

博士論文審査会

# Interferometer Locking Scheme for Advanced Gravitational-Wave Detectors and Beyond

理学系研究科物理学専攻 博士課程3年

榎本 雄太郎



# 概要

- ◎ **重力波観測**は、ユニークな天文学的・物理学的な成果をもたらす
  - \* 現在のレーザー干渉計型地上検出器: **コンパクト天体や重力理論に重要な知見**
  - \* 次世代の地上検出器: 10倍長い腕、10倍良い感度 → **サイエンスがより深化**
- ◎ 複雑な干渉計構成が必須
  - **干渉計のロック** (動作点引き込み) が**本質的役割**を担う。
- ◎ **Arm Length Stabilization (ALS)**: 干渉計ロックの中心的役割
  - \* メインレーザーと異なる波長の補助レーザーを用い、腕共振器を分離して制御
  - \* **先行研究のALS** → 腕が長くなる**次世代への適用が非自明**
- ◎ 本研究の手法: **新しいALSシステムの開発・実証**
  - \* **次世代へのスケールアップが容易な構成**
  - \* KAGRAにおいて、ALSシステムの**開発と評価**
  - \* KAGRAを観測可能な状態へ → **重力波のネットワーク観測に質的に重要な寄与**
- ◎ 次世代検出器のロック: **課題と解決法を初めて議論**
  - \* **課題を明確化**した
  - \* 課題を考慮に入れ、特性評価の結果から**次世代検出器のALSの雑音シミュレーション**をした
  - \* ロック達成をより確実にするための新規手法を提案し、有用性を示した
  - **次世代検出器の観測実現へ道筋をつける重要かつ先駆的な一歩**

1. 重力波の観測
2. 干渉計のロックと重力波観測
3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価
4. 次世代検出器におけるALS
5. まとめ・結論

1. **重力波の観測**
2. 干渉計のロックと重力波観測
3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価
4. 次世代検出器におけるALS
5. まとめ・結論

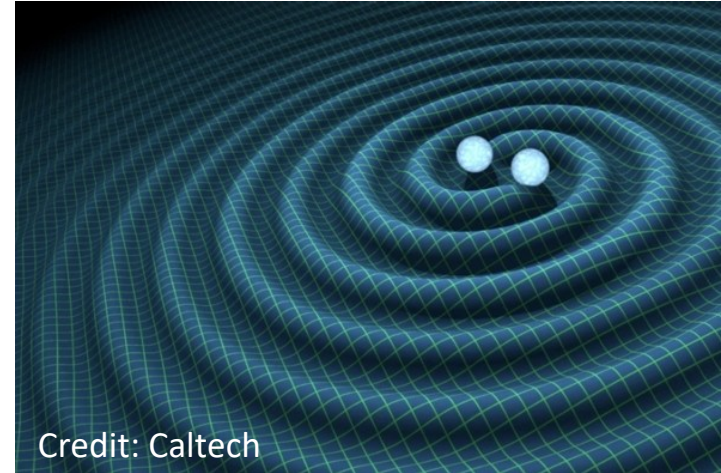


## 1. 重力波の観測

# 重力波

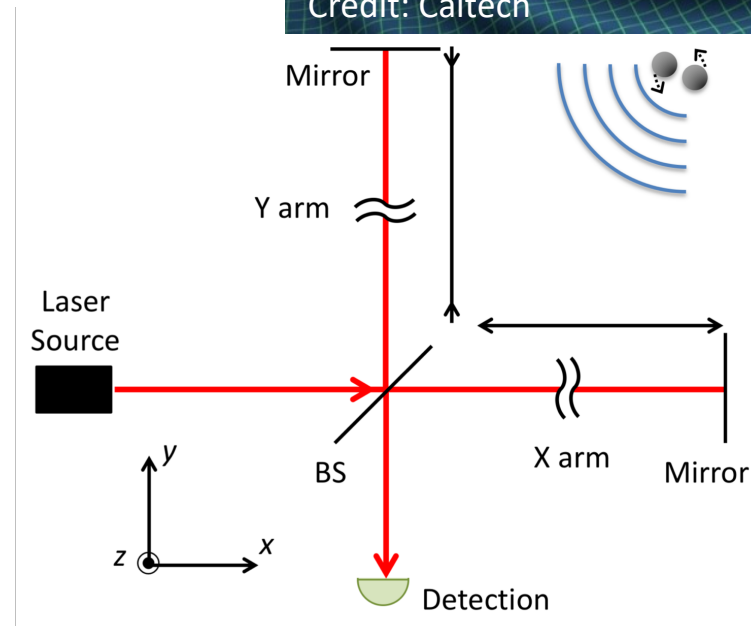
-- 重力波: 時空の歪みが時空を伝播する現象

重い物体が速く動くと  
重力波を強く放射する  
=> 天文学的な源



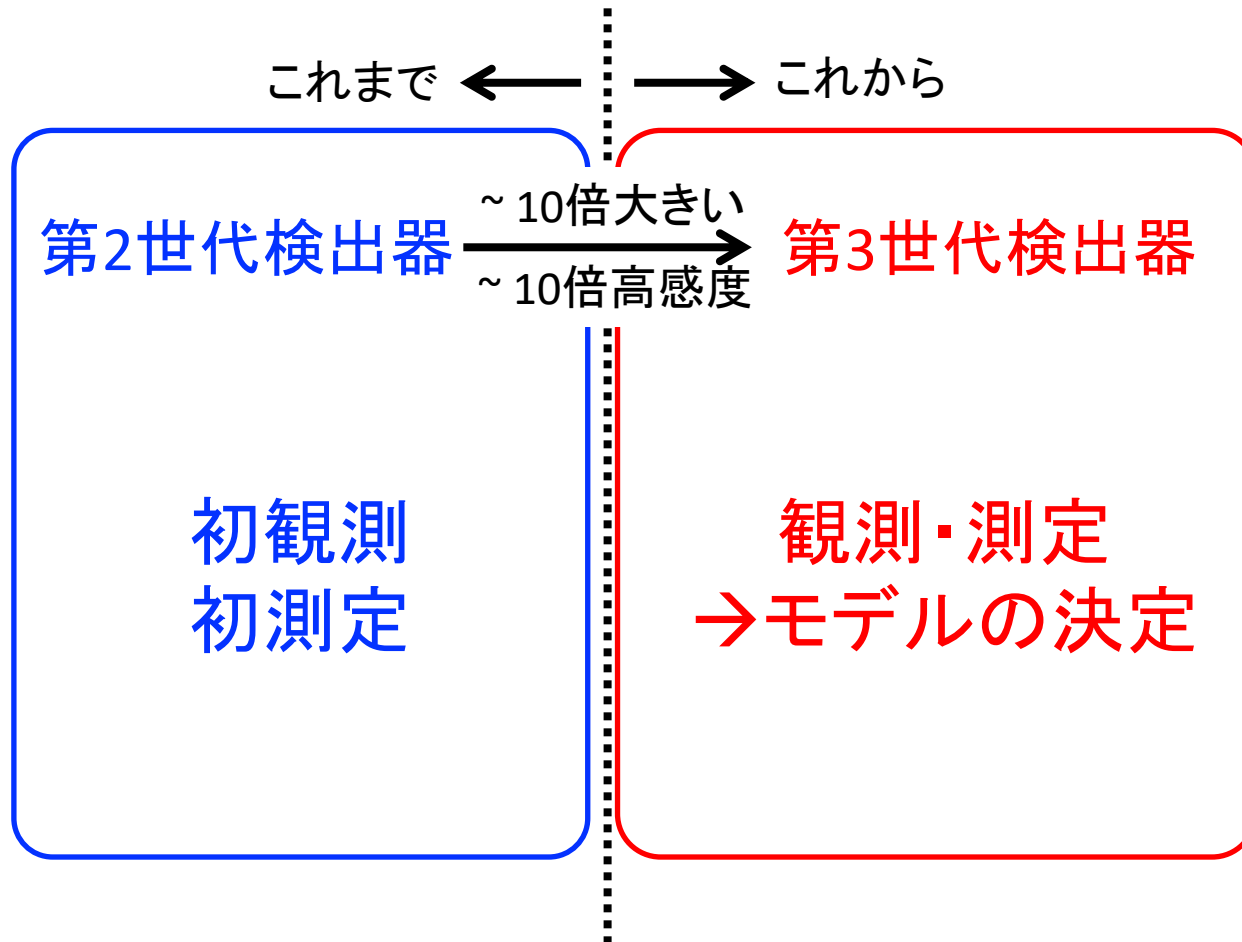
-- 重力波の直接検出

=> 距離変動の精密測定



## 1. 重力波の観測

# 重力波観測の概観



## 1. 重力波の観測

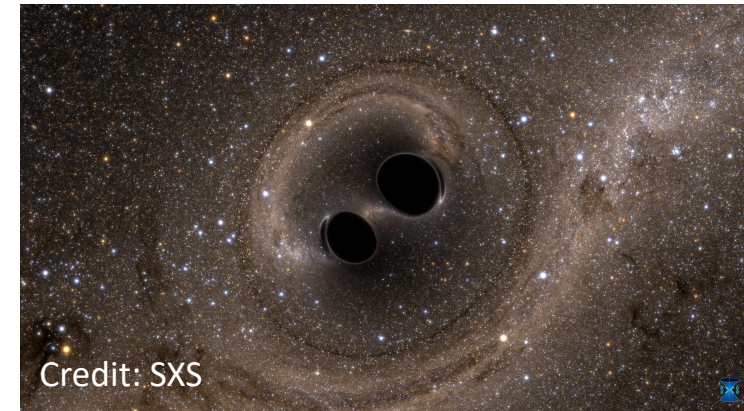
# 重力波観測 (これまで)

= 得られたサイエンス =

-- 重力波の初検出 (2015)

=> 重い恒星質量ブラックホールの存在

=> ブラックホールの準固有振動



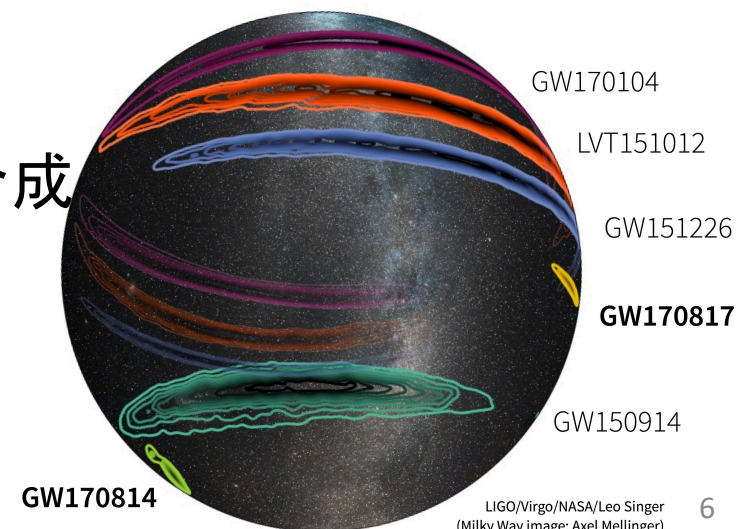
-- 連星中性子星合体のmultimessenger観測 (2017)

=> 短ガンマ線バーストの同時検出 → 発生源を明らかに

=> 重力波の伝搬速度に制限

=> 可視・近赤外のキロノバ → 重元素合成

=> 母銀河の特定 → Hubble定数



## 1. 重力波の観測

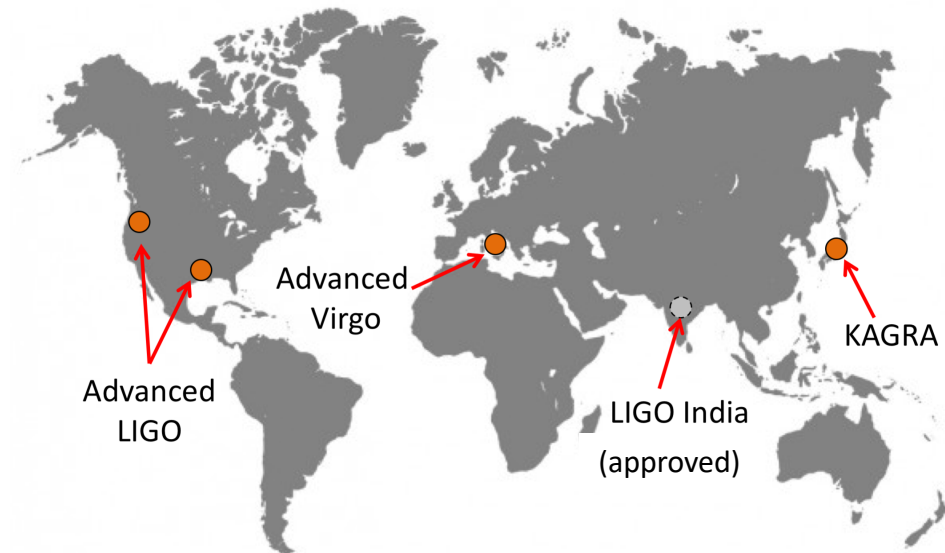
# 重力波観測 (これまで)

第2世代 (2G) 検出器が現在観測中

-- Advanced LIGOが  
連星ブラックホール合体  
からの重力波を捉えた

-- Advanced Virgoが加わり、  
連星中性子星合体を捉え、  
高精度で方向決定決定した

-- KAGRAもネットワーク観測に来月にも参加か  
=> 方向決定の精度の向上  
=> 方向決定できる波源の割合の向上



## 1. 重力波の観測

# 重力波観測 (これから)

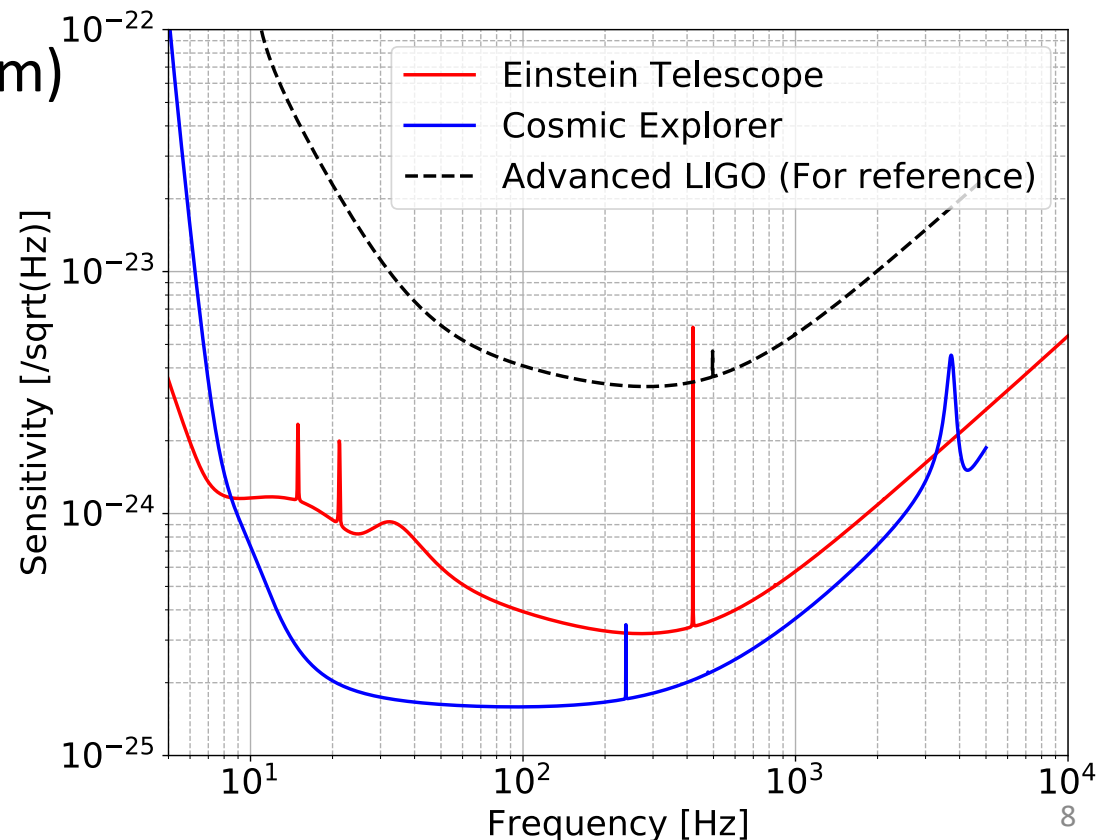
2030年代ころに、第3世代 (3G) 検出器が観測開始予定

- ヨーロッパのEinstein Telescope (基線長: 10 km)
- アメリカのCosmic Explorer (基線長: 40 km)

(Advanced LIGO: 4 km,  
Advanced Virgo/KAGRA: 3 km)

長い基線長を活かした  
より高感度な検出器

=> より大きなサイエンス



## 1. 重力波の観測

# 重力波観測 (これから)

= 得られるだろうサイエンス =

- [中性子星の物理](#): 合体直前/直後の波形から、中性子星の状態方程式や半径が特定できる
- [超新星爆発のメカニズム](#): コア崩壊型の超新星爆発からの重力波を数年に1度の割合で検出できる → 超新星爆発の発生時にコアでなにが起きているか
- [重力理論への制限](#): ブラックホール合体後の準固有振動を、数%の精度で相対論の予想と比較可能
- [Hubble定数の測定](#): 赤方偏移のわかっているところからの重力波の検出 → 赤方偏移 vs 光度距離 => Hubble定数の独立な測定、宇宙の発展の歴史
- [連星形成の歴史](#):  $z > 10$  からのコンパクト連星合体を検出可能 → 連星合体の頻度の歴史、およびそこから星形成の歴史を、初代星の時代から現在にかけて知ることができる。

## 1. 重力波の観測

# 重力波観測

	2G	3G
	← これまで	→ これから
基線長	3 – 4 km	10 – 40 km
感度 @ 100 Hz	$\sim 3 \times 10^{-24}$ [/VHz]	$\sim 3 \times 10^{-25}$ [/VHz]
連星系の観測	初検出	初代星の時代まで
中性子星の性質	初めて制限がついた	多くの状態方程式が排除できる
超新星爆発	$\sim 1/30$ year	$\sim 1/3$ year
重力理論	相対論と無矛盾	準固有振動を数%の精度で
Hubble 定数	初測定	乖離に決着付けられる精度
	初観測・初測定	観測・測定 → モデルの決定



## 1. 重力波の観測

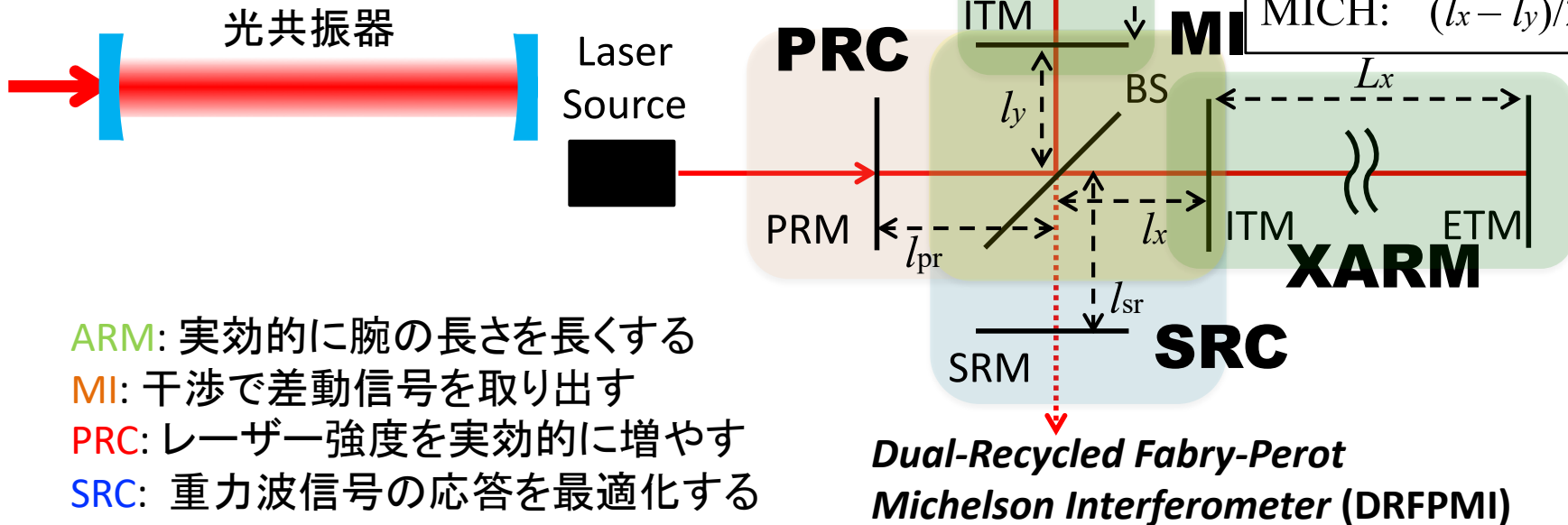
# 重力波検出器

= レーザー干渉計型重力波検出器 =

=> 振り子で吊られた鏡による  
光共振器を組み合わせ、  
複雑な干渉計構成が必須

The main interferometer  
degrees of freedom

DARM:	$(L_x - L_y)/2$
CARM:	$(L_x + L_y)/2$
PRCL:	$l_{pr} + (l_x + l_y)/2$
SRCL:	$l_{sr} + (l_x + l_y)/2$
MICH:	$(l_x - l_y)/2$



=> これらすべてが1波長 ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) のごく1部 ( $\sim 1 \text{nm}$ ) である共振点にあるときはじめて重力波検出器は動作する。



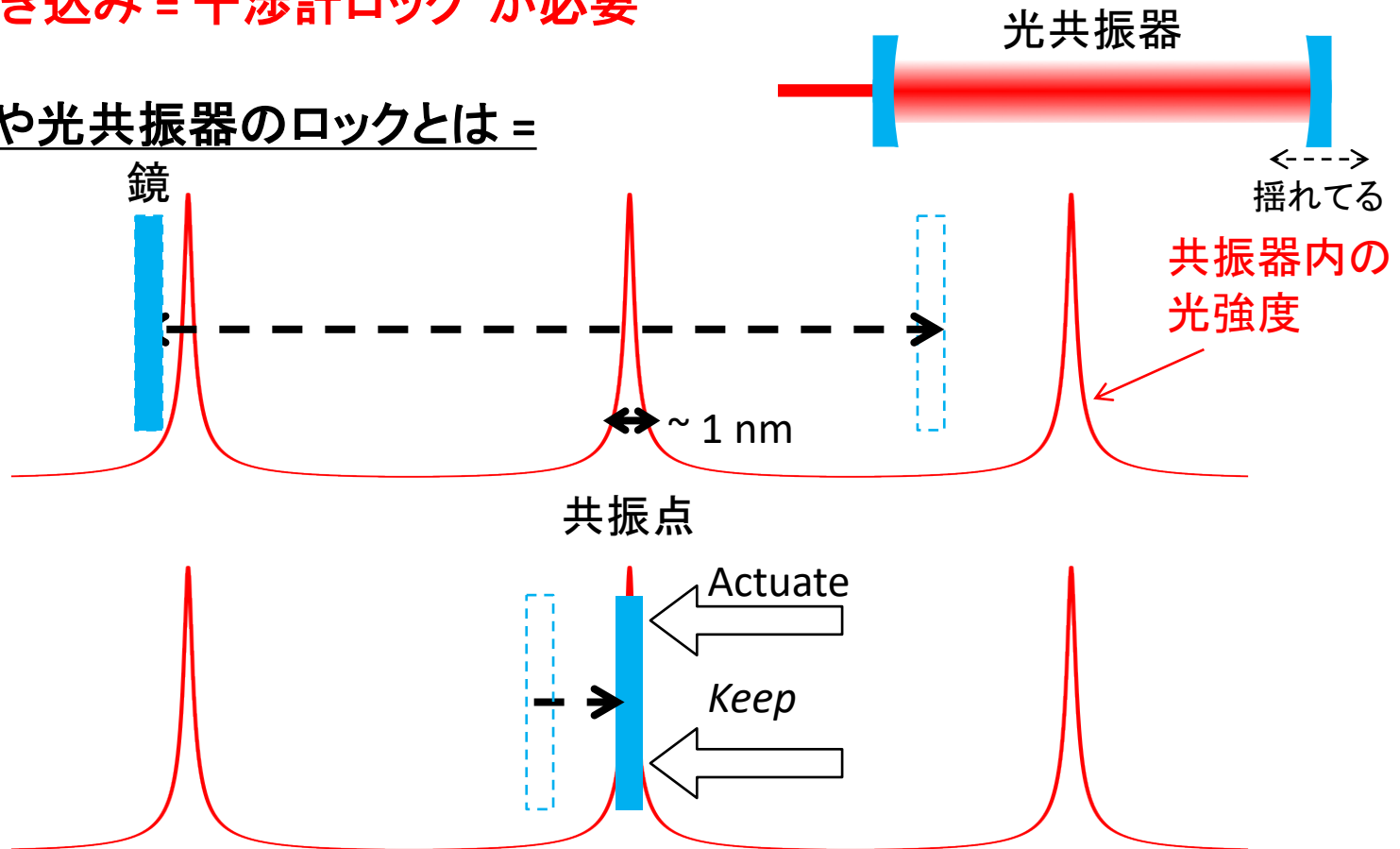
1. 重力波の観測
2. **干渉計のロックと重力波観測**
3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価
4. 次世代検出器におけるALS
5. まとめ・結論

## 2. 干渉計のロックと重力波観測

## はじめに

◎ すべての共振器長自由度が共振点に → 重力波検出器が動作  
**共振点引き込み = 干渉計ロック が必要**

そもそも  
= 干渉計や光共振器のロックとは =

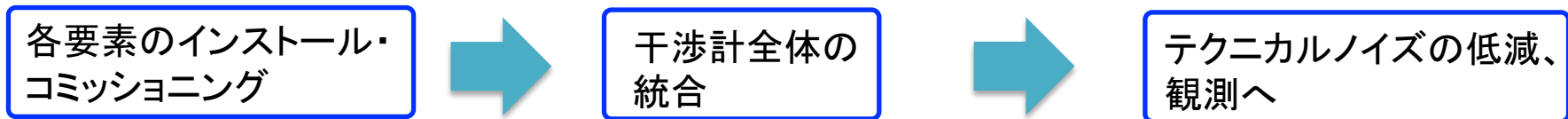


## 2. 干渉計のロックと重力波観測

# 干渉計のロックの研究の意義

## 干渉計のロック達成は、観測の実現に必要な最重要ステップ

== 観測までの流れ ==



初ロックの達成

ロックの達成 ≡ 各要素を統合し全体として動作可能にすること

- ロックして初めて重力波への感度が出せるようになる
  - 初めて干渉計の診断ができるようになる
  - 感度をリミットする雑音を1つずつ下げていける
- とても非自明・困難なプロセス、初ロックまで時間がかかる

例: Advanced LIGO

初ロックまで 11-16ヶ月

ロックから観測開始まで 7ヶ月

信頼できるロック手法を研究・開発する  
 - そもそも観測実現への最大のマイルストーン  
 - 早期の観測開始を可能に・感度上げに時間を割ける。

## 2. 干渉計のロックと重力波観測

# ロックの困難さ

-- すべての鏡が揺れている

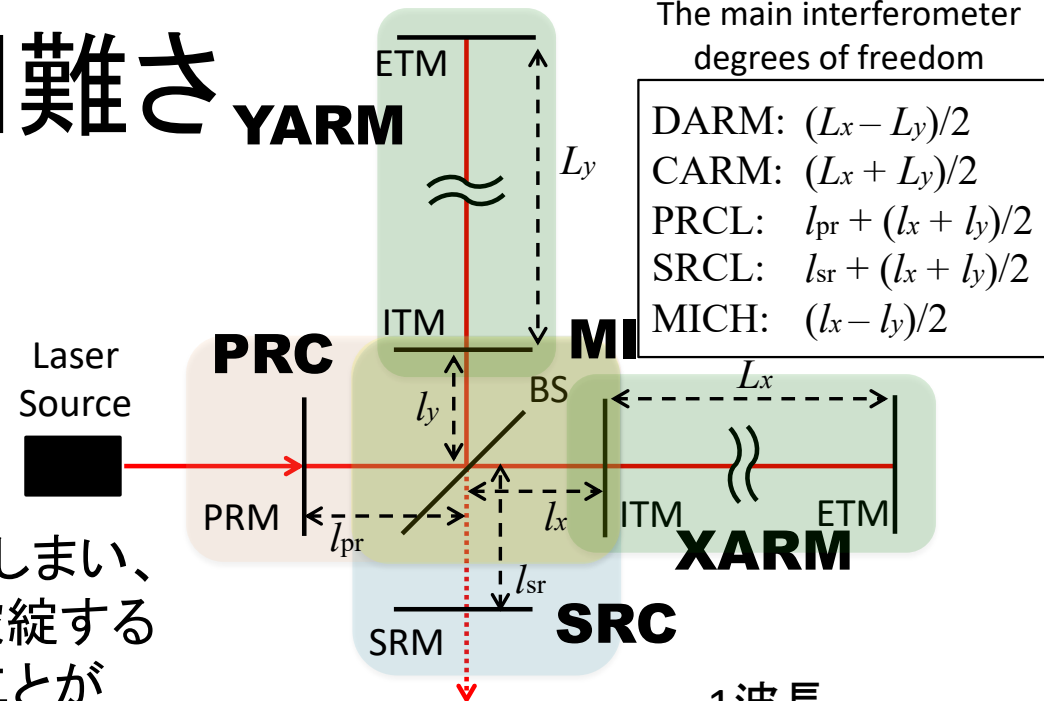
=>  $\sim 1 \mu\text{m}$  vs  $\sim 1\text{nm}$

-- 複数の光共振器/干渉計がカップルする

=> 5自由度の制御信号が混ざってしまい、  
他自由度の運動に応じて制御が破綻する  
=> 1自由度ずつ共振に持って行くことが  
極めて困難

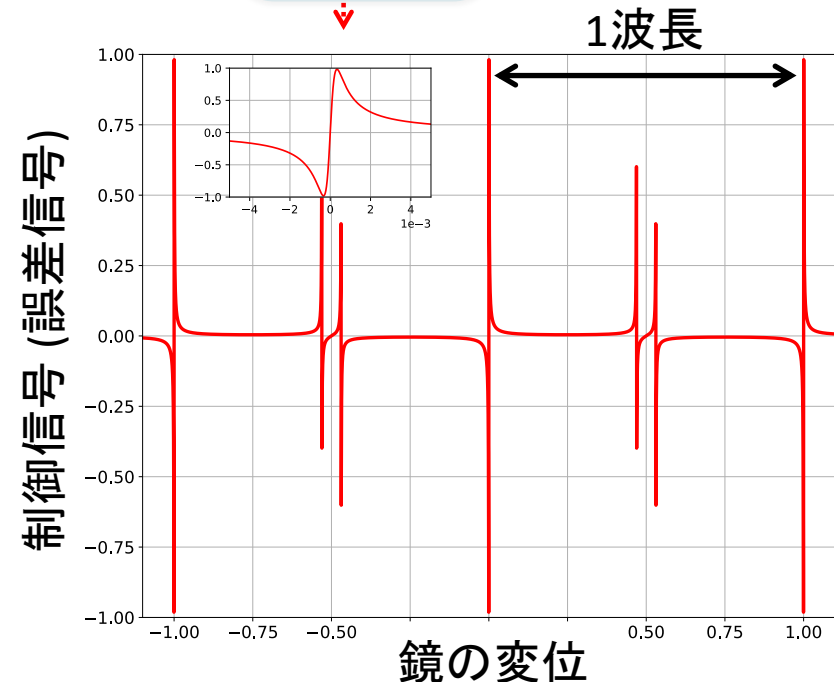
-- 各自由度の信号が非線形

=> 制御信号の線形域が狭く、  
共振点付近以外では制御信号が取れない



The main interferometer  
degrees of freedom

DARM:	$(L_x - L_y)/2$
CARM:	$(L_x + L_y)/2$
PRCL:	$l_{pr} + (l_x + l_y)/2$
SRCL:	$l_{sr} + (l_x + l_y)/2$
MICH:	$(l_x - l_y)/2$



## 2. 干渉計のロックと重力波観測

# 干渉計のロックの研究の意義

◎ 実際、干渉計ロックは精力的に研究されてきた

1G	2G	3G
TAMA300, Initial LIGO, Virgo, GEO600	Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA	Einstein Telescope, Cosmic Explorer
* 初のキロメートルスケール検出器	* 干渉計構成の複雑化 * 弱い/低雑音なアクチュエータ	* 10-40 kmの腕 * 異なるレーザー波長
* TAMA300 のロック手法 [M. Ando, Ph.D. Thesis, UTokyo (1998)] * よりロバストなPRCロック [K. Arai, Ph.D. Thesis, UTokyo (2001); CQG <b>19</b> (7)1843 (2002)] * Initial LIGOのロック手法 [M. Evans, Ph.D. Thesis, Caltech (2002); Optics Letters <b>27</b> (8)598 (2002)] * VirgoのVariable finesse法 [L. Barsotti, Ph.D. Thesis, Univ. of Pisa (2006); CQG <b>23</b> (8)S85 (2006)]	* ALSのプロトタイプ実証 [K. Izumi, Ph.D. Thesis, UTokyo (2012); JOSA A <b>29</b> (10)2092 (2012)] * Advanced LIGOのロック [A. Staley, Ph.D. Thesis, Caltech (2015); CQG <b>31</b> (24)245010 (2014)]	<b>未検討</b>

## 2. 干渉計のロックと重力波観測

# 干渉計のロックの研究の意義

◎ 実際、干渉計ロックは精力的に研究されてきた

1G	2G	3G
TAMA300, Initial LIGO, Virgo, GEO600	Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA	Einstein Telescope, Cosmic Explorer
* 初のキロメートルスケール検出器	* 干渉計構成の複雑化 * 弱い/低雑音なアクチュエータ	* 10-40 kmの腕 * 異なるレーザー波長
* TAMA300 のロック手法 [M. Ando, Ph.D. Thesis, UTokyo (1998)] * よりロバストなPRCロック [K. Arai, Ph.D. Thesis, UTokyo (2001); CQG <b>19</b> (7)1843 (2002)] * Initial LIGOのロック手法 [M. Evans, Ph.D. Thesis, Caltech (2002); Optics Letters <b>27</b> (8)598 (2002)] * VirgoのVariable finesse法 [L. Barsotti, Ph.D. Thesis, Univ. of Pisa (2006); CQG <b>23</b> (8)S85 (2006)]	* ALSのプロトタイプ実証 [K. Izumi, Ph.D. Thesis, UTokyo (2012); JOSA A <b>29</b> (10)2092 (2012)] * Advanced LIGOのロック [A. Staley, Ph.D. Thesis, Caltech (2015); CQG <b>31</b> (24)245010 (2014)]	<div style="text-align: center; color: red; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">             本研究の位置付け           </div>

## 2. 干渉計のロックと重力波観測

# 干渉計のロックの研究の意義

◎ 実際、干渉計ロックは精力的に研究されてきた

1G	2G	3G
TAMA300, Initial LIGO, Virgo, GEO600	Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA	Einstein Telescope, Cosmic Explorer
* 初のキロメートルスケール検出器	* 干渉計構成の複雑化 * 弱い/低雑音なアクチュエータ	* 10-40 kmの腕 * 異なるレーザー波長
* TAMA300 のロック手法 [M. Ando, Ph.D. Thesis, UTokyo (1998)] * よりロバストなPRCロック [K. Arai, Ph.D. Thesis, UTokyo (2001); CQG <b>19</b> (7)1843 (2002)] * Initial LIGOのロック手法 [M. Evans, Ph.D. Thesis, Caltech (2002); Optics Letters <b>27</b> (8)598 (2002)] * VirgoのVariable finesse法 [L. Barsotti, Ph.D. Thesis, Univ. of Pisa (2006); CQG <b>23</b> (8)S85 (2006)]	* ALSのプロトタイプ実証 [K. Izumi, Ph.D. Thesis, UTokyo (2012); JOSA A <b>29</b> (10)2092 (2012)] * Advanced LIGOのロック [A. Staley, Ph.D. Thesis, Caltech (2015); CQG <b>31</b> (24)245010 (2014)]	<div style="border: 2px dashed green; padding: 10px; text-align: center;"> <p><b>本研究の位置付け</b></p> </div>

ALSを用いたロック

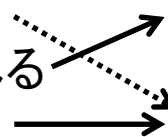
## 2. 干渉計のロックと重力波観測

## ALS

ロック実現への課題:

- \* (そもそも鏡が $\sim 1 \mu\text{m}$  揺れている)
- \* 干渉計自由度がカップルして信号に現れる
- \* 1自由度に注目しても信号が非線形

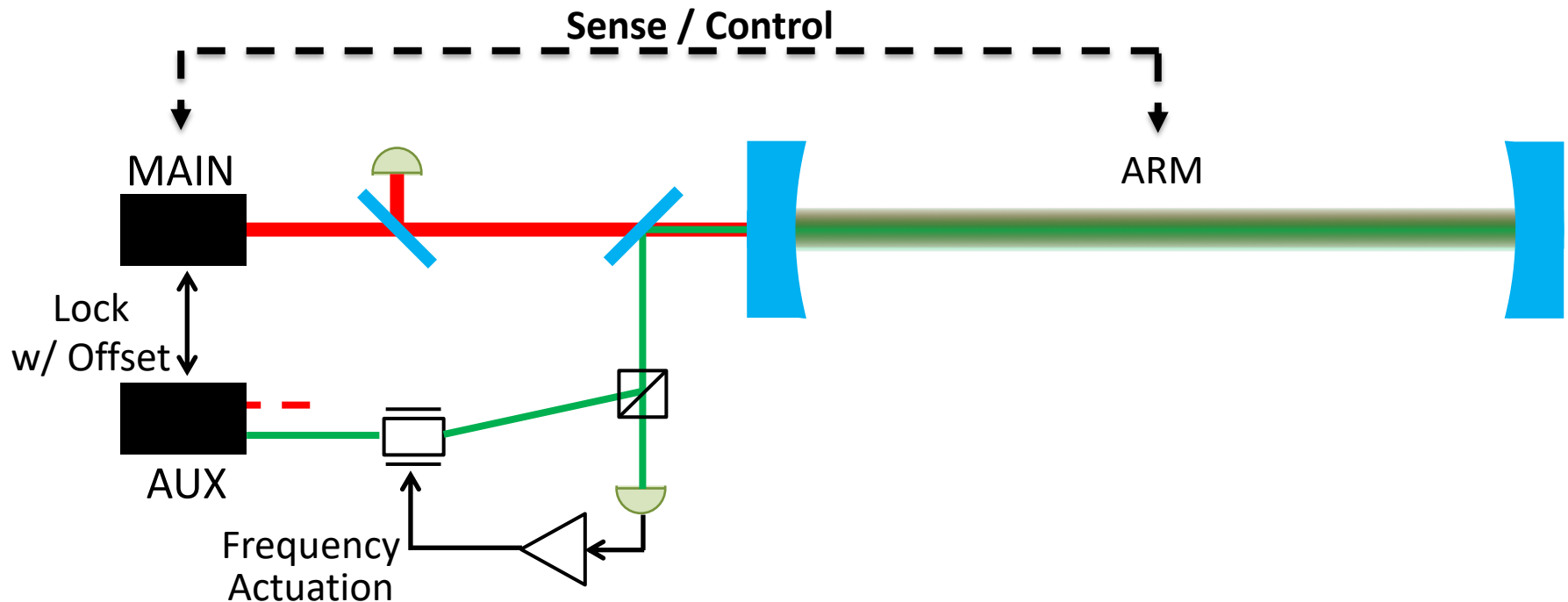
対策



## ALS (Arm Length Stabilization)

- \* メインレーザーと異なる波長の補助レーザー
- \* 2色コーティングで1つの腕しか感じない
- \* 補助レーザーが腕の共振を追いかける

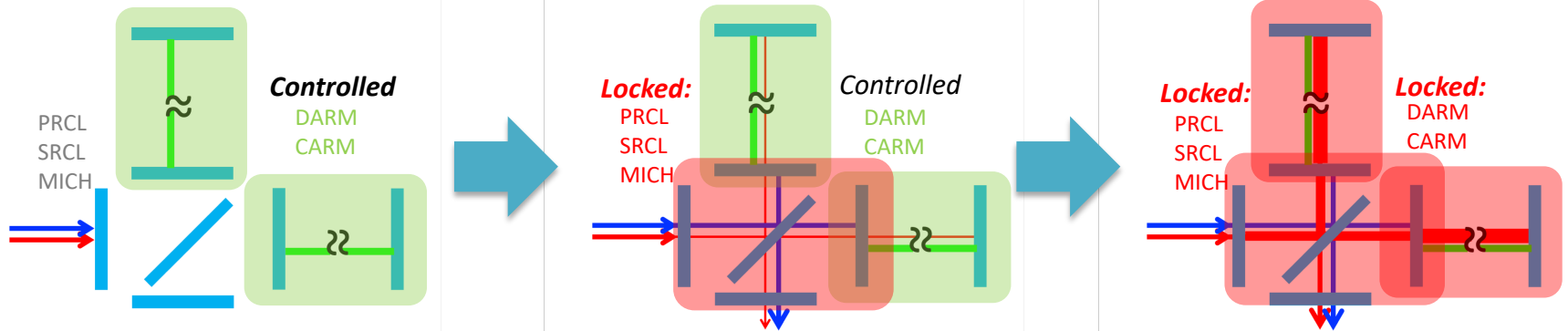
最も困難である、腕のロックを担当





## 2. 干渉計のロックと重力波観測

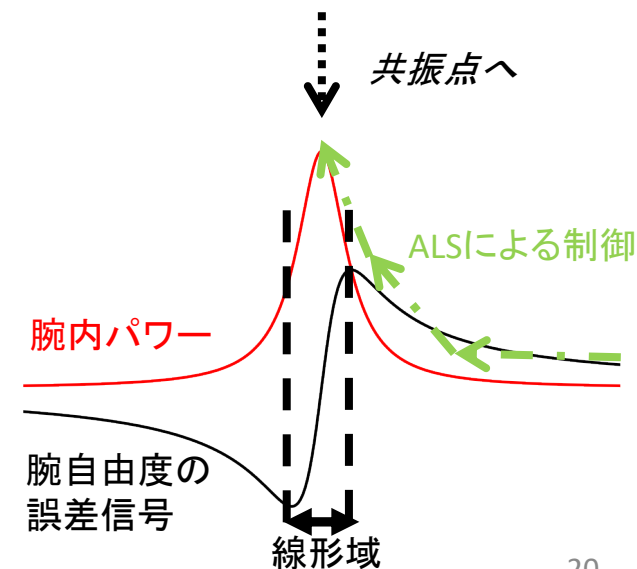
## ALSを用いたロック



\* ALSによる腕の制御:  
メインレーザーの倍波の  
グリーンレーザーで両腕を  
それぞれ制御

\* 中央部分のロック: メインレーザー  
の変調を活用して中央部分  
(MICH, PRCL, SRCL)をロック

\* 腕の制御の受け渡し:  
腕共振器もメインレーザーの共振点へ  
持って行き、信号の受け渡し



## 2. 干渉計のロックと重力波観測

# 先行研究の手法

## 特徴:

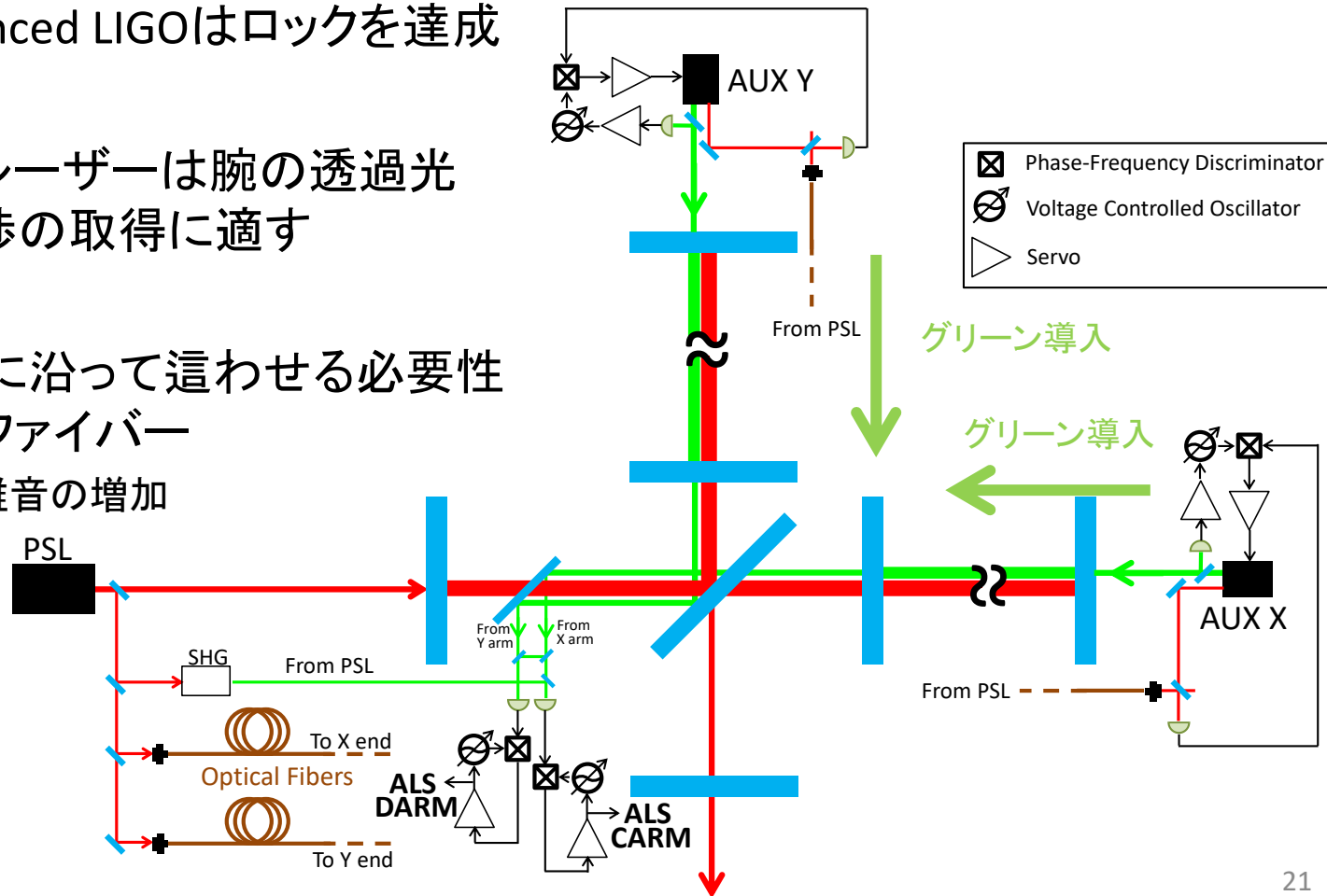
- \* 腕の後ろから**補助レーザー**を打ち込む
  - \* 腕の自由度の信号取得を光の干渉で取る
- => この手法でAdvanced LIGOはロックを達成

## 利点:

- \* 中央部分の補助レーザーは腕の透過光
- 綺麗な光で、干渉の取得に適す

## 問題点/改善点:

- \* 光ファイバーを腕に沿って這わせる必要性
- 3Gではより長いファイバー
- => 光学損失や位相雑音の増加



## 2. 干渉計のロックと重力波観測

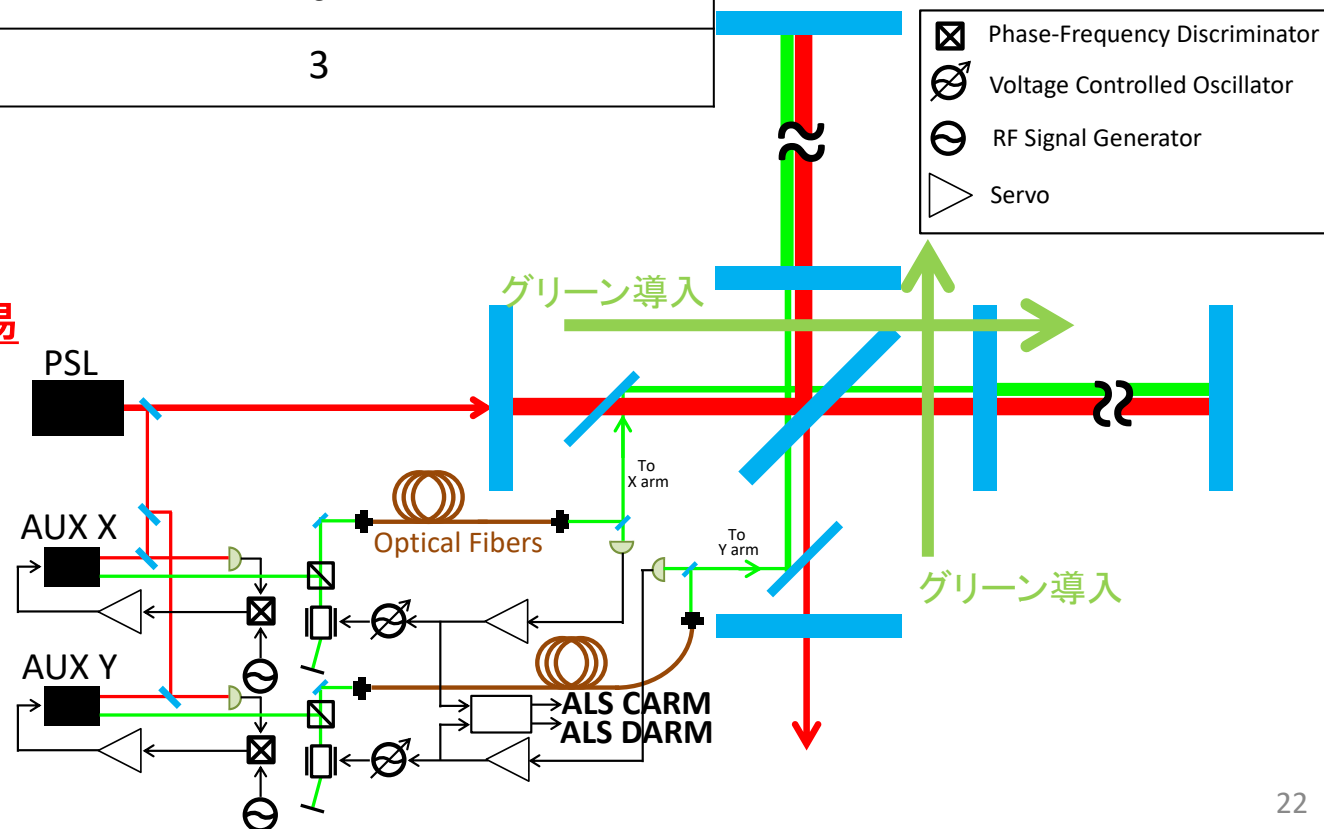
## 本研究の手法

	本研究	先行研究
補助レーザーの導入	センターから	エンドから
光ファイバー	センターエリア内	腕に沿って
CARM/DARMの取得	電圧の和と差	光の干渉 (beat note)
光学センサーの数	4	6
倍波発生の数	2	3

最大の違い

構成の違いにより、

-- センターからグリーン導入

→ 短いファイバー=> 3Gにスケールアップが容易-- 構成もよりシンプルに

## 2. 干渉計のロックと重力波観測

# 本研究の位置付け・意義

## ◎ 干渉計ロックの研究

1G	2G	3G
TAMA300, Initial LIGO, Virgo, GEO600	Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA	Einstein Telescope, Cosmic Explorer
* 初のキロメートルスケール検出器	* 干渉計構成の複雑化 * 弱い/低雑音なアクチュエータ	* 10-40 kmの腕 * 異なるレーザー波長
* TAMA300 のロック手法 [M. Ando, Ph.D. Thesis, UTokyo (1998)] * よりロバストなPRCロック [K. Arai, Ph.D. Thesis, UTokyo (2001); CQG <b>19</b> (7)1843 (2002)] * Initial LIGOのロック手法 [M. Evans, Ph.D. Thesis, Caltech (2002); Optics Letters <b>27</b> (8)598 (2002)] * VirgoのVariable finesse法 [L. Barsotti, Ph.D. Thesis, Univ. of Pisa (2006); CQG <b>23</b> (8)S85 (2006)]	* ALSのプロトタイプ実証 [K. Izumi, Ph.D. Thesis, UTokyo (2012); JOSA A <b>29</b> (10)2092 (2012)] * Advanced LIGOのロック [A. Staley, Ph.D. Thesis, Caltech (2015); CQG <b>31</b> (24)245010 (2014)]	<div style="text-align: center; color: red; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">             本研究の位置付け           </div>

## 2. 干渉計のロックと重力波観測

# 本研究の位置付け・意義

## ◎ 干渉計ロックの研究

-- 新しい/シンプルなALSシステムの開発

(→ 次世代へスケールアップ可能な構成)、

KAGRAへのインストール、KAGRAでのシステム実証・評価

次章: 3. 新手法のKAGRAでの  
実証・特性評価

-- 3G検出器のロック手法の研究

=> 新しいのALSシステムを3G検出器に適用、  
評価結果を用いて性能シミュレーション

=> 必要な開発項目を明らかに

次々章: 4. 次世代検出器におけるALS

Optics Letters **27**(8)598 (2002)]

\* VirgoのVariable finesse法

[L. Barsotti, Ph.D. Thesis, Univ. of Pisa (2006);

CQG **23**(8)S85 (2006)]

## 本研究の位置付け

1. 重力波の観測
2. 干渉計のロックと重力波観測
3. **新手法のKAGRAでの実証・特性評価**  
[博士論文 Chapter 7]
4. 次世代検出器におけるALS
5. まとめ・結論

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

# KAGRAで行ったこと

## = 目的 =

- \* 新しいALSシステムの開発・実証・評価
- \* KAGRAのロックの達成

## = Overview =

### -- Design, Implementation:

- \* 新ALSシステムのデザイン → KAGRAの干渉計ロックへの要求値を満たす
- \* ALSシステムのKAGRAへのインストール

### -- Demonstration:

- \* KAGRAの干渉計 (FPMI) のロックの達成
- \* ALSシステムの機能の実証

### -- Characterization:

- \* ALSシステムの雑音の定量的評価
- \* 主要な雑音源の特定、改善方法の考察

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

# KAGRAで行ったこと

## = 目的 =

- \* 新しいALSシステムの開発・実証・評価
- \* KAGRAのロックの達成

## = Overview =

### -- Design, Implementation:

- \* 新ALSシステムのデザイン → KAGRAの干渉計ロックへの要求値を満たす
- \* ALSシステムのKAGRAへのインストール

### -- Demonstration:

- \* KAGRAの干渉計 (FPMI) のロックの達成
- \* ALSシステムの機能の実証

### -- Characterization:

- \* ALSシステムの雑音の定量的評価
- \* 主要な雑音源の特定、改善方法の考察



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## ALSのゴール

-- 実際に干渉計をロックすること => 最も明白なゴール

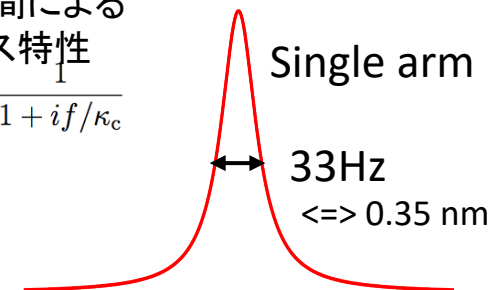
では、干渉計のロックに必要な要求は、、、

-- 要求値: 各腕の自由度を腕の線幅より抑える

$$\Delta f_{\text{res}}(f; \kappa_{\text{ARM}}) = \left[ \underbrace{\Delta f_{\text{main}}(f)}_{\substack{\text{メインレーザー} \\ \text{周波数}}} - \underbrace{\Delta f_{\text{ARM}}(f)}_{\substack{\text{腕共振器の} \\ \text{共振周波数}}} \right] L(f; \kappa_{\text{ARM}})$$

共振器内の光の  
滞在時間による  
ローパス特性  
 $L(f; \kappa_c) = \frac{1}{1 + if/\kappa_c}$

➡ RMS ( $\Delta f_{\text{res}}$ ) < 33Hz

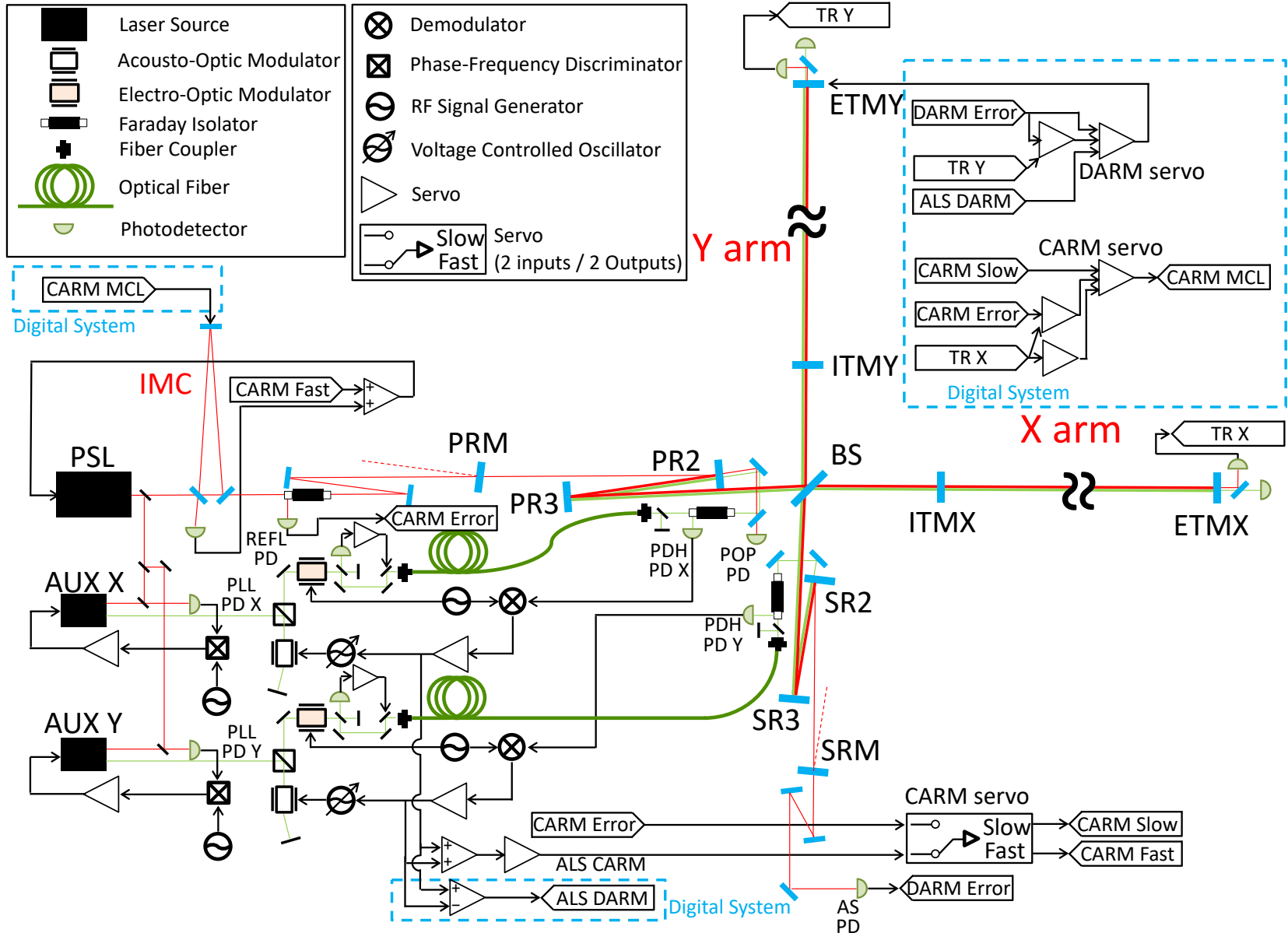


-- 後述する動機により、Extra success: 1.6 Hz もターゲットに  
(RMS ( $\Delta f_{\text{res,CARM}}$ ) < 1.6Hz)

Extra success も達成可能なシステムをデザインし、KAGRAにインストールした。

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## ALSシステム



### 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

**Legend:**

- Laser Source
- Acousto-Optic Mod
- Electro-Optic Mod
- Faraday Isolator
- Fiber Coupler
- Optical Fiber
- Photodetector

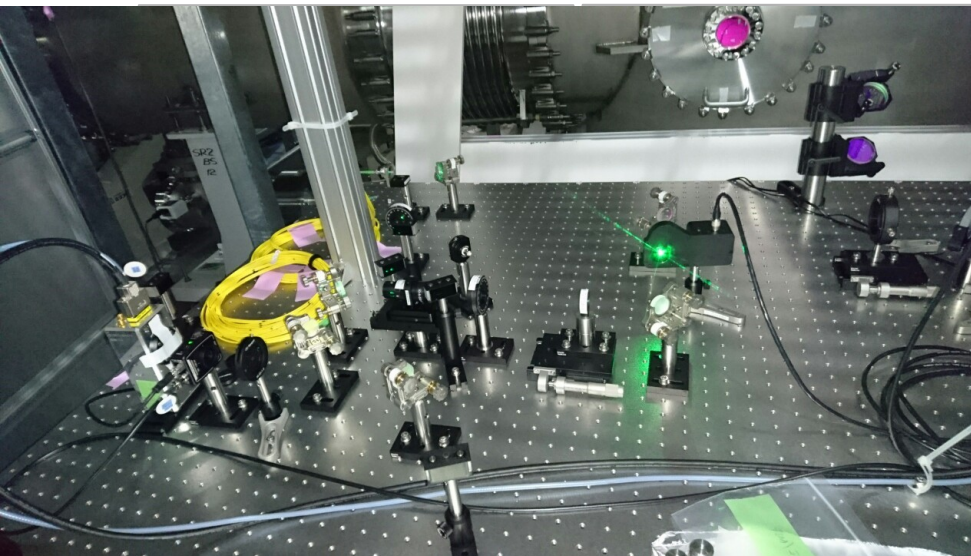
**Diagram Labels:** PSL, AUX X, AUX Y, PLL PD X, PLL PD Y, REFLECTOR PD, PDH PD, POP PD, SR3, ALS CARM, ALS DARM, Digital System, CARM MCL, IMC, CARM, DARM Error, AS PD.

**Text Annotations:**

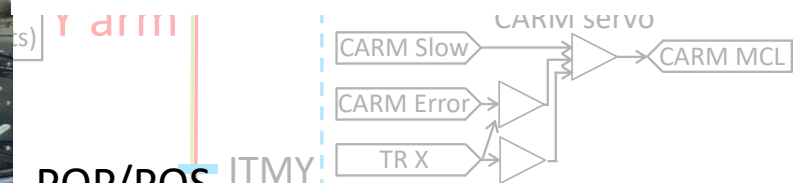
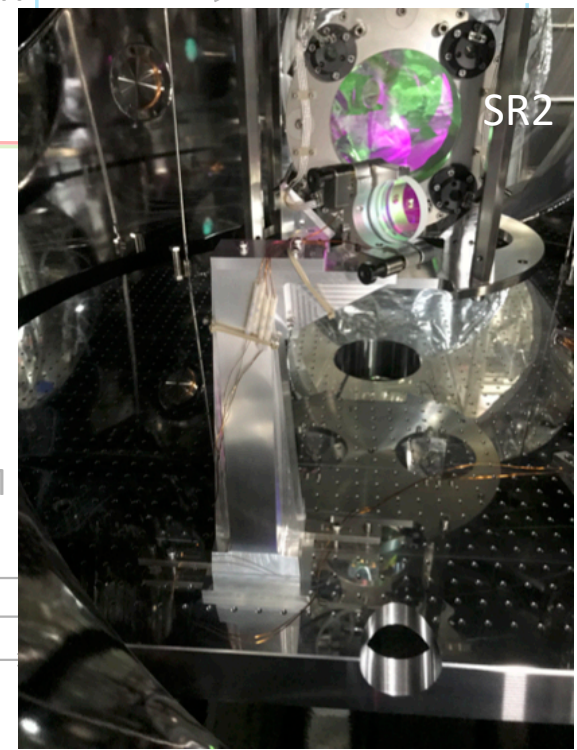
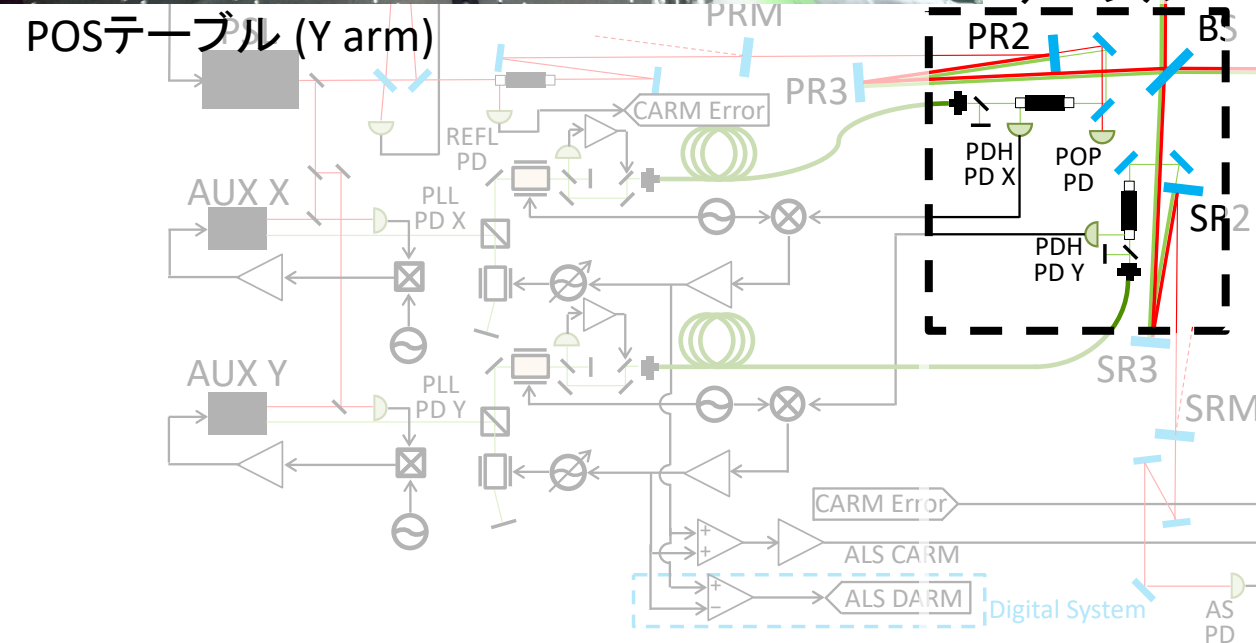
- レーザーラーム
- \* 補助レーザー (赤外) とメインレーザーの干渉  
=> 補助レーザー周波数がメインレーザーに追従
- \* 補助レーザー (緑; 倍波) の周波数シフトと位相変調  
腕共振器に追従するためのアクチュエータ
- 腕共振器のセンシングに必要な

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## ALSシステム



- \* グリーンを腕に入射
  - \* 腕からの反射光の検出
- => 腕の共振 vs グリーンの周波数の信号取得

POP/POS  
テーブル



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

# KAGRAで行ったこと

= 目的 =

- \* 新しいALSシステムの開発・実証・評価
- \* KAGRAのロックの達成

= **Overview** =

-- Design, Implementation:

- \* 新ALSシステムのデザイン → KAGRAの干渉計ロックへの要求値を満たす
- \* ALSシステムのKAGRAへのインストール

-- Demonstration:

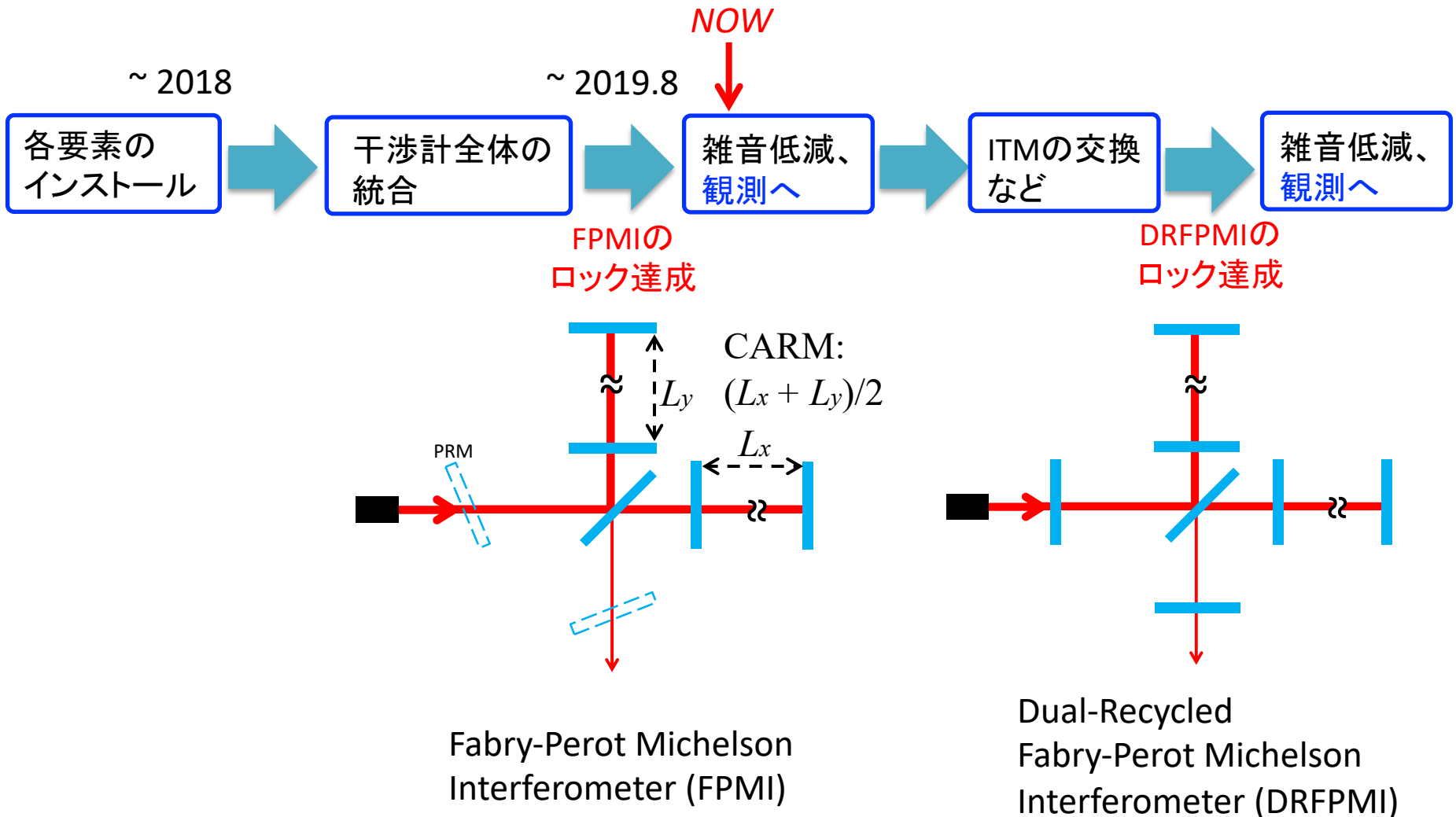
- \* KAGRAの干渉計 (FPMI) のロックの達成
- \* ALSシステムの機能の実証

-- Characterization:

- \* ALSシステムの雑音の定量的評価
- \* 主要な雑音源の特定、改善方法の考察

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## 背景: KAGRAのタイムライン



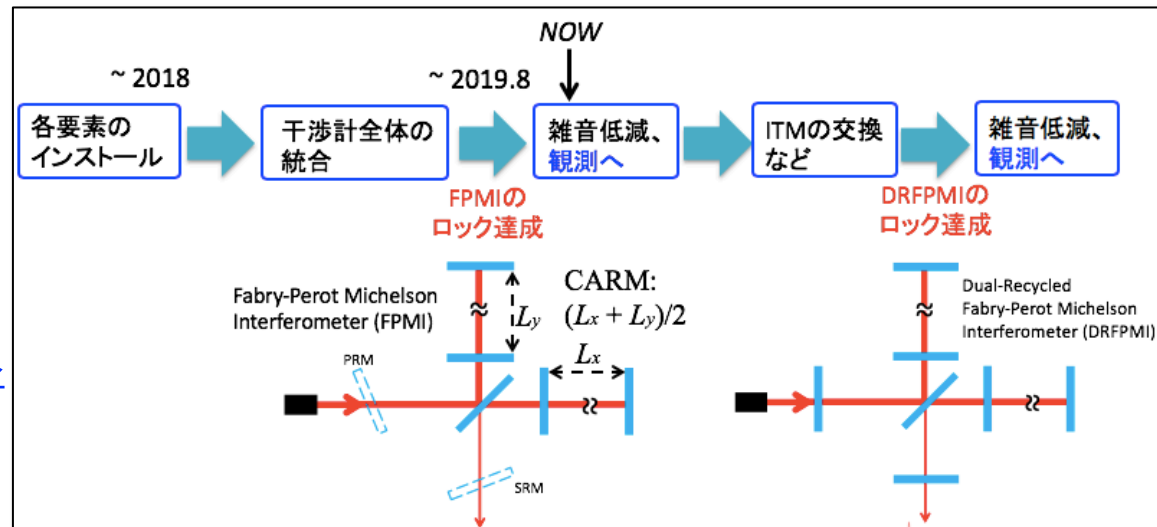
## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

# Demonstration

= 狙い・意義 =

## ◎ KAGRAの干渉計の ロックの達成

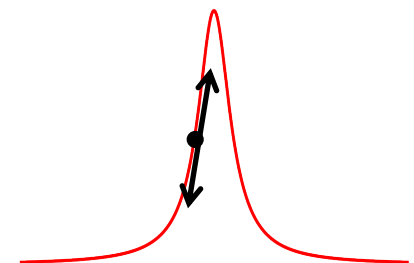
=> 検出器の感度が出る状態へ



## ◎ 2つの手法でFPMIをロック

-- 1つめの手法: ALSによる制御からメインレーザーの信号に直接受け渡し  
=> ALSによる制御で、CARM/DARMが線幅以内に抑えられていることを示す

-- 2つめの手法: ALSによるCARM制御 → 透過光による制御 → 最終的な信号  
=> DRFPMIのロックのときに必要になるステップを実証  
=> FPMI → DRFPMI になっても問題ないことを示す



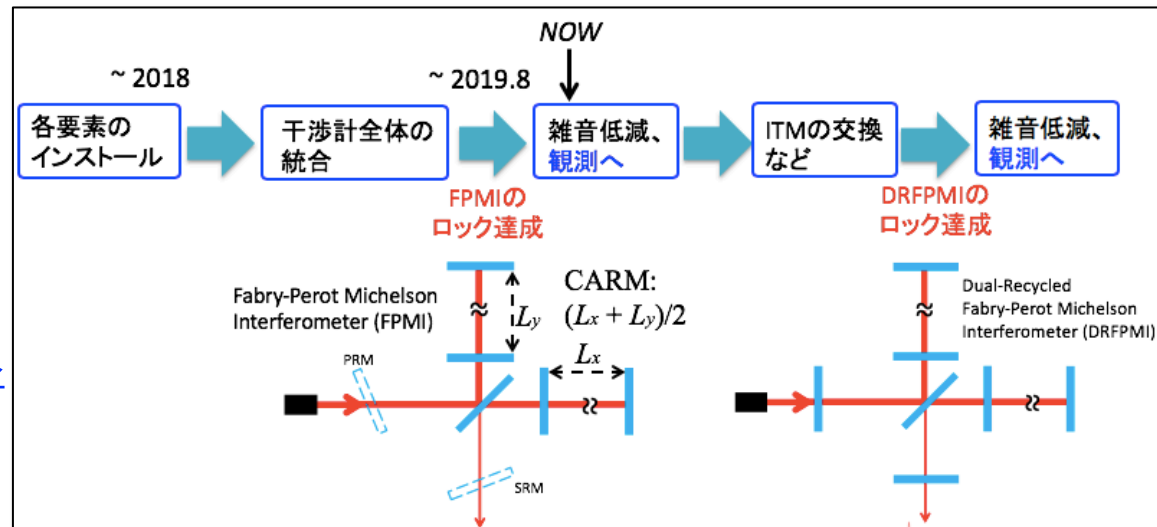
## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

# Demonstration

= 狙い・意義 =

## ◎ KAGRAの干渉計の ロックの達成

=> 検出器の感度が出る状態へ

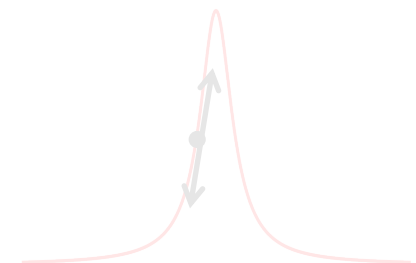


## ◎ 2つの手法でFPMIをロック

-- 1つめの手法: ALSによる制御からメインレーザーの信号に直接受け渡し  
=> ALSによる制御で、CARM/DARMが線幅以内に抑えられていることを示す

こちらを話す

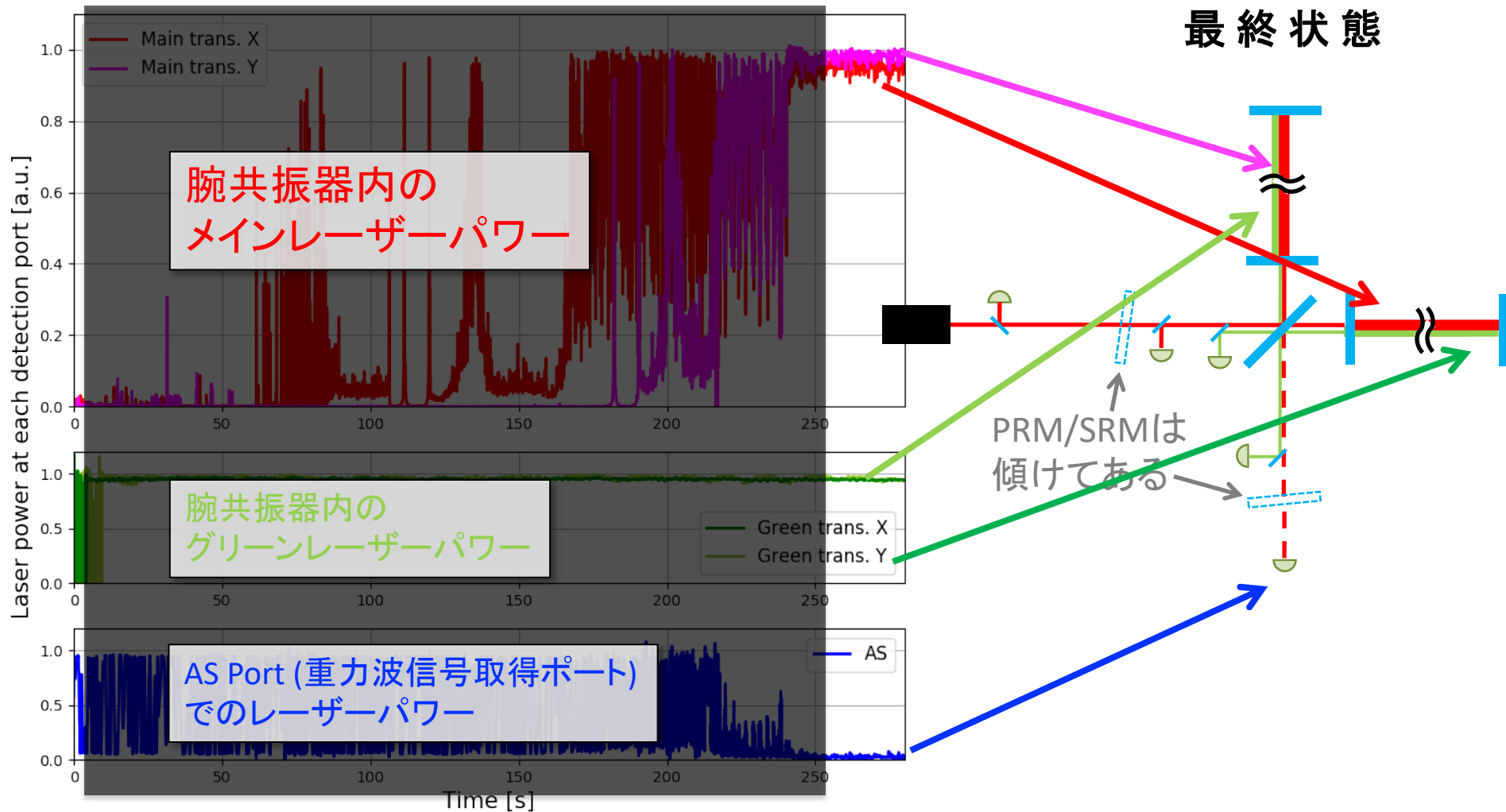
-- 2つめの手法: ALSによるCARM制御 → 透過光による制御 → 最終的な信号  
=> DRFPMIのロックのときに必要になるステップを実証  
=> FPMI → DRFPMI になっても問題ないことを示す





## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## Demonstration

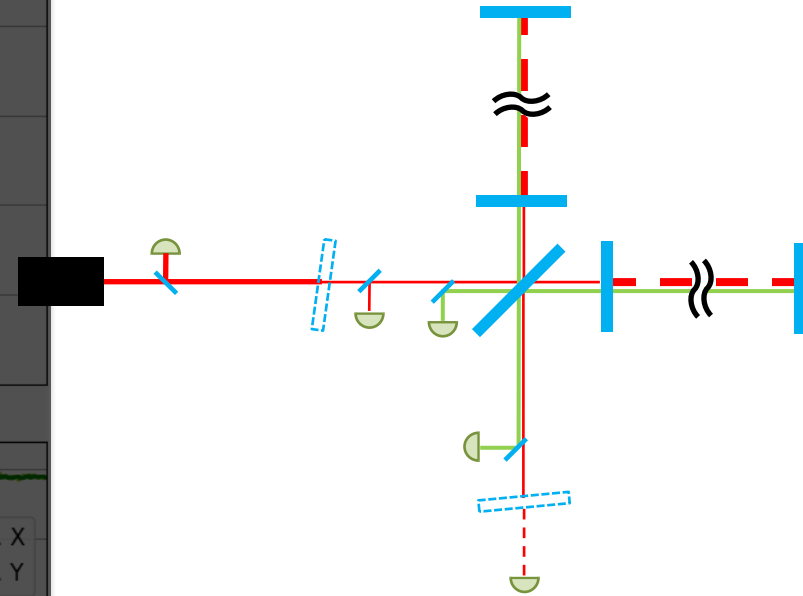
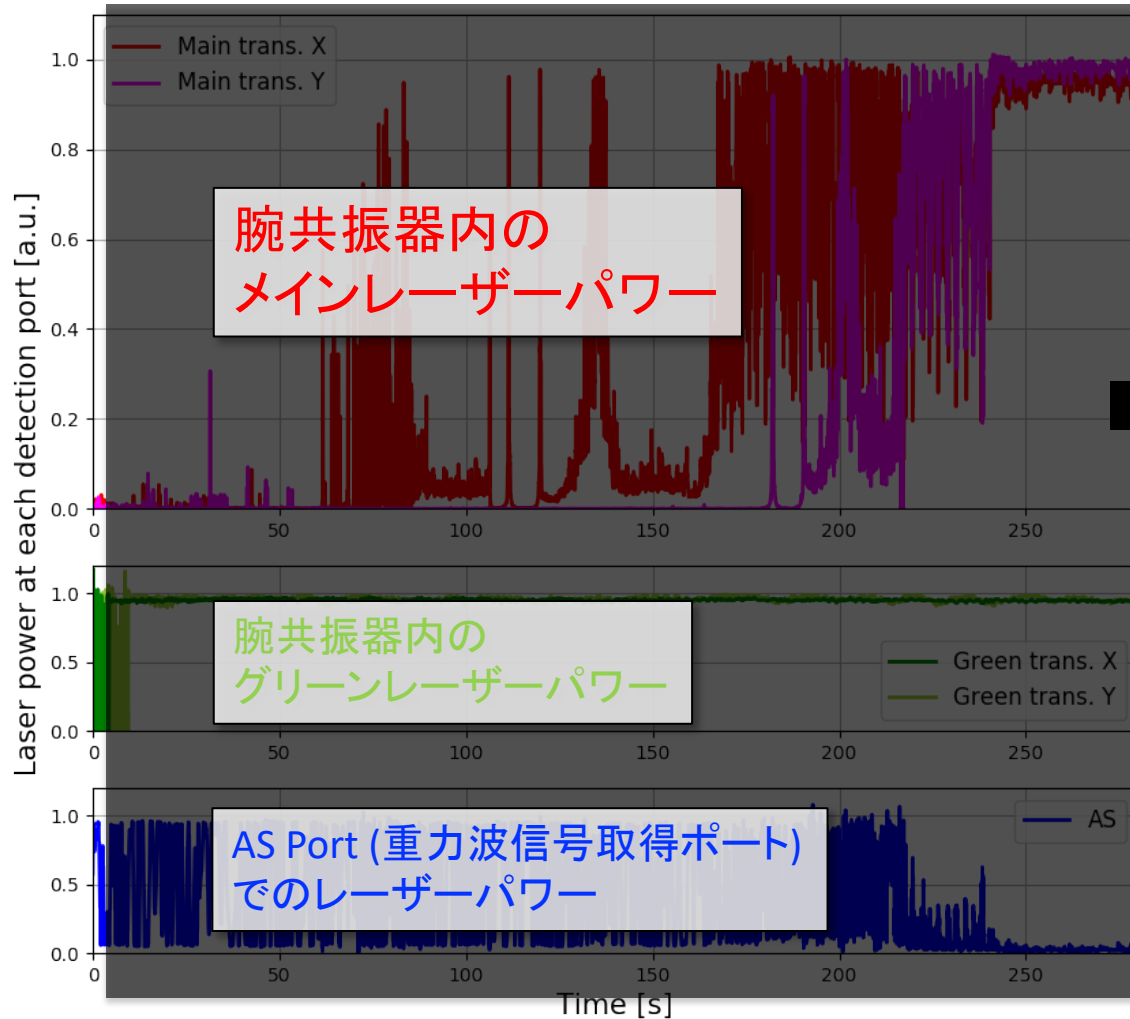


動作点引き込みの時系列



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## Demonstration



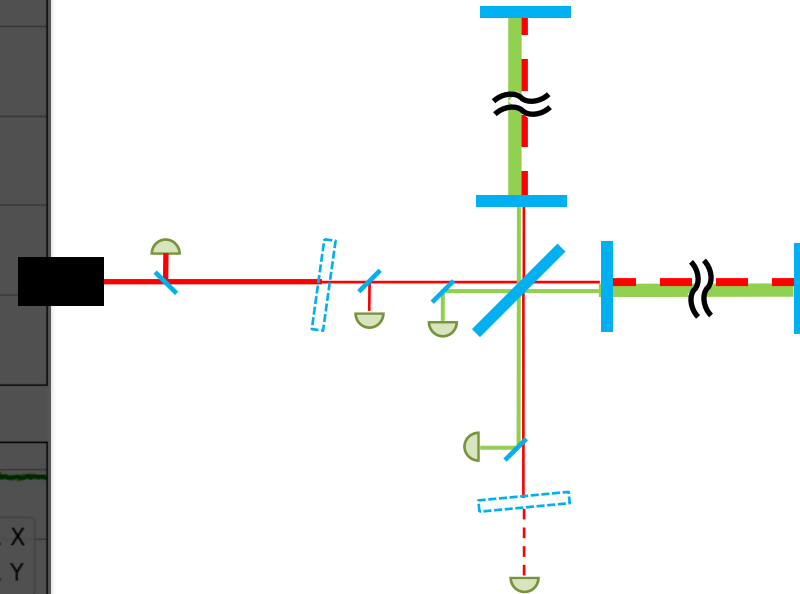
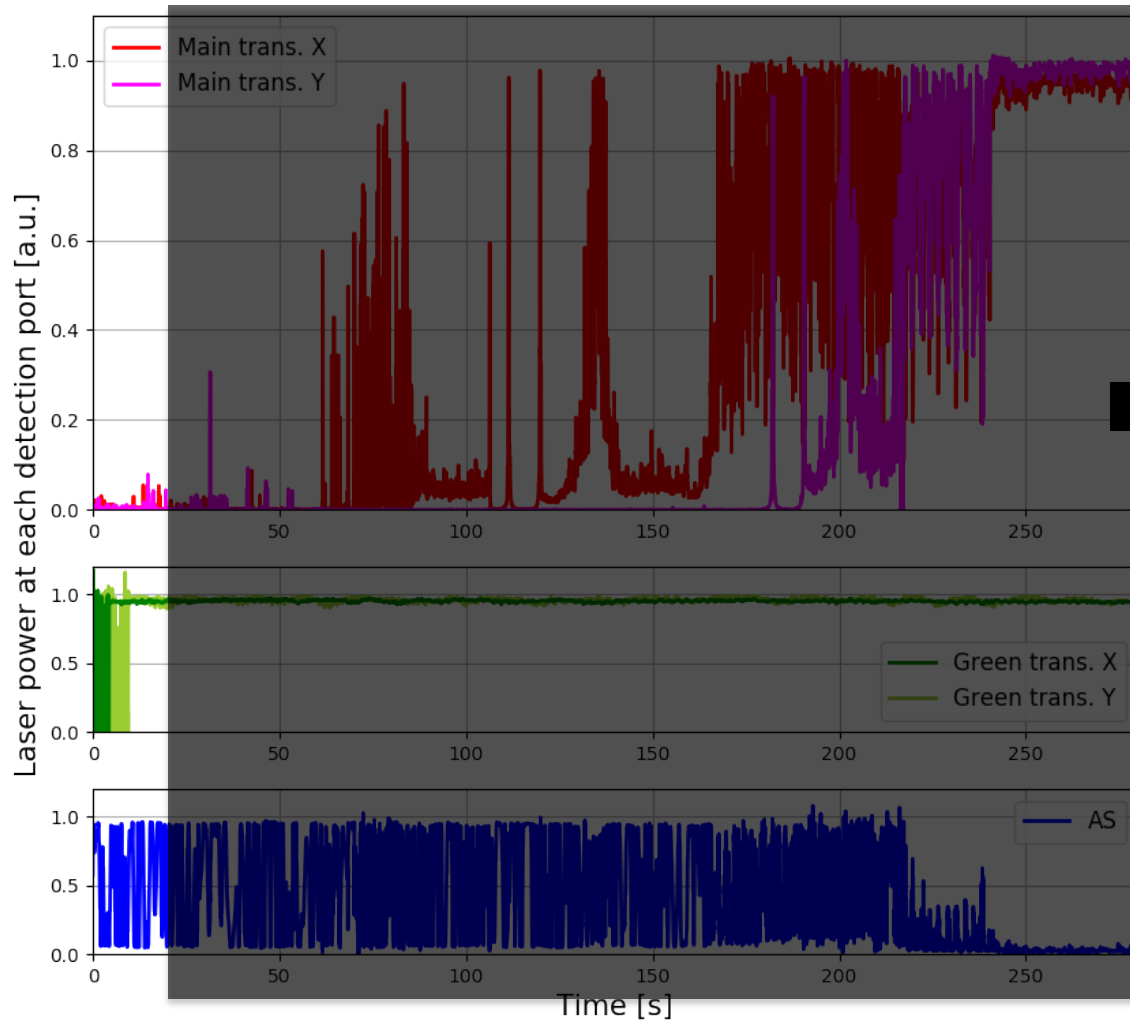
0'. 何も動作点にない。

動作点引き込みの時系列



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## Demonstration



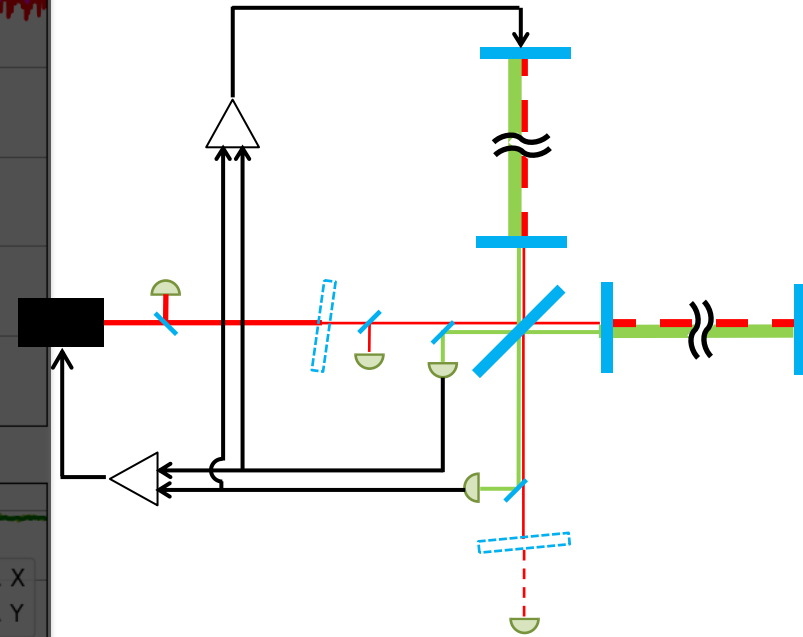
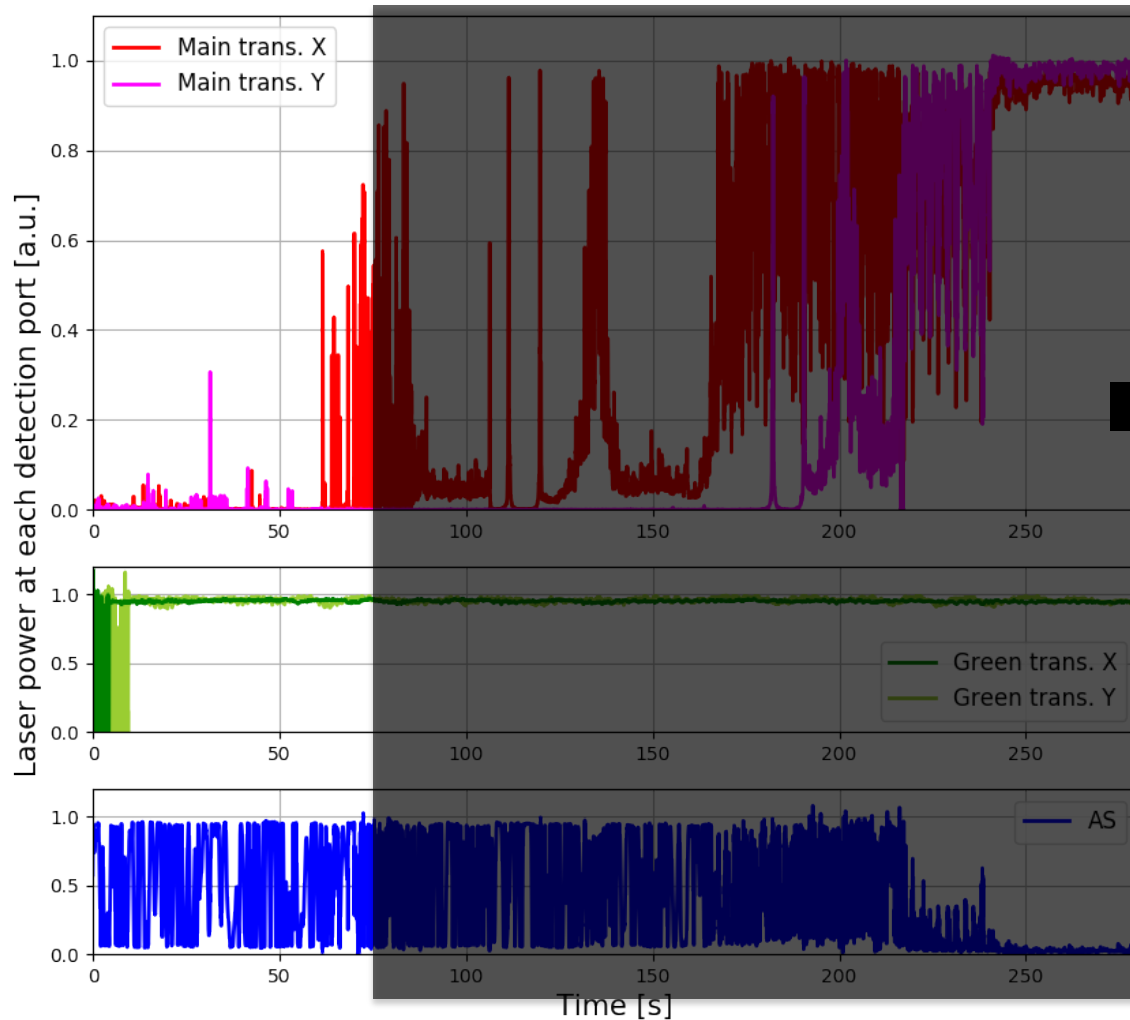
- 0. 何も動作点にない。
- 0. **メインレーザー**は動作点にいない。  
**グリーンレーザー**を腕に追随させる。

動作点引き込みの時系列



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## Demonstration



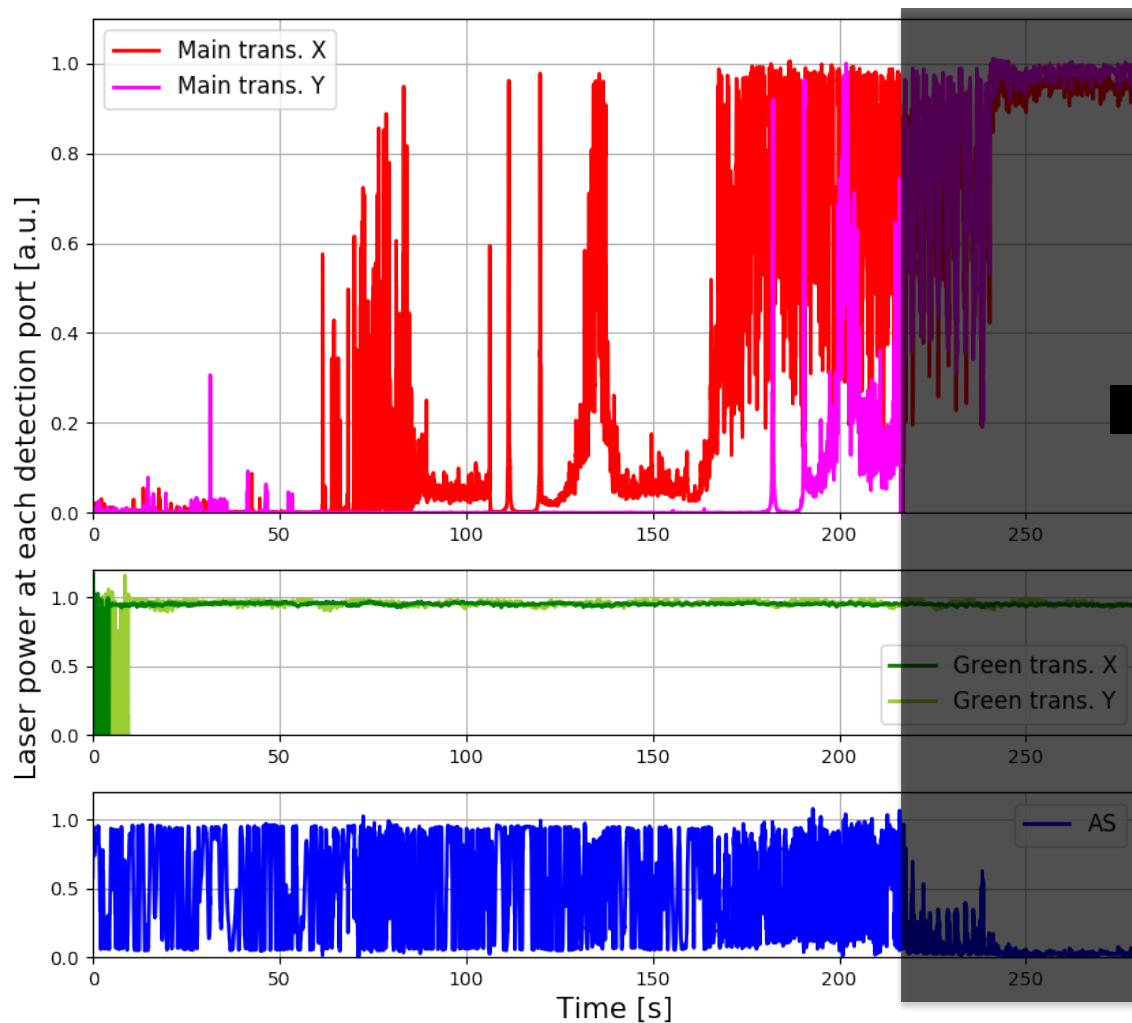
- 0'. 何も動作点にない。
- 0. **メインレーザー**は動作点にいない。  
グリーンレーザーを腕に追従させる。
- 1. **グリーンの信号**で腕の1+1自由度を安定化

動作点引き込みの時系列

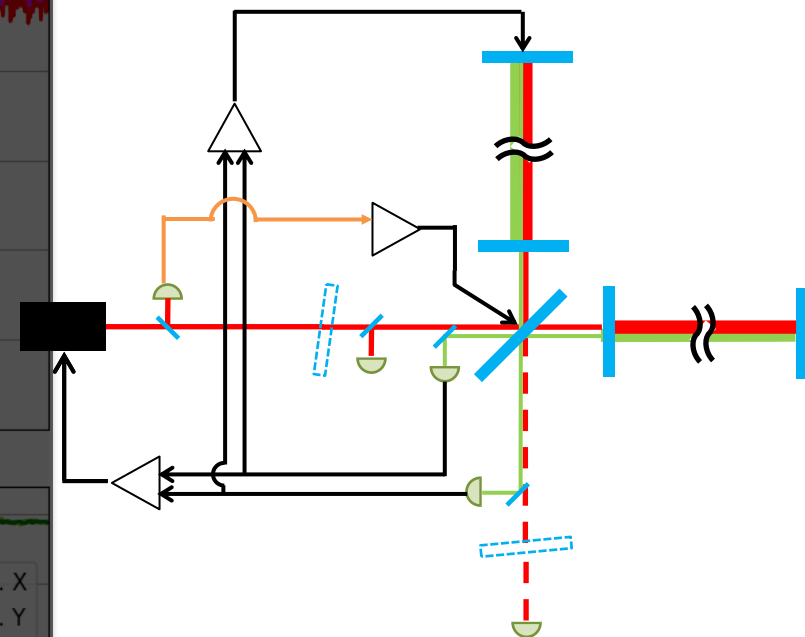


## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## Demonstration



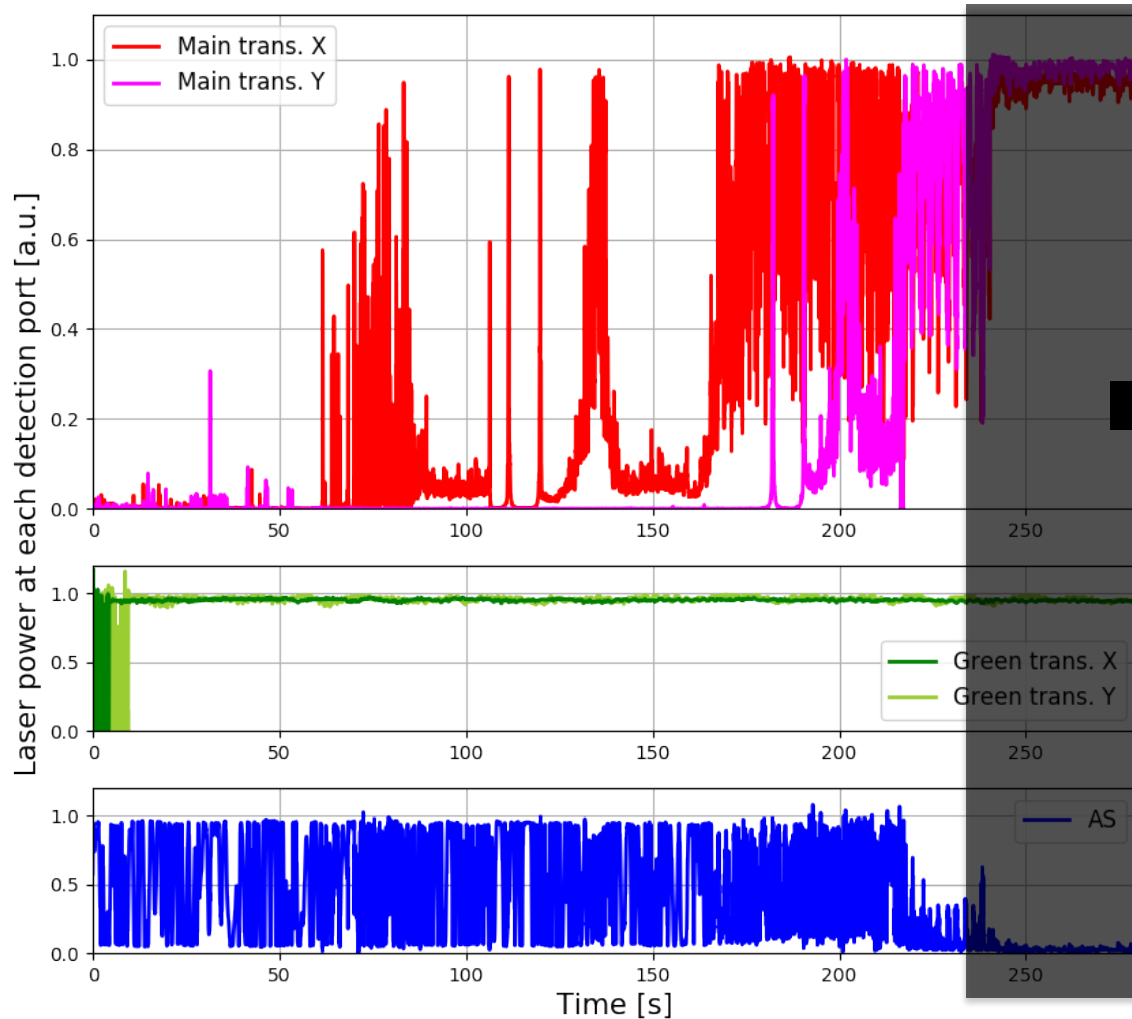
動作点引き込みの時系列



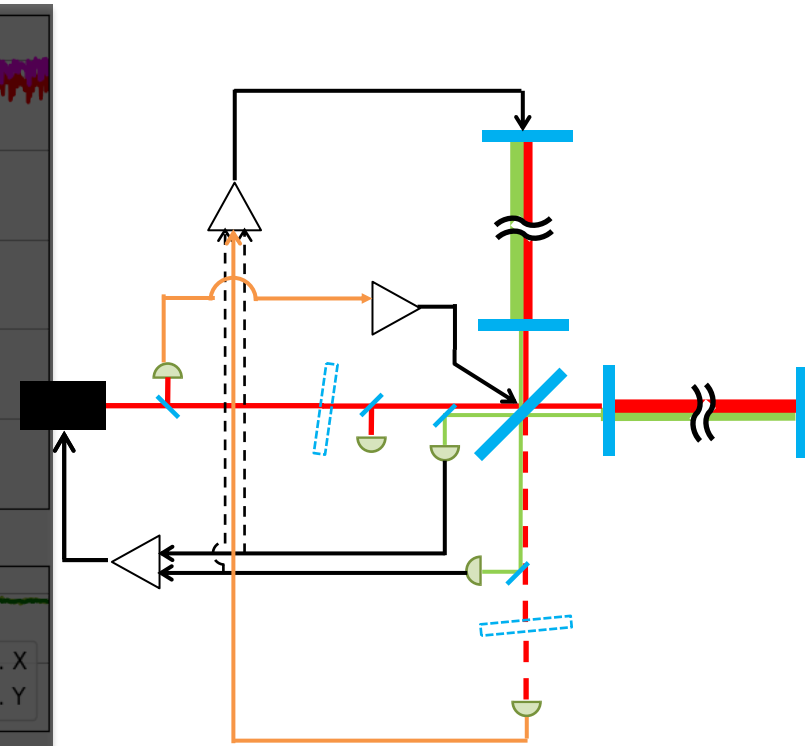
- 0'. 何も動作点にない。
0. **メインレーザー**は動作点にいない。  
グリーンレーザーを腕に追従させる。
1. **グリーンの信号**で腕の1+1自由度を安定化
2. **中央部分 (MICH)**のロック
3. 腕の自由度も動作点へ

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## Demonstration



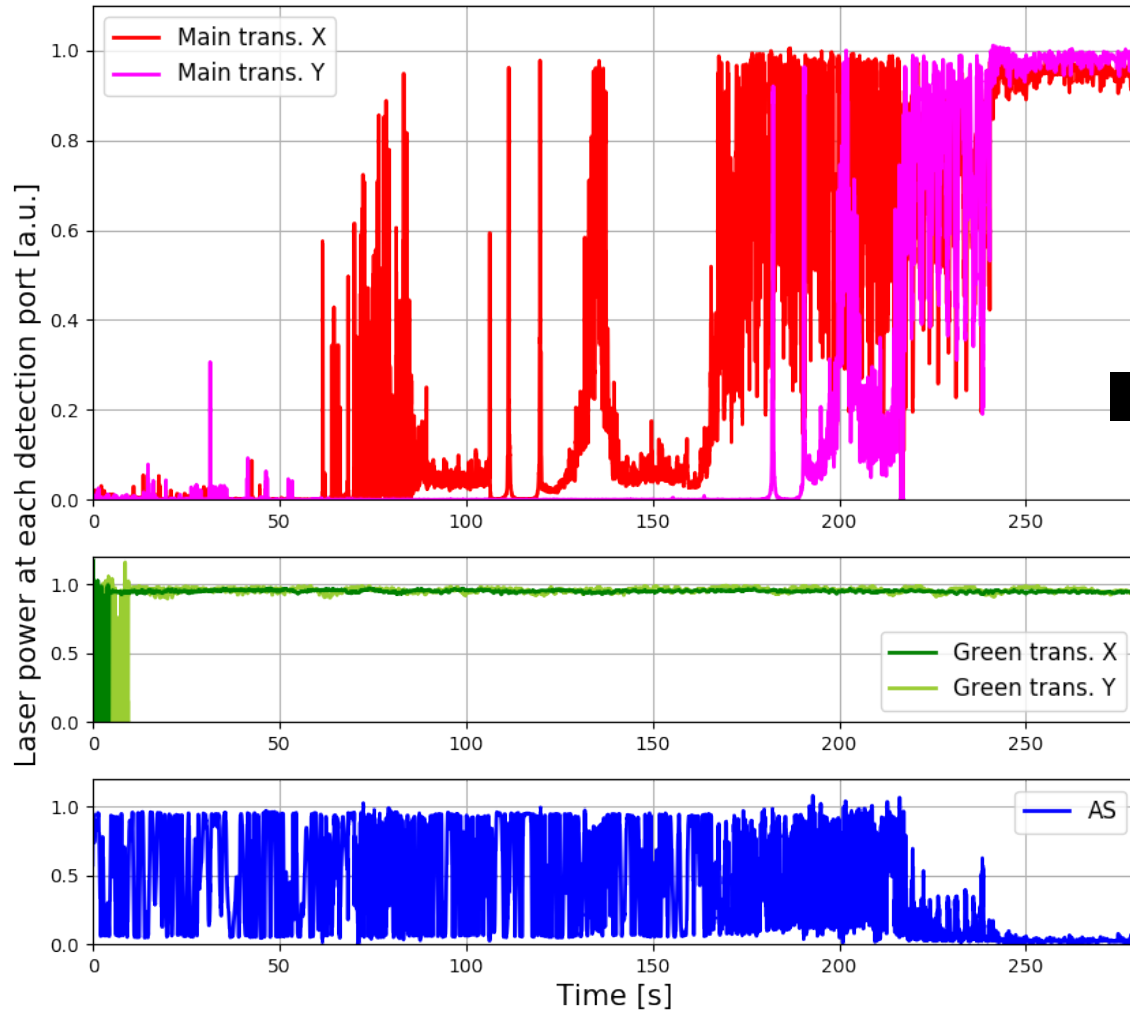
動作点引き込みの時系列



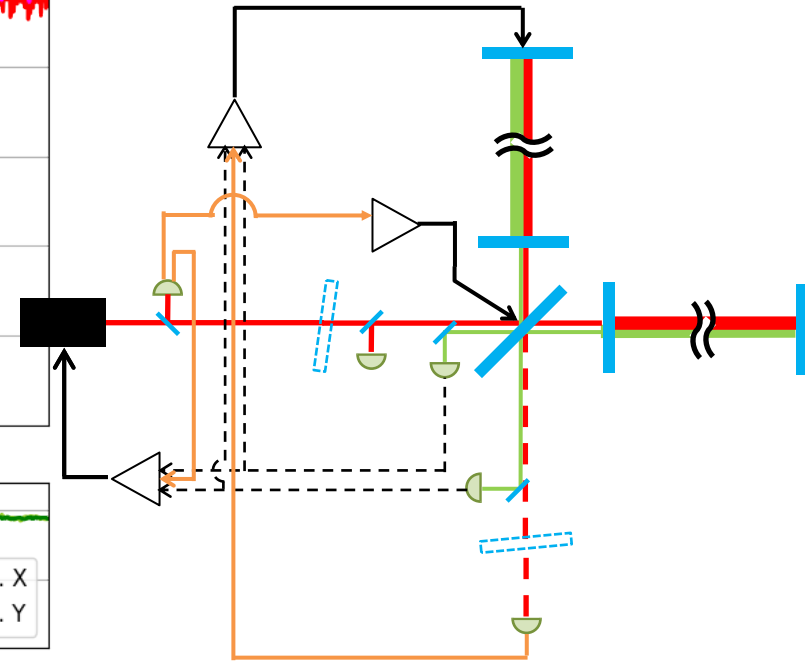
- 0'. 何も動作点にない。
0. **メインレーザー**は動作点にない。  
グリーンレーザーを腕に追従させる。
1. **グリーンの信号**で腕の1+1自由度を安定化
2. **中央部分 (MICH)**のロック
3. 腕の自由度も動作点へ
4. 信号の切り替え (DARMのみ)

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## Demonstration



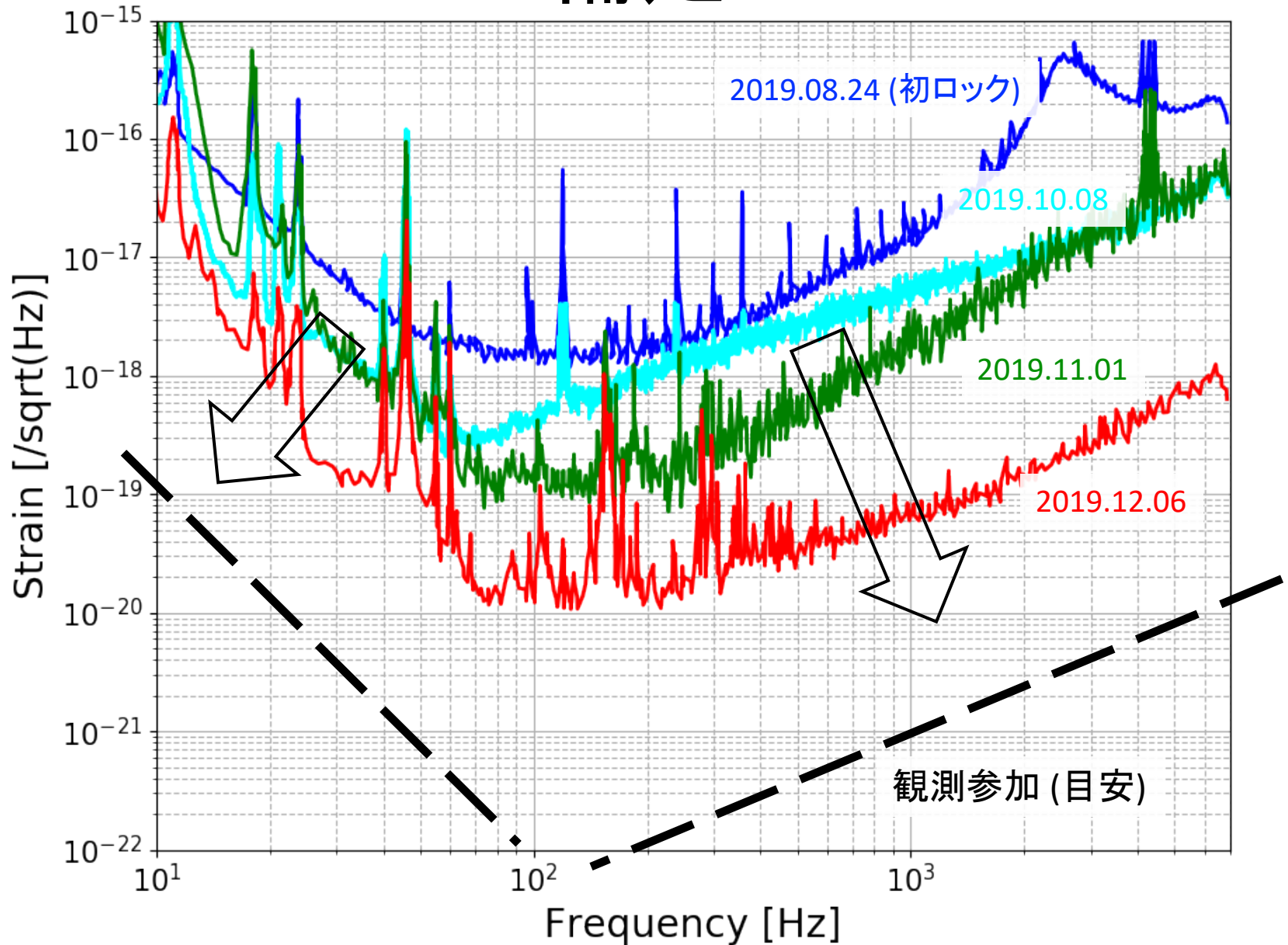
動作点引き込みの時系列



- 0'. 何も動作点にない。
0. **メインレーザー**は動作点にいない。  
グリーンレーザーを腕に追従させる。
1. **グリーンの信号**で腕の1+1自由度を安定化
2. **中央部分 (MICH)**のロック
3. 腕の自由度も動作点へ
4. 信号の切り替え (DARMもCARMも)  
→ 引き込み完了

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## 補足





## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

# KAGRAで行ったこと

= 目的 =

- \* 新しいALSシステムの開発・実証・評価
- \* KAGRAのロックの達成

= **Overview** =

-- Design, Implementation:

- \* 新ALSシステムのデザイン → KAGRAの干渉計ロックへの要求値を満たす
- \* ALSシステムのKAGRAへのインストール

-- Demonstration:

- \* KAGRAの干渉計 (FPMI) のロックの達成
- \* ALSシステムの機能の実証

-- Characterization:

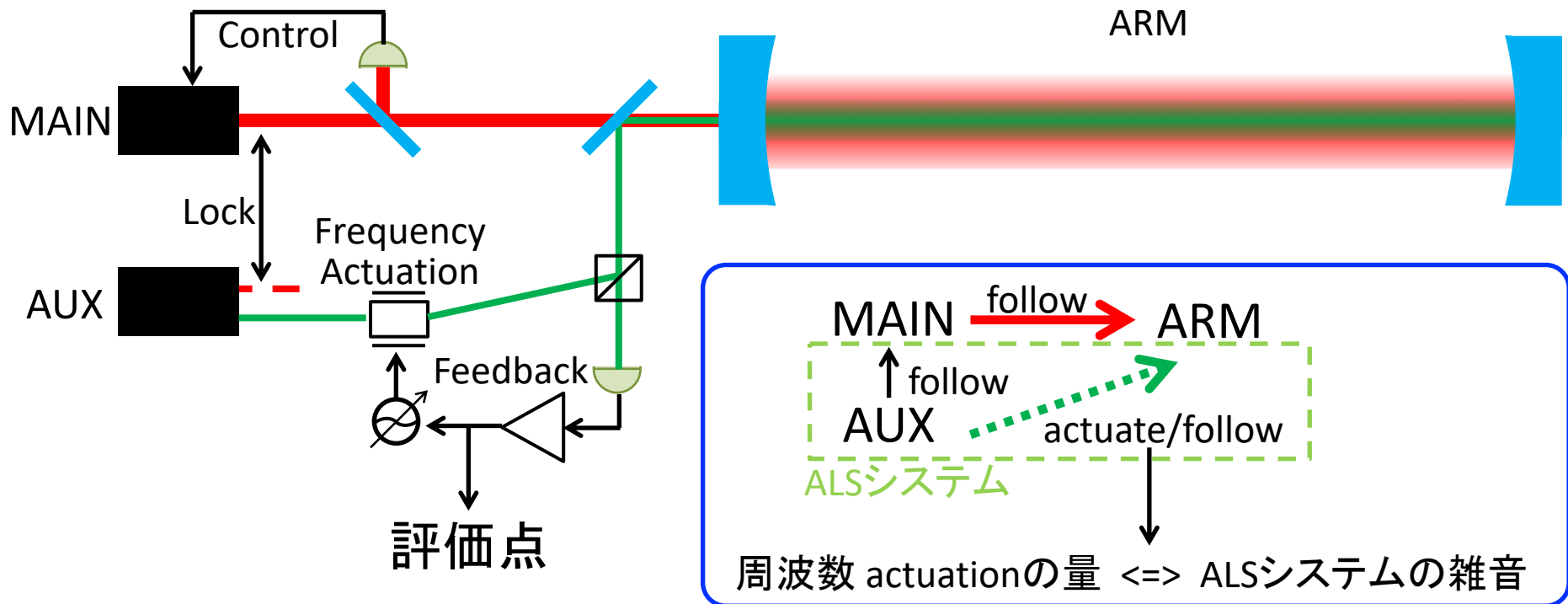
- \* ALSシステムの雑音の定量的評価
- \* 主要な雑音源の特定、改善方法の考察

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

# 特性評価の目的・手法

- 目的: \* ALSシステムの雑音の定量的評価  
 \* 主要な雑音源の特定 → 3G検出器のロック達成への示唆

-- 評価手法

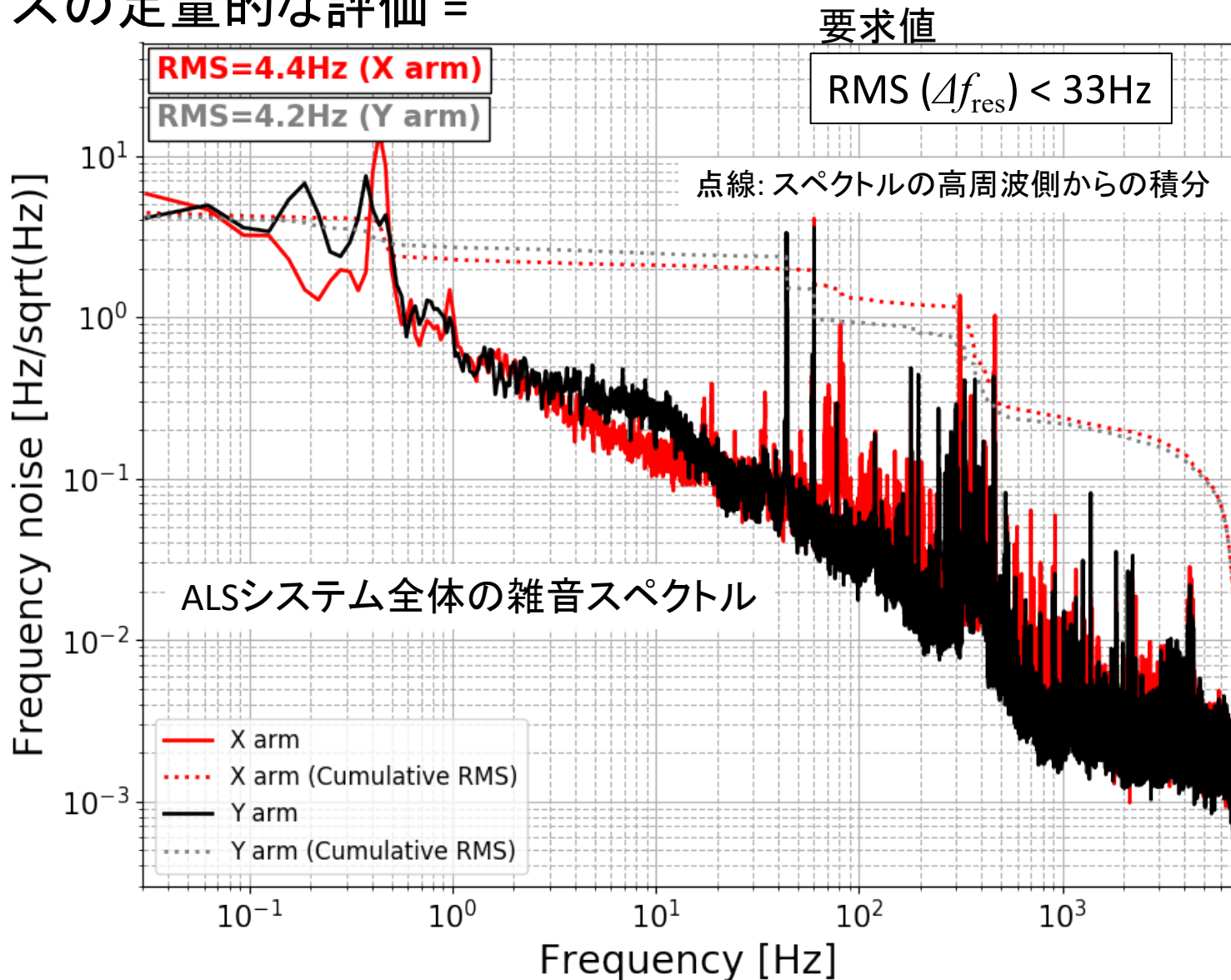


$$(\text{評価点の電圧変動}) \times (\text{周波数アクチュエータ効率}) = (\text{ALSシステムの雑音})$$

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

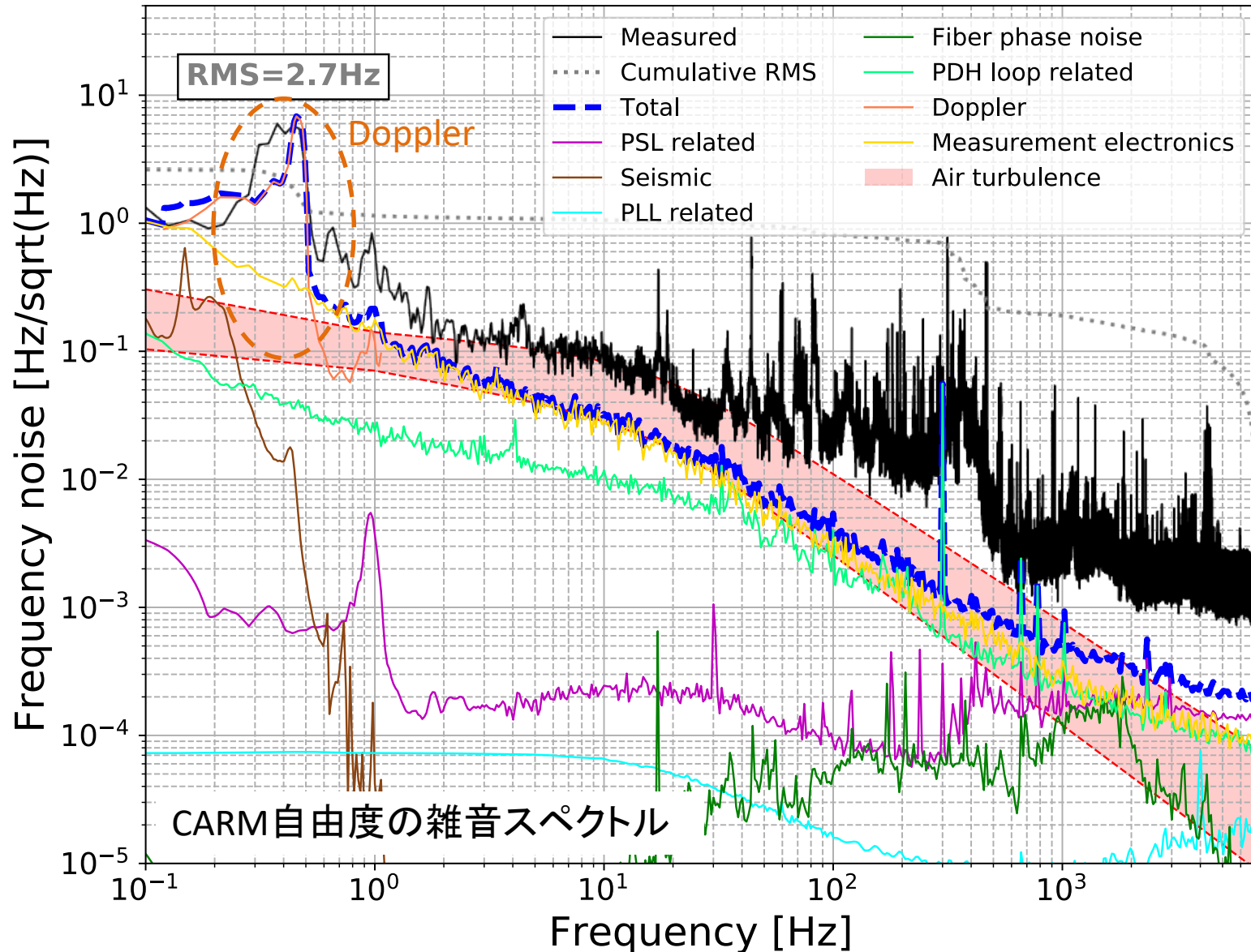
# Characterization: ALSのノイズ

= ノイズの定量的な評価 =



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

# Characterization: 雑音源



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

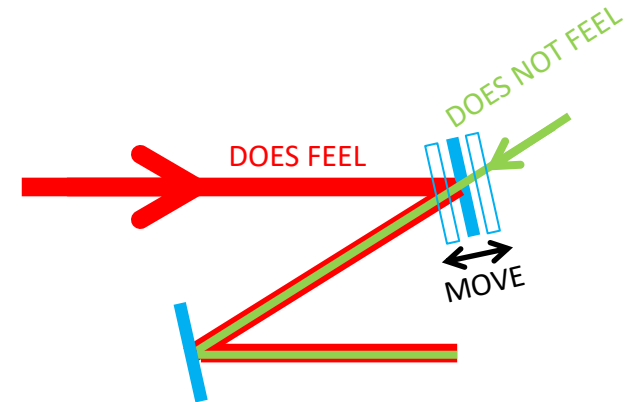
# Characterization

= **Doppler 雑音** =

メインレーザーだけ (またはグリーンだけ)

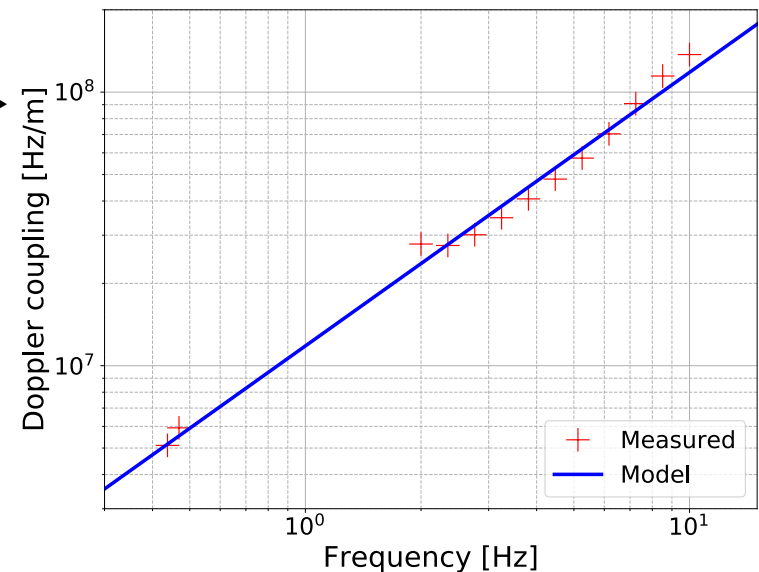
反射する鏡の運動によるDoppler shiftは、ALSシステムでは読めない

→ Doppler 雑音



$$\begin{aligned}\Delta f_{\text{Doppler}}(f) &= \frac{2\pi}{\lambda} 2v(f) \\ &= \frac{i4\pi f}{\lambda} x(f)\end{aligned}$$

鏡の運動 → ALSの雑音 のカップリング測定



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## Discussion

= 予期せぬ雑音 =

Doppler雑音: デザイン時に考慮に入れず。

ALS全体の雑音のRMSを制限してしまうことが明らかに。

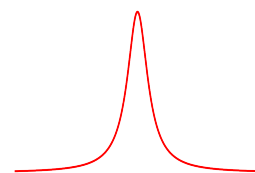
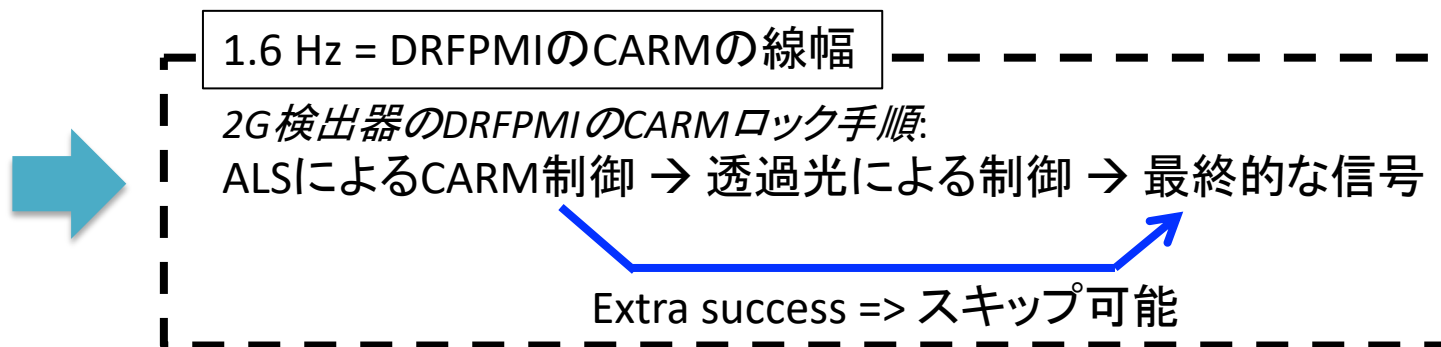
## -- 対処法:

雑音源となる懸架鏡 (BS, PR2, PR3, SR3)  
の運動を測定し、

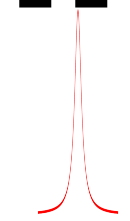
- \* 鏡の運動を抑える
- \* ALSの信号から差し引く

現在の技術で達成可能な  
 $\sim 3 \times 10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度の感度の  
ローカルセンサーの活用

=> Extra success 1.6 Hzの達成に十分



パワーリサイクリング  
→



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## この章のまとめ

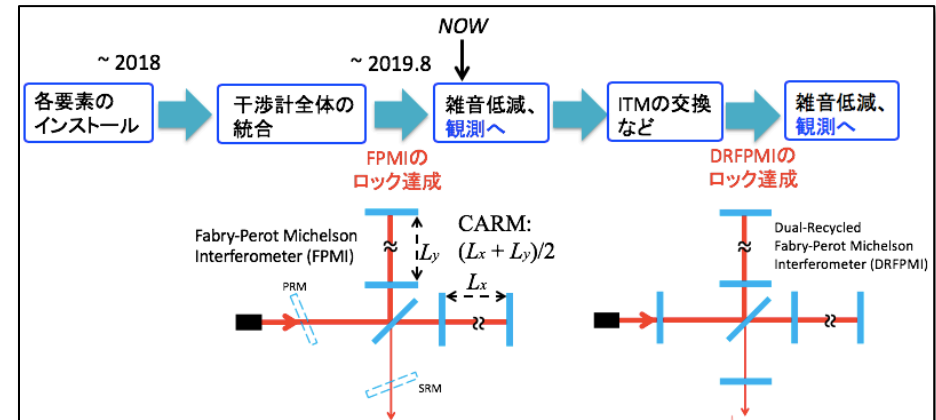
-- 新しいタイプのALSシステムをデザインし、第2世代検出器であるKAGRAにインストールした。短いファイバー・シンプルな構成  
→ 腕が長い第3世代にそのままスケールアップできる

-- 新しいALSシステムを使ってKAGRAの干渉計 (FPMI) のロックを達成した

\* KAGRAを感度が出せる状態に

\* 2つの手法でロックをdemonstration

→ DRFPMI のロックも可能なことを示した



-- ALSシステム全体としてのノイズを評価した

(X arm, Y arm) = (4.4 Hz, 4.2 Hz)

\* 片腕の線幅33 Hzよりも小さく、要求値を満たした

\* Extra successである CARMの線幅 1.6 Hzを満たすことはできなかった

→ Doppler雑音が原因であることがわかった => 鏡のローカルセンサーで低減へ

1. 重力波の観測
2. 干渉計のロックと重力波観測
3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価
4. **次世代検出器におけるALS** [博士論文 Chapter 8]
5. まとめ・結論



# 4. 次世代検出器におけるALS

## ◎ 干渉計ロックの研究

1G	2G	3G
TAMA300, Initial LIGO, Virgo, GEO600	Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA	Einstein Telescope, Cosmic Explorer
* 初のキロメートルスケール検出器	* 干渉計構成の複雑化 * 弱い/低雑音なアクチュエータ	* 10-40 kmの腕 * 異なるレーザー波長
* TAMA300 のロック手法 [M. Ando, Ph.D. Thesis, UTokyo (1998)] * よりロバストなPRCロック [K. Arai, Ph.D. Thesis, UTokyo (2001); CQG <b>19</b> (7)1843 (2002)] * Initial LIGOのロック手法 [M. Evans, Ph.D. Thesis, Caltech (2002); Optics Letters <b>27</b> (8)598 (2002)] * VirgoのVariable finesse法 [L. Barsotti, Ph.D. Thesis, Univ. of Pisa (2006); CQG <b>23</b> (8)S85 (2006)]	* ALSのプロトタイプ実証 [K. Izumi, Ph.D. Thesis, UTokyo (2012); JOSA A <b>29</b> (10)2092 (2012)] * Advanced LIGOのロック [A. Staley, Ph.D. Thesis, Caltech (2015); CQG <b>31</b> (24)245010 (2014)] <p style="text-align: right;"><b>本研究</b></p>	<div style="border: 2px dashed green; padding: 10px; text-align: center;"> <p><b>この章</b></p> <p>* 新たな課題 * 本研究のALSの適用</p> </div>

## 4. 次世代検出器におけるALS

# 本章の目的・内容

-- 目的: 第3世代検出器の干渉計ロックの達成に向け、その課題を明確にする。  
そして、その課題が克服可能な手法を提案。

## 課題:

- \* 長い腕共振器 (~ 40 km)  
→ さらに狭い腕共振器の線幅 (CARM ~ 0.12 Hz)
- \* 腕共振器をレーザーが往復する時間遅れ  
→ 腕共振器にまつわるループの制御帯域に制限
- \* 腕共振器の鏡にシリコンを使う可能性  
→ **メイン**/**補助**レーザーの波長変更、倍波が使えない

## 研究手法:

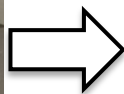
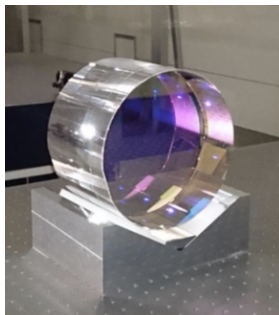
KAGRAでのALSの特性評価

性能シミュレーション

倍波の利用に代わる  
「波長変換」の手法の検討

解決策

比較



シリコン

## 4. 次世代検出器におけるALS

# 本章の目的・内容

-- 目的: 第3世代検出器の干渉計ロックの達成に向け、その課題を明確にする。  
そして、その課題が克服可能かを議論する。

## 課題:

- \* 長い腕共振器 (~ 40 km)  
→ さらに狭い腕共振器の線幅 (CARM ~ 0.12 Hz)
- \* 腕共振器をレーザーが往復する時間遅れ  
→ 腕共振器にまつわるループの制御帯域に制限

## 議論:

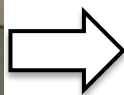
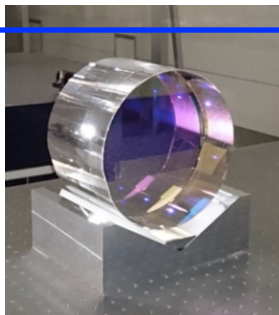
KAGRAでのALSの特性評価

性能シミュレーション

比較

解決策

倍波の利用に代わる  
「波長変換」の手法の検討

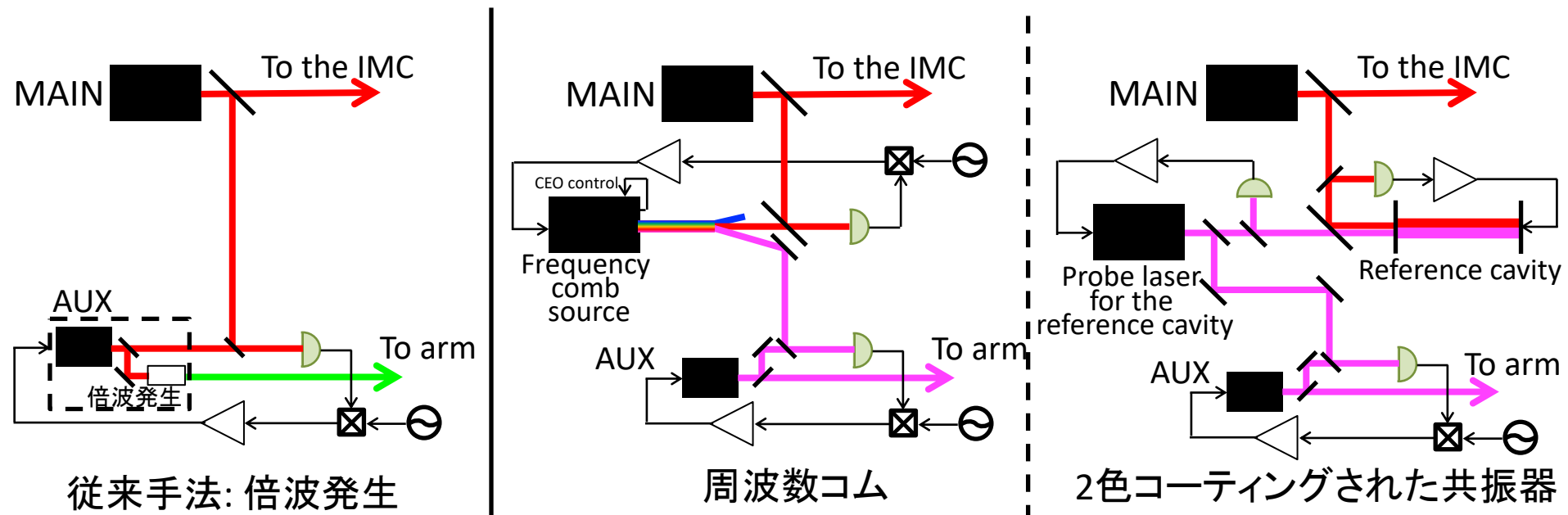


シリコン

## 4. 次世代検出器におけるALS

# 波長変換

◎ メインと補助レーザーの波長を「はしご」する方法



メインレーザー ← はしご → 補助レーザー

雑音混入:  $3 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  のフラットスペクトルの周波数雑音を仮定  
文献の値 + 安全係数

## 4. 次世代検出器におけるALS

# 本章の目的・内容

-- 目的: 第3世代検出器の干渉計ロックの達成に向け、その課題を明確にする。  
そして、その課題が克服可能かを議論する。

## 課題:

- \* 長い腕共振器 (~ 40 km)  
→ さらに狭い腕共振器の線幅 (CARM ~ 0.12 Hz)
- \* 腕共振器をレーザーが往復する時間遅れ  
→ 腕共振器にまつわるループの制御帯域に制限
- \* 腕共振器の鏡にシリコンを使う可能性  
→ メイン/補助レーザーの波長変更、倍波が使えない

## 議論:

KAGRAでのALSの特性評価

性能シミュレーション

倍波の利用に代わる  
「波長変換」の手法の検討

解決策

ALSによるCARM制御 → 透過光による制御 → 最終的な信号

=> 3Gで使えるかわからない

CARMの線幅をターゲットに => ALSから直接ロック

## 4. 次世代検出器におけるALS

# 性能シミュレーション

## = 目的 =

ALSによる制御の残留雑音  
のシミュレーション結果



CARMの線幅 0.12 Hz

## = シミュレーション方法 =

-- 3Gの干渉計のパラメータを定める

-- KAGRAで測定された各要素の雑音の大きさを用いて、  
3G検出器のALSの雑音モデルを立てる

基本方針: KAGRAで評価された雑音レベルをそのまま使う

例外: 波長変換の雑音、Doppler雑音、乱流雑音

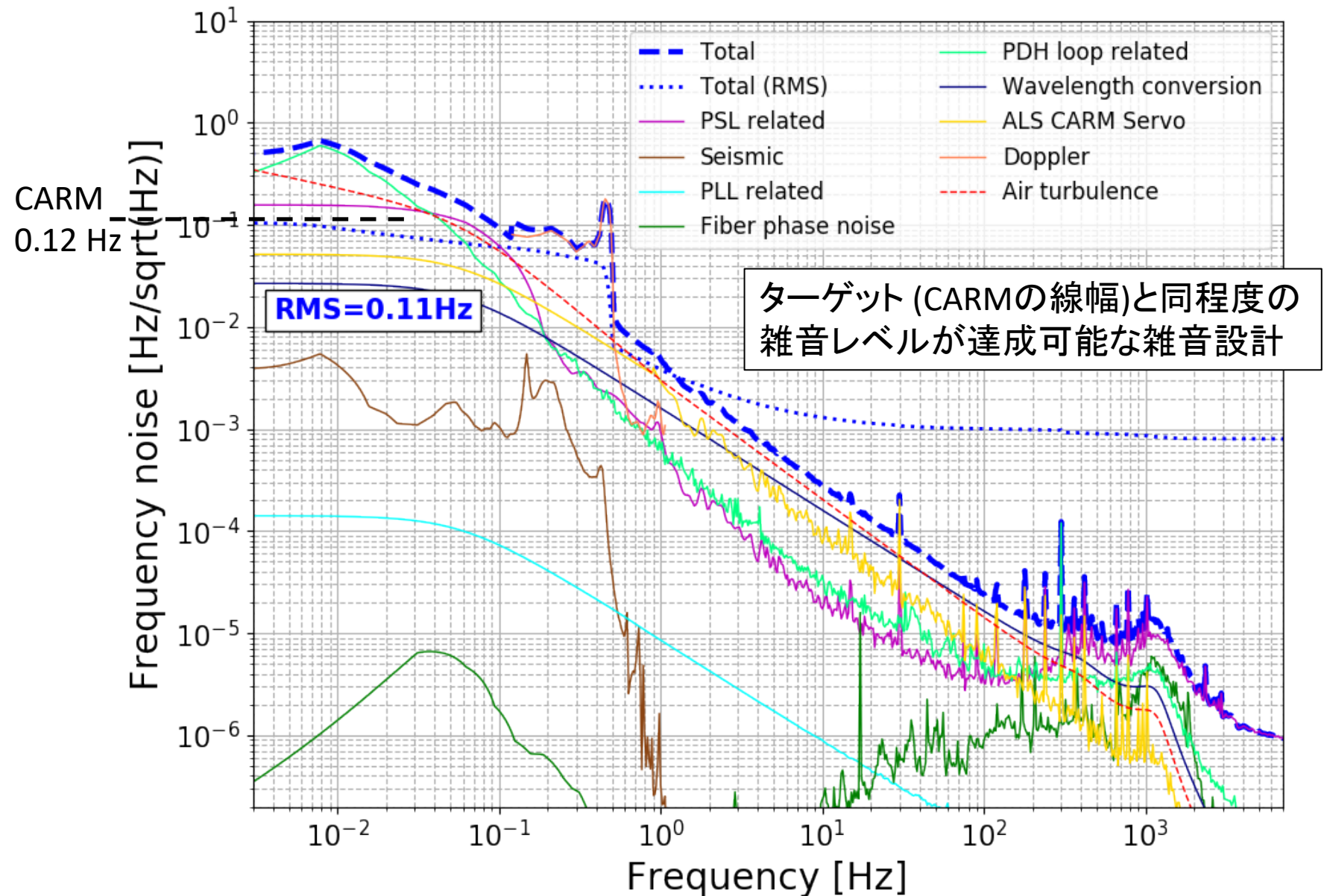
3Gでの新要素

~ 5倍の改善を仮定

~ 3倍の改善を仮定

## 4. 次世代検出器におけるALS

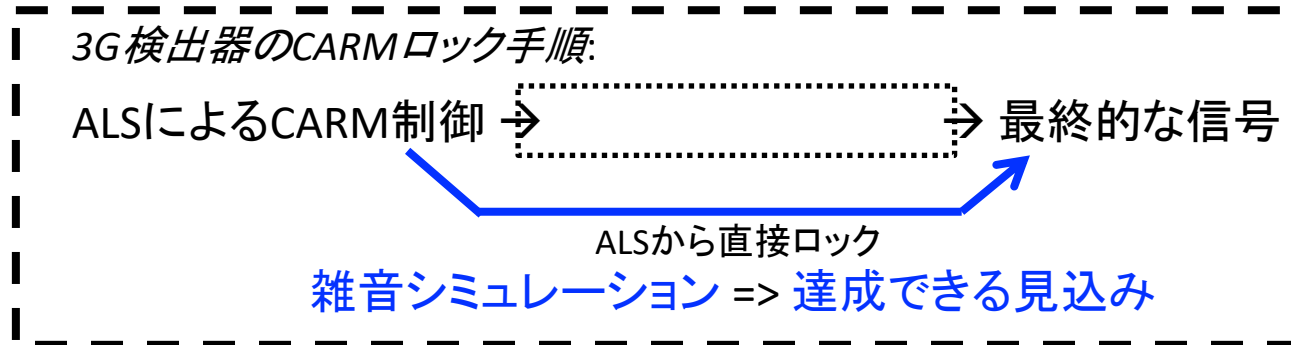
## 性能シミュレーション



## 4. 次世代検出器におけるALS

# 議論

シミュレーション結果により、...



-- 雑音の推定に不定性・雑音向上を仮定

→ [ ] → に対応するステップが重要になる



ALSを拡張したような手法は使えないか？



## 4. 次世代検出器におけるALS

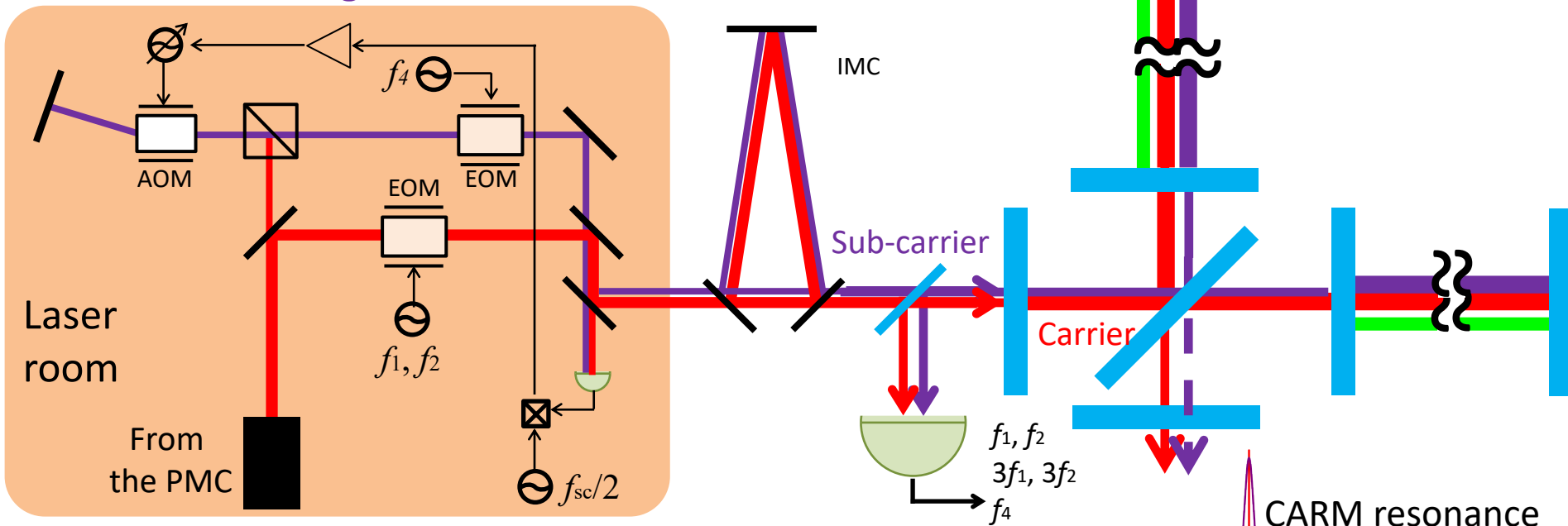
# 議論: common path

◎ ALSの主要な雑音源: Doppler雑音など → メインと補助レーザーの経路が違うのが原因

➡ メインと補助レーザーを同じ経路に → **Sub-carrier光の利用を提案**

ALSによるCARM制御 → **Sub-carrier CARM制御** → 最終的な信号

## Sub-carrier generation



Sub-carrier法のノイズをALSと同じ方法でシミュレーション

→ RMS = 0.012 Hz

CARMの線幅 (0.12 Hz) より十分小さい

1. 重力波の観測
2. 干渉計のロックと重力波観測
3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価
4. 次世代検出器におけるALS
5. **まとめ・結論**

# 結果のまとめ

## = デザイン・インストール =

- 新しいタイプのALSシステムをデザインし、第2世代検出器であるKAGRAにインストールした。短いファイバー・シンプルな構成
  - 腕が長い第3世代にそのままスケールアップできる

## = 実証 =

- 新しいALSシステムを使ってKAGRAの干渉計 (FPMI) のロックを達成した
  - \* KAGRAを感度が出せる状態に
  - \* 2つの手法でロックをdemonstration → DRFPMI のロックも可能なことを示した

## = 性能評価 =

- ALSシステム全体としてのノイズを評価した → (X arm, Y arm) = (4.4 Hz, 4.2 Hz)
  - \* 片腕の線幅33 Hzよりも小さく、要求値を満たした
  - \* Extra successである CARMの線幅 1.6 Hzを満たすことはできなかった
    - Doppler雑音が原因であることがわかった

## = 次世代検出器のロック =

- KAGRAのALSを第3世代検出器に適用した場合のパフォーマンスを見積もった。
  - \* 3Gで必要になるであろう、倍波発生に代わる波長変換の手法を提案した
  - \* ターゲット (CARMの線幅: 0.12 Hz) は、Doppler雑音や乱流雑音の低減により達成できるはず
    - \* CARMのロックにSub-carrierを用いる手法を提案し、有用なことを示した。

# 結論

- 新しいALSの手法をデザイン・実装し、KAGRAの干渉計のロックを達成した。  
→ KAGRAという第2世代重力波検出器を観測が可能な状態へ



波源位置決定精度向上・位置決定可能な波源のカバー率向上

第2世代検出器によるネットワーク観測に「質的に」重要な寄与を果たした。

- 第3世代検出器の干渉計ロックを初めて議論した。 ロック方法の提案やALSの性能シミュレーションを通じ、今後必要な研究の見通しを立てた。

- \* 波長変換の手法 (周波数コムや2色共振器)

- \* 本研究のALSは3Gにも適用可能

- \* Sub-carrierの手法を提案、透過光ロックの代わりとして有用



中性子星の内部構造・重力理論への制限といった  
成果をもたらす、3G検出器の実現を具体化

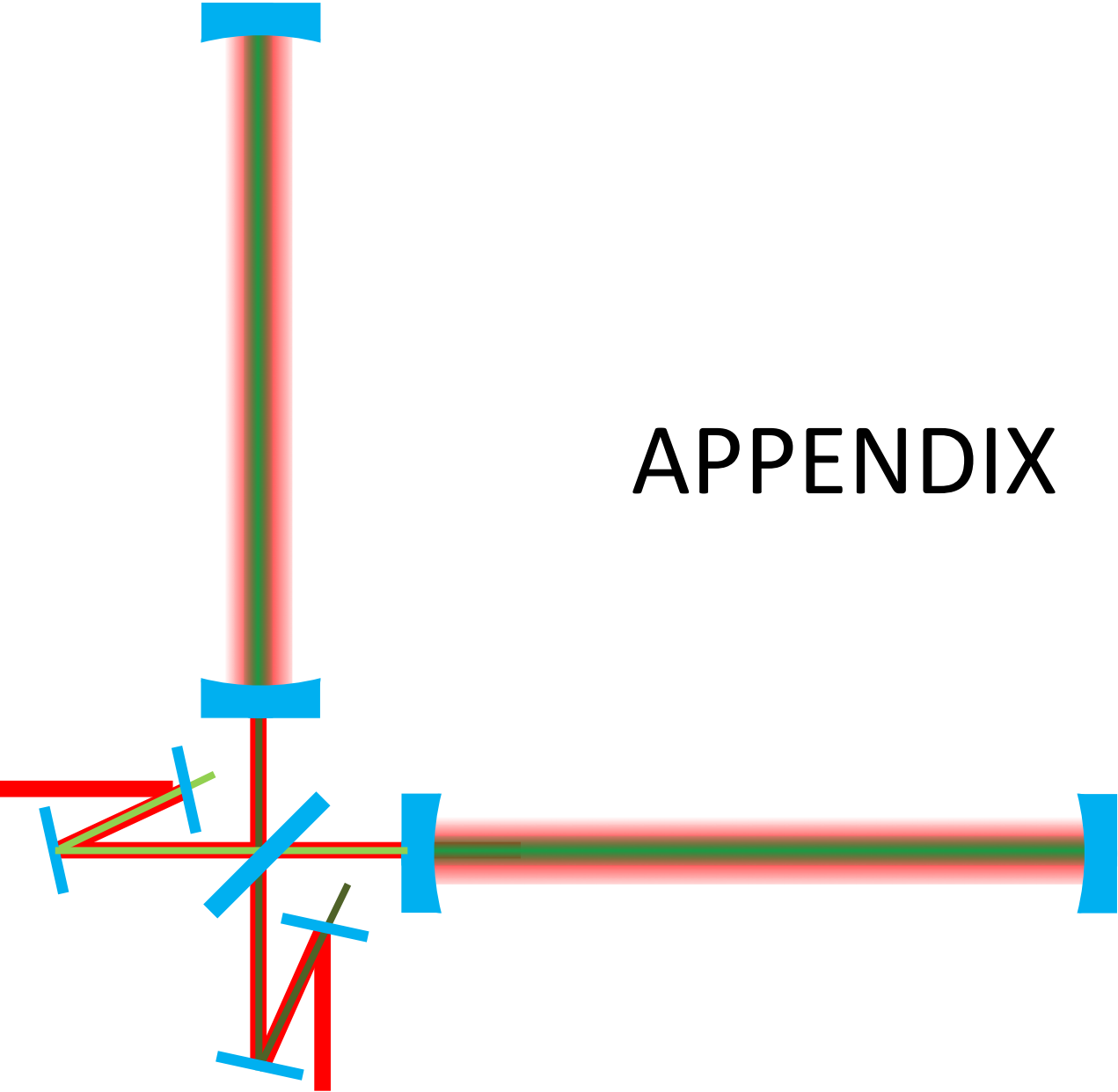
第3世代検出器の観測実現へ道筋をつける重要かつ先駆的な一歩となった。



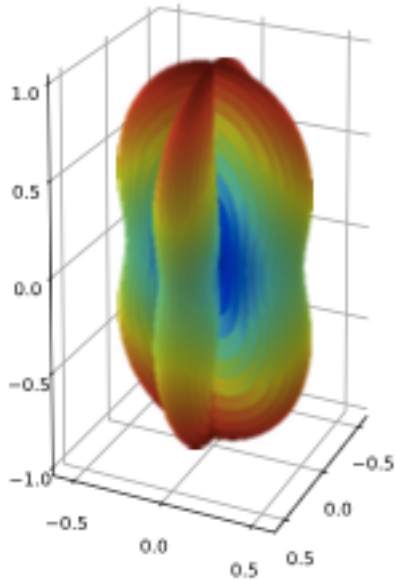
# 概要

- ◎ **重力波観測**は、ユニークな天文学・物理学的な成果をもたらす
  - \* 現在のレーザー干渉計型地上検出器: コンパクト天体や重力理論に重要な知見
  - \* 次世代の地上検出器: 10倍長い腕、10倍良い感度 → サイエンスがより深化
- ◎ 複雑な干渉計構成が必須
  - \* 複数の共振器がカップル、制御信号が共振点 (= 動作点) 以外で非線形  
→ 干渉計のロック (動作点引き込み) が 本質的役割 を担う。
- ◎ **Arm Length Stabilization (ALS)**: 干渉計ロックの中心的役割
  - \* メインレーザーと異なる波長の補助レーザーを用い、腕共振器を分離して制御
  - \* **先行研究** (Advanced LIGO) の特徴:  
腕の後ろから補助レーザーを導入、腕に沿った光ファイバー → 次世代への適用が非自明
- ◎ 本研究の手法: **新しいALSシステムの開発・実証**
  - \* **特徴**: 中央エリアから補助レーザーを導入、ファイバーが短い → 次世代へのスケールアップが容易
  - \* **やったこと**: システムの 雑音設計、KAGRAへの インストール、KAGRAのロック (システム実証)、特性評価
  - \* **もたらす成果**: KAGRAを観測可能な状態へ → 重力波のネットワーク観測に質的に重要な寄与
- ◎ 次世代検出器のロック: **課題と解決法を初めて議論**
  - \* 課題を明確化した (より長い腕 → ALSへの厳しい要求、波長変換の手法、など)
  - \* 課題を考慮に入れ、特性評価の結果から 次世代検出器のALSの雑音設計 → 要求値を満たせる見込み
  - \* ロック達成をより確実にするためSub-carrierを用いる手法を提案、有用性を示した  
→ 次世代検出器の観測実現へ道筋をつける重要かつ先駆的な一歩

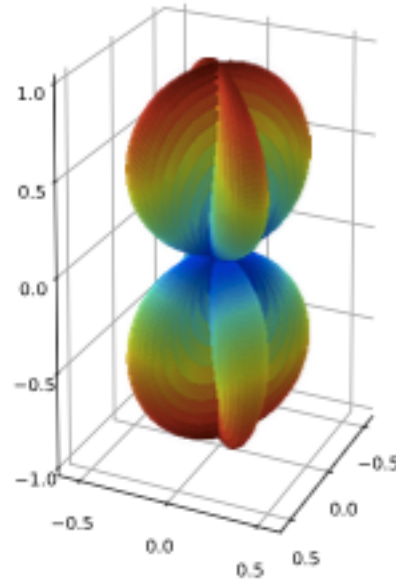
# APPENDIX



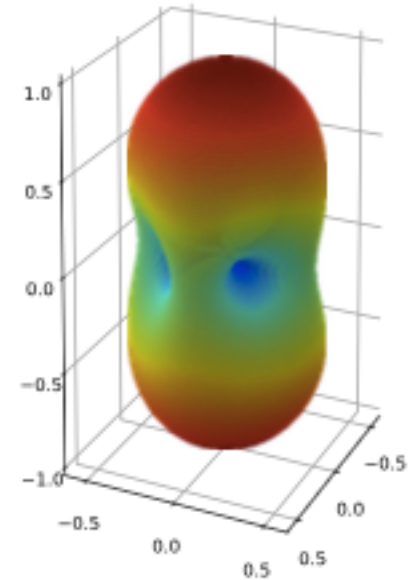
# Antenna pattern



(a) + mode.



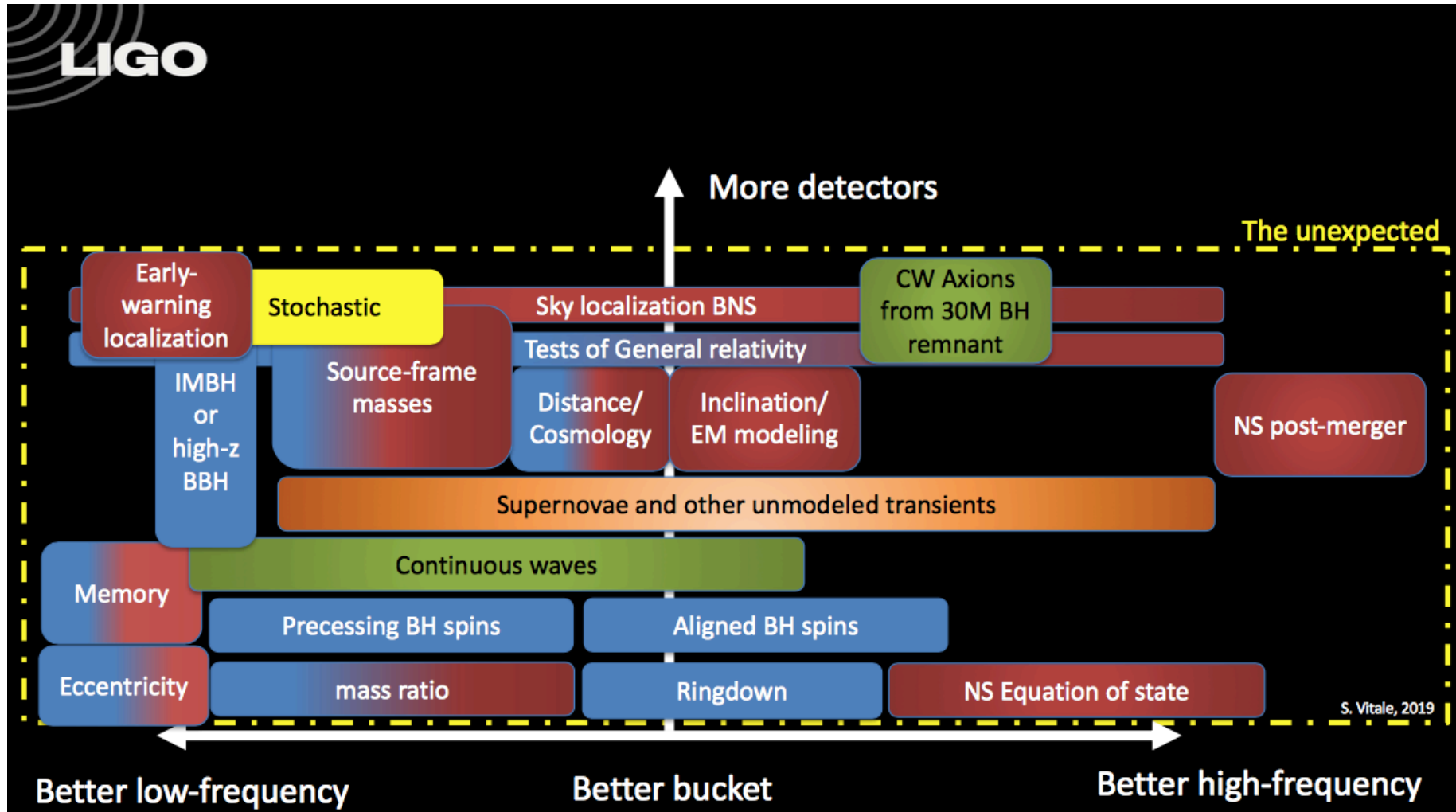
(b)  $\times$  mode.



(c) Average.



# Science case



S. Vitale, LIGO DCC P1900660-v1

## CBC

B. P. ABBOTT *et al.*PHYS. REV. X **9**, 031040 (2019)

TABLE III. Selected source parameters of the 11 confident detections. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors and systematic errors from averaging the results of two waveform models for BBHs. For GW170817, credible intervals and statistical errors are shown for IMRPhenomPv2NRT with a low spin prior, while the sky area is computed from TaylorF2 samples. The redshift for NGC 4993 from Ref. [94] and its associated uncertainties are used to calculate source-frame masses for GW170817. For BBH events, the redshift is calculated from the luminosity distance and assumed cosmology as discussed in Appendix B. The columns show source-frame component masses  $m_i$  and chirp mass  $\mathcal{M}$ , dimensionless effective aligned spin  $\chi_{\text{eff}}$ , final source-frame mass  $M_f$ , final spin  $a_f$ , radiated energy  $E_{\text{rad}}$ , peak luminosity  $l_{\text{peak}}$ , luminosity distance  $d_L$ , redshift  $z$ , and sky localization  $\Delta\Omega$ . The sky localization is the area of the 90% credible region. For GW170817, we give conservative bounds on parameters of the final remnant discussed in Sec. V E.

Event	$m_1/M_\odot$	$m_2/M_\odot$	$\mathcal{M}/M_\odot$	$\chi_{\text{eff}}$	$M_f/M_\odot$	$a_f$	$E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$l_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	$d_L/\text{Mpc}$	$z$	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.7}_{-3.1}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.7}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.4}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4} \times 10^{56}$	$440^{+150}_{-170}$	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	182
GW151012	$23.2^{+14.9}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.1}_{-1.2}$	$0.05^{+0.31}_{-0.20}$	$35.6^{+10.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.6^{+0.6}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7} \times 10^{56}$	$1080^{+550}_{-490}$	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1523
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.7}_{-1.7} \times 10^{56}$	$450^{+180}_{-190}$	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$30.8^{+7.3}_{-5.6}$	$20.0^{+4.9}_{-4.6}$	$21.4^{+2.2}_{-1.8}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.21}$	$48.9^{+5.1}_{-4.0}$	$0.66^{+0.08}_{-0.11}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$3.3^{+0.6}_{-1.0} \times 10^{56}$	$990^{+440}_{-430}$	$0.20^{+0.08}_{-0.08}$	921
GW170608	$11.0^{+5.5}_{-1.7}$	$7.6^{+1.4}_{-2.2}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.4}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$3.5^{+0.4}_{-1.3} \times 10^{56}$	$320^{+120}_{-110}$	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	392
GW170729	$50.2^{+16.2}_{-10.2}$	$34.0^{+9.1}_{-10.1}$	$35.4^{+6.5}_{-4.8}$	$0.37^{+0.21}_{-0.25}$	$79.5^{+14.7}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5} \times 10^{56}$	$2840^{+1400}_{-1360}$	$0.49^{+0.19}_{-0.21}$	1041
GW170809	$35.0^{+8.3}_{-5.9}$	$23.8^{+5.1}_{-5.2}$	$24.9^{+2.1}_{-1.7}$	$0.08^{+0.17}_{-0.17}$	$56.3^{+5.2}_{-3.8}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	$1030^{+320}_{-390}$	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	308
GW170814	$30.6^{+5.6}_{-3.0}$	$25.2^{+2.8}_{-4.0}$	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.12}$	$53.2^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5} \times 10^{56}$	$600^{+150}_{-220}$	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	$\leq 2.8$	$\leq 0.89$	$\geq 0.04$	$\geq 0.1 \times 10^{56}$	$40^{+7}_{-15}$	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.4^{+7.5}_{-4.7}$	$26.7^{+4.3}_{-5.2}$	$26.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.4^{+4.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{56}$	$1060^{+420}_{-380}$	$0.21^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.5^{+11.2}_{-6.7}$	$29.0^{+6.7}_{-7.8}$	$29.2^{+4.6}_{-3.6}$	$0.09^{+0.22}_{-0.26}$	$65.4^{+10.1}_{-7.4}$	$0.72^{+0.09}_{-0.12}$	$3.3^{+1.0}_{-0.9}$	$3.6^{+0.7}_{-1.1} \times 10^{56}$	$1940^{+970}_{-900}$	$0.35^{+0.15}_{-0.15}$	1666

# Supernovae

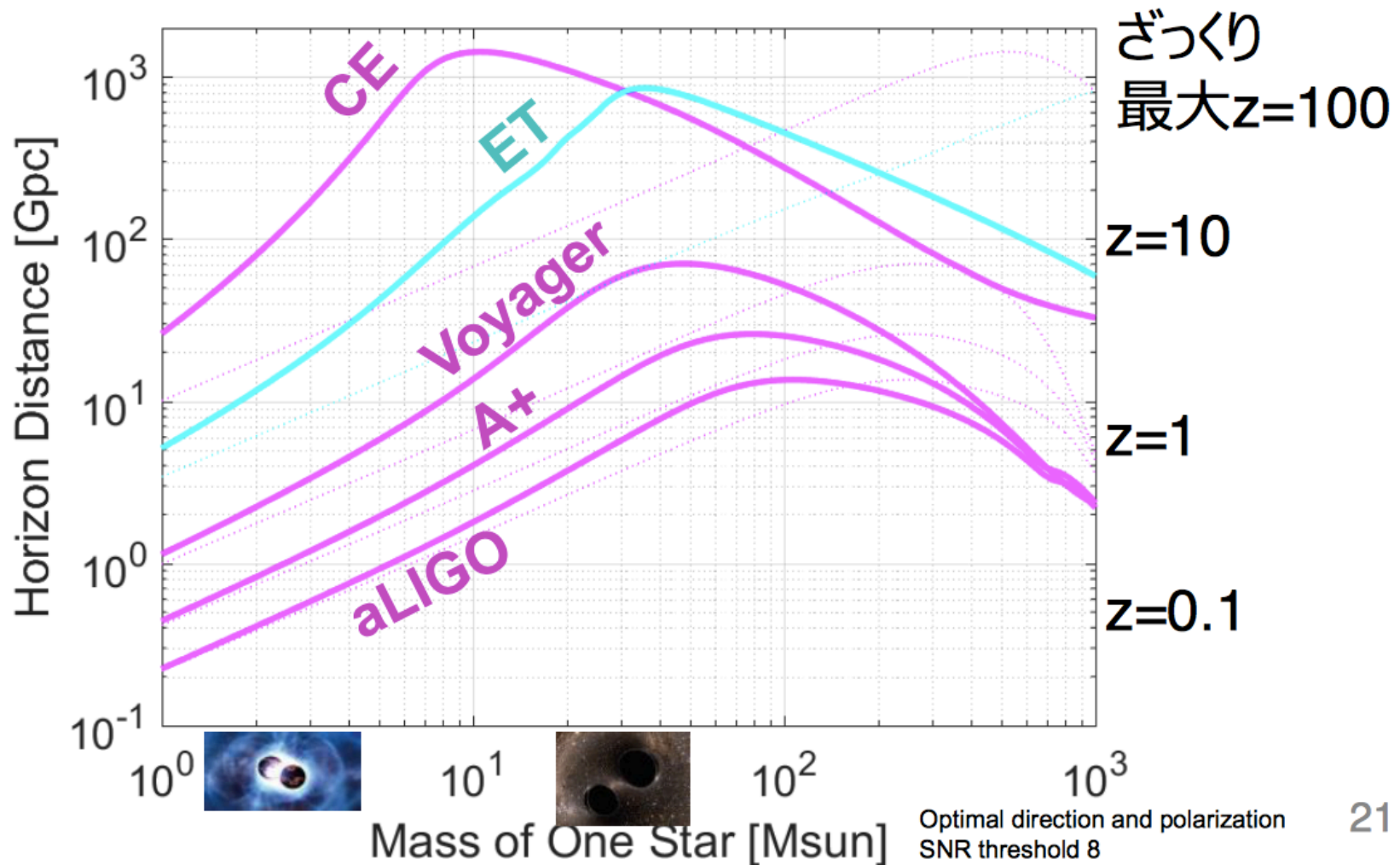
2G:  $\sim 0.6-10.5 \times 10^{-2}$  CCSN $\text{yr}^{-1}$  in Milky Way  
[PHYSICAL REVIEW D 93, 042002 (2016)]

=>  $\sim 1/30$  yr

3G: 28 galaxies within 150 kpc, 1-2 CCSNe per galaxy  
[PHYSICAL REVIEW D 99, 063018 (2019) ]

=>  $\sim 1/3$  yr

# Horizon distance



Y. Michimura, [http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~grav-wakate3/files/programme/I2\\_S\\_Michimura.pdf](http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~grav-wakate3/files/programme/I2_S_Michimura.pdf)

# Network Duty Cycle

3台以上稼働の確率

**= Case1: Only 3 detectors =**

$$0.8 * 0.8 * 0.8 = 0.512$$

=> 51 %

c.f.) O3 => 44 % (with 1 det. ~75%)

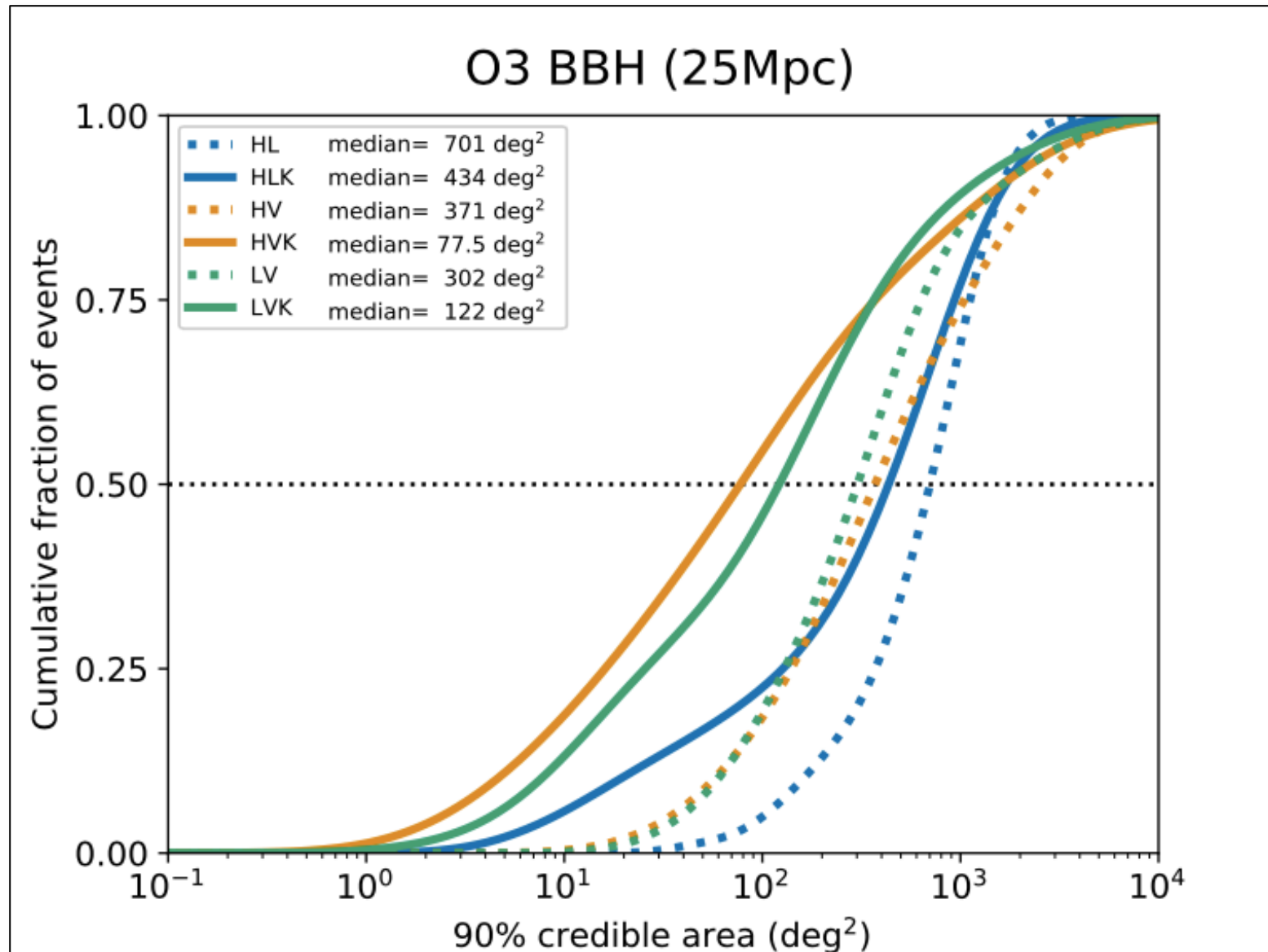
仮定: 1台の稼働率 = 80 %

**= Case2: 4 detectors =**

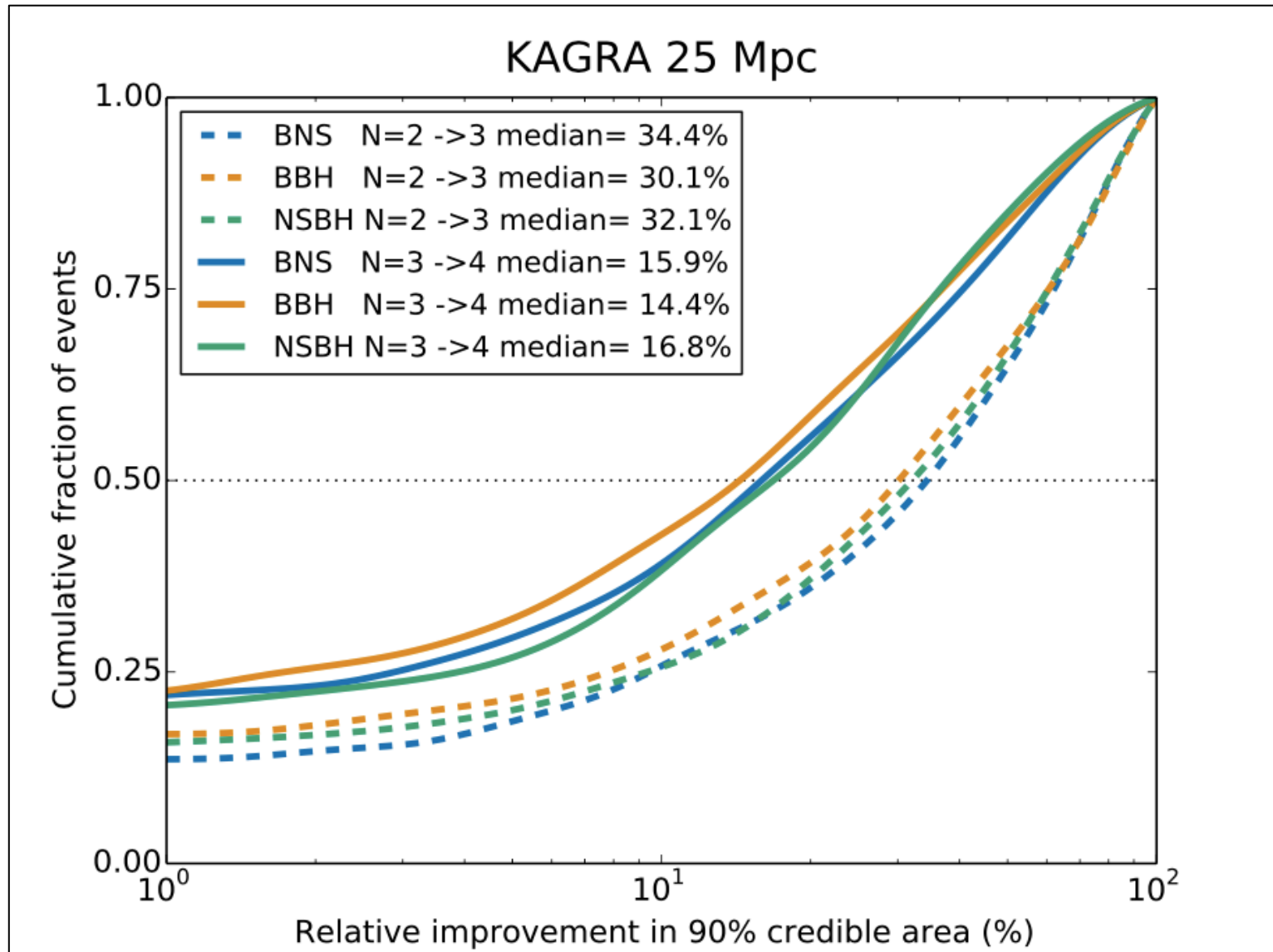
$$0.8^4 + 4 * 0.2 * 0.8^3 = 0.8192$$

=> 82 %

# KAGRA contribution

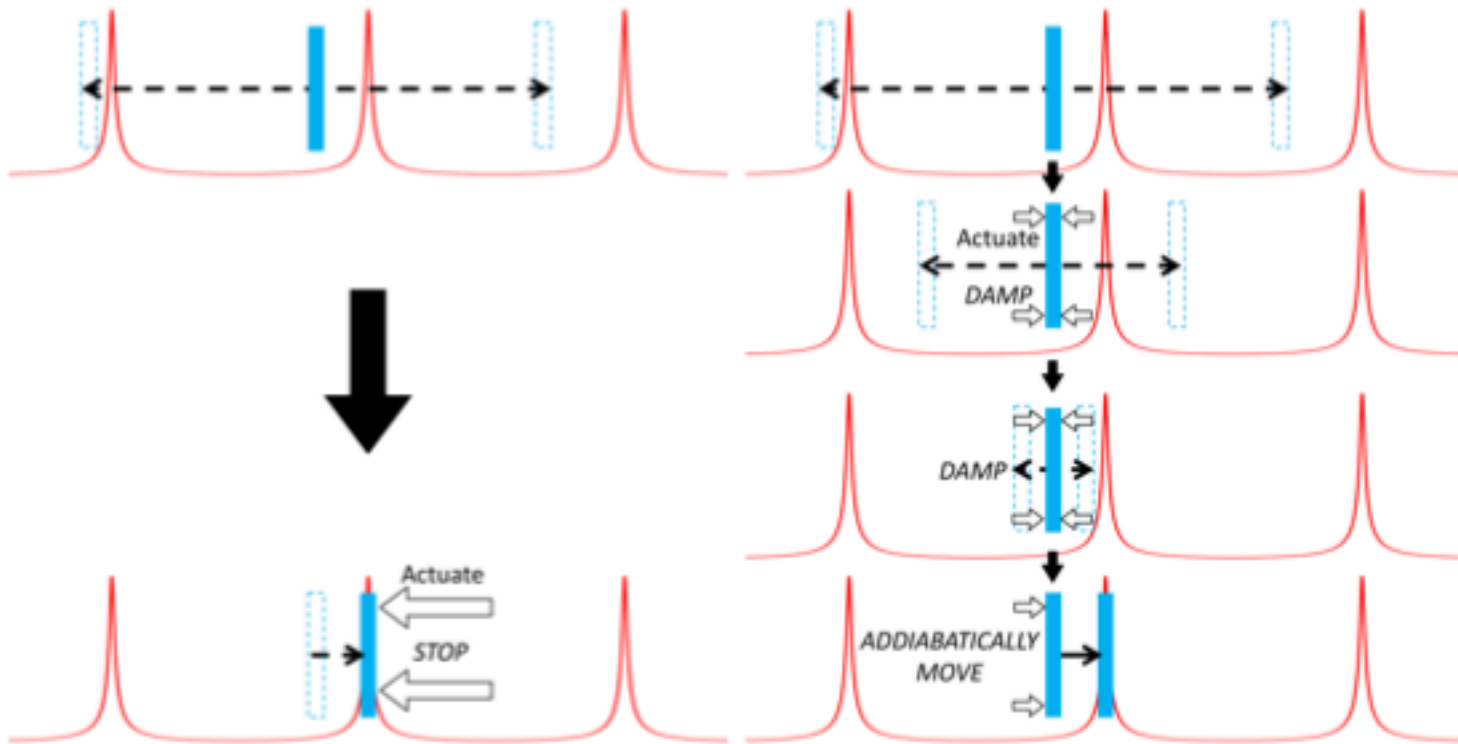


# KAGRA contribution





# w/ and w/o ALS

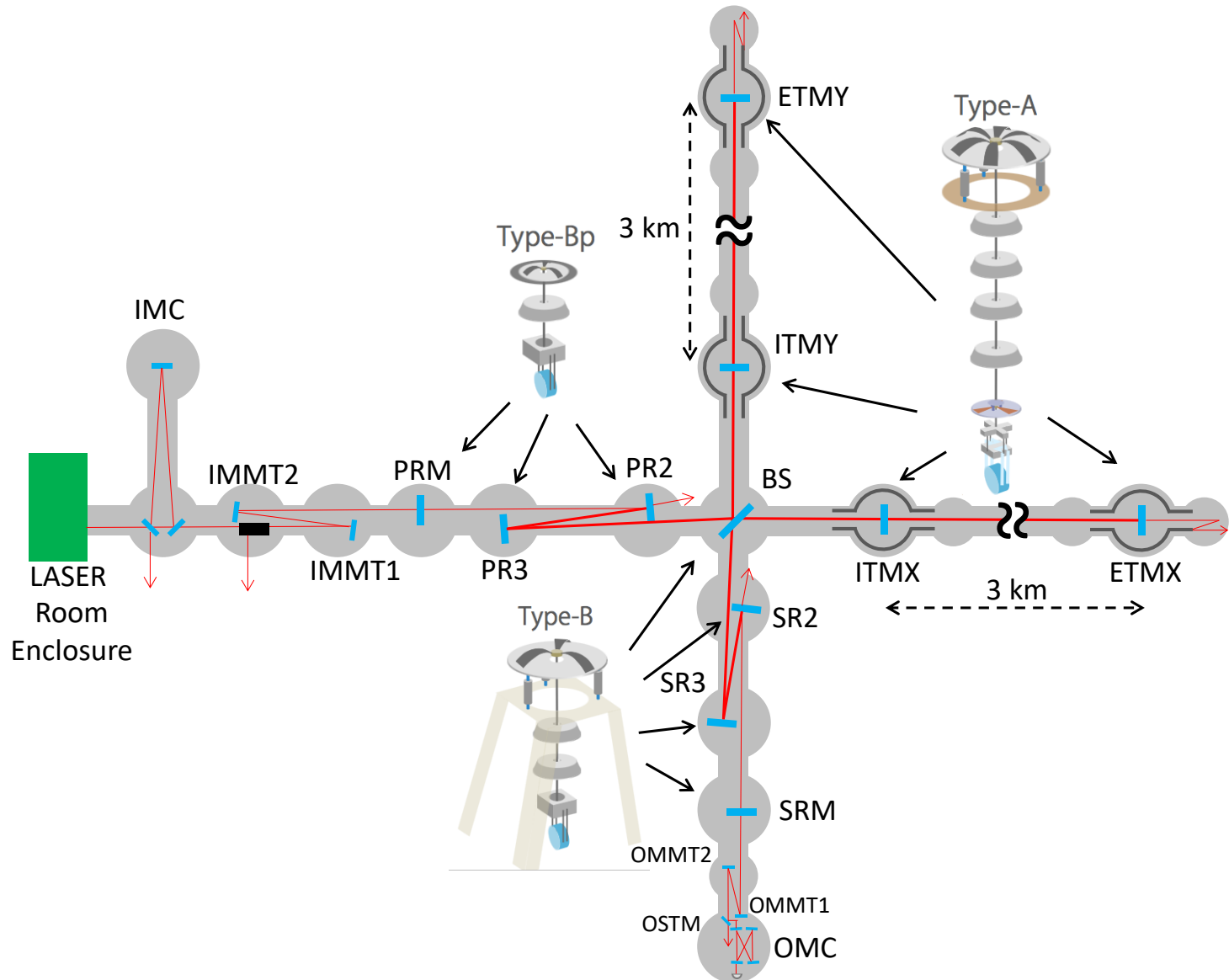


(a) Lock acquisition without ALS

(b) Lock acquisition with ALS

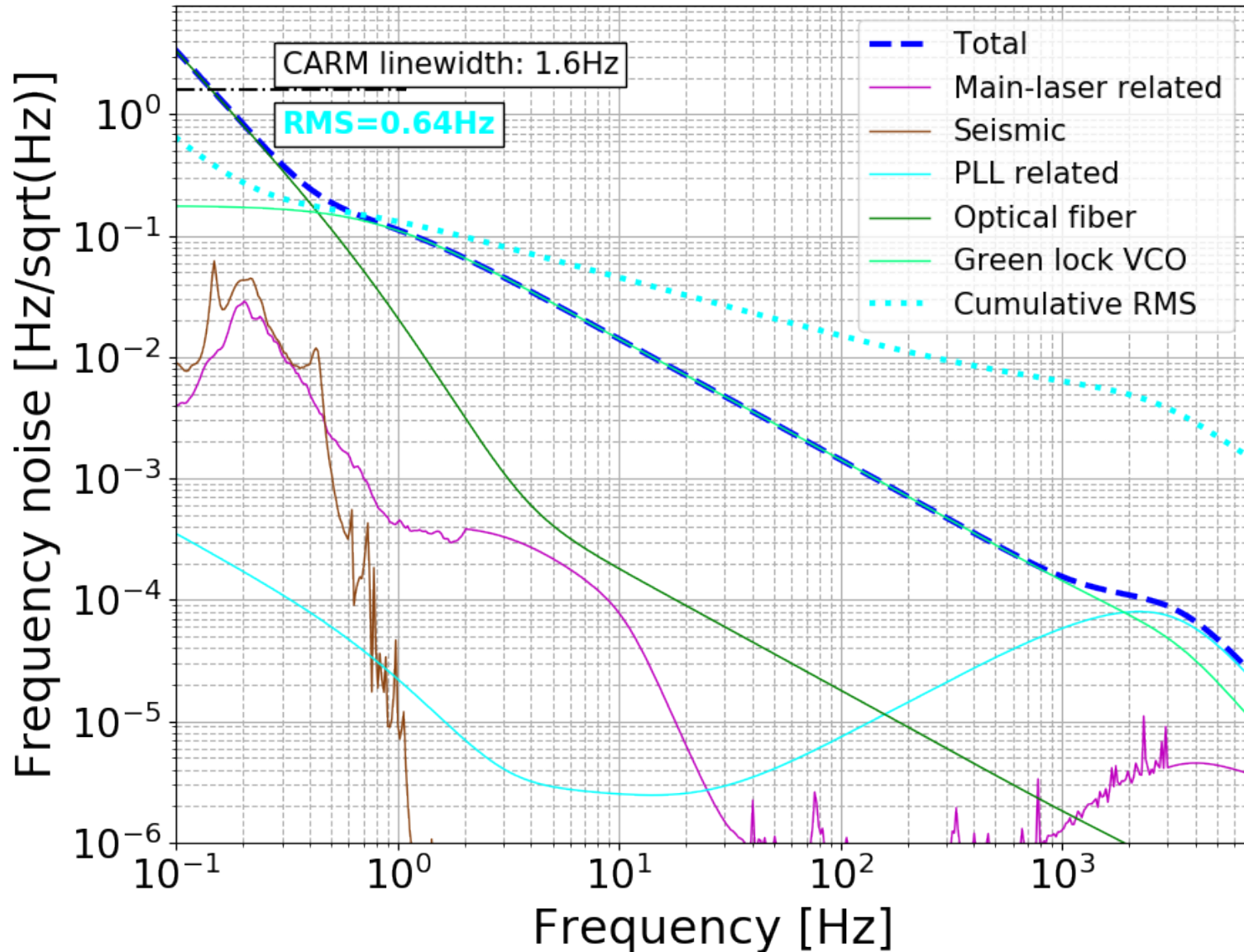


# KAGRA



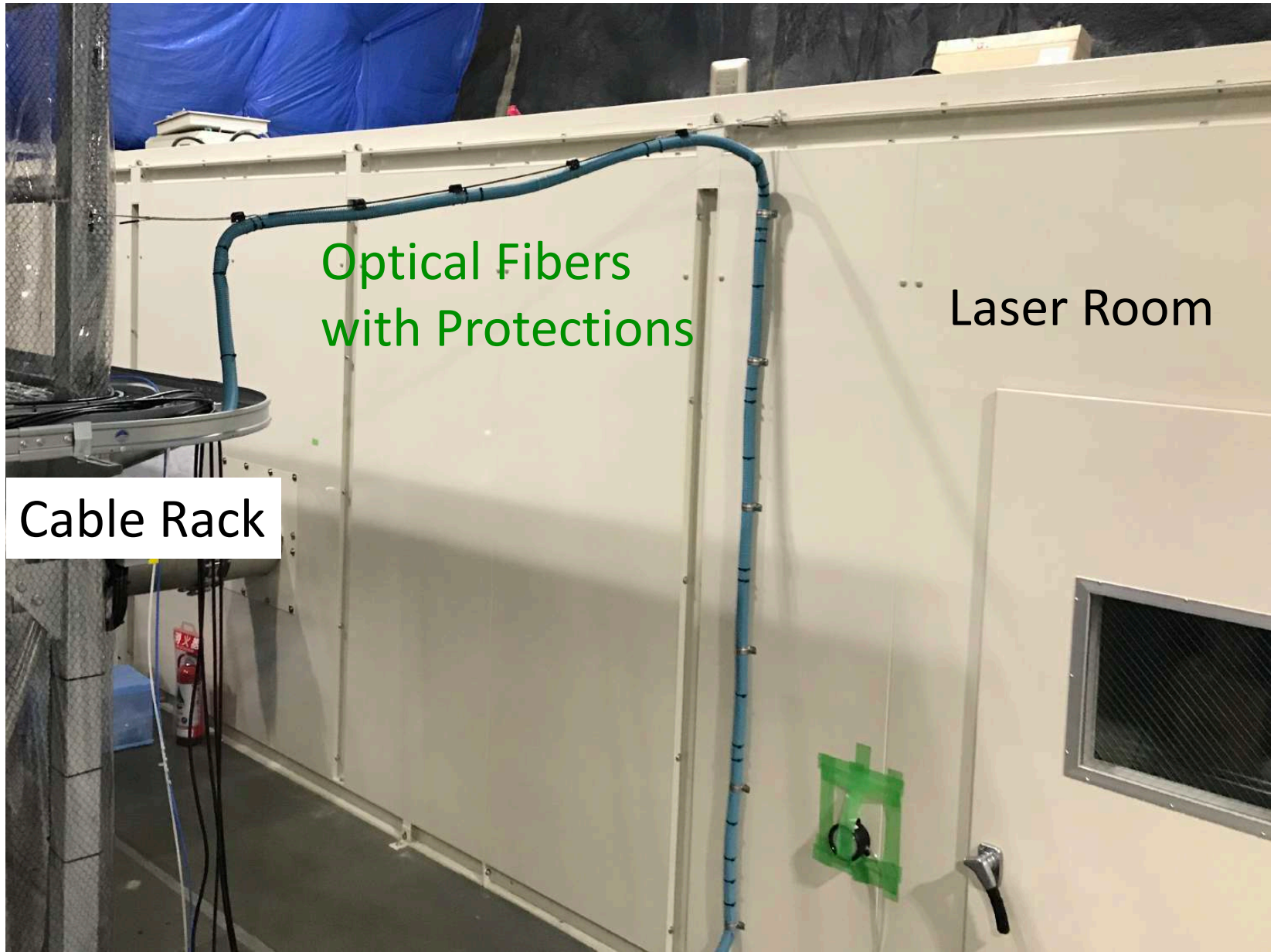
## (3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価)

## Design



(3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価)

# Fiber



Optical Fibers  
with Protections

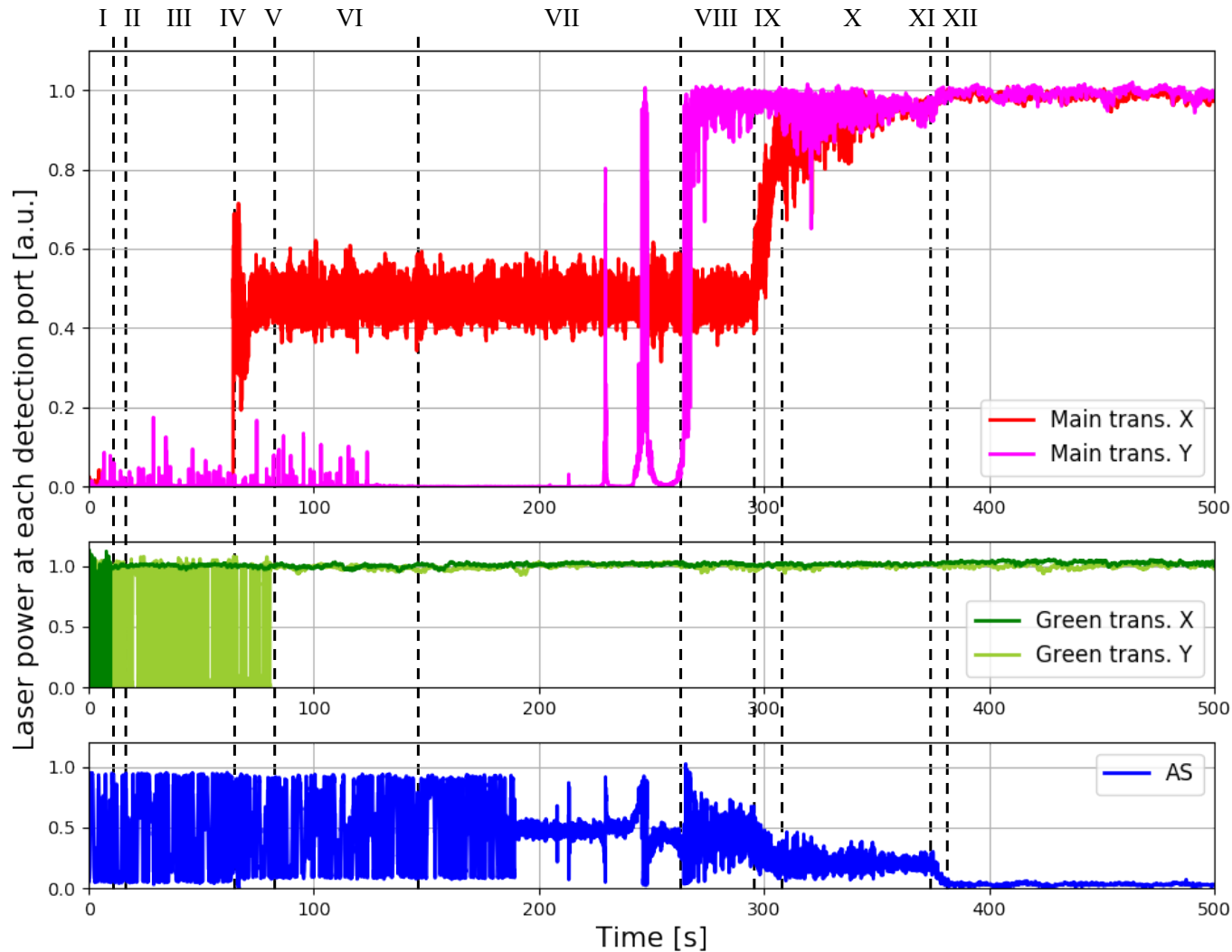
Laser Room

Cable Rack

## (3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価)

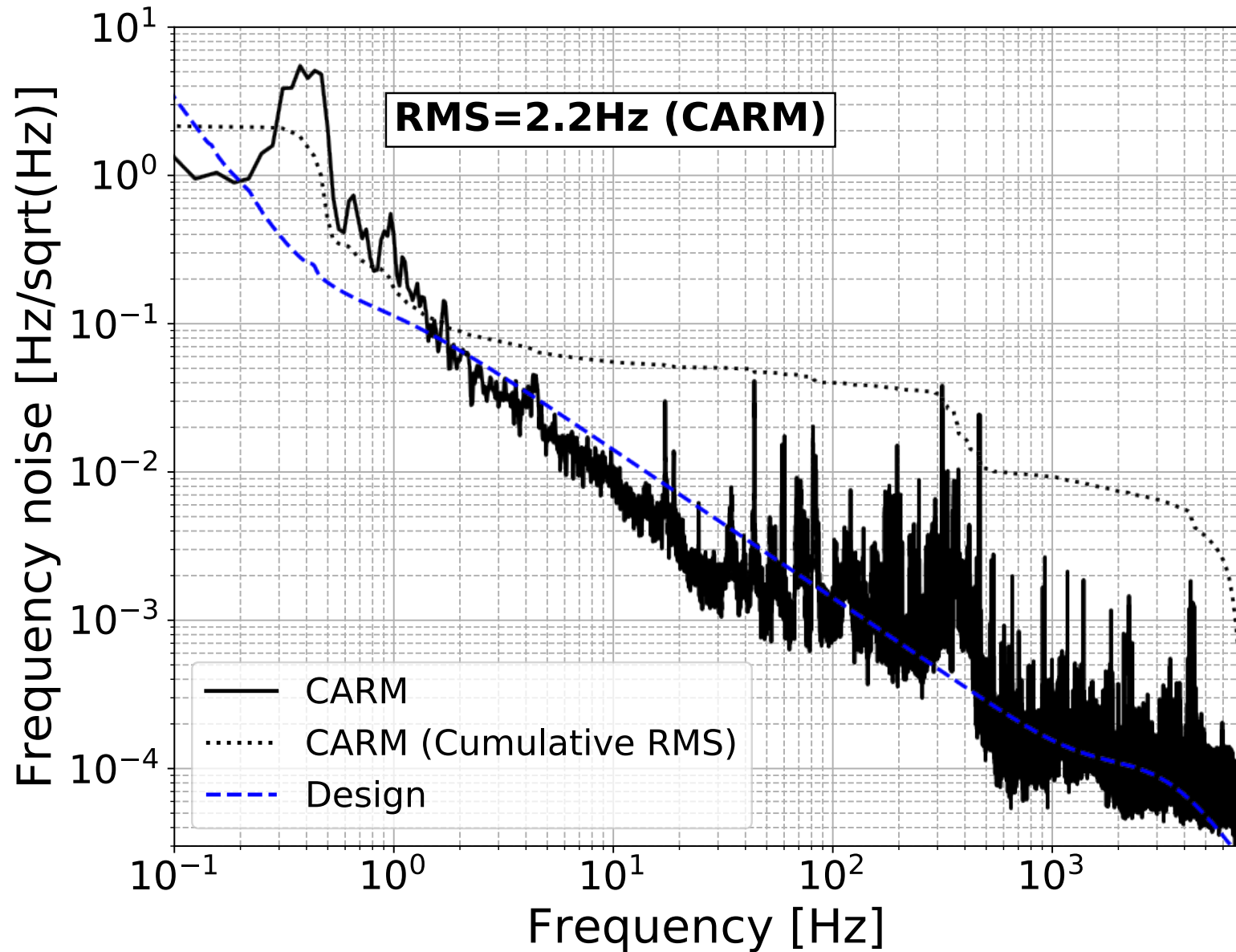
# Demonstration

## -- 2つめの手法



## (3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価)

## CARM



(3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価)

# 雑音源

Noise source	Expected	Achieved
Optical fiber	$0.01 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$	$0.05 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Figure 7.15)
VCO	$0.5 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$	$0.1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Appendix F)
Arm length fluctuations	$3 \times 10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$	$\leq 1 \times 10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ [161]
Free-run frequency noise of the auxiliary laser	$1 \times 10^5 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$	$3 \times 10^5 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ [162]
PSL frequency noise	$1 \times 10^4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$	$1 \times 10^4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ [161]

## (3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価)

# Allan deviation

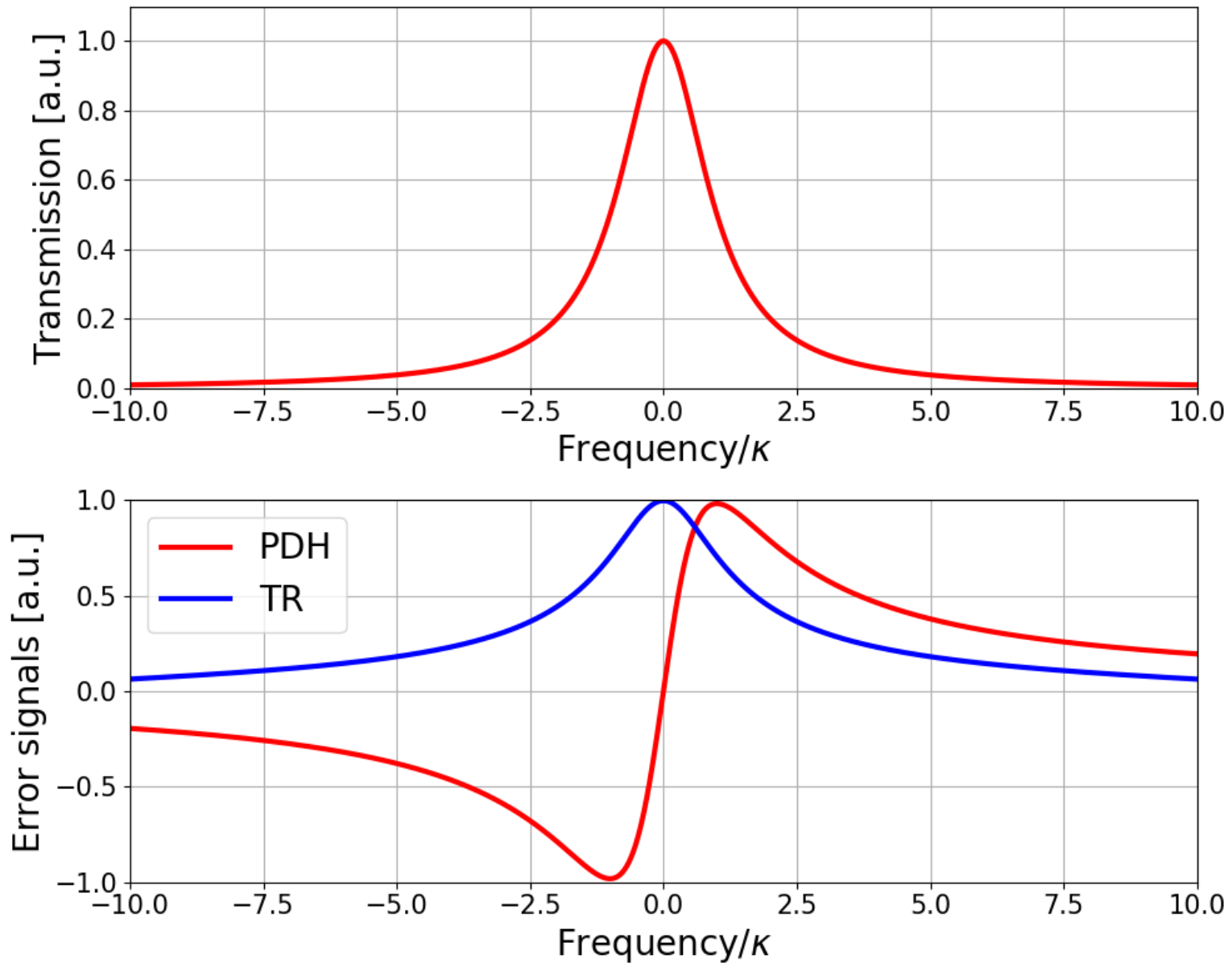
$\tau$ [s]	0.3	1	3	10
X arm [Hz]	1.2	3.3	1.0	1.1
Y arm [Hz]	0.9	2.4	1.5	0.8

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\int_0^{\infty} G_y(f) H(f) df}, \quad H(f) = 2 \frac{\sin^4(\pi \tau f)}{(\pi \tau f)^2}.$$

[T. Ushiba, Ph.D. Thesis, UTokyo (2015)]

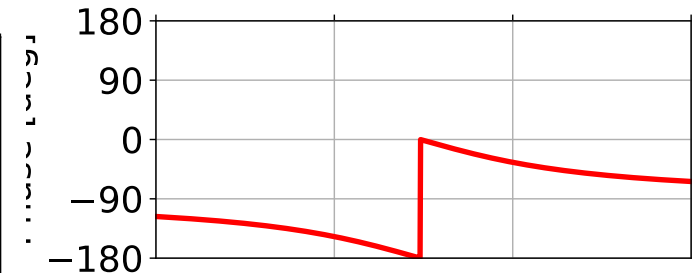
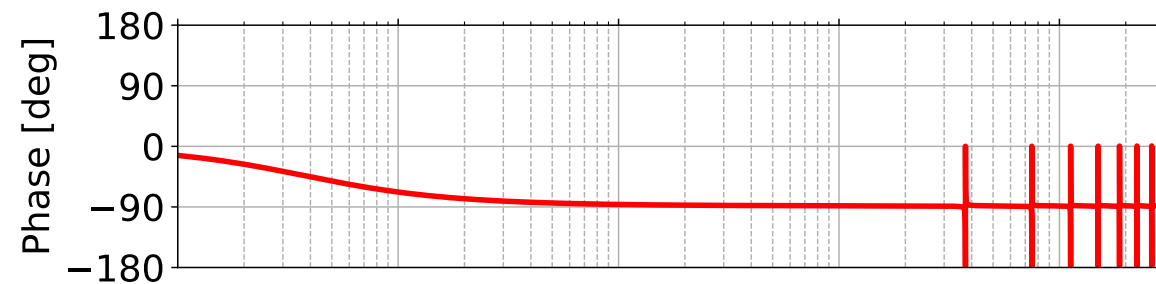
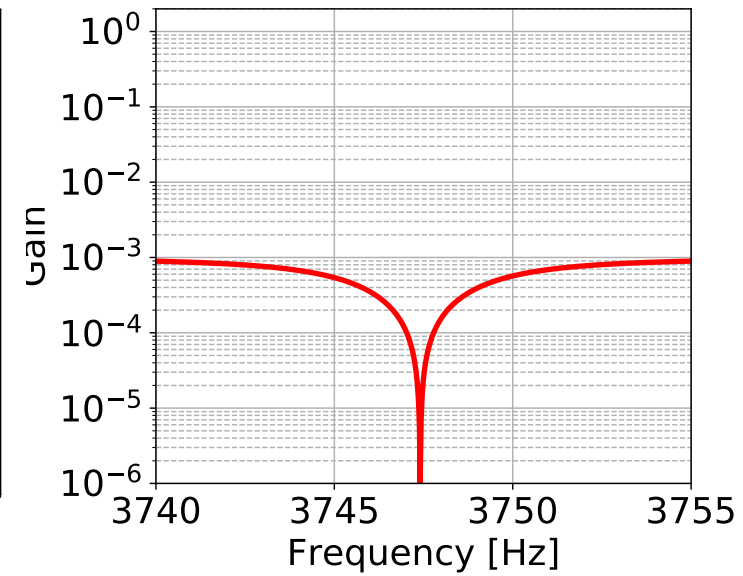
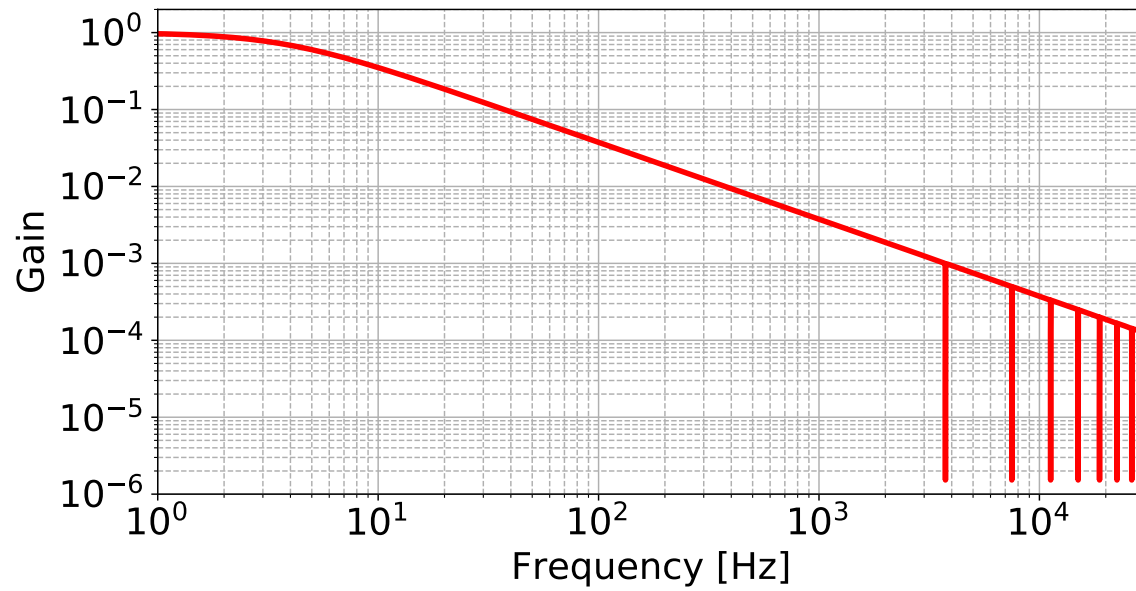
## (3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価)

## TR CARM





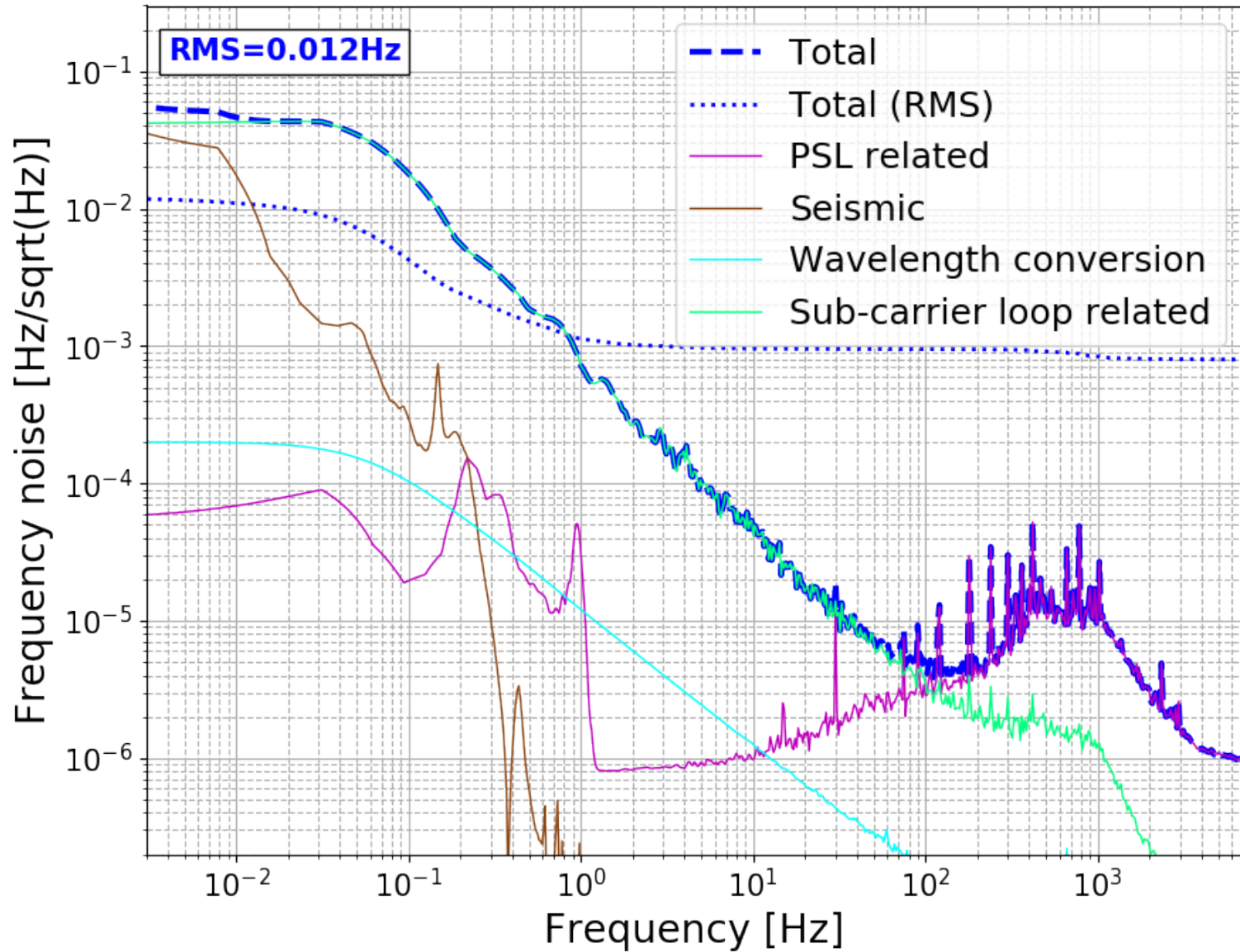
# FSR and TF



# CE-like detector

Arm length ( $L$ )	40 km
Test mass material	Silicon
Wavelength ( $\lambda_1$ )	1550 nm
Optical power in the arm ( $P_{\text{arm}}$ )	2 MW
Detector bandwidth ( $\kappa_{\text{DARM}}$ )	400 Hz
Finesse of the arm ( $\mathcal{F}_{\text{arm}}$ )	519
Roundtrip loss of the arm ( $T_{\text{loss}}$ )	100 ppm
Transmissivity of the PRM ( $T_{\text{PRM}}$ )	3.33 %
Transmissivity of the SRM ( $T_{\text{SRM}}$ )	3.50 %
Input laser power ( $P_{\text{PRM}}$ )	400 W

# Sub-carrier result



(3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価)

# レーザー

Nd:YAG 1064nm

SHG: PPKTP ?

Er doped: 1550nm

Tm doped: 1950nm



## 4. 次世代検出器におけるALS

# 雑音設計

## = 2つの「外挿」方法 =

-- 1つめ: KAGRAで測定された各要素の雑音の大きさを用いて、3G検出器のALSの雑音モデルを立てる。

利点: \* 各雑音源の改善 (Doppler雑音など) や悪化 (波長変換) を柔軟に取り入れられる。

\* 制御ループの帯域の変化の影響も取り入れられる。

欠点: \* 考慮していない雑音源があると、雑音の過小評価に繋がる

-- 2つめ: KAGRAで測定されたトータルの雑音スペクトルを単純に用いる。

利点: \* KAGRA ALSに寄与した全ての雑音源が取り入れられる → 保守的な推定

欠点: \* 新たな雑音源 (波長変換など) は取り入れられない

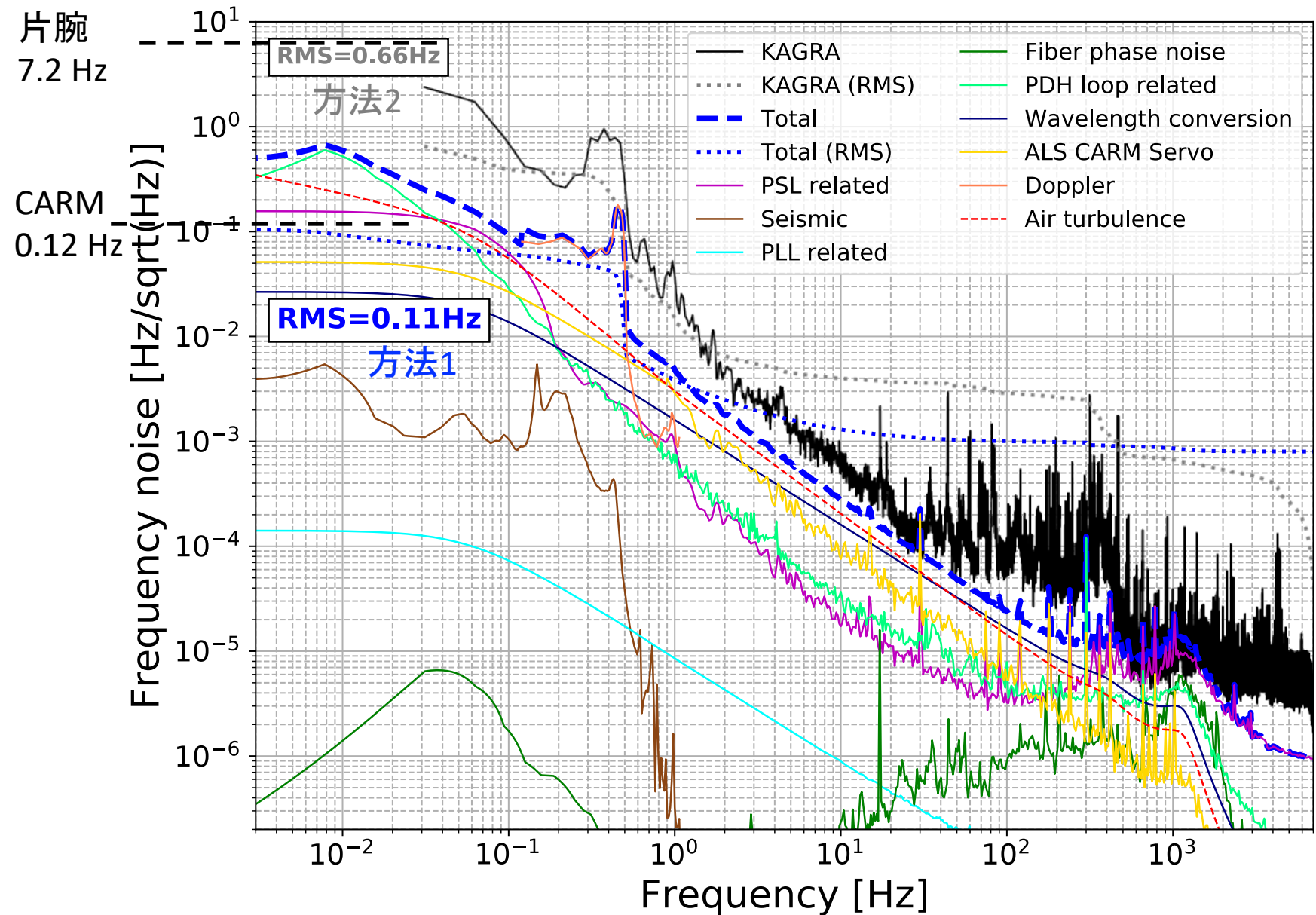
◎ 2つの方法は相補的である



両方の「外挿」結果を示す。

## 4. 次世代検出器におけるALS

## 想定されるパフォーマンス



## 2. 干渉計のロックと重力波観測

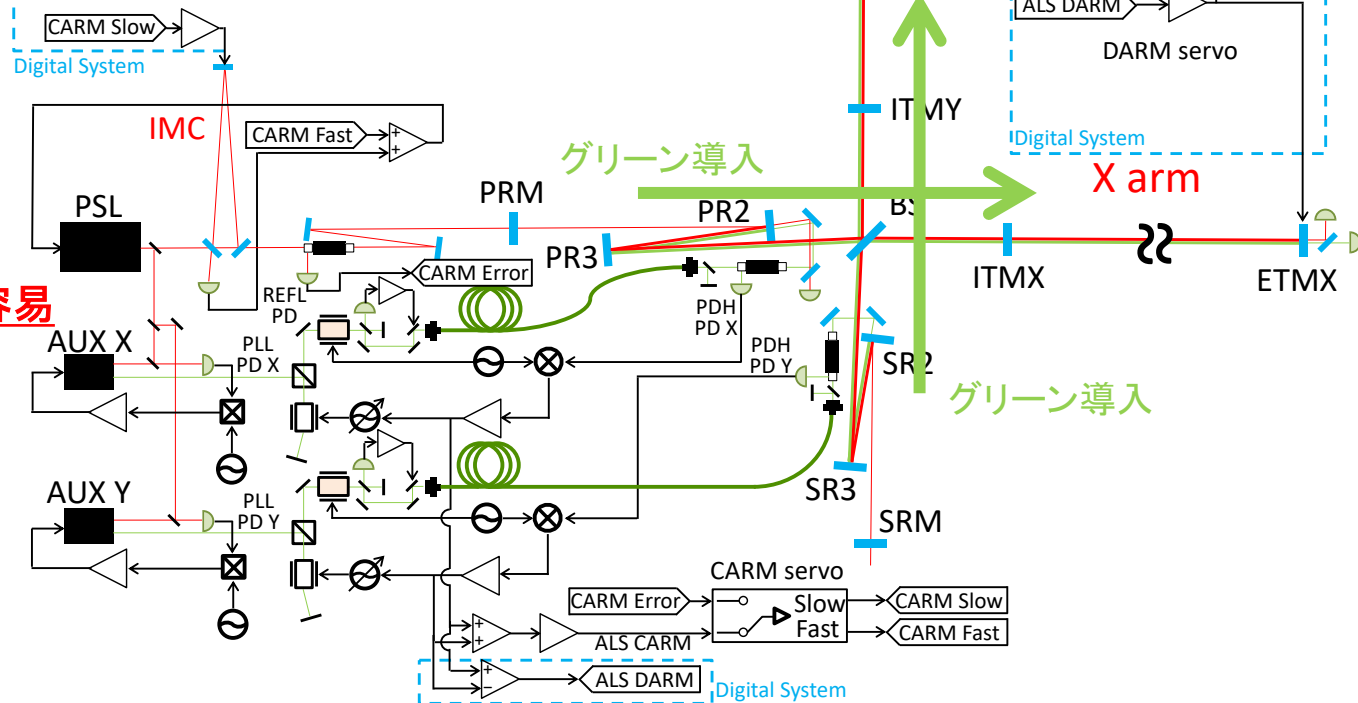
## 本研究での手法・意義

= KAGRA ALS =

	KAGRA	Advanced LIGO
Green laser injection site	Central area	End stations
Optical fibers	Within the central area	Along the arms
Signals of the arm DoFs	Summations in electronics	Optical beat notes
Number of optical sensors	4 (or 6 <sup>a</sup> )	6
Number of SHG setups	2	3

<sup>a</sup> If the fiber noise cancellation loops are involved.

最大の違い



構成の違いにより、

-- センターからグリーン導入

→ 短いファイバー

=&gt; 3Gにスケールアップが容易

-- 構成もよりシンプルに



## 2. 干渉計のロックと重力波観測

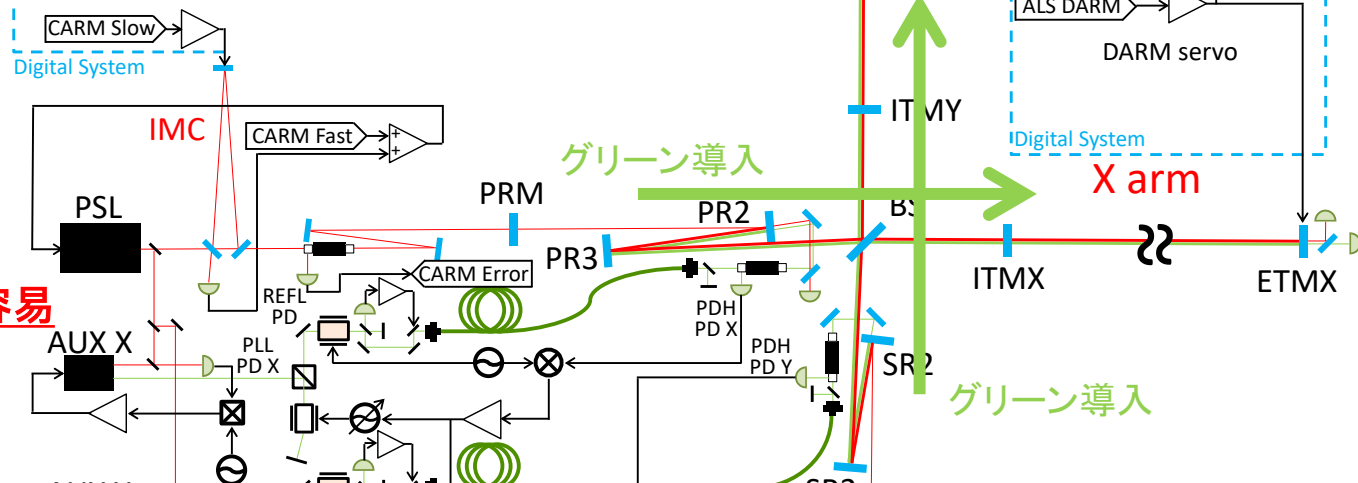
## 本研究での手法・意義

= KAGRA ALS =

	KAGRA	Advanced LIGO
Green laser injection site	Central area	End stations
Optical fibers	Within the central area	Along the arms
Signals of the arm DoFs	Summations in electronics	Optical beat notes
Number of optical sensors	4 (or 6 <sup>a</sup> )	6
Number of SHG setups	2	3

<sup>a</sup> If the fiber noise cancellation loops are involved.

最大の違い



構成の違いにより、

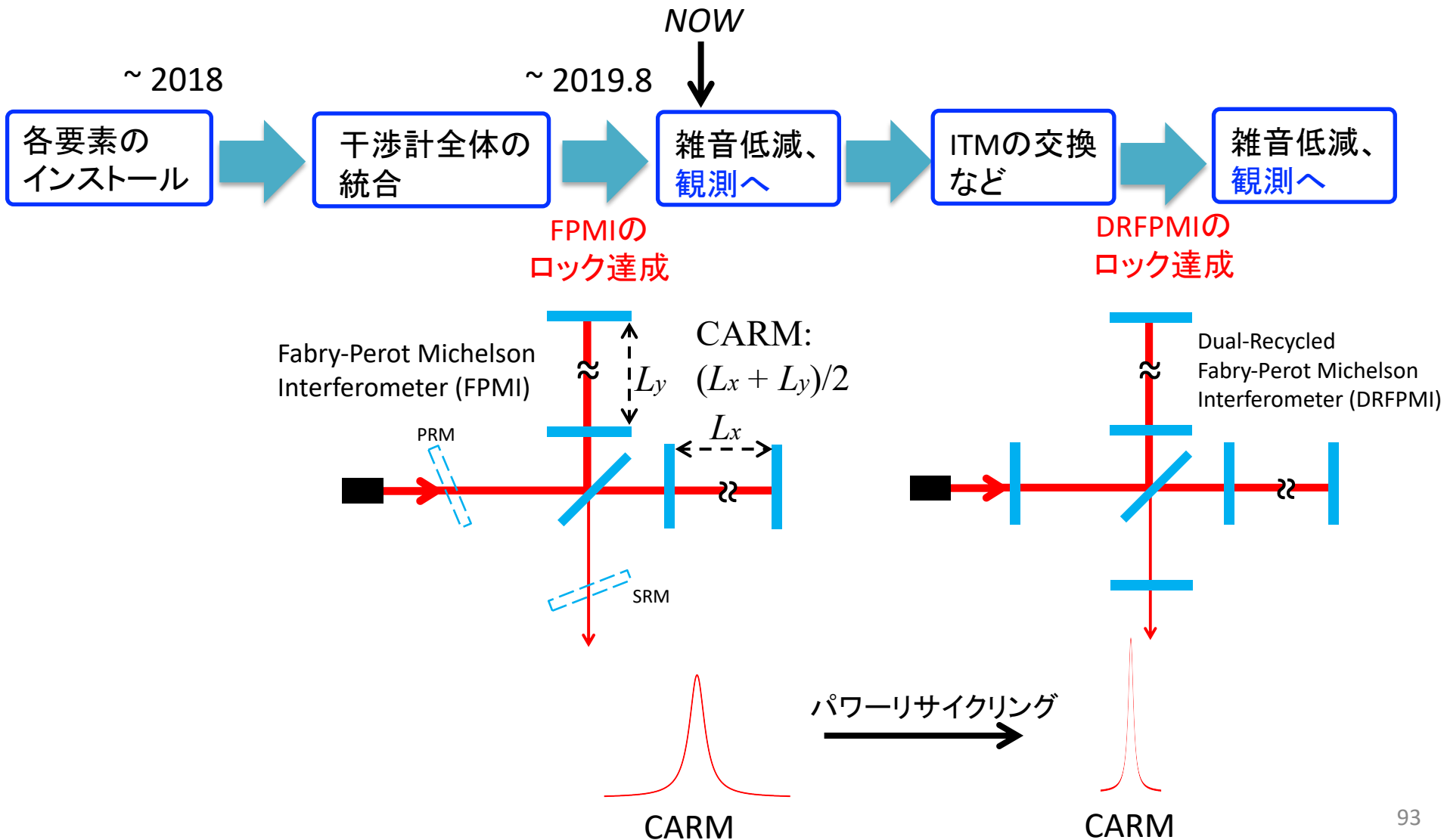
-- センターからグリーン導入

→ 短いファイバー=> 3Gにスケールアップが容易-- 構成もよりシンプルに**本研究の意義:**

- \* KAGRAのロックを、新しい/シンプルなALSで達成する  
=> KAGRAの観測ネットワーク参加への最大のジャンプ
- \* 3G検出器にスケールアップできるALS、ロック手法の開発  
=> 3Gでの観測を可能にする重要な一歩 / 今後のR&Dに道筋

## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## 背景: KAGRAのタイムライン



## 3. 新手法のKAGRAでの実証・特性評価

## ALSのゴール

-- 実際に干渉計をロックすること => 最も明白なゴール

では、干渉計のロックに必要な要求は、、、

-- 要求値: 各腕の自由度を腕の線幅より抑える

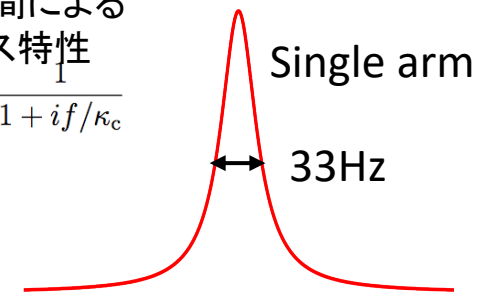
$$\Delta f_{\text{res}}(f; \kappa_{\text{ARM}}) = \left[ \underbrace{\Delta f_{\text{main}}(f)}_{\text{メインレーザー周波数}} - \underbrace{\Delta f_{\text{ARM}}(f)}_{\text{腕共振器の共振周波数}} \right] L(f; \kappa_{\text{ARM}})$$

共振器内の光の滞在時間によるローパス特性  
 $L(f; \kappa_c) = \frac{1}{1 + if/\kappa_c}$



$$\text{RMS } (\Delta f_{\text{res}}) < 33\text{Hz}$$

\* (必要なら腕の透過光の「肩ロック」を経由して)  
DRFPMIのロックが可能

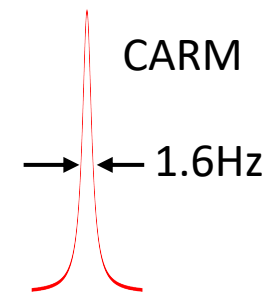


-- Extra success: CARM自由度をCARMの線幅より抑える



$$\text{RMS } (\Delta f_{\text{res,CARM}}) < 1.6\text{Hz}$$

\* よりシンプルなDRFPMIのロックが可能  
\* 早く初ロックが達成できることが期待できる

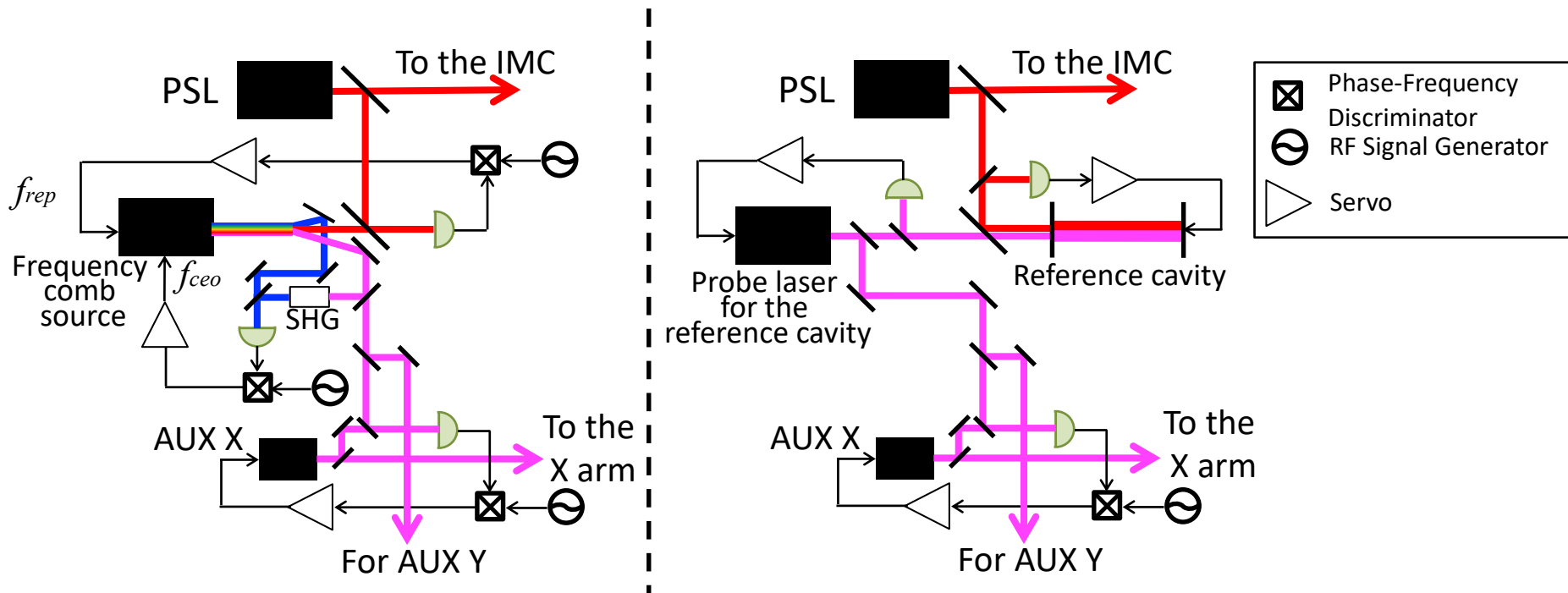


Extra success が達成可能なシステムをデザインし、KAGRAにインストールした。

## 4. 次世代検出器におけるALS

## 波長変換

◎ メインと補助レーザーの波長を「はしご」する方法



周波数コム

2色コーティングされた共振器

