

グリーンロック実験報告

和泉究

東京大学大学院・天文学専攻



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

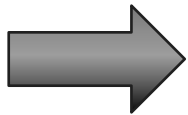
概要

待望の第2世代レーザー干渉計を使った重力波の直接観測がもうすぐ始まる！！
ところが。

レーザー干渉計の難しいところ

デザインどおりの干渉状態（終状態／観測状態）を得るまでは
干渉計は非常に非線形な応答をする

結果として



- 光路長の制御が難しい
- 終状態まで移行する作業（ロックアクイジション）が困難

解決策

Arm Length Stabilisation technique
(ALS、もしくは単にグリーンロック)が提案

本講演

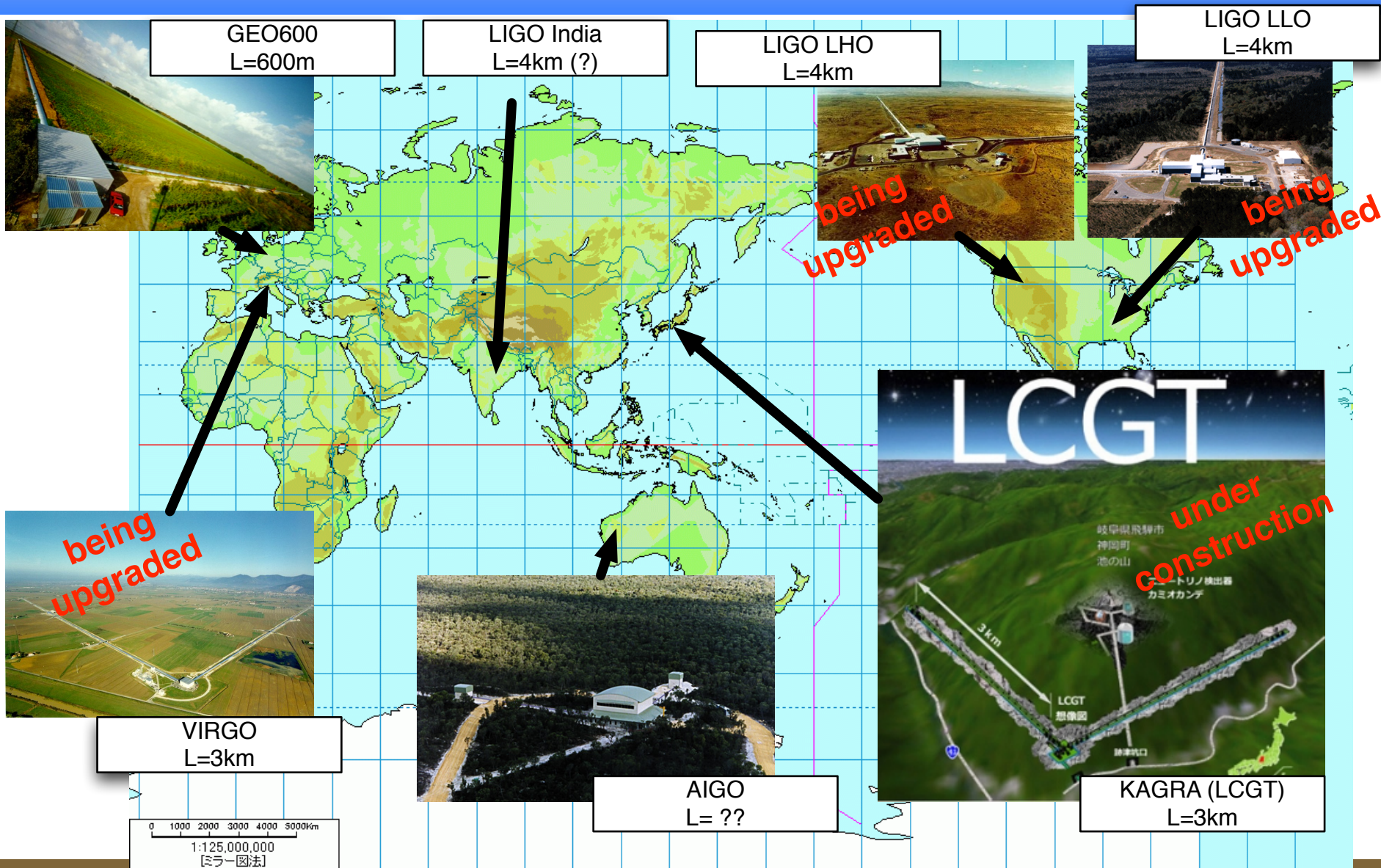
- 40m 基線長のプロトタイプ干渉計実験を行い、要求値を満たす性能を達成。
- 第2世代干渉計への有益さが確認できた

アウトライン

1. イントロ ～レーザー干渉計～
2. 干渉計の光路長制御
3. ロック ～2つの確率的過程～
4. ALS 評価実験
5. まとめ

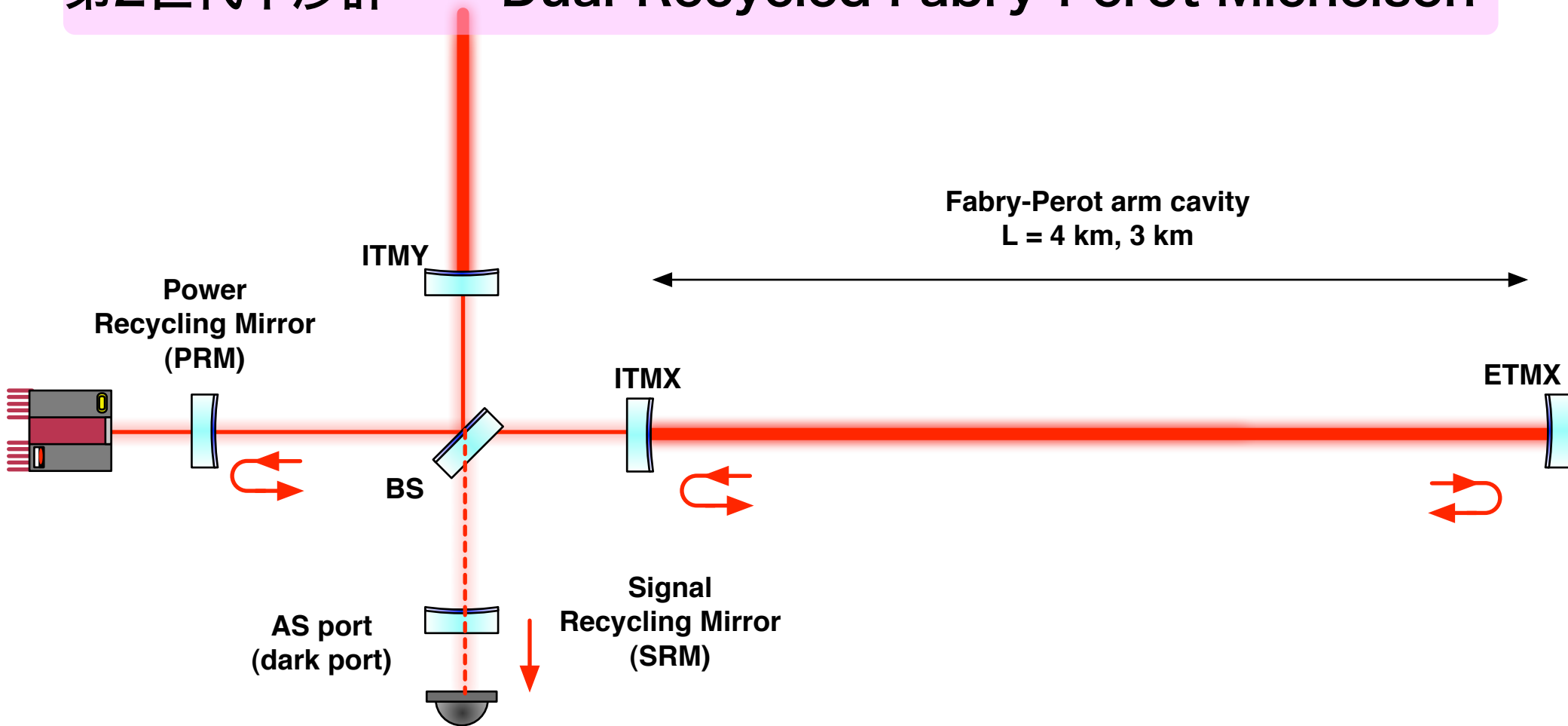
1. イントロ ～レーザー干渉計～

国際観測ネットワーク

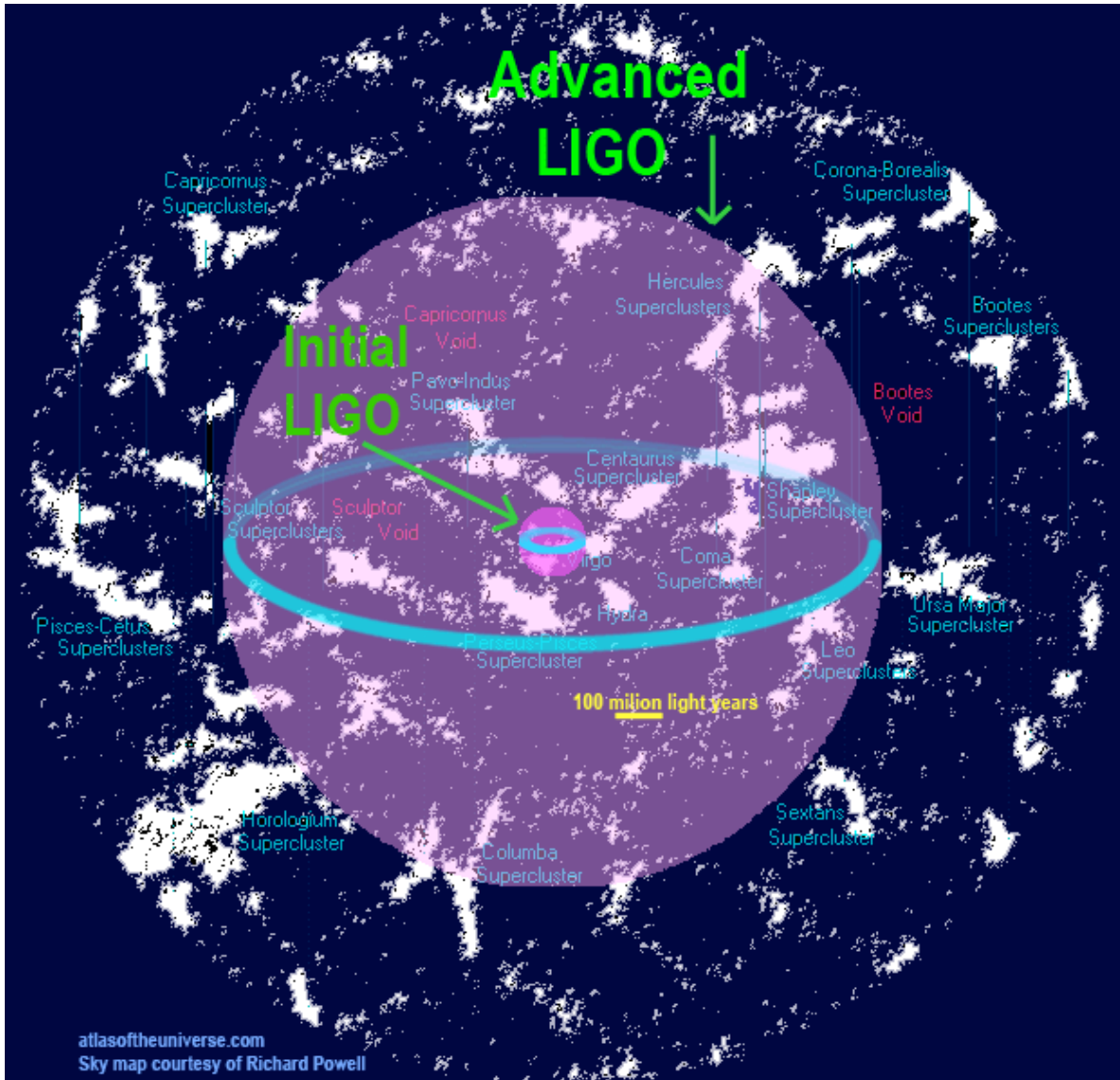


第2世代干渉計

第2世代干渉計 = Dual-Recycled Fabry-Perot Michelson



Goal in aLIGO



~ 200 Mpc for NS-NS
~ few events / year

2. 干渉計の光路長制御

光路長制御が必須

デザイン
感度



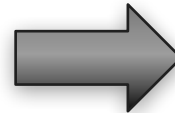
必要性

正しい干渉条件

鏡間の光路は常に干渉条件を
満たす長さでなければならない

実際には さらに

鏡の位置は地面振動により
常に動いている！



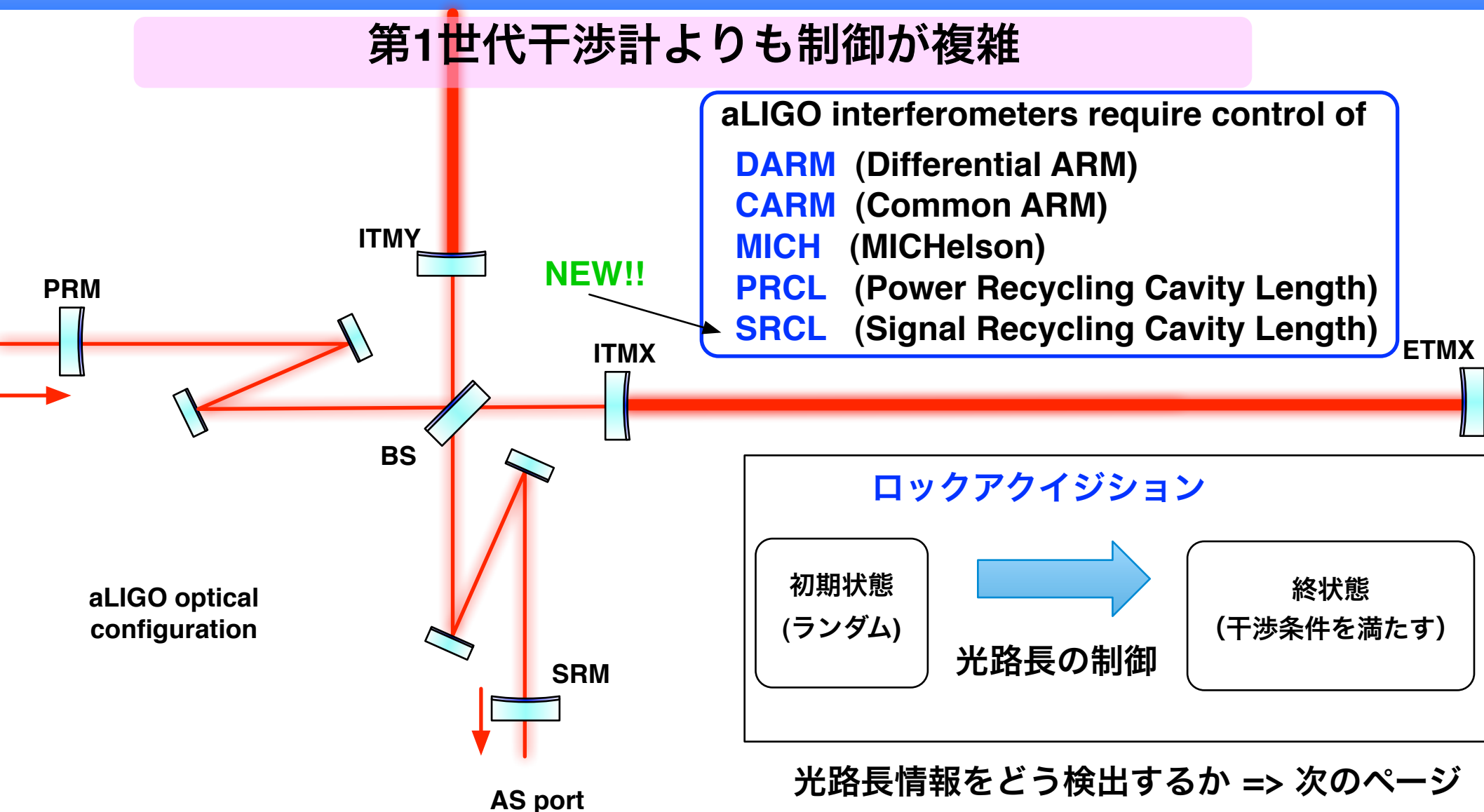
光路長を制御することが
必須

光路長制御

第1世代干渉計よりも制御が複雑

aLIGO interferometers require control of

- DARM (Differential ARM)
- CARM (Common ARM)
- MICH (MICHelson)
- PRCL (Power Recycling Cavity Length)
- SRCL (Signal Recycling Cavity Length)



ロックアクイジション

初期状態
(ランダム)



光路長の制御

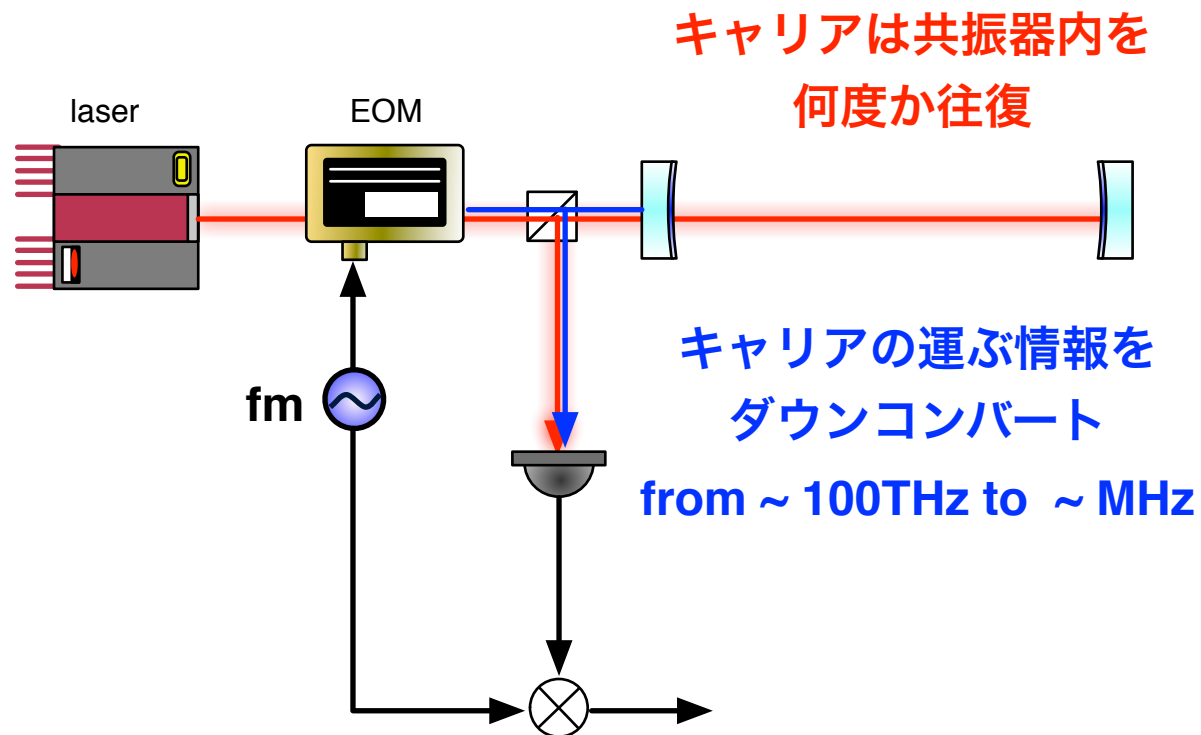
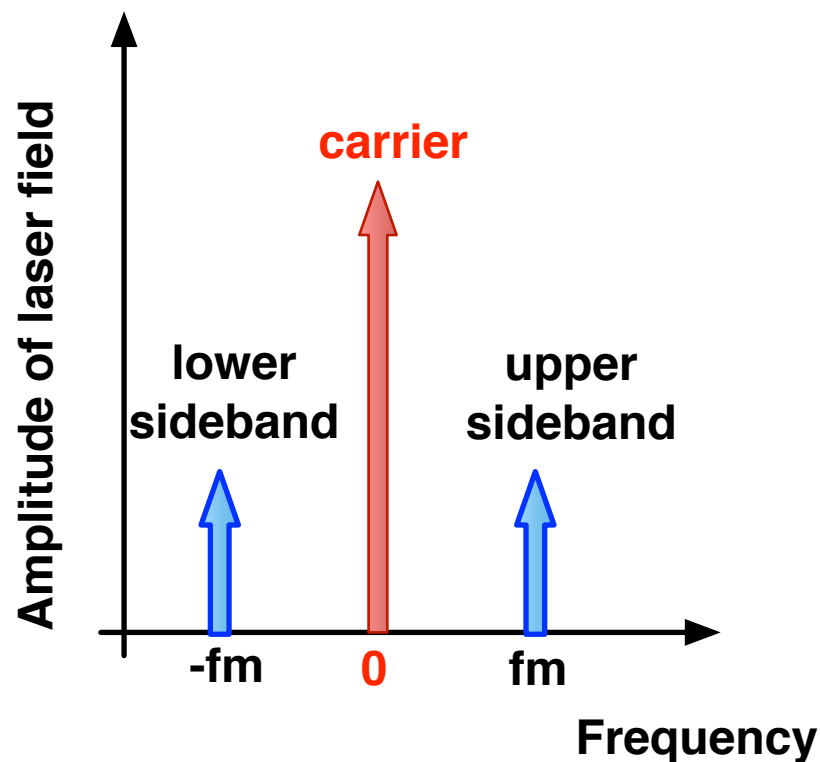
終状態
(干渉条件を満たす)

光路長情報をどう検出するか => 次のページ

変調／復調法のおさらい

✓ サイドバンド ⇒ ローカル・オスシレータ

✓ キャリア ⇒ 光路長情報を運ぶ



キャリアは共振器内を
何度か往復

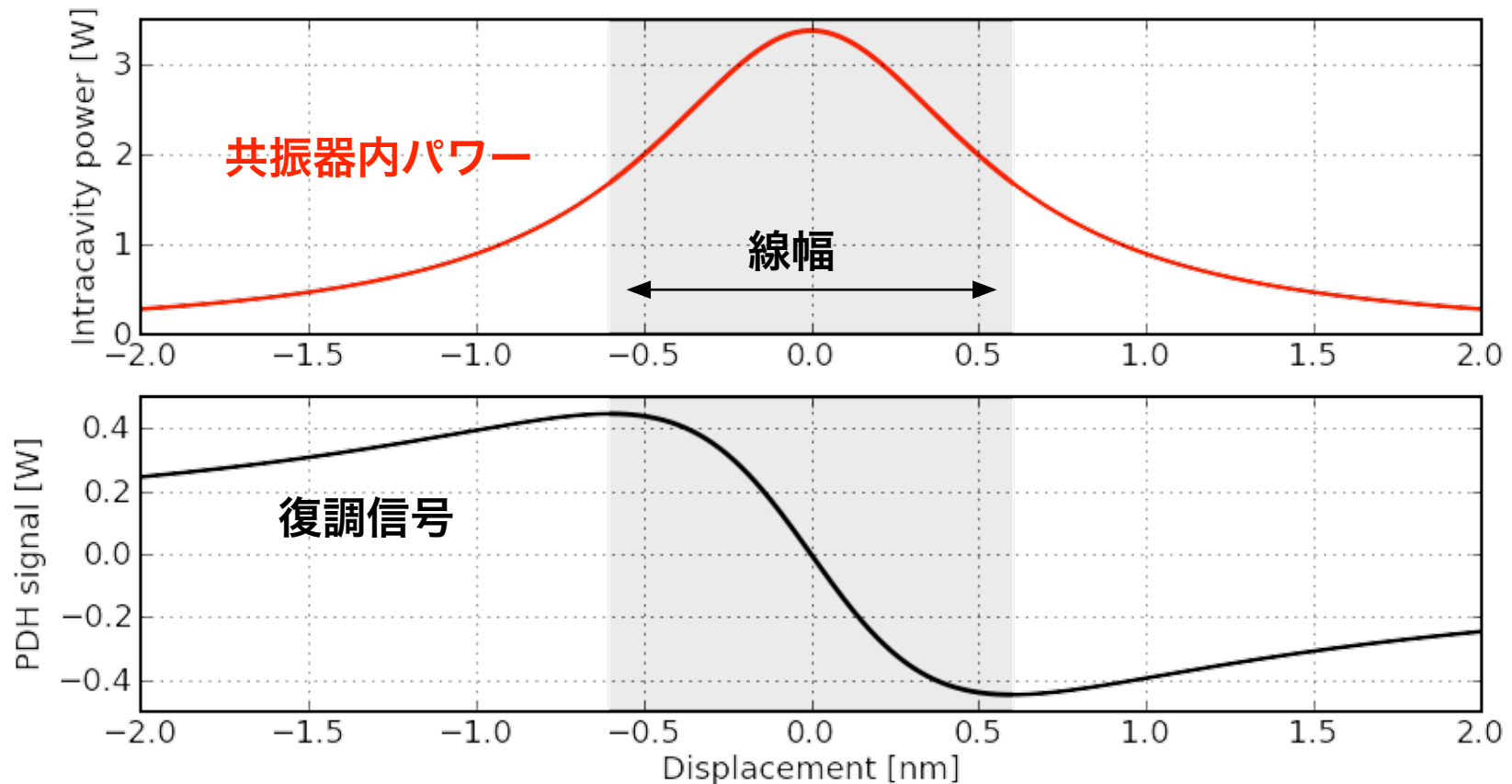
キャリアの運ぶ情報を
ダウンコンバート
from ~ 100THz to ~ MHz

電氣的にダウンコンバート from MHz to DC -Audio

変調／復調法から得られる信号

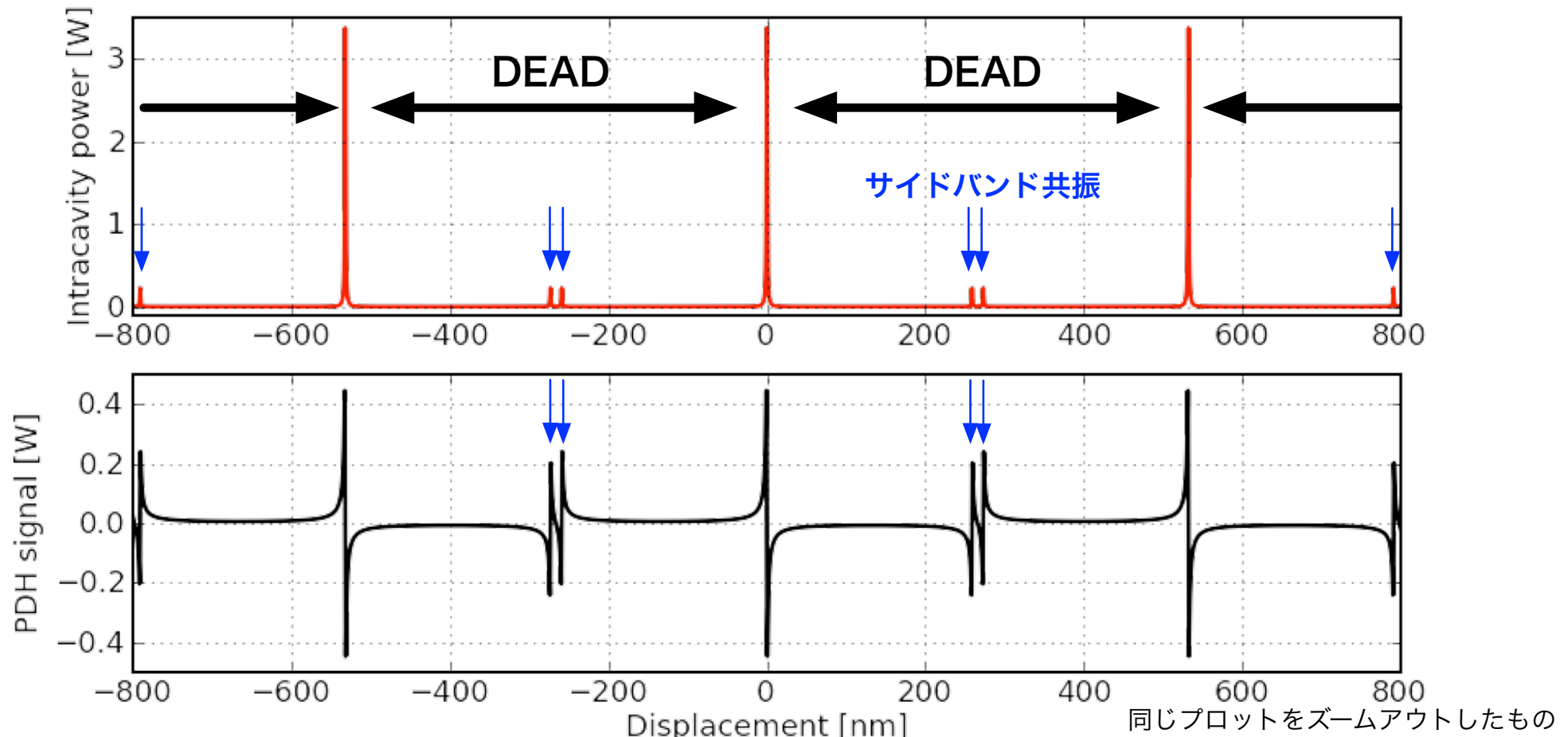
共振点まわり ($\sim 1\text{nm}$) で線形信号

一度線形域内に引込めば線形制御できる



光共振器の特性

- 広い "DAED" な領域。
- サイドバンドも長さによっては共振する。



いったんまとめ

- * 干渉計の光路長制御は必須
- * ロック = 初期状態から終状態への移行
- * 変調法により線形信号をえる
- * サイドバンドはローカルオスシレータ
- * 共振器は広大な"DEAD"領域を持つ
- * 共振器長さによってはサイドバンドも共振

3. ロック

～2つの確率的過程～

スムーズなロックを妨げる大きな要素

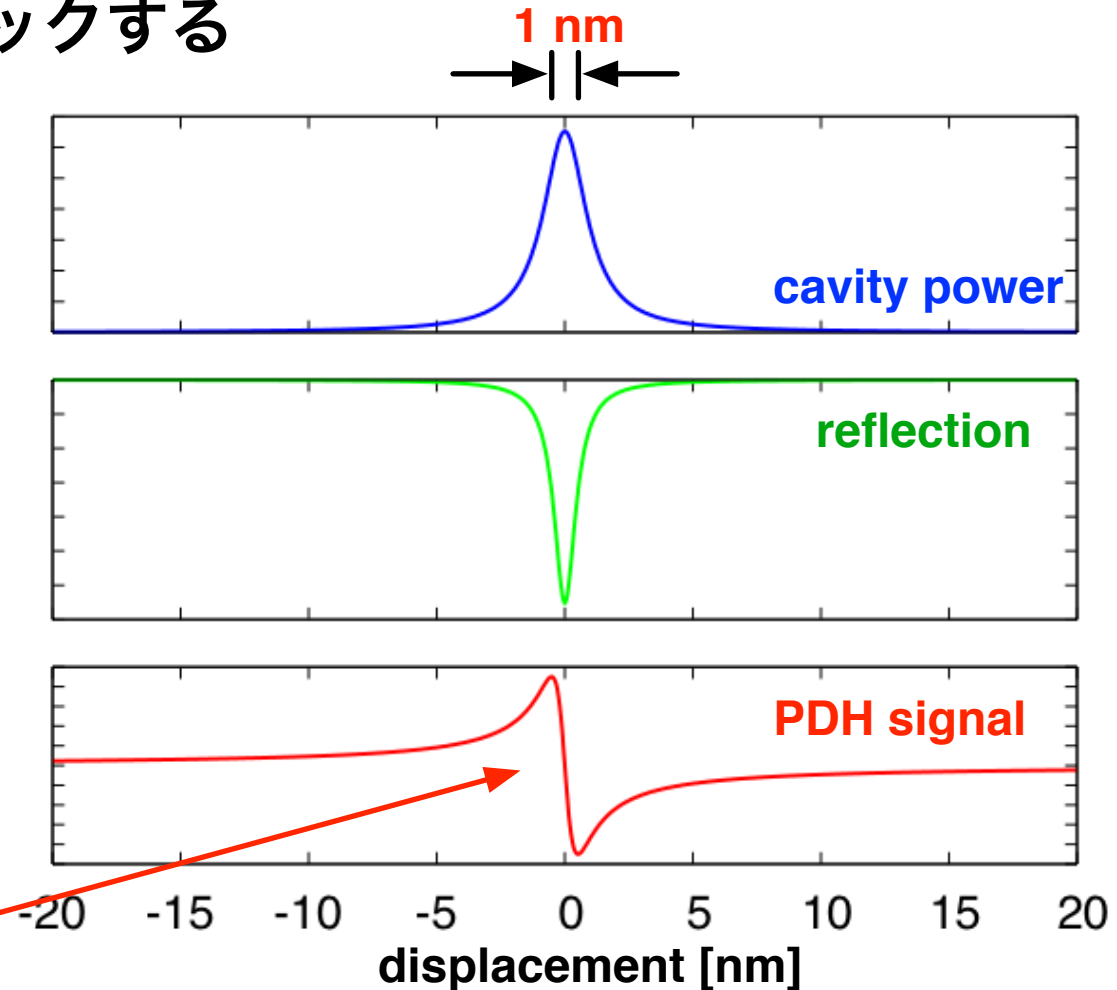
- 1- 力学的にきまる確率過程
- 2- 複数共振器をロックする際の初期値確率問題

ロックアキュイジションの例

1つのFabry-Perot 腕をロックする

- 共振点通過を待つ
- 線形信号を使って瞬時に制御
- 共振器長を線形域内にとどめる

signals of a FP cavity (a.u.)



線形域

力学的な確率過程

共振通過時の速度が確率的
速度が速すぎる => ロックできない

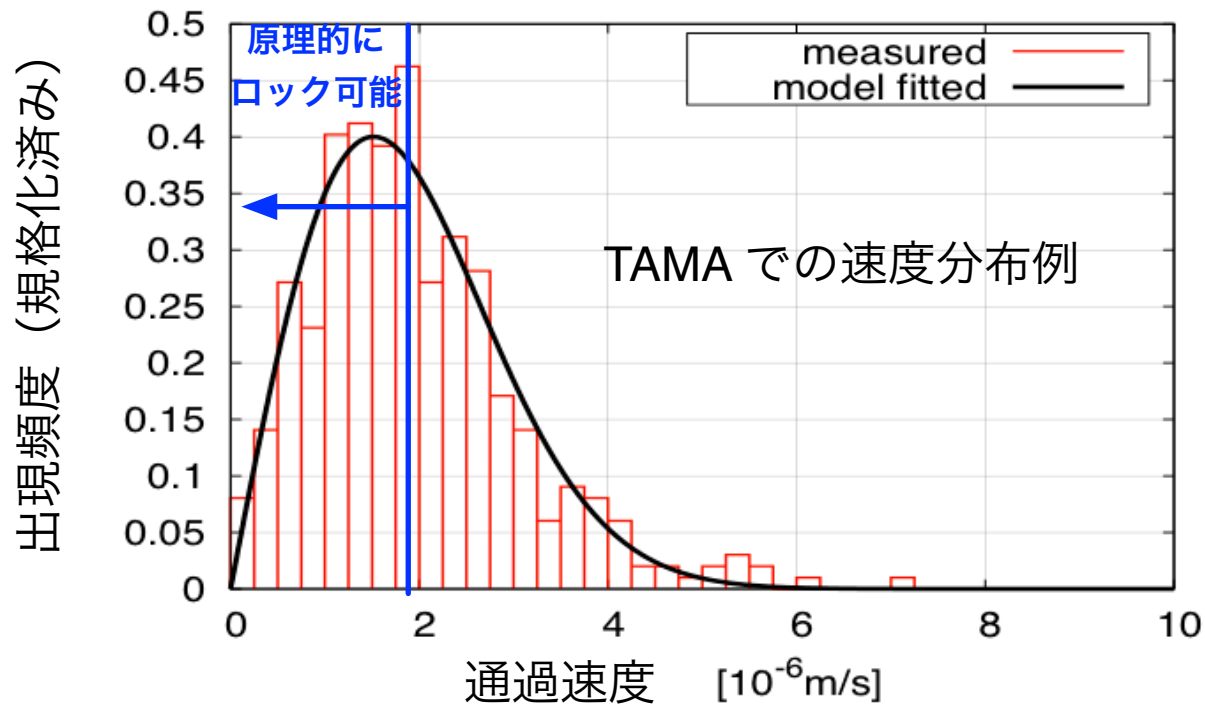
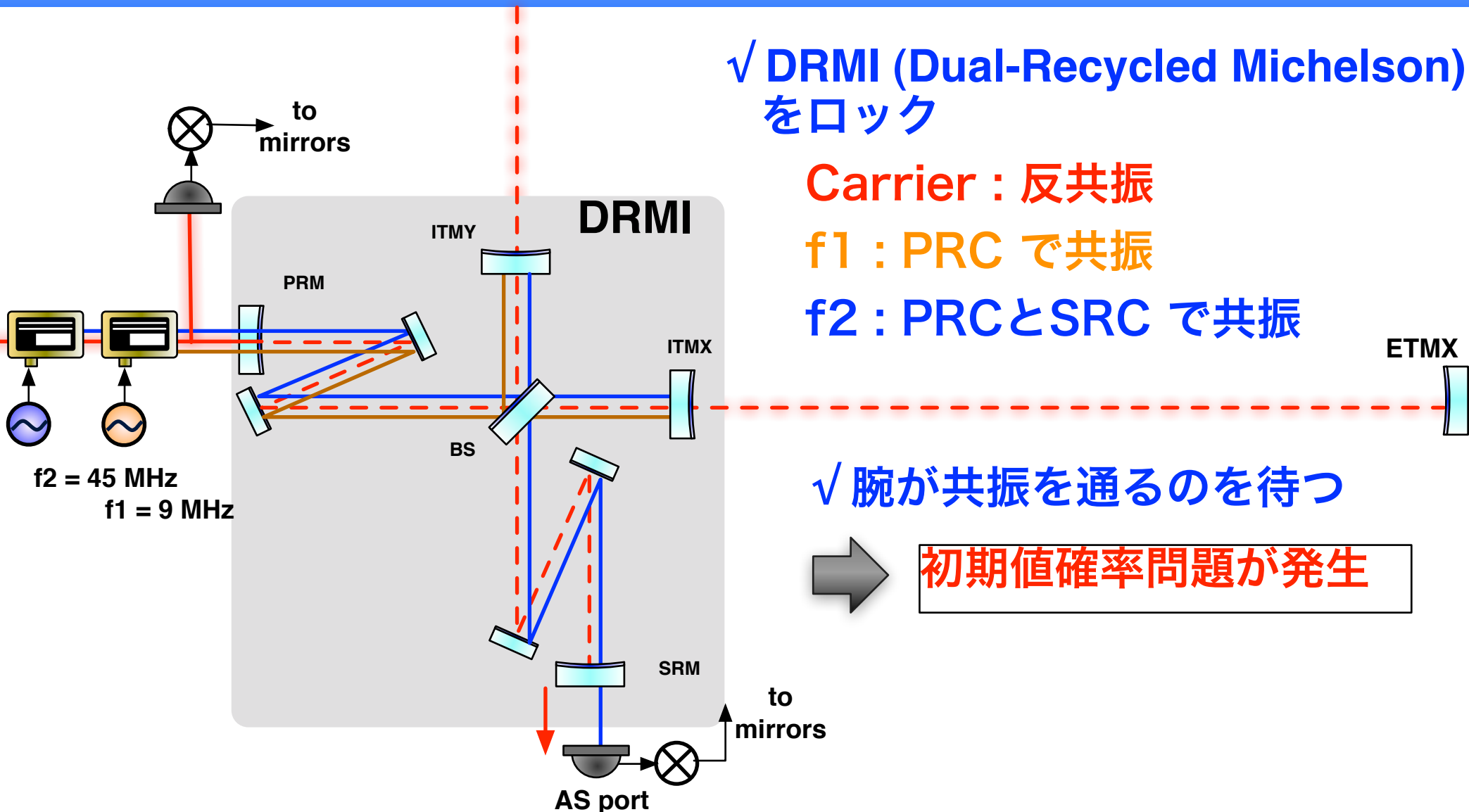


図 3.3 共振通過時の速度の度数分布

例その2: 複合共振器のロック



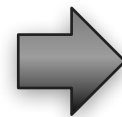
✓ DRMI (Dual-Recycled Michelson) をロック

Carrier : 反共振

f_1 : PRC で共振

f_2 : PRCとSRC で共振

✓ 腕が共振を通るのを待つ

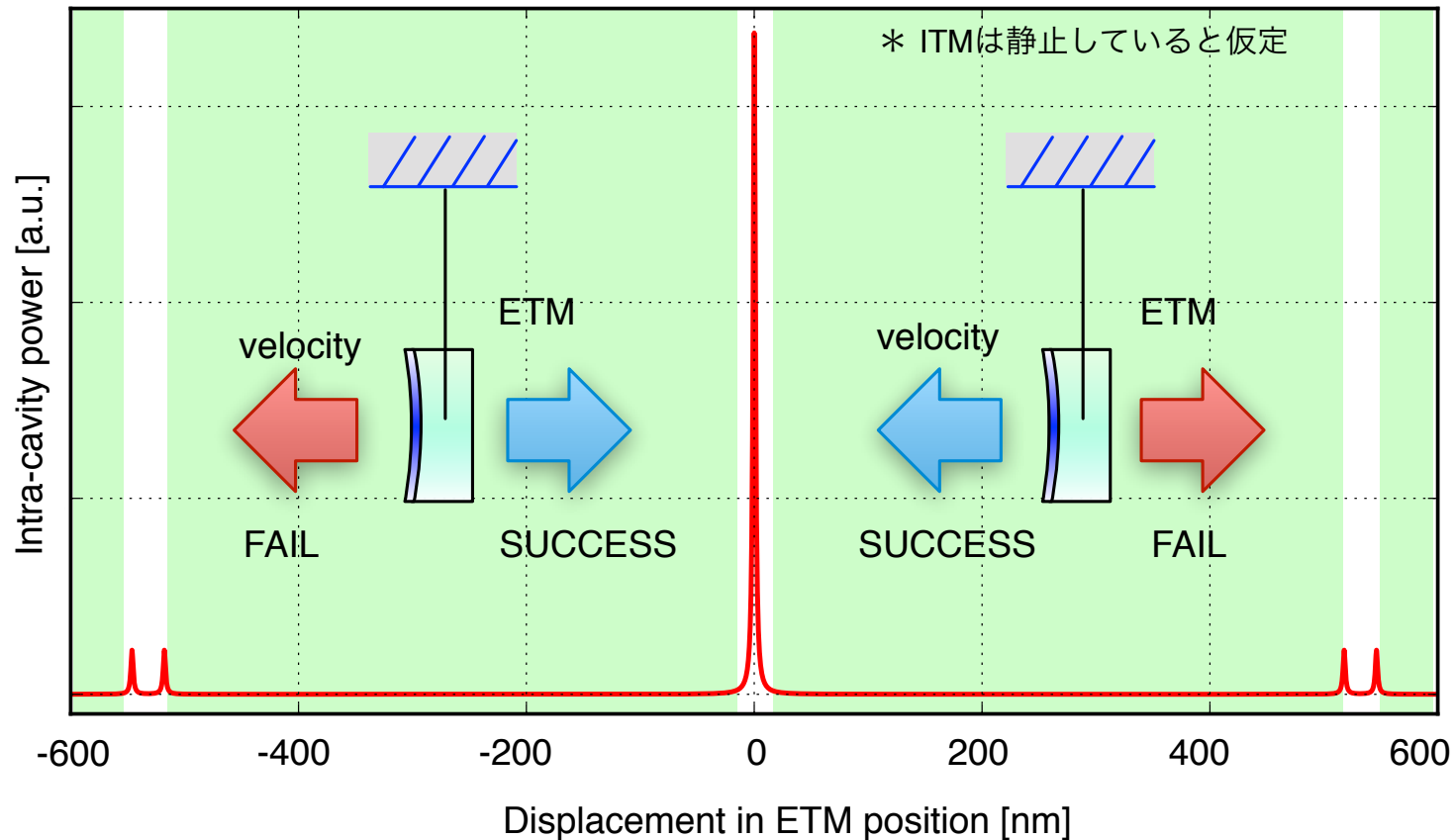


初期値確率問題が発生

腕の初期状態に左右される確率

腕がサイドバンド共振を通過

DRMIのロックが破壊される



決定論的なロックが欲しい

- ✓ 腕の長さを pre-fix しておきたい
- ✓ SB が共振しない初期状態を作っておきたい
- ✓ 2つの確率過程が存在しない、well-defined なステップがほしい

新ロック過程

ALSを使う

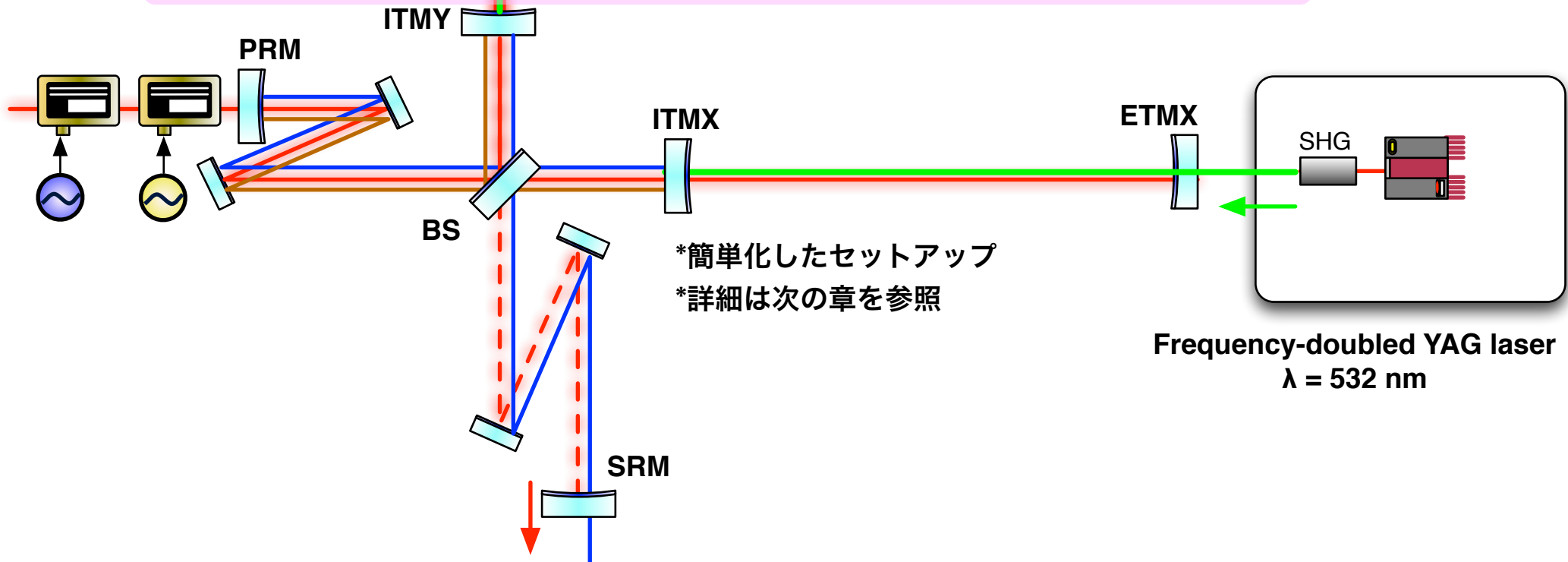
腕を最初から制御。
オフ-レゾナンス
状態にロックしておく

DRMIを通常の変調／復
調法でロックする

腕のオフセットを
減らす
フルロック！！

Arm Length Stabilization (ALS)

- + 周波数倍した YAG laser をETMから入射
- + DRMIの共振条件に関係なく、腕の動きだけを
読み取る
- + 腕の初期状態を最初から準備・コントロールできる



ALS の働き

干渉計は複数アウトプット系

$N \times$ sensor vector

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{pmatrix}$$

=

$N \times 5$ sensing matrix

$$\begin{pmatrix} \hat{M} \end{pmatrix}$$

DOF vector

$$\begin{pmatrix} \text{DARM} \\ \text{CARM} \\ \text{PRCL} \\ \text{MICH} \\ \text{SRCL} \end{pmatrix}$$

光路長信号がミックスされる

共振状態により
変化していく

ALS を使うとマトリクスがクリーンになる

$$\begin{pmatrix} \text{ALS}_x \\ \text{ALS}_y \\ s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{pmatrix}$$

=

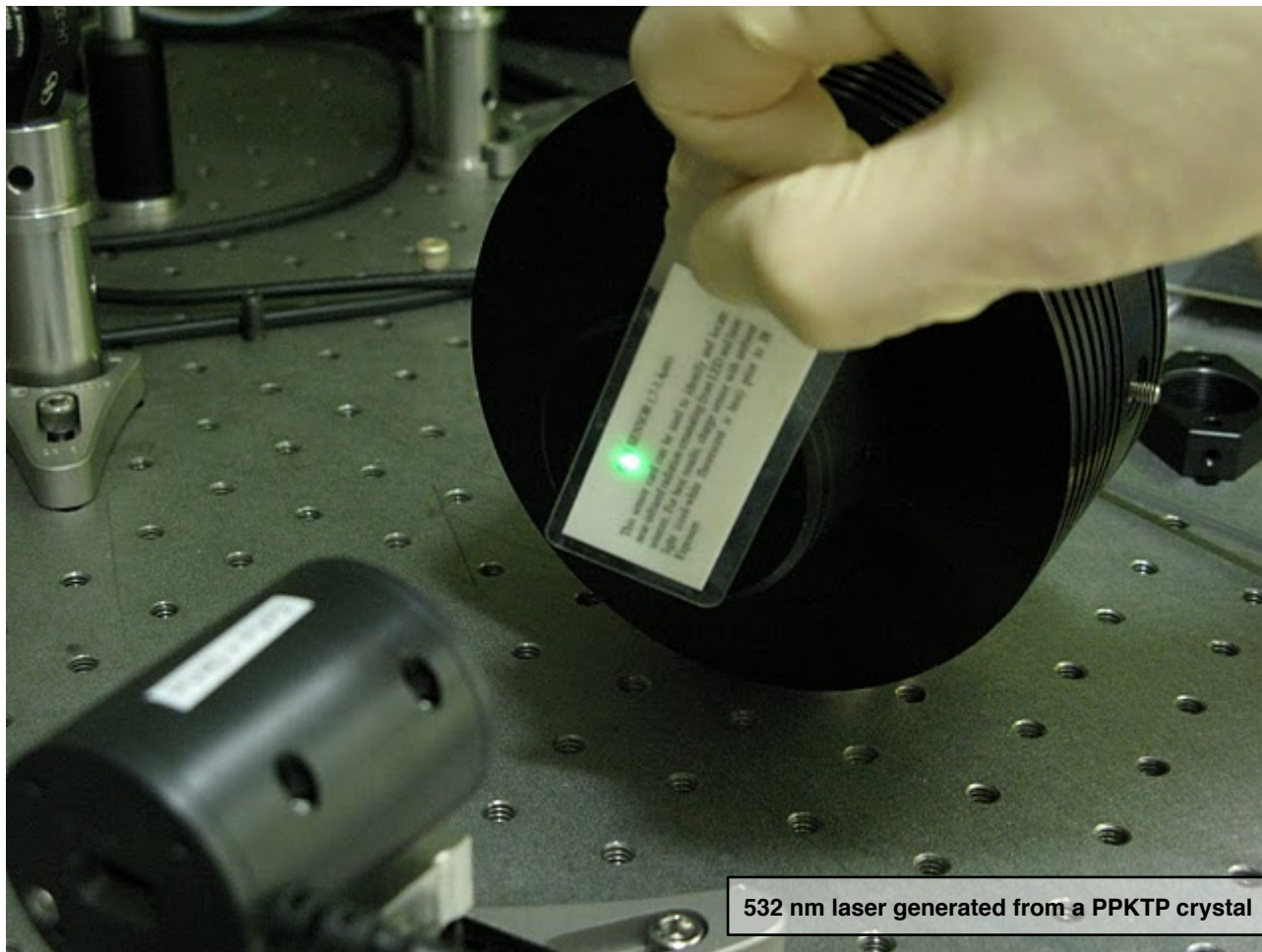
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{13} & s_{14} & s_{15} \\ 0 & 0 & s_{23} & s_{24} & s_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & s_{N3} & s_{N4} & s_{N5} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \text{XARM} \\ \text{YARM} \\ \text{PRCL} \\ \text{MICH} \\ \text{SRCL} \end{pmatrix}$$

腕だけの信号

DRMIは初期には
腕の信号が入ってこない

4. ALS 評価実験



試験の概要

**aLIGO のコミッショニングに先んじて、
ALS のパフォーマンスの評価を行う**

+ 40m の懸架 Fabry-Perot 共振器 1 本

+ DRMI なし (わざとミスアライン)

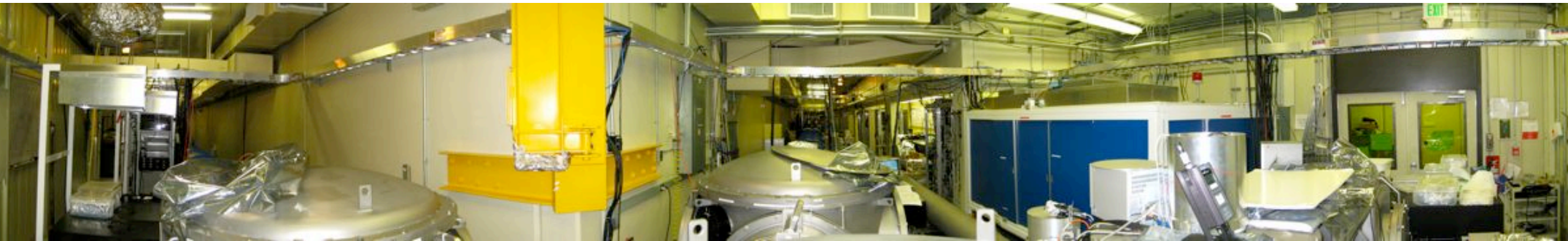
+ 腕の光路長さを任意に用意できることを示す

+ ノイズ要求値の達成と、ノイズの解析

40-m プロトタイプ干渉計

- カルテクのキャンパス内に存在
- 40m 基線長
- aLIGO のプロトタイプ
- aLIGOで仕様される制御技術などの開発／評価
- 自動制御に向けたスクリプト／コードを制作

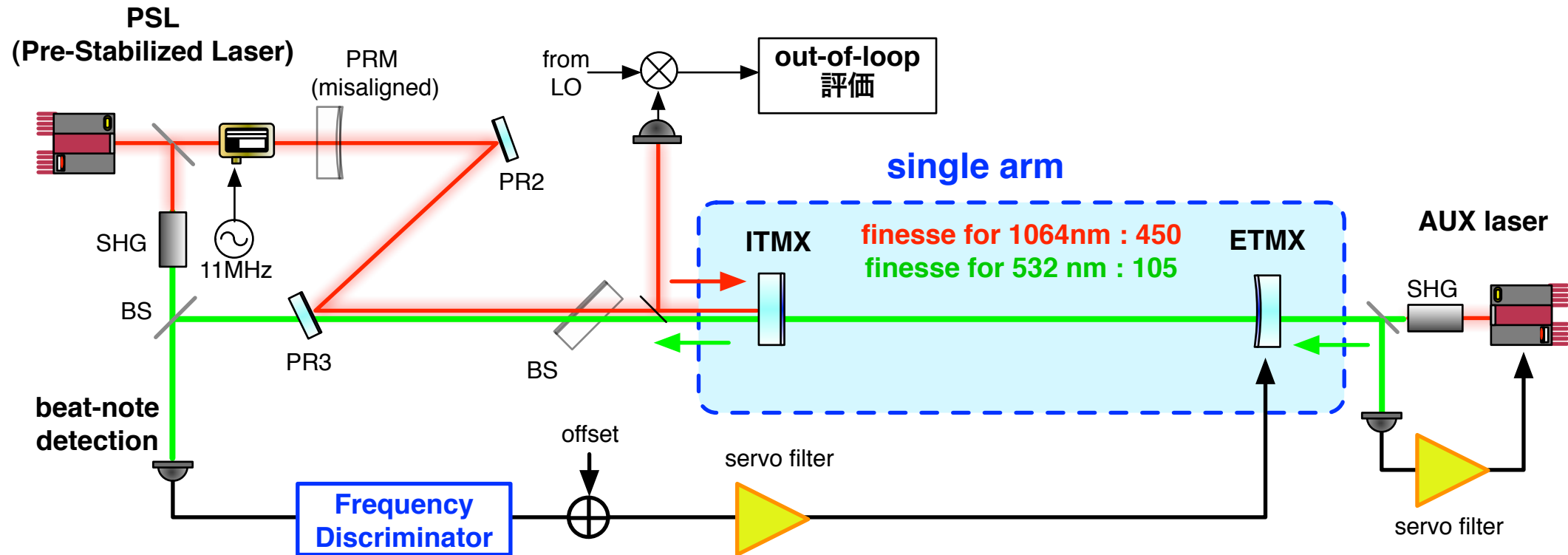
すべての真空用オプティクスがインストール済み。
いままさにコミッショニングを行っている



BSから見たパノラマ写真

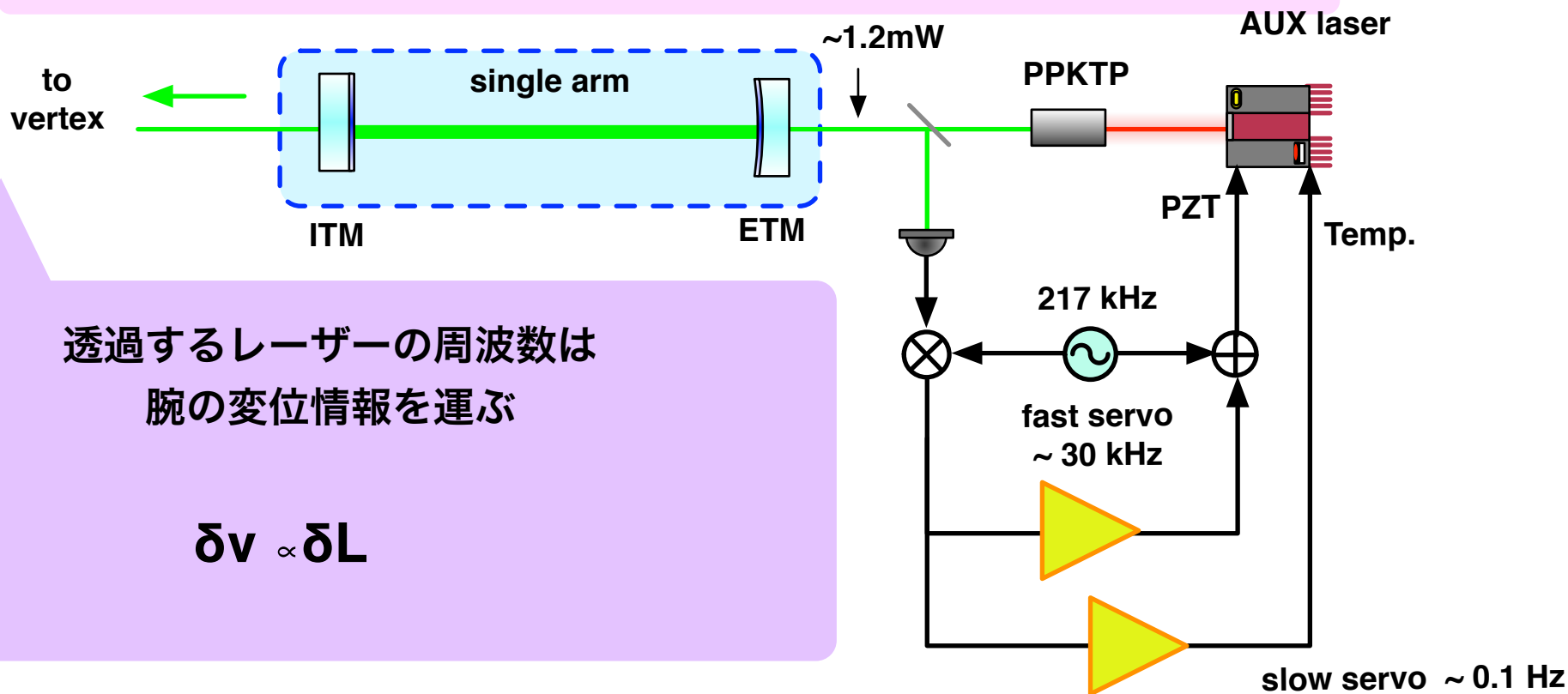
実験の概観

腕の変位 $\sim 1\mu\text{m}$ を安定化させ、共振まで運ぶ
目標安定度は rms 値で 1nm (腕の線幅) 以下

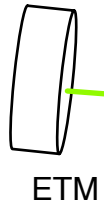


AUX レーザーセットアップ

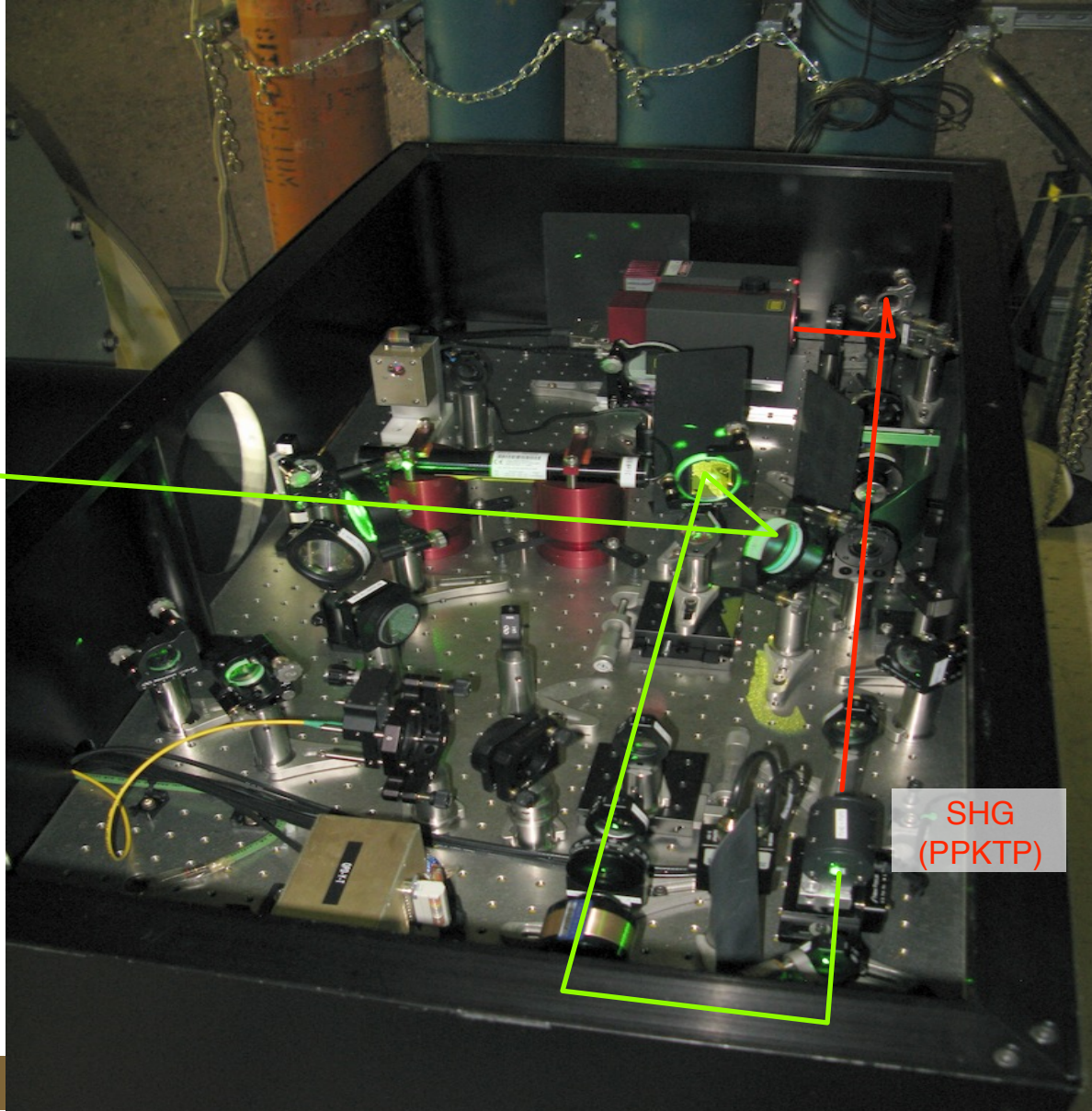
- AUX レーザーの周波数を腕に変調法を使いロック
- 速いサーボ（高いUGF）が必須
 - (1) レーザーの周波数雑音を下げる
 - (2) ロックがかかりやすくなる



AUX レーザーセットアップ



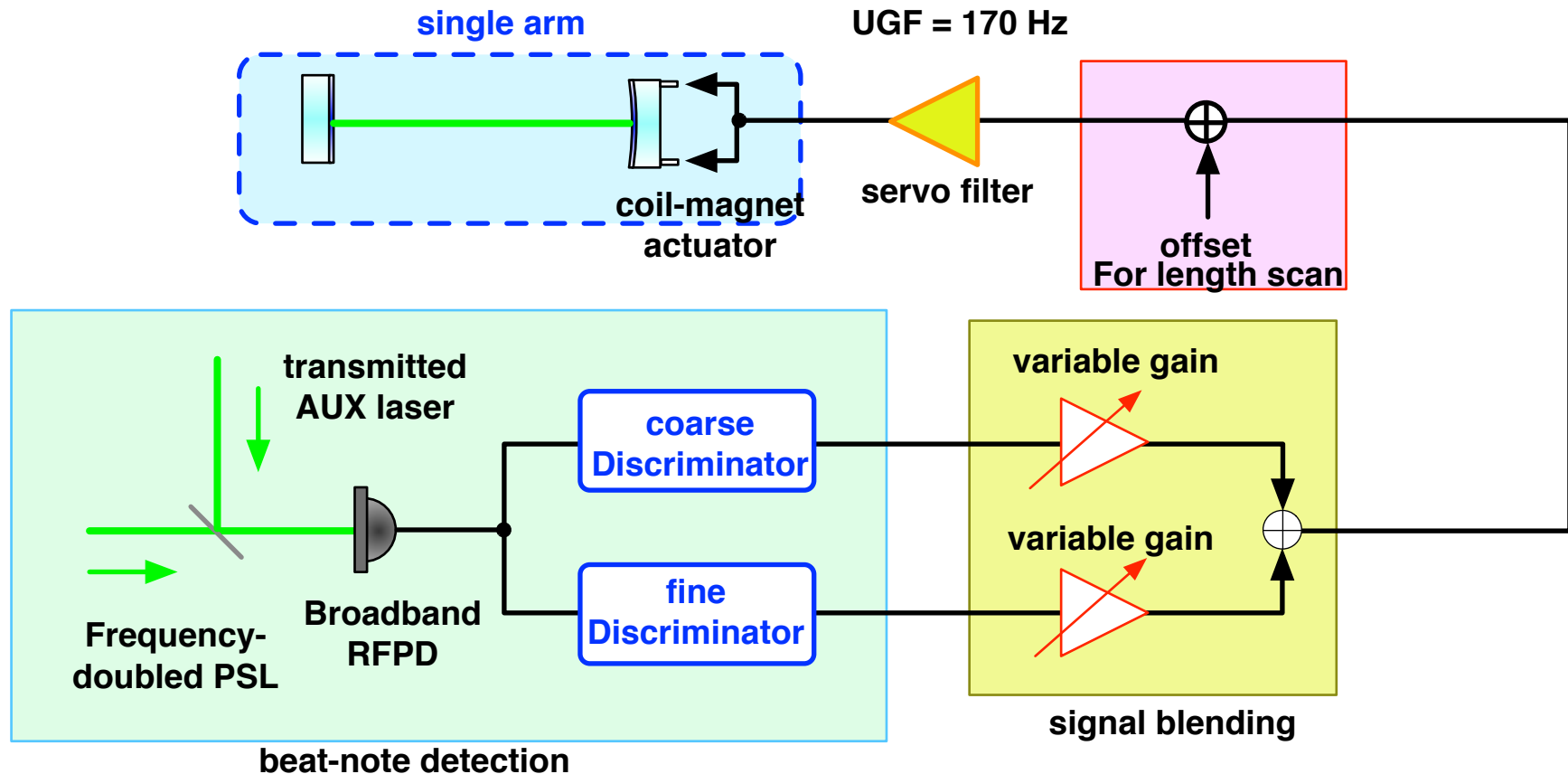
ETM



腕変位の安定化

RF ビート信号 \Rightarrow 線形オーディオ信号に変換

その後に共振器長へ feedback

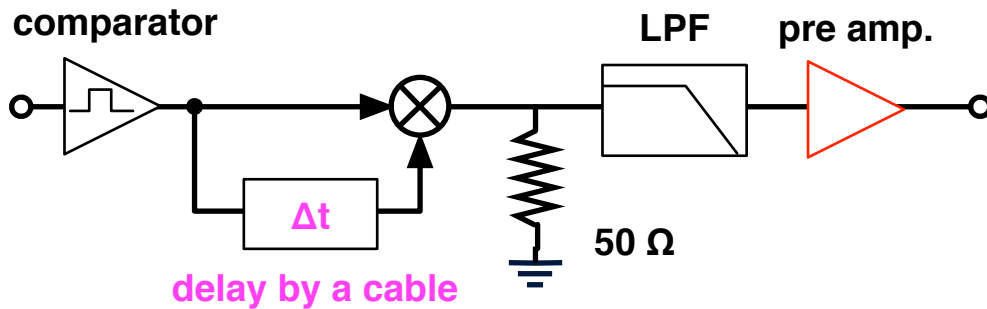


ビット信号の読み取り：DFD

DFD does the frequency discrimination

DFD

(Delay-line Frequency Discriminator)



- coarse discriminator

- ➔ time delay for = 7.5 nsec (1.5 m cable)
- ➔ +/- 33 MHz linear range

- fine discriminator

- ➔ time delay for fine = 28 nsec (55 m cable)
- ➔ +/- 1MHz linear range

$$\text{signal} = \cos(2\pi \cdot f \cdot dt)$$

Arm displacement ~ 5 MHz (1 μm)

Coarse DFD suppresses motion to ~ 100 Hz

Switch to fine DFD to increase sensitivity

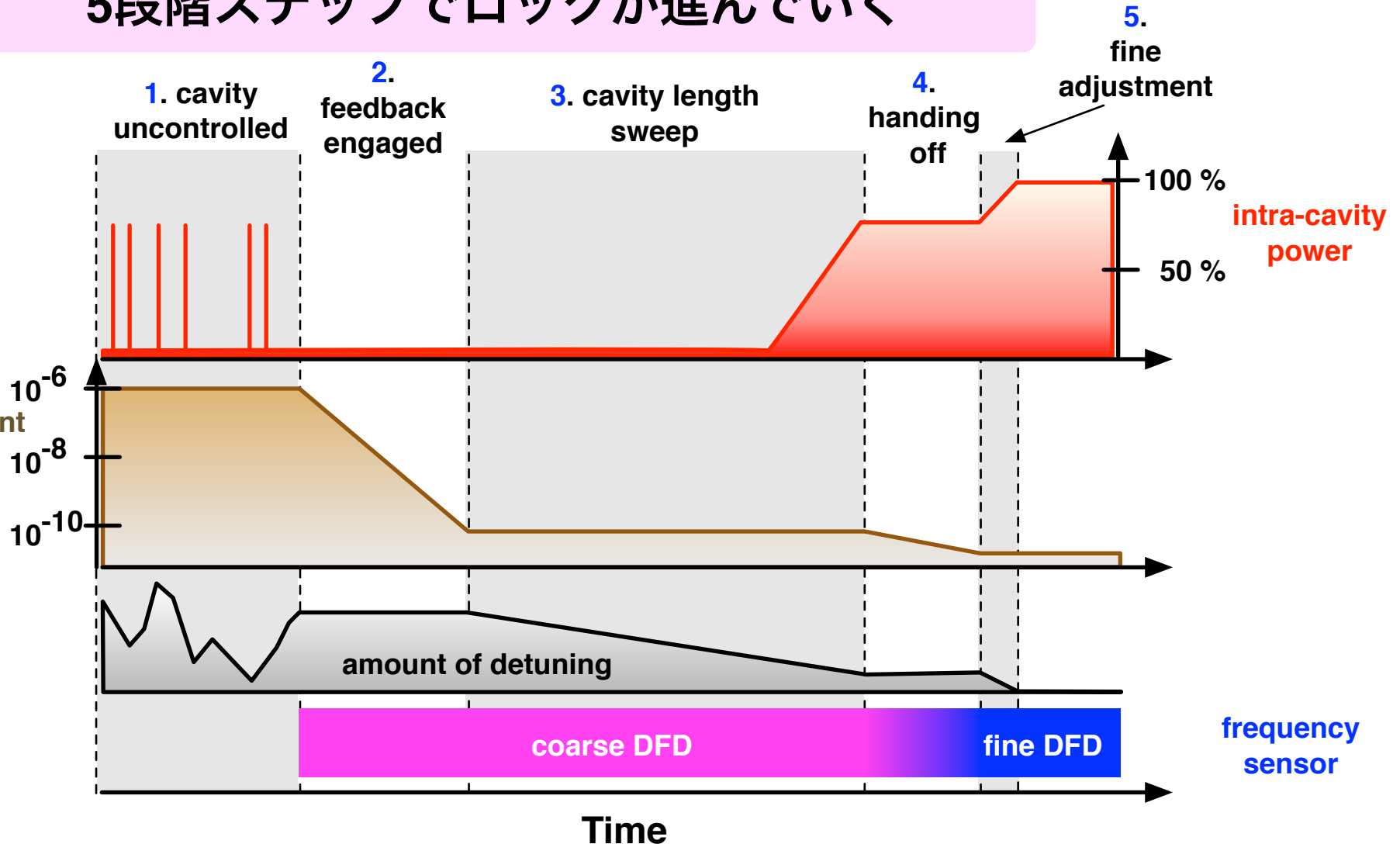
Noise :

~ 3 Hz/Hz^{1/2} @ 1 Hz limited by the comparator

ロックの順序

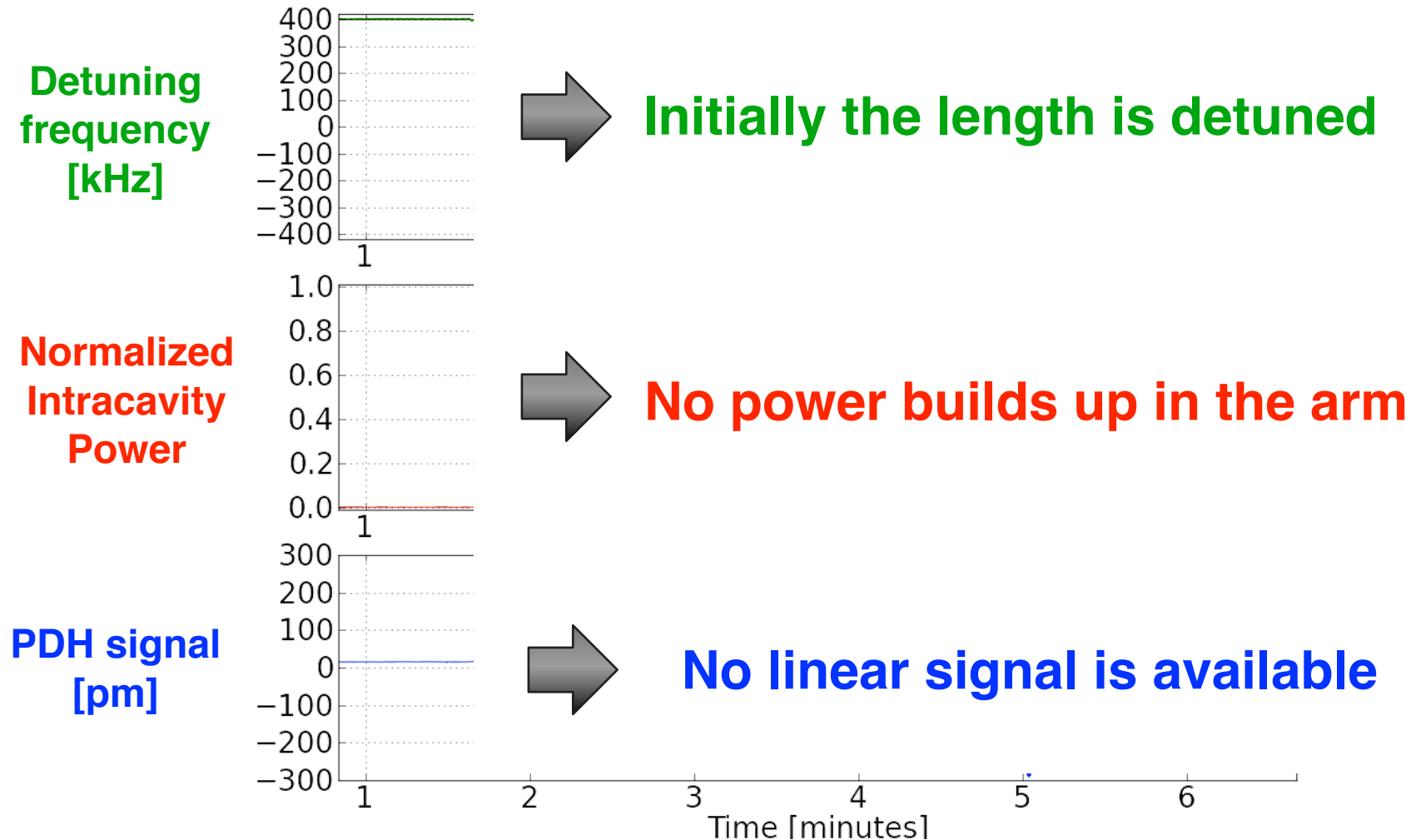
5段階ステップでロックが進んでいく

control steps



腕長さをスキャン

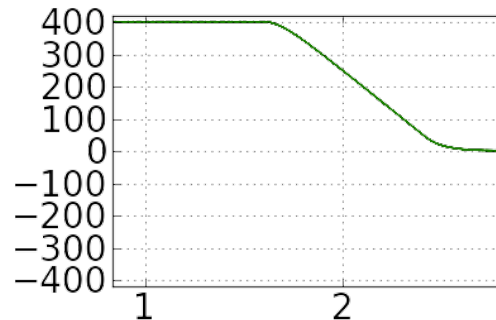
A demonstration of how precisely we can control the length



腕長さをスキャン

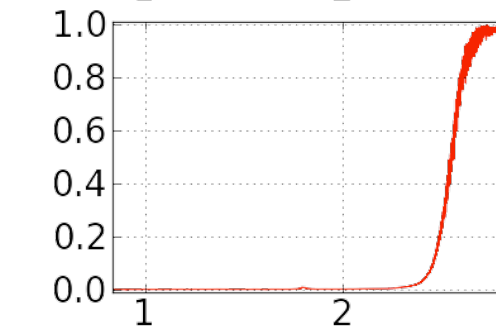
A demonstration of how precisely we can control the length

Detuning frequency [kHz]



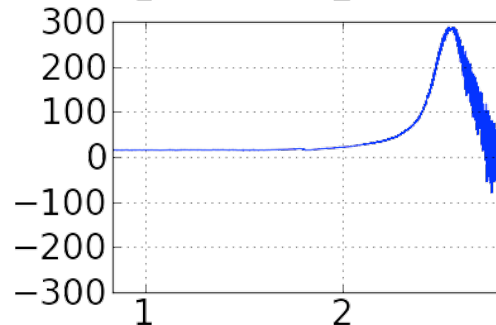
Sweeping the length to resonance point

Normalized Intracavity Power



Power builds up in the arm

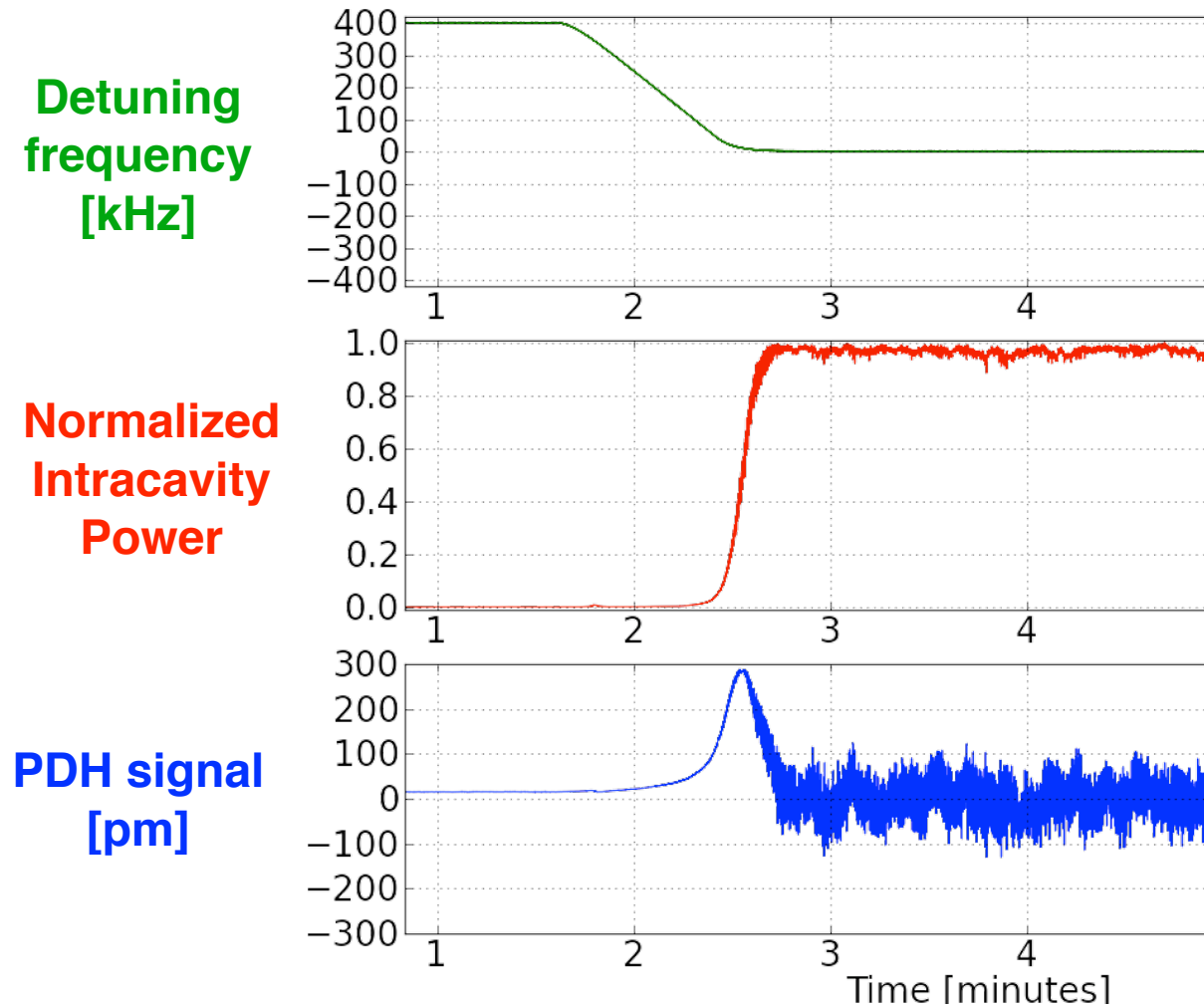
PDH signal [pm]



PDH signal goes into linear range

腕長さをスキャン

A demonstration of how precisely we can control the length



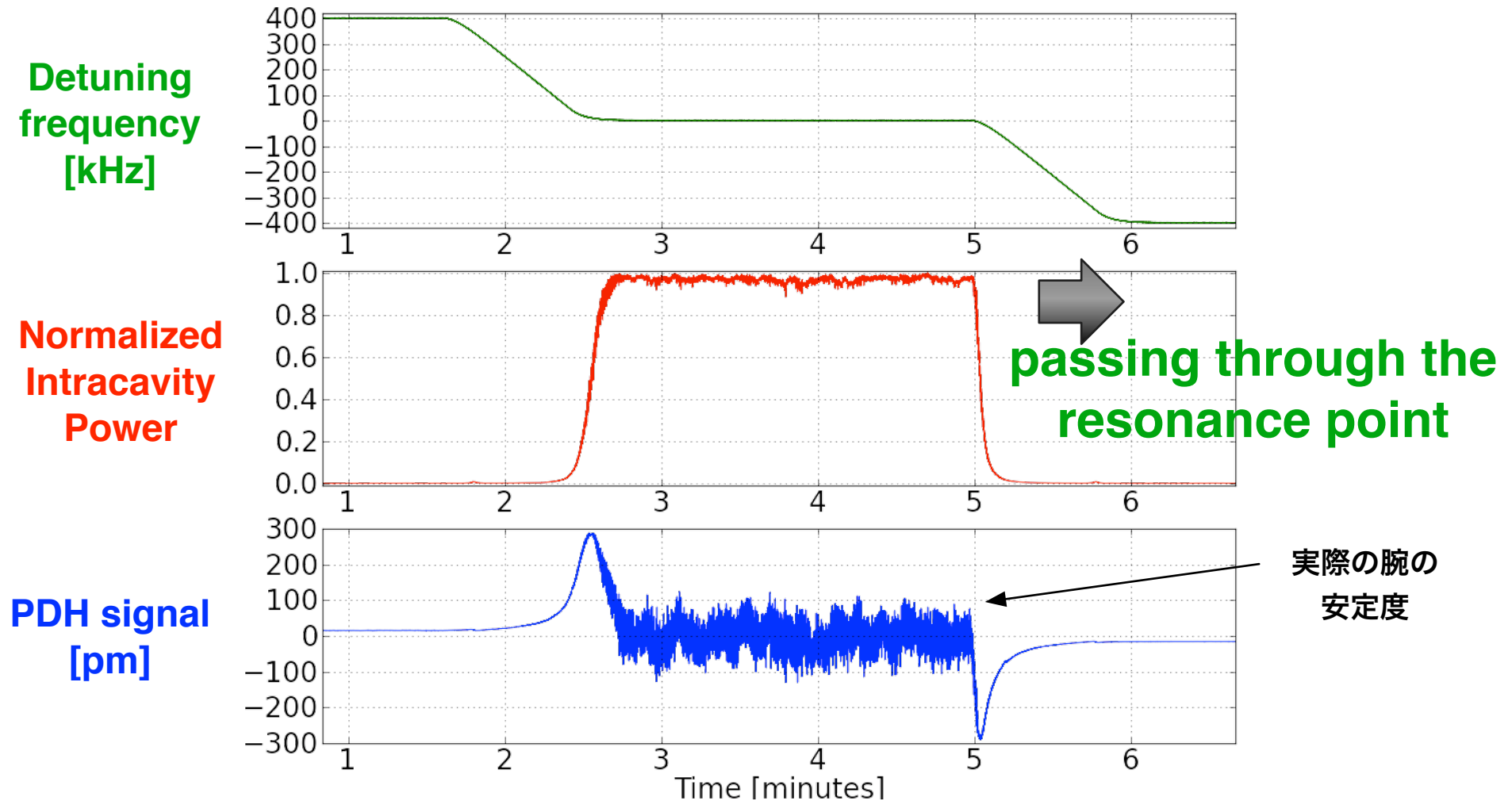
➡ The sweep stops at the resonance point

➡ Power stays at the maximum

➡ PDH signal stays at zero crossing point

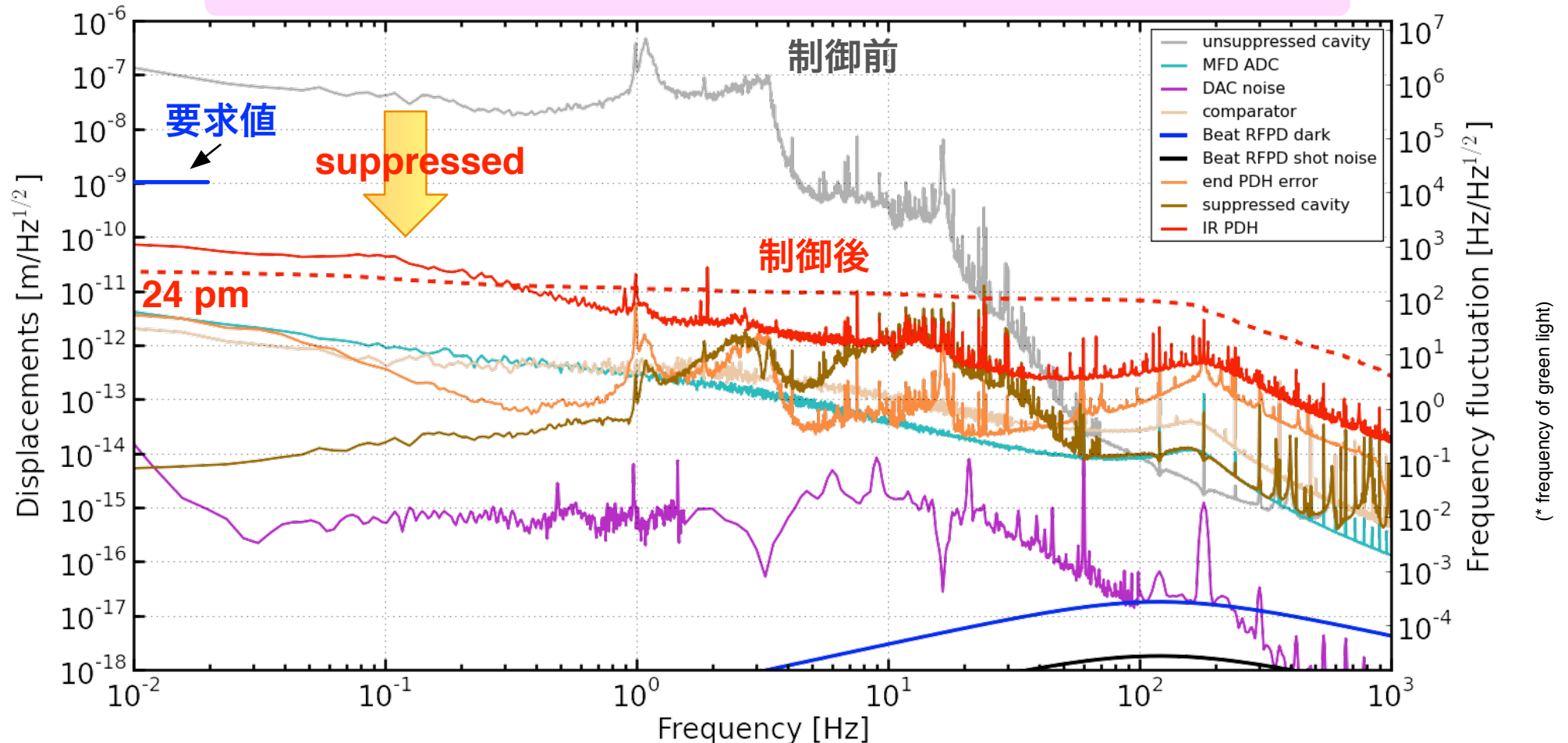
腕長さをスキャン

A demonstration of how precisely we can control the length



安定度の評価

変位は rms 値で 24 pm まで抑えることに成功
要求値である 1nm をクリア



4 km での雑音

aLIGOでの雑音もオッケー：ただし以下の項目をクリア
いくつかの雑音は長さに比例して、100倍寄与が大きくなる

- **AUX レーザーの周波数雑音**

100 倍寄与が大きくなる



AUXレーザーの周波数ロックループの最適化（より大きなサプレッション）が必要となってくる

- **ディスクリミネータの雑音**

100 倍寄与が大きくなる



そもそも beat-note の周波数振れ幅は100倍小さくなるので、
小さいレンジかつレゾリューションの細かいディスクリミネータを用意 (VCO-PLL)

- **地面振動**

寄与の仕方は変わらない。むしろ防振系がすばらしいので、対処しやすくなる

まとめ

- 重力波の直接観測がもうすぐ始まる
- レーザー干渉計の光路長制御は必須
- ロックの難しさ
 - 2つの確率的過程が存在
- ALS を用いることにより 2つの確率過程を避ける

- 40m 基線長のプロトタイプで1本腕を使った ALS 試験
- 腕の初期値を任意に用意できることを確認
- 腕の安定度 $1\text{ }\mu\text{m} \Rightarrow 24\text{ }\mu\text{m}$
- 雑音の評価 $\Rightarrow 4\text{ km}$ 腕ではいくつかの雑音が 100倍厳しいが対処可能

Appendix

Difference between the 40m and aLIGO interferometer

| | 40m | aLIGO |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|
| LSC - sidebands | 11 MHz & 55 MHz | 9 MHz & 45 MHz |
| LSC - 3f demod | ✓ | ✓ |
| Small Schnupp asym. | ✓ | ✓ |
| Arm finesse (IR) | 450 | 450 |
| Green arm length stabilization | ✓ | ✓ |
| Arm cavity power | 3 kW | 850 kW |
| GW readout | Old copper bowtie OMC | Monolithic OMC |
| WFS | IMC only | IMC and IFO |
| Suspensions | Single pendulum | Triple & Quad pendulum |
| Optic Mass | 0.25 kg | 40 kg |