
超高周波重力波検出器 の現状

東大天文 D3

阿久津 智忠

もくじ

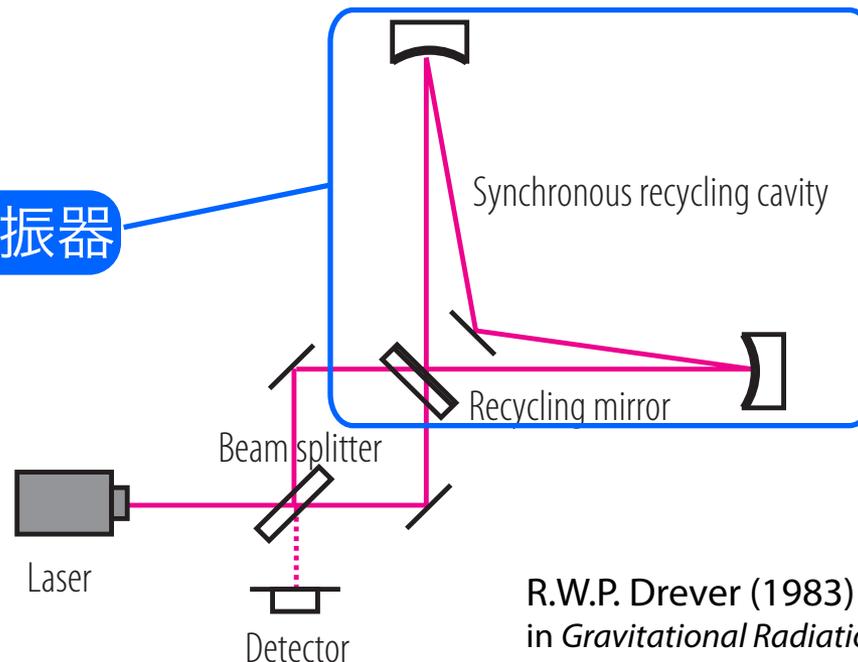
1. 概要
2. 重力波への応答
3. 開発の現状
4. まとめ

1. 概要

重力波の直接観測の試み:
1MHz以上はほとんど手がつけられていない

- 目的: 100MHz 重力波の直接測定 (による上限)
- 方式: 75cm シンクロナス・リサイクリング干渉計
(マイケルソン型より狭帯域だが高感度)

リサイクリング共振器



概要(つづき)

主な波源: 重力波の背景放射のような stochastic な信号を想定。

検出器を2台作成 => 相関をとってS/Nを上げる

全天平均・相関後 $h \simeq 2 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$ を目標とする

(単体、真上からで $h \sim 4.7 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$)

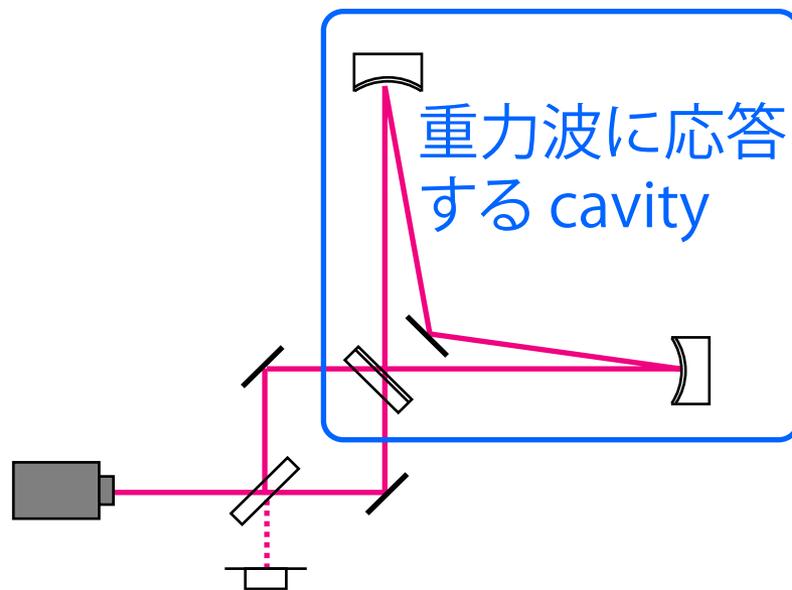
現状

- 2台とも構築(まずは大気中で) 場所: 国立天文台/三鷹 ATC
- 感度: $h < 10^{-16} \text{ Hz}^{-1/2}$ (2台とも)

100MHzでの直接観測では**最高感度**

同じ光学条件のもと、マイケルソン型で到達しうる感度を超えた

2. 重力波への応答

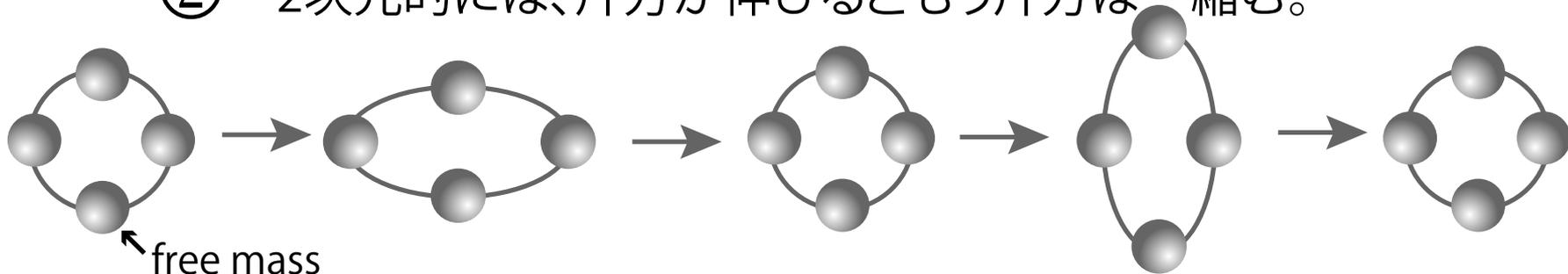


重力波が来ると、

① 光路長が変化する (簡単に言えば)

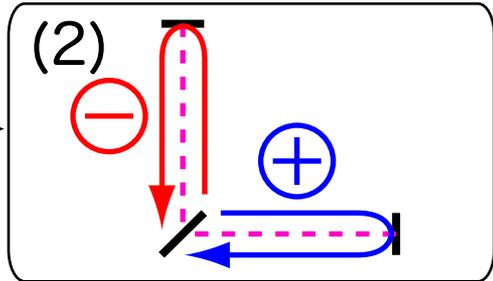
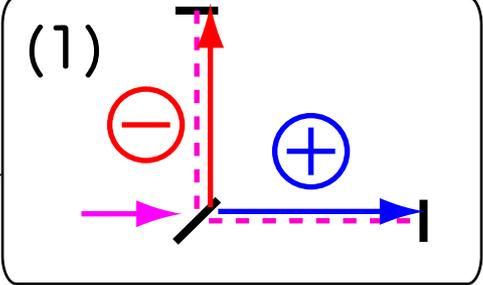
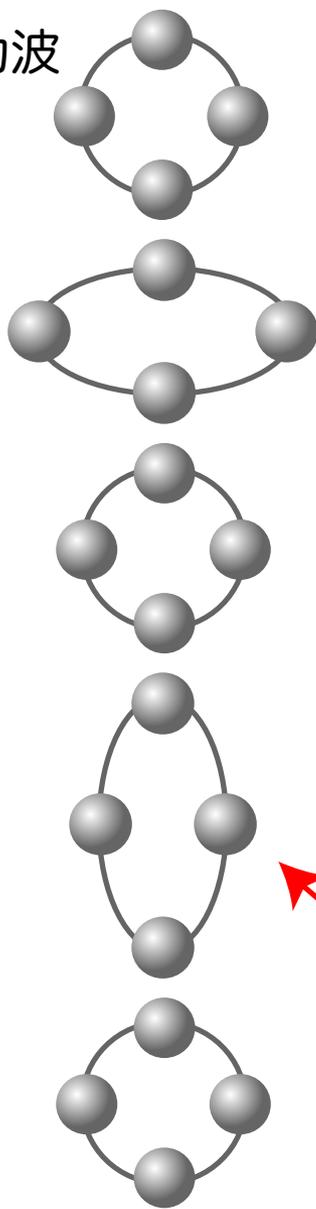


② 2次元的には、片方が伸びるともう片方は 縮む。



マイケルソン型の場合

重力波

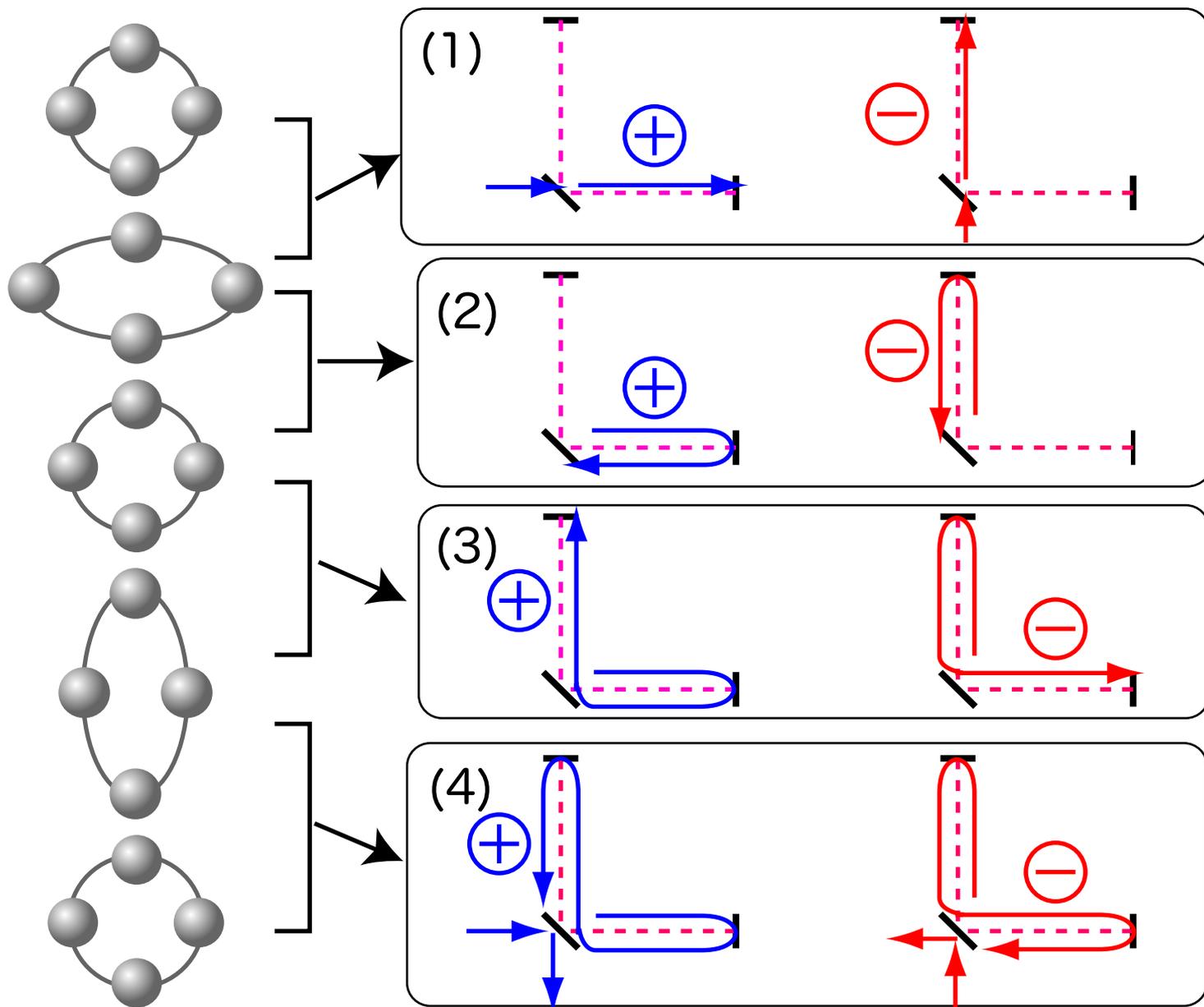


重力波の1/2周期 > 光の滞在時間

(or 1周する時間)

になると、
光が腕に滞在中に重力波の位相が反転して
光に蓄積する位相量が減ってしまう。

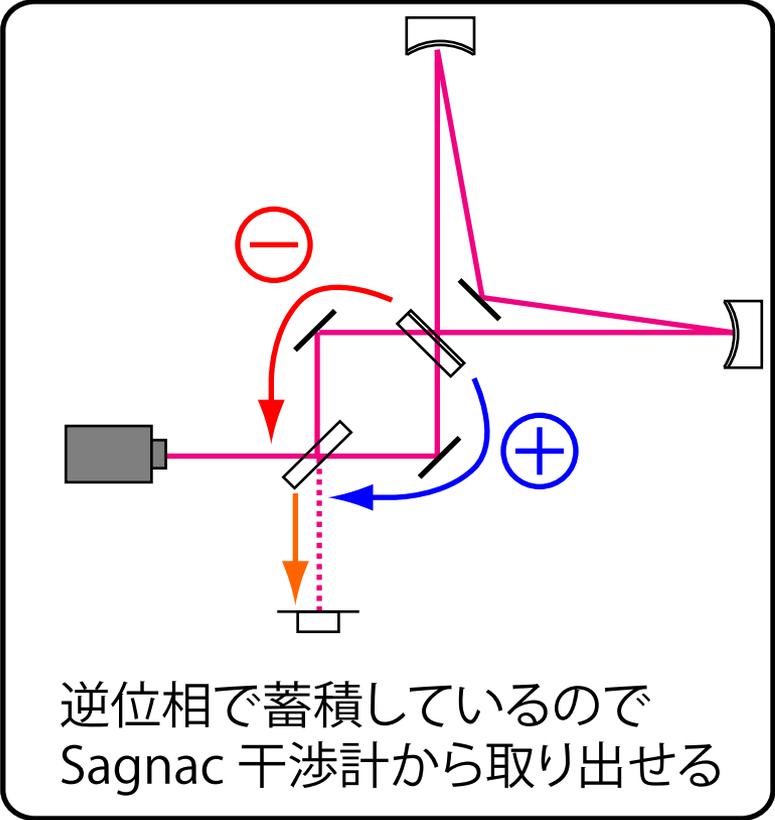
- 高周波では、腕を伸張しても感度は改善しない
- つまり高周波の重力波検出には不向き



重力波の周期 = 光が1周する周期
 であれば、cavity 内部の光の位相変調量は増え続ける

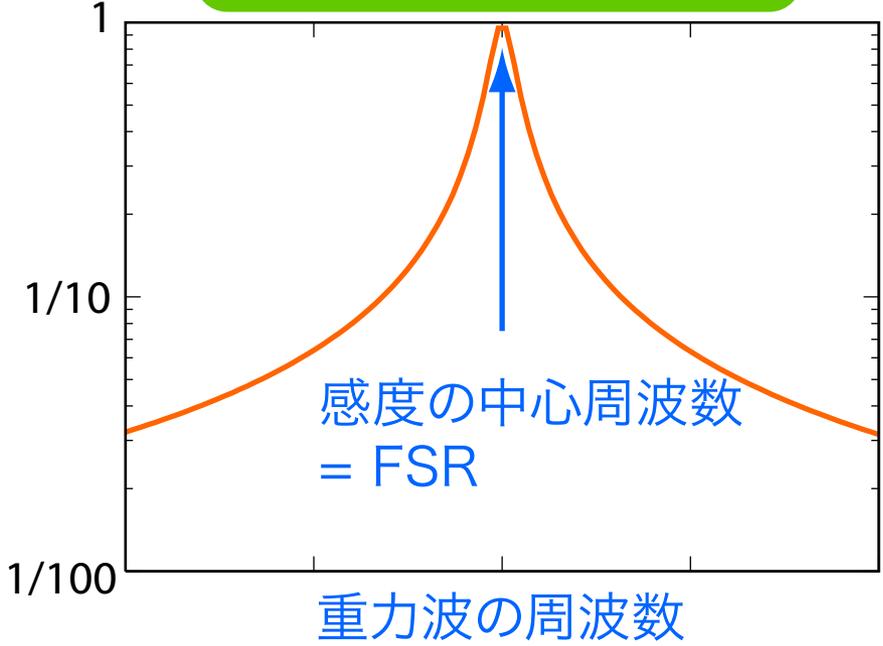
フィネスを高くすると 高感度化

特定の周波数でだけ



重力波に対する応答
(適当に規格化)

かわりに帯域がせまくなる

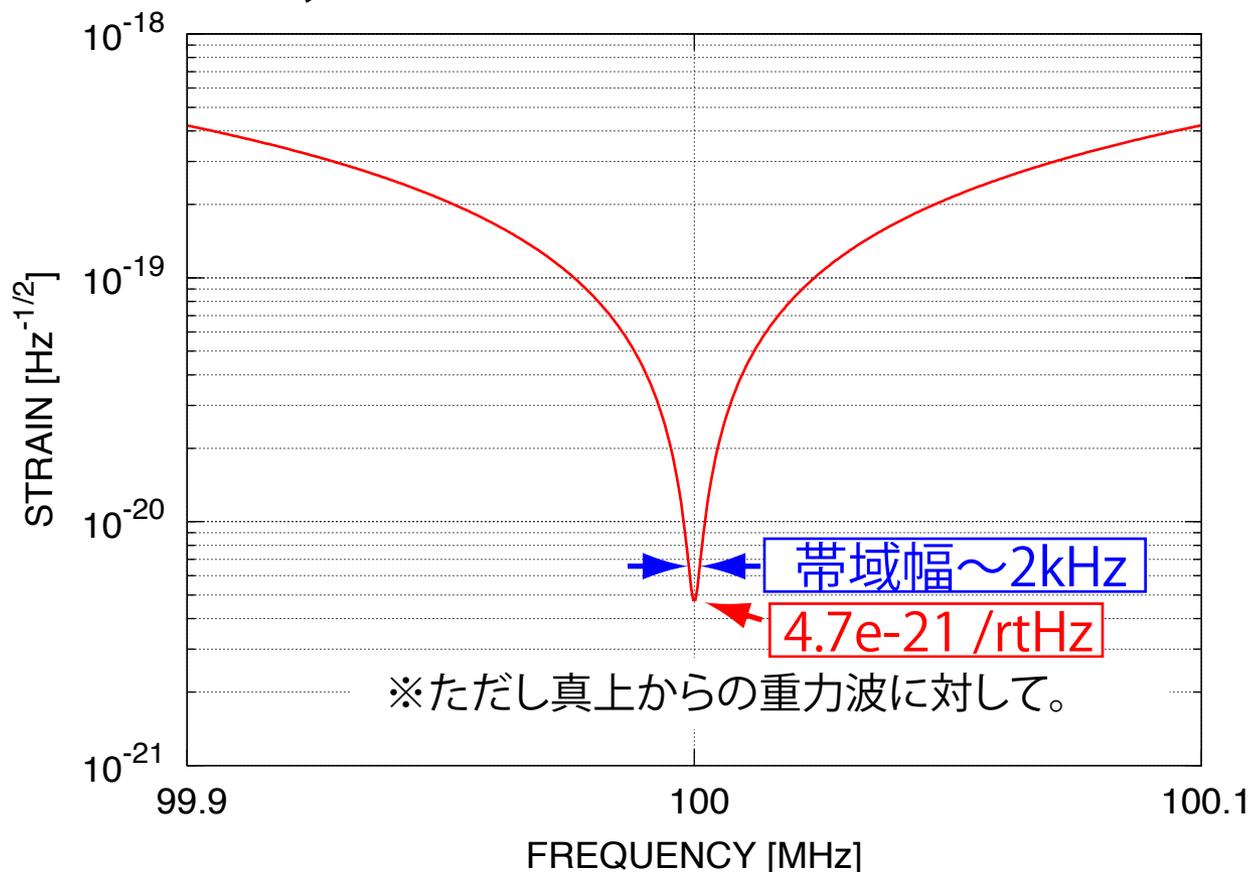


最終的な目標感度 (計算値)

- Shot noise のみを考えている (熱雑音や輻射圧雑音もある?)

Laser光源 500mW

Cavity の finesse = 4.5×10^4 (i.e. FWHM ~ 2 kHz)

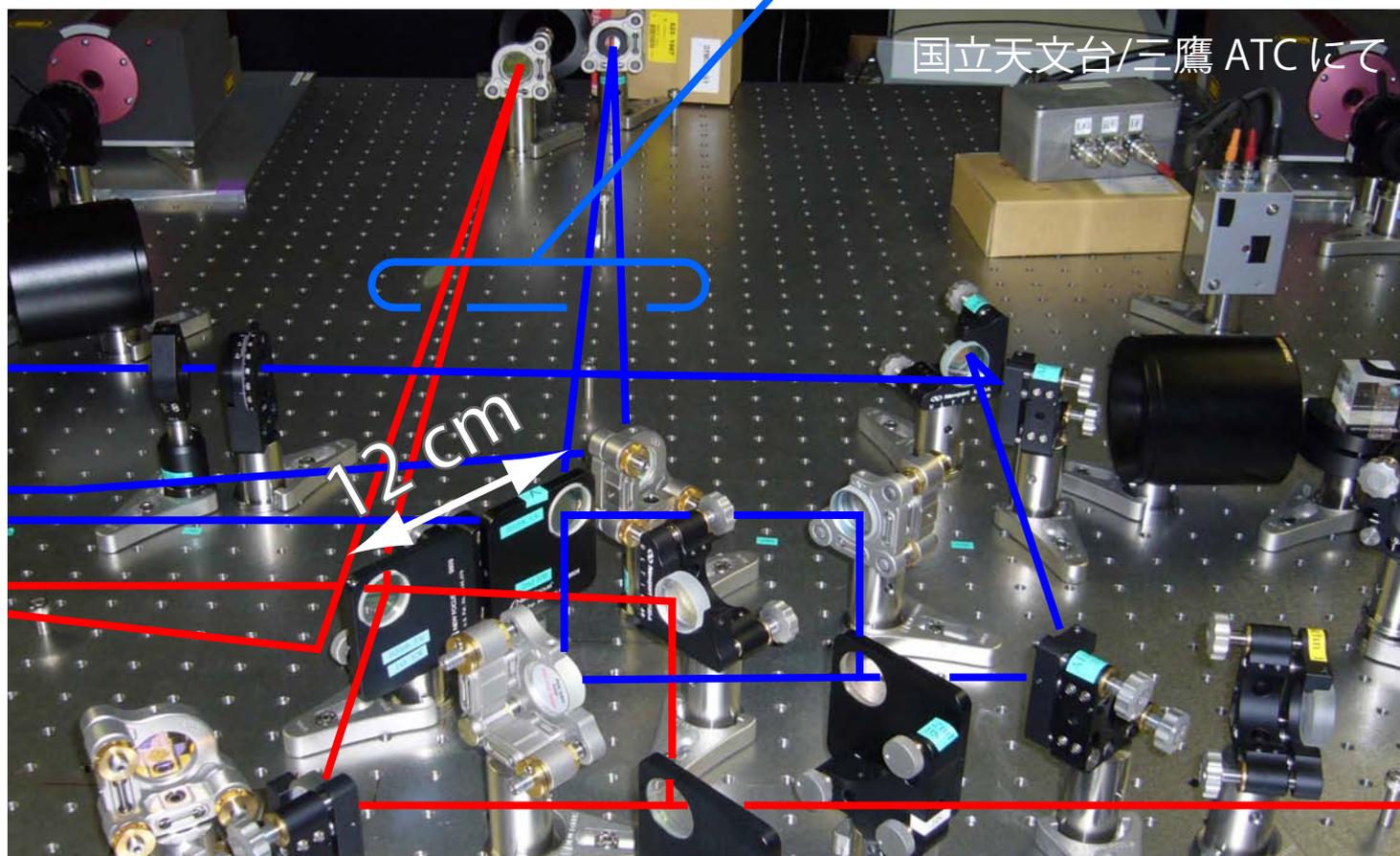


3. 開発の現状

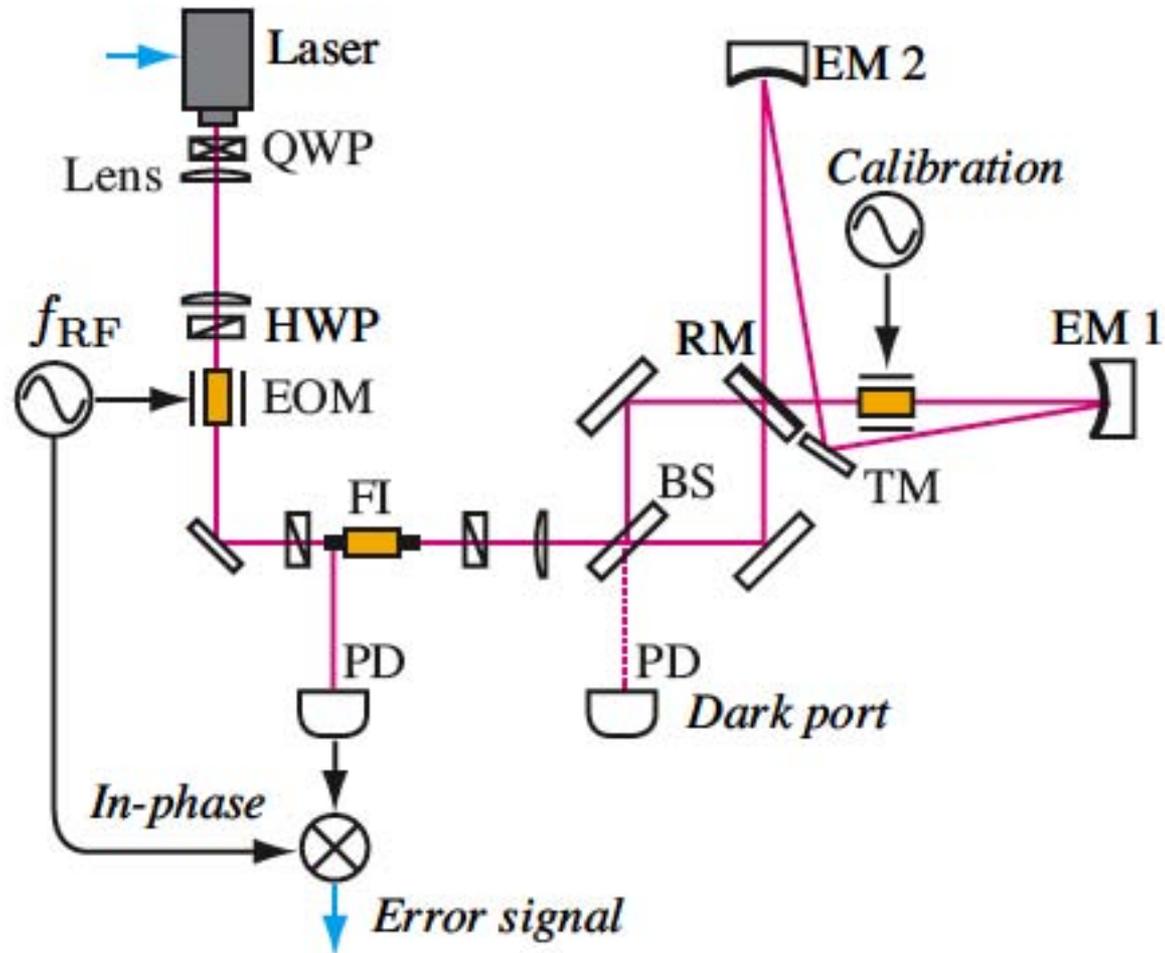
赤: Detector 1

青: Detector 2

Stochasticな信号の相関解析のため
Cavityどうしはなるべく近づけてある



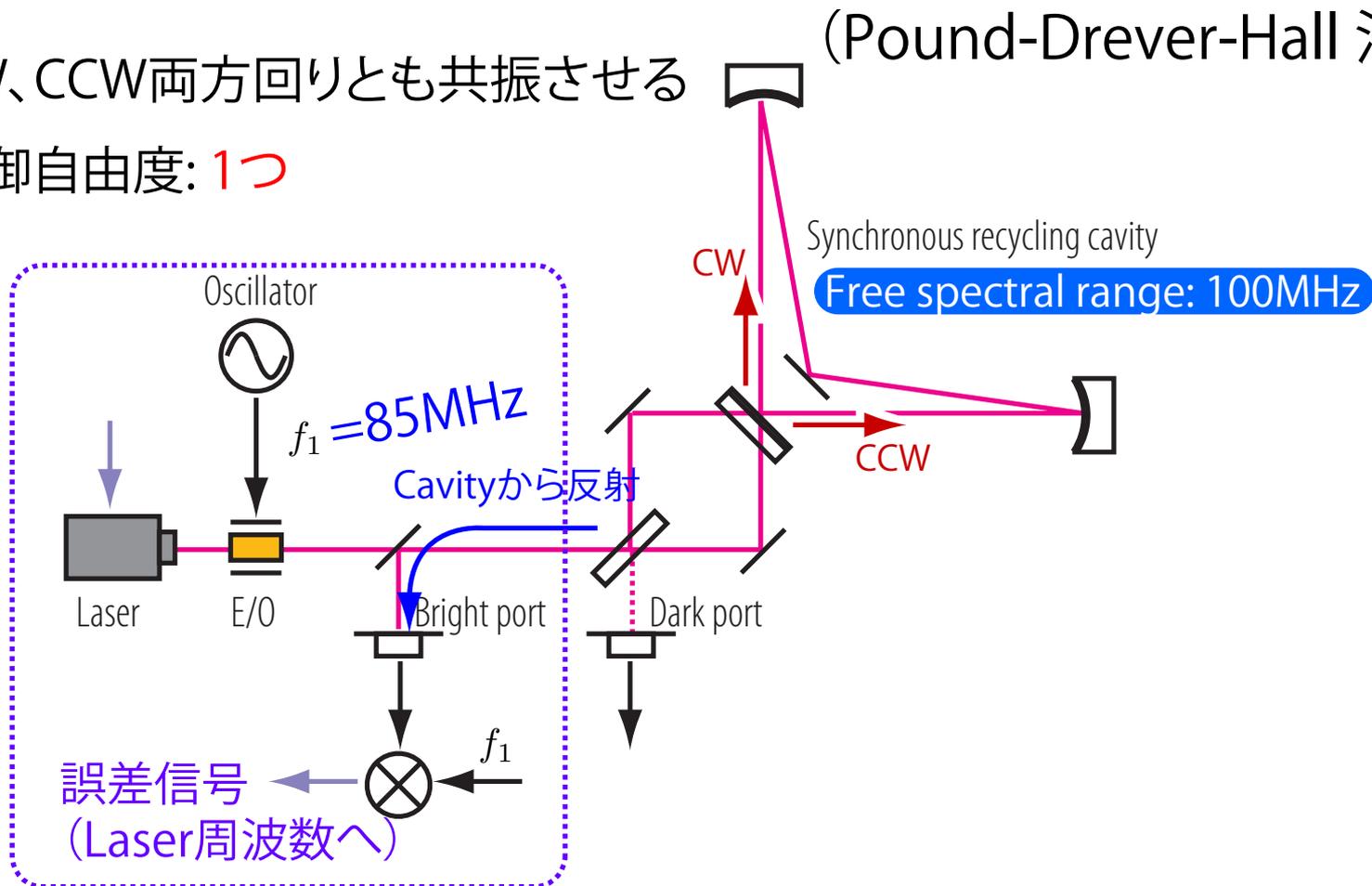
検出器の現状 (片方)



信号取得系と必要な制御

Cavityに光が共振し続けるように、レーザーの周波数を制御

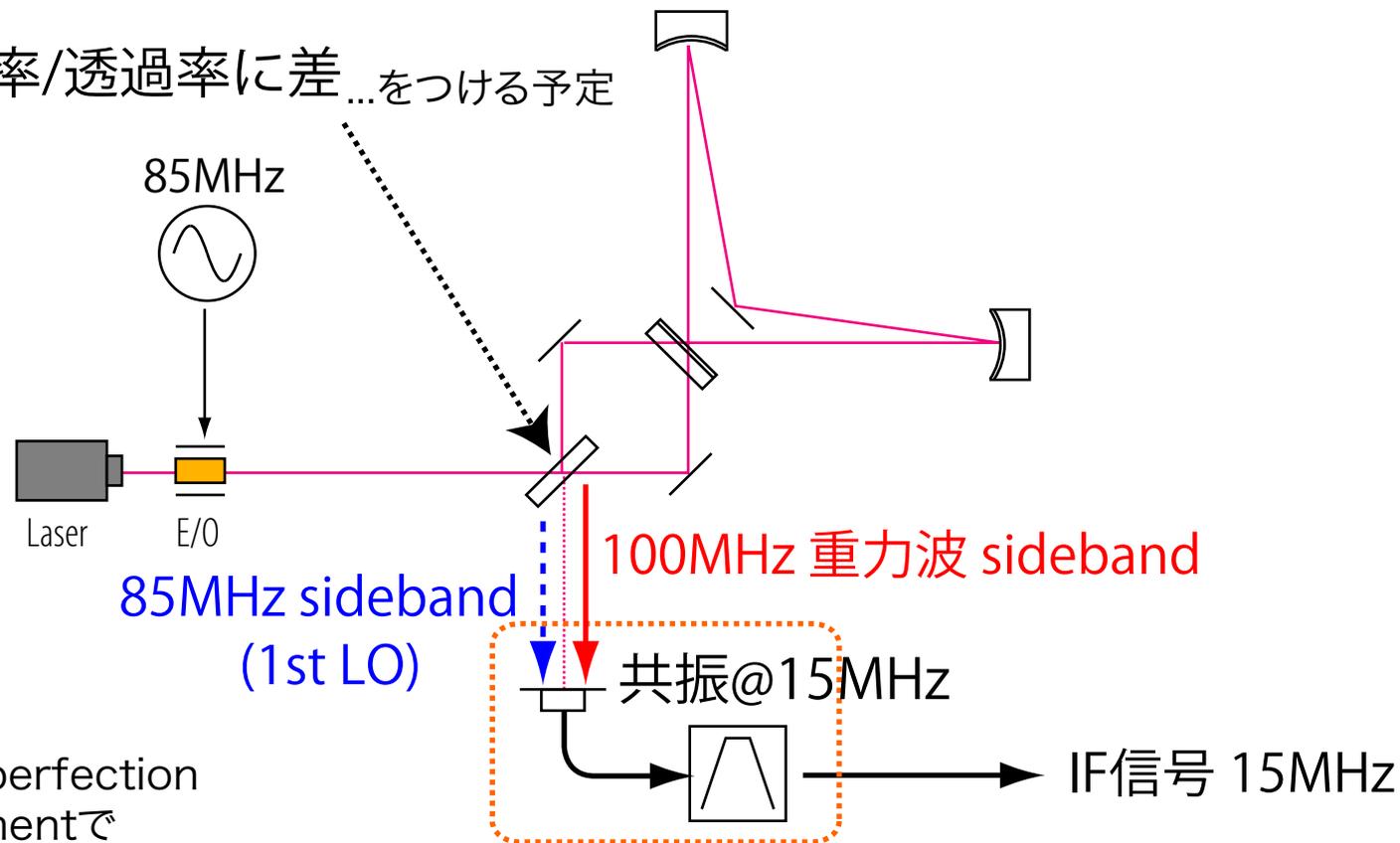
- CW、CCW両方回りとも共振させる (Pound-Drever-Hall 法)
- 制御自由度: 1つ



重力波信号の取り出し

PDで受光するときに 中間周波数へ down convert する

- BS 反射率/透過率に差...をつける予定

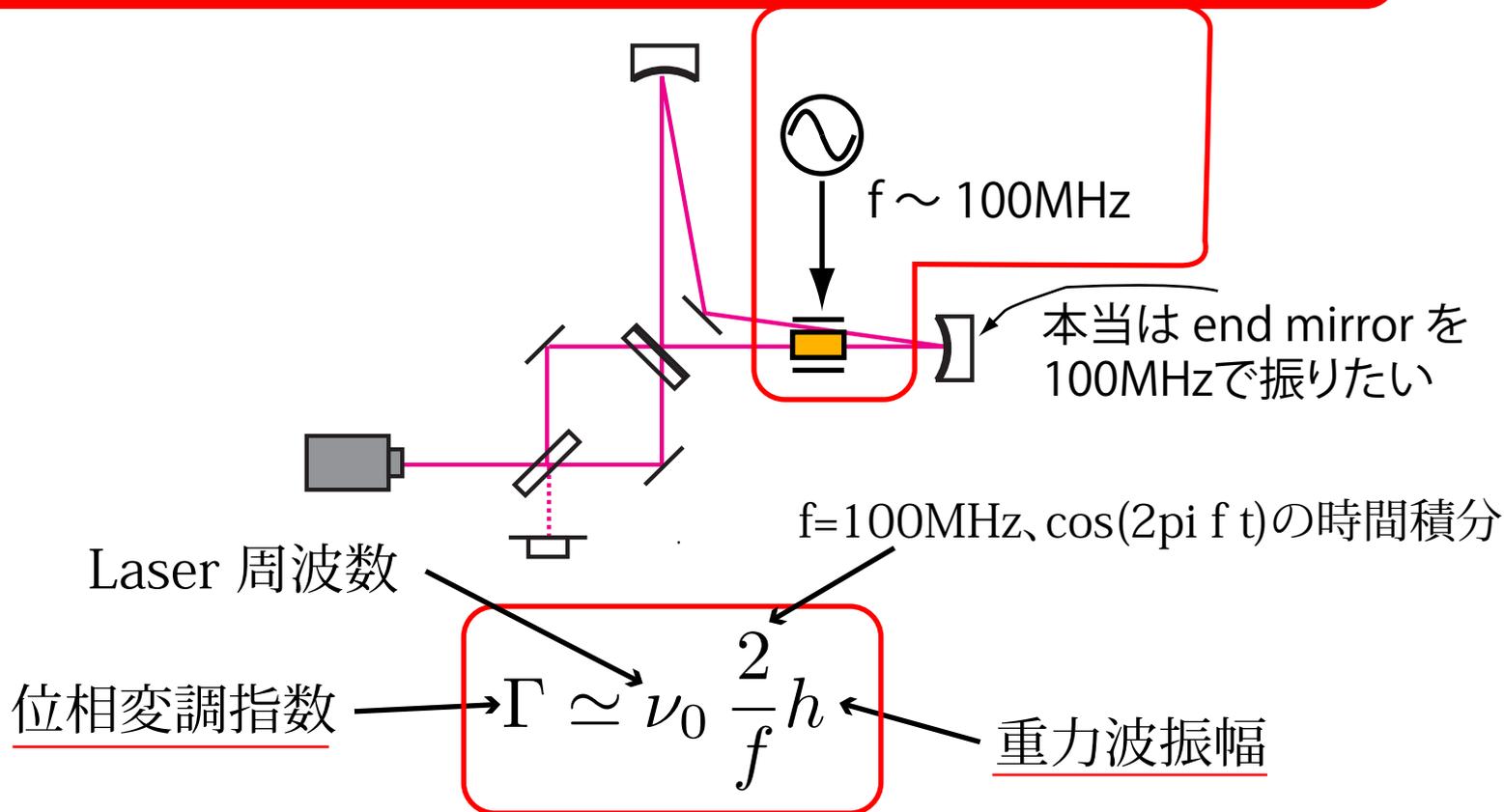


今は BSのimperfection
& mis-alignmentで

1st LOが漏れている => ジャンクライト含めてdark portは15mWほど(入力の3%)
=> 差つきBSに換装予定

検出器の calibration

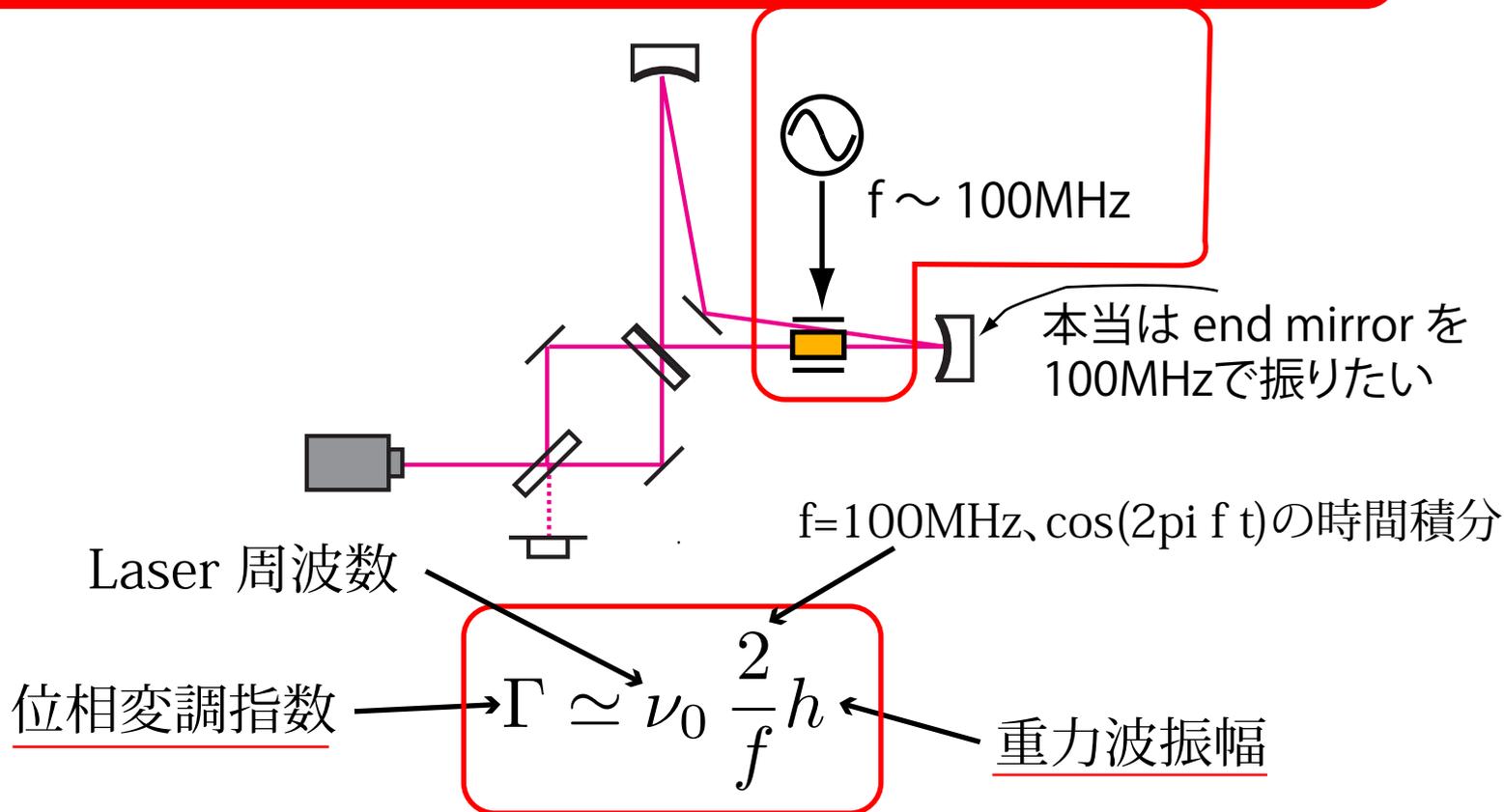
Pockels cell による位相変調で重力波の代わりとする



※ Cavityのend mirror近くにcellを置いた場合。

検出器の calibration

Pockels cell による位相変調で重力波の代わりとする

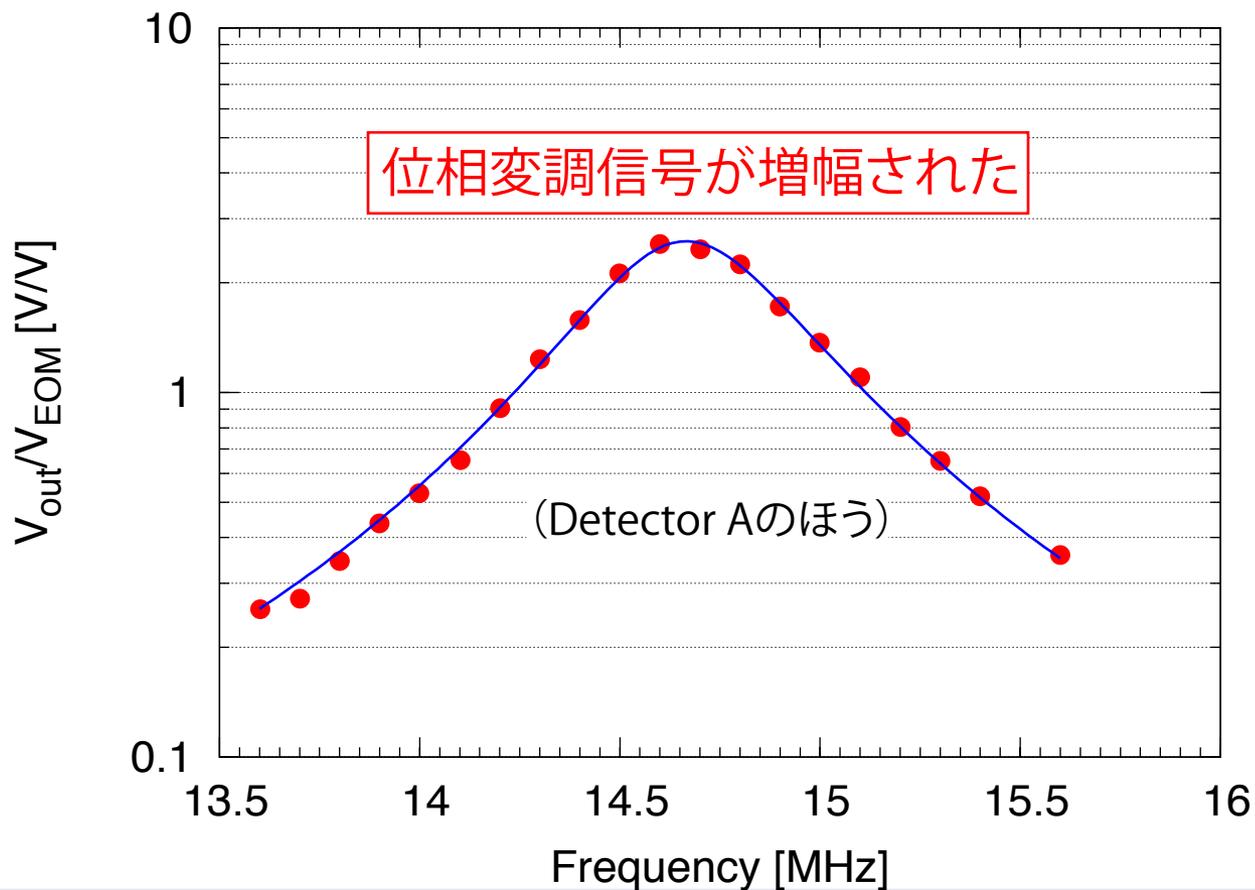


$$\frac{h}{\Gamma}(f) = \frac{t_{\text{BS}}^2 - r_{\text{BS}}^2 \exp(i\pi f / \nu_{\text{FSR}} \cdot l_1 / L) \exp(-i2\pi f / \nu_{\text{FSR}})}{2 \frac{\nu_0}{f} \sin^2[\pi f / (2\nu_{\text{FSR}})] (r_{\text{BS}}^2 + t_{\text{BS}}^2) \exp(-i\pi f / \nu_{\text{FSR}})}$$

Calibration factor の実測

次の2つの積で fit できる

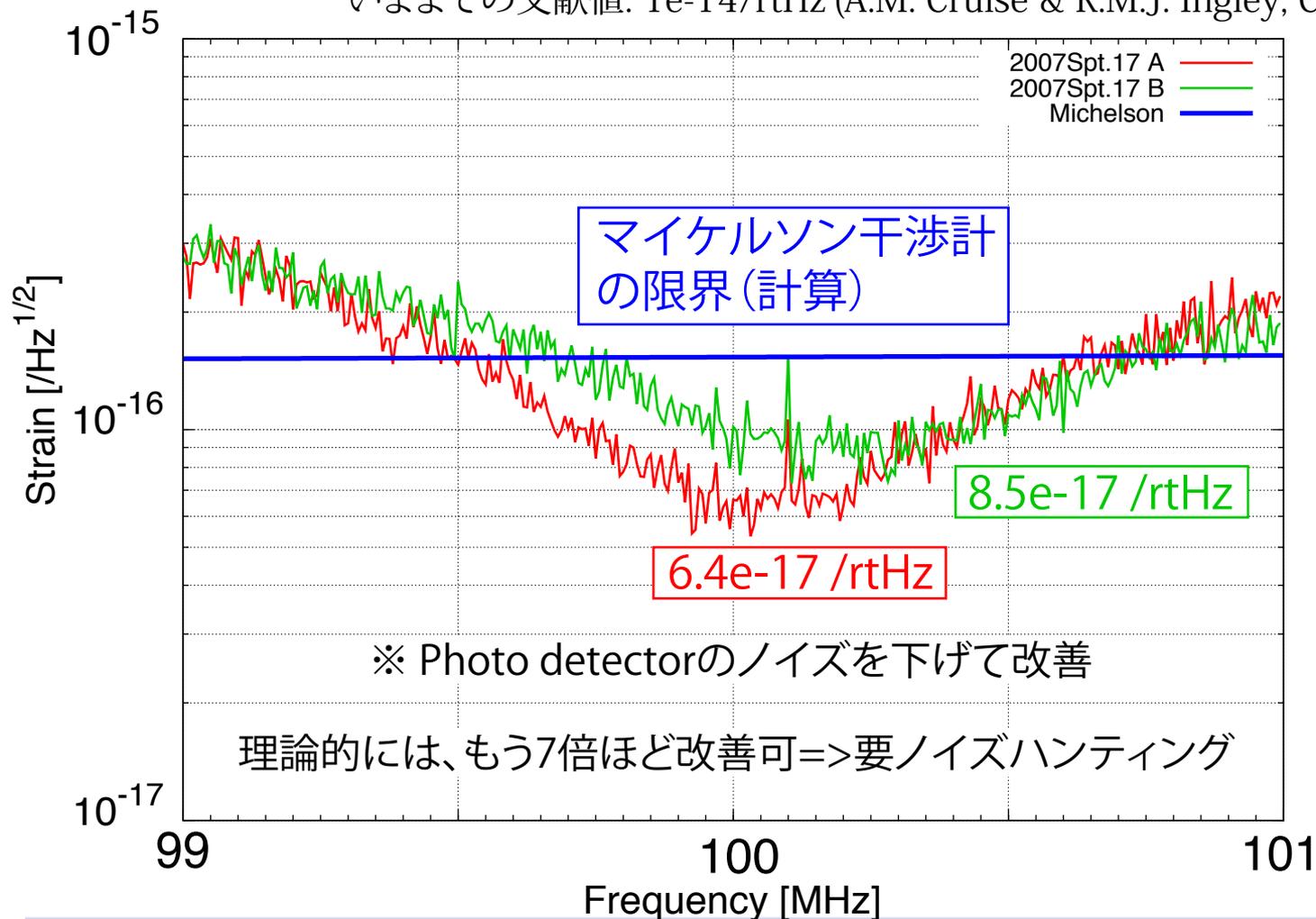
- Cavityによる共振 ($f_c=100.1\text{MHz}$, Finesse=199 を85.4MHz 低い方へshift)
- BPF 付き PD の特性 ($f_c=14.7\text{MHz}$, $Q=13.7$)



現在の感度

- 100MHz付近では**最高感度**を達成

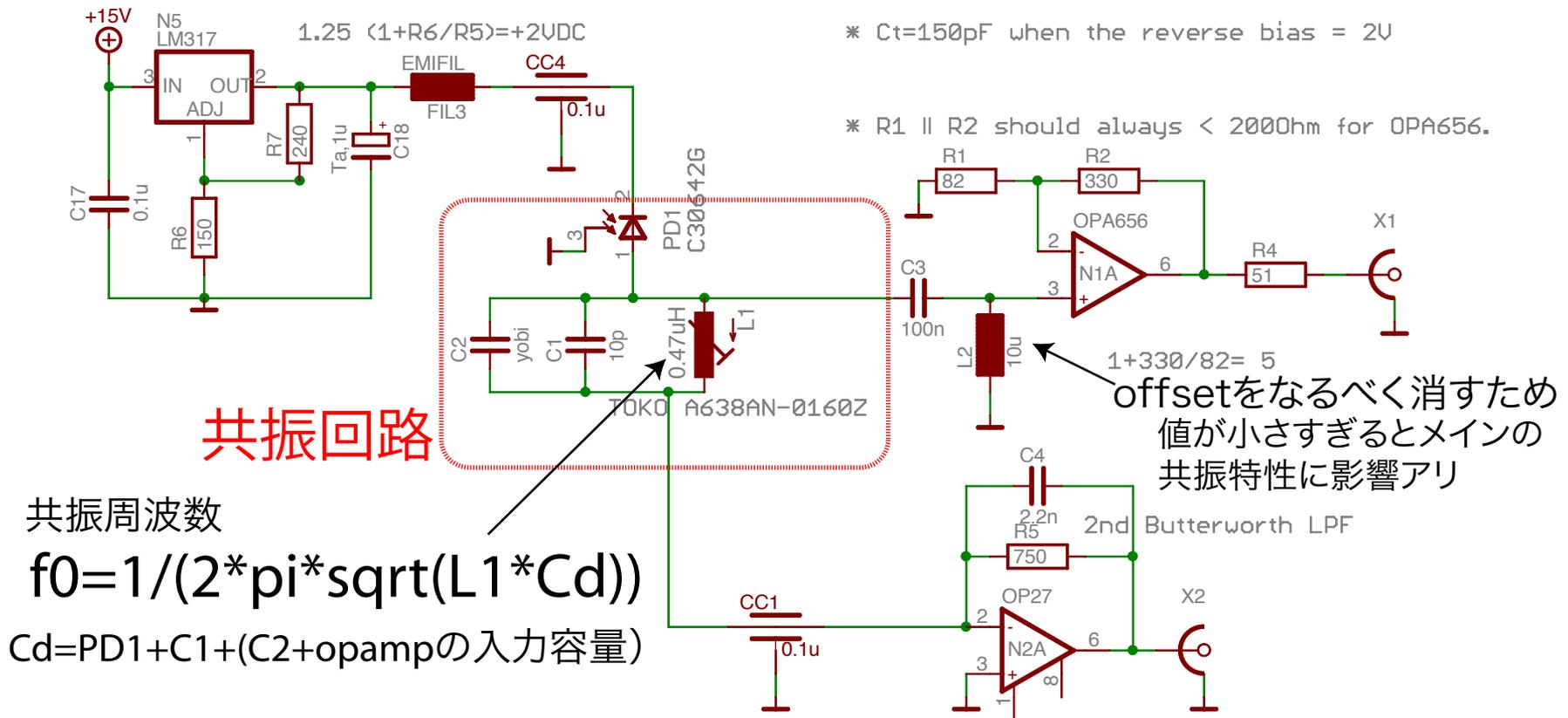
いままでの文献値: $1e-14/\text{rtHz}$ (A.M. Cruise & R.M.J. Ingley, CQG 23, 6185)

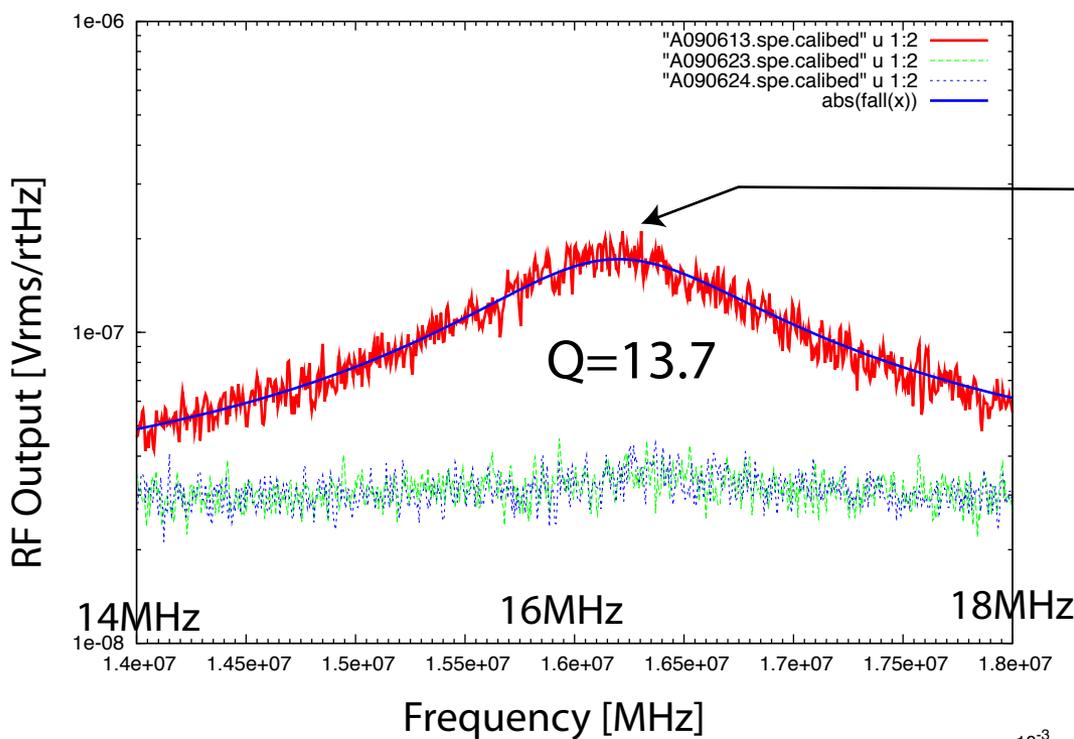


Dark port PDの性能について

信号取得portのPDなので、S/Nをなるべく良くしておきたい!

- 基本的にはG. HeinzlのD論のAppendixにまとまっている。
- H. Grote, Rev. Sci. Instrum. 78, 054704 (2007) に世界の干渉計のPDのまとめと、新しい直列共振+2nd共振ノッチPDについて記述がある。





f0=16.2MHz

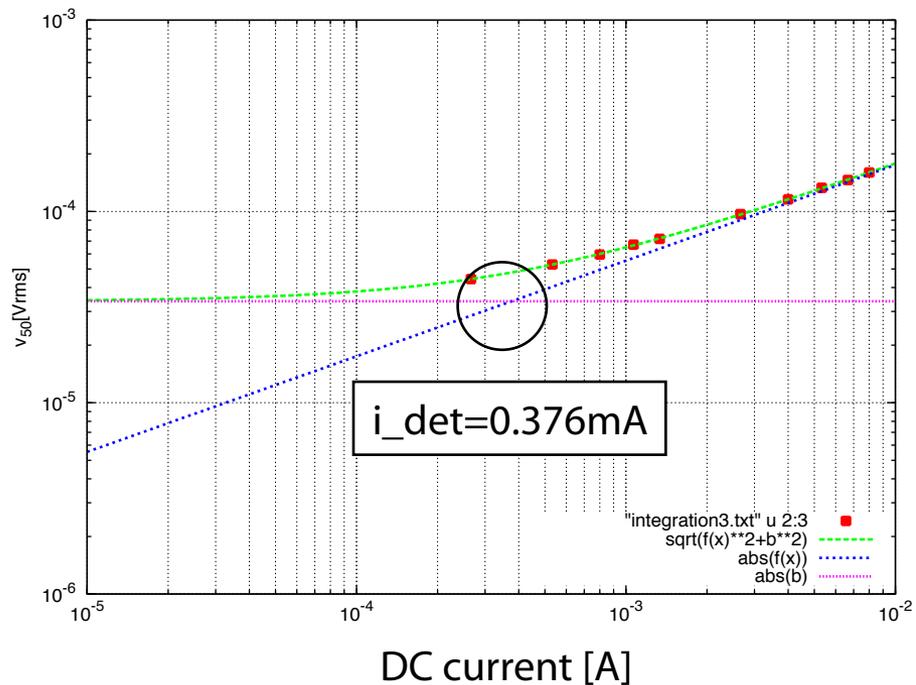
$$f_0 = 1 / (2 * \pi * \sqrt{L_1 * C_d})$$

$$Z_{max} = L_1 / (C_d * R_{loss})$$

$$Q = 1 / R_{loss} * \sqrt{L_1 / C_d}$$

PDの口径 2mm (TAMAの2倍)
 Perkin Elmer C30642G

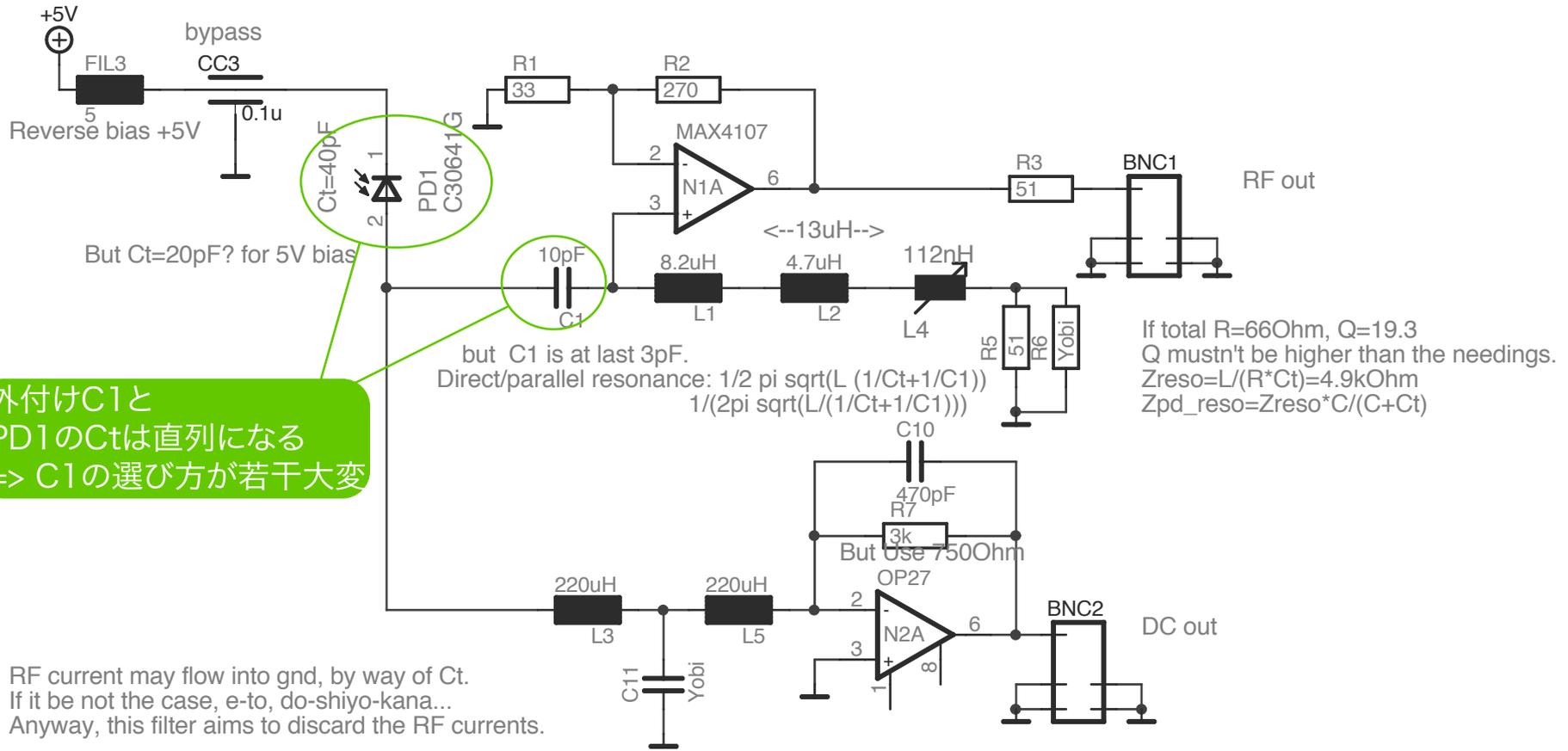
i_detが小さい
 (FET入力なOPA657を使用)



旧 Dark port PD

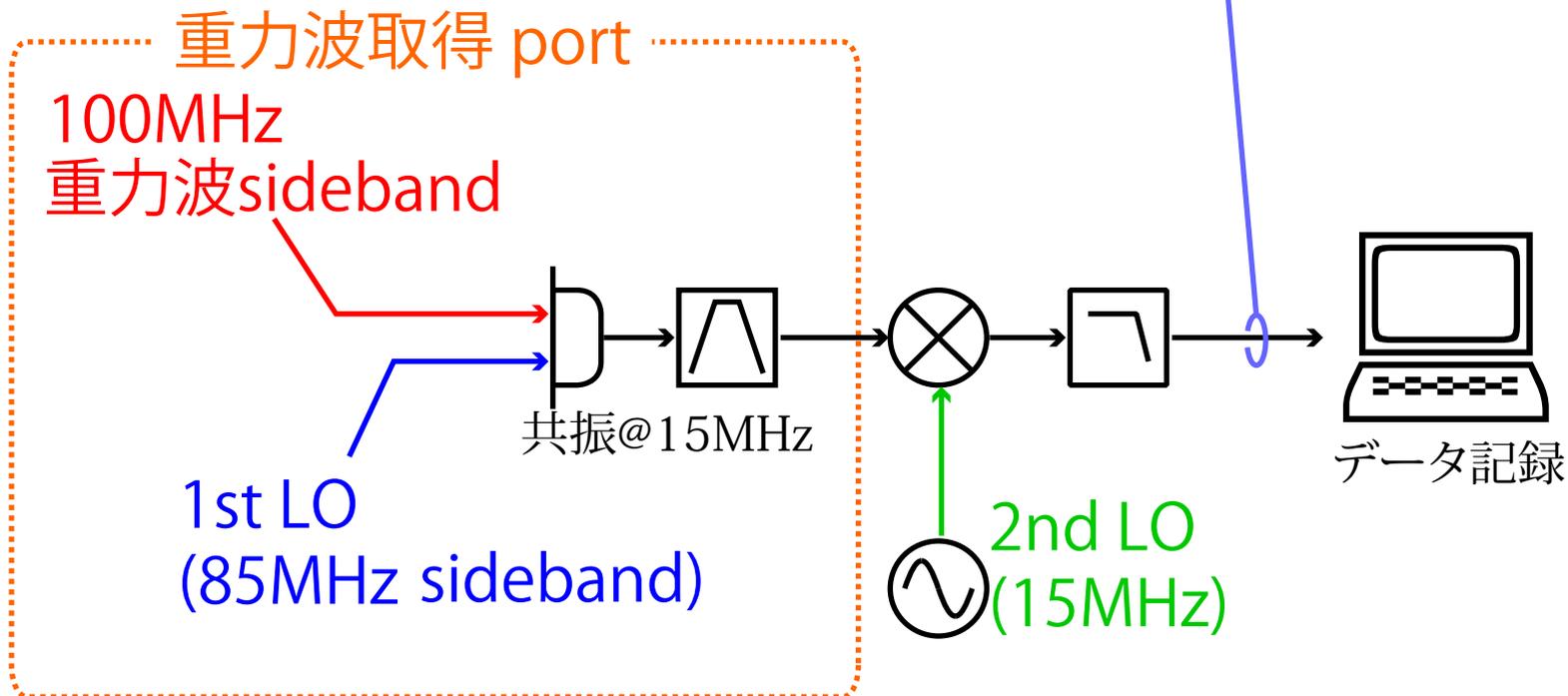
- H. Grote, Rev. Sci. Instrum. 78, 054704 (2007) を参考にした直列共振型。2倍波ノッチは省略

直列共振の利点: 共振周波数の電流が流れてもPD1にかかる逆電圧があまり変化しない

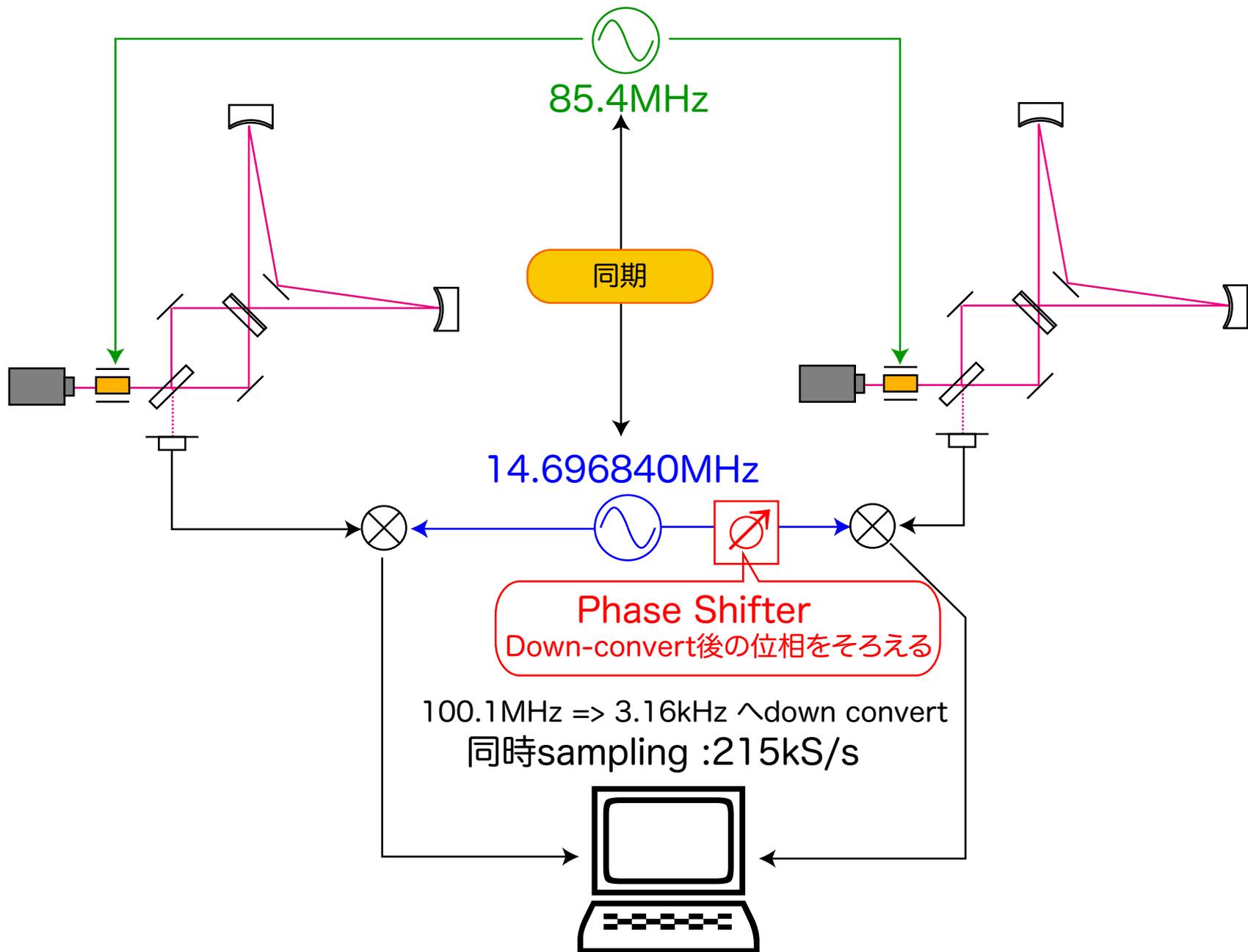


データ収集のために

100MHzの信号をDC付近に down convert



=> 100MHz を中心とする、ある帯域幅の信号を取り出す。



4. まとめ

目標

- 観測の中心周波数: 100MHz
- ターゲット: 背景重力波など
- 観測手段: シンクロナス・リサイクリング干渉計 x 2 で相関処理

進展

- 検出器2台稼働
- 感度: $1e-16$ /rtHzより小さいノイズレベル

今後の課題

- データ取得、解析
- 感度の改善
- 真空槽へ入れ、finesse を上げる