

光学浮上鏡を用いた重力デコヒーレンスの観測実験

牛場 崇文 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

重力理論と量子論の統一理論の構築は現代の物理学における大きな未解決問題の一つであり、これを解決することができれば、初期宇宙の現象に対して非常に大きな示唆を与えてくれるものである。現在までに、様々な理論提案がなされているが、それらの検証実験は十分になされていると言い難いのが現状である。本講演ではそのように十分な検証を行うことが困難な量子重力理論の中で、近年テーブルトップの実験によって検証の可能性が示唆されている重力デコヒーレンスと呼ばれる現象に焦点を当て解説を行う [1]。また、私たちが提案するレーザー光を用いて浮上させた鏡を用いた重力デコヒーレンスの観測実験について解説する。この実験により重力デコヒーレンスの観測に成功すれば、量子力学における観測問題に大きな示唆を与えることができると期待される。

1 序章

近年の爆発的な技術的な進歩に伴い、振動子の精密位置計測分野において、原子や分子などの量子性を観測しやすい物体比べて非常に重い振動子を光の量子性を用いて量子的に駆動することに成功している。現在までに fg スケールの振動子から mg スケールの振動子まで様々な質量スケールの振動子を量子的に駆動することに成功しており、将来的には重力波検出器によって kg スケールの振動子でも光子の量子性によって振動子の動きが支配されるようになると言われている。このような大きな質量スケールの振動子は原子や分子などの軽い物体に比べて重力による影響が大きいいため、これらの振動子を用いることによって重力デコヒーレンスの観測が可能であるとの提案がなされており、研究が進められている。

2 重力デコヒーレンス

重力デコヒーレンスとは重力エネルギーによって系の量子性を崩壊させる現象である。ハイゼンベルグの不確定性関係として時間とエネルギーの不確定性関係は

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar \quad (1)$$

と表される。ここで ΔE を重力エネルギーとしたときの Δt は重力エネルギーによる系の量子性の寿命

を表す。

このようなメカニズムによって系の量子性が崩壊することが確認できれば、マクロな物体における量子的な重ね合わせ現象が実生活において観測されない理由や、波動関数の波束が観測によって収縮してしまう理由に関して何らかの示唆を与えられると考えられている。

3 観測方法

重力デコヒーレンスの観測のためにはマクロな物体の間にエンタングルメント状態を生成し、その崩壊時間を見ることによって重力デコヒーレンスによる量子性の崩壊を観測する。このような重力デコヒーレンスの観測は重力波の分野から発症したもので、重力波検出器を用いて観測することが可能である。図 1 に日本の重力波検出器 KAGRA のメインとなる干渉計部分の図を示す。

KAGRA では、最も感度が良い周波数帯で、ハイゼンベルグの不確定性関係から決まるような極限的な感度 (SQL) に到達するため、干渉計の二枚の鏡が光子の量子性を介してエンタングルメント状態となる。したがって、レーザーのスイッチを OFF した後にそのエンタングルメントがどの程度持続するのかを観測することによって、重力デコヒーレンスの理論が正しいかどうかの検証が可能となる。

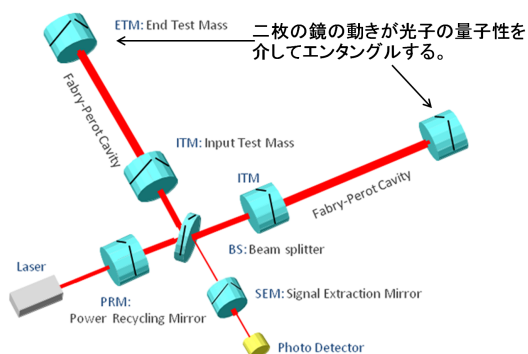


図 1: KAGRA の干渉計のメイン部分

4 先行研究とその問題点

このような重力デコヒーレンスの観測は重力波検出器のような非常に重たいスケールのみで観測するのではなく、いろいろな質量スケールで観測することが重要となる。特に mg スケールでの観測は重力波検出器のような大規模な実験装置ではなくテーブルトップでの実験によって実現可能性があることから私たちの実験室ではそれを目指した研究が行われている [2]。

しかしながら、地上で観測を行うためには振動子を固定する機械的なサポートが必要不可欠であり、そのサポートからの熱雑音によって二つの振動子の間にエンタングルメント状態を生成することが困難となっている。一方で、宇宙に振動子を打ち上げることで機械的なサポートなしに振動子を駆動することができるが、衛星計画であるために膨大な時間と費用がかかるため観測の成功までには多大な時間を要すると考えられる [3]。

5 光学浮上

そこで、地上で機械的なサポートなしに振動子を浮かせることができれば、重力デコヒーレンスの観測の大きな妨げとなる機械的サポートからの熱雑音による影響を原理的になくすることが可能である。そのために用いられる手法として光学浮上と呼ばれるものがある。これは光の輻射圧力のみを用いて物体を浮上させる手法で、様々なセットアップでの光学浮上が提案されている [4,5]。

一般に $1 \mu\text{m}$ 程度の波長をもつ光子の光子数状態間のエネルギーギャップは

$$\Delta E_p = \hbar\omega \sim 10^{-19} \text{ J} \quad (2)$$

である。一方で室温における熱揺らぎの大きさは

$$\Delta E_t = k_B T \sim 10^{-23} \text{ J} \quad (3)$$

である。したがって、光子数状態間の遷移が外界の熱揺らぎによって引き起こされる確率は

$$P \propto \exp\left(-\frac{\Delta E_p}{\Delta E_t}\right) \sim 0 \quad (4)$$

となるため、レーザー光が外界の熱揺らぎに対してエネルギーのやり取りをすることはない。したがって、レーザー光のみを用いて部隊を浮上させると熱雑音を導入することなく物体を支持することができる。

6 実験の進捗

このような経緯から私たちは光学浮上させた微小鏡をエンタングルメントさせることにより、重力デコヒーレンスの観測を行うことのできる新しい実験セットアップを考案した。現在までに、浮上鏡の系の安定性解析や浮上鏡の感度計算によるエンタングルメントを生成するための実験パラメータの設定を行った。また、実際に浮上させる微小鏡の製作を企業に依頼し製作が完了している。

7 まとめ

重力が量子力学の枠組みの中で果たす役割の一つとして挙げられる重力デコヒーレンスの観測は巨視的な系でのエンタングルメント状態の崩壊時間として実験的に観測することが可能である。その観測のために私たちは光学浮上鏡を用いた観測実験を計画しており、理論計算および実験準備が進められている。本実験において重力デコヒーレンスの観測に成功すれば、巨視的な系において量子的な重ね合わせ状態が観測されない理由や、観測によって波動関数の波束の収縮が何故起こるのかといった量子力学における観測問題に対して大きな示唆を与えることができる。

Reference

- [1] Roger Penrose: *General Relativity and Gravity* 28, 5 (1996)
- [2] N. Matsumoto, Y. Michimura, et. al.: arXiv:1312.5031
- [3] R. Kaltenbaek G. Hechenblaikner et. al.: *Experimental Astronomy* 34, 2 (2012)
- [4] S. Singh, G. A. Phelps et. al.: *Phys. Rev. Lett.* 105, 213602
- [5] G. Guccione, M. Hosseini et. al.: *Phys. Rev. Lett.* 111, 183001 (2013)