

超高感度重力波検出器へ向けた光学設計技術

東大理 麻生洋一

2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会

シンポジウム 「重力波観測用巨大干渉計の設計と建設」

2012年3月15日@早稲田大学

この講演で伝えたいこと

干渉計型重力波検出器のイメージを掴んでもらう

- 干渉計型重力波検出器の原理
- 干渉計高感度化への工夫
- 干渉計制御
- 次世代干渉計へ向けて

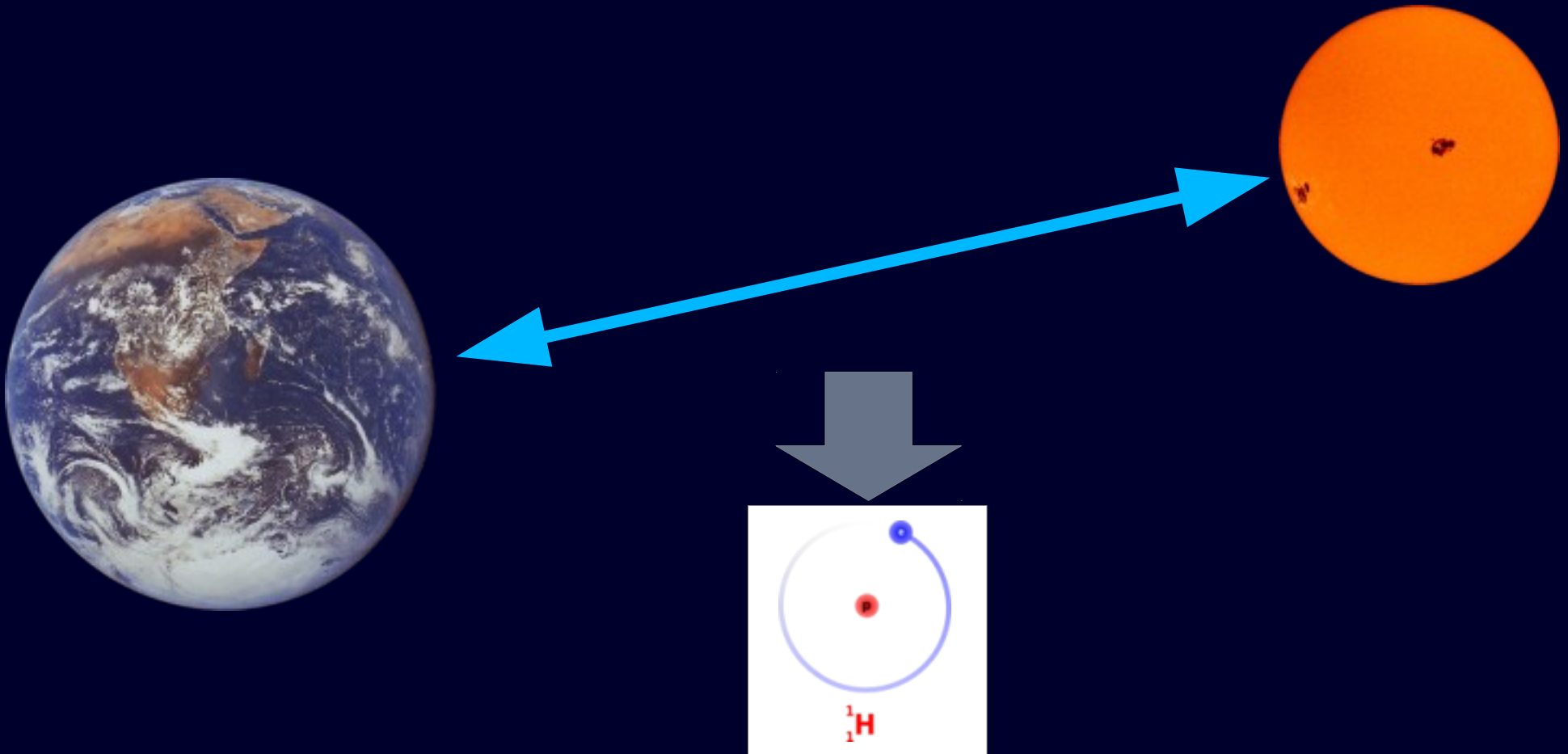
重力波が我々に及ぼす効果

T-Tゲージでは、自由質点間の固有距離変化

大きなイベント

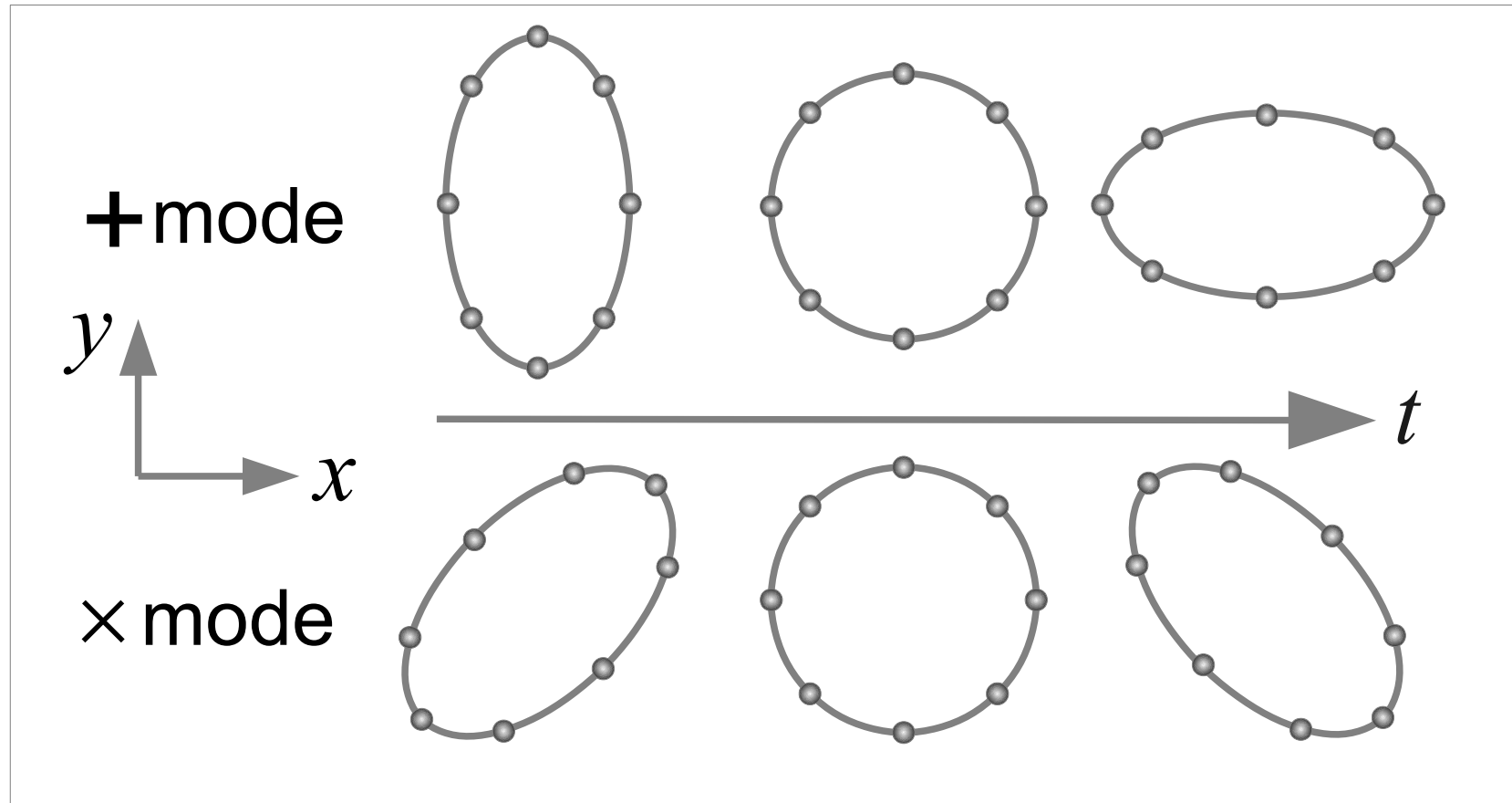
乙女座銀河団(5千万光年)で1.4太陽質量の連星中性子合体

→ $h \sim 10^{-21}$



水素原子一個分の変化

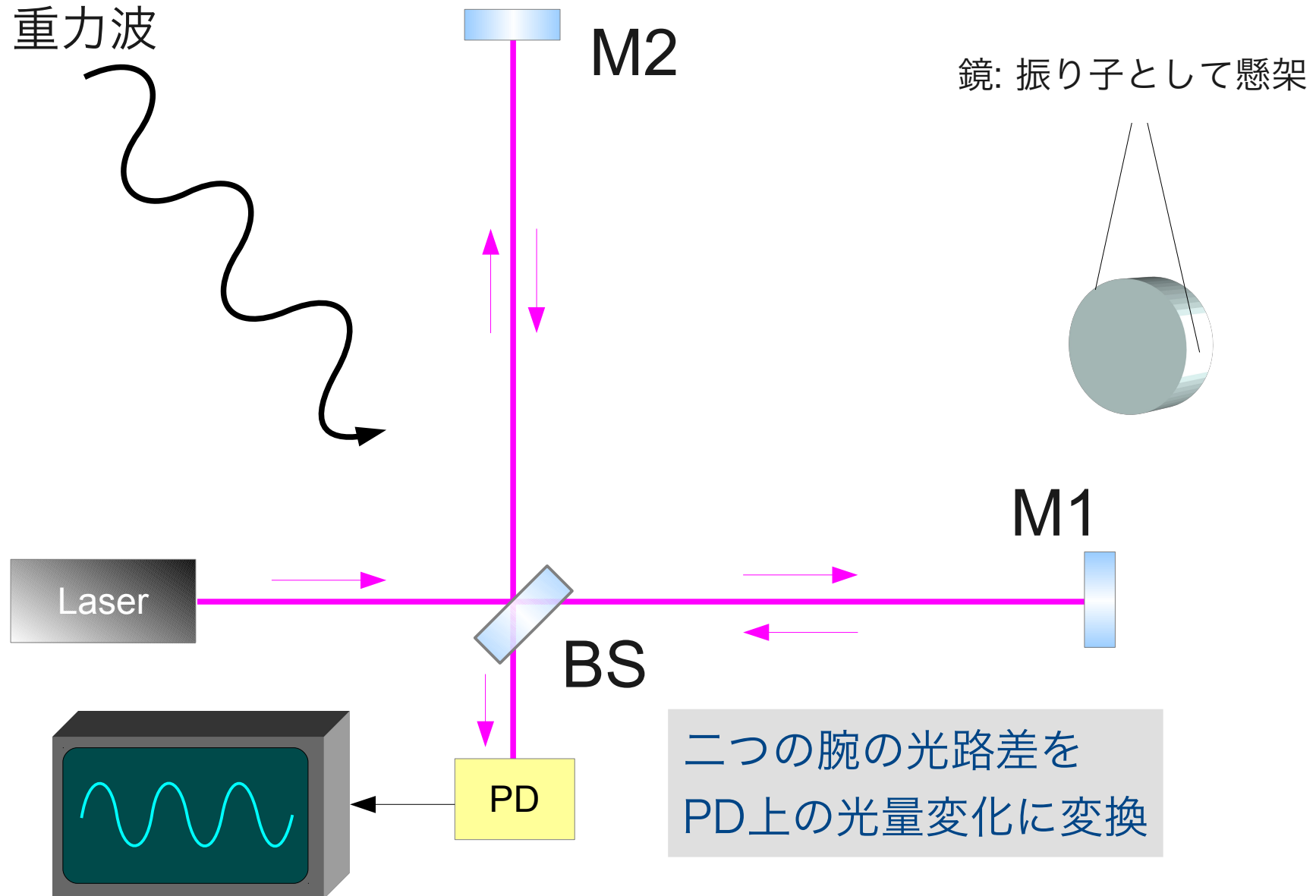
重力波: 潮汐力



2つの偏光モード

干渉計型重力波検出器の基本原理

Michelson干渉計



原理は単純 → 感度は？

干渉計の原理的雑音源

PDに入る光のパワー: 光子数計測

レーザー光: コヒーレント状態 $\neq$ 光子数の固有状態

検出される光子数は毎回揺らぐ → ショットノイズ

光子数揺らぎ

$$\delta n = \sqrt{n}$$

平均光子数

$$\text{SNR} = \frac{\sqrt{P_{\text{in}}}}{P_{\text{in}}} = \frac{1}{\sqrt{P_{\text{in}}}}$$

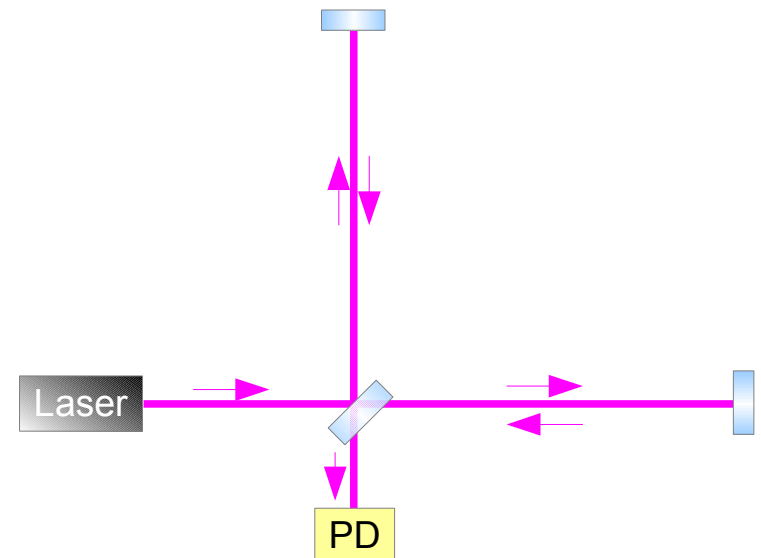
← 入射パワー

PDに入る平均光量が少なければ良い

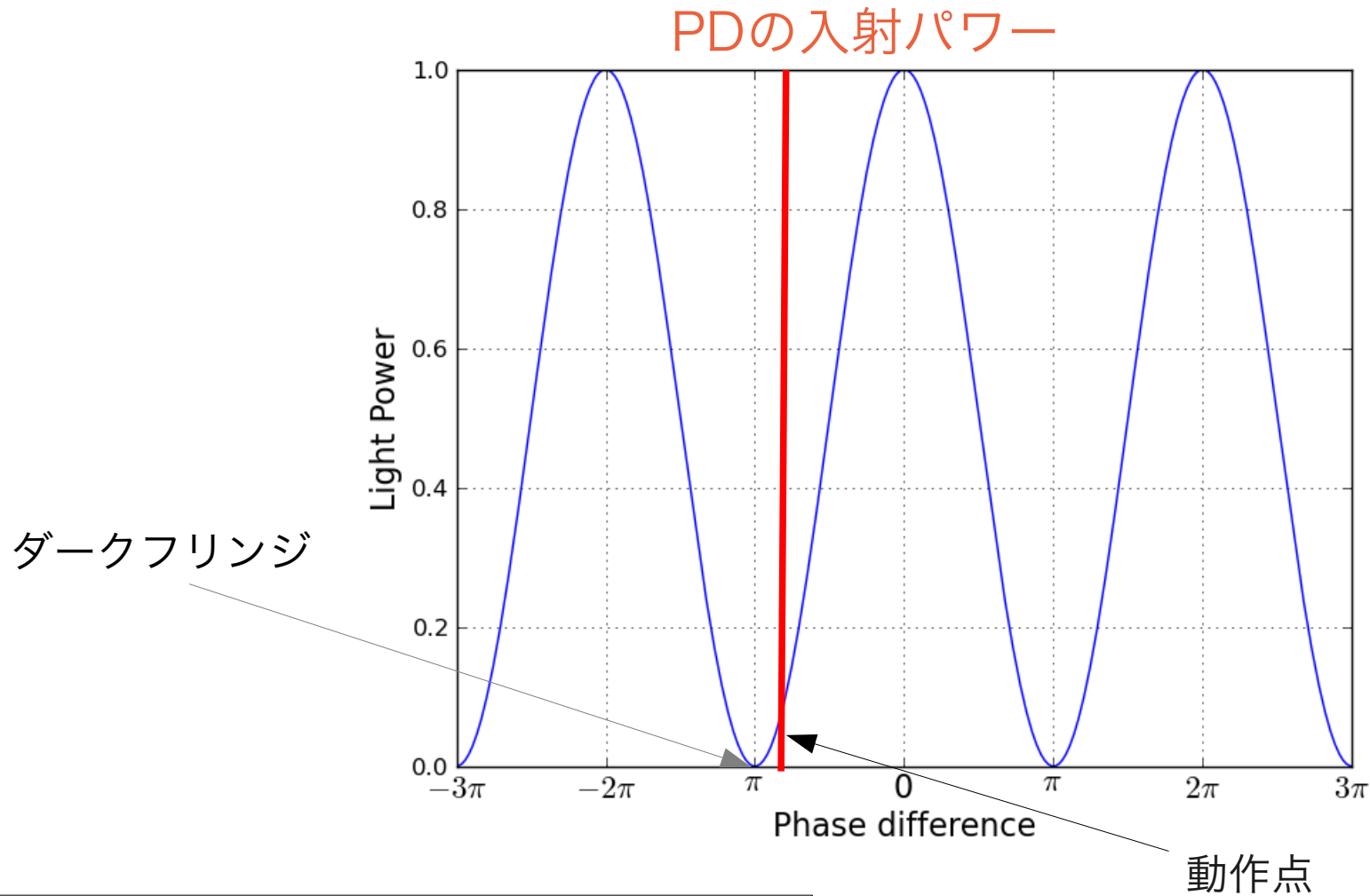
→ ダークフリンジ

ショットノイズはゼロ？

No → 完全なダークでは信号が取れない



動作点をどこに選ぶか？



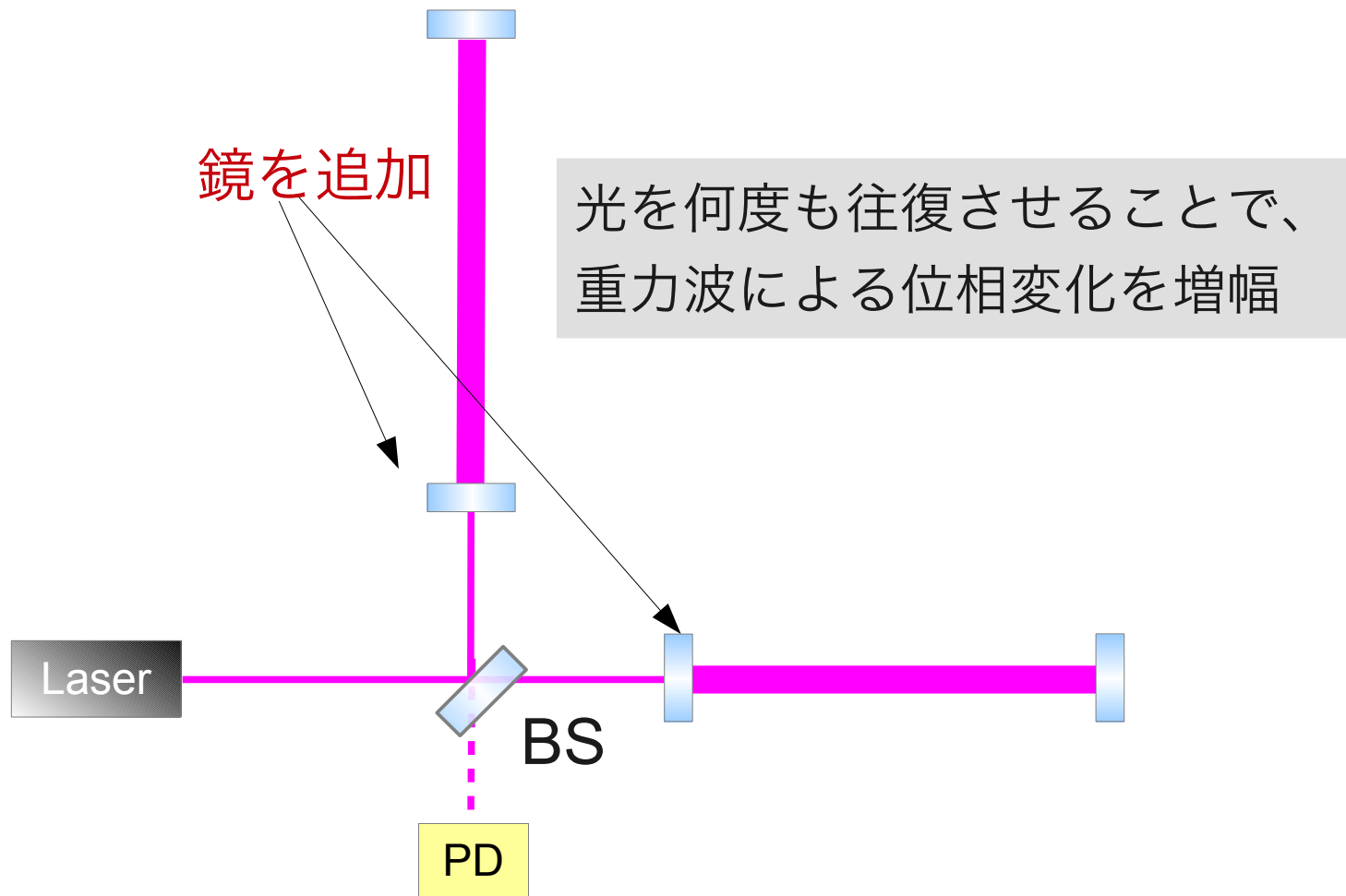
Michelson干渉計のショットノイズ

$$h_{min} \approx 2 \times 10^{-21} \text{ (帯域1Hz)}$$

レーザーパワー 100W, 基線長3km

全く不十分
どうするか？

Fabry-Perot Michelson干渉計



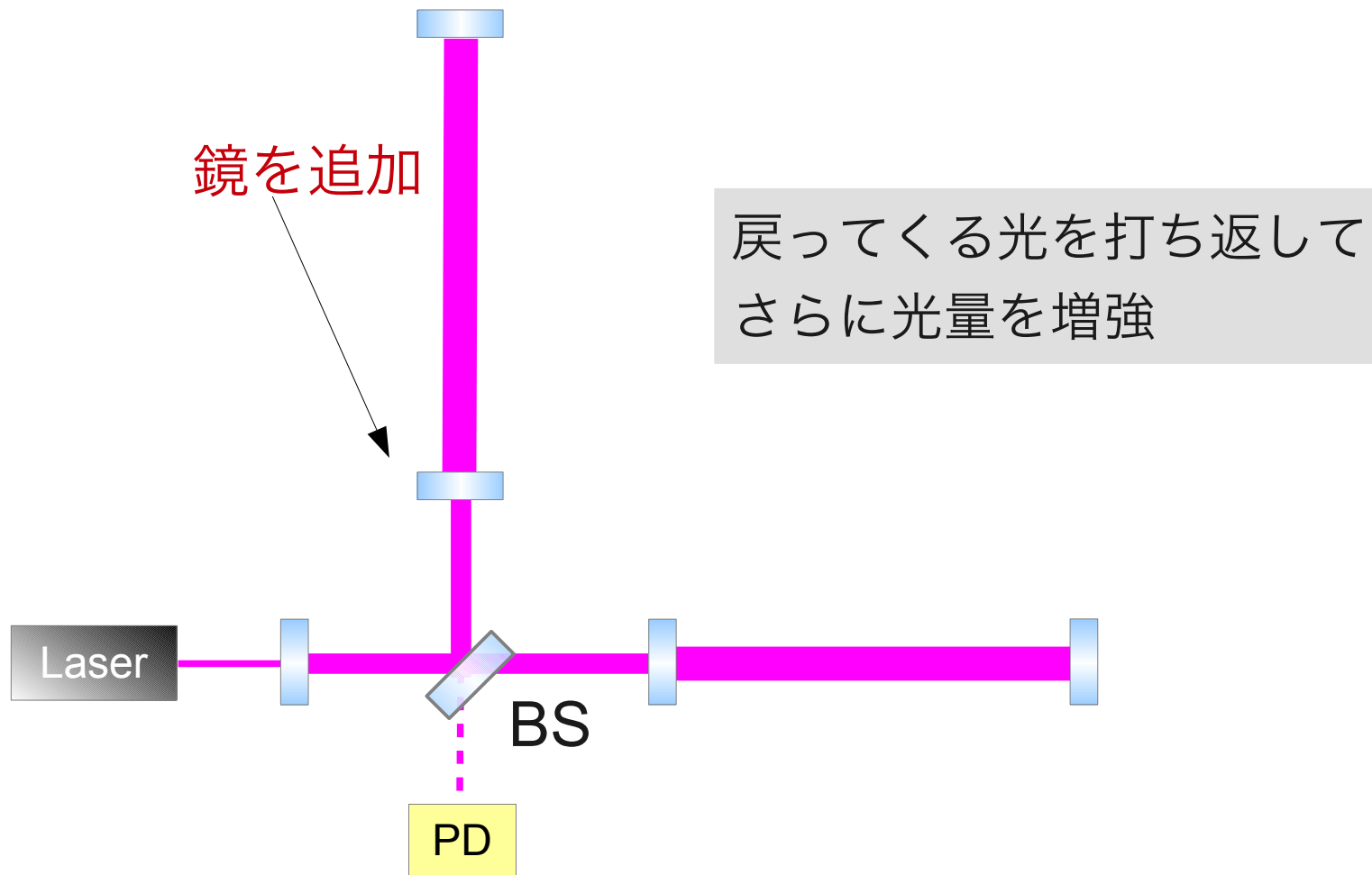
感度: 折り返し回数倍(約1000倍)

$$h_{min} \approx 2 \times 10^{-24}$$

折り返し回数 $\approx$ フィネス

いい感じ
もっと高感度化

Power Recycling

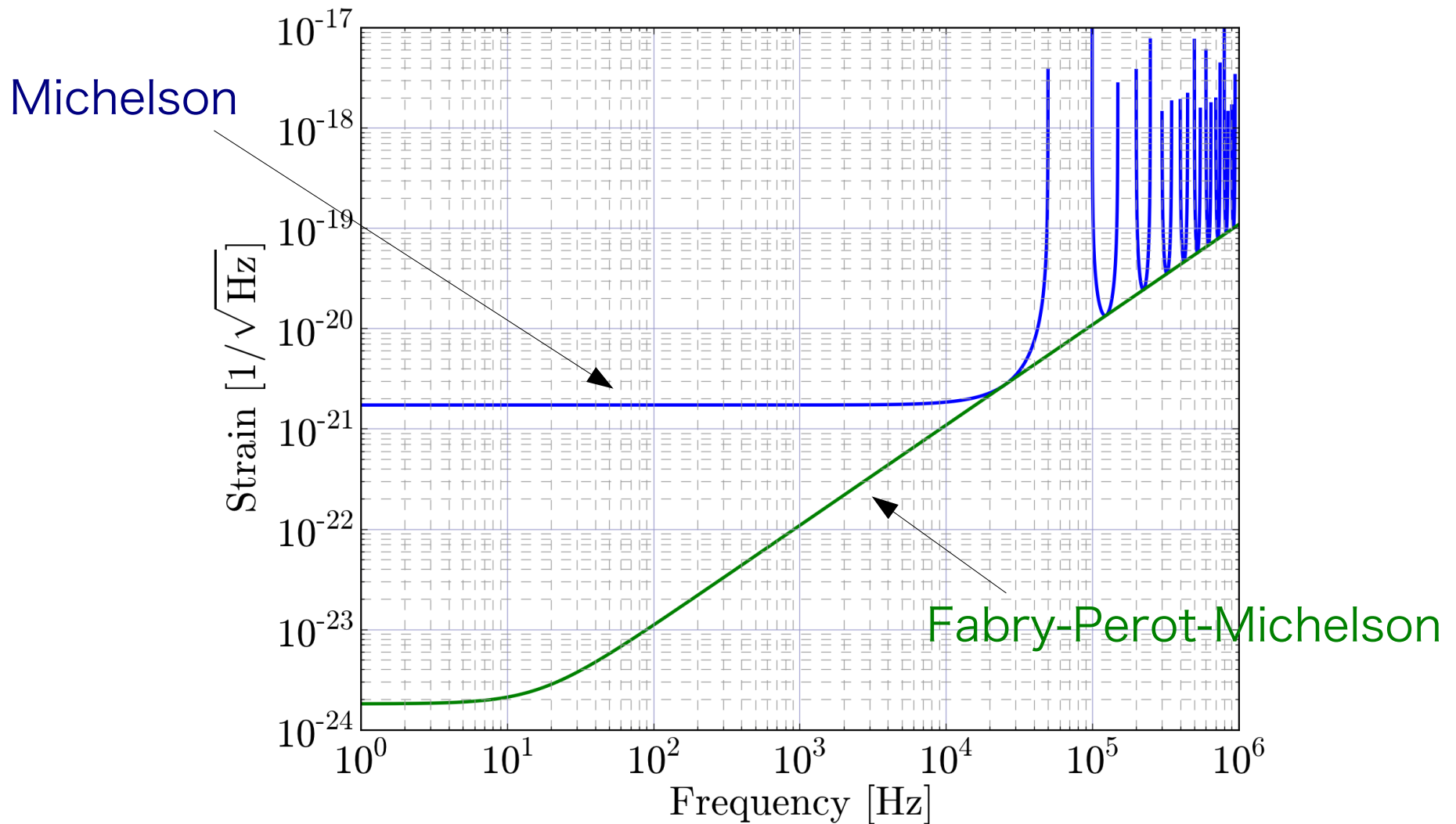


光量10倍 → ショットノイズ $1/\sqrt{(10)}$

$$h_{min} \approx 6 \times 10^{-25}$$

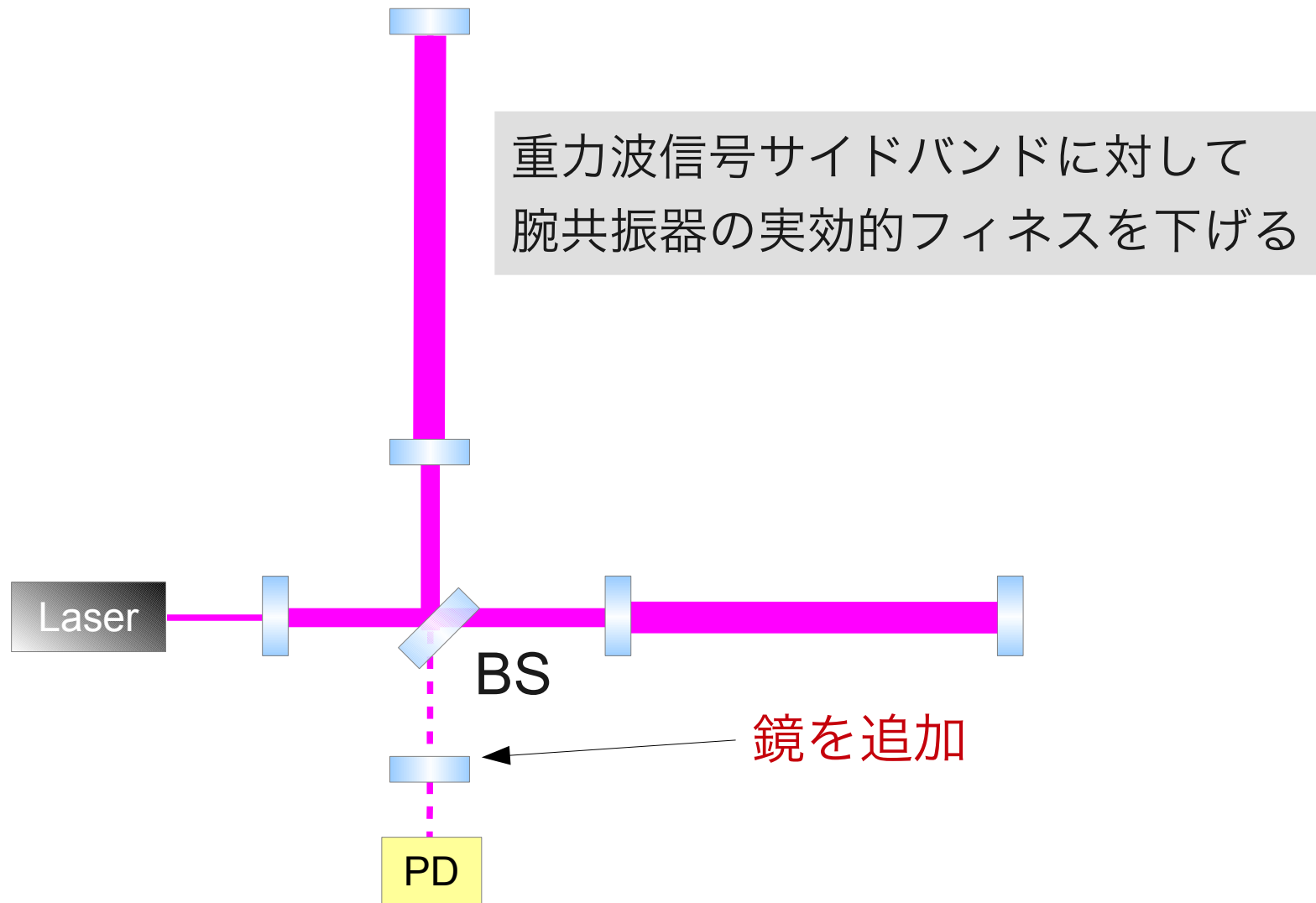
かなりいい感じ
しかし、

多数回折り返す: 高周波の信号が打ち消しあう



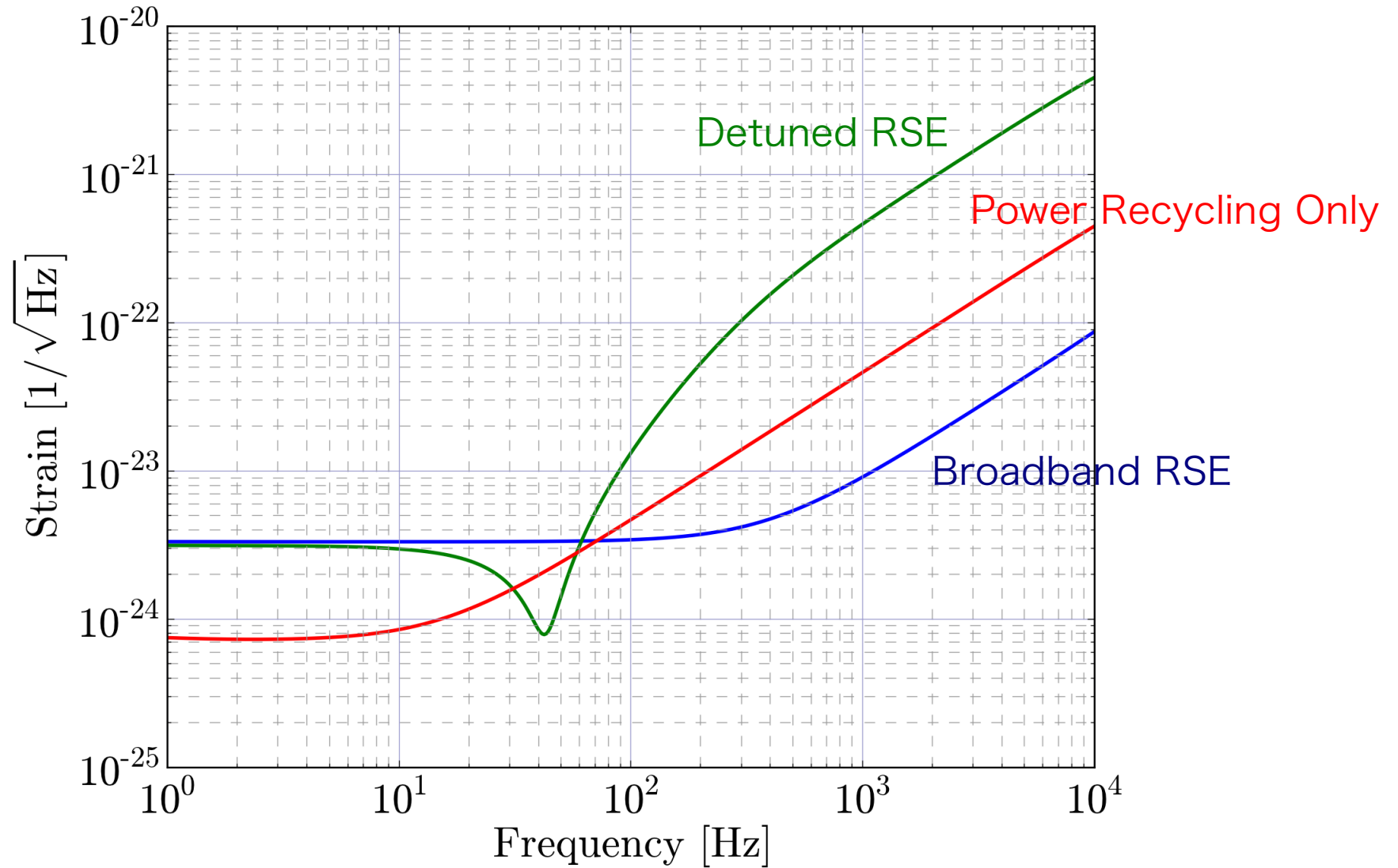
干渉計の観測帯域が狭くなる

Resonant Sideband Extraction (RSE)



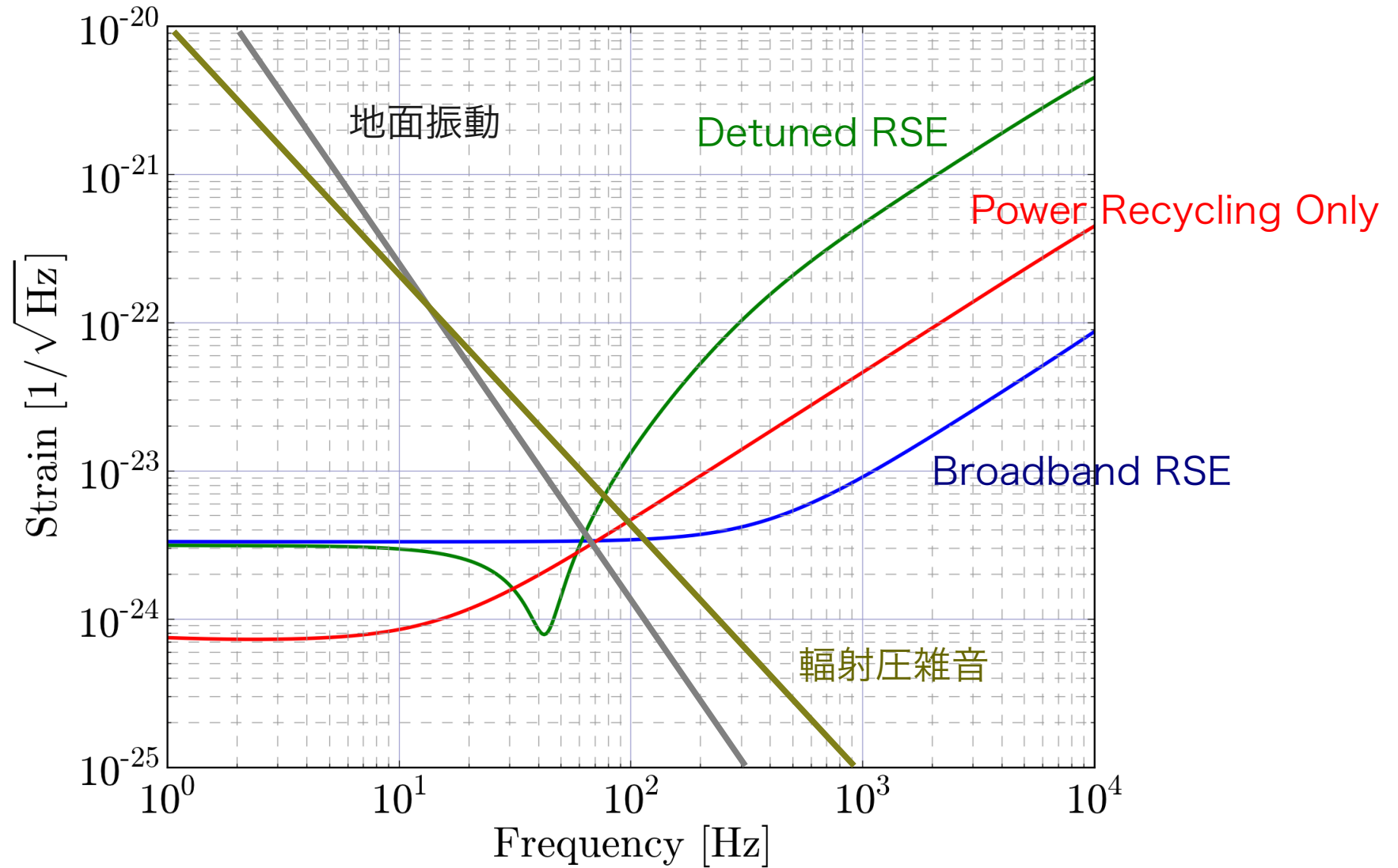
鏡の微視的位置を変えることで、干渉計の周波数応答を調整可能
高いフィネスの腕共振器 --> 入射鏡を透過する光パワーを抑制可能

ショットノイズの比較



ターゲットとする重力波源に応じて最適な周波数応答を選ぶ

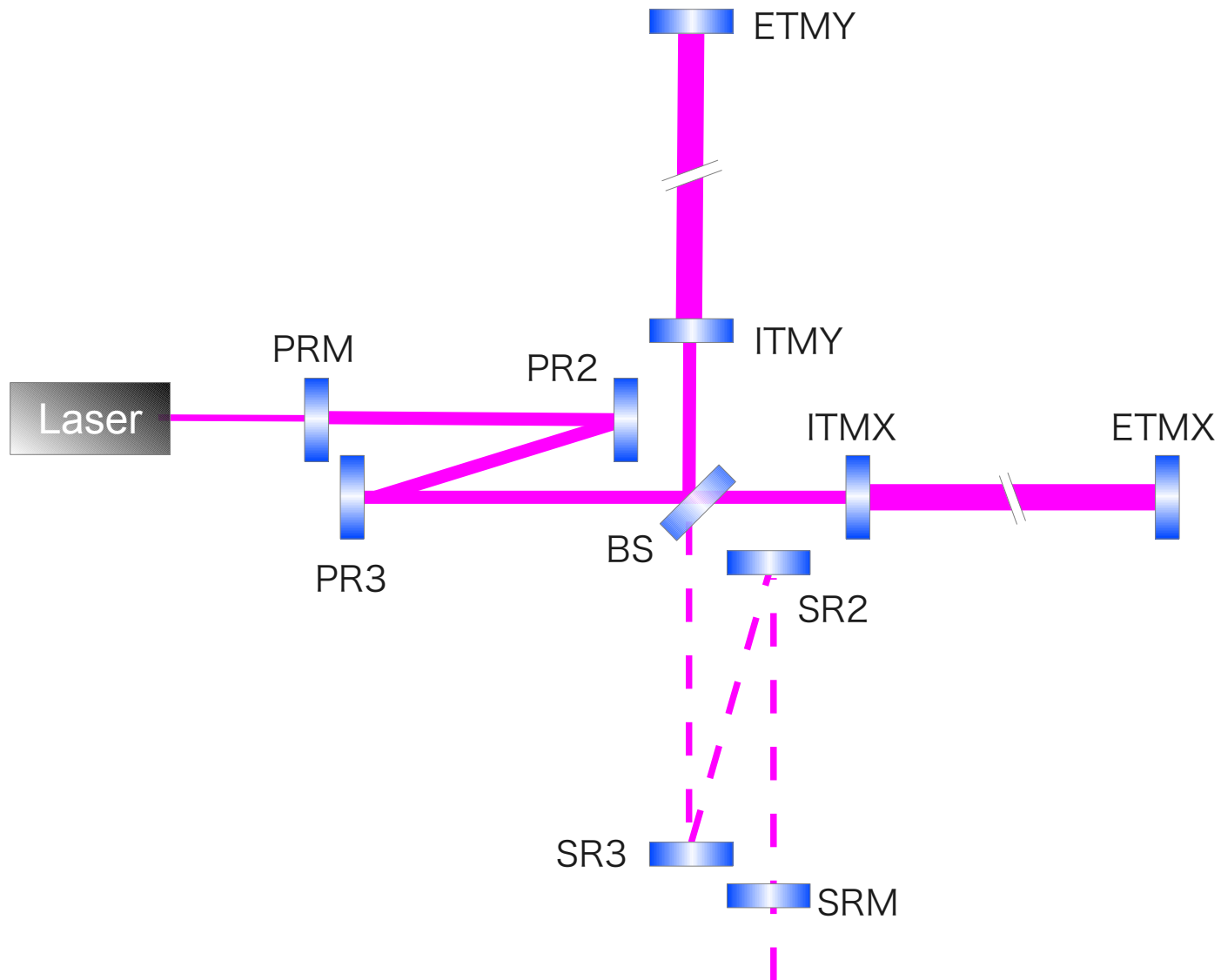
ショットノイズの比較



低周波にはその他のノイズが多数ある

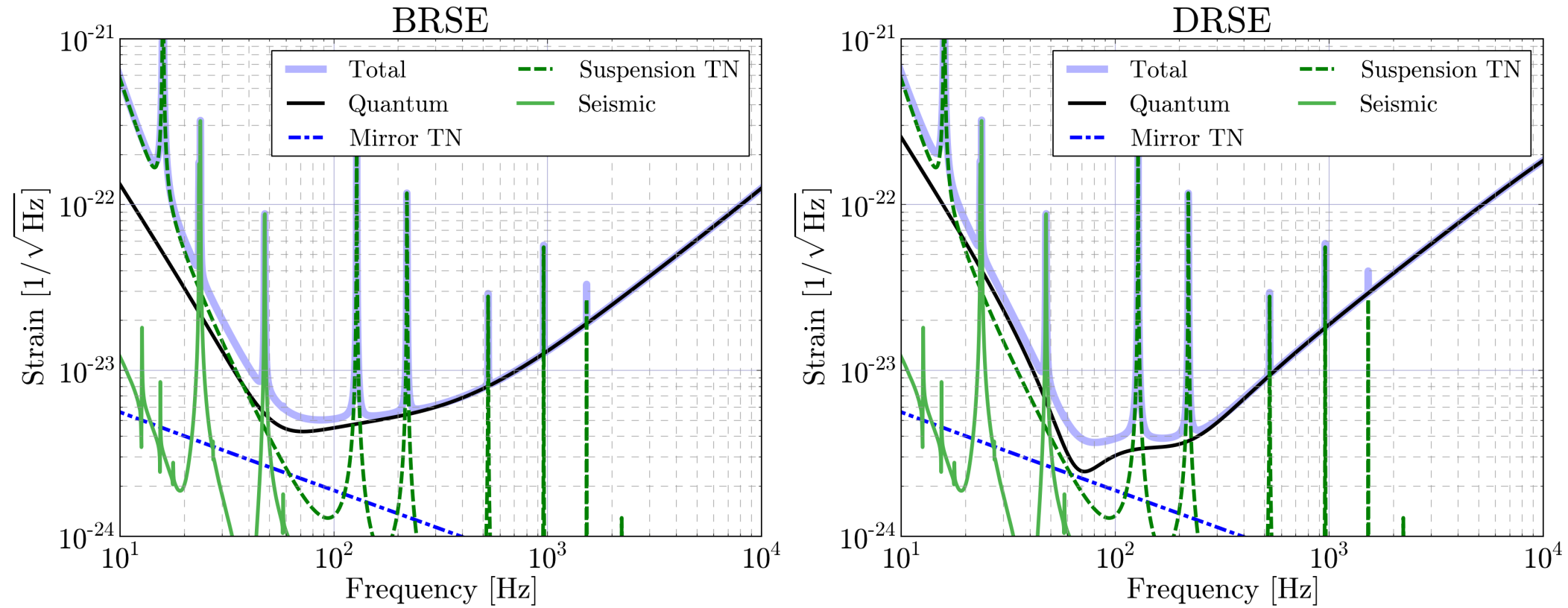
Power Recyclingのみにはメリットがほぼ無い

KAGRAの干渉計構成



可変RSE干渉計: 入射レーザーパワー 50W, 基線長3km

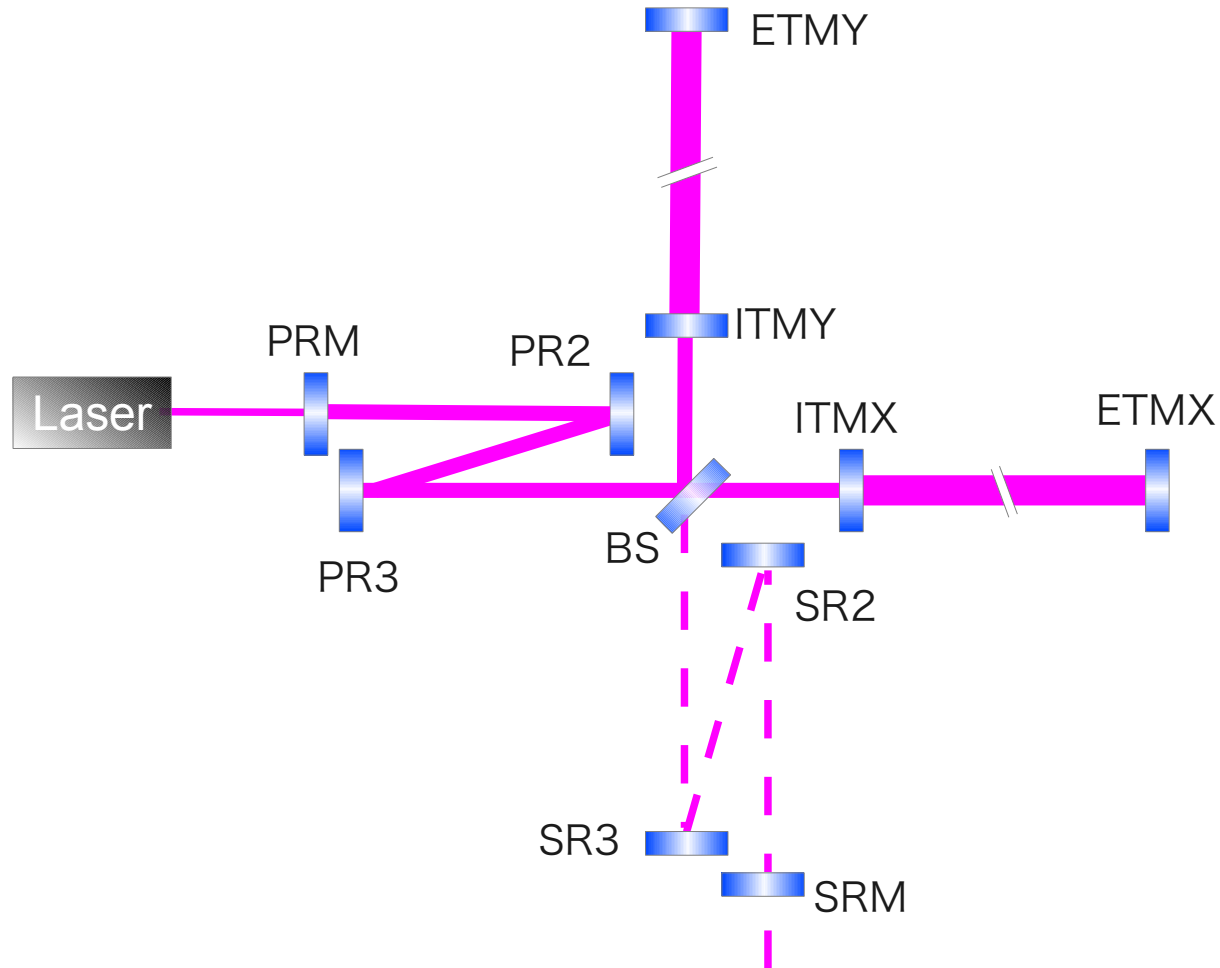
KAGRAのデザイン感度



中性子連星検出可能距離 $\sim 200\text{Mpc}$

干渉計の制御

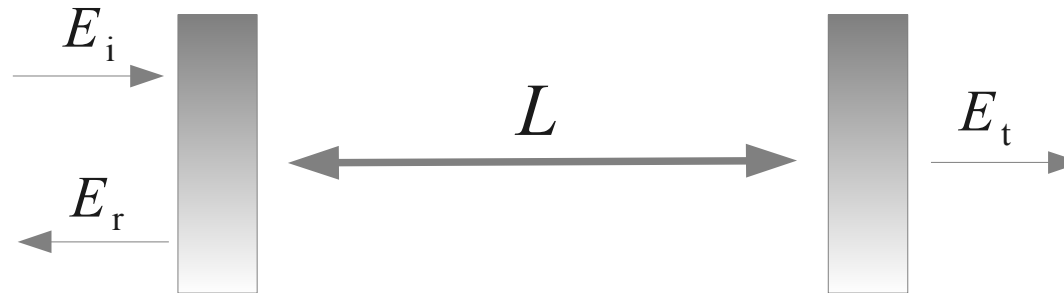
結合した複数の光共振器: 腕共振器, Power Recycling共振器, Signal Recycling共振器
最適な動作点に保つ: 共振状態を維持



鏡間の距離をピコメートルの精度で制御

鏡の向き(回転)もマイクロラジアン以下の精度で制御

Fabry-Perot 共振器



往復距離が波長の整数倍

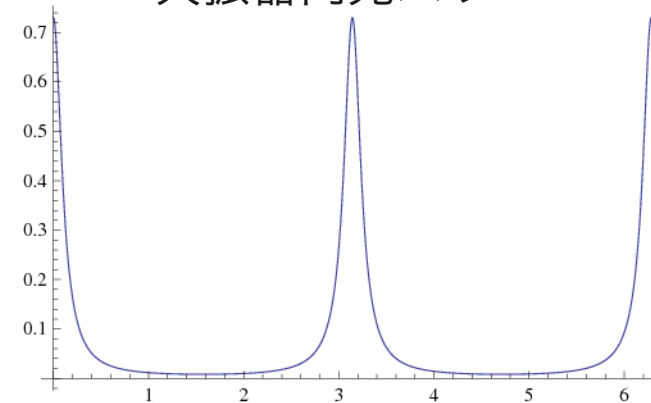
——▶ 共振

共振付近: 反射位相が急激に変化

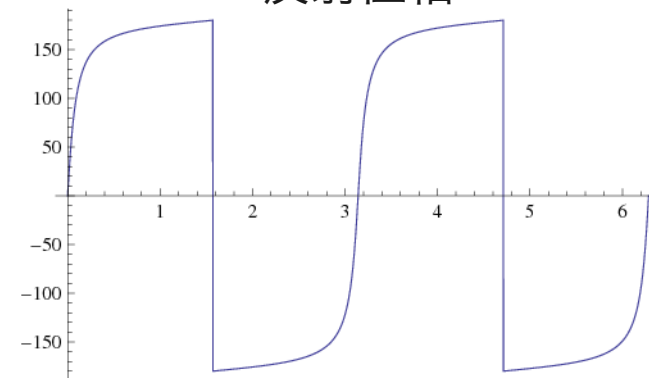
微小な距離変化を大きな位相変化に変換

共振条件を満たさない光はフロントミラー
で直接反射

共振器内光パワー

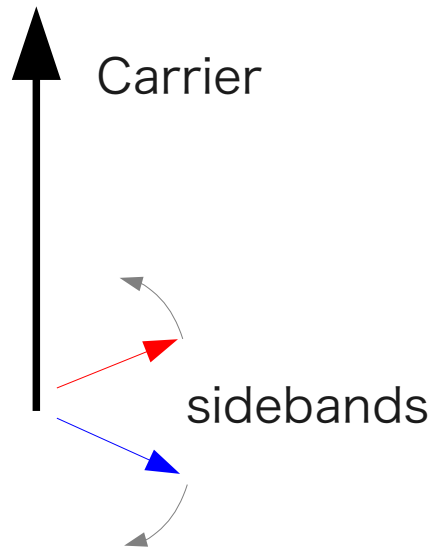


反射位相



RF位相変調

Phasor Diagram



Carrier周波数で回転する座標系から見た
電場を複素平面上に表示する

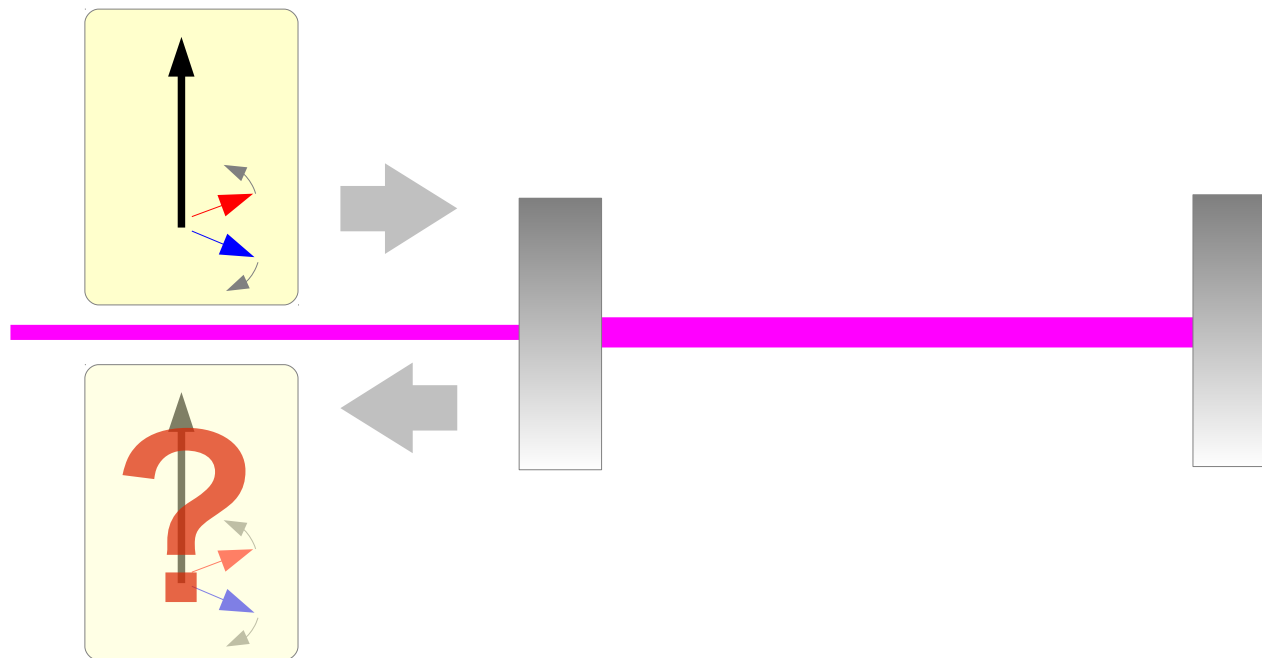
Carrierは静止

+Sidebandは正方向に回転

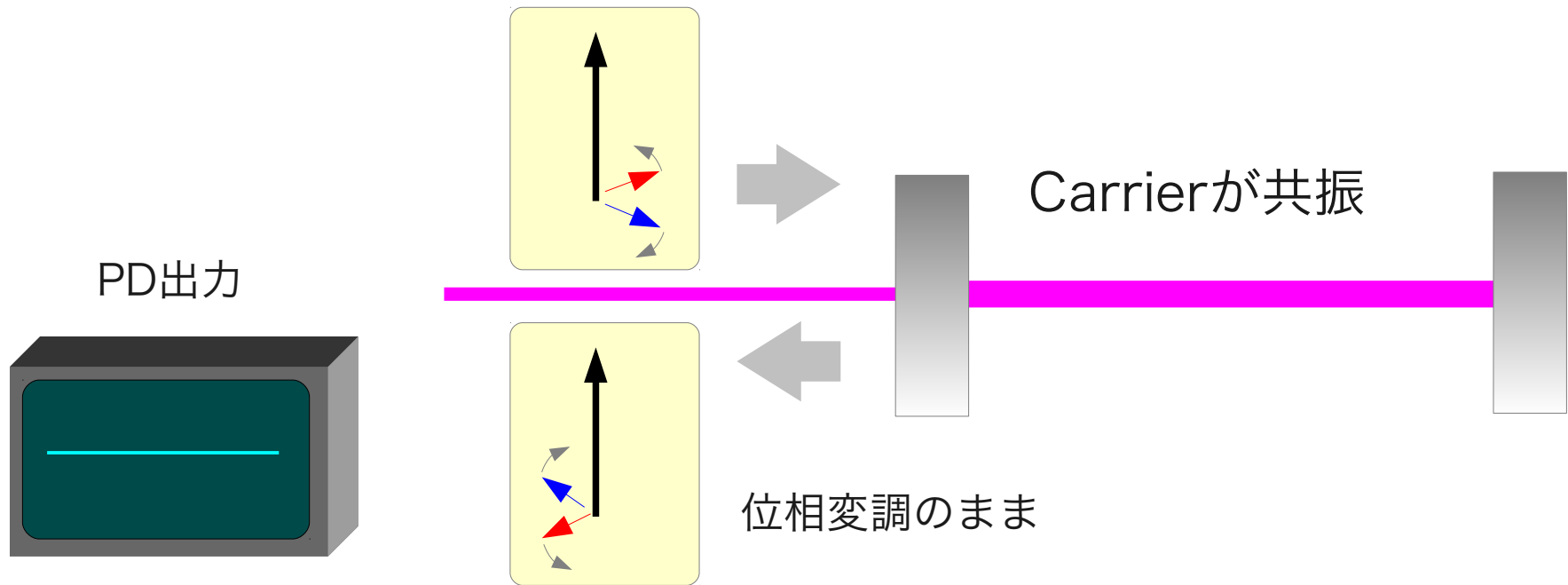
-Sidebandは負方向に回転

全電場 $E(t)$ はそのベクトル和

我々 (PD) は $E(t)$ の絶対値²しか知ることができない

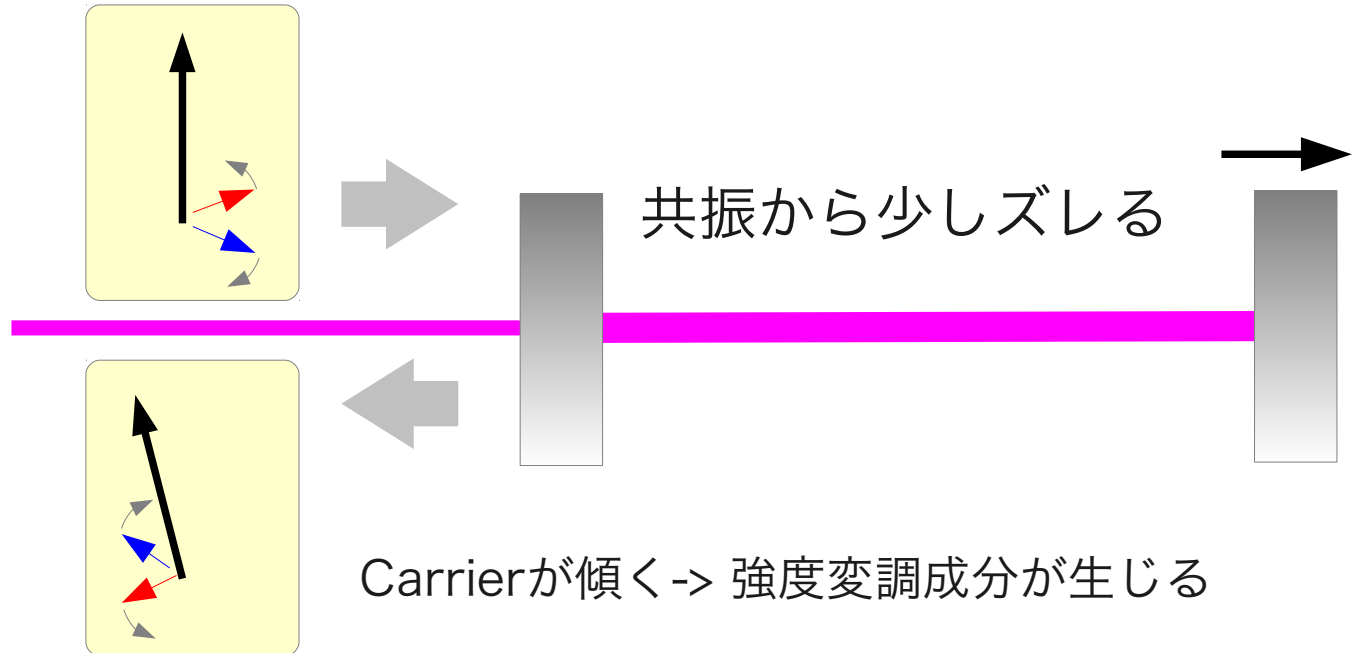
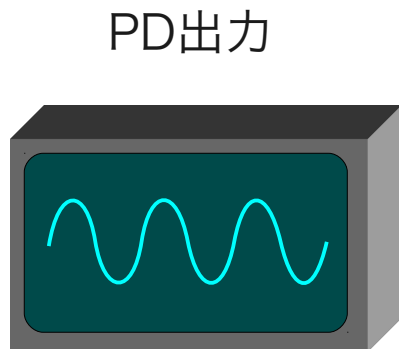


Pound-Drever-Hall Method



変調周波数で強度変調が生じる

復調: 誤差信号



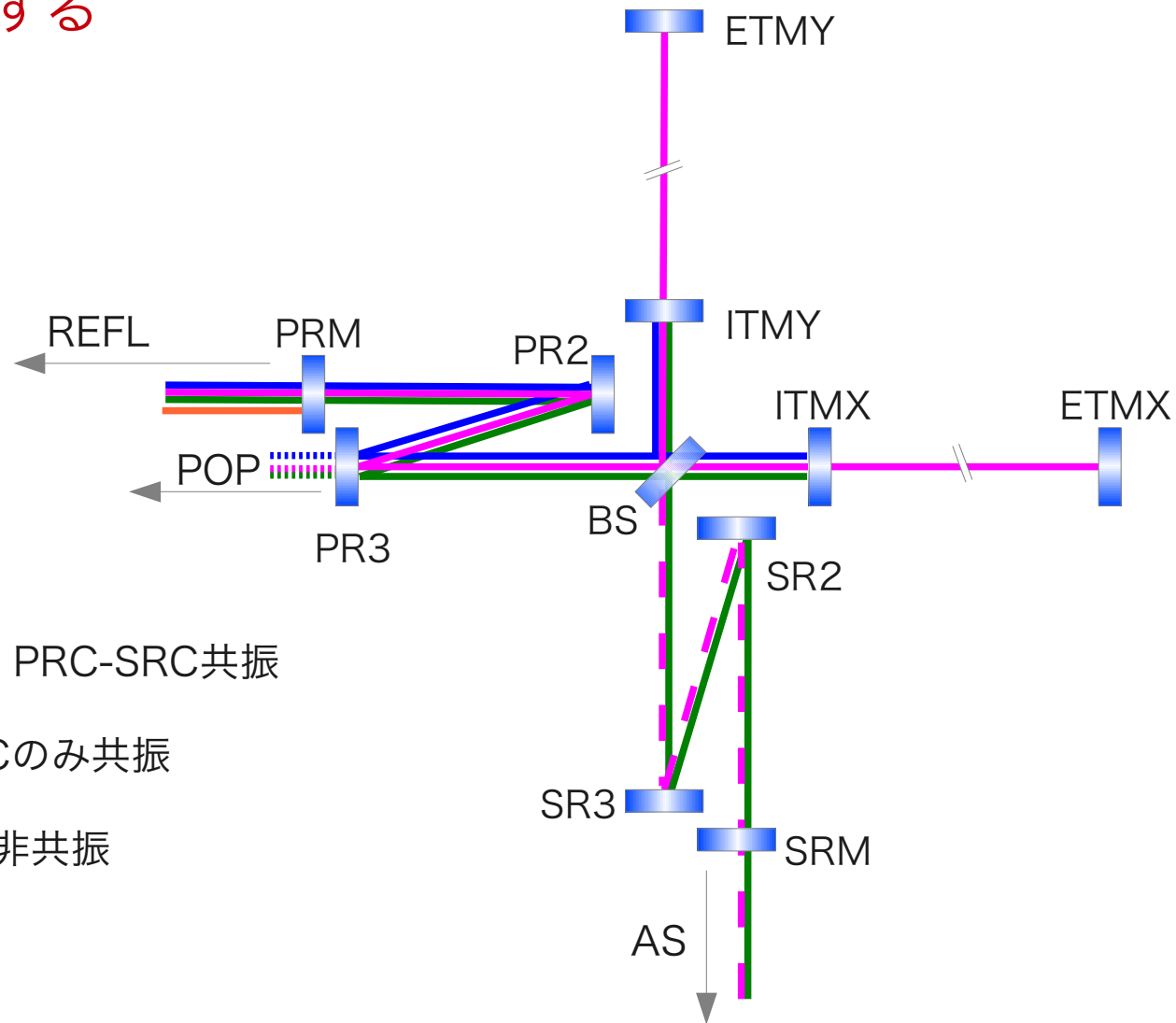
KAGRAの制御信号取得方法

3つのRF Sidebandを利用する

それぞれ異なる場所に共振

共振条件

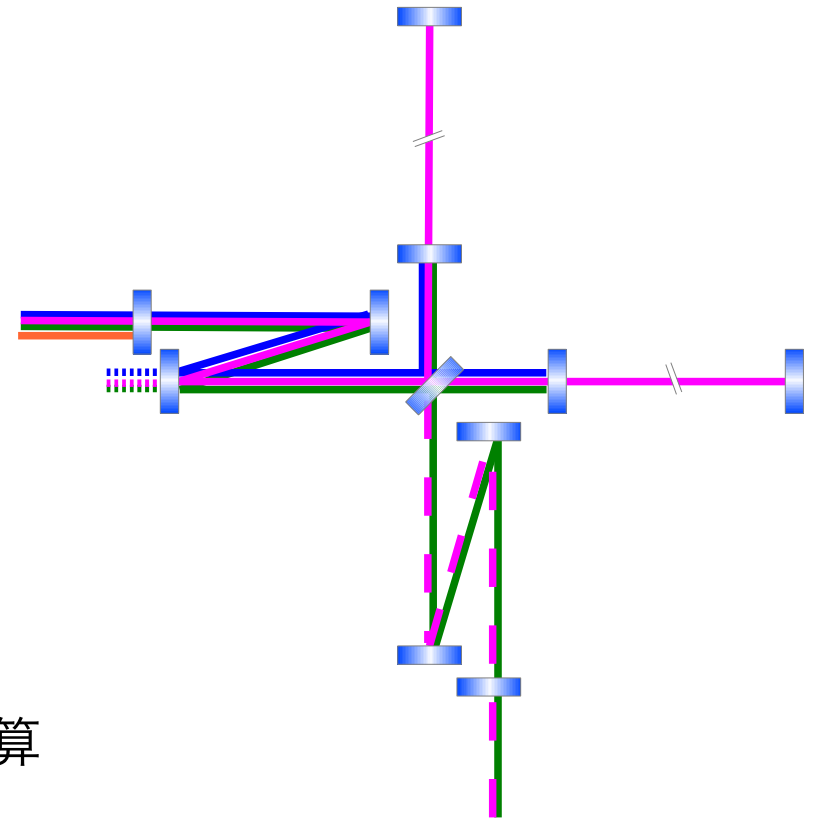
- Carrier
- f1 sideband (PM 16.875MHz): PRC-SRC共振
- f2 sideband (PM 45MHz): PRCのみ共振
- f3 sideband (AM 56.25MHz): 非共振



3つの信号取得ポート: AS, REFL, POP

干渉計シミュレーション

- KAGRAの干渉計構成は複雑
- シミュレーションで干渉計の応答を計算
 - 干渉計内の電場の振る舞いを線形近似で記述
 - 鏡と光の輻射圧による相互作用
 - 真空場の導入による量子雑音計算



誤差信号の周波数応答 → 制御系設計

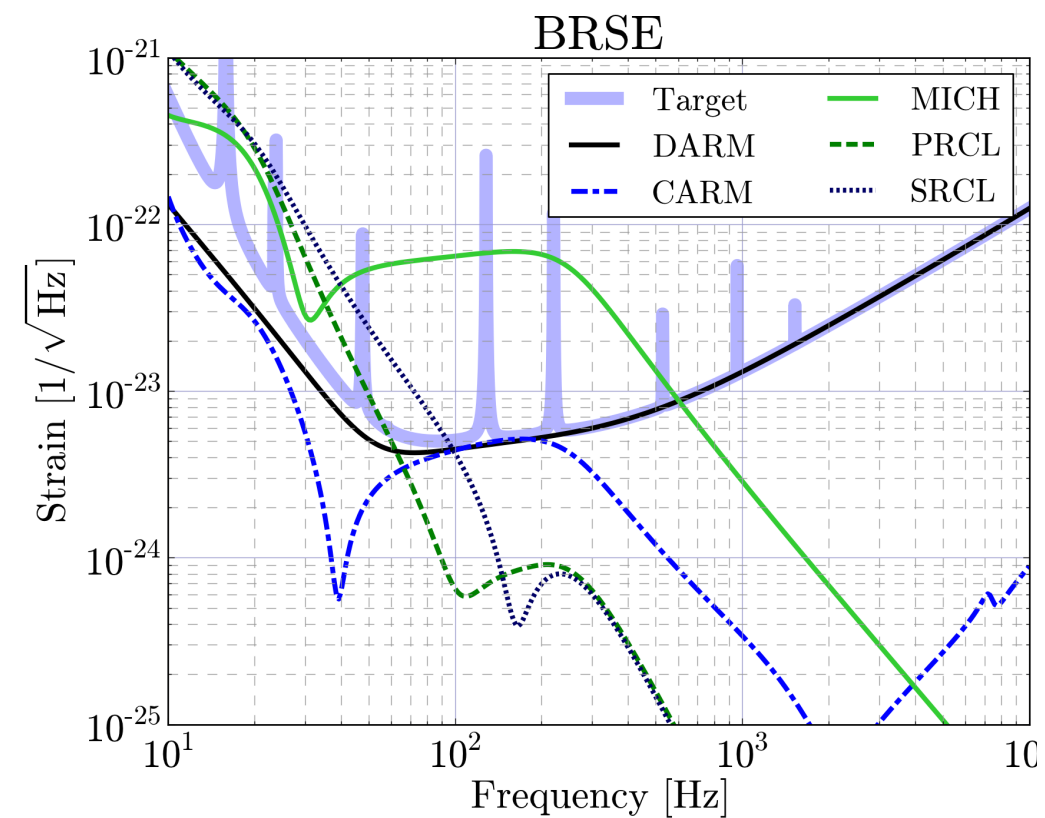
各種雑音(レーザー周波数等)のカップリング計算

→ 要求値設定

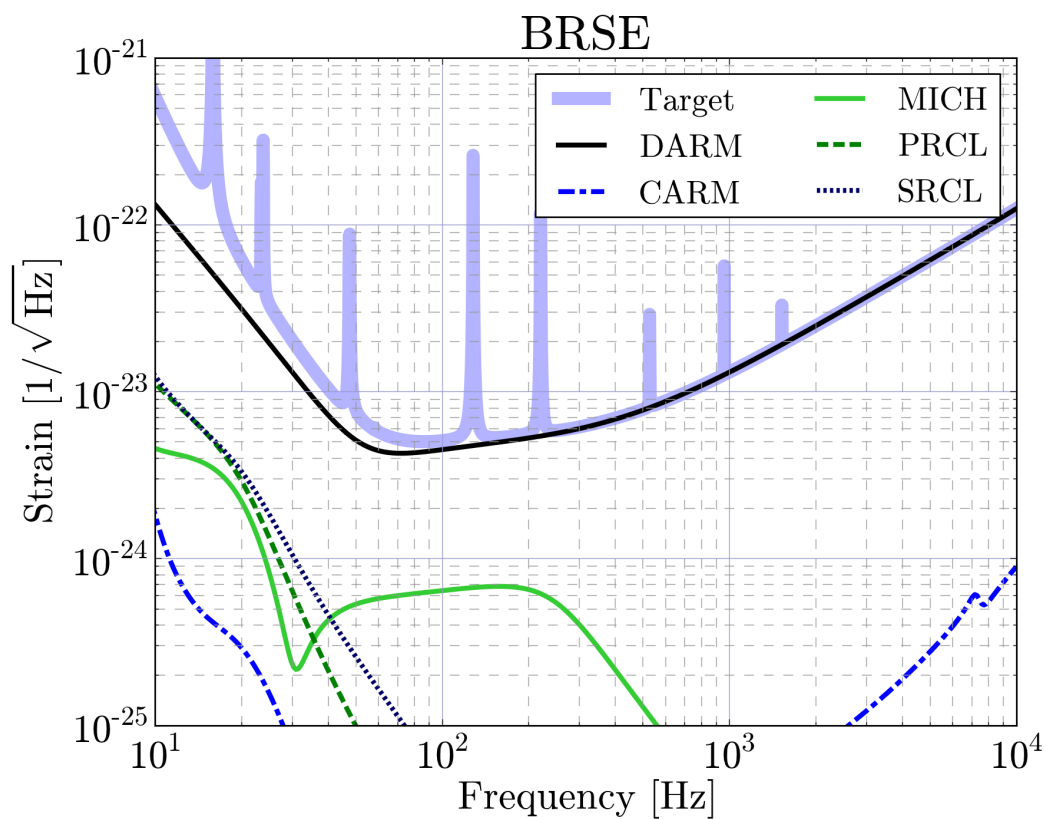
信号マトリックス

	DARM	CARM	MICH	PRCL	SRCL
AS_DC	1	4.2e-5	1.0e-3	4.8e-6	4.7e-6
REFL_1I	5.4e-3	1	4.3e-5	6.5e-3	4.3e-3
REFL_1Q	5.0e-3	1.3e-2	1	1.02	0.67
POP_2I	2.3e-2	4.3	1.0e-2	1	2.5e-4
POP_1I	8.7e-2	16.23	3.1e-2	2.1	1

制御によるショットノイズ混合



Feed forward



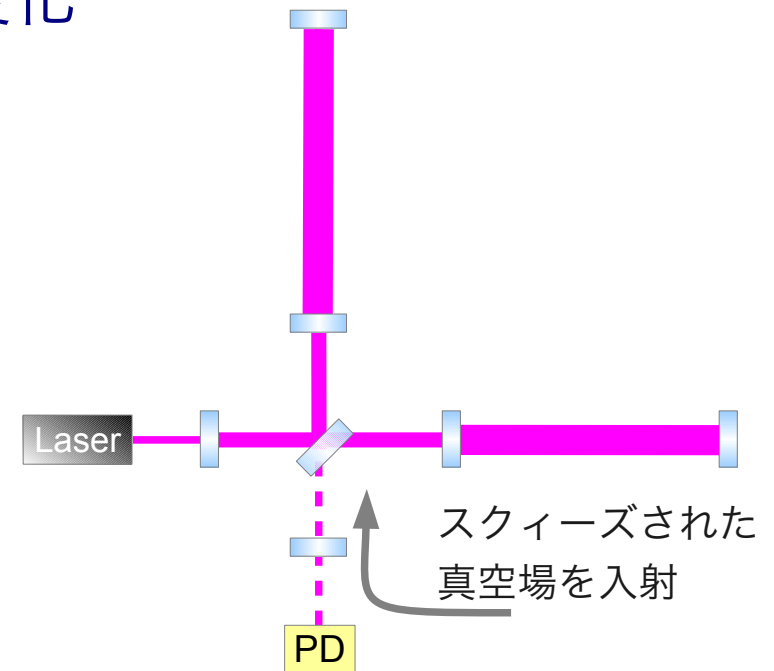
さらなる高感度化

量子雑音低減

- レーザーパワー増大 (ショットノイズ低減)
- 大質量ミラー (輻射圧雑音低減)
- 量子非破壊計測 (QND)
 - スクィーズ状態の利用

テクニカルノイズ

- Adaptive Filtering



まとめ

- 干渉計型重力波検出器の高感度化: 干渉計構成の工夫
 - Fabry-Perot共振器 (多重折り返し)
 - Power Recycling (光パワー増幅)
 - Resonant Sideband Extraction (干渉計帯域拡大)
- 複雑な干渉系を高精度で制御
 - RF変調を用いた誤差信号取得
 - シミュレーションによる制御方法最適化
 - 各種テクニカルノイズの影響見積り

複雑化