

干渉計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。
- 現在、双方向Fabry-Perot干渉計+その他の制御(ドラッグ・フリー制御)の運用可能性について、シミュレーション・実験の双方から検討を進めている。
- 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)

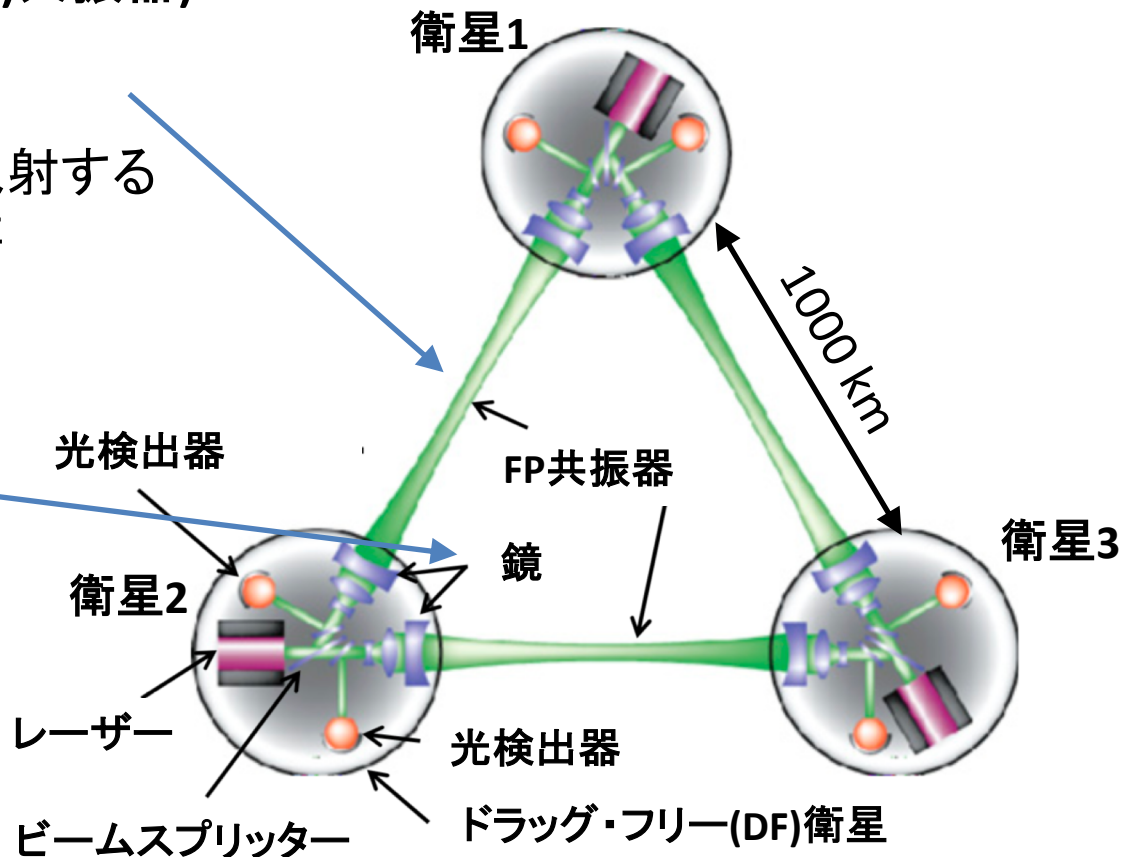
- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

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)

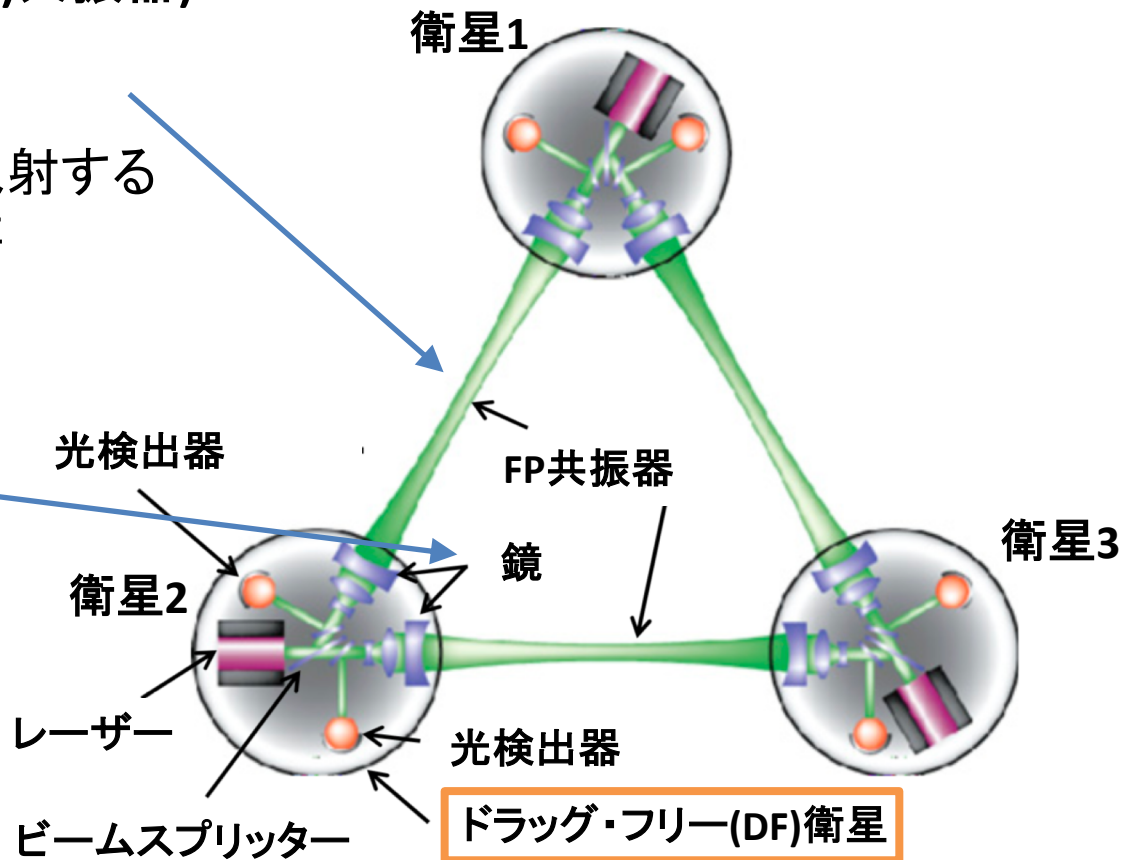
- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡

- 質量: 100 kg

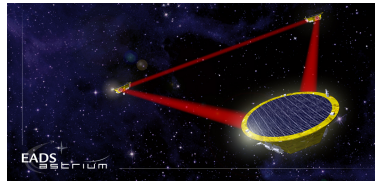
レーザー

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

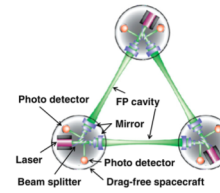


DECIGOの予備概念設計 (S. Kawamura+, CQG, 2011)

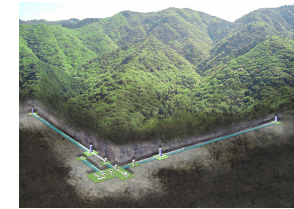
DECIGOとLISAとKAGRA



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)

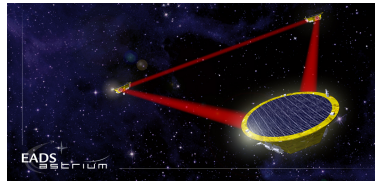
DF制御

必要

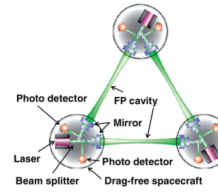
必要

不要

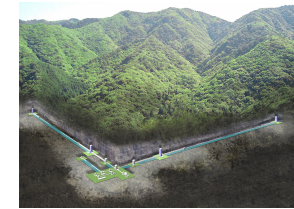
DECIGOとLISAとKAGRA



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нда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)

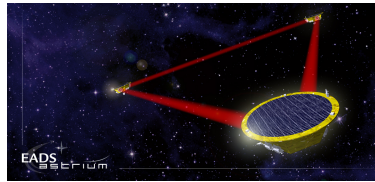
DF制御

必要

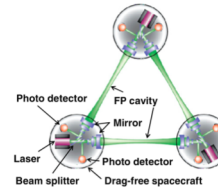
必要

不要

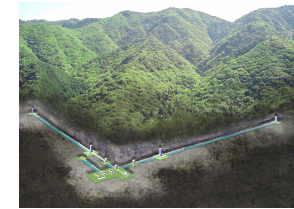
DECIGOとLISAとKAGRA



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

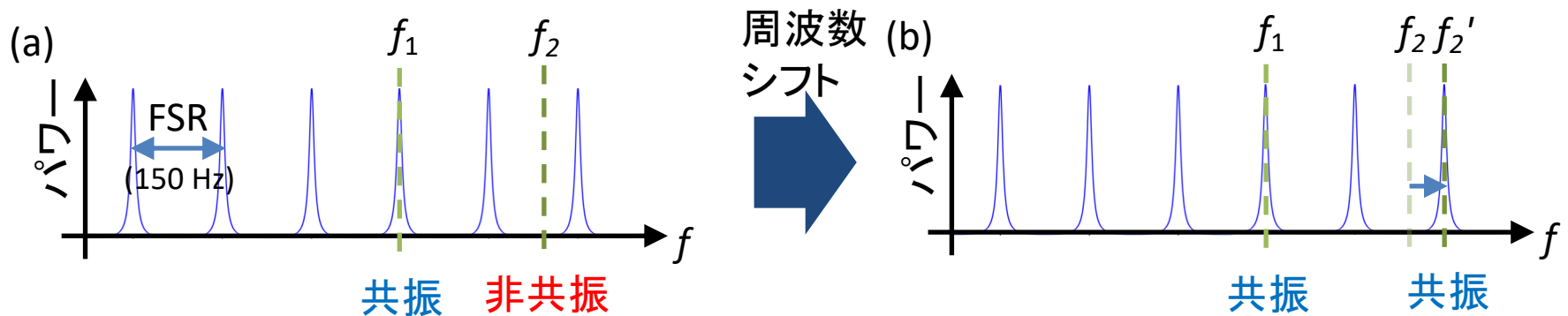
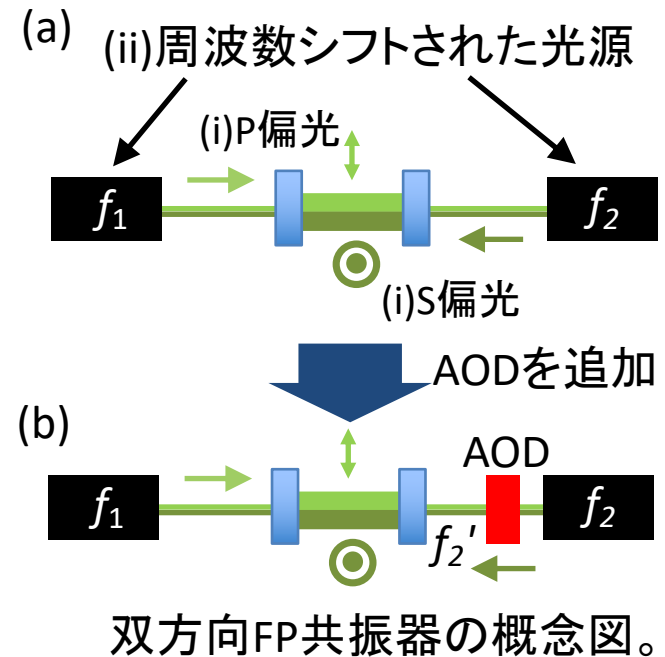
双方向Fabry-Perot干渉計

- 特徴

- 1つの腕共振器を2つの光が共有する。
- 2つの光は、(i)偏光と(ii)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)。



腕共振器内のパワーのイメージ図。

双方向Fabry-Perot干渉計

- 検討事項

- 干渉計制御の詳細。(そもそも干渉計制御のトポロジーが決まっていない。)
 - 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。
- 超長基線共振器に関する問題

- 前者2つの事項の検討のために、試験用プラットフォームを構築する必要がある。

- 1つ目の制御方法の検討では理論検討も必要。
- 2つ目は理論的予想は難しい。

双方向Fabry-Perot干渉計

- 検討事項

- 干渉計制御の詳細。(そもそも干渉計制御のトポロジーが決まっていない。)
 - 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。
- 超長基線共振器に関する問題

- 前者2つの事項の検討のために、試験用プラットフォームを構築する必要がある。
 - 1つ目の制御方法の検討では理論検討も必要。
 - 2つ目は理論的予想は難しい。

双方向Fabry-Perot干渉計

- 検討事項

- 干渉計制御の詳細。(そもそも干渉計制御のトポロジーが決まっていない。)
 - 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。
- 超長基線共振器に関する問題
- 前者2つの事項の検討のために、試験用プラットフォームを構築する。
 - 1つ目の制御方法の検討では理論検討も必要。
 - 2つ目は理論的予想は難しい。

双方向Fabry-Perot干渉計

- 検討事項

- 干渉計制御の詳細。(そもそも干渉計制御のトポロジーが決まっていない。)
 - 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。

- 超長基線共振器に関する問題

- 前者2つの事項の検討のために、試験用プラットフォームを構築する。

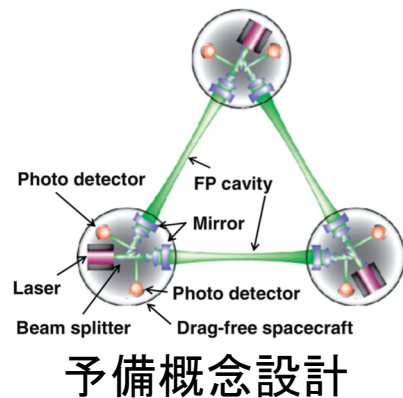
- 1つ目の制御方法の検討では理論検討も必要。

- 2つ目は理論的予想は難しい。

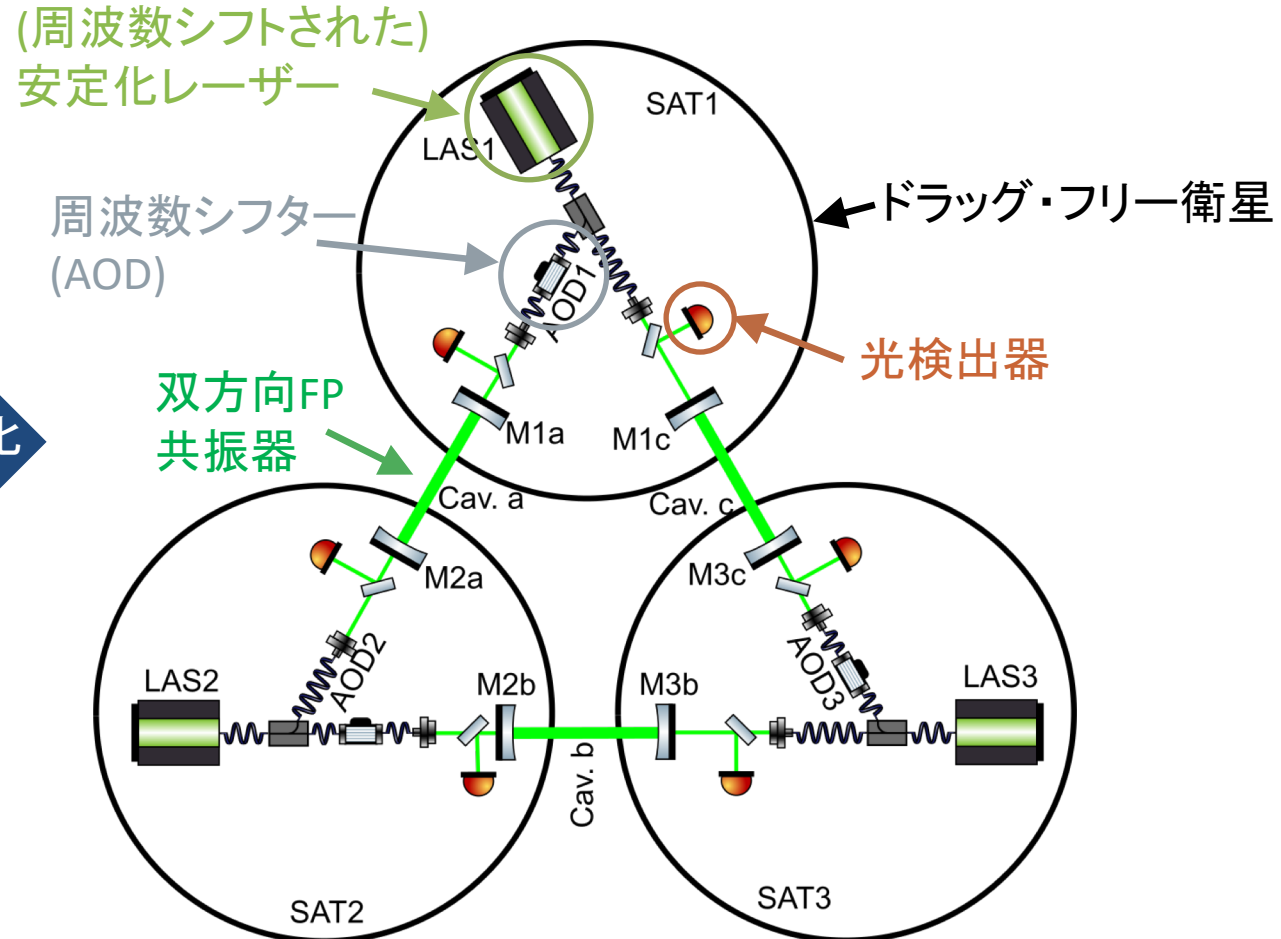
まず長さ制御について検討

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



(注: いくつかの要素は省略している。)

周波数シフトされたレーザー

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。

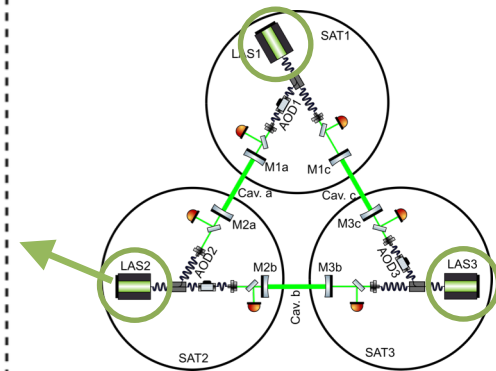
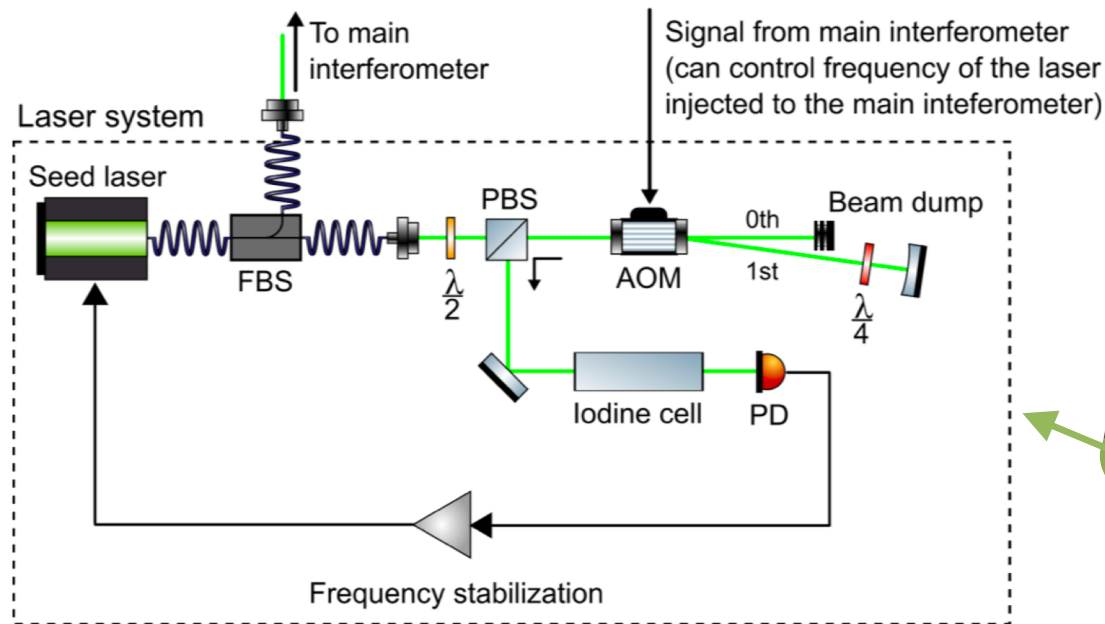
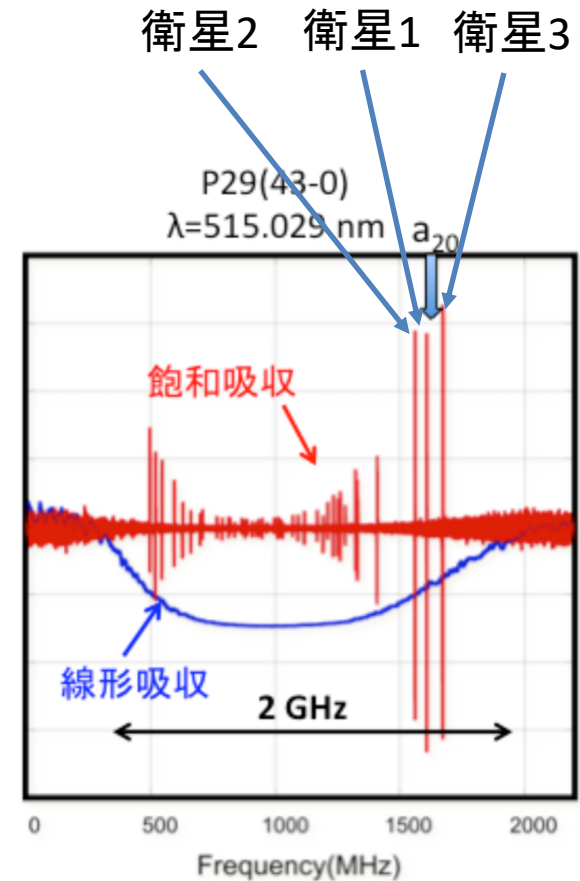


図2 ダブルパス AOM 等を用いたレーザー周波数安定化の概略図。FBS, fiber beam splitter; hogehoge.

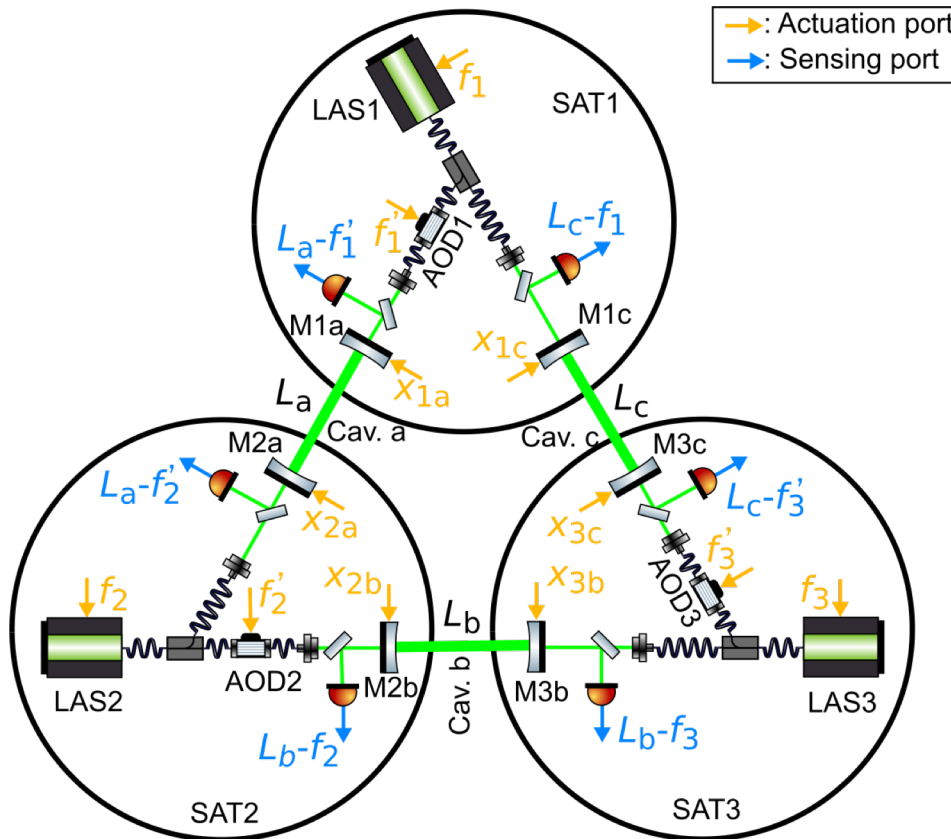
周波数シフトされたレーザー

- ところで、これをやると、長期安定度がAOMの安定度によって決まってしまう。
(正確にはAOMを駆動するドライバの周波数の安定度)
- 多少のS/Nを犠牲にして、ヨウ素セルの違う飽和吸収線に制御することは出来ないか。



ヨウ素セルの分光信号。(DECIGO/Pre-DECIGOのための安定化光源、末正+ (第16回宇宙科学シンポジウム))

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)

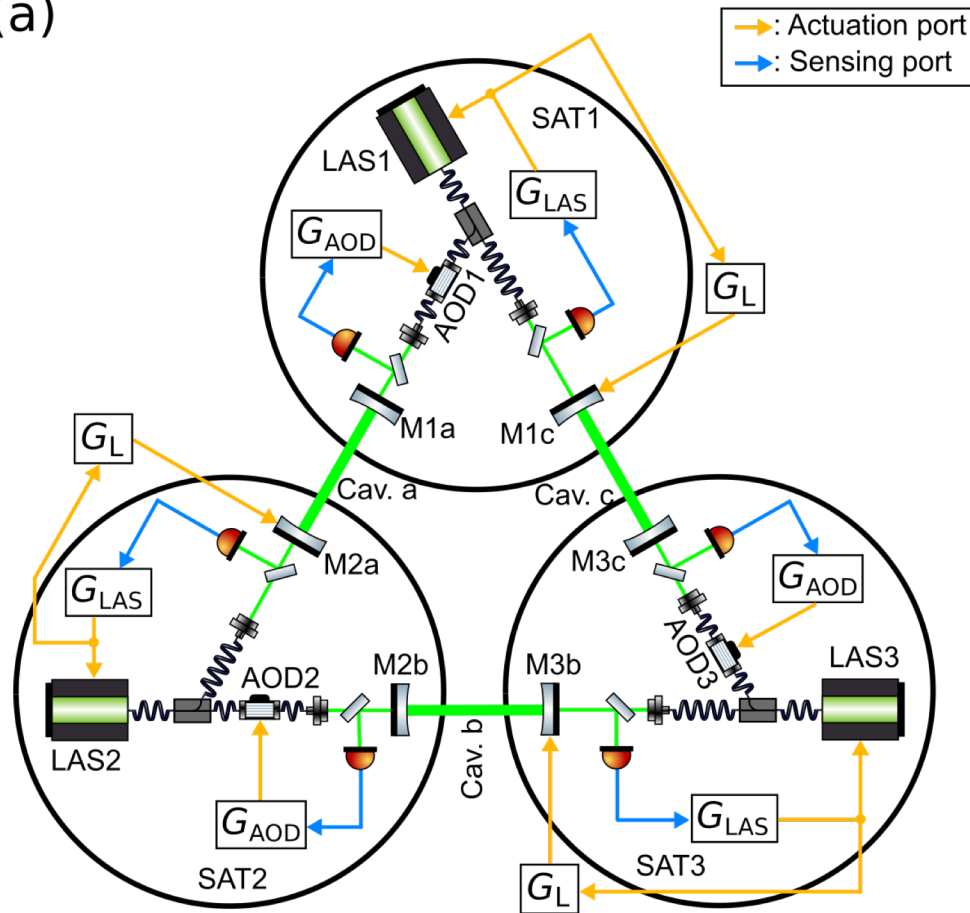
— 鏡の位置 (例: x_{1a})

(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。)

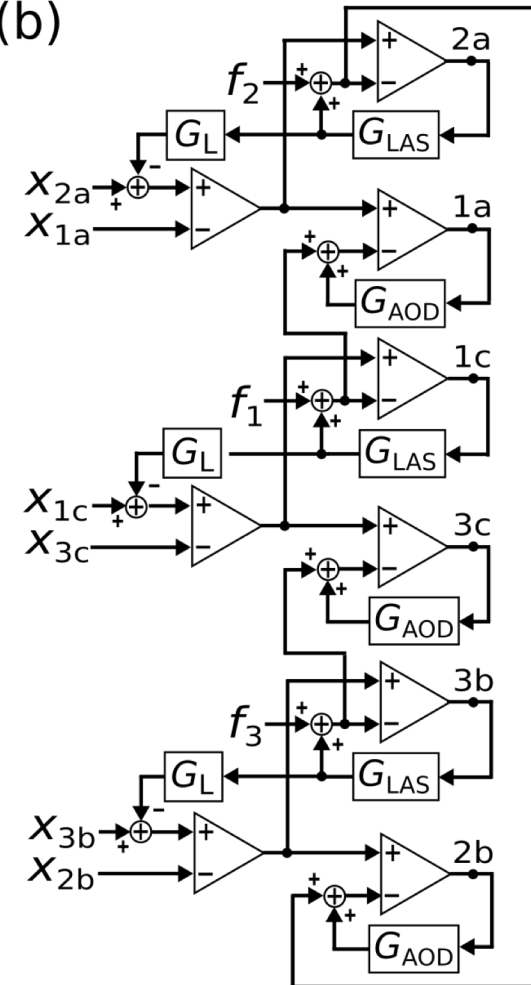
制御トポロジー

• 考えられる制御トポロジーの例

(a)



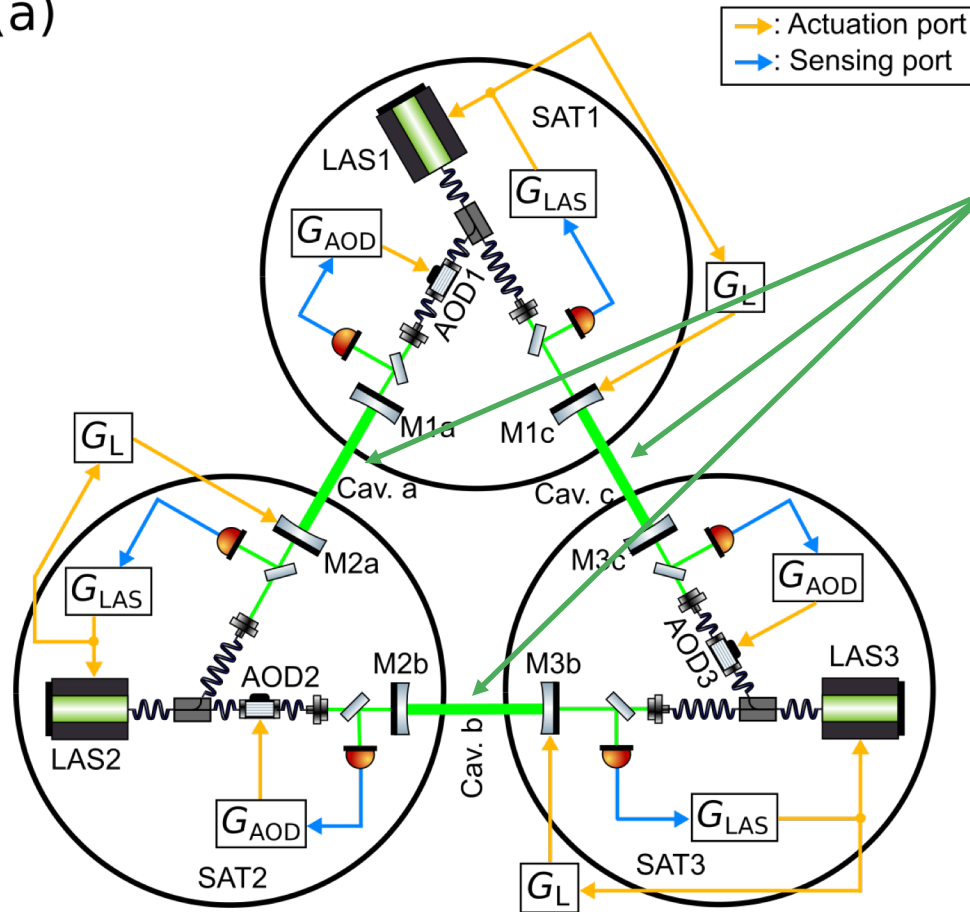
(b)



制御トポロジー

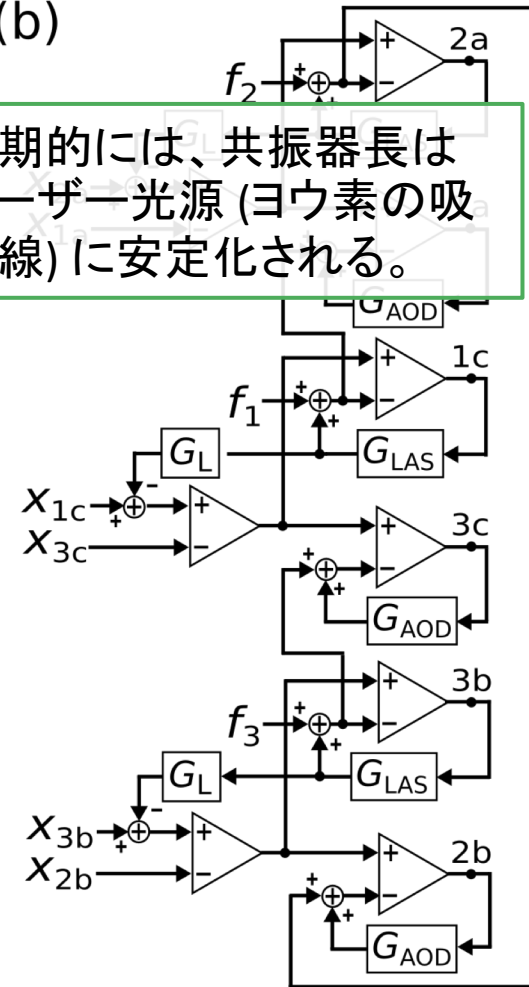
• 考えられる制御トポロジーの例

(a)



(b)

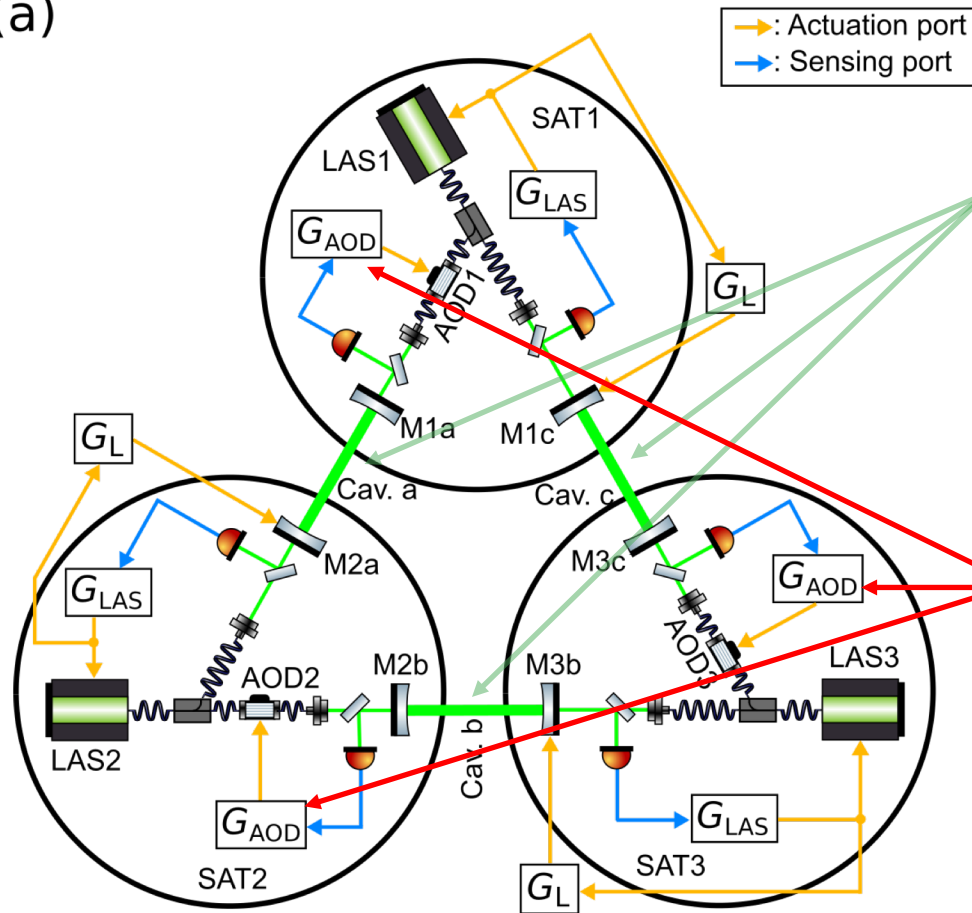
長期的には、共振器長はレーザー光源 (ヨウ素の吸収線) に安定化される。



制御トポロジー

• 考えられる制御トポロジーの例

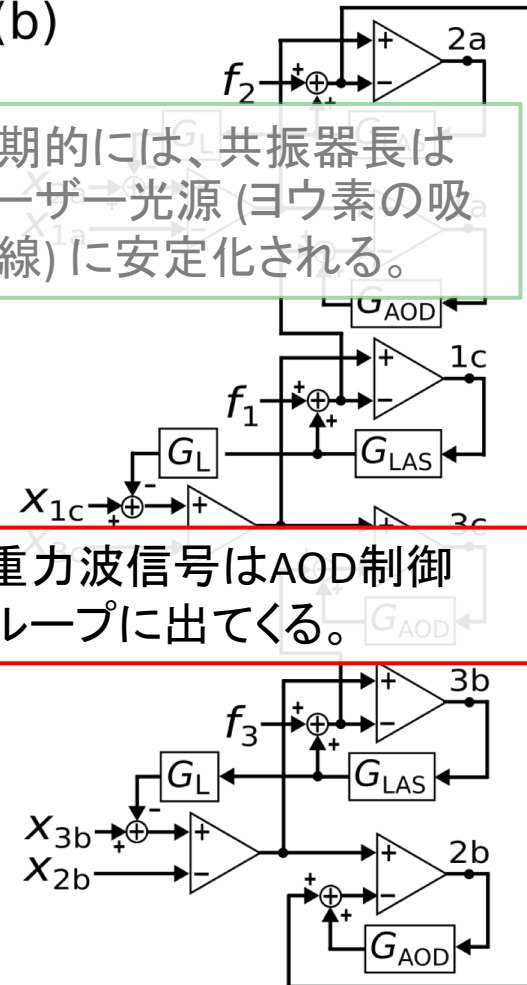
(a)



(b)

長期的には、共振器長はレーザー光源 (ヨウ素の吸収線) に安定化される。

重力波信号はAOD制御ループに出てくる。



共振器の長さ制御

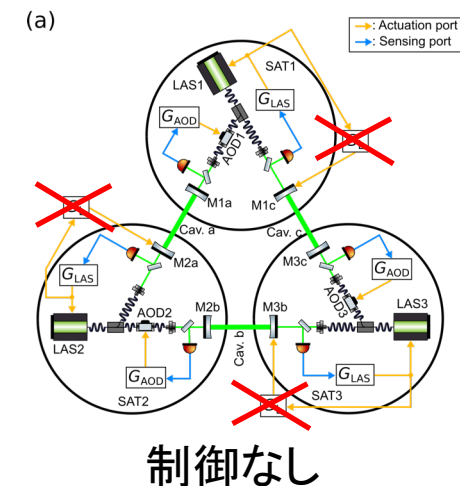
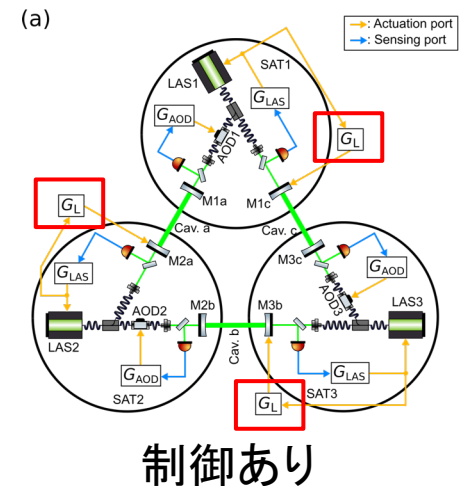
• ところで、共振器長制御は必要か？

–制御する場合

- Good: 共振器長が安定する (=もう一方の共振器制御に使うAODのレンジが小さくて良くなる [=雑音が小さくなる])
- Not Good: (DF制御を介して) 常に衛星のスラスターを吹かなくてはならない (=ミッション期間が短くなる?)

–制御しない場合

- Good: (よい軌道があれば) スラスターを吹かなくても良い。
- Not Good: AODにもGHzのレンジが必要 (=雑音が大きくなる)

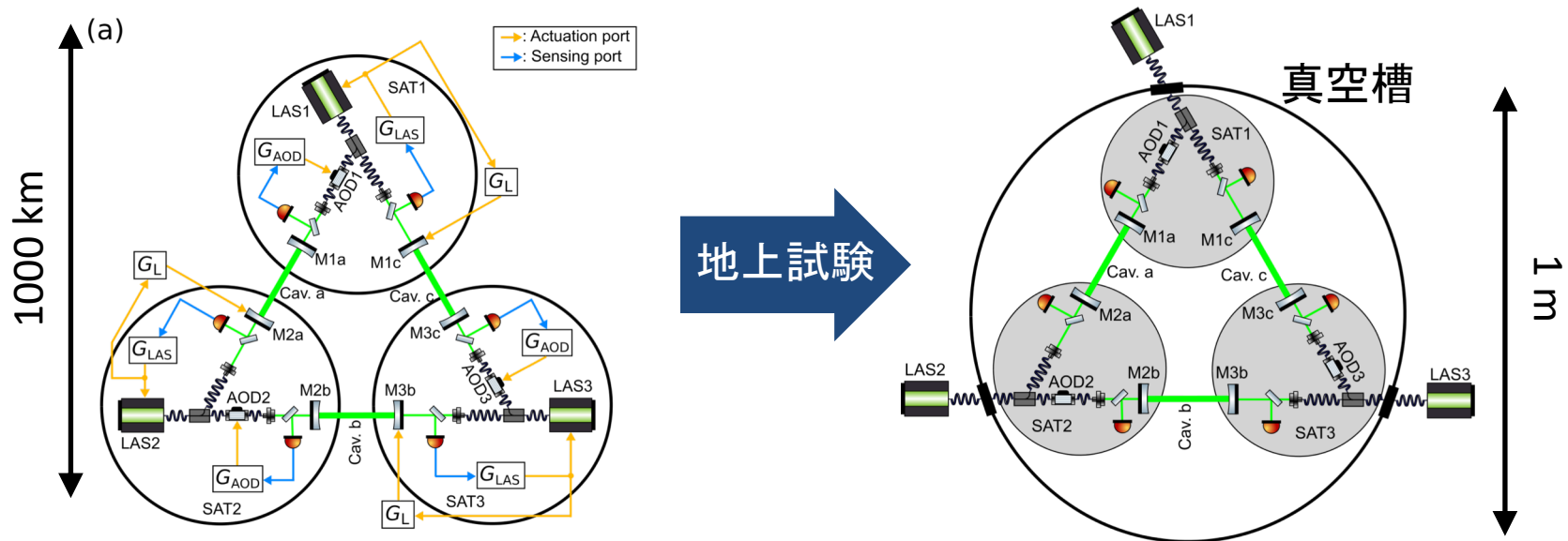


目次

1. DECIGO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

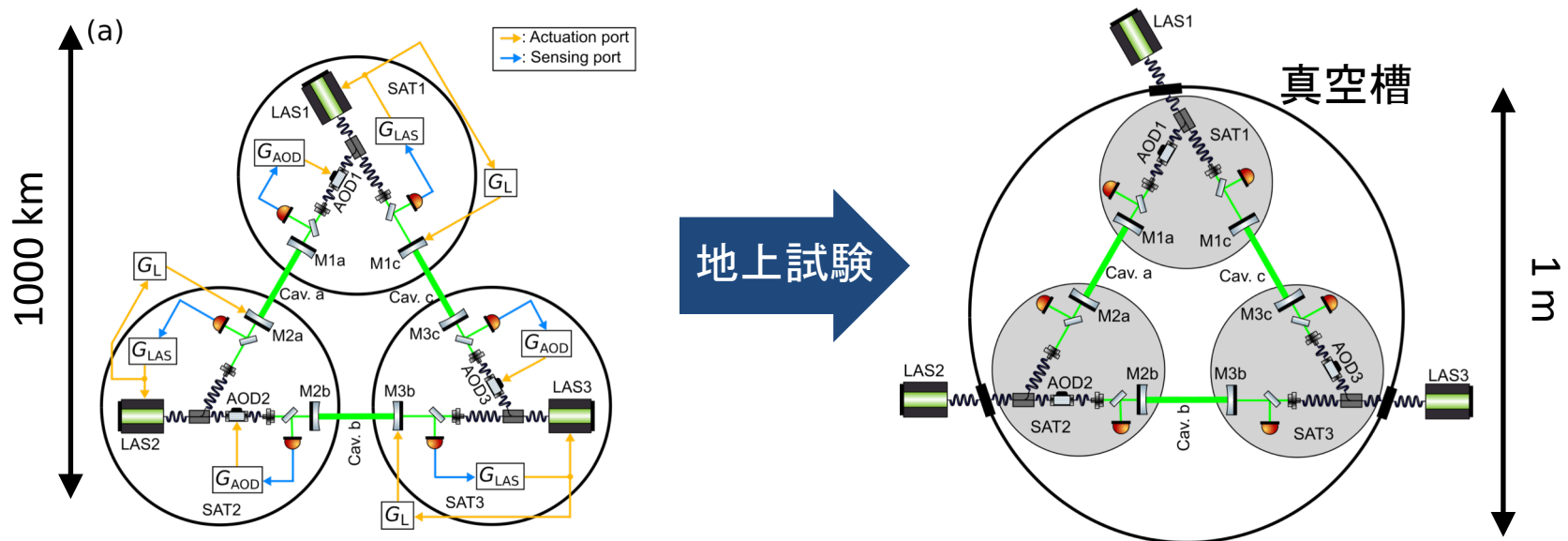
干渉計統合試験用プラットフォーム

- 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

- 目的:
 - DECIGO/B-DECIGOの干渉計運用を実証する。
 - 制御、初期アライメント、雑音の評価を含む。
 - (Option) 要素技術の地上での統合試験を行い、それらが軌道上で運用可能であることを示す。



試験項目

- (最初は)S/C間の初期捕捉後から、干渉計オペレーションまでの実証を行う。
 - これが出来たら初期捕捉も含めて試験を行う。
- 1. 重力波観測運用の実証 (干渉計+衛星)
 - 検討した制御の実験実証や雑音の検証
- 2. 干渉計初期アラインメント手順
- 3. 自由鏡のアラインメント方法
- 4. 開発された要素技術を導入した統合試験

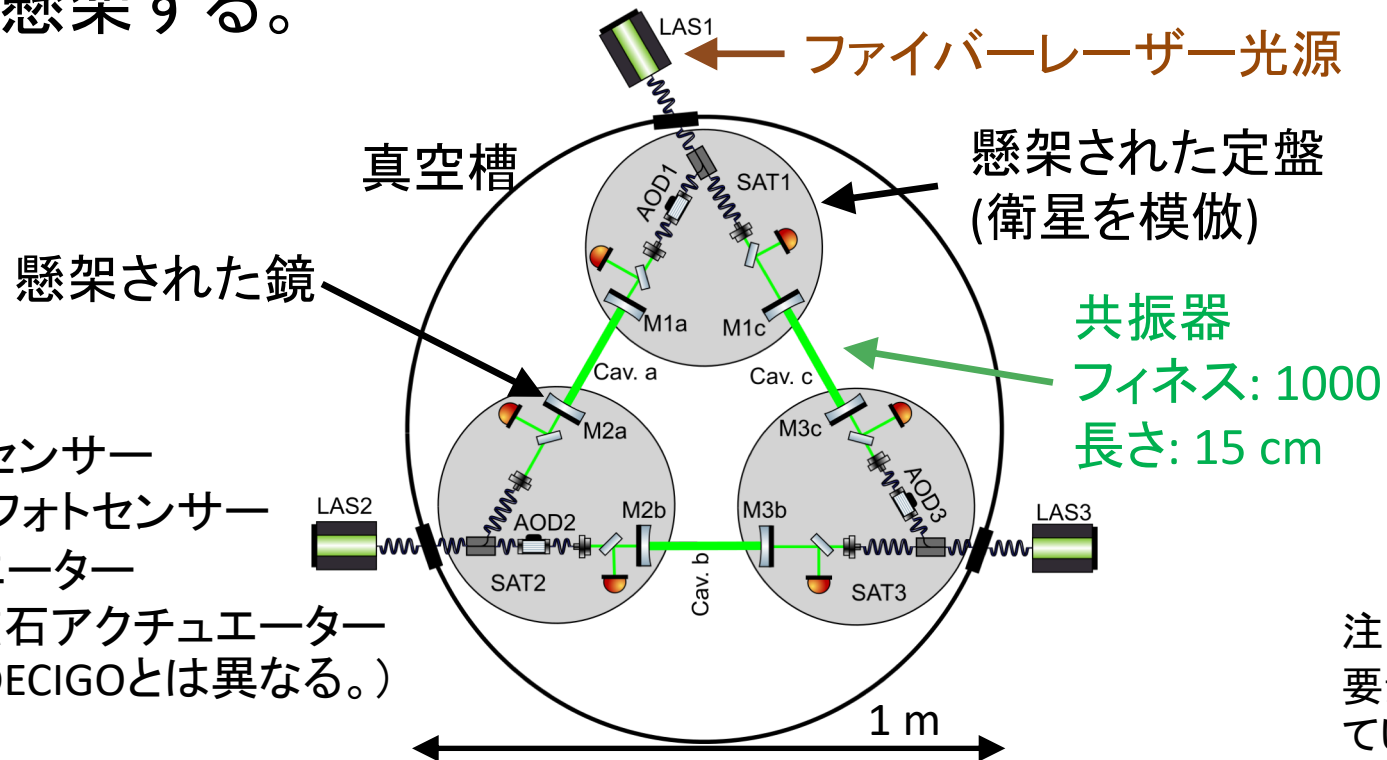
プラットフォーム構築計画

- 2018年9月まで
 - 概念設計 (済)
- 2018年12月まで
 - 物品調達 (機械系は完了)
 - 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
 - (Option) 懸架系改良

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

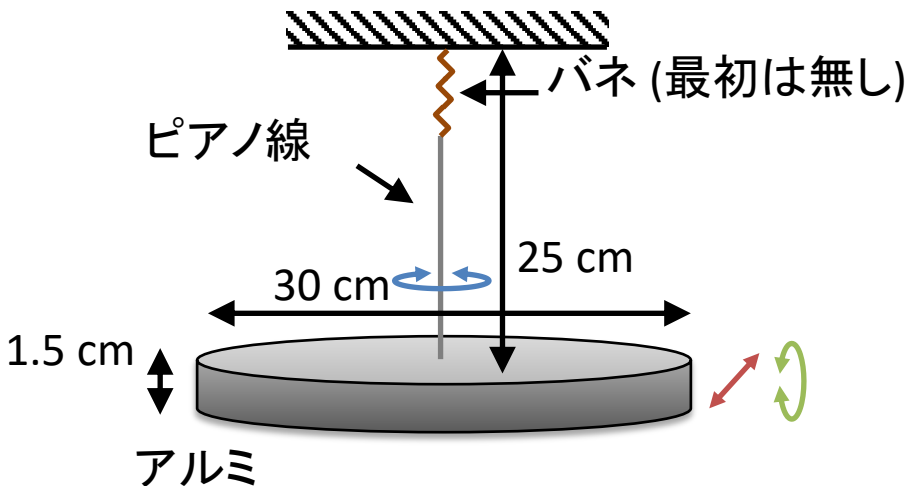
- 干渉計の制御トポロジーは実際の検出器と同じ。
 - ドラッグフリー制御を含む
- 宇宙空間を模するために、各自由度をできるだけ柔らかく懸架する。



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

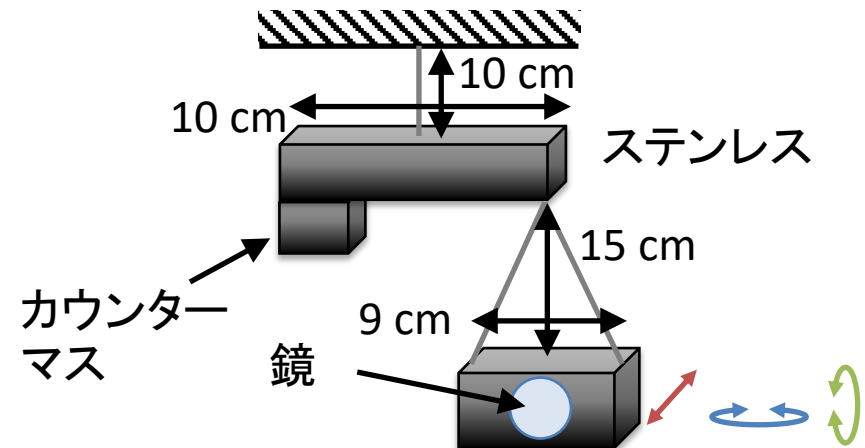
• 光学定盤懸架系



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

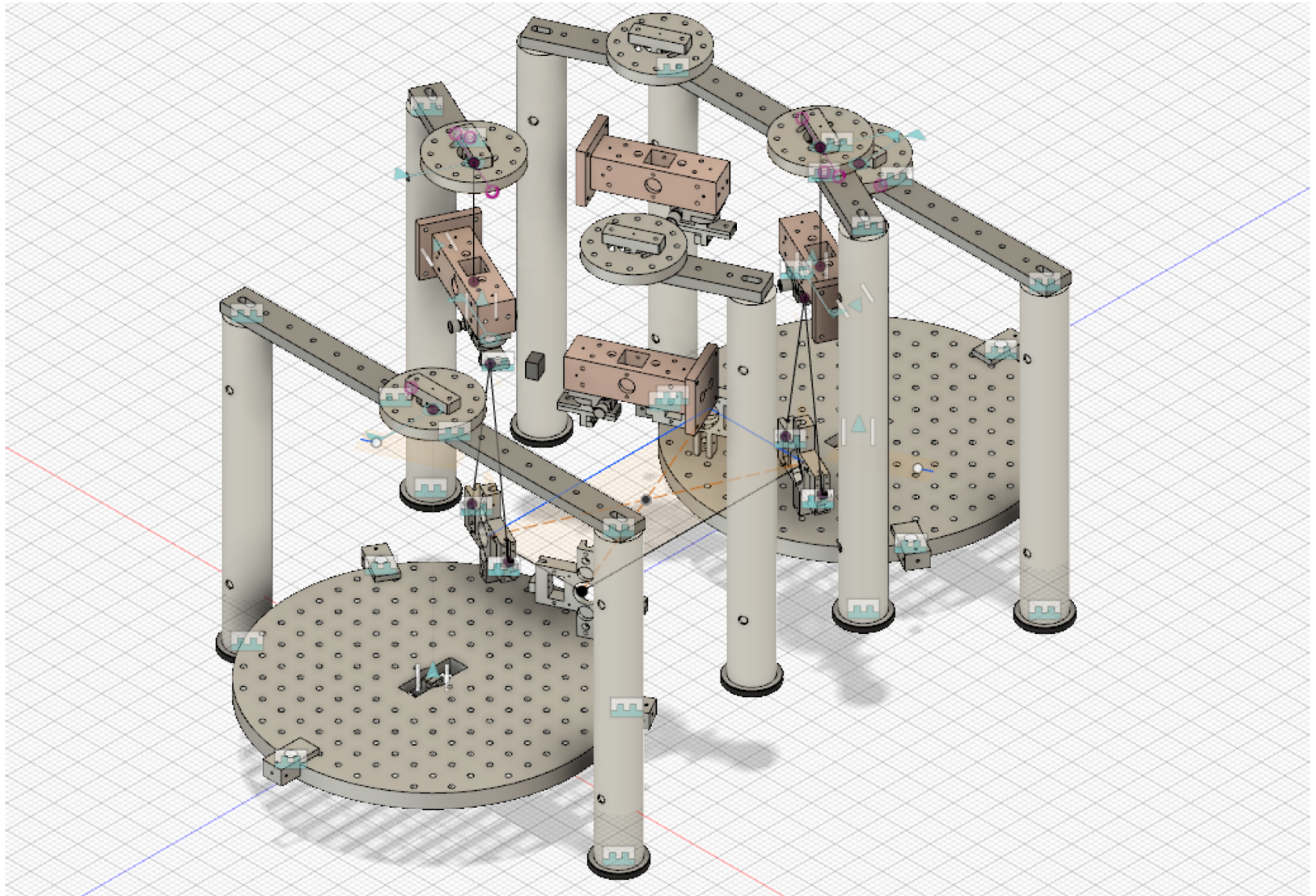
• 鏡懸架系



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



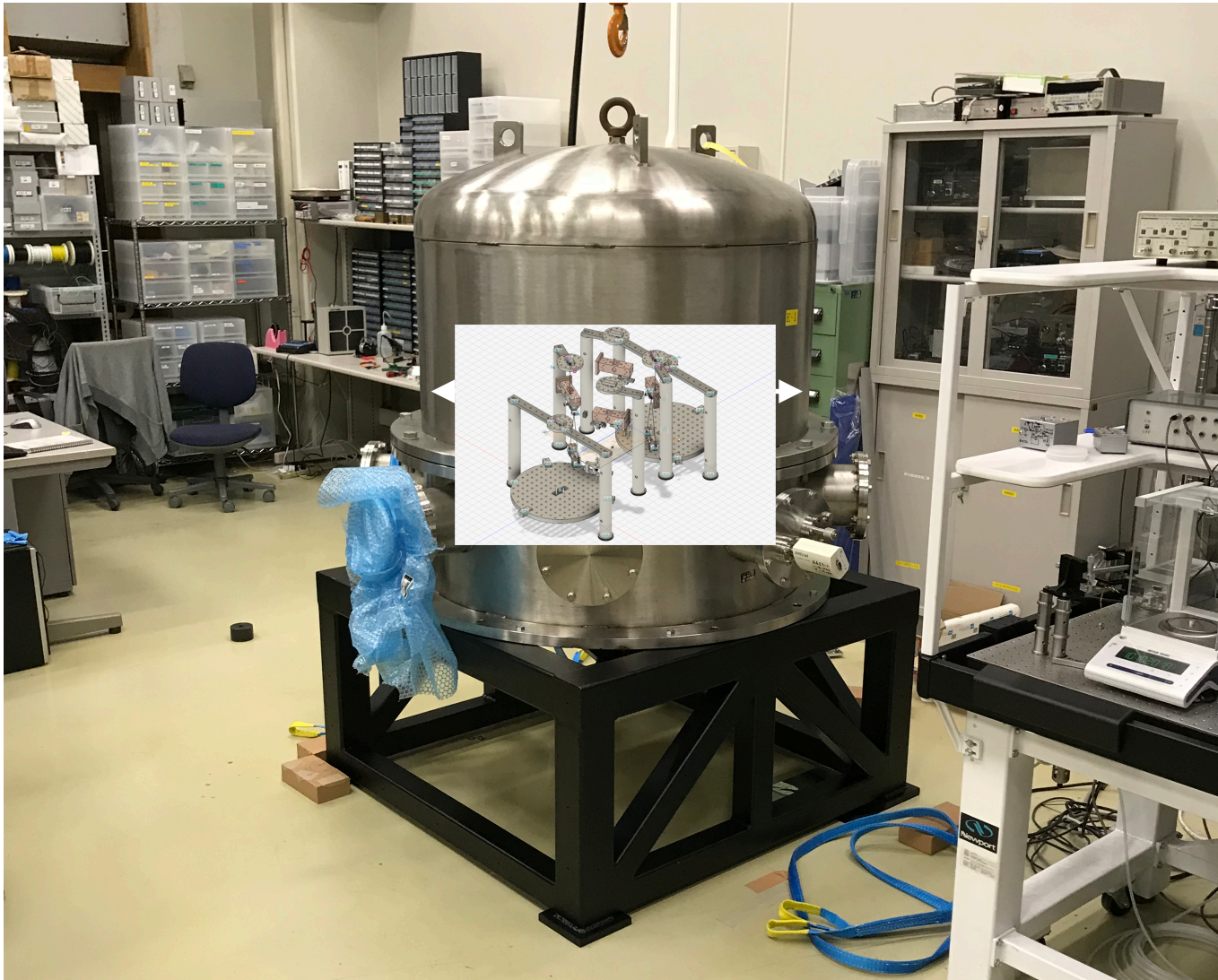
構築計画

- 2018年9月まで
 - 概念設計 (済)
- 2018年12月まで
 - 物品調達 (機械系は完了)
 - 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
 - (Option) 懸架系改良

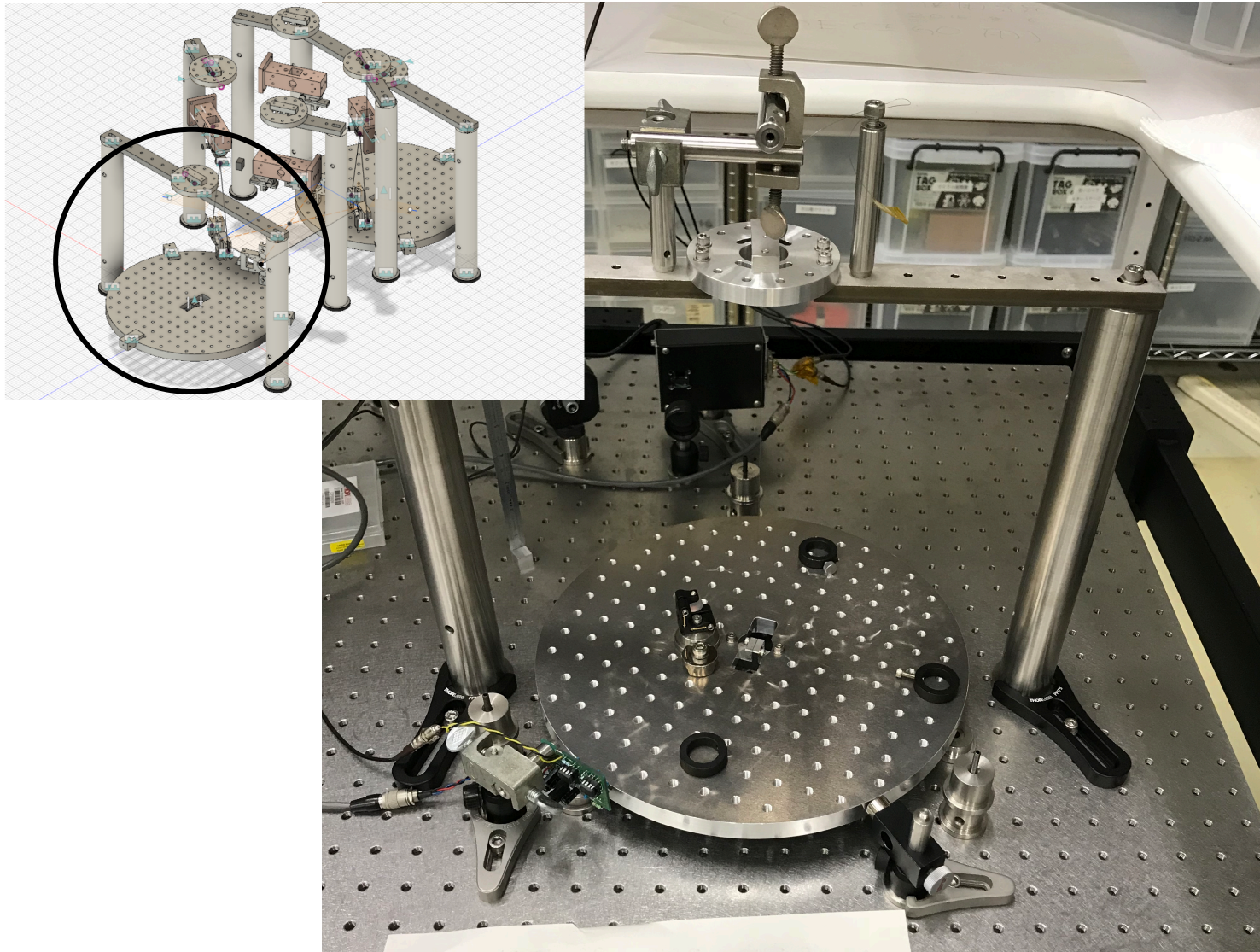
建設予定地



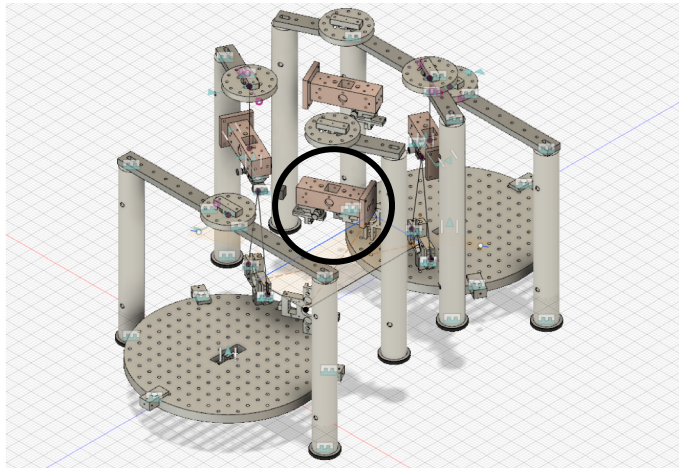
建設予定地



光学定盤懸架系



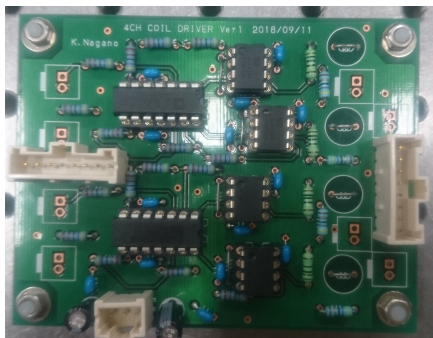
鏡懸架系



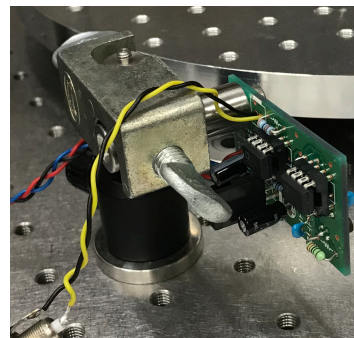
アセトン洗浄したもの

他の物品調達

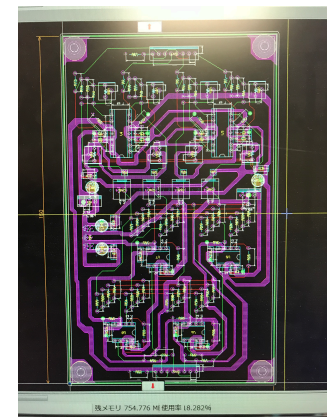
- 光学部品
 - 光源は(一応)ある。
 - 他の光学部品は~1/5くらいある。
- 制御系 (最初はアナログ)
 - 多くの制御回路用基板は発注済 (要はんだ付け)。
 - ローカルセンサー (フォトセンサー) も発注済。
 - アクチュエーター用コイルはまだ。



コイルドライバー基板。



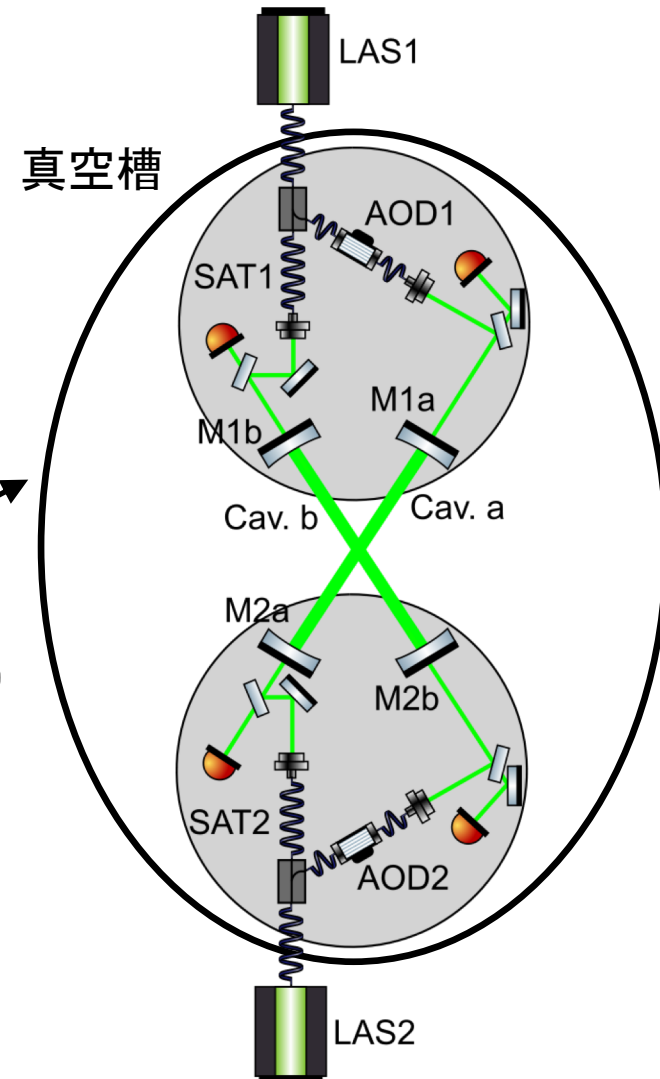
フォトセンサー基板。



行列演算用基板の図面。

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 (機械系は完了)
 - 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
 - (Option) 懸架系改良

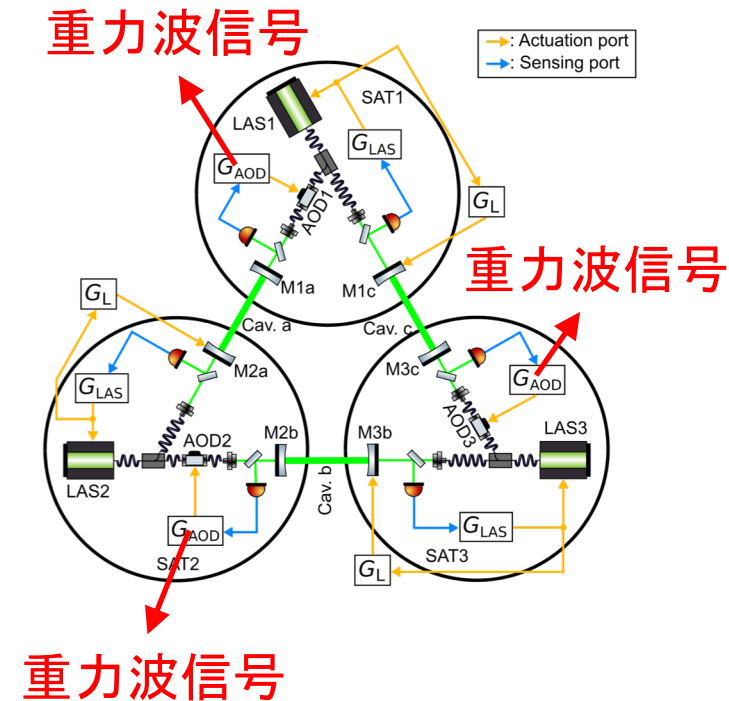


目次

1. DECIGO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いる。
 - 概念設計は完了し、物品調達中。
 - 今後は、懸架系組み立て・性能評価から始める。



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。(AODの雑音が厳しそう。)
- 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

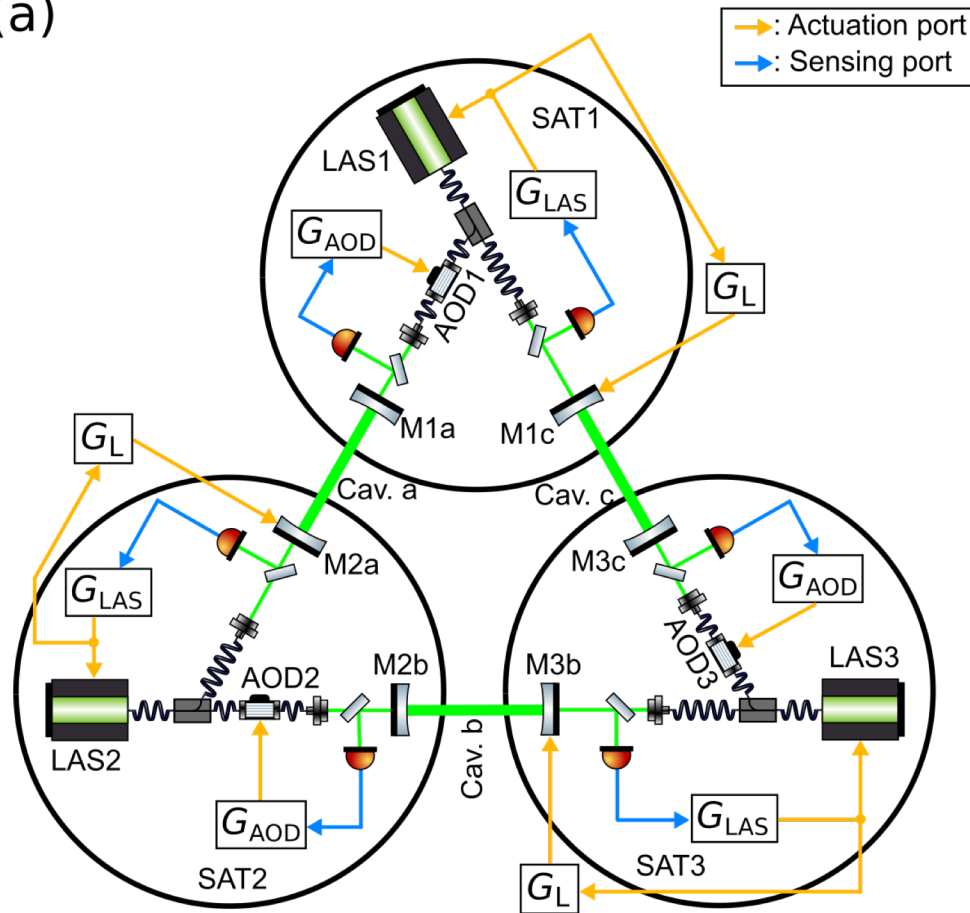
- DECIGOで採用される予定の双方向Fabry-Perot干渉計の長さ制御がブロック図上では成立することを示した。
- ただし、ドラッグ・フリー制御との両立可能性等については今後検討が必要である。
- DECIGOの干渉計部分の試験用プラットフォームの設計が完了し、構築を進めている。
- 今年度末には、干渉計試験を始める予定。

Appendix

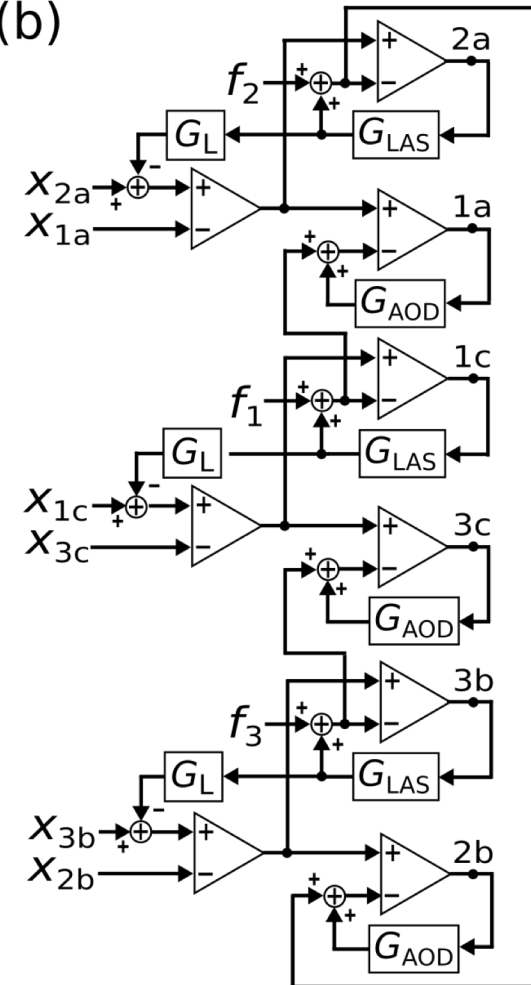
制御トポロジー

• 考えられる制御トポロジーの例

(a)

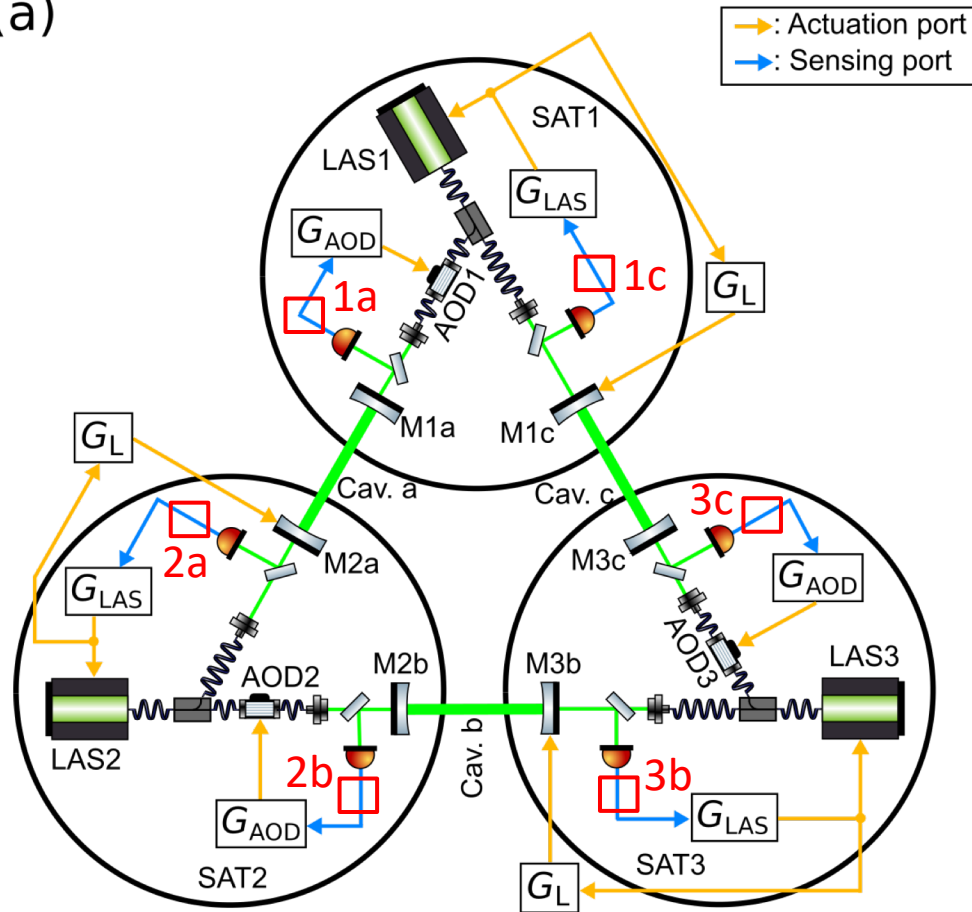


(b)

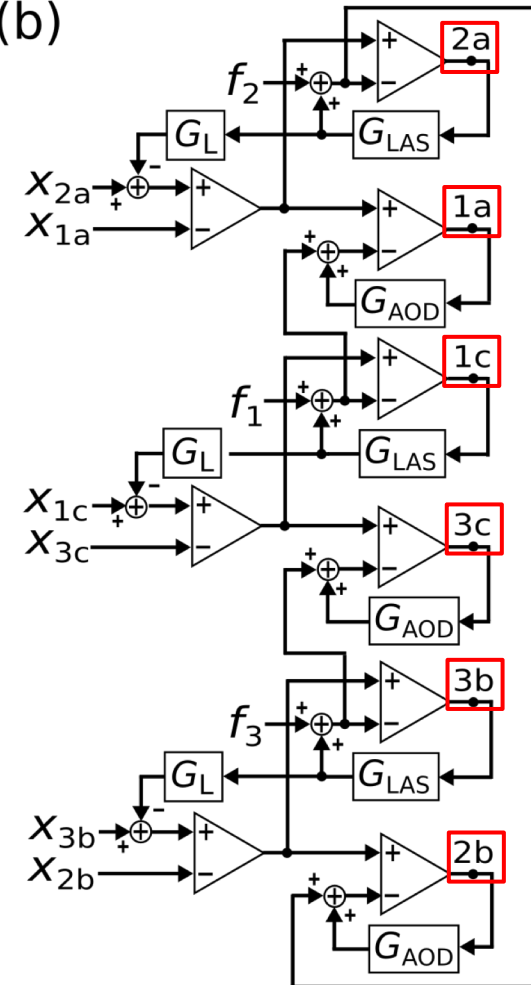


・考えられる制御トポロジーの例

(a)



(b)

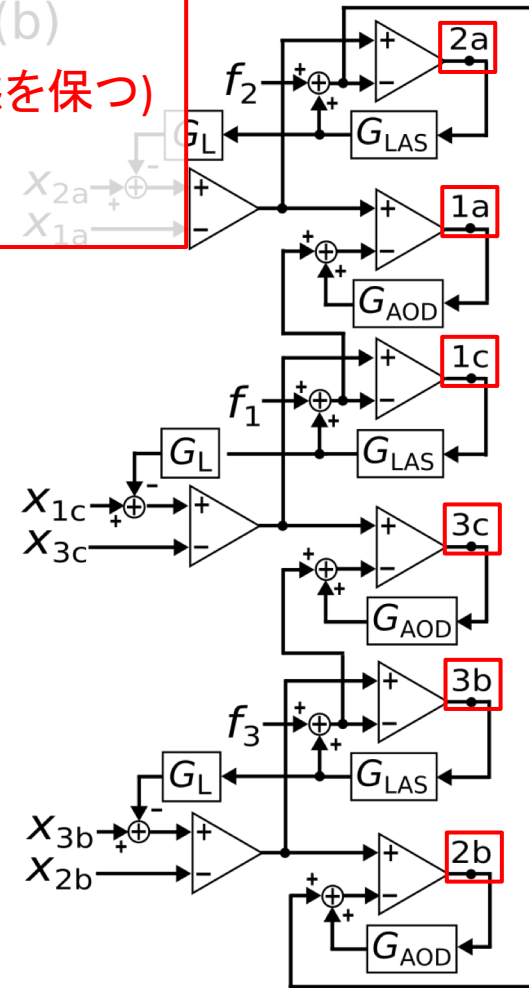
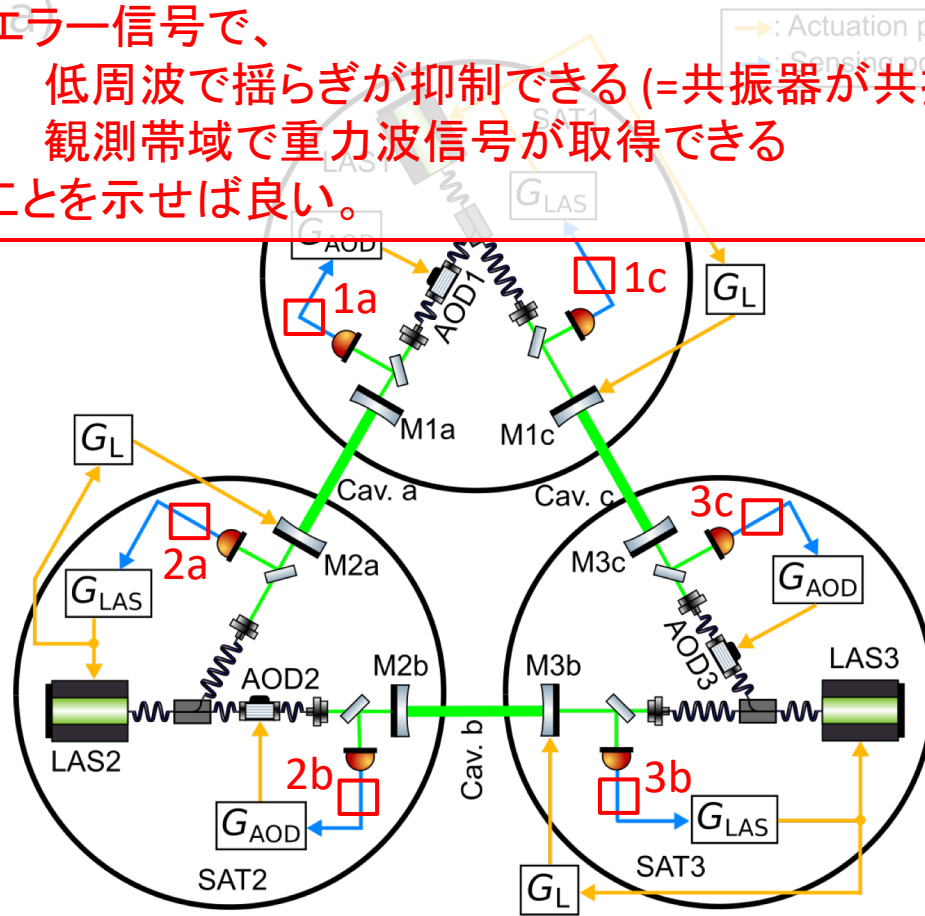


制御トポロジー

• 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できる (=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、

$$s_{1a} = \frac{1}{1 + G_{AOD}} \left[\frac{1}{1 + \frac{G_{LAS}G_L}{1+G_{LAS}}} \left(\Delta x_a + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}} f_2 \right) - \frac{1}{1 + \frac{G_{LAS}}{1+G_{LAS}G_L}} \left(f_1 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L} \Delta x_c \right) \right], \quad (20)$$

$$s_{1c} = \frac{1}{1 + G_{LAS} + G_{LAS}G_L} (\Delta x_c - f_1), \quad (21)$$

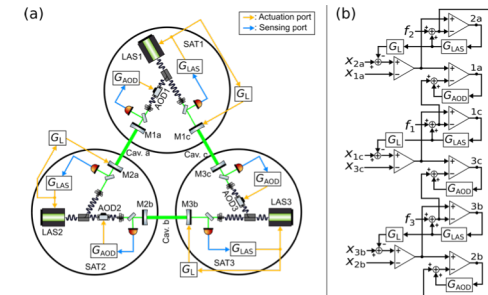
$$s_{2a} = \frac{1}{1 + G_{LAS} + G_{LAS}G_L} (\Delta x_a - f_2), \quad (22)$$

$$s_{2b} = \frac{1}{1 + G_{AOD}} \left[\frac{1}{1 + \frac{G_{LAS}G_L}{1+G_{LAS}}} \left(\Delta x_b + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}} f_3 \right) - \frac{1}{1 + \frac{G_{LAS}}{1+G_{LAS}G_L}} \left(f_2 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L} \Delta x_a \right) \right], \quad (23)$$

$$s_{3b} = \frac{1}{1 + G_{LAS} + G_{LAS}G_L} (\Delta x_b - f_3), \quad (24)$$

$$s_{3c} = \frac{1}{1 + G_{AOD}} \left[\frac{1}{1 + \frac{G_{LAS}G_L}{1+G_{LAS}}} \left(\Delta x_c + \frac{G_{LAS}G_L}{1 + G_{LAS}} f_1 \right) - \frac{1}{1 + \frac{G_{LAS}}{1+G_{LAS}G_L}} \left(f_3 + \frac{G_{LAS}}{1 + G_{LAS}G_L} \Delta x_b \right) \right], \quad (25)$$

Δx_α 等は
共振器 α
の長さゆ
らぎ

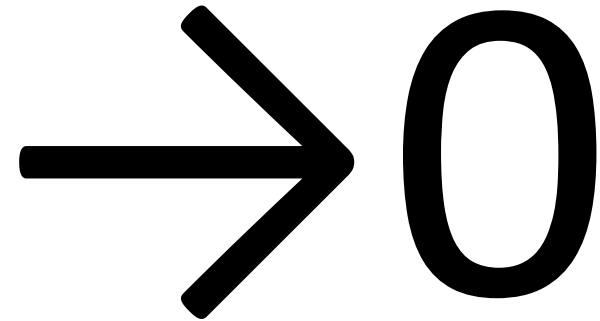


となるが、これは分からないので近似をする。

双方向Fabry-Perot干渉計の制御

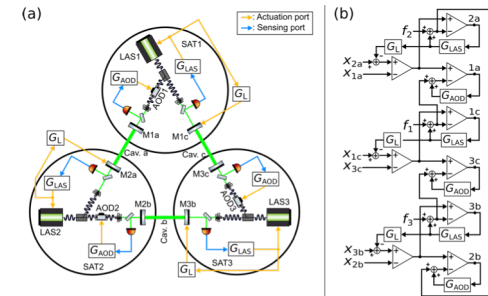
- 低周波で、 $|G_{AOD}| \gg 1$ 、 $|G_{LAS}| \gg 1$ 、 $|G_L| \gg 1$ とすると、

$$\begin{aligned} s_{1a} &= \frac{1}{1 + G_{AOD}} (f_2 - f_1), \\ s_{1c} &= \frac{1}{1 + G_{LAS} + G_{LAS}G_L} (\Delta x_c - f_1), \\ s_{2a} &= \frac{1}{1 + G_{LAS} + G_{LAS}G_L} (\Delta x_a - f_2), \\ s_{2b} &= \frac{1}{1 + G_{AOD}} (f_3 - f_2), \\ s_{3b} &= \frac{1}{1 + G_{LAS} + G_{LAS}G_L} (\Delta x_b - f_3), \\ s_{3c} &= \frac{1}{1 + G_{AOD}} (f_1 - f_3), \end{aligned}$$



〔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、 $|G_{AOD}| \ll 1$ 、 $|G_{LAS}| \gg 1$ 、 $|G_L| \ll |G_{LAS}|^{-1}$ とすると、

$$s_{1a} = \Delta x_a - \Delta x_c,$$

→ 重力波信号

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

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

$$s_{2b} = \Delta x_b - \Delta x_a$$

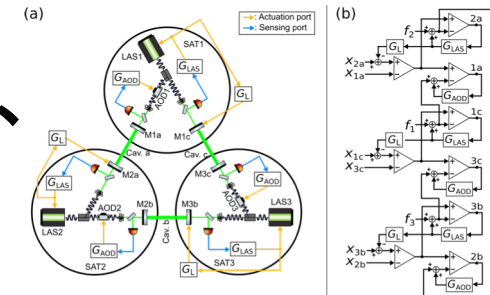
→ 重力波信号

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

$$s_{3c} = \Delta x_c - \Delta x_b,$$

→ 重力波信号

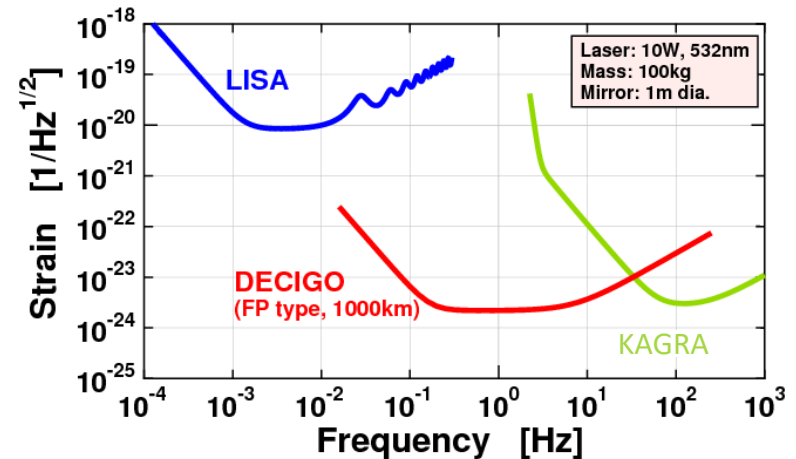
となり、点1a、2a、3cで各腕共振器の長さの差動信号(=重力波信号)をとることができる。



DECIGO計画

DECIGO計画

- Decihertz
Interferometer
Gravitational Wave
Observatory = DECIGO

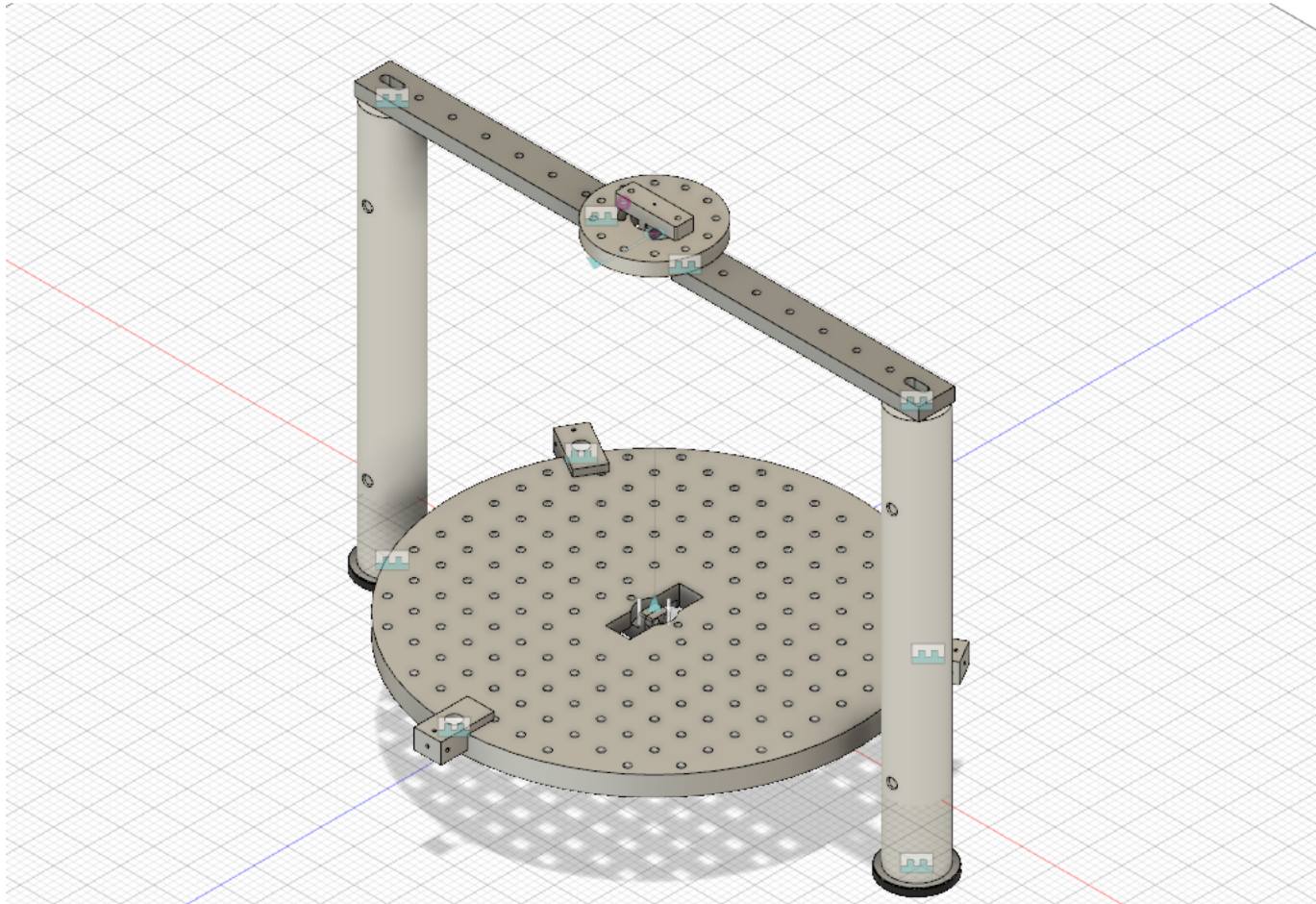


DECIGO、LISA、KAGRAの観測周波数帯域の比較 (S. Kawamura+, CQG, 2011)

- 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。

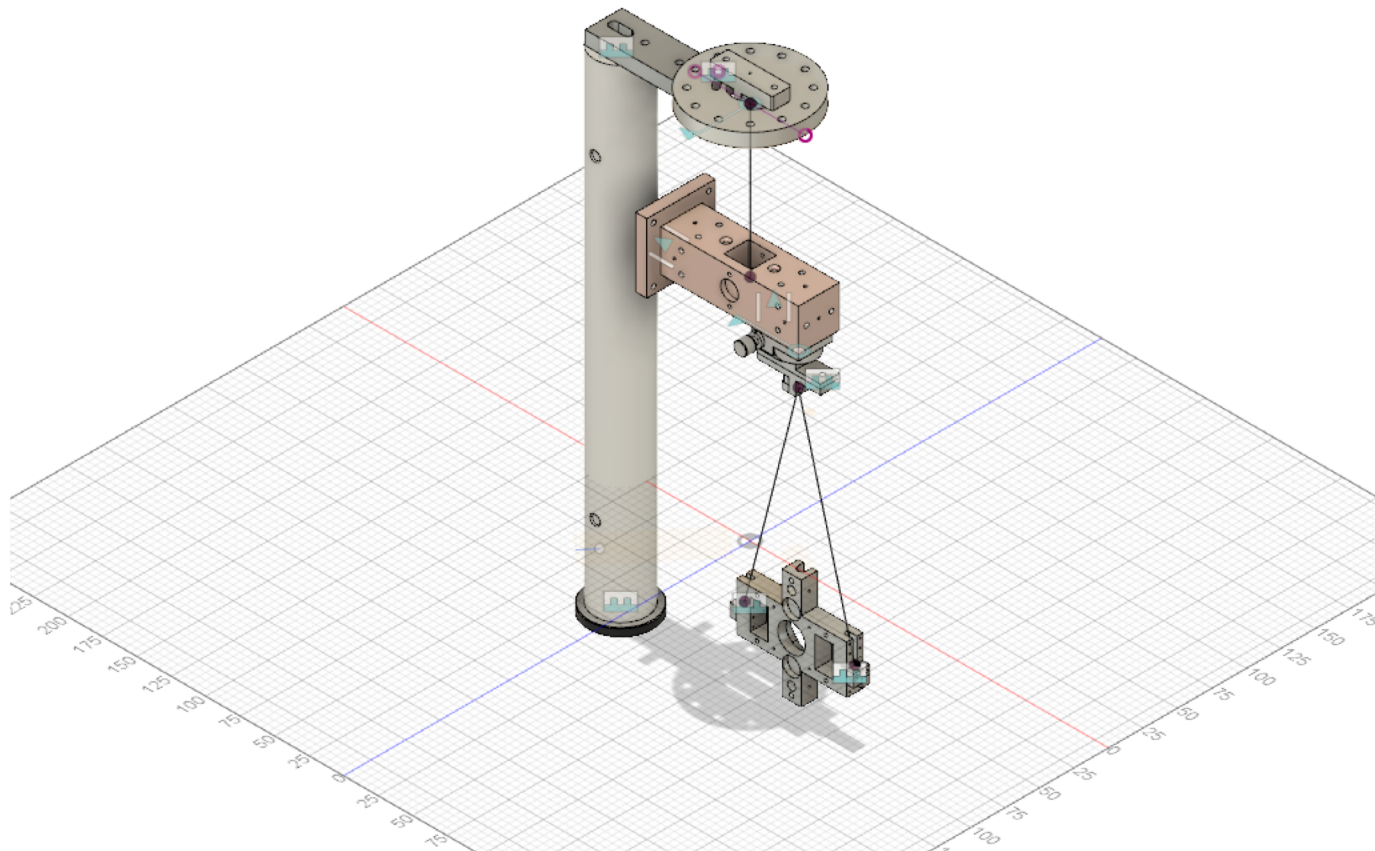
プラットフォームの懸架系

- 光学定盤懸架系



プラットフォームの懸架系

- 鏡懸架系



B-DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

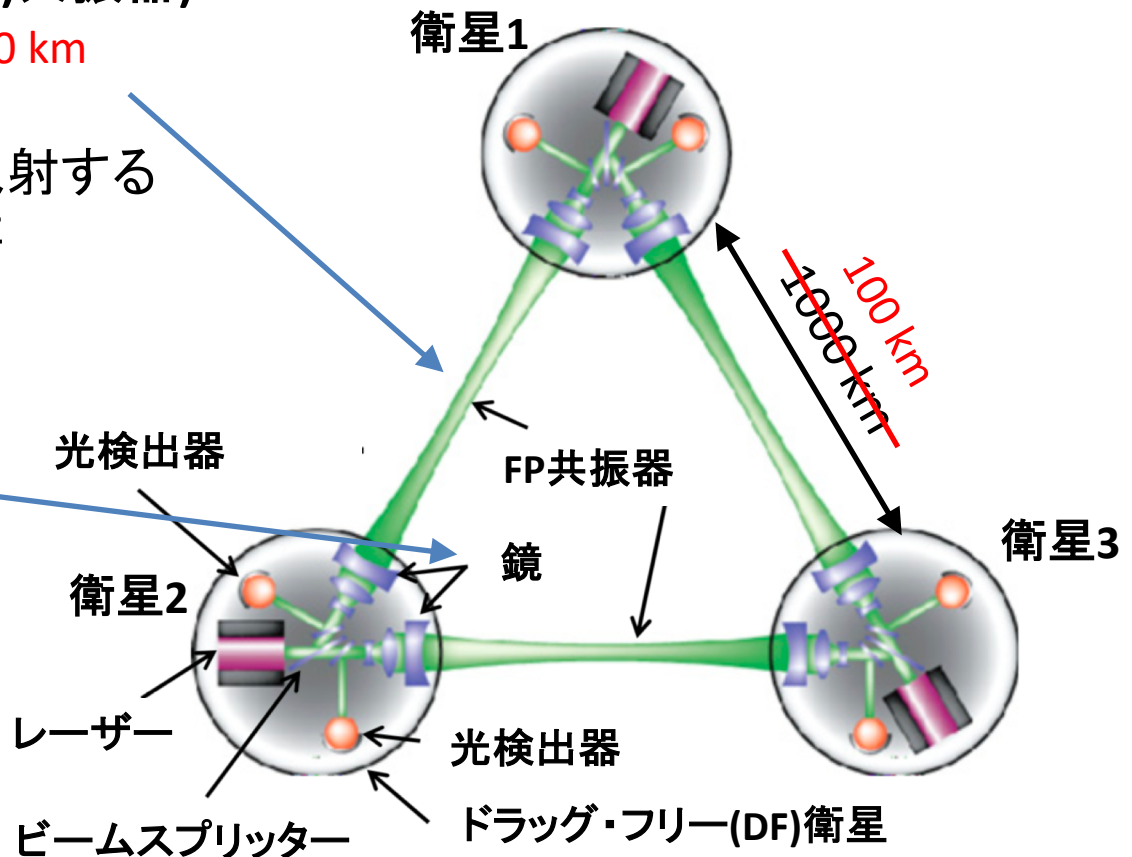
- 長さ: ~~1000 km~~ 100 km
- フィネス: ~~10~~ 100
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

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: $<1 \text{ Hz/rtHz @1 Hz}$

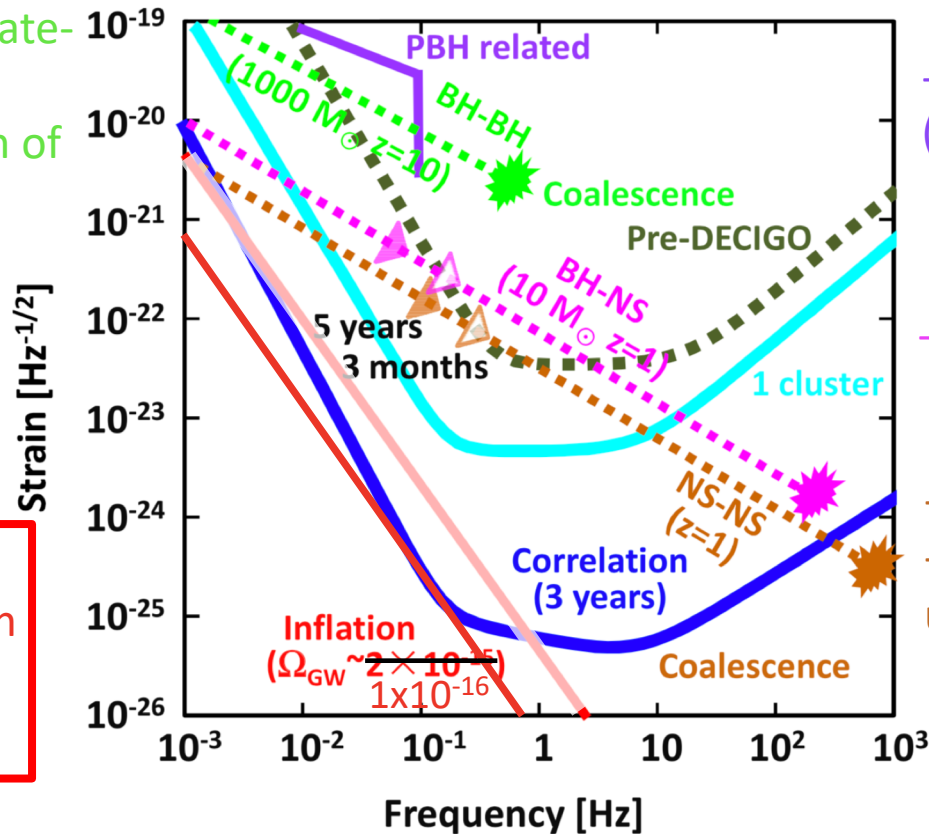


DECIGOの予備概念設計 (S. Kawamura+, CQG, 2011)

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)

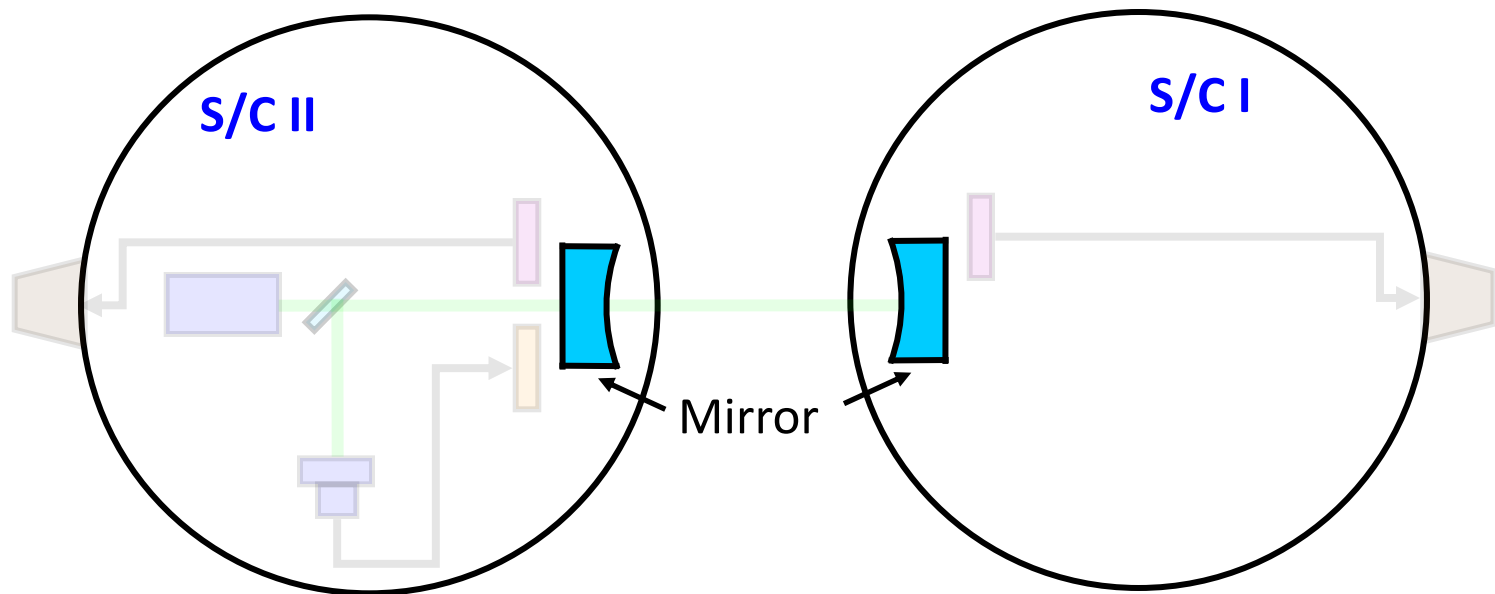
[1] R. Saito+, *PTP*, 2009

[2] K. Yagi+, *PTP*, 2010

[3] N. Seto+, *PRL*, 2001

Drag-free control

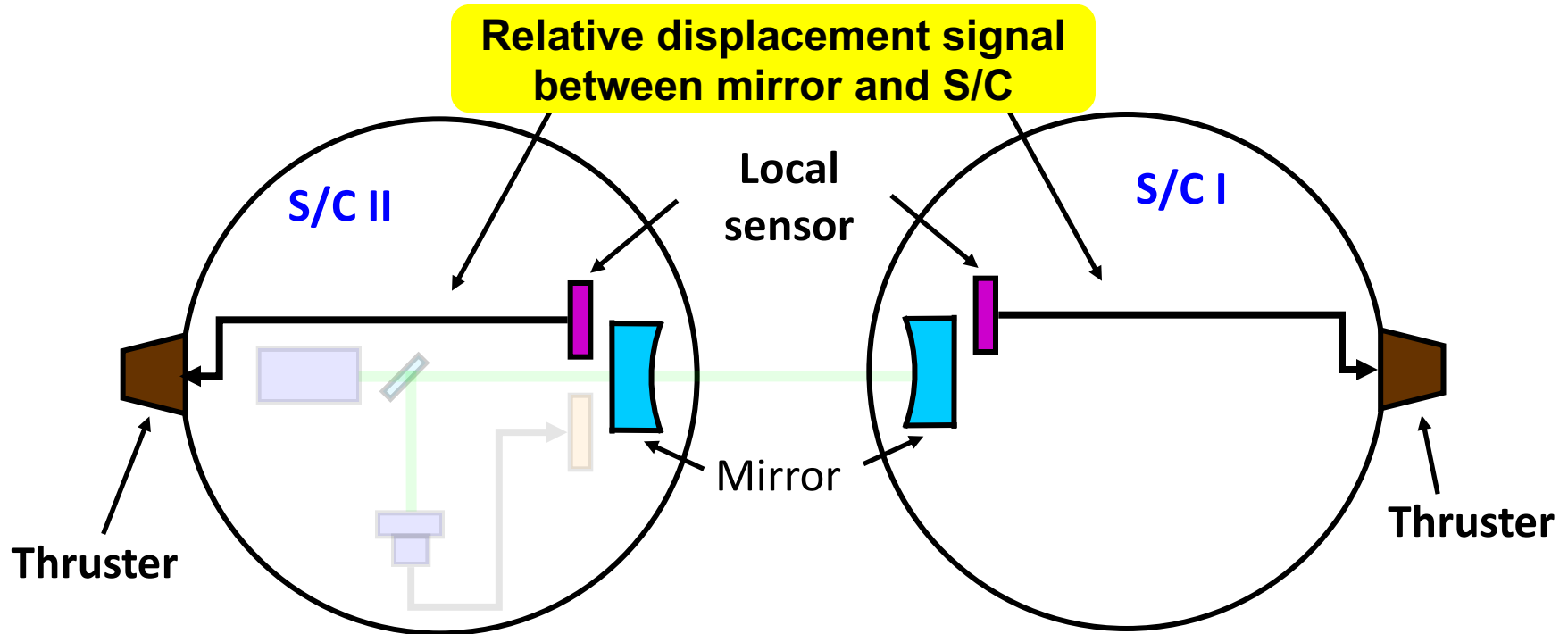
- Does a drag-free S/C consort with an optical cavity?



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?

