

スペース重力波アンテナ DECIGO計画(99): 統合試験用プラットフォームの開発

長野晃士^A, 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とは0.1-10 Hzの帯域の重力波を観測するための宇宙検出器である。
- 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、宇宙検出器特有の問題があるため、詳細な制御方式は決定されていない。
- 今回、双方向Fabry-Perot干渉計の制御について検討し、重力波信号の取得等が可能であることを示した。
- 実験的検証も必要で、そのための実験用プラットフォームの開発を進めており、概念設計が完了した。

目次

1. DECIGO計画とその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討
3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発
4. 結論、今後の課題、まとめ

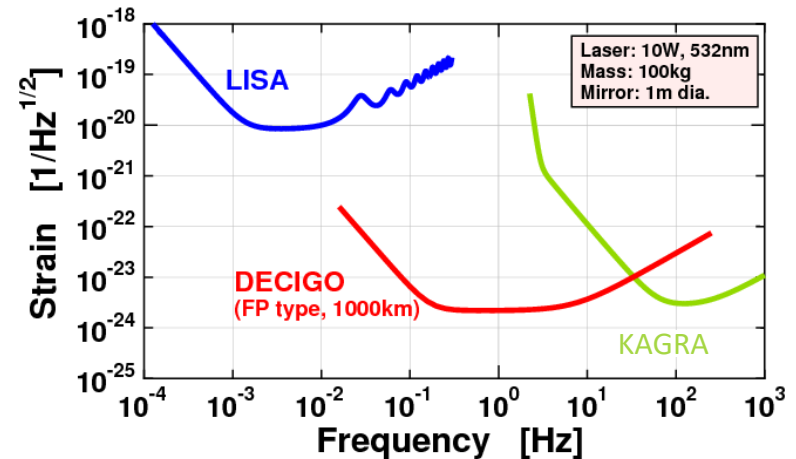
目次

- 1. DECIGO計画とその干渉計構成**
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討
3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発
4. 結論、今後の課題、まとめ

DECIGO計画

DECIGO計画

- Decihertz
Interferometer
Gravitational Wave
Observatory = DECIGO



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

- 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は2030年台の打ち上げを、前哨計画のB-DECIGOは2020年台の打ち上げを目指している。

DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

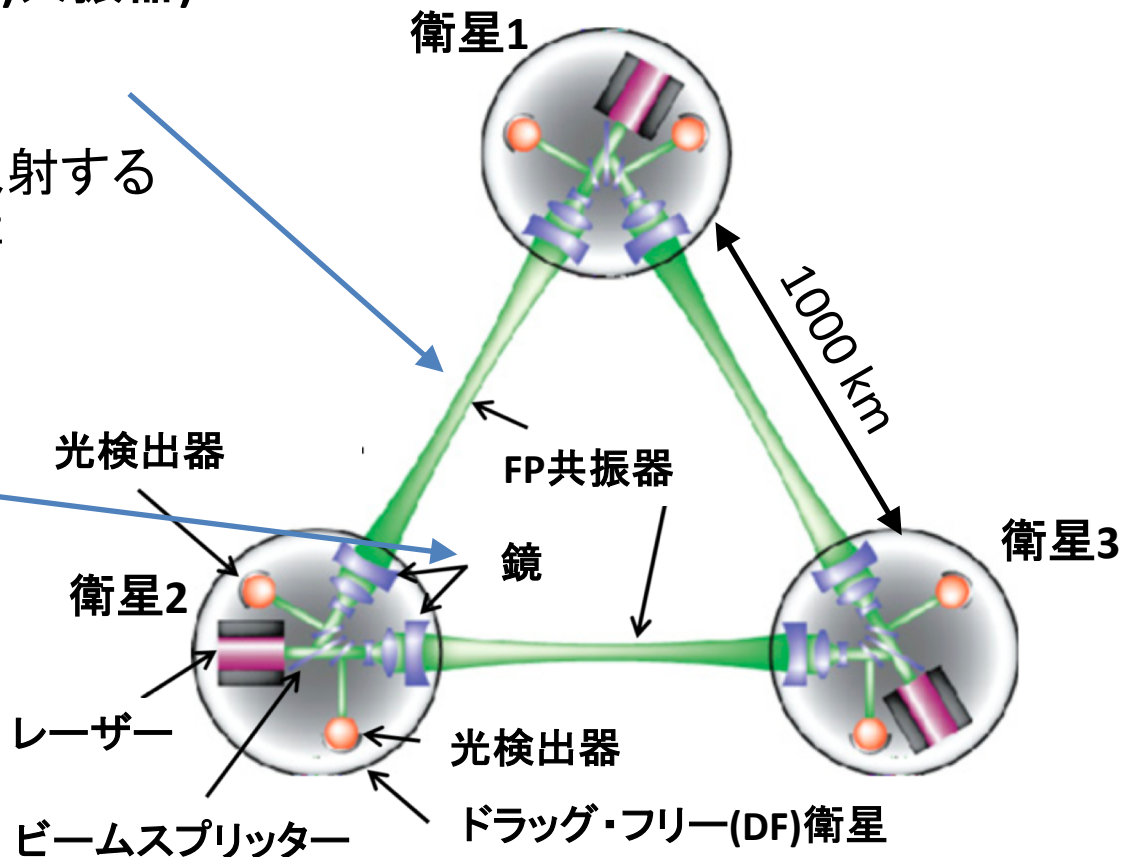
- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡

- 質量: 100 kg

レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: 10 W
- 周波数揺らぎ: $< 1 \text{ Hz/rtHz @ } 1 \text{ Hz}$



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

DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 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

鏡の数が少なくてすむという利点

鏡

- 質量: 100 kg

レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: 10 W
- 周波数揺らぎ: $<1 \text{ Hz/rtHz @1 Hz}$

光検出器

衛星2

レーザー

ビームスプリッター

FP共振

鏡

光検出器

ドラッグ・フリー(DF)衛星

衛星1

衛星3

衛星1から

衛星3から

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

DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

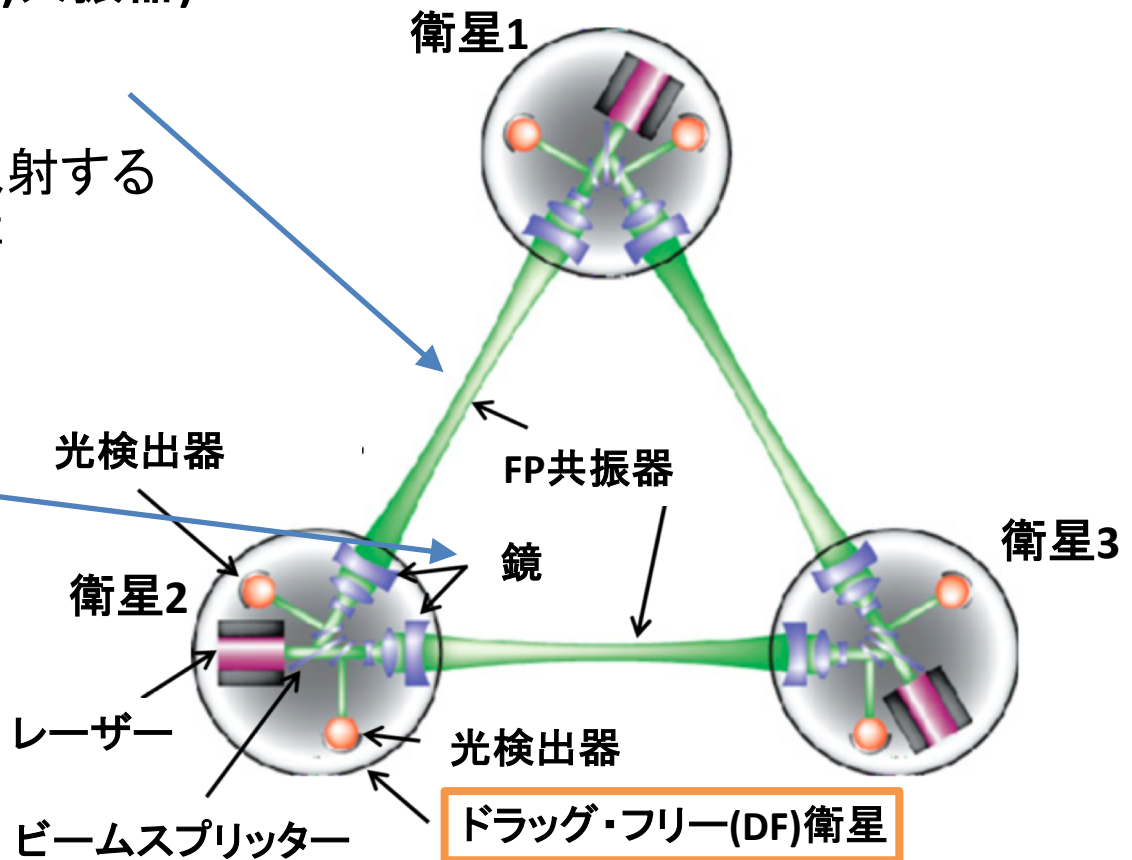
- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡

- 質量: 100 kg

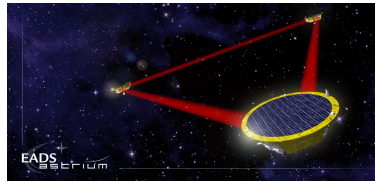
レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: 10 W
- 周波数揺らぎ: $<1 \text{ Hz/rtHz @1 Hz}$

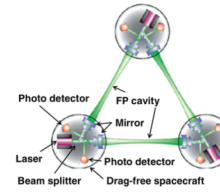


DECIGOの予備概念設計
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

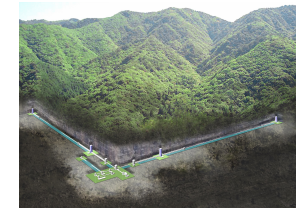
DECIGOとLISAとKAGRA



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)

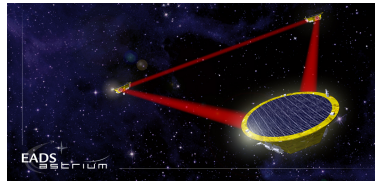
DF制御

必要

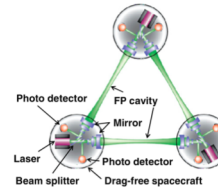
必要

不要

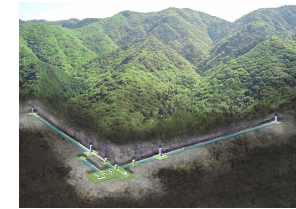
DECIGOとLISAとKAGRA



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)

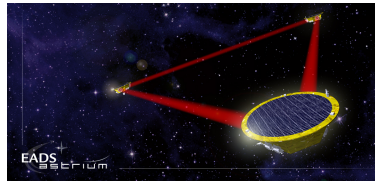
DF制御

必要

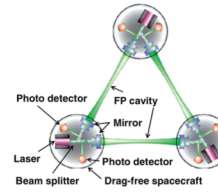
必要

不要

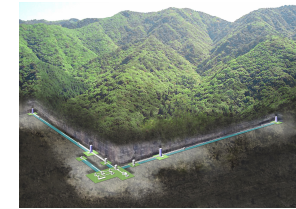
DECIGOとLISAとKAGRA



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

必要

必要

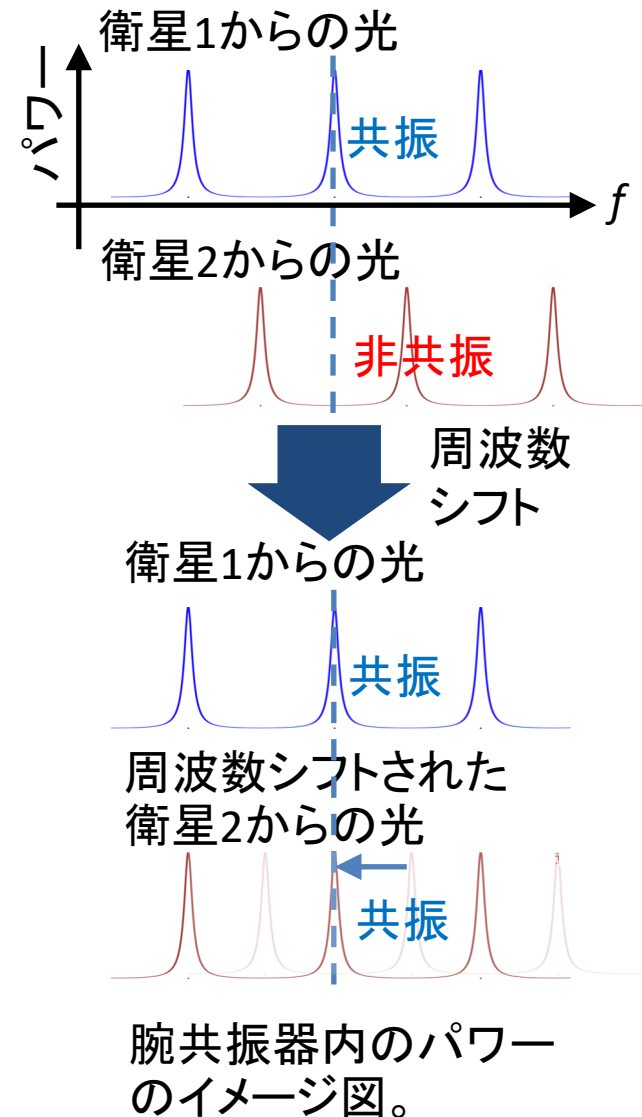
不要

目次

1. DECIGO計画とその干渉計構成
- 2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討**
3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発
4. 結論、今後の課題、まとめ

双方向Fabry-Perot干渉計

- 特徴
 - 1つの腕共振器を2つの光が共有する。
 - 2つの光は偏光と周波数を変えることで区別する。
- 事前検討
 - 2つの異なる周波数の光を同時に共振させるために周波数アクチュエータが必要 (Acousto-Optic Deflectorなど)。
- 確認が必要な事項
 - 干渉計の各自由度が制御可能か。
 - ドラッグ・フリー制御と両立するか。
 - 2つの共有された光間の偏光カップリング雑音や散乱光雑音などが小さいか。



双方向Fabry-Perot干渉計

- 特徴

- 1つの腕共振器を2つの光が共有する。
- 2つの光は偏光と周波数を変えることで区別する。

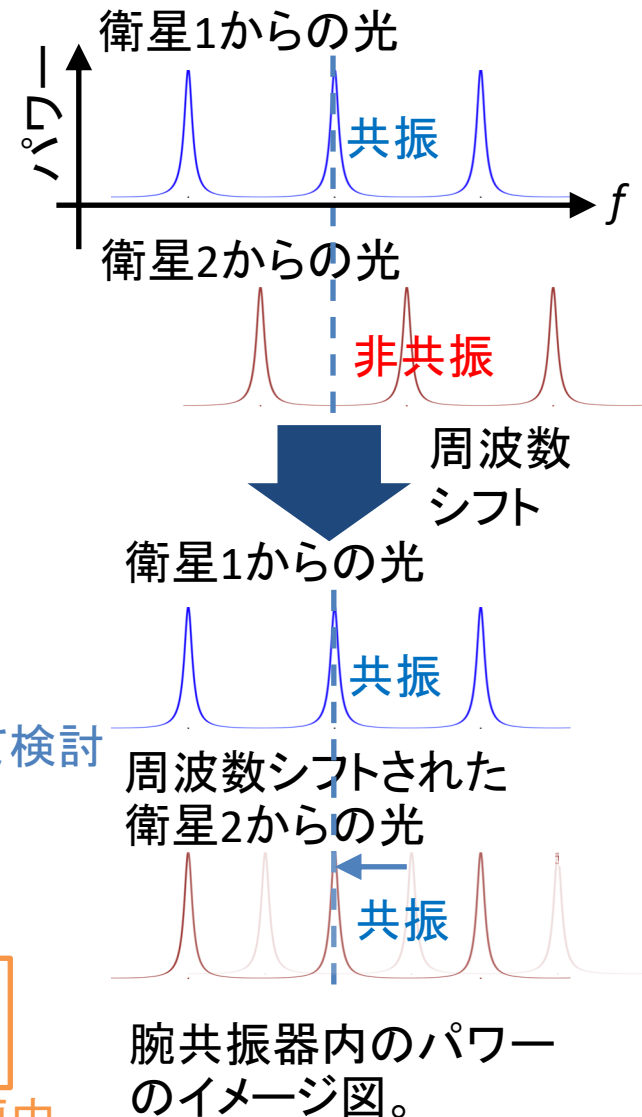
- 事前検討

- 2つの異なる周波数の光を同時に共振させるために周波数アクチュエータが必要 (Acousto-Optic Deflectorなど)。

- 確認が必要な事項 今回は長さ制御について検討

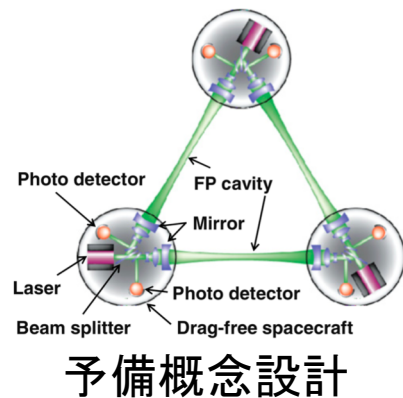
- 干渉計の各自由度が制御可能か。
- ドラッグ・フリー制御と両立するか。
- 2つの共有された光間の偏光カップリング雑音や散乱光雑音などが小さいか。

理論的予想が難しいため検証用プラットフォームを計画中。

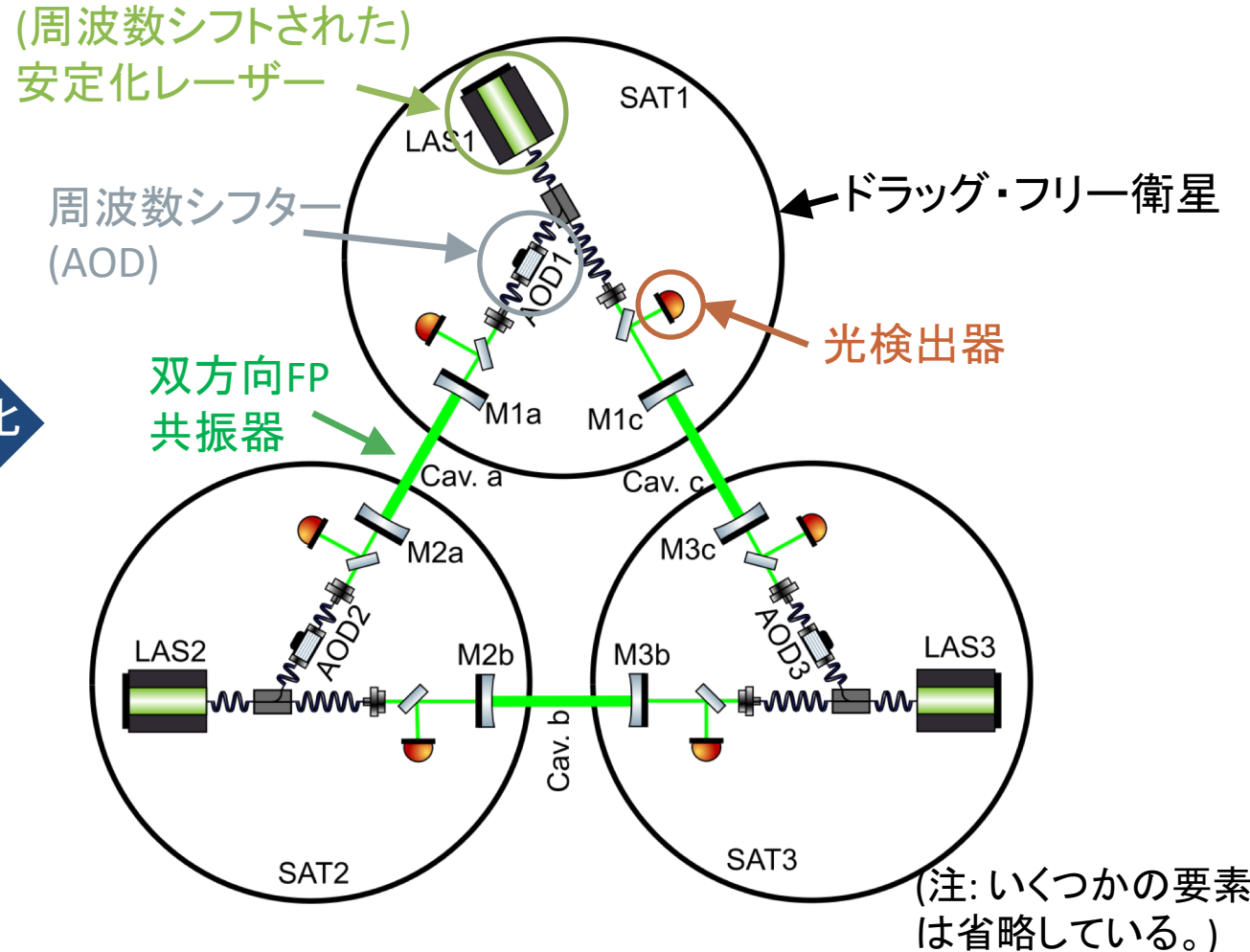


双方向Fabry-Perot干渉計

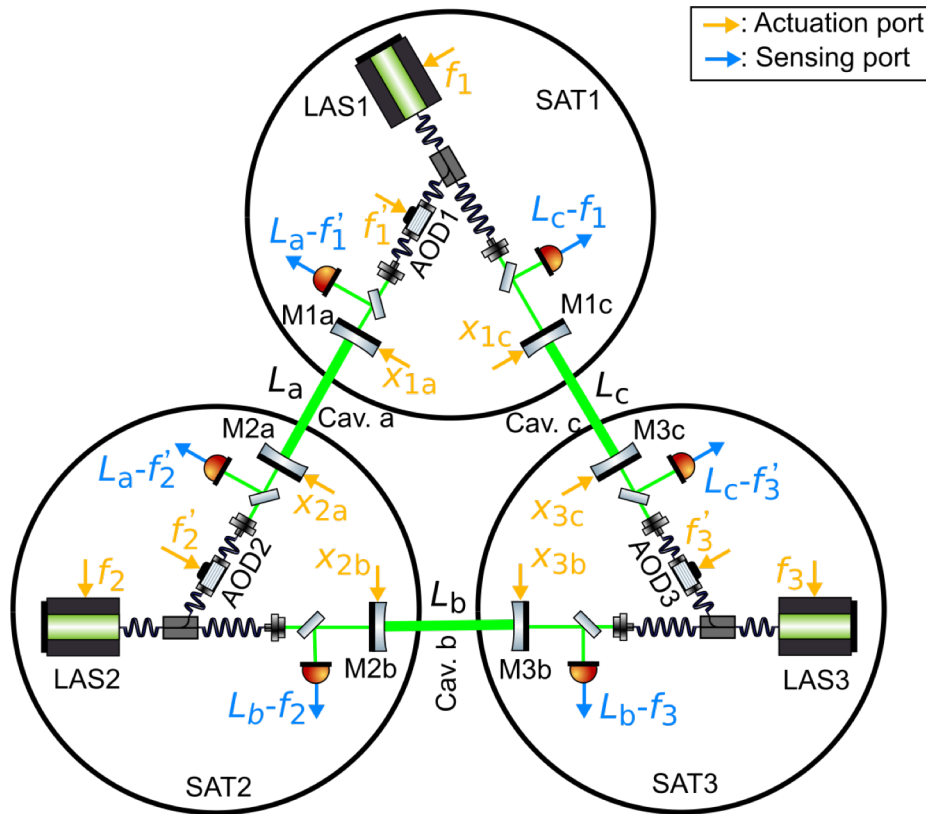
- 今回は長さ方向制御について考える。



現実化



制御トポロジー



• 測定できる量

– 各腕共振器の長さ信号
(例: $L_b - f_2$)

• 動かせる量

– レーザー光源周波数
(例: f_1)

– AODの周波数シフト量
(例: f'_3)

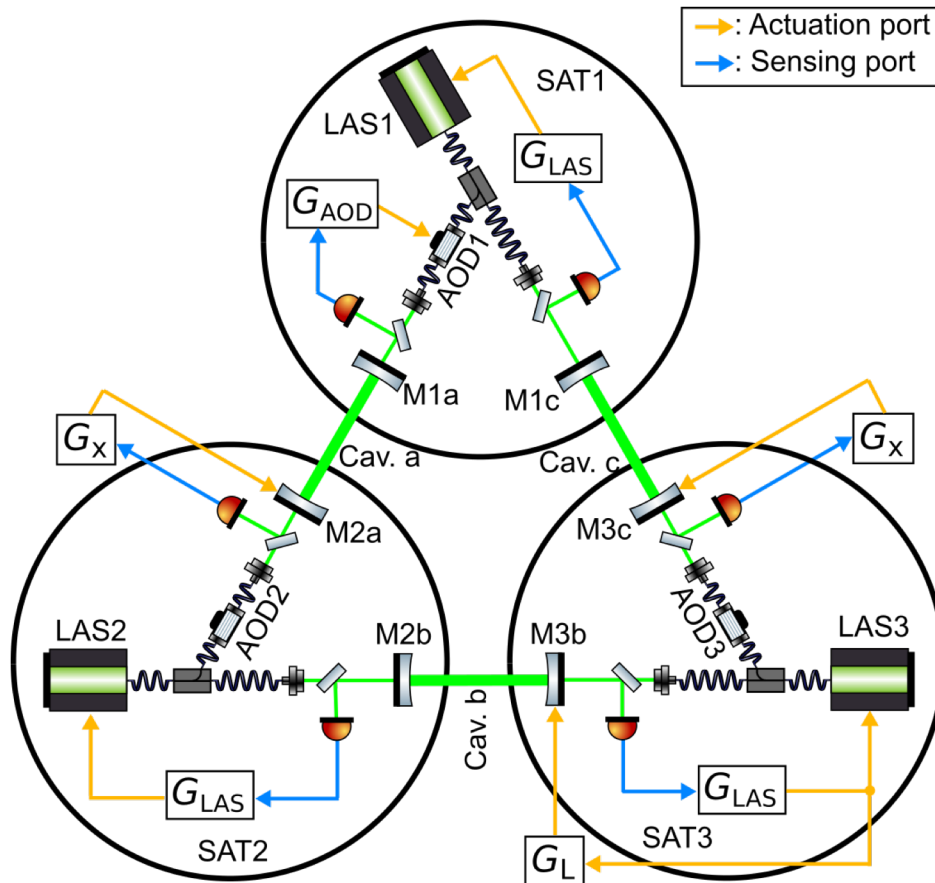
– 鏡の位置 (例: x_{1a})

(注: 簡単のため、レーザー周波数と鏡の位置は、それぞれ中心周波数と共振器の平均長さで規格化した量を考える。)

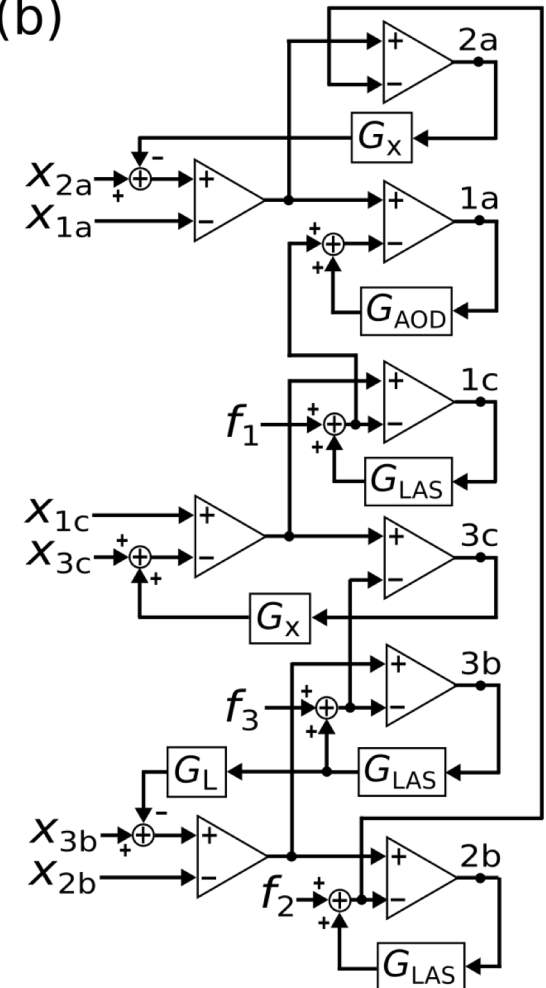
制御トポロジー

• 考えられる制御トポロジーの例

(a)



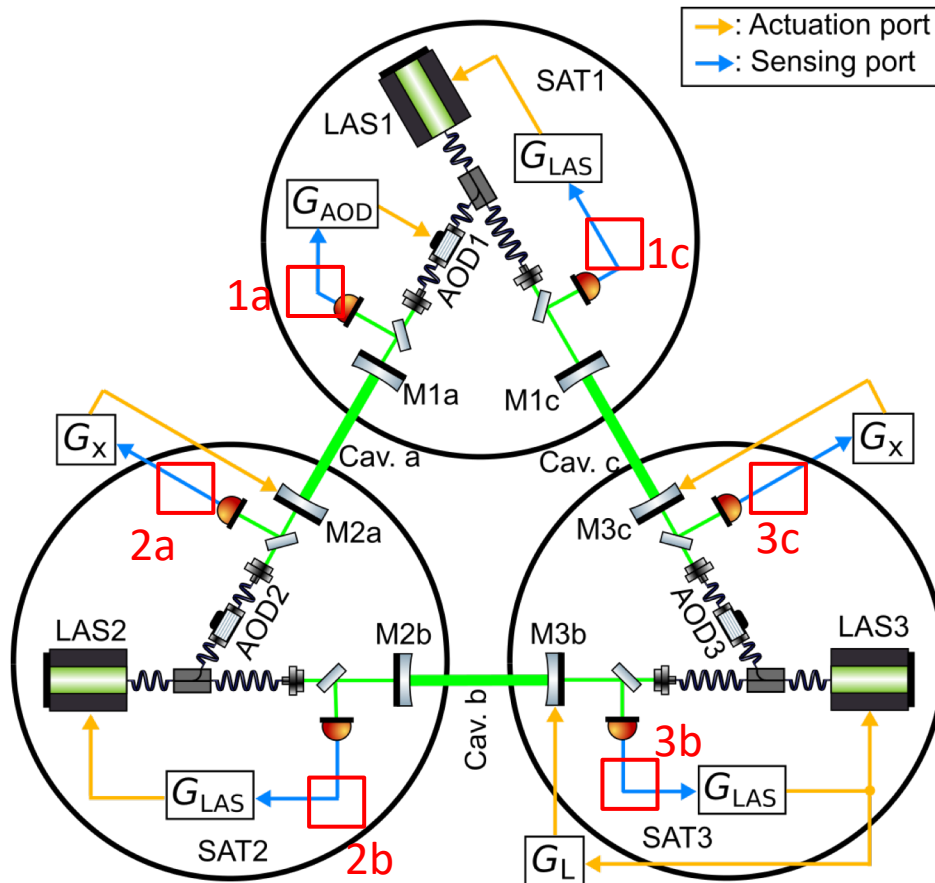
(b)



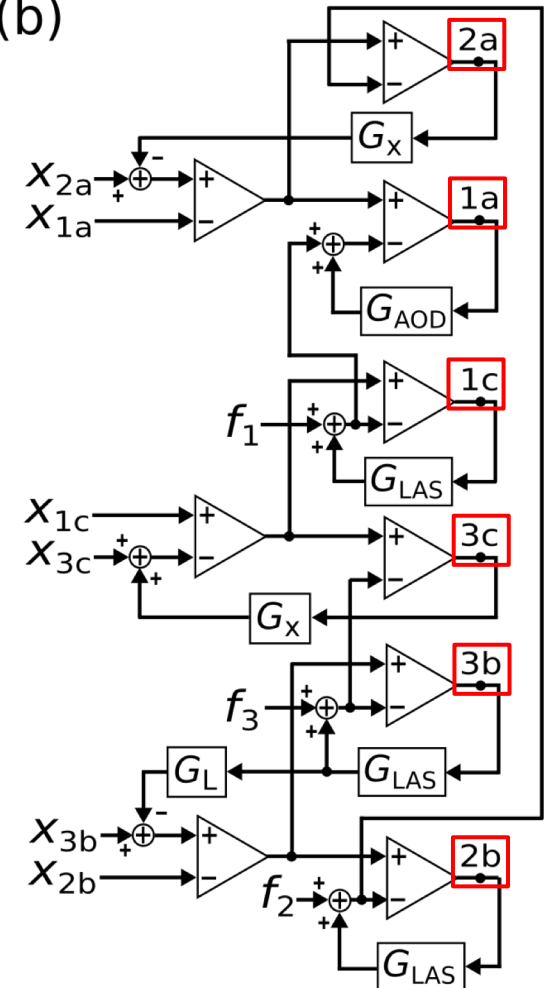
制御トポロジー

• 考えられる制御トポロジーの例

(a)



(b)

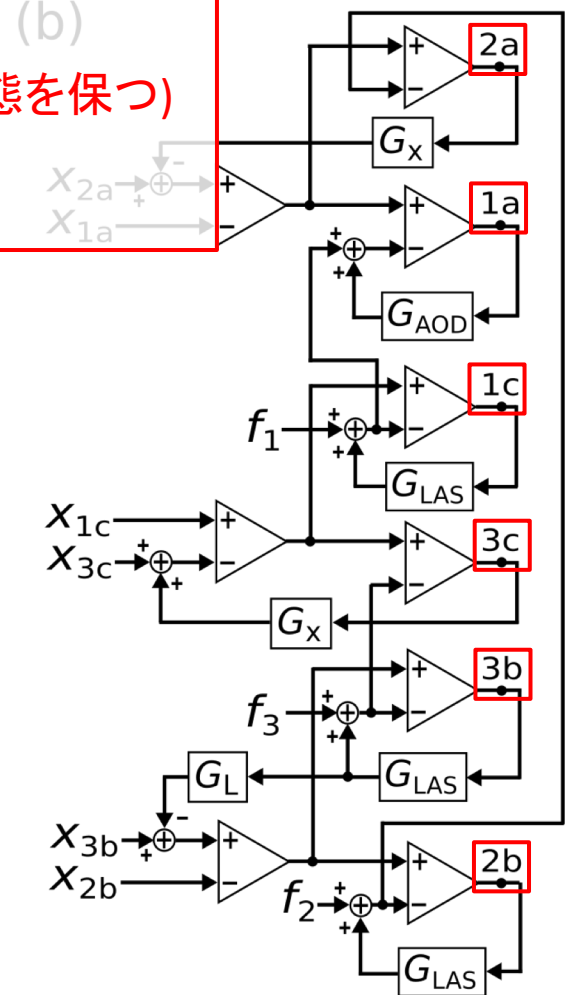
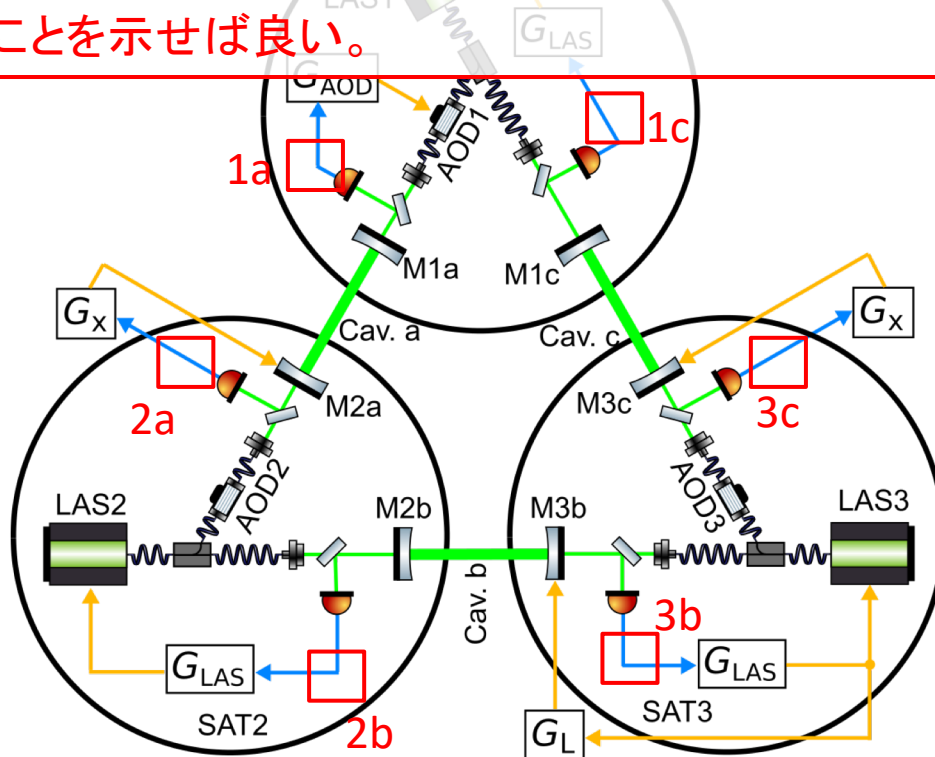


制御トポロジー

• 考えられる制御トポロジーの例

エラー信号で、

- 低周波で揺らぎが抑制される (=共振器が共振状態を保つ)
 - 観測帯域で重力波信号が取得できる
- ことを示せば良い。



双方向Fabry-Perot干渉計の制御

- ブロック図から計算すると、各点でのエラー信号 $s_{i\alpha}$ は、

$$s_{1a} = \frac{1}{1 + G_{AOD}} \left[\frac{1}{1 + G_x} \left\{ x_{2a} - x_{1a} + \frac{G_x}{1 + G_{LAS}} \left[f_2 + \frac{G_{LAS}}{1 + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}}} \left(x_{3b} - x_{2b} + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}} f_3 \right) \right] \right\} - \frac{1}{1 + G_{LAS}} \left(\frac{G_{LAS}}{1 + G_x} \left\{ x_{1c} - x_{3c} + \frac{G_x}{1 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L}} \left[f_3 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L} (x_{3b} - x_{2b}) \right] \right\} + f_1 \right) \right],$$

$$s_{1c} = \frac{1}{1 + G_{LAS}} \left(\frac{1}{1 + G_x} \left\{ x_{1c} - x_{3c} + \frac{G_x}{1 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L}} \left[f_3 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L} (x_{3b} - x_{2b}) \right] \right\} - f_1 \right),$$

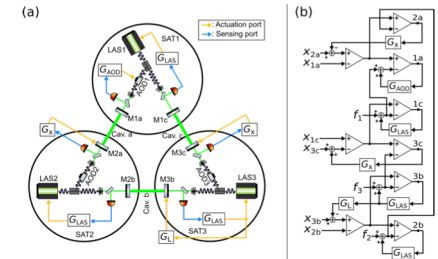
$$s_{2a} = \frac{1}{1 + G_x} \left\{ x_{2a} - x_{1a} - \frac{1}{1 + G_{LAS}} \left[f_2 + \frac{G_{LAS}}{1 + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}}} \left(x_{3b} - x_{2b} + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}} f_3 \right) \right] \right\},$$

$$s_{2b} = \frac{1}{1 + G_{LAS}} \left[\frac{1}{1 + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}}} \left(x_{3b} - x_{2b} + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}} f_3 \right) - f_2 \right],$$

$$s_{3b} = \frac{1}{1 + G_{LAS} + G_{LAS}G_L} (x_{3b} - x_{2b} - f_3),$$

$$s_{3c} = \frac{1}{1 + G_x} \left\{ x_{1c} - x_{3c} - \frac{1}{1 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L}} \left[f_3 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L} (x_{3b} - x_{2b}) \right] \right\},$$

となるが、これは分からないので近似をする。



双方向Fabry-Perot干渉計の制御

- 低周波で、 $|G_{AOD}| \gg 1$ 、 $|G_x| \gg 1$ 、 $|G_{LAS}| \gg 1$ 、 $|G_L| \gg 1$ とすると、

$$s_{1a} = 0,$$

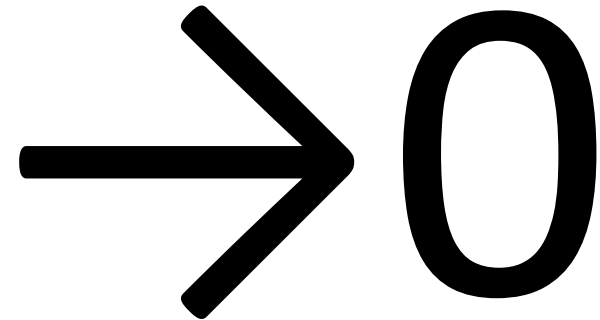
$$s_{1c} = \frac{1}{1 + G_{LAS}}(f_3 - f_1),$$

$$s_{2a} = \frac{1}{1 + G_x}(x_{2a} - x_{1a} - f_3),$$

$$s_{2b} = \frac{1}{1 + G_{LAS}}(f_3 - f_2),$$

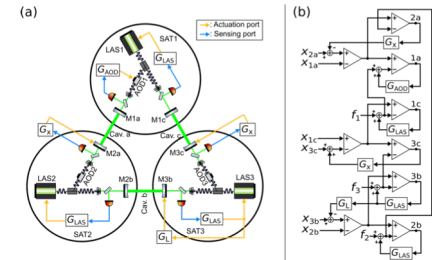
$$s_{3b} = \frac{1}{1 + G_{LAS}G_L}(x_{3b} - x_{2b} - f_3),$$

$$s_{3c} = \frac{1}{1 + G_x}(x_{1c} - x_{3c} - f_3),$$



〔本当は残留揺らぎが共振器の線幅内に収まるかどうか見る必要がある。〕

となり、揺らぎが制御によって抑制され、原理的には共振状態を維持できることが分かる。



双方向Fabry-Perot干渉計の制御

- 観測帯域で、 $|G_{AOD}| \ll 1$ 、 $|G_x| \ll 1$ 、 $|G_{LAS}| \gg 1$ 、 $|G_L| \ll |G_{LAS}|^{-1}$ とすると、

$$s_{1a} = x_{2a} - x_{1a} - (x_{1c} - x_{3c}),$$

→ 重力波信号

$$s_{1c} = \frac{-1}{1 + G_{LAS}} f_1,$$

$$s_{2a} = x_{2a} - x_{1a} - (x_{3b} - x_{2b}),$$

→ 重力波信号

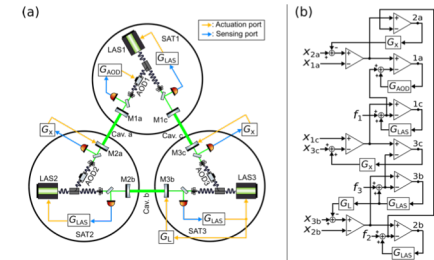
$$s_{2b} = \frac{-1}{1 + G_{LAS}} f_2,$$

$$s_{3b} = \frac{-1}{1 + G_{LAS}} f_3,$$

$$s_{3c} = x_{1c} - x_{3c} - (x_{3b} - x_{2b}),$$

→ 重力波信号

となり、点1a、2a、3cで各腕共振器の長さの差動信号(=重力波信号)をとることができる。

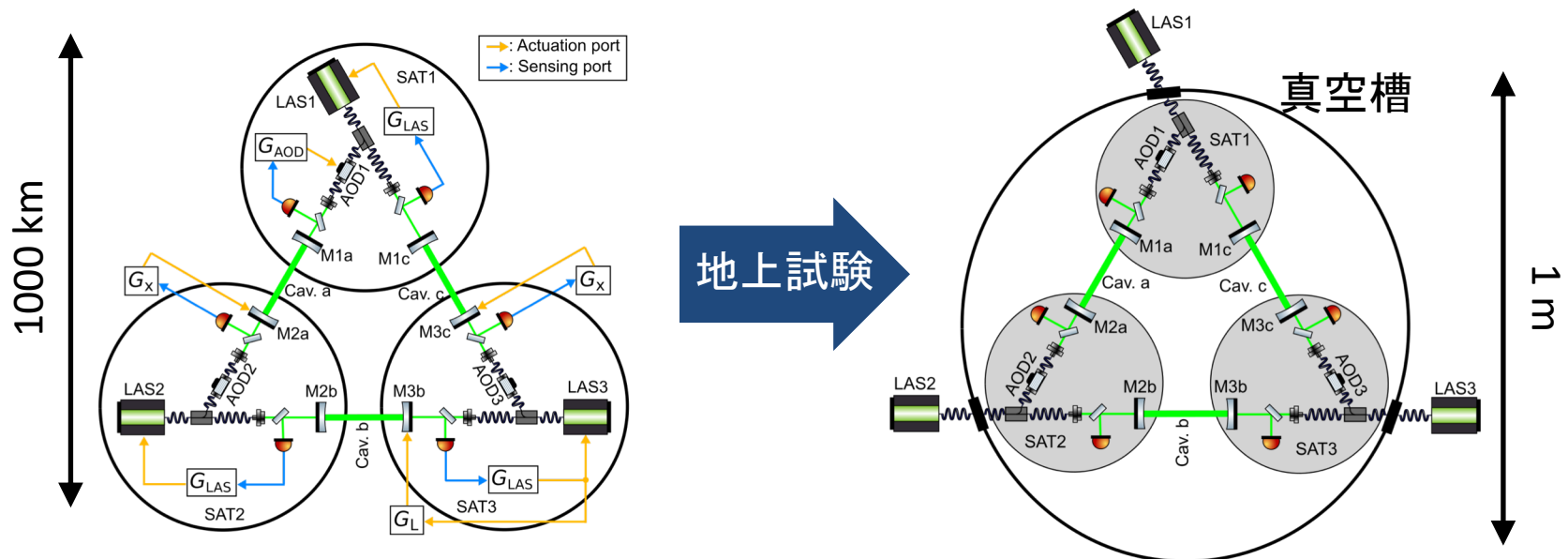


目次

1. DECIGO計画とその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討
- 3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発**
4. 結論、今後の課題、まとめ

干渉計統合試験用プラットフォーム

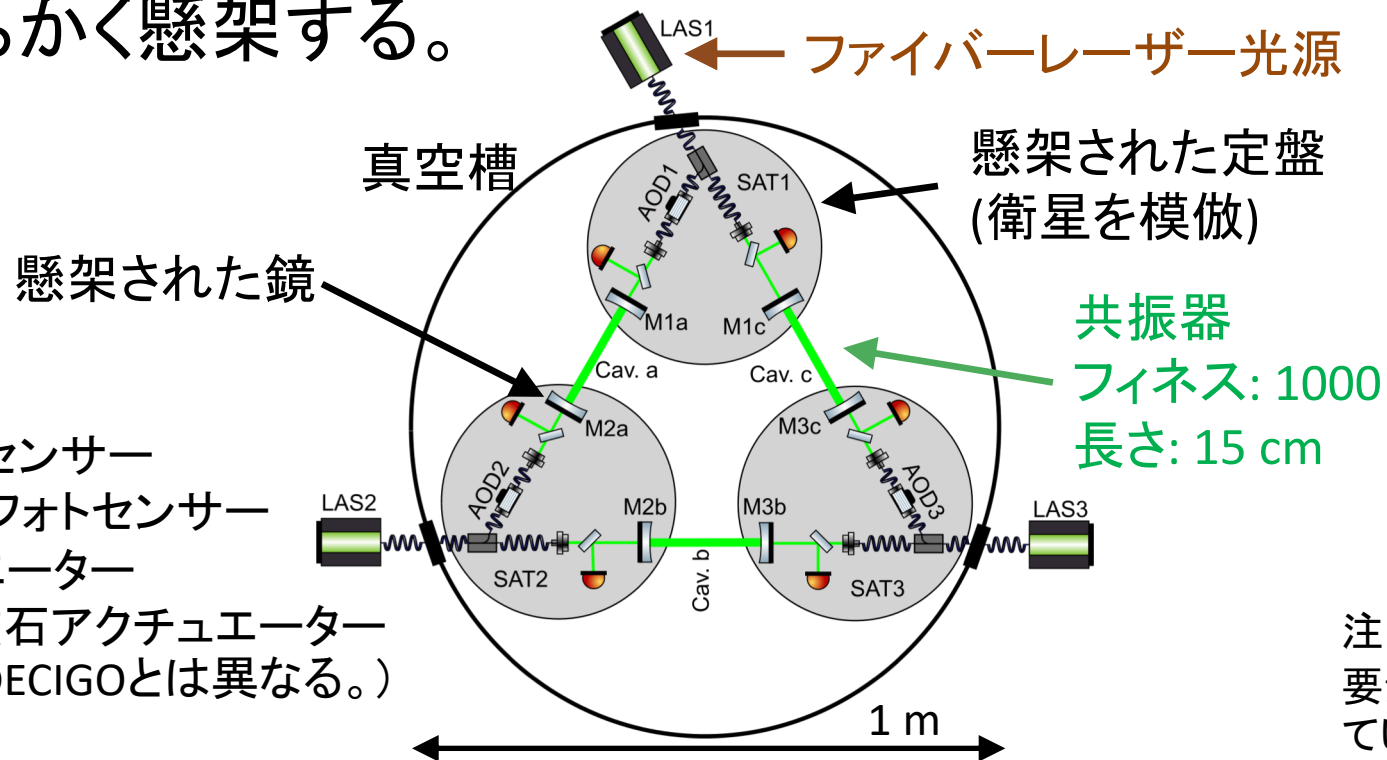
- 理論検討だけでは、さまざまな実際上の問題を見逃す可能性がある。
- また、理論的にはどの程度影響があるか予想が難しい、偏光カップリング雑音や散乱光雑音などもある。
- そのため、実験的実証も行う必要があり、干渉計地上統合試験用プラットフォームを構築する予定である。



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

- 干渉計の制御トポロジーは実際の検出器と同じ。
- 宇宙空間を模すために、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。)

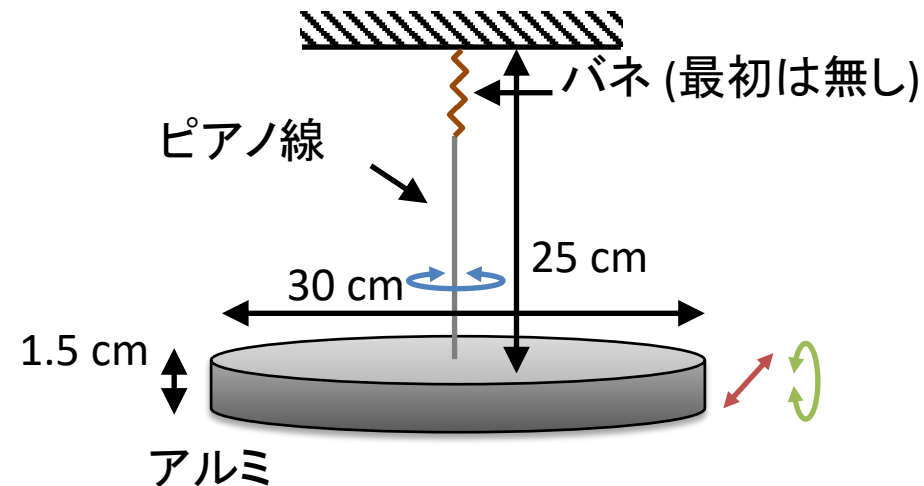
注: いくつかの要素は描かれていない。

建設予定地



プラットフォームの懸架系

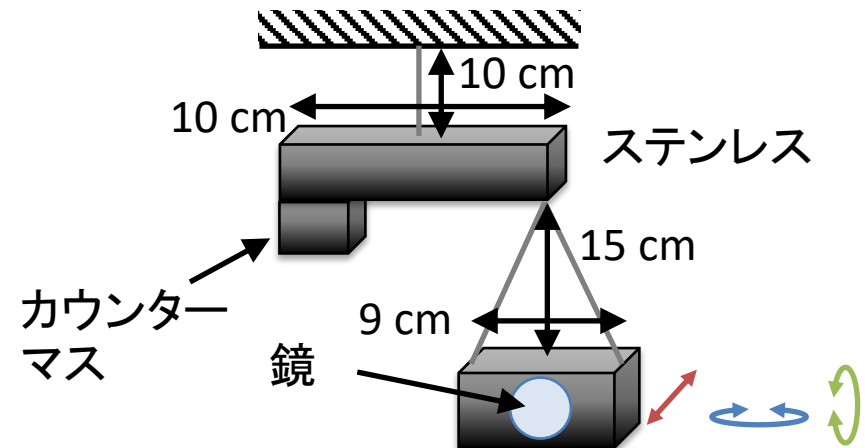
• 光学定盤懸架系



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

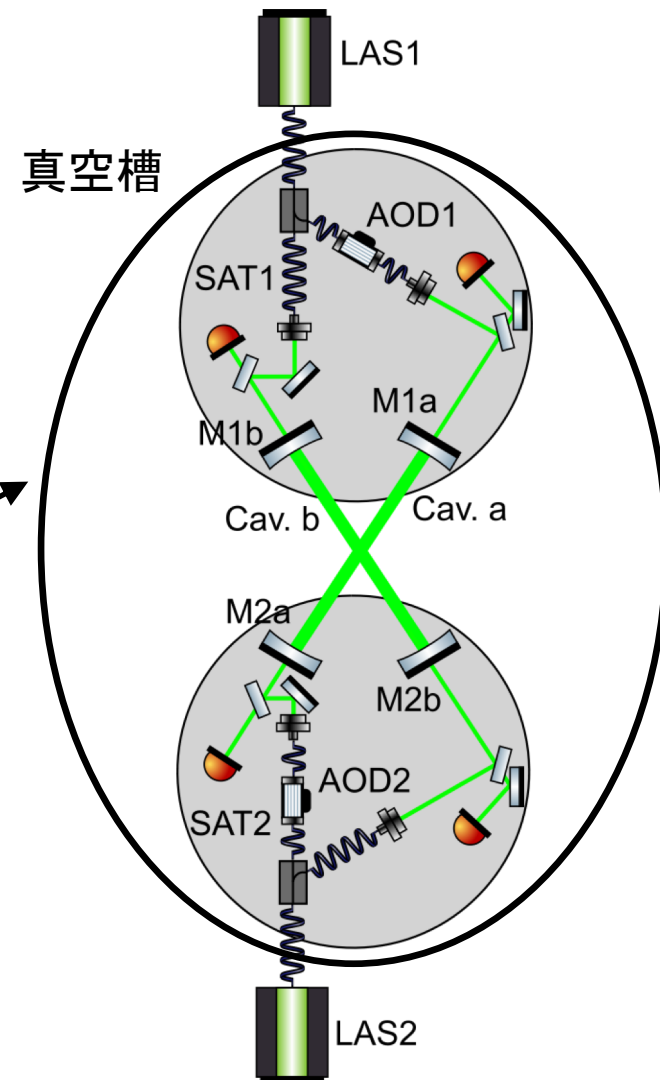


共振周波数 (設計値)

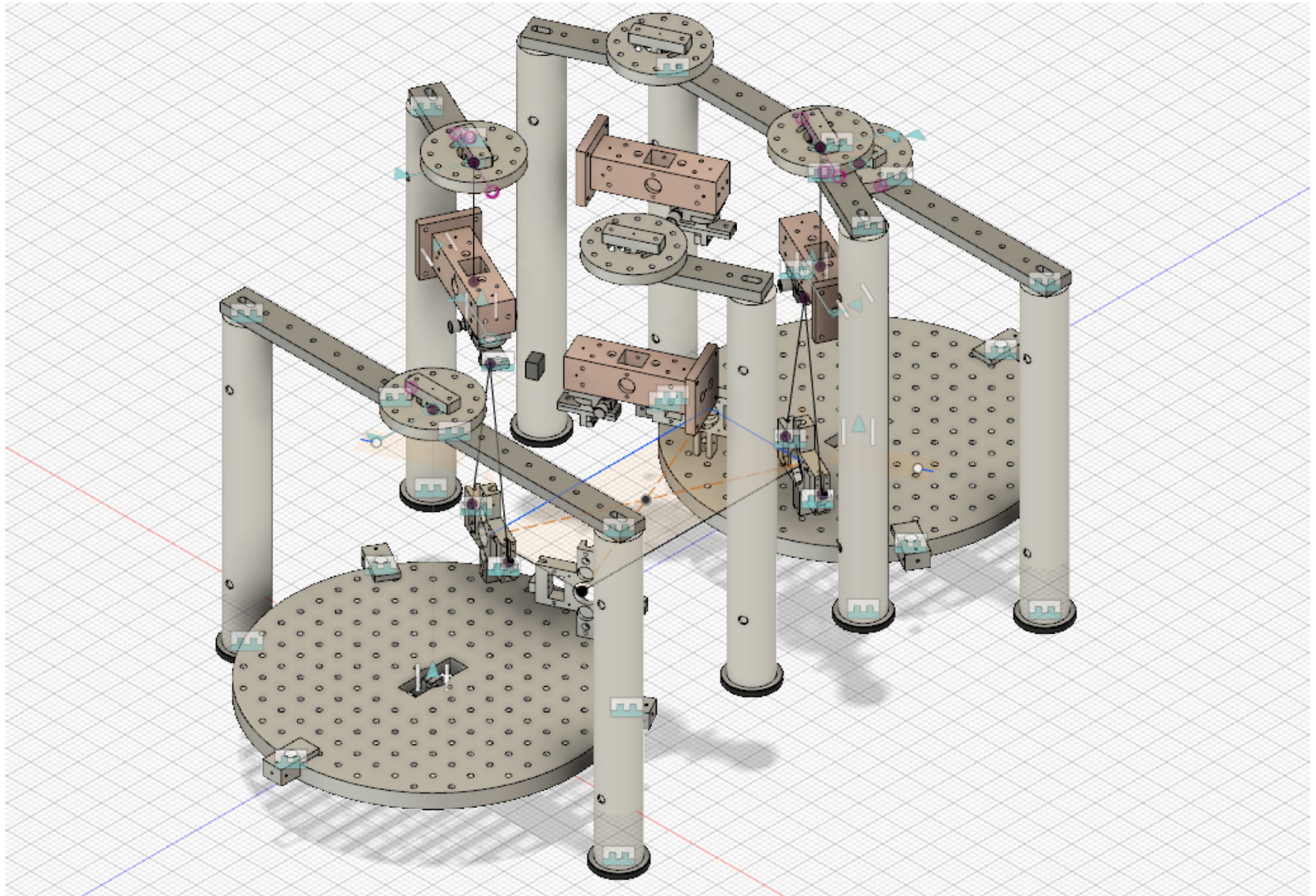
- ピッチ: 0.05 Hz
- ヨー: 0.1 Hz
- 長さ方向: 0.02 Hz

構築計画

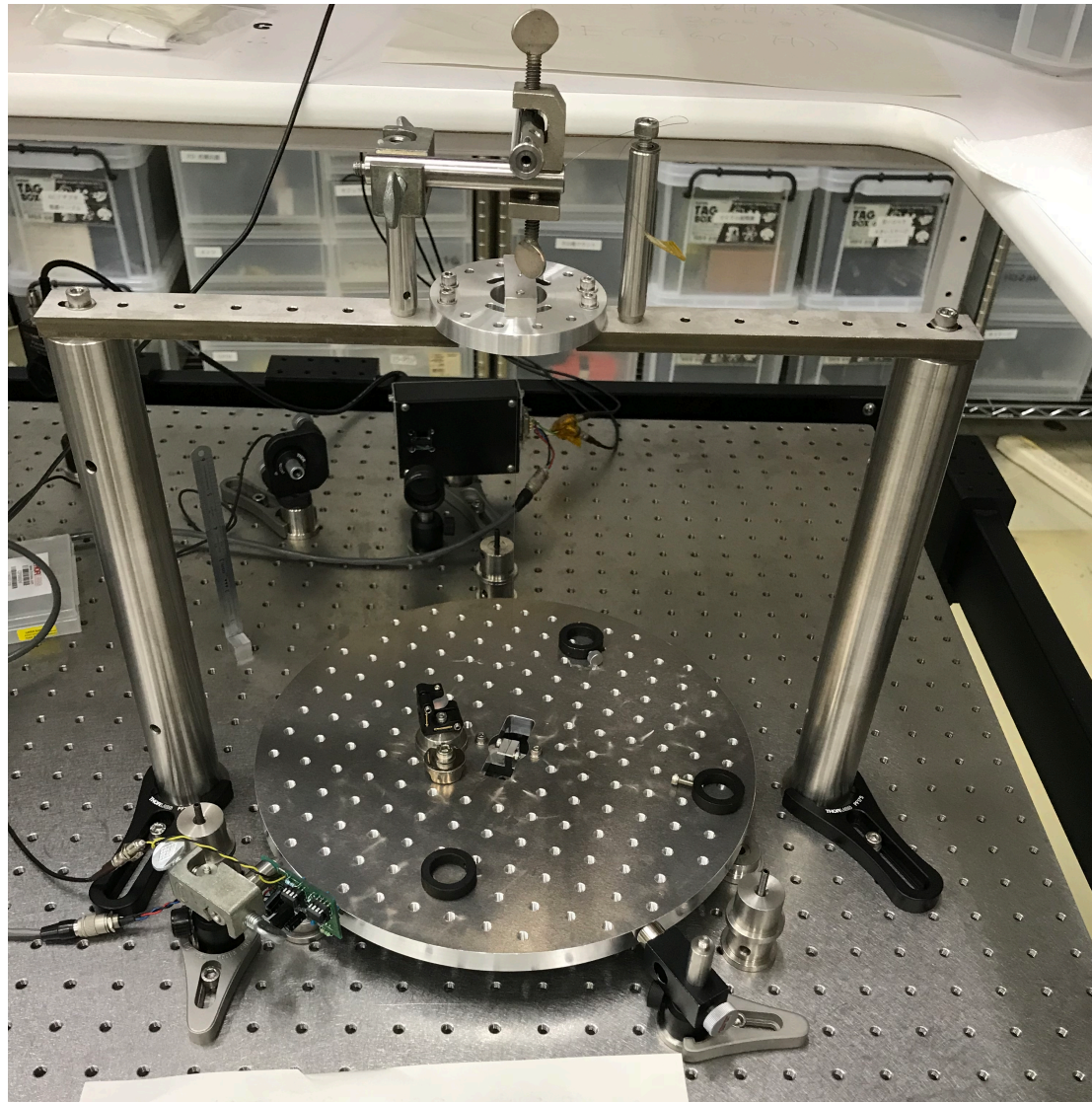
- 2018年9月まで
 - 概念設計 (済)
- 2018年12月まで
 - 物品調達
 - 機械系構築
- 2019年3月まで
 - 光学系構築 (2衛星・2共振器系)
- 2019年4月以降
 - 干渉計試験開始
 - 適宜3衛星・3共振器系に改良



2衛星・2共振器系の概念設計



光学定盤懸架系

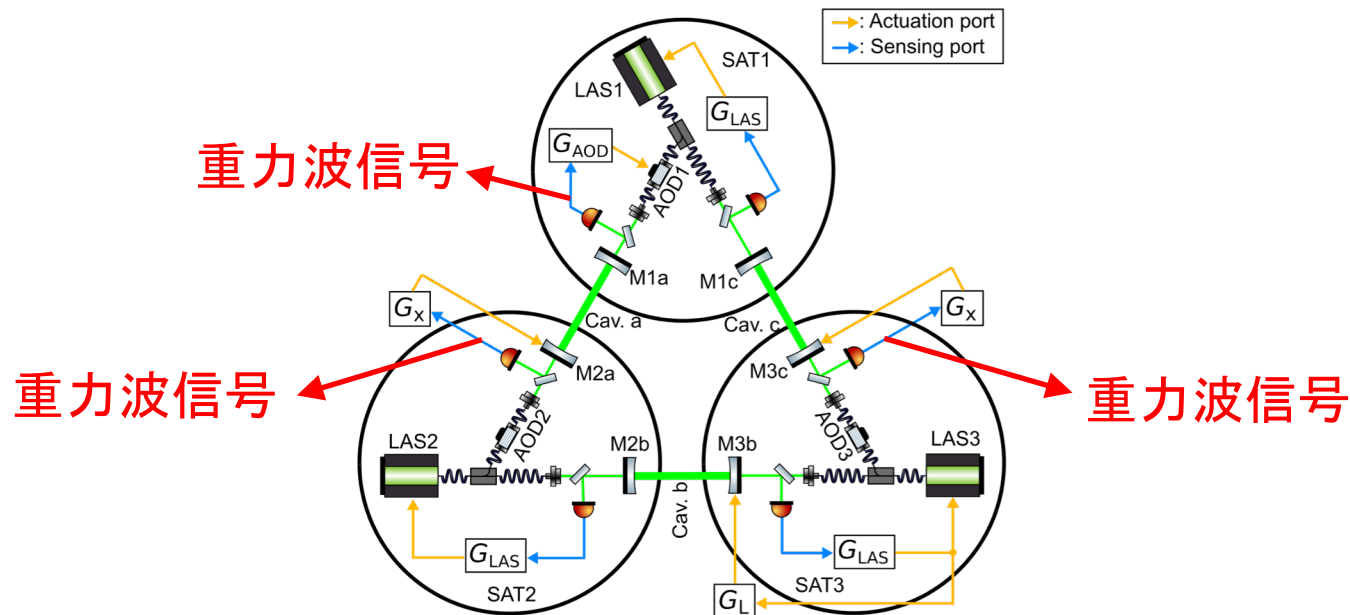


目次

1. DECIGO計画とその干渉計構成
2. 双方向Fabry-Perot干渉計の検討
3. 干渉計統合試験用プラットフォームの開発
- 4. 結論、今後の課題、まとめ**

結論

- 双方向Fabry-Perot干渉計の長さ制御可能性を示した。
- 干渉計統合試験用プラットフォームの開発を進めており、概念設計が完了した。



今後の課題

- 干渉計の他自由度の制御や、ドラッグ・フリー制御との両立性はまだ検討中。
- 雑音も検討中。
- MATLAB (Simulink) を使ったシミュレーションも進行中。
- 干渉計については、超長基線共振器や初期アライメントに関する問題もある。
 - 初期アライメントの手順に関しては、干渉計統合試験用プラットフォームで検証可能であり、その準備も進めている。

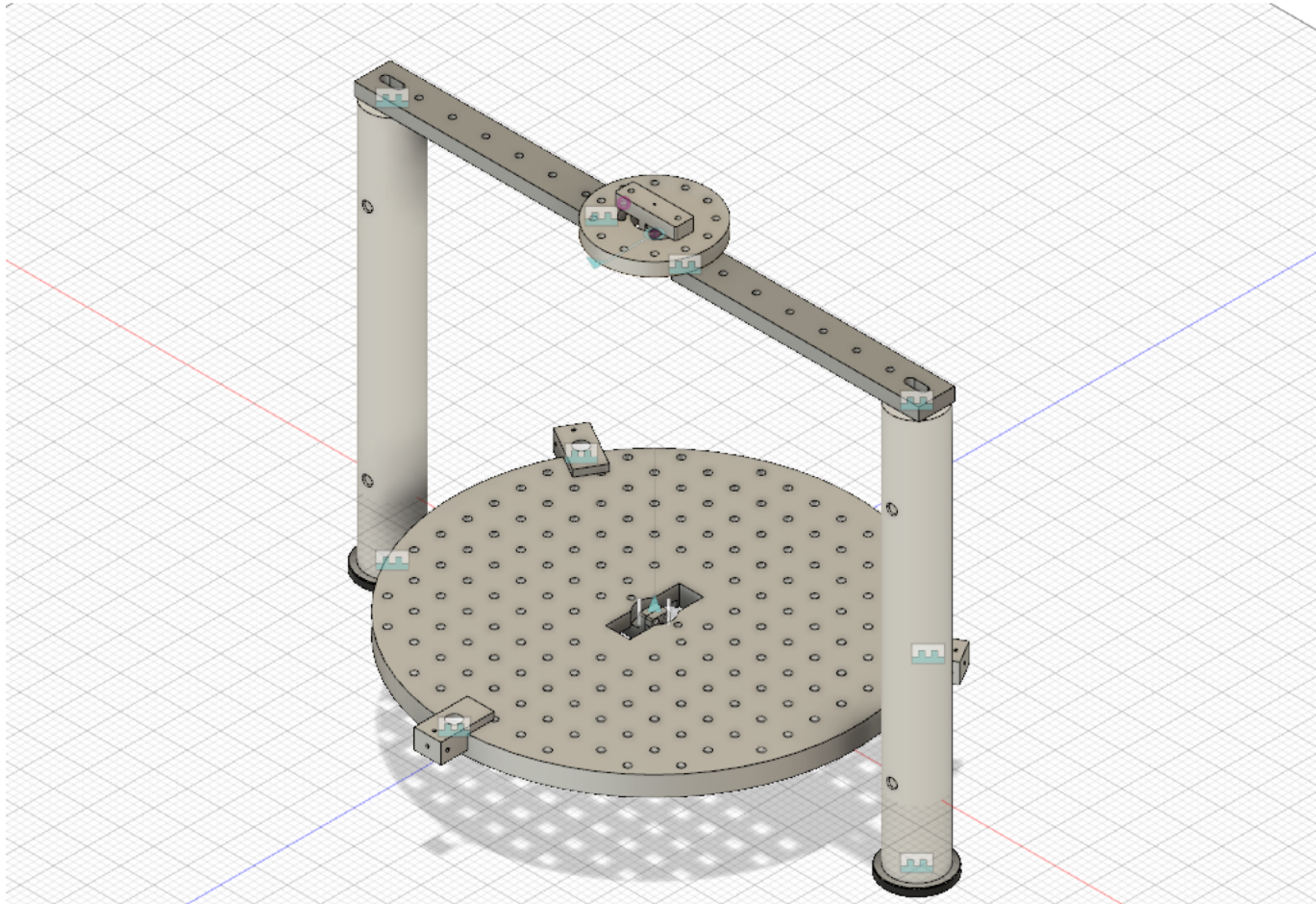
まとめ

- DECIGOで採用される予定の双方向Fabry-Perot干渉計の長さ制御方法について検討し、運用可能であることを示した。
- ただし、ドラッグ・フリー制御との両立可能性等については今後検討が必要である。
- DECIGOの干渉計部分の試験用プラットフォームの設計が完了し、構築を進めている。
- 今年度末には、干渉計試験を始める予定。

Appendix

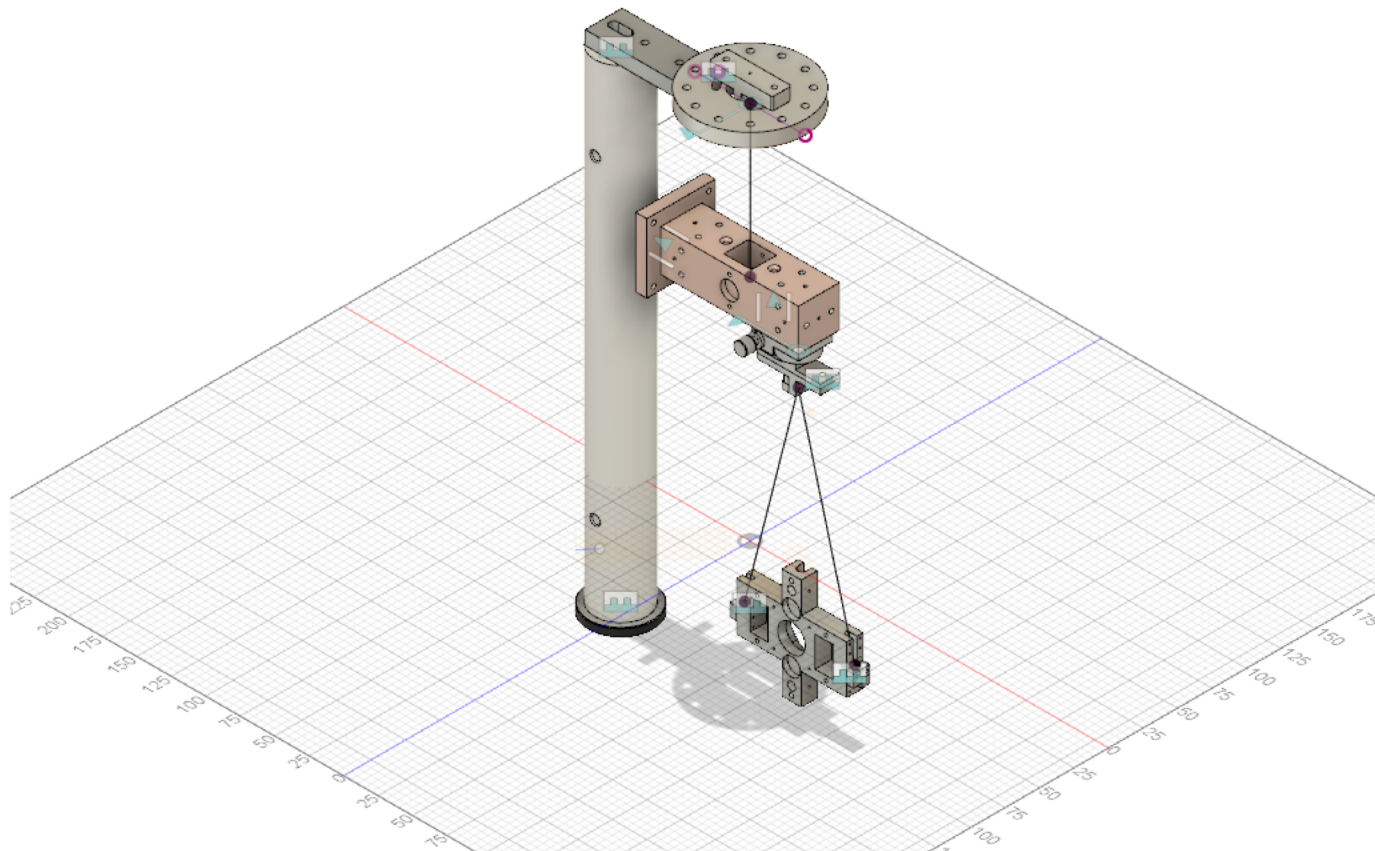
プラットフォームの懸架系

- 光学定盤懸架系



プラットフォームの懸架系

- 鏡懸架系



周波数シフトレーザー

2.2 レーザー

それぞれの衛星のレーザーは、ヨウ素セルで安定化されている。さらに、図2のようなダブルパス AOM 等を用いて、周波数シフト、及び外部共振器を用いた安定化が可能である [3]。このドキュメントでは、点線で囲まれば部分をレーザー系、あるいは単にレーザーと呼ぶことにする。

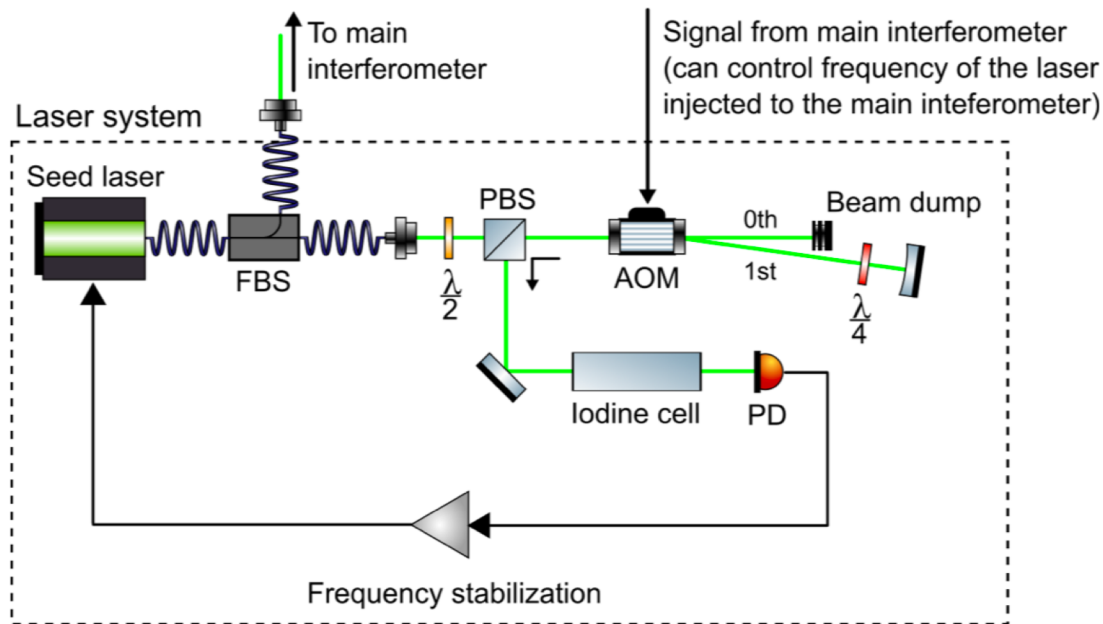


図2 ダブルパス AOM 等を用いたレーザー周波数安定化の概略図。FBS, fiber beam splitter; hogehoge.

B-DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

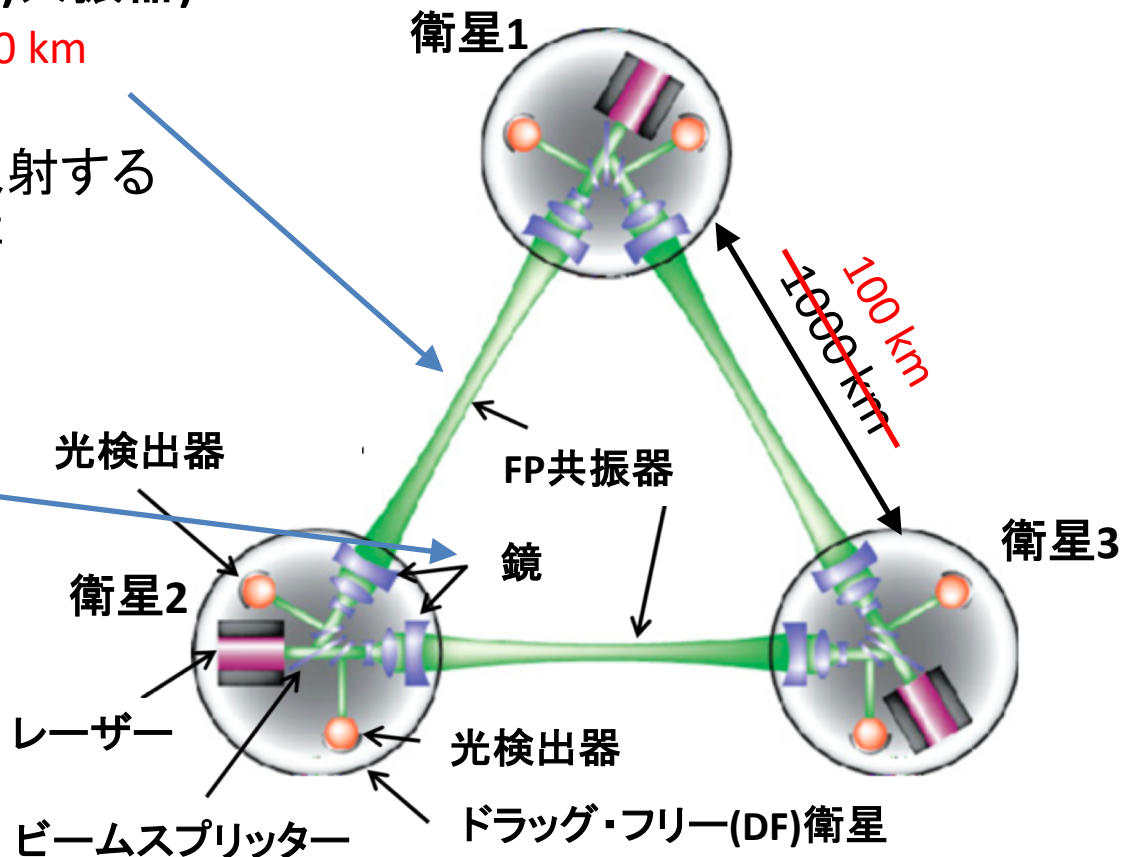
- 長さ: ~~1000 km~~ 100 km
- フィネス: ~~10~~ 100
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡

- 質量: ~~100 kg~~ 30 kg

レーザー

- 波長: 515 nm
- 入射パワー: ~~10 W~~ 1 W
- 周波数揺らぎ: $<1 \text{ Hz/rtHz @1 Hz}$

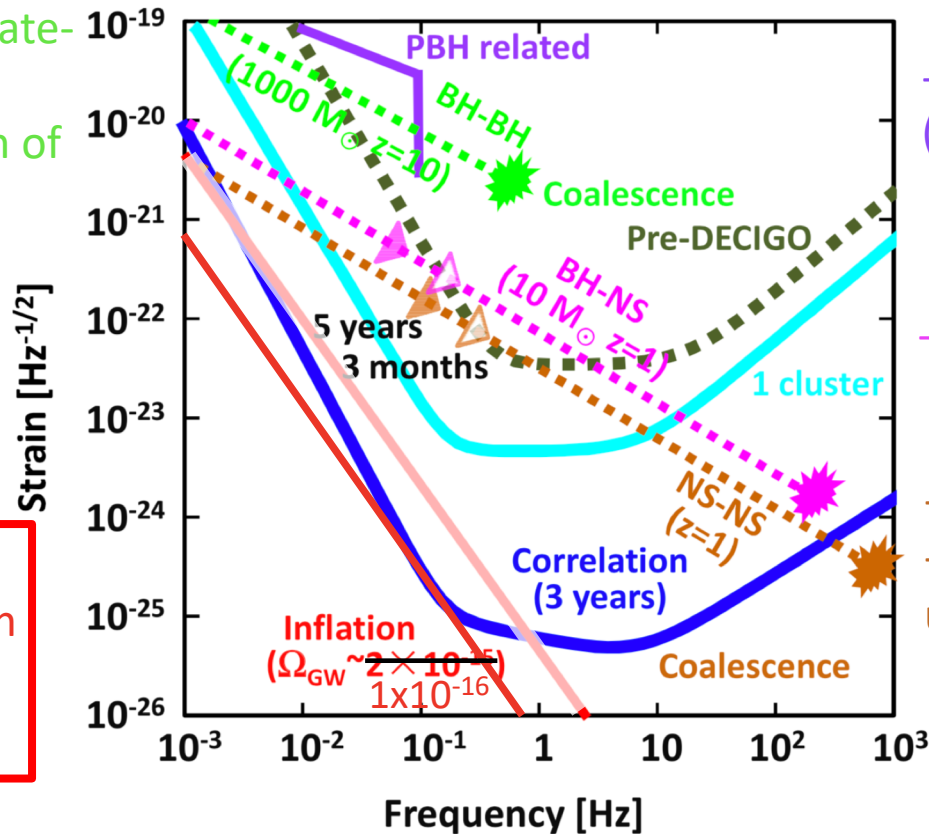


DECIGOの予備概念設計
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

DECIGO sensitivity and science cases

- Observe intermediate-mass black holes
- > Reveal mechanism of formation of supermassive black holes

- Verify inflation
- > Direct observation of the beginning of the universe



- Dark-matter (candidate) search [1]

- Test gravity theories [2]

- Study neutron physics
- Measure accelerated universe directly [3]
- > Dark-energy search

DECIGO and B-DECIGO sensitivity. B-DECIGO was called Pre-DECIGO formerly.
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

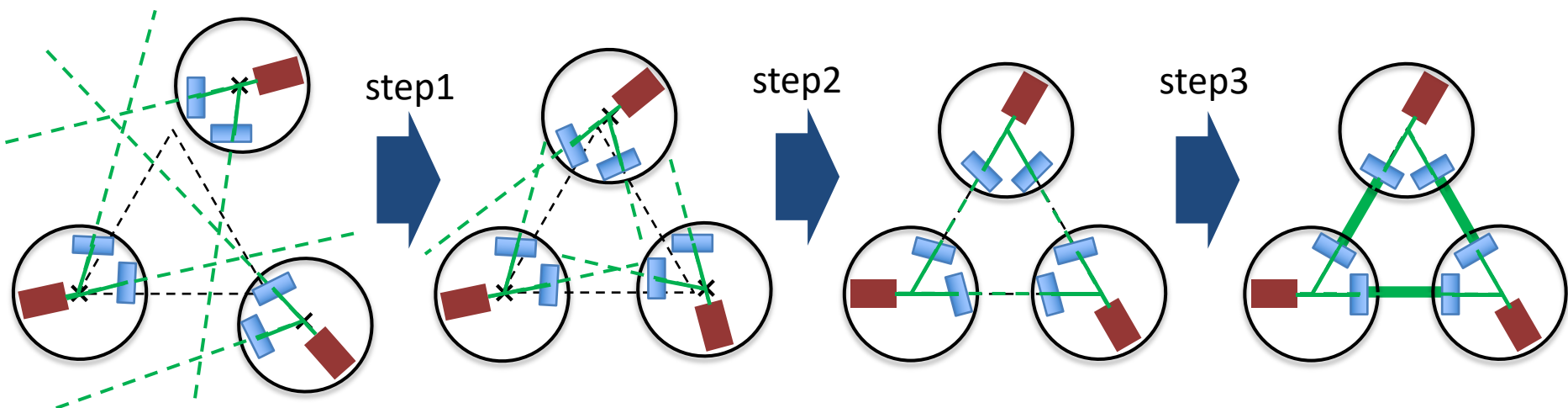
- [1] R. Saito+, *PTP*, 2009
- [2] K. Yagi+, *PTP*, 2010
- [3] N. Seto+, *PRL*, 2001

Challenges for mission

- Low force noise requirement ($<1 \times 10^{-16}$ N/rtHz)
 - LISA Path Finder result @0.01 Hz: 4×10^{-15} N/rtHz
- Low S/C displacement noise requirement ($<1 \times 10^{-19}$ m/rtHz @0.1 Hz)
 - Low noise, high dynamic range, continuously variable thruster is required.
 - S/C alignment and drag-free control scheme (signal processing scheme) is necessary.
- First locking after initial S/C tracking.
- Interferometer configuration
 - Dual-path Fabry-Perot cavity is most promising though.
 - Configuration itself should be demonstrated.
 - In any choice, practical problem should be investigated.
- Integration test
 - Thruster, S/C tracking with Acousto-Optic Deflector (AOD), and so on.

First locking

- First locking is one of the most serious problems of DECIGO/B-DECIGO.
- “First locking” can be divided into 3 steps.
 1. S/C tracking (~ 10 m, 100 μ rad)
 2. Optical S/C alignment (~ 10 cm, 0.1 μ rad)
 3. Cavity locking (~ 1 μ m)

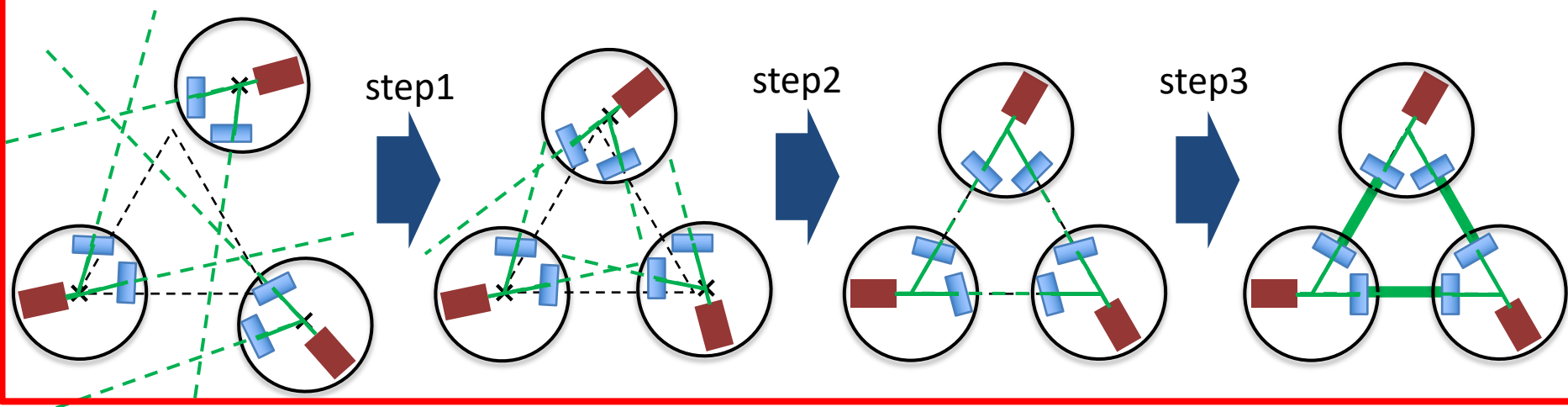


First locking

- First locking is one of the most serious problems of DECIGO/B-DECIGO.
- “First locking can be divided into 3 steps.”

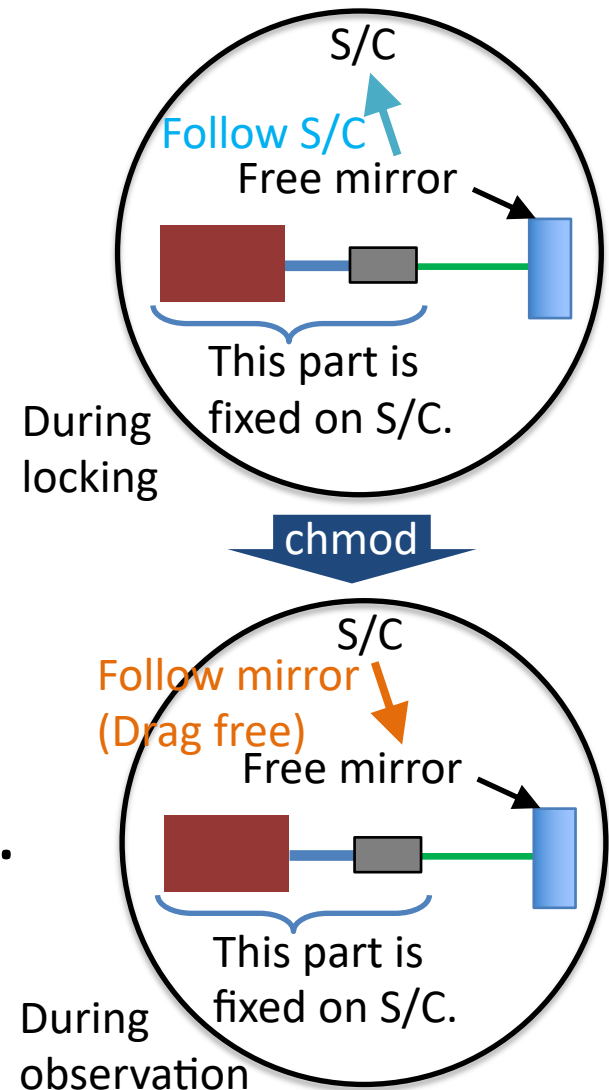
This locking scheme should be demonstrated before launch.

1. S/C tracking (~ 10 m, 100 μ rad)
2. Optical S/C alignment (~ 10 cm, 0.1 μ rad)
3. Cavity locking (~ 1 μ m)



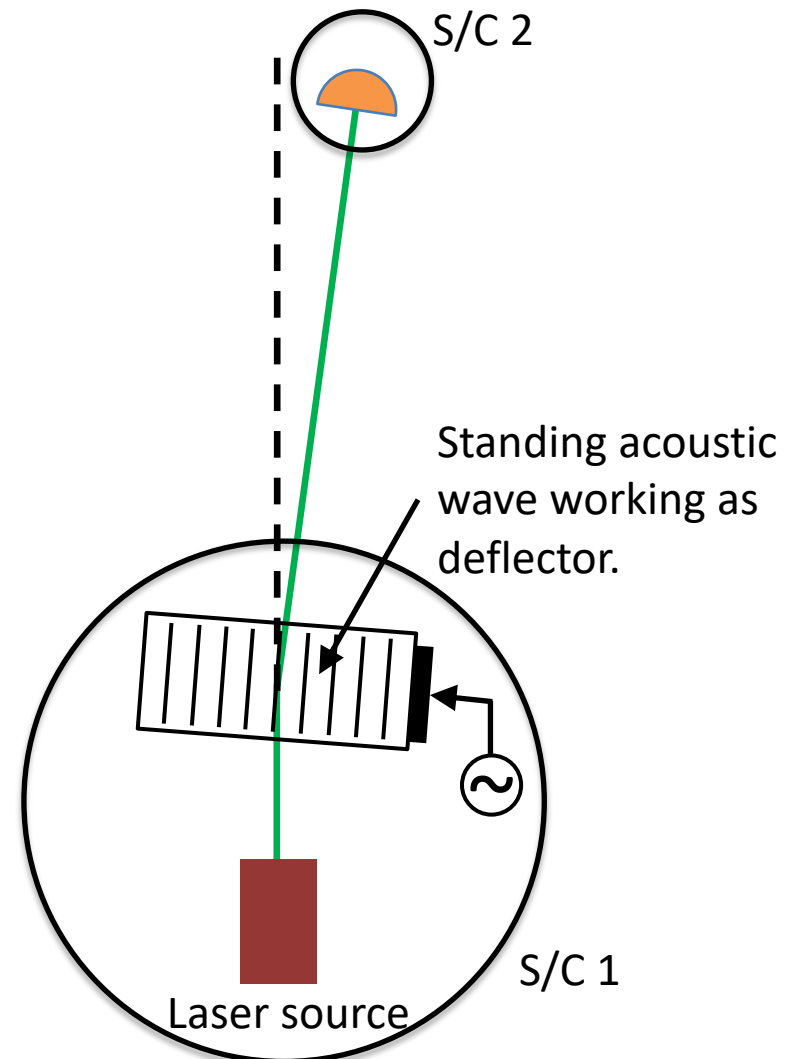
First locking

- One thing which is needed to be demonstrated is control topology changing according to operation phases.
- In locking phase, the mirrors are controlled to follow S/Cs.
- In observation phase, the S/Cs are controlled to follow mirrors.
= Drag free control



First locking

- In each phase, different techniques and schemes will be used.
- For example, AODs technique scanning optical path will be used.



Schematic of AOD tracking technique.

Suspension for mirror in test bench

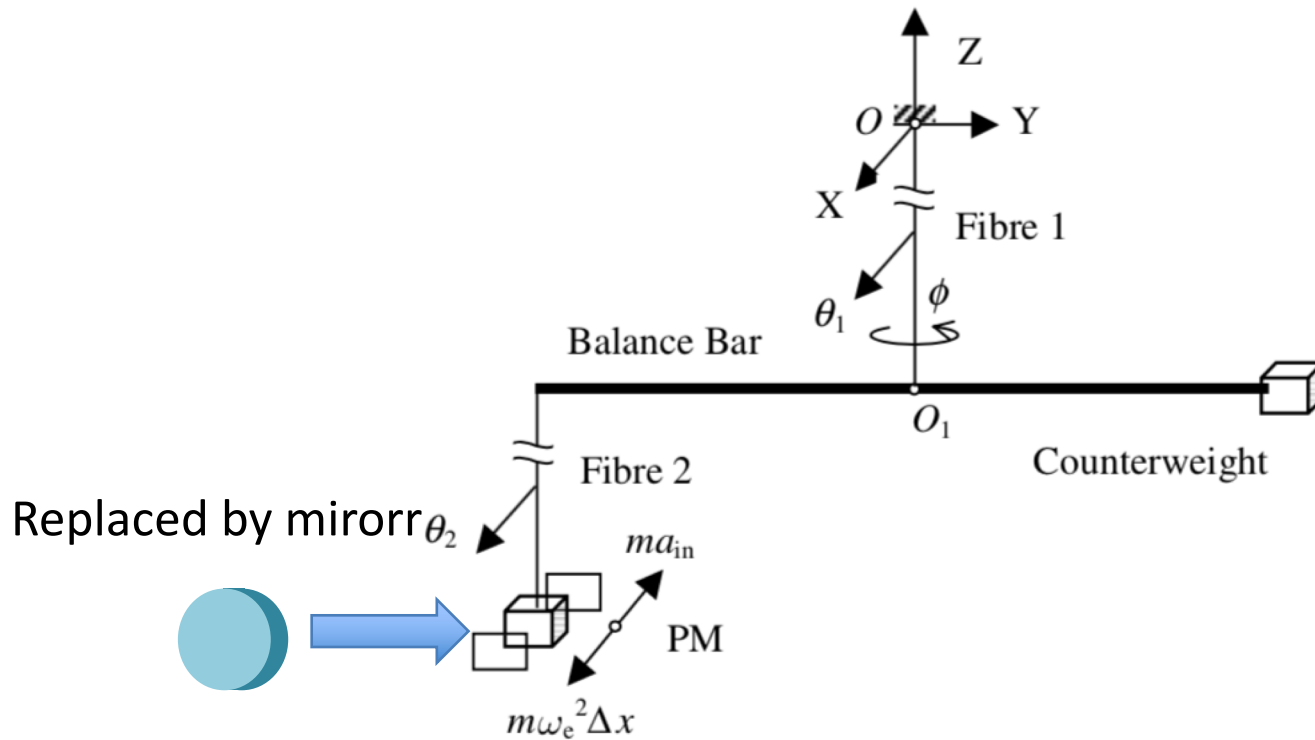


Figure 1. Simplified model of the two-stage torsion pendulum scheme.

System used for development of internal sensor of LISA. (Z B Zhou et al, *CQG* **27** (2010))

SWIM

Compact Gravitational Wave Detector: SWIM_{μν}

■ SWIM_{μν} Torsion Antenna Module

- Sensor module to demonstrate SpW communication
- Observation of **GWs** (Design: $\sim 10^{-7} / \text{Hz}^{1/2}$)
- Monitor the satellite environment as accelerometers

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass
(Size : 80mm cube, Weight : $\sim 500\text{g}$)

Test mass

$\sim 47\text{g}$ Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control

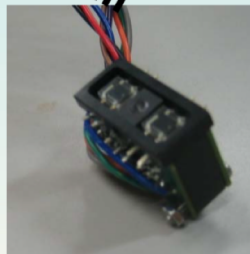
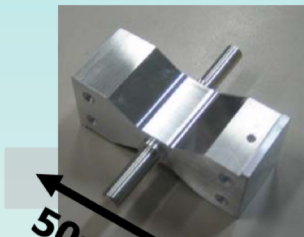
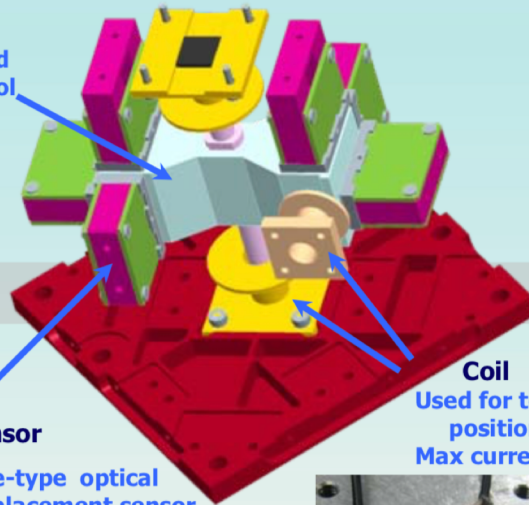


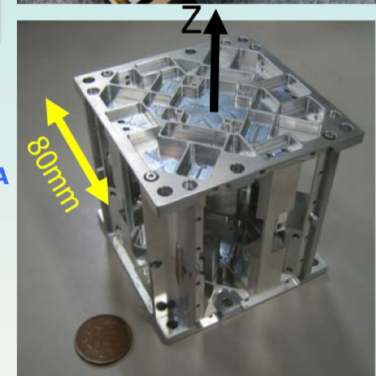
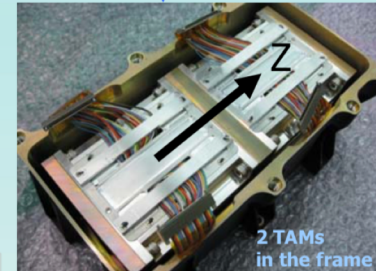
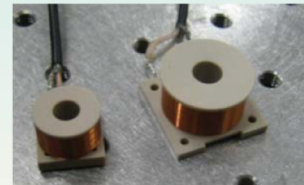
Photo sensor

Reflective-type optical displacement sensor
 $\sim 900\text{nm}$ Infrared LED, 4PDs
Separation to mass $\sim 1\text{mm}$
Sensitivity $\sim 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$
6 PSs to monitor mass motion



Coil

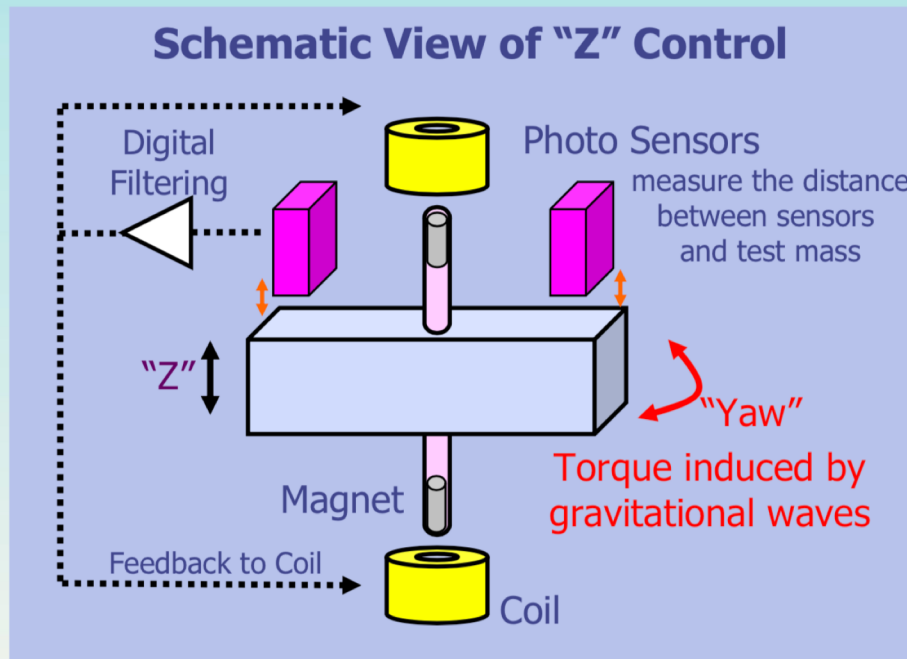
Used for test-mass position control
Max current $\sim 100\text{mA}$



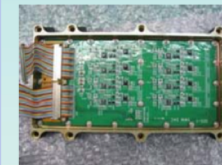
SWIM

Compact Gravitational Wave Detector: SWIM_{μν}

- Test Mass Position Control
 - Vertical ("Z") and rotational ("Yaw") degree of freedom: feedback-controlled
 - The rest four DoF: passively stabilized by magnetic potential
 - Feedback system with digital PID filter implemented on FPGA [11]



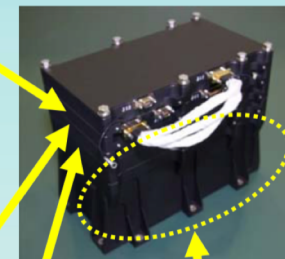
FPGA (Digital Filter) and SpaceWire I/F



DACs and Coil drivers

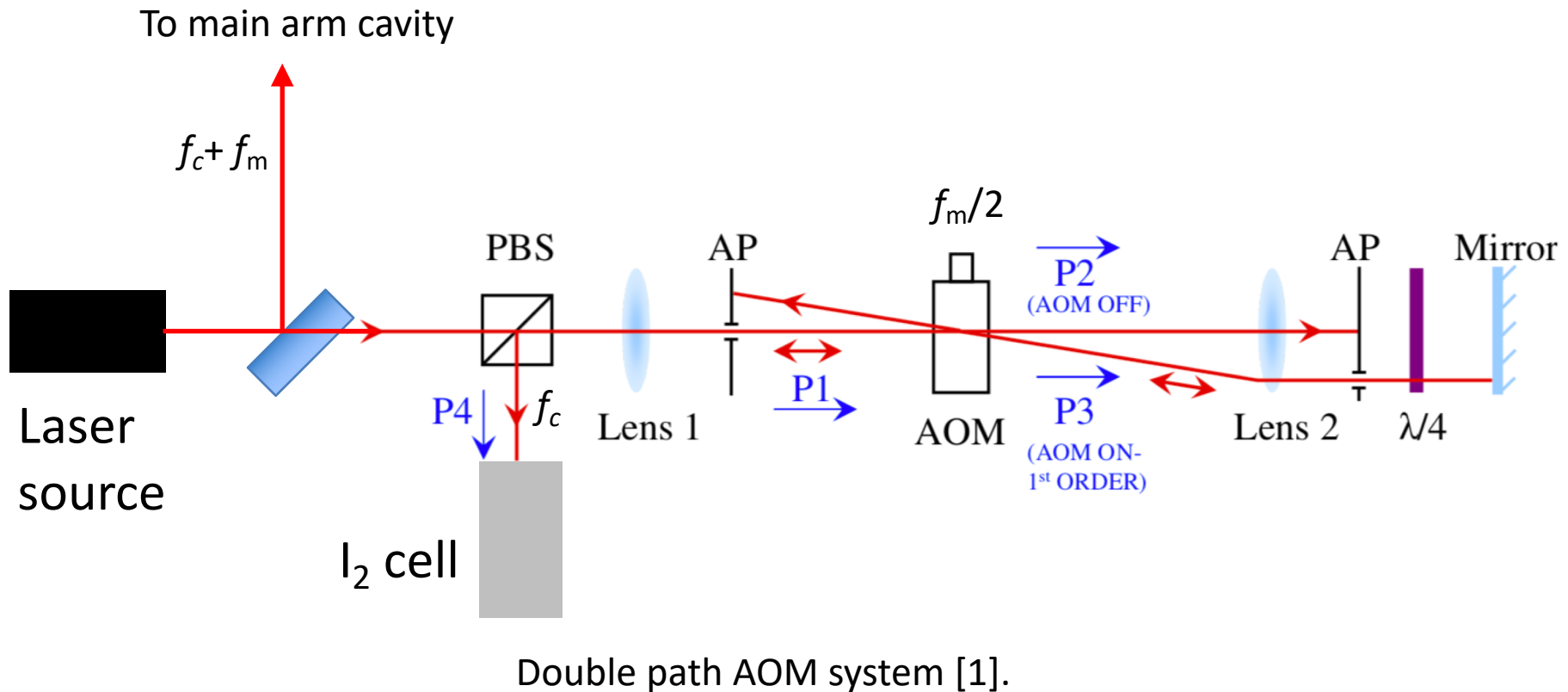


ADCs and Multiplexers



Two Torsion Antenna Modules assembled

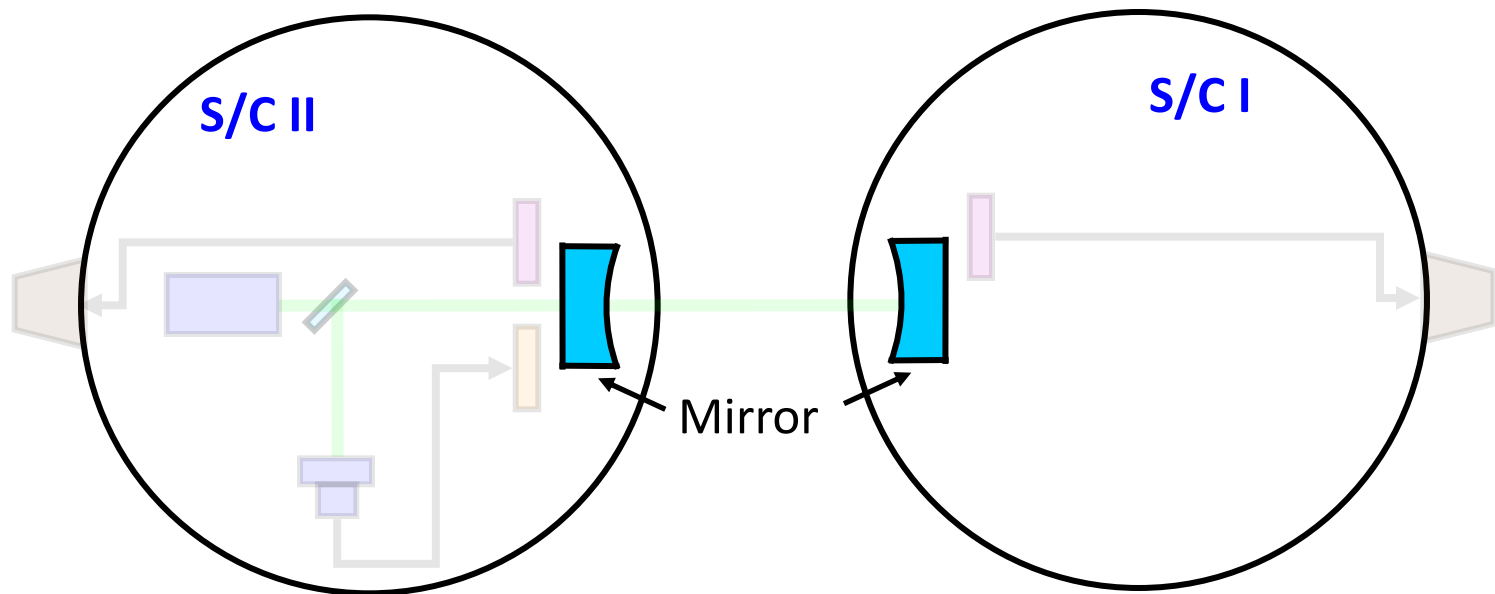
Frequency shift



[1] D. J. McCarron, "A Guide to Acousto-Optic Modulators"

Drag-free control

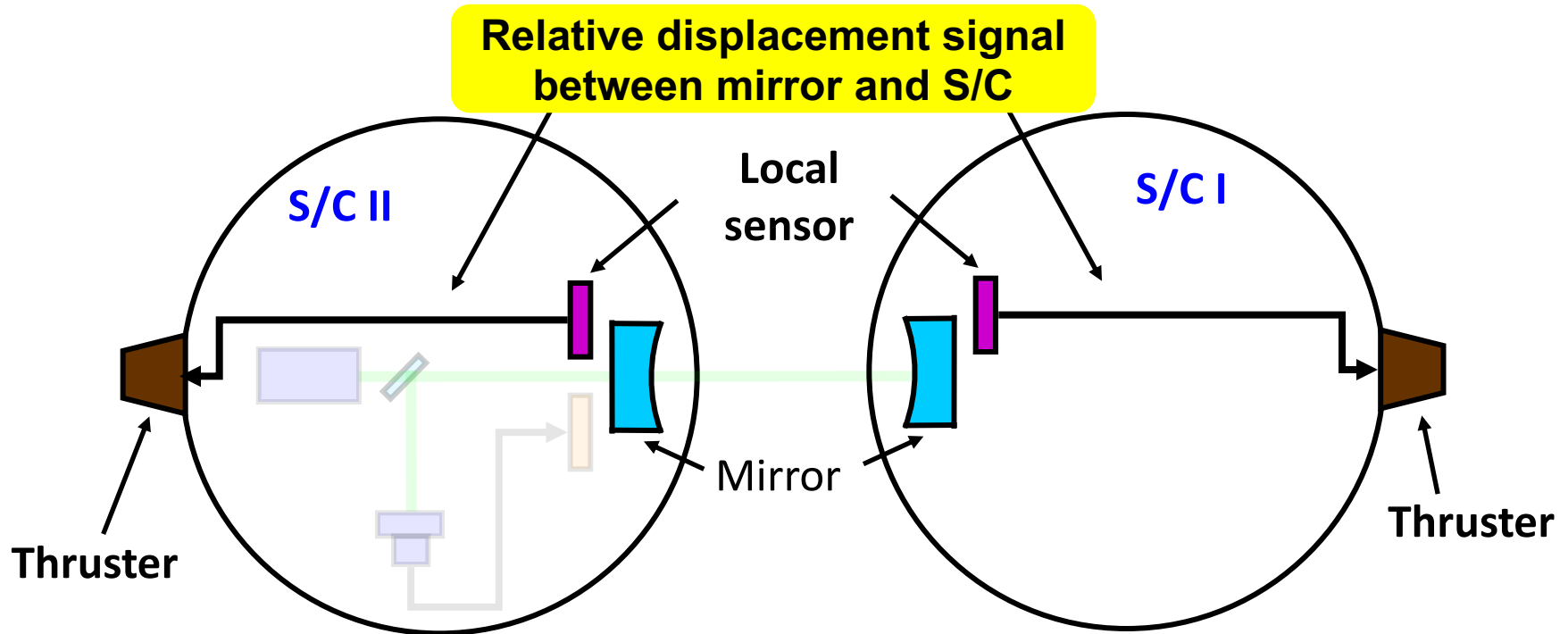
- Does a drag-free S/C consort with an optical cavity?



Made by S. Kawamura.

Drag-free control

- Does a drag-free S/C consort with an optical cavity?



Made by S. Kawamura.

Drag-free control

- Does a drag-free S/C consort with an optical cavity?

