では位置の量子的重ね合わせが量子揺らぎとともに大きく広がるため、二つの鏡の間に生じる重力誘起エンタングルメントの信号が増強されることを明らかにしました。

本研究では、オプトメカ系の出力光を連続測定(※4)し、そのデータを最適に処理する最適フィルタリング（Wiener フィルタ(※5)）の手法を用いて鏡の量子状態を理論的に解析しました。その結果、運動量の量子ゆらぎを標準量子限界以下に抑える運動量スクイーズド状態が実現できることを発見し、その条件を特定するとともに、この状態を利用することで重力誘起エンタングルメントの生成が強くなる仕組みを明らかにしました。

本成果は、将来の実験で重力の量子性を検証するための新しい戦略を示すものです。実現には超高真空・低温環境など厳しい条件が必要であり、低周波領域での精密測定や宇宙空間での実験環境の活用などが課題となります。また本研究の発展は、超高感度フォースセンサーなどの量子センシング技術への波及効果も期待されます。

本研究成果は米国の雑誌「Physical Review Research」に2026年4月13日（月）に掲載されました。



研究者からひとこと：

重力が量子の性質を持つかどうかは現代物理学の大きな謎です。本研究は、将来の実験実現に向けた新しい戦略を提案するものです。

図1. 光を用いた鏡の連続位置測定とフィルタリングの流れ

レーザー光を光共振器に入射し、可動鏡の位置を連続的に測定する。出力光はホモダイン検出(※6)によって読み出され、その測定データを最適フィルタリングの手法を用いて解析することで、鏡の量子状態を高精度に推定することができる。

【研究の背景と経緯】

量子力学はミクロな世界を記述する理論として大きな成功を収めていますが、重力が量子的な性質を持つかどうかは、いまだ解明されていない重要な問題です。近年、二つの質量が重力相互作用のみを介して量子もつれを生成できるかを調べる「重力誘起エンタングルメント」の提案が注目されています。もしこの現象が観測されれば、重力が量子的性質を持つことを示す重要な証拠となる可能性があります。

この検証には、比較的大きな質量を持つ機械振動子を量子状態として精密に制御・測定する必要があります。特に、光と鏡の機械振動子を結合させるオプトメカ系は、その有力な実験プラットフォームとして研究が進められています。本研究では、このようなオプトメカ系において連続測定と最適フィルタリングを用いることで量子状態を高精度に推定し、重力による量子効果の観測可能性を高める方法を理論的に検討しました。

【研究の内容と成果】

本研究では、光共振器の可動鏡を対象としたオプトメカ系において、連続測定と量子最適フィルタリングを組み合わせることで、鏡の量子状態を連続測定の結果をもとに推定する方法を解析しました。(図1参照)

その結果、測定の設定(ホモダイン検出角)(※6)を適切に選ぶことで、鏡の運動量の量子ゆらぎが大きく抑えられた「運動量スキーズド状態」が実現できることを示しました。この状態では、位置の不確定性が大きくなる一方で運動量の不確定性が小さくなっています。またこの鏡が実効的に自由粒子のように振る舞うことも示しました。(図2参照)

さらに、この運動量スキーズド状態を利用することで、二つの鏡の間に重力相互作用によって生じる量子もつれ(重力誘起エンタングルメント)の信号を大きく強められることを理論的に明らかにしました。(図3参照)

【今後の展開】

本研究で示した運動量スキーズド状態は、適切な測定条件と低雑音環境が整えば、比較的近い将来に実現可能なパラメータ領域にあります。特に、低温・高真空環境や宇宙空間などの低雑音環境を利用することで、重力誘起エンタングルメントの生成と検出の可能性がさらに高まると考えられます。

本研究の成果は、巨視的な物体の量子状態制御を前進させるだけでなく、重力が量子的性質を持つかどうかを実験的に検証するための新しいアプローチを示すものです。また、オプトメカ系を用いた精密量子測定や超高感度フォースセンサーなど、量子センシング技術への波及効果も期待されます。

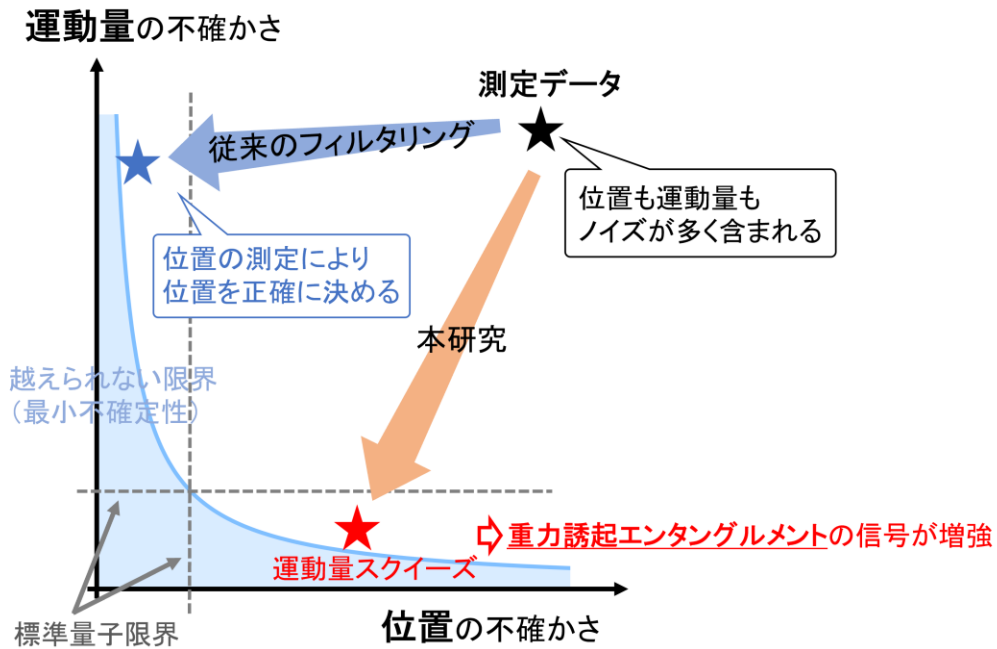


図2. 運動量の揺らぎを抑える量子測定に基づく新しい方法

量子力学では、位置と運動量を同時に正確に決めることはできない。従来は位置の不確定性を減らして高精度に位置の推定を行っていた。本研究では、検出条件を工夫することで、位置の不確定性が増大する代わりに運動量の不確定性が強く抑えられる「運動量スクイーズド状態」を実現できることを示した。この状態を利用すると、二つの鏡の間に生じる重力誘起エンタングルメントの信号を大きく強めることができる。

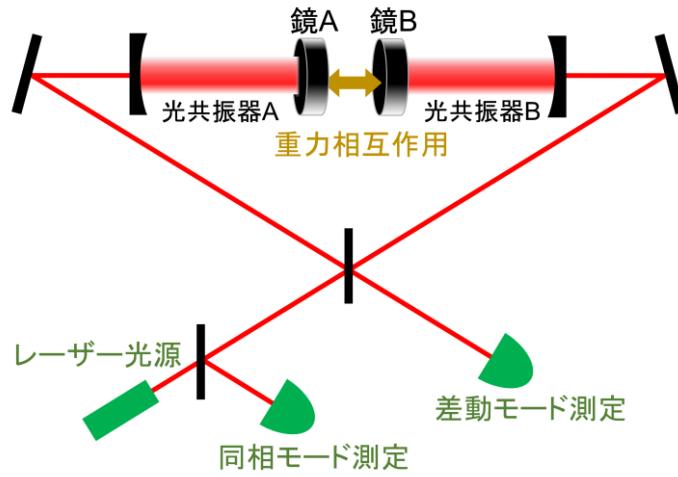


図3. オプトメカ系を用いた重力誘起エンタングルメント検証実験系の概念図

互いに重力相互作用を及ぼし合う二つの可動鏡（鏡A,B）をレーザー光で測定し、鏡の運動の同相モードと差動モードの信号から重力誘起エンタングルメントの生成を調べる。

【用語解説】

(※1)オプトメカ系（光学機械振動子系）

光（レーザー光）と機械振動子（可動鏡など）の運動が相互作用する物理系。出力光を利用して機械振動子を精密に測定・制御できるため、巨視的物体の量子状態の研究や重力波の観測でも用いられている。

(※2)スクイズド状態

量子力学の不確定性原理を満たしつつ、ある物理量のゆらぎ（不確定性）を基底状態のゆらぎ（標準量子限界）より小さくした量子状態。本研究では運動量のゆらぎが抑えられた「運動量スクイズド状態」が得られる方法を発見した。

(※3) 重力誘起エンタングルメント

エンタングルメント（量子もつれ）とは、二つ以上の量子系が強く相関し、一方の状態を測定するともう一方の状態も瞬時に決まるような量子力学特有の現象で、量子情報や量子通信の基礎となる重要な性質である。重力誘起エンタングルメントは二つの物体が重力相互作用だけで量子もつれ状態になる現象で、もし観測されれば、重力が量子的な性質を持つことを示す重要な証拠になると考えられている。

(※4)連続測定（continuous measurement）

量子系の状態を時間的に連続して測定し、その情報をもとに量子状態を推定する測定方法。量子制御や量子センシングで重要な手法。

(※5)最適フィルタリング（Wiener フィルタ）

測定データに含まれる雑音を抑えながら、対象の物理量を最も精度よく推定するための数学的手法。信号処理や制御理論でも広く用いられている。Wiener フィルタは、フーリエ空間で最適化される代表的フィルタリング手法である。

(※6)ホモダイン検出角

レーザー光と基準光（局所発振器）を干渉させて測定する光計測技術。光の位相や振幅の微小な変化

を高精度に測定することができる。ホモダイン検出角は、光の位相と振幅を組み合わせた測定のパラメータを表す。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費（JP23H01175）および海外特別研究員制度の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Physical Review Research（2026年3月4日 受理）

タイトル：Momentum Squeezed State Realized via Optimal Filtering in Optomechanics:
Implications for Gravity-Induced Entanglement

著者名：Ryotaro Fukuzumi¹, Kosei Hatakeyama¹, Daisuke Miki², Kazuhiro Yamamoto¹（¹九州大学, ²カリフォルニア工科大学）

DOI：10.1103/zrs2-sk28

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院理学研究院・時空量子連携研究機構

教授 山本 一博（ヤマモト カズヒロ）

TEL：092-802-4047 FAX：092-802-4107

Mail：yamamoto.kazuhiro.963@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