

光リング共振器を用いた 片道光速の異方性探査

道村唯太

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

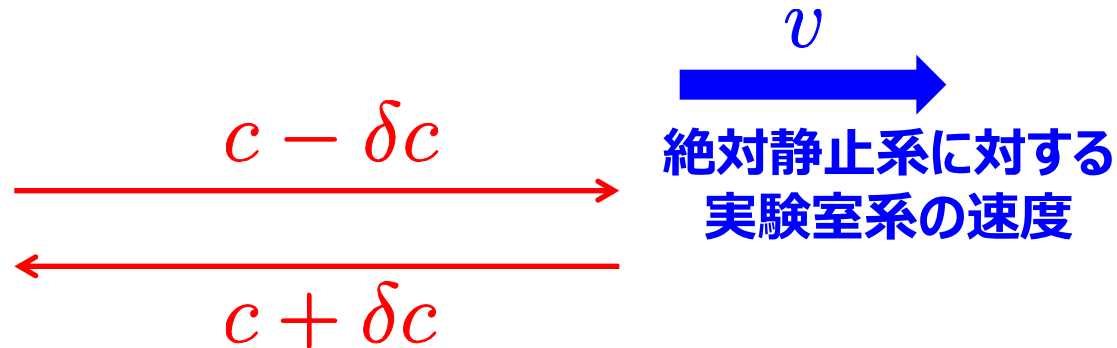
坪野研究室 修士課程2年

概要

- 特殊相対論、電磁気学のLorentz不変性の検証実験
その中でも片道光速の異方性
- 光リング共振器を用いた新しい手法
- これまでの上限値を2倍以上更新

$$\alpha + 1/2 = (-2.3 \pm 2.6) \times 10^{-10}$$

$\delta c/c$ でいうと世界最高の 10^{-13} の精度で
異方性がないことを確かめた



目次

1. 研究背景 [第1章, 第2章]
動機、特殊相対論の検証理論(MS理論)
2. 測定原理 [第3章]
原理、過去の検証実験との比較
目標感度、雑音
3. 実験装置 [第4章]
強度安定化、リング共振器、回転機構
4. データ解析 [第5章]
解析方法、解析結果
5. 結論 [第6章]
まとめ、今後の研究

1. 研究背景

[第1章, 第2章]

特殊相対性理論

- 2つの原理

- 光速不変の原理

- 光速は伝播方向、
光源の速度によらない

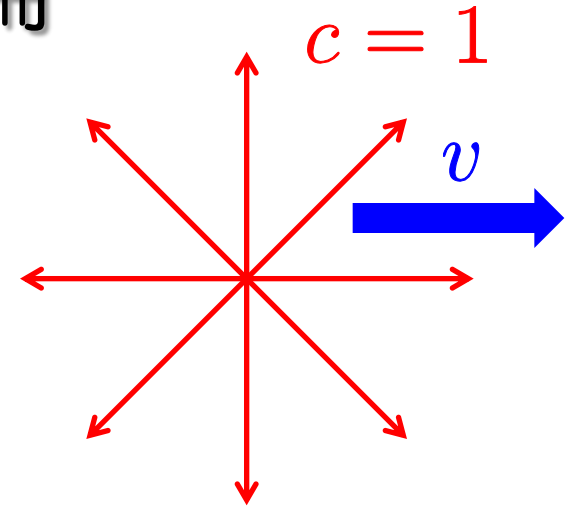
- 特殊相対性原理

- どの慣性系においても物理法則は不変

- Lorentz不変性は宇宙の基本的な対称性である

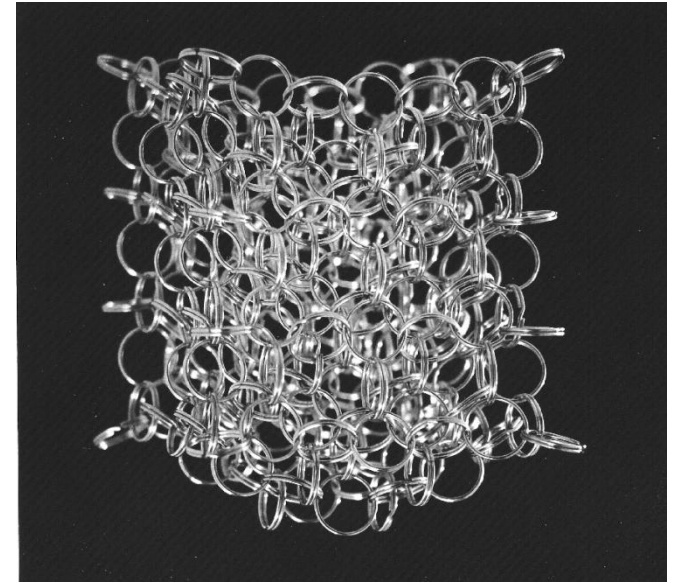
- 発表から100年以上、様々な実験的検証
一度も「破れ」は見つかっていない

→全ての物理学の基礎



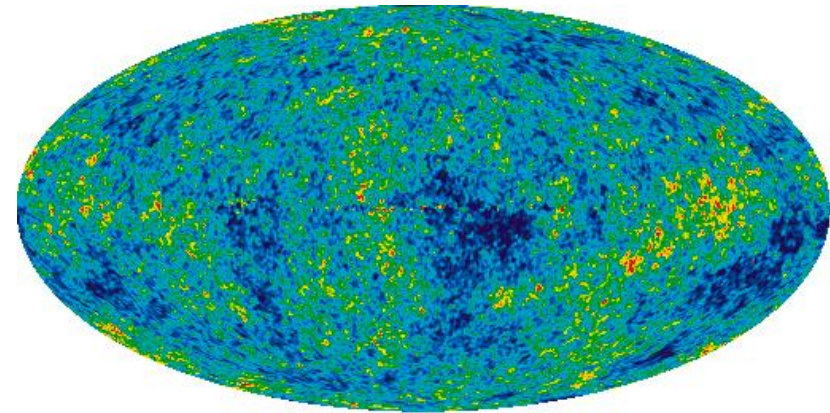
Lorentz不変性の破れ

- 量子重力理論からの示唆
あるスケールで、Lorentz
不変性が破れている可能性
例えば、 $\delta c/c \sim 10^{-17}$ の
オーダーで



http://www.cpt.univ-mrs.fr/~rovelli/loop_quantum_gravity.jpg

- CMBの観測からの示唆
絶対静止系がある可能性
(異方性の双極子成分が
ゼロになるCMB静止系)

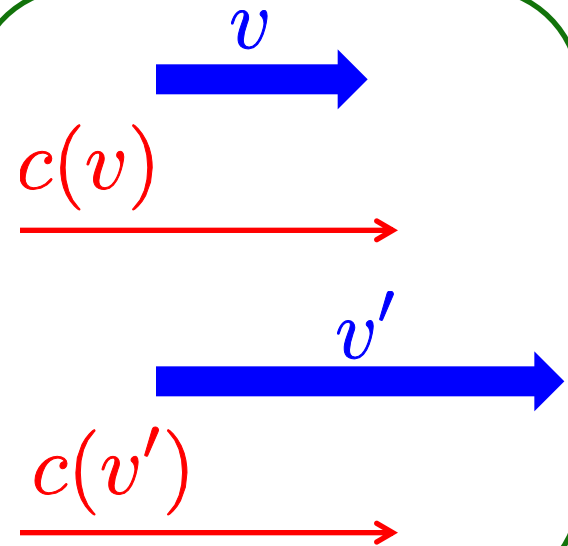
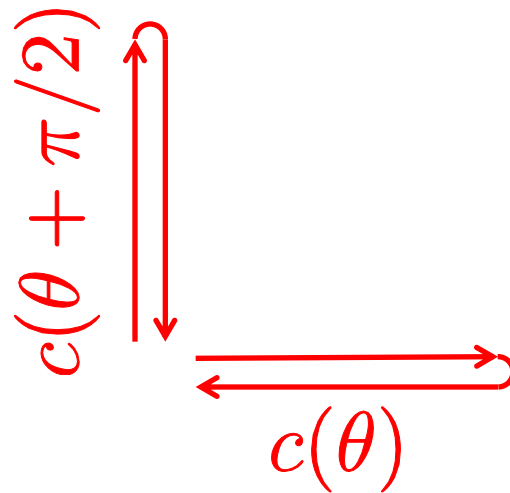
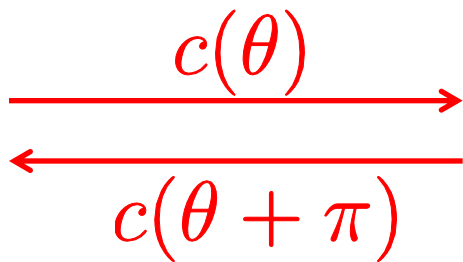


http://en.wikipedia.org/wiki/File:WMAP_2010.png

→ 実験的な検証が必要

特殊相対論の検証

- その中でも「光速不変の原理」を検証
- 3種類の光速不変性
 - 片道光速の等方性 (往路と復路の光速は等しい)
 - 往復光速の等方性 (直交2方向の往復光速は等しい)
 - 光源の速度に対する非依存性



特殊相対論の検証理論

- 光速度不変性の検証精度を他の実験と比較する枠組みが必要
- Mansouri-Sexlの検証理論(1977)
- Lorentz変換に特殊相対論からのずれを表す3つのパラメータ α , β , δ を導入
- 仮定
 - 宇宙には絶対静止系 Σ が存在 (←CMB静止系)
 - Σ 系では光速不変が成り立つ ($c = 1$)
 - Σ 系には特別な方向は存在しない
- 他の慣性系では $c \neq 1$

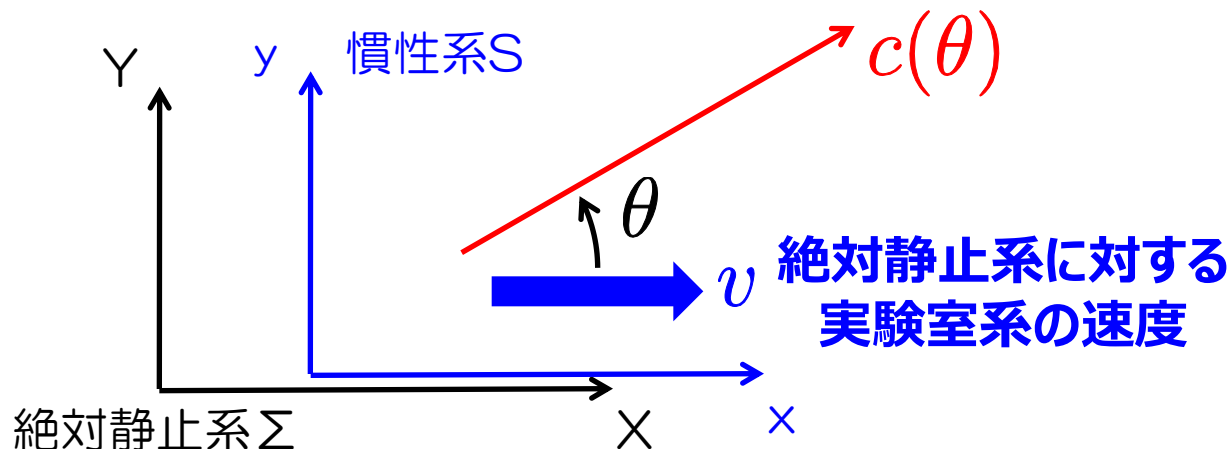
MS理論における光速

- Σ に対して v で動いている慣性系Sでは

$$c(\theta) = 1 - 2 \left(\alpha + \frac{1}{2} \right) v \cos \theta \quad \text{片道光速の異方性}$$

$$- \left(\beta - \delta + \frac{1}{2} \right) v^2 \sin^2 \theta \quad \text{往復光速の異方性}$$

$$- (\alpha - \beta + 1) v^2 \quad \text{光源速度への依存性}$$



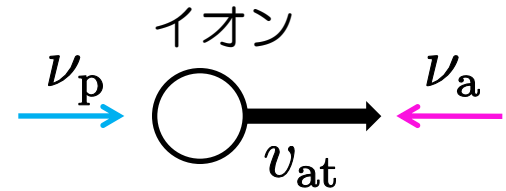
これまでの検証実験

- 片道光速の異方性

ドップラー効果を利用

$$\alpha + 1/2 = (-4.8 \pm 8.4) \times 10^{-8}$$

S. Reinhardt *et al.*: Nat. Phys. **3** (2007) 861.

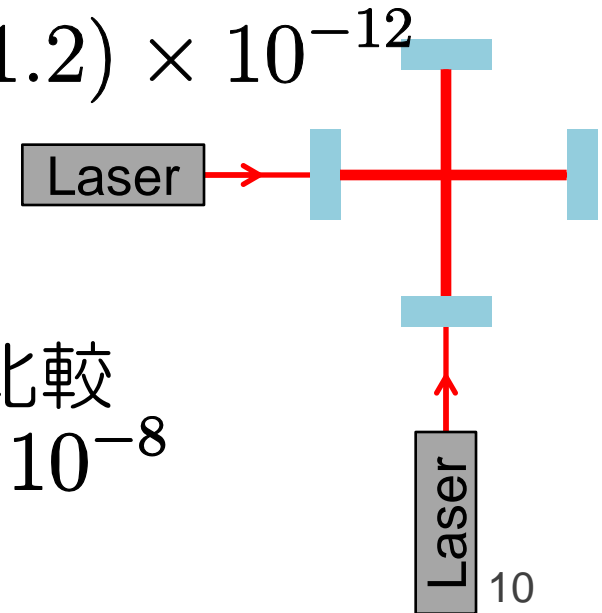


- 往復光速の異方性

直交した光共振器の共振周波数を比較

$$\beta - \delta + 1/2 = (-1.6 \pm 6 \pm 1.2) \times 10^{-12}$$

Ch. Eisele *et al.*: PRL **103** (2009) 090401.



- 光源速度への依存性

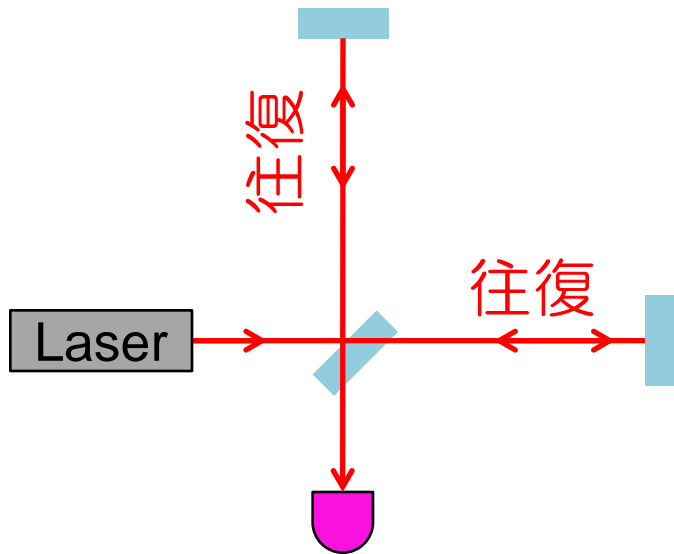
共振器とメーザーの周波数を比較

$$\alpha - \beta + 1 = (-4.8 \pm 3.7) \times 10^{-8}$$

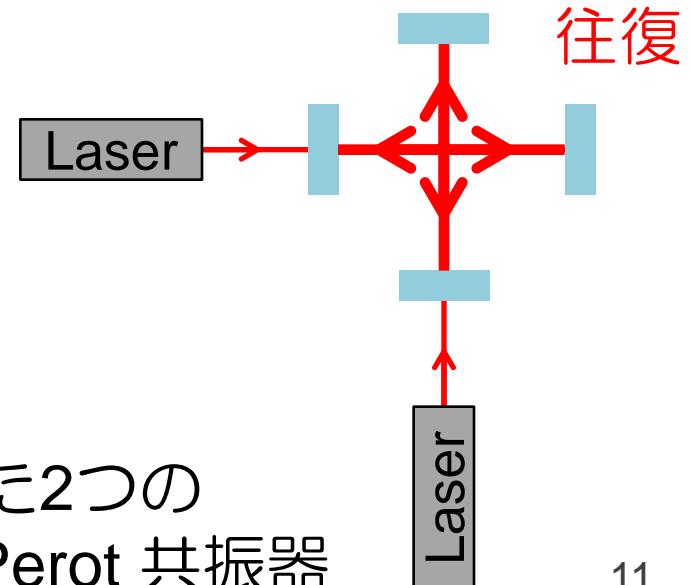
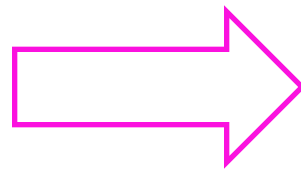
M. S. Tobar *et al.*: PRD **81** (2010) 022003.

本実験の着眼点

- 片道光速の等方性検証の精度が最も低い
- 光共振器を利用することができないため
- 片道光速の項は一周積分でゼロになってしまう
 $c(\theta) = 1 - 2(\alpha + 1/2)v \cos \theta + \mathcal{O}(v^2)$
→ なんとかできないか？



Michelson 干渉計



直交した2つの
Fabry-Perot 共振器

2. 測定原理

[第3章]

3つのアイディア

- 光路に媒質を入れる

→ 片道光速の異方性に感度を持つように

W. S. N. Trimmer *et al.*: PRD 8 (1973) 3321.

Q. Exirifard: arXiv:1010.2057.

- 反時計回りと時計回りの共振周波数を比較

→ 同相雑音除去によって環境変動に強くなる

F. Baynes *et al.*: PRD 84 (Oct 2011) 0811021.

- ダブルパス構成による比較

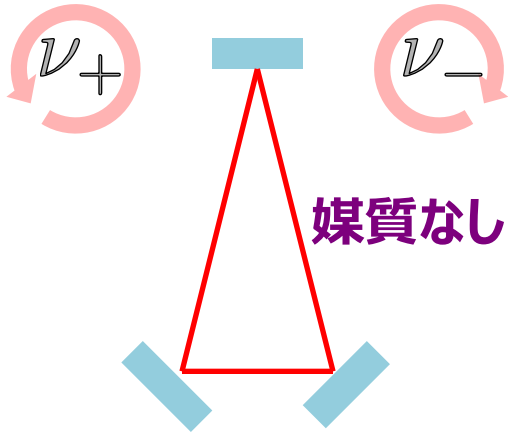
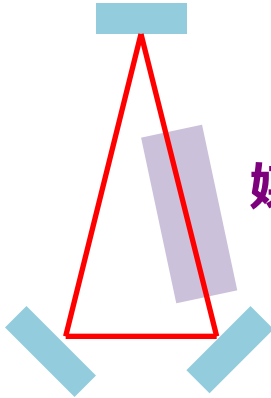
→ null測定になる

本実験の新アイディア

リング共振器の光路に媒質

- 片道光速の異方性がキャンセルされなくなる

$$c(\theta) = 1 - 2(\alpha + 1/2)v \cos \theta + \mathcal{O}(v^2)$$

	 <p>媒質なし</p>	 <p>媒質あり</p>
異方性なし	$\nu_+ = \nu_0$ $\nu_- = \nu_0$	$\nu_+ = \nu$ $\nu_- = \nu$ <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; display: inline-block; color: red;"> $\alpha + 1/2$ に 比例したずれ </div>
異方性あり	$\nu_+ = \nu_0$ $\nu_- = \nu_0$	$\nu_+ = \nu - \delta\nu$ $\nu_- = \nu + \delta\nu$

3つのアイディア

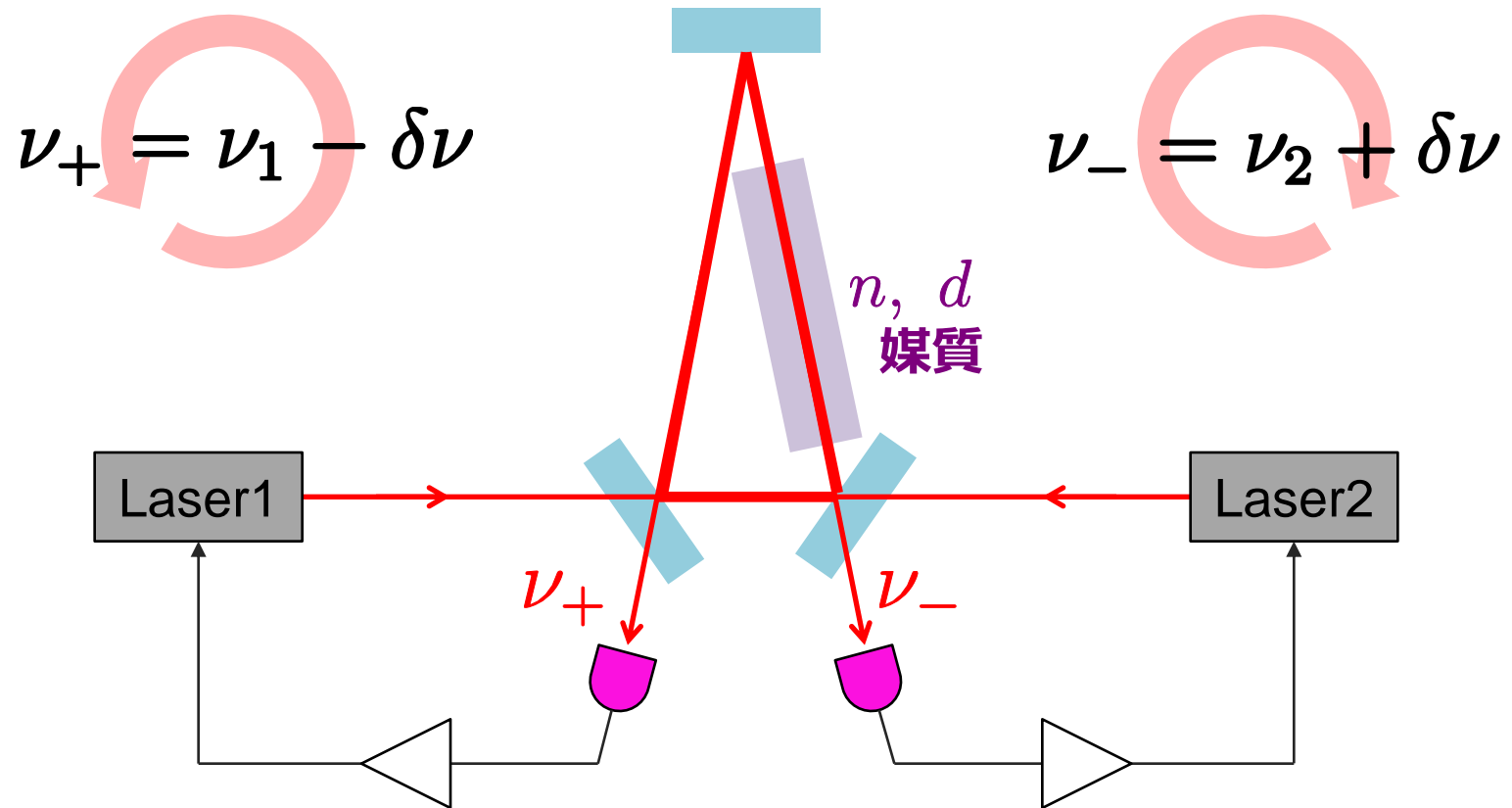
- 光路に媒質を入れる
 - 片道光速の異方性に感度を持つように

W. S. N. Trimmer *et al.*: PRD 8 (1973) 3321.
Q. Exirifard: arXiv:1010.2057.
- 反時計回りと時計回りの共振周波数を比較
 - 同相雑音除去によって環境変動に強くなる

F. Baynes *et al.*: PRD 84 (Oct 2011) 0811021.
- ダブルパス構成による比較
 - null測定になる
 - 本実験の新アイディア

Baynes(2011) の光学系構成

- 2台のレーザー周波数を ν_+ , ν_- にそれぞれロック
- ロックイン現象により、**原理的に $\nu_+ - \nu_- = 0$ とできない** (null実験ではない)



ν_+ にレーザー周波数をロック

ν_- にレーザー周波数をロック

3つのアイディア

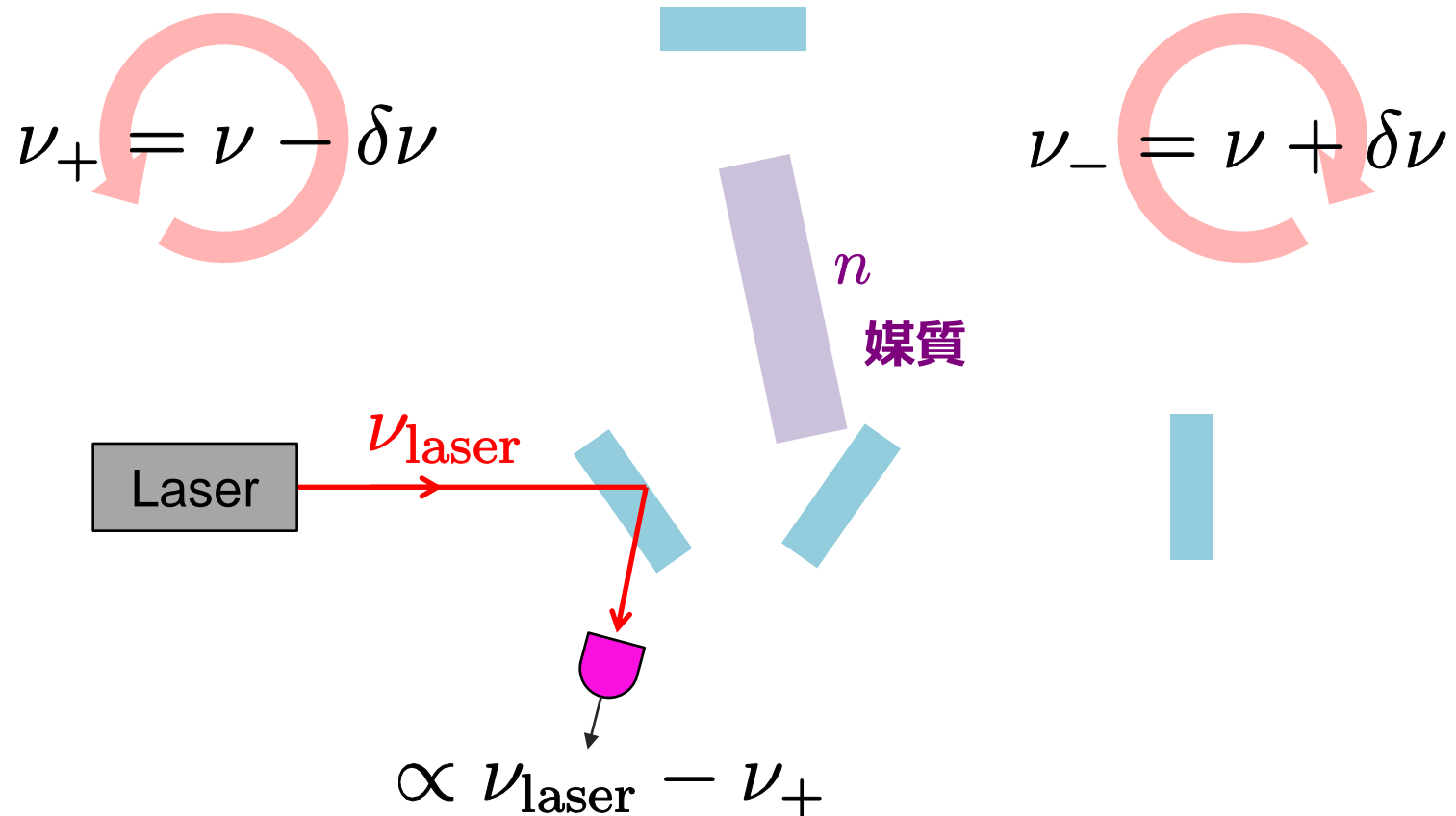
- 光路に媒質を入れる
 - 片道光速の異方性に感度を持つように

W. S. N. Trimmer *et al.*: PRD 8 (1973) 3321.
Q. Exirifard: arXiv:1010.2057.
- 反時計回りと時計回りの共振周波数を比較
 - 同相雑音除去によって環境変動に強くなる

F. Baynes *et al.*: PRD 84 (Oct 2011) 0811021.
- ダブルパス構成による比較
 - null測定になる
 - 本実験の新アイディア

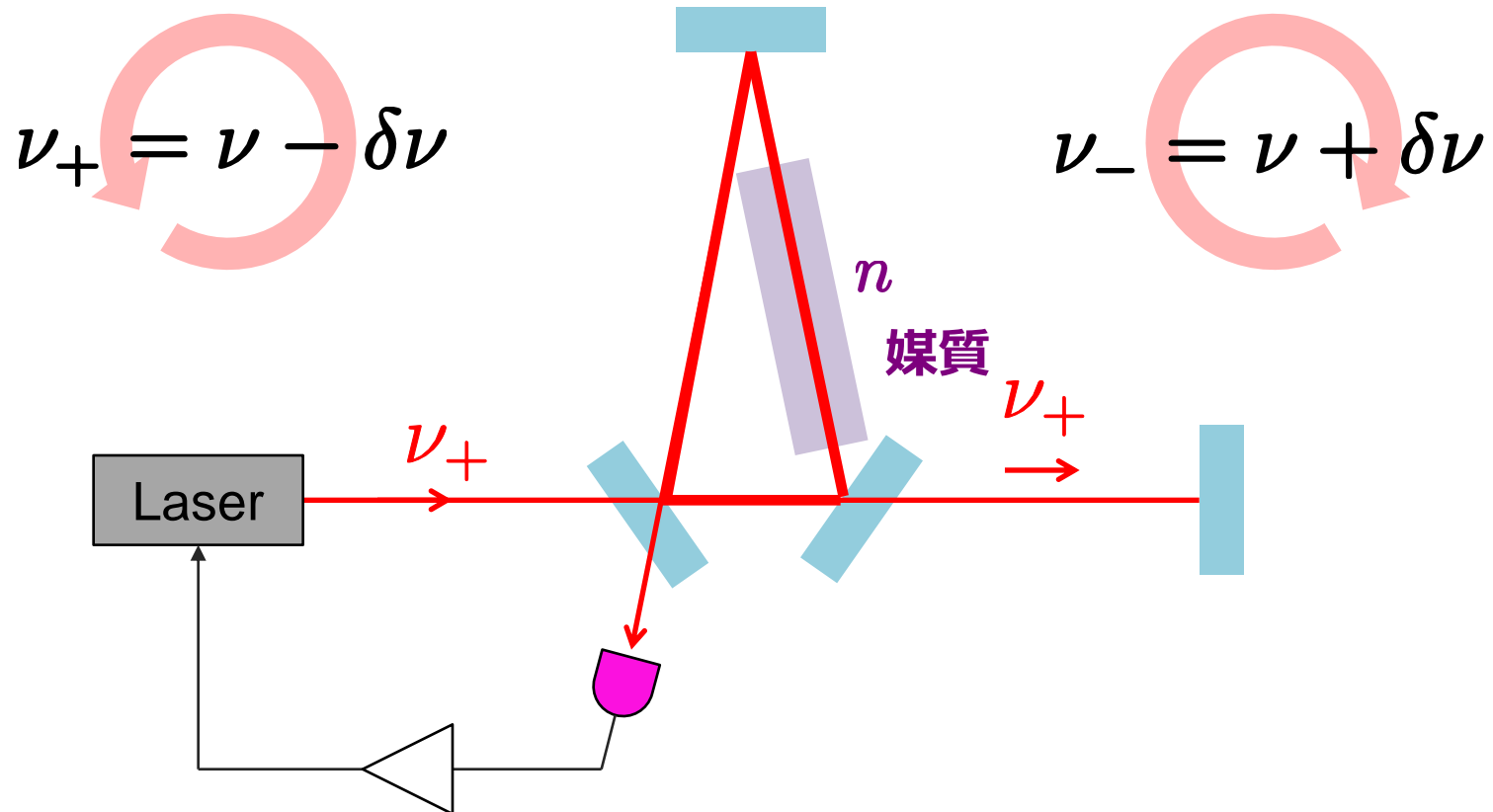
本実験の光学系構成

- 反時計回りの透過光を打ち返すことにより、時計回りと比較 ← **ダブルパス構成**
- もし異方性がなければ、 $\nu_+ - \nu_- = 0$ の **null実験**



本実験の光学系構成

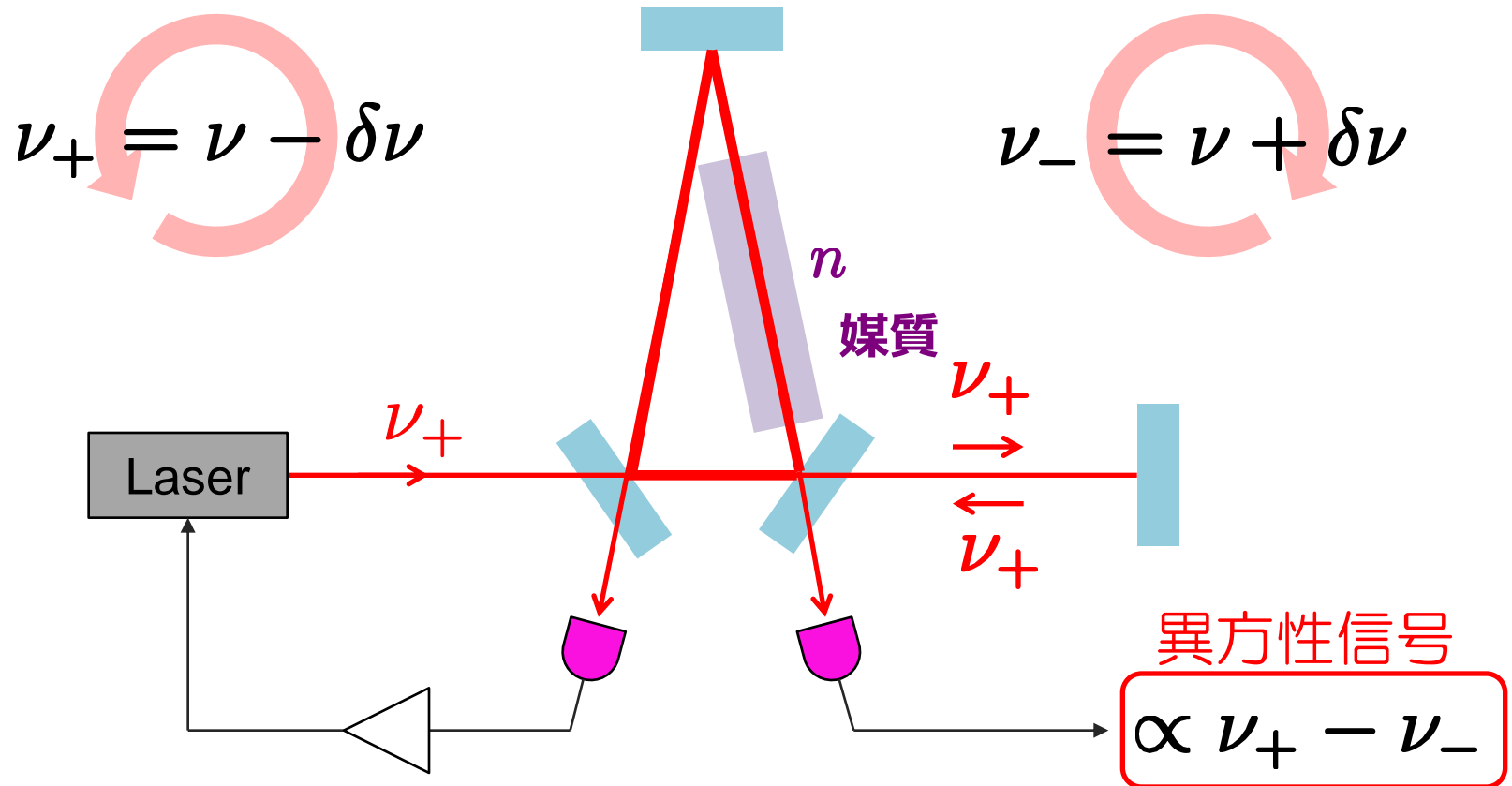
- 反時計回りの透過光を打ち返すことにより、時計回りと比較 ← **ダブルパス構成**
- もし異方性がなければ、 $\nu_+ - \nu_- = 0$ の **null実験**



ν_+ にレーザー周波数をロック

本実験の光学系構成

- 反時計回りの透過光を打ち返すことにより、時計回りと比較 ← **ダブルパス構成**
- もし異方性がなければ、 $\nu_+ - \nu_- = 0$ の **null実験**



ν_+ にレーザー周波数をロック

異方性信号の大きさ

- $\delta\nu \equiv \nu_+ - \nu_-$ とすると

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = - \frac{4(n-1)d}{L + (n-1)d} (\alpha + 1/2) v \cos \theta$$

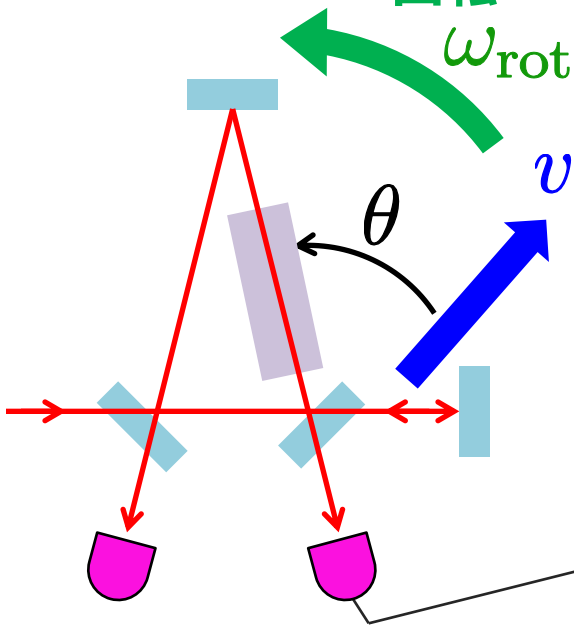
CMBに対する
実験室系の速さ
 $v \simeq 10^{-3}$

一周長

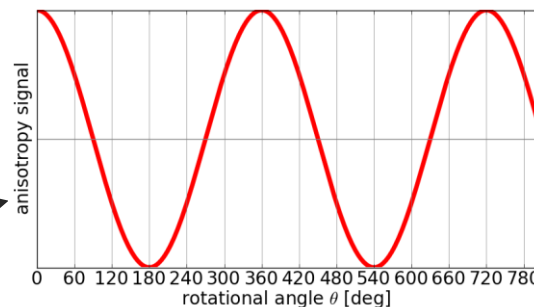
媒質長

実験装置を回転させ、
異方性信号を変調

回転
 ω_{rot}



媒質を入れることが本実験のポイント
屈折率が高いほど感度が高い
→ シリコン($n=3.69$)を使用
(波長1550nmの光に対して透明)



$\propto \alpha + 1/2$

目標感度

- 目標: $|\alpha + 1/2| \lesssim 10^{-10}$ の上限値を与えること
- 上限値は
「感度(雑音レベル)」
「測定時間の平方根」 で決まる

- 現実的な測定時間を仮定すると
目標感度は

$$\frac{\delta\nu}{\nu} < 10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (@\text{回転周波数}=0.125\text{Hz})$$

共振器を回転
させることで変化

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{4(n-1)d}{L+(n-1)d} (\alpha + 1/2) v \cos \theta$$

雑音と要求値

- 目標感度実現のためには0.125 Hzで.....
- レーザー強度雑音

$$\frac{\delta P}{P} < 1 \times 10^{-3} / \sqrt{\text{Hz}}$$

(強度安定化により実現)

- レーザー周波数雑音

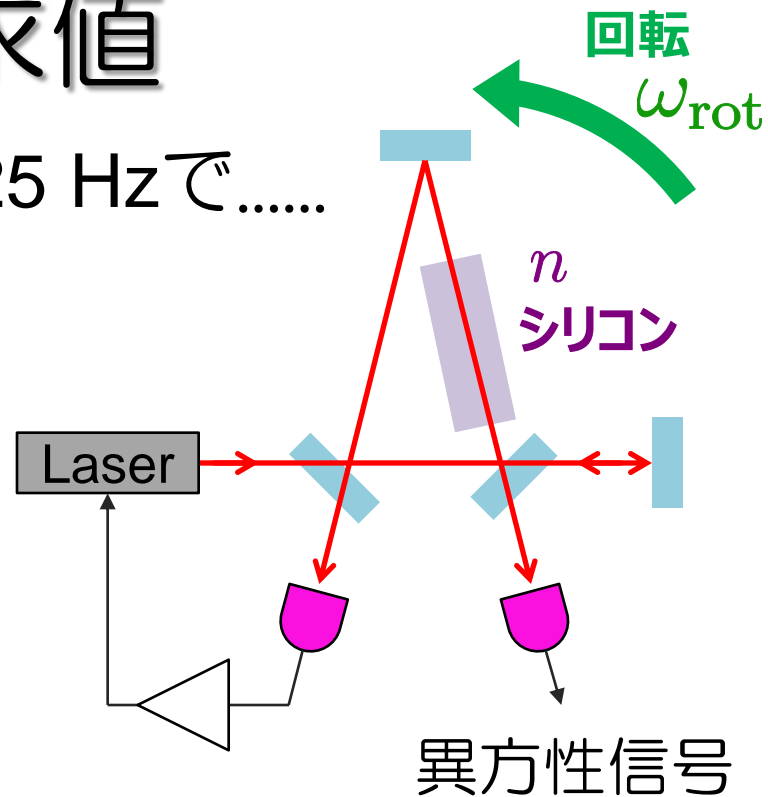
$$\frac{\delta \nu}{\nu} < 1 \times 10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}}$$

(周波数ロック)

- Sagnac効果による雑音

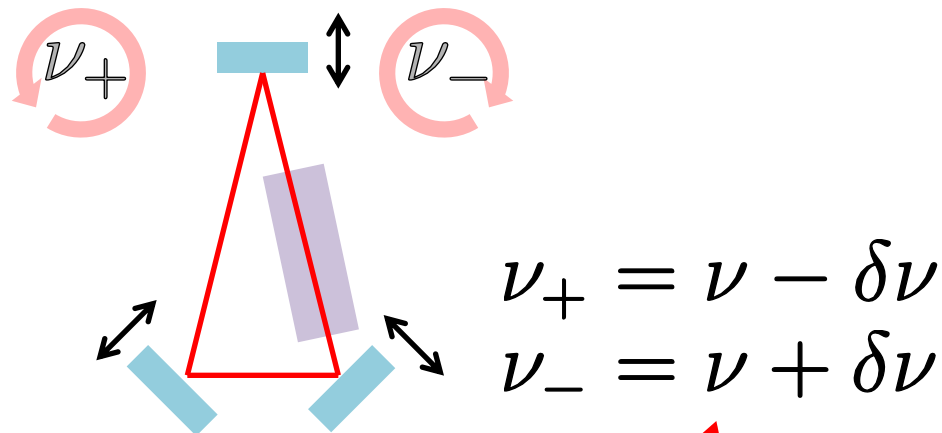
$$\delta \omega_{\text{rot}} < 3 \times 10^{-2} \text{ rad/sec} / \sqrt{\text{Hz}}$$

(回転台の回転速度制御により実現)



その他の雑音

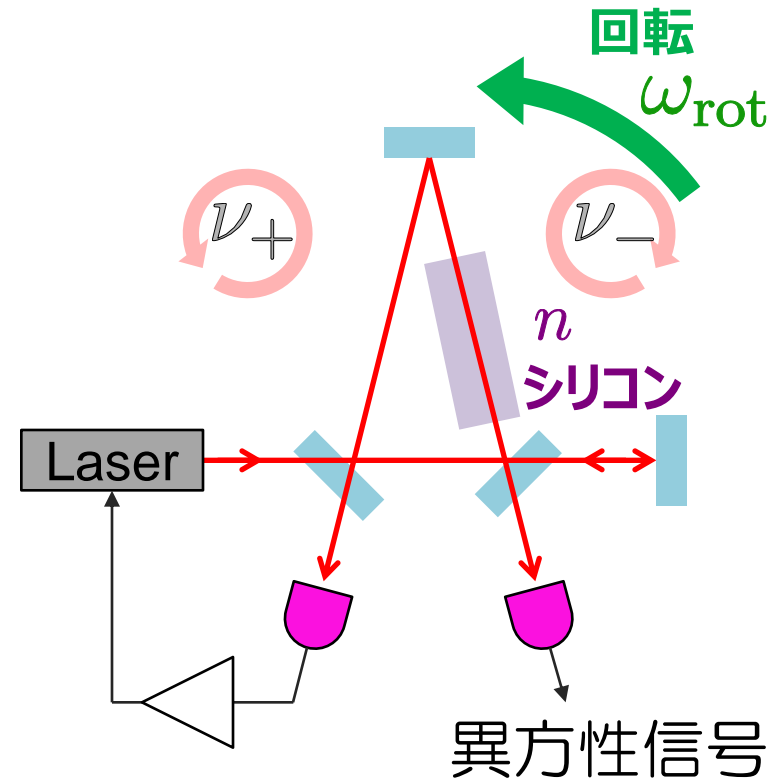
- 共振器長変動に関する雑音は全て同相雑音除去が効くため、他の共振器実験のような高真空、高レベル防振、温度制御(or低温環境)などが必要ない(驚異的な利点！)



共振器長変化しても同相で変化

ここまでのまとめ

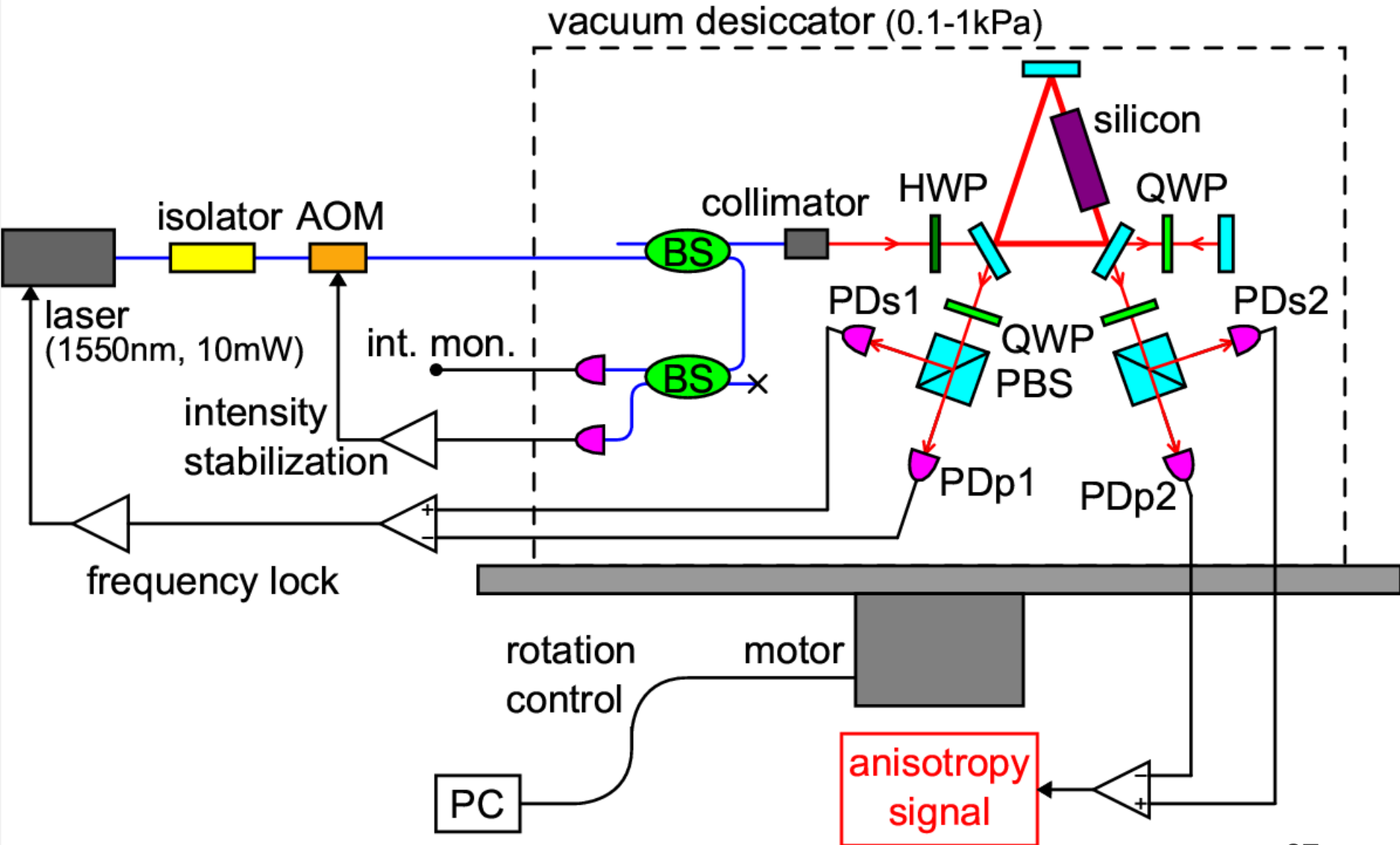
- リング共振器により片道光速の異方性を測定
 - 一部に媒質(シリコン)
 - 反時計回り、時計回りの共振周波数を比較
 - 同相雑音除去
 - ダブルパス構成
 - null測定
- リング共振器を回転
 - 回転周波数に異方性信号
- 上限値を更新するには
 - レーザー強度安定化
 - レーザー周波数ロック
 - 回転速度制御



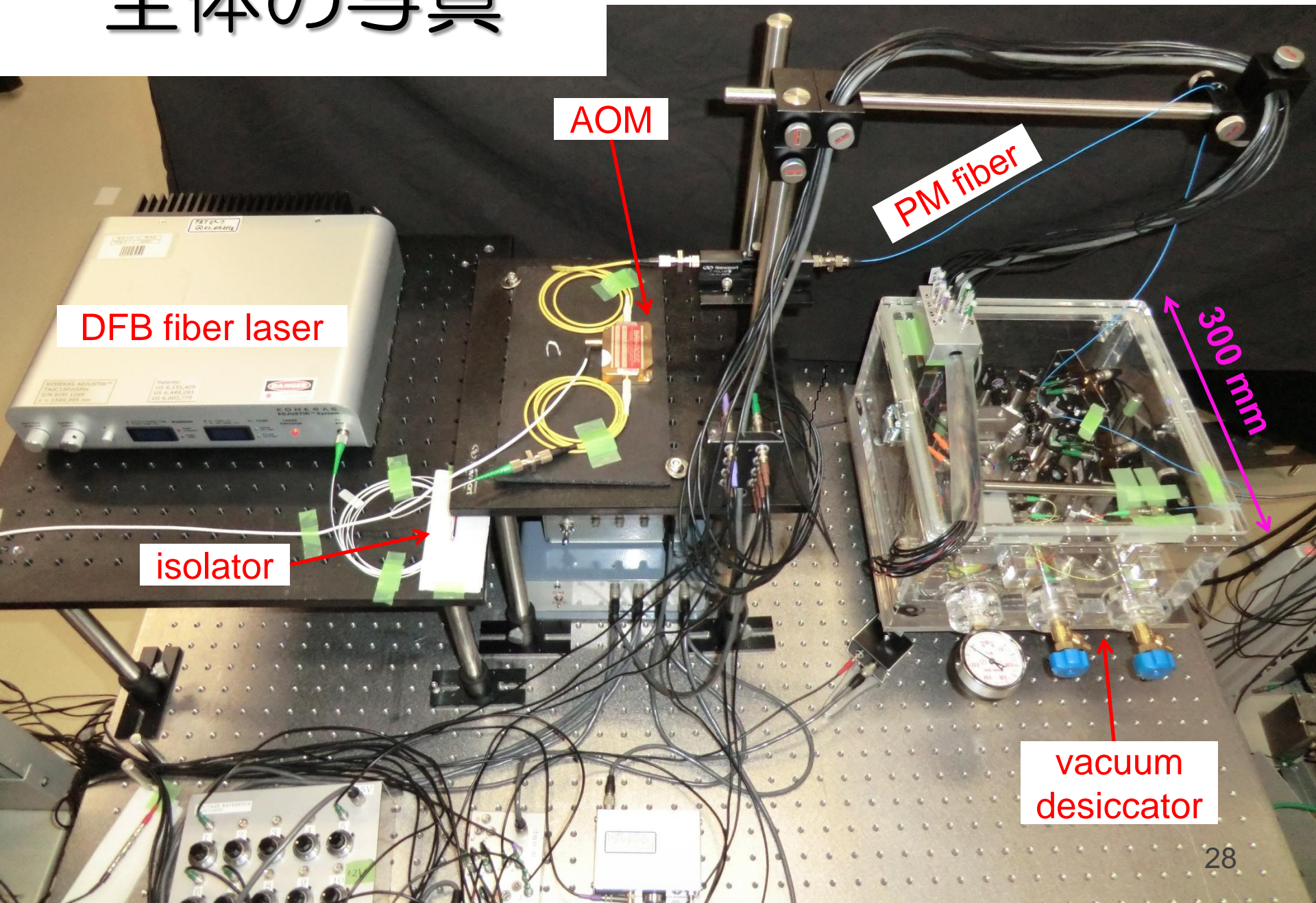
3. 実験装置

[第4章]

全体の構成



全体の写真



DFB fiber laser

AOM

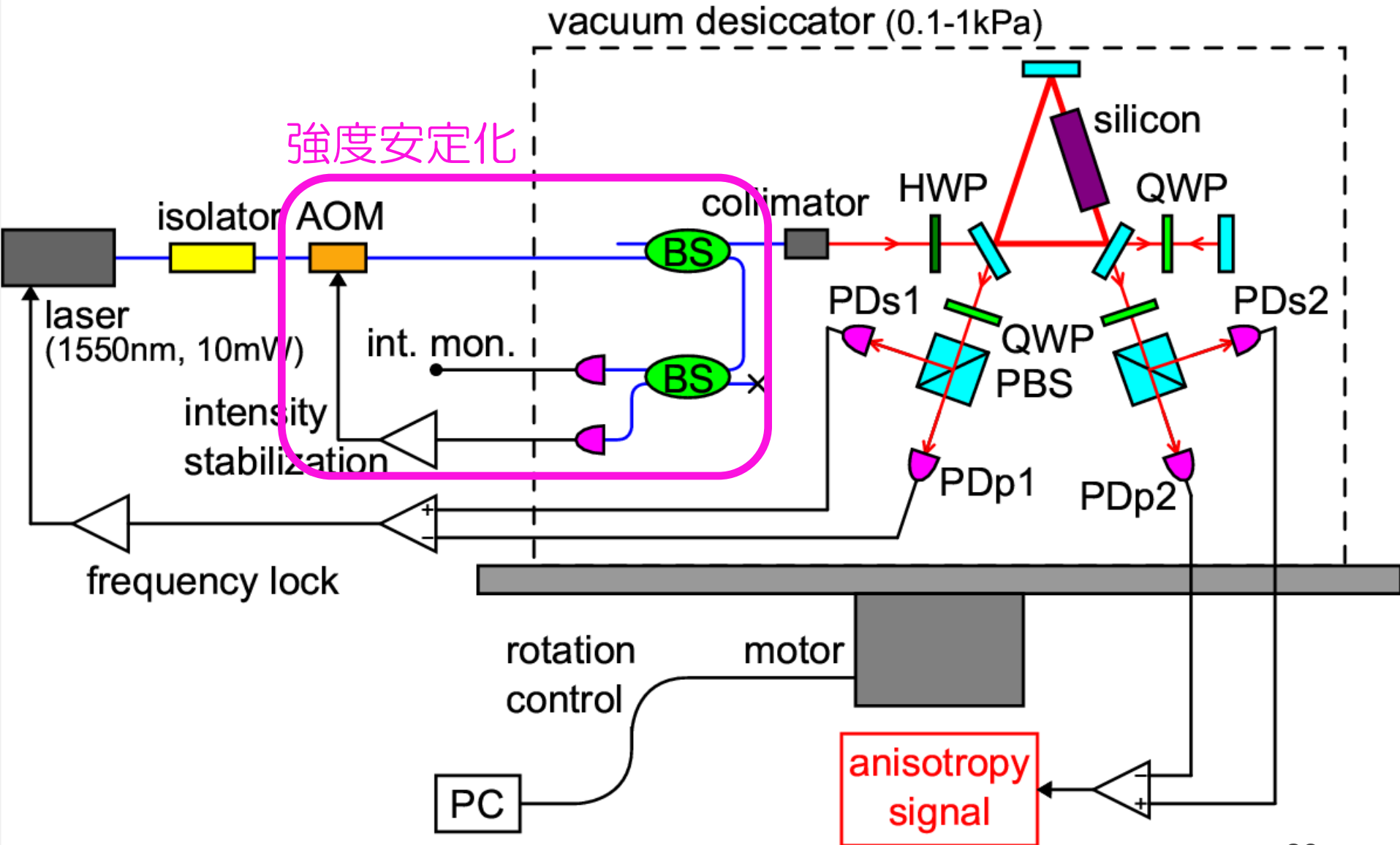
PM fiber

isolator

300 mm

vacuum desiccator

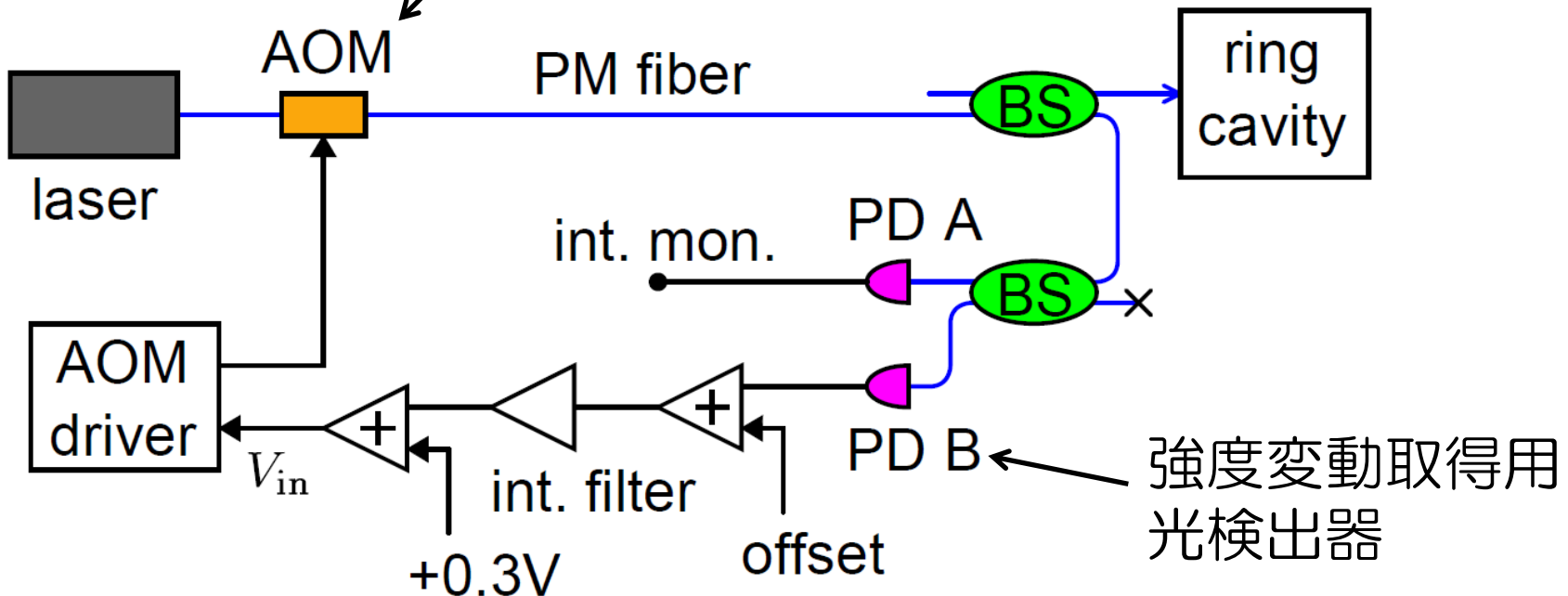
全体の構成



強度安定化光学系

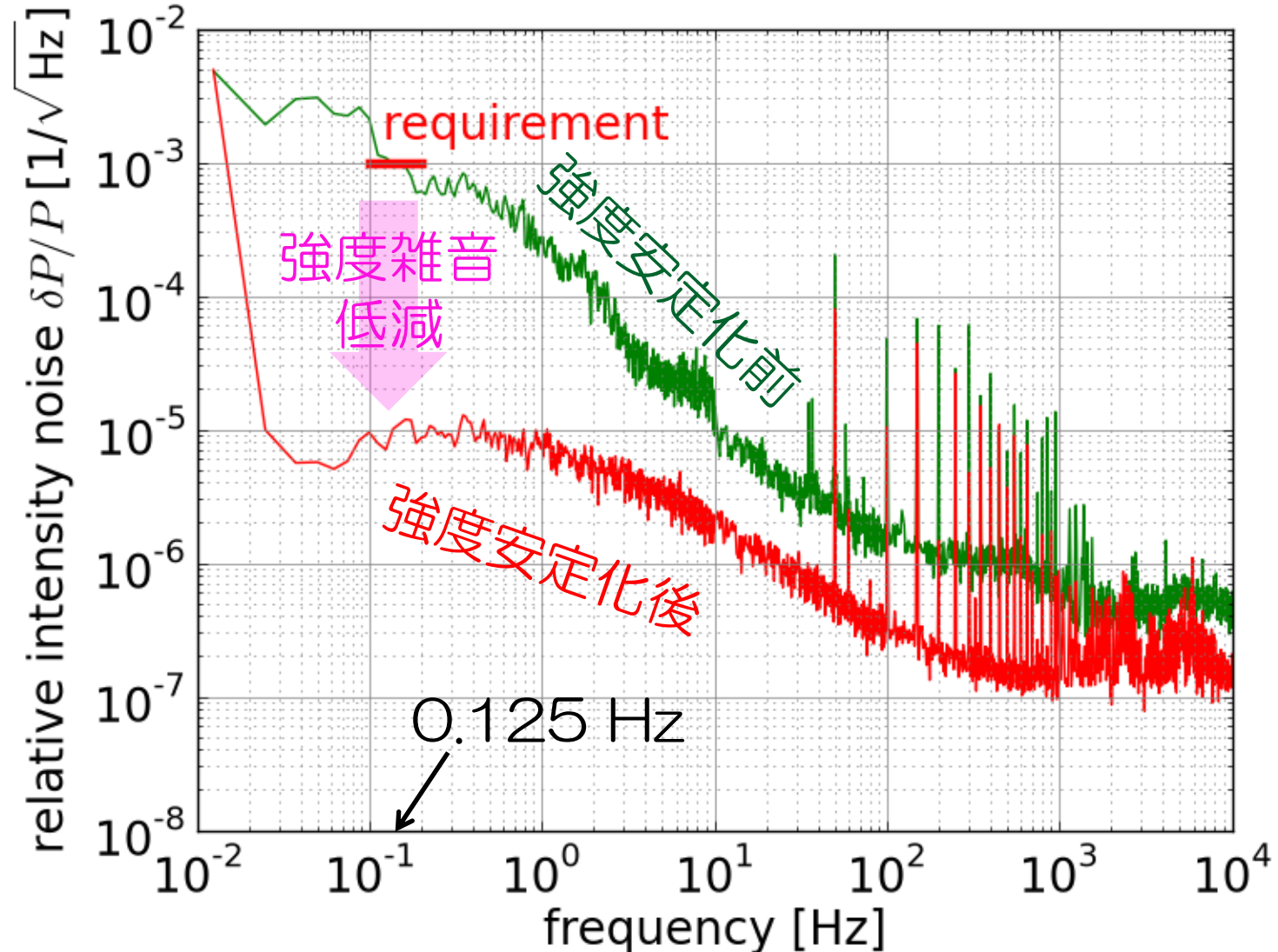
- ファイバ光学系
- 入射光の一部を用いて強度変動を得て、AOMにフィードバック

AOM=音響光学素子
強度変調をかける素子

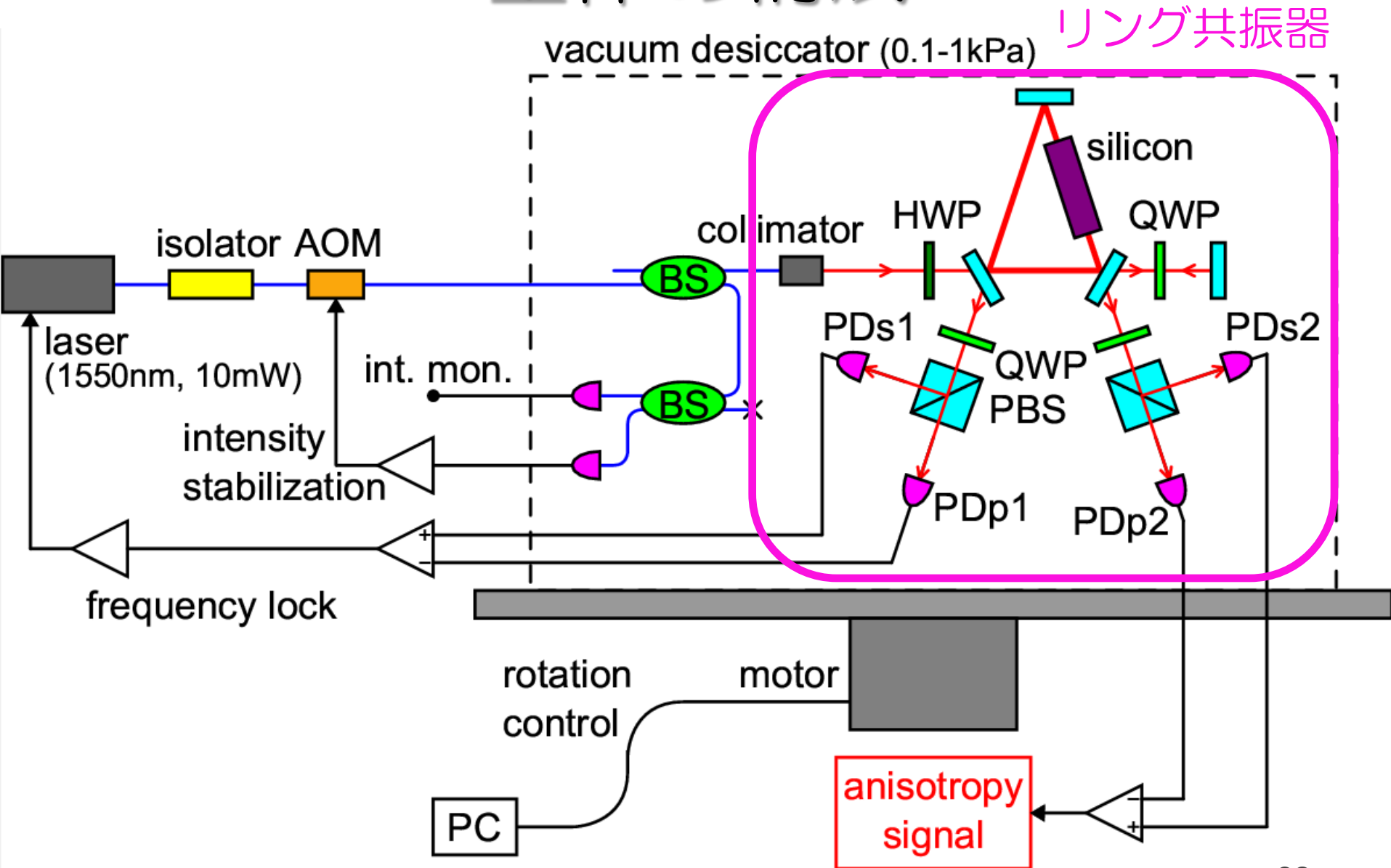


強度安定化結果

- 要求値より2桁下の安定度を達成

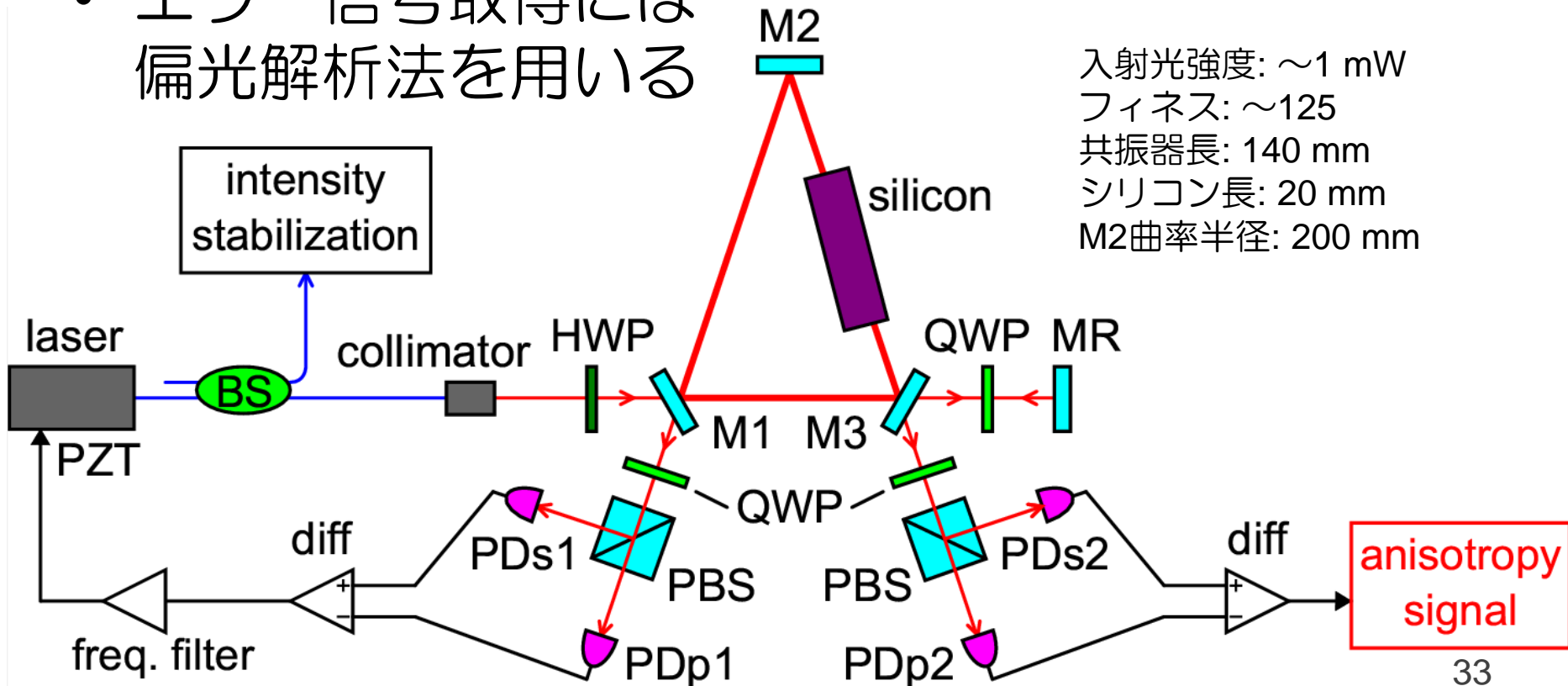


全体の構成

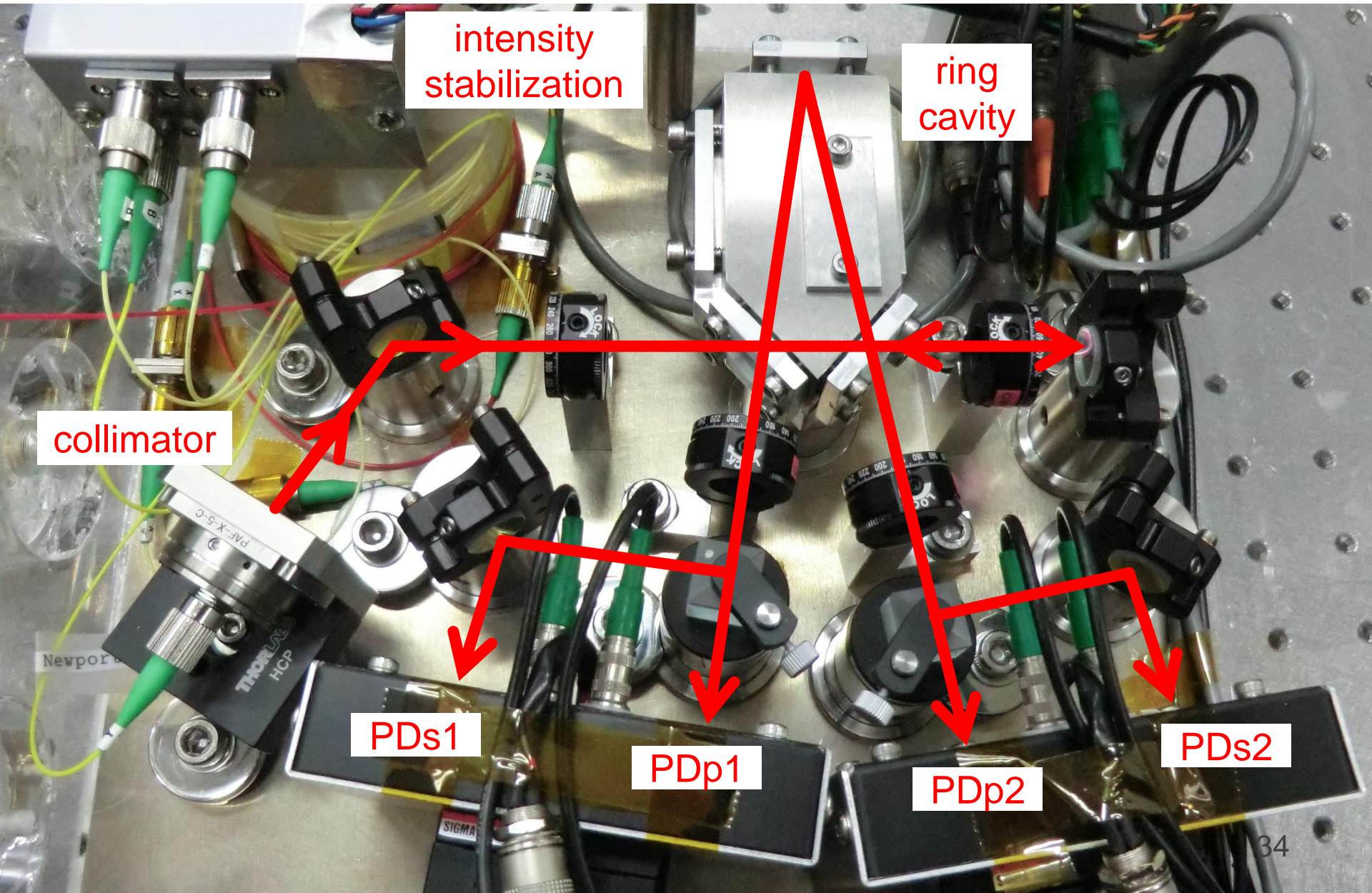


リング共振器

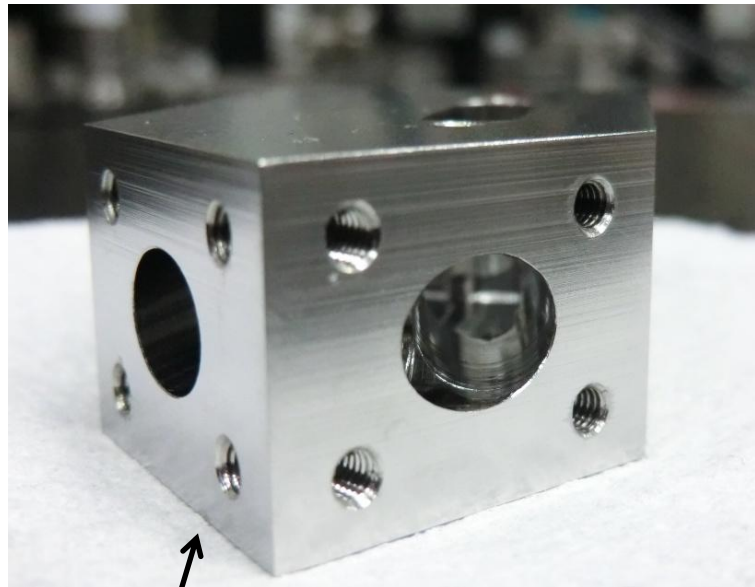
- 反時計回りの共振にレーザー周波数をロック
レーザーPZTにフィードバック
- ダブルパス目のエラー信号が異方性信号
- エラー信号取得には
偏光解析法を用いる



光学系の写真

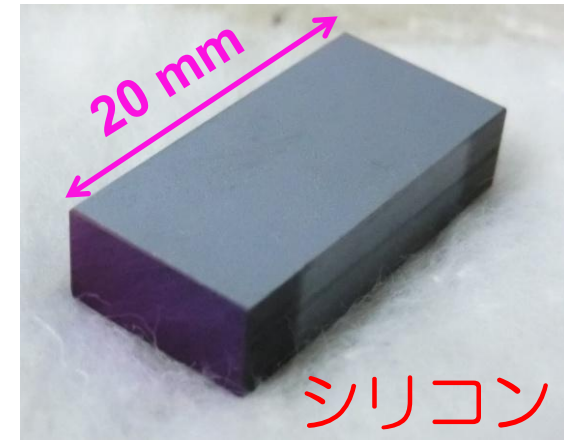


リング共振器の写真

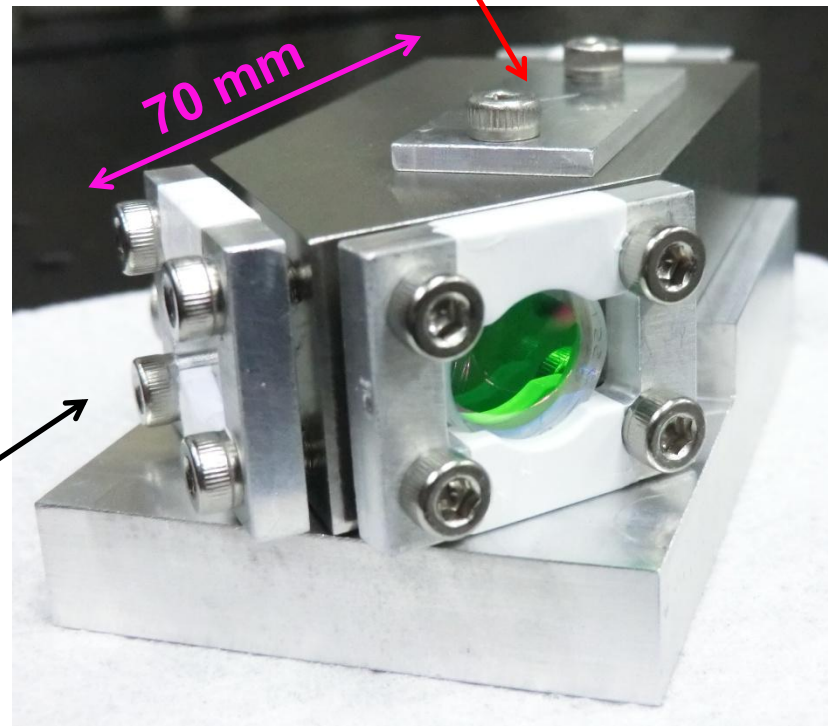


スペーサーは
スーパーインバー製
(低熱膨張合金)

鏡を取り付けた状態

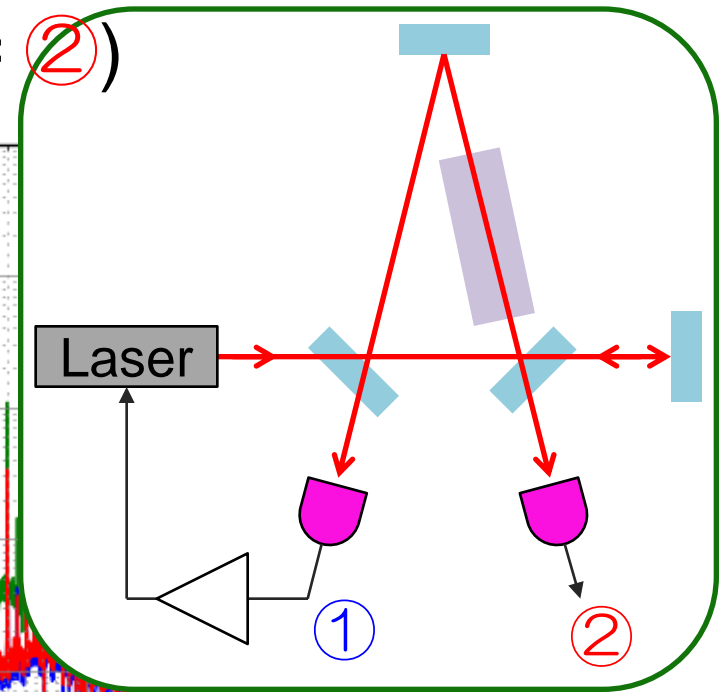
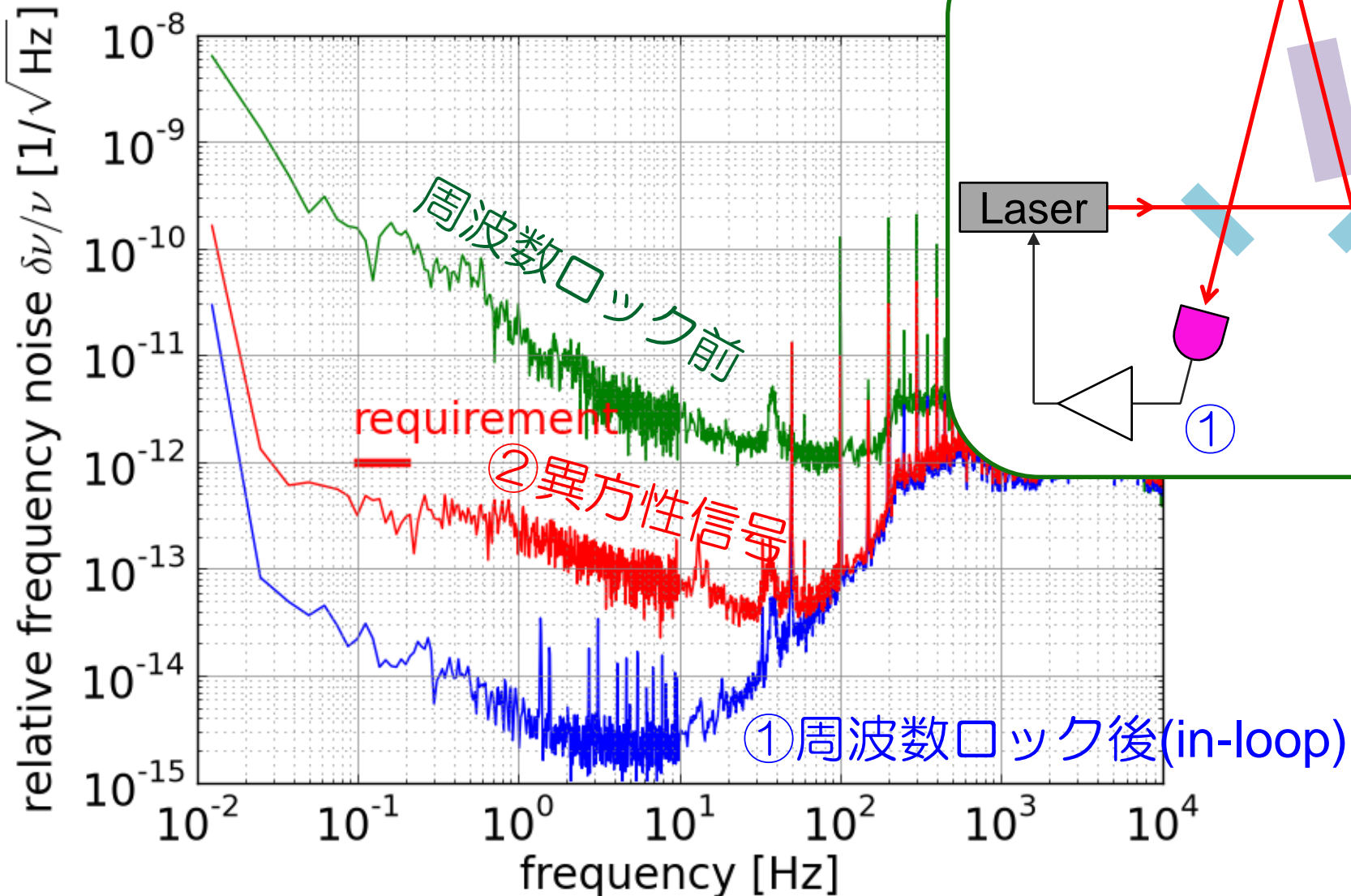


この中にシリコン



周波数ロック結果

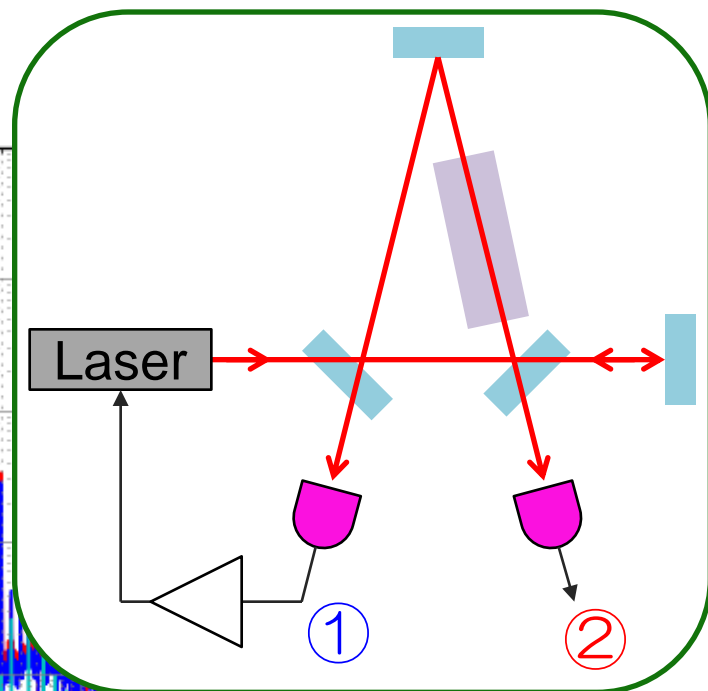
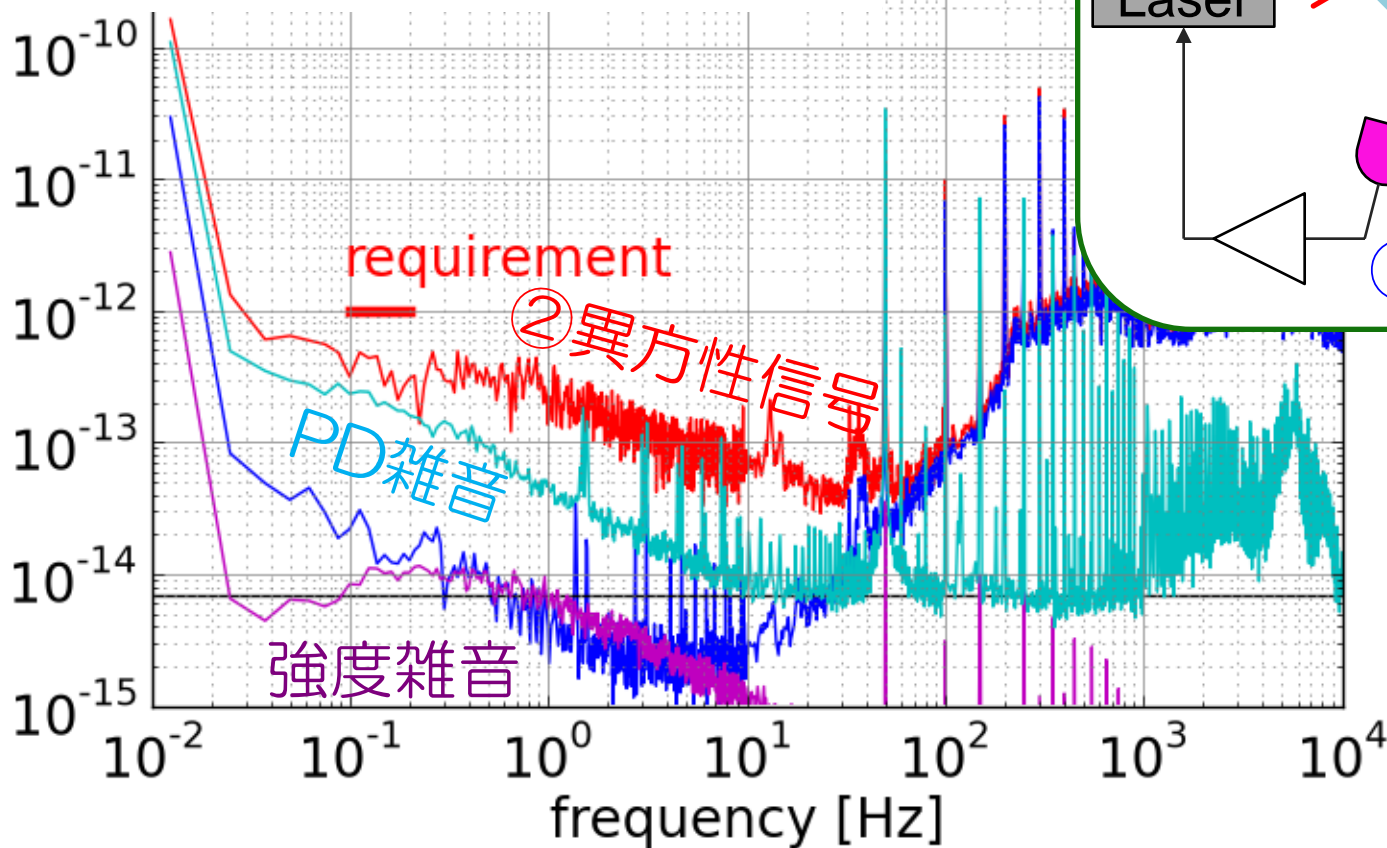
- 要求値をクリア(ただし、① ≠ ②)



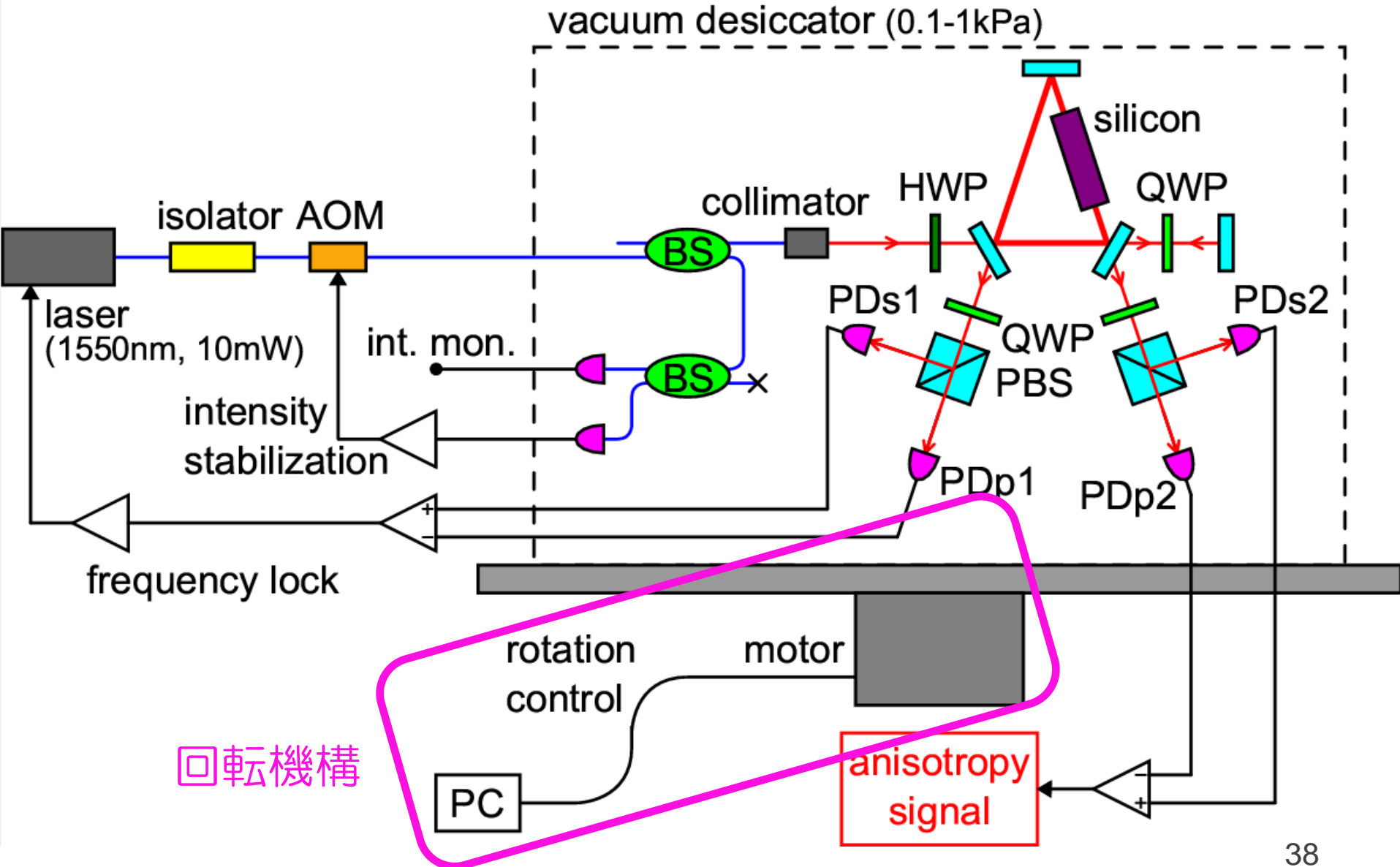
なぜスペクトルが一致しないか？

- 理想的には① = ②
- 光検出器の雑音
- 偏光ドリフトの可能性

relative frequency noise $\delta\nu/\nu$ [$1/\sqrt{\text{Hz}}$]

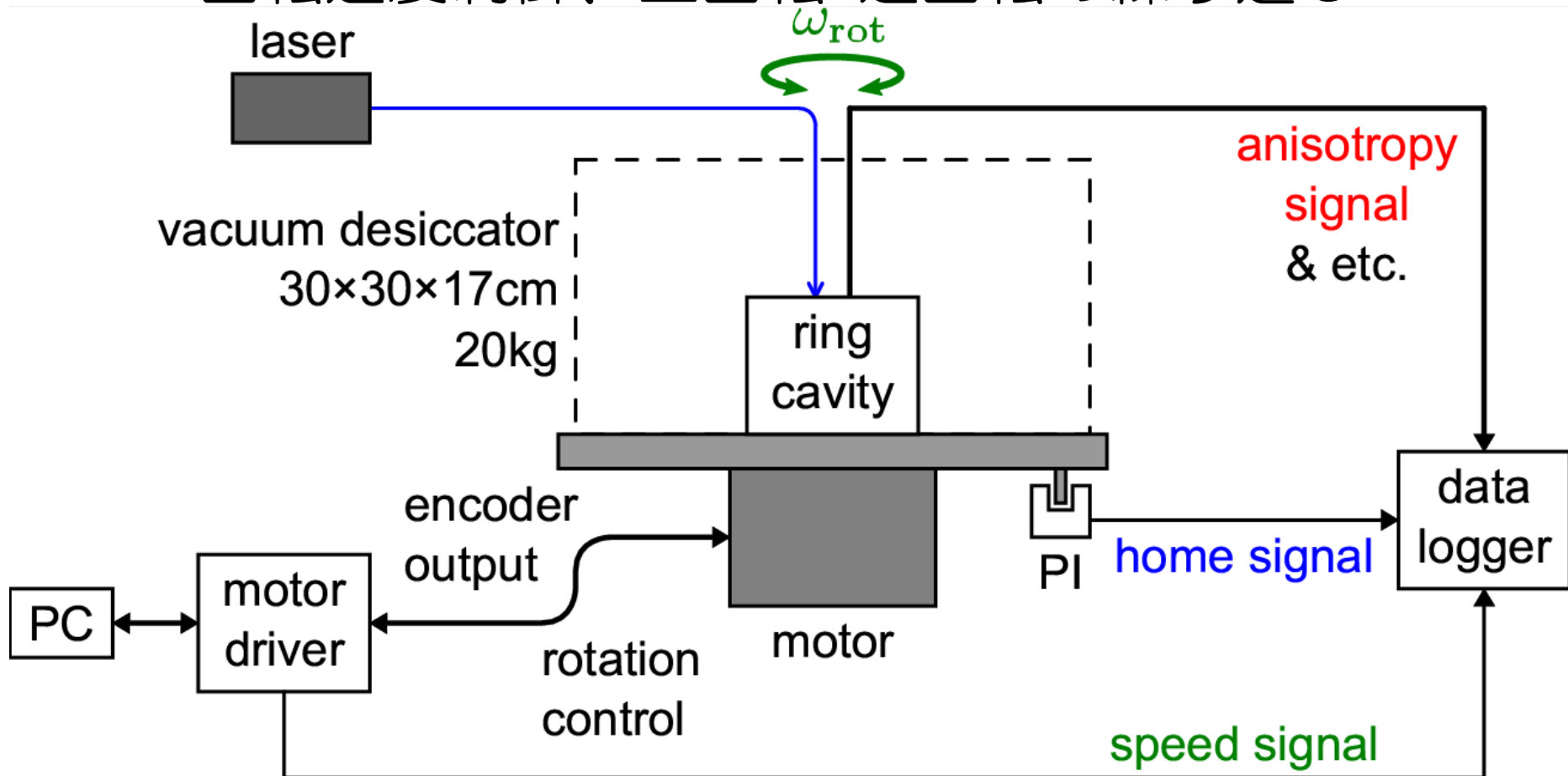


全体の構成



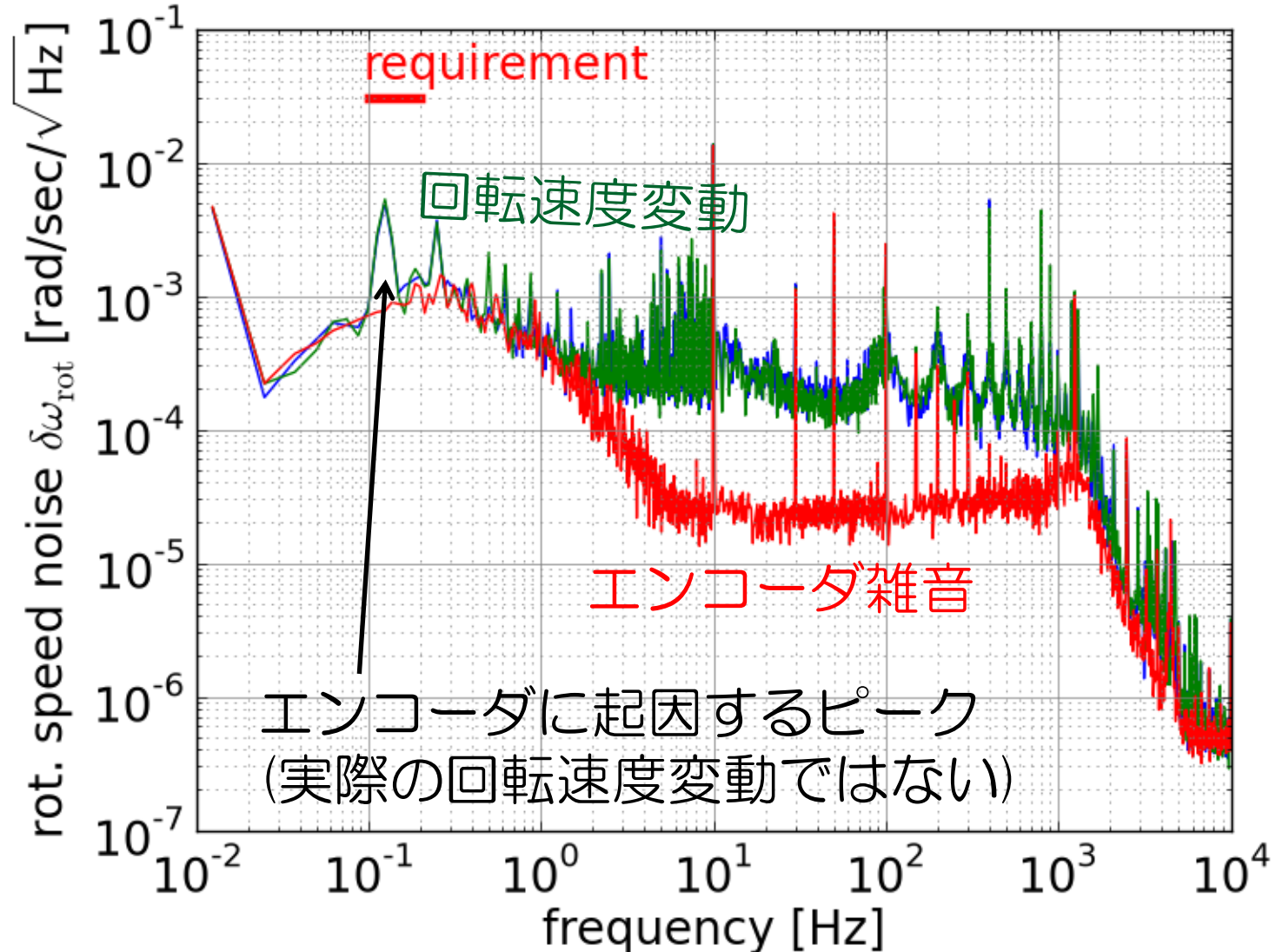
回転機構

- 市販のモータとその制御システムを利用
回転速度制御、正回転+逆回転の繰り返し



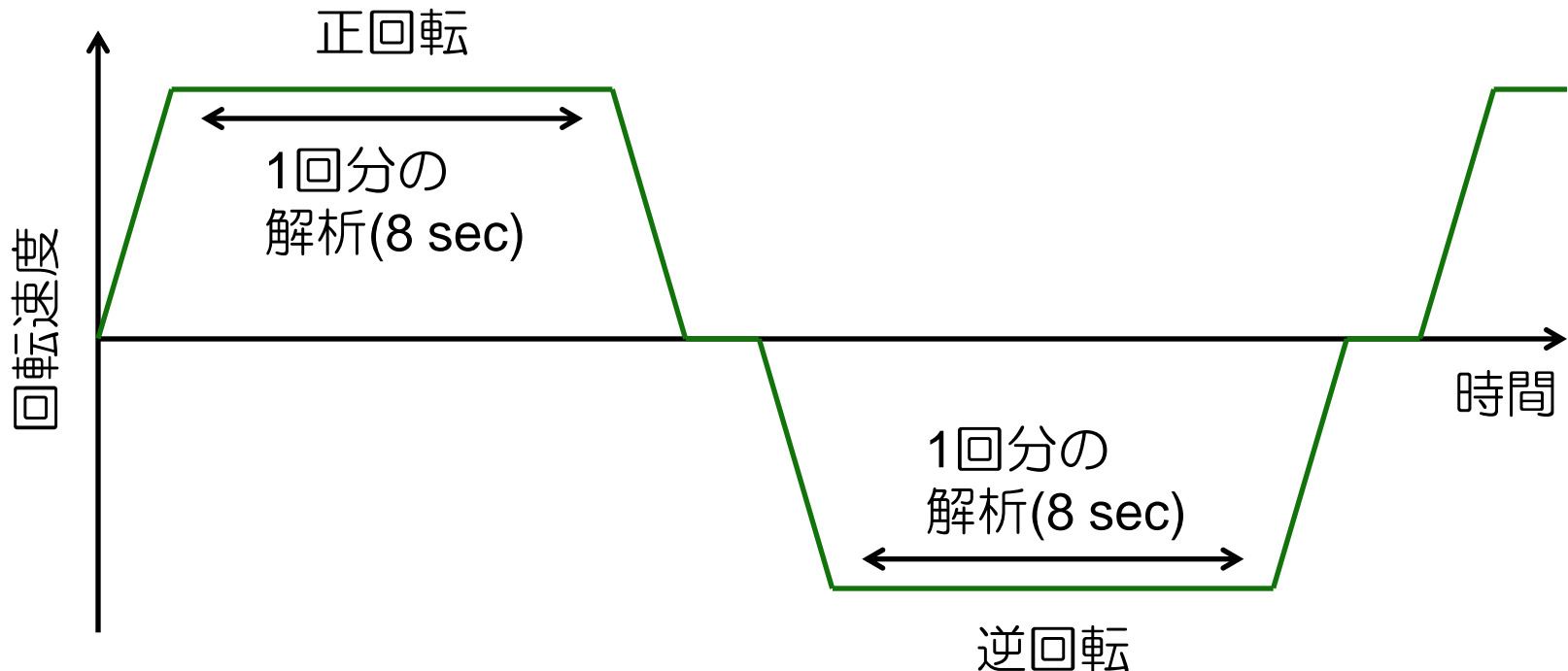
回転速度安定度

- 要求値をクリア



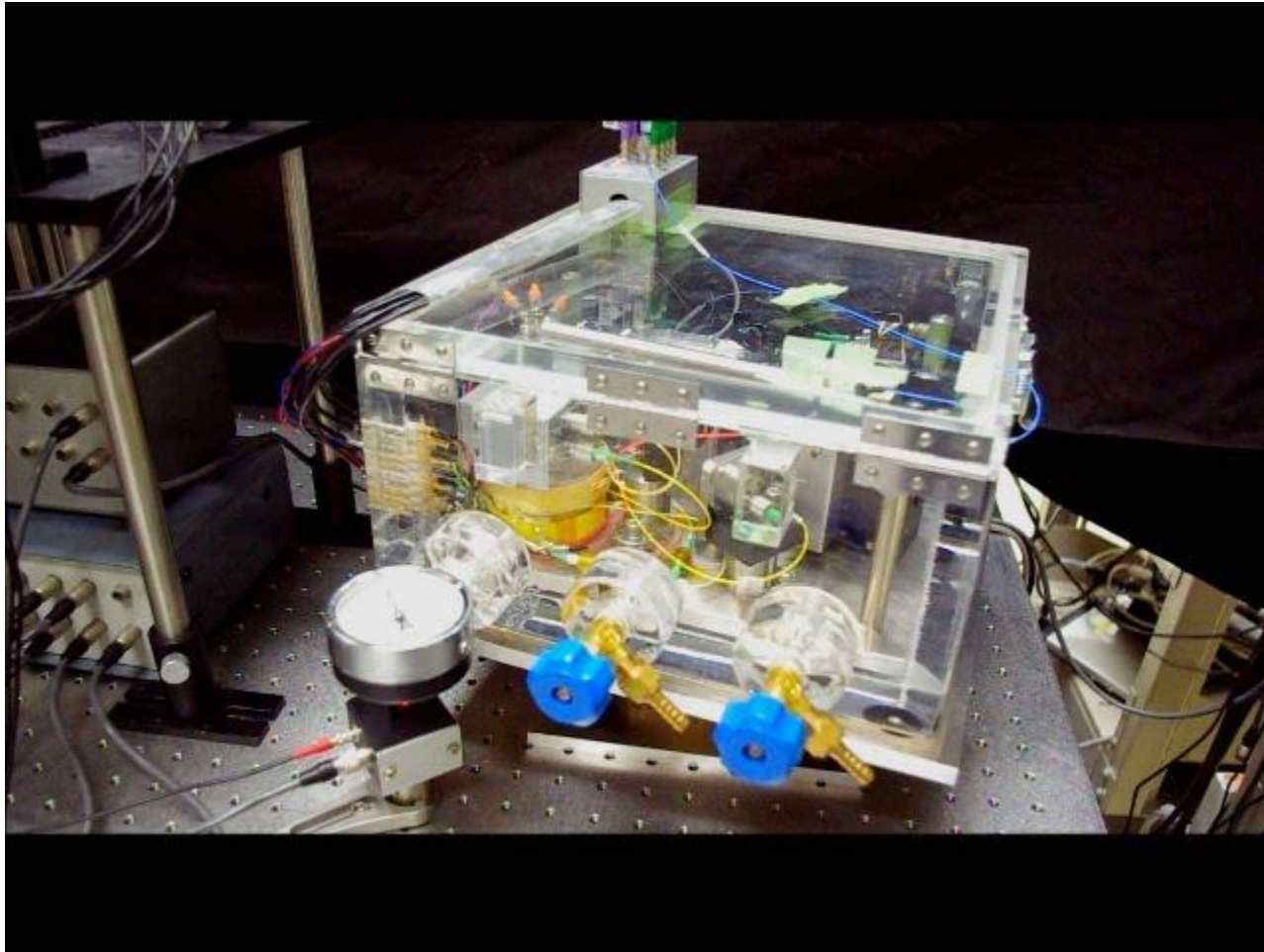
回転の流れ

- 回転速度 45 deg/sec (0.125 Hz)
- ± 390 degの正回転、逆回転を繰り返す
- 回転反転時は台形加速/減速
- 等速回転の360 deg分の異方性信号データを解析に用いる



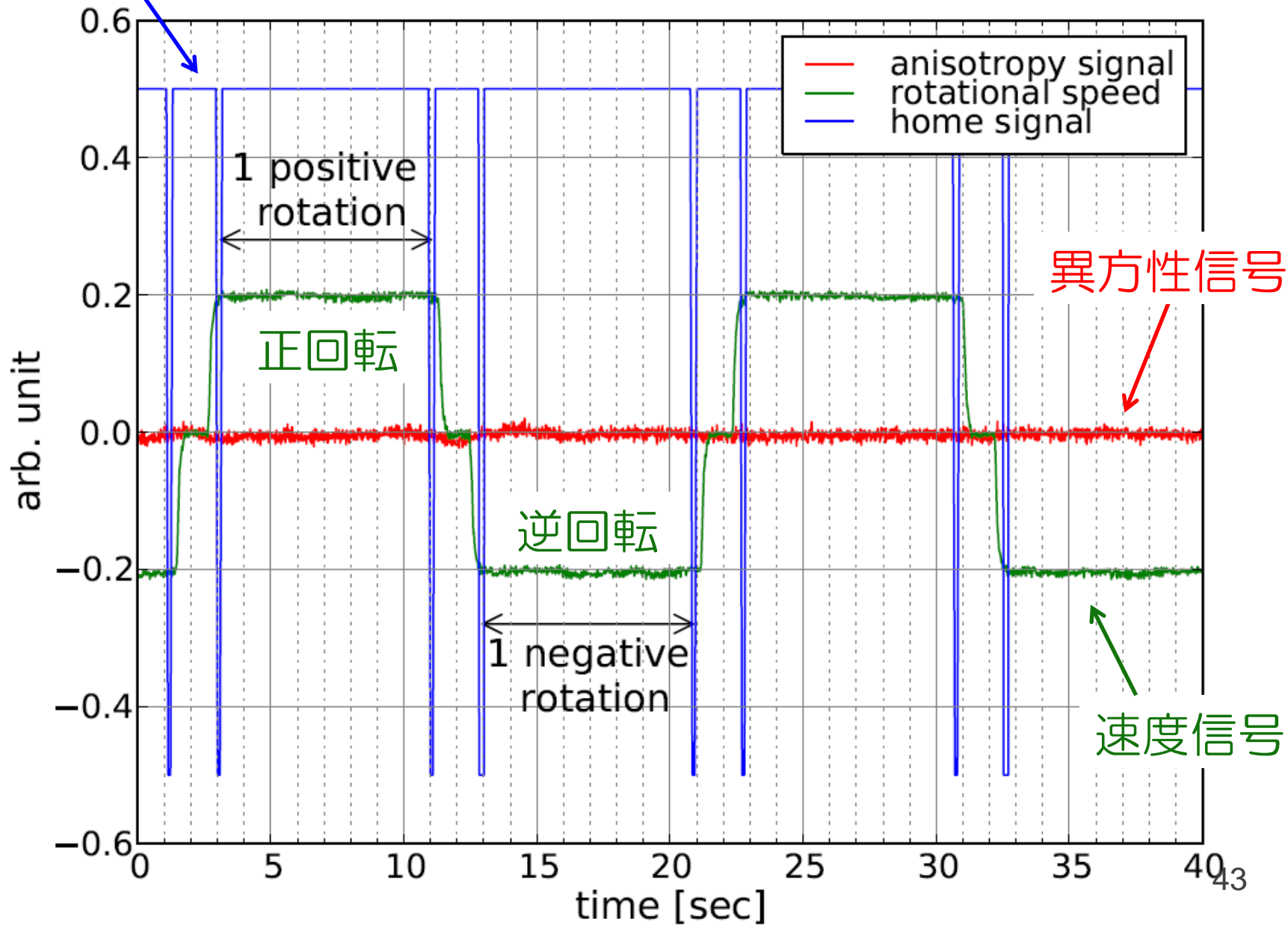
回転の様子

- 動画



生データ

原点通過信号



4. データ解析

[第5章]

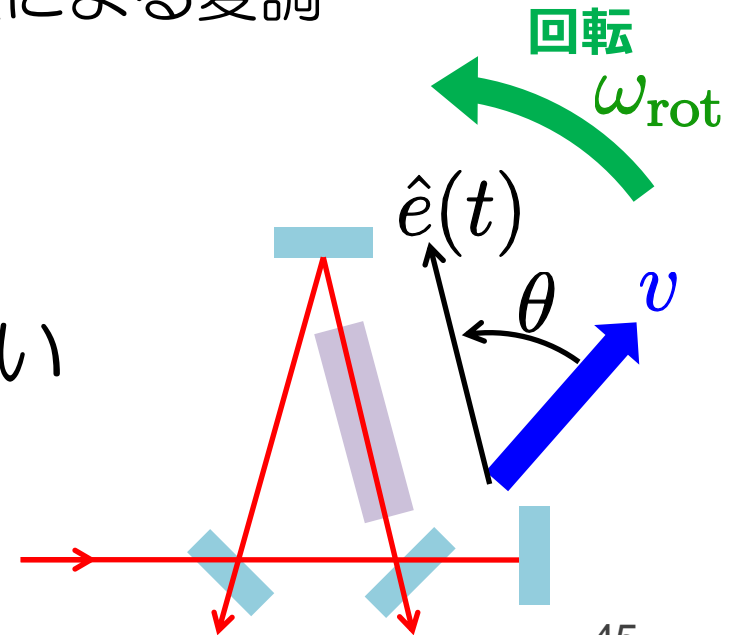
異方性信号

- 反時計回りと時計回りの共振周波数の差

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{4(n-1)d}{L+(n-1)d}(\alpha+1/2)v\cos\theta$$

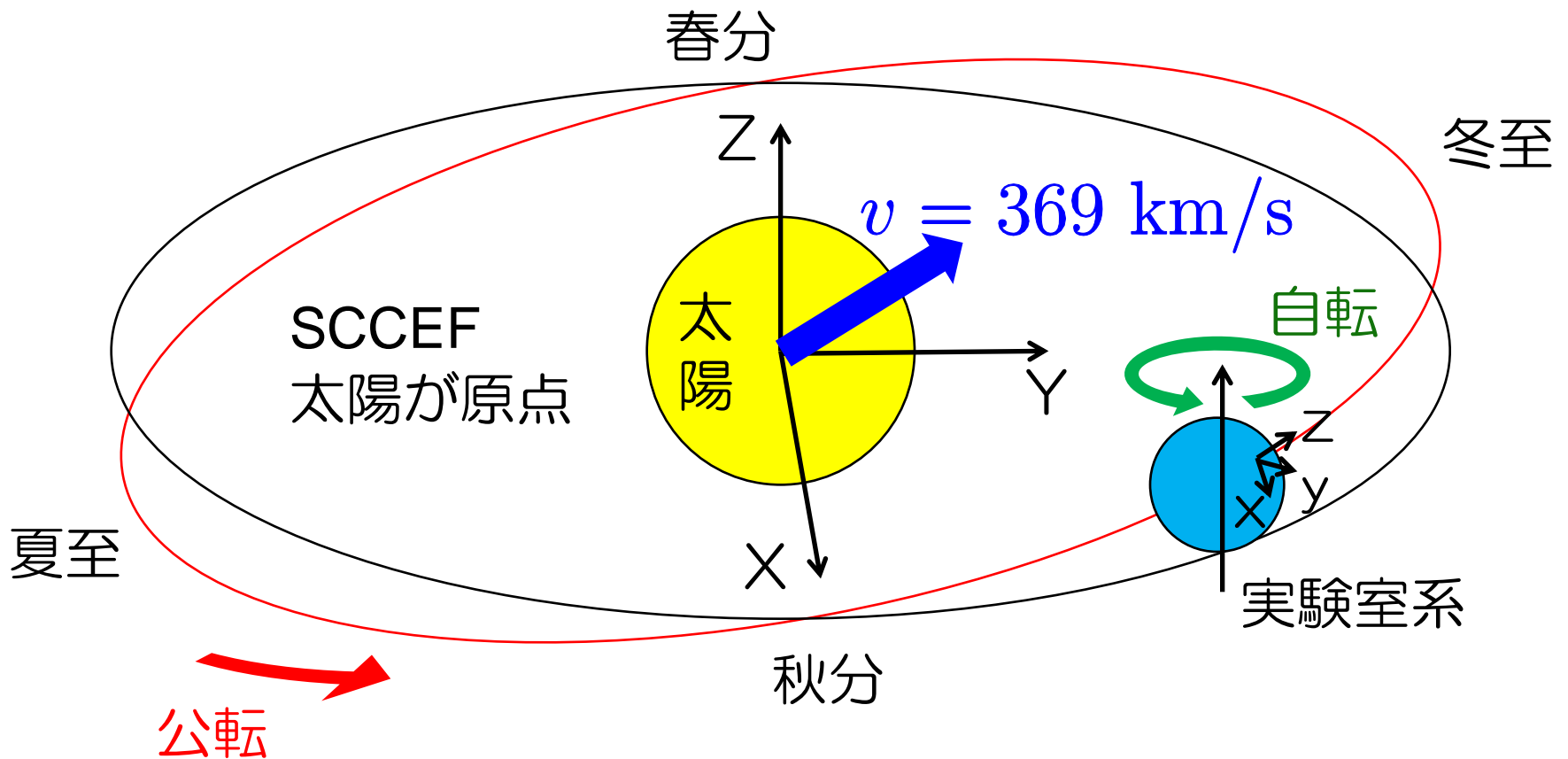
回転台の回転+地球自転による変調

- 自転の影響の無い系で考えたい



SCCEF

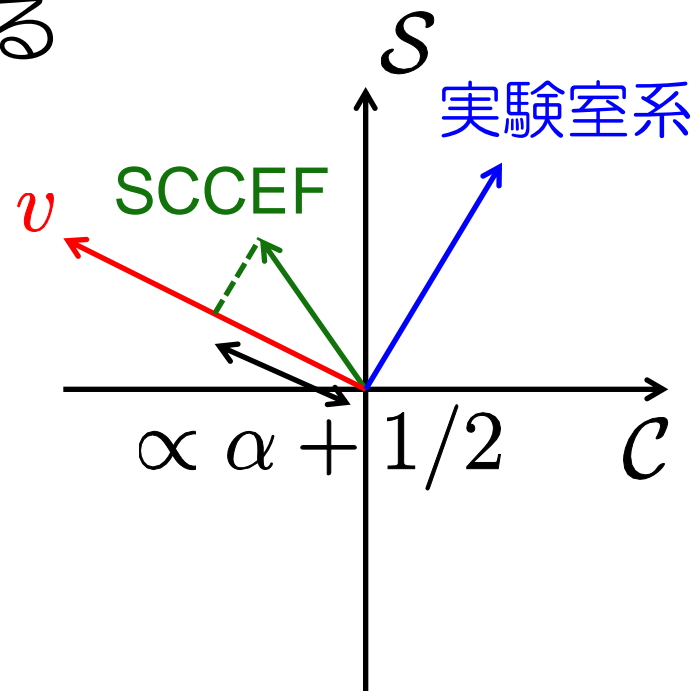
- Sun centered celestial equatorial frame
- CMB静止系に対して(ほぼ)一定速度で運動



解析の基本的な流れ

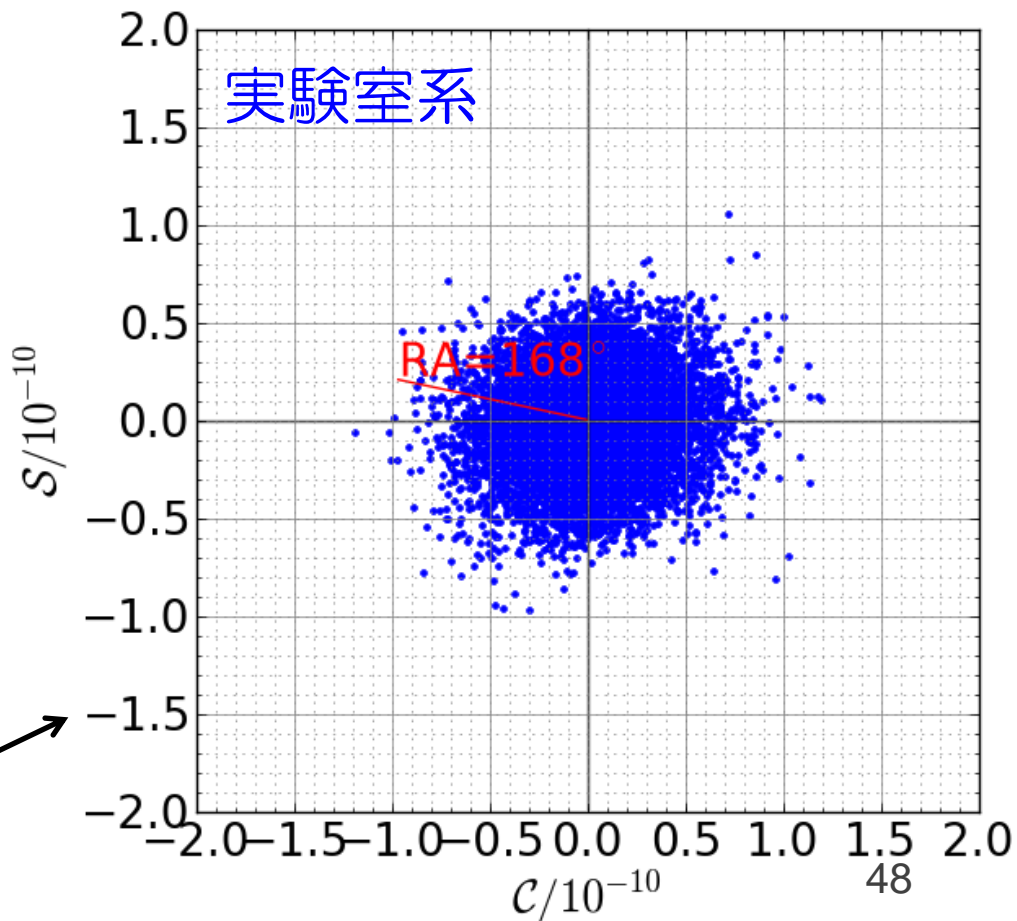
- 異方性信号の回転周波数におけるフーリエ振幅 (C, S) を求める
- フーリエ振幅 (C, S) から地球自転の影響を除去 (SCCEFにおけるフーリエ振幅 (C', S') に変換)
- (C', S') から $\alpha + 1/2$ を求める

- 1回転ごとに上記解析を行い、得られた各 $\alpha + 1/2$ の平均を最終的な値とする



解析結果

- 2011年11月後半の2週間に渡って、断続的に2.6万回転
- そのうち雑音レベルの低い1万回転(約1.2日分)を解析に使用

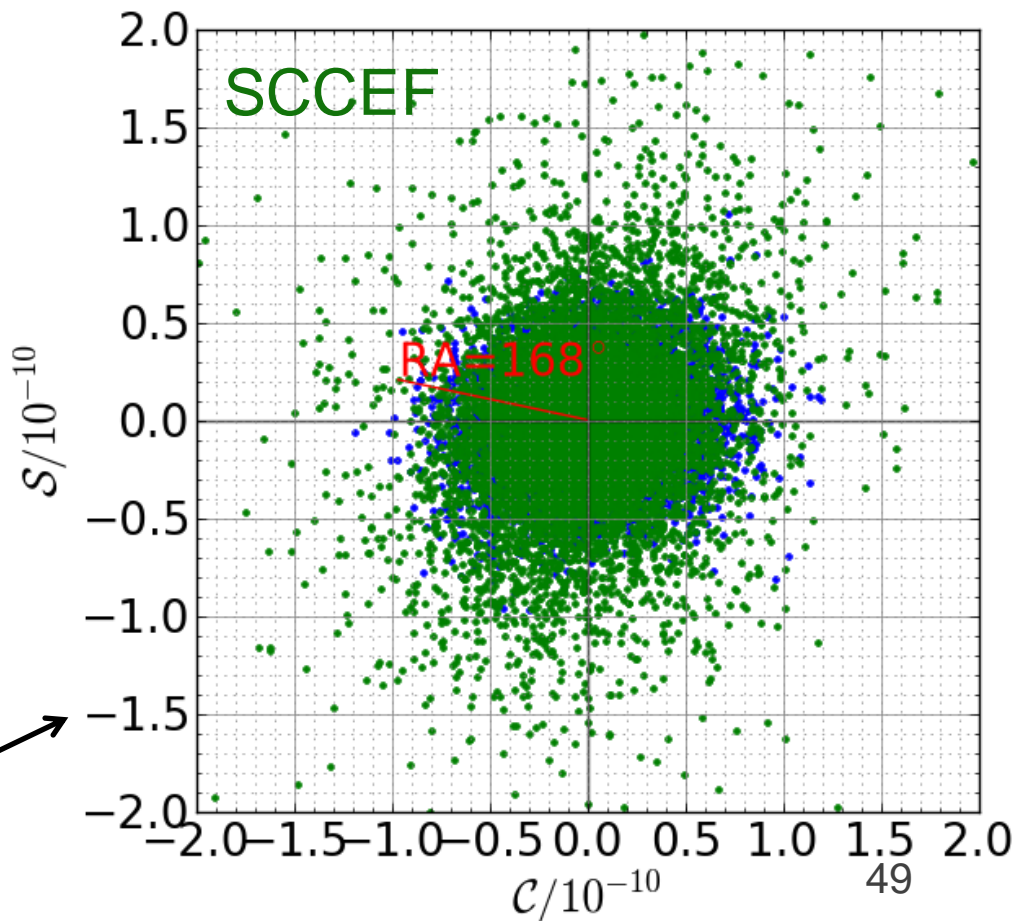


フーリエ振幅 (C, S)
1万点



解析結果

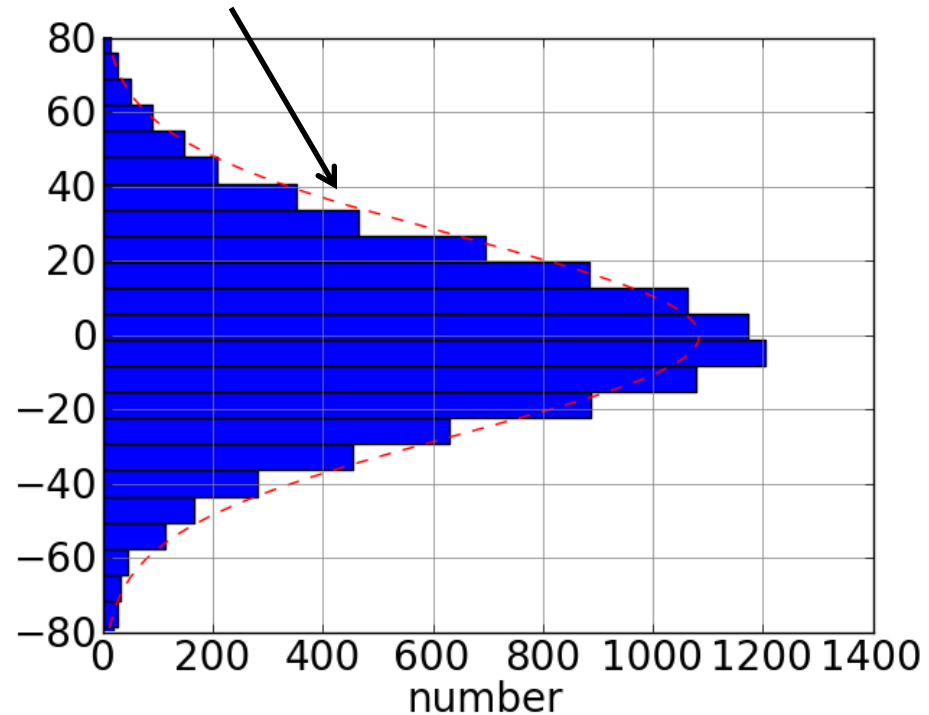
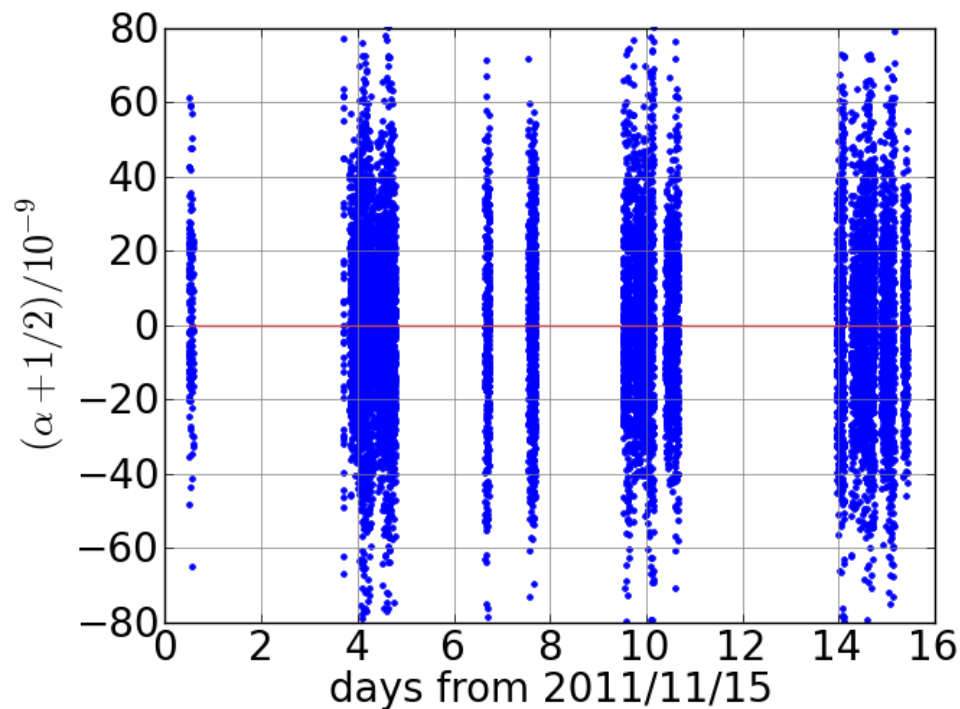
- 2011年11月後半の2週間に渡って、断続的に2.6万回転
- そのうち雑音レベルの低い1万回転(約1.2日分)を解析に使用
- 原点を中心に分布



フーリエ振幅 (C', S')
1万点

得られた上限値

- 得られた $\alpha + 1/2$ のヒストグラム



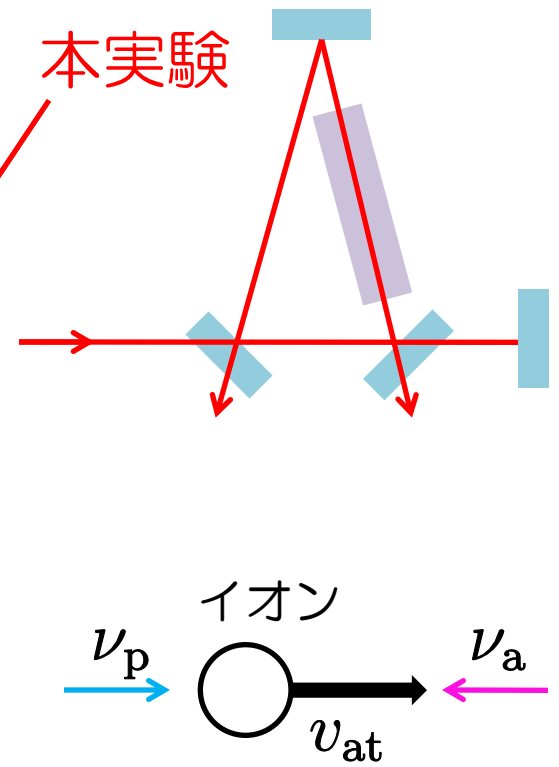
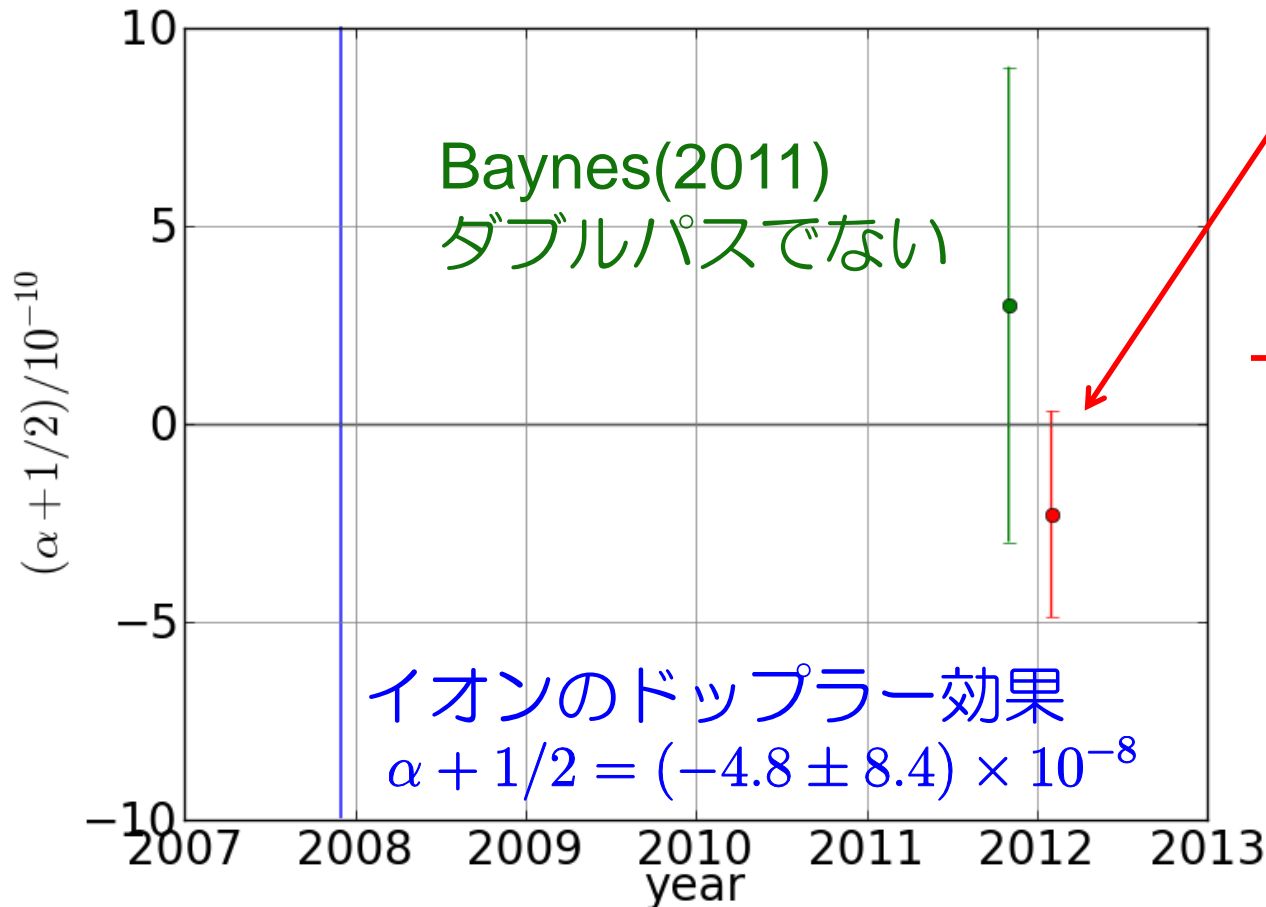
→ $\alpha + 1/2 = (-2.3 \pm 2.6) \times 10^{-10}$

統計誤差 (1σ)

過去の測定との比較

- これまでの上限値を2倍以上更新！

$$\alpha + 1/2 = (-2.3 \pm 2.6) \times 10^{-10}$$



拡張標準理論における解析

- 近年よく用いられている別の検証理論
素粒子の標準理論の検証
- 光子のLorentz不変性の破れを表す4つのパラメータ
に上限値

$$\tilde{\kappa}_{o+}^{YZ} = (1.1 \pm 0.9) \times 10^{-12}$$

$$\tilde{\kappa}_{o+}^{XZ} = (1.0 \pm 0.9) \times 10^{-12}$$

$$\tilde{\kappa}_{o+}^{XY} = (-0.4 \pm 9.4) \times 10^{-13}$$

$$\tilde{\kappa}_{tr} = (-0.1 \pm 4.2) \times 10^{-9}$$

これまでの上限値を更新！

5. 結論

[第6章]

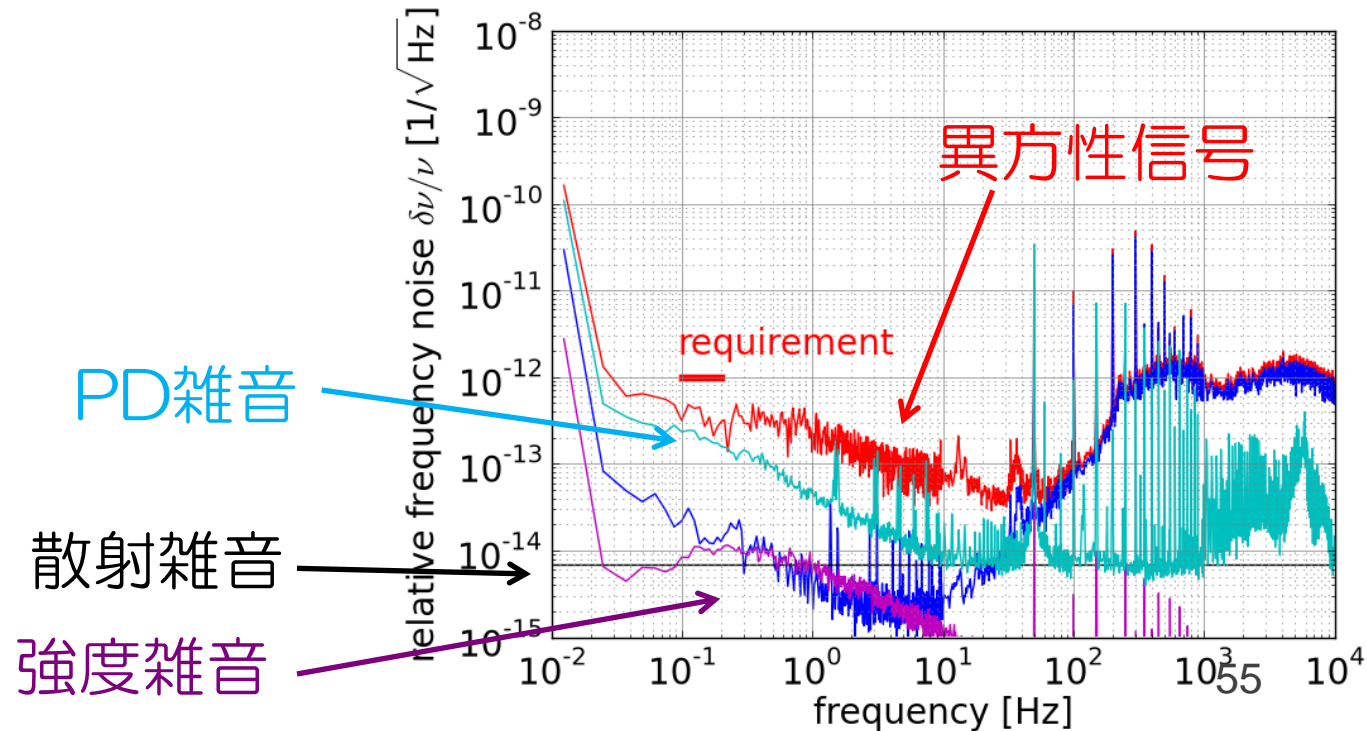
まとめ

- 特殊相対論の検証は全ての物理学にとって重要
片道光速の異方性探査
- リング共振器による新しい異方性探査装置を開発
光路の一部にシリコン
ダブルパス構成
- 約1万回転分(約1.2日分)の異方性信号データを取得
- これまでの精度より2倍以上良い、世界最高の精度
で片道光速の等方性を検証

$$\alpha + 1/2 = (-2.3 \pm 2.6) \times 10^{-10}$$

今後の研究

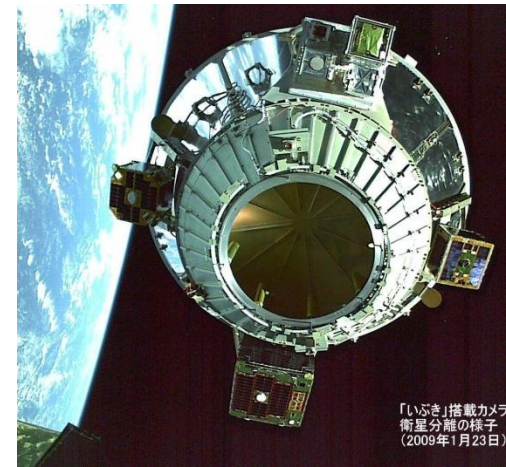
- 簡単な装置と1.2日分のデータで上限値を更新
→ ダブルパス構成の有用性を示せた
- 低雑音の光検出器の使用
レーザー光の偏波面の安定化
→ さらに1桁程度の上限值更新が可能



将来性

- より高安定なレーザー光源の使用
強度雑音 $\delta P/P = 3 \times 10^{-6} / \sqrt{\text{Hz}}$
周波数雑音 $\delta \nu/\nu = 3 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$
 - 本格的な回転機構
低回転速度変動 $\delta \omega_{\text{rot}} = 10^{-4} \text{ rad/sec} / \sqrt{\text{Hz}}$
低振動レベル
連続回転
 - 1年間の測定
- ← スピン衛星への搭載
連続回転
回転軸の最適化

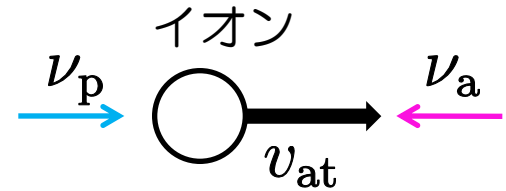
→ 既存の技術で、
さらに4桁程度の更新も可能！
 $\delta c/c \sim 10^{-17}$ の異方性探査



補足スライド

過去の実験に比べた利点

- イオンのドップラー効果(2007)
共鳴周波数の絶対値を測定する
必要あり



- 媒質入り光リング共振器実験

	Baynes (2011)	本実験
同相雑音除去	○	○
null測定	×	○
装置の回転	×	○
媒質と屈折率	UV融解石英 n=1.44	シリコン n=3.69

CWとCCWの
比較

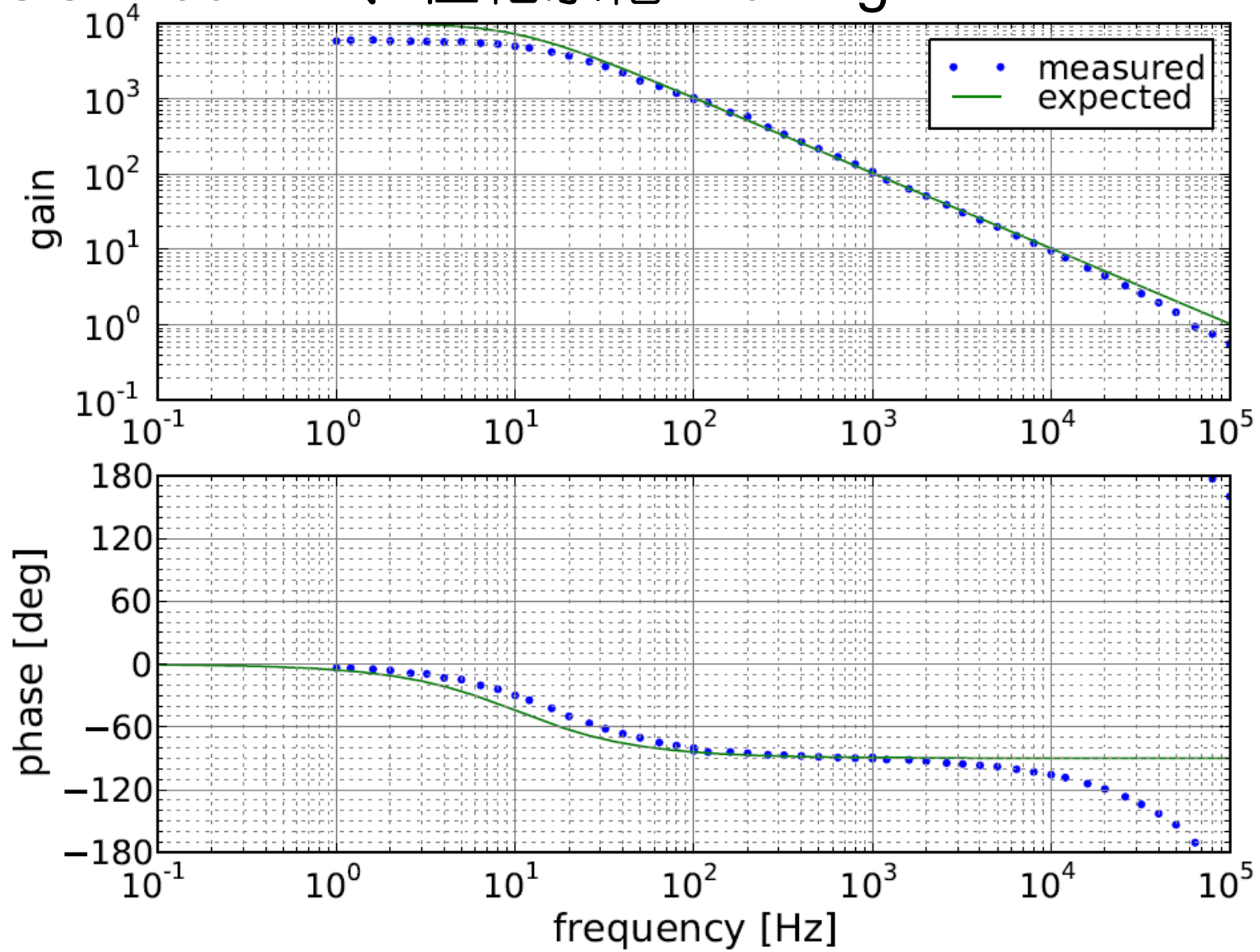
ダブルパス構成

異方性信号を
変調

屈折率大
→感度良

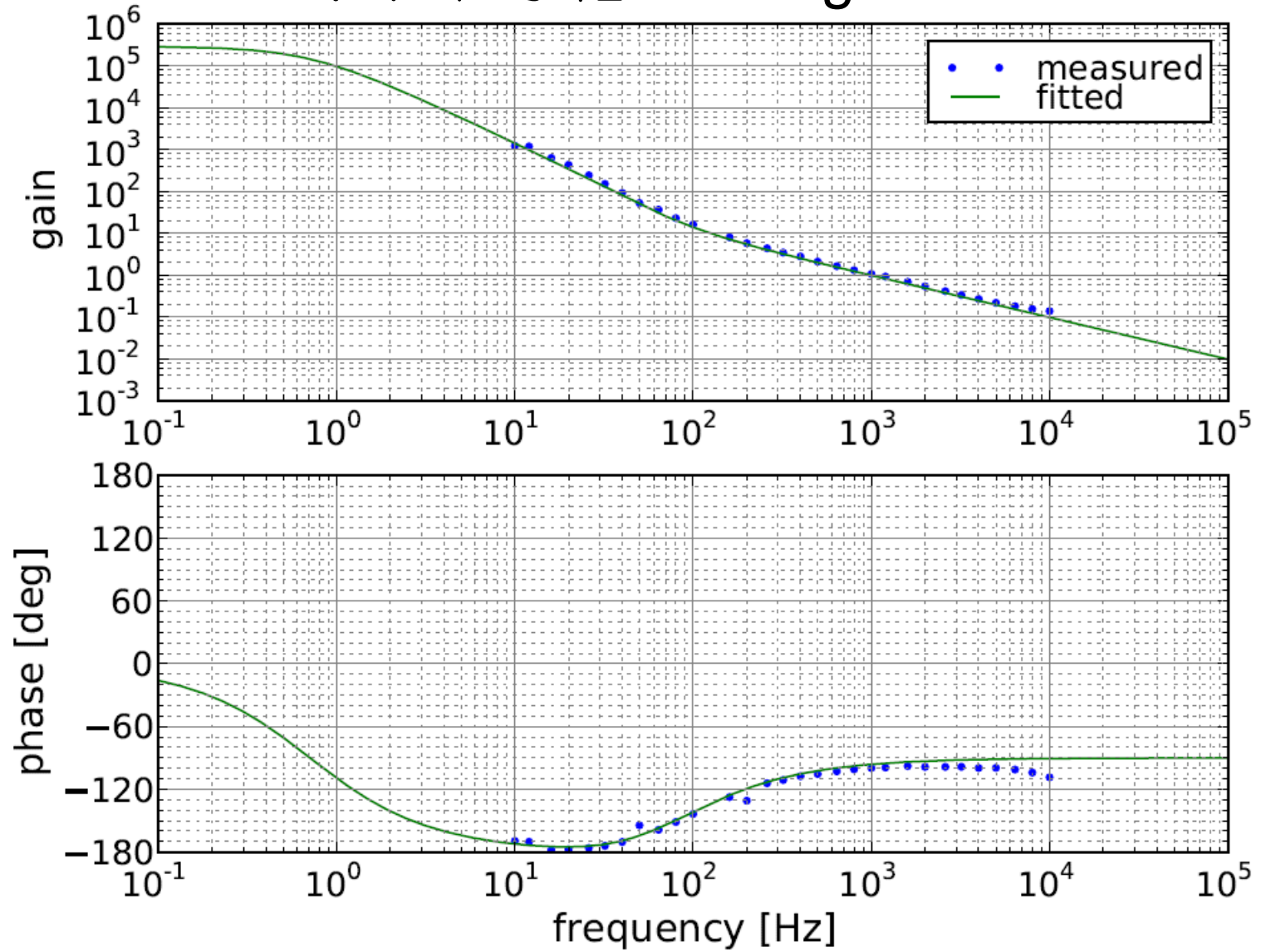
強度安定化のオープンループTF

- UGF: 60 kHz、位相余裕: 10 deg



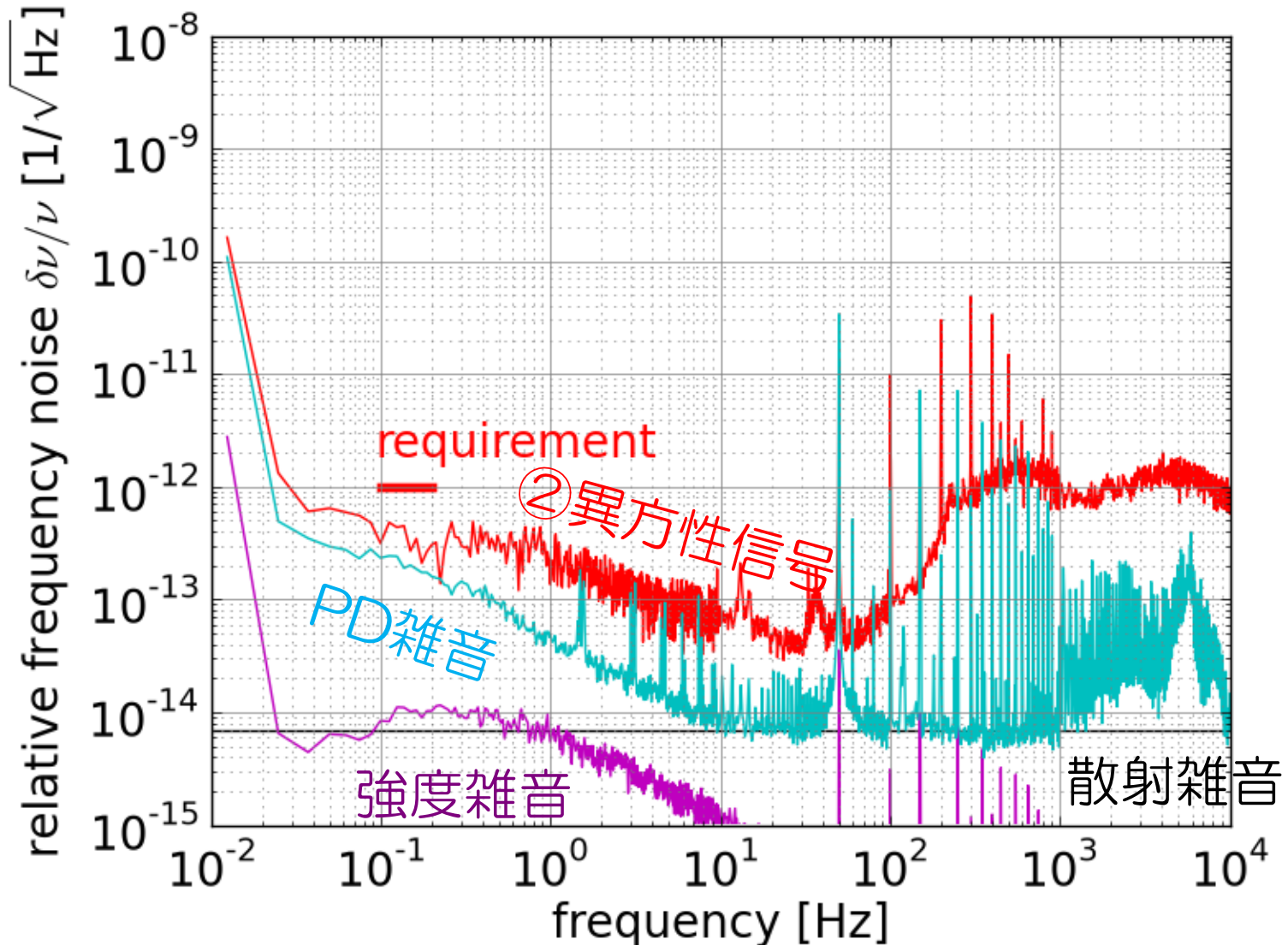
周波数ロックのオープンループTF

- UGF: 1 kHz、位相余裕: 80 deg



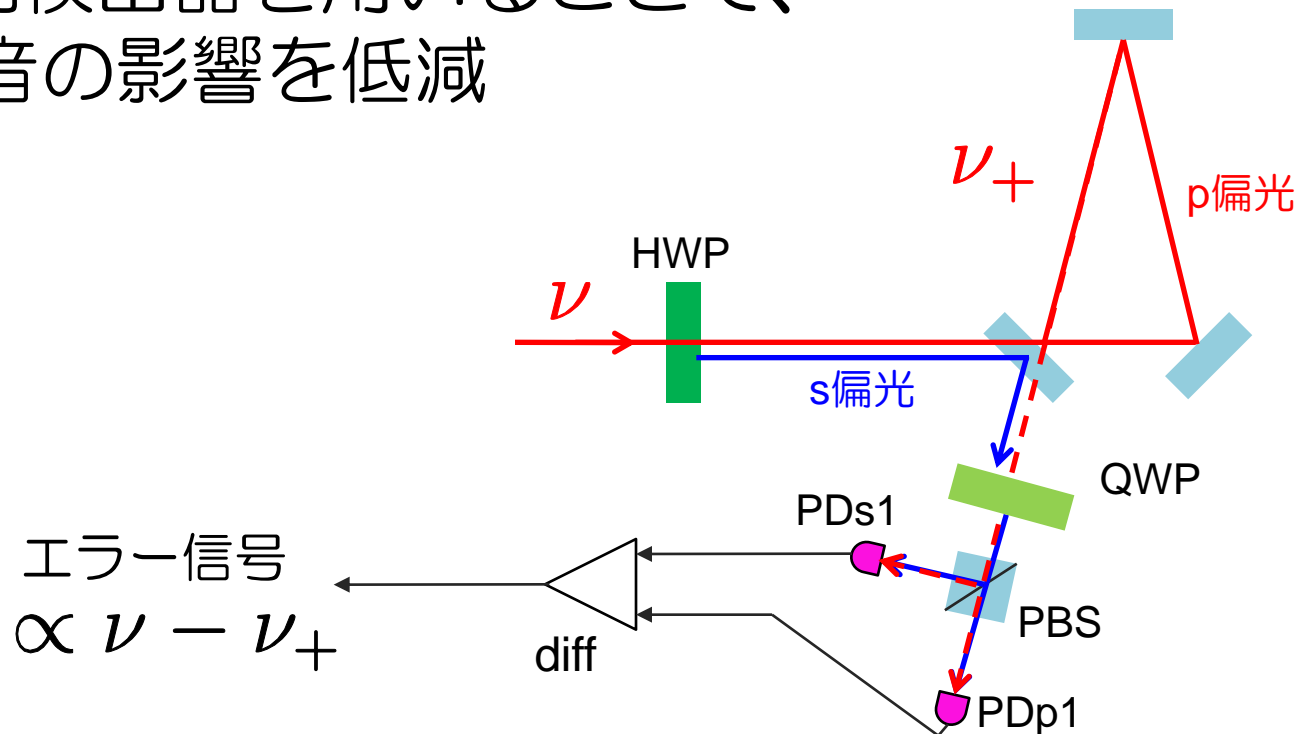
異方性信号への各種雑音

- 光検出器の雑音十何か(おそらく偏光ドリフト)



偏光解析法の原理

- 三角形リング共振器の偏光選択性を利用
p偏光が共振時はs偏光が非共振
- 反射光に含まれるs偏光とp偏光の干渉から、
共振周波数と入射光周波数の差がわかる
- 2つの光検出器を用いることで、
強度雑音の影響を低減



異方性信号とフーリエ振幅

- 異方性信号を内積で

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{4(n-1)d\nu}{L+(n-1)d}$$

$$(\alpha + 1/2)R\hat{\nu}$$

$$\cdot \begin{pmatrix} \cos \omega_{\text{rot}} t \\ \sin \omega_{\text{rot}} t \\ 0 \end{pmatrix}$$

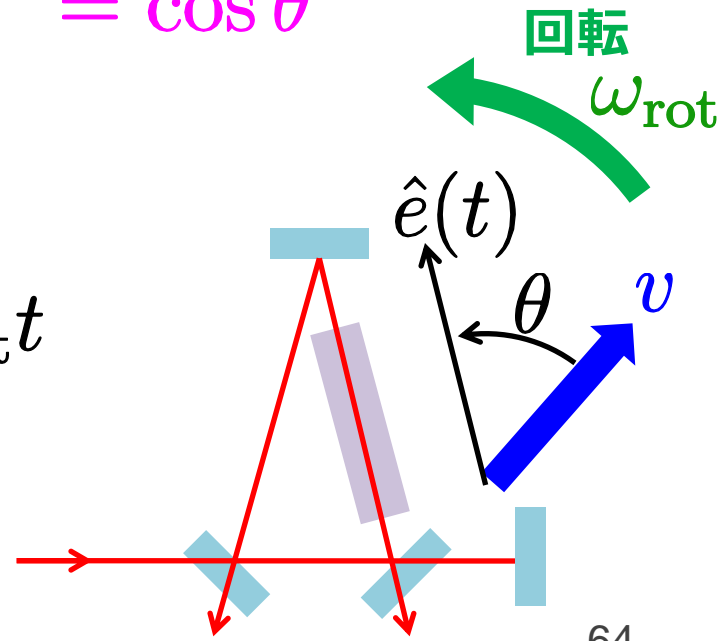
$$= \cos \theta$$

SCCEFから実験室系への座標変換

- フーリエ振幅

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = C \cos \omega_{\text{rot}} t + S \sin \omega_{\text{rot}} t$$

→ フーリエ振幅から $\alpha + 1/2$ が求まる



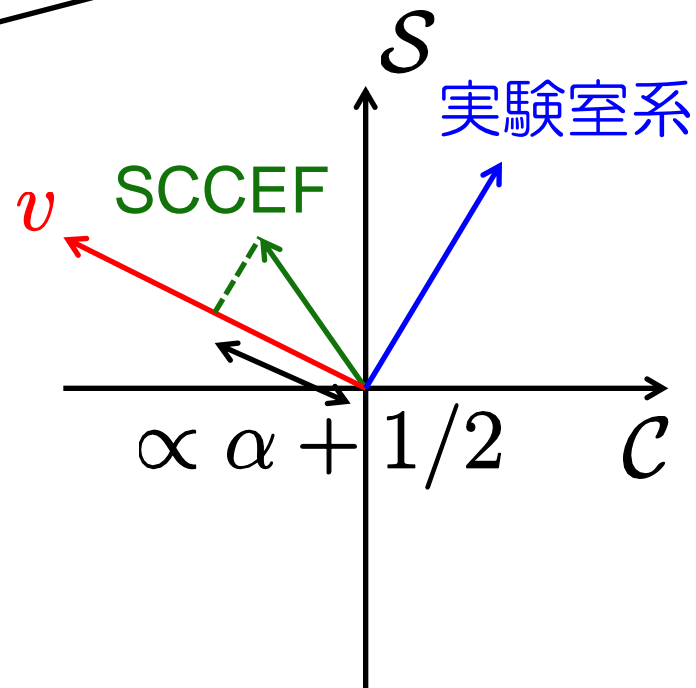
異方性信号から $\alpha+1/2$ の算出

- Q を R の2行3列成分として

$$\alpha + 1/2 = -\frac{L + (n - 1)d}{4(n - 1)d} \frac{1}{|Qv|^2} v \cdot Q^T \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c' \\ s' \end{pmatrix} = Q^T \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$$

SCCEFにおける
フーリエ振幅のベクトル
これの v 方向への射影が
異方性の大きさ



データ選択

- 異方性信号の出ない周波数で雑音レベルを評価
- 雑音レベルの大きい回転は解析に用いない

