

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

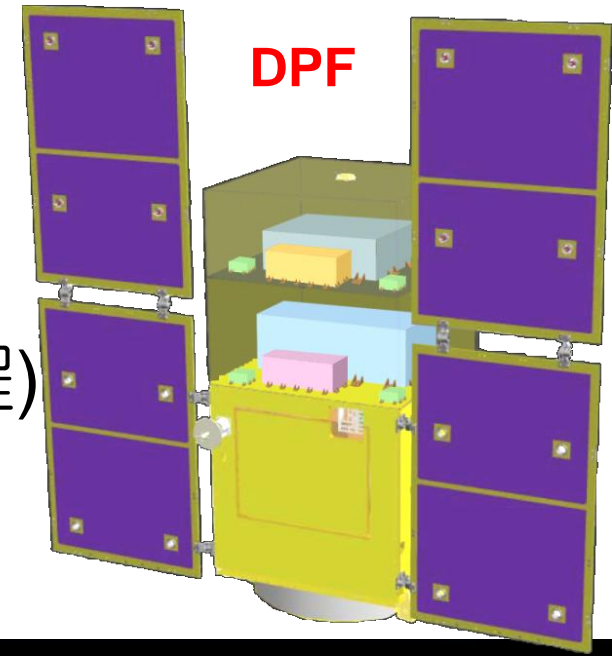
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

坪野研究室 修士課程2年

自己紹介

- 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 (4月から博士課程)

- 重力波・相対論実験
 - 小型重力波観測衛星
DECIGO Pathfinder
プロトタイプ干渉計実験
 - 大型低温重力波望遠鏡
KAGRA (LCGT)
鏡の姿勢制御系の設計
 - 光速の異方性探査

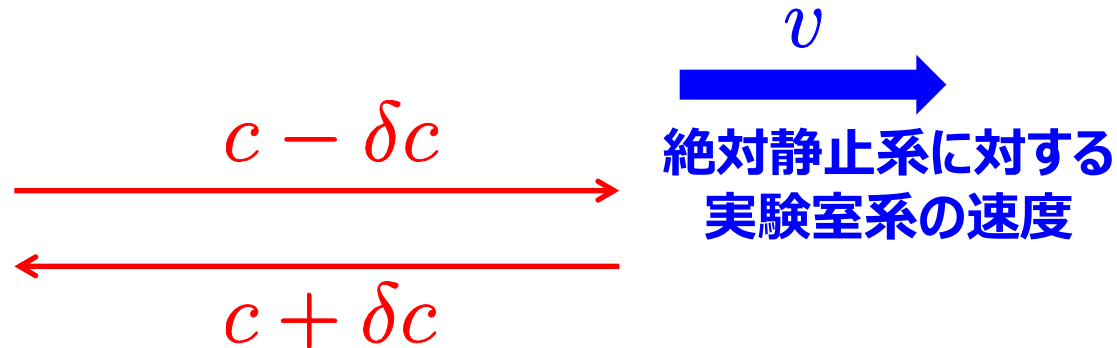


概要

- 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

動機、特殊相対論の検証理論(MS理論)
過去の検証実験

2. 測定原理

原理、過去の検証実験との比較
目標感度、雑音

3. 実験装置

強度安定化、リング共振器、回転機構

4. データ解析

解析方法、解析結果

5. 結論

まとめ、今後の研究

1. 研究背景

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

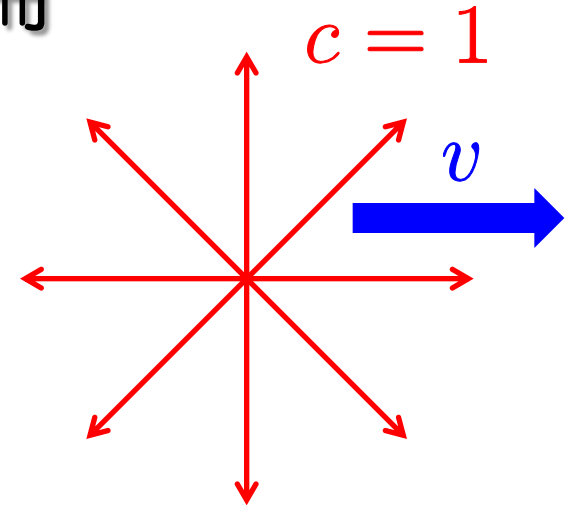
- どの慣性系においても物理法則は不変

- 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

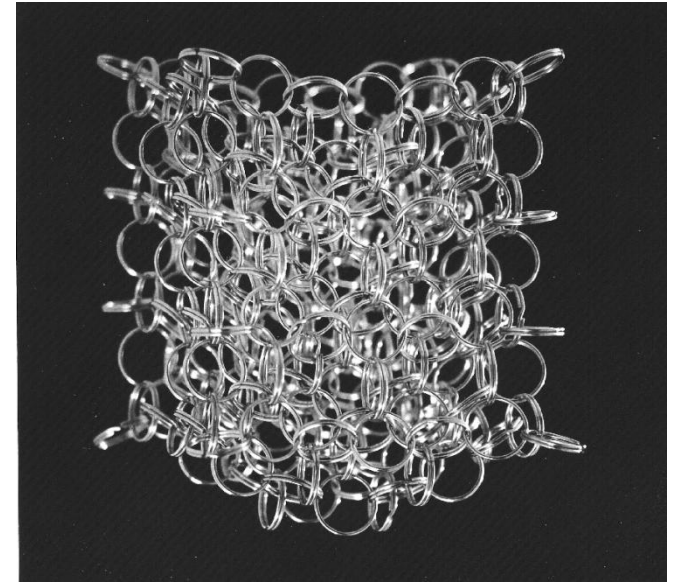
- 一度も「破れ」は見つかっていない

→全ての物理学の基礎



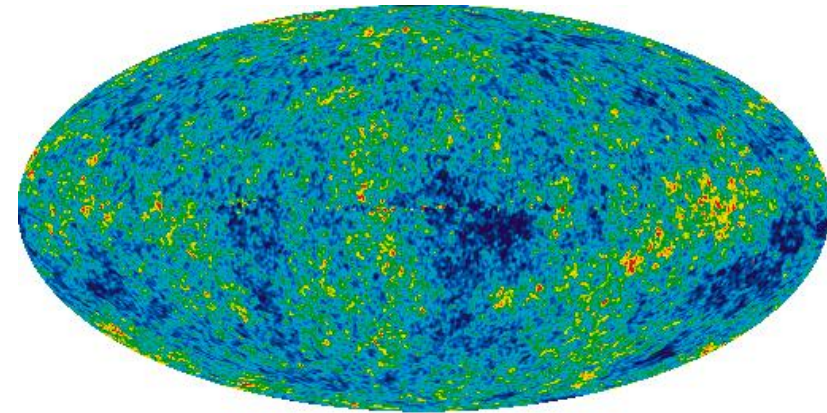
Lorentz不変性の破れ

- 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
異方性の双極子成分が
ゼロになるCMB静止系
= 絶対静止系かも？

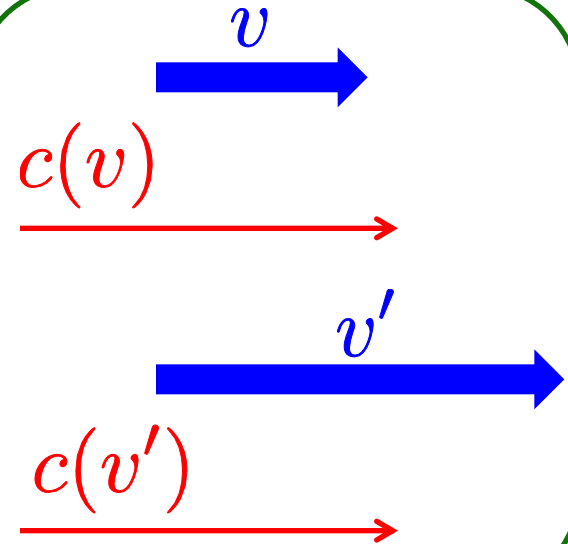
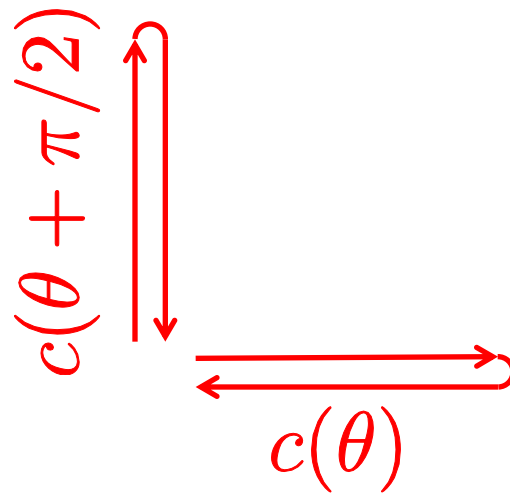
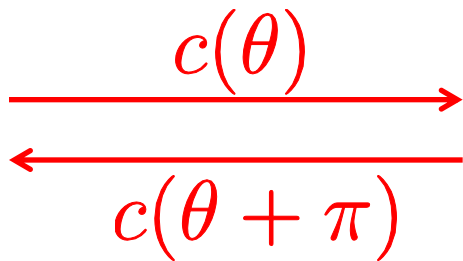


http://en.wikipedia.org/wiki/File:WMAP_2010.png

→ 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 $c \neq 1$

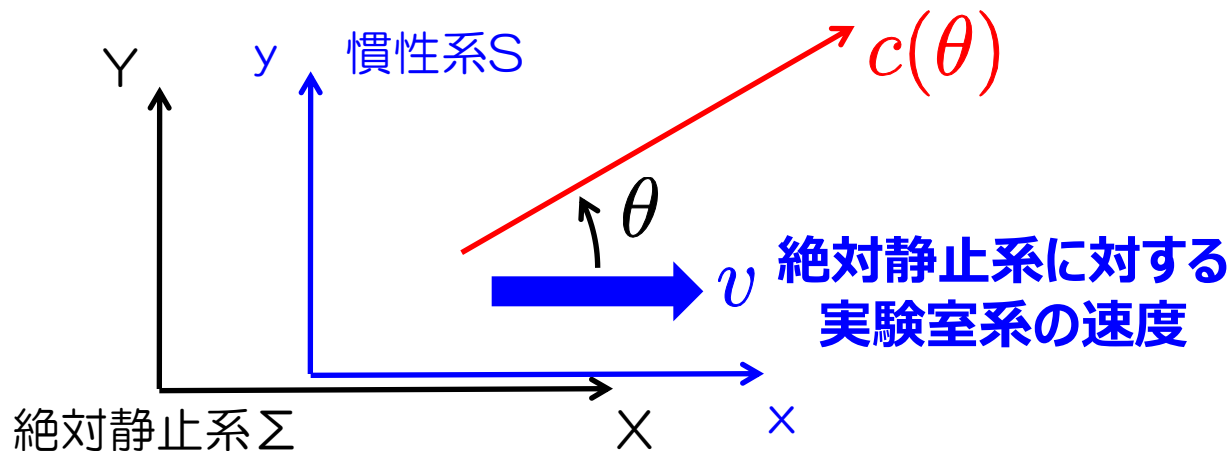
MS理論における光速

- Σ に対して v で動いている慣性系Sでは

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

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

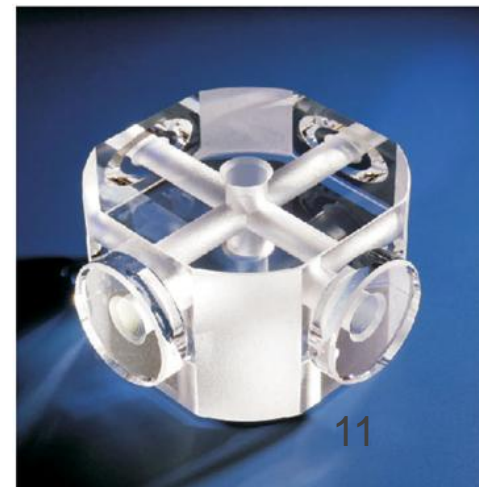
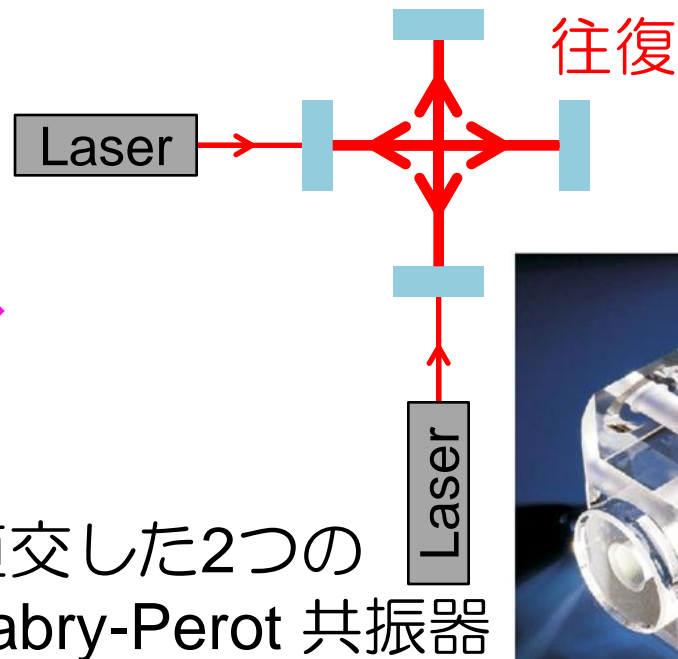
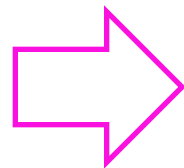
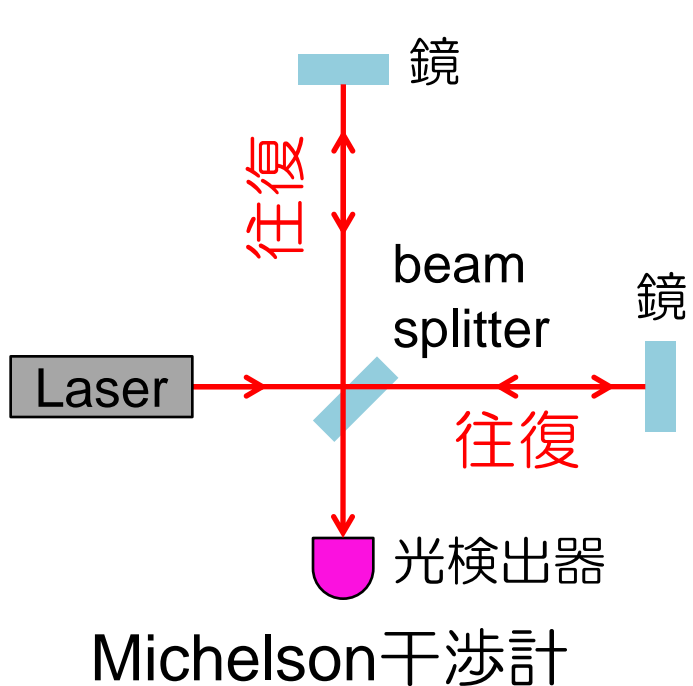
$$- (\alpha - \beta + 1) v^2 \quad \text{光源速度への依存性}$$



過去の検証実験(往復光速)

- Michelson-Morleyの実験(1887)
Michelson干渉計を利用
- 直交した光共振器の共振周波数を比較(2009)
$$\beta - \delta + 1/2 = (-1.6 \pm 6 \pm 1.2) \times 10^{-12}$$

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



過去の検証実験(片道光速)

- Ives-Stilwellの実験(1938)
イオンのDoppler遷移した共鳴周波数の測定
- 最新版 (2007)

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

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

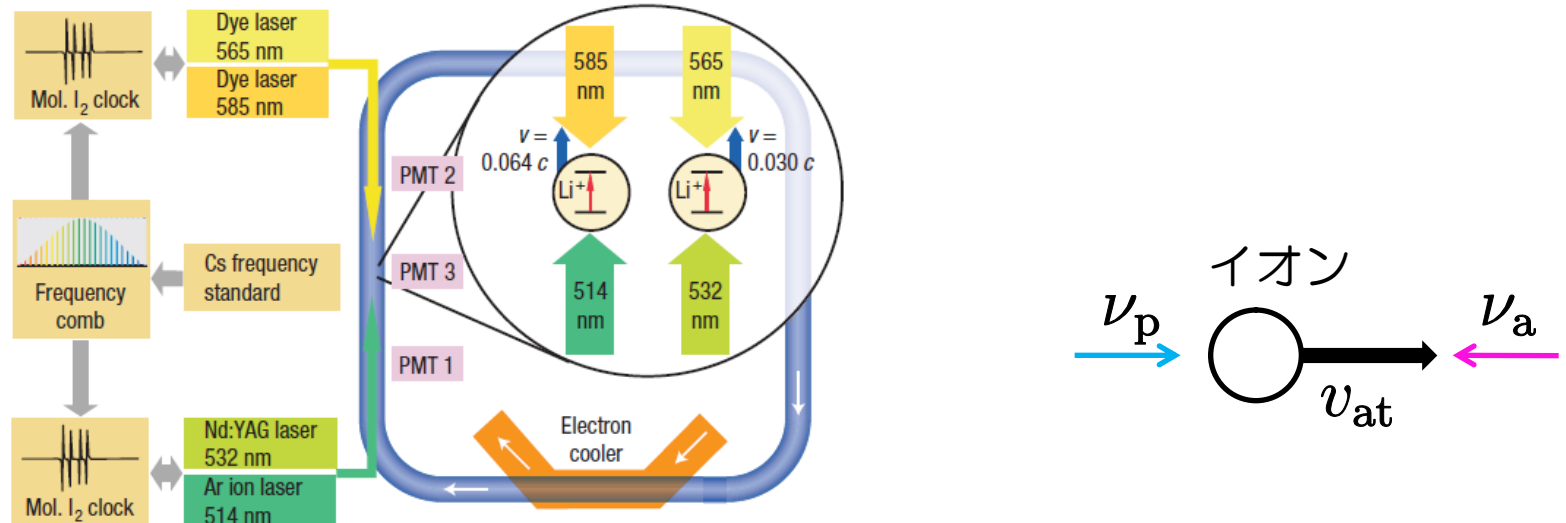


Figure 1 Schematic diagram of the TSR. Li^+ ions circulate in the 55-m-circumference ring. In the electron cooler, cold electrons are overlapped with the ions and provide cooling. The measurements at the two different velocities are carried out sequentially. In the experiment, the two lasers are coupled into the ring from the same side and are retro-reflected.

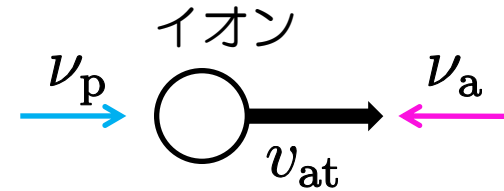
過去の検証実験まとめ

- 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

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

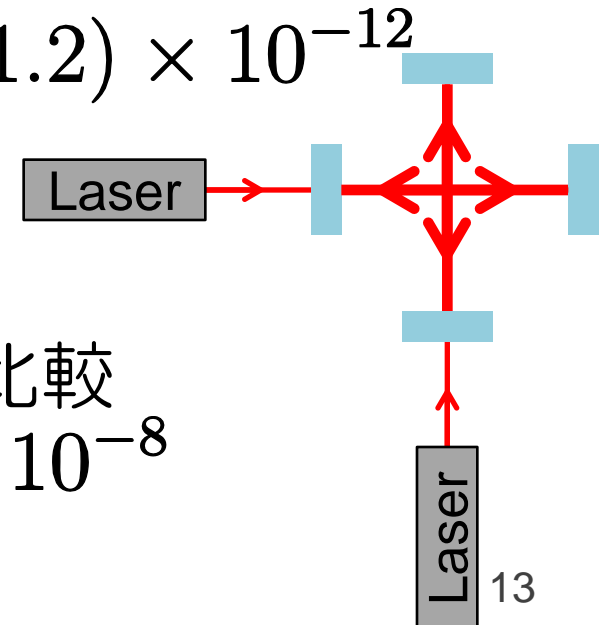
Ch. Eisele *et al.*: PRL **103** (2009) 090401.

- 光源速度への依存性

共振器とメーザーの周波数を比較

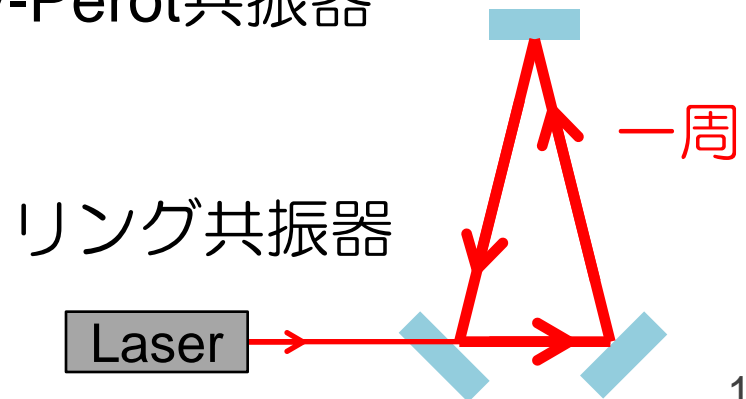
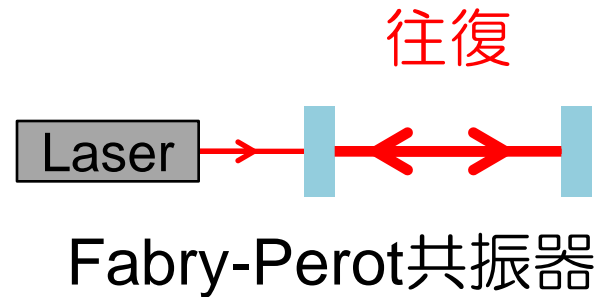
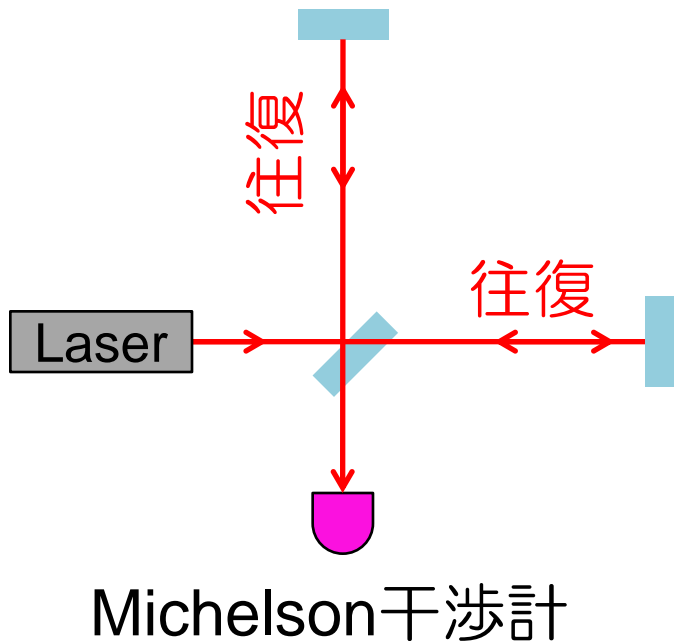
$$\alpha - \beta + 1 = (-4.8 \pm 3.7) \times 10^{-8}$$

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？



2. 測定原理

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

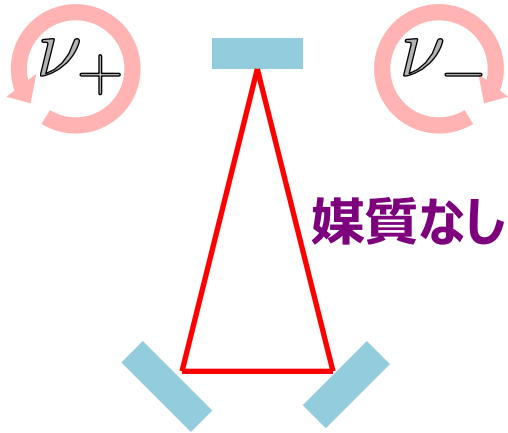
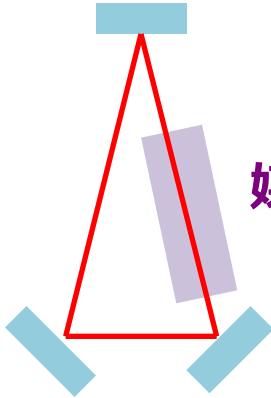
→ null測定になる

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

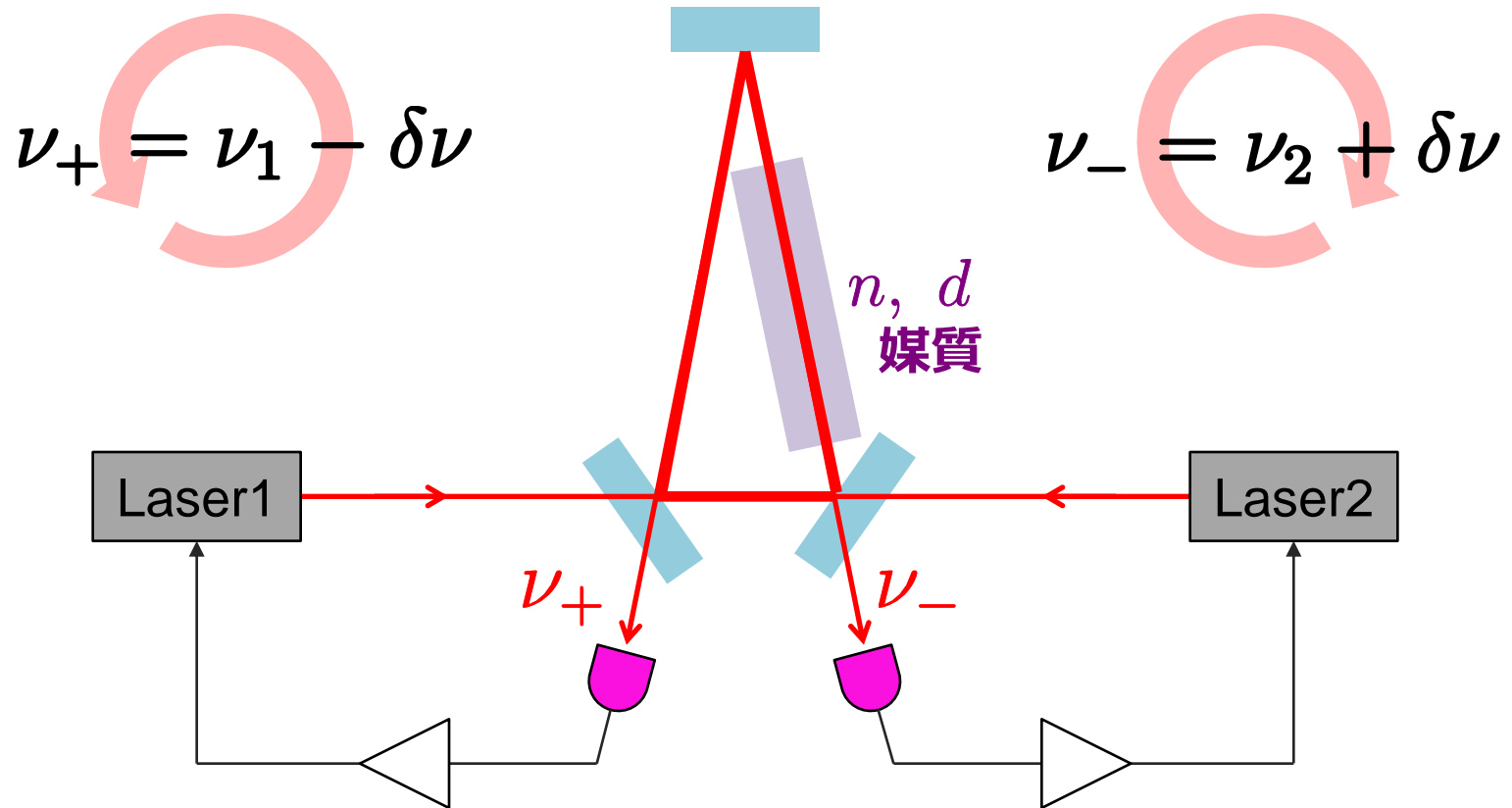
- 光路に媒質を入れる
 - 片道光速の異方性に感度を持つように

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

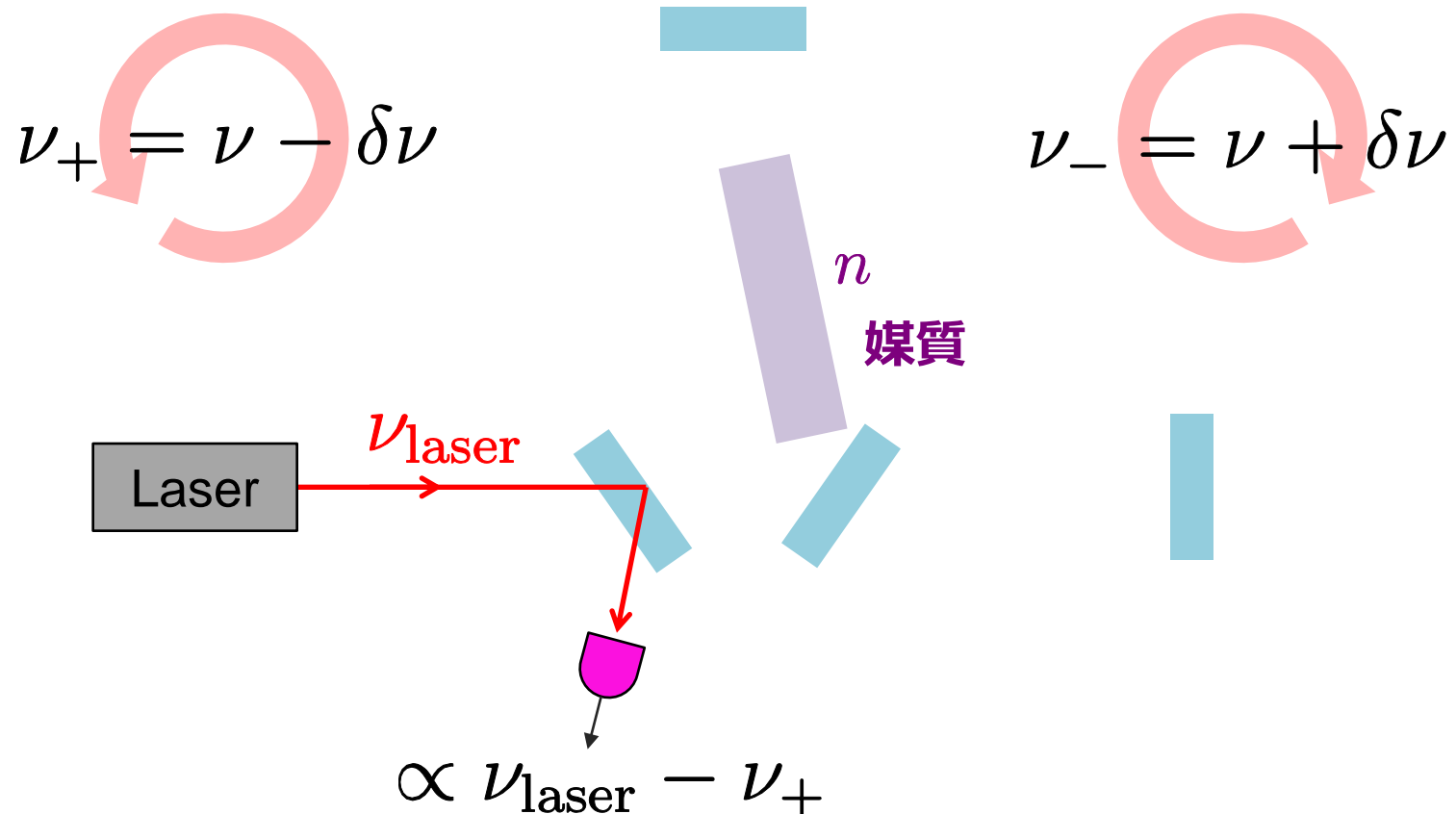
- 光路に媒質を入れる
 - 片道光速の異方性に感度を持つように

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

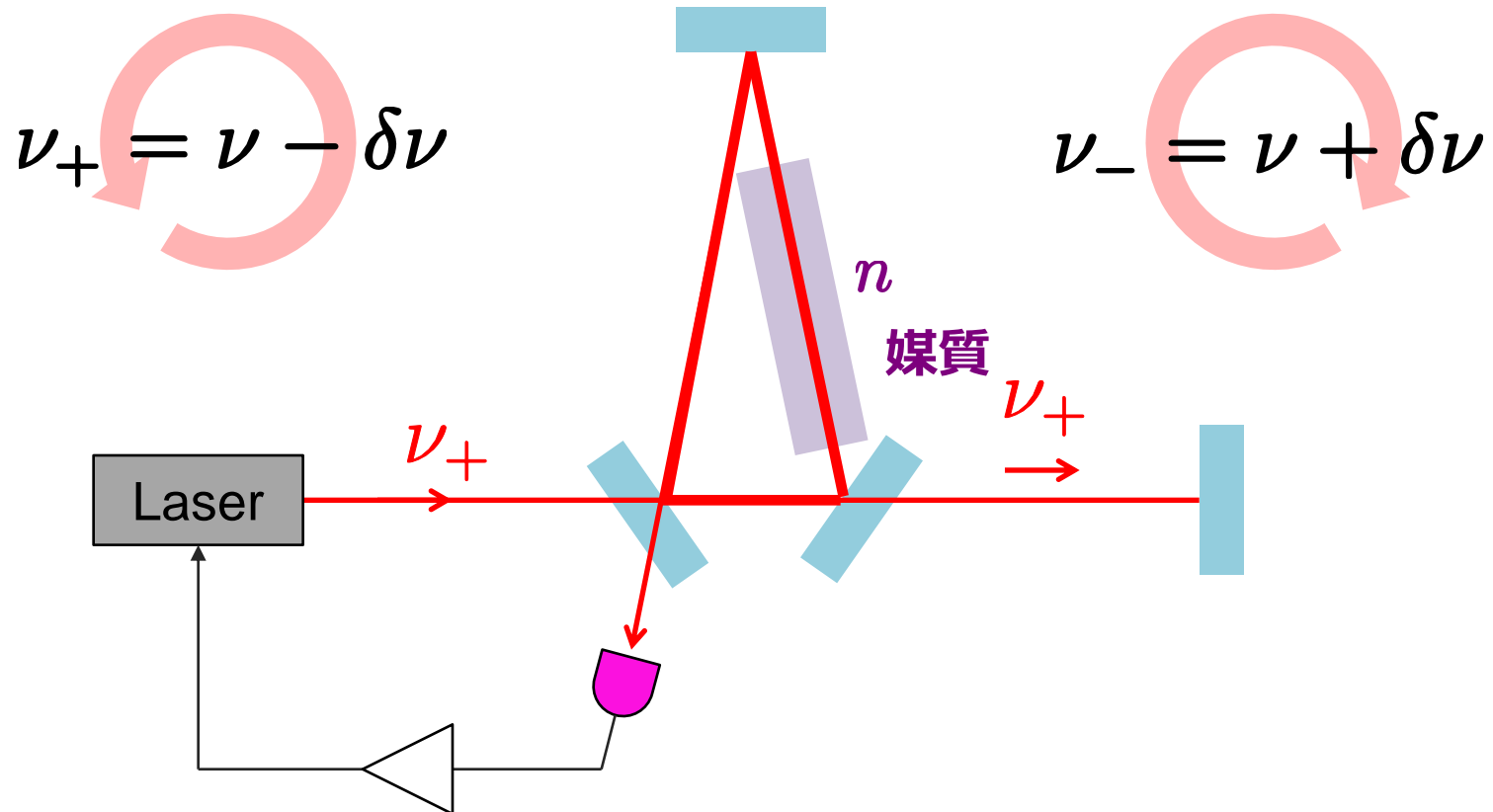
本実験の光学系構成

- 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

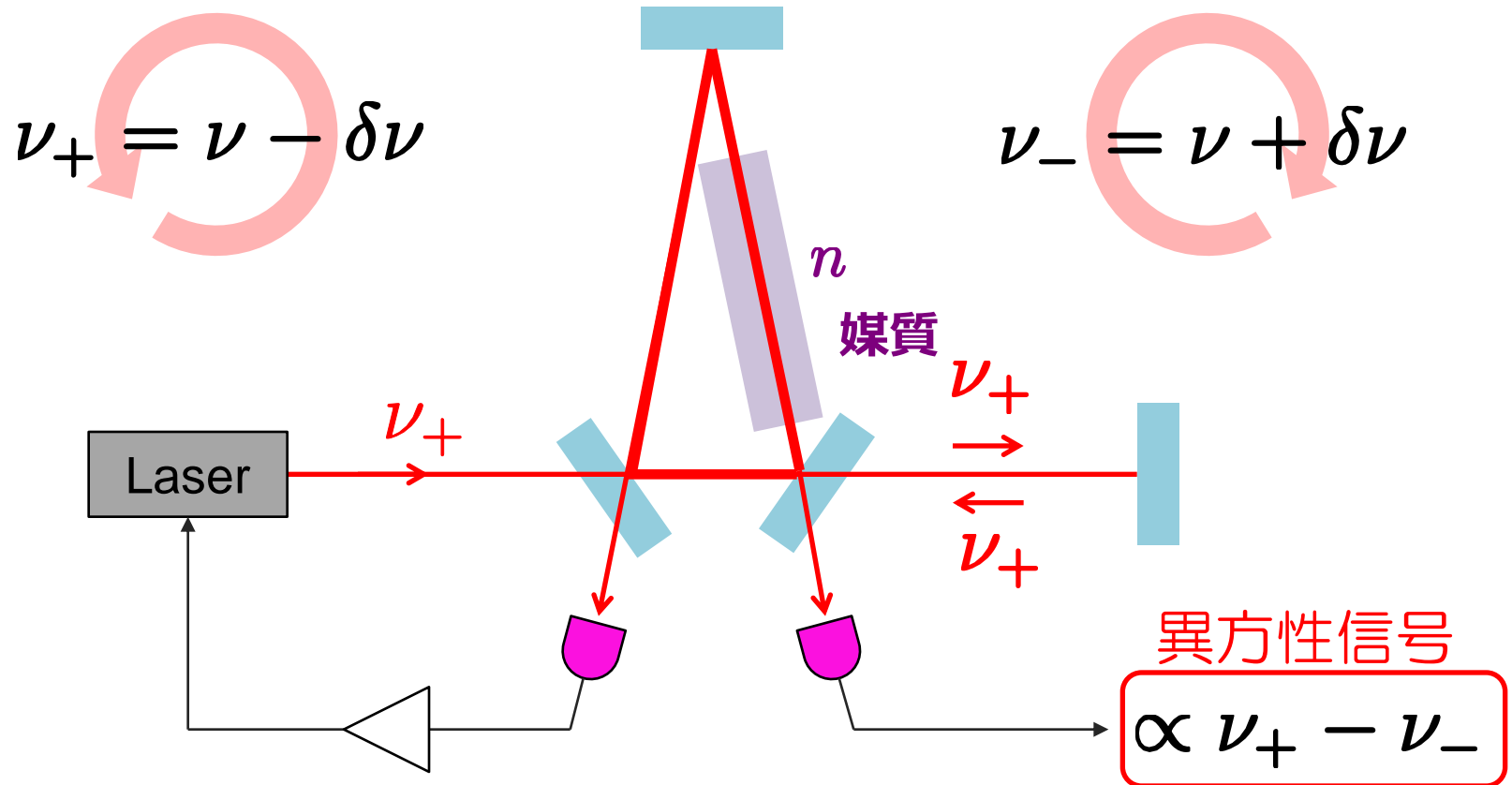
- 反時計回りの透過光を打ち返すことにより、時計回りと比較 ← **ダブルパス構成**
- もし異方性がなければ、 $\nu_+ - \nu_- = 0$ の **null実験**



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

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

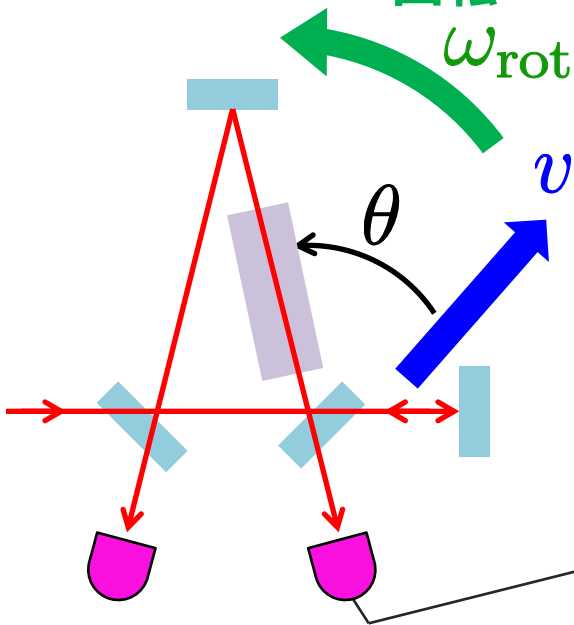
CMBに対する
実験室系の速さ
 $v \simeq 10^{-3}$

一周長

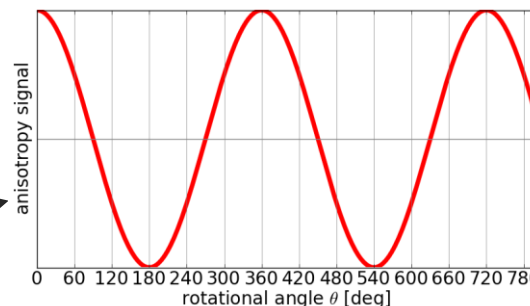
媒質長

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

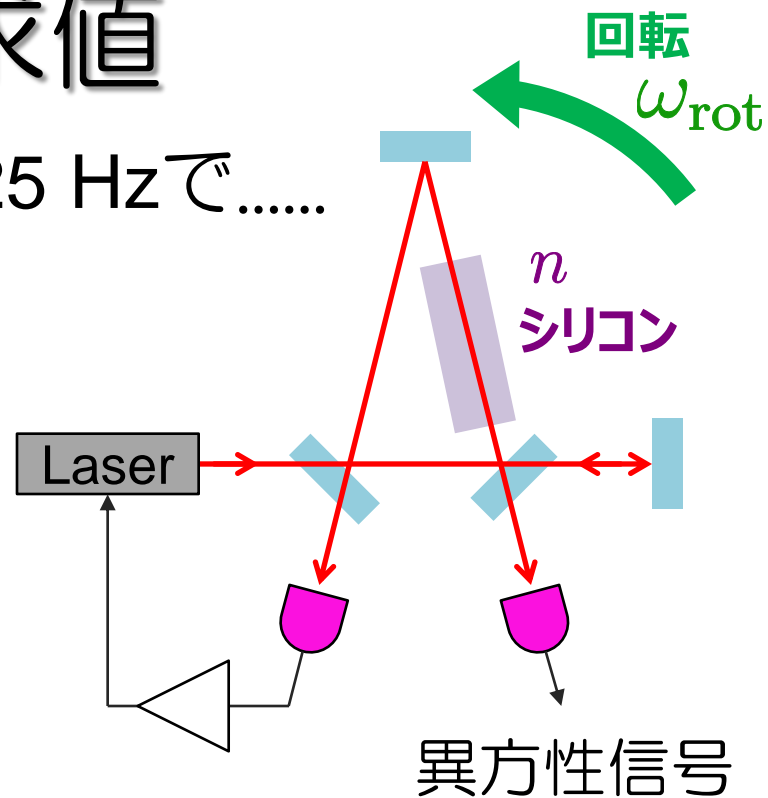
$$\frac{\delta \nu}{\nu} < 1 \times 10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}}$$

(周波数ロック)

- Sagnac効果による雑音

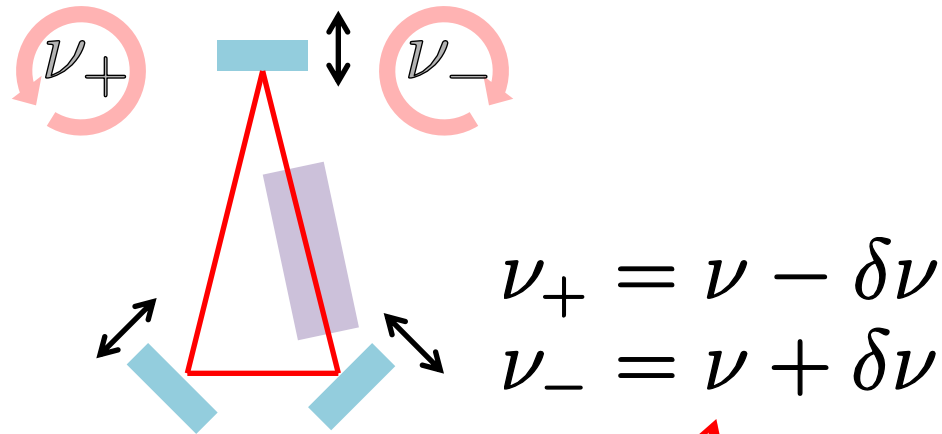
$$\delta \omega_{\text{rot}} < 3 \times 10^{-2} \text{ rad/sec} / \sqrt{\text{Hz}}$$

(回転台の回転速度制御により実現)



その他の雑音

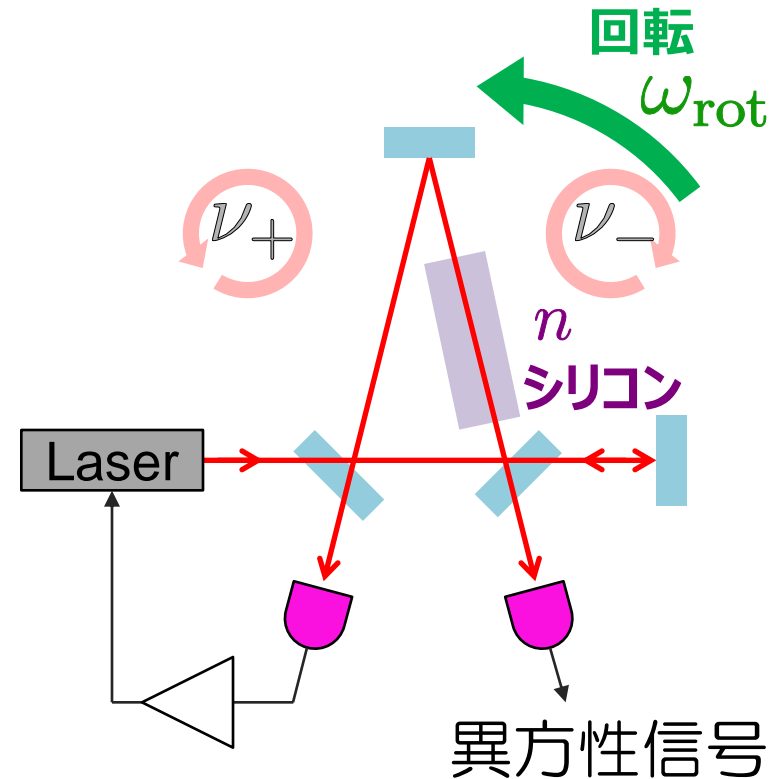
- 共振器長変動に関する雑音は全て同相雑音除去が効くため、他の共振器実験のような高真空、高レベル防振、温度制御(or低温環境)などが必要ない(驚異的な利点！)



共振器長変化しても同相で変化

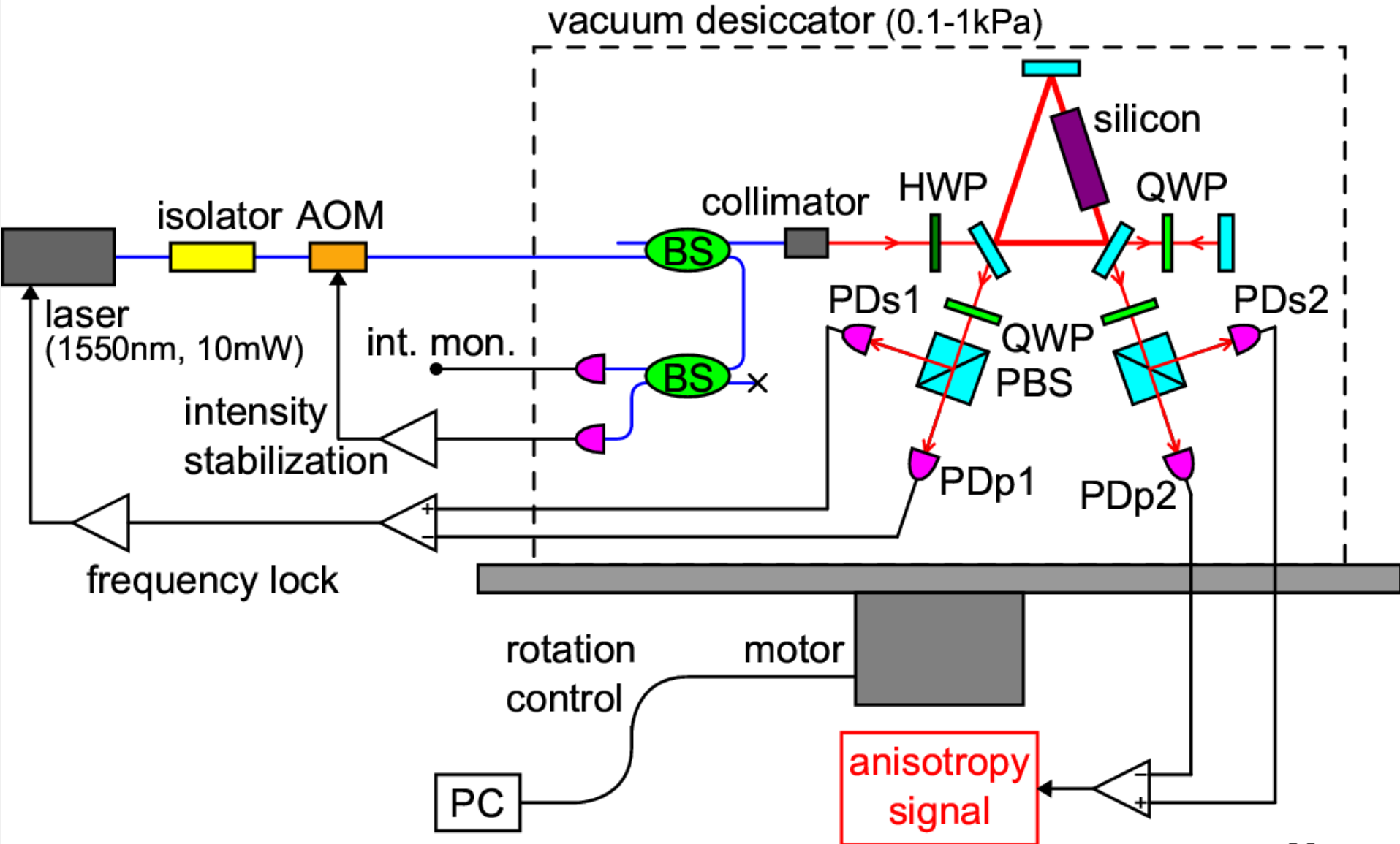
ここまでのまとめ

- 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

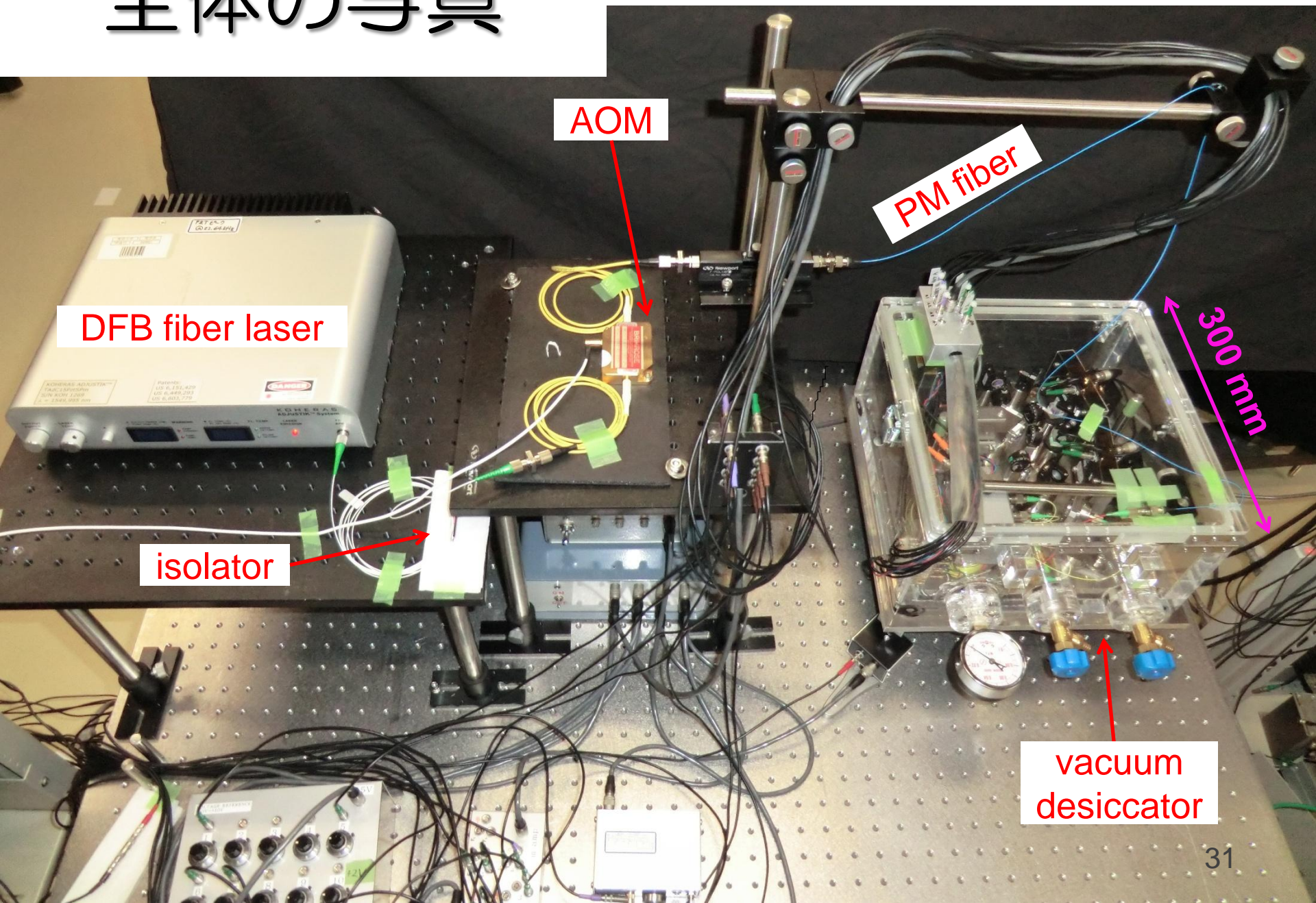


3. 実験装置

全体の構成



全体の写真



DFB fiber laser

AOM

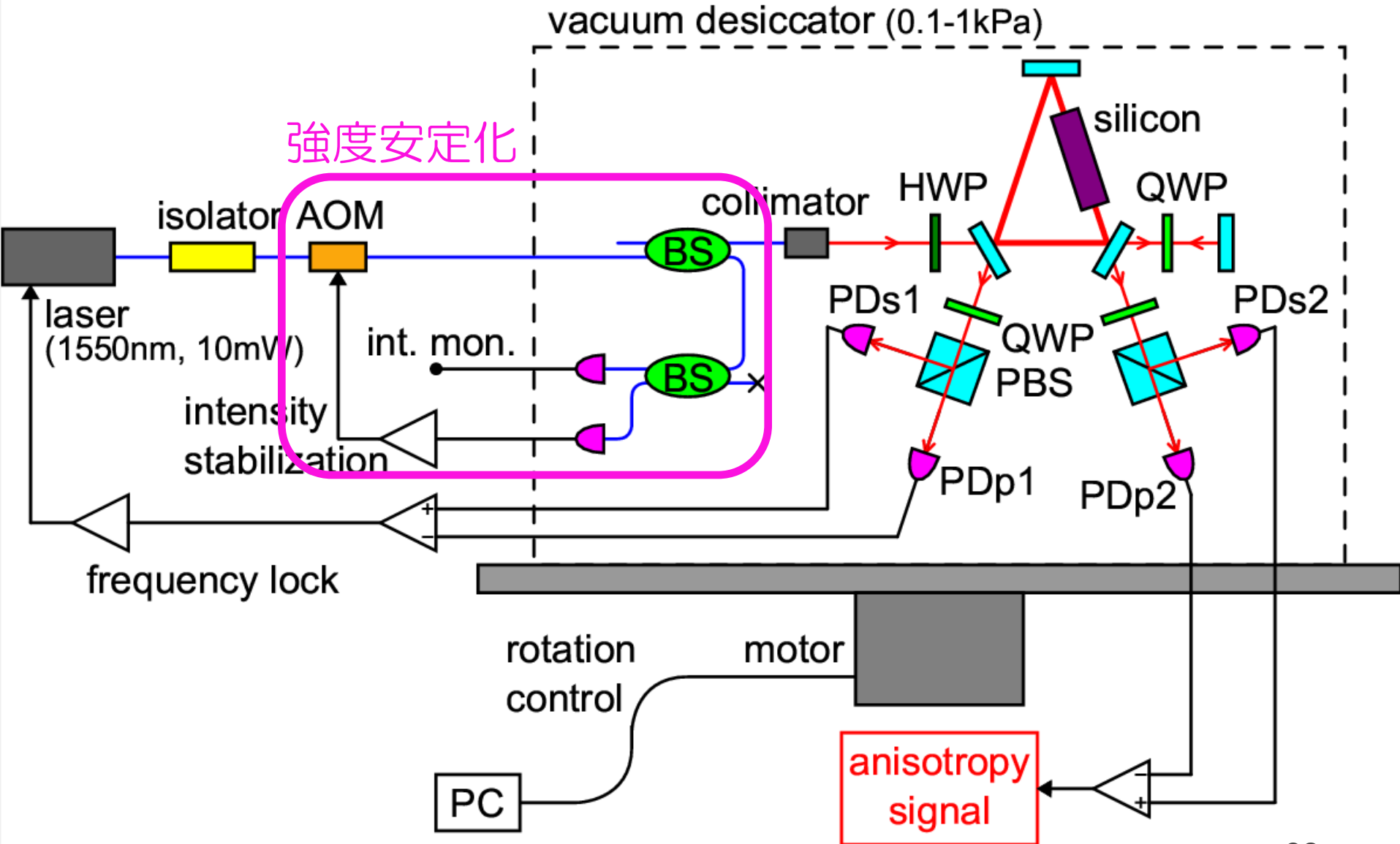
PM fiber

300 mm

isolator

vacuum desiccator

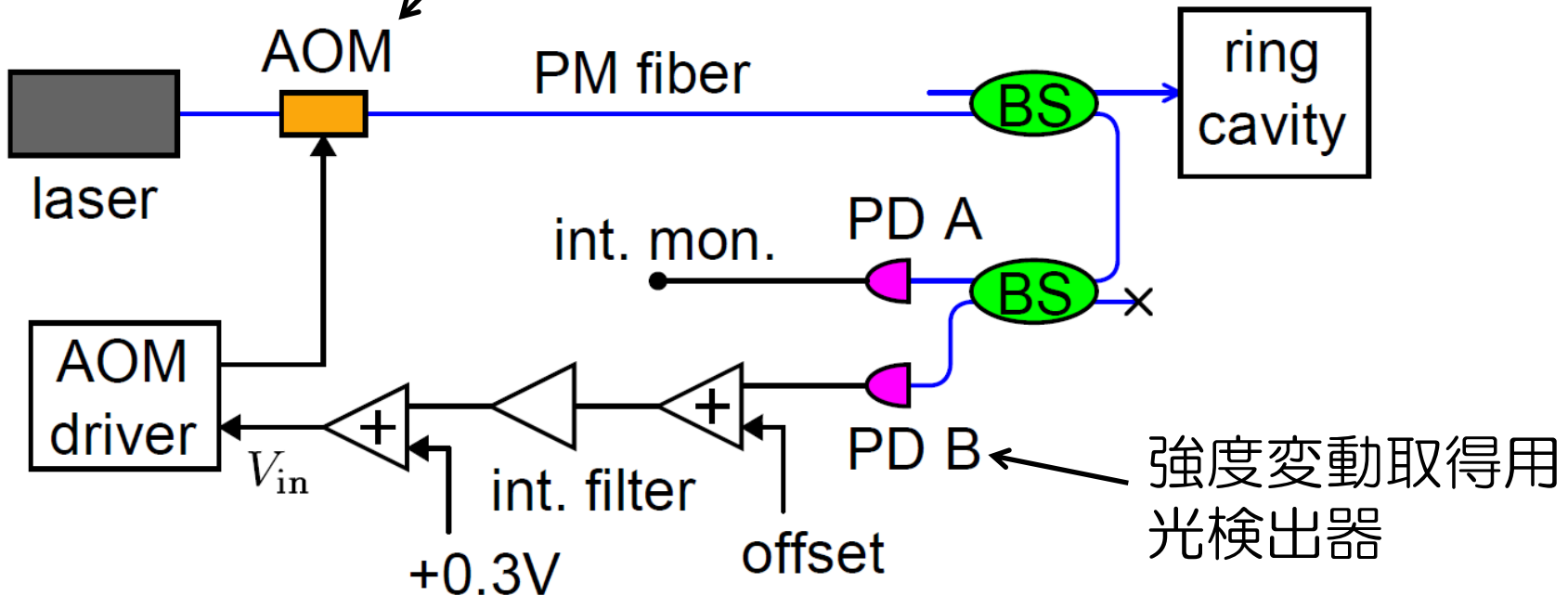
全体の構成



強度安定化光学系

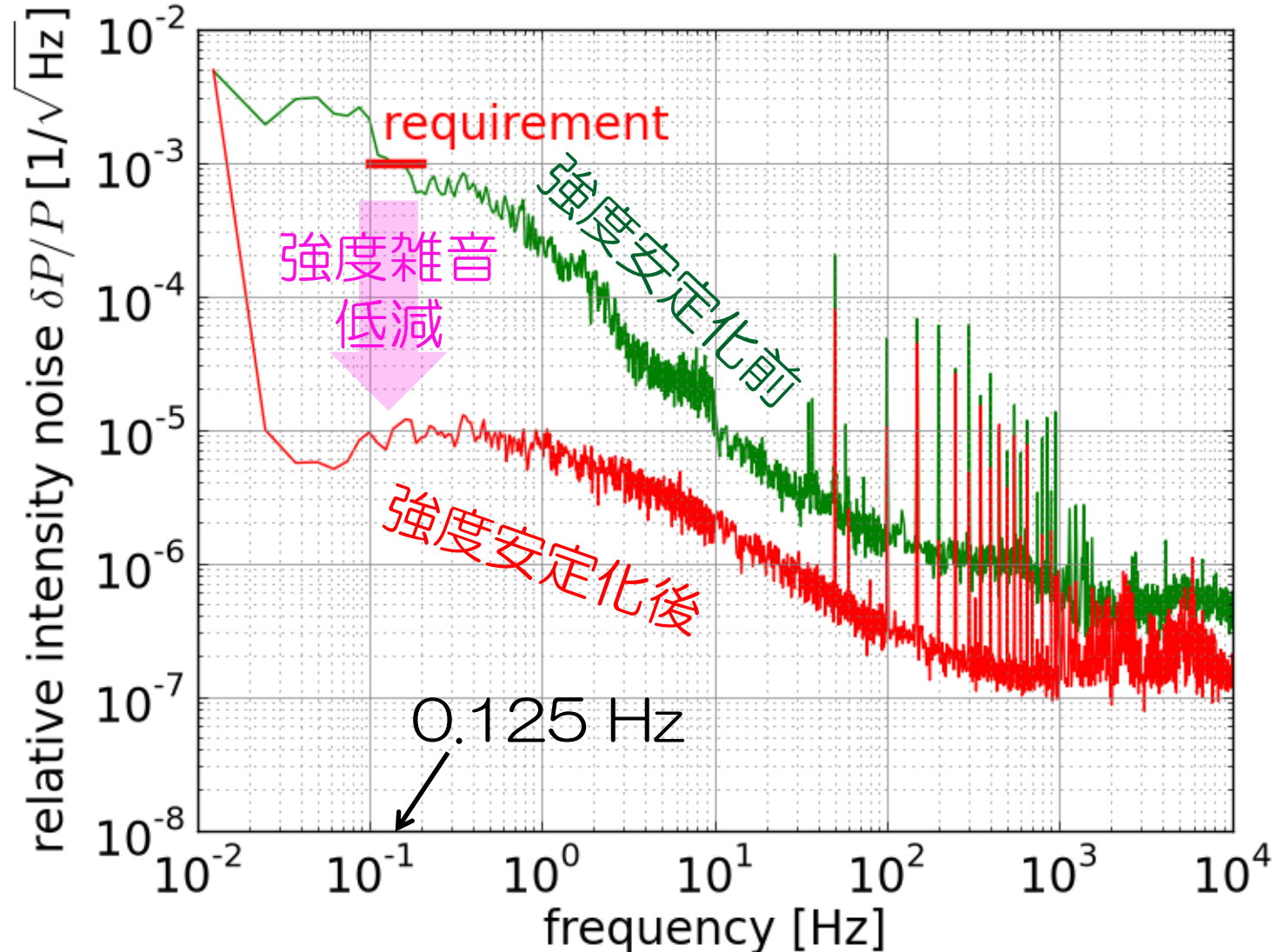
- ファイバ光学系
- 入射光の一部を用いて強度変動を得て、AOMにフィードバック

AOM=音響光学素子
強度変調をかける素子

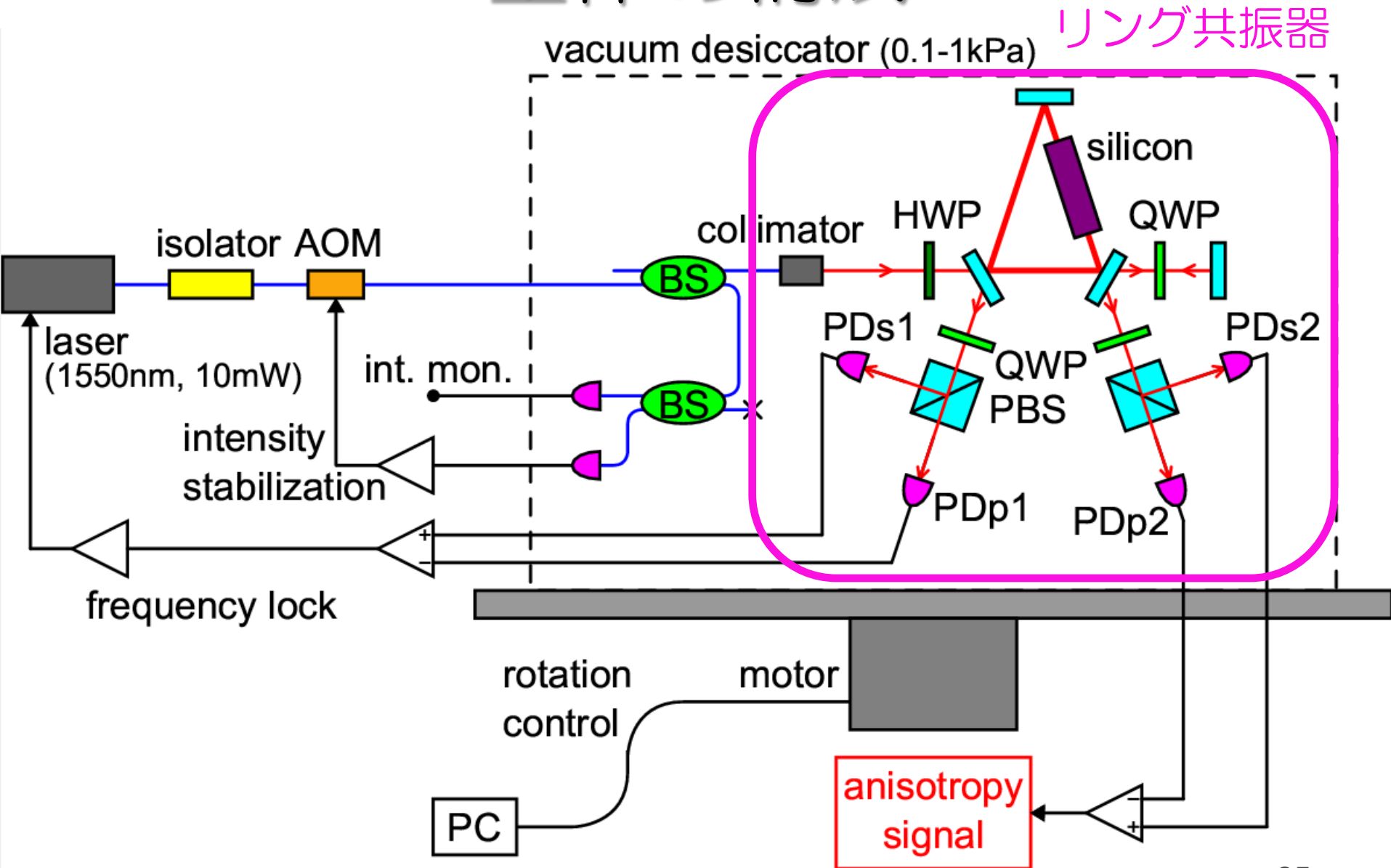


強度安定化結果

- 要求値より2桁下の安定度を達成

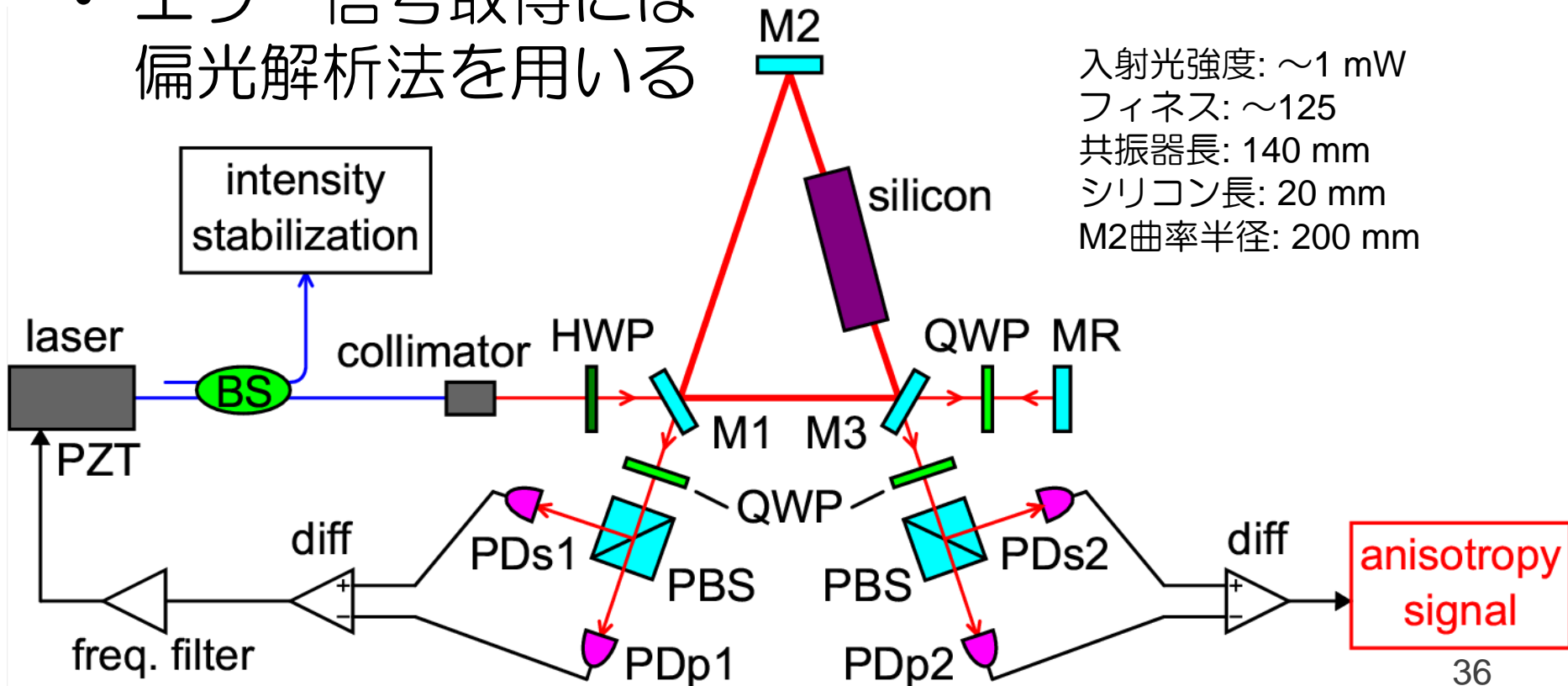


全体の構成

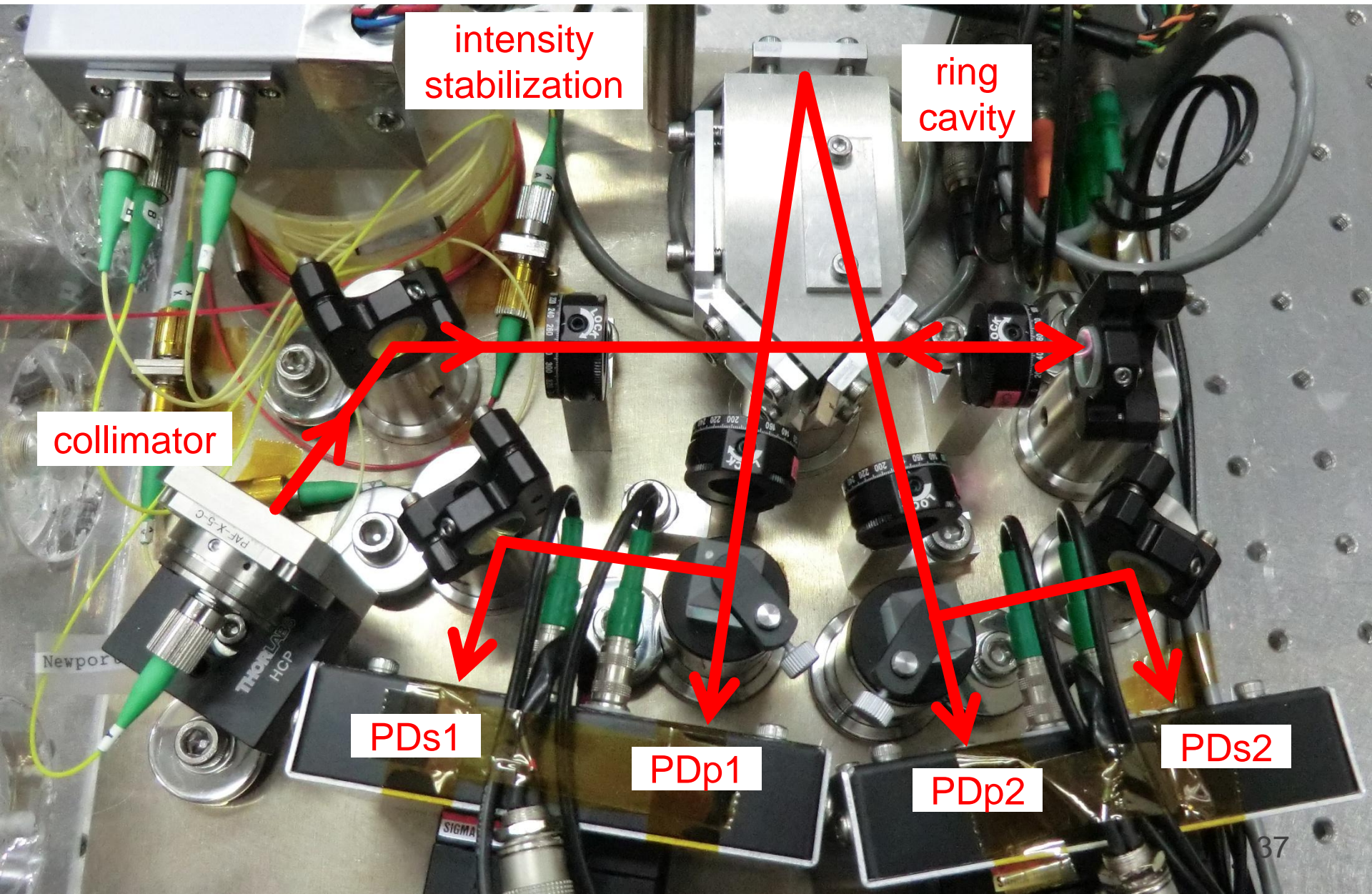


リング共振器

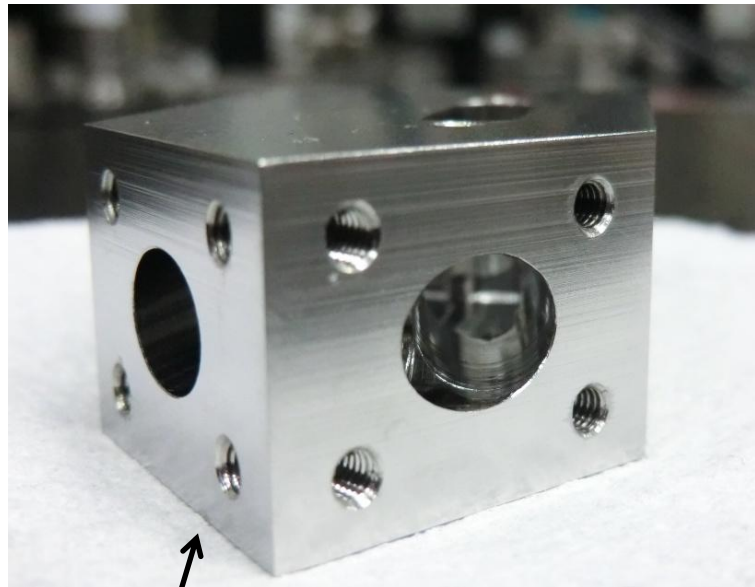
- 反時計回りの共振にレーザー周波数をロック
レーザーPZTにフィードバック
- ダブルパス目のエラー信号が異方性信号
- エラー信号取得には
偏光解析法を用いる



光学系の写真

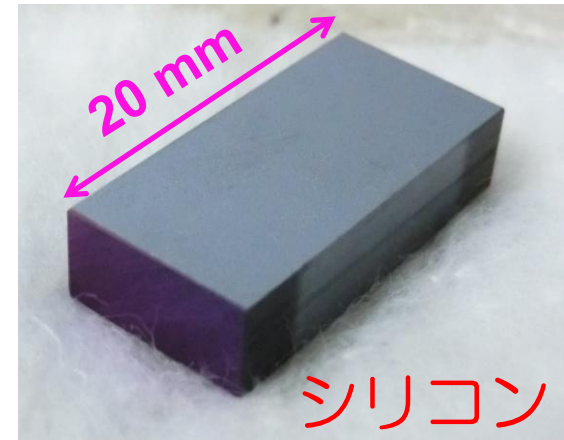


リング共振器の写真

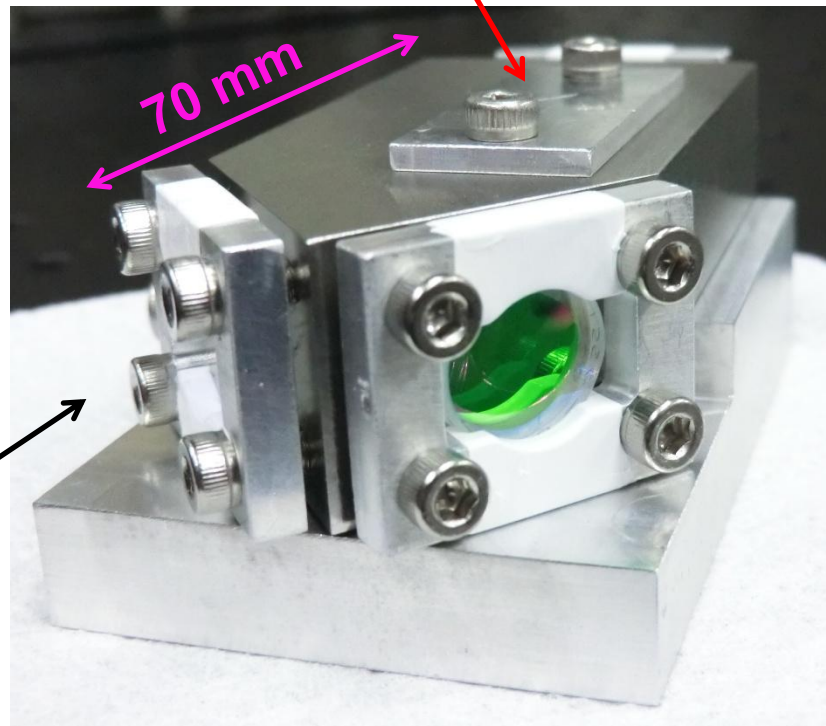


スペーサーは
スーパーインバー製
(低熱膨張合金)

鏡を取り付けた状態

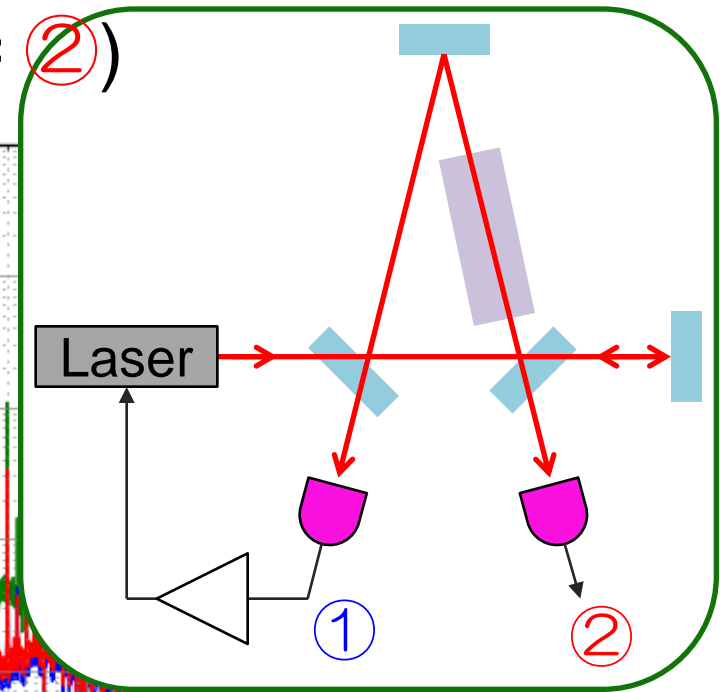
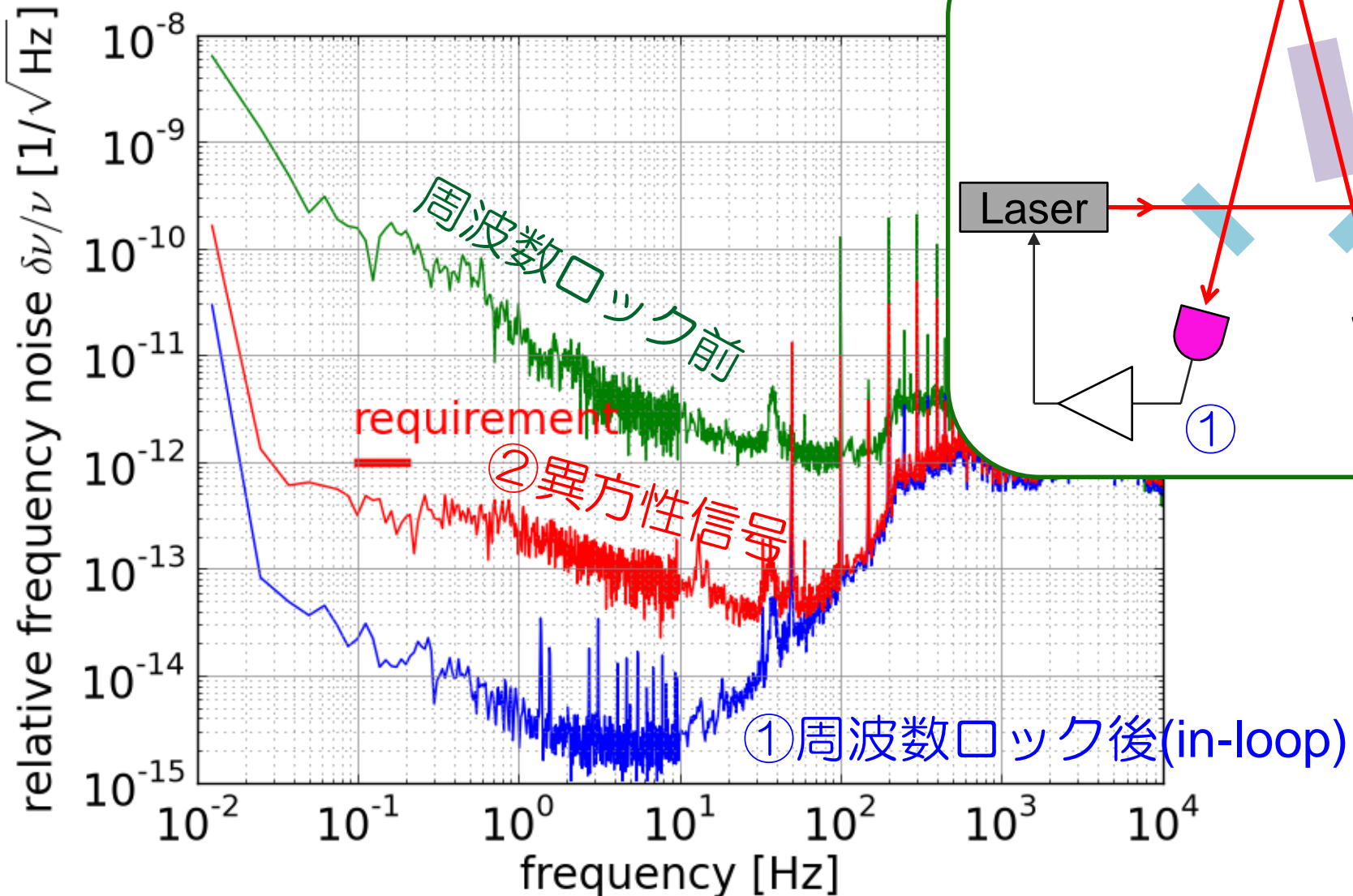


この中にシリコン



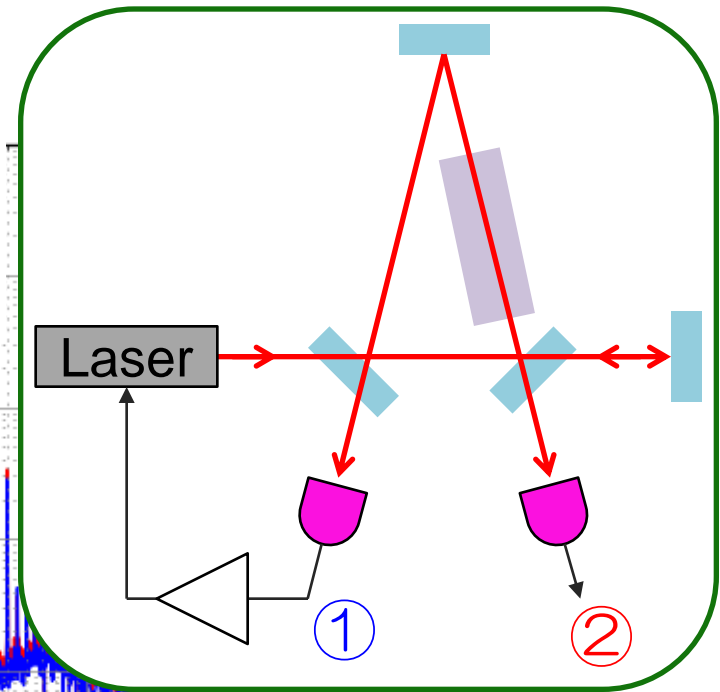
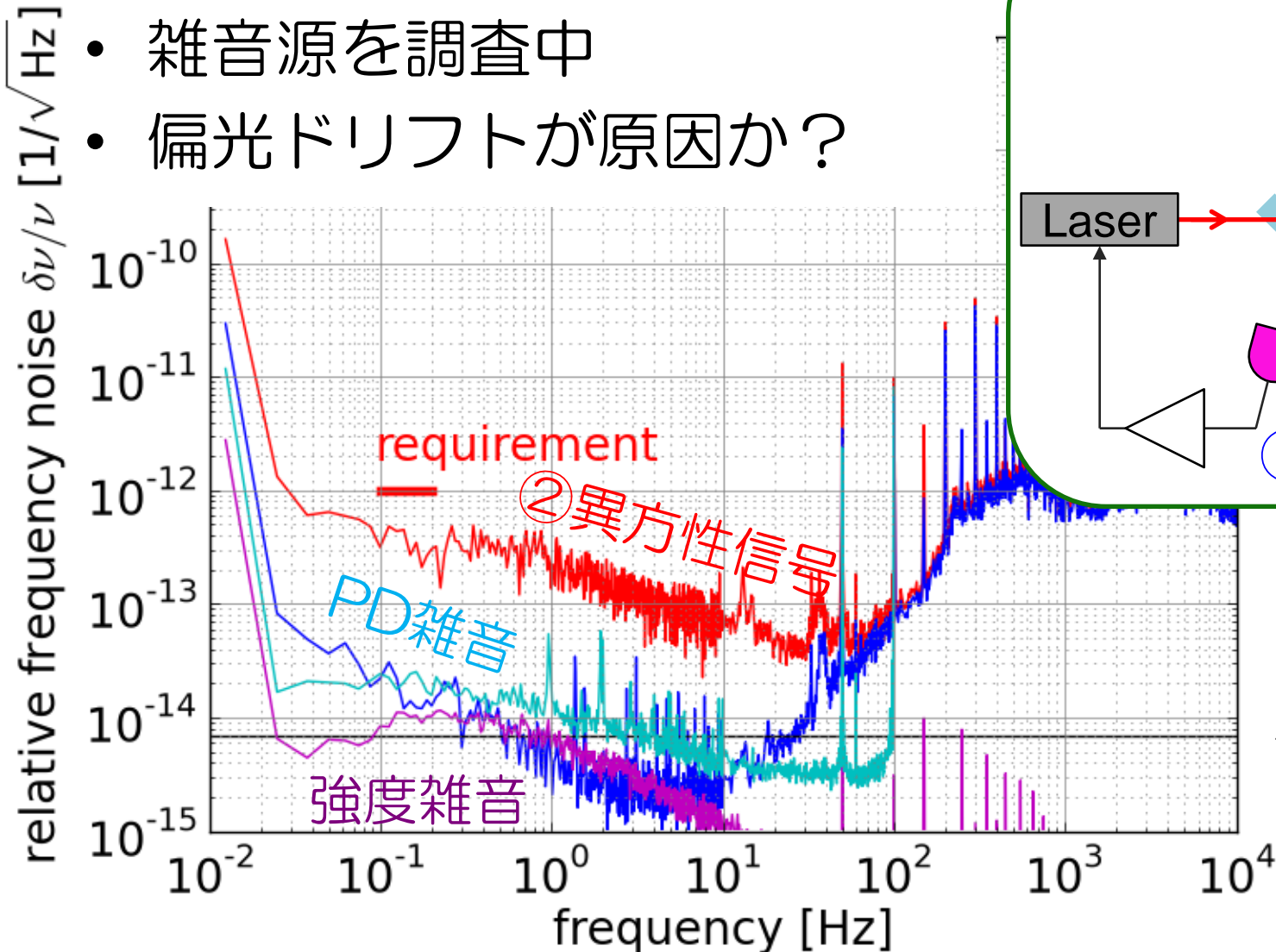
周波数ロック結果

- 要求値をクリア(ただし、① ≠ ②)



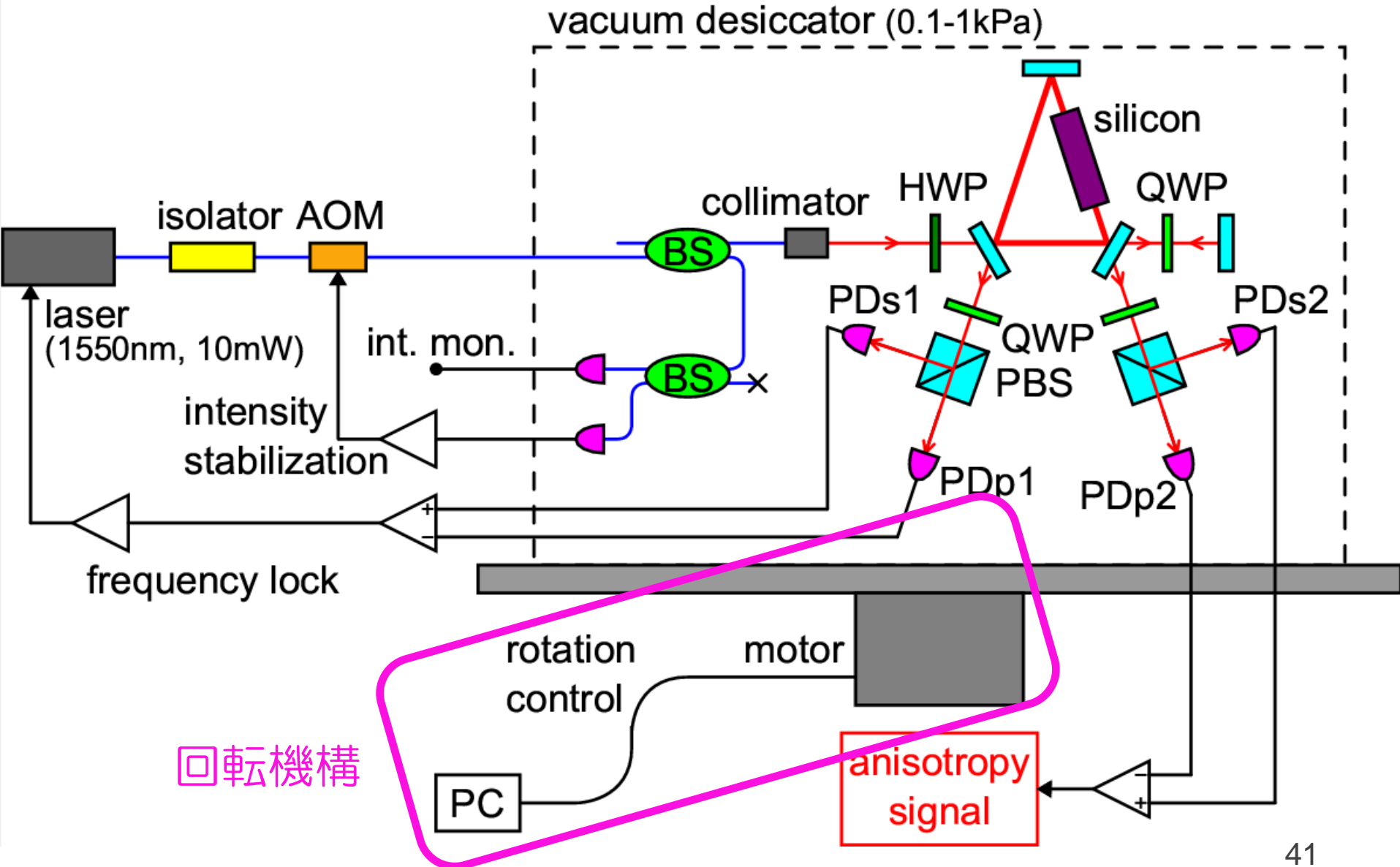
なぜ何が感度を制限しているか

- 理想的には① = ②
- 雑音源を調査中
- 偏光ドリフトが原因か？



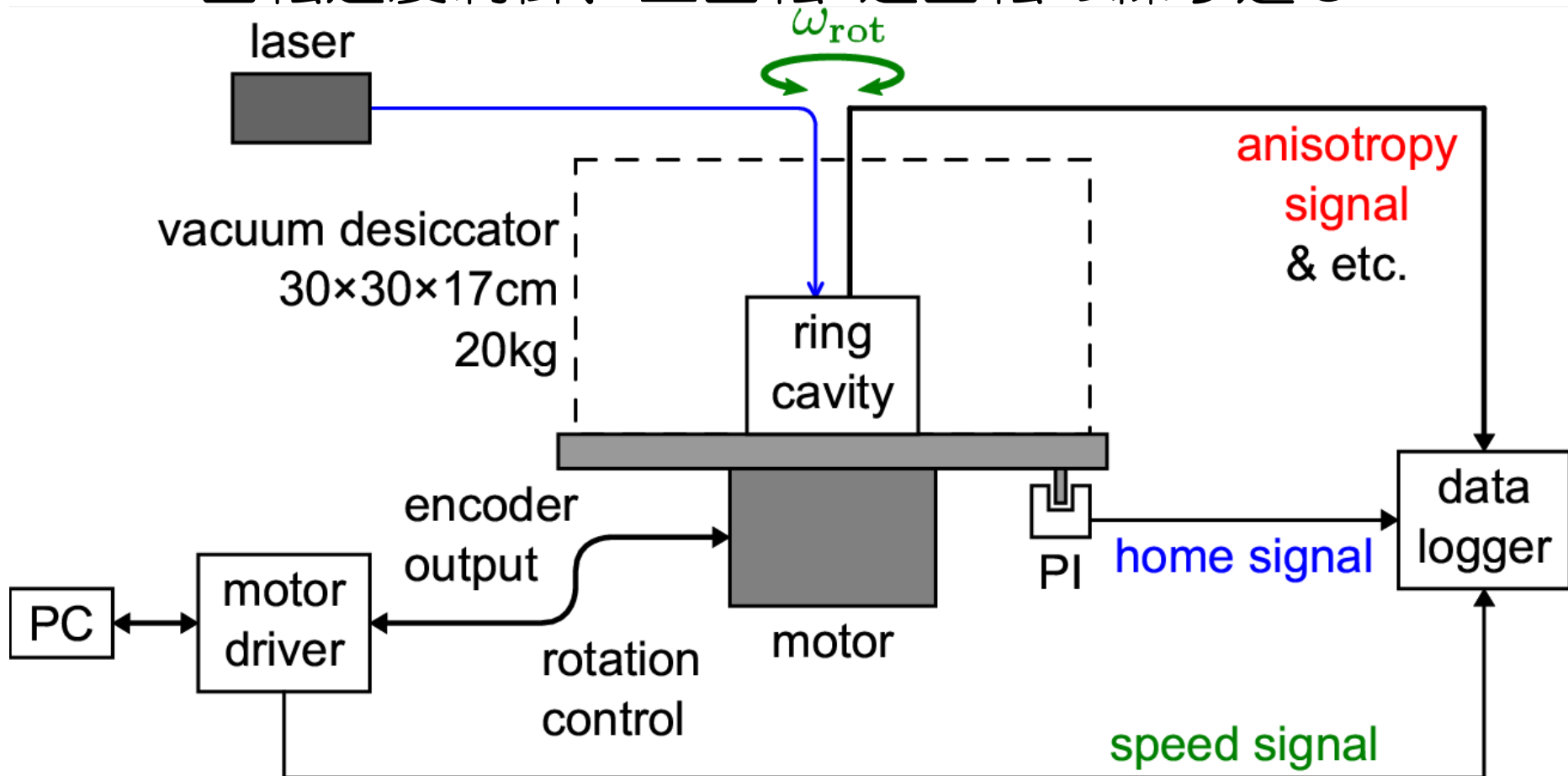
散射雑音

全体の構成



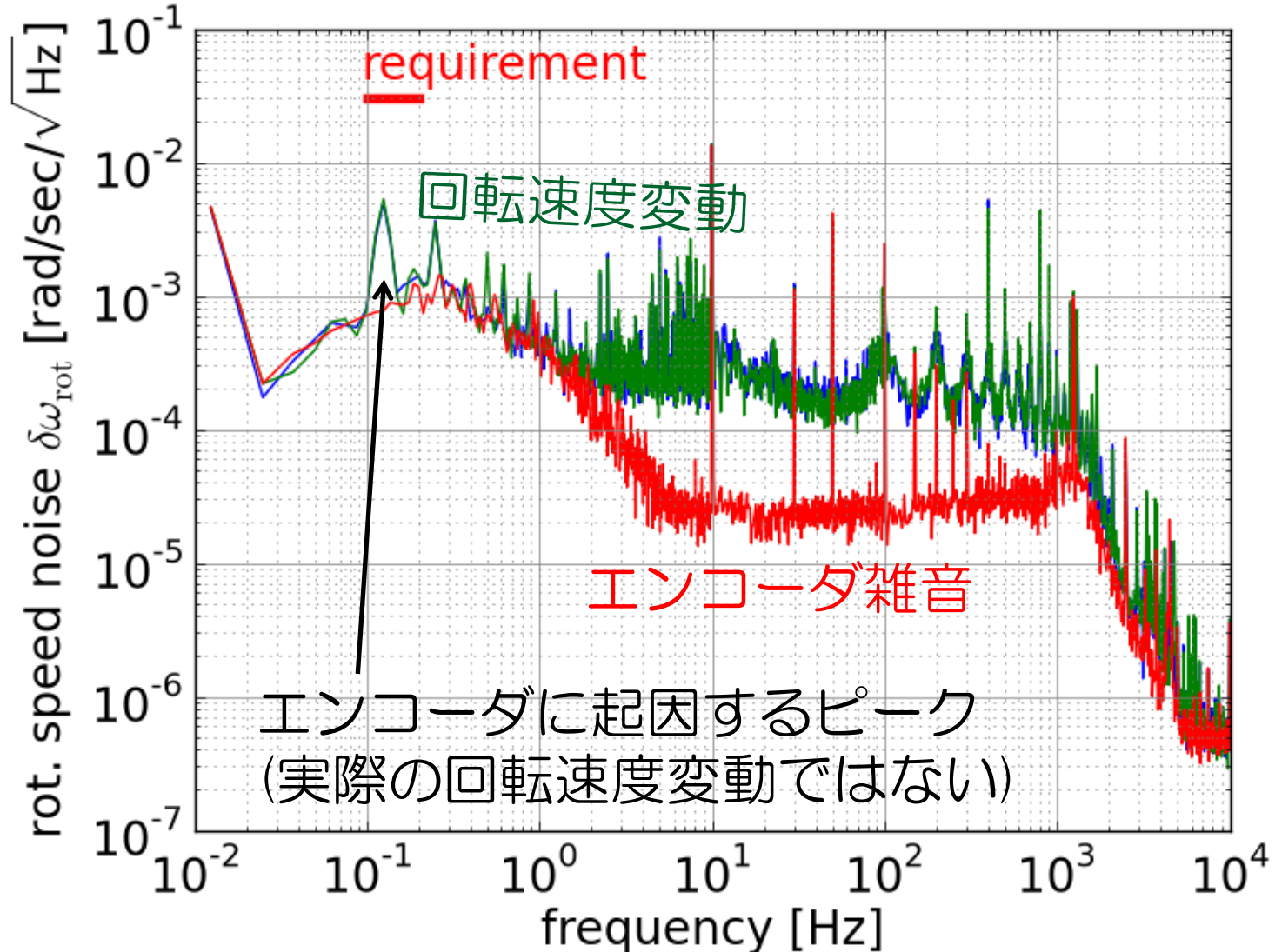
回転機構

- 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



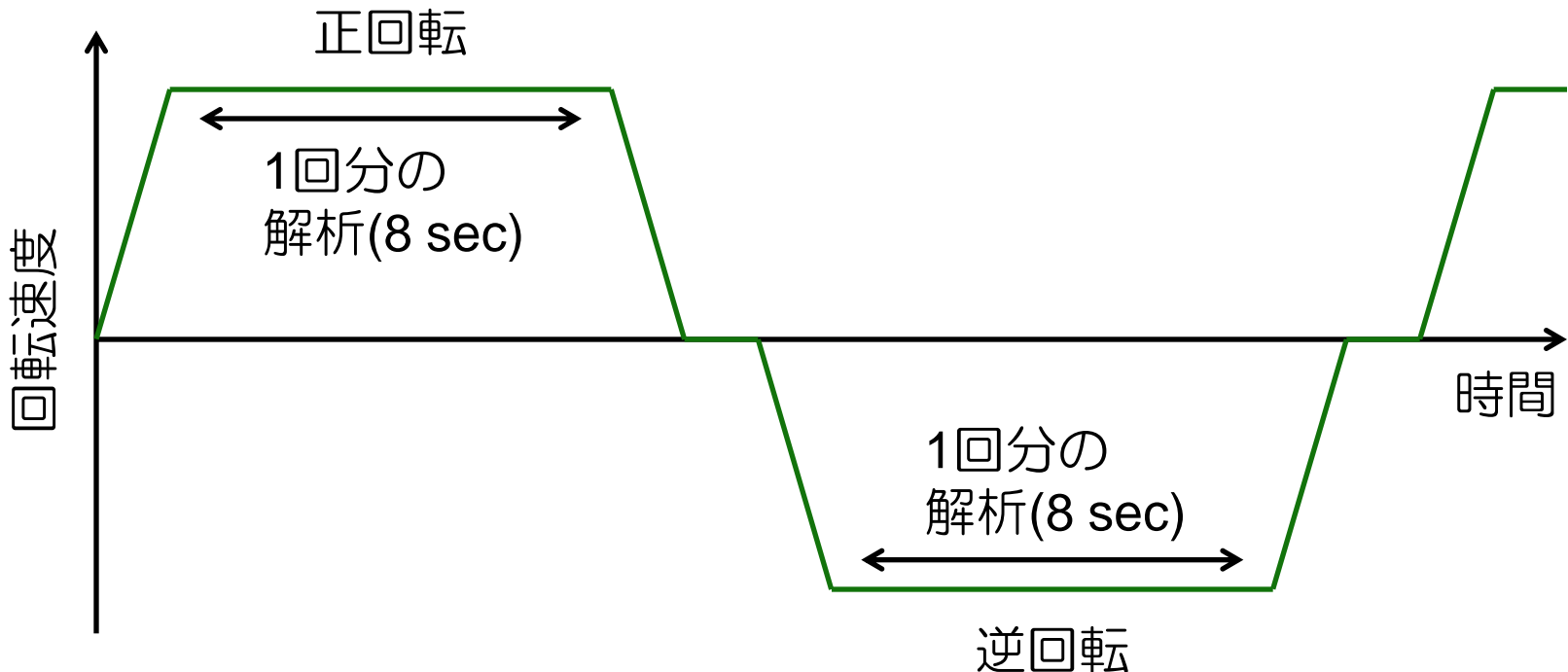
回転速度安定度

- 要求値をクリア



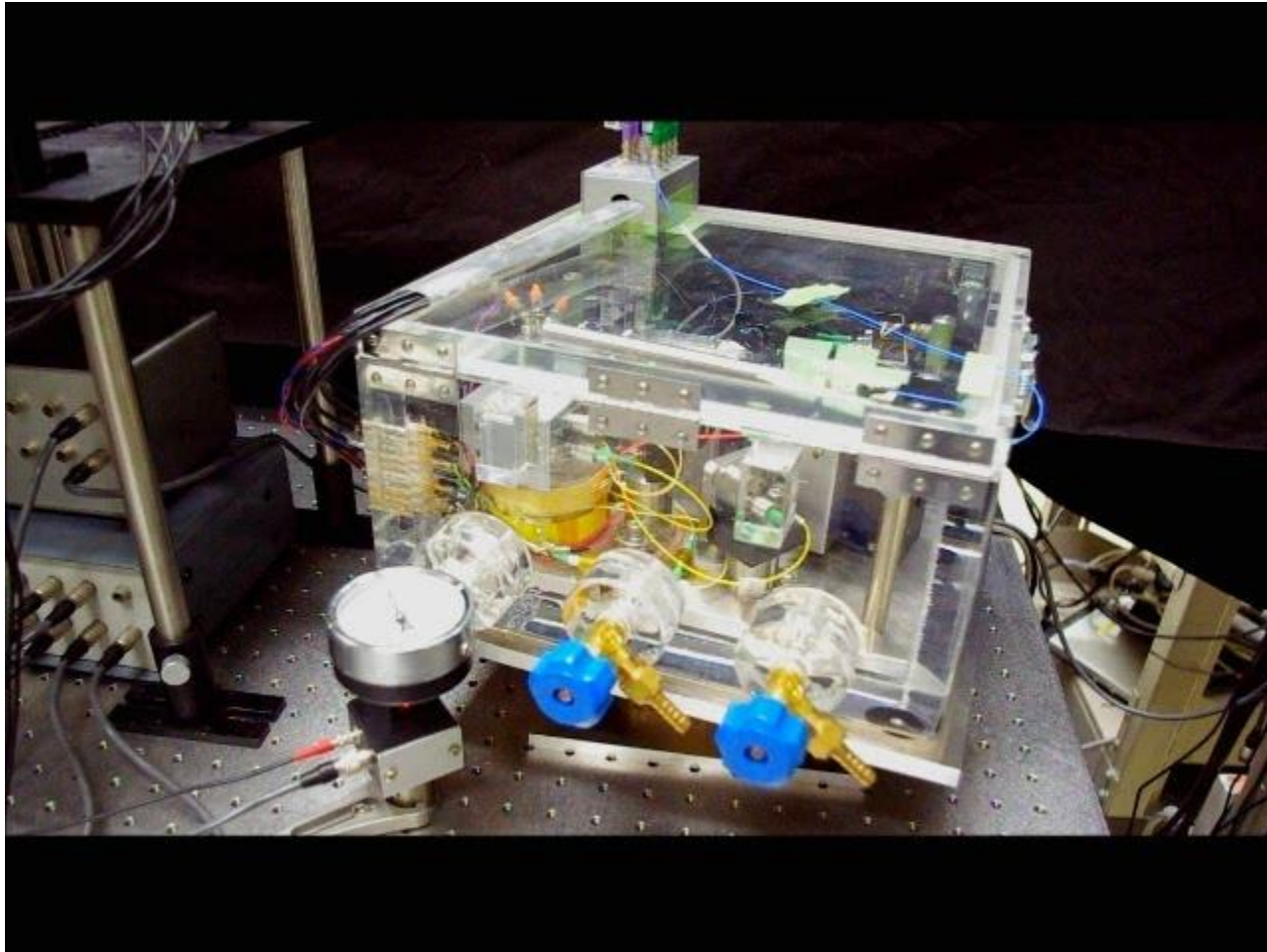
回転の流れ

- 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



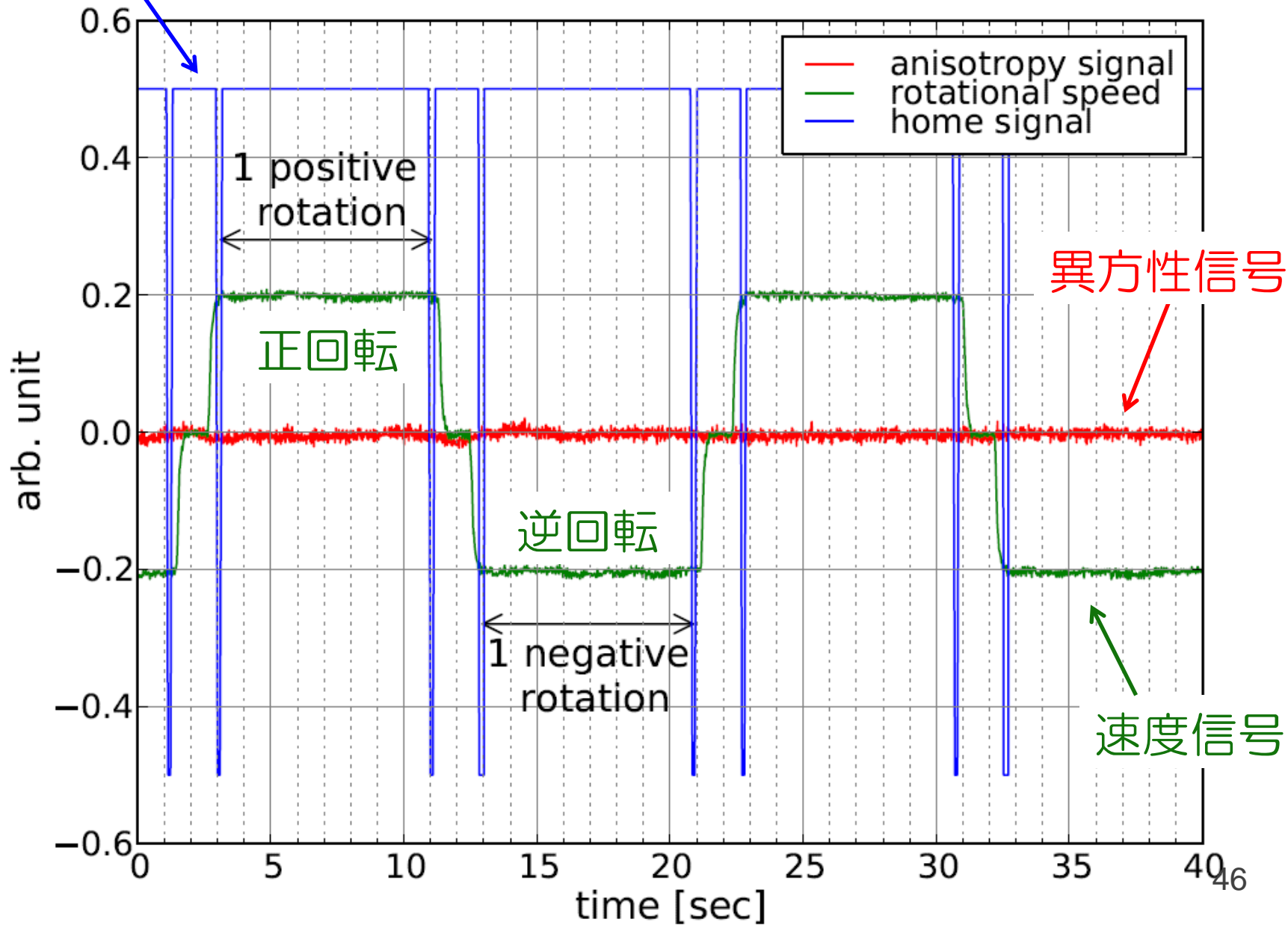
回転の様子

- 動画



生データ

原点通過信号



4. データ解析

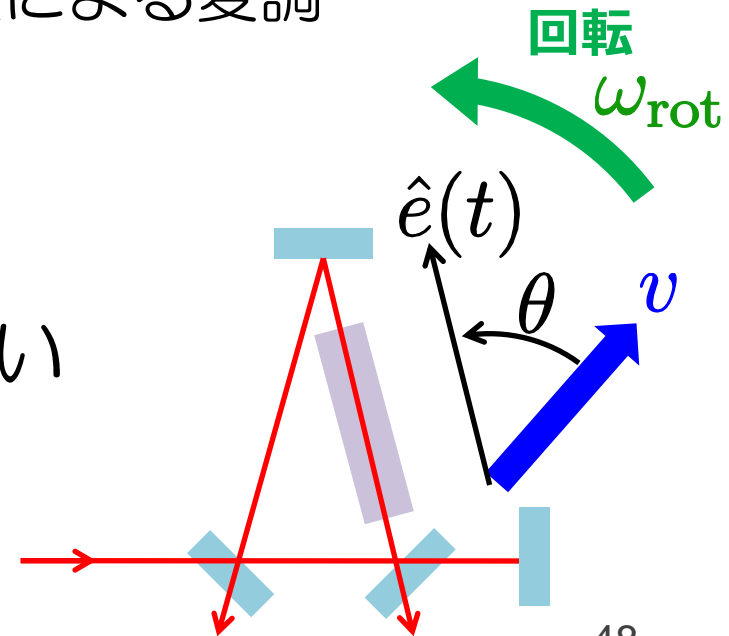
異方性信号

- 反時計回りと時計回りの共振周波数の差

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

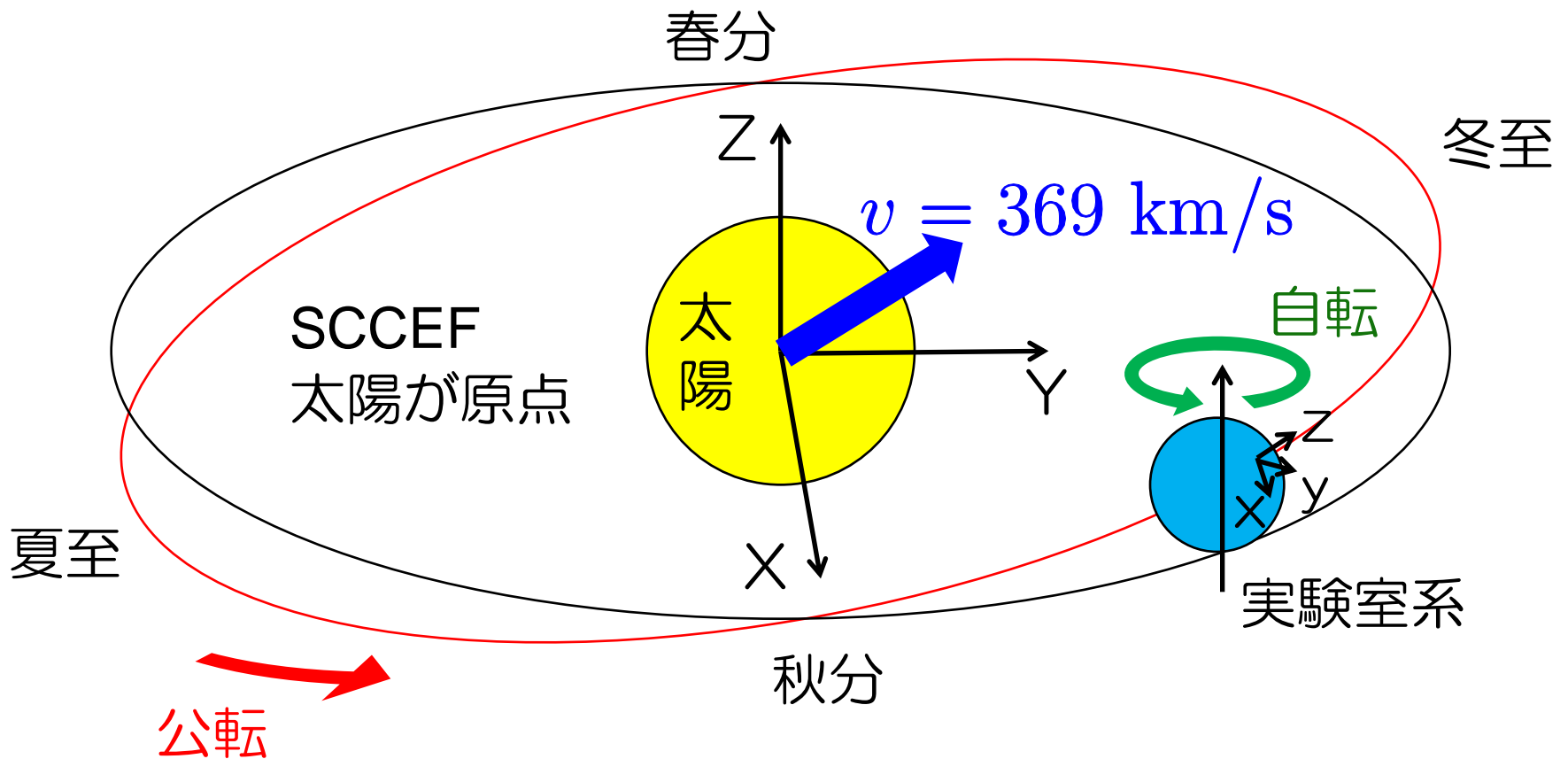
回転台の回転+地球自転による変調

- 自転の影響の無い系で考えたい



SCCEF

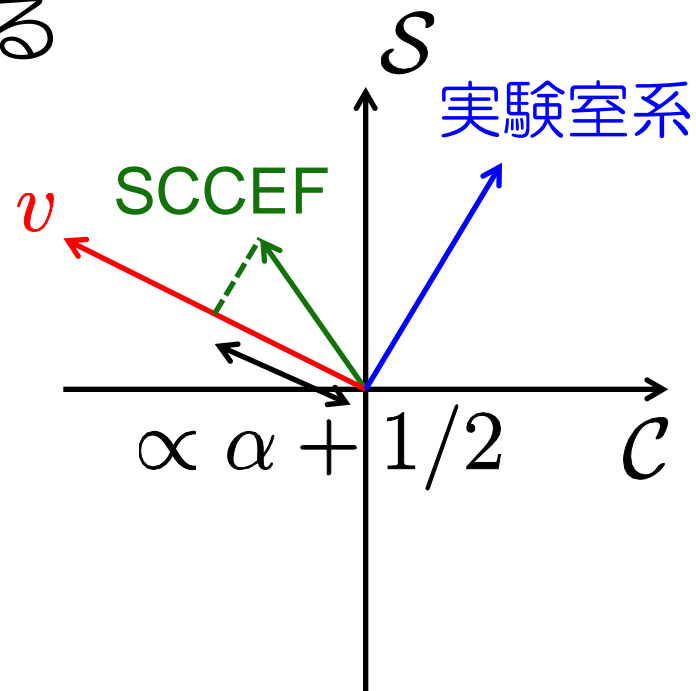
- Sun centered celestial equatorial frame
- CMB静止系に対して(ほぼ)一定速度で運動



解析の基本的な流れ

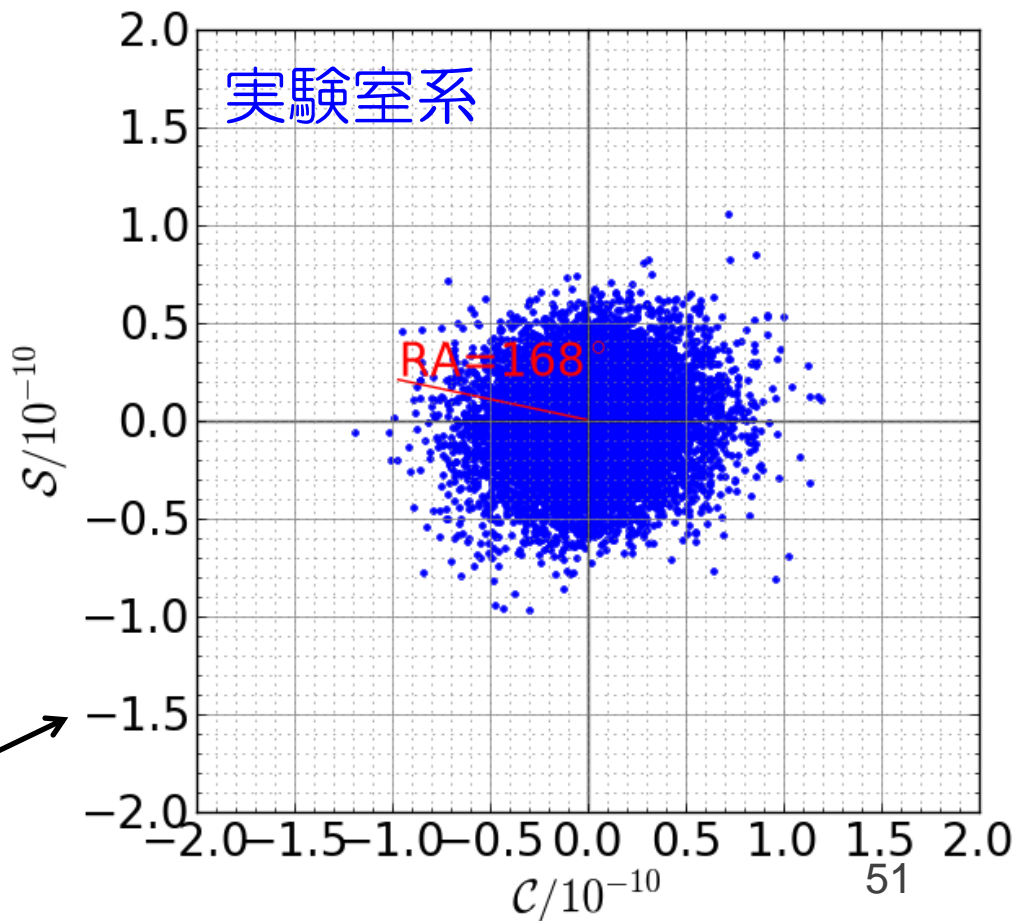
- 異方性信号の回転周波数におけるフーリエ振幅 (C, S) を求める
- フーリエ振幅 (C, S) から地球自転の影響を除去 (SCCEFにおけるフーリエ振幅 (C', S') に変換)
- (C', S') から $\alpha + 1/2$ を求める

- 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

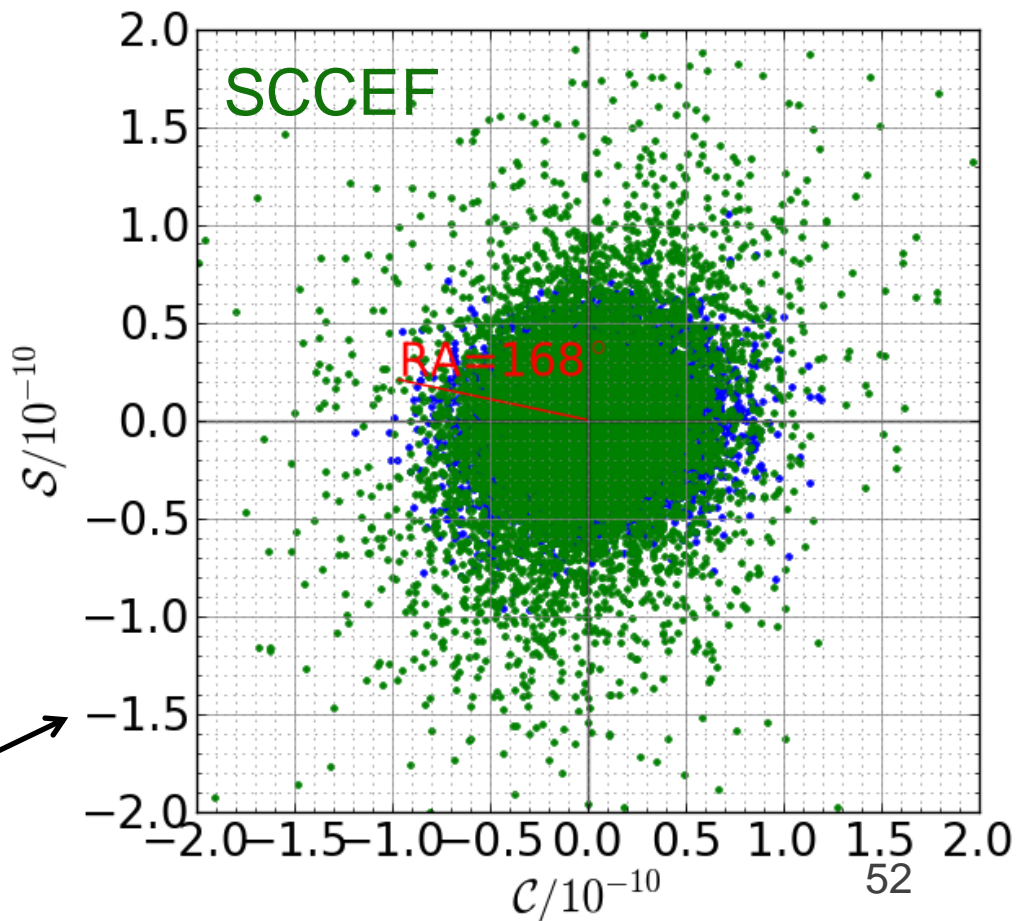


フーリエ振幅 (C, S)
1万点



解析結果

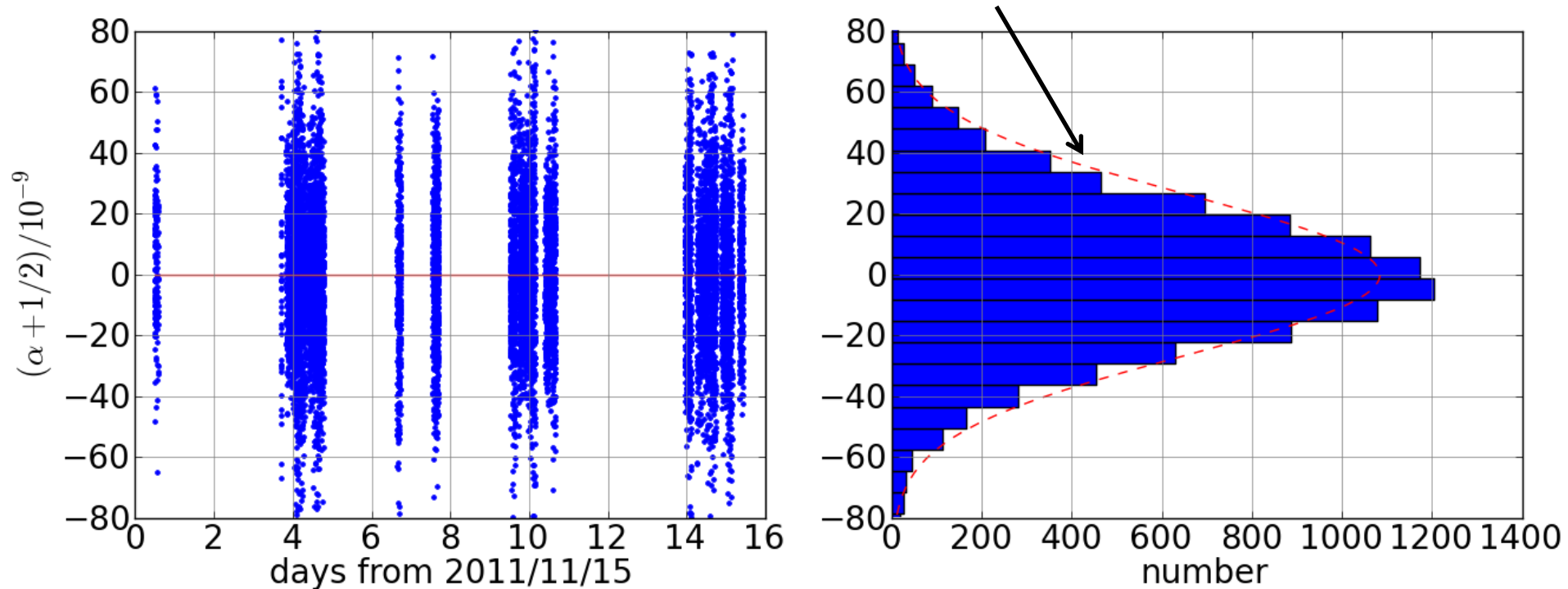
- 2011年11月後半の2週間に渡って、断続的に2.6万回転
- そのうち雑音レベルの低い1万回転(約1.2日分)を解析に使用
- 原点を中心に分布



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



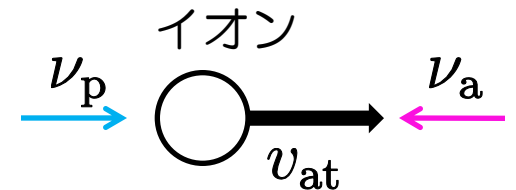
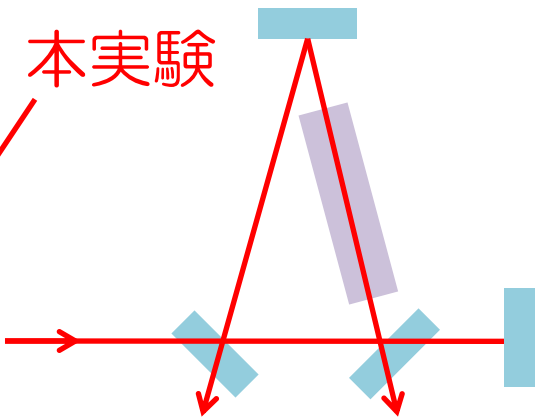
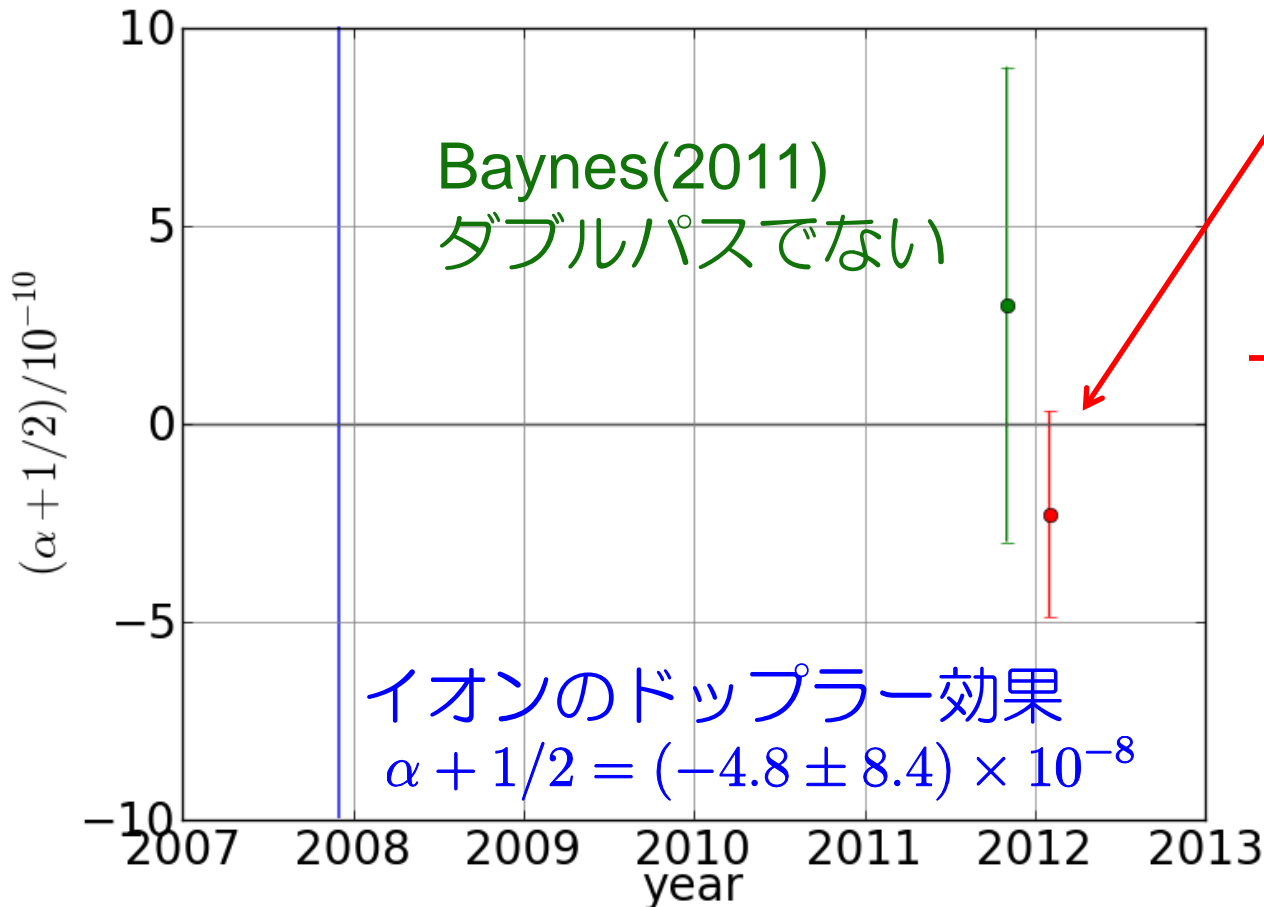
→ $\alpha + 1/2 = (-2.3 \pm 2.6) \times 10^{-10}$

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

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

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

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

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

これまでの上限値を更新！

5. 結論

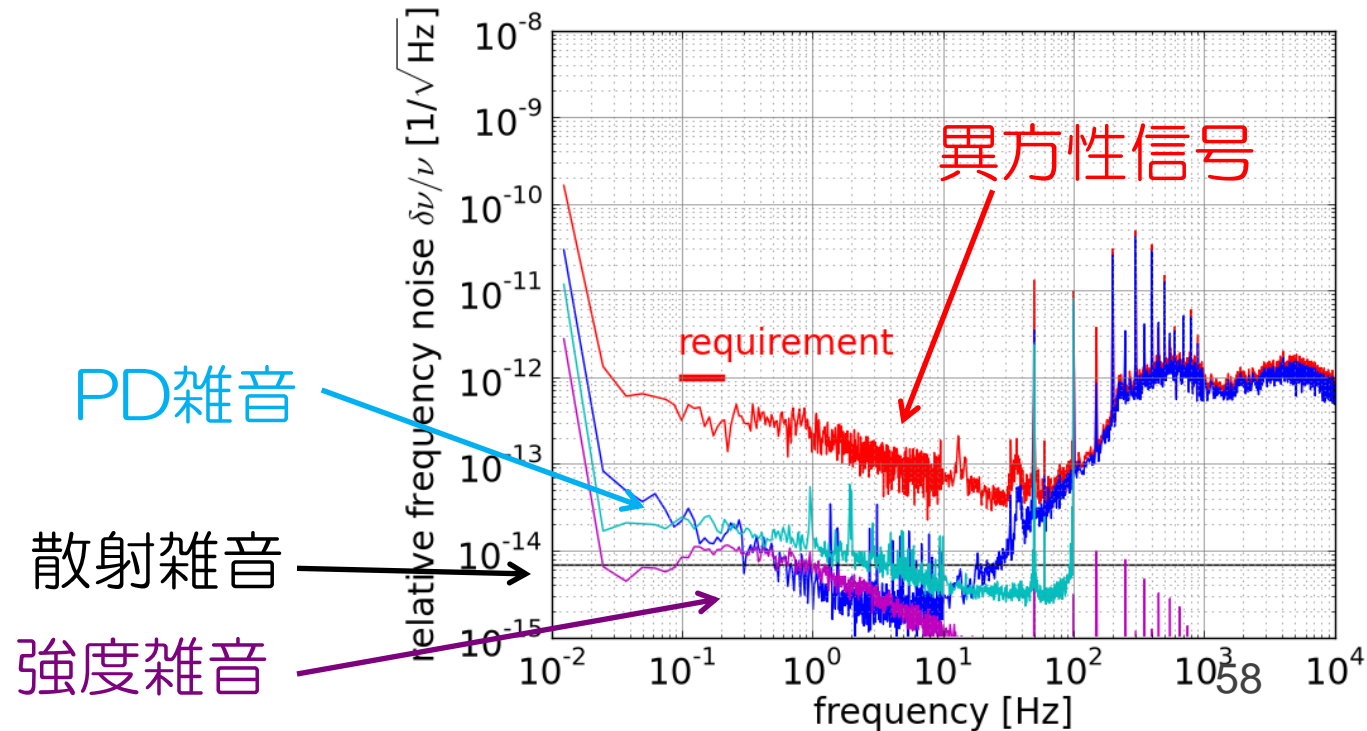
まとめ

- 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

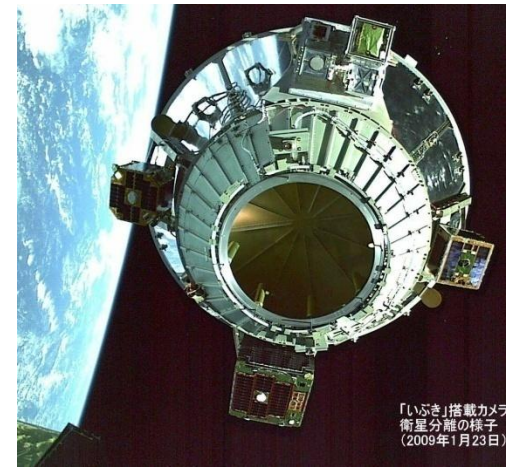
- 簡単な装置と1.2日分のデータで上限値を更新
→ ダブルパス構成の有用性を示せた
- レーザー光の偏波面の安定化
回転に伴う雑音の低減(回転反転時の振動など)
→ さらに1桁程度の上限值更新が可能



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

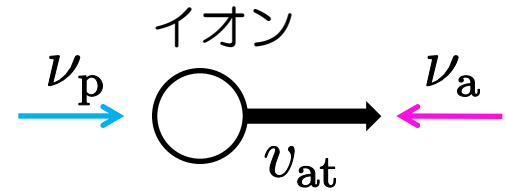
→ 既存の技術で、
さらに4桁程度の更新も可能！
 $\delta c/c \sim 10^{-17}$ の異方性探査



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

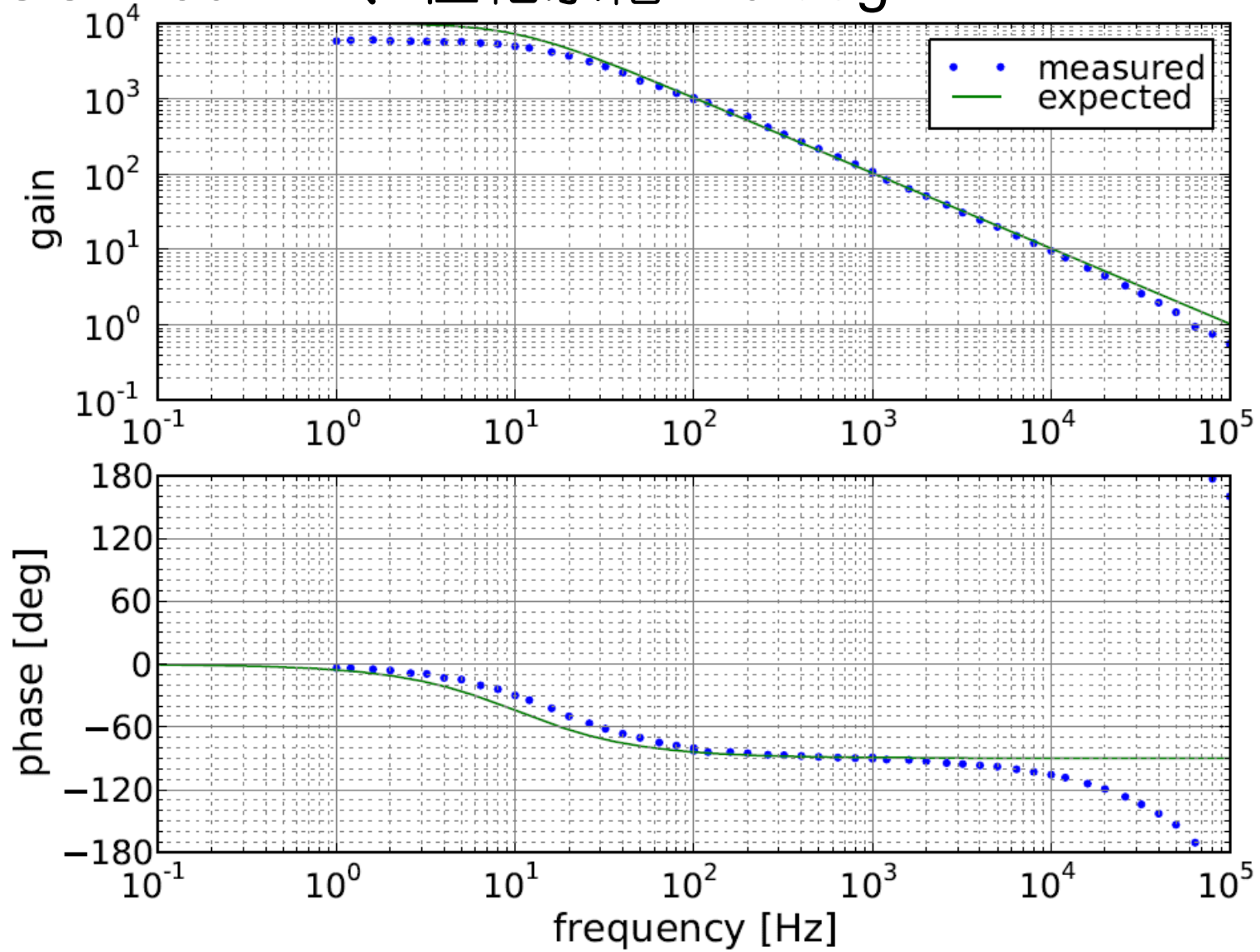
ダブルパス構成

異方性信号を
変調

屈折率大
→感度良

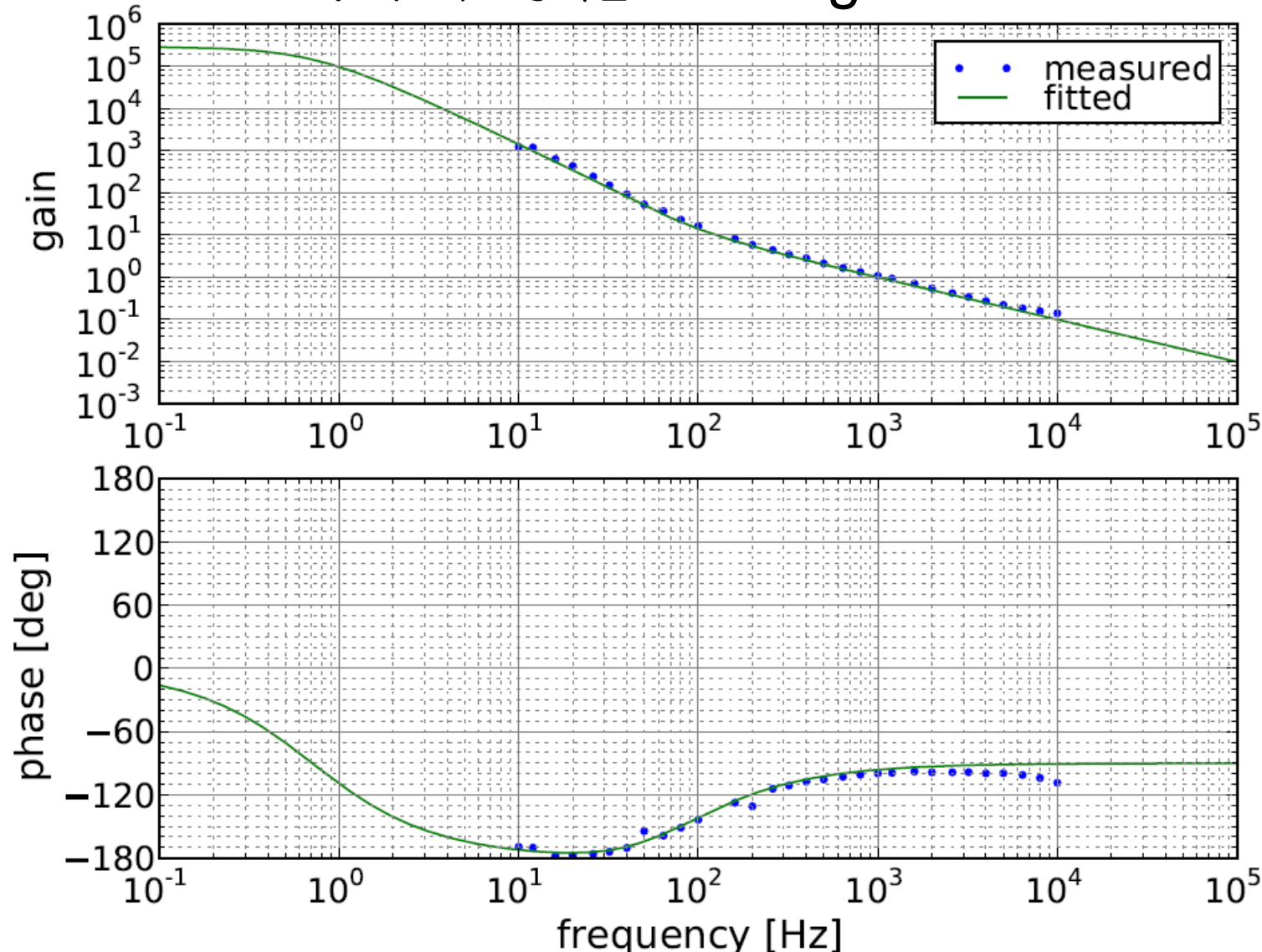
強度安定化のオープンループTF

- UGF: 60 kHz、位相余裕: 10 deg



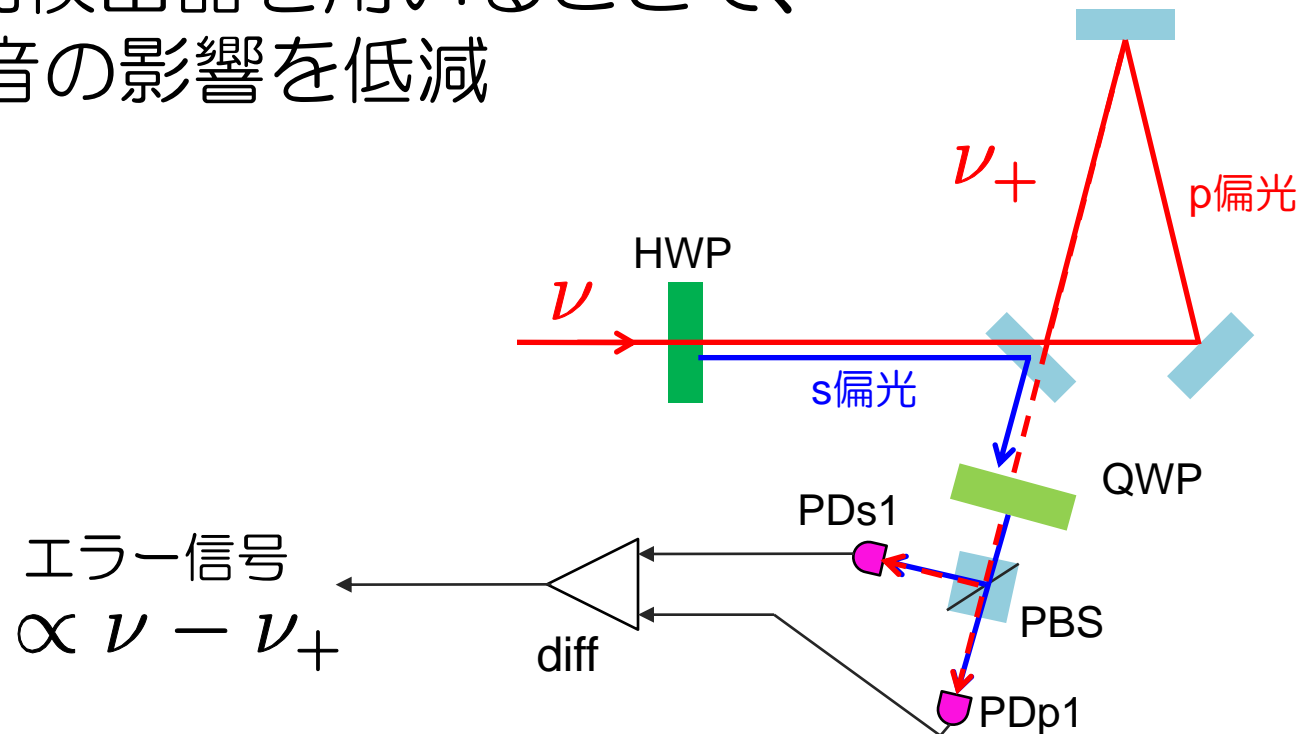
周波数ロックのオープンループTF

- UGF: 1 kHz、位相余裕: 80 deg



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

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{4(n-1)d\nu}{L+(n-1)d} (\alpha + 1/2) R\hat{\nu} \cdot \begin{pmatrix} \cos \omega_{\text{rot}} t \\ \sin \omega_{\text{rot}} t \\ 0 \end{pmatrix}$$

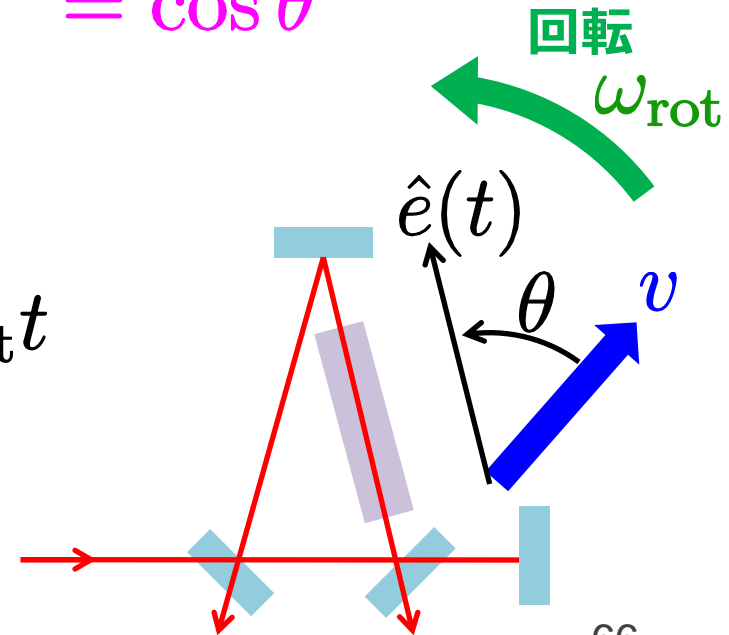
SCCEFから実験室系への座標変換

$= \cos \theta$

- 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



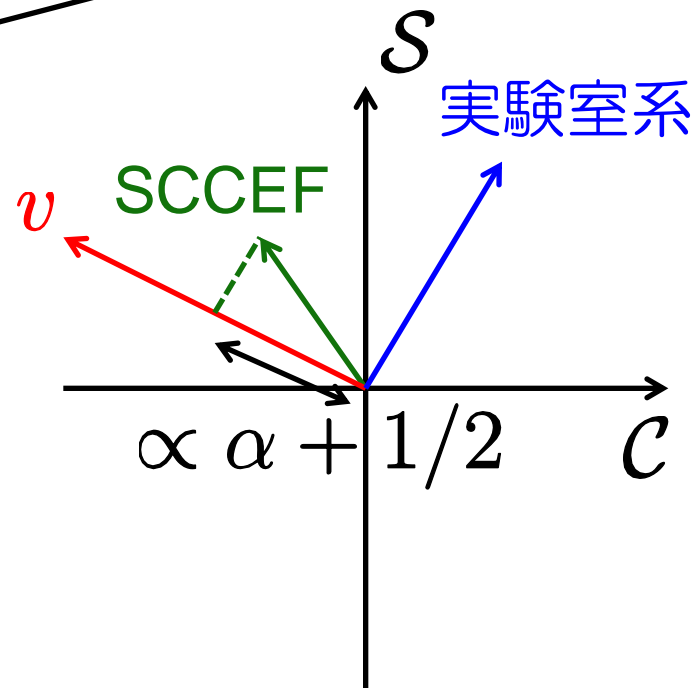
異方性信号から $\alpha+1/2$ の算出

- 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

