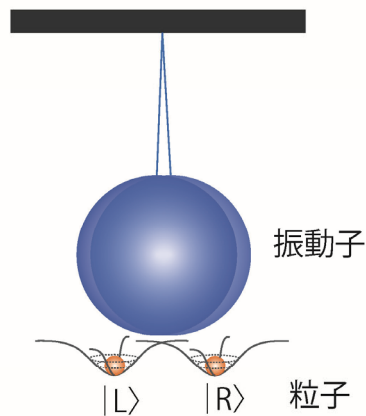




振動子と重ね合わせ状態の粒子からなるハイブリッド量子系

基底状態にある振動子に、左と右に空間的に波束が局在した重ね合わせ状態の粒子を近づけると、振動子は重力相互作用の量子的な重ね合わせにより、左と右に振動する量子もつれ状態になると予想されます。このような系で、レグット・ガーグ不等式の破れが現れることを明らかにしました。

重力の実在性の破れを検証する方法を提案

～量子重力への新しいアプローチ～

ポイント

- ① 物理学最大の未解決問題「量子重力」の実験的検証を目指す理論を構築
- ② 重力の実在性の破れを検証する方法を世界で初めて提案
- ③ 量子技術を用いた量子重力の新しい研究分野の創出に期待

概要

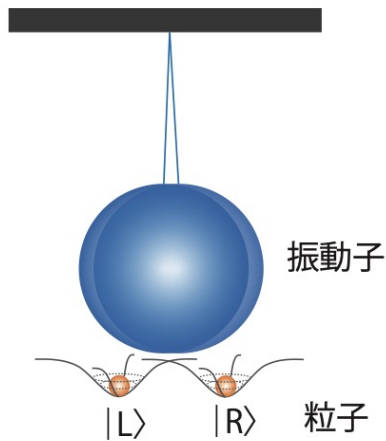
従来、重力と量子力学を統一する量子重力の研究は、超弦理論を中心とする理論研究により進められてきました。未完であるこのアプローチの難しさは、理論と実験が結びつきにくい点にあります。重力と量子力学の融合に関して、重力が量子力学に従うかどうかさえわかりません。2020年にノーベル物理学賞を受賞したペンローズは、重力が量子力学に従わない可能性を指摘しています。重力が量子力学の枠組みに従うかどうかという「重力の量子性」は、量子重力の出発点となる問いですが、全く確かめられておらず、検証が必要です。

今回の研究は、量子力学の性質として知られる「実在性の破れ」を重力が示すかどうか確かめる方法を初めて提案し、また、実験による実証の可能性も示しました。そのような検証実験は、量子技術の発展により将来実現される可能性があります。今回の研究成果は、量子技術を用いた新しい量子重力研究の創出を期待させるものです。

南部保貞 博士（名古屋大学 准教授）、松村央 博士（九州大学 助教）、山本一博 博士（九州大学 教授）の研究グループは、先行研究において重力の量子力学的非局所性を検証するために用いられた理論模型に対して、今回は、「実在性の破れ」に着目した理論解析を行いました。図1は、理論解析で用いた振動子と左右に空間的に波束が局在化した重ね合わせ状態の粒子の模型（ハイブリッド模型）です。レグット・ガーグ不等式は、巨視的な量子系の実在性の破れを検証するために考案されました。今回の研究では、この模型を用いて重力相互作用が量子力学の枠組みに従う場合にレグット・ガーグ不等式が破れることを発見しました。これによって、重力の実在性の破れという量子力学的性質が確かめられる可能性を明らかにしました。

今後は、実験によりどのように巨視的な量子系を実現し重力の実在性の破れをテストするか、さらに具体的な検討が必要です。この成果は、量子情報科学技術を基盤とし、実験と結びつく量子重力への新しいアプローチとして価値があります。

本研究成果は、米国のトップジャーナル「Physical Review A」に2022年7月20日(水)に掲載されました。



(図1) 振動子と重ね合わせ状態の粒子からなるハイブリッド量子系

(説明) 基底状態にある振動子に、左と右に空間的に波束が局在した重ね合わせ状態の粒子を近づけると、振動子は重力相互作用の量子的な重ね合わせにより、左と右に振動する量子もつれ状態になると予想されます。このような系で、レグット・ガーグ不等式の破れが現れることを明らかにしました。

【研究の背景と経緯】

重力は 1915 年にアインシュタインが発見した一般相対性理論によって記述されます。一般相対性理論の予言は、宇宙の進化、ブラックホール(※1)、重力波(※2)などの観測事実と良く合っています。しかし、重力と量子力学を融合する量子重力は、100 年近く議論が続けられていますが、物理学最大の問題として未解明のままです。超弦理論(※)は、量子重力を含む究極の理論として研究されていますが完成していません。これまで実験が行われていないという点に量子重力の研究を難しくしている一因があり、重力が量子力学に従うのかどうかさえ全く検証されていません。

量子力学はミクロな世界で全ての物質が従う基本法則です。量子力学には「状態の重ね合わせ」という不思議な性質があり、例えば、1つの粒子が右にある状態と左にある状態が同時に現れることができます。この状態の重ね合わせは、その1つの粒子が右か左のどちらかにあってどちらかわからない状態ではなく、どちらにも存在する状態です。この量子力学の性質は、観測する前から粒子の状態が左右のどちらかに決まっているという古典力学では当たり前の実在性という性質が、量子力学では成り立たず、測定を行うまで状態が確定しないという実在性の破れ（非実在性）を表しています。実在性の破れは、量子力学の不思議な性質の一つで、アインシュタインは、「人が月を見ていない時、月はそこにはないのでしょうか。」とこの不思議な性質を評しました。そして、非実在性がどこまで巨視的な系でも成り立つのかは、量子力学の基本的な課題です。

重力も量子力学に従い非実在性を示すかどうかは、量子重力の出発点となる問題ですが全く確かめられていません。先述したようにペンローズは重力が量子力学に従わない可能性を指摘しています。実験的な検証が必要です。最近の量子情報科学技術の発展を応用し、重力が量子力学に従うかどうかを実験によって確かめるための方法として、重力の非実在性をテストする新しい方法を提案しました。将来の実験によって重力の非実在性が確かめられると、一般相対性理論において重力は時空の歪みなので、時空の歪みが非実在性という性質を持つことになります。重力の非実在性に関する実験は量子重力の検証には欠かせません。

【研究の内容と成果】

レグット・ガーグ不等式は、量子力学のもつ非実在性を確かめる方法として、1985 年に考案されました。レグット・ガーグ不等式とは、 ± 1 という値をとる変数が実在性の性質を満たす時、時間的相関の組み合わせに対して成り立つ不等式です。この変数が量子力学に従い、非実在性を持つ時には、レグット・ガーグ不等式が成立しません。つまり、レグット・ガーグ不等式の破れが確かめられると量子力学

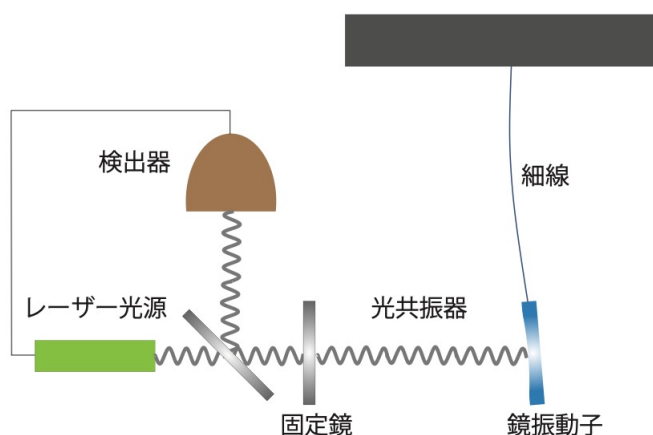
の非実在性を検証することになるのです。この方法を用いて、これまで様々な巨視的量子系の非実在性の実証されてきました。

この研究では、重力が量子力学に従うかどうか検証する方法の一つとして、重力相互作用する量子系のレグット・ガーグ不等式に注目しました。具体的な解析を行うため、先行研究にて採用された重力が作る量子もつれ(※4)を検証するための理論模型(図1参照)に着目しました。この模型は、振動子と左右に空間的に波束が局在した重ね合わせ状態の粒子からなる系で、ハイブリッド量子系と呼ばれています。この模型で、重力相互作用が量子力学に従うならレグット・ガーグ不等式の破れが現れることを発見しました。重力相互作用によって現れるレグット・ガーグ不等式の破れは、重力が非実在性を示す証拠になり得ることを意味しています。実験的な実証の可能性についても検討を行い、振動子を強いスクイズド状態(※3)として用意できれば、破れのシグナルが大きくなることも示しました。

【今後の展開】

重力が量子力学に従うかどうかという重力の量子性の問題は、量子重力の新しい研究テーマとして注目を集めています。その背景には最近の量子情報科学技術の発展があり、重力の量子性を実験的に実証できる可能性が見えてきたからです。今回の研究と深い関係のある研究として、量子もつれに着目した重力の量子性の検証(※5)の重要性が指摘されています。量子もつれは、量子力学固有の性質であり、非局所的な量子相互作用によってのみ生まれることが知られているので、もし重力相互作用によって量子もつれが生まれるならば、重力が非局所的な性質を持つ量子相互作用であることが示唆されることになります。今回研究した振動子と重ね合わせ状態の粒子からなるハイブリッド量子系でも、重力による量子もつれが生じています。重力による量子もつれとレグット・ガーグ不等式の破れとの関係を明確にすることも今後の課題です。

また、今回の成果を実験で確かめるためには、巨視的振動子の量子状態を実現する必要があります。巨視的振動子の量子状態は、光共振器の一端を鏡振動とする光学機械振動子の量子制御(※6)によって実現ができると期待されています(図2参照)。今後、このような巨視的量子系の実現に向けて、実験分野と連携した研究も必要です。巨視的振動子の量子制御や物質の重ね合わせ状態の生成といった量子技術が、基礎物理学の難問である量子重力の解明に重要な役割を果たすことが期待されます。



(図2) 懸架型光学機械振動子の模型図
(説明) 細線により吊るされた鏡振動子が光共振器の一端となって光共振器内のレーザー光と相互作用する。レーザー光の読み出しとフィードバックにより鏡振動子を量子制御する。

【用語解説】

(※1)ブラックホール

一般相対性理論が予言する天体。重力が極めて強く、中心に光さえ外側に脱出できない領域が現れる。その領域との境界を事象の地平面と呼ぶ。太陽質量のブラックホール場合、事象の地平面の半径は、3km程度となる。

(※2)重力波

一般相対論性理論において、空間は伸び縮みする力学自由度となる。その中で重力波は、空間の伸び縮みが光速で伝播する成分である。ブラックホール同士の合体から発生した重力波が、2015年に米国のグループによって初めて直接検出された。

(※3)スクイズド状態

量子力学に従う調和振動子の最もエネルギーの低い状態は、基底状態と呼ばれる。基底状態の位置と運動量の不確定さはそれぞれある大きさで決まっている。スクイズド状態は、位置と運動量の不確定さが、基底状態と比較して非対称となっている状態。

(※4)量子もつれ(状態)

量子力学的な非局所性を持つ状態。二つの粒子の状態が互いに相関して重ね合わせとなっており、片方の粒子の状態の変化がもう片方の粒子の状態を変化させる。アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼンらが、量子力学のこの解釈を批判し、3名の頭文字からEPR状態とも呼ばれている。量子もつれ状態の性質は量子コンピューターや量子暗号通信が利用している性質で、現在ではEPR相関とも呼ばれる。

(※5)量子もつれに着目した重力の量子性の検証

量子もつれは、量子力学固有の性質であり、量子情報理論の定理により非局所的な量子的相互作用によってのみ生まれることが知られている。そこで、もし重力相互作用によって量子もつれが発生することが確かめられれば、重力が非局所的な量子的相互作用であることを検証できると期待されている。

(※6)量子制御

量子系を連続的に測定し、測定データに基づいたフィードバック操作により、量子系の状態を制御する技術。

【謝辞】

本研究はJSPS科研費19K03866、22H05267、22H05263の助成、及び九州大学改革活性化制度の支援を受けた成果です。

【論文情報】

掲載誌：Physical Review A

タイトル：Leggett-Garg inequalities for testing quantumness of gravity

著者名：Akira Matsumura, Yasusada Nambu, Kazuhiro Yamamoto

DOI: 10.1103/PhysRevA.106.012214

URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.106.012214>