

干渉計型重力波検出器実験の現状

東大理
麻生 洋一

国立天文台高エネルギーセミナー
2009年12月10日

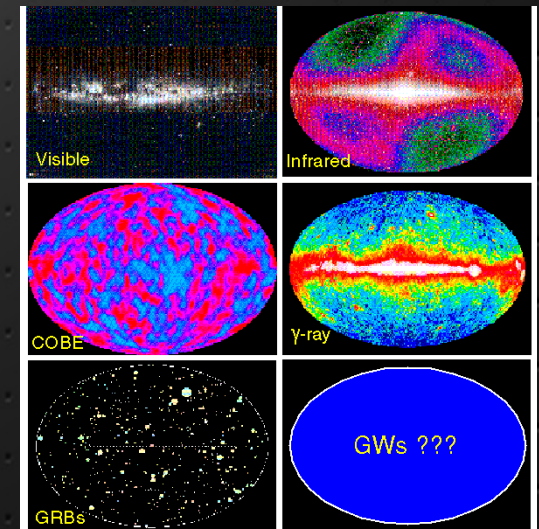
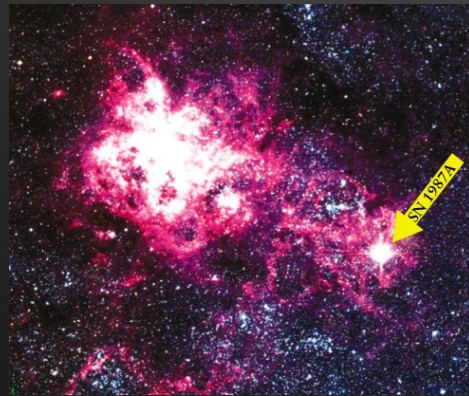
概要

- 干渉計型重力波検出器の原理
- 大型干渉計型重力波検出器の歴史・現状
- 干渉計型重力波検出器の感度を制限する雑音
- 次世代検出器の技術

この講演で触れない事

重力波検出の意義: 一般相対論の検証、新しい天文学、宇宙論、etc...

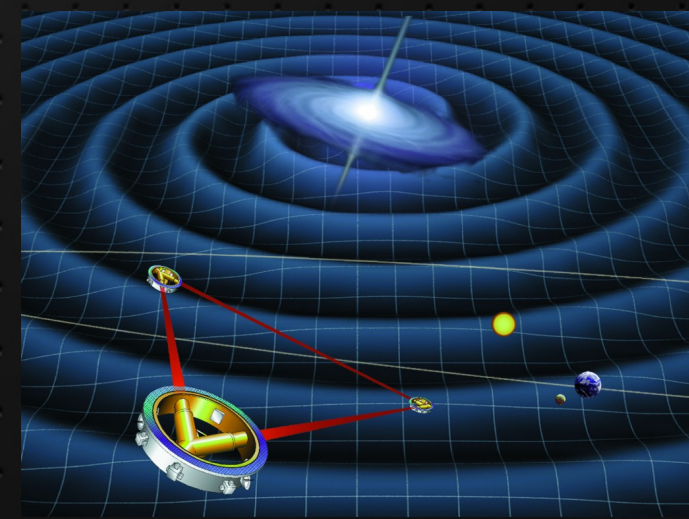
重力波のソース: 中性子星連星の合体, 超新星爆発, γ -線バースト
パルサー, 背景重力波



共振型重力波検出器

スペース重力波検出器: LISA, DECIGO, etc

パルサータイミング



干渉計型重力波検出器の原理

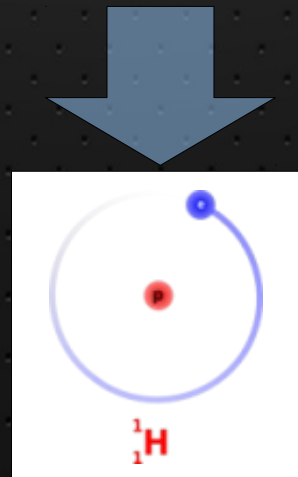
重力波が我々に及ぼす効果

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

1.4 M_☉ NS- NS binary inspiral in Virgo cluster (15Mpc)

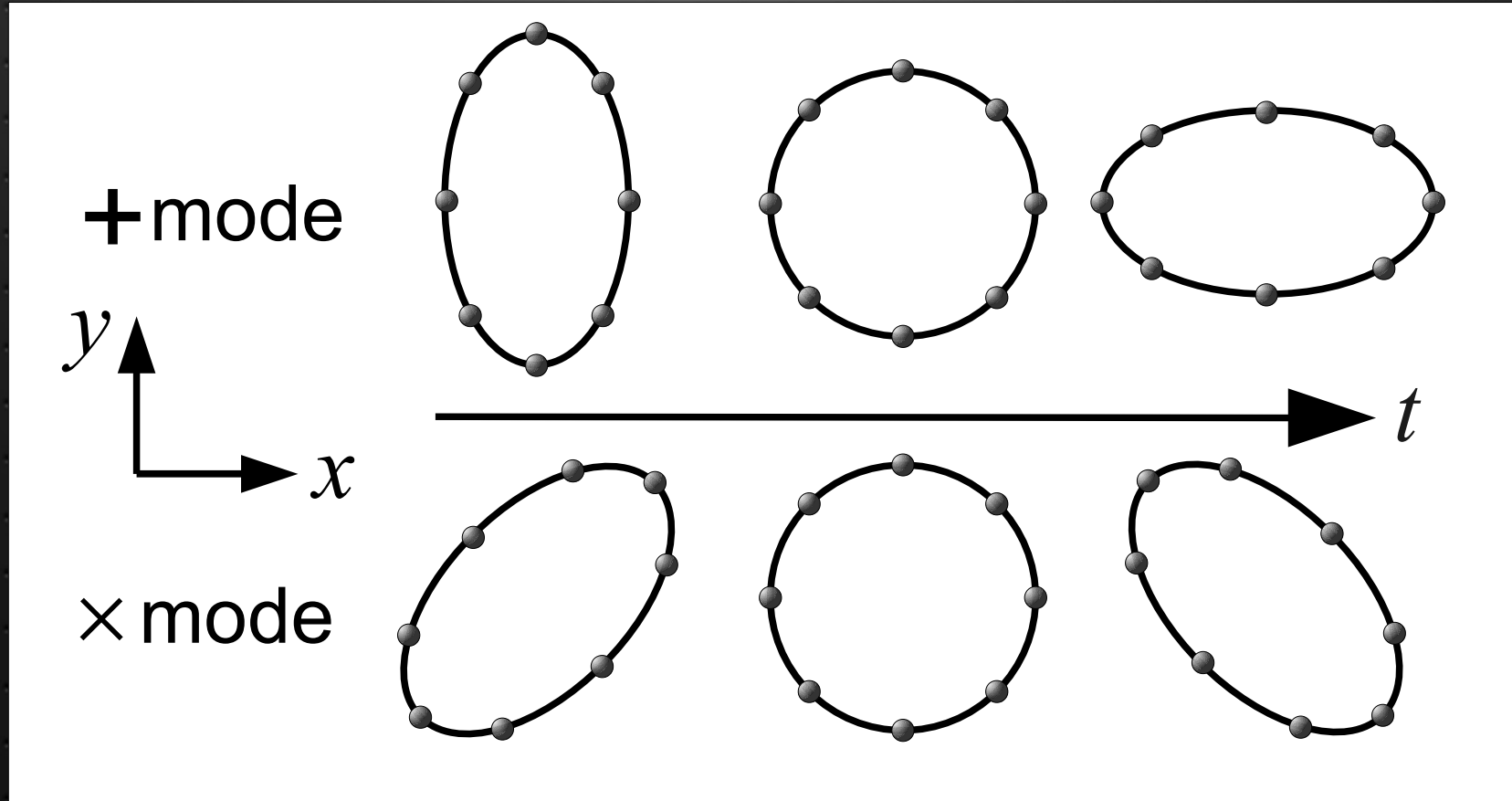
→ $h \sim 10^{-21}$



水素原子一個分の変化

重力波の検出

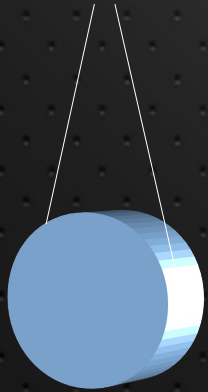
四重極の性質



直交する固有長さの差動変動を検出すればよい

Michelson干渉計

鏡は振り子として吊られている
--> 水平方向には自由質点
として振る舞う



Laser

Y-Arm



M2

二つの腕の光路差を
PD上の光量変化に変換

同相変動
レーザー雑音に鈍感



BS

PD

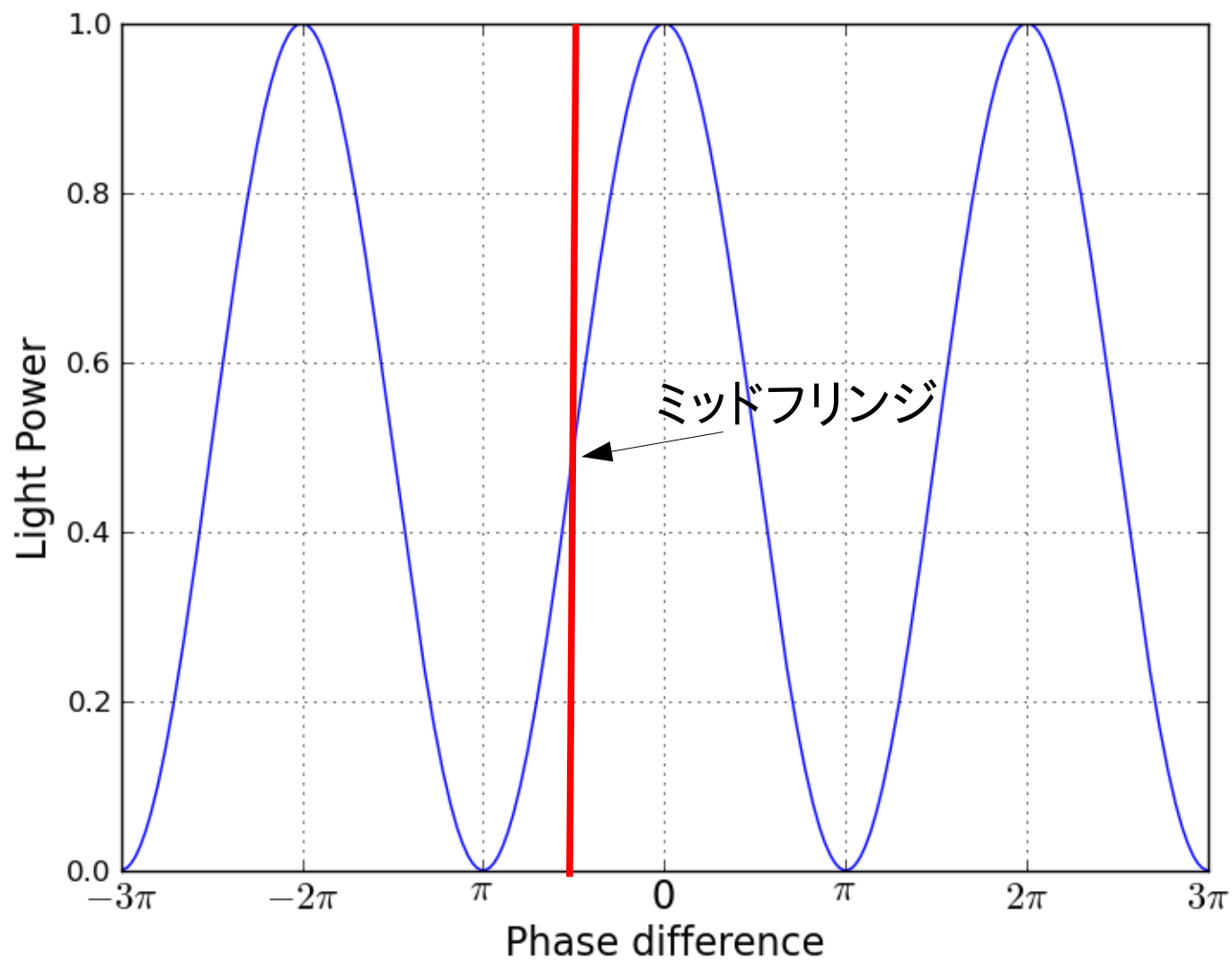
X-Arm

M1



動作点をどこに選ぶか?

PDの入射パワー



散射雑音(Shot Noise)

- レーザー光は有限個の光子の集まりである
- レーザーのコヒーレント状態は光子数の固有状態では無い
- したがって、観測される光子数はポアソン分布で揺らぐ

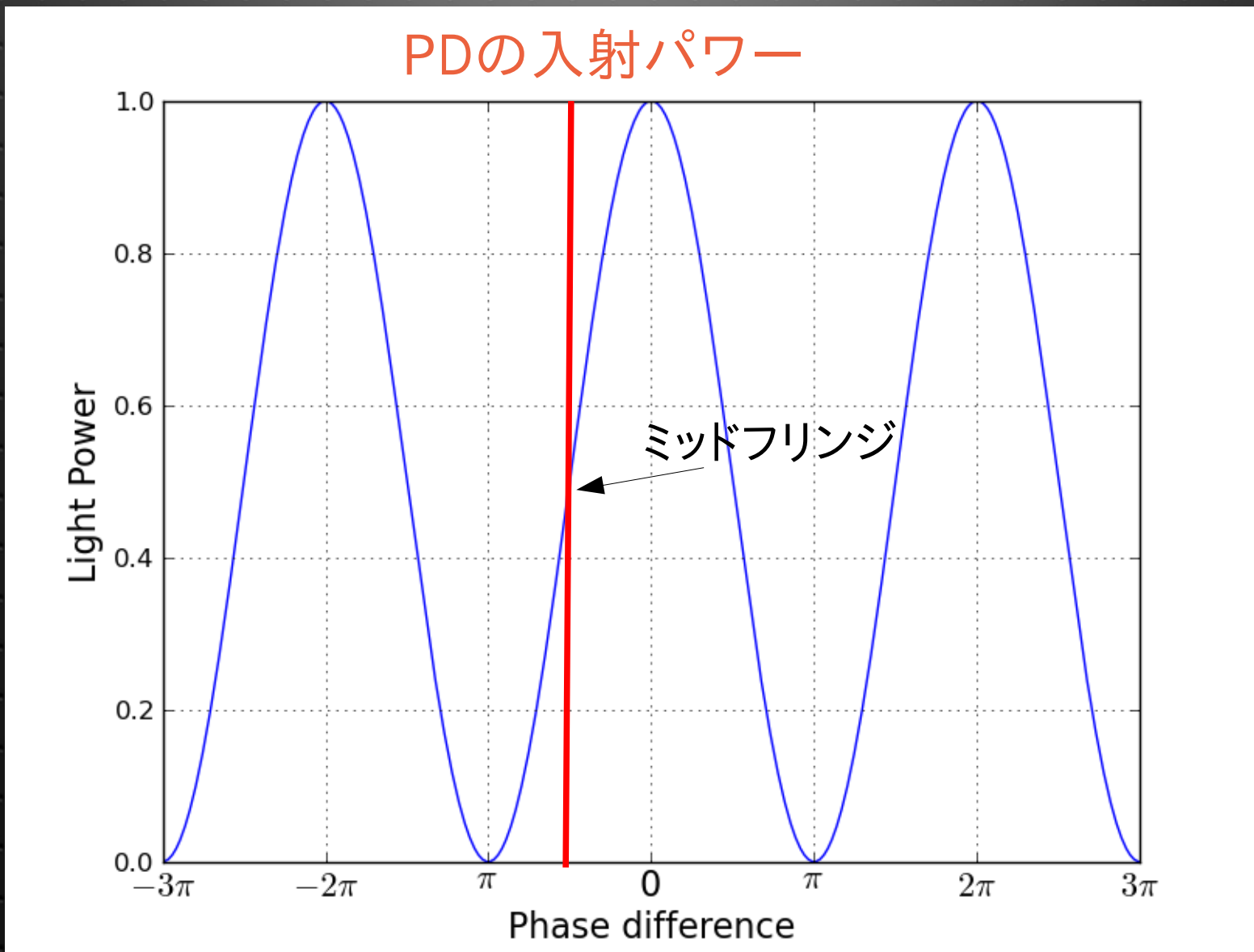
光子数の揺らぎ $\propto \sqrt{n}$ n : 平均光子数(パワーに比例)

干渉計信号 $\propto n$

$$\text{SNR} \propto \frac{n}{\sqrt{n}} = \sqrt{n}$$

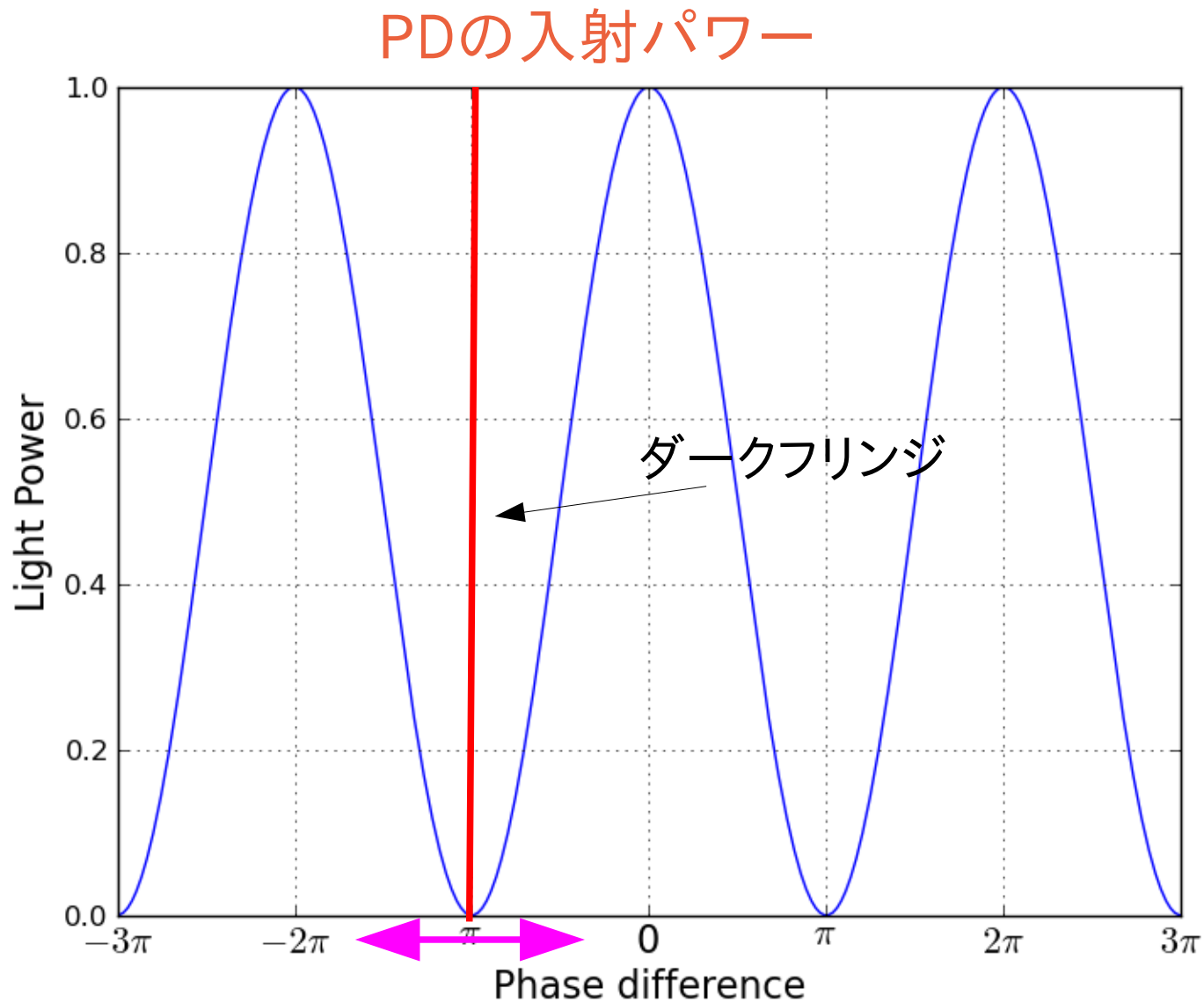
同じ光学構成ならば、レーザーパワーは高い方が散射雑音は低い

動作点をどこに選ぶか?



DC的パワーが大きい(散射雑音が大きい)
レーザーパワー変動の影響を受けやすい

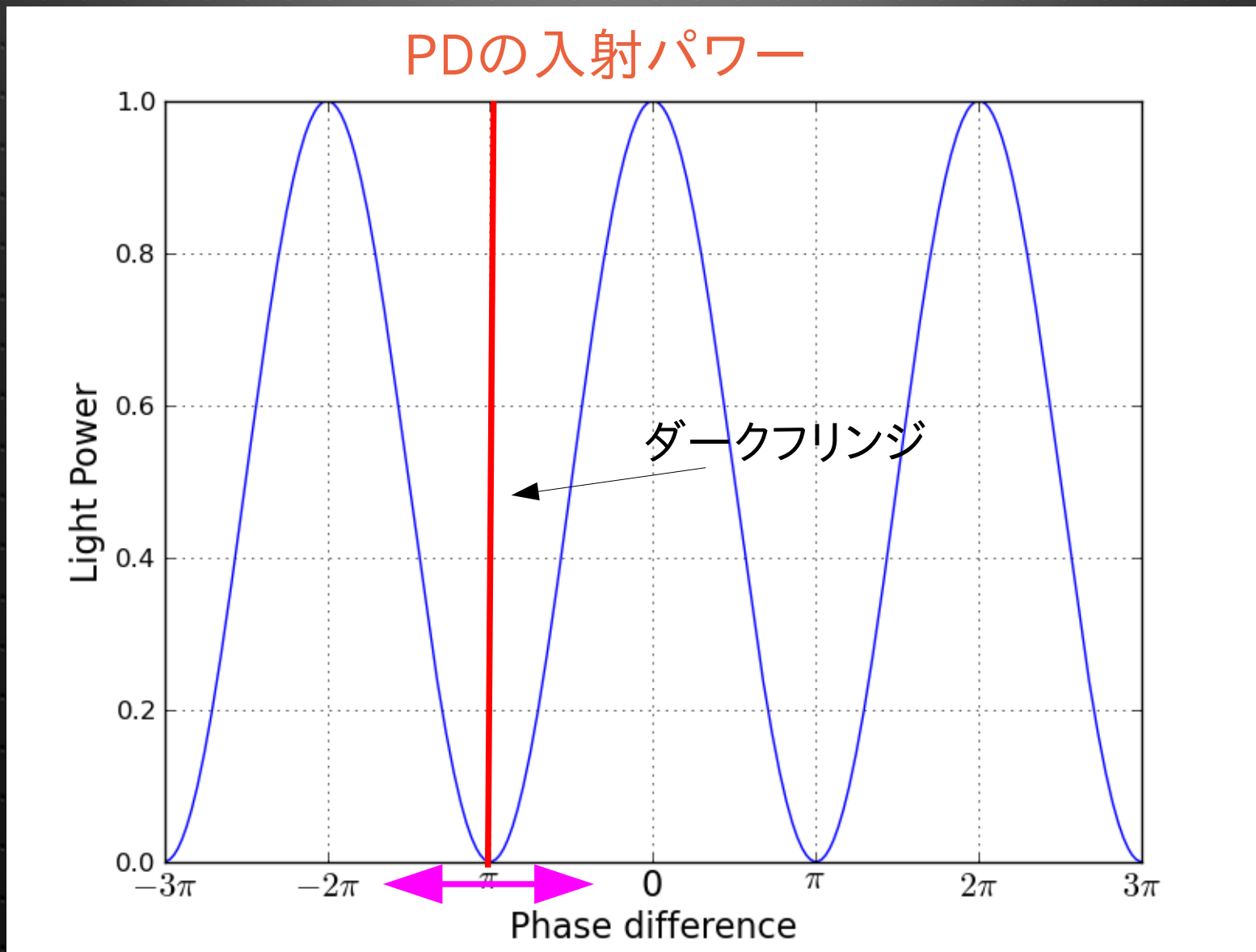
動作点をどこに選ぶか?



線形な信号が取れない

→ 微分すれば良い

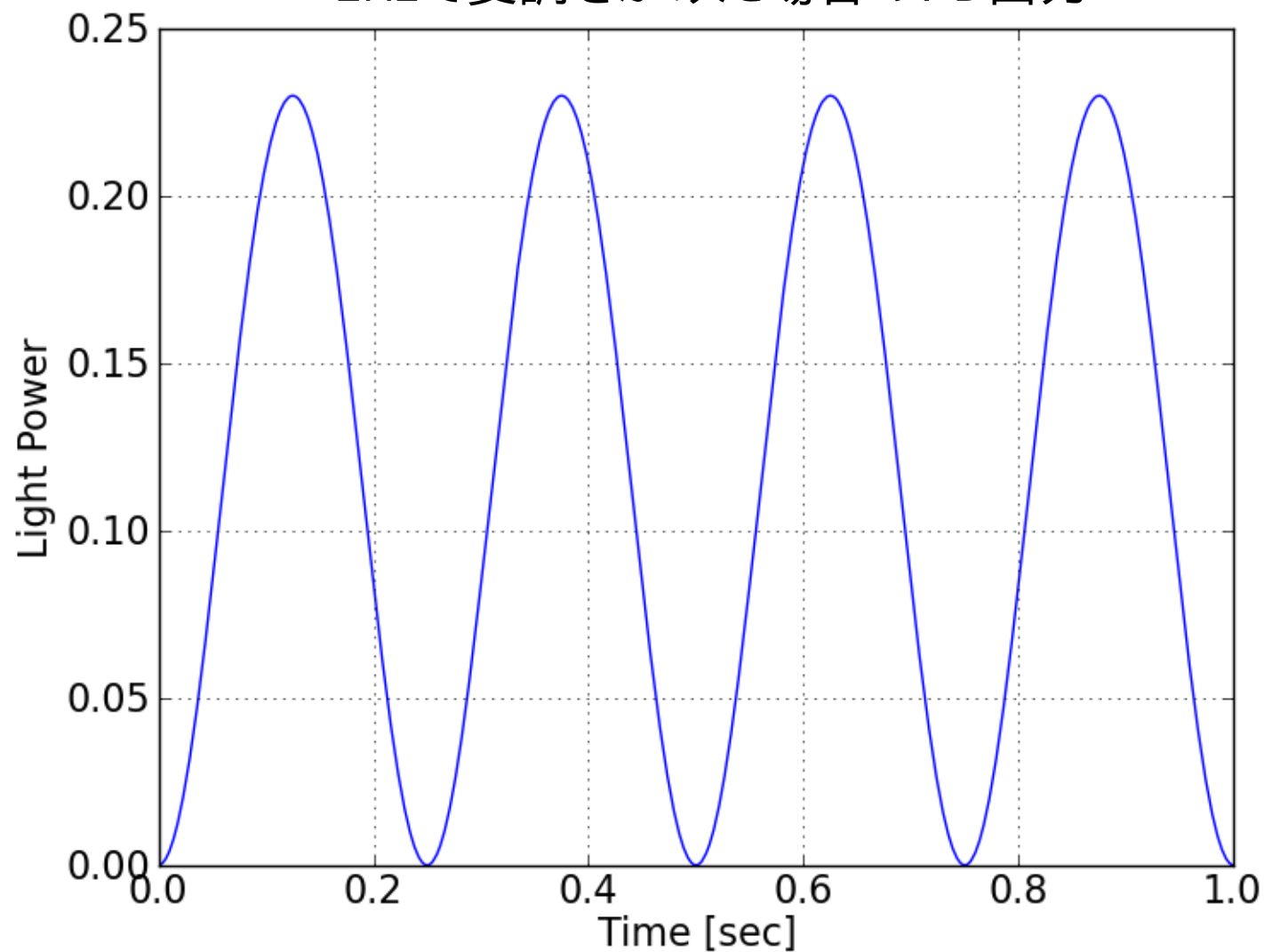
動作点をどこに選ぶか?



鏡を振って変調を加える

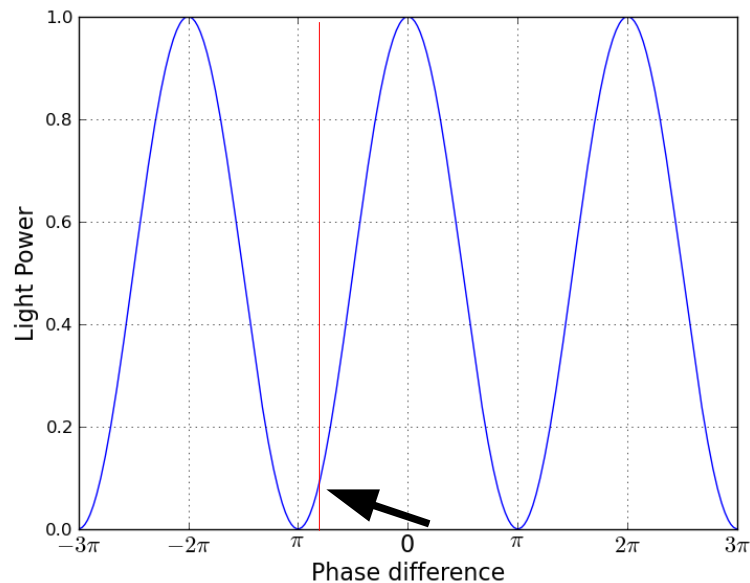
→ 変調周波数で復調して信号を得る

2Hzで変調をかけた場合のPD出力



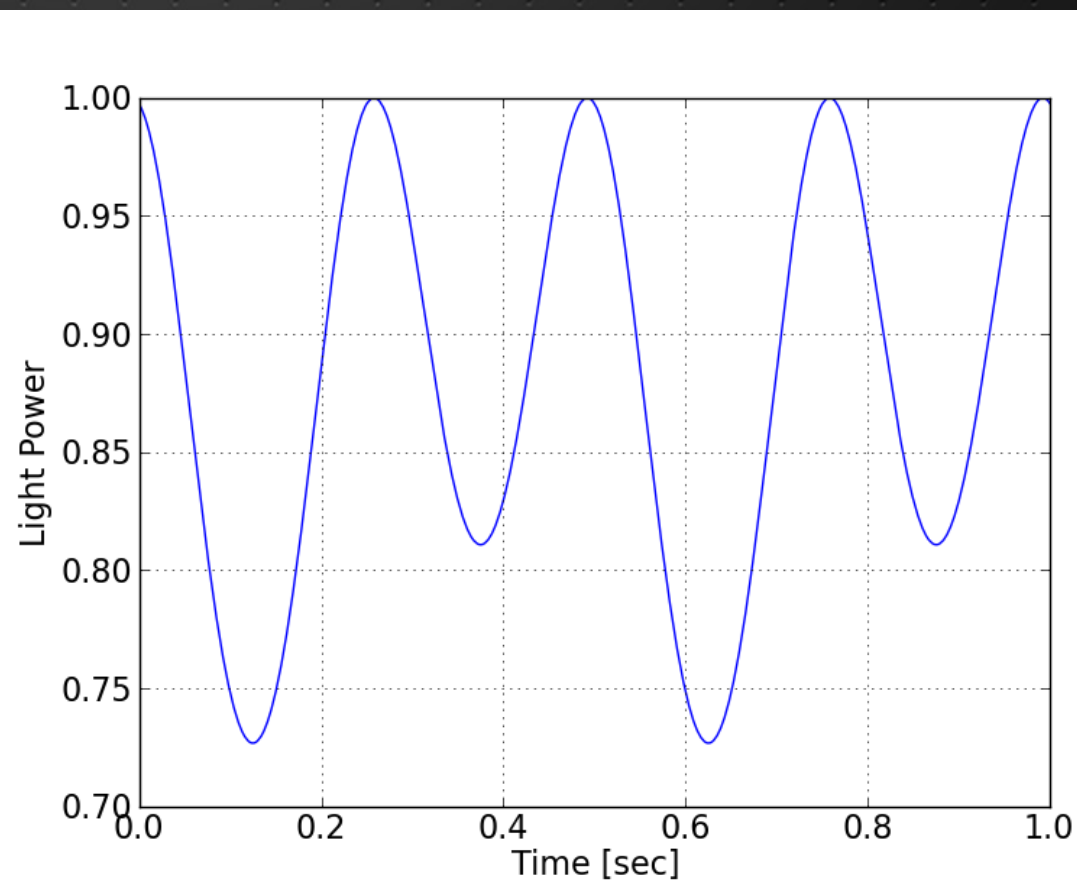
中心が完全にダークの場合、4Hzの信号が出てくる
2Hzで復調しても出力はゼロ

動作点がダークから少しずれた場合



$$P(t) = A \cos(\omega t) + B \cos(\nu \omega t) + C$$

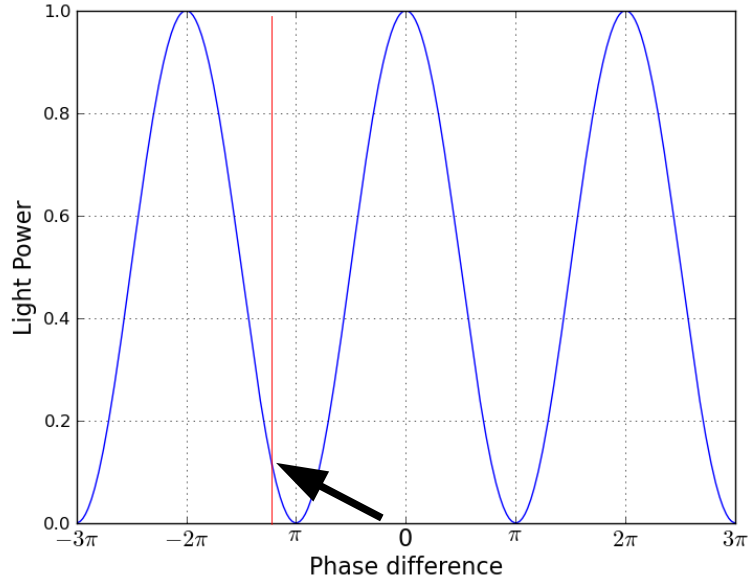
2Hzの成分が混ざる



復調信号

$$d(t) = \langle P(t) \times \cos(\omega t) \rangle$$
$$\sim A/\nu$$

動作点がダークから少しずれた場合



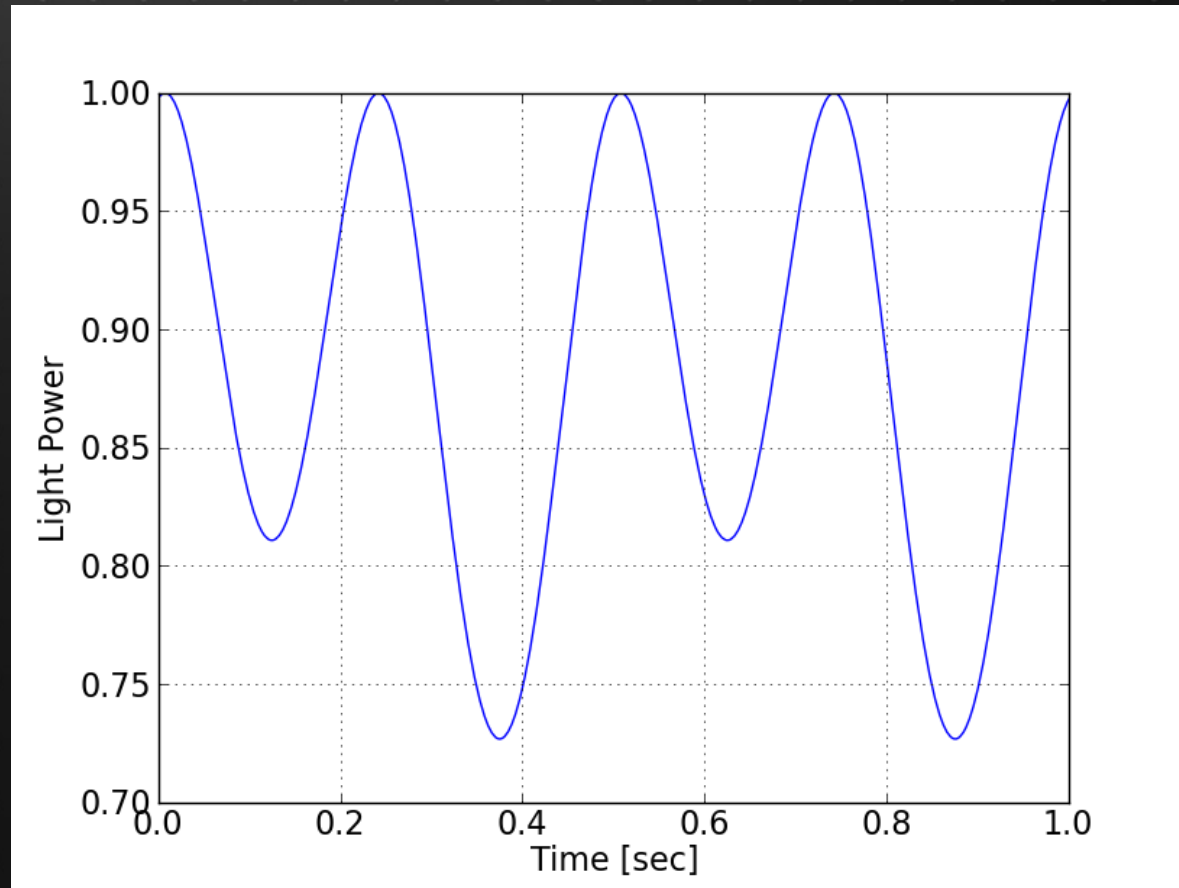
$$P(t) = -A \cos(\omega t) + B \cos(2\omega t) + C$$

逆位相になる

$$d(t) \sim -A/2$$

復調信号の符号は、動作点がダークからどちらにずれているかに依る

→ 線形な信号が得られる



位相変調

機械的な変調は使いたくないので、レーザーに変調をかける

元々のレーザー電場(Carrier) $E = E_0 e^{i\Omega t}$

位相変調をかける: $E = E_0 e^{i(\Omega t + m \cos \omega t)}$



$$= E_0 e^{i\Omega t} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n(m) i^n e^{in\omega t}$$

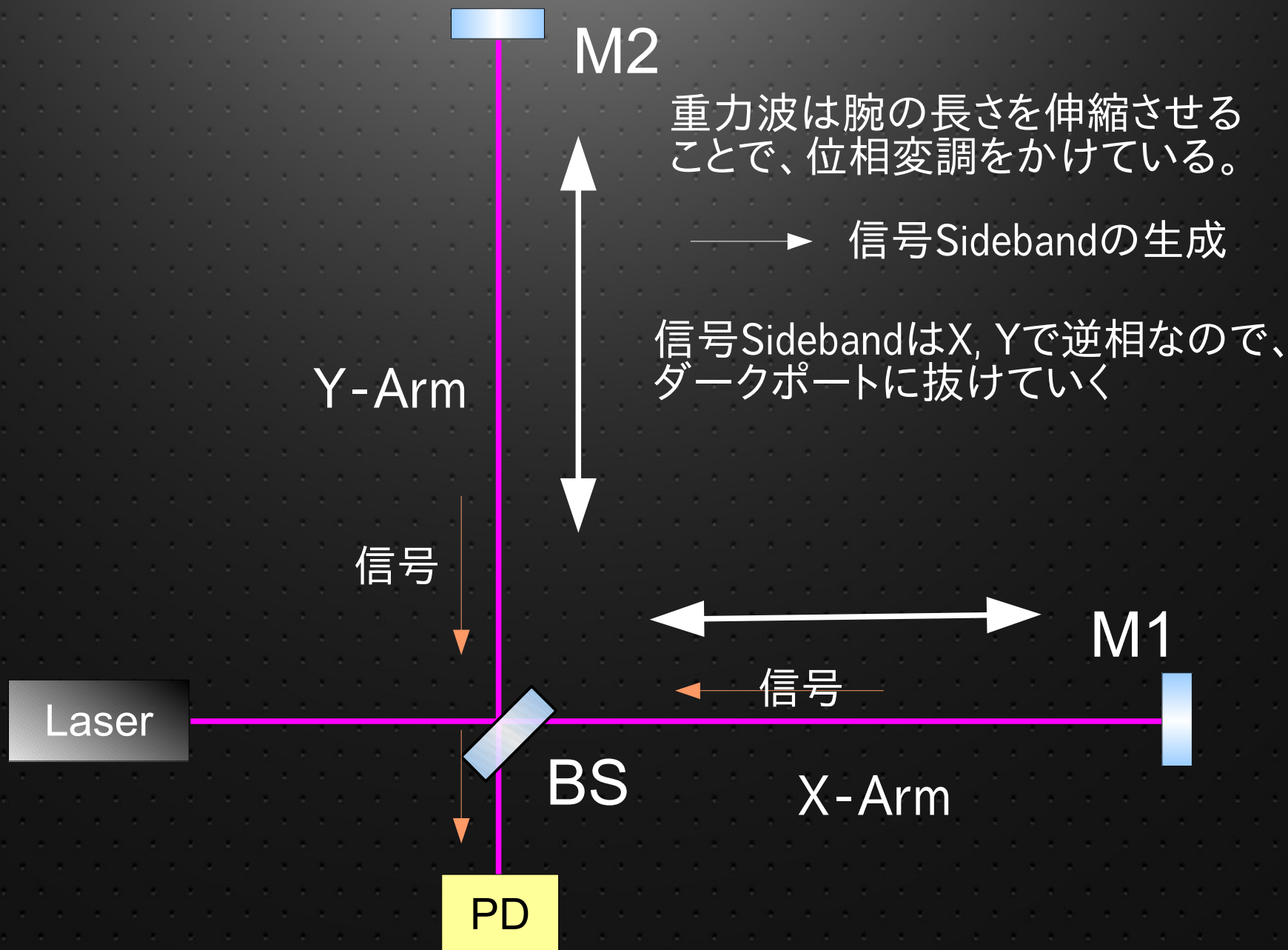
Sidebandの和

振幅変調をかける: $E = E_0 (1 + m \cos \omega t) e^{i\Omega t}$

$$= E_0 \left\{ e^{i\Omega t} + \frac{m}{2} (e^{i(\Omega+\omega)t} + e^{i(\Omega-\omega)t}) \right\}$$

周波数 ω で変調をかけると $\pm\omega$ にSidebandが生成される
(その他高次のSBも)

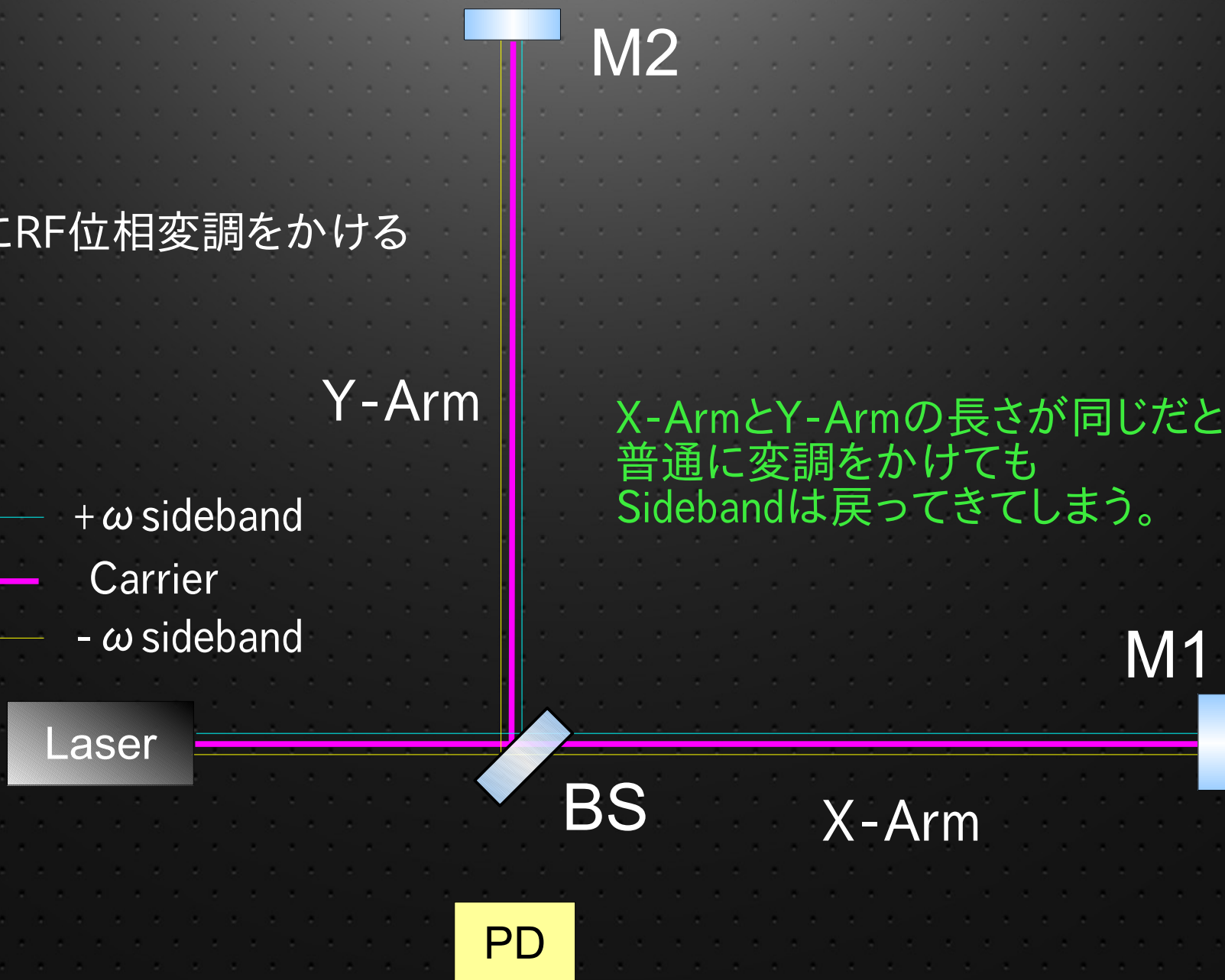
重力波による信号Sidebandの生成



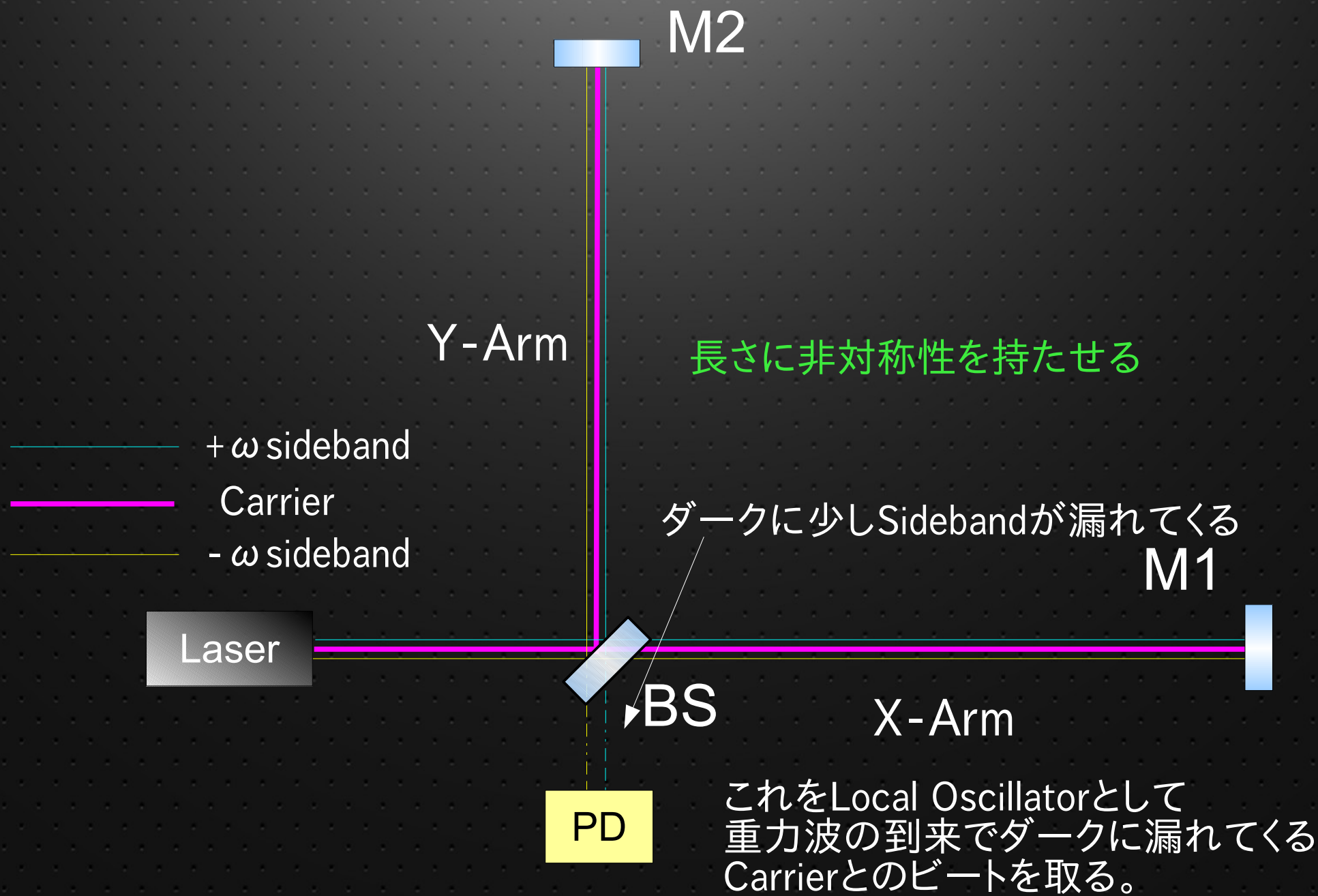
RF位相変調による信号取得

入射光にRF位相変調をかける

- + ω sideband
- Carrier
- - ω sideband

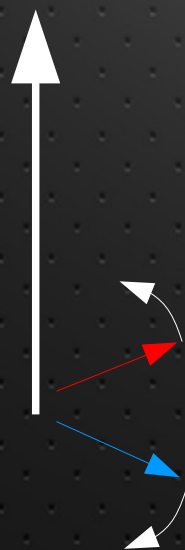


X-ArmとY-Armの長さが同じだと普通に位相変調をかけてもSidebandは戻ってきてしまう。



Phasor Diagram

$$E(t) = E_0 \left(\underbrace{J_0(m) e^{i\Omega t}}_{\text{Carrier}} + \underbrace{i J_1(m) e^{i(\Omega+\omega)t}}_{\text{+Sideband}} - \underbrace{i J_{-1}(m) e^{i(\Omega-\omega)t}}_{\text{-Sideband}} \right)$$



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

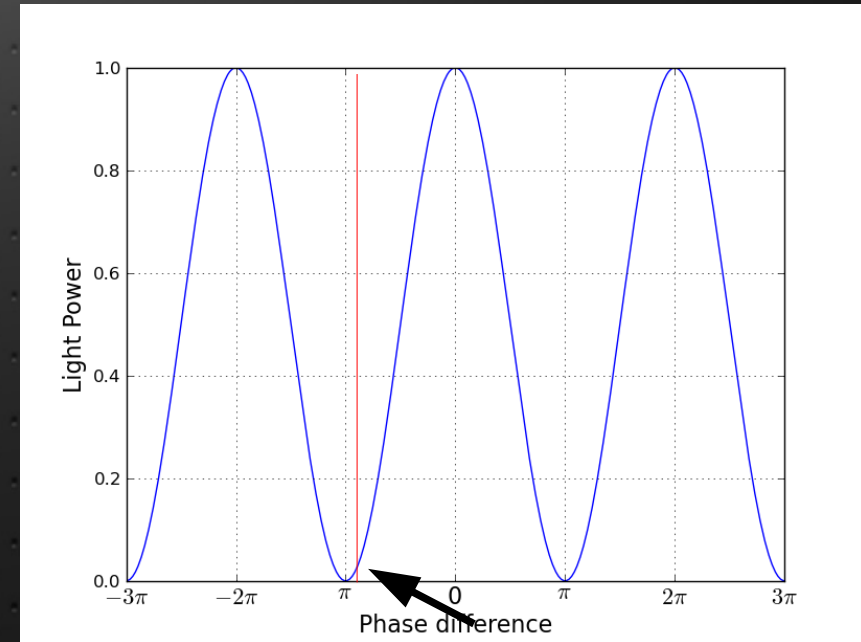
DC Readout

RF変調法

- レーザー強度雑音が散射雑音レベルに落ちる、高周波を使える
- 非定常散射雑音
- 変調器の雑音

DC Readout

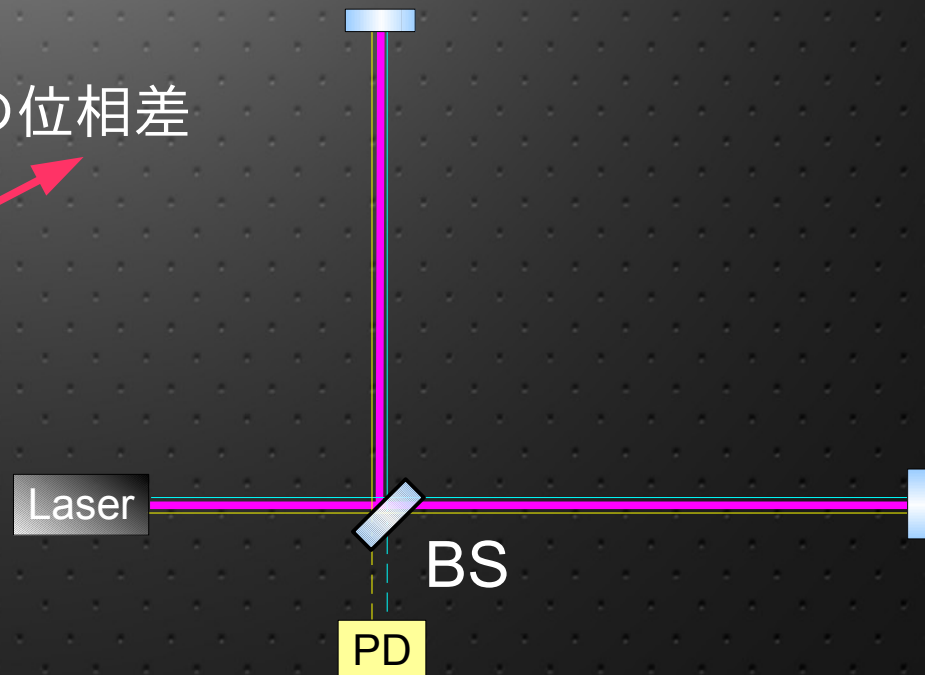
- 動作点を微小にダークからずらす
- ダークに漏れてくるCarrierをLocal Oscillatorとして、重力波による信号Sidebandとビートを取る
- 非定常散射雑音や変調器の雑音が無い
- DC付近の強度雑音が効いてくる



干渉計構成の進化

重力波信号: 二つの腕から戻ってくる光の位相差

これをどう増幅するか?



腕を長くする: 建設コスト、地球の曲率 etc

何度も折り返す: Fabry-Perot Cavity

Fabry-Perot Cavity



$$E_1 = (t_1 E_i + r_1 E_2) \exp\left(\frac{-i \Omega L}{c}\right)$$

$$E_r = (t_1 E_2 - r_1 E_i)$$

$$E_2 = r_2 E_1 \exp\left(\frac{-i \Omega L}{c}\right)$$

$$E_t = t_2 E_1$$

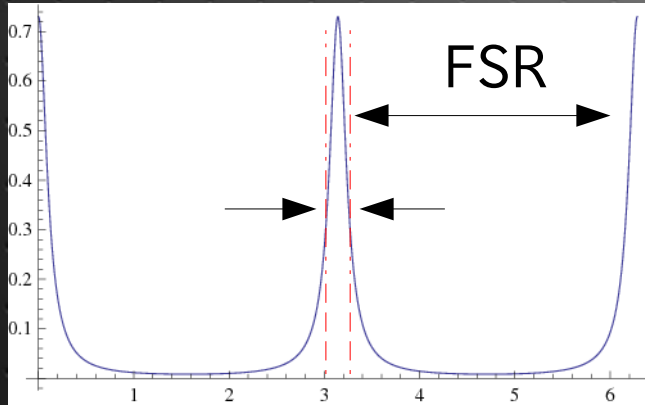
反射: $E_r = \left(-r_1 + \frac{t_1 t_2 r_2}{e^{2i\phi} - r_1 r_2}\right) E_i$

透過: $E_t = \frac{t_1 t_2 r_2 e^{i\phi}}{e^{2i\phi} - r_1 r_2} E_i$

$\phi = \frac{\Omega L}{c}$: 片道位相変化

往復の光路長が波長の整数倍 -> 共振(光が共振機内に溜まる)

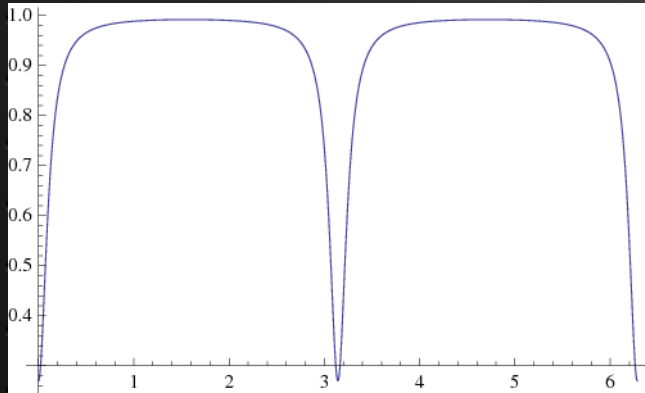
横軸: Φ (片道位相変化)



透過パワー

$\Phi = n\pi$ でピーク(共振)

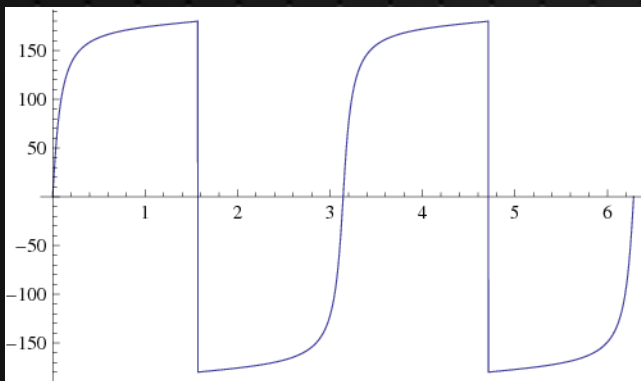
$$\frac{\text{FWHM}}{\text{FSR}} = \textit{Finesse}$$



反射パワー

共振時最小

$r_1 = r_2$ の時共振で0 (Critical Coupling)



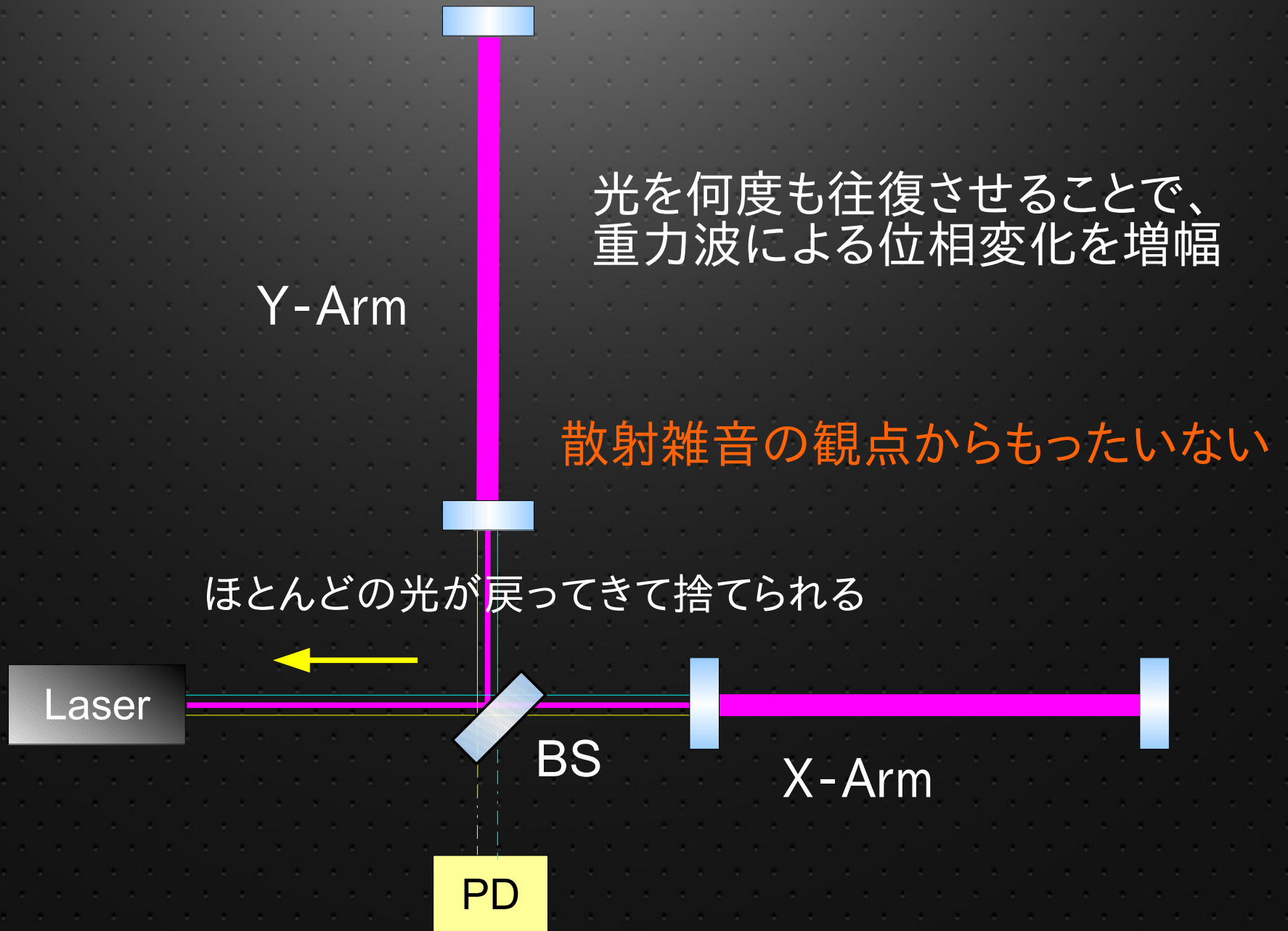
反射光位相

共振前後で大きく変化

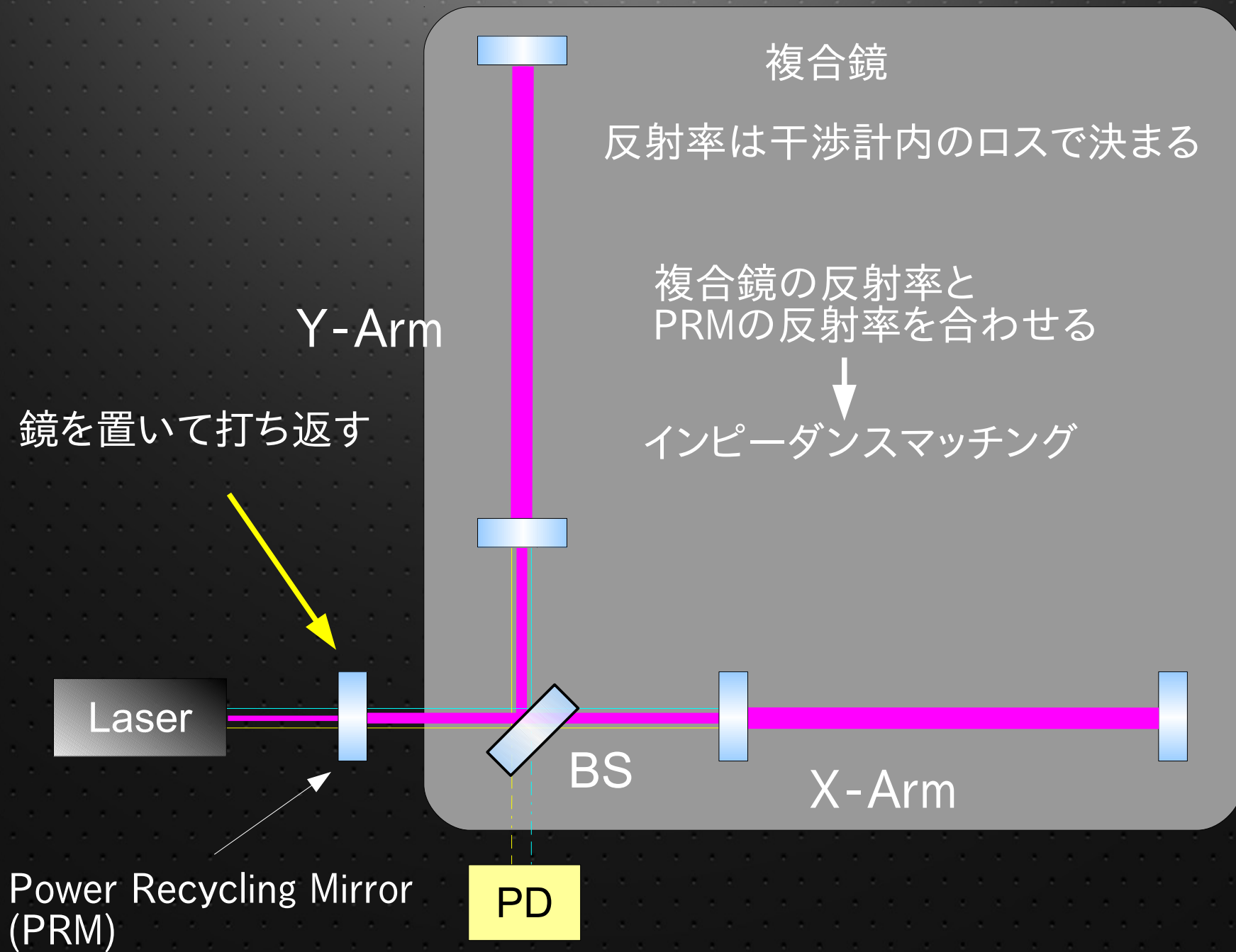
$r_1 < r_2$ の時、共振前後で反転 (Over coupling)

$r_1 > r_2$ の時、反転起こらず (Under coupling)

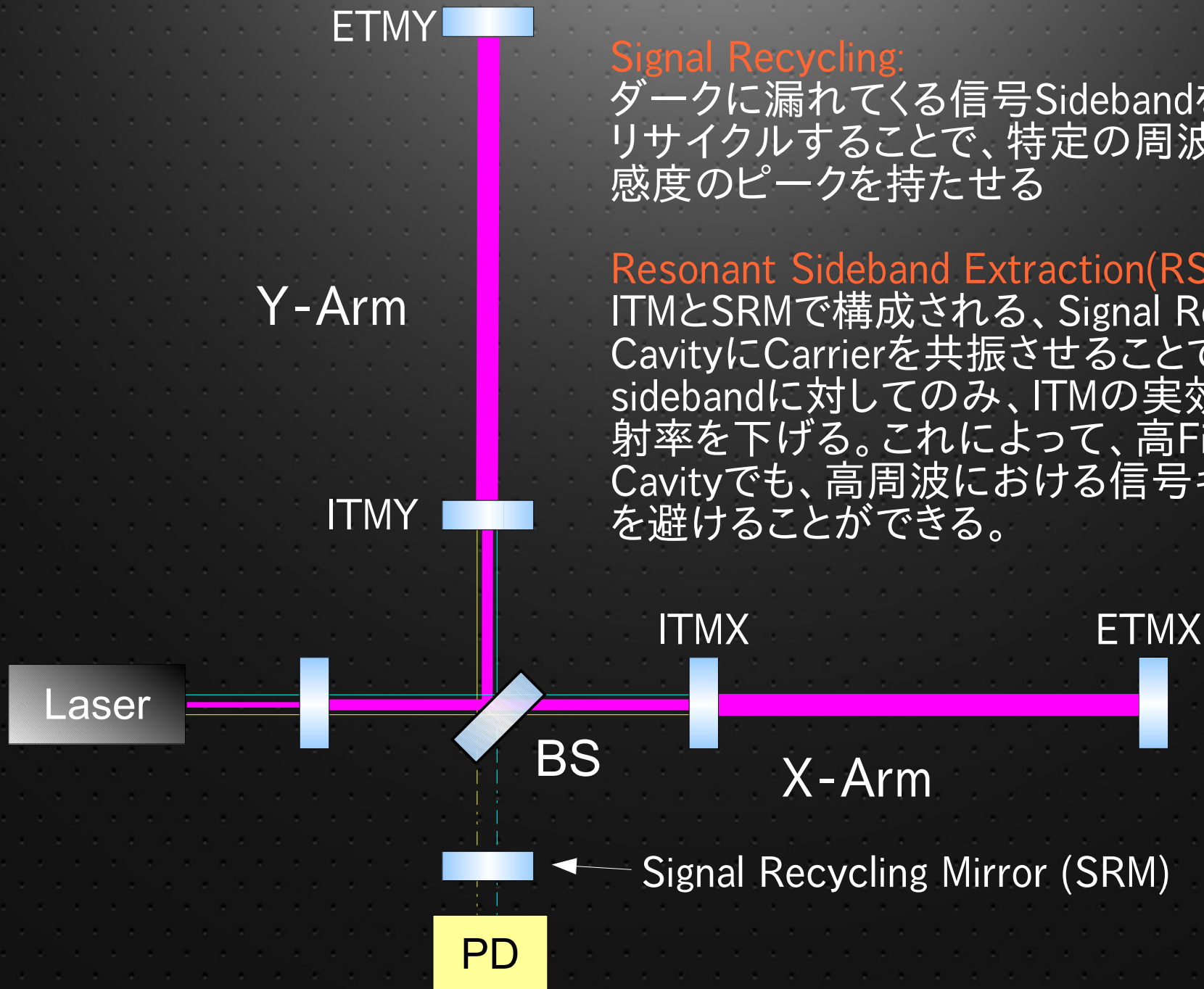
Fabry-Perot Michelson干渉計



Power Recycling



Signal Recycling or Resonant Sideband Extraction



Signal Recycling:

ダークに漏れてくる信号Sidebandをリサイクルすることで、特定の周波数に感度のピークを持たせる

Resonant Sideband Extraction(RSE):

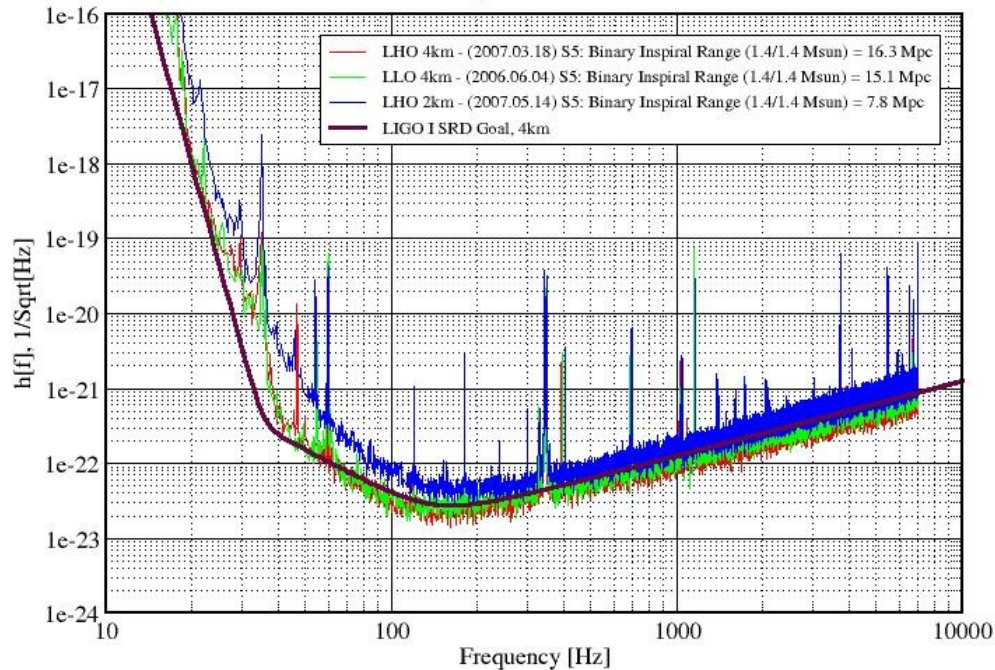
ITMとSRMで構成される、Signal Recycling CavityにCarrierを共振させることで、信号sidebandに対してのみ、ITMの実効的な反射率を下げる。これによって、高Finesse腕Cavityでも、高周波における信号キャンセルを避けることができる。

重力波検出器の感度について

感度曲線: 雑音のパワースペクトル

Strain Sensitivity of the LIGO Interferometers

S5 Performance - May 2007 LIGO-G070366-00-E



Inspirational Range (IR):
1.4 Solar Massの中性子星連星合体が
どの距離まで検出可能か (例: 15Mpc)

定義がいくつかあるが、
SNR=8, 全天平均感度で計算する
のが一般的

重力波検出器の感度は**振幅**で表すのが一般的

振幅 $\propto 1/(\text{距離})$ \longrightarrow 検出可能距離は感度に比例

検出可能体積は感度の3乗に比例

感度10倍 \longrightarrow 検出可能イベント数は**1000倍**

大型干渉計型重力波検出器の歴史、現状、将来計画

干渉計型重力波検出器の世界ネットワーク

LISA, DECIGO



Operating detectors: Yellow, Planned detectors: Blue

第一世代干涉計

TAMA300



- 世界初の大型(中型?)レーザー干渉計型重力波検出器
- 300m Recycled Fabry-Perot Michelson interferometer
- 国立天文台三鷹キャンパス内に設置
- 他の検出器に先駆けて1000時間連続観測達成等、一時期は世界をリードしていた



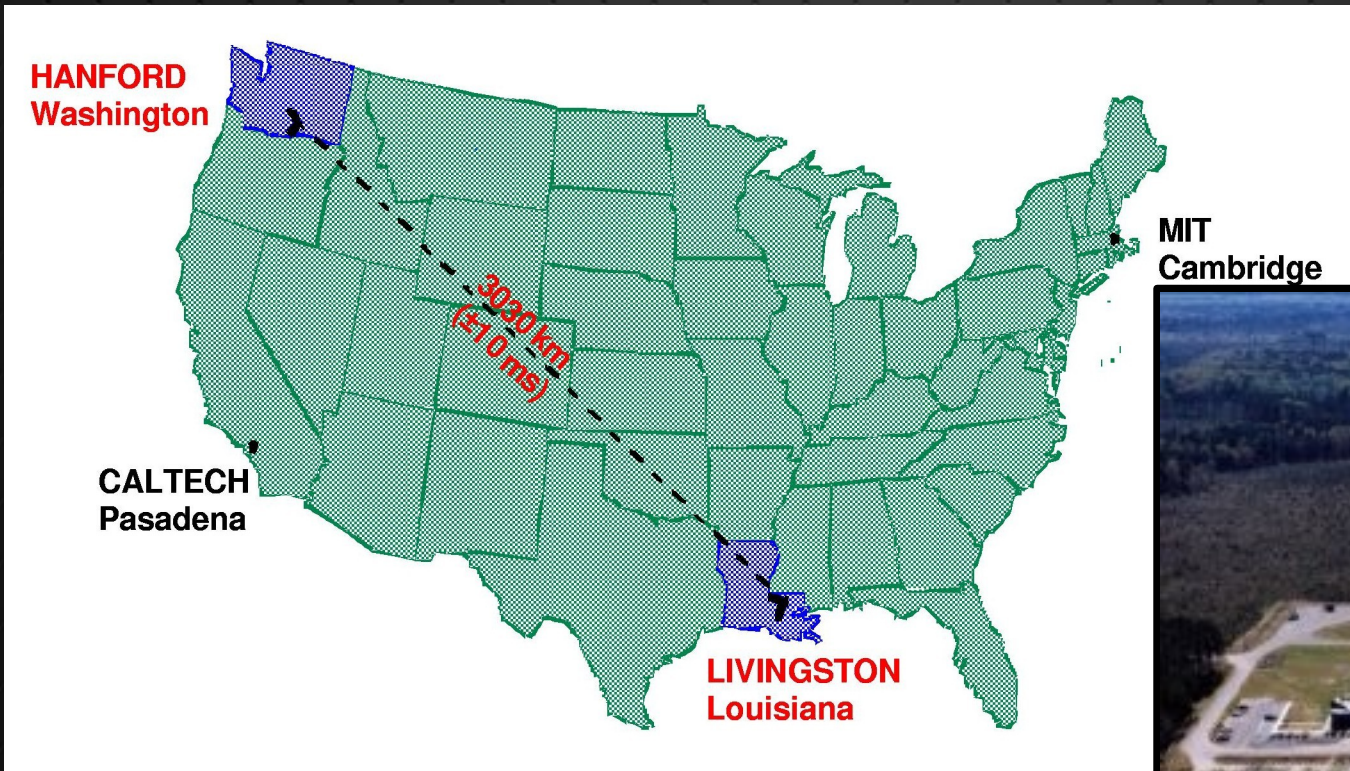


LIGO

(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)



Hanford, Washington
4km and 2km interferometer
in the same vacuum system



Livingston, Louisiana
4km interferometer

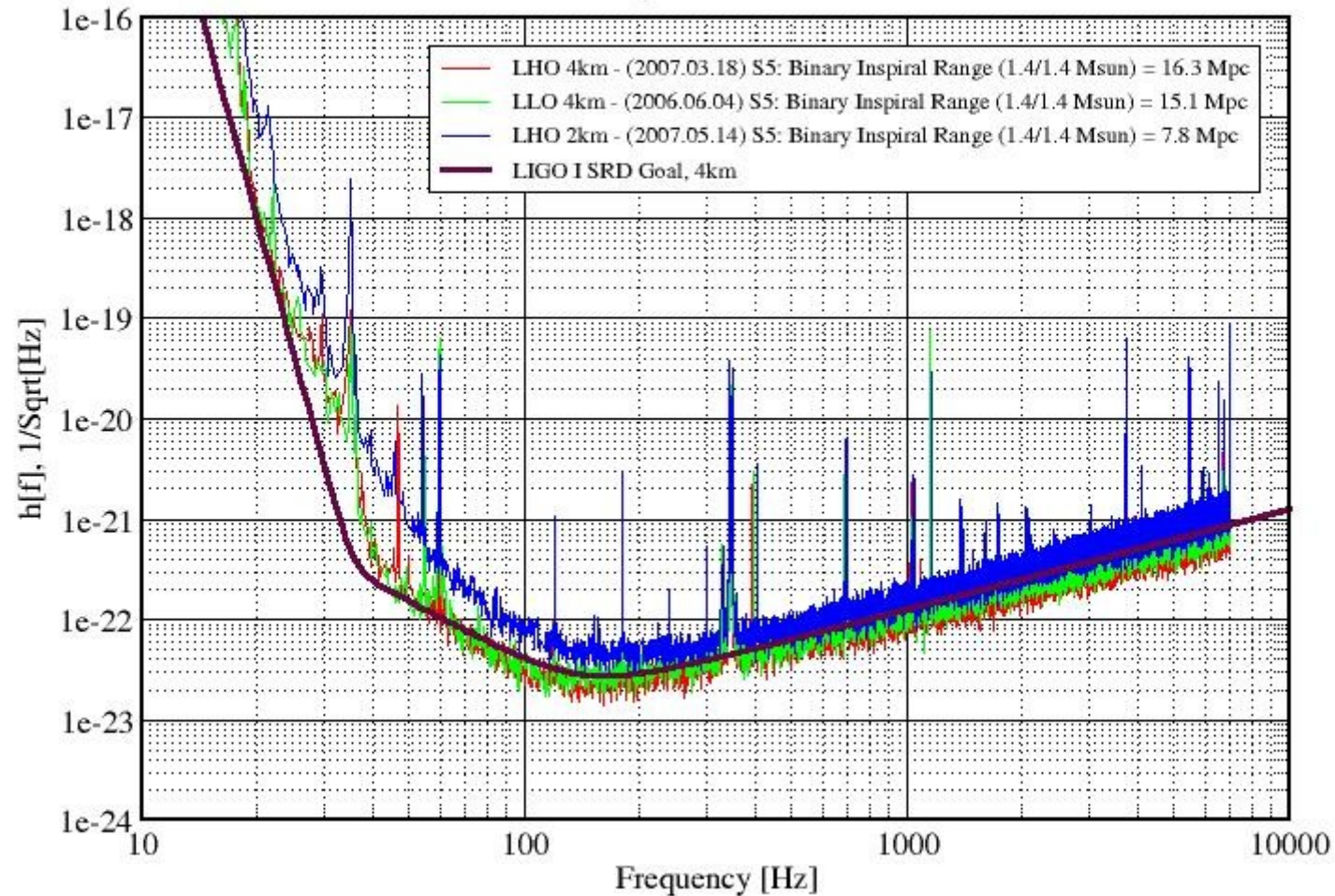


現在世界最高感度を保持

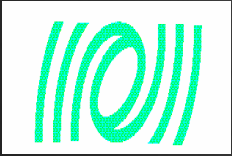
Initial LIGOの感度 (S5)

Strain Sensitivity of the LIGO Interferometers

S5 Performance - May 2007 LIGO-G070366-00-E



Inspiral Range: 約15Mpc



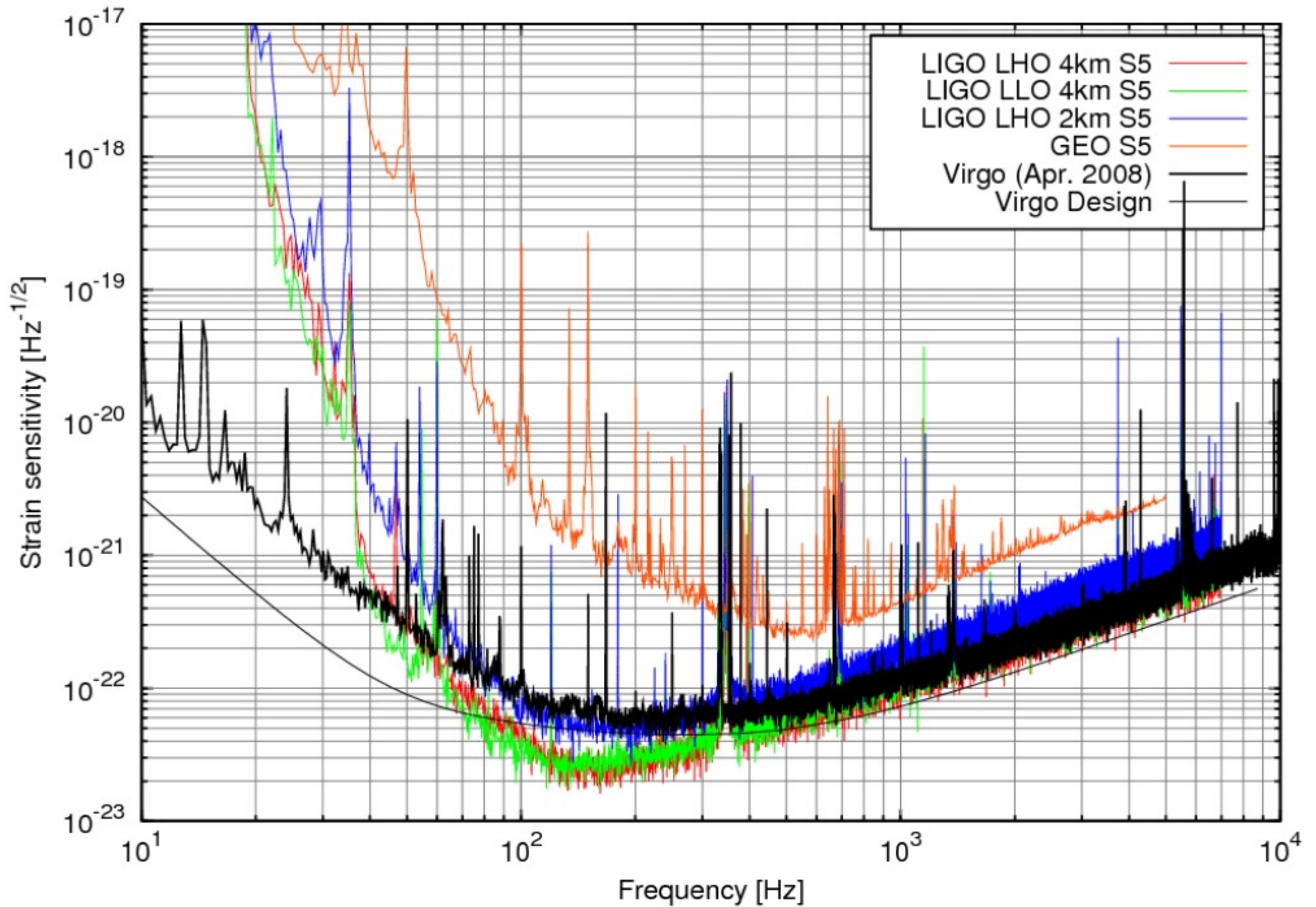
Virgo

French-Italian Collaboration
3km Recycled Fabry-Perot Michelson interferometer
Located near Pisa, Italy



LIGOの感度に迫りつつある

Virgoの感度



GEO600



British-German Collaboration

600m Folded Michelson Interferometer
with a Signal Recycling Mirror

Located near Hannover, Germany

Leibniz
Universität Hannover



UNIVERSITY OF
BIRMINGHAM



Universitat de les
Illes Balears

CARDIFF
UNIVERSITY

次世代干渉計

- 第一世代のkmクラス干渉計: IR=10Mpc程度
- NS-NS Binaryの年間検出可能イベント数 < 0.1 個

- 次世代干渉計: IR = 200Mpc程度
- NS-NS Binaryのイベント数期待値は年間数個以上

Enhanced LIGO, Advanced LIGO

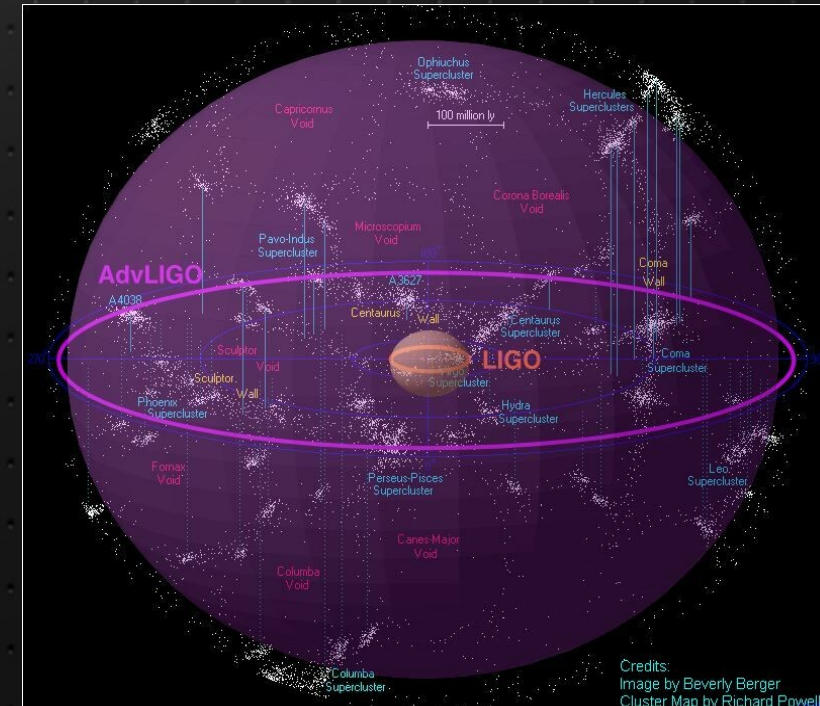
- Initial LIGOの感度は重力波を確実に検出するには不十分
- さらなる感度向上が必要

Enhanced LIGO

- Initial LIGOの感度を2倍向上させる (イベントレート 8倍)
- Advanced LIGOの技術を先取り導入
- 現在、一年間の観測運転中(S6)

Advanced LIGO

- Initial LIGOの感度を10倍向上させる (イベントレート 1000倍)
- 低周波防振、大きな鏡、ハイパワーレーザー、RSE干渉計 etc
- 2014年第4四半期から観測運転予定(S7)
- ただし、S7の時点ではまだ目標感度に達していない可能性大



Virgo+, Advanced Virgo

Virgo+

- Virgoの感度を2倍向上させる
- LIGOのEnhanced LIGOに相当
- Fused Silica Suspensionの導入, ハイパワーレーザー

Advanced Virgo

- Virgoの感度を10倍向上させる
- Advanced LIGOと同時期に運転開始予定
- 使われる技術はAdvLIGOと類似
- ただし、Virgoには既に低周波防振システムが組み込んである

LCGT

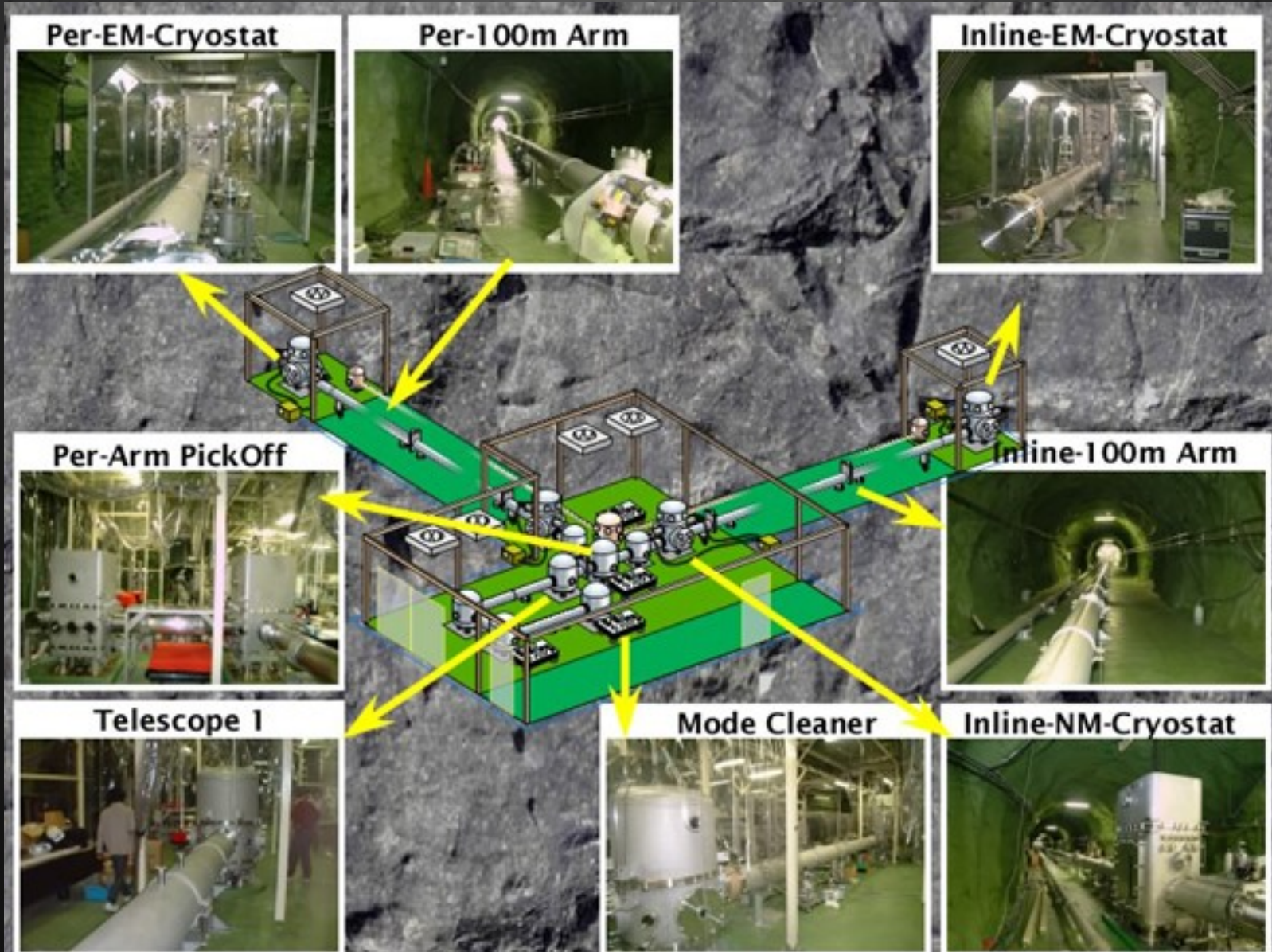
(Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

- Japanese next-generation interferometer project
- Cryogenic mirrors for thermal noise reduction
- 3km arm length
- Underground location (smaller seismic activity)

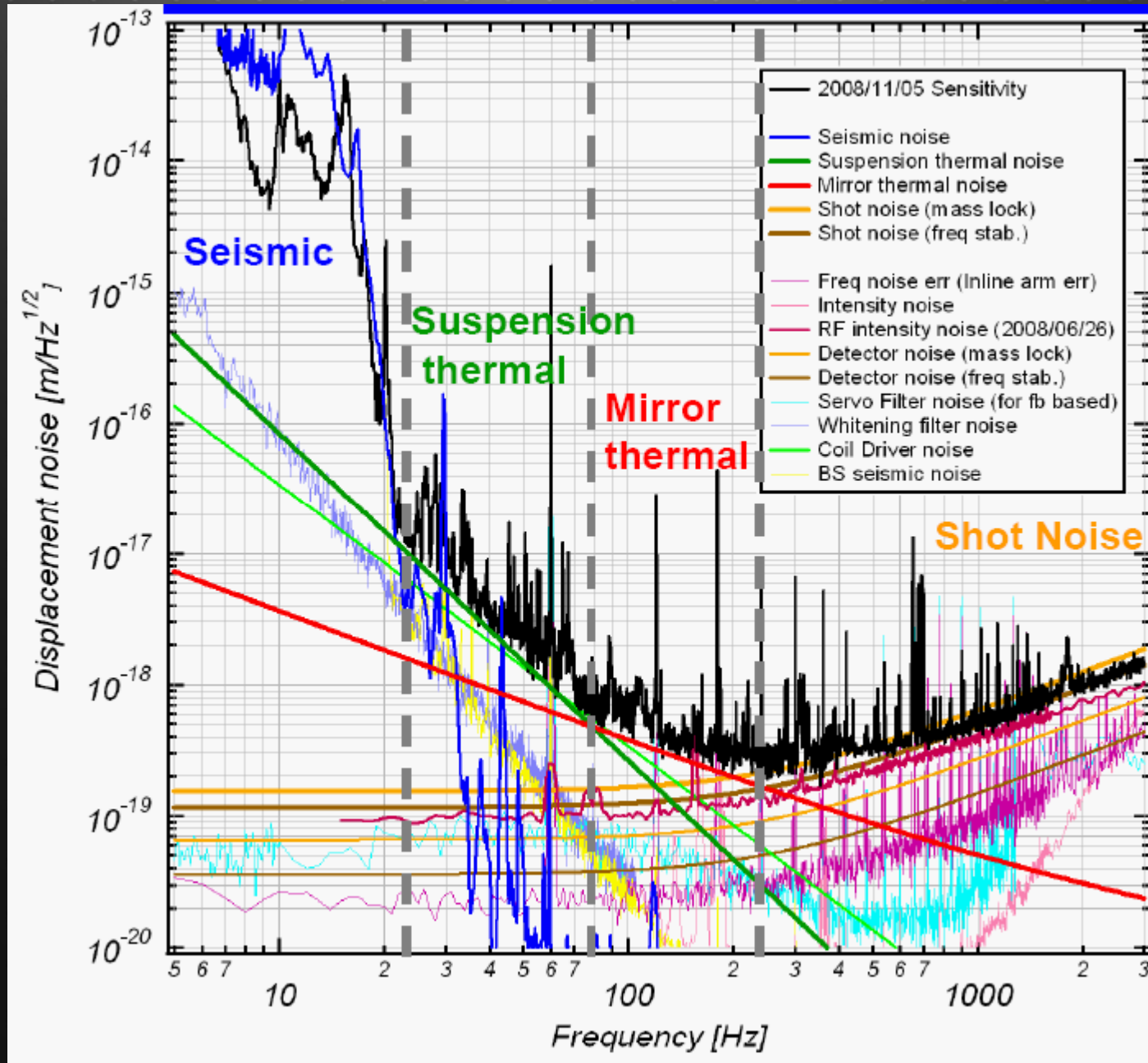


CLIO

- Cryogenic prototype interferometer (100m)
- Located underground in Kamioka mine (near SK)
- Comparable sensitivity with LIGO around 20Hz



CLIOの感度は常温の熱雑音にほぼ達した



現在冷却実験中

干渉計の雑音とそれを克服する技術

次世代干渉計に用いられる技術

- ハイパワーレーザー
- 大きな鏡, Monolithic Mirror Suspension
- 低周波防振装置
- RSE干渉計
- DC Readout
- 低温(LCGT)

量子雑音

干渉計の感度は最終的に光の量子雑音によって決まる

散乱雑音: 光子数の揺らぎ $\propto 1/(\text{光パワー})^{1/2}$

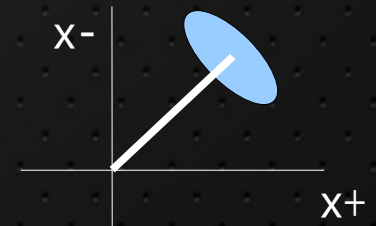
輻射圧雑音: 光子数の揺らぎが鏡を揺らす効果 $\propto (\text{光パワー})^{1/2}$

一方が下がれば一方が上がる \longrightarrow 標準量子限界
$$h_{\text{SQL}} = \frac{\hbar}{L\omega} \sqrt{\frac{\hbar}{m}}$$

(2.8×10^{-24} @100Hz)

標準量子限界の克服方法

- スクイズド光の利用
 - ダークポートから入射する真空場を、コヒーレント状態からスクイズド状態に変換する
- Ponderomotive Squeezing
 - RSE干渉計のSignal Extraction CavityをCarrierからdetuneする。
 - 散乱雑音と輻射圧雑音が相関を持つことで、出射光がSqueezeされる



Thermal Noise

Thermal vibration of the molecules of mirror / suspension material

Fluctuation Dissipation Theorem

Mechanical loss \longleftrightarrow Connection to the heat bath \longrightarrow Thermal fluctuation

High mechanical quality mirror substrate / coating materials

Low mechanical loss suspension fibers
Fused silica fibers with silica bonding

Other challenges for mirrors

Large mirror (40kg):

- large beam size (average out thermal fluctuations)
- Small radiation pressure noise

Precision manufacturing/metrology:

- Large radius of curvature
- Smooth polishing (<0.1nm RMS micro roughness)

Optical Absorption:

- Optical loss < 0.5 ppm/cm
- Thermal lensing compensation system

Fused silica mirror



地面振動

定常的な地面振動: 10^{-12} m/rtHz@100Hz

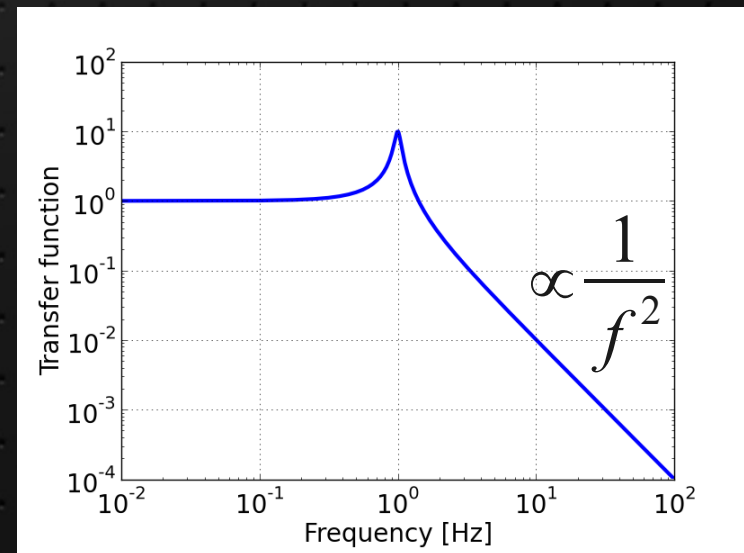
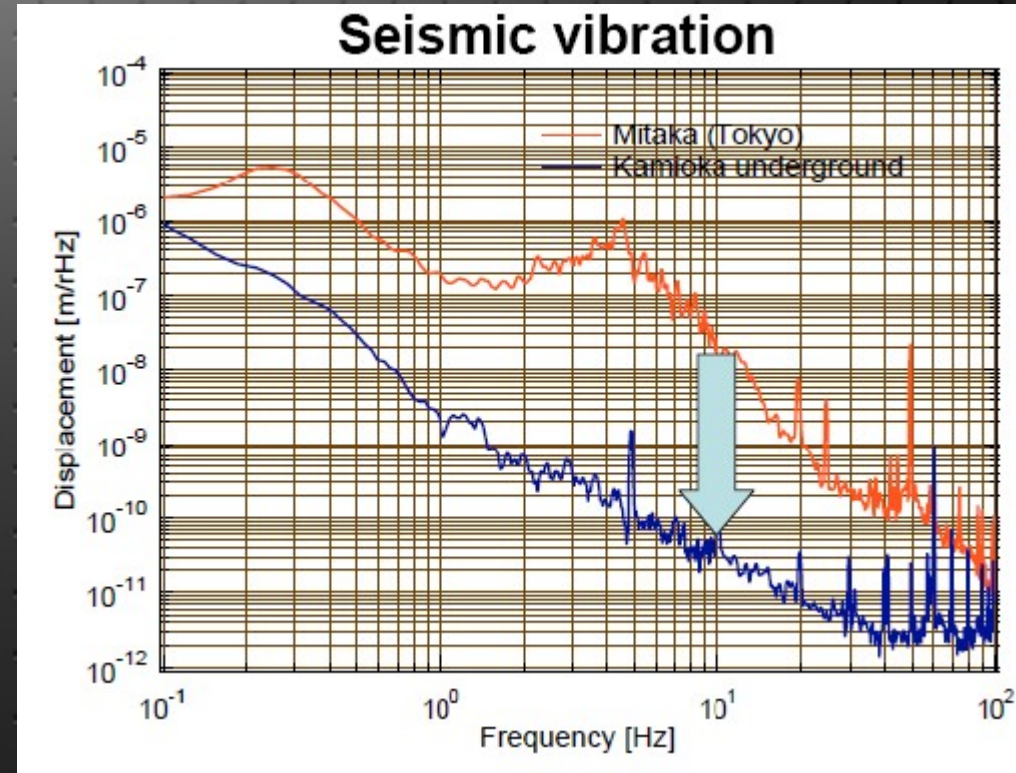
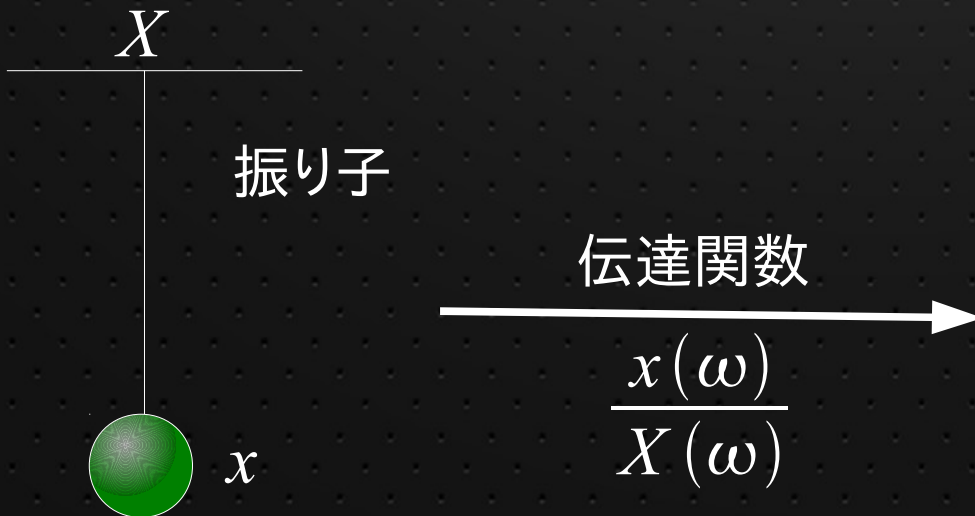
8桁の差



次世代干渉計の感度: 10^{-20} m/rtHz@100Hz

- 地下の静寂な地面振動環境
- 高度な防振装置

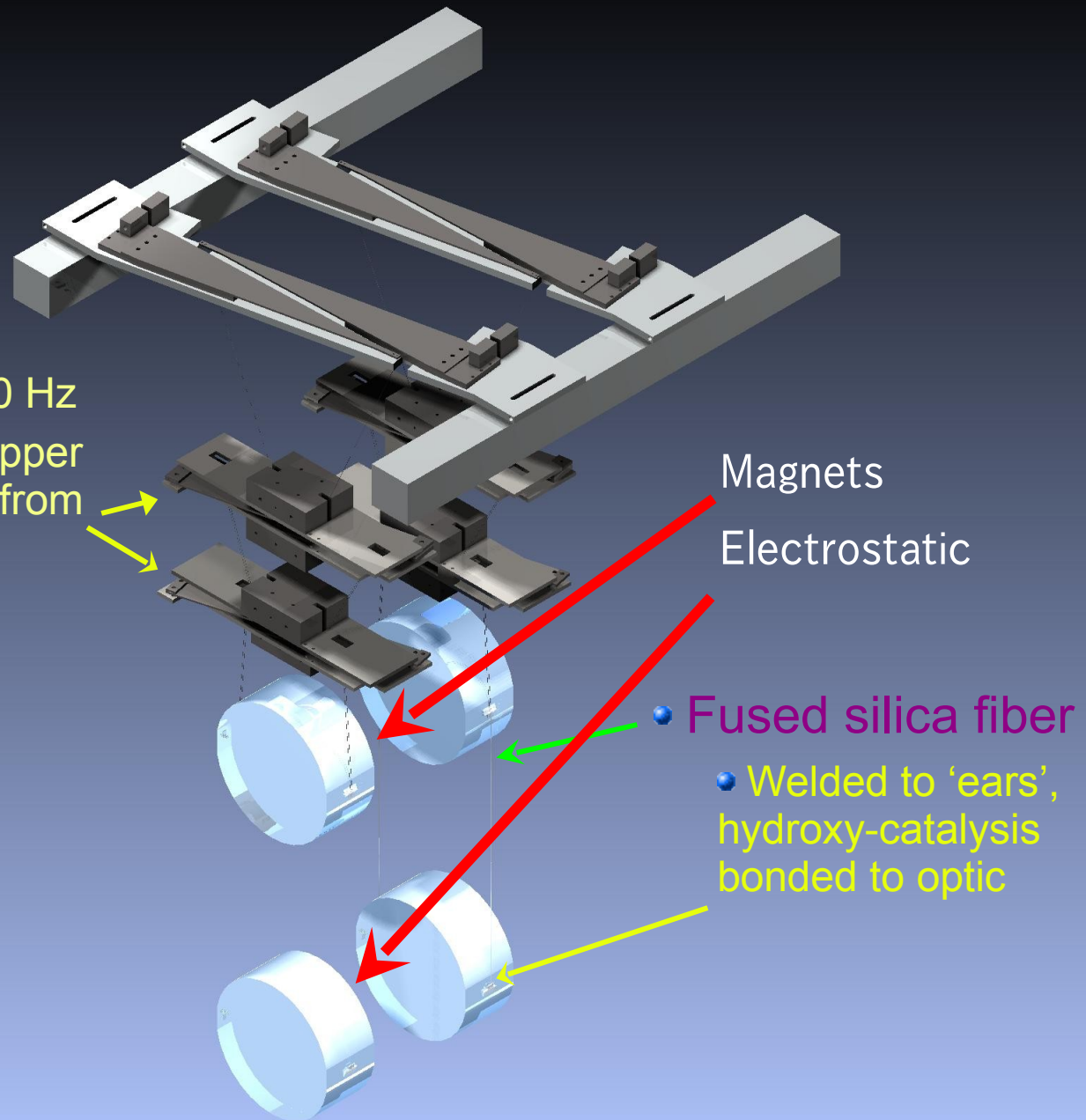
受動防振の原理



Passive Vibration Isolation Chain

- Quadruple pendulum:
 - » $\sim 10^7$ attenuation @10 Hz
 - » Controls applied to upper layers; noise filtered from test masses

- Seismic isolation and suspension together:
 - » 10^{-19} m/rHz at 10 Hz



低周波防振

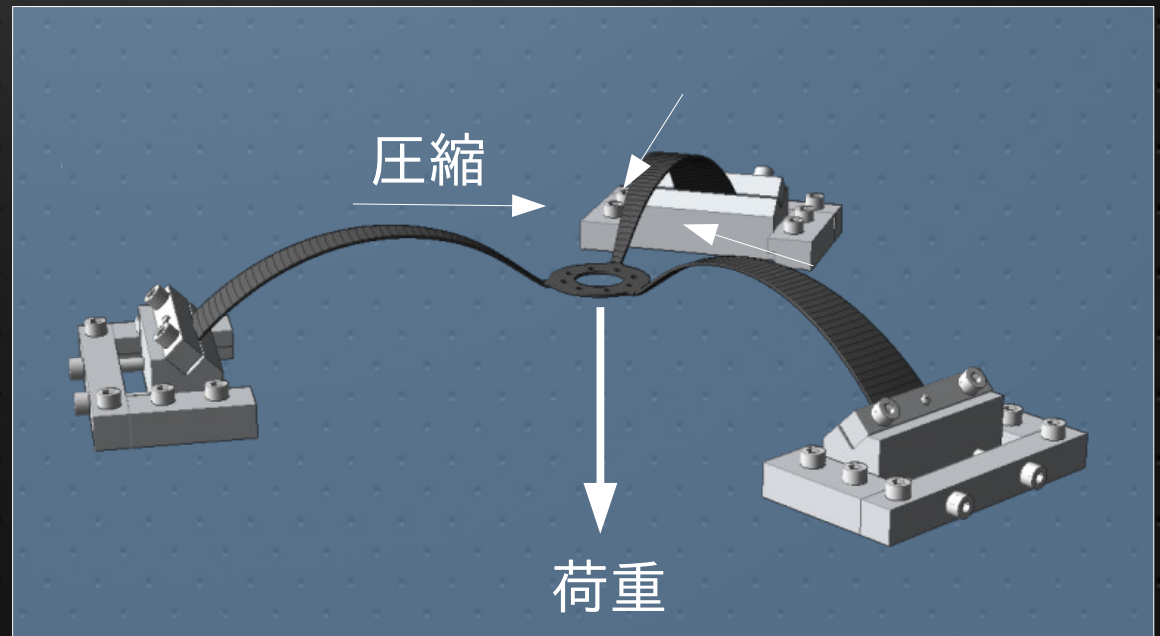
- 高周波における防振性能を上げる
- 低周波の重力波を捉える
- 干渉計の安定度向上

低い共振周波数: 小さいバネ定数 → 反バネ

倒立振り子



MGAS Filter

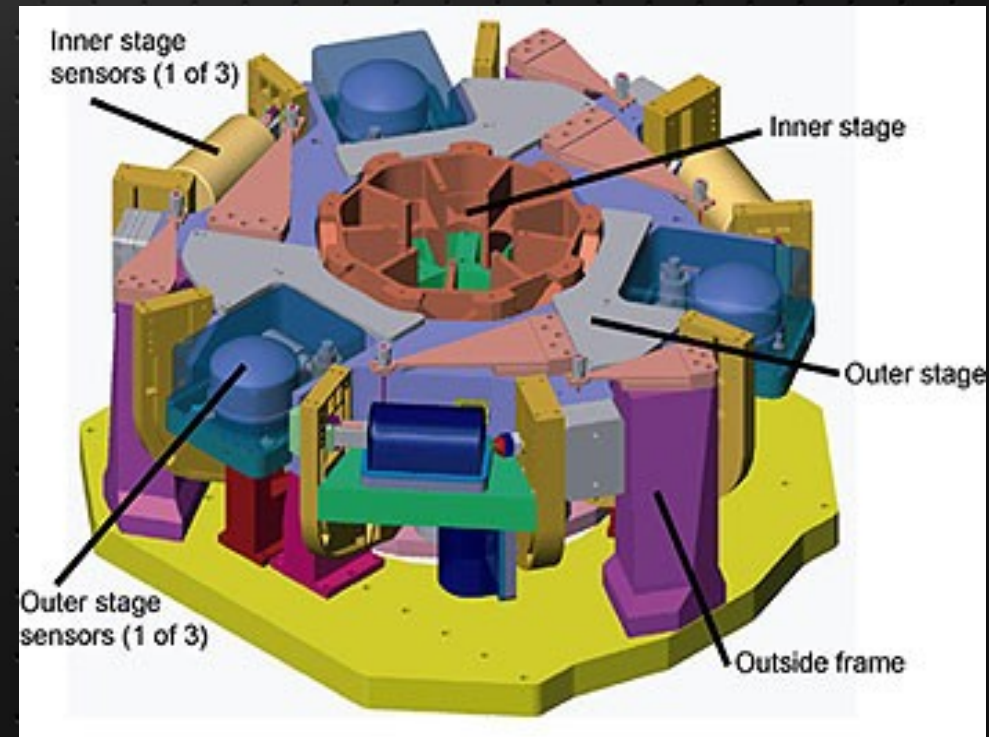
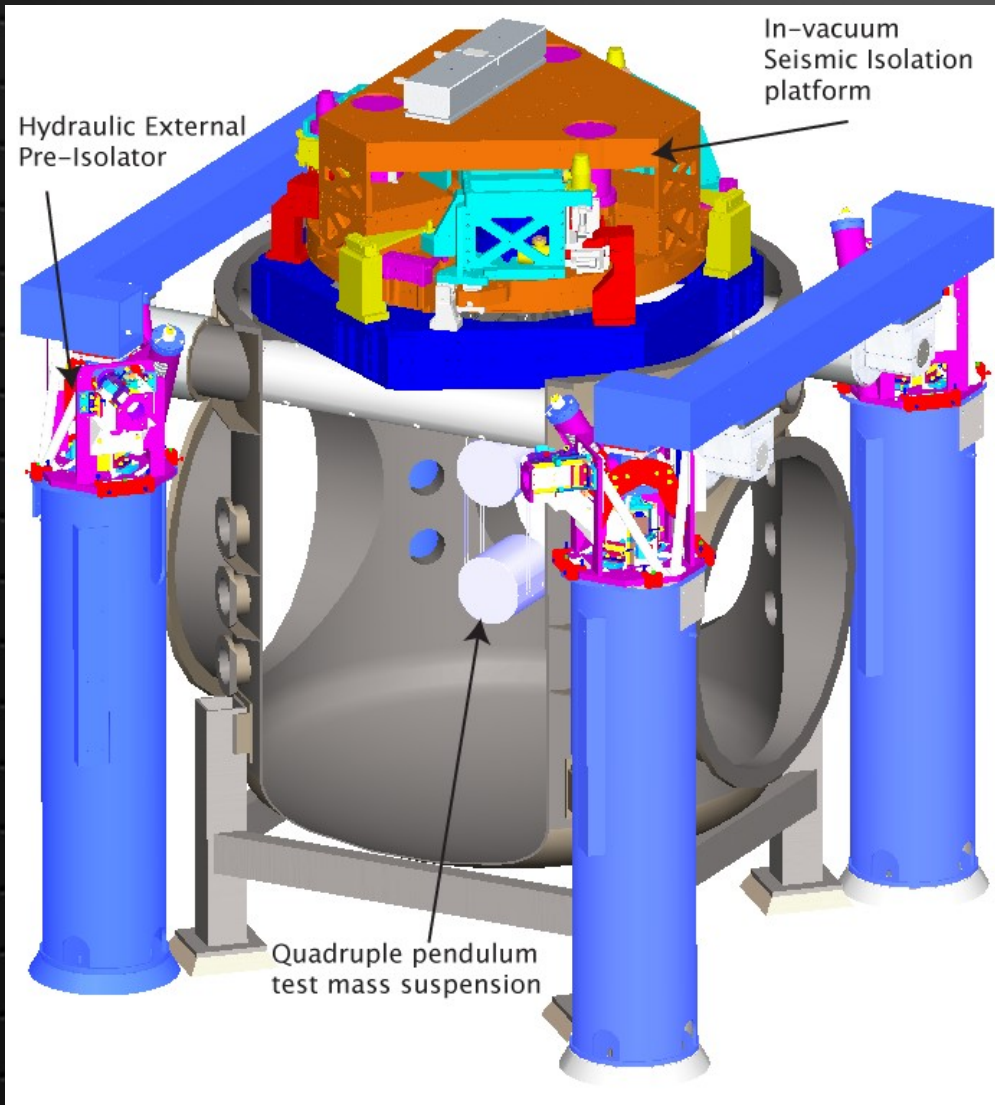


能動防振

加速度センサーで振動を検知 --> アクチュエータにフィードバック
振動を打ち消す

センサーノイズで性能が制限される

Internal Active Isolation Platform



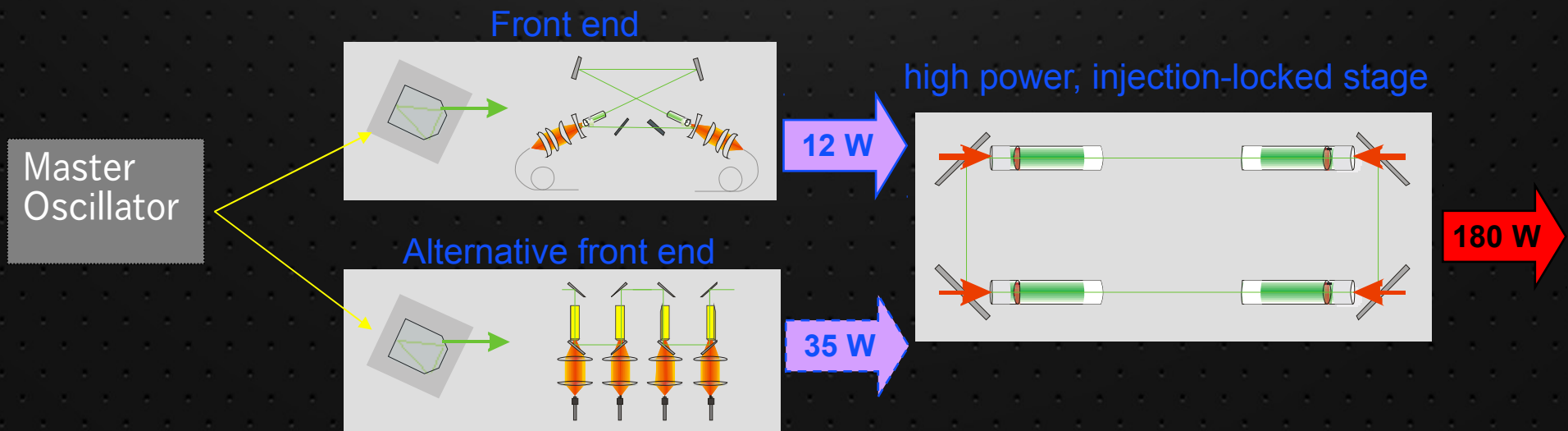
High Power Laser

Shot Noise: Photon number fluctuation
Larger laser power \longrightarrow Less significant

Requirements

- High power 180W
- Intensity stability: $\sim 2 \times 10^{-9}$
- Frequency stability: $\sim 10^{-7} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Good mode shape (TEM00 Gaussian beam)

Advanced LIGO Laser System



干渉計制御

高感度オペレーション

→ 干渉計の各自由度を非常に高精度で最適点に保つ必要がある

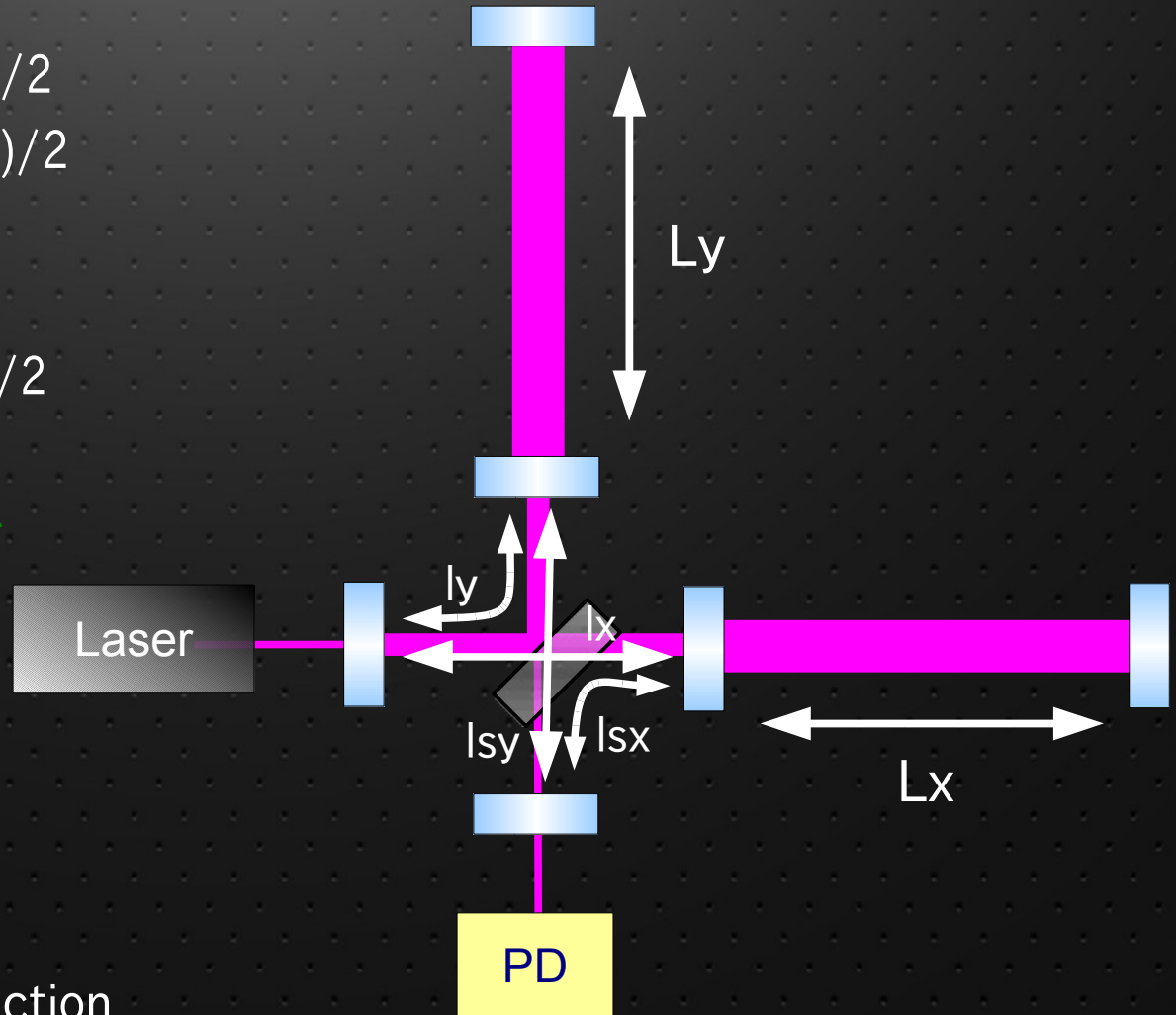
制御すべき自由度

$$L_+ = (L_x + L_y) / 2$$
$$L_- = (L_x - L_y) / 2$$
$$l_+ = (l_x + l_y) / 2$$
$$l_- = (l_x - l_y) / 2$$
$$l_s = (l_{sx} + l_{sy}) / 2$$

複雑な多入力・多出力システム

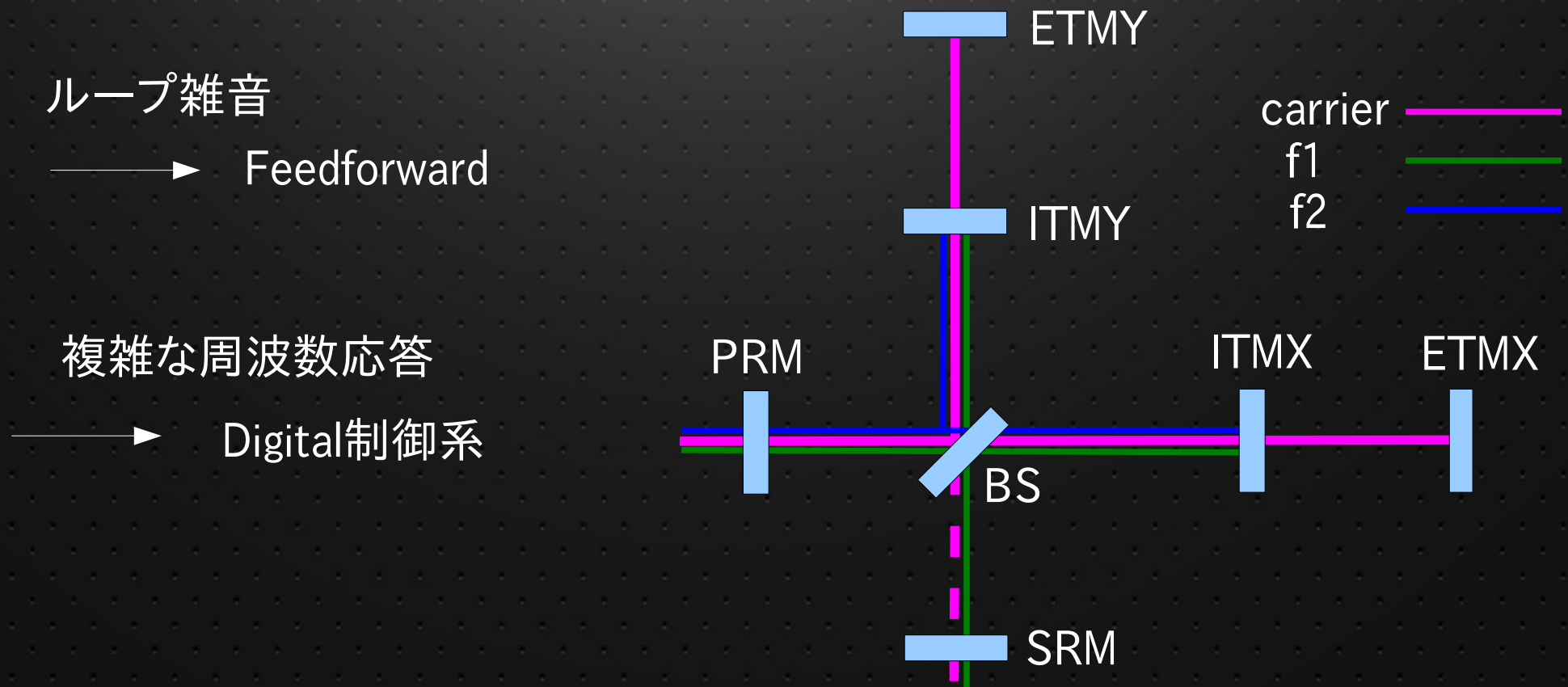
信号取得方法

- RF 位相、振幅変調
- 様々なポートでの復調
- 重力波信号はHomodyne Detection

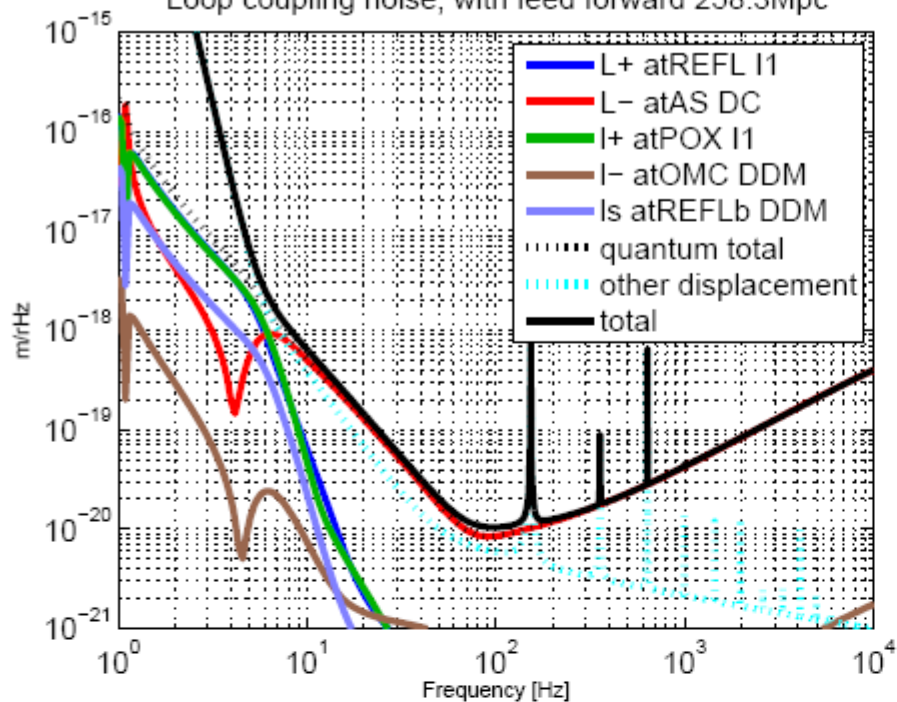


干渉計制御の問題点

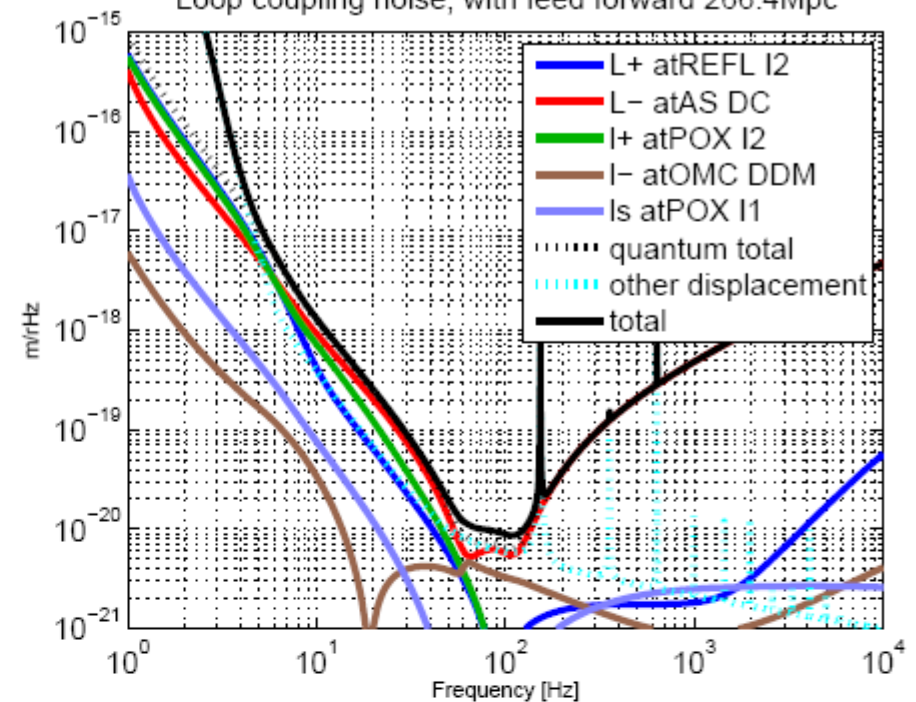
- 各自由度の信号をきれいに分離できない
- 重力波信号以外の自由度は散射雑音が大きい
- 制御ループを介して、この雑音を導入してしまう(ループ雑音)
- Detuneをすると、信号の周波数応答が複雑になる



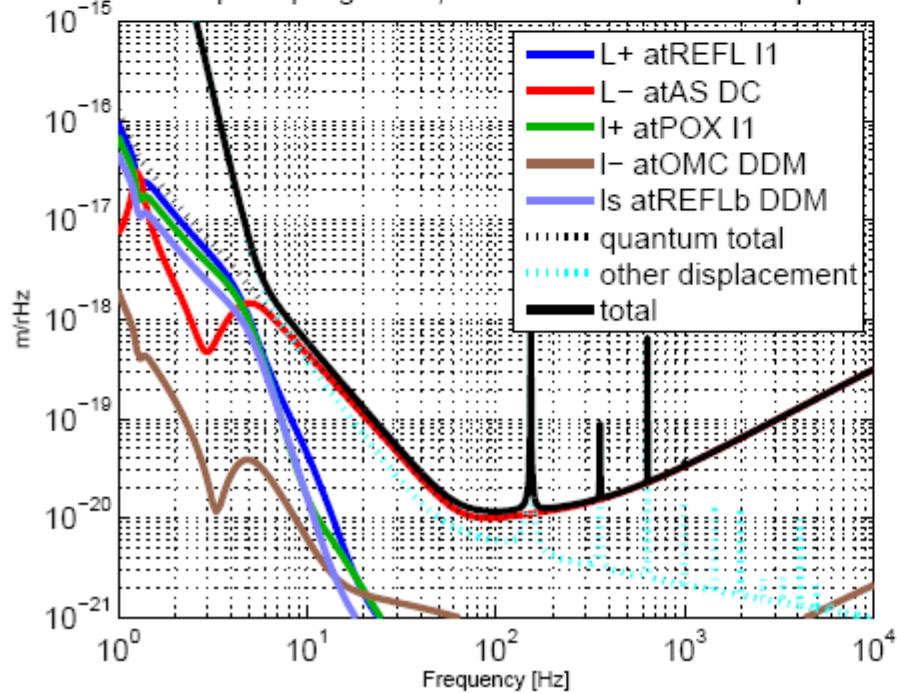
Loop coupling noise, with feed forward 258.3Mpc



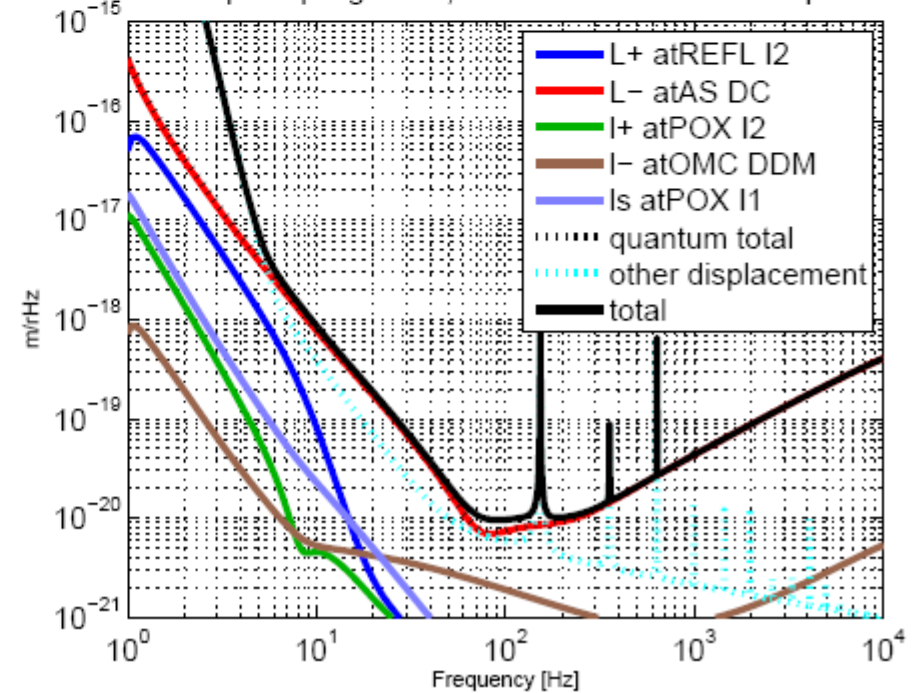
Loop coupling noise, with feed forward 266.4Mpc



Loop coupling noise, with feed forward 251.4Mpc



Loop coupling noise, with feed forward 274.8Mpc



その他の干渉計における問題点

- 光学素子の散乱、吸収によるロス
- ハイパワーレーザーによる鏡の熱変形(熱レンズ)
 - Thermal Compensation System
- Parametric Instability
 - Cavityの高次モードと鏡の弾性モードの結合
- 輻射圧によるアラインメント不安定性
 - アラインメント制御
- 散乱光対策
- 大規模な超高真空
- 電子回路の雑音
- 複雑なシステムの保守 管理 etc

まとめ

- 重力波検出器は 10^{-21} 以下の超微小な歪みを検出しなければならない
- 第一世代干渉計はこの感度に到達し、安定な観測を行った
- しかし、重力波の確実な検出にはあと一桁感度向上が必要
- 次世代干渉計計画は動きだしている
- 干渉計の開発 = 雑音低減
- 量子雑音, 熱雑音, 地面振動, etc ...
- これらの雑音を低減する技術も開発が進んでいる
- 重力波の初検出に向けて、日本もAdvLIGO, AdvVirgoに遅れないようにLCGT計画を進める必要がある
- しかし、金が付かない、、、。