

# DetChar MTG

2014年7月22日(火)

譲原浩貴

- 以下の論文についてレビューを行う

Impact of upconverted scattered light on advanced interferometric  
gravitational wave detectors (2012)

<http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-20-8-8329>

# Abstract

- 第2世代の重力波検出器のinstallが進んでいる
- 第1世代と比べて、10~40Hzの感度が数桁向上する
- 散乱光を原因としたnon-linear noise couplingのコントロールが重要
- この論文では新しいtime domain解析とLIGO livingstonの地面振動(2年間)を用いた散乱光の減衰に対するrequirementを出した

# 光学配置と鏡の表面

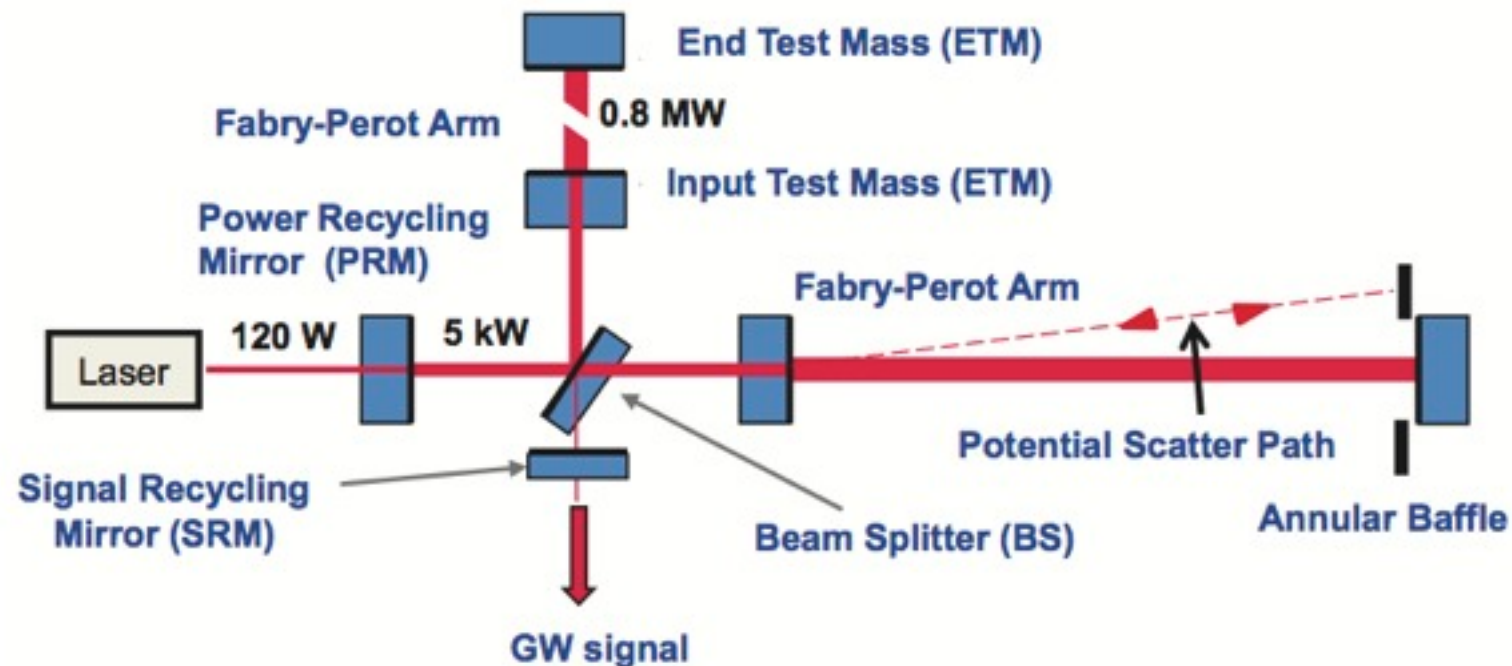


Fig. 1. Schematic of an advanced gravitational wave detector.

180Wのレーザーを用いて、最終的に750kWをFabry-Perot cavityに蓄える  
これを実現するためにはそれぞれの鏡は35ppm以下で反射する必要がある  
これは鏡表面の運動のRMSが0.3nm以下に揃っている必要がある  
これが実現できれば鏡の変動によってレーザーが散乱する効果も無視でき  
なくなる

# 散乱光の影響

次の2つに分類できる

- ・ 鏡の運動のずれがレーザーの波長以下の場合  
-> 運動の周波数と同じ周波数に線形な効果を及ぼす
- ・ 鏡の運動のずれがレーザーの波長以下の場合  
-> “fringe-wrapping”, 低周波の鏡の運動が高周波にup-convertされる

この論文ではup-convertを避けるための光学系へのrequirementを求めた

# LIGOにおける低周波の雑音源

- “oceanic microseism”(海洋脈動?)
- 海洋の波の運動により起こる  
季節変動あり  
LIGO sitesでは0.1~0.4Hzにピークを持つ
- 北大西洋で起こったmicroseismは時折LIGOの運転を妨げる  
2カ所のLIGOにcoherentに影響を与える

# 散乱イベント

1. 光がcavityから散乱される
2. cavityの外層(tube表面?)で反射され鏡の方向へ再び散乱される
3. arm cavity modeに戻る必要がある

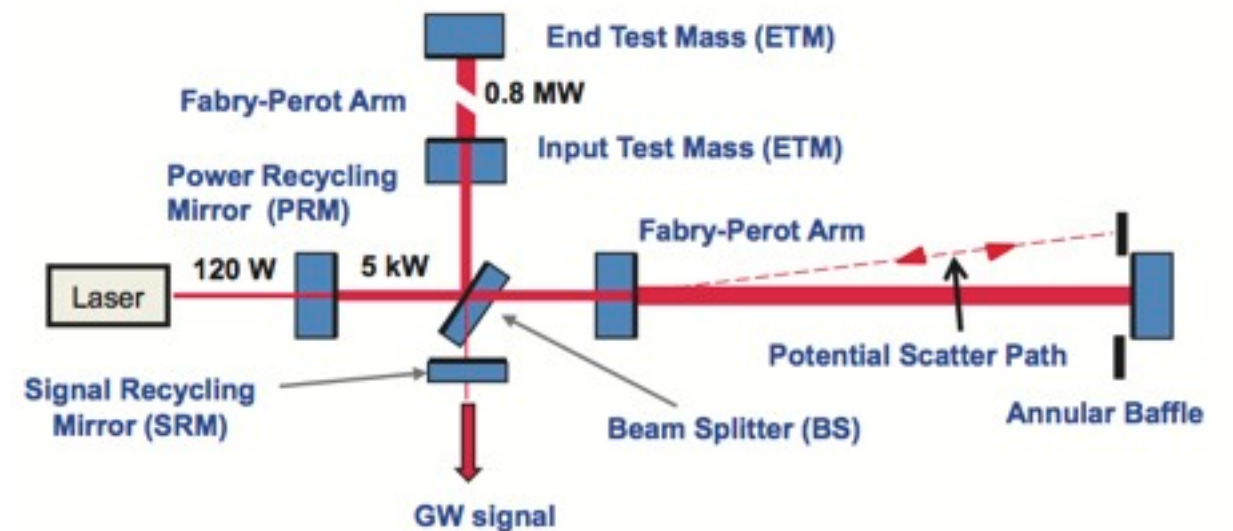


Fig. 1. Schematic of an advanced gravitational wave detector.

これらの散乱イベントは減衰しておく必要があるが、  
upconversionを防ぐためには24桁以上の減衰が必要となる(論文の結果)

# 伝達関数の導出 1

干渉計の腕に蓄えられるレーザー光はcomplexな電場として表される

$$E(x,t) = E_0 \exp[i(\omega t - kz + \phi(t))]$$

$k$ は波数,  $\omega$ は角振動数

$z$ は任意の平面からの距離  $\rightarrow z=0$ とする

phase modulationの振幅と周波数をそれぞれ $\phi_m$ と $\omega_m$ として  
Bessel展開すると、cavity内でのある平面の電場は

$$E(t) = E_0 \exp[i\omega t] \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\phi_m) \exp[in\omega_m]$$

重力波による変移  $x_G = hL \rightarrow$  位相ずれ  $\phi_G = 2kx_G$

$\rightarrow \phi_G \ll 1$ . なので、 $n=-1, 0, 1$ だけを見る

$$E_G(x,t) \simeq E_0 \exp[i\omega t] (1 + ikx_G \exp[\pm i\omega_G t]).$$

## 伝達関数の導出 2

散乱光には式(2)に amplitude transfer coefficient  $A$  をかけて

$$E_s(t) = AE_0 \exp[i\omega t] \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(2kx_s) \exp[in\omega_s].$$

ここで  $x_s$  は周波数  $\omega_s$  での散乱運動の振幅(?)

---

$$\frac{x_{eff}}{\Phi} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{4\pi} \left[ \frac{m}{rad} \right].$$

$$\frac{x_{eff}}{RIN} = 2 \frac{\Gamma}{M} \frac{1}{\Omega^2 - \omega^2} \frac{2}{c} P_0 [m].$$

ここで  $\Gamma$  is the coupled cavity gain,

$M = 40$  kg the mirror mass,

$\frac{\Omega}{2\pi} = 0.45$  Hz : suspensionの固有振動数



# 散乱断面積の見積もり

散乱断面積Aは以下のように定義される

$$\frac{\delta I}{I} = \left(\frac{\lambda}{R}\right)^2 BRDF_m^2 BRDF_b \delta\Omega_b \equiv A^2.$$

$\delta I/I$  はpower scattering coefficient

$\delta\Omega_b$  : baffleに対する立体角

Bi-directional Reflectivity Distribution Function

: 鏡の表面の構造で決まる関数(?)

coating前のaLIGOの鏡で測定

aLIGOのion milledされた鏡を仮定すると、  $\delta I/I = 0.9 \times 10^{-24}$

→  $A \sim 10^{-12}$

initial LIGOのcoatingされた鏡と比較していく

# 地面振動の測定

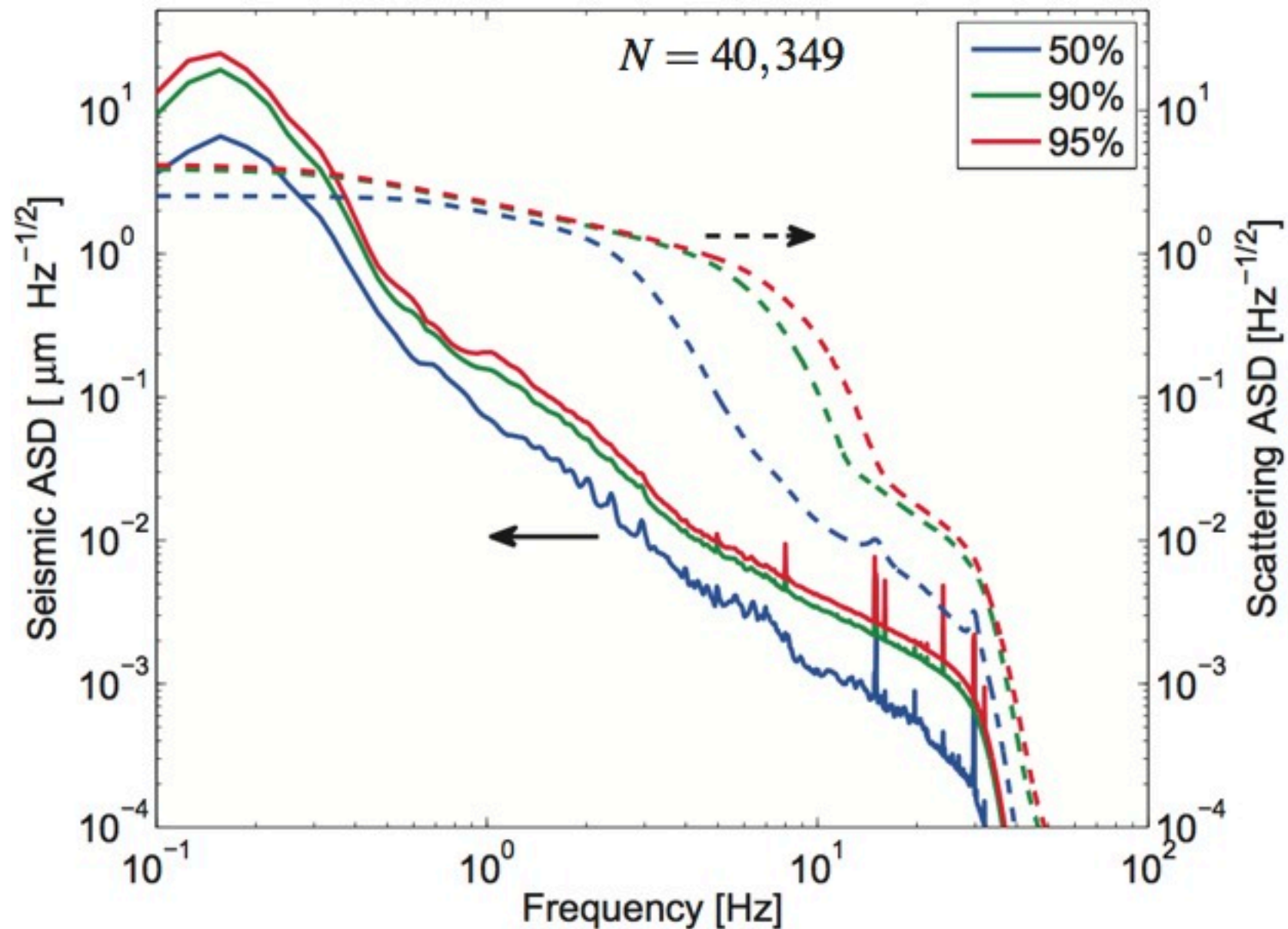
地面振動の効果を定量化するために、ground displacement,  $x_s(t)$  を測定する

LIGO S5+S6の期間測定した、データは956日分

ノイズスペクトルを伝達関数(5), (6)とFourier変換測定データで見積もる

- データを2048秒ごとに分割
- Welch' method(データを半分overlapさせる)とHanning window

# 推定された地面振動と散乱光のスペクトル



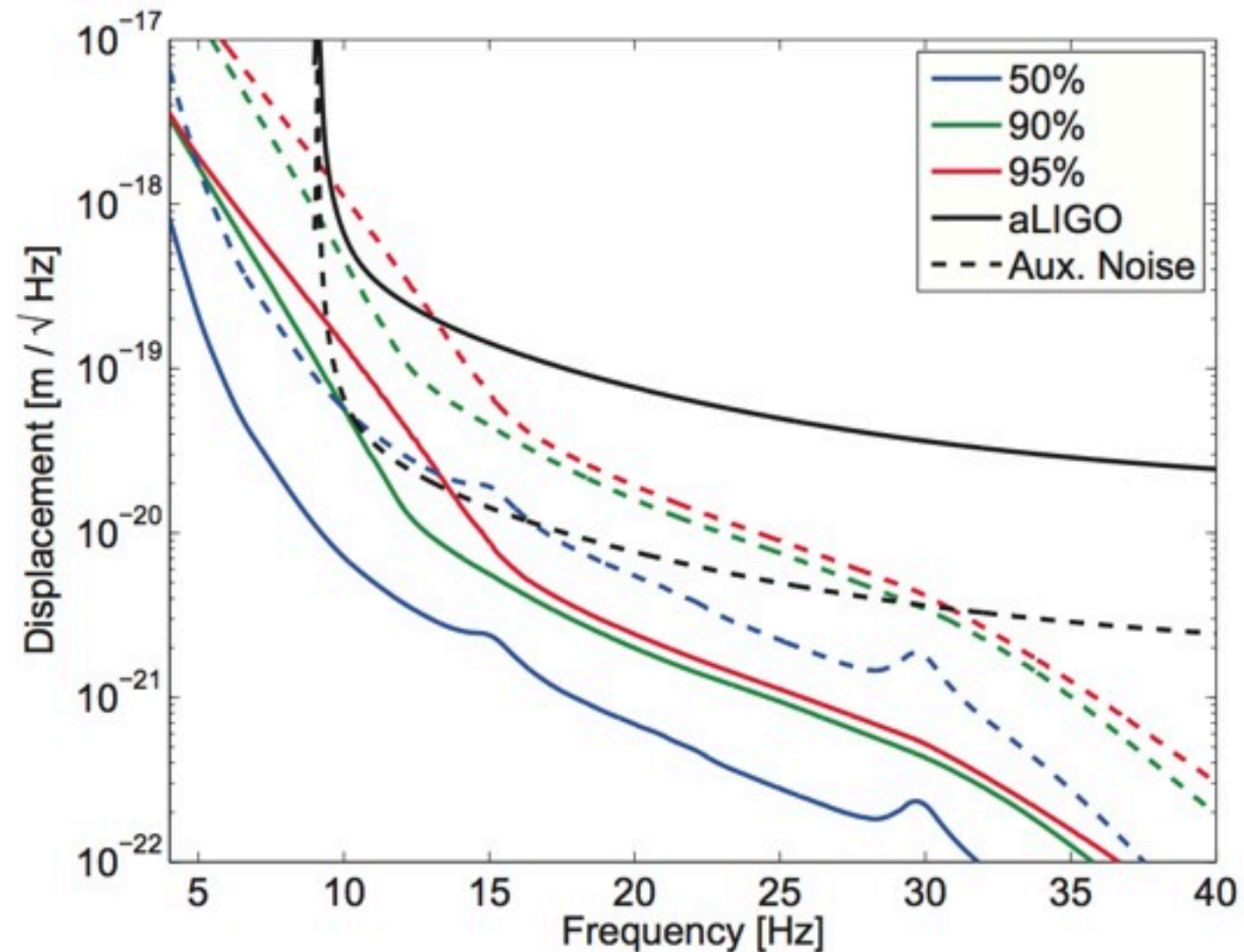
solid : Amplitude Spectral Densities (ASD) of the seismic motion.

dashed : ASD of the upconverted scattered field.

0.1~0.4Hzはmicroseismがdominate

これらのpeakには15Hzあたりまでのupconversion sidebandが伴う

## Requirement - 2種類の鏡で結果を比較



aLIGO :  $A = 1 \times 10^{-12}$

initial LIGO :  $A = 8 \times 10^{-12}$

ion milled opticsとbaffleならばAux. noiseには影響しない、ただし  
最大級のmicroseismが来る場合は除く

## conclusion

- ・ 第2世代重力波検出器のperformanceに関して散乱光の影響を見積もった
- ・ もしaLIGOでion-milledされた鏡も散乱光の減衰もうまくいっていないと、低周波で妥協する必要がある
- ・ 10Hz以下のnoise performanceを向上させるために、散乱光のcontrolのperformance向上が必要
  - 干渉計の動きに合わせて、baffleの位置を制御し、散乱光によるup-conversion noiseを取り除く
- ・ 第3世代重力波検出器は地下に位置するので、aLIGOよりもさらに低周波が重要になる
  - 最近の研究で、地下深くではmicroseismの影響をあまり受けない(?)