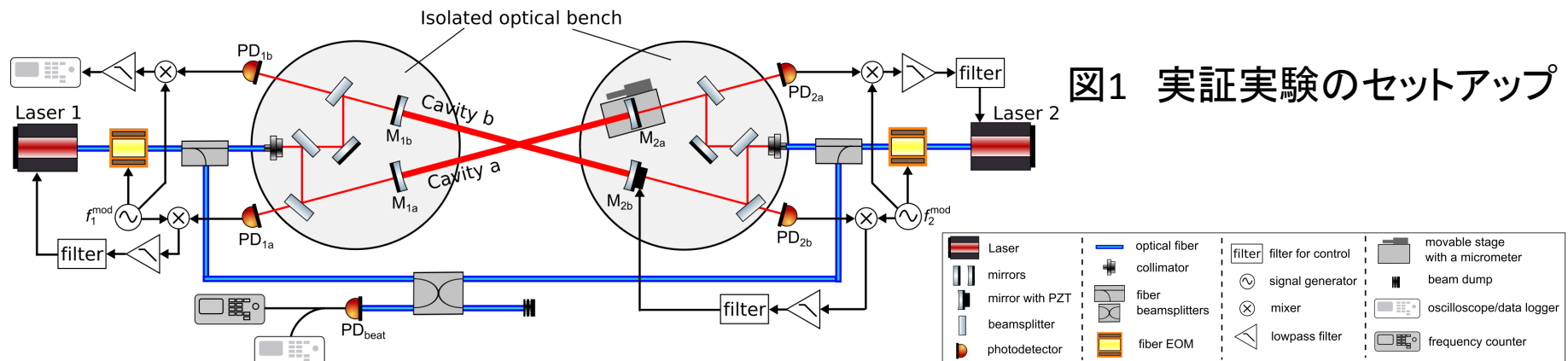


双方向Fabry-Perot干渉計の開発

長野晃士^A, 武田紘樹^B, 下田智文^B,
道村唯太^B, 安東正樹^B
東大宇宙線研^A, 東大理^B

概要

- DECIGOでは、双方向Fabry-Perot干渉計と呼ばれる干渉計方式を用いる予定である。
- これは、地上検出器に似た直接干渉型であるが、詳細な制御法が確立されていなかった。
- 今回、長さ方向の制御法に関して、理論的には信号取得が可能であることを示した。
- また、実験的に双方向Fabry-Perot干渉計の実証も行った。



目次

1. DECIGOとその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の制御法の検討
3. 地上試験用双方向Fabry-Perot干渉計の開発
4. 今後の展望、結論

目次

1. DECIGOとその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の制御法の検討
3. 地上試験用双方向Fabry-Perot干渉計の開発
4. 今後の展望、結論

B-DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

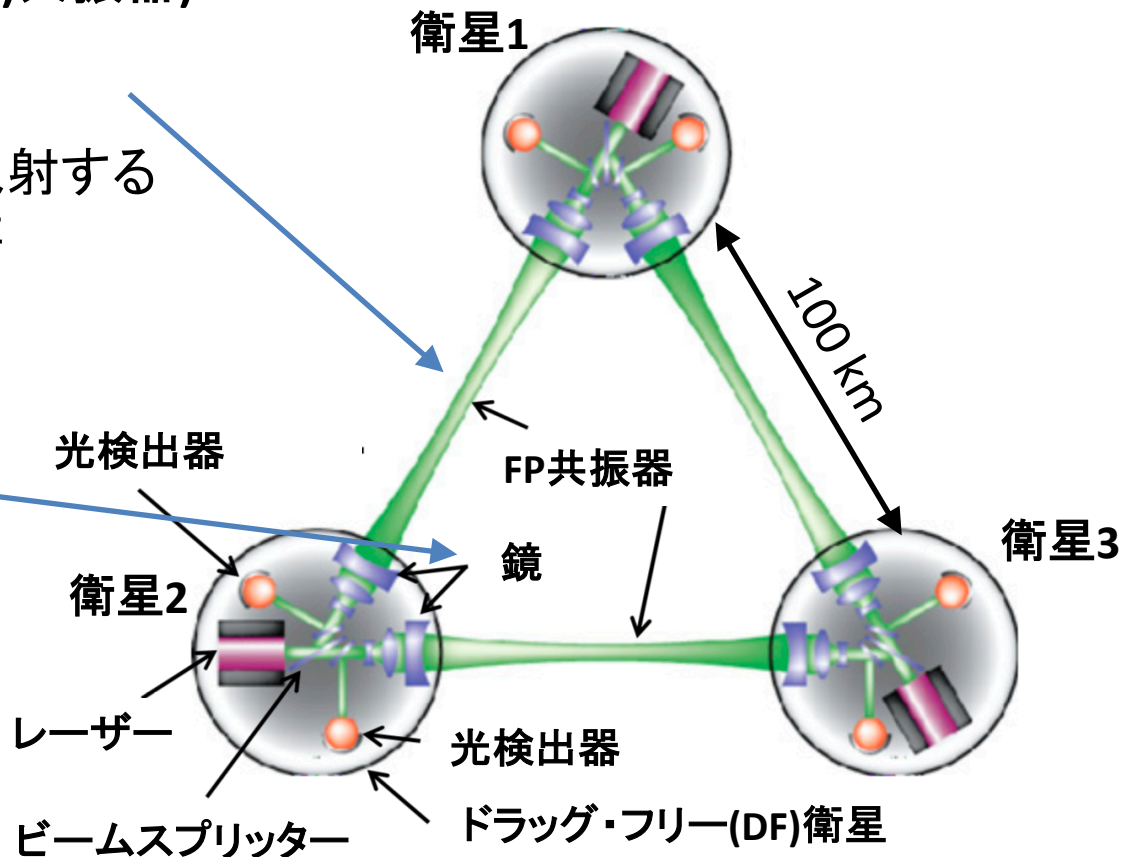
- 長さ: 100 km
- フィネス: 100
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡

- 質量: 30 kg

レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: 1 W
- 周波数揺らぎ: $< 1 \text{ Hz/rtHz @ } 0.1 \text{ Hz}$
- 相対強度ゆらぎ: $< 10^{-8} / \text{rtHz @ } 0.1 \text{ Hz}$



DECIGOの予備概念設計
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

B-DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

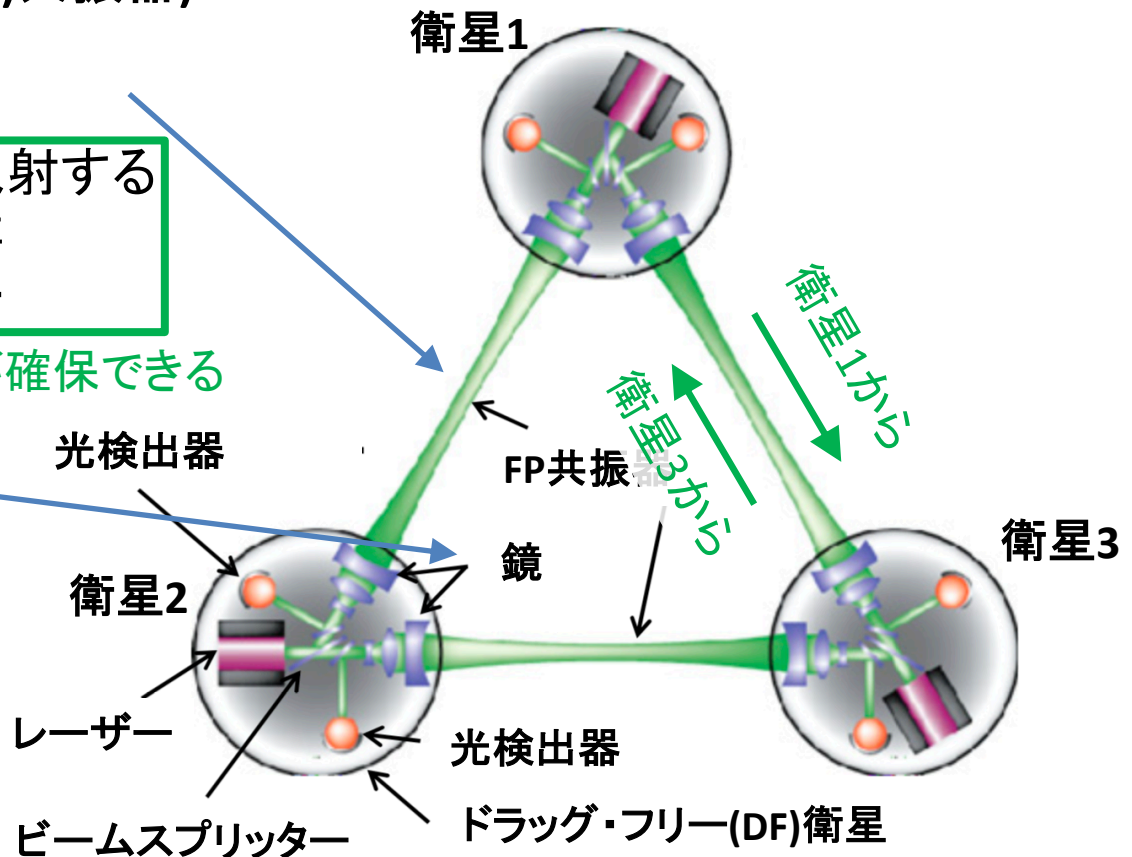
- 長さ: 100 km
- フィネス: 100
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡 少ない鏡で冗長性が確保できる

- 質量: 30 kg

レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: 1 W
- 周波数揺らぎ: $< 1 \text{ Hz/rtHz @ } 0.1 \text{ Hz}$
- 相対強度ゆらぎ: $< 10^{-8} / \text{rtHz @ } 0.1 \text{ Hz}$



DECIGOの予備概念設計
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

B-DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

- 長さ: 100 km
- フィネス: 100
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

少ない鏡で冗長性が確保できる

今回はこの制御方法についての
検討・実証実験について報告する。

レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: 1 W
- 周波数揺らぎ: $< 1 \text{ Hz/rtHz @ } 0.1 \text{ Hz}$
- 相対強度ゆらぎ: $< 10^{-8} / \text{rtHz @ } 0.1 \text{ Hz}$

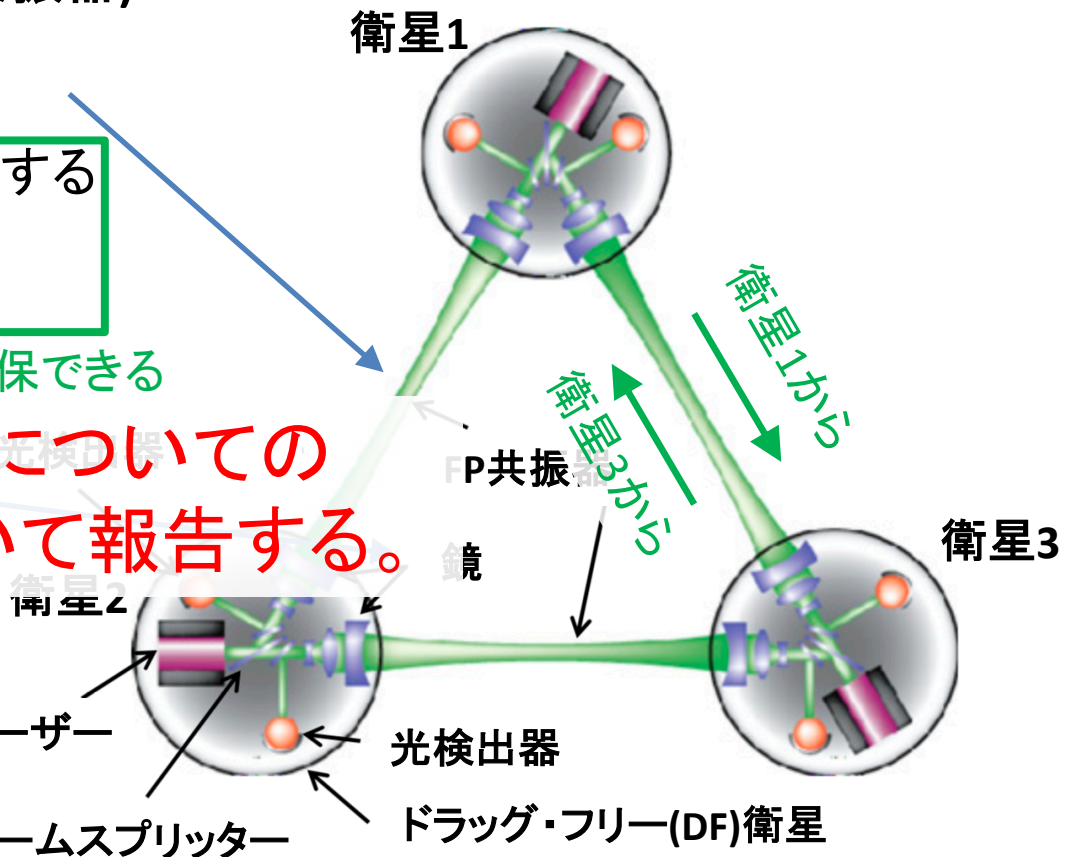
レーザー

ビームスプリッター

光検出器

ドラッグ・フリー(DF)衛星

DECIGOの予備概念設計
(S. Kawamura+, CQG, 2011)



目次

1. DECIGOとその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の制御法の検討
3. 地上試験用双方向Fabry-Perot干渉計の開発
4. 今後の展望、結論

双方向Fabry-Perot干渉計の検討

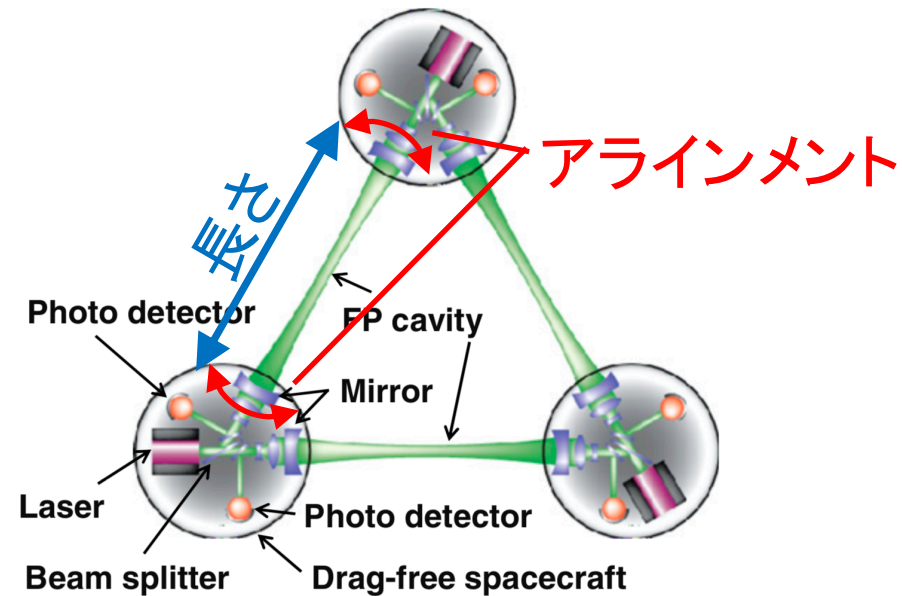
- 双方向Fabry-Perot干渉計の実現に向けては、

- 共振器長さ信号
- アライメント信号

のそれぞれについて、

- 信号取得方法
- 感度要求 (スペクトル)
- 安定度 (RMS)

を検討する必要がある。



双方向Fabry-Perot干渉計の検討

- 双方向Fabry-Perot干渉計の実現に向けては、

- 共振器長さ信号

- アライメント信号

のそれぞれについて、

- 信号取得方法

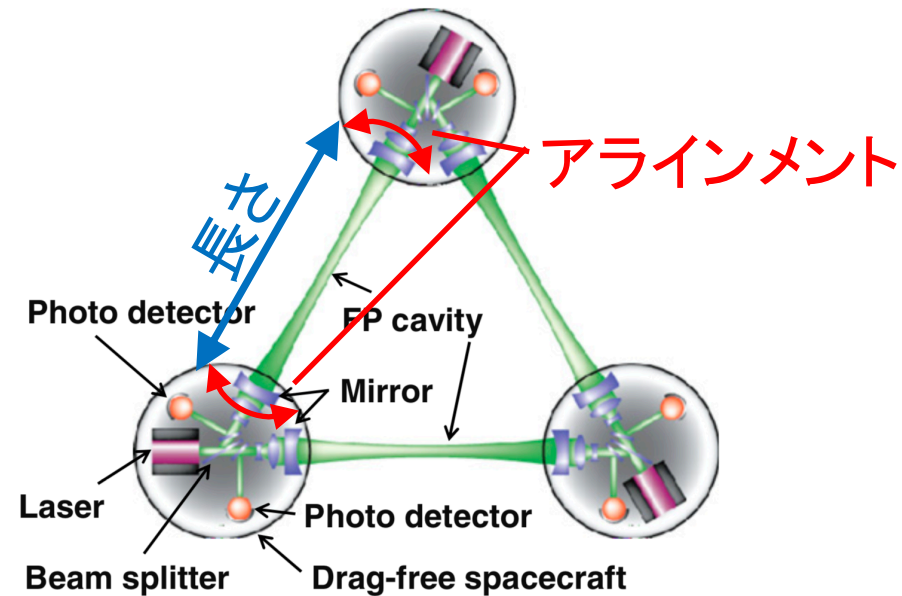
- 感度要求 (スペクトル)

- 安定度 (RMS)

を検討する必要がある。

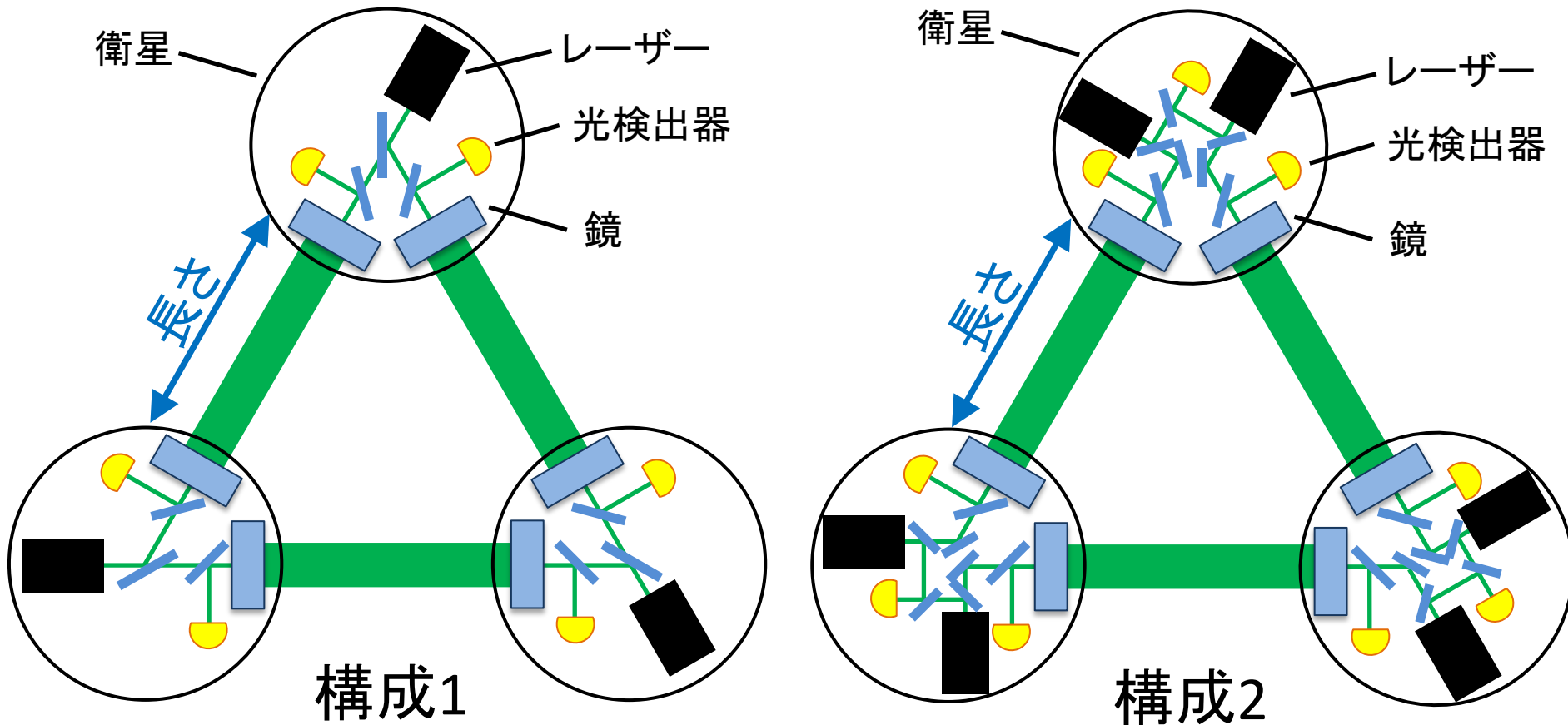
今回は、共振器長さ信号取得について検討した。

(感度、安定度については、軌道選択などとも絡むため依然検討中。)



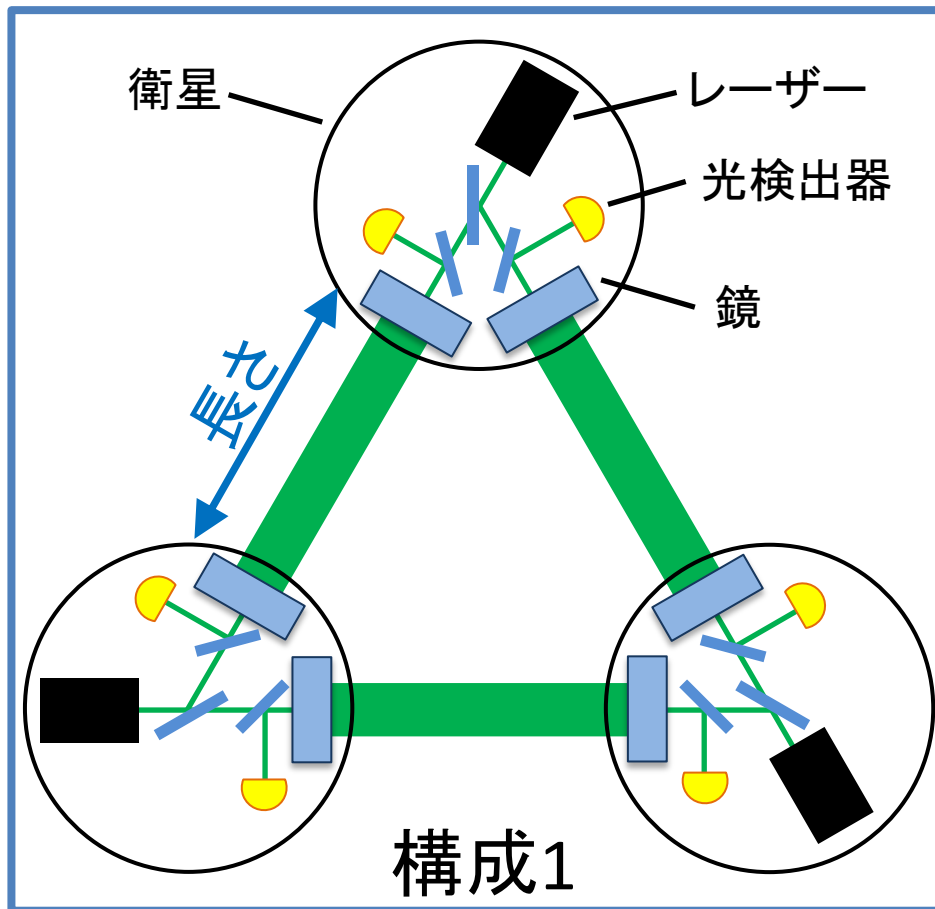
双方向Fabry-Perot干渉計の構成

- これまで、主に2つの構成が提案されている。

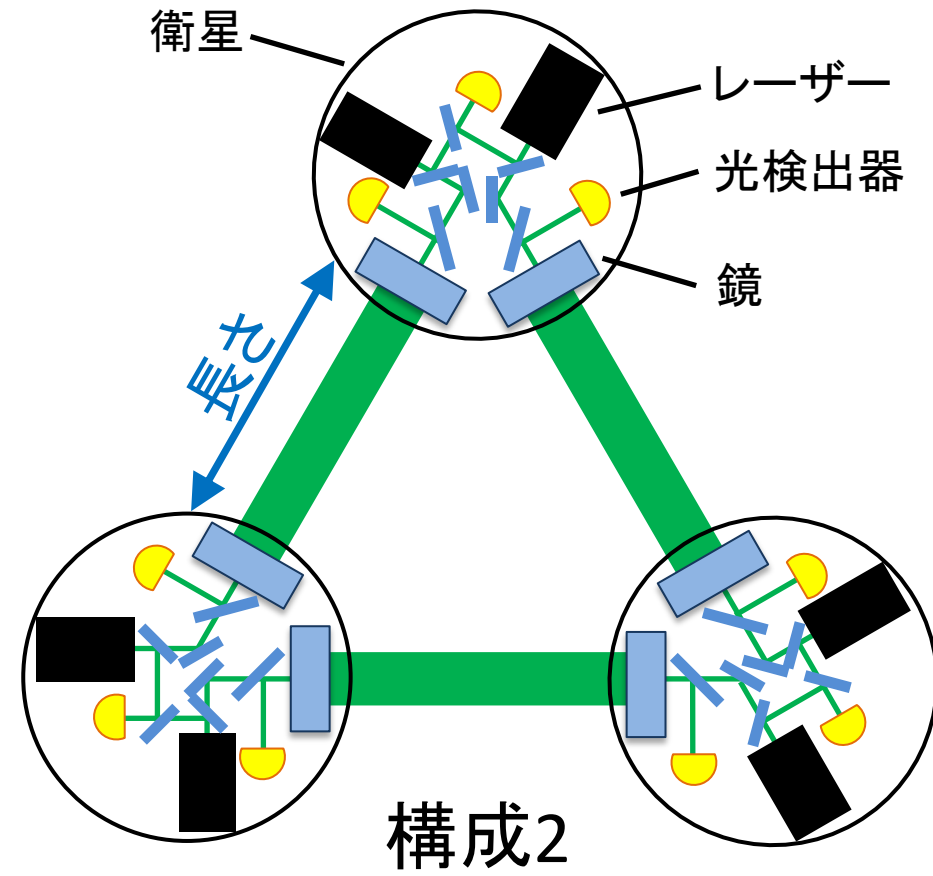


双方向Fabry-Perot干渉計の構成

- これまで、主に2つの構成が提案されている。

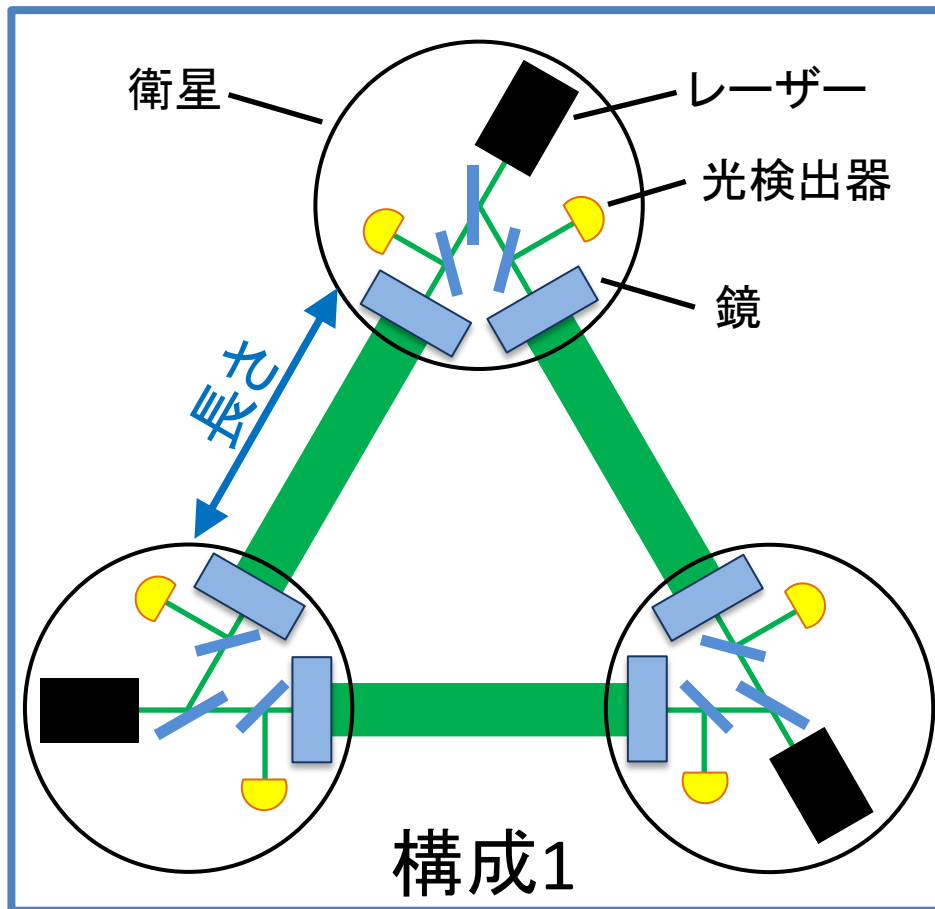


今回はこちらを検討



双方向Fabry-Perot干渉計の構成

- これまで、主に2つの構成が提案されている。



今回はこちらを検討

←今後、この構成を双方向
ロックトFabry-Perot干渉計
方式 (Dual-pass locked
Fabry-Perot interferometer)
と呼びたい。

(正確には後述の制御トポロジーを持つ場合)

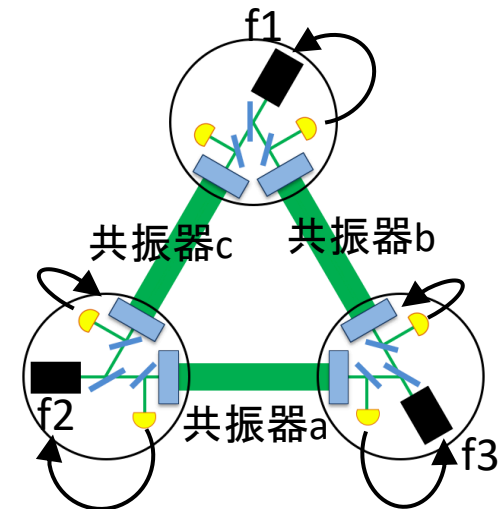
双方向ロックトlocked Fabry-Perot干渉計

- メリット

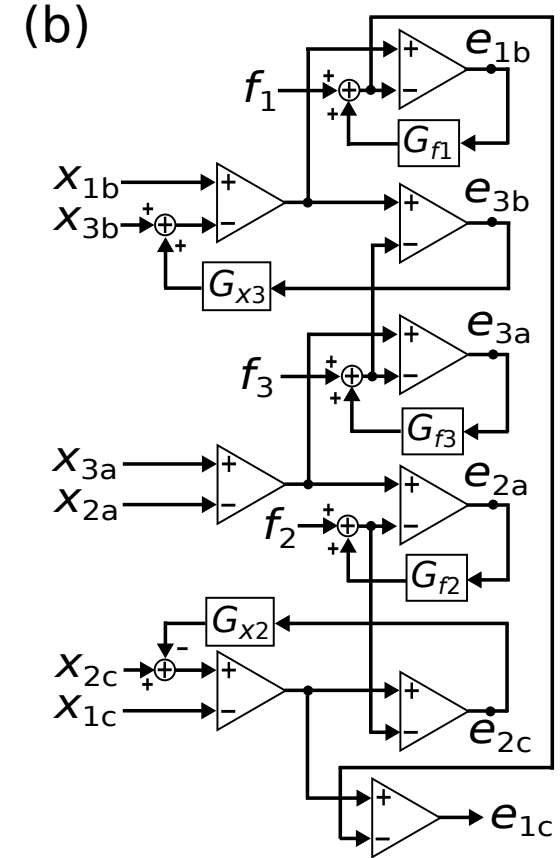
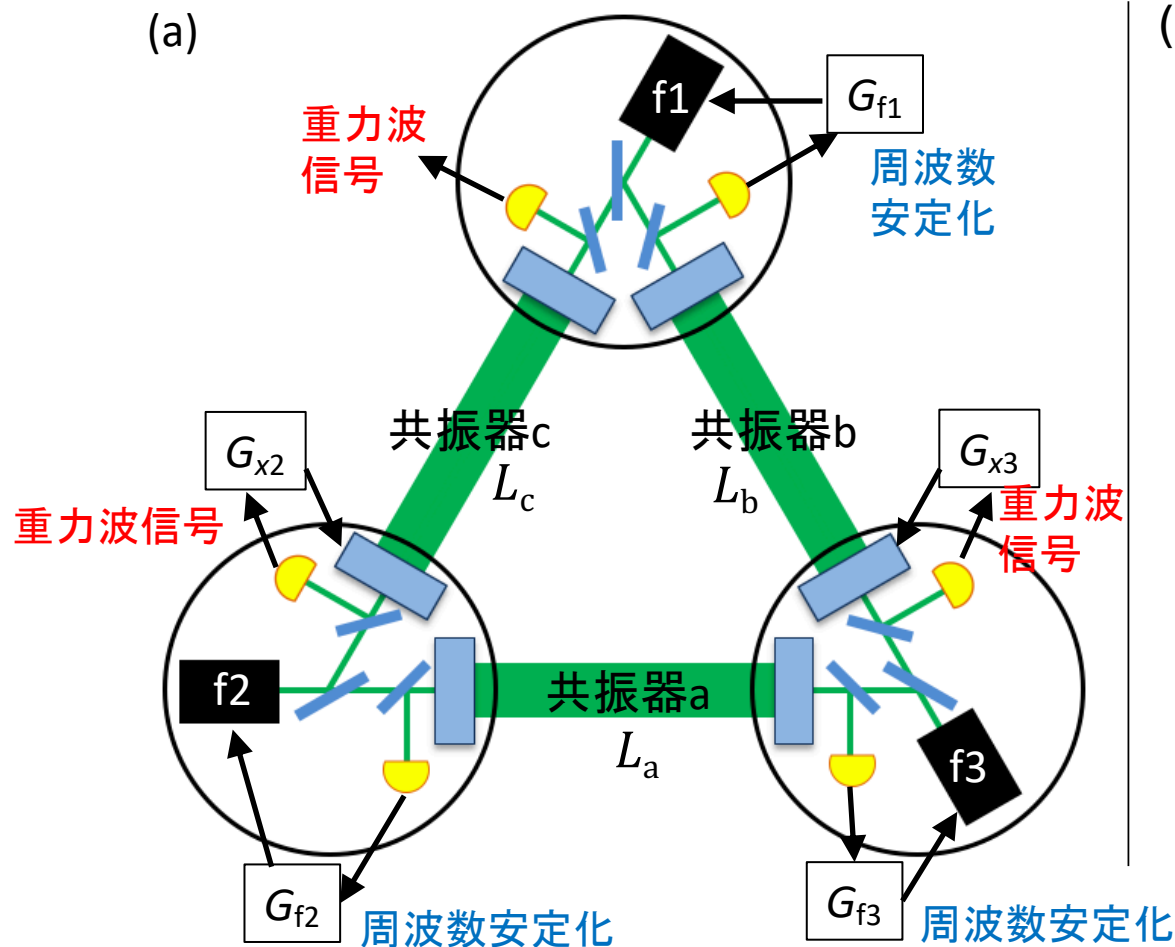
- 構成がシンプル。
- ショットノイズレベルの感度が、既存の干渉計技術で達成可能。
- 古典輻射圧雑音が“同相雑音除去”される。

- デメリット

- 腕の長さを調整する必要がある(次ページ以降)。
- すべての腕が同相で動く必要がある。

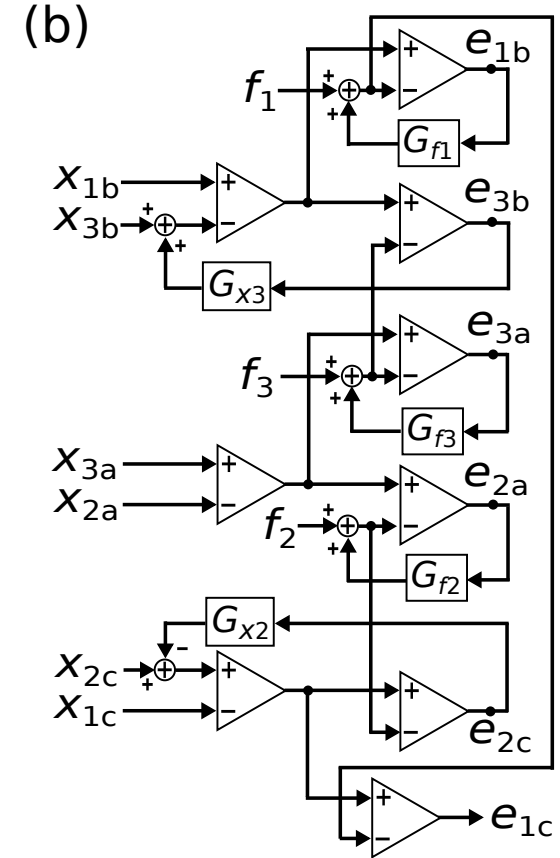
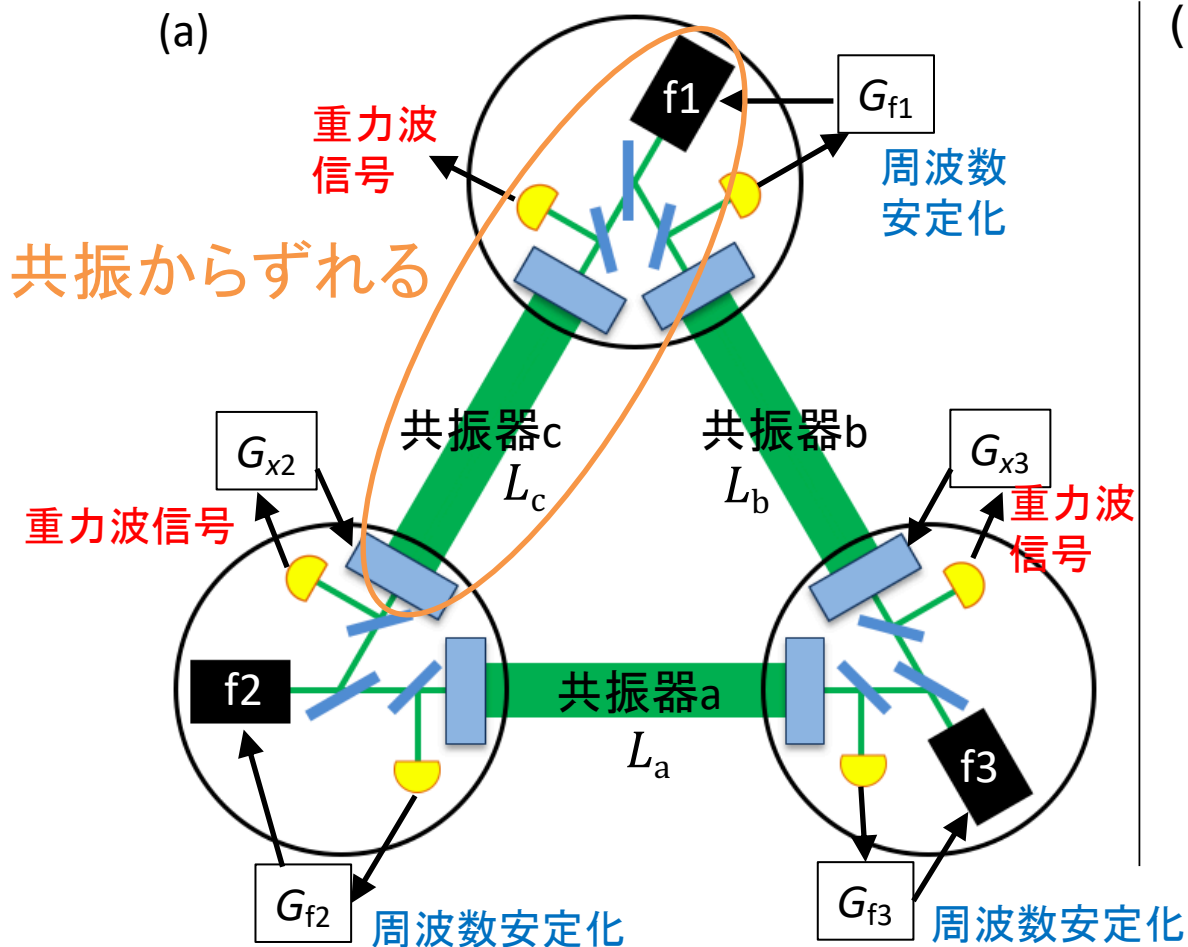


双方向Fabry-Perot干渉計の制御方式



B-DEICGOの干渉計制御方式。

双方向Fabry-Perot干渉計の制御方式



B-DEICGOの干渉計制御方式。

腕の長さの調整精度

- 共振ずれ Δf の最大量: $\frac{c}{2L} \frac{|L_b - L_c|}{L}$
- Δf への要求値 $(L \cong L_b \cong L_c)$

地球周回軌道ならGPSにより
10-100 m程度の精度で衛星
間距離は測定可能。

– 信号取得 = 共振器の線幅内に収まる

$$\rightarrow \Delta f < \frac{c}{2LF} \leftarrow \text{フィネス}$$

- B-DECIGOでは、 $|L_b - L_c| < 1 \text{ km}$

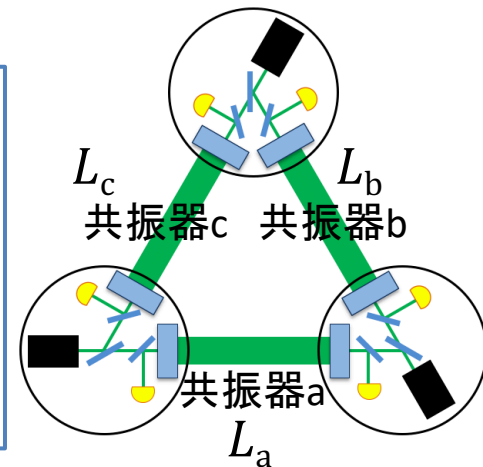
信号取得は共振器を用いない粗調で達成可能

– 感度達成 = 相対強度ゆらぎ(RIN)カップリング

$$\rightarrow \Delta f < \frac{h}{\text{RIN}} \nu \leftarrow \begin{array}{l} \text{歪み感度} \\ \text{レーザー周波数} \end{array}$$

- B-DECIGOでは、 $|L_b - L_c| < 40 \text{ m}$

感度達成も共振器を用いた調整により可能。



B-DECIGOのパラメータ

L : 100 km

F : 100

h : $1\text{e-}23 \text{ 1/rtHz}$

RIN : $1\text{e-}8 \text{ 1/rtHz}$

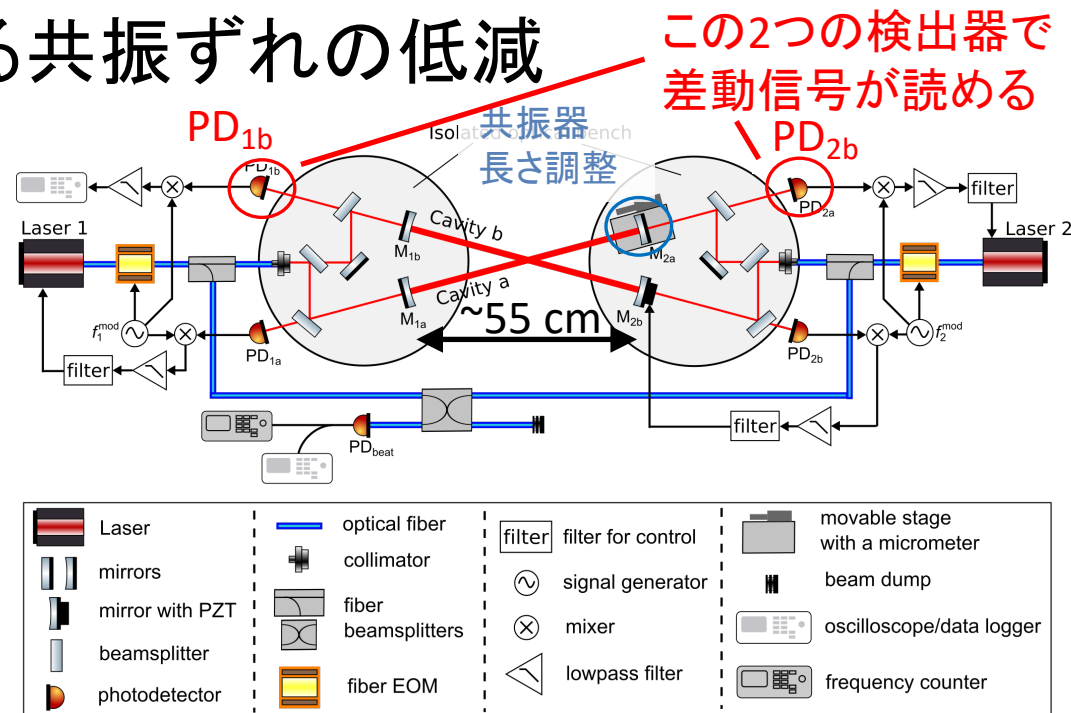
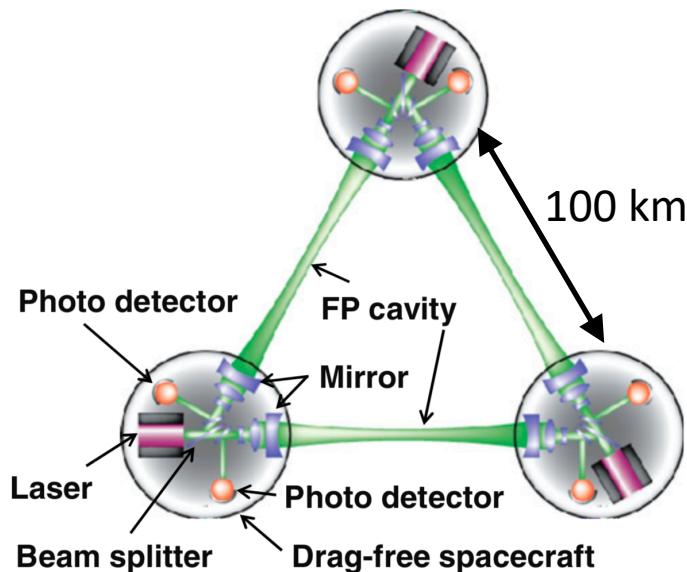
ν : $6\text{e}14 \text{ Hz}$

目次

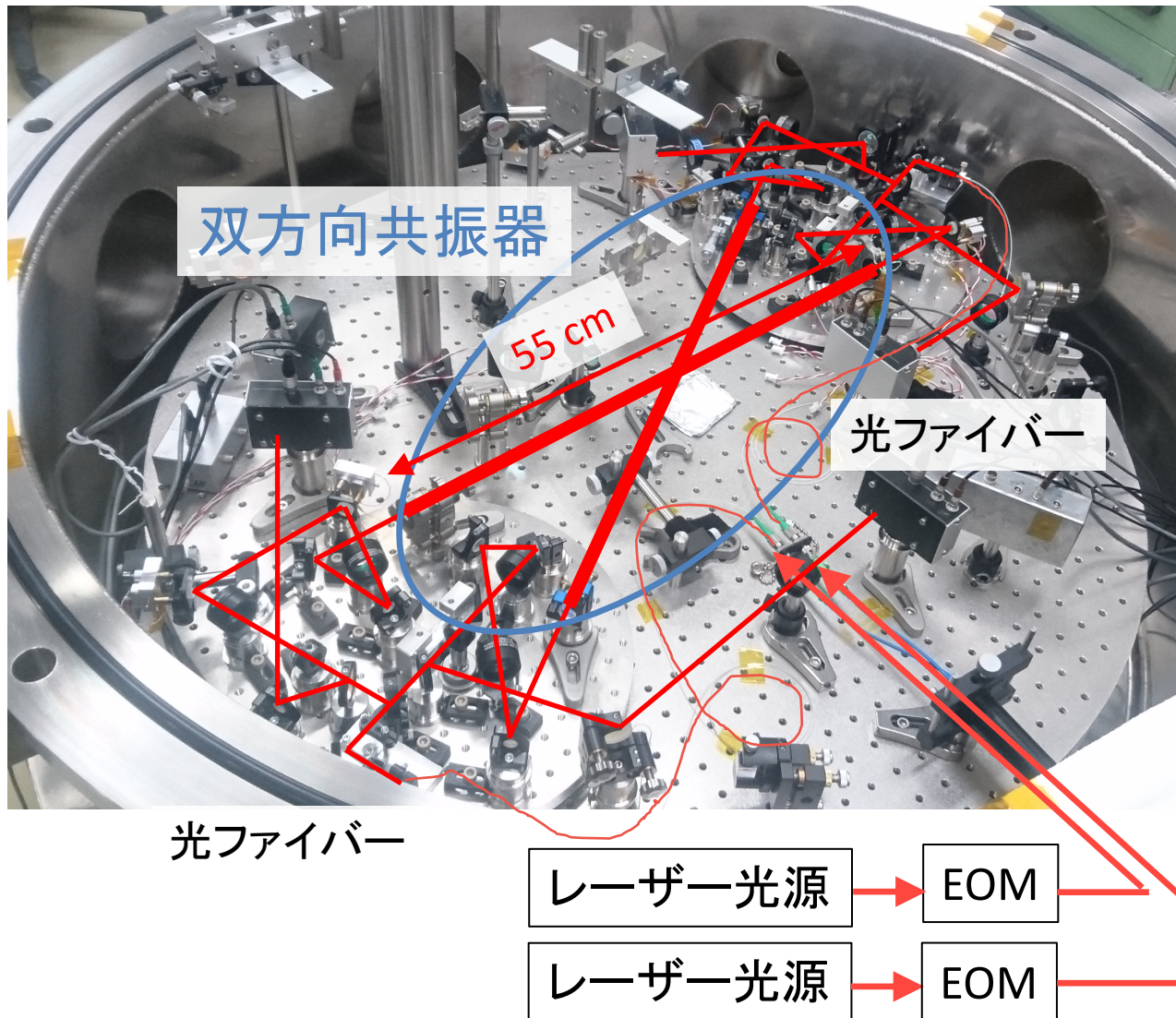
1. DECIGOとその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の制御法の検討
3. 地上試験用双方向Fabry-Perot干渉計の開発
4. 今後の展望、結論

地上実証実験

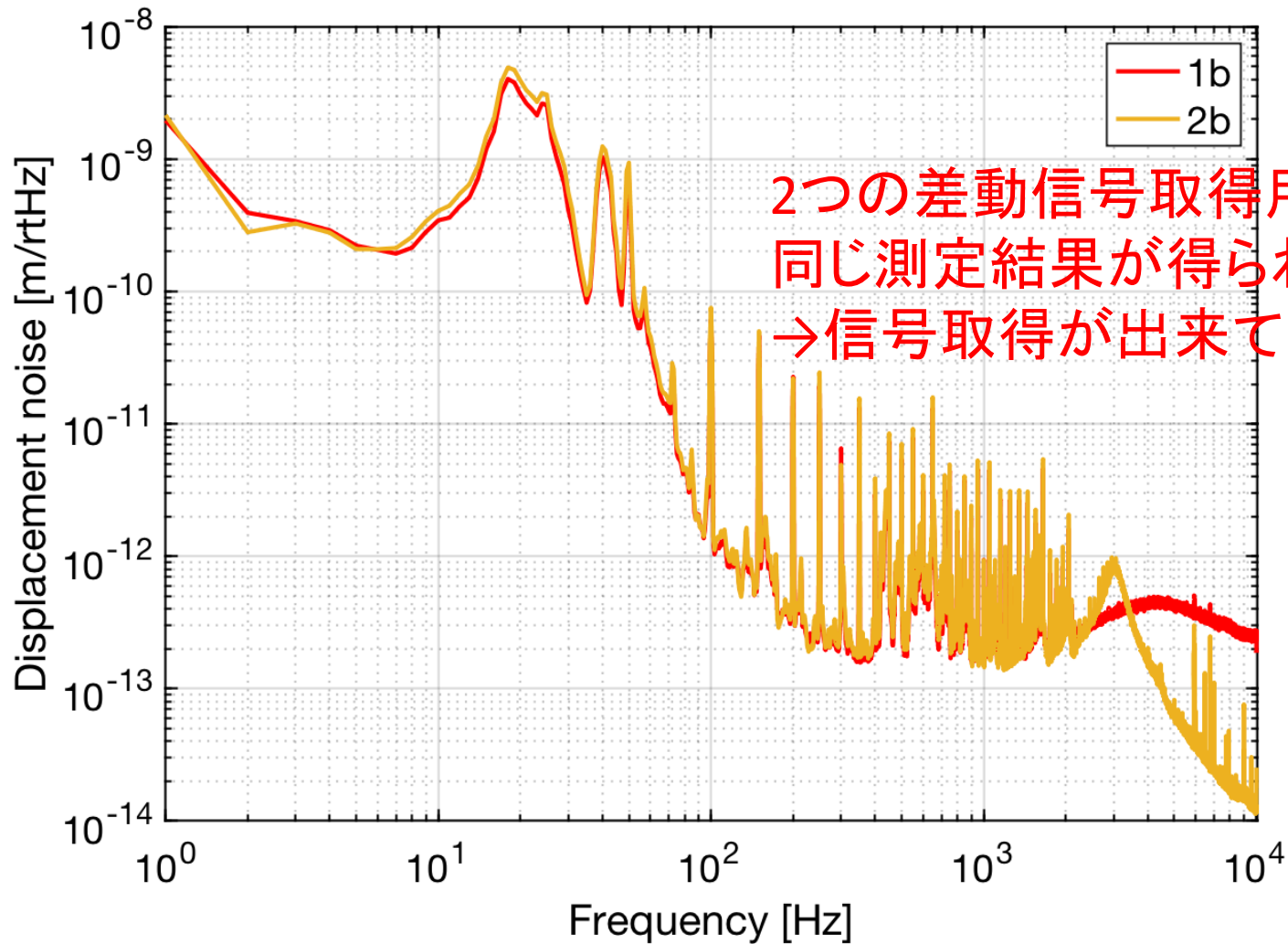
- 現在、以上のような双方向FP干渉計を、特に腕の長さ調整による信号取得可能性を実証するための地上実験を行っている。特に、
 - 双方向ロックトFabry-Perot干渉計の信号取得
 - 絶対長さ調整による共振ずれの低減



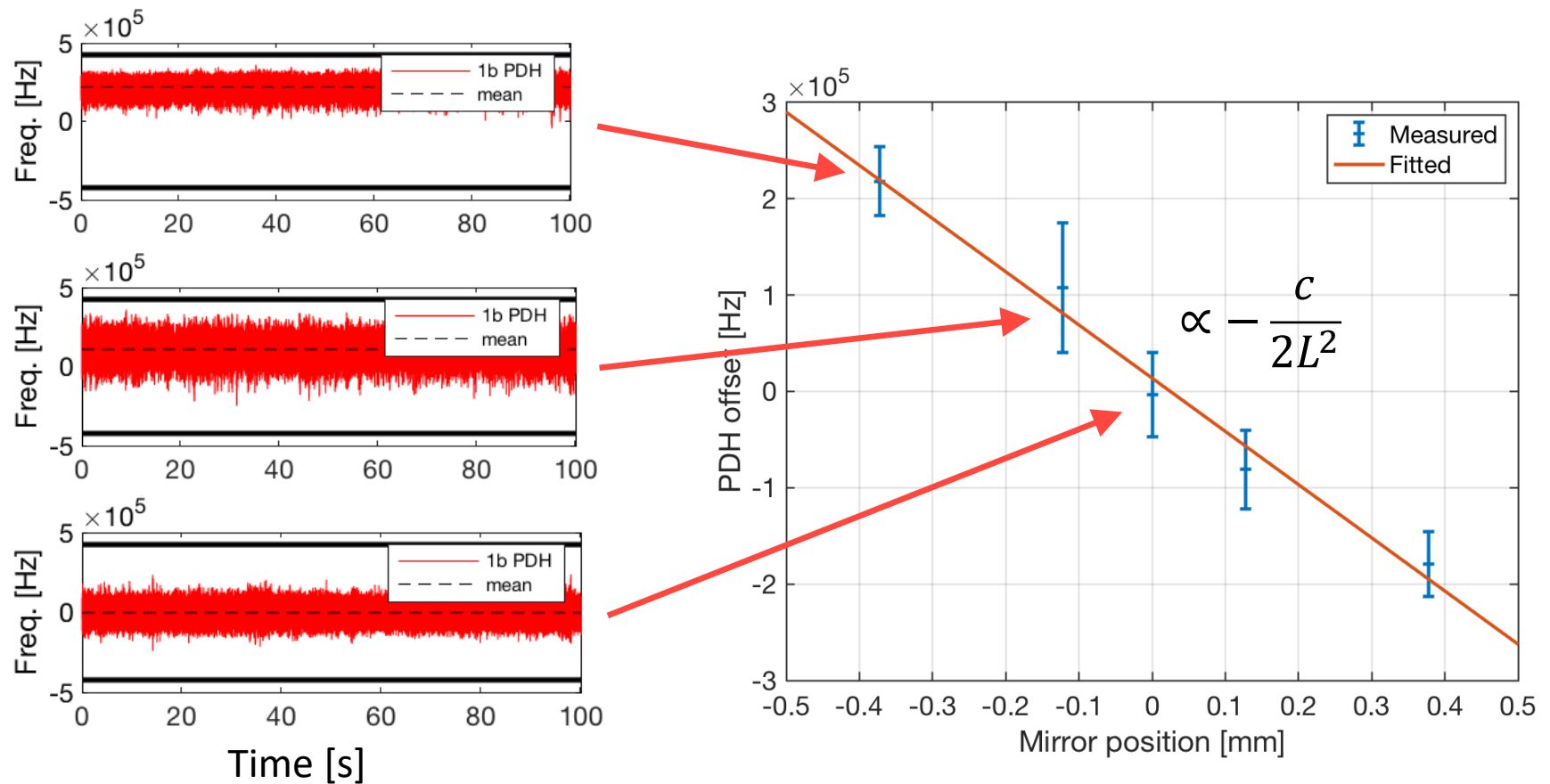
地上実証実験



双方向ロックトFP干渉計の測定



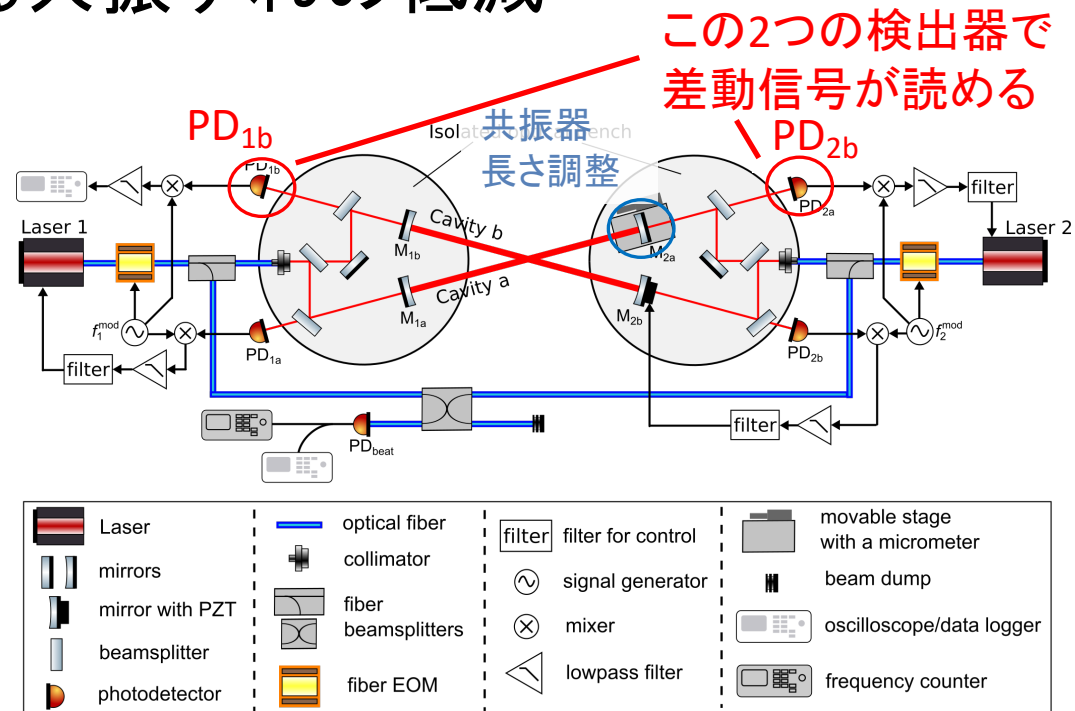
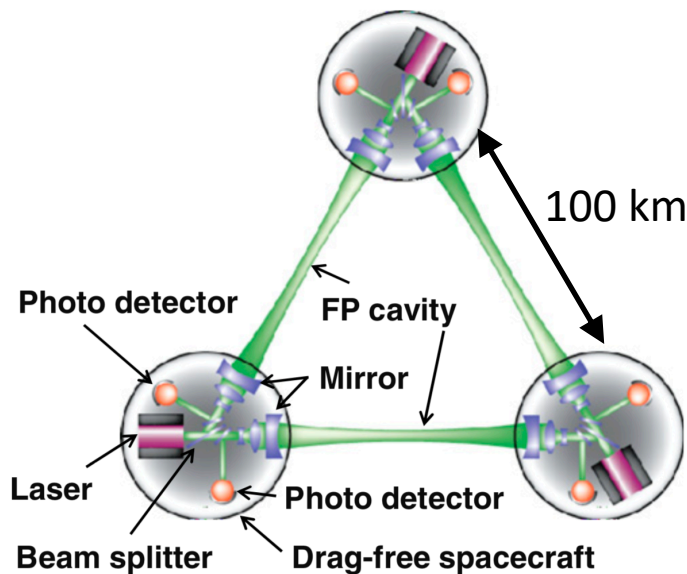
絶対長さ調整による共振ずれの低減



絶対長さを変えながら測定し、共振器bの共振ずれが変化することを確認した。
→絶対長さを調整することで、共振ずれを低減し、強度雑音カップリングを低減することができる。

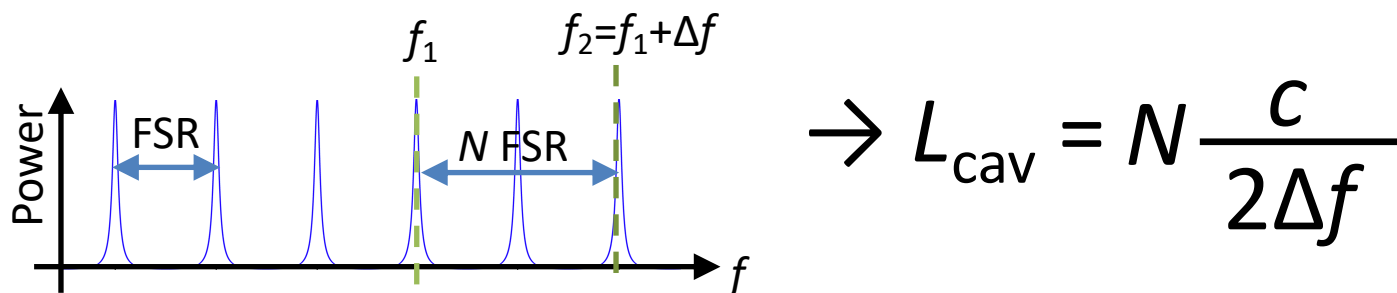
地上実証実験のまとめ

- 目的であった以下の2点が実証できた。
 - 双方向ロックトFabry-Perot干渉計の信号取得
 - 絶対長さ調整による共振ずれの低減

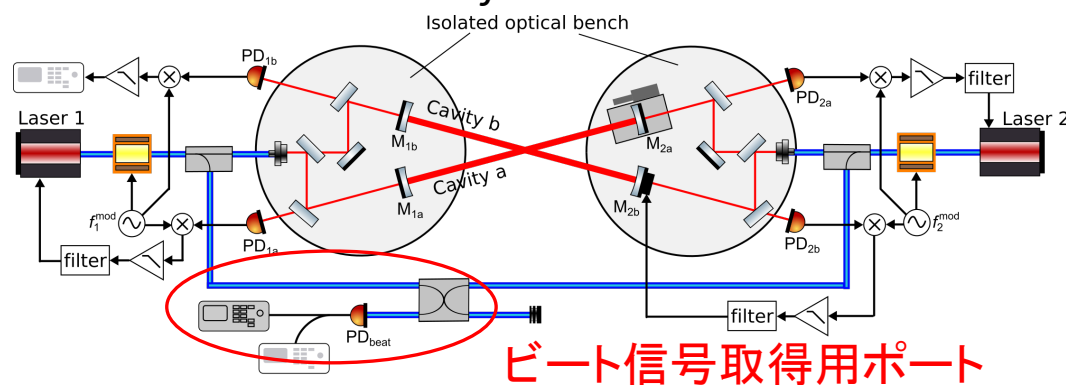


共振器絶対長さ測定

- ところで、共振器長さは双方向の2つレーザーのビート信号を取得することで測定した。



$$\rightarrow L_{\text{cav}} = N \frac{c}{2\Delta f}$$



調整後の2つ共振器の長さ: 0.55340(1) m $\rightarrow$ 相対測定精度: 2×10^{-5}
(雑音源はまだよくわからない。おそらくSN比リミット)

実際も同様の方法で測定できる(はず)。

目次

1. DECIGOとその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の制御法の検討
3. 地上試験用双方向Fabry-Perot干渉計の開発
4. 今後の展望、結論

今後の展望

- 理論的検討

- これまでの長さ方向制御に加えて、アライメント制御の検討も進めている。
- Wave front sensorや、鏡のディザーによるビーム位置測定などの信号を用いる。
- 複雑な制御になるので、Simulinkを用いたシミュレーションツールも開発中。(実はほぼ出来ている)

- 実験的検証

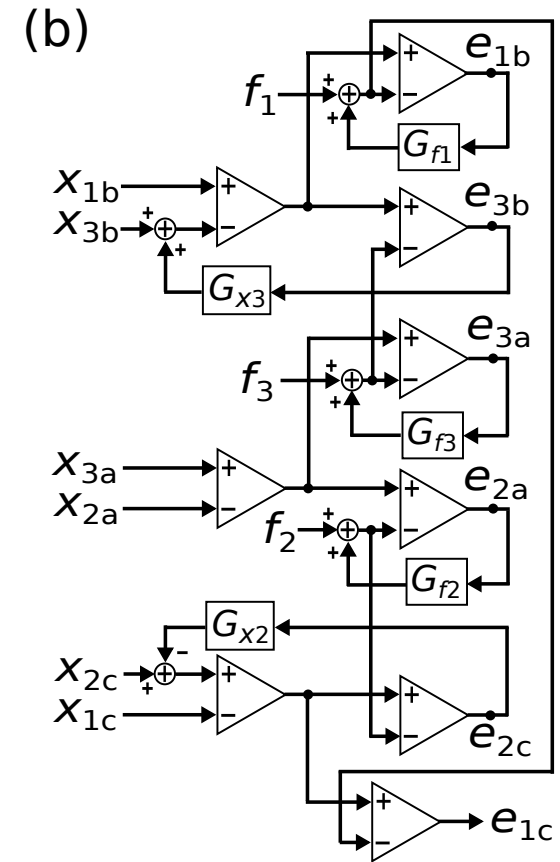
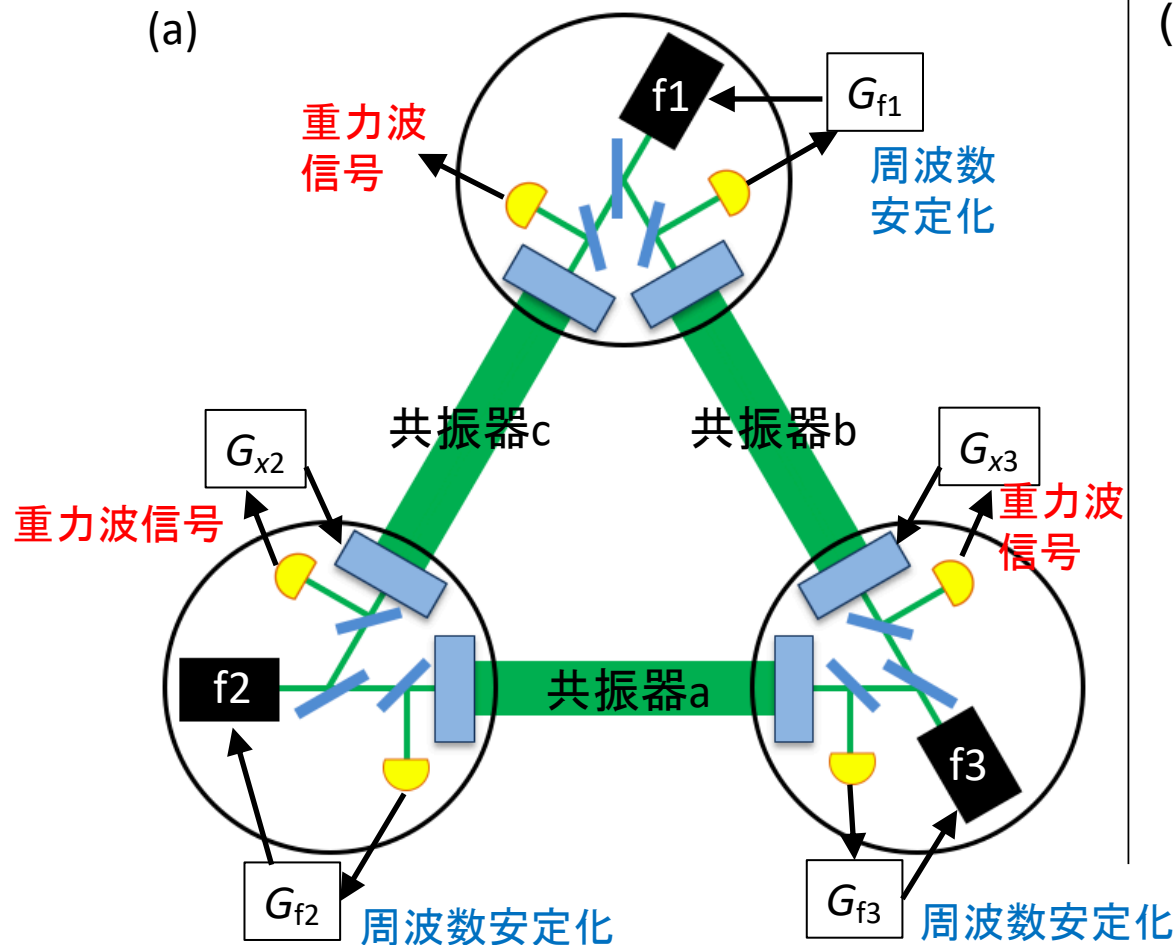
- 長さ制御に加えて、角度制御も含めた実証を行う。

結論

- スペース重力波アンテナDECIGOで用いるための双方向Fabry-Perot干渉計の検討を行った。
- 理論的には、長さ信号を取得できることを確認した。
 - アライメント制御についてはさらなる検討が必要。
- 実験的にも、干渉計を構築し、双方向ロックトFabry-Perot干渉計を実証した。
 - 今後は、角度制御も含めた実証を行う。

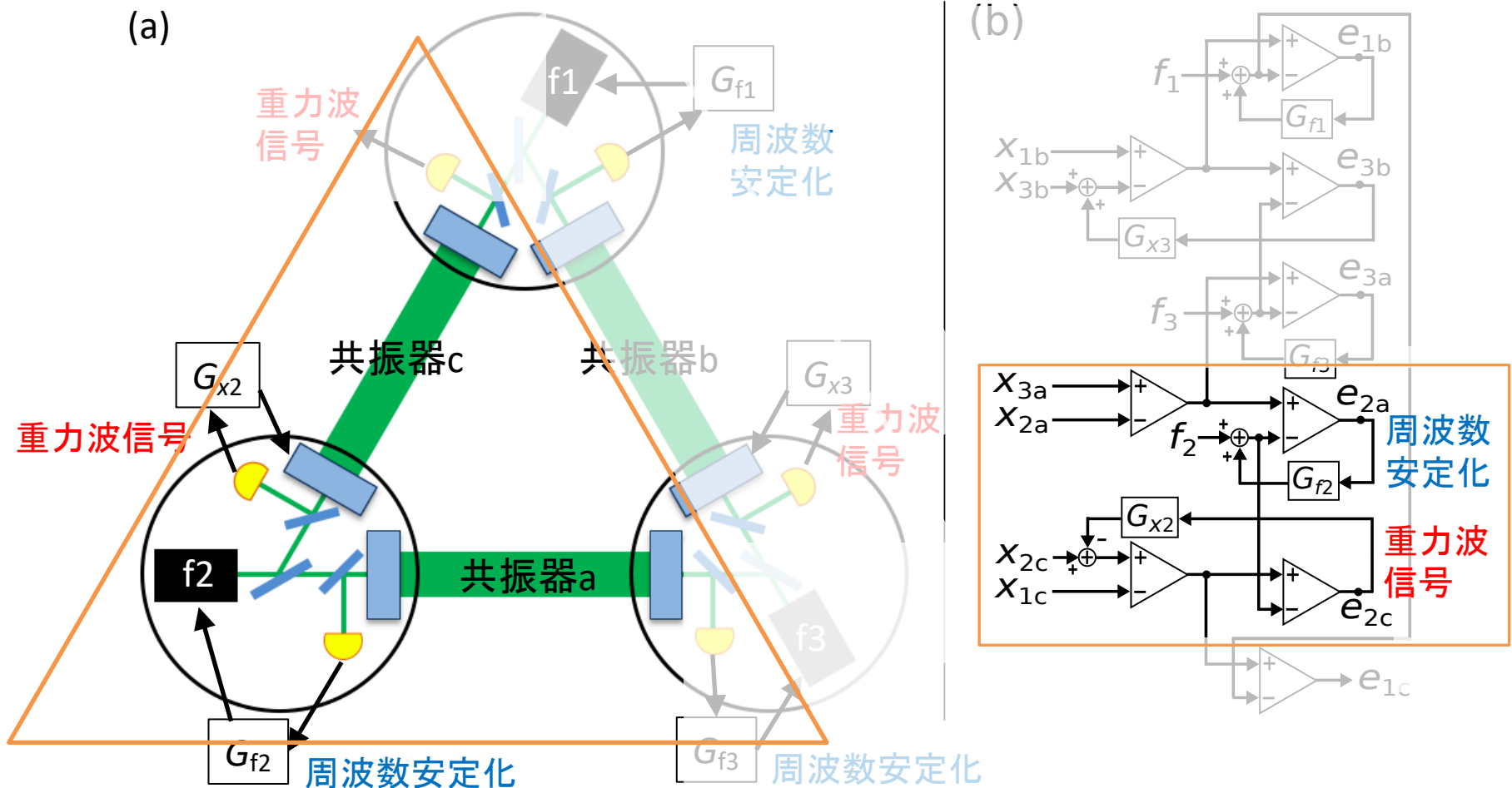
補遺

双方向Fabry-Perot干渉計の制御方式



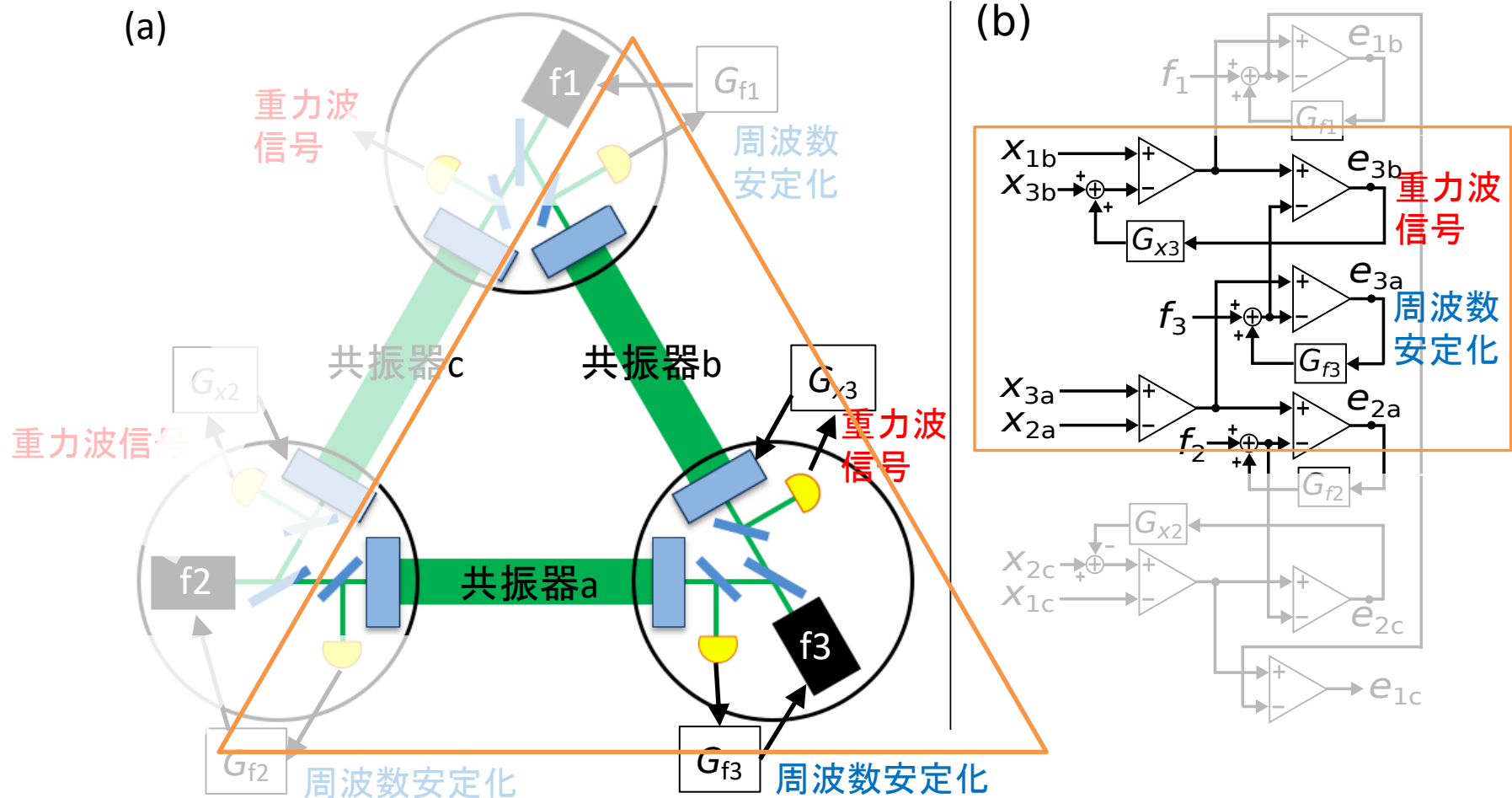
B-DEICGOの干渉計制御方式。

双方向Fabry-Perot干渉計の制御方式



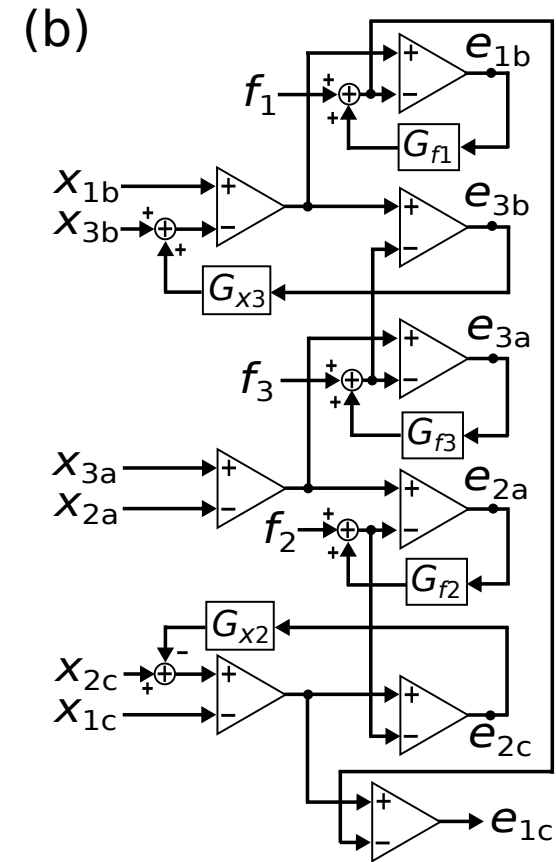
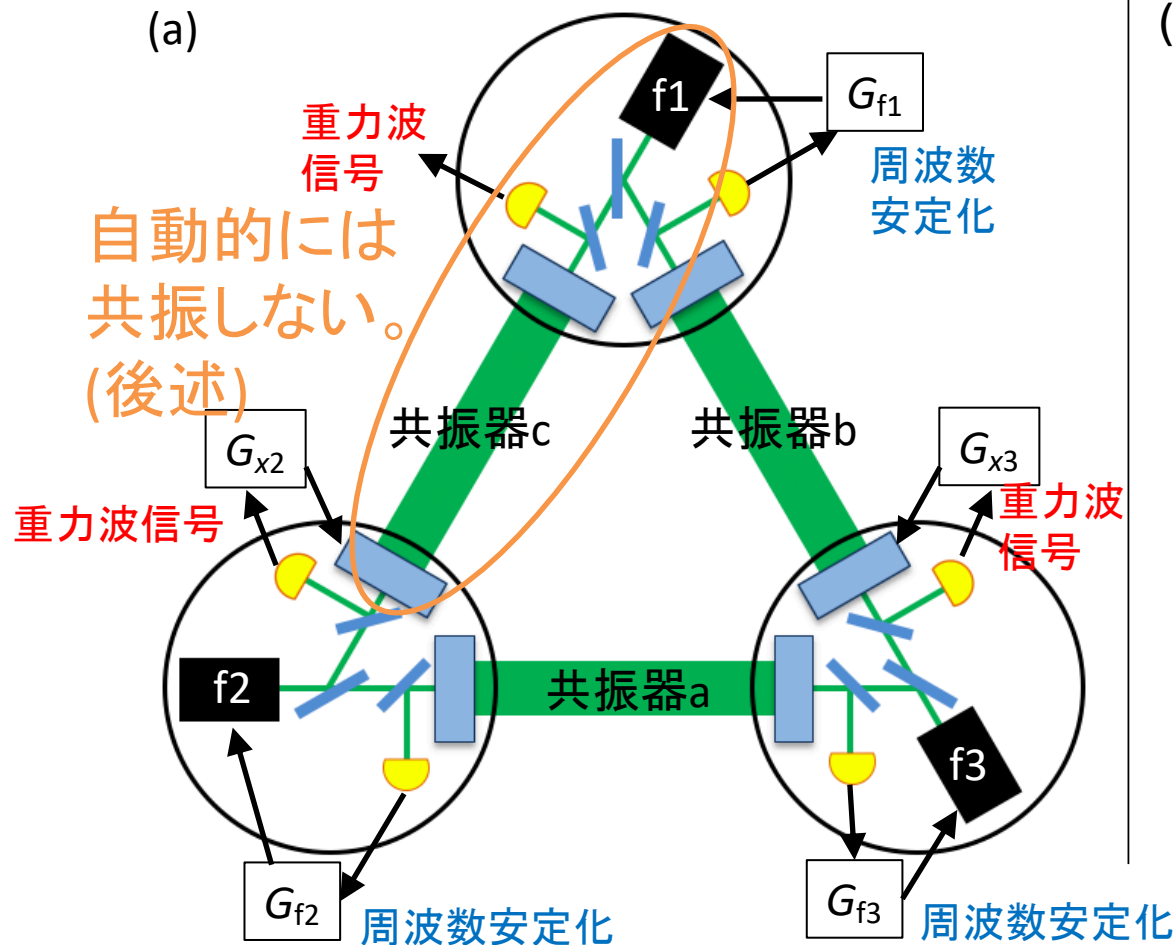
B-DEICGOの干渉計制御方式。

双方向Fabry-Perot干渉計の制御方式



B-DEICGOの干渉計制御方式。

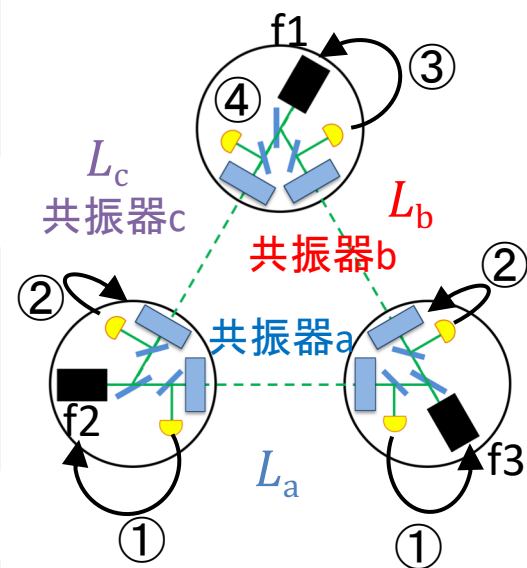
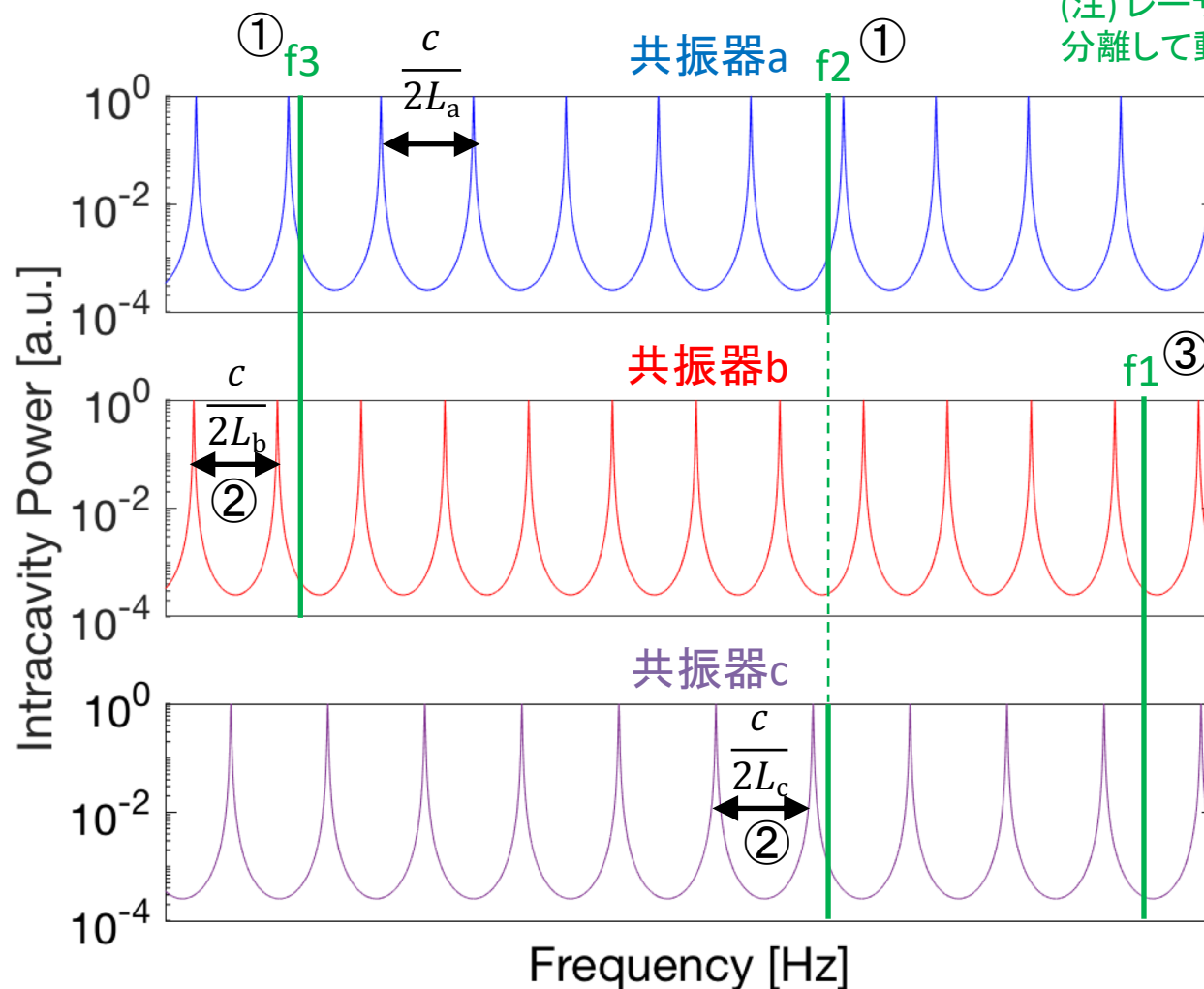
双方向Fabry-Perot干渉計の制御方式



B-DEICGOの干渉計制御方式。

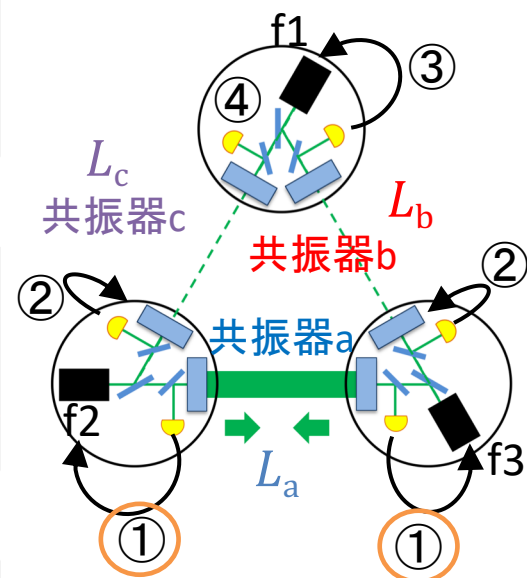
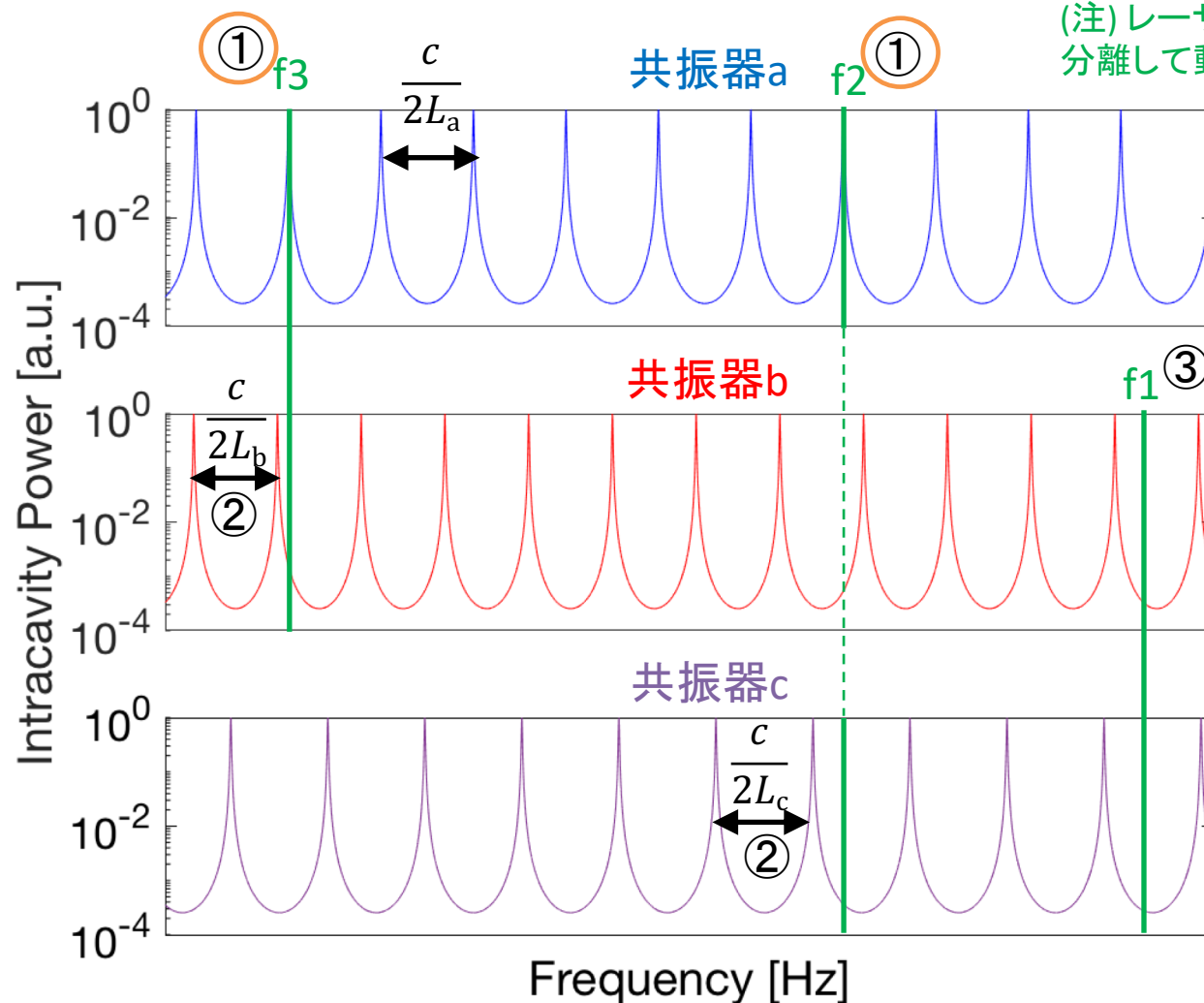
腕の長さ調整が必要な理由

(注) レーザー周波数同士は、干渉計を分離して動かすためにずらす必要がある。



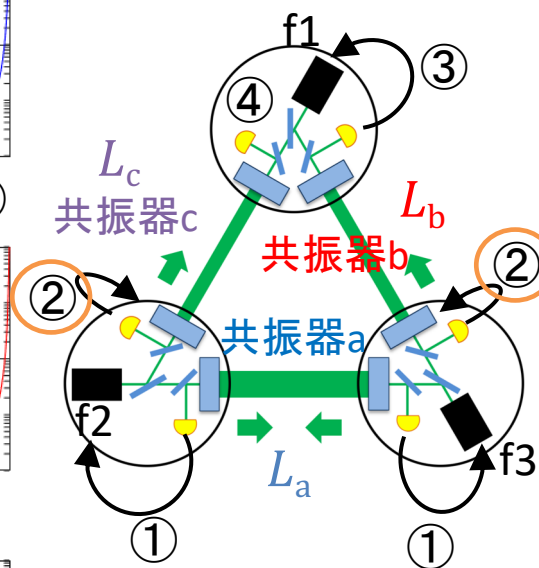
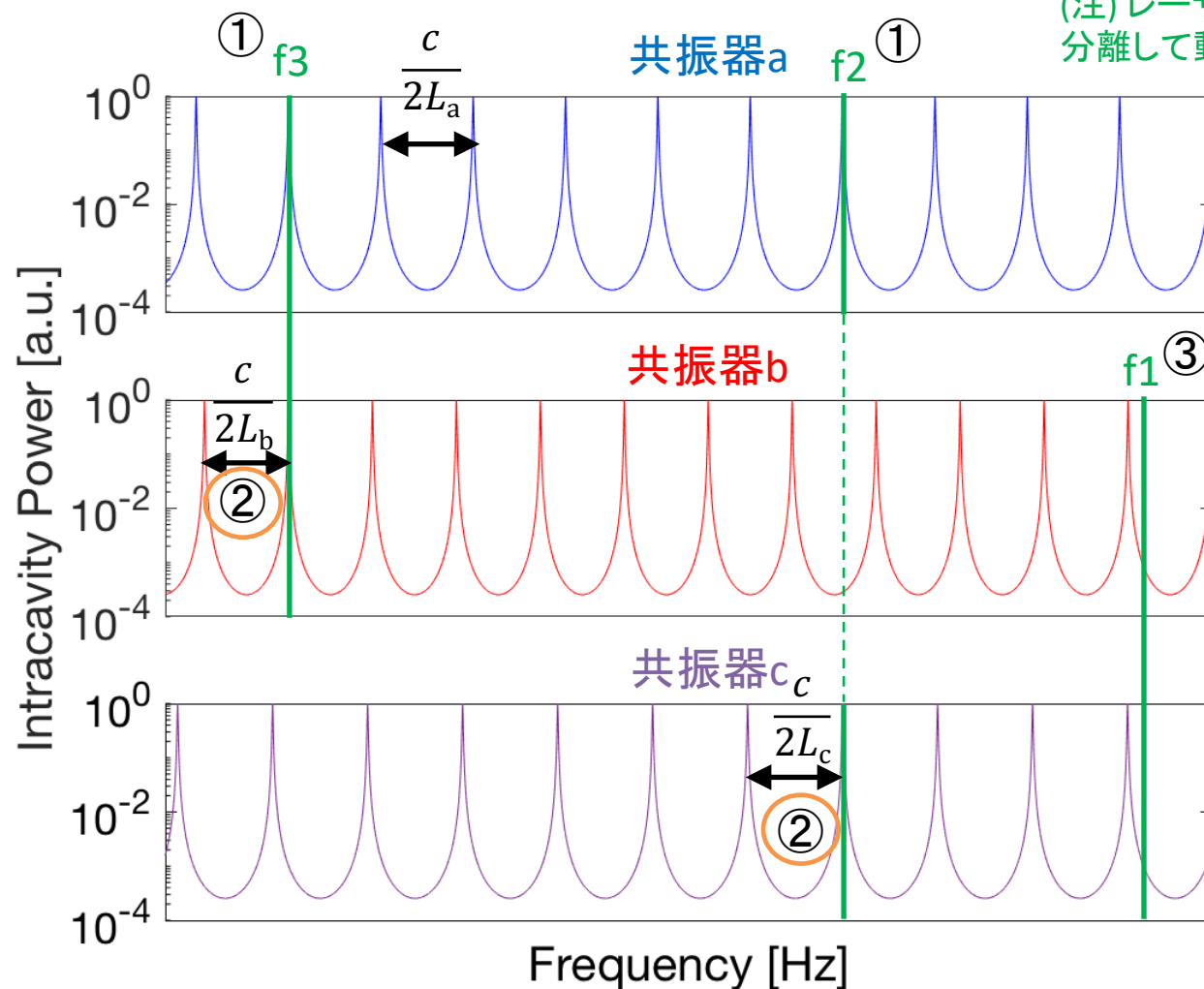
腕の長さ調整が必要な理由

(注) レーザー周波数同士は、干渉計を分離して動かすためにずらす必要がある。



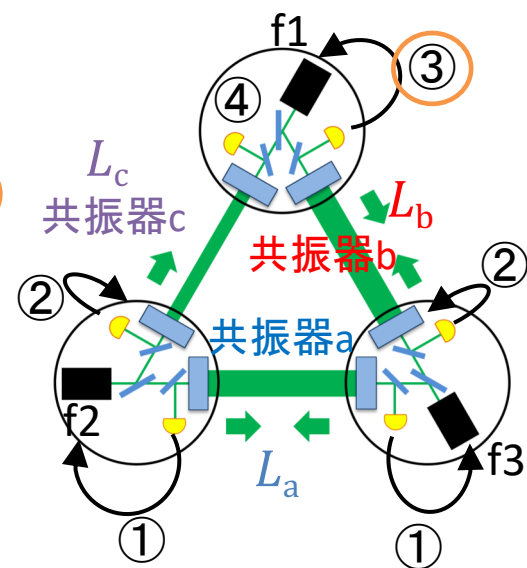
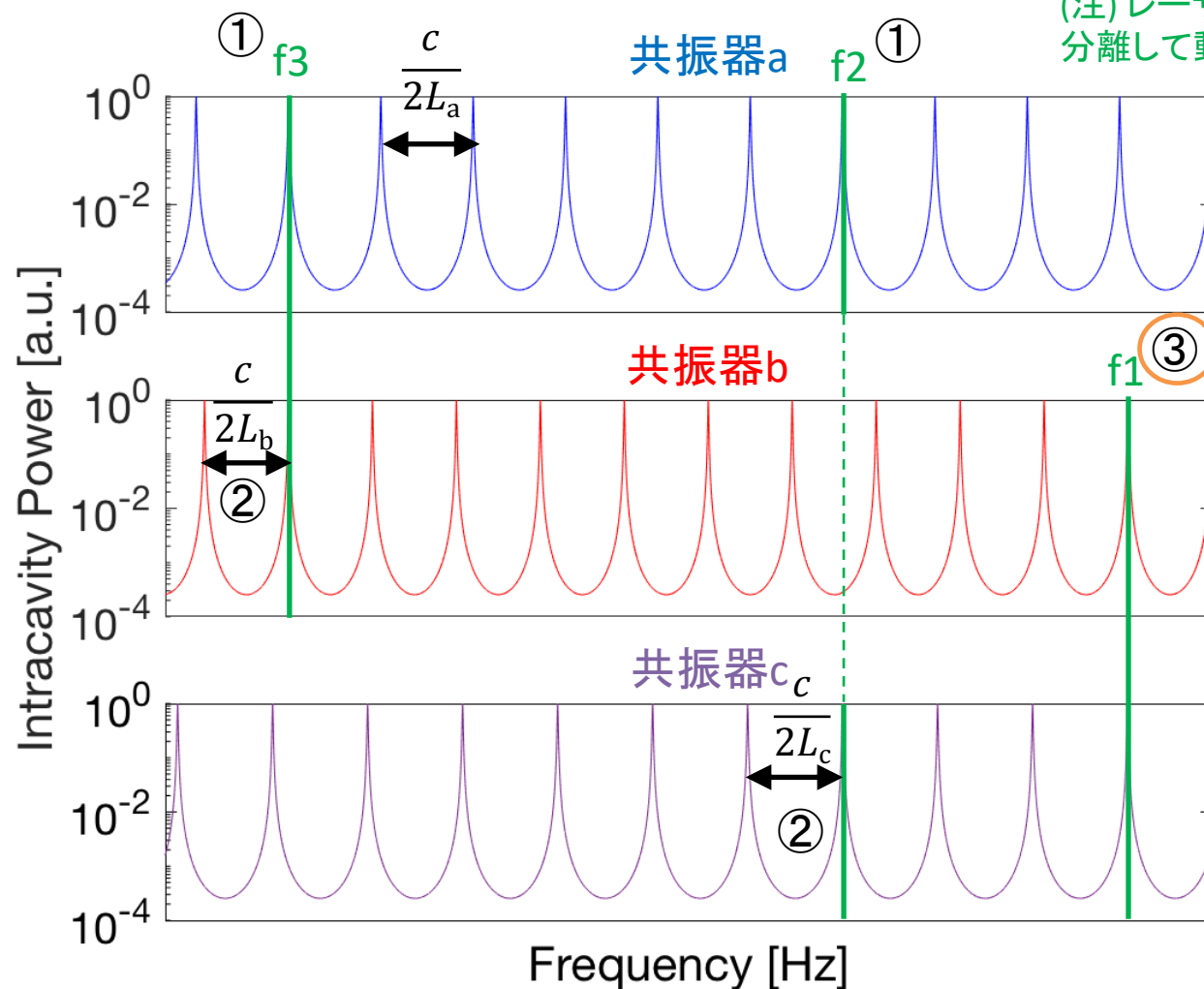
腕の長さ調整が必要な理由

(注) レーザー周波数同士は、干渉計を分離して動かすためにずらす必要がある。

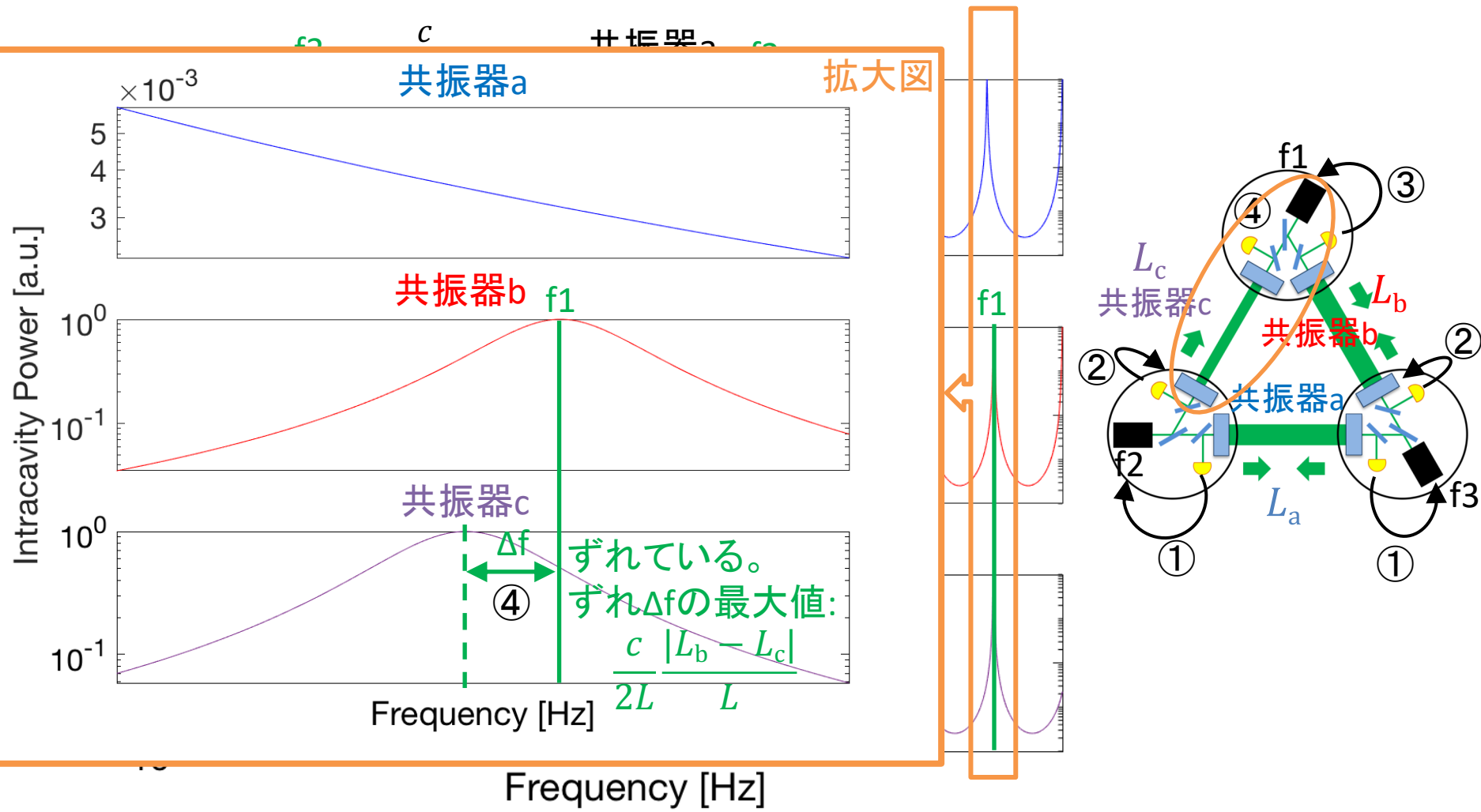


腕の長さ調整が必要な理由

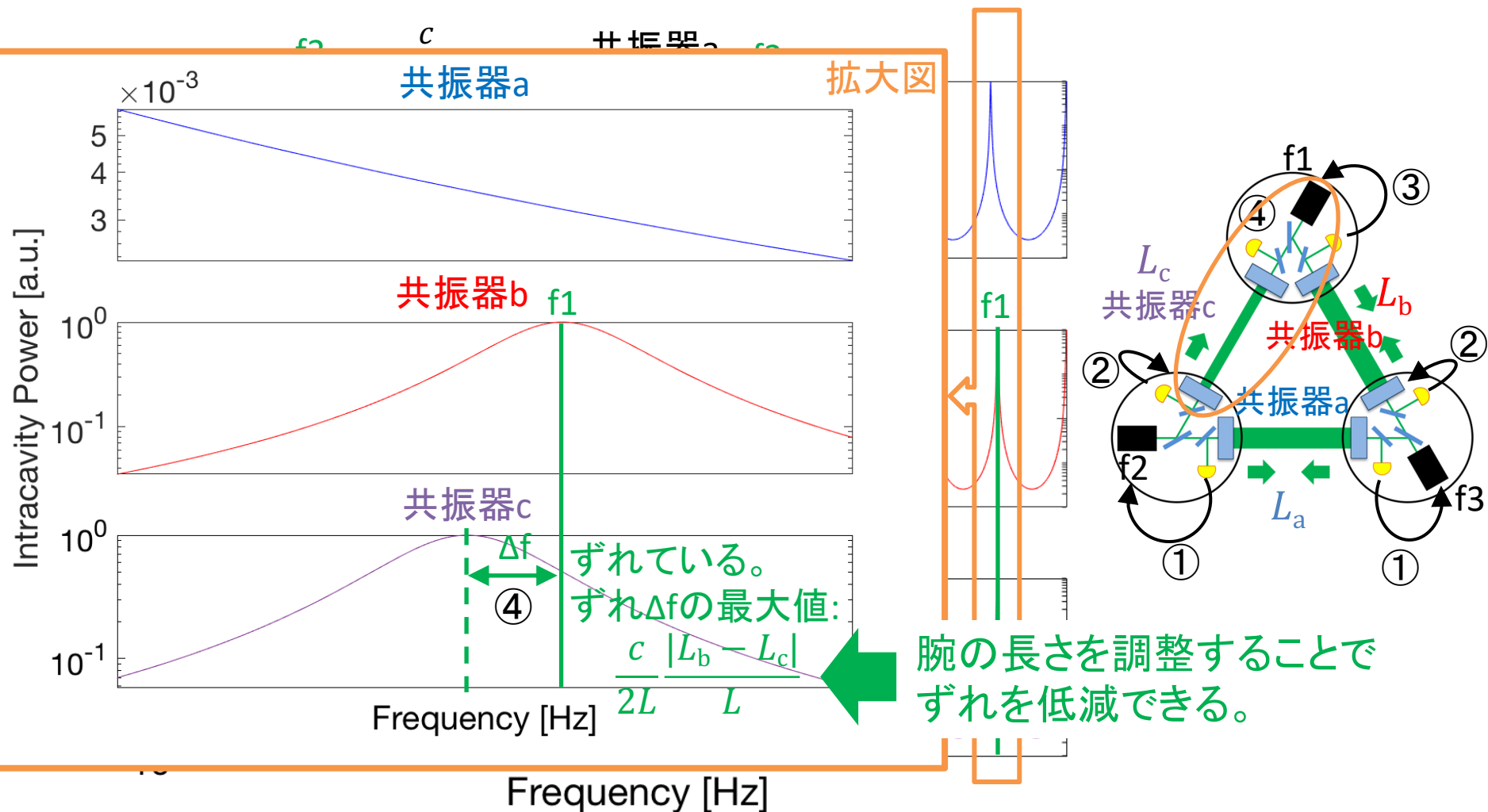
(注) レーザー周波数同士は、干渉計を分離して動かすためにずらす必要がある。



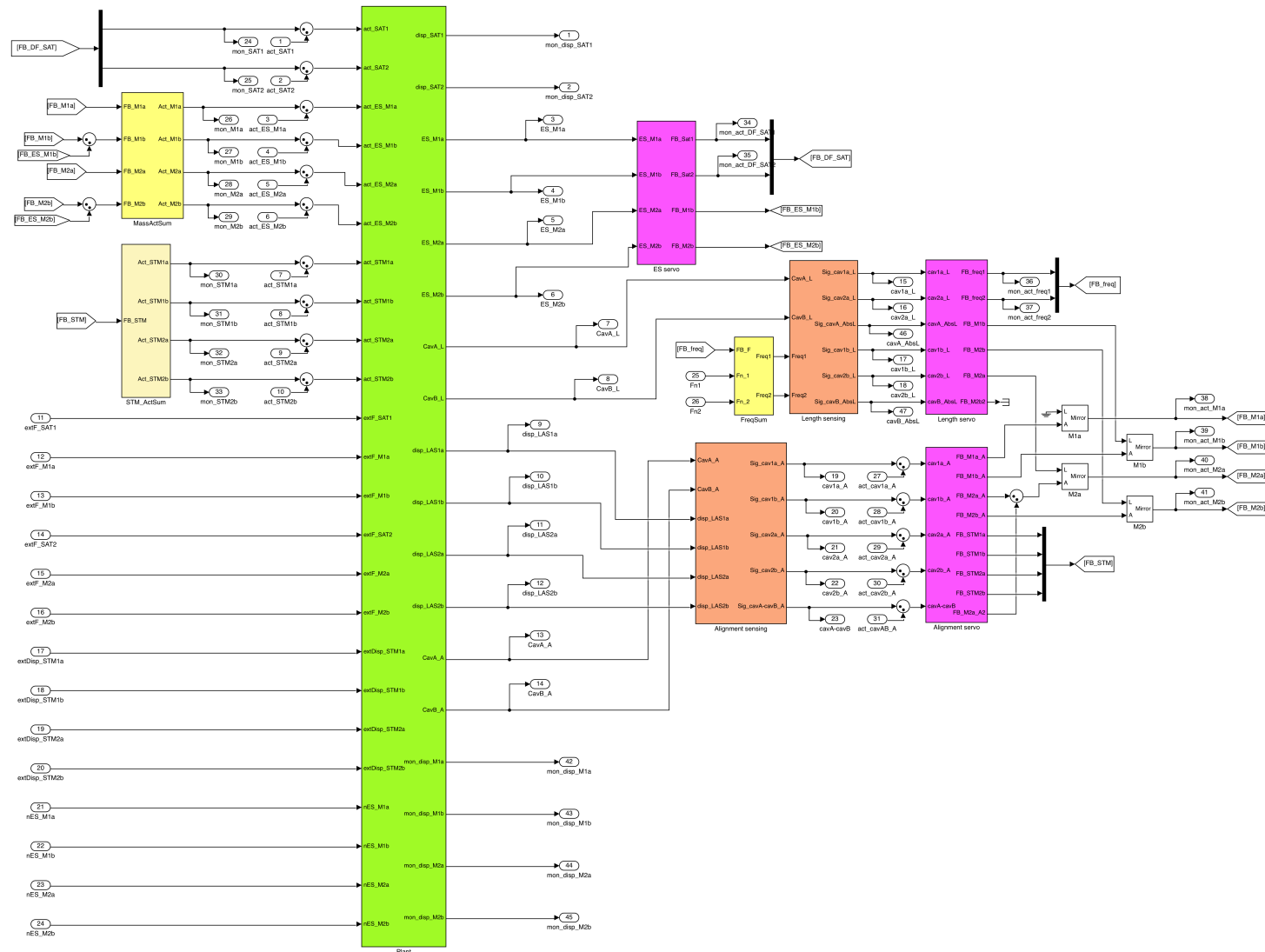
腕の長さ調整が必要な理由



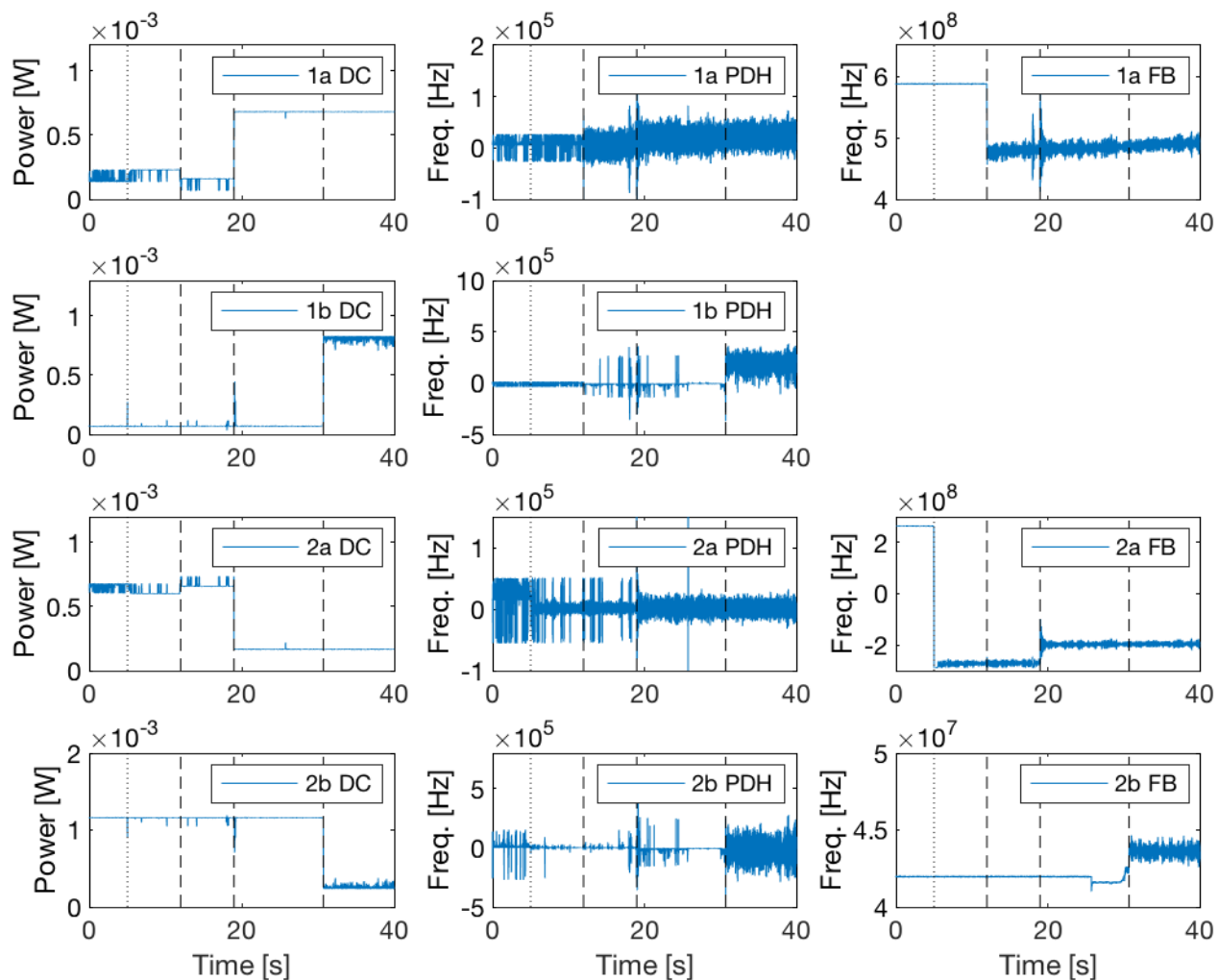
腕の長さ調整が必要な理由



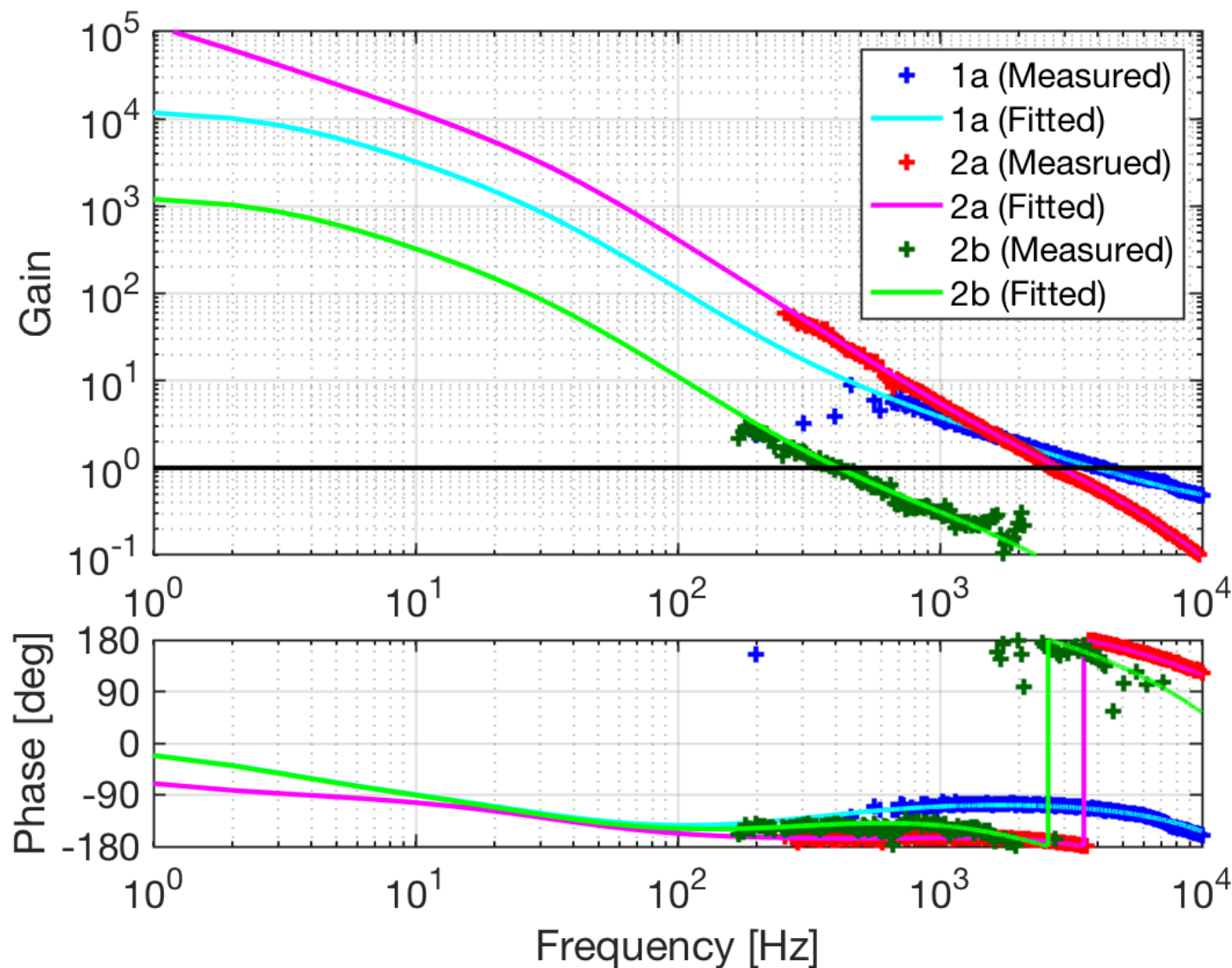
Simulink model



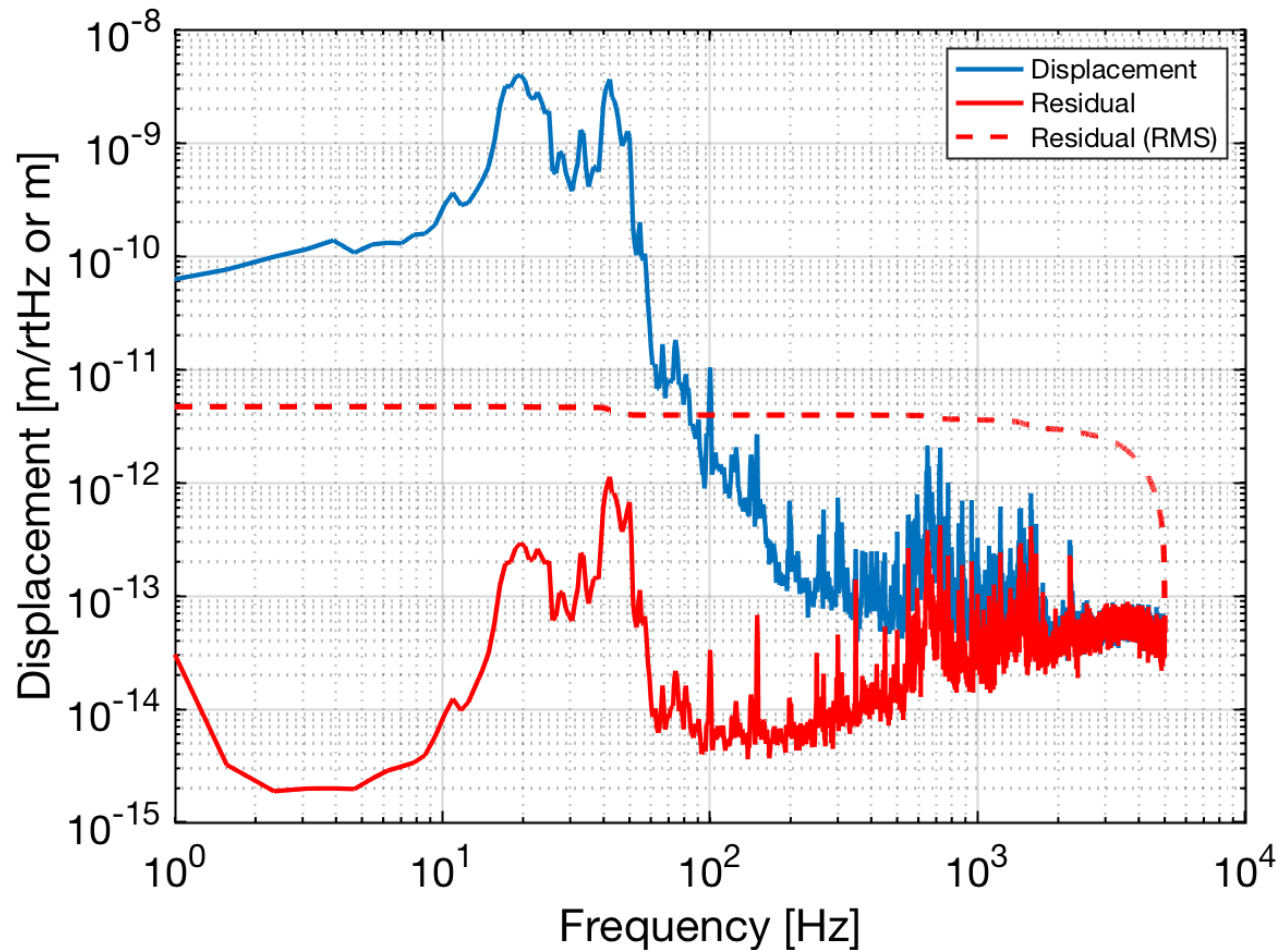
制御過程のシーケンス



オープンループゲイン

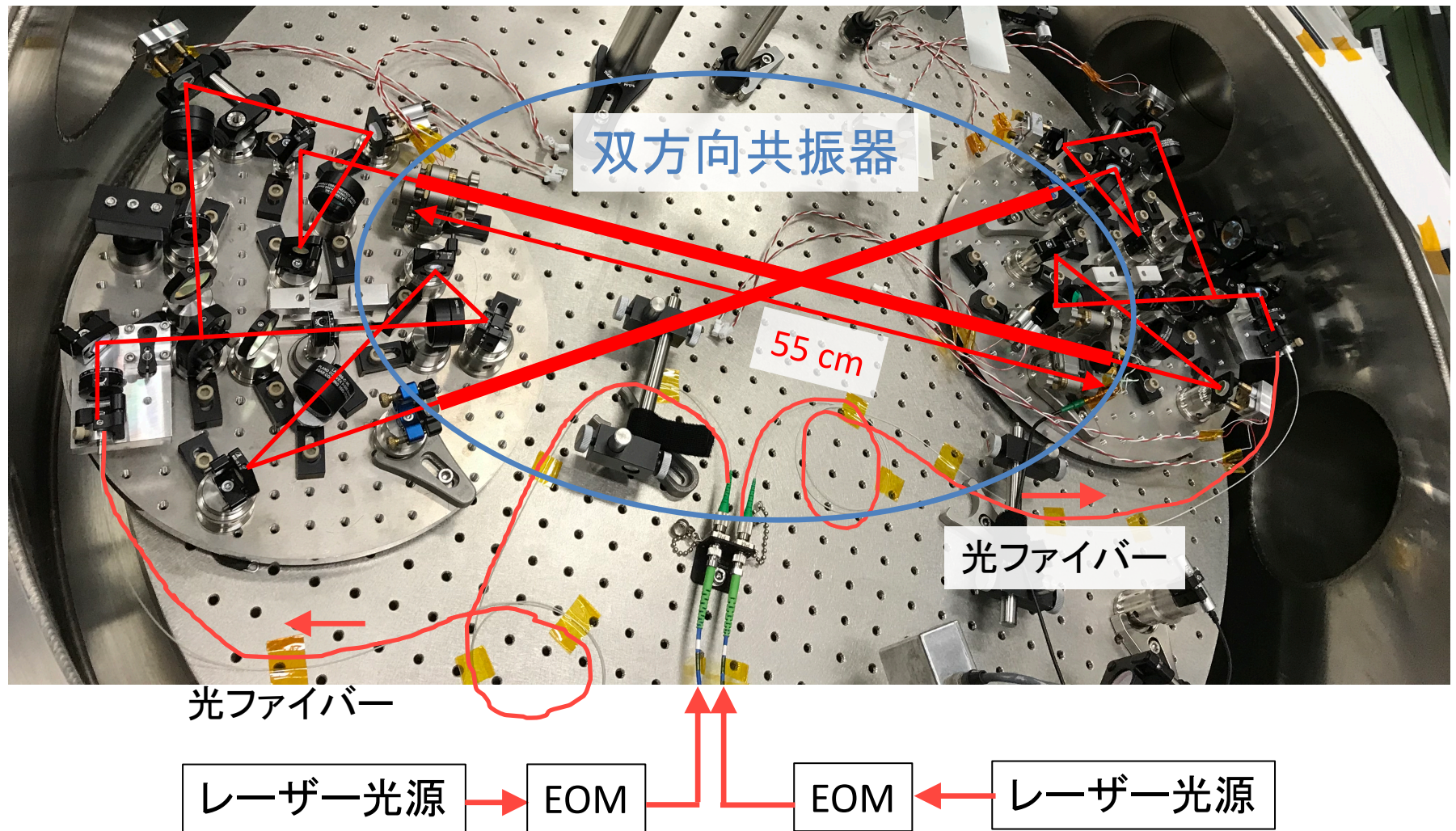


一つの片道共振器のスペクトル



一つの片道共振器のスペクトル。

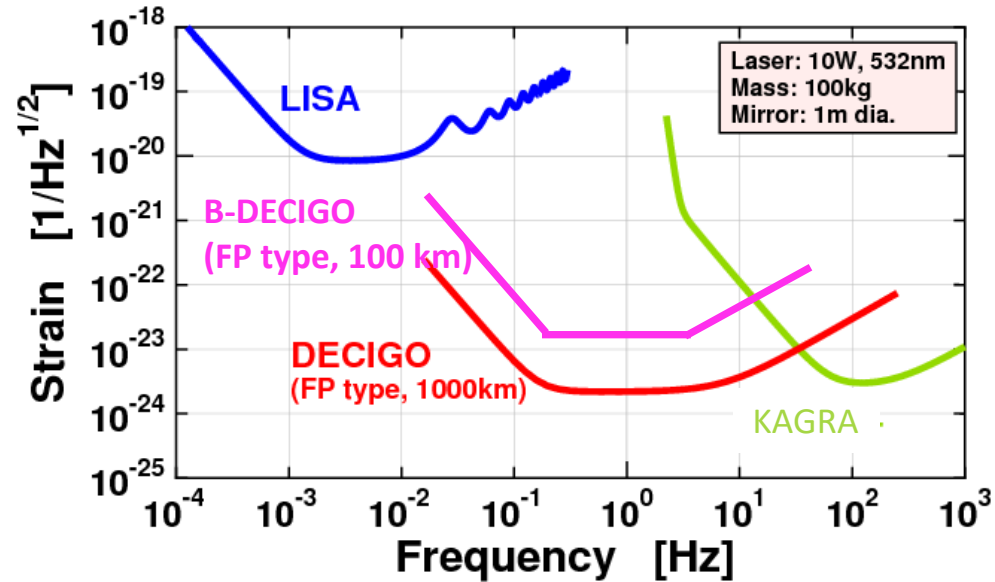
地上実証実験



DECIGO計画

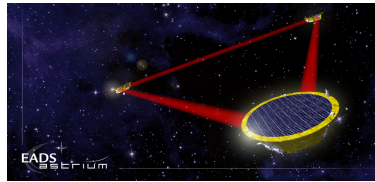
DECIGO計画

- DECihertz
Interferometer
Gravitational Wave
Observatory
- 欧州で進行中のLISA
と、KAGRAなどの地上
重力波検出器の間の
周波数帯を狙う。

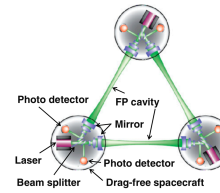


DECIGO、LISA、KAGRAの観測周波数帯域
の比較 (S. Kawamura+, CQG, 2011)

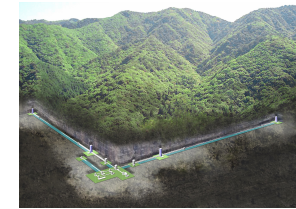
DECIGOとLISAとKAGRA



LISA



DECIGO



KAGRA

宇宙/地上

宇宙

宇宙

地上 (地下)

基線長

250万 km

1000 km

3 km

観測帯域

10^{-4} - 10^{-1} Hz

10^{-1} -10 Hz

10 - 10^4 Hz

光学構成

光トランス
ポンダ方式
(間接干渉型)

双方向FP
干渉計
(直接干渉型)

帯域可変型
干渉計
(直接干渉型)

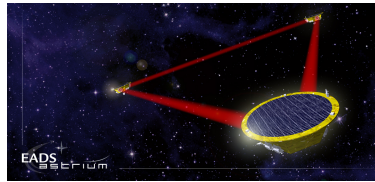
DF制御

必要

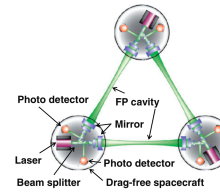
必要

不要

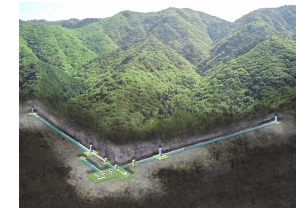
DECIGOとLISAとKAGRA



LISA



DECIGO



KAGRA

宇宙/地上

宇宙

宇宙

地上 (地下)

基線長

250万 km

1000 km

3 km

観測帯域

10^{-4} - 10^{-1} Hz

10^{-1} -10 Hz

10 - 10^4 Hz

光学構成

光トランス
ポンダ方式
(間接干渉型)

双方向FP
干渉計
(直接干渉型)

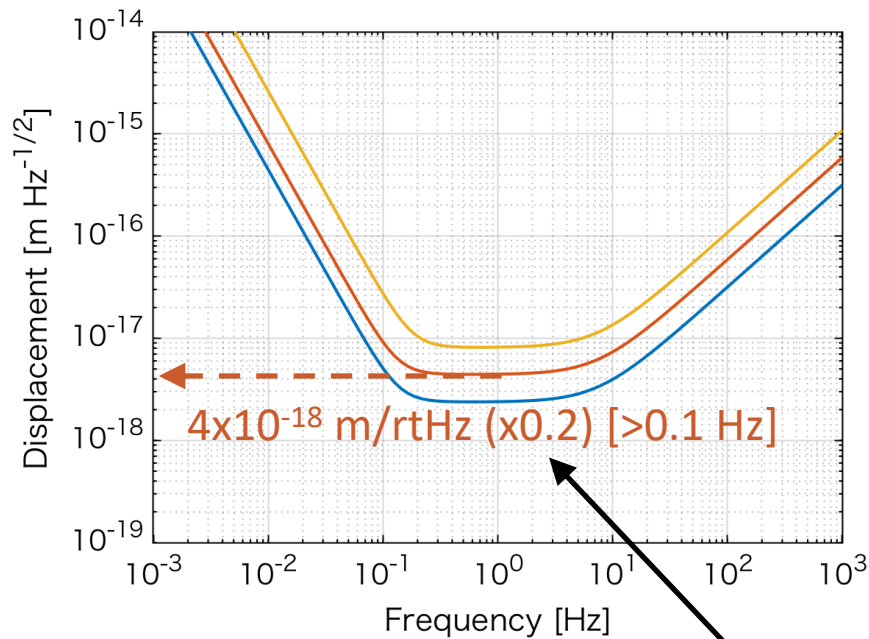
帯域可変型
干渉計
(直接干渉型)

DF制御

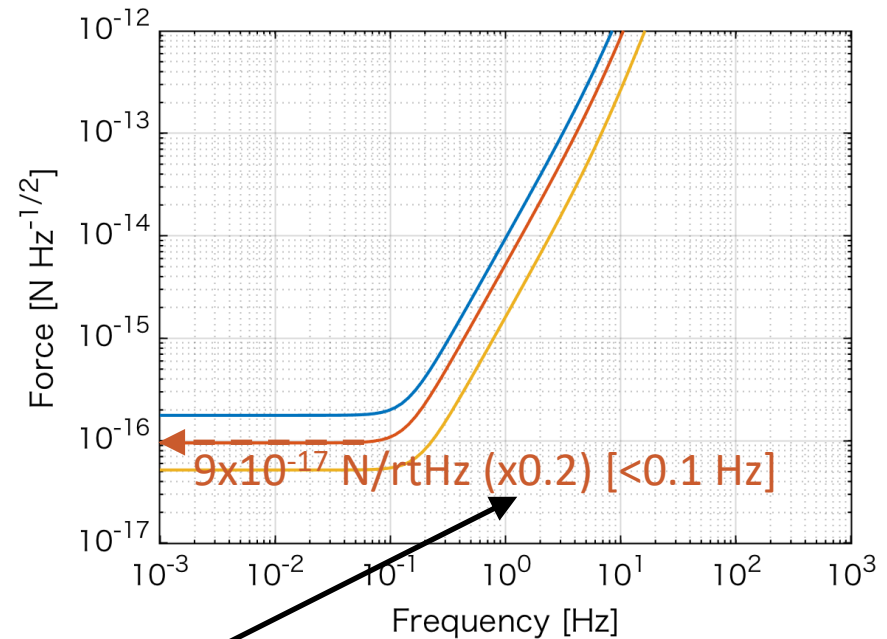
今回はこの制御方法や感度についての
検討・実証実験について報告する。

B-DECIGOの感度要求

• 変位雑音



• 力雑音



安全係数を5にした場合

B-DECIGOの要求値まとめ

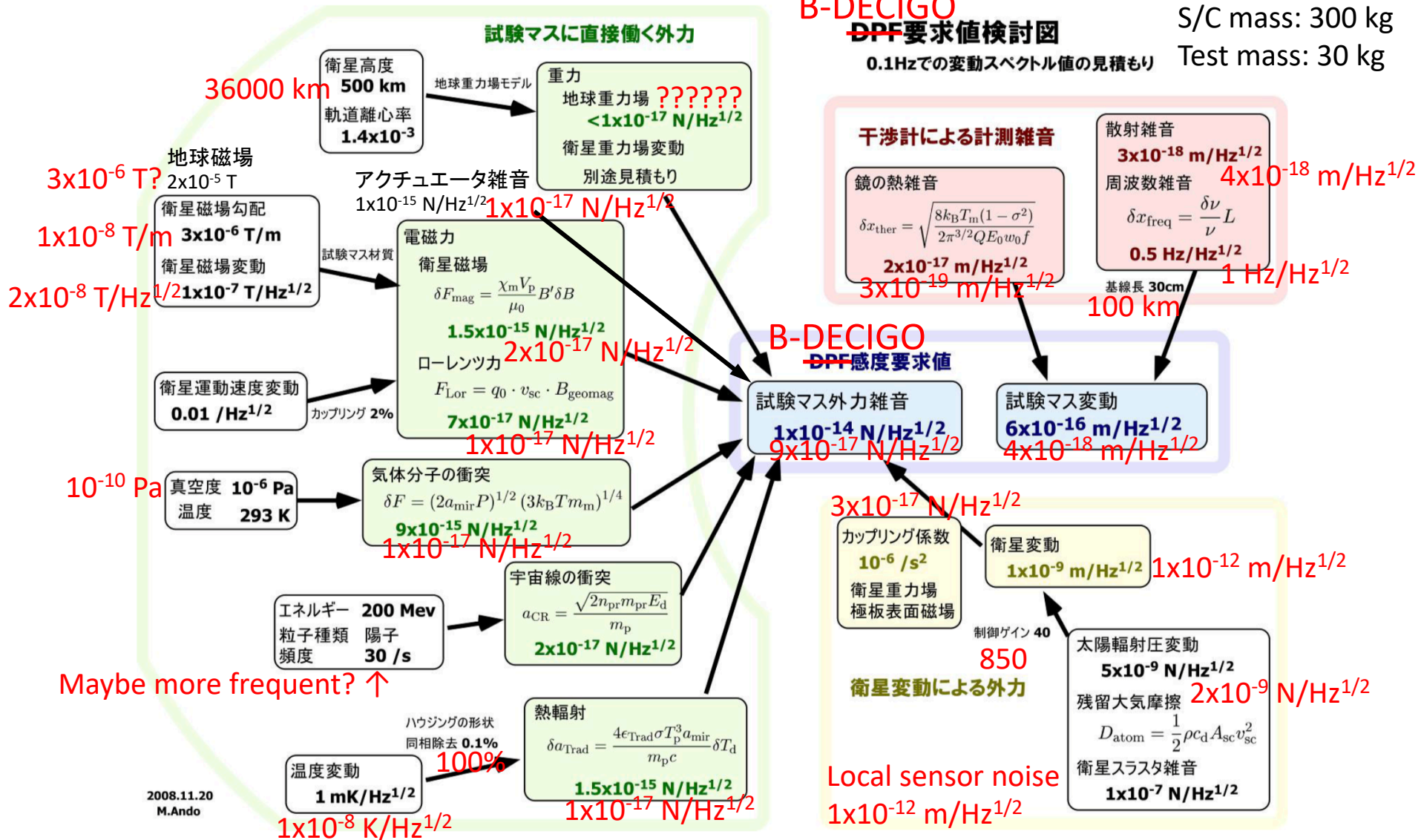
B-DECIGO

~~DPF~~要求値検討図

0.1Hzでの変動スペクトル値の見積もり

S/C mass: 300 kg

Test mass: 30 kg



干渉計の感度要求

- Fabry-Perot共振器内の雑音 (加速度雑音や熱雑音、量子雑音など) に加えて、各衛星内の干渉計での雑音も考える必要がある。
- 各衛星内の干渉計の雑音の一つがビームスプリッターの振動によるドップラー雑音。

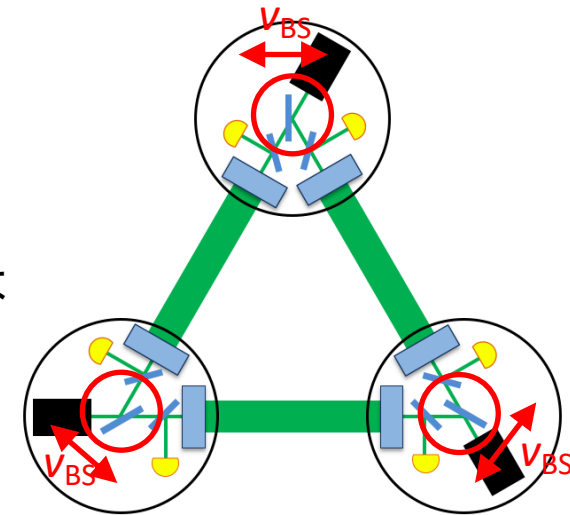
– 左右の干渉計に逆相で効く。

$$\frac{2v_{BS}}{c} = \frac{4\pi f x_{BS}}{c} < h$$

→ $x_{BS} < 10^{-15}$ m/rtHz

衛星の振動レベルは
10⁻¹² m/rtHz程度。

- 衛星内の干渉計信号を取得して制御 (あるいはサブトラクト) することで達成可能。



干渉計の感度要求

- Fabry-Perot共振器内の雑音 (加速度雑音や熱雑音、量子雑音など) に加えて、各衛星内の干渉計での雑音も考える必要がある。
- 各衛星内の干渉計の雑音の一つがビームスプリッターの振動によるドップラー雑音。

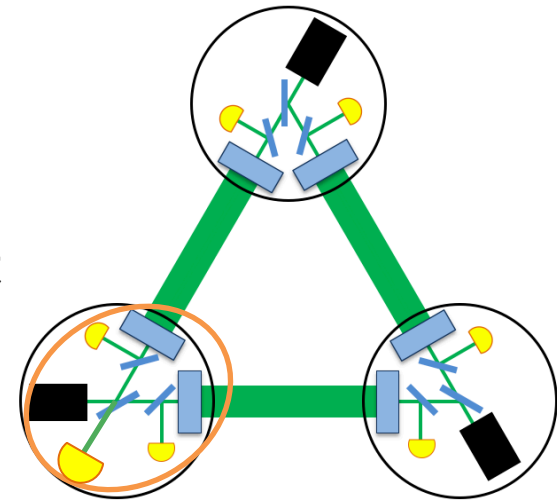
– 左右の干渉計に逆相で効く。

$$\frac{2\nu_{BS}}{c} = \frac{4\pi f x_{BS}}{c} < h$$

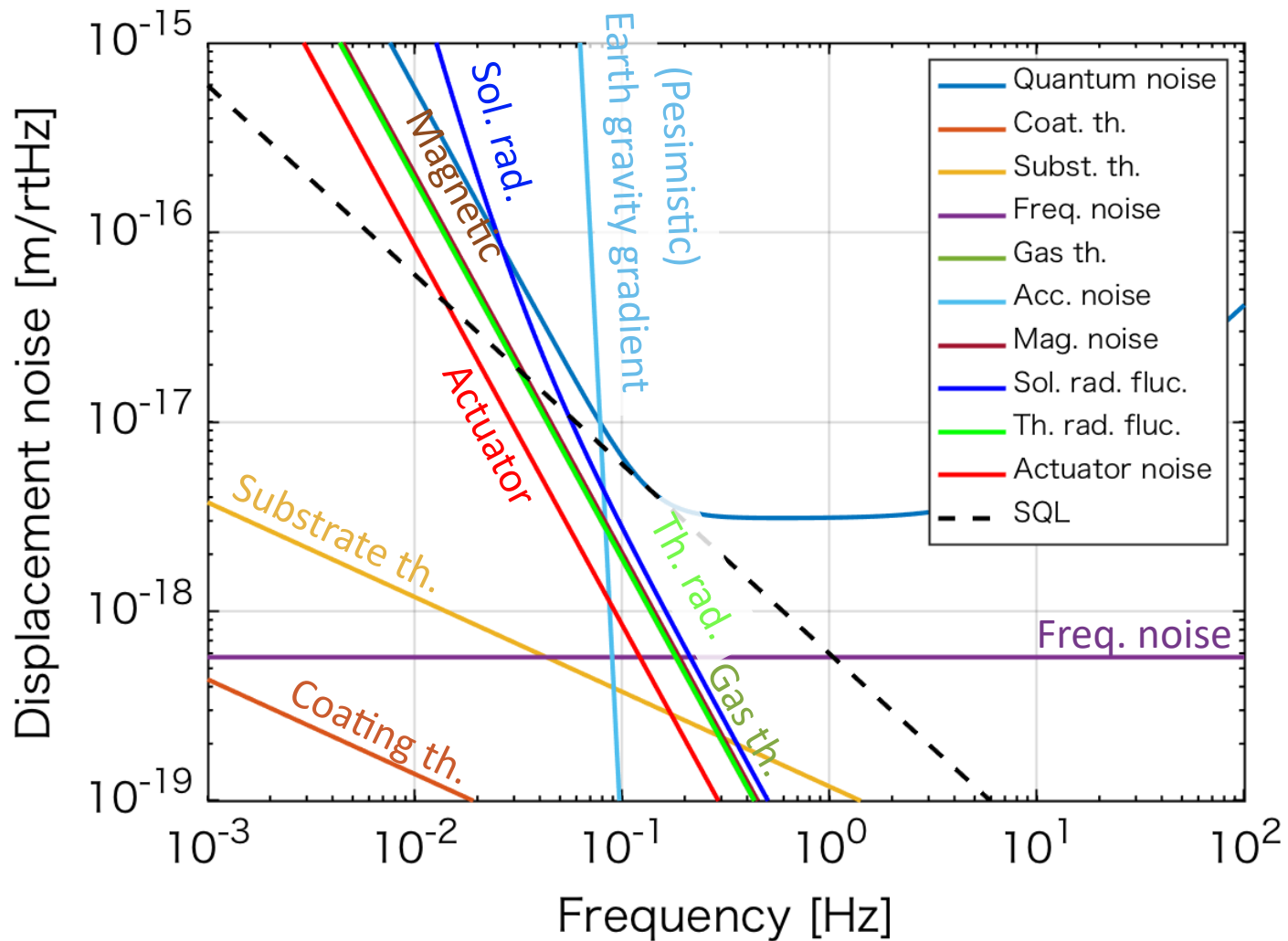
→ $x_{BS} < 10^{-15}$ m/rtHz

衛星の振動レベルは
 10^{-12} m/rtHz程度。

- 衛星内の干渉計信号を取得して制御 (あるいはサブトラクト) することで達成可能。



B-DECIGOのノイズバジェット

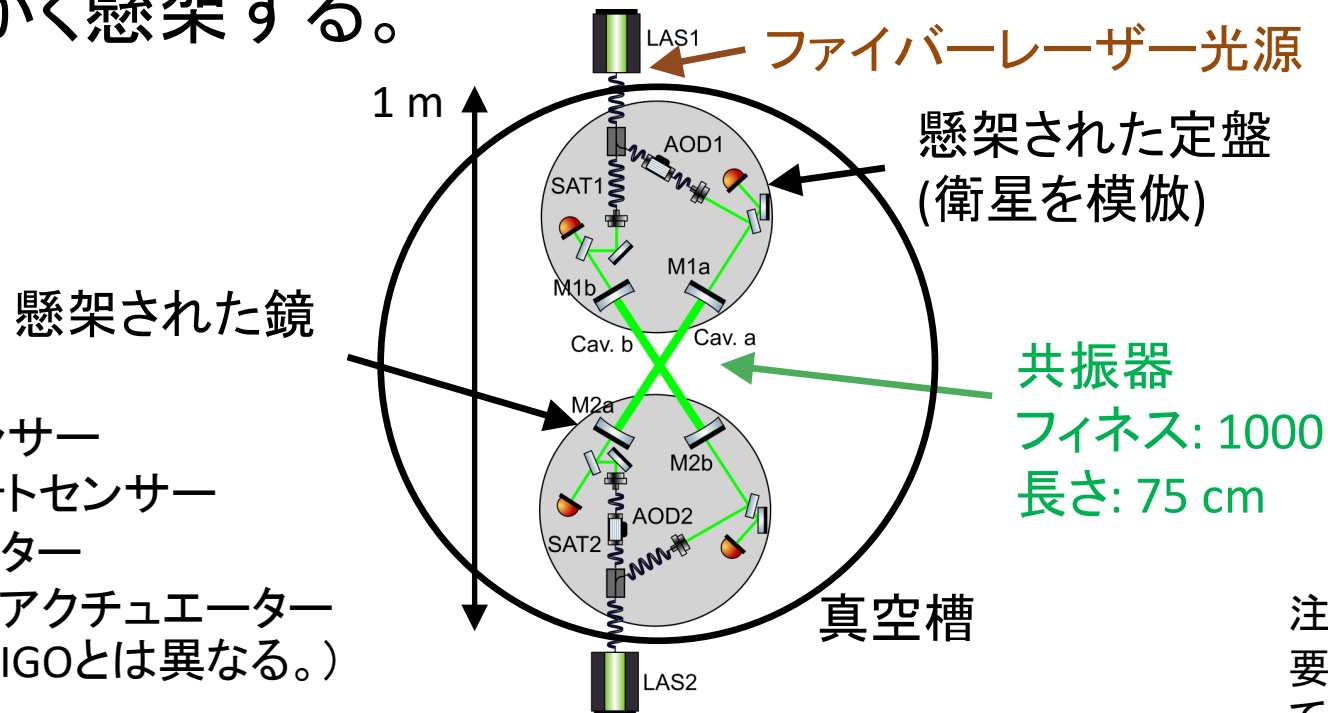


ただし、アクチュエータやスラスターについてはR&Dが必要。

干渉計統合試験用プラットフォーム

• プラットフォームの特徴

- 干渉計制御とドラッグ・フリー制御の要素を持つ。
- 宇宙空間を模するために、各自由度をできるだけ柔軟に懸架する。

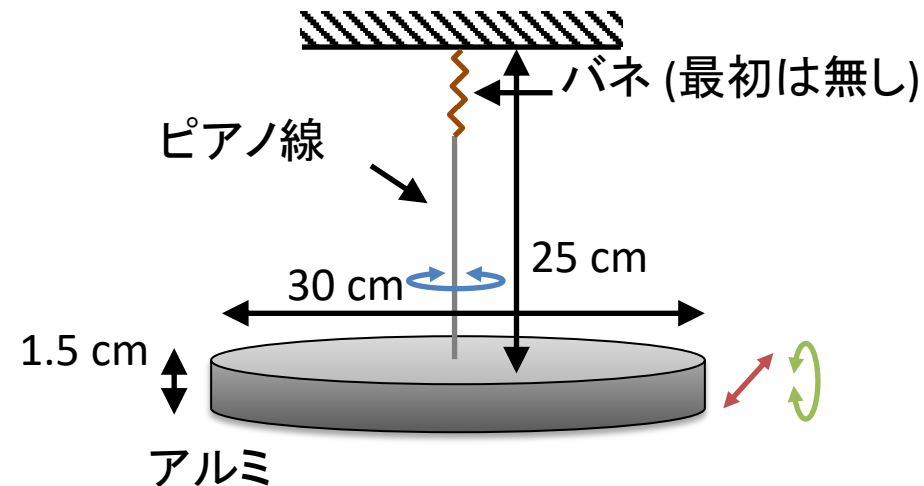


- ローカルセンサー
 - 光てこ・フォトセンサー
 - アクチュエーター
 - コイル磁石アクチュエーター
- (注: 実際のDECIGOとは異なる。)

注: いくつかの要素は描かれていない。

プラットフォームの懸架系

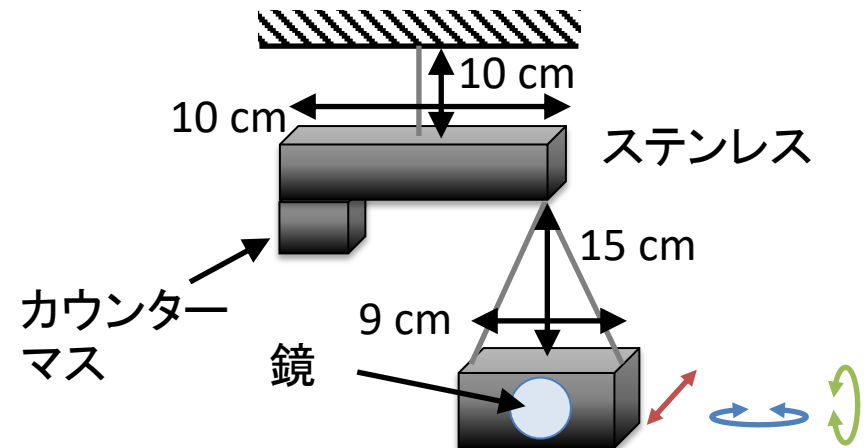
• 光学定盤懸架系



共振周波数 (設計値)

- ピッチ/ロール: 0.086 Hz
- ヨー: 0.012 Hz
- 水平: 1 Hz

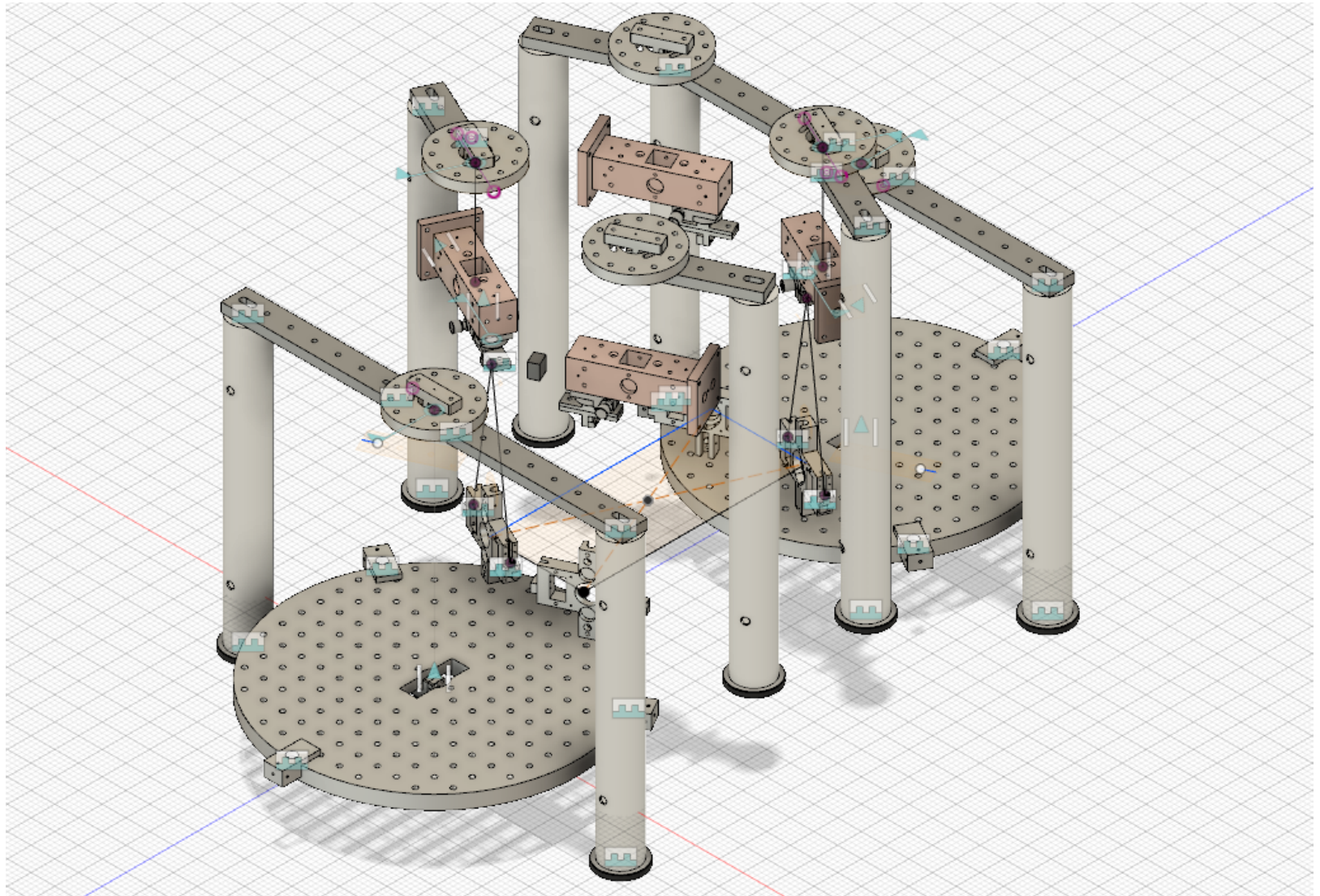
• 鏡懸架系



共振周波数 (設計値)

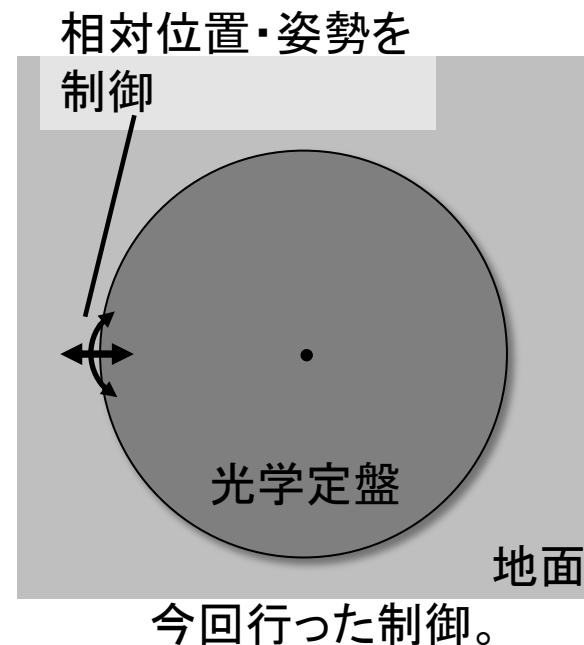
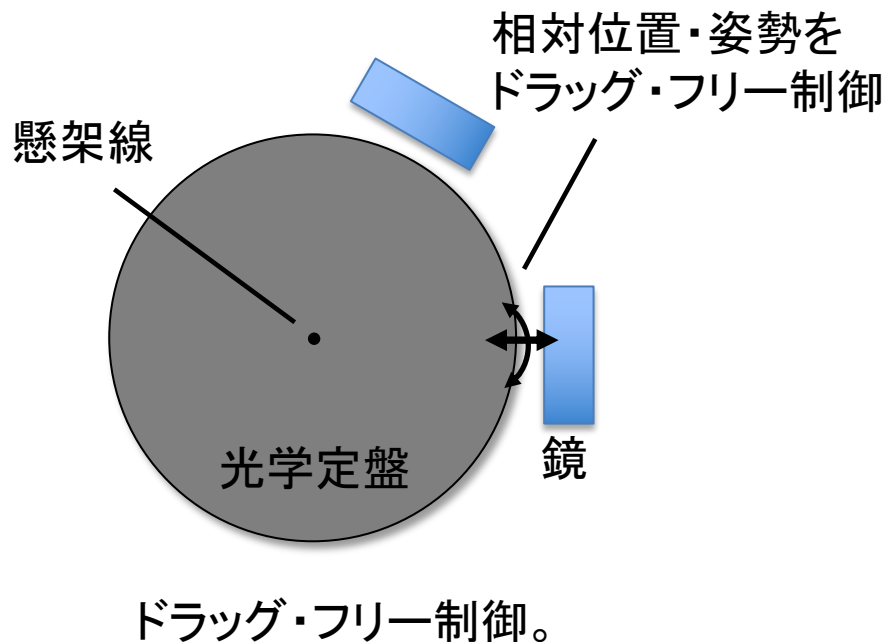
- ピッチ: 0.05 Hz
- ヨー: 0.1 Hz
- 長さ方向: 0.02 Hz

2衛星・2共振器系の概念設計



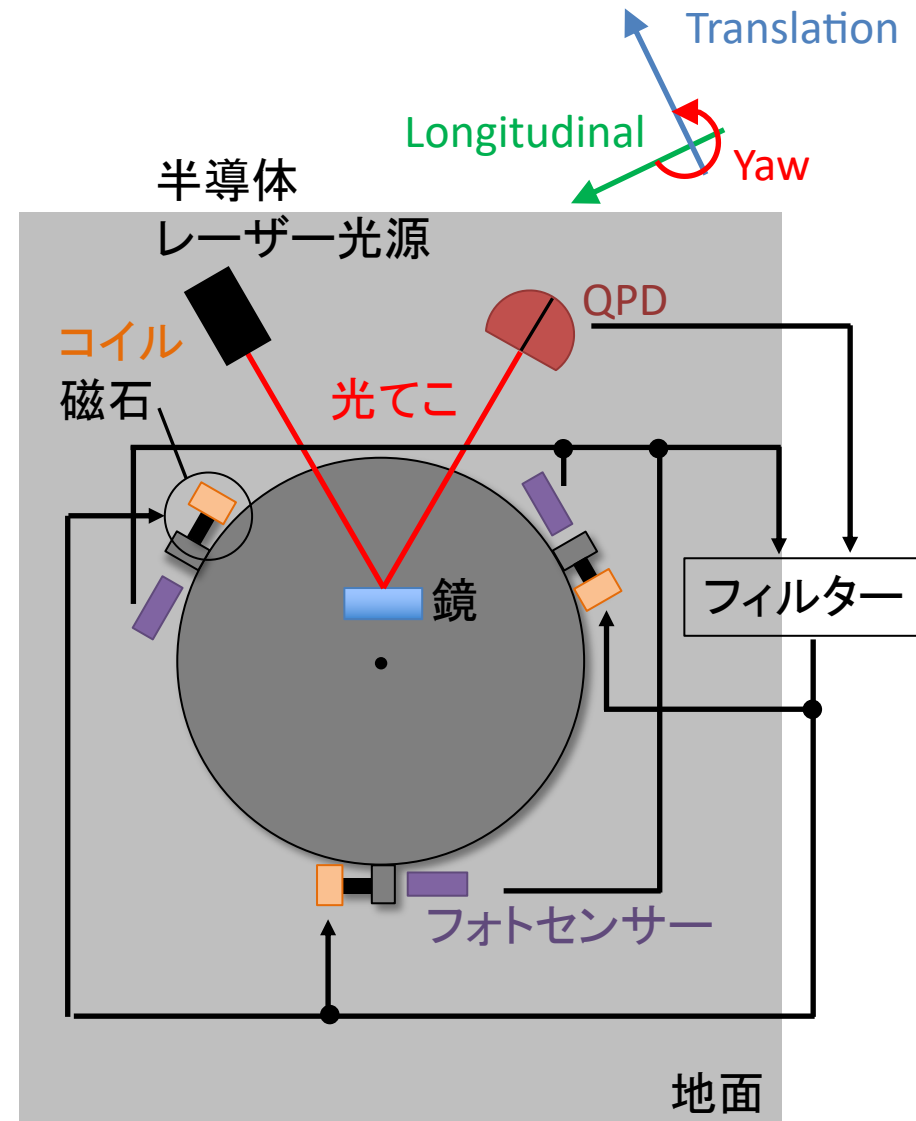
光学定盤懸架系の制御

- 光学定盤(衛星)は、鏡(テストマス)にドラッグ・フリー制御される。
- その予備測定として、光学定盤を地面の慣性系に対して制御する試験を行った。
 - 目的: 懸架系、および電気回路等のテスト。

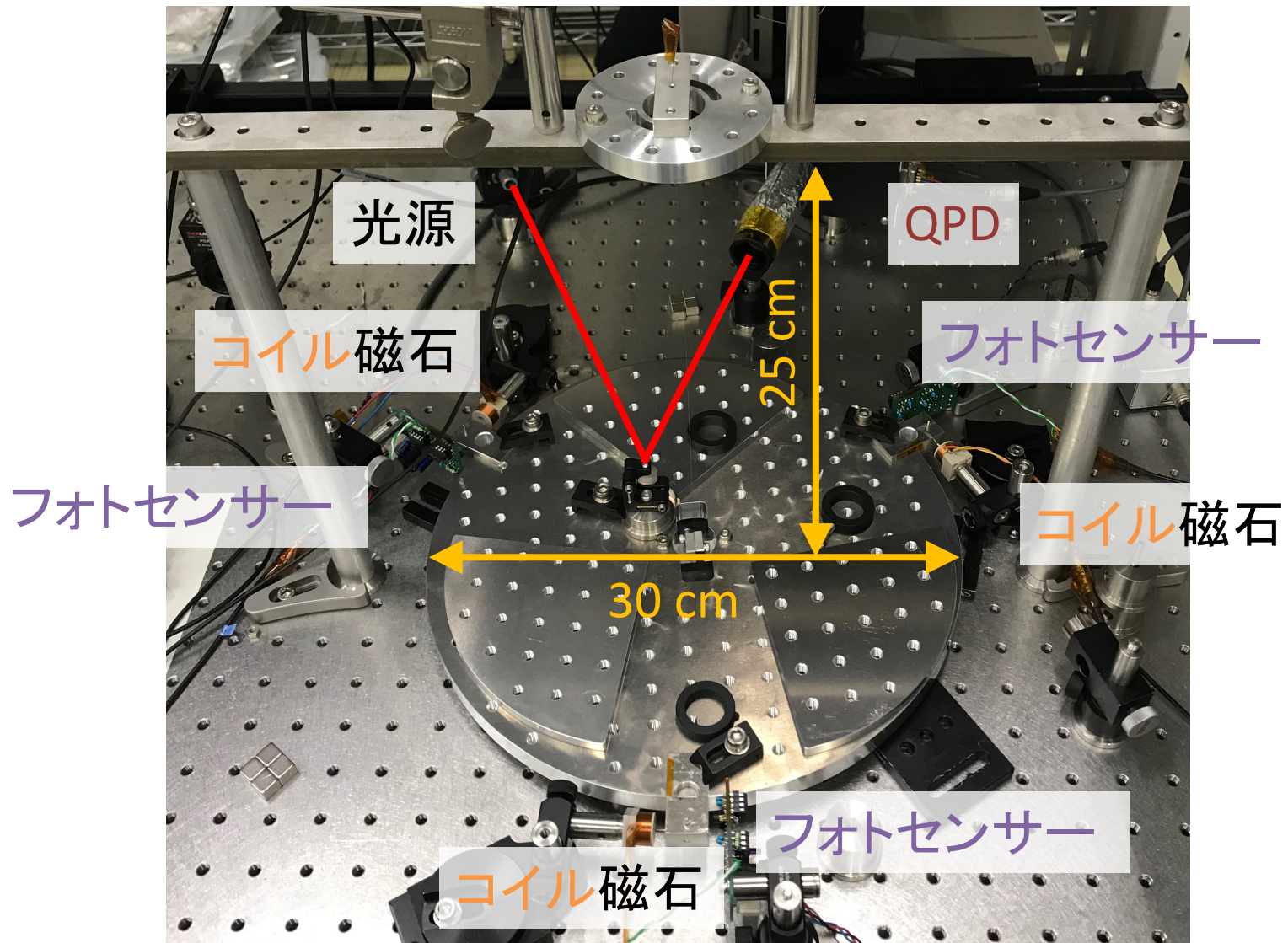


光学定盤懸架系の制御

- 今回は水平方向制御のみを行った。
- センサー
 - 変位: 反射型フォトセンサー
 - 回転: 光てこ
- アクチュエータ
 - コイル・磁石
- 制御フィルター
 - アナログ回路



光学定盤懸架系



鏡懸架系

