

## 重力波検出器が量子重力を明らかにする!?

小森 健太郎 (東京大学大学院理学系研究科)

### Abstract

宇宙で最も激しい天体現象を観測しようというモチベーションから生まれた検出器が、ミクロの世界を司る根本的な事象を明らかにするかもしれない。かつて Glashow は宇宙論と素粒子物理がつながっているということをウロボロスの蛇になぞらえて表現したが、本講演でもスケールの異なる一見無関係に思われる 2 つのテーマが、実は強く結びついていることをお伝えする。重力波検出器と量子重力は、巨視的量子現象を介して結ばれているのである。

## 1 Introduction

重力波とは時空の歪みが伝播する波動である。重力波を観測することでブラックホールの内部情報など電磁波では分からない情報が分かるため、直接検出の意義は大きい。重力波の振幅は非常に小さく、人類が直接観測できるのは中性子星やブラックホールといったコンパクト天体の合体、あるいは超新星爆発など、宇宙で最も激しい天体現象から発生する重力波である。

一方、本講演で扱う量子重力とは、量子の世界で重力の果たす役割のことである。量子論における大きな謎として、なぜ量子性のデコヒーレンスや波束の収縮が起こるのかというものがある。時間に関して線形なシュレディンガー方程式からは考えられない、非線形で不可逆な振る舞いだ。こういったミクロの世界を司るトピックの一つとして、重力デコヒーレンスというもの理論的に示唆されている [1]。これは、時間とエネルギーの不確定性関係

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar$$

をモチーフに、 $\Delta E$  を重力エネルギー、 $\Delta t$  をデコヒーレンス時間とした予想である [2]。通常量子的にふるまうのは原子や分子といった  $\Delta E$  が非常に小さい物体であるため  $\Delta t$  が非常に大きくなってしまい、重力デコヒーレンスの効果は他のデコヒーレンス効果に埋もれてしまう。しかし  $\Delta E$  が大きくなれば、すなわち巨視的な物体の量子状態が実現できれば、これが観測できるのではないかと、という発想も生まれる。

重力波検出器と量子重力は、まさにこの巨視的量子現象によって結びつけられる。

## 2 Methods

重力波検出器は、その感度向上のためあらゆる努力がなされ、地面振動や熱雑音といった古典的な雑音は十分低減できるようになった。例えば日本で建設中の大型低温重力波望遠鏡 KAGRA はあらゆる古典雑音が量子雑音以下にまで低減される予定である [3]。

量子雑音には、散射雑音 (Shot noise) と輻射圧雑音 (Radiation pressure noise) の 2 種類が存在する。前者は光子の統計的な揺らぎによって検出器の出力が揺らぐこと、後者は光子が鏡に与える反作用が揺らぐことに起因しており、その大きさはパワーの大小によるトレードオフの関係にある。トレードオフを決めるのは標準量子限界 (Standard Quantum Limit; SQL) であり、ハイゼンベルグの不確定性関係から決まる原理的な測定限界となっている。

この SQL は、検出器にとっては単なる感度限界でしかないのだが、鏡の変位測定精度での SQL 到達は、量子測定という観点から見れば鏡の量子状態を実現したというベンチマークでもあり、テーブルトップでの到達の意義は大きい。SQL 到達の必要条件として Shot noise と Radiation pressure noise の直接観測が挙げられ、前者はあらゆる実験で観測されているのに対し後者は観測例が数例しかない。中でも、上述の重力デコヒーレンス時間が熱的デコヒーレンス時

間よりも短くなるほどの巨視的な物体での Radiation pressure noise 観測は、つい昨年達成されたばかりである [4]。ここで用いられた技術は SQL 到達にも大いに役立つ。

さて、SQL に到達したとき、例えば重力波検出器の場合 2 枚の鏡がエンタングルする [5]。エンタングルの持続時間、すなわちデコヒーレンス時間を測定することで、重力デコヒーレンスの検証が可能となる。

さらに、SQL を超えた感度での測定や鏡の基底状態の達成など、重力波検出器は巨視的量子現象の格好の実験場にもなりうるのである。

[5]H Eberhard et al. "Entanglement of Macroscopic Test Masses and the Standard Quantum Limit in Laser Interferometry," *Physical Review Letters*, **100**, 013601 (2008)

### 3 Conclusion

重力波検出器と量子重力は巨視的量子現象によって結びつく。重力波検出器を用いることで、これまでにない巨視的量子現象の実現が達成される。また、将来的には SQL を超えた感度での測定も予定されているなど、様々な面白さ、可能性を秘めた実験となっている。

### Acknowledgement

本実験は現安東研究室 PD の松本伸之氏のアイデアである。未熟な私の面倒を辛抱強く見て頂いていることへの感謝を、ここに謝辞として記しておく。

### 参考文献

- [1] C Anastopoulos and B L Hu, "Decoherence in quantum gravity: issues and critiques," *Journal of Physics: Conference Series* **67**, 012012 (2007)
- [2] R Penrose, "On Gravity's Role in Quantum State Reduction," *General Relativity and Gravitation*, **28**, 5 (1996)
- [3]Y Aso et al. "Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector," *Physical Review D*, **88**, 043007 (2013)
- [4]N Matsumoto et al. "Classical Pendulum Feels Quantum Back-Action," arXiv: 1312.5031 (2013)