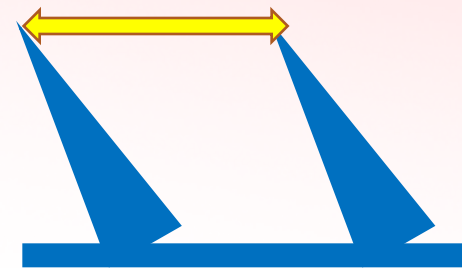
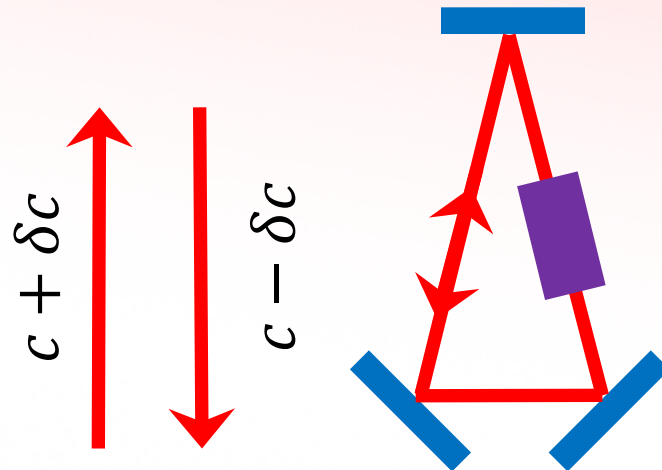


光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証(2)

Tests of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity (2)

武田 紘樹, 酒井 譲, 道村 唯太, 安東 正樹
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

Abstract



モノリシック光学系

- ・ 光リング共振器を用いたLorentz不変性検証(片道光速の異方性)の感度向上
- ・ 先行研究において感度を制限していた回転に起因する雑音低減と雑音評価
 - (1). セミモノリシック光学系、連続回転、信号取得の無線化 (酒井)
→ セミモノリシック、連続回転によるノイズレベルの低下
 - (2). モノリシック光学系製作、同相雑音除去比測定 (武田)
→ モノリシック光学系の設計、光リング共振器温度変調測定

Contents

1. 背景

1.1 光リング共振器

1.2 実験系

1.3 研究計画

2. モノリシック光学系

2.1 アライメント手法

3. 同相雑音除去

3.1 同相雑音除去比測定

3.2 温調による共振器温度変動測定

4. Summary

5. Outlook

1. 背景

【特殊相対性理論】

- ・ 光速度不変の原理 . . . 光速度はLorentz変換のもとで不変なLorentz不変量
 - ・ 特殊相対性原理 . . . 物理法則はLorentz変換のもとで共変
- あらゆる物理学の基礎

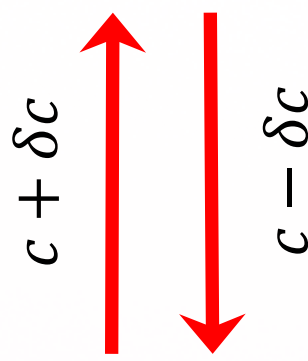
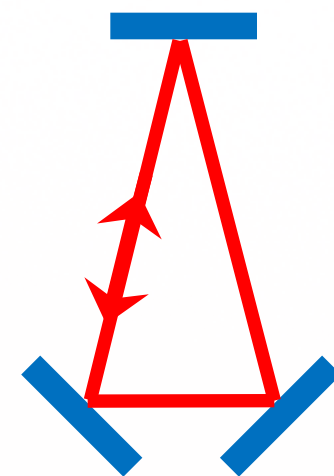
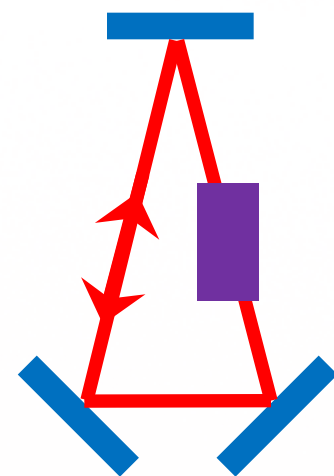
しかし、

量子重力理論の研究、宇宙マイクロ波背景放射の観測[1,2]

- Lorentz不変性の破れの可能性を示唆
- 高精度で実験的にLorentz不変性の検証が必要

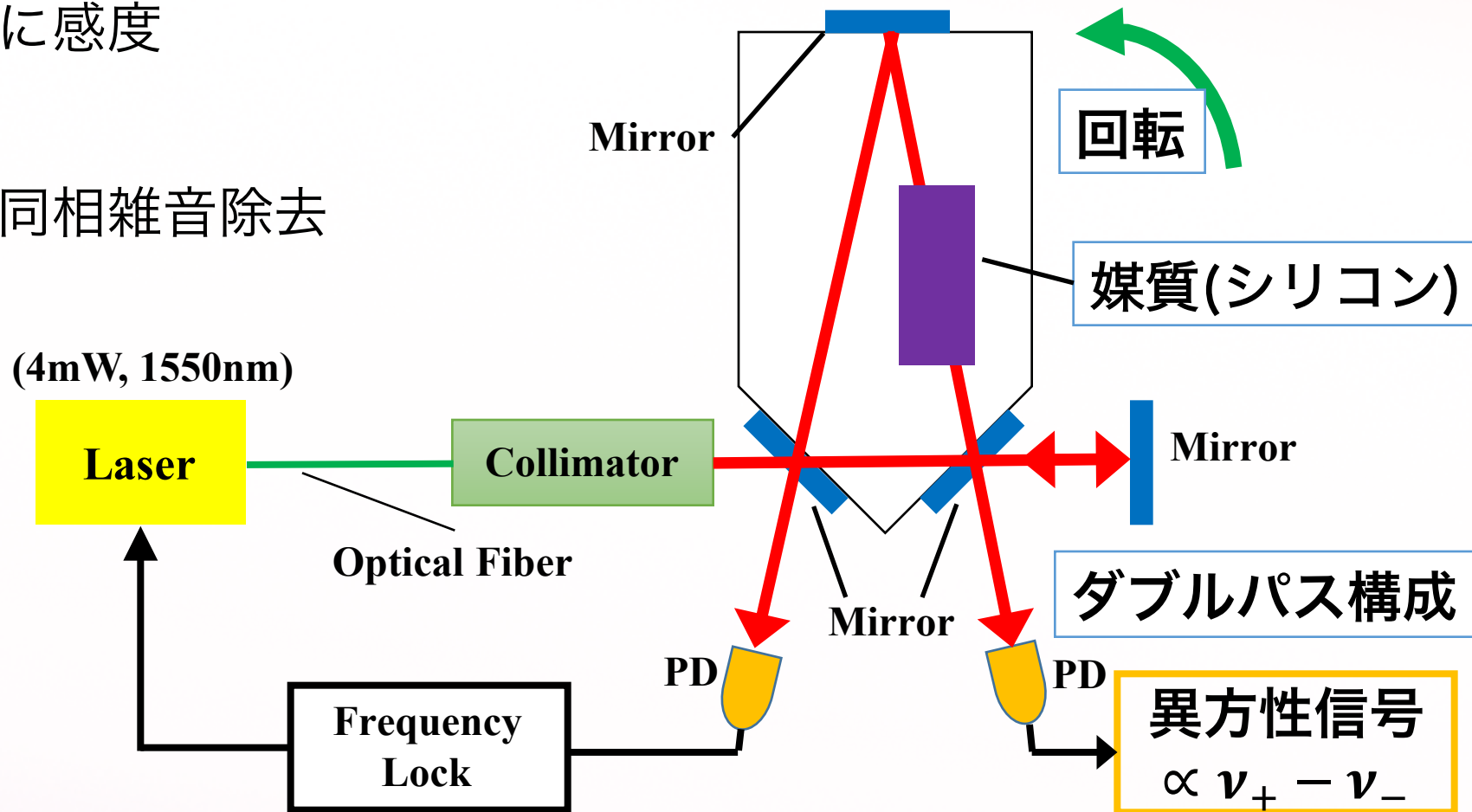
[1] V. A. Kostelecký & S. Samuel, PRD, **39**, 683 (1989). [2] C. H. Lineweaver *et al.* Astrophys. J. **470** (1996) 38.

1.1 光リング共振器

 Lorentz不変性の破れ	 媒質なし	 媒質あり	Lorentz不変性の破れ 光速のずれ ↓ 一周した光に位相差 ↓
共振周波数 右回りν_+, 左回りν_-	$\nu_+ = \nu_0$ $\nu_- = \nu_0$	$\nu_+ = \nu'_0 - \delta\nu$ $\nu_- = \nu'_0 + \delta\nu$	共振する光の周波数にずれ ←

1.2 実験系

- 媒質→片道光速の異方性に感度
- ダブルパス構成
→共振周波数比較、高い同相雑音除去
- 回転→異方性信号を変調



1.3 研究計画

2013
Michimura

- ・ペデスタル光学系
- ・回転台交互回転

$$\frac{\delta c}{c} \lesssim 6 \times 10^{-15}$$

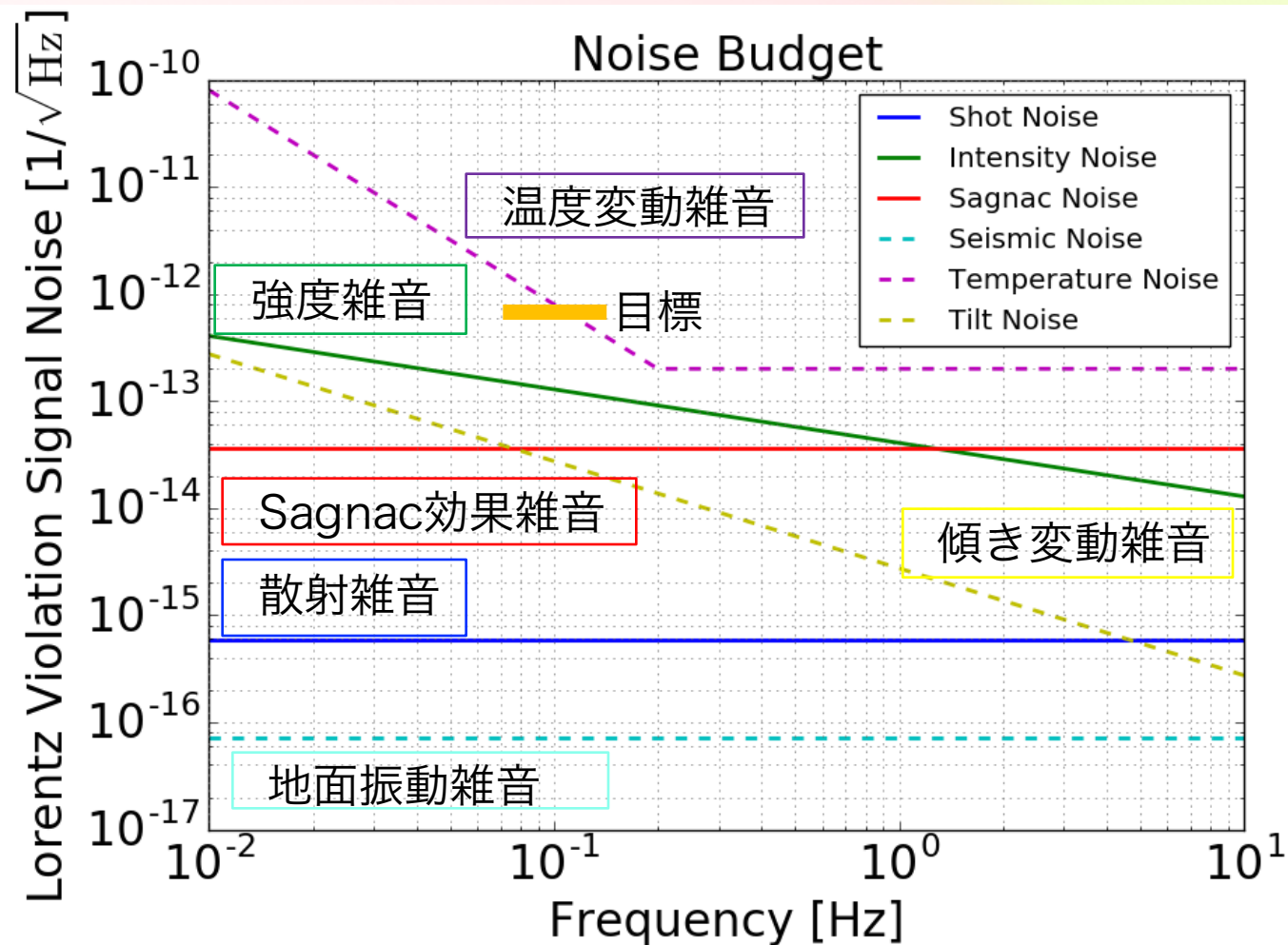
Y. Michimura et al . Phys. Rev. Lett. 110 , 200401 (2013).



2017
Sakai

- ・セミモノリシック光学系
(光軸低い、金属ネジ止め)
- ・回転台連続回転

目標感度 $\frac{\delta c}{c} \lesssim 1 \times 10^{-17}$



要求: 同相雑音除去比 $\frac{1}{100}$ (破線)

① モノリシック光学系の製作 ② 雑音の定量的評価のための同相雑音除去比測定

① モノリシック光学系

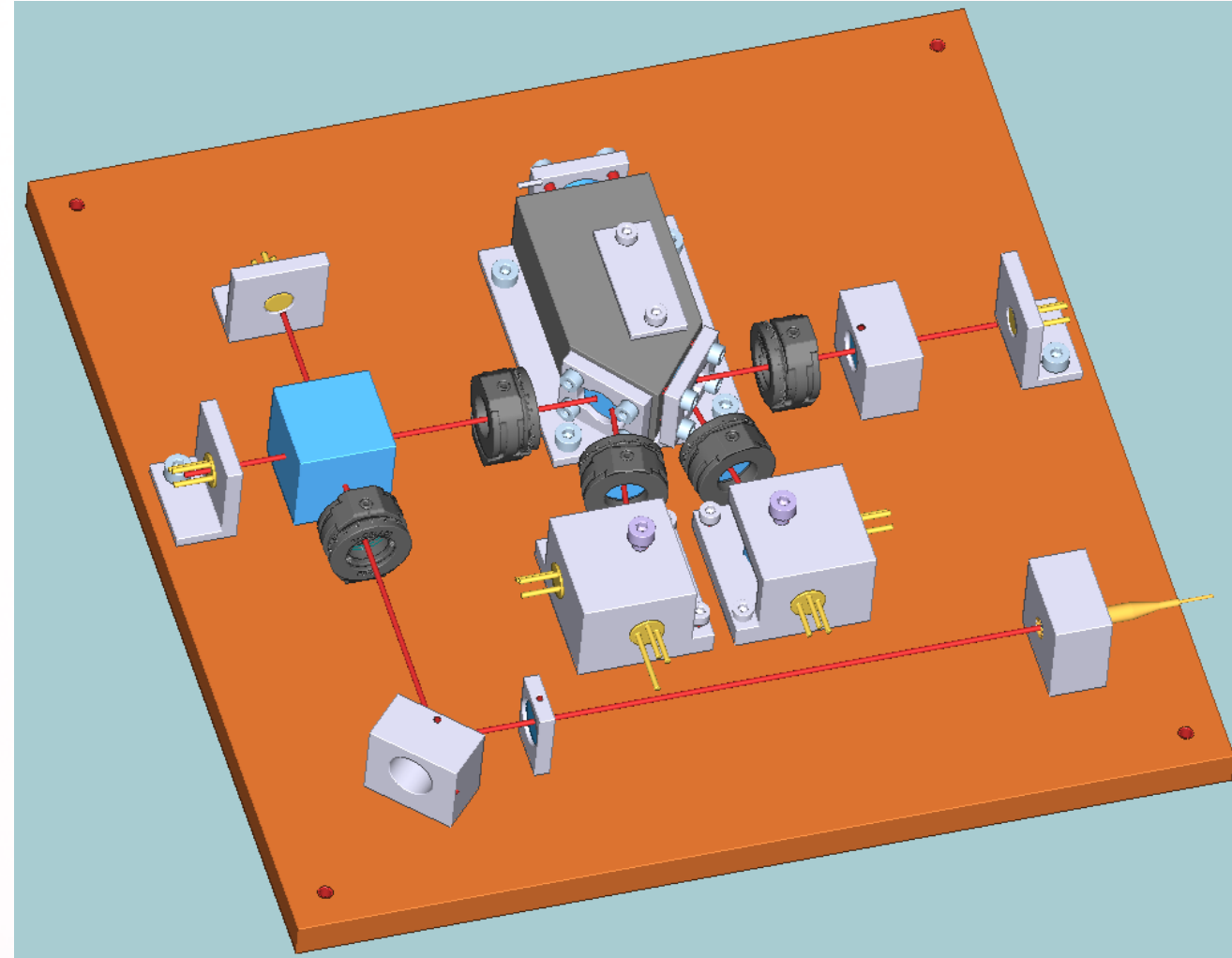
2. モノリシック光学系

- ・モノリシック光学系
土台と光学素子が一体となった光学系
(素子間の相対位置変動を抑制)
→ 高い同相雑音除去、振動感度低減

LIGOやLISA Pathfinderで変位読み取り
光学系として使用

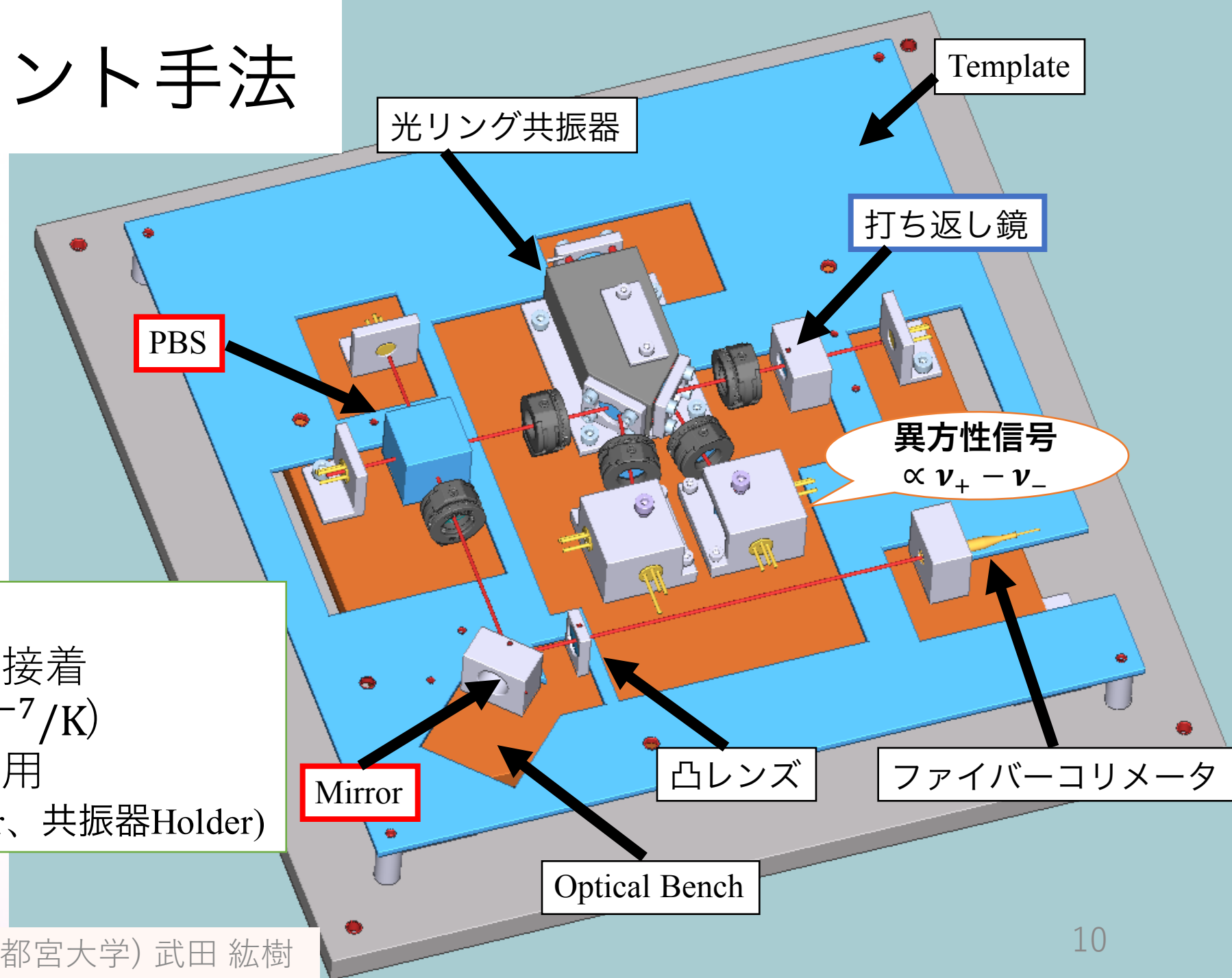
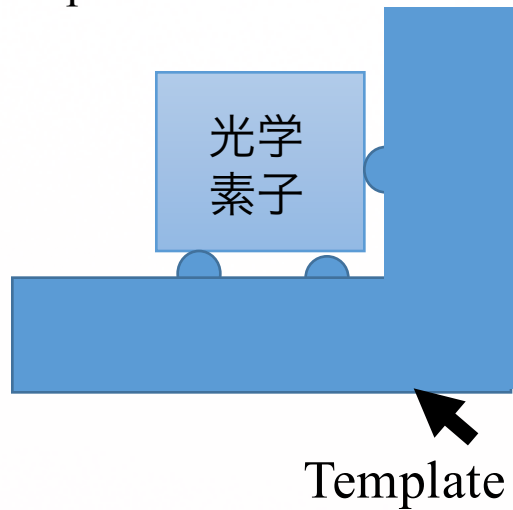
M. Armano *et al.* Phys. Rev. Lett. **116**, 231101 (2016).

アライメント手法を確立する必要



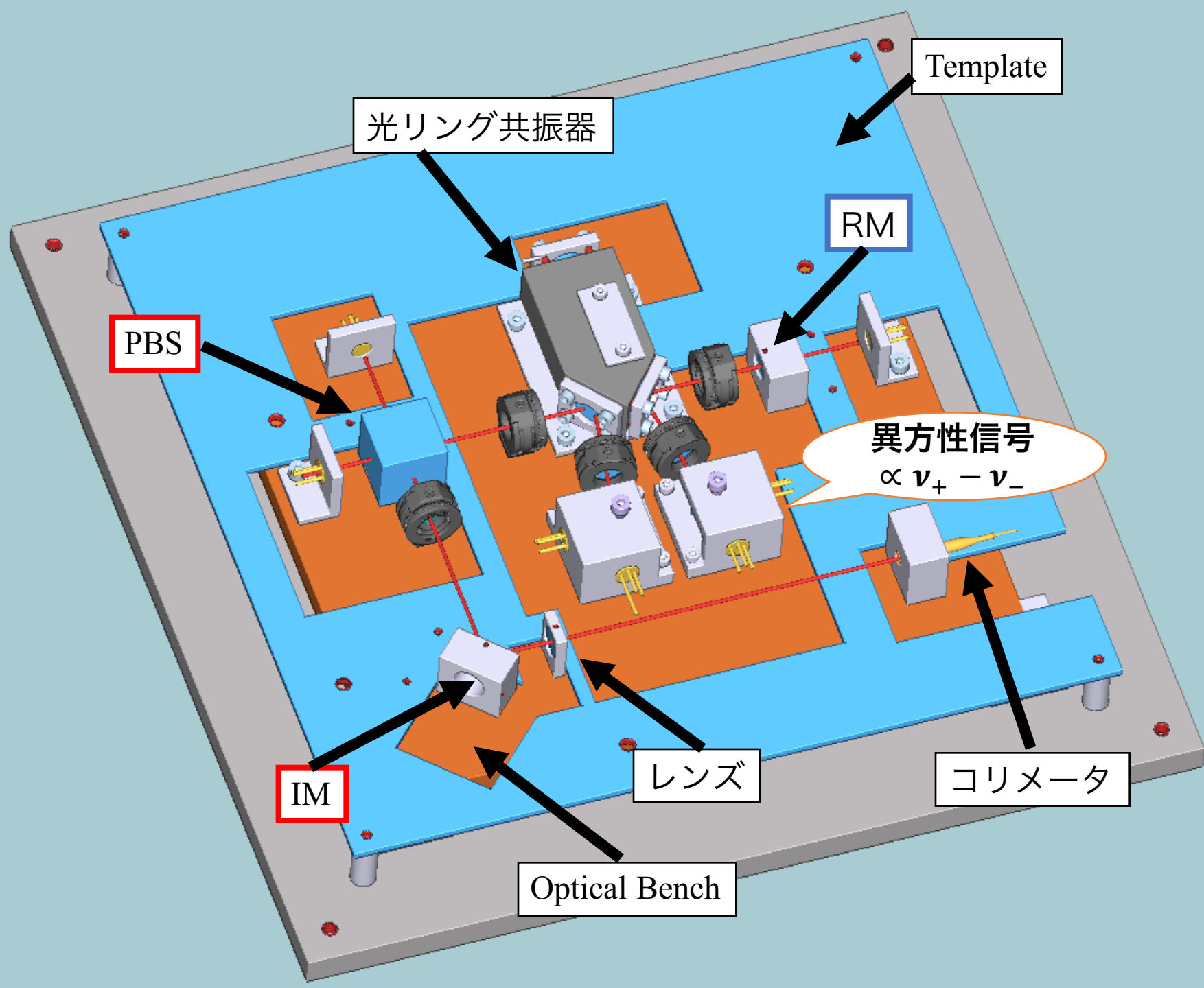
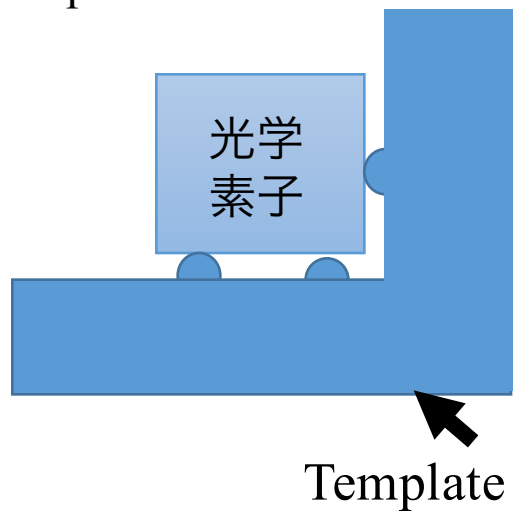
2.1 アライメント手法

Top View



- ・ 三点突起位置指定
- ・ 紫外線硬化樹脂による接着
- ・ 熱膨張の小さい($\alpha \sim 10^{-7}/\text{K}$) スーパーインバーの使用
(Optical bench, Optics Holder、共振器Holder)

Top View



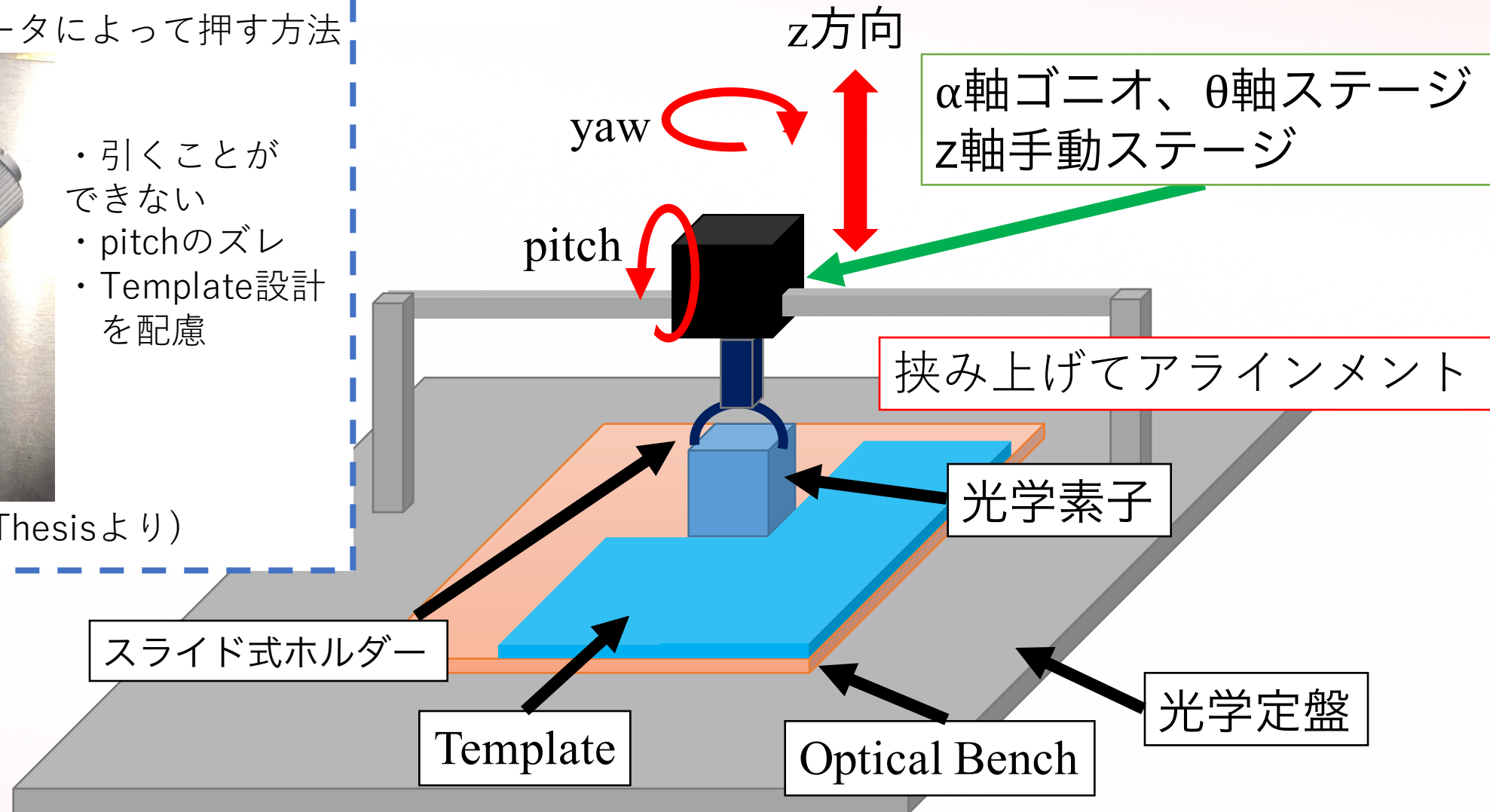
2.1 アライメント手法

先行研究のマイクロメータによって押す方法

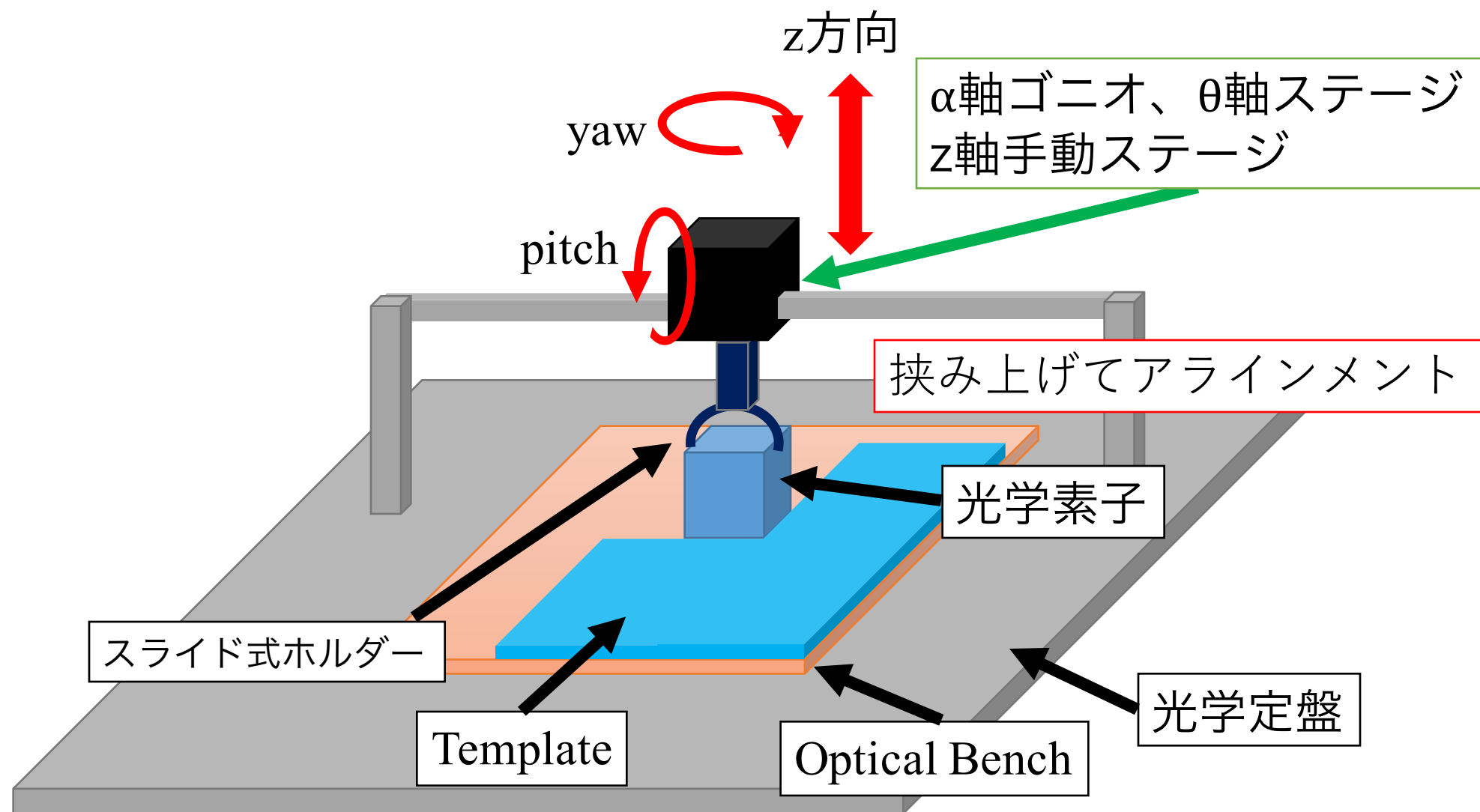


- ・引くことができない
- ・pitchのズレ
- ・Template設計を配慮

(Aritomi(2017)Master Thesisより)



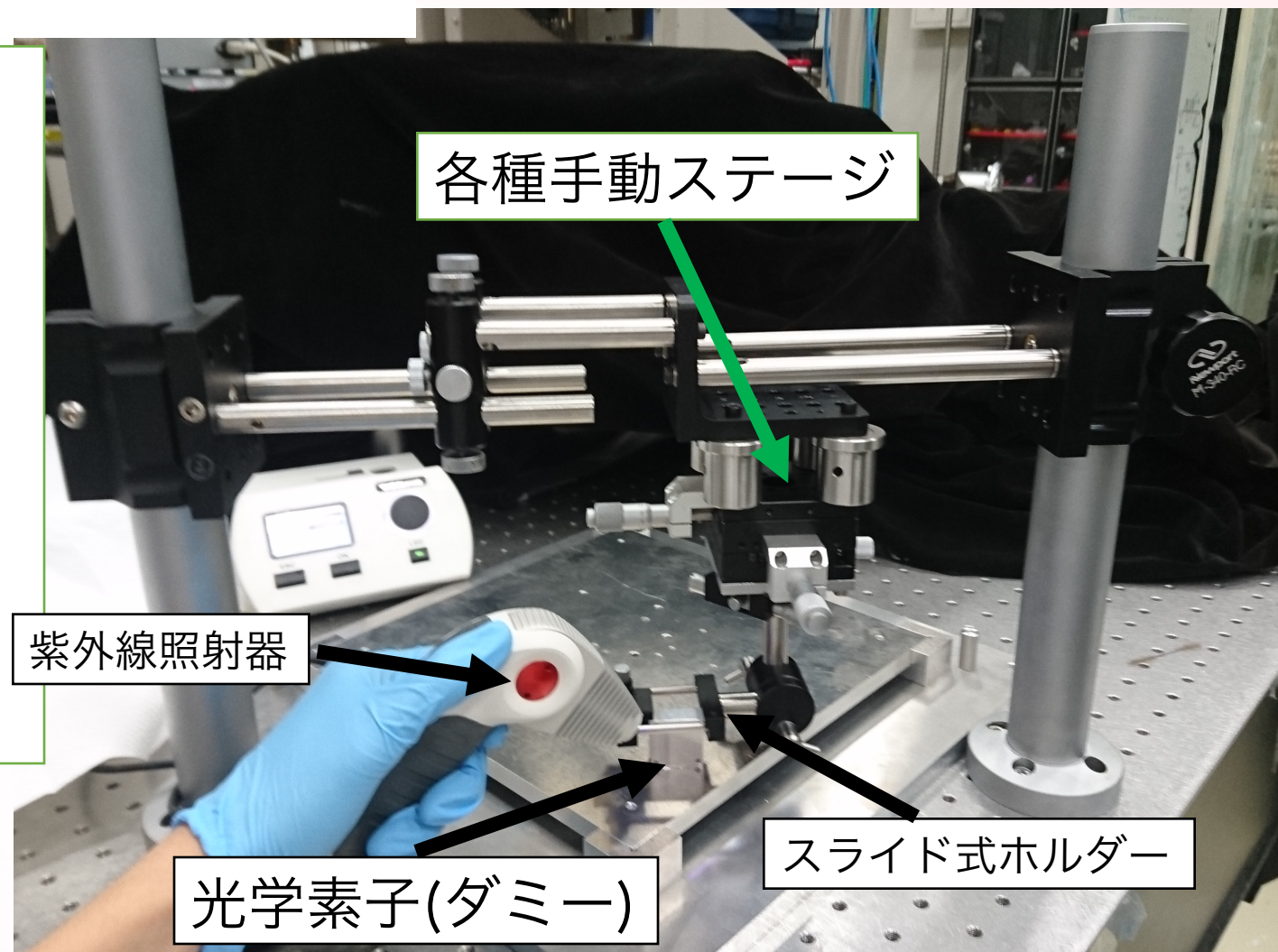
2.1 アライメント手法



2.1 アライメント手法

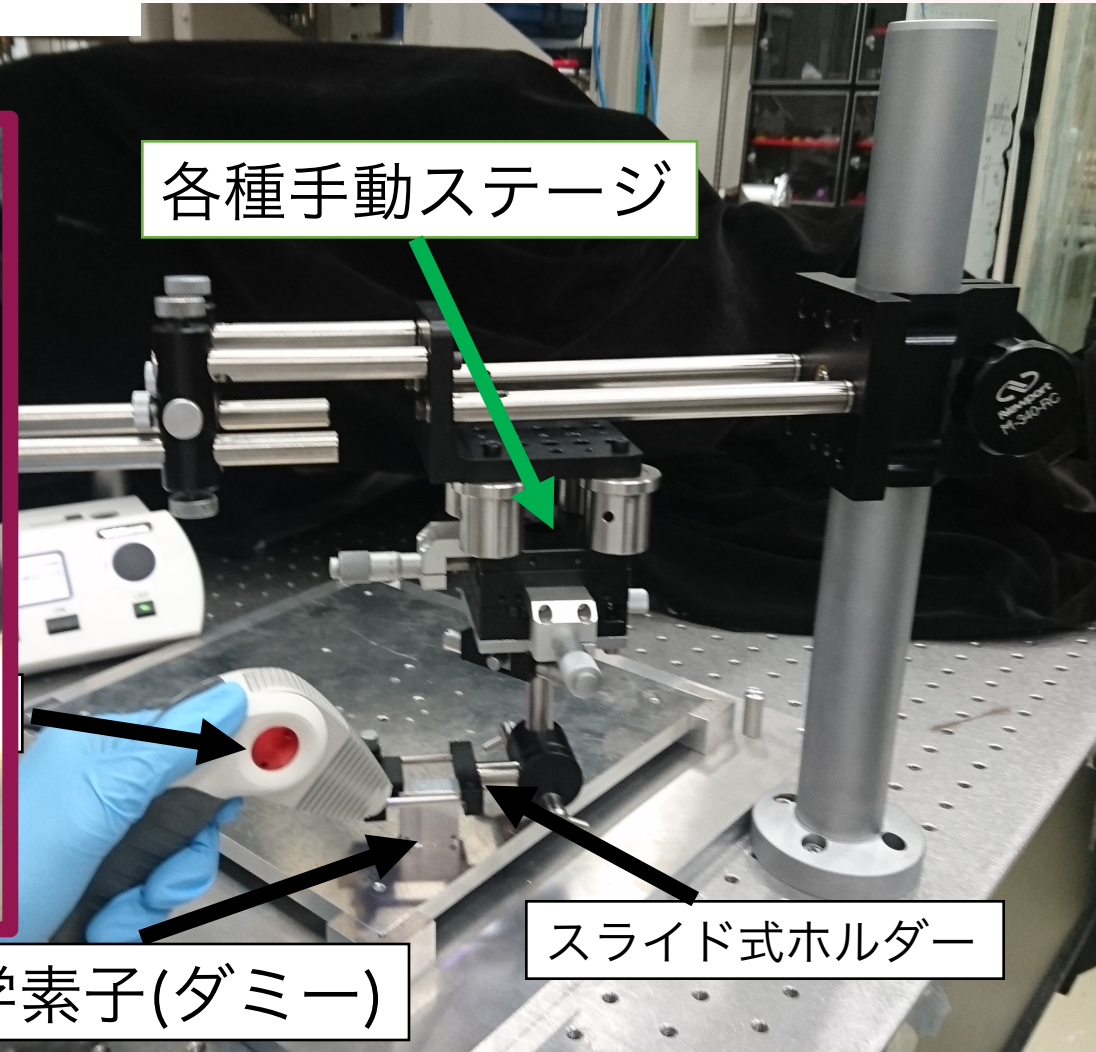
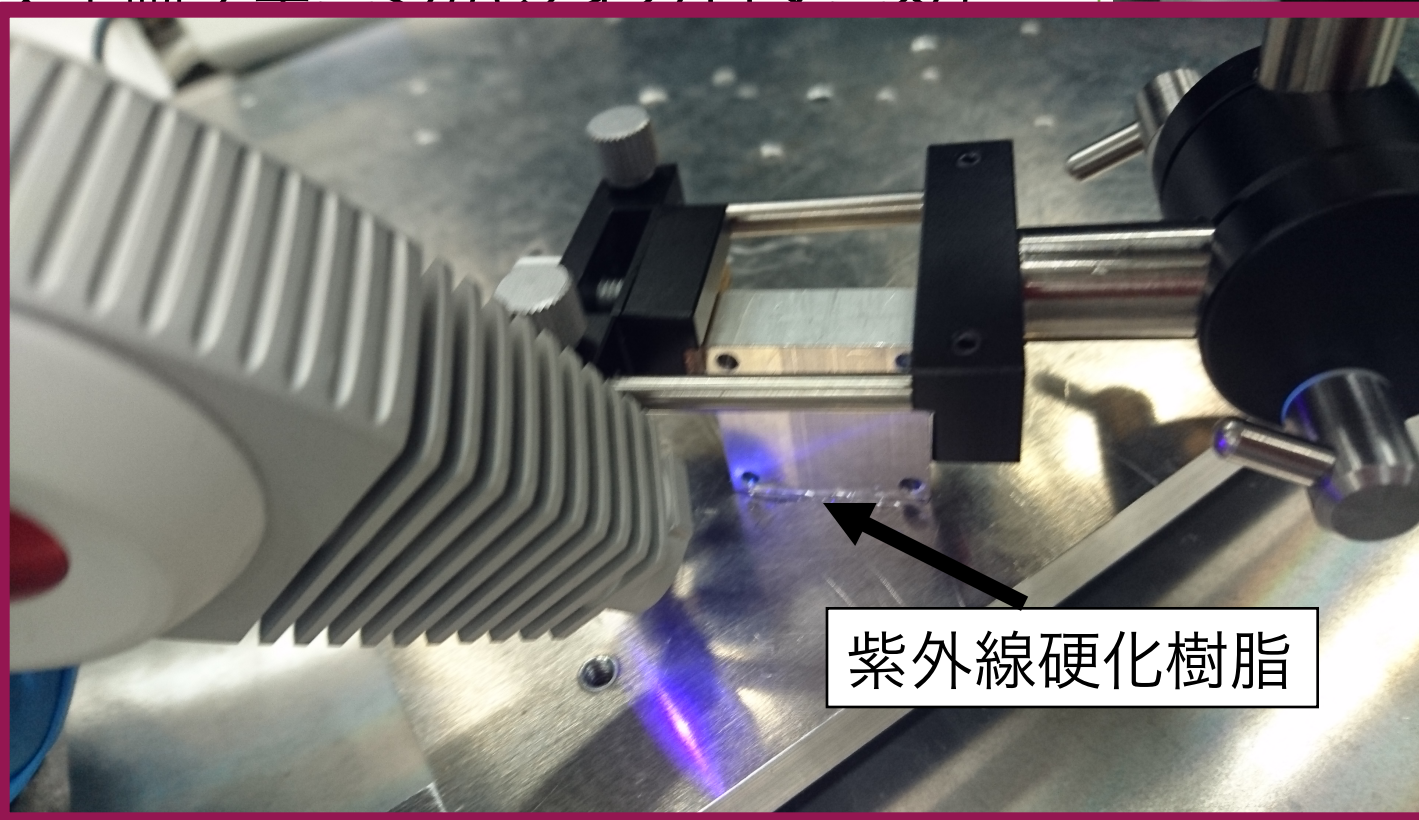
- ・ 手動ステージのマイクロメータによって自由度調節
→ 光学素子を引くことも可能
- ・ 手動ステージの組み合わせ
→ 種々の自由度のアライメントが可能(pitch方向)
- ・ 定盤に固定し上からアライメント
→ Template等と独立に設計、操作

実際にダミーの物体で動作確認→



2.1 アライメント手法

手動ステージのマイクロメータに



実際にダミーの物体で動作確認→

② 同相雑音除去比測定

3. 同相雑音除去

環境変動による共振器長変動に強い

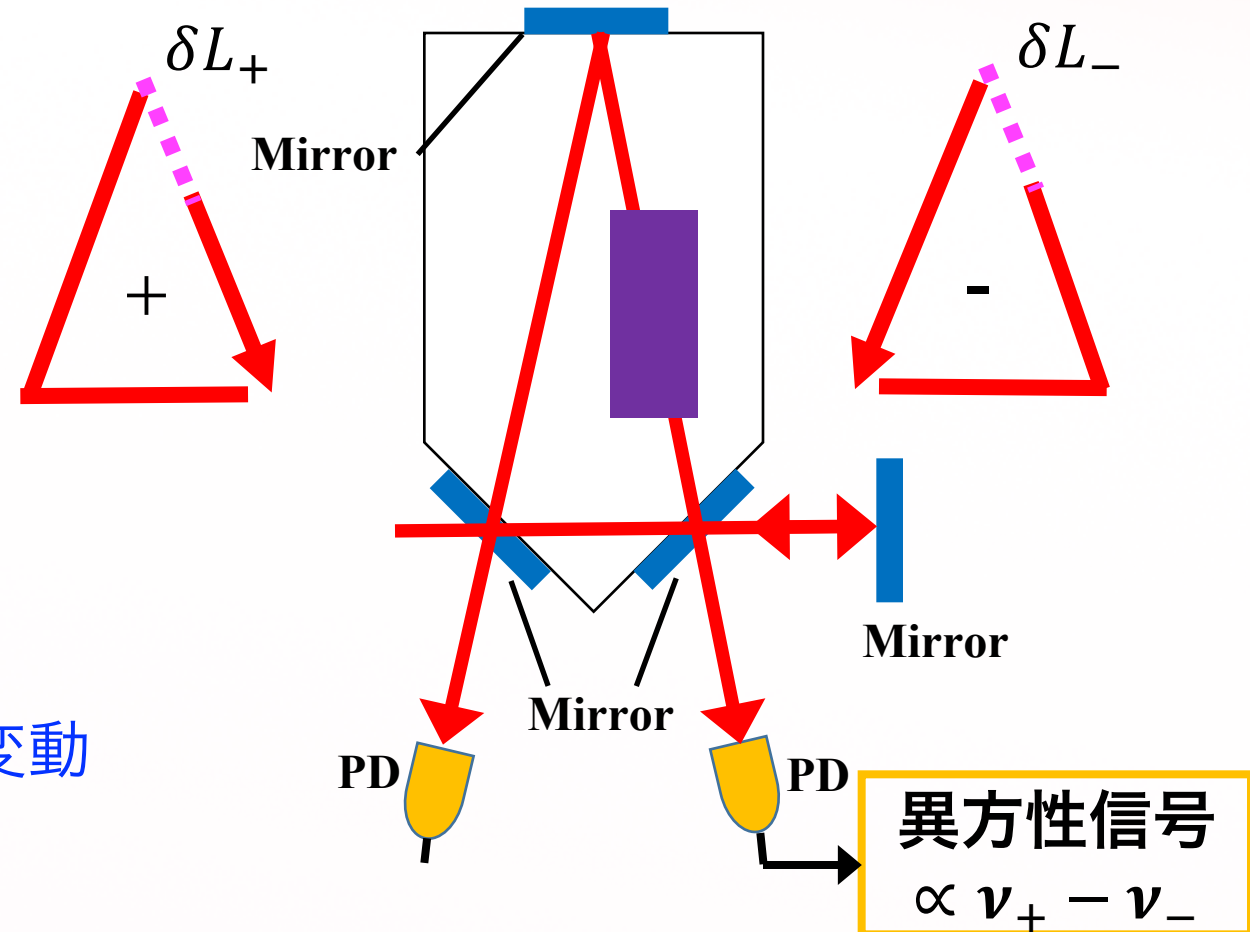
共振器長変動を伴う雑音

- ・ 地面振動雑音
- ・ 温度変動雑音
- ・ 傾き変動
- ・ 遠心力雑音

$$\begin{aligned}\frac{\nu_+ - \nu_-}{\nu} &= \frac{\delta L_+ - \delta L_-}{L + (n-1)d} \\ &= \gamma \frac{\delta L}{L + (n-1)d}\end{aligned}$$

δL 共振器長変動

同相雑音除去比(CMRR)



3.1 同相雑音除去比測定

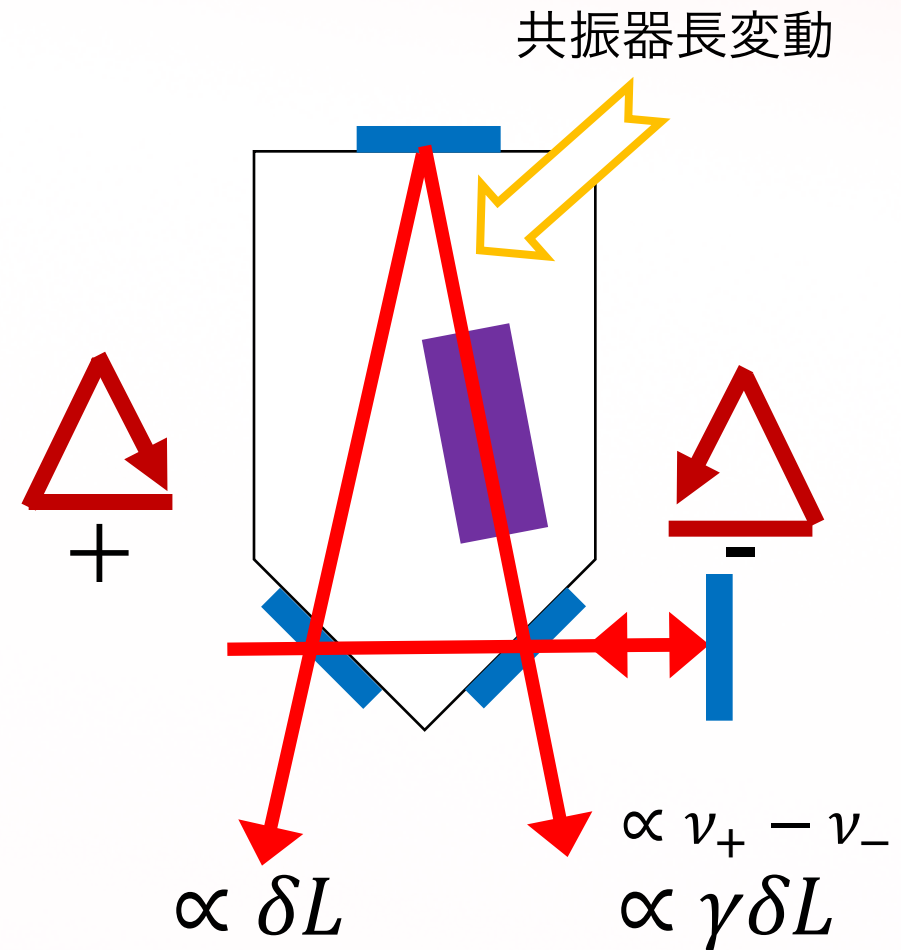
雑音評価にはCMRRの実測が必要(要求: $\gamma = 1/100$)

→共振器長変動に対する外部からの変調が必要

温調をかけて熱膨張によって共振器長変動を誘起

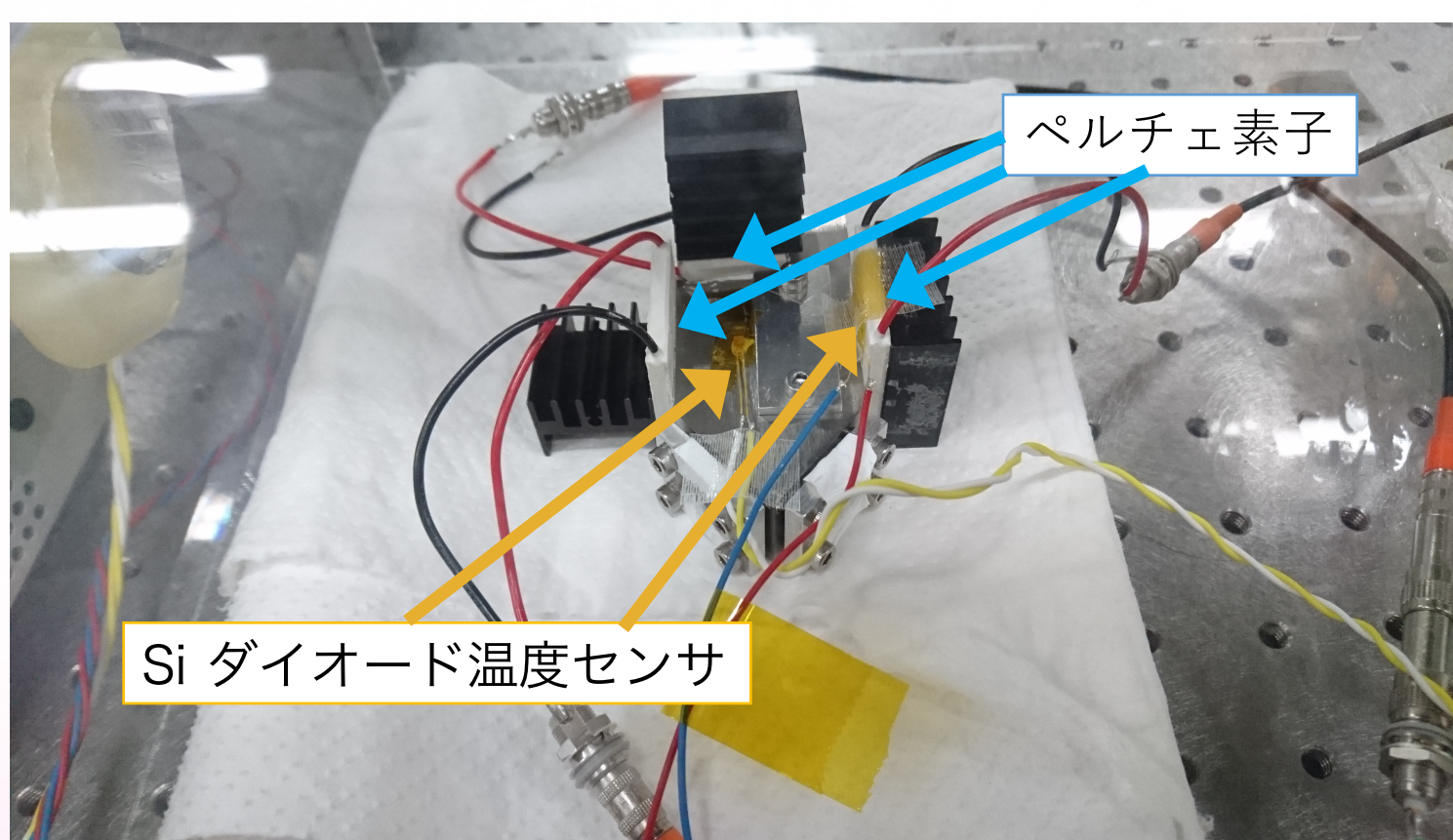
同相雑音除去が効かないエラー信号と
同相雑音除去が効くエラー信号とを比較
→ CMRR測定

$\gamma \lesssim 1/100$ で測定するには $\delta T_{\text{cav}} \geq 10^{-3} [\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}]$ の
温度変動が必要



3.2 温調による共振器温度変動測定

ペルチェ素子の電圧を0.1Hz、10Vppで変動
→適切な温度変動が与えられるか測定



共振器用温度計

ペルチェ素子
モニター用温度計

ペルチェ素子
複数個でできるだけ一様に温調

3.2 温調による共振器温度変動測定

目標温度変動 $\delta T_{\text{cav}} \geq 10^{-3} \text{ [K}/\sqrt{\text{Hz}}]$ を達成

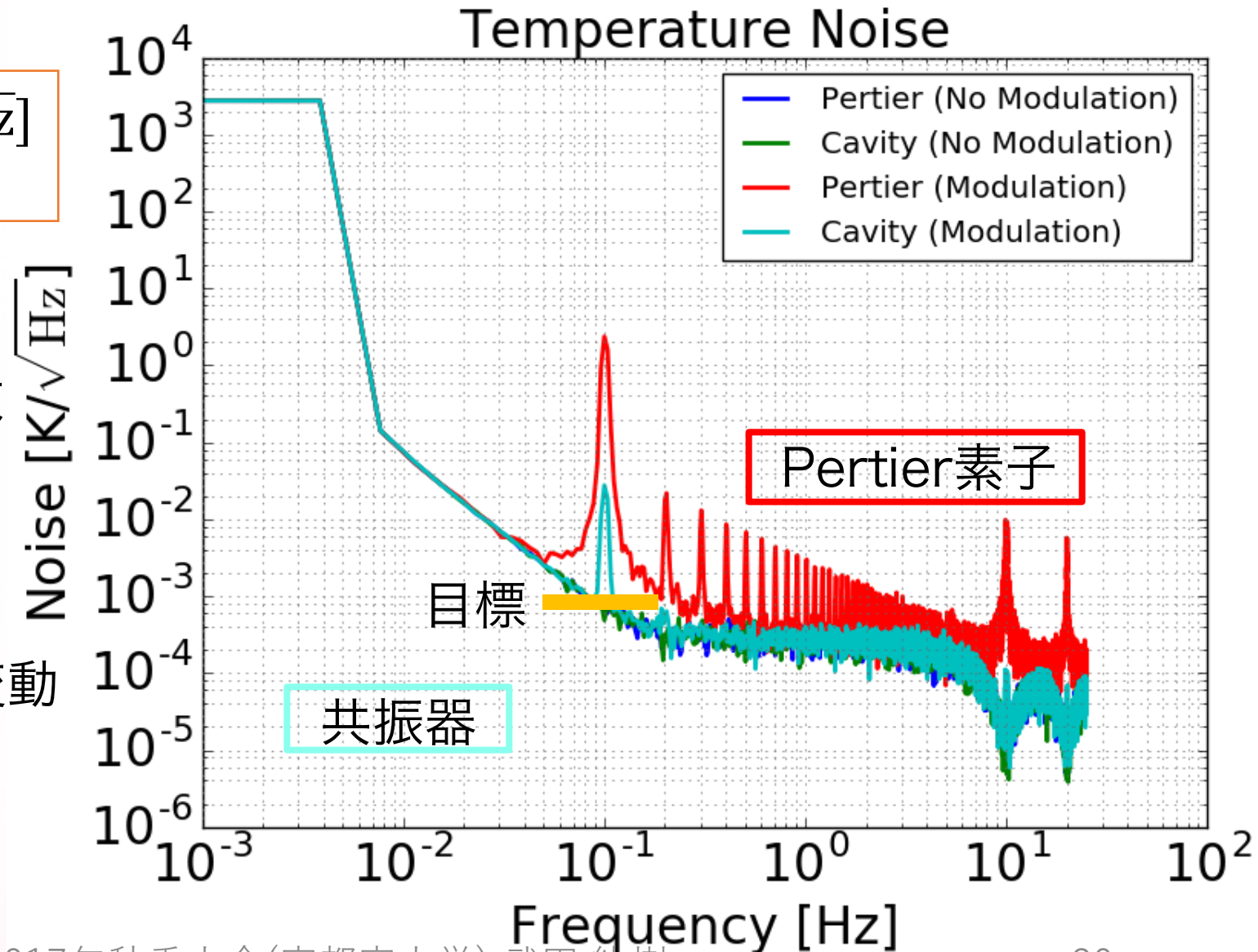
→ 共振器(インバー)の性質から
理論的に計算される減衰と一致

このレベルの温度変動は共振器変動

$$\delta L = \alpha \delta T_{\text{cav}} \sim 2 \times 10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$$

に対応

→ $\gamma \sim 1/1000$ 程度の測定が可能



4. Summary

- 光リング共振器を用いたLorentz不変性検証(片道光速の異方性)の感度向上
- モノリシック光学系製作
→ モノリシック光学系の設計とアラインメント手法の動作確認
- 温調による同相雑音除去比測定
→ 光リング共振器温度変動測定、温調方法確認

5. Outlook

- モノリシック光学系設計 ○
- アライメント手法設計と動作確認 ○
- モノリシック光学系アライメント
- 共振器温度変動測定 ○
- CMRR測定のための温度変調手法 ○
- CMRR測定
- Optical bench, 光学素子のガラス化

おしまい
わへへへ