

DECIGO主干涉計デザインドキュメント (仮)

長野 晃士 (Koji Nagano)

東京大学 理学系研究科 物理学専攻
宇宙線研究所 重力波観測研究施設

概要

- 宇宙重力波望遠鏡DECIGOは、初期宇宙のインフレーション由来の重力波を観測できる感度を持つ検出器である。
- DECIGOの前哨計画であるB-DECIGOもとても良い感度を持っており、(ほぼ)全宇宙のブラックホールを観測できる。
- ものが自由に動く宇宙空間でレーザー干渉計を制御するためには、地上干渉計とは異なる手法が必要である。
- 2年考え続け、なんとか上手いきそうな手法を発見した。

目次

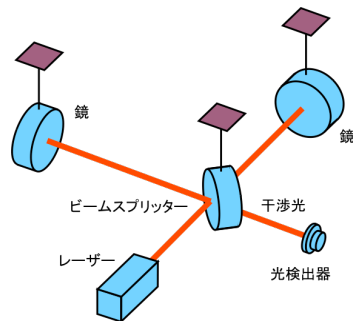
1. オーバーチュア
2. 序論
3. DECIGO実現のために必要なこと
4. まとめ・結論

目次

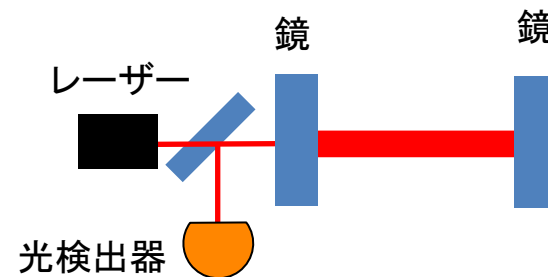
1. オーバーチュア
2. 序論
3. DECIGO実現のために必要なこと
4. まとめ・結論

オーバーチュア

- 興味のあるサイエンス
 - 重力波物理学・天文学
 - 特に、レーザー光の量子雑音に関する研究
 - オプトメカニクスを用いた巨視的物体の量子現象の観測
 - 暗黒物質探査
- 興味のある技術
 - レーザー干渉計を用いた精密測定
 - 宇宙ミッションのためのフォーメーションフライトやドラッグ・フリー衛星技術



Michelson干渉計。
(Made by S. Kawamura)



光共振器。

オーバーチュア

これまでの研究

- KAGRAサイトでのインストール・コミッショニング作業 (M1-)
- 干渉計型重力波検出器の量子雑音低減技術の開発
– 特に光の輻射圧による角度不安定性の低減 (M1-M2)
- 光学浮上技術を用いた巨視的量子現象の観測に向けた研究 (D1)
- DECIGOに向けたドラッグ・フリー制御を含む干渉計制御法の開発 (D1-)
- 超小型衛星を用いた光速等方性検証ミッション提案 (D2-)
- 干渉計によるAxion dark matterの探査法の提案 (D3-)
- その他 (Photon recycling法による光検出器 (M1-) の量子効率向上の実証や、重力波観測を用いた重力理論の検証など。) (D2-)

詳しくは、<http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/knagano/html/koji.html> →



オーバーチュア

これまでの研究

- KAGRAサイトでのインストール・コミッショニング作業 (M1-)
- 干渉計型重力波検出器の量子雑音低減技術の開発
– 特に光の輻射圧による角度不安定性の低減 (M1-M2)
- 光学浮上技術を用いた巨視的量子現象の観測に向けた研究 (D1)
- DECIGOに向けたドラッグ・フリー制御を含む干渉計制御法の開発 (D1-)
- 超小型衛星を用いた光速等方性検証ミッション提案 (D2-)
- 干渉計によるAxion dark matterの探査法の提案 (D3-)
- その他 (Photon recycling法による光検出器 (M1-) の量子効率向上の実証や、重力波観測を用いた重力理論の検証など。) (D2-)

詳しくは、<http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/knagano/html/koji.html> →



オーバーチュア

なぜDECIGOをやるのか

オーバーチュア

なぜDECIGOをやるのか



オーバーチュア

なぜDECIGOをやるのか



[https://en.wikipedia.org/wiki/Eclipse_\(horse\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Eclipse_(horse))

目次

1. オーバーチュア
2. 序論
3. DECIGO実現のために必要なこと
4. まとめ・結論

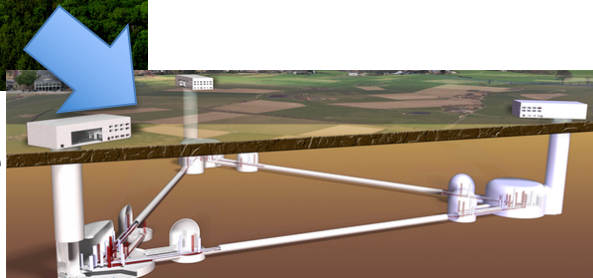
序論

- これまでに、多数の重力波イベントが、地上重力波望遠鏡で見つかっている。
- ここから、さらに重力波物理学・天文学を拡張しているためには、主に2つの選択肢がある。

地上検出器の感度向上
(10 Hz-1 kHz)

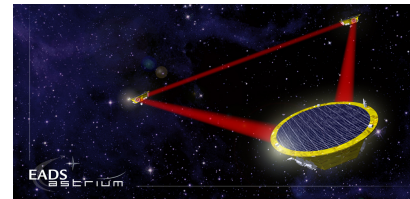


LIGO Livingston (Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab)



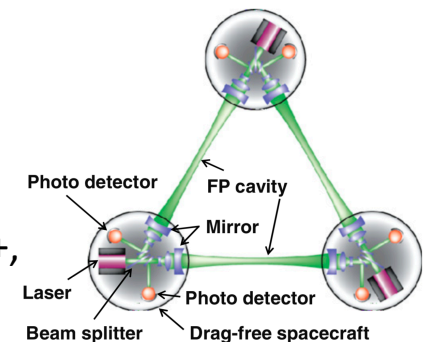
Einstein telescope
(<http://www.et-gw.eu>)

宇宙重力波望遠鏡の実現
(0.1 mHz-10 Hz)



LISA (Credit: EADS Astrium)

DECIGO (S. Kawamura+,
CQG, 2011)



序論

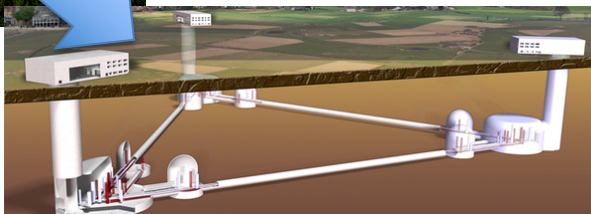
- これまでに、多数の重力波イベントが、地上重力波望遠鏡で見つかっている。
- ここから、さらに重力波物理学・天文学を拡張しているためには、主に2つの選択肢がある。

地上検出器の感度向上
(10 Hz-1 kHz)

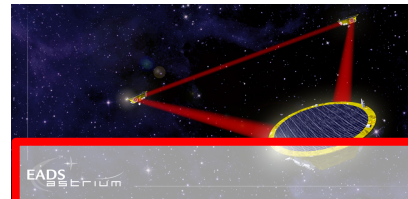


LIGO Livingston (Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab)

Einstein telescope
(<http://www.et-gw.eu>)

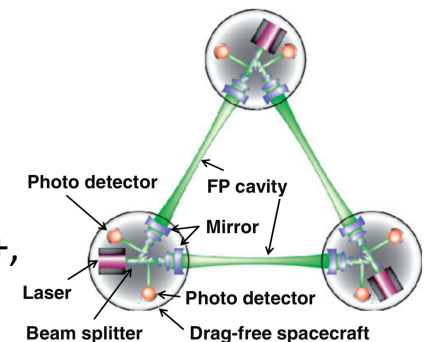


宇宙重力波望遠鏡の実現
(0.1 mHz-10 Hz)



LISA (Credit: EADS Astrium)

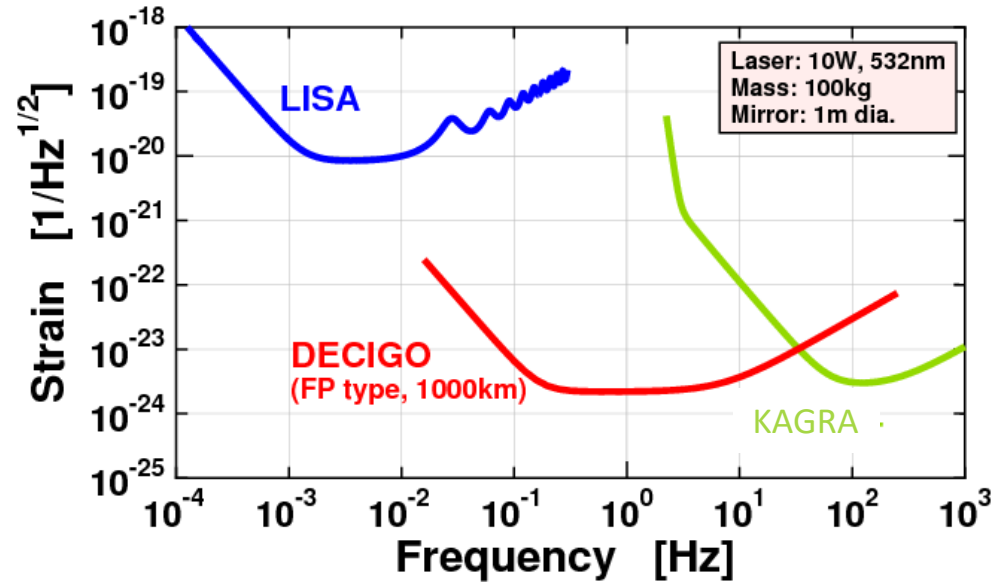
DECIGO (S. Kawamura+,
CQG, 2011)



DECIGO計画

DECIGO計画

- Decihertz
Interferometer
Gravitational Wave
Observatory =
DECIGO
- 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。

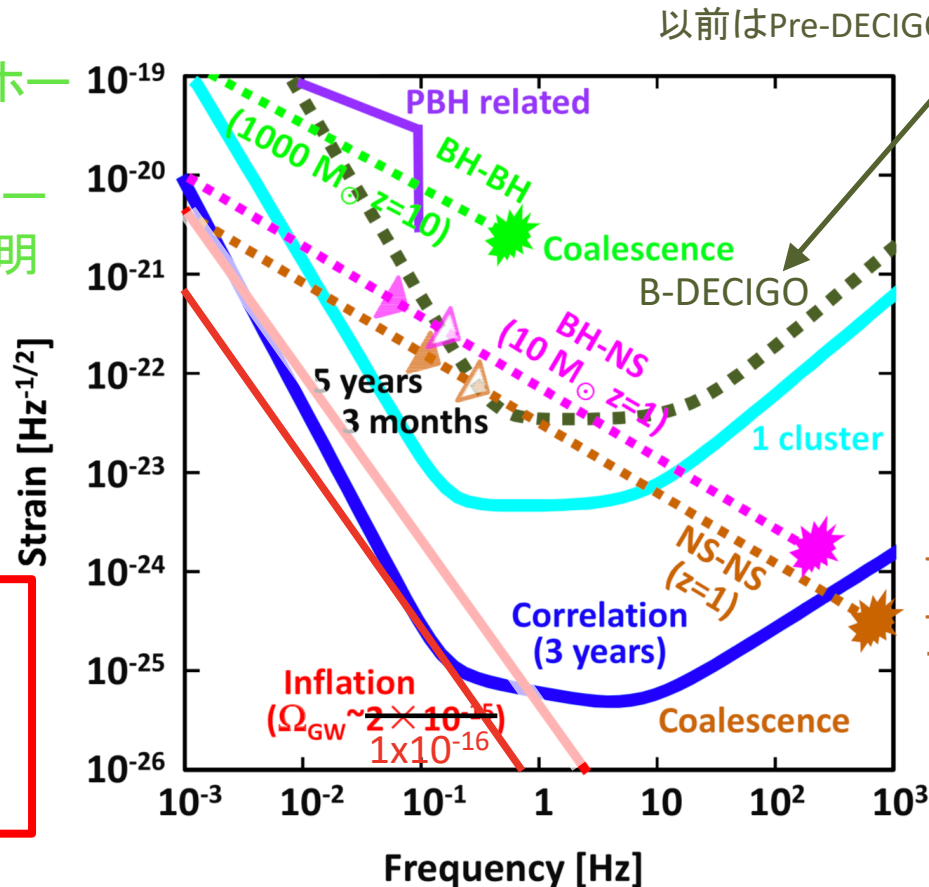


DECIGO、LISA、KAGRAの観測周波数帯域
の比較 (S. Kawamura+, CQG, 2011)

DECIGOとB-DECIGOの感度

- 中間質量ブラックホールの観測
- > 超巨大ブラックホールの生成過程の解明

- インフレーションの検証
- > 宇宙誕生直後の姿の直接観測



- 暗黒物質(の候補)の探査 [1]

- 重力理論の検証 [2]

- 中性子物理の研究
- 宇宙膨張の独立かつ直接的な測定 [3]

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

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

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

DECIGOの光学構成

腕 (Fabry-Perot(FP)共振器)

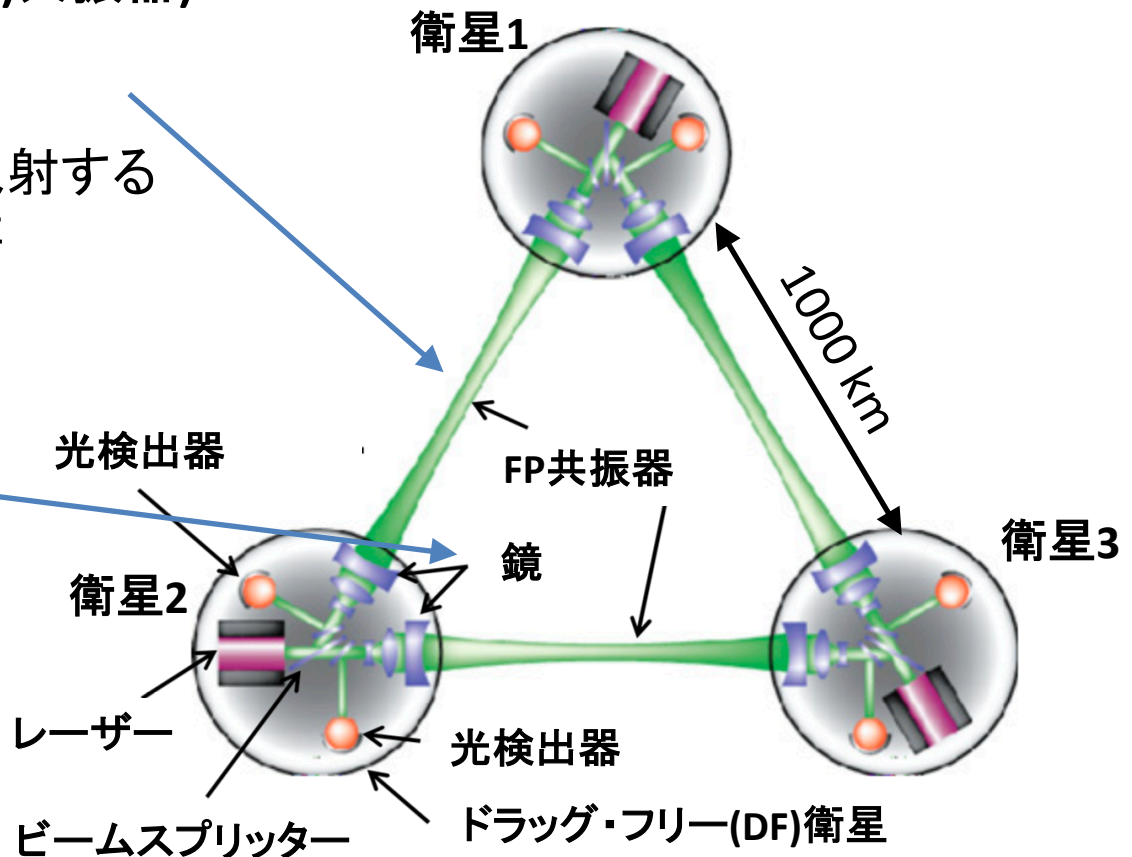
- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

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

冗長性、鏡の数が少ないという利点

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)

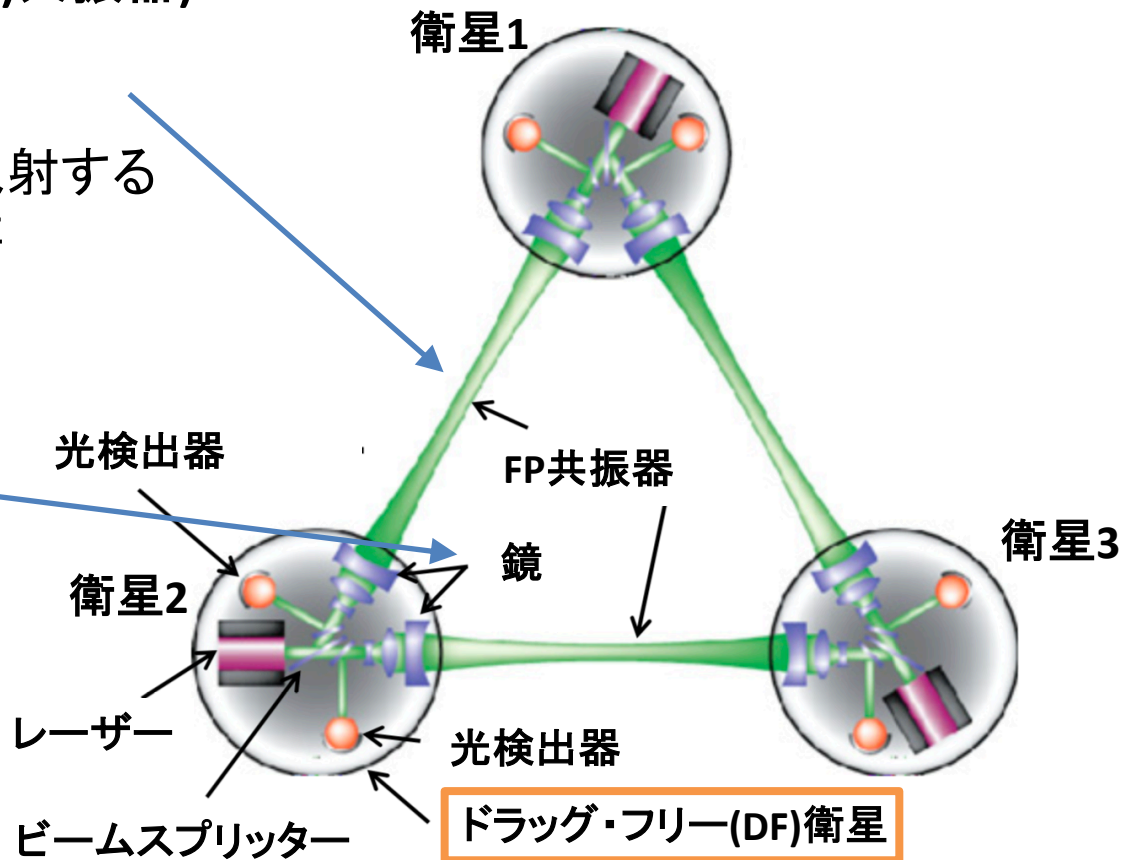
- 長さ: 1000 km
- フィネス: 10
- 2つの衛星から入射するレーザー光が共存
= 双方向FP干渉計

鏡

- 質量: 100 kg

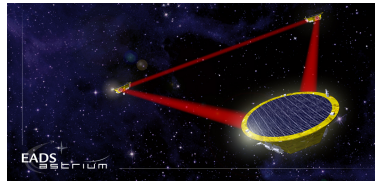
レーザー

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

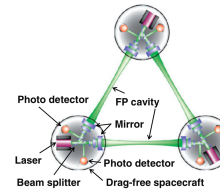


DECIGOの予備概念設計
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

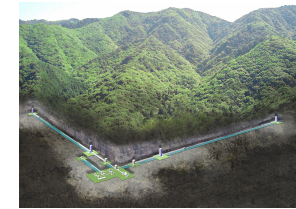
DECIGOとLISAとKAGRA



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)

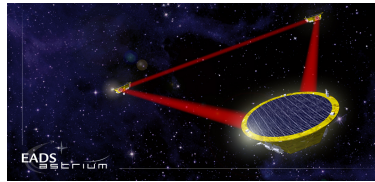
DF制御

必要

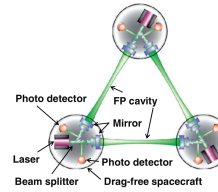
必要

不要

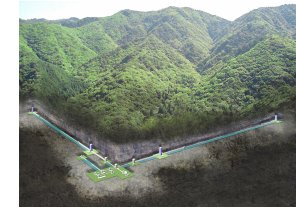
DECIGOとLISAとKAGRA



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)

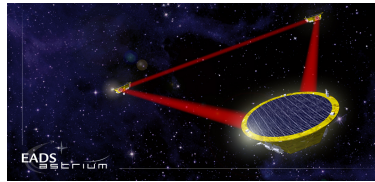
DF制御

必要

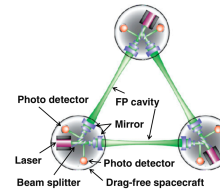
必要

不要

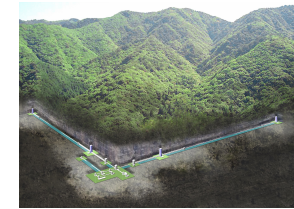
DECIGOとLISAとKAGRA



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. オーバーチュア
2. 序論
3. DECIGO実現のために必要なこと
4. まとめ・結論

DECIGO実現のために必要なこと

干渉計制御手法の確立

- そもそも、どのような制御方式なら双方向FP干渉計は動作するのか。
 - 長さ制御
 - 角度制御
- その上で、要求値を決定
 - 感度 (スペクトル) だけではなく、動作のために必要なもの (RMS) も。
- 実験的検討も必要。

~~DECIGO実現のために必要なこと~~

D論執筆

干渉計制御手法の確立

- そもそも、どのような制御方式なら双方向FP干渉計は動作するのか。
 - 長さ制御
 - 角度制御
- その上で、要求値を決定
 - 感度 (スペクトル) だけではなく、動作のために必要なもの (RMS) も。
- 実験的検討も必要。

~~DECIGO実現のために必要なこと~~

D論執筆

干渉計制御手法の確立

- そもそも、どのような制御方式なら双方向FP干渉計は動作するのか。← 今回のトーク。
 - 長さ制御
 - 角度制御
- その上で、要求値を決定 ← (一部については) 2019年安東研中間報告会。
 - 感度 (スペクトル) だけではなく、動作のために必要なもの (RMS) も。
- 実験的検討も必要。 ← (一部については) 9月の物理学会。

~~DECIGO実現のために必要なこと~~

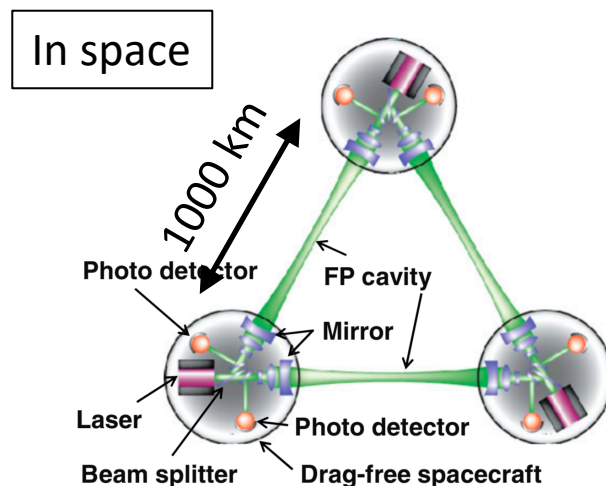
D論執筆

干渉計制御手法の確立

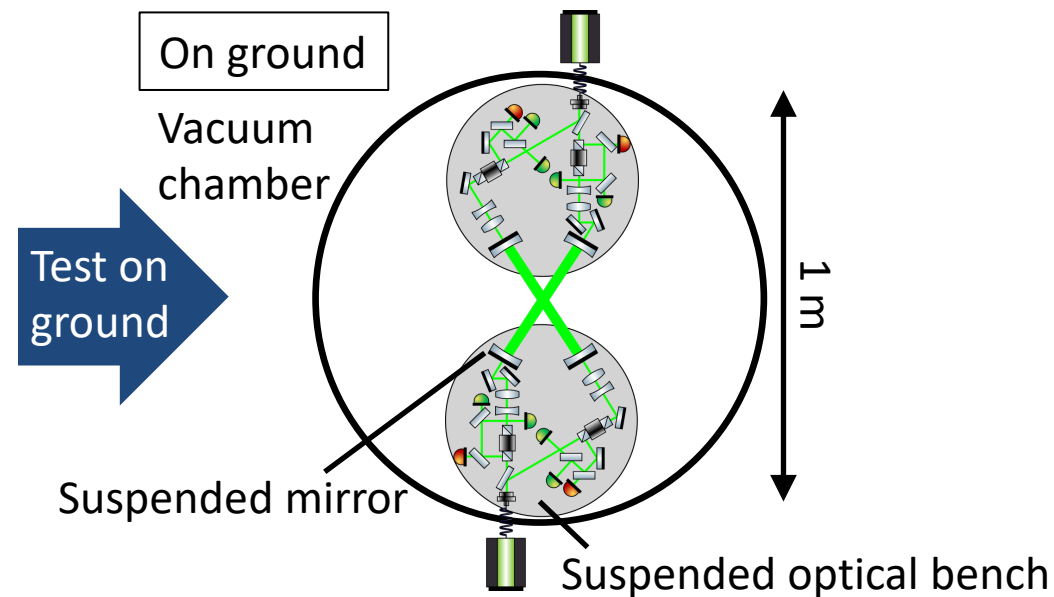
- そもそも、どのような制御方式なら双方向FP干渉計は動作するのか。← 今回のトーク。
 - 長さ制御
 - 角度制御
- その上で、要求値を決定 ← (一部については) 2019年安東研中間報告会。
 - 感度 (スペクトル) だけではなく、動作のために必要なもの (RMS) も。
- 実験的検討も必要。 ← (一部については) 9月の物理学会。

干渉計動作試験のためのテストベンチ

- FP共振器とドラッグフリー制御の両立性を確認するために、テストベンチを構築をしている。
 - このテストベンチは、光学部分(干渉計)と、機械部分(ドラッグフリー)の両方を持つ。

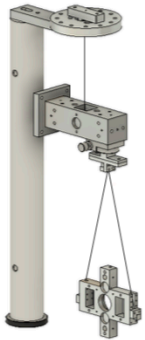


Schematic of DECIGO
(S. Kawamura+, CQG, 2011)

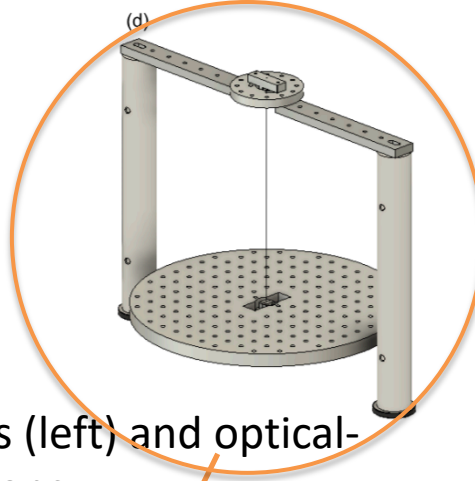


テストベンチの概念図

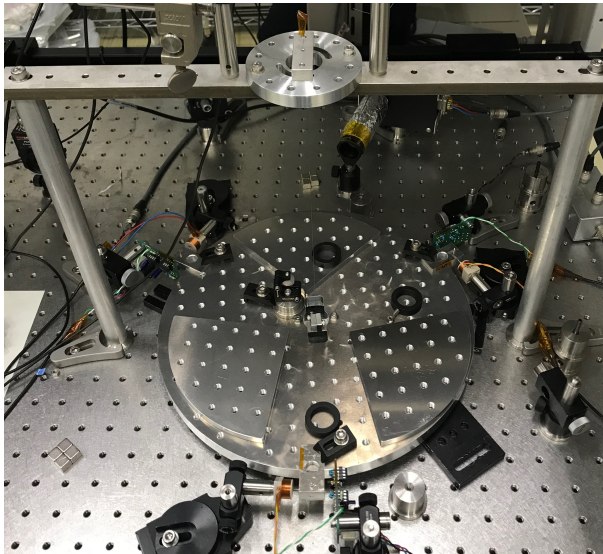
(c)



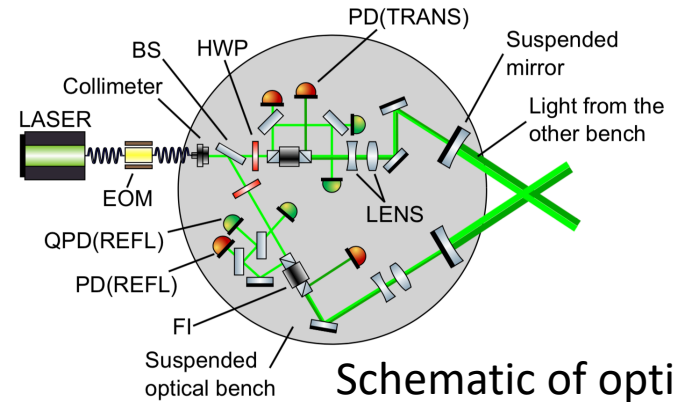
(d)



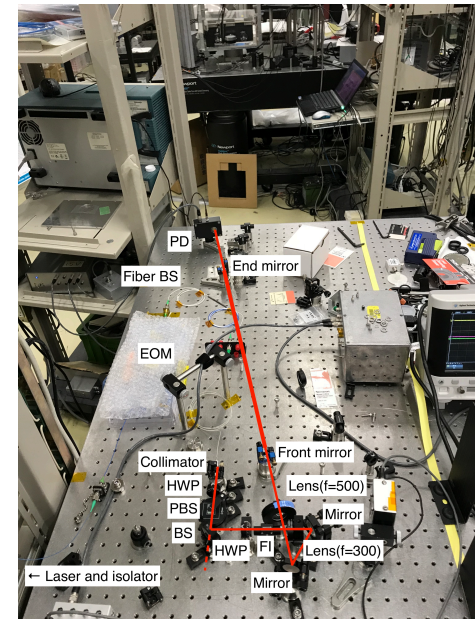
Schematic of test mass (left) and optical-bench (right) suspensions.



Picture of suspended optical bench.



Schematic of optics.



Experiment to demonstrate Dual-Pass FP interferometer.

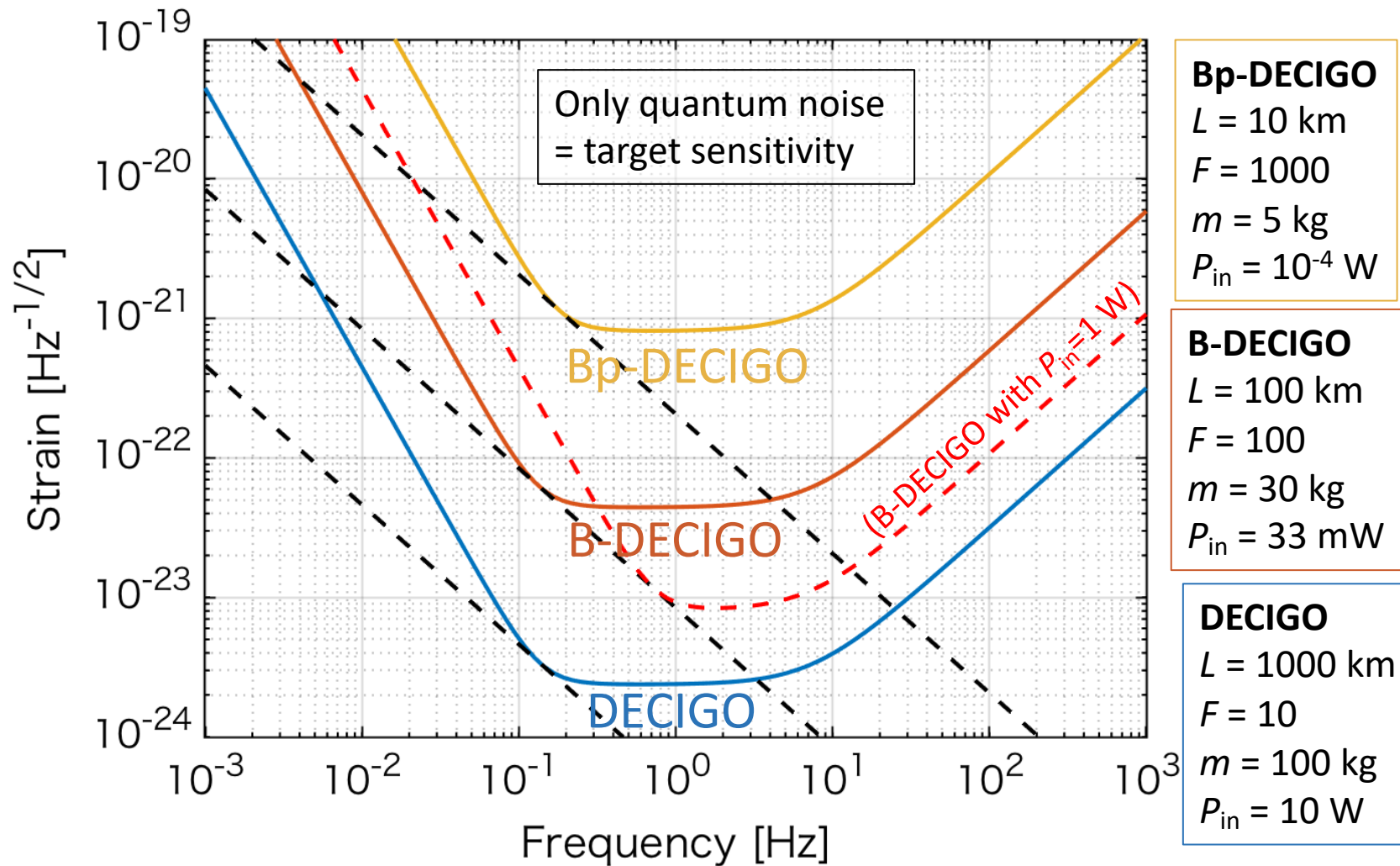
~~DECIGO実現のために必要なこと~~

D論執筆

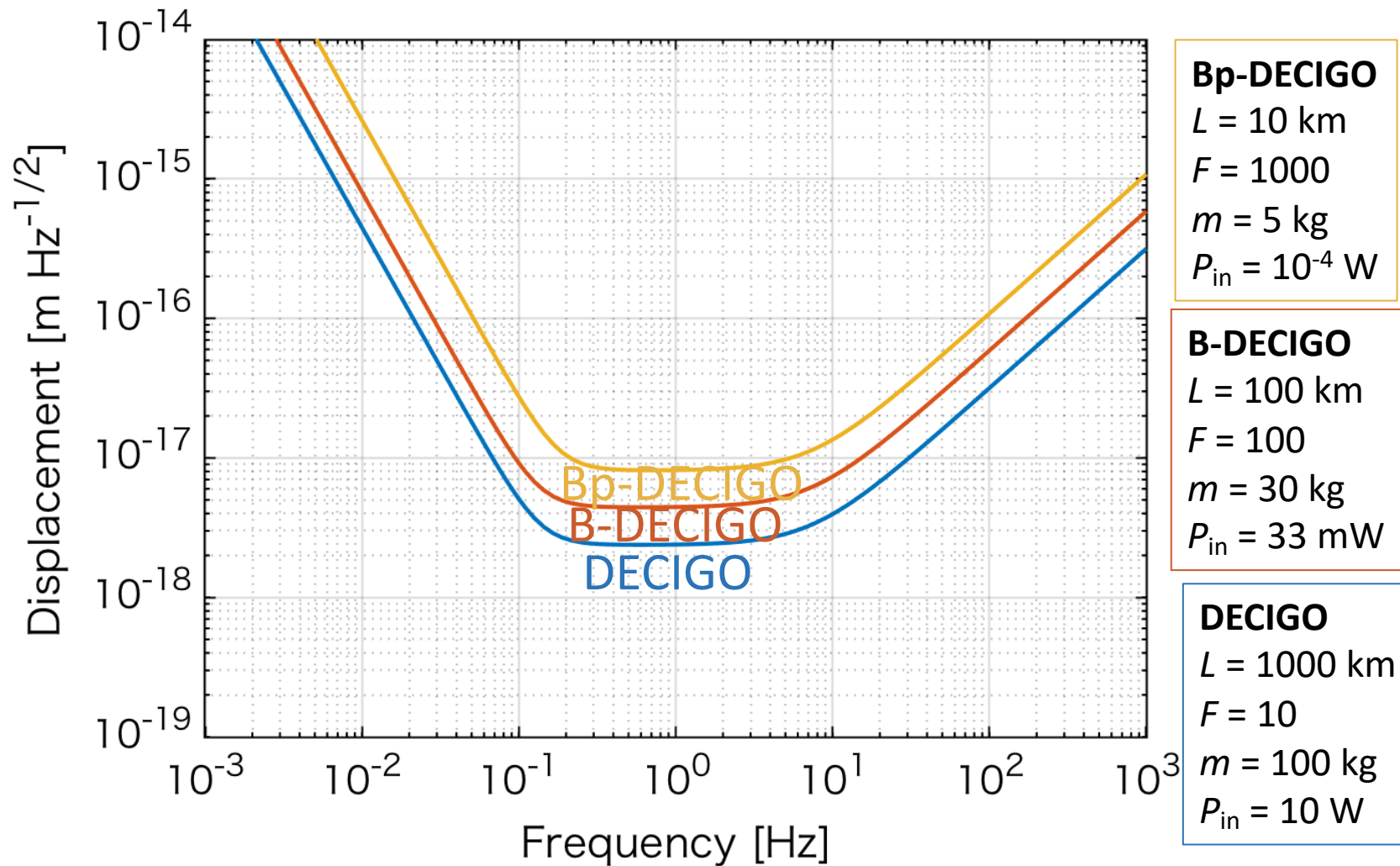
干渉計制御手法の確立

- そもそも、どのような制御方式なら双方向FP干渉計は動作するのか。← 今回のトーク。
 - 長さ制御
 - 角度制御
- その上で、要求値を決定 ← (一部については) 2019年安東研中間報告会。
 - 感度 (スペクトル) だけではなく、動作のために必要なもの (RMS) も。
- 実験的検討も必要。 ← (一部については) 9月の物理学会。

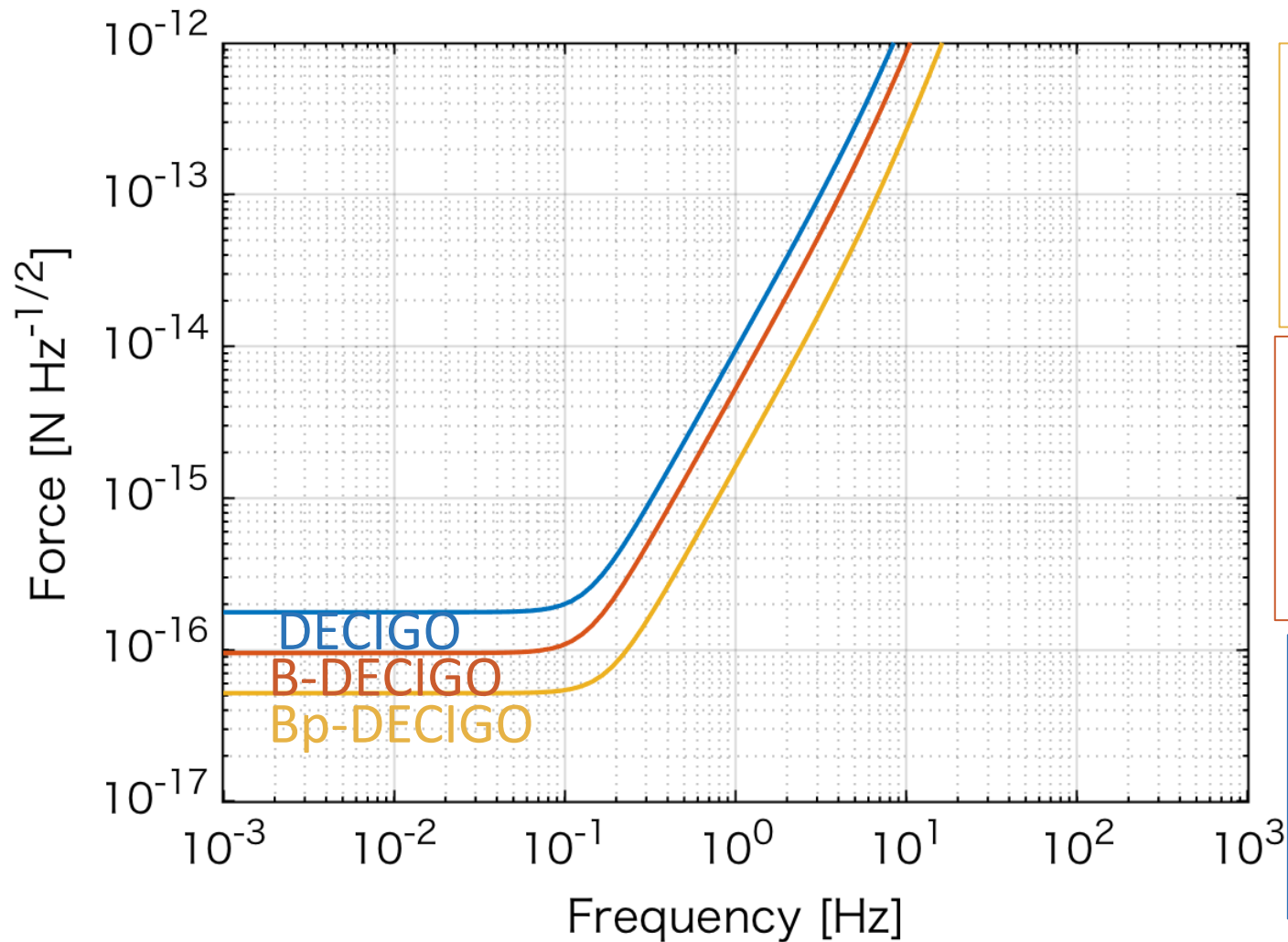
B-DECIGOの感度



B-DECIGOの感度



B-DECIGOの感度



Bp-DECIGO

$L = 10$ km
 $F = 1000$
 $m = 5$ kg
 $P_{\text{in}} = 10^{-4}$ W

B-DECIGO

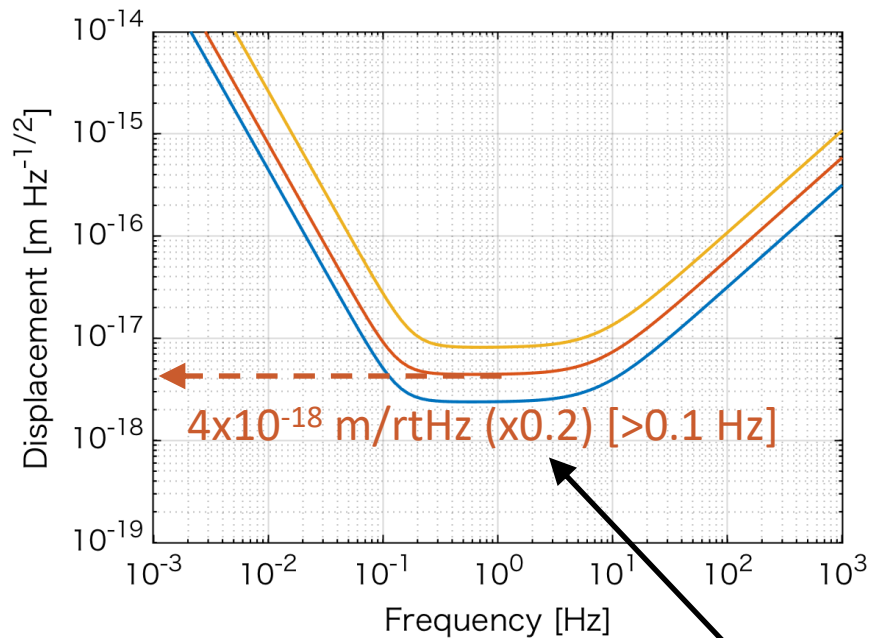
$L = 100$ km
 $F = 100$
 $m = 30$ kg
 $P_{\text{in}} = 33$ mW

DECIGO

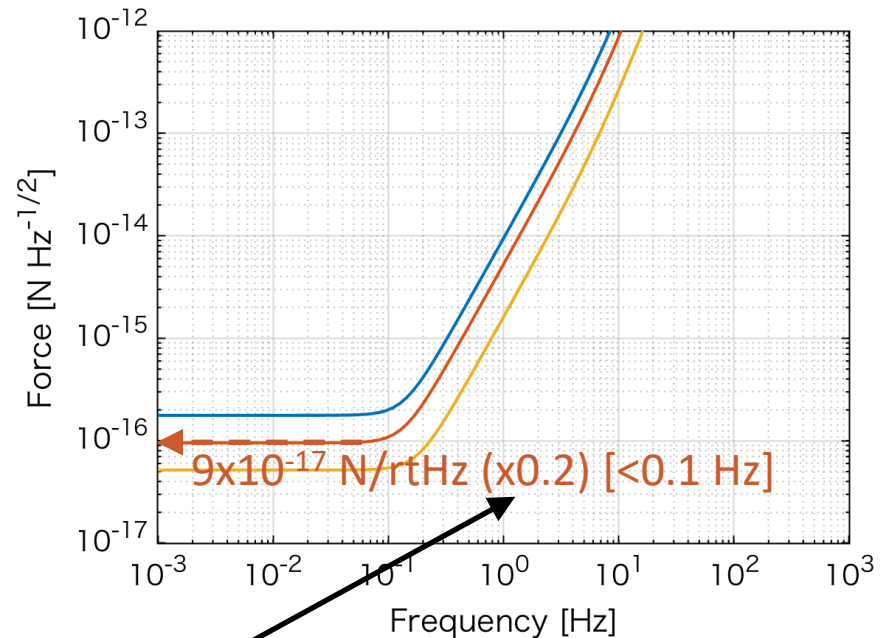
$L = 1000$ km
 $F = 10$
 $m = 100$ kg
 $P_{\text{in}} = 10$ W

B-DECIGOの感度要求

- Displacement noise



- Force noise



If safety factor = 5

B-DECIGOの要求値まとめ

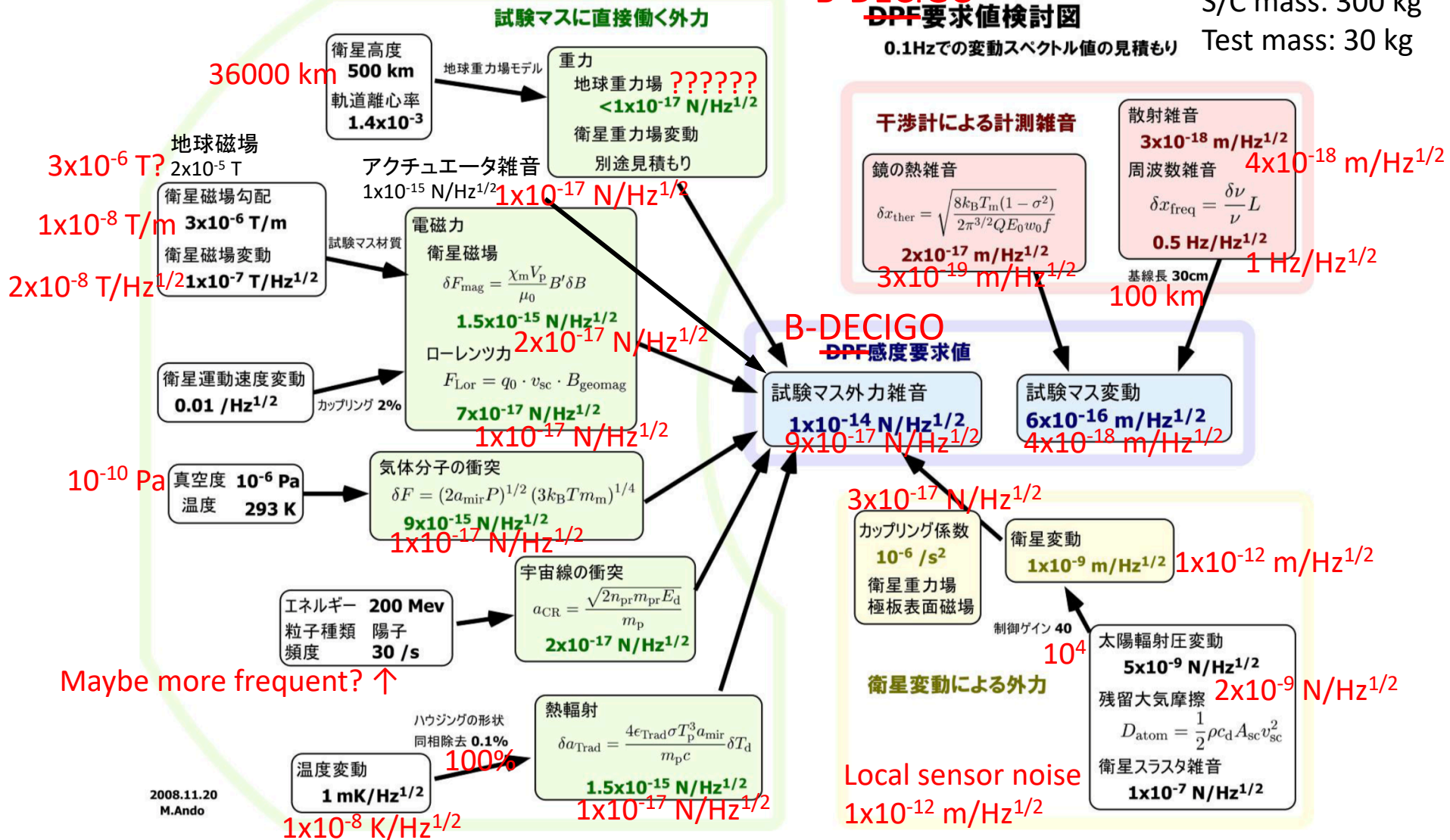
B-DECIGO

~~DPF~~要求値検討図

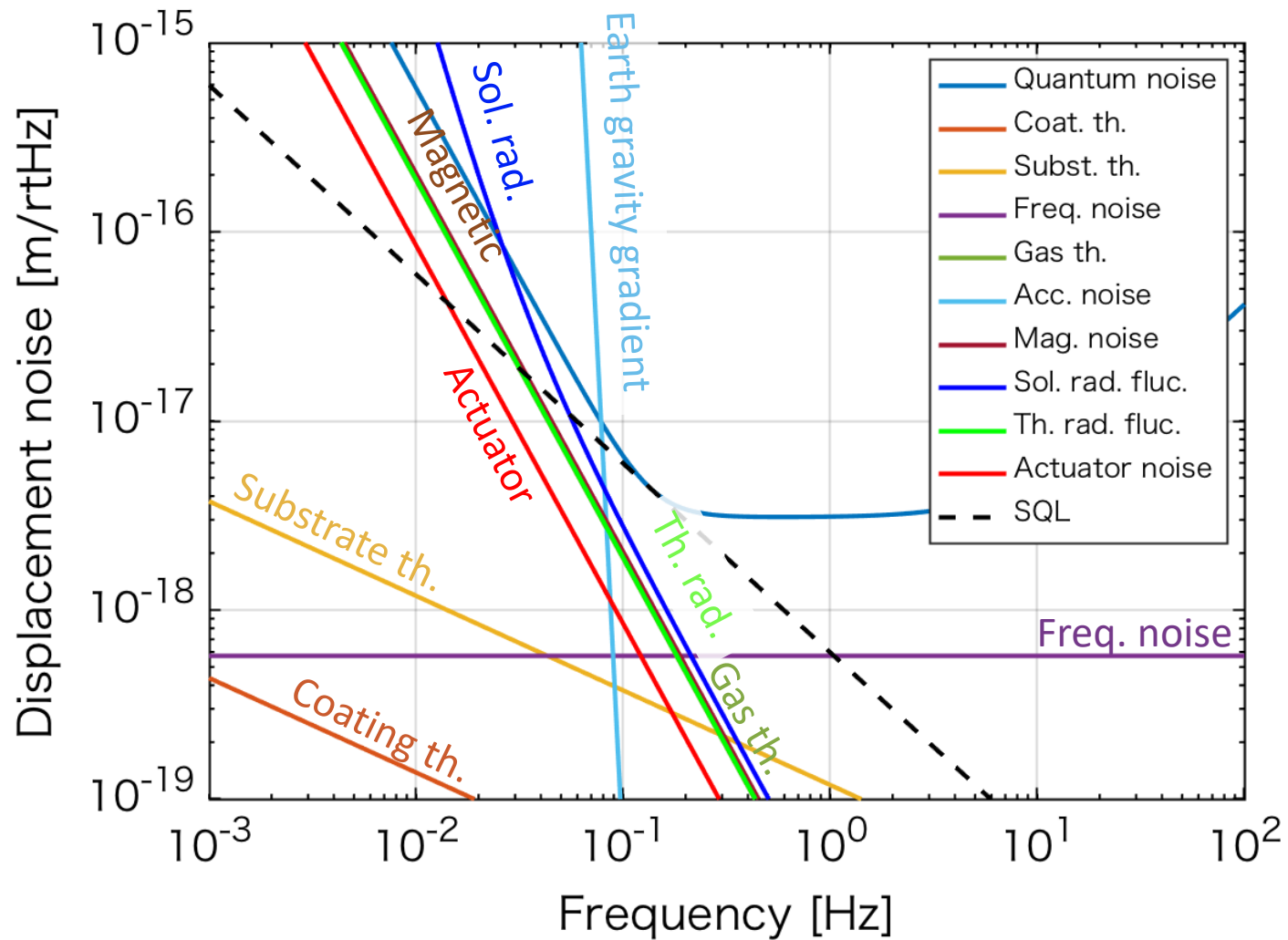
0.1Hzでの変動スペクトル値の見積もり

S/C mass: 300 kg

Test mass: 30 kg



B-DECIGOのノイズバジェット



~~DECIGO実現のために必要なこと~~

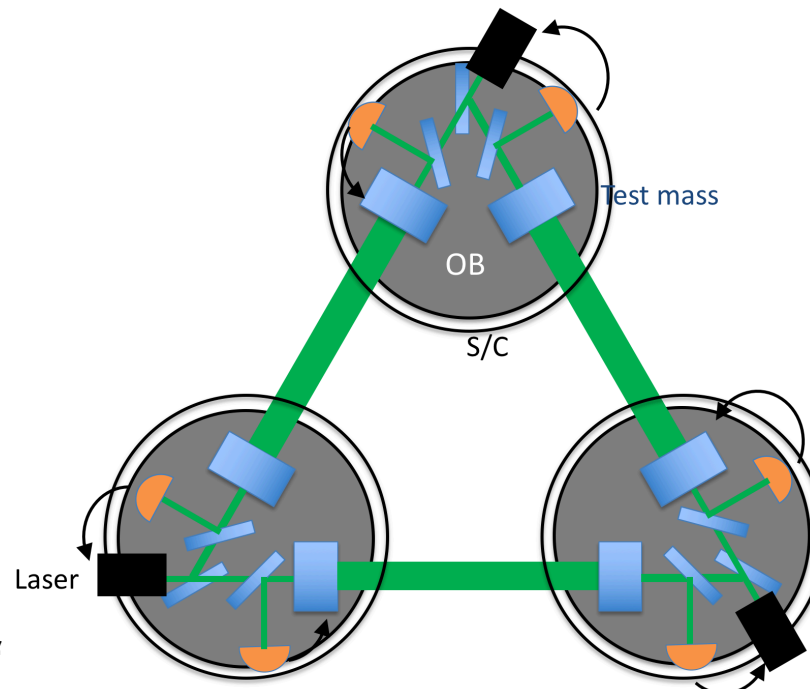
D論執筆

干渉計制御手法の確立

- そもそも、どのような制御方式なら双方向FP干渉計は動作するのか。← 今回のトーク。
 - 長さ制御
 - 角度制御
- その上で、要求値を決定 ← (一部については) 2019年安東研中間報告会。
 - 感度 (スペクトル) だけではなく、動作のために必要なもの (RMS) も。
- 実験的検討も必要。 ← (一部については) 9月の物理学会。

動かない構成 (制御が破綻)

- 以下のような、単純な構成では動かない。
 - 1つの腕の長さを2つの制御が動かそうとするため。
(DCではこれは避けられない。つまり制御帯域を分けられない。)

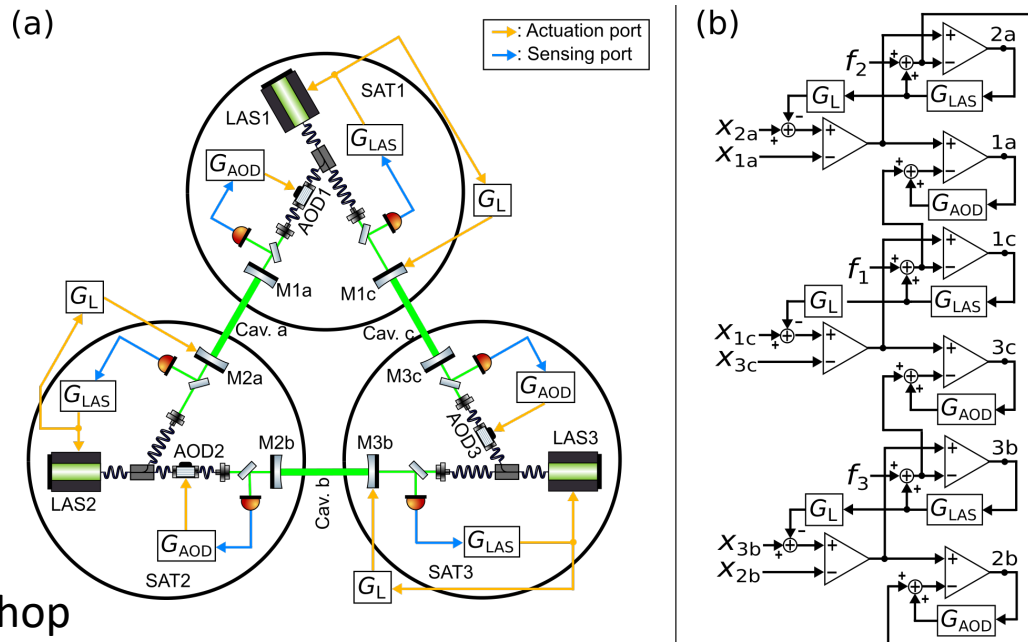


2018年5月
安東研中間報告会

単純なDual-pass locked Fabry-Perot interferometer.

動かない構成 (感度不足)

- AODをアクチュエータに使う場合、制御は成り立つが、感度が厳しい。
 - 具体的には、VCO雑音が大きい。
 - 現在のKAGRAで1 Hz/rtHz。(要求値は 6×10^{-9} Hz/rtHz)
 - (難しそうだが)LISAのようなTDIを応用できる可能性はある。

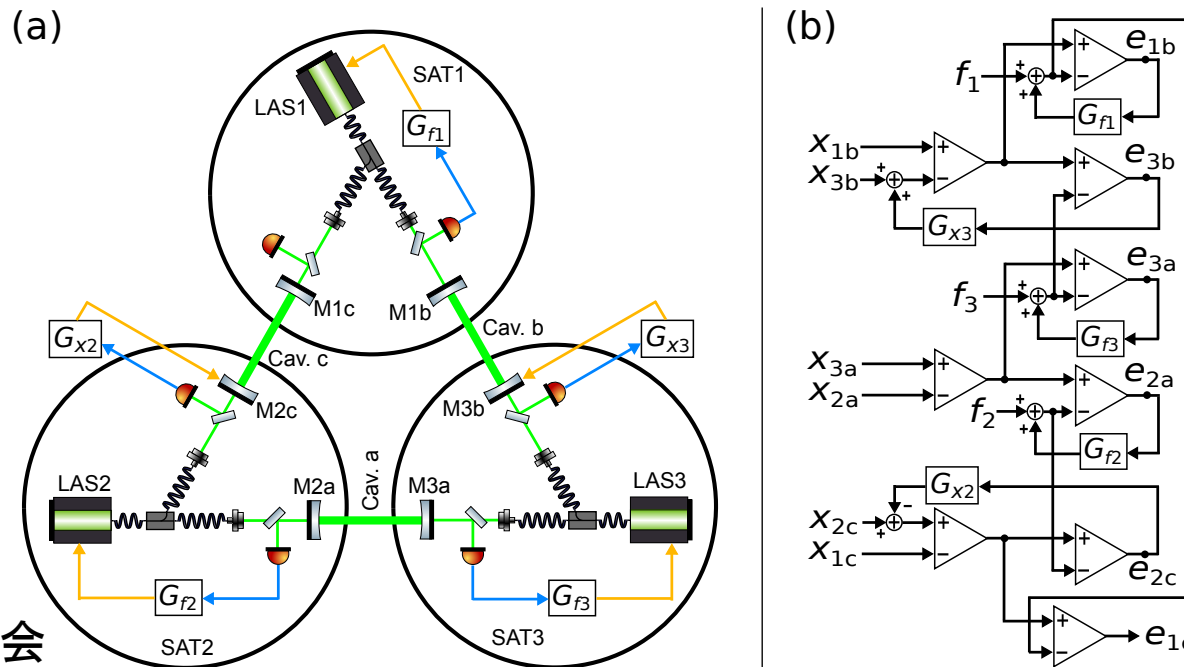


AODを使った構成。

2018年10月
DECIGO workshop

動く構成(案1)

- 以下のような方式は動く。
 - ただし、腕の長さを精度よく(~ 0.1 m)合わせる必要がある。



B-DEICOG干渉計方式(案1)。共振器長さを精度よく合わせる必要がある。

動く構成(案1)

- メリット

- 構成がシンプル。
- 軌道上での調整で頑張れる。

- デメリット

- 軌道上での調整を頑張る必要がある。

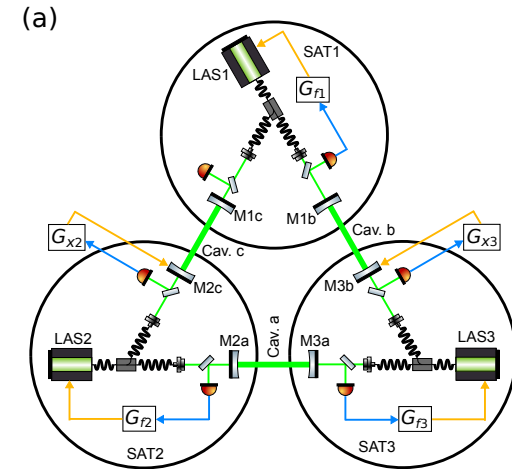
- 少なくとも2つの腕の長さを0.1 mの精度で合わせる必要がある。

(DECIGOの変位感度 4×10^{-18} m/rtHz)

- 0.1 mは、強度雑音カップリング ($RIN = 10^{-6}$ 1/rtHz) から来ている。 $(0.1 \text{ mのとき、} \frac{\lambda}{2} \left(\frac{0.1 \text{ m}}{L} \right) RIN = 3 \times 10^{-19} \text{ m/rtHz})$

- とりあえず信号が取れば良いという意味では、1 kmの精度で良い ($1 \text{ km} = L/\text{Finesse}$)

- すべての腕が同相で動く必要がある。



1.5 GHz (=FSR $\times$ L/ Δ L)
ずらすと良い感じ
の場所がある。

動く構成(案2)

- 1つの衛星に2つのレーザーを搭載し、それぞれ腕共振器に入れて安定化させて干渉させる。
 - 制御的には問題ない。
 - 衛星内の振動が直接雑音になる。

NO IMAGE

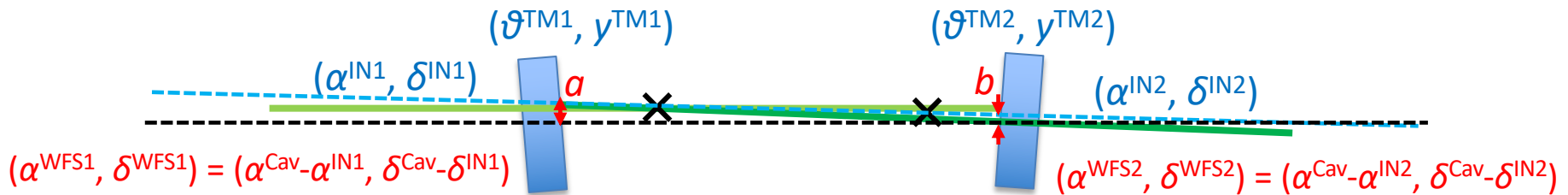
B-DEICOG干渉計方式(案2)。衛星内振動をかなり低くする必要がある。

動く構成(案2)

- メリット
 - それぞれの腕を独立に運用できる。
 - 腕が同相に動かなくてもよい。
- デメリット
 - 衛星内の振動が直接雑音になる。
 - 0.1 HzでのCMRRは謎だが、B-DECIGOの変位感度 ($=4 \times 10^{-18}$ m/rtHz) x CMRR x Finesseの要求値になる。
 - 本当はヘテロダイン測定だから多分違う。
 - ちなみに、スラスター雑音による衛星変動は 2×10^{-11} m/rtHz。
- メリット or デメリット (よく分からない)
 - ヘテロダイン測定が必要

DECIGOの角度制御

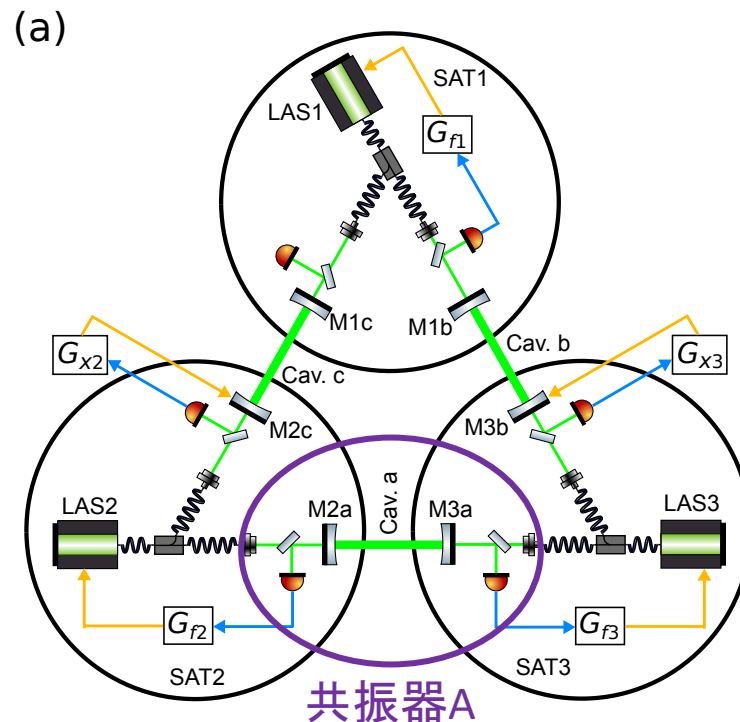
- パラメータは8個。各鏡の位置・姿勢と、入射ビームの並進・角度。
- 測定量は6個。ビームの重心からのずれ (ディザー $\times 2$) と入射軸と共振器軸のずれ (WFS $\times 4$)。
- $8 - 6 = 2$ は基準となる直線に対応する。
 - 例1: 2つの鏡の重心を結ぶ直線。
 - 例2: 入射ビームの直線。



共振器のASCの**パラメータ**と**観測量**。

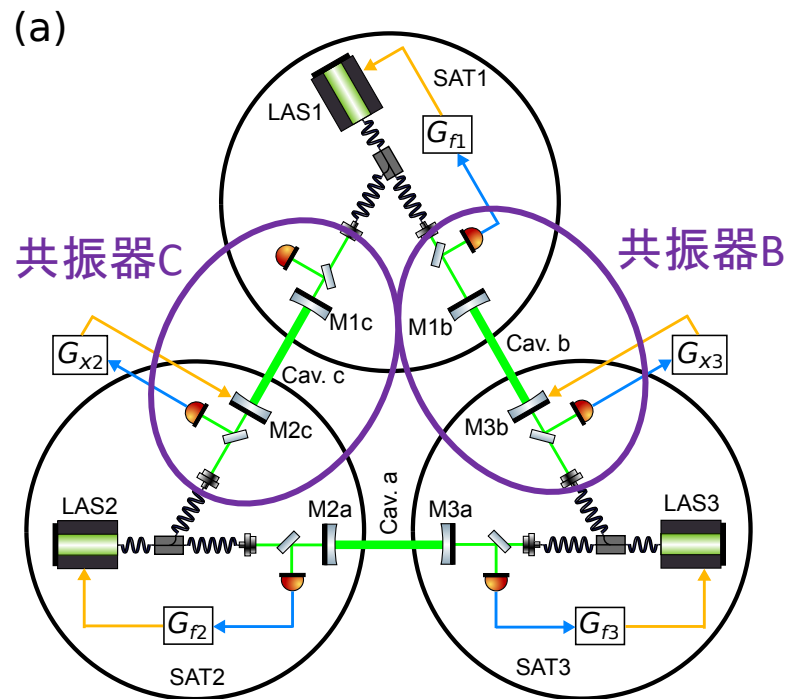
DECIGOの角度制御

- 共振器A (2つの鏡の重心が基準)
 - $a, b \rightarrow \vartheta^{\text{TM}2}, \vartheta^{\text{TM}2}$
 - $a, b, \alpha^{\text{WFS}2(3)}, \delta^{\text{WFS}2(3)} \rightarrow \alpha^{\text{IN}2(3)}, \delta^{\text{IN}2(3)}$



DECIGOの角度制御

- 共振器C (Bも同様) (入射ビームが基準)
 - $a, b, \alpha^{\text{WFS1}}, \delta^{\text{WFS1}} \rightarrow \vartheta^{\text{TM1}}, \gamma^{\text{TM1}} (\vartheta^{\text{TM3}}, \gamma^{\text{TM3}})$
 - $a, b, \alpha^{\text{WFS3}}, \delta^{\text{WFS3}} \rightarrow \vartheta^{\text{TM3}}, \gamma^{\text{TM3}}, \alpha^{\text{IN3}}, \delta^{\text{IN3}}$



角度方向の要求値

- 感度要求

- 鏡 (ビームが当たる位置の重心からのズレ(~1 mm)とのカップリング)

- 4.5×10^{-15} rad/rtHz @0.1 Hz

- RMS要求

衛星B, Cのドラッグフリー制御の精度で決まる。

- 共振器B, Cに入射するレーザー軸のズレ (衛星1の鏡を、鏡周りの1 mm空隙分動かさないようにする要求)

- 10^{-8} rad (ドラッグフリー用のセンサー換算: 10^{-9} m)

鏡の直径が約0.1 mとして計算 (10^{-8} rad x 0.1 m)。

目次

1. オーバーチュア
2. 序論
3. DECIGO実現のために必要なこと
4. まとめ・結論

まとめ・結論

- DECIGOはとても良い重力波望遠鏡である。
 - 「DECIGOがあれば他の検出器はいらない。」
- DECIGOの干渉計を動かすためには、地上干渉計とは異なる制御方法を考える必要がある。
 - 長さ制御においては腕の長さの調整が必要
 - 角度制御においては2つの鏡の重心を結ぶ直線を基準に制御するという手法が必要
- 干渉計的には、頑張ればできそう。
 - あとは、衛星からの要求とのすり合わせが必要。