
高感度レーザー干渉計による 微小力学系の標準量子限界の研究

構成

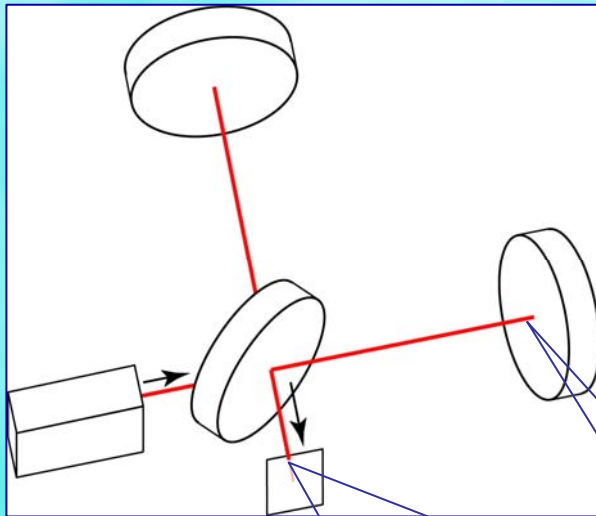
1. 干渉計の標準量子限界とは
2. 標準量子限界に必要な要素
3. 実験(1)力学系
4. 実験(2)光学系
5. まとめ

三尾研究室 森 匠

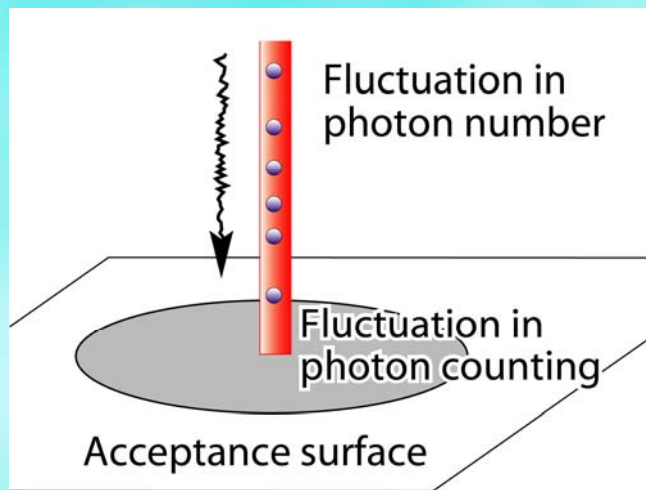
レーザー干渉計の標準量子限界(1)

- **量子力学: 物体の位置と運動量を同時に任意の精度で測定することが不可能であることを主張する**
 - Heisenbergの不確定性原理
- **計測の感度: 究極的には測定対象、もしくは測定系の量子的な性質に支配される**
 - これまではマクロな力学系に対しては殆ど問題ない量であった
 - 近い将来に問題となる可能性

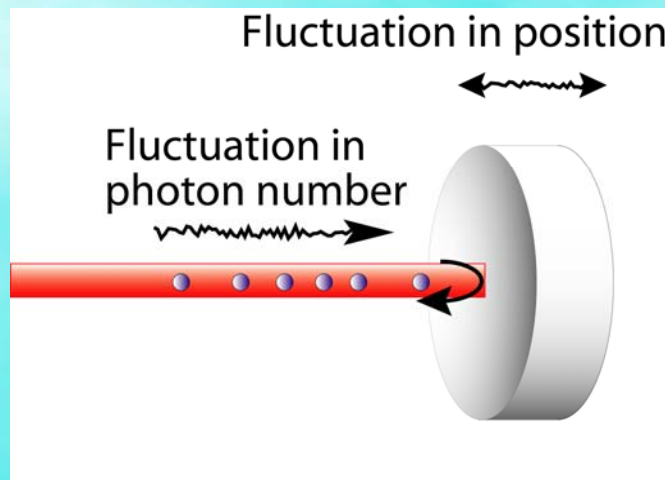
レーザー干渉計の標準量子限界 (2)



- Michelson干渉計
 - 光子数の量子的揺らぎ
- 2つの雑音メカニズム
 - 検出ショットノイズ
 - 輻射圧雑音



検出ショットノイズ $\propto P^{-1/2}$



輻射圧雑音 $\propto P^{1/2}$

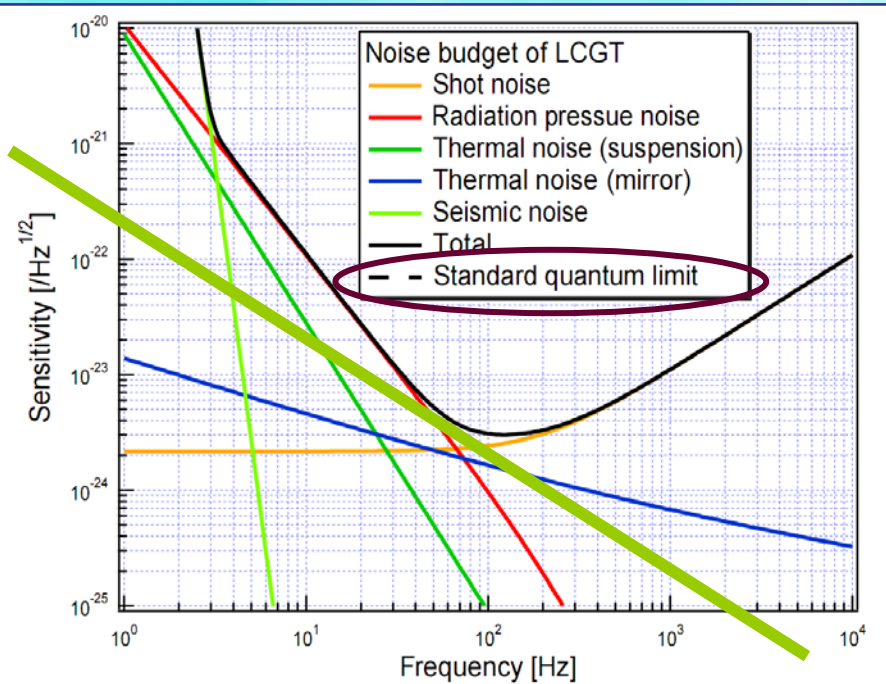
レーザー干渉計の標準量子限界 (3)

検出ショットノイズ $\propto P^{-1/2}$

輻射圧雑音 $\propto P^{1/2}$

- 2つの雑音はある入射光強度で最小化される
 - →標準量子限界 (Standard Quantum Limit, SQL)
 - 不確定性原理から直接的に導かれる限界
- 計測行為がもたらす雑音の最小化
- 古典力学と量子力学の境界領域
- 未だに観察はされていない
 - 検出ショットノイズは高周波で観測されている

重力波検出器とSQL



- 次世代型検出器：100Hz付近でSQL感度を実現させる予定
- 輻射圧雑音は未だに確認されていない
- 早期のSQL観測の必要性

3Hz

100Hz

地面振動

輻射圧雑音

検出ショット
ノイズ

SQLの観察への要請

- 必要な光強度を達成する
- 他の雑音を極限的に落とす
 - 熱雑音など

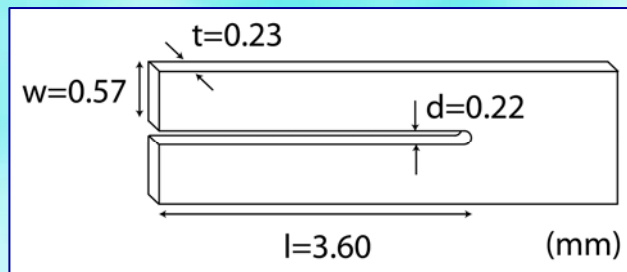
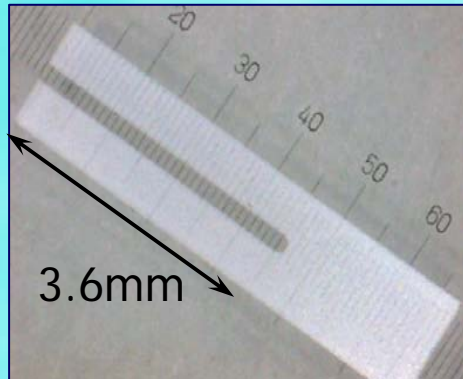
$$\langle x_{\text{thermal}}^2(\omega) \rangle = \frac{4m_0\omega_0^2 k_B T}{\omega Q} |\chi(\omega)|^2$$

- 光学系に対する要請
 - 共振器による光強度の増大
 - 光源の極限的な安定化
- 鏡に対する要請
 - 質量が小さいこと
 - 機械的ロスが小さいこと
 - 低温に置くこと

微小力学系を用いたSQLへの道

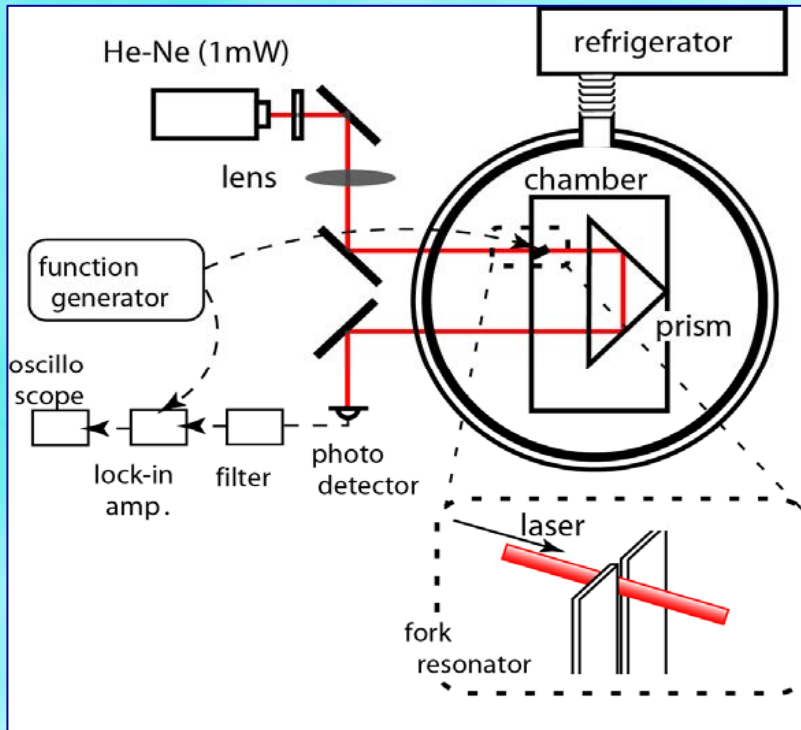
- **意義: テーブルトップの実験でSQL=巨視的物体にはたらく量子性を議論する**
- **微小力学系のSQLについては、微細加工技術の発達に伴い、近年盛んに議論されている**
 - **微小力学系は一般に損失が大きい**
 - **高いQ値という観点からSQLを目指した例は少ない**

力学系に関する実験 音叉型水晶振動子

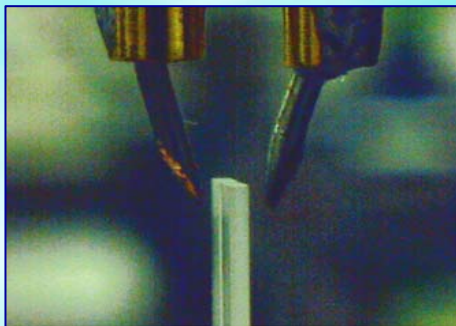


- 試験的な力学系に対して、その力学特性を測定
- 音叉型水晶振動子
 - 時計の周波数参照として用いられているもの
 - 高い安定性・小さな内部損失
 - 音叉モード振動
 - 振動数: 32 kHz.
 - 有効質量 : 0.63 mg

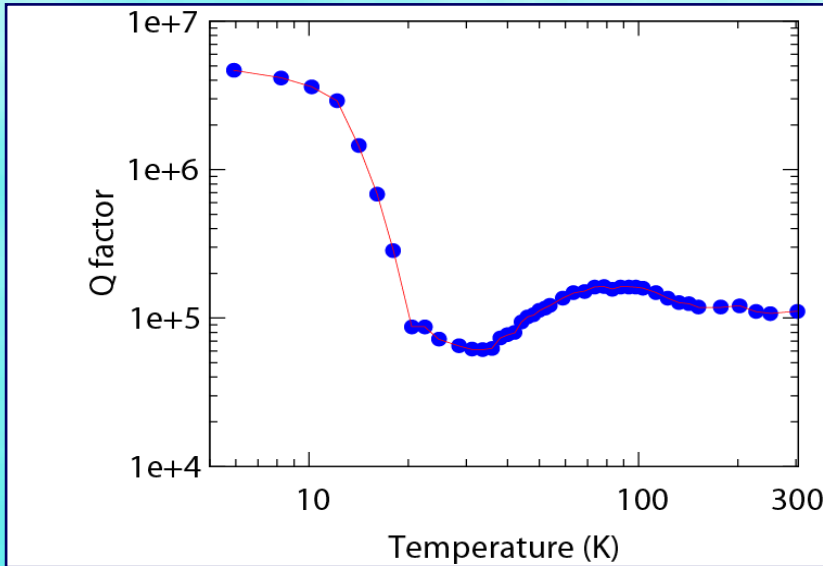
Q値測定光学系



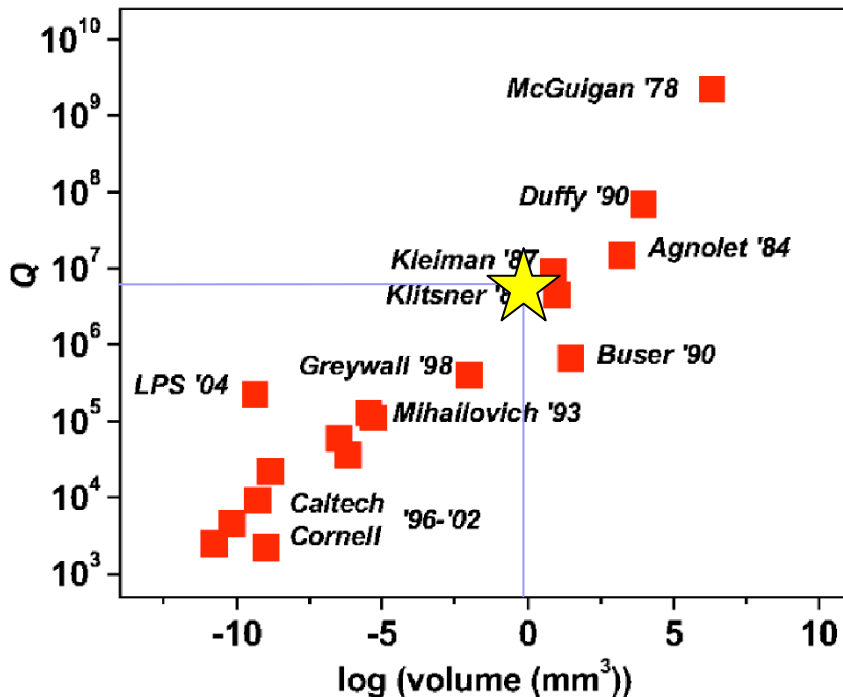
- 振動子の内部損失を測定
- 交流電場で振動を励起
- He-Neレーザーをセンサとして振動の減衰を測定
- 真空度: 1Pa以下
- 温度: 5.8K



Q値の温度依存性

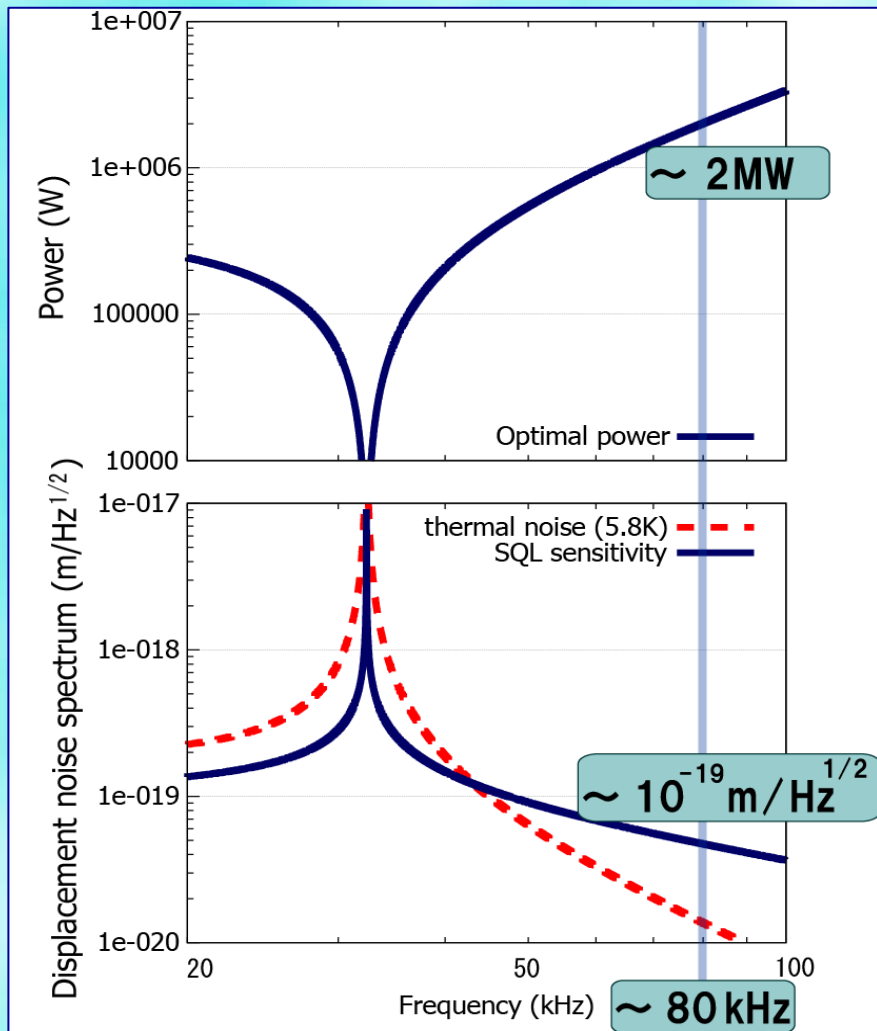


- 室温・空気中: 10^4
- 室温・真空: 10^5
- 低温 (5.8K): 5×10^6
- 残留ガスの影響はない



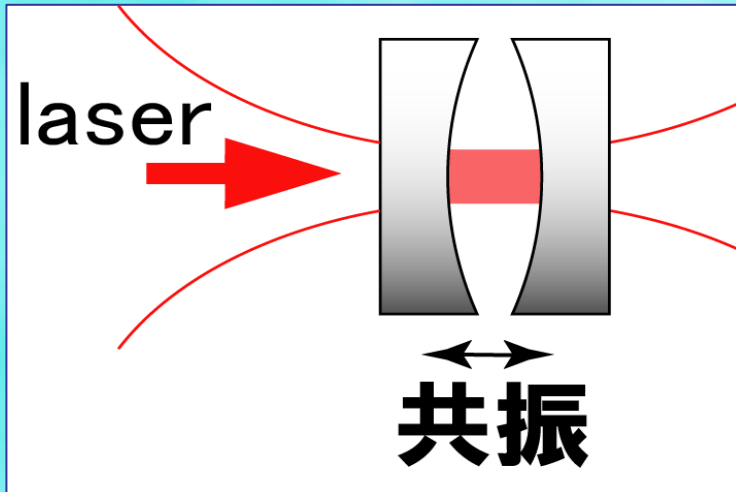
- 他の微小振動子との比較:
遜色ない特性を示している

SQLへのパラメータ考察



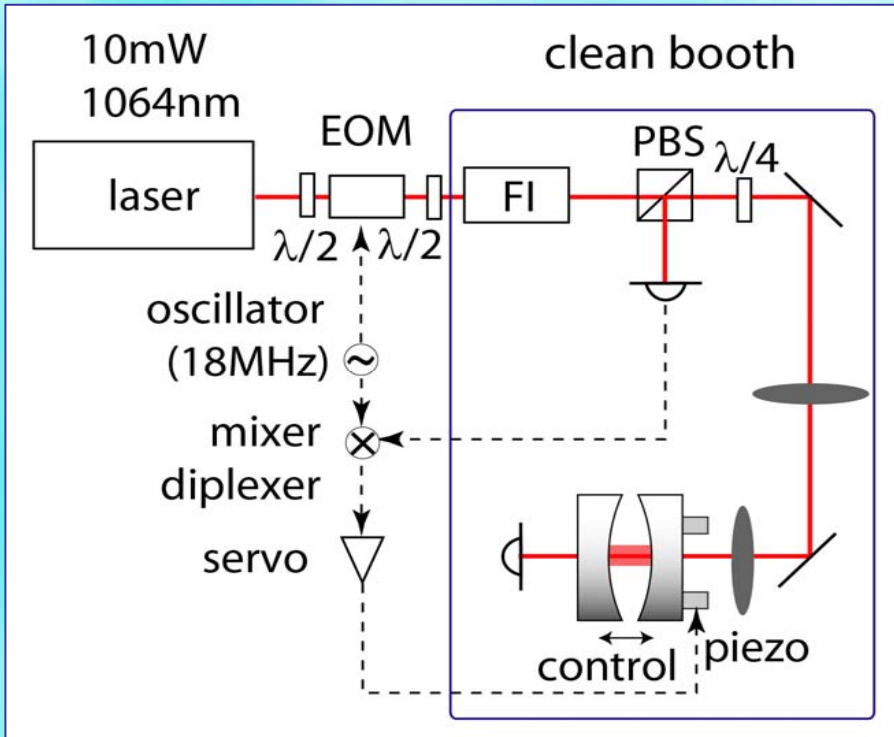
- 振動子の側面を鏡として用いた場合のSQL
- 共振周波数から外れた場所でSQL感度が熱雑音を上回る
- 莫大な光強度が必要

光学系への要請

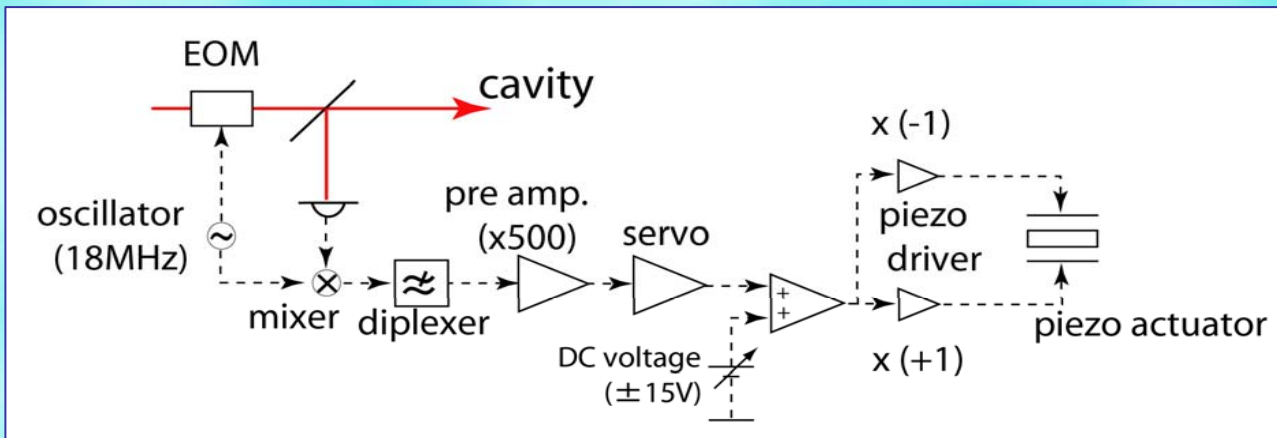


- 輻射圧雑音：フィネスの2乗で大きくなる
 - SQLを実現するためには入射光強度1Wに対してフィネス数千が必要
- 共振器長を短くとる
 - 光源の周波数雑音に対するパッシブな安定化
- 高フィネス共振器による感度の実証実験を行った

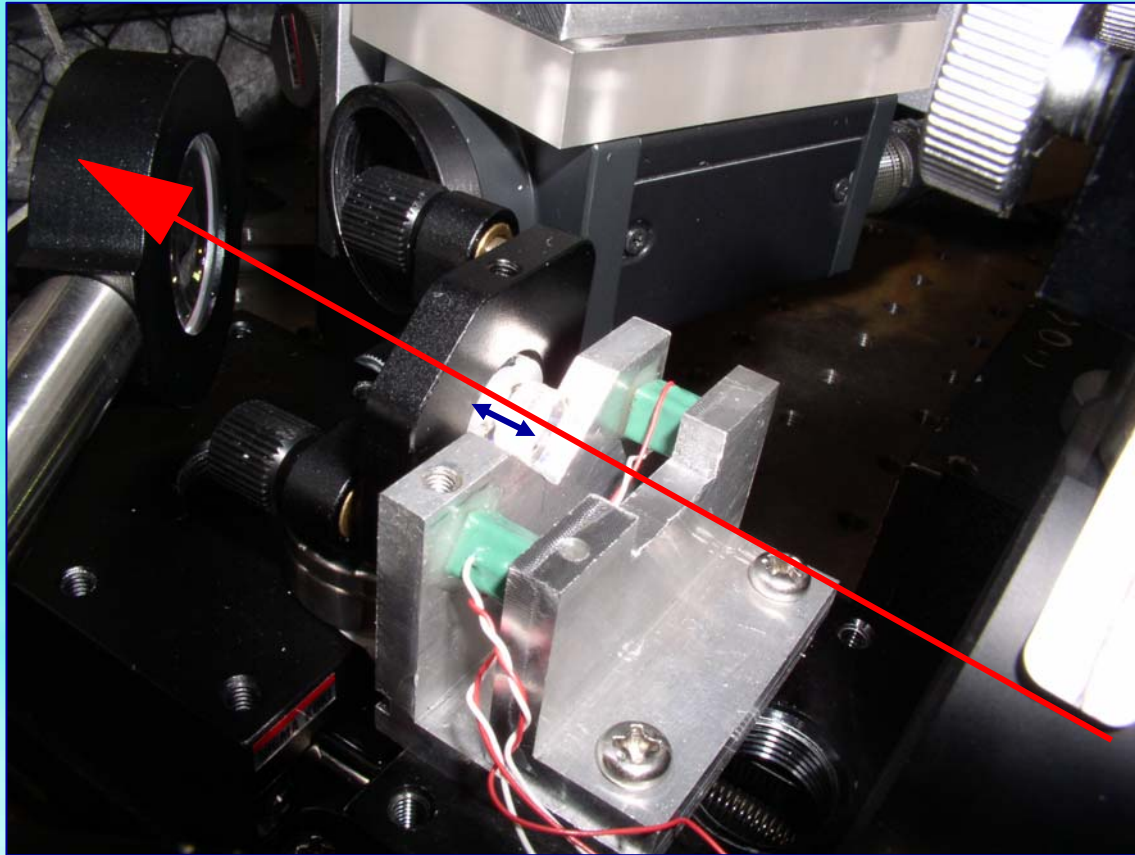
光学系



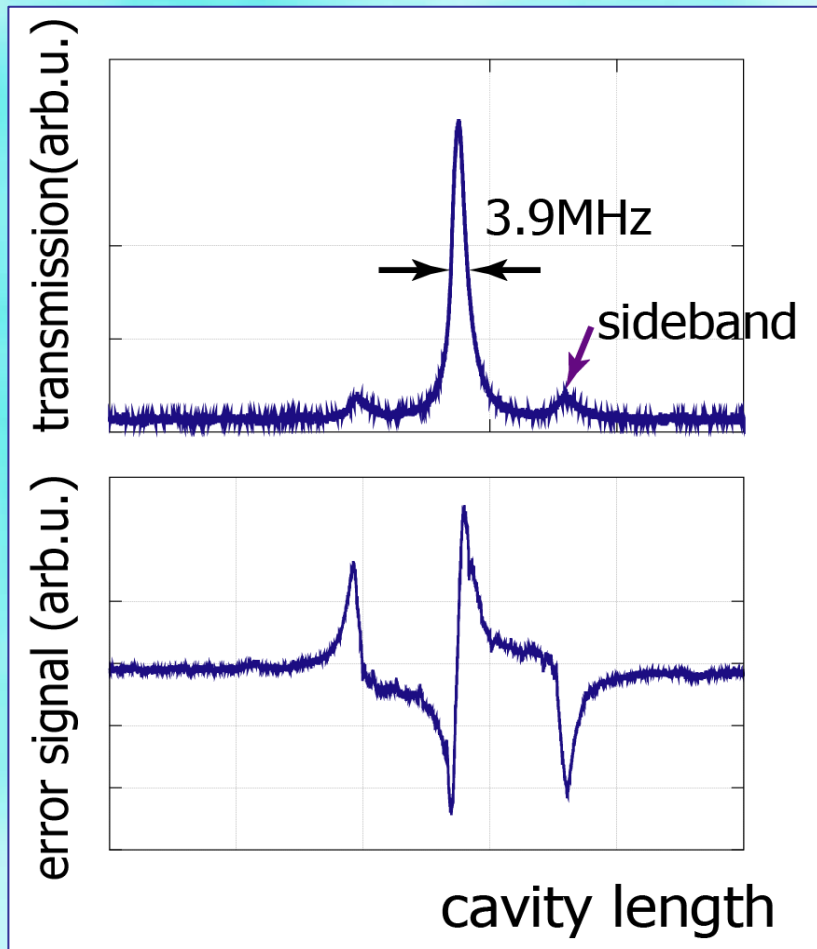
- 共振器長: 0.7mm
- 双方の鏡を一次元方向に走査して最適点を探す
- 入射側の鏡を制御する
- PDH法により共振状態に制御する



共振器の様子

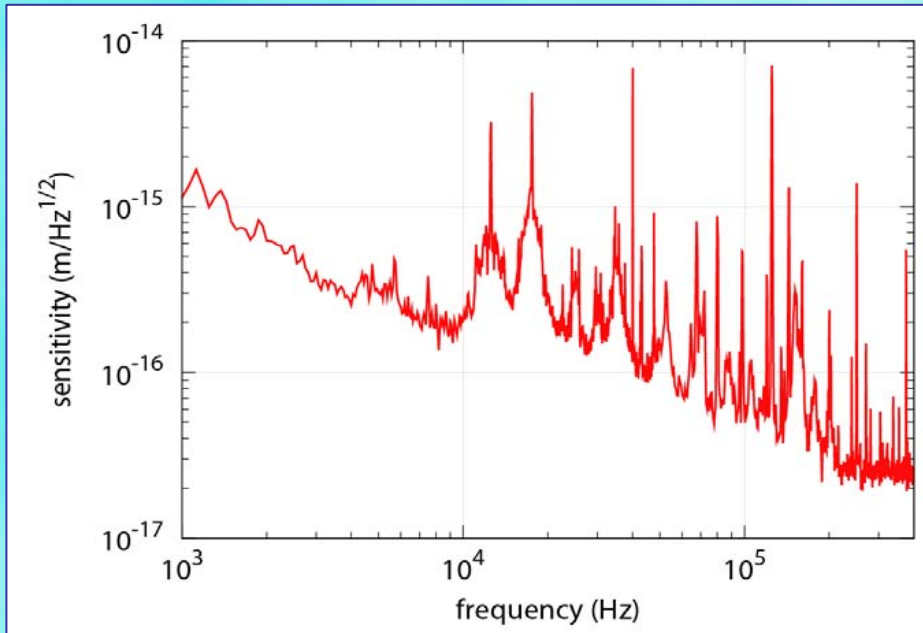


フィネスの測定・誤差信号の取得



- フィネス～51000
- 鏡の反射率：
 $R=99.994\%$
- 共振器によって1710倍程度光を強めることが可能に
- 共振状態に制御した

変位感度



- $7 \times 10^{-17} \text{ m}/\text{Hz}^{1/2}$
@80kHz
- 光源の周波数雑音はまだ見えていない
- 周囲の雑音が見えている状態と考えられる


まとめ

- レーザー干渉計のSQLの観察を目標として、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。
- 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、最大で 5×10^6 程度を記録した。更に、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、高フィネスか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51000という極めて高い光共振器が得られ、共振長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。

SQLに必要な光強度

$$\begin{cases} \langle x_{\text{rad}}^2(\omega) \rangle = \frac{2Ph}{\lambda c} |\chi(\omega)|^2 \\ \langle x_{\text{shot}}^2(\omega) \rangle = \frac{h\lambda c}{8\pi^2 P} \end{cases} \quad |\chi(\omega)| = \frac{1}{m_0 [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega_0^2/Q)^2]^{1/2}}$$

: 鏡の機械感受率


$$\begin{cases} P_{\text{SQL}}(\omega) = \frac{\lambda c}{4\pi |\chi(\omega)|} \\ \langle x_{\text{SQL}}^2(\omega) \rangle = \frac{h |\chi(\omega)|}{\pi} \end{cases}$$

m_0 : mirror mass

λ : wavelength of light

ω_0 : resonant frequency

Q : quality factor of the mirror