

Ph.D. Thesis Presentation

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

University of Tokyo  
Yutaro Enomoto



# Overview

-- My work is on how to bring the interferometer into operation mode in the 2G and 3G detectors, focusing on lock acquisition of the arm cavities using Arm Length Stabilization (ALS).

-- The thesis includes:

- \* Design of a new type of the ALS system for KAGRA
- \* Demonstration of the ALS system → Achievement of FPMI Lock
- \* Characterization of the ALS system → Noise budget of the system
- \* ALS in the 3G detector → Noise simulation of the 3G ALS,  
Discussions on new necessary techniques



# Overview

-- My work is on how to bring the interferometer into operation mode in the 2G and 3G detectors, focusing on lock acquisition of the arm cavities using Arm Length Stabilization (ALS).

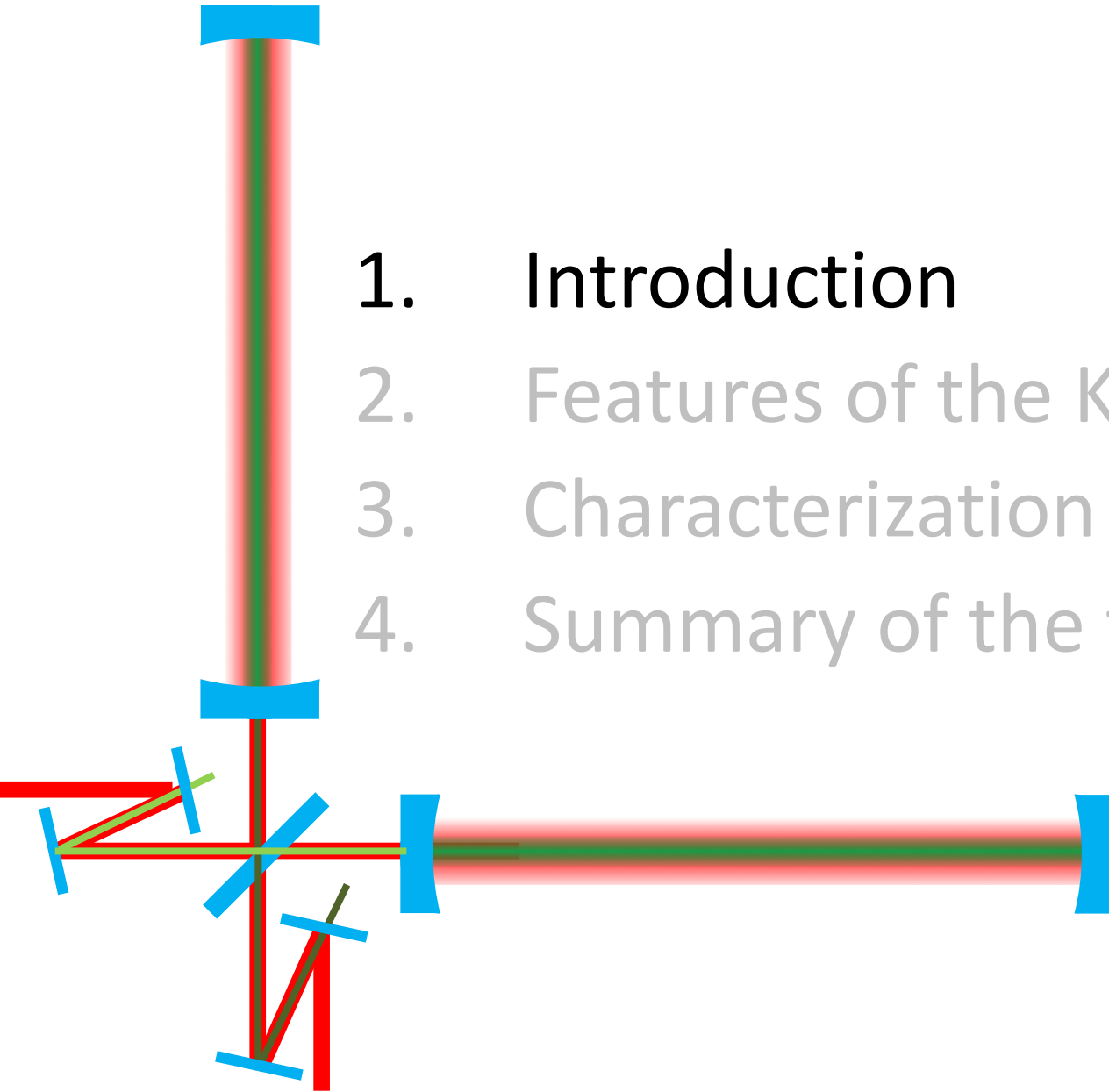
-- The thesis includes:

- \* Design of a new type of the ALS system for KAGRA
- \* Demonstration of the ALS system → Achievement of FPMI Lock
- \* Characterization of the ALS system → Noise budget of the system
- \* ALS in the 3G detector → Noise simulation of the 3G ALS,  
Discussions on new necessary techniques

See the poster for the rest



1. Introduction
2. Features of the KAGRA ALS
3. Characterization
4. Summary of the talk



# 1. Introduction

- Lock acquisition is *difficult*
- ∴ \* 5 length DoFs are coupled with each other
  - \* Each error signal is quite non-linear
- Solution: Arm Length Stabilization (ALS)

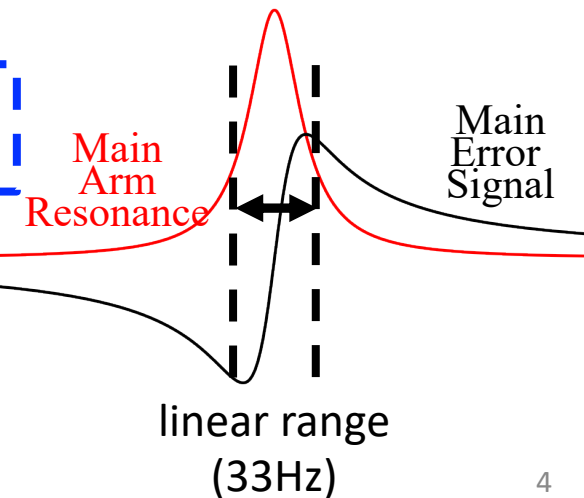
Uses **two auxiliary lasers**

- \* **One laser** senses **one arm**
  - X arm/ Y arm sensed independently (Decoupled)
- \* Laser freq. always follows the arm resonance
  - Wide linear-ranged sensors

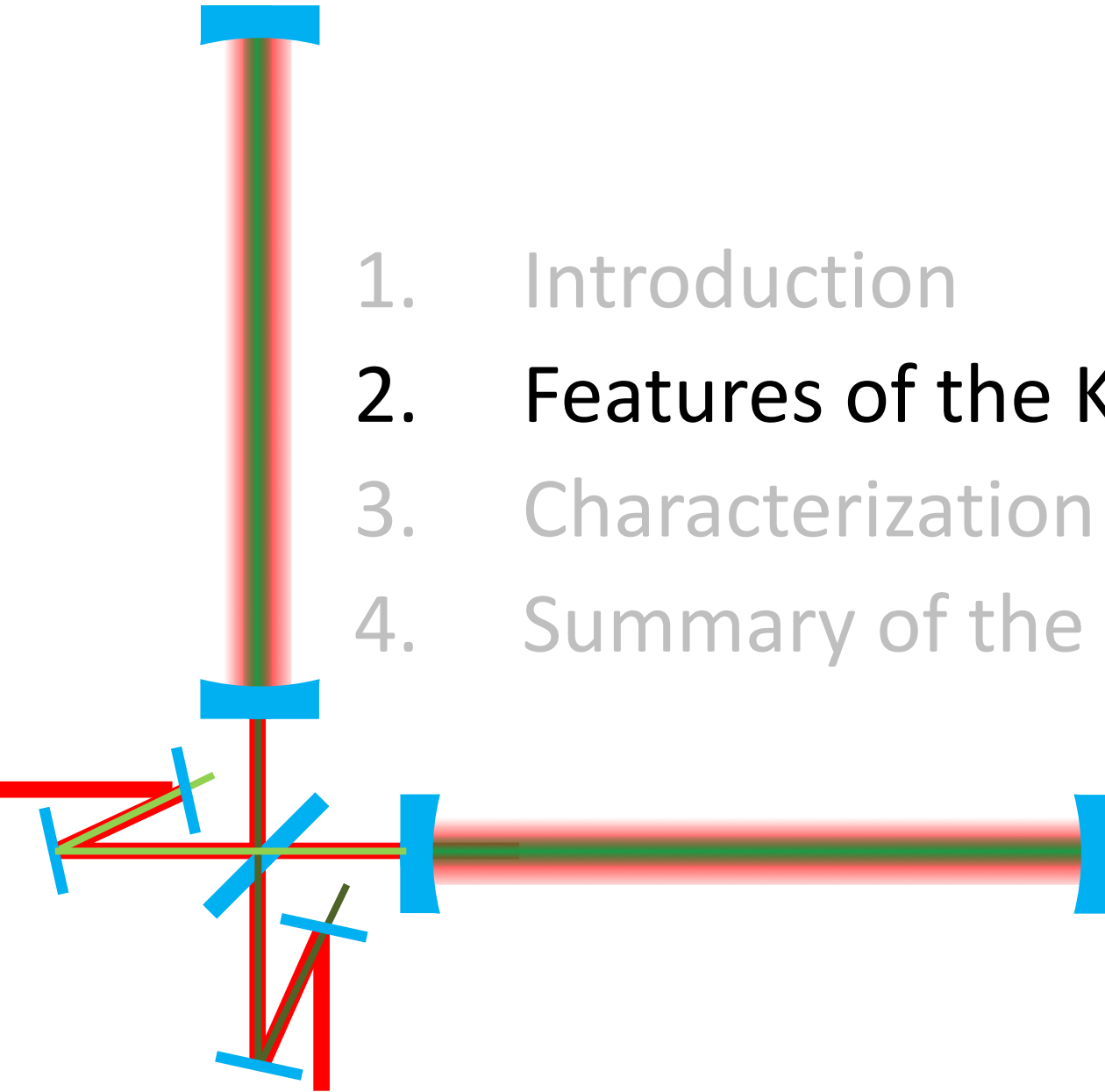
-- Requirements:

$$\Delta f_{\text{arm}} < (\text{Arm Linewidth}) = 33 \text{ Hz}$$

(KAGRA single arm)



1. Introduction
2. **Features of the KAGRA ALS**
3. Characterization
4. Summary of the talk



## 2. Features of the KAGRA ALS

-- The KAGRA ALS is a new type (c.f. aLIGO ALS)

	KAGRA	Advanced LIGO
From where to inject green	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

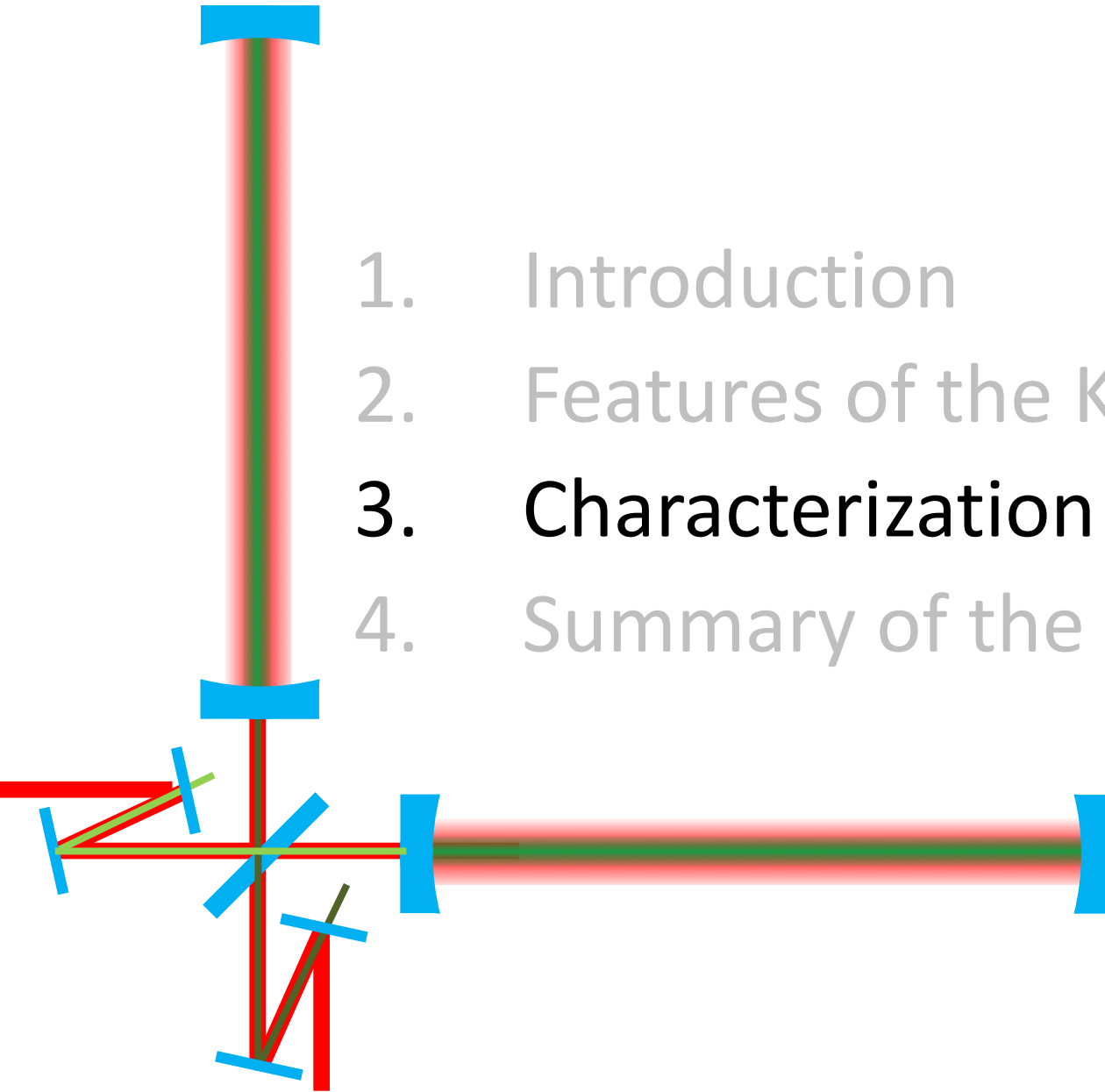
<sup>a</sup> If the fiber noise cancellation loops are involved.

- \* Simple and flexible
- \* No need to lay optical fibers along the arms



**Scalable to the 3G detectors**

1. Introduction
2. Features of the KAGRA ALS
- 3. Characterization**
4. Summary of the talk





# 3. Characterization

-- Achievement of the FPMI

→ demonstrates that the new ALS system is really working!!

→ The noise performance is good enough.

-- So, why do we need to characterize the ALS noise performance??

\* Noise improvement of the system

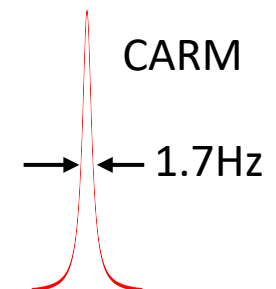
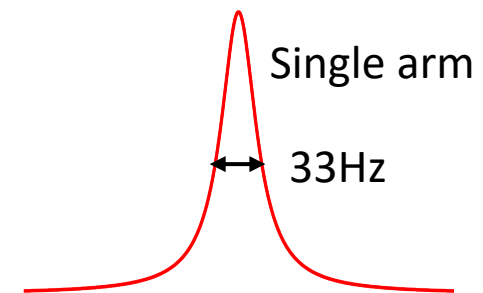
*might enable us to simplify the full lock process*

→ if  $\Delta f < 1.7$  Hz, CARM locking in DRFPMI will be significantly simplified.

\* Assessment of the scheme itself:

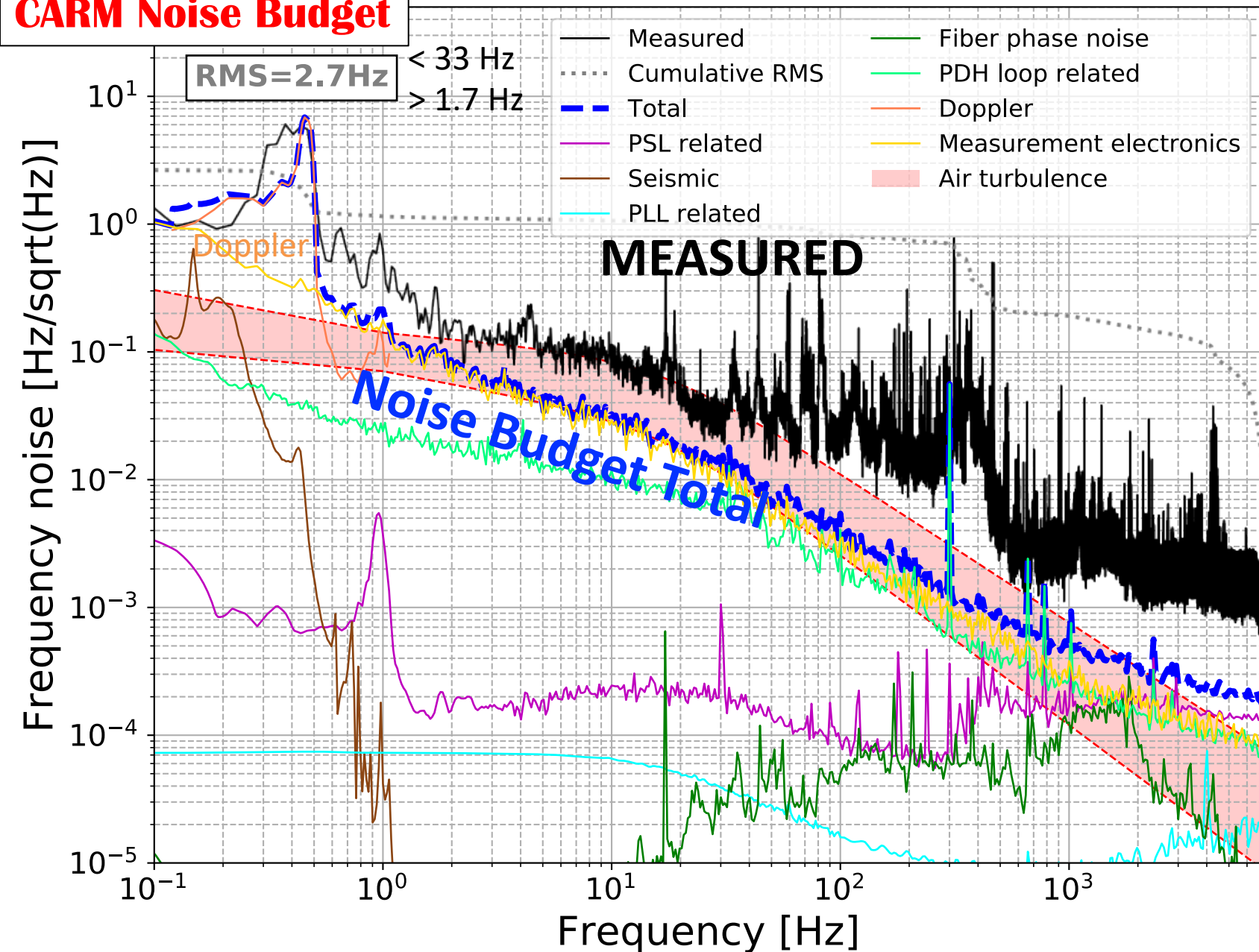
→ gain knowledge toward the 3G ALS

(**Realization of the 3G detector**)



# 3. Characterization

## CARM Noise Budget



# 3. Characterization

= What were learned from the characterization? =

\* The ALS stability  $1.7 \text{ Hz} < \Delta f < 33 \text{ Hz}$

→ It satisfied the requirement,

but was not enough for direct transition of CARM in DRFPMI

\* The **Doppler coupling** limited the overall performance

- By improving the Doppler coupling,

1.7 Hz would be achievable.

- careful damping of PR2

- online subtraction

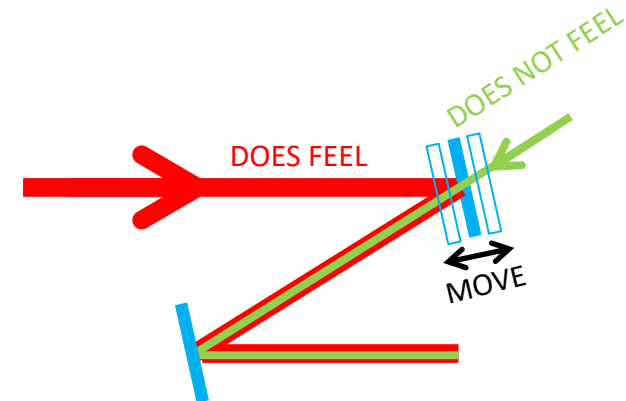
- The Doppler coupling (and air turbulence)

∴ **Optical paths** of the main and green

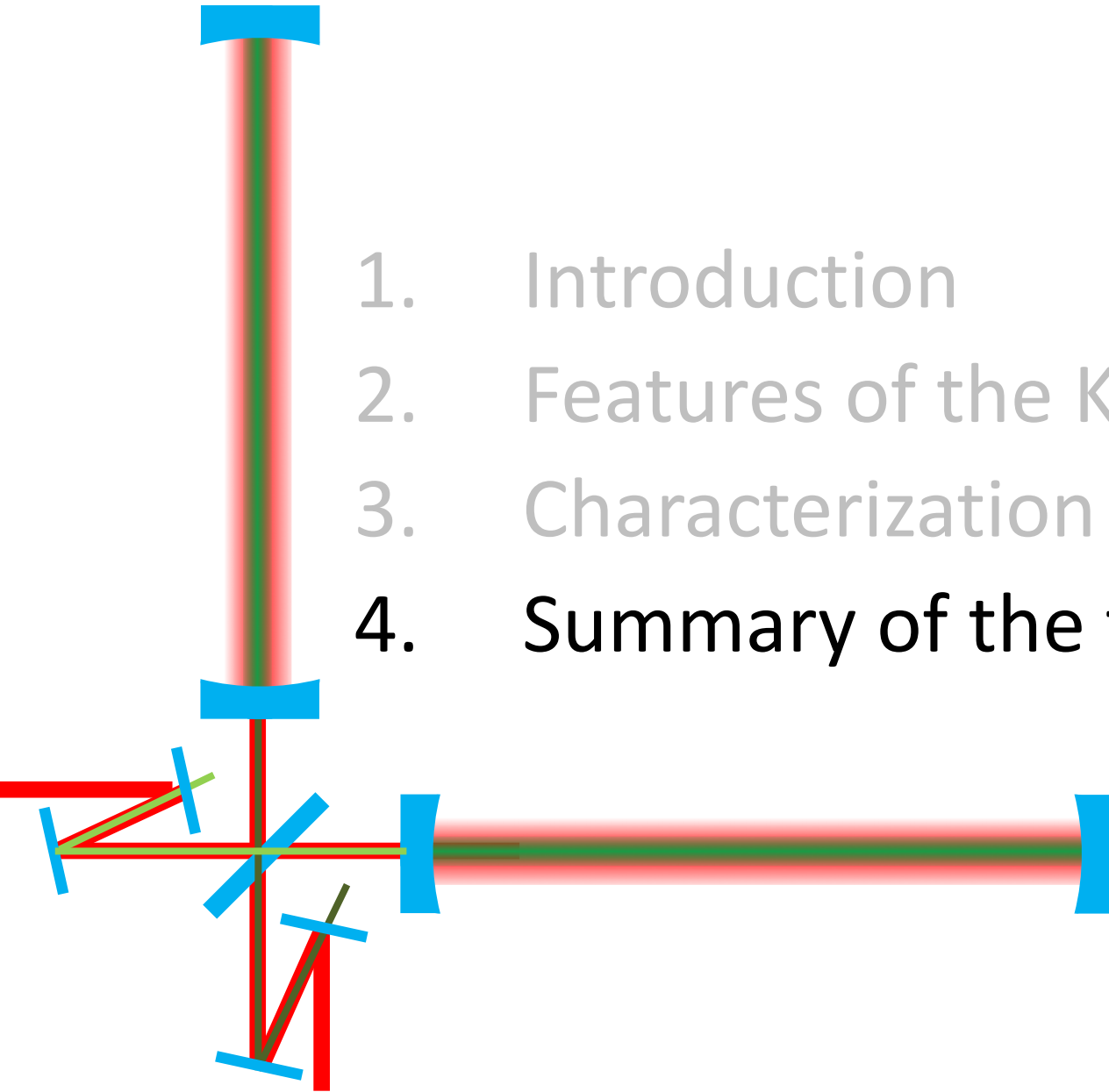
lasers are **different**

→ Implications to 3G lock acquisition

(see the poster)

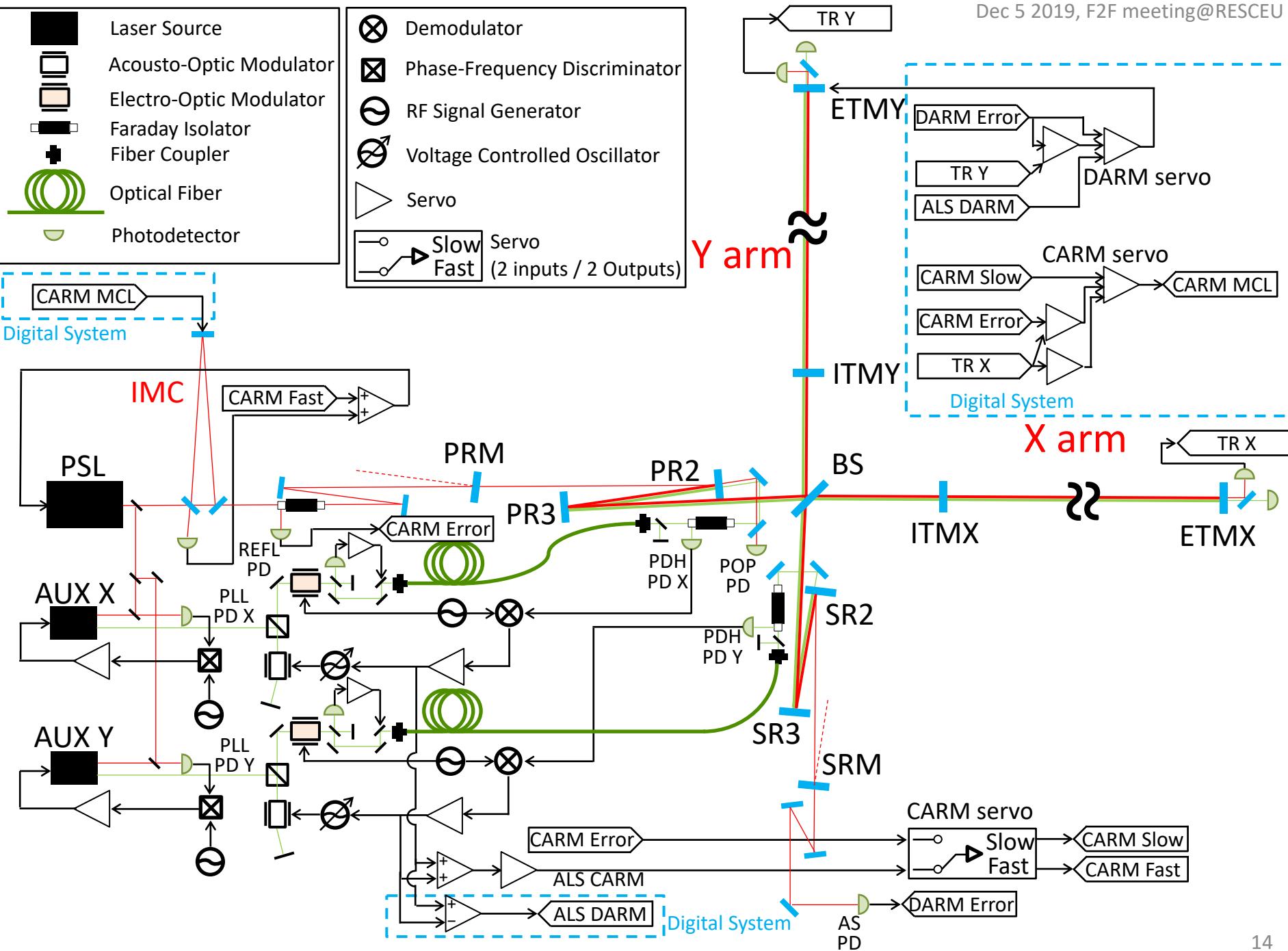


1. Introduction
2. Features of the KAGRA ALS
3. Characterization
4. Summary of the talk

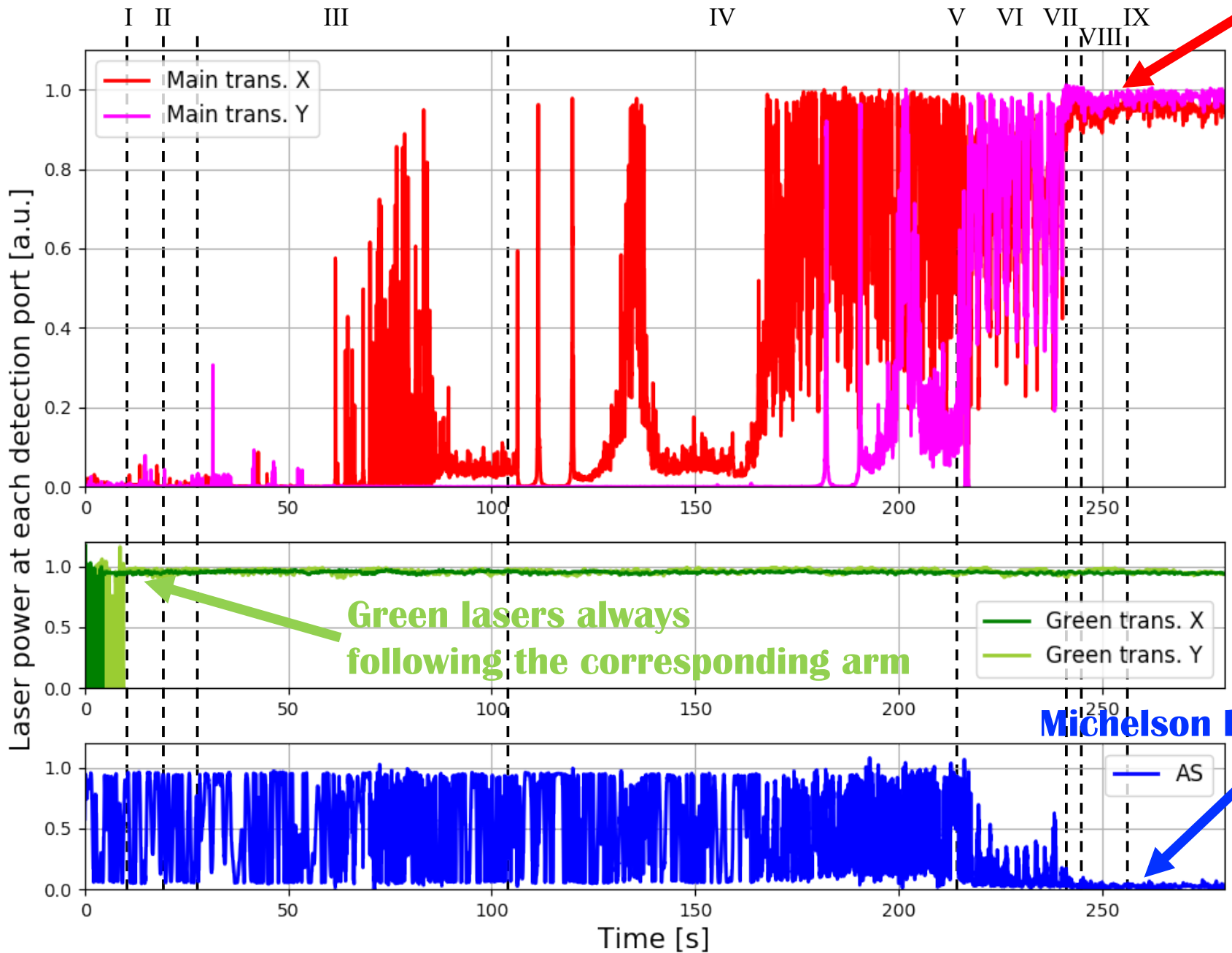




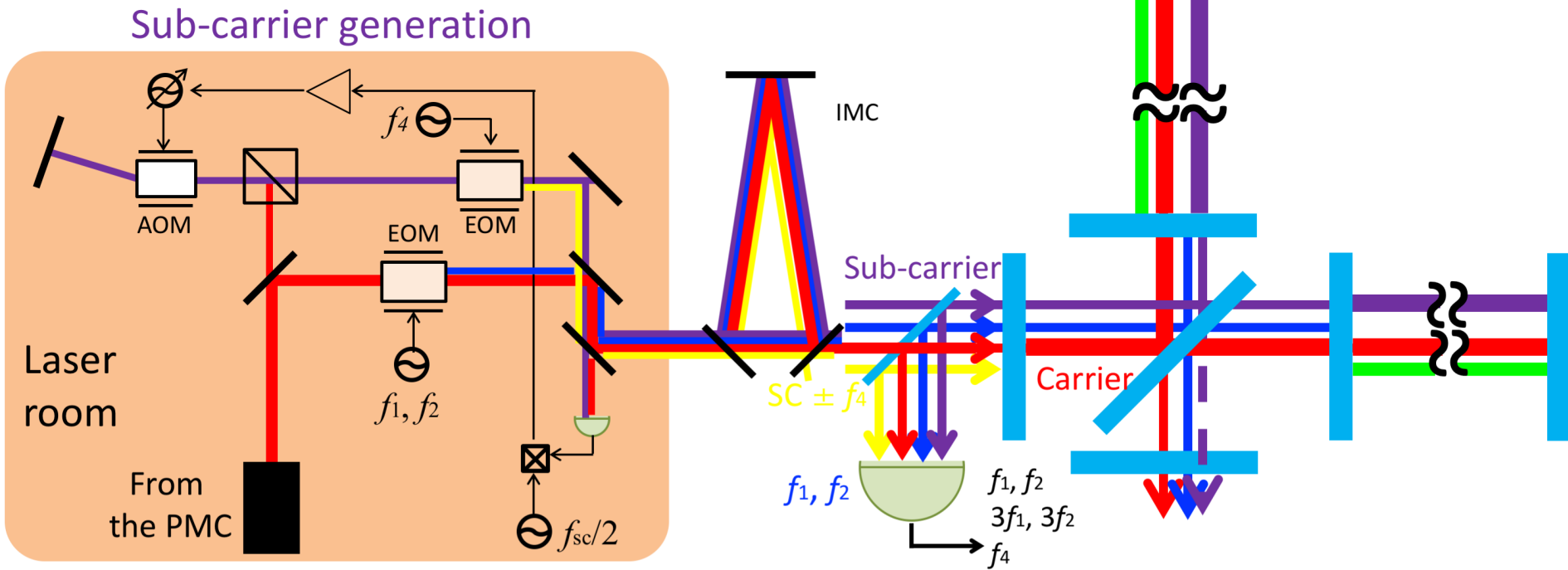
# APPENDIX

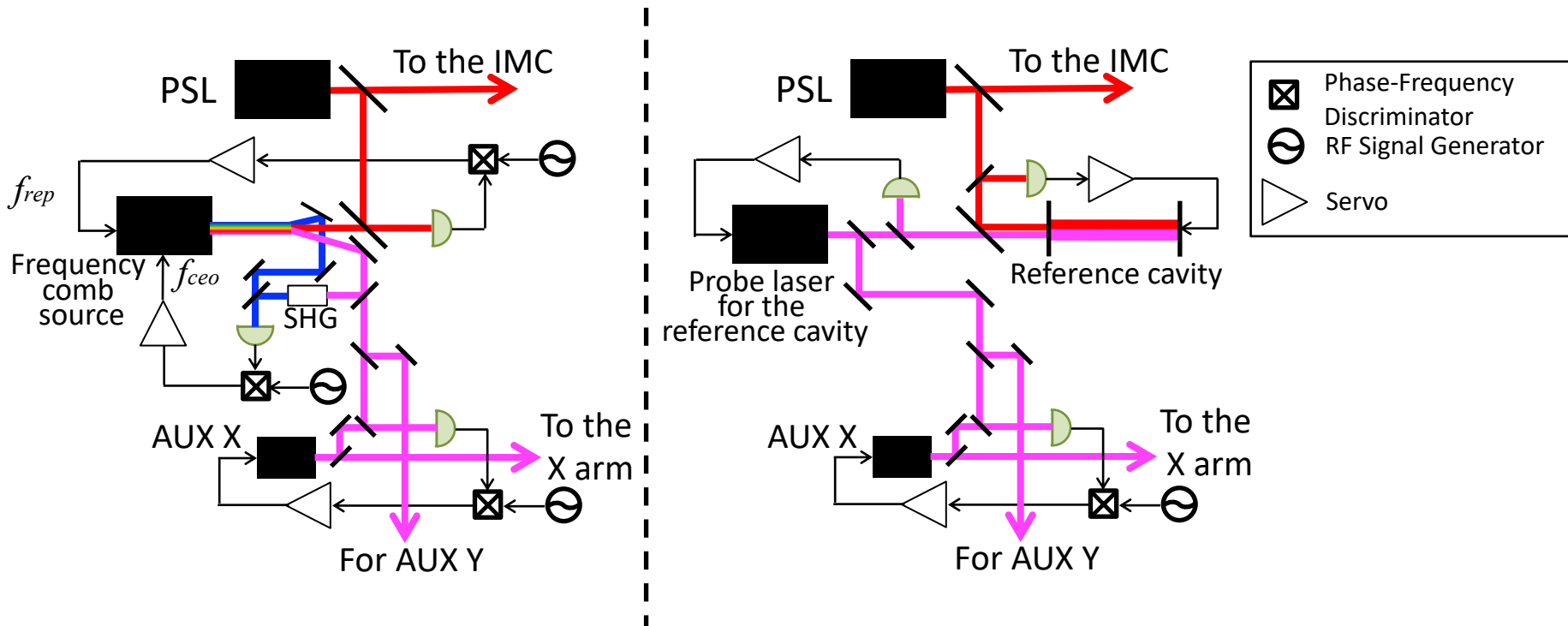


**Both arms at resonance**









## 1. イントロダクション

# 動作点引き込み

## ◎ 動作点引き込みは難しい

重力波検出器 => **多自由度**の干渉計

- 5つの共振器/干渉計 自由度が絡み合う

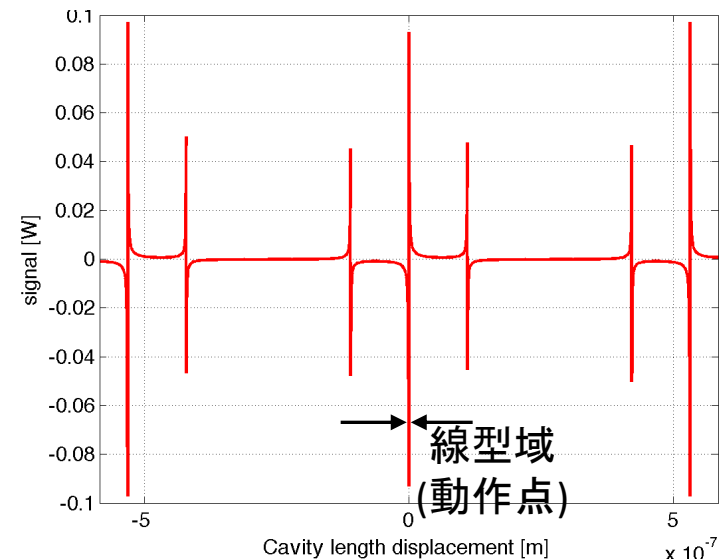
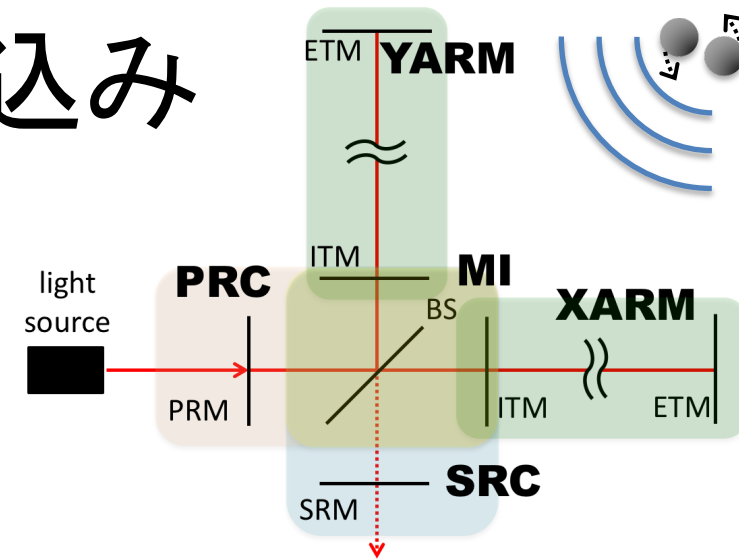
各自由度の誤差信号がとても非線形

- 非常に狭い線型域 (= **動作点**)

## ◎ 動作点引き込みは本質的に重要

地震等の外乱で、観測モードの制御が外れてしまうのは避けられない。

→ 短時間・確実な動作点引き込みが duty cycleの向上の鍵



腕共振器の誤差信号

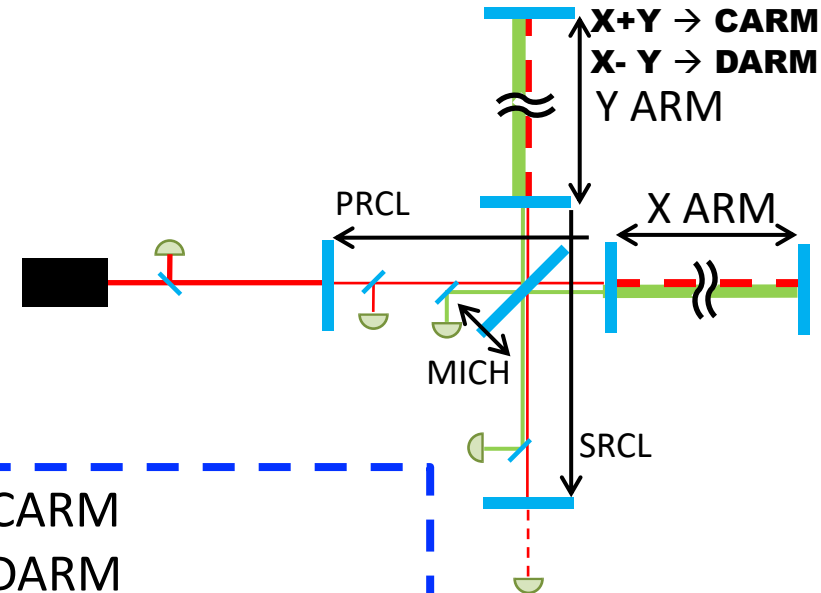
## 1. イントロダクション

## 引き込み法

◎ 全5自由度の読み出しを

1 (X ARM) + 1 (Y ARM) + 3 (PRC, MI, SRC) に分離。

読み出し      グリーン x 2                      メインレーザー



全5自由度

- X ARM                      =>    CARM
- Y ARM                             DARM
- PRCL (Power recycling cavity length)
- SRCL (Signal recycling cavity length)
- MICH (Michelson length)

## 1. イントロダクション

# 引き込み法

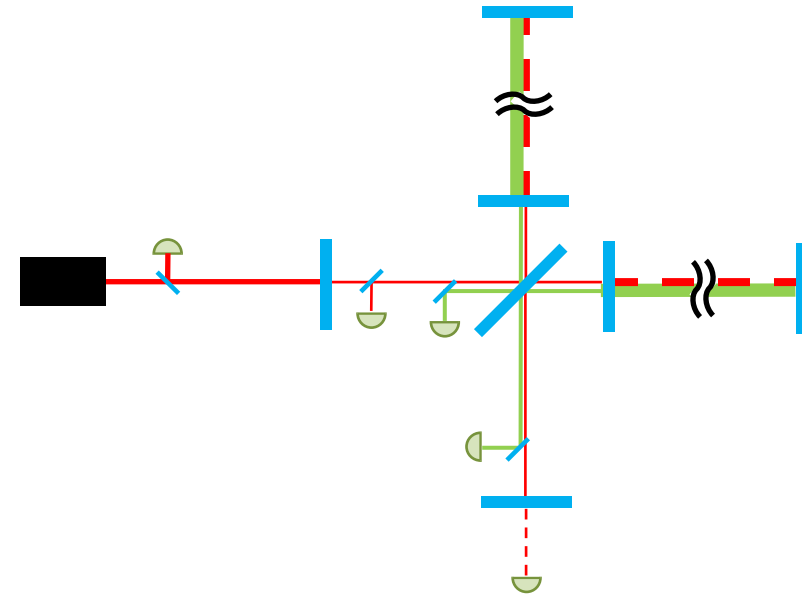
## ◎ 全5自由度の読み出しを

1 (X ARM) + 1 (Y ARM) + 3 (PRC, MI, SRC) に分離。

読み出し      グリーン x 2                      メインレーザー

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. 中央部分の3自由度のロック
3. 腕の自由度も動作点へ
4. 信号の切り替え → 引き込み完了





## 1. イントロダクション

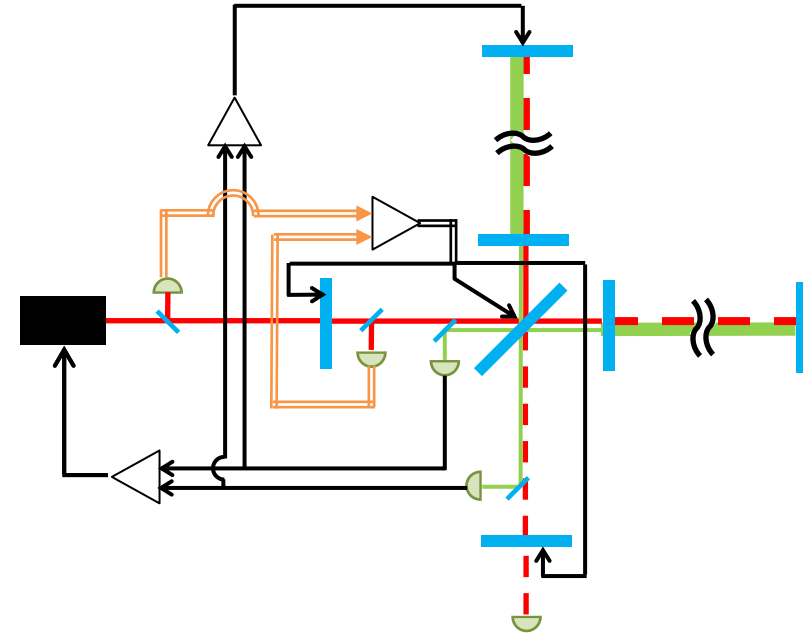
# 引き込み法

◎ 全5自由度の読み出しを

1 (X ARM) + 1 (Y ARM) + 3 (PRC, MI, SRC) に分離。

読み出し      グリーンx2                      メインレーザー

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**の3自由度のロック
3. 腕の自由度も動作点へ
4. 信号の切り替え → 引き込み完了



## 1. イントロダクション

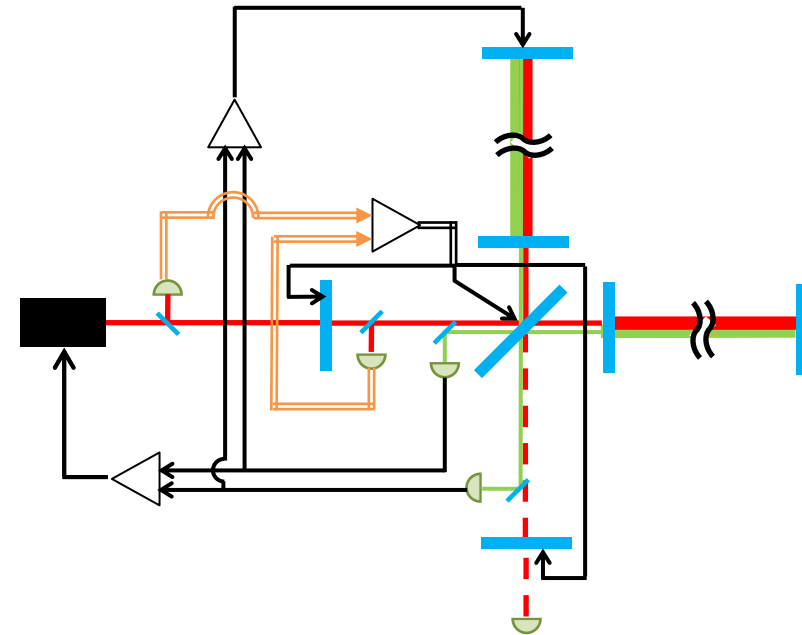
# 引き込み法

◎ 全5自由度の読み出しを

1 (X ARM) + 1 (Y ARM) + 3 (PRC, MI, SRC) に分離。

読み出し      グリーンx2                      メインレーザー

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**の3自由度のロック
3. 腕の自由度も動作点へ
4. 信号の切り替え → 引き込み完了





## 1. イントロダクション

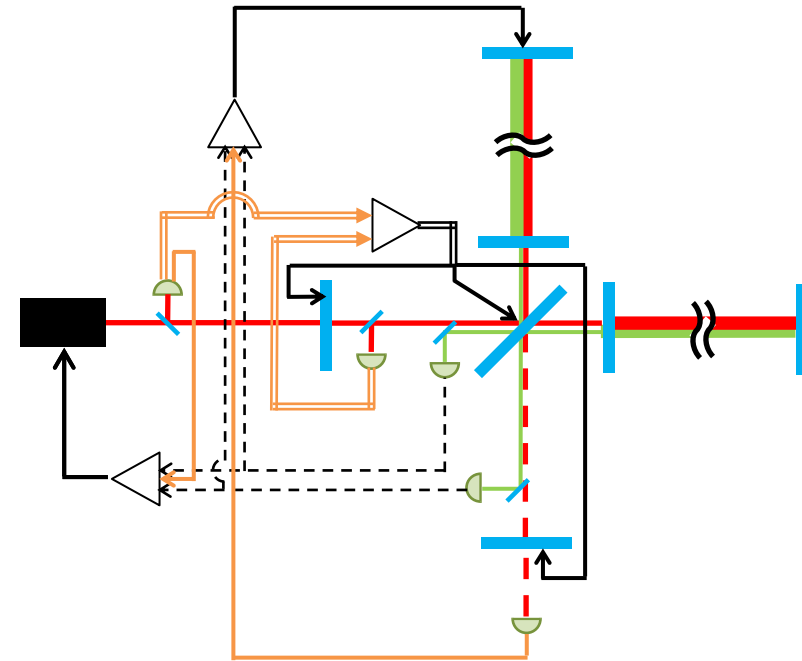
## 引き込み法

◎ 全5自由度の読み出しを

1 (X ARM) + 1 (Y ARM) + 3 (PRC, MI, SRC) に分離。

読み出し      グリーンx2                      メインレーザー

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**の3自由度のロック
3. 腕の自由度も動作点へ
4. 信号の切り替え → 引き込み完了



腕の自由度を安定化することを、

Arm Length Stabilization (ALS)という。

KAGRAではグリーンレーザーを用いたALSを行なっている。

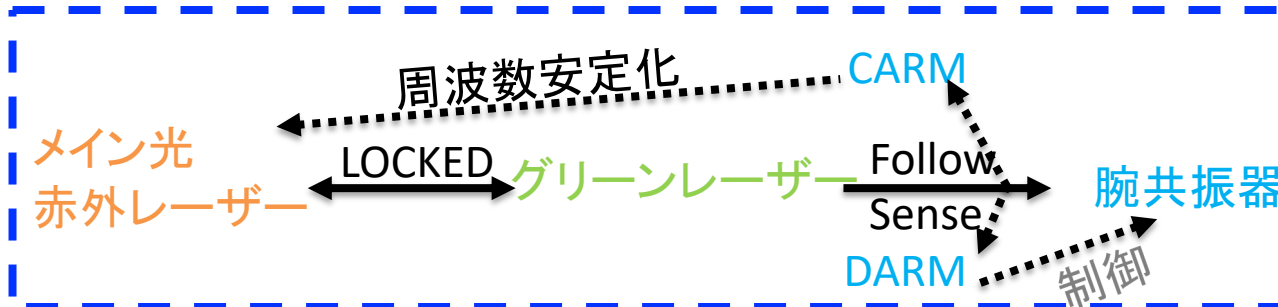
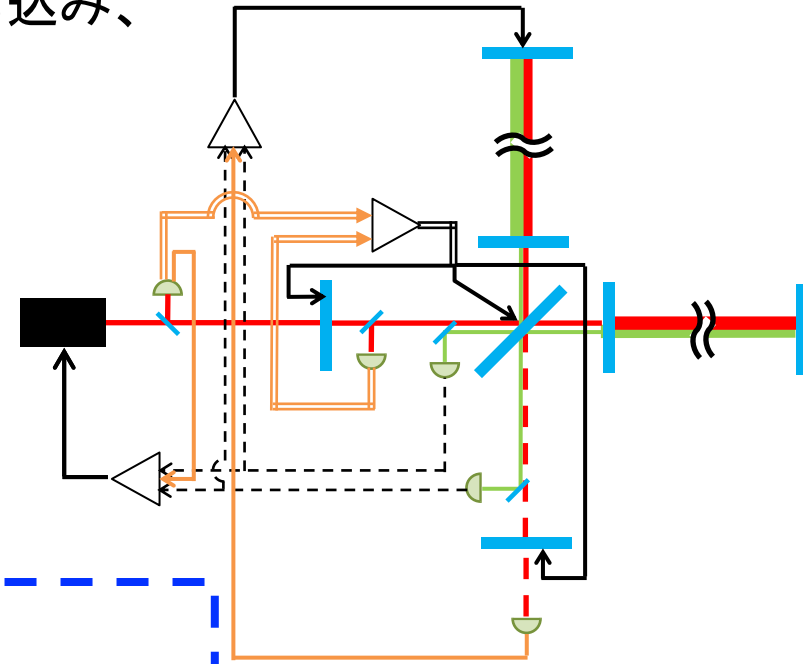
詳細は次の講演 (杉本氏) で扱う。

## 1. イントロダクション

# CARM/DARMの制御

◎ 腕共振器の自由度 (CARM/DARM) の制御・動作点引き込みに注目する

- 2つのグリーンレーザーをそれぞれの腕に打ち込み、  
2つの腕の共振周波数を独立に測る。
- Comm. 自由度 (CARM) 成分は  
メインレーザー周波数に、
- Diff. 自由度 (DARM) 成分は  
テストマス自体にフィードバック
- メインレーザーによるエラー信号の線型域にも  
もっていき、信号を切り替える。



◎ 本講演: 以上のプロセスを実際に行い、

**Fabry-Perot Michelson干渉計 (FPMI) のロック** (動作点引き込み) を達成したことを報告する。

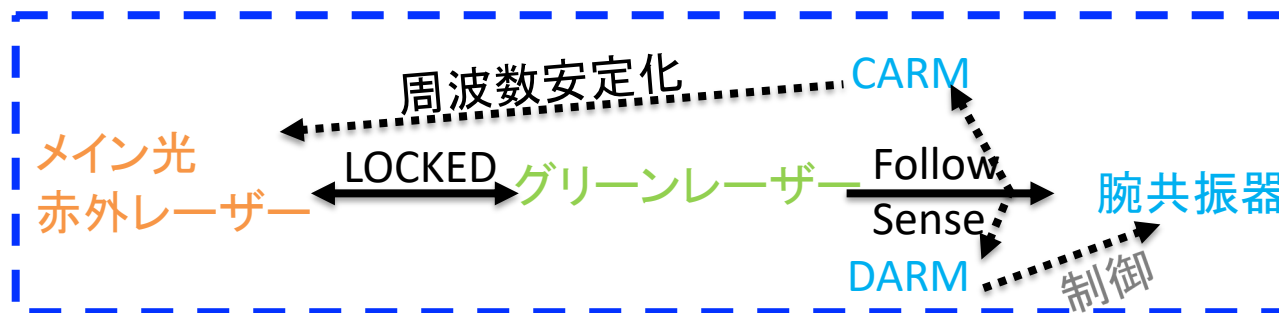
## 2. FPMIのロック

前回の物理学会までにALSによるCARM自由度(メインレーザー周波数)の制御・動作点引き込みは実現・確立された。

FPMIのロックの実現のために越えるべき課題

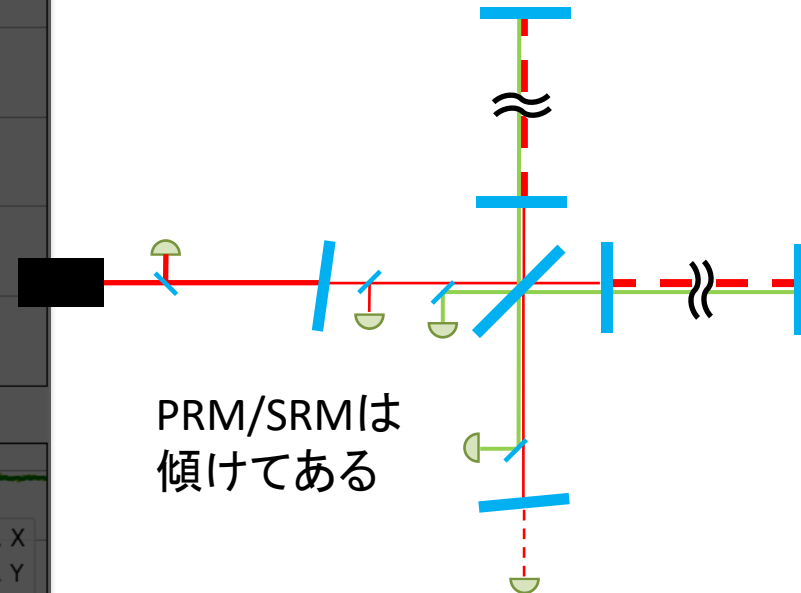
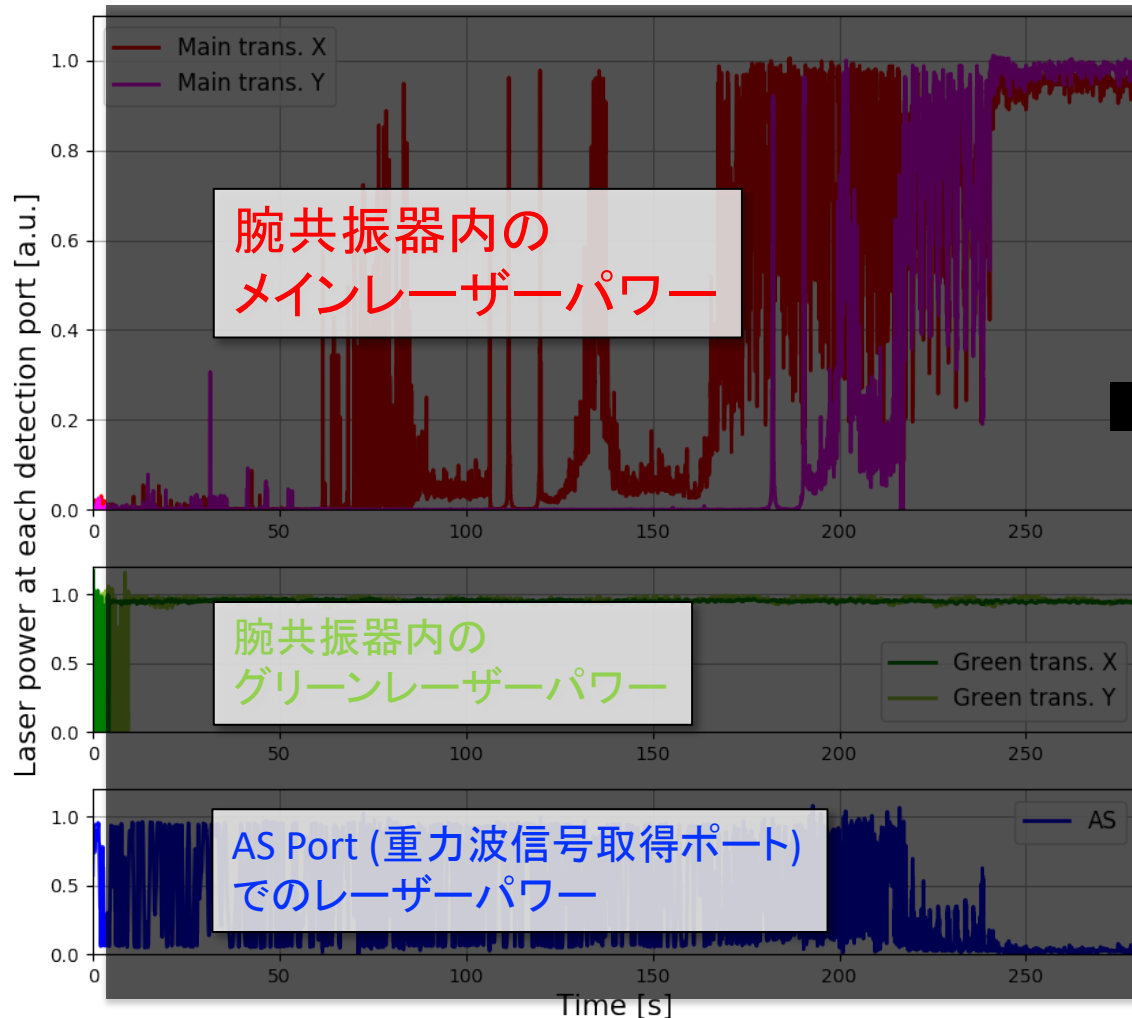
\* DARM自由度のテストマスへのフィードバックによる制御 (mass lock) の実現 → 次ページ

\* 中央部分の干渉計 (MICH) との統合し、ALSによるエラー信号 --> メインレーザーによるエラー信号 の切り替えの方法の確立 → 次々ページ以降



## 2. FPMIのロック

## 動作点引き込み - 実証



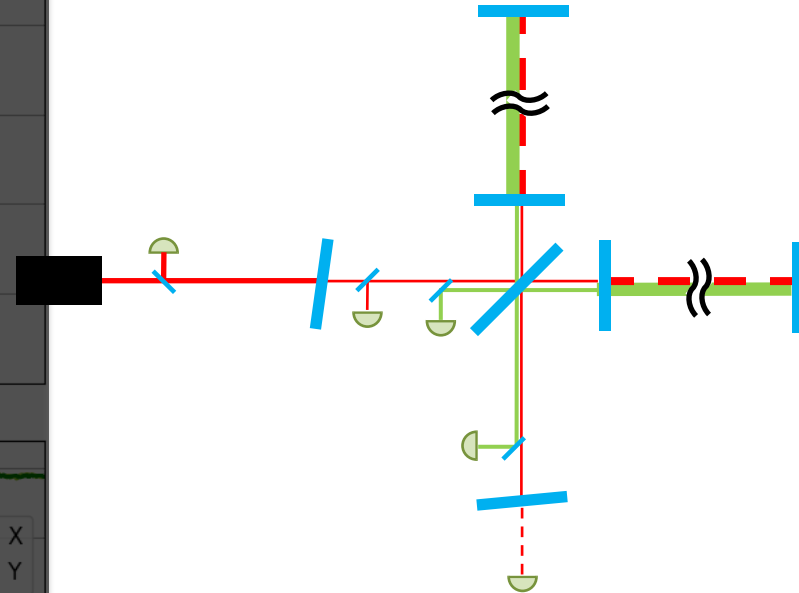
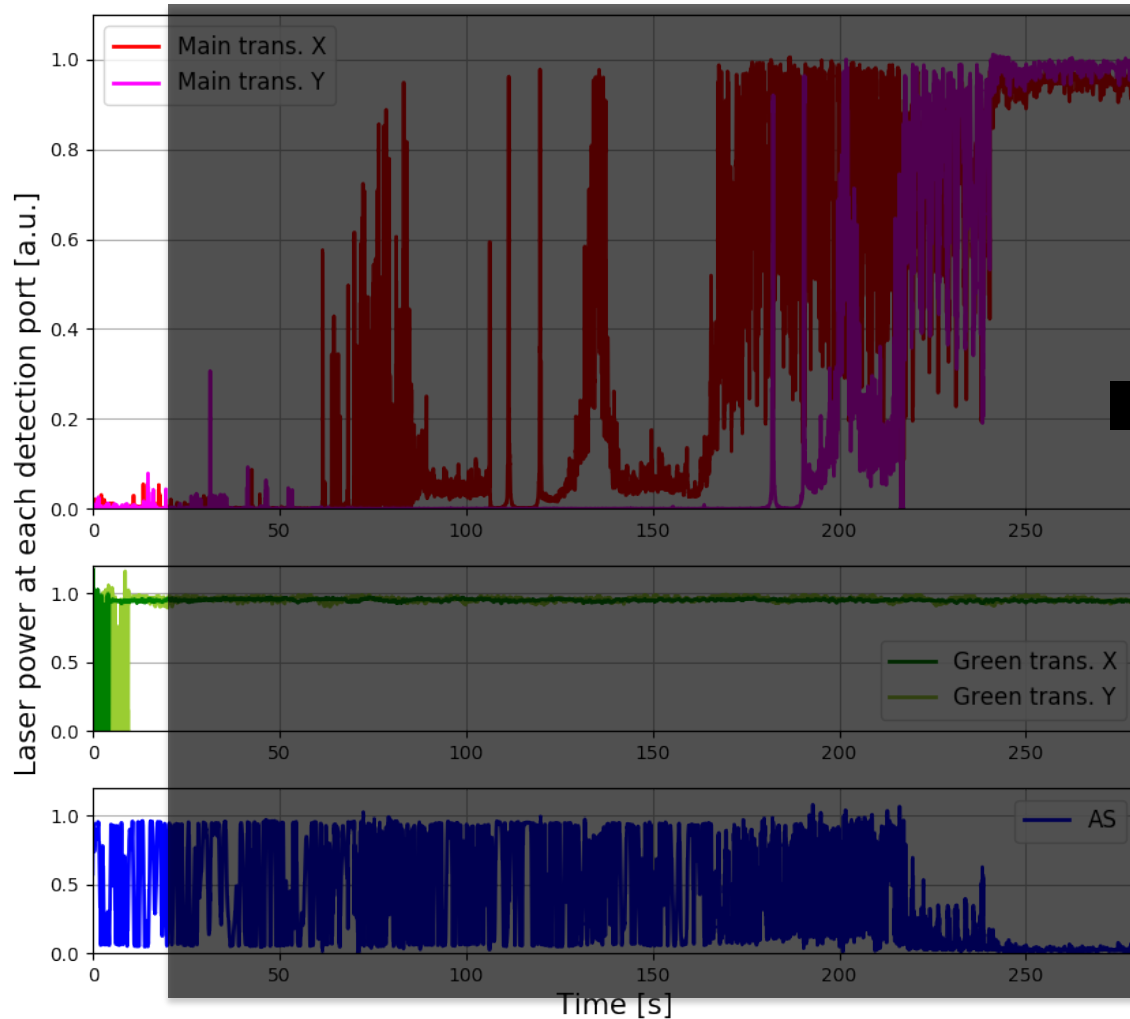
0. 何も動作点にない。

動作点引き込みの時系列



## 2. FPMIのロック

## 動作点引き込み - 実証



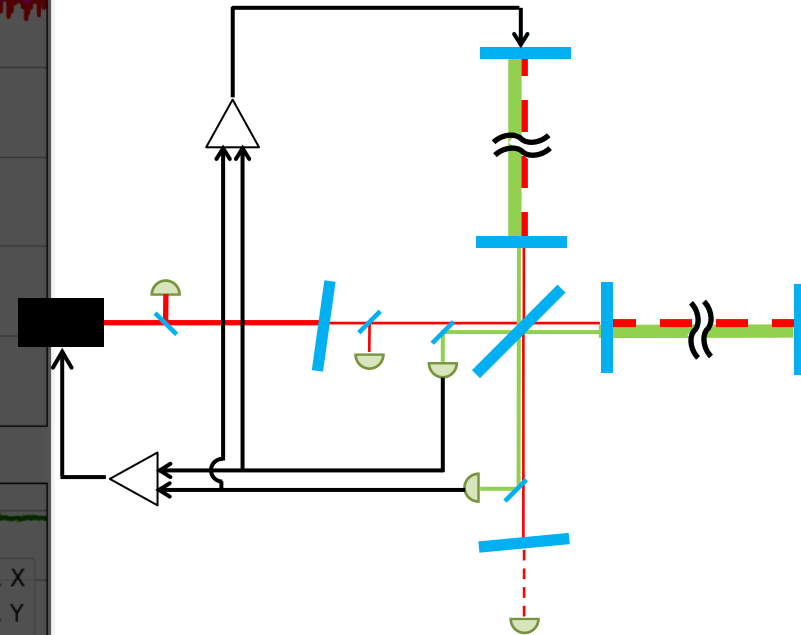
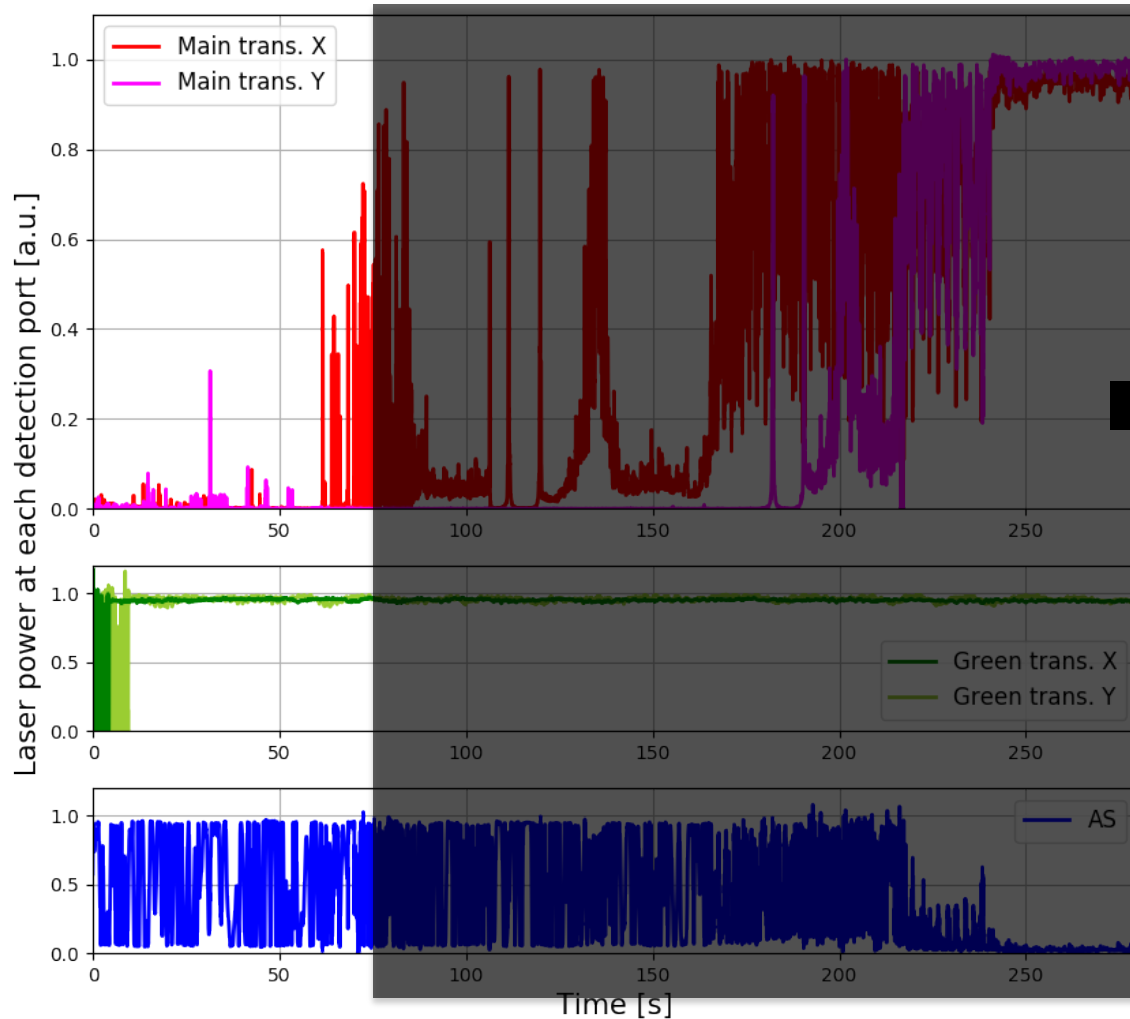
- 0. 何も動作点にない。
- 0. **メインレーザー**は動作点にいない。  
**グリーンレーザー**を腕に追隨させる。

動作点引き込みの時系列



## 2. FPMIのロック

## 動作点引き込み - 実証



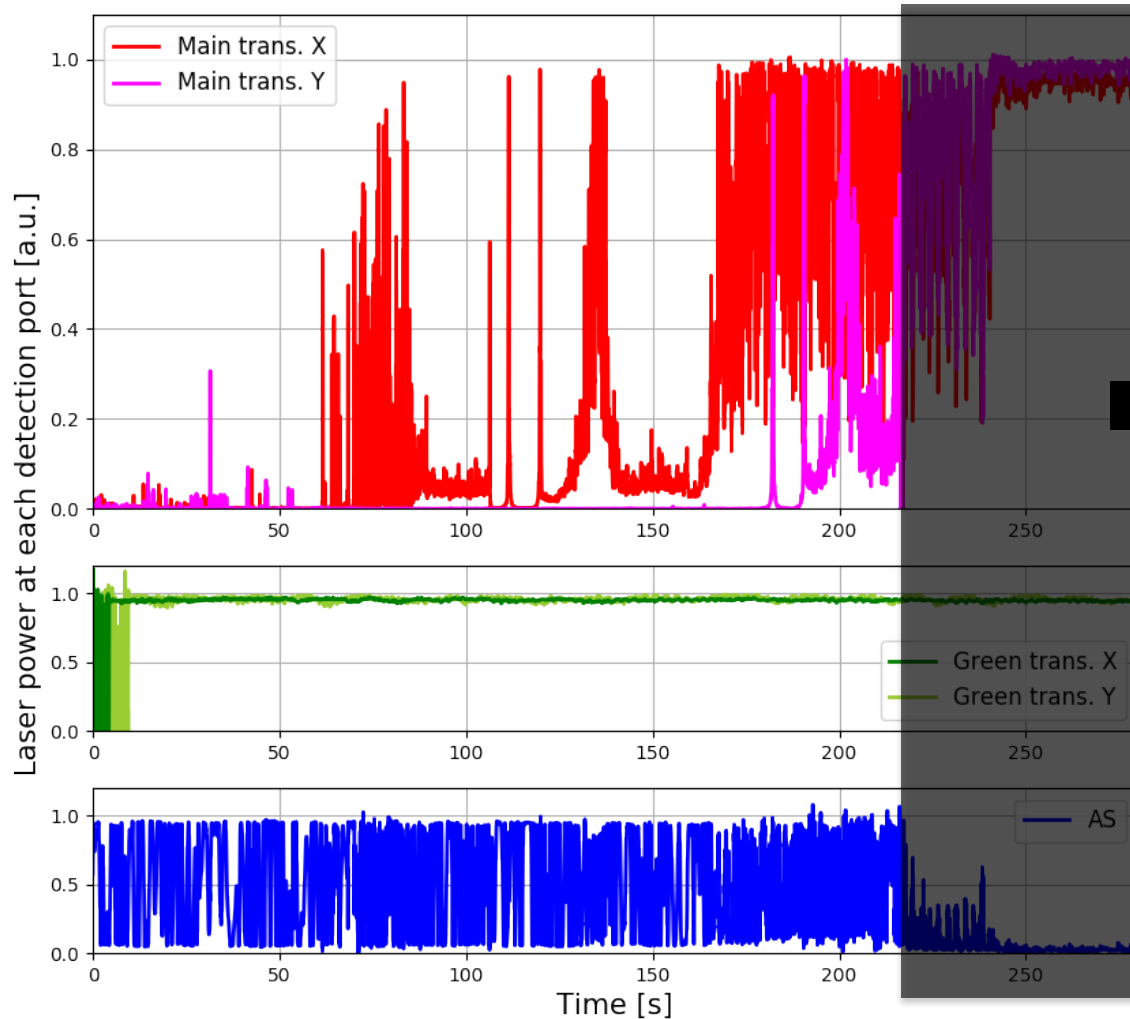
- 0'. 何も動作点にない。
- 0. **メインレーザー**は動作点にいない。  
グリーンレーザーを腕に追従させる。
- 1. **グリーンの信号**で腕の1+1自由度を安定化

動作点引き込みの時系列

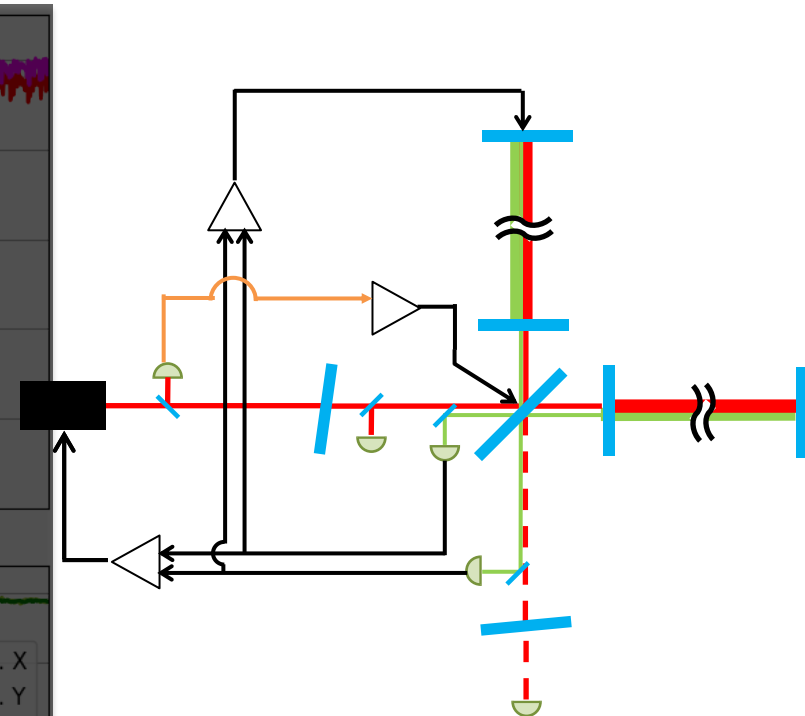


## 2. FPMIのロック

## 動作点引き込み - 実証



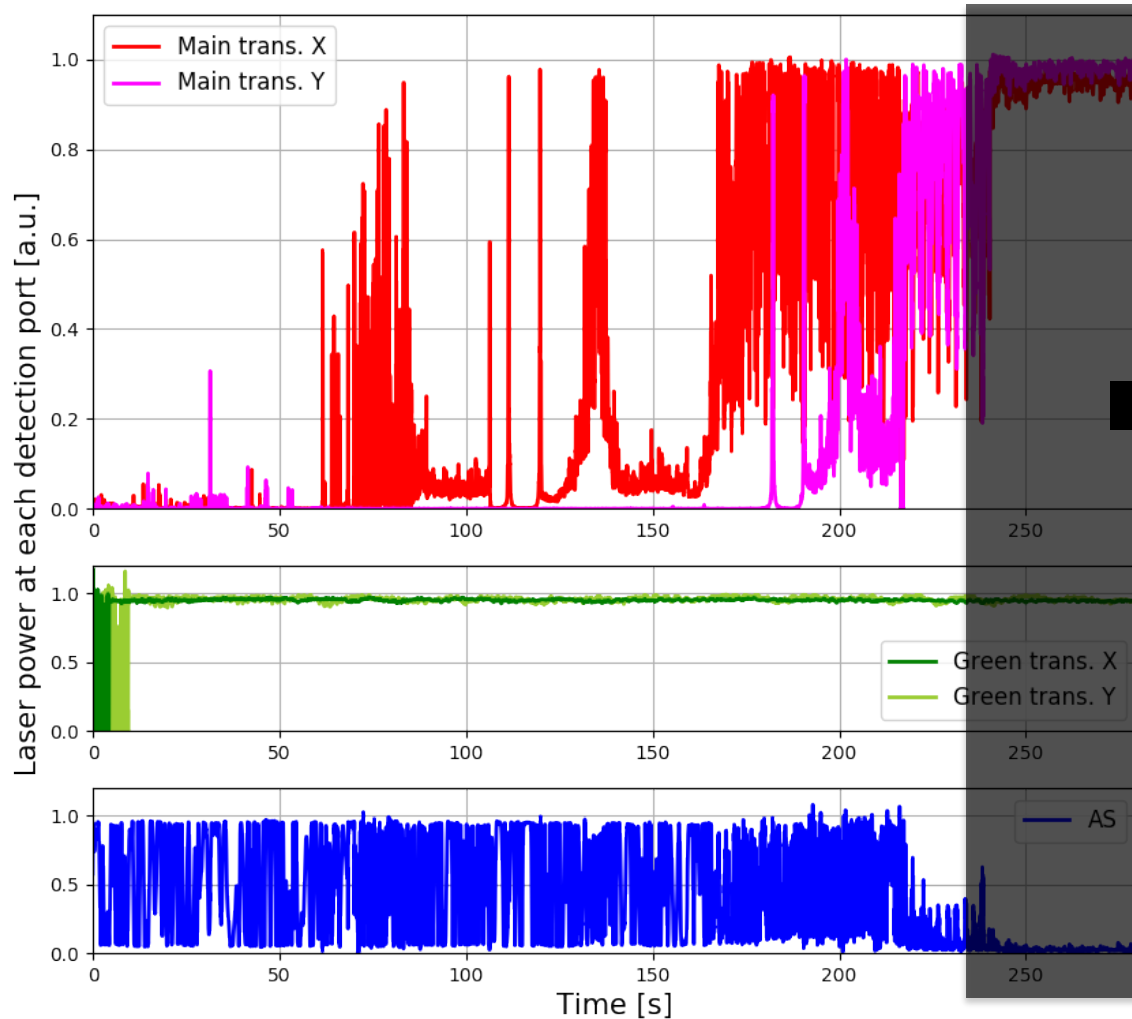
動作点引き込みの時系列



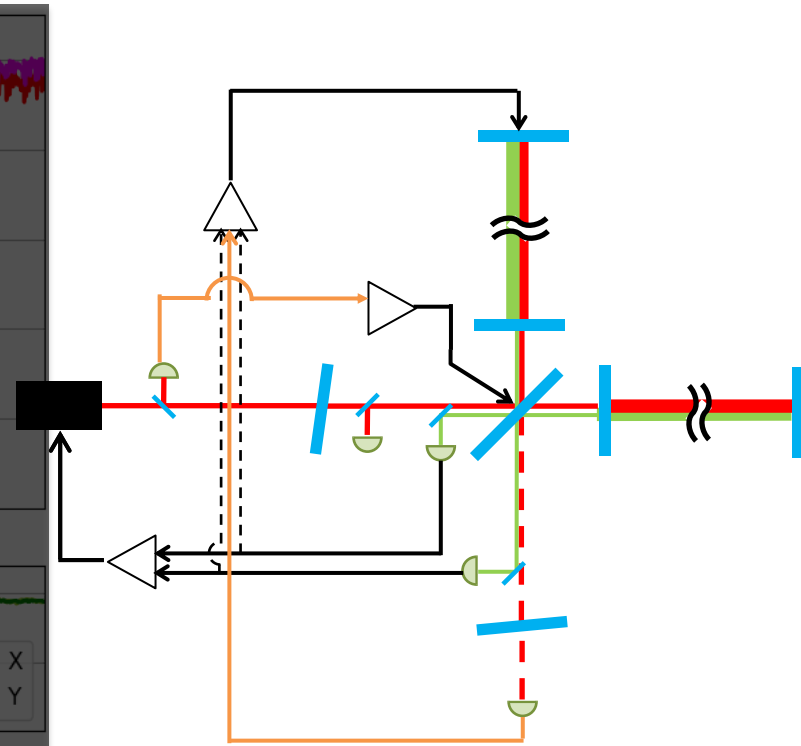
- 0'. 何も動作点にない。
0. **メインレーザー**は動作点にいない。  
グリーンレーザーを腕に追従させる。
1. **グリーンの信号**で腕の1+1自由度を安定化
2. **中央部分 (MICH)のロック**
3. 腕の自由度も動作点へ

## 2. FPMIのロック

## 動作点引き込み - 実証



動作点引き込みの時系列

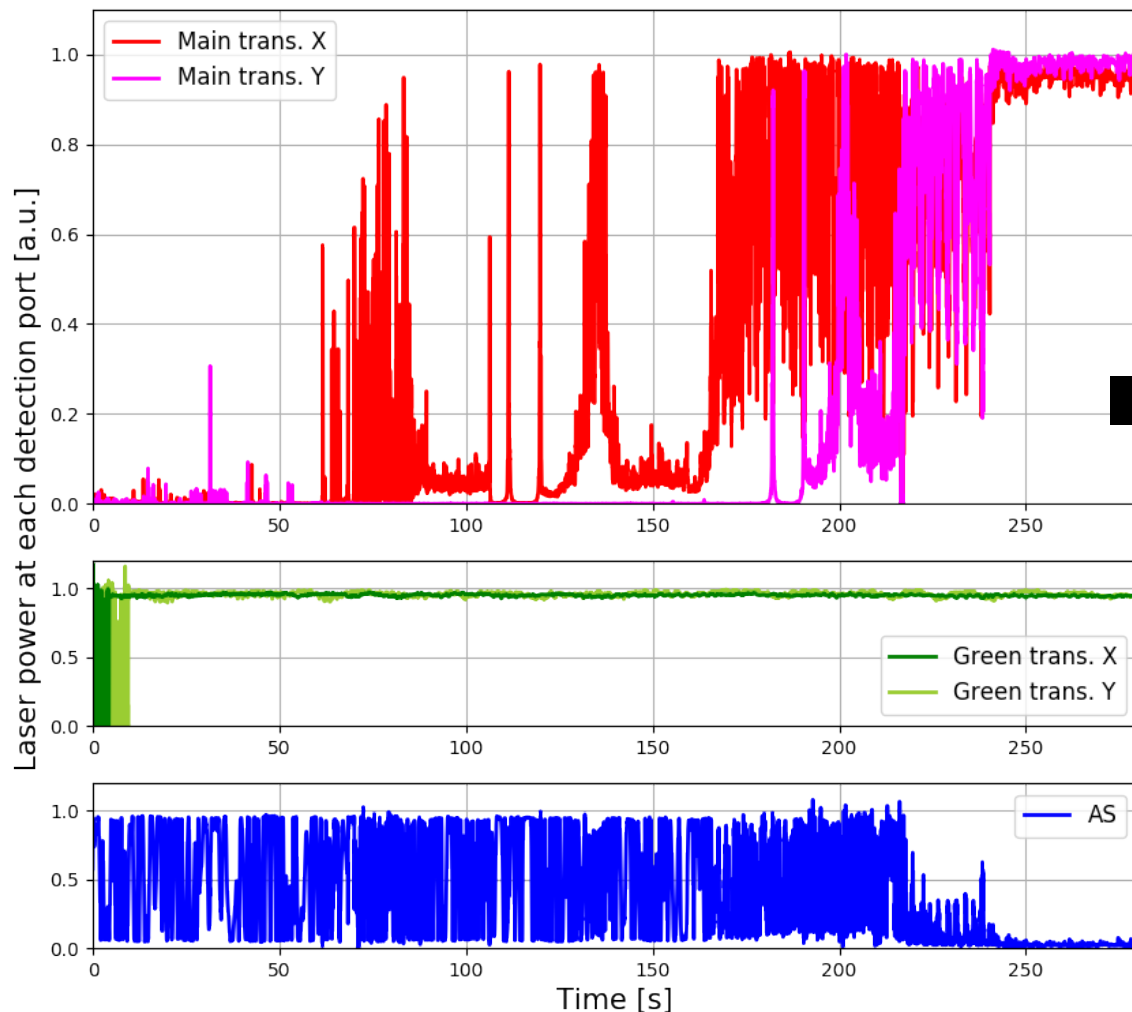


- 0'. 何も動作点にない。
0. **メインレーザー**は動作点にいない。  
グリーンレーザーを腕に追従させる。
1. **グリーンの信号**で腕の1+1自由度を安定化
2. **中央部分 (MICH)のロック**
3. 腕の自由度も動作点へ
4. 信号の切り替え (DARMのみ)

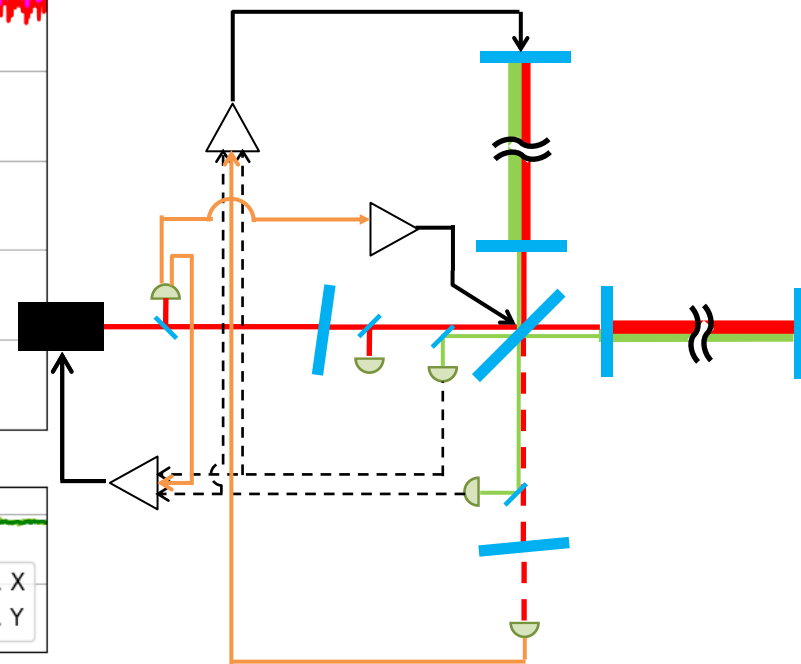


## 2. FPMIのロック

## 動作点引き込み - 実証



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

1. イントロダクション
2. FPMIのロック (動作点引き込み)
3. **まとめ・今後の展望**

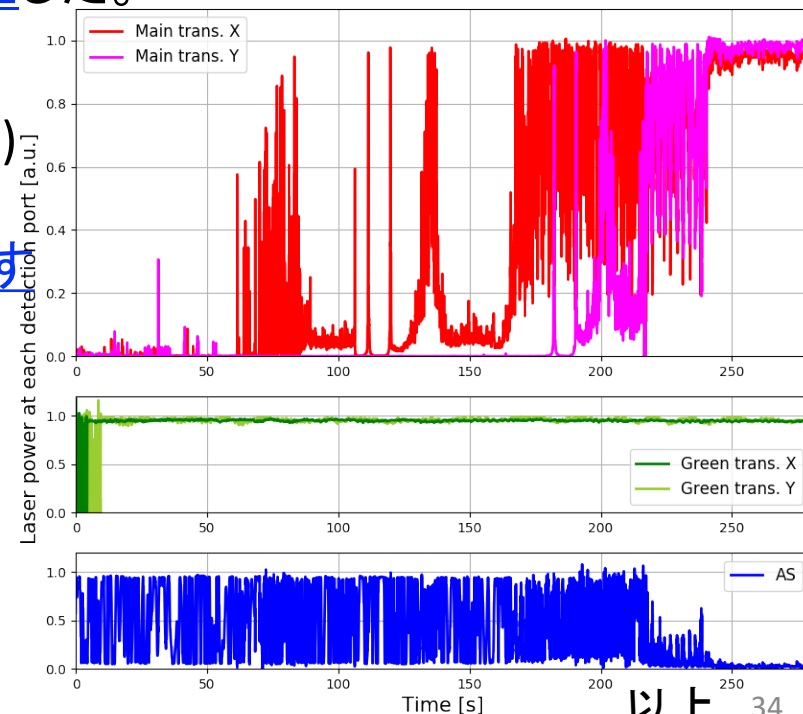
# 3. まとめ・今後の展望

- KAGRAは今年末に観測運転を開始予定。  
 => 干渉計の動作点引き込みが最重要の課題。

- Fabry-Perot Michelson 干渉計の動作点引き込み (Lock) を達成した

意義: 腕共振器のALSによる制御 → 中央部分の動作点引き込み → 統合  
 という動作点引き込みの手順を実証・確立した。

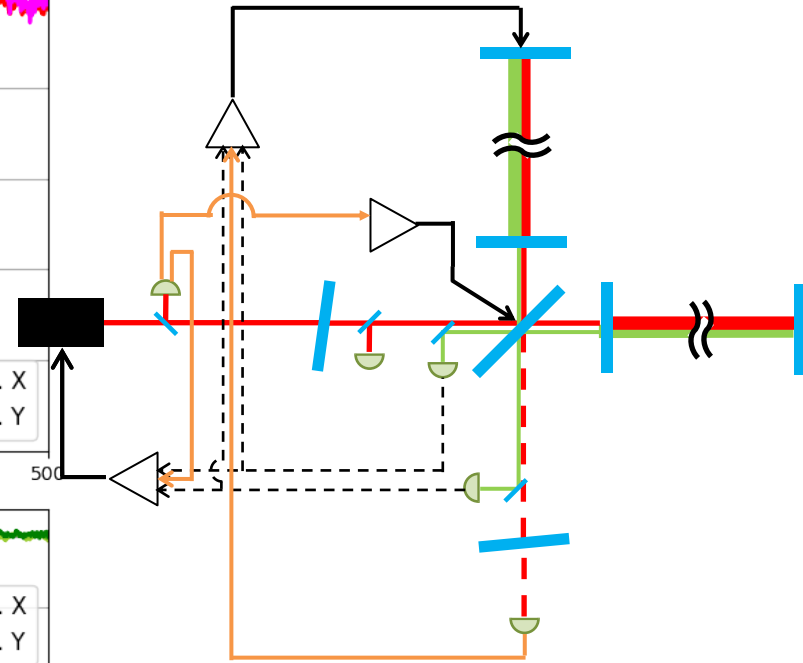
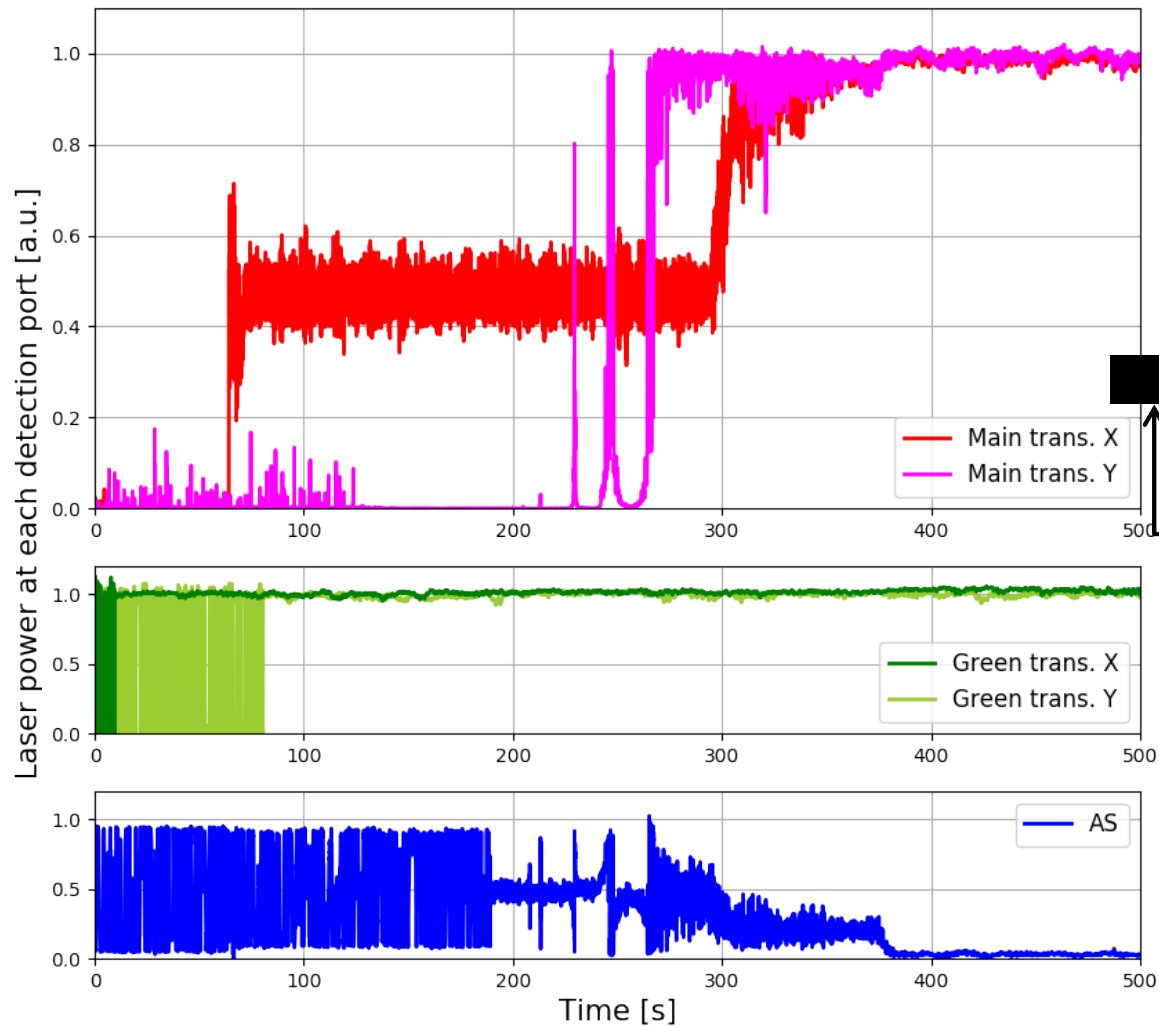
- FPMIでは中央部分の自由度は1自由度 (MICH)  
 → PRCL/SRCL/MICH の3自由度  
 へ拡張し、今後は主干渉計のフルロックを目指す



# APPENDIX

## 2. FPMIのロック

## 透過光ロック



動作点引き込みの時系列

