

高感度レーザー干渉計による巨視的力学系の標準量子限界の研究

物質系専攻 076147 森 匠
 指導教員：三尾 典克(准教授)

Key words : Laser interferometer, Standard quantum limit, Fabry-Perot resonator, High-Q mechanical oscillator

【背景】

量子力学は、その本質において、計測という行為が対象に与える影響が不可避に存在することを主張する。すなわち、極限的な感度を必要とする計測においては、計測そのものの反作用も考慮されなければならない。しかしながらそれは微小な効果であり、特に本研究で扱うようなマクロな力学系の変位や振動の精密計測を目標とする分野においては、近年まではまず問題にならない大きさのものであった。

現在、レーザー干渉計による変位計測の感度限界を原理的に定められているのは、干渉計に入射する光子の数と位相に対する不確定性原理から直接的に導かれる、標準量子限界(standard quantum limit, SQL)と呼ばれる感度である。SQL は光の位相雑音として与えられるショットノイズと、鏡に作用する輻射圧による雑音の変位換算二乗和を最小化する、ある入射光強度に対して与えられる。すなわち SQL とは、計測のプロブである光によって与えられる反作用を最小化することであり、量子力学的な感度限界を定めるものであるとすることができる。

レーザー干渉計の SQL 自体は30年以上前に提唱された概念であるが[1]、未だに実験的な実証はなされていない。しかし、現在の干渉計の感度はこの限界が問題となる領域にまで踏み込もうとしており、次世代型の重力波検出器の目標感度は100Hz付近でSQLレベルに定められている[2]。現在、SQLは早期の実現及びその性質について詳細な解析を行うことが不可欠となってきていると言える。これが本研究の動機であり、SQL感度の計測を実現することが最終的な目標になる。

SQLを実現させるための超高感度のレーザー干渉計には、極めて質量の小さな、光子との運動量相互作用を顕在化させられるレベルのサイズの鏡が必要となる。近年、NEMS技術の発達により極めて微小な力学系の加工が可能となったことにも支えられて、微小力学系を用いたSQLへのアプローチが現在盛んに行われている[3]。加えて、高強度且つ高安定の光源が必須である。本研究においては、力学系と光学系双方の面からSQLに必要な要素を考察するための実験を行った。

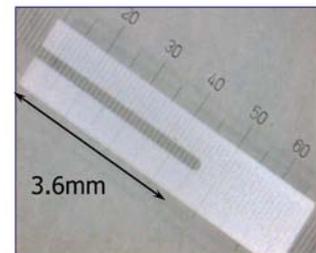


図1 音叉型水晶振動子

【力学系に関する実験及び結果】

SQLを達成するためには微小且つ損失の小さい振動子を鏡として用いる必要があるが、この2点の両立は一般に困難であると言われる。振動子のスケールが下がるに従い、表面における損失がQ値の劣化に寄与する割合が大きくなることがその理由として挙げられる。そこで、微小力学系の達成できるQ値の上限についてまず見積もる必要があり、試験的な力学系を用意して測定を行った。

今回我々が選んだのは音叉型の水晶振動子(図1、有効質量0.6mg、32kHz)である。音叉モードの振動を交流電圧で励起し、He-Neレー

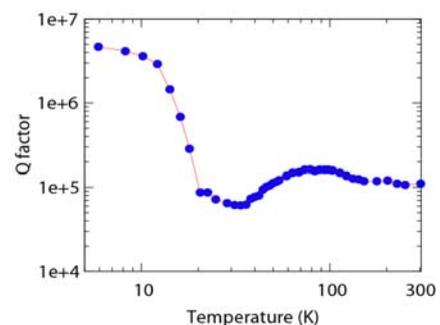


図2 水晶振動子の音叉モードのQ値の温度依存性

ザーでその振動を検出することによりその損失の大きさを見積もった。

空気中で 10^4 程度であった Q 値は、真空中に置くことにより 10^5 程度まで増加した。更に、4K パルス管冷凍機により振動子を冷却し、 Q 値の最大値として 5.8K において 5×10^6 という値を得た。その温度依存性を図 2 に示す。振動子の温度はレーザーの入射窓からの熱輻射により制限されている。また、20-50K における Q 値の劣化は、振動子の不純物などによると考えられるが、10K 以下では最早その影響はないと考える。

この質量及び Q 値を文献[4]と比較することにより、この振動子の Q 値は他の微小振動子と比べても遜色なく、非常に良い力学特性を持つことが示された。

光学系は熱雑音を避け、また高い Q 値を利用するため、低温下に置くことを考えている。このときの SQL 感度レベルと、大きな雑音源になると考えられる熱雑音の大きさを図 3 に示す。

また、必要な光強度を示しておく。

振動子の共振の強さを見る限りでは、SQL の観察は極めて困難であると考えられる。それは、共振点においては熱雑音など外来の雑音もまた増幅されてしまい、振動子が高い Q 値を持っている利点を生かすことができないからである。しかしながら、共振から離れた周波数をターゲットにすることで、SQL 感度は他の雑音を上回る可能性があることを見出した。

80kHz 近辺において、SQL レベルの雑音は熱雑音に対して $S/N \sim 10$ 程度で観察されることが期待される。このときの変位感度は $10^{-19} \text{m/Hz}^{1/2}$ 程度となる。また、必要な光強度 2MW という値は光共振器の作成により十分に実現可能な値である。実効的な光強度は光共振器のフィネスの 2 乗に比例して強めることが可能であるため、例えば光源の強度 1W に対して、フィネス数千の光共振器の鏡としてこの水晶振動子を用いることで SQL レベルが達成されると考えられる。

【光学系に関する実験及び結果】

SQL の観察のために光学系に要請されるのは、高安定度且つ光共振器による実効的な光強度の増大である。図 4 の実験系を組み、その制御法及び変位感度計測の実証実験を行った。

共振器長を短く取るにより、光源の周波数雑音による共振器の感度の劣化を防ぐことができる。そのため、共振器長として 1mm 以下(0.7mm 程度)という微小共振器長に設計を行った。共振器の線幅は 3.9MHz、フィネスは 5 万以上という高フィネスの共振器が得られた。

共振器を共振状態にロックするために、PDH 法による共振器

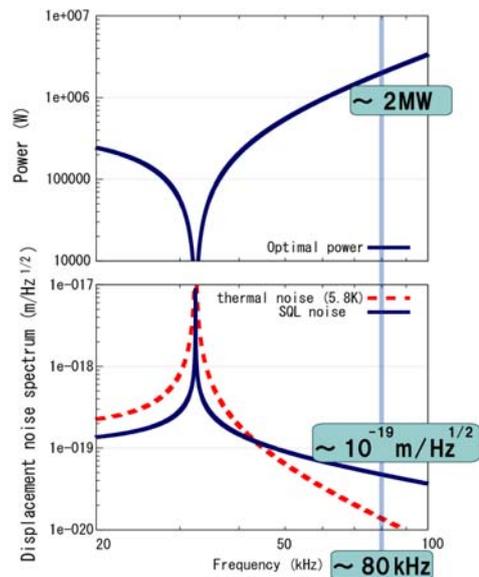


図 3 水晶振動子を用いた場合の熱雑音と SQL 感度の比較

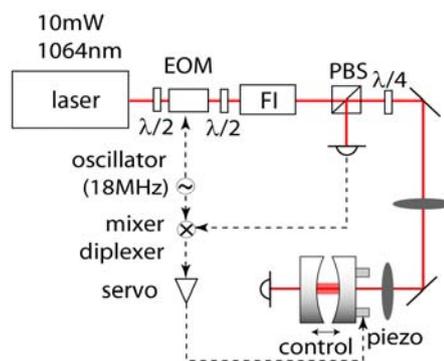


図 4 微小光共振器の変位感度測定のための光学系

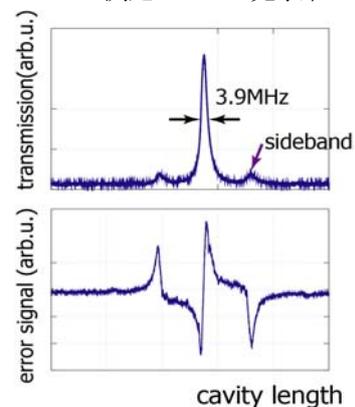


図 5 上：共振時の透過光
下：PDH 法による誤差信号

長の制御を行った。得られた透過光及び誤差信号を図5に示す。この信号を Fabry-Perot 共振器の入射側の鏡に接着したピエゾ素子に返すことで共振器長を制御した。

また、誤差信号のレベルに対する系の雑音によってこの光共振器の変位感度を下げた。そのスペクトルを図6に示す。高感度の変位干渉計として機能していることを確認した。現在の感度は電気系などの雑音に支配されている可能性があり、更なる高精度化が可能であると考えられる。

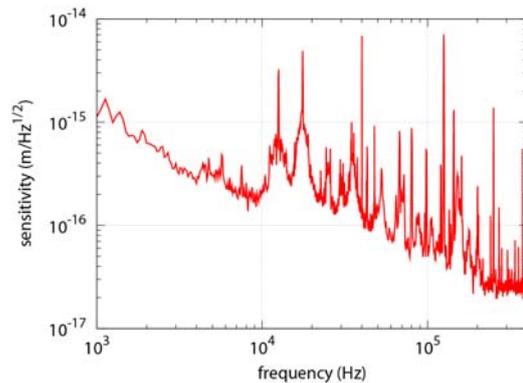


図6 変位感度スペクトル

【まとめ】

レーザー干渉計の SQL の観察を目標として、その要素として考えられる力学系・光学系についてそれぞれ実験を行い、その可能性を議論した。

まず、力学系については音叉型の水晶振動子を試験的に選択し、その力学特性について測定を行った。低温化に伴い Q 値は上昇し、最大で 5×10^6 程度を記録した。これは非常に高い値であり、他の微小振動子の実験と比べても遜色ないものであることが分かった。更に、振動子の共振から外れた周波数で変位計測を行うことで、SQL 感度は熱雑音よりも十分に大きいレベルで観察される可能性を見出した。

また、力学系に照射される光強度を実効的に強め、また光源のパッシブな安定化を目的として、高フィネス且つ共振器長を短くとした Fabry-Perot 光共振器を作成しその制御及び変位感度の測定を行った。フィネス 50000 という極めて高い光共振器が得られ、共振点にロックをかけることで高感度の変位干渉計として機能することを確認した。

力学系光学系の両面から得られた知見をもとに、SQL の観察が期待される。

【参考文献】

- [1] V. B. Braginsky and F. Y. Khalili, *Quantum Measurement*, Cambridge University Press, New York (1992)
- [2] S. Daniel and LIGO collaboration, *Class. and Quantum Grav.*, **11** (2008) 114041
- [3] T. Caniard et al., *Opt. and Spectr.*, **103** (2007) 225, M. Poggio et al., *Phys. Rev. Lett.*, **99** (2007) 017201, *Appl. Phys. B*, **3** (2007) 417, D. Kleckner and D. Bouwmeester, *Nature*, **444** (2006) 75, A. Naik et al., *Nature*, **443** (2006) 193 など
- [4] K. L. Ekinci and M. L. Roukes: *Rev. Sci. Instrum.*, **76** (2005) 061101

【論文・学会発表】

1. T. Mori, S. Moriwaki, and N. Mio, “Mechanical Q-factor Measurement of a Quartz Oscillator at Cryogenic Temperature”, *Appl. Phys. Express*, **1**, 077002 (2008)
2. S. Moriwaki, T. Mori, K. Takeno, and N. Mio, “Frequency Discrimination Method Making Use of Polarization Selectivity of Triangular Optical Cavity”, *Appl. Phys. Express*, **2**, 016501 (2009)
3. 第 68 回応用物理学会学術講演会(北海道工業大学、2007 年 9 月)
口頭発表 「光による微小力学系の制御」
4. 第 55 回応用物理学会関係連合講演会(日本大学理工学部船橋キャンパス、2008 年 3 月)
口頭発表 「光による微小力学系の制御 II」
5. 第 69 回応用物理学会学術講演会(中部大学、2008 年 9 月)
ポスター発表 「微小力学系の標準量子限界の観察に向けた超高感度変位干渉計の開発」
6. 第 56 回応用物理学会関係連合講演会(筑波大学、2009 年 3 月)(予定)