

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

面白い話をします

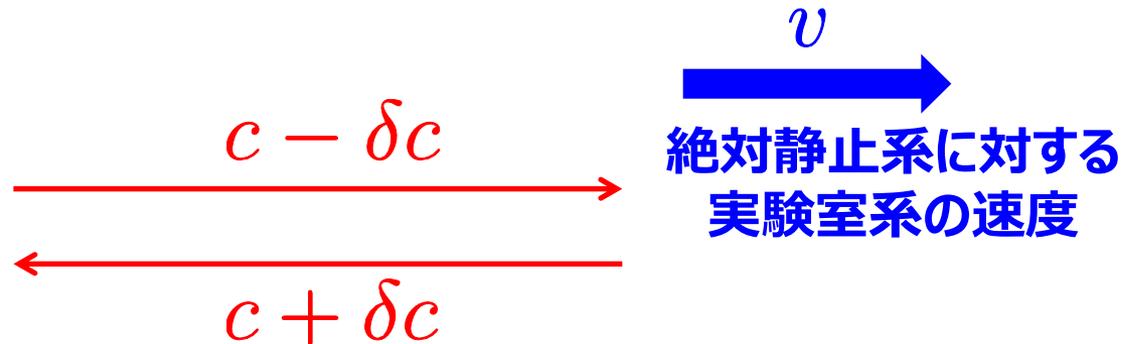
I will give an impressive talk

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等方性検証
- 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 10^{-13} の精度で往路と復路の
光速に差がないことを確かめた



目次

1. 研究背景

なぜ光速の異方性を考えるのか

2. 測定原理

なぜ光リング共振器で測定できるのか

3. 実験装置

強度安定化系、リング共振器、回転機構

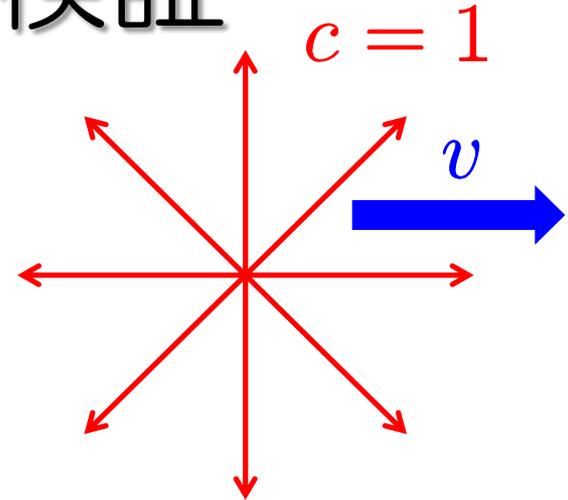
4. データ解析

解析の流れ、結果

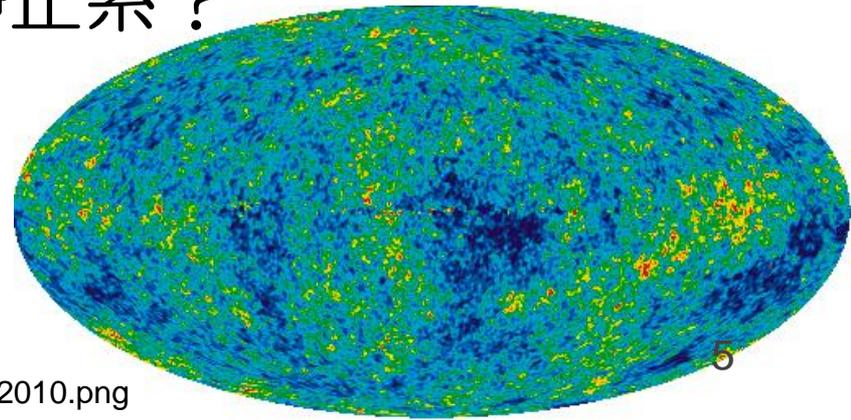
5. まとめ

特殊相対性理論の検証

- 光速不変の原理
光速は伝播方向、
光源の速度によらない
- Lorentz不変性
全ての物理学の基礎
- Lorentz不変性の破れ？
量子重力理論: ごくわずかに破れている可能性
CMBの観測: CMB静止系の存在
＝絶対静止系？



→実験的検証が必要



光速の等方性検証

- 往復光速の等方性検証

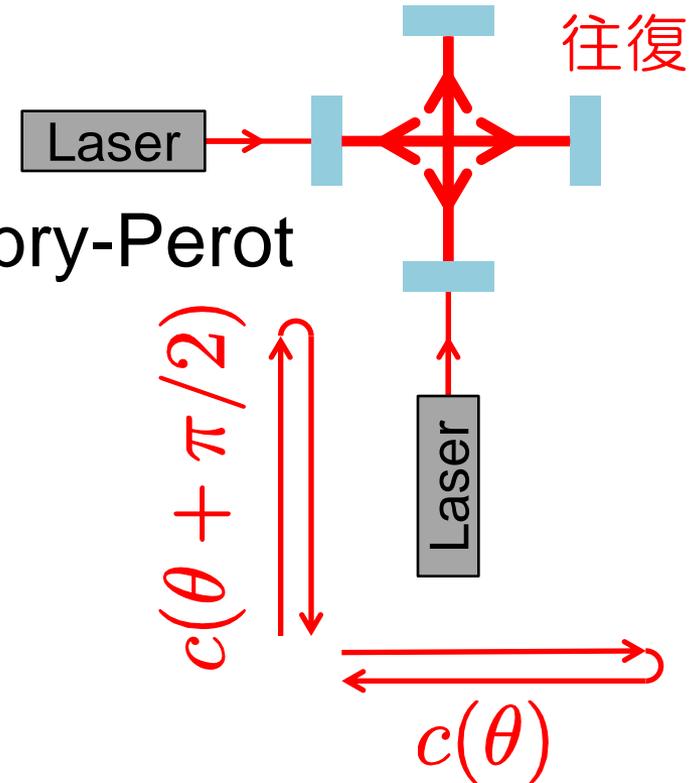
Michelson-Morleyの実験

最新版は直交した2つのFabry-Perot

共振器の共振周波数差

$$\rightarrow \delta c/c < 10^{-17}$$

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

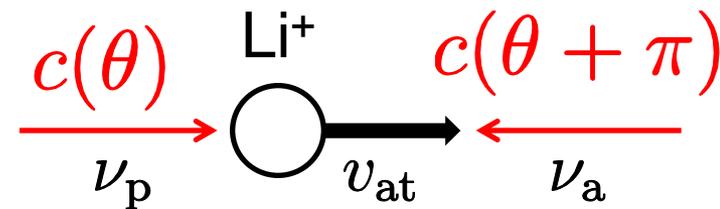


- 片道光速の等方性検証

イオンのDoppler遷移した共鳴周波数の測定

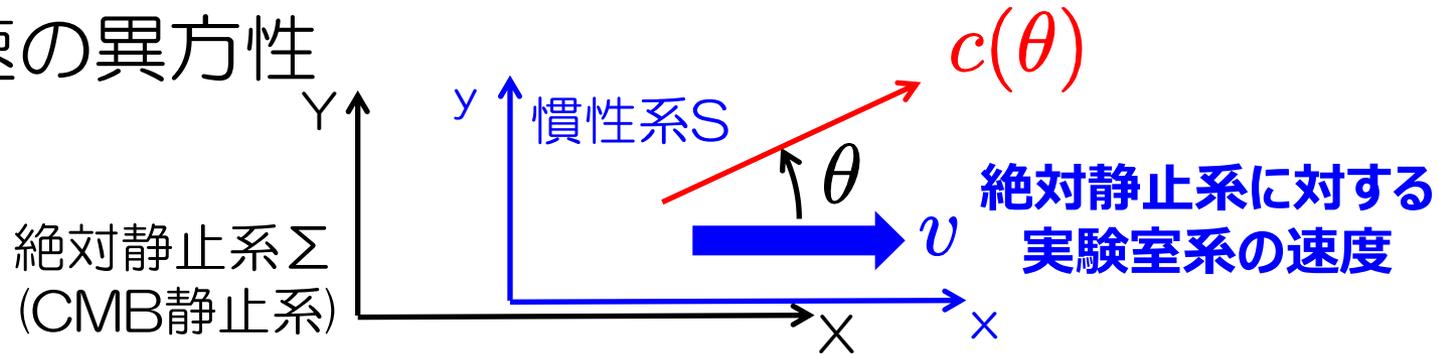
$$\rightarrow \delta c/c < 10^{-10}$$

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



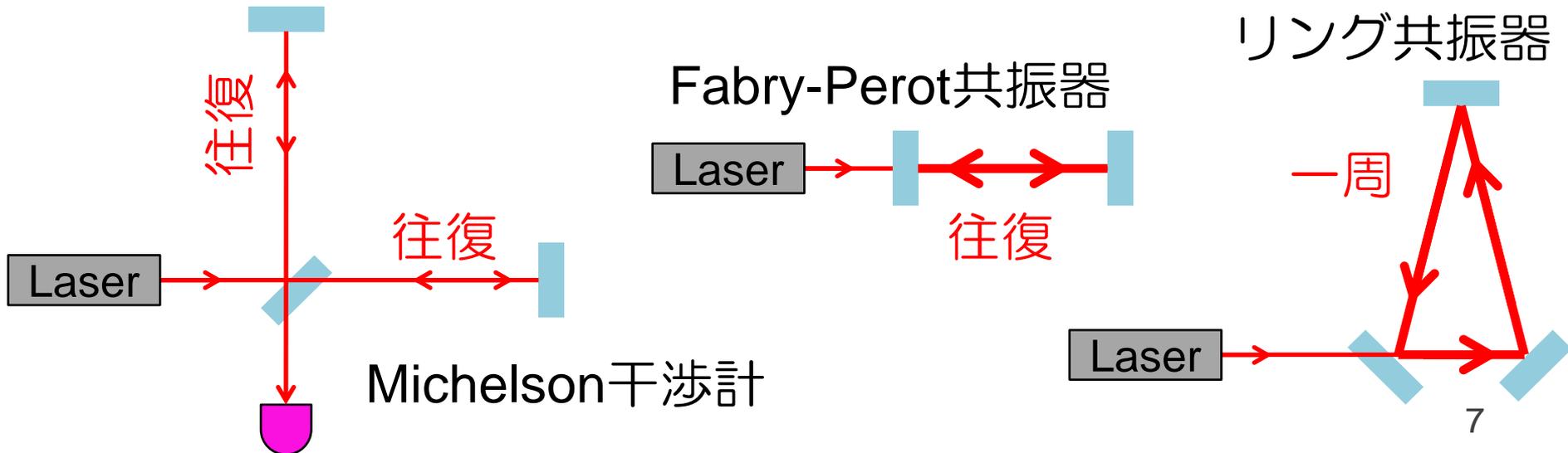
片道光速の異方性測定

- 片道光速の異方性



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

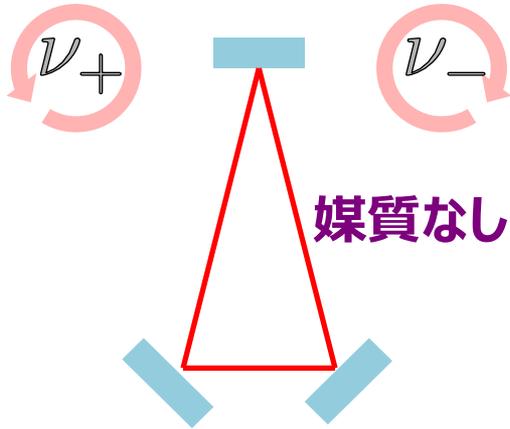
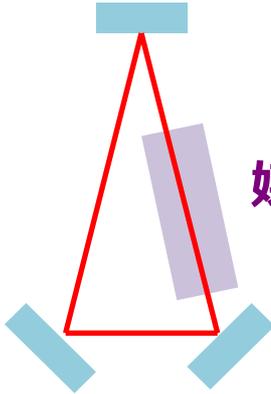
- 通常の干渉計では往復光速の異方性だけ



リング共振器の光路に媒質

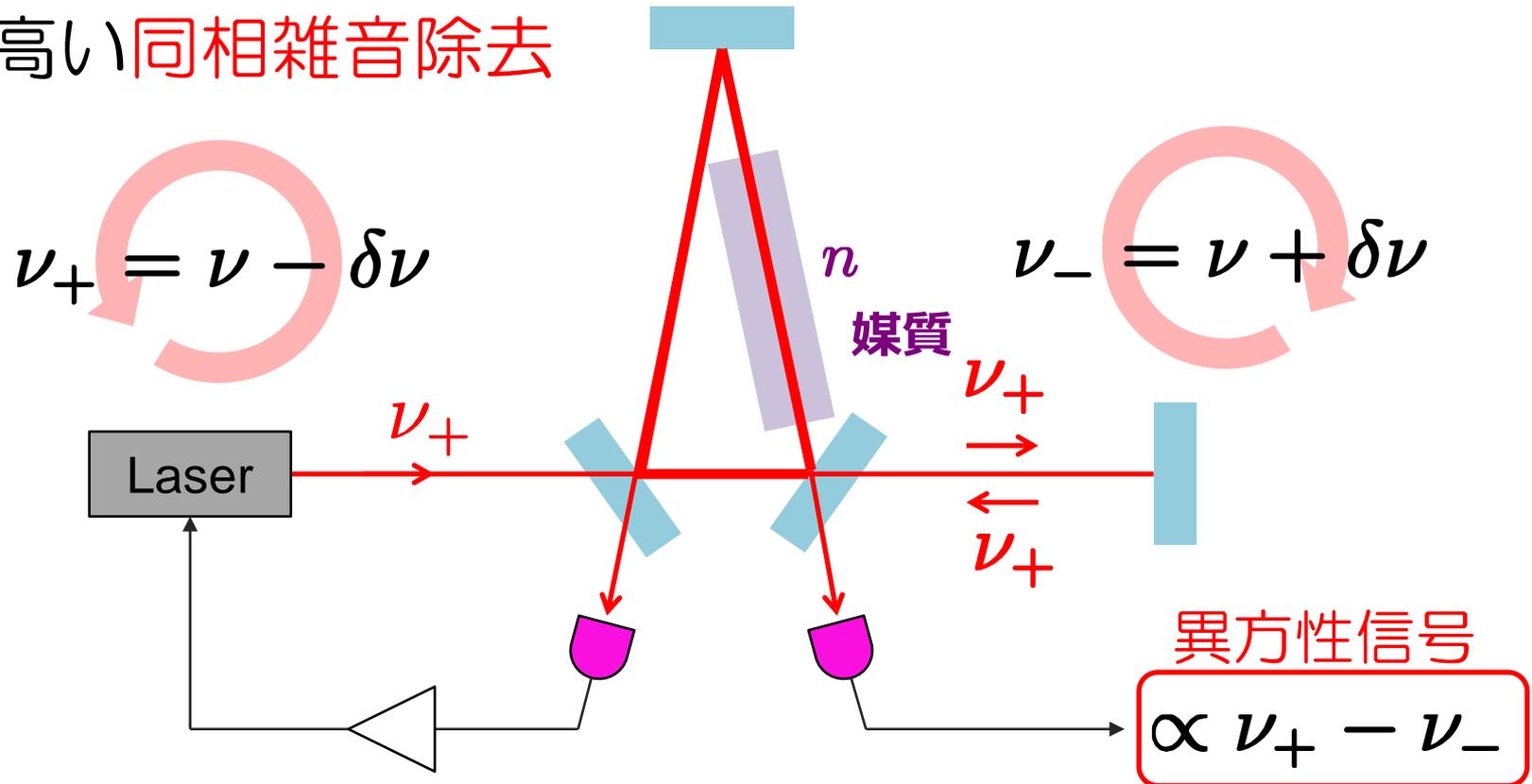
- 片道光速の異方性がキャンセルされなくなる

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

	 <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	$\nu_+ = \nu_0$ $\nu_- = \nu_0$	$\nu_+ = \nu - \delta\nu$ $\nu_- = \nu + \delta\nu$

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**
- 高い **同相雑音除去**



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

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

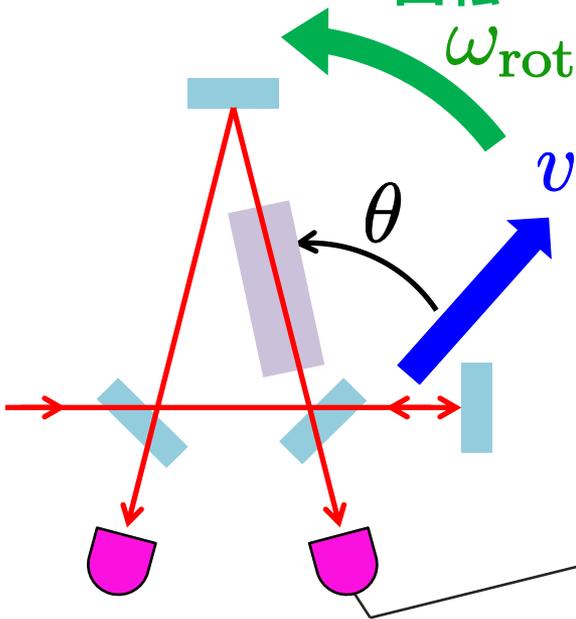
CMBに対する
実験室系の速さ
 $v \simeq 10^{-3}$

一周長

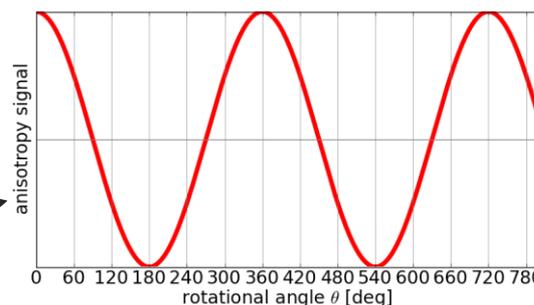
媒質長

実験装置を回転させ、
異方性信号を変調

回転
 ω_{rot}

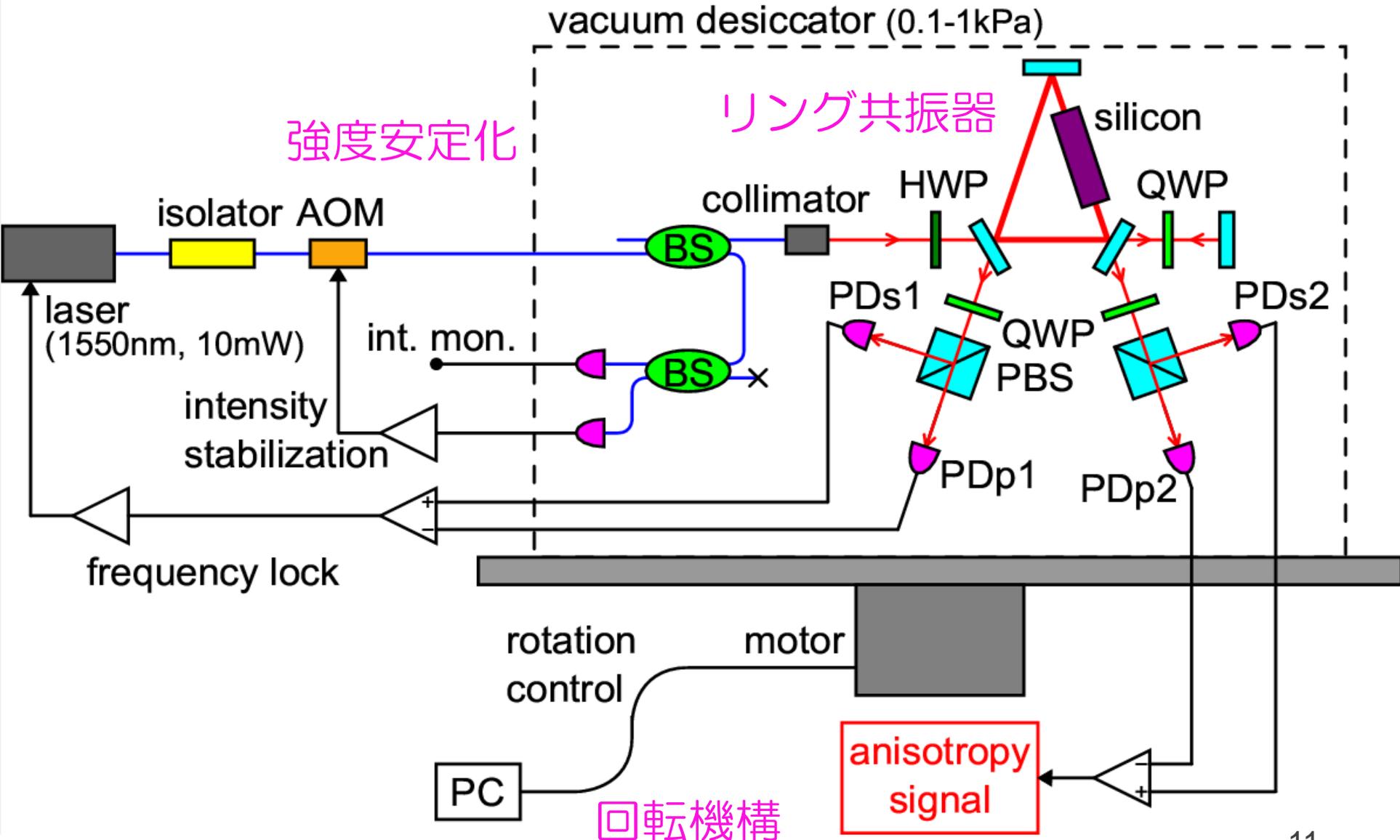


媒質を入れることが本実験のポイント
屈折率が高いほど感度が高い
→ シリコン($n=3.69$)を使用
(波長1550nmの光に対して透明)

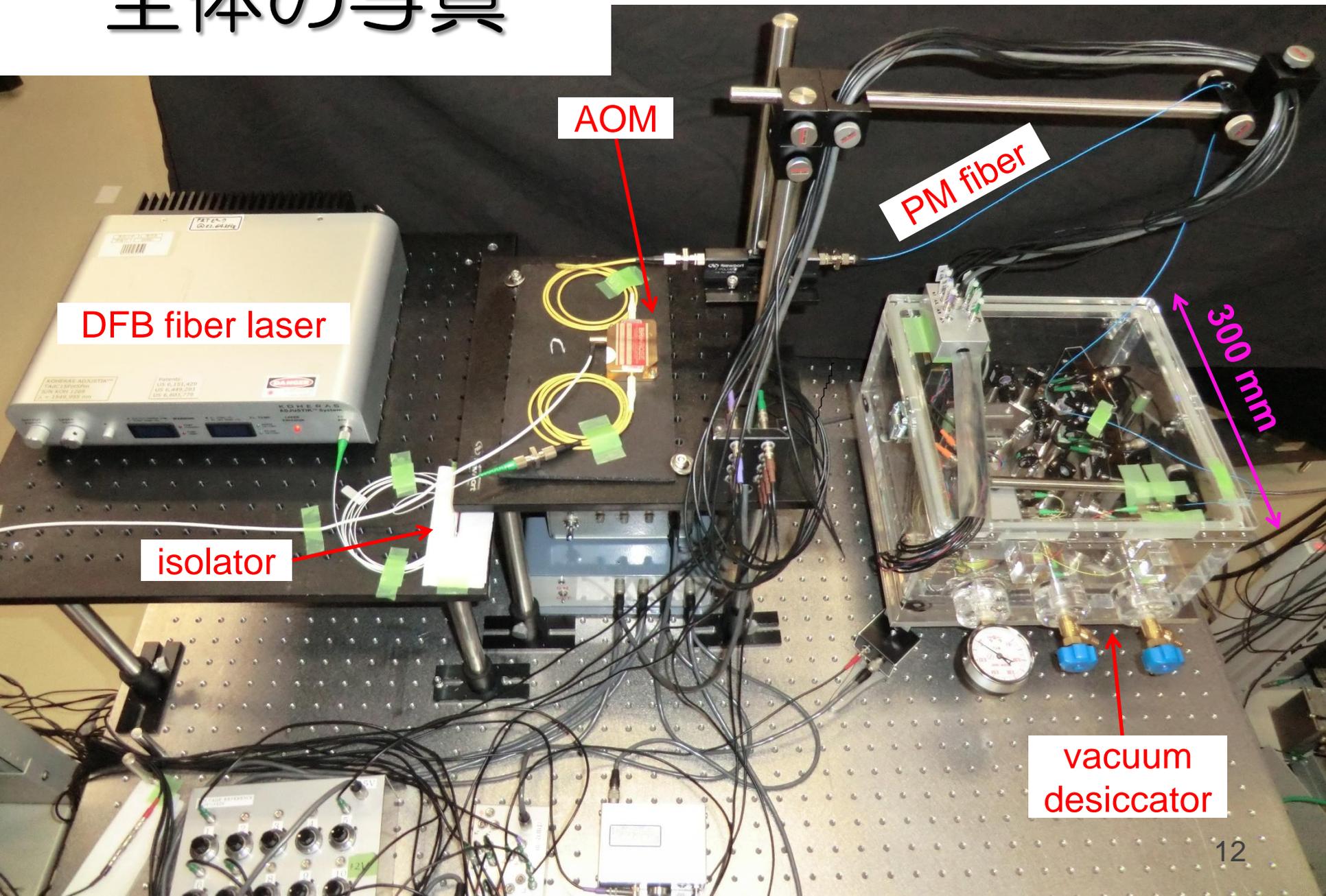


$\propto \alpha + 1/2$

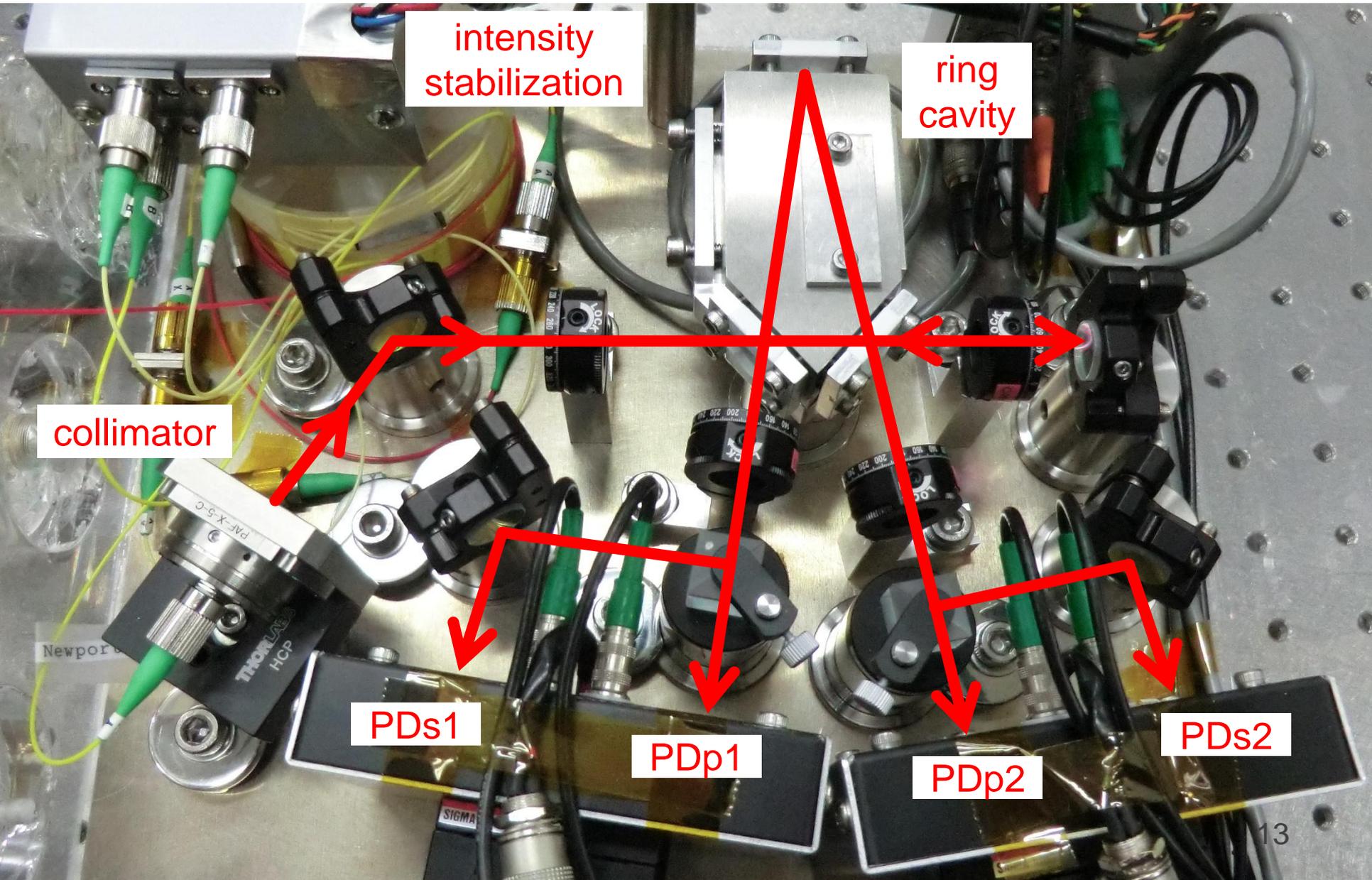
実験装置全体の構成



全体の写真



光学系の写真



intensity
stabilization

ring
cavity

collimator

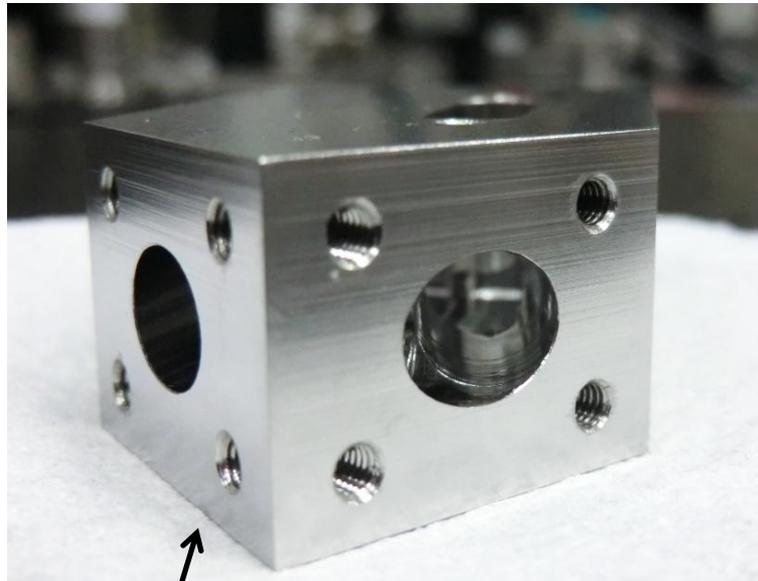
PDs1

PDp1

PDp2

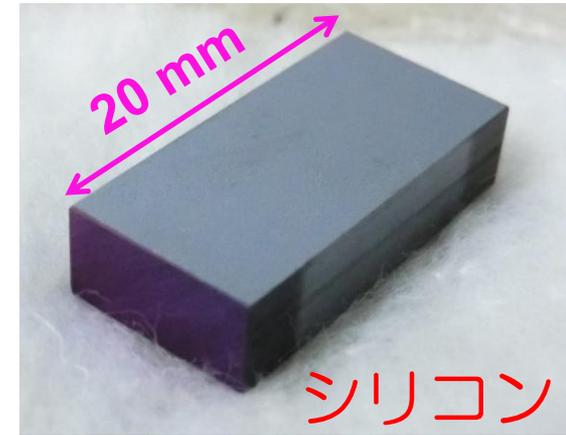
PDs2

リング共振器の写真

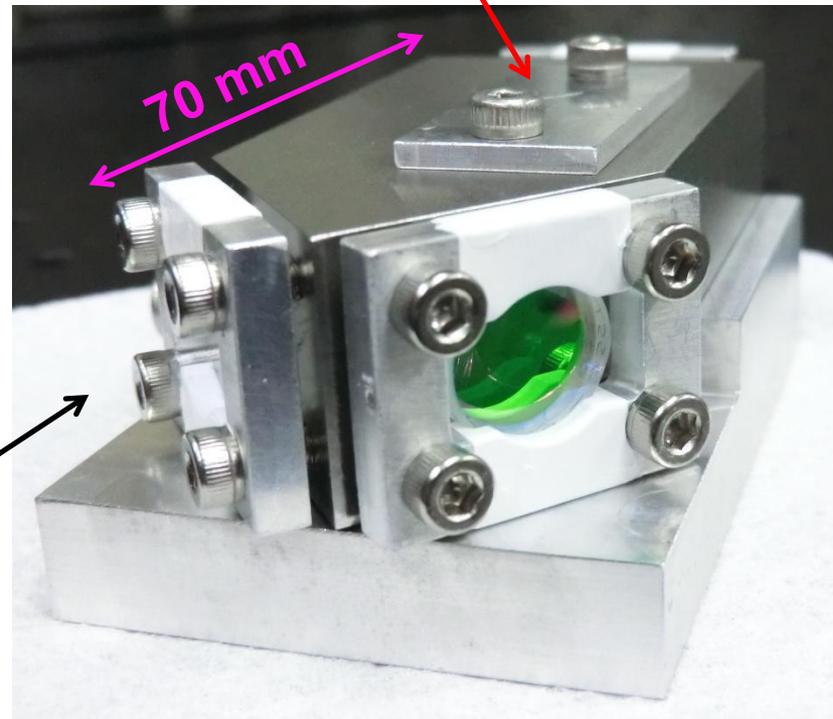


スペーサーは
スーパーインバー製
(低熱膨張合金)

鏡を取り付けた状態

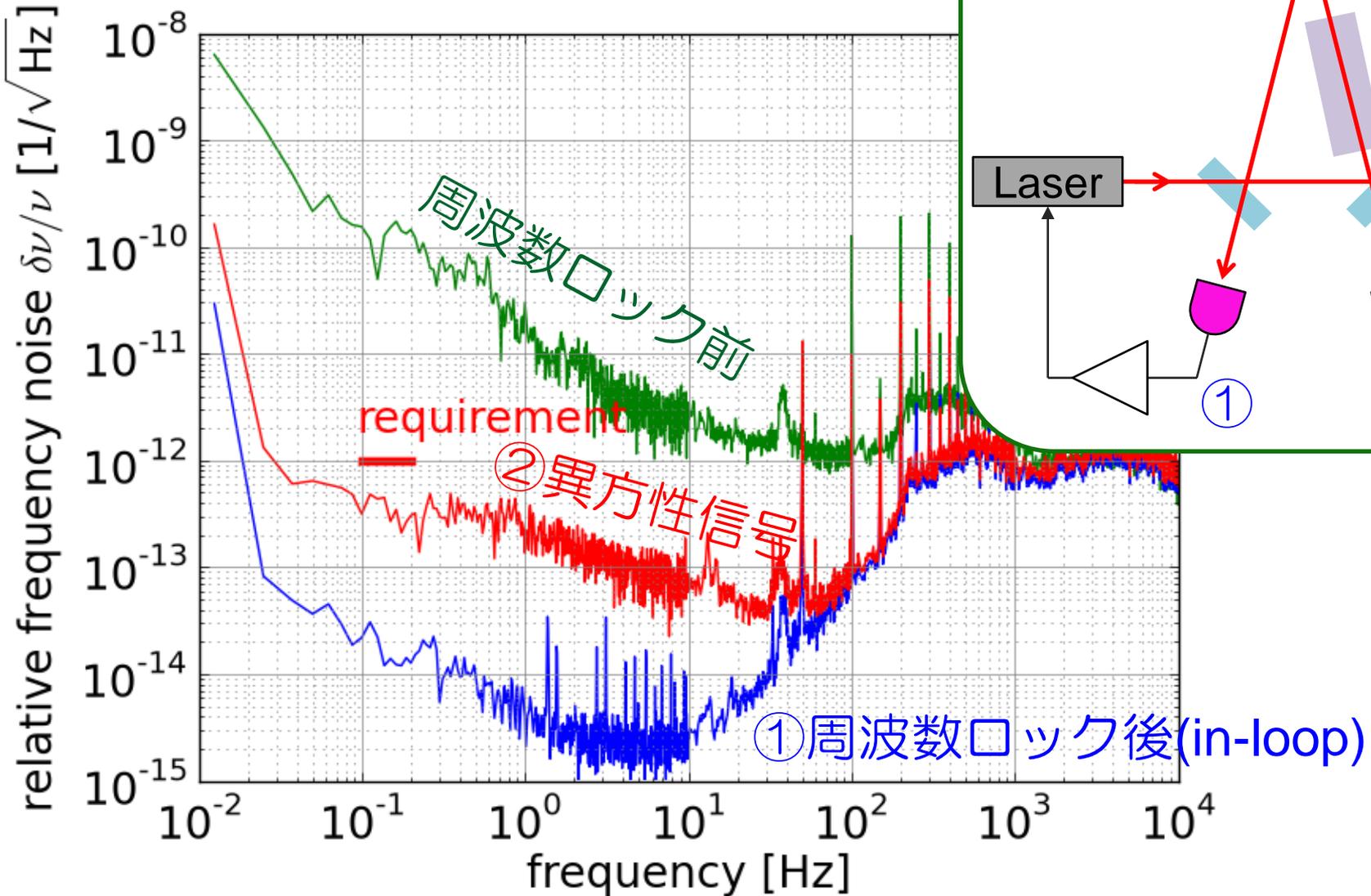


この中にシリコン



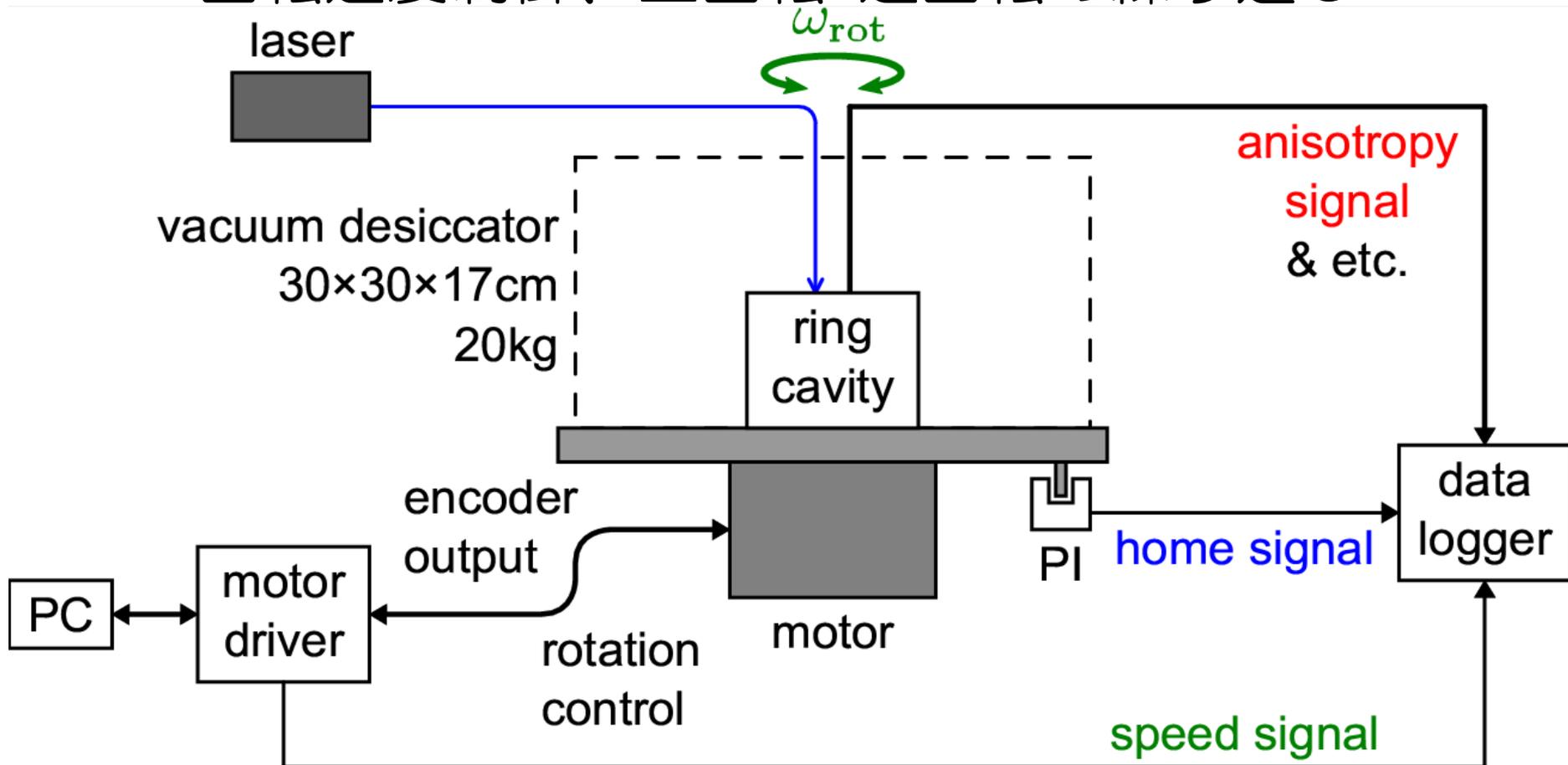
異方性への感度

- 上限値更新が可能な感度



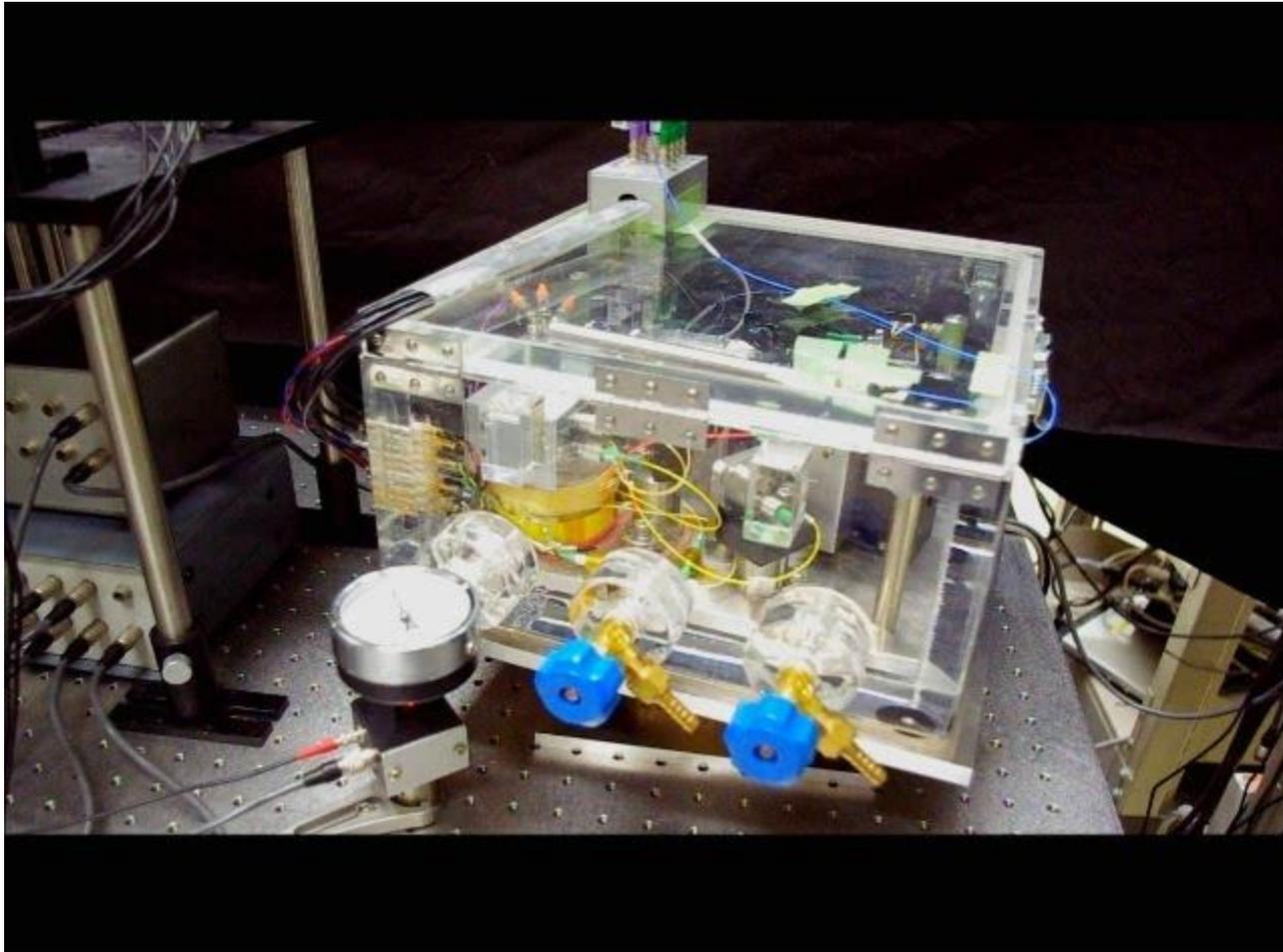
回転機構

- 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



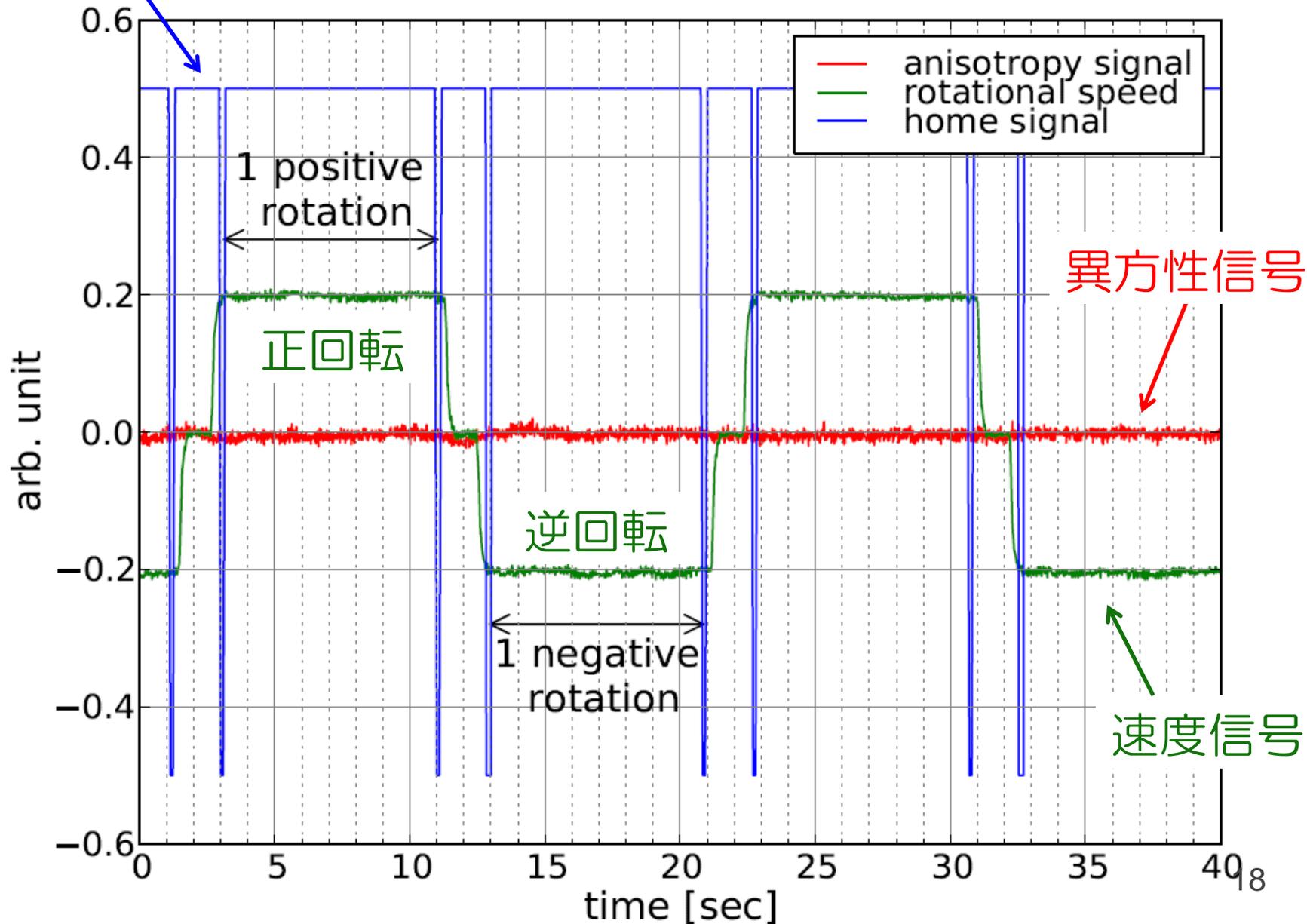
回転の様子

- 動画



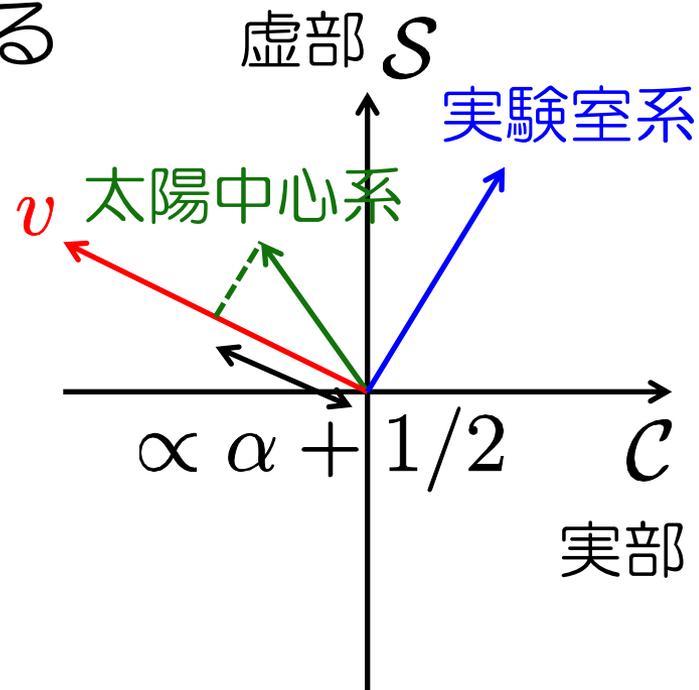
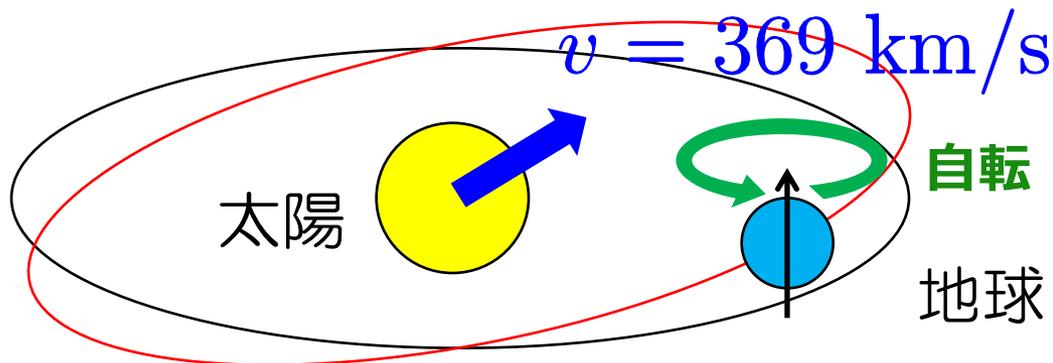
生データ

原点通過信号



データ解析の流れ

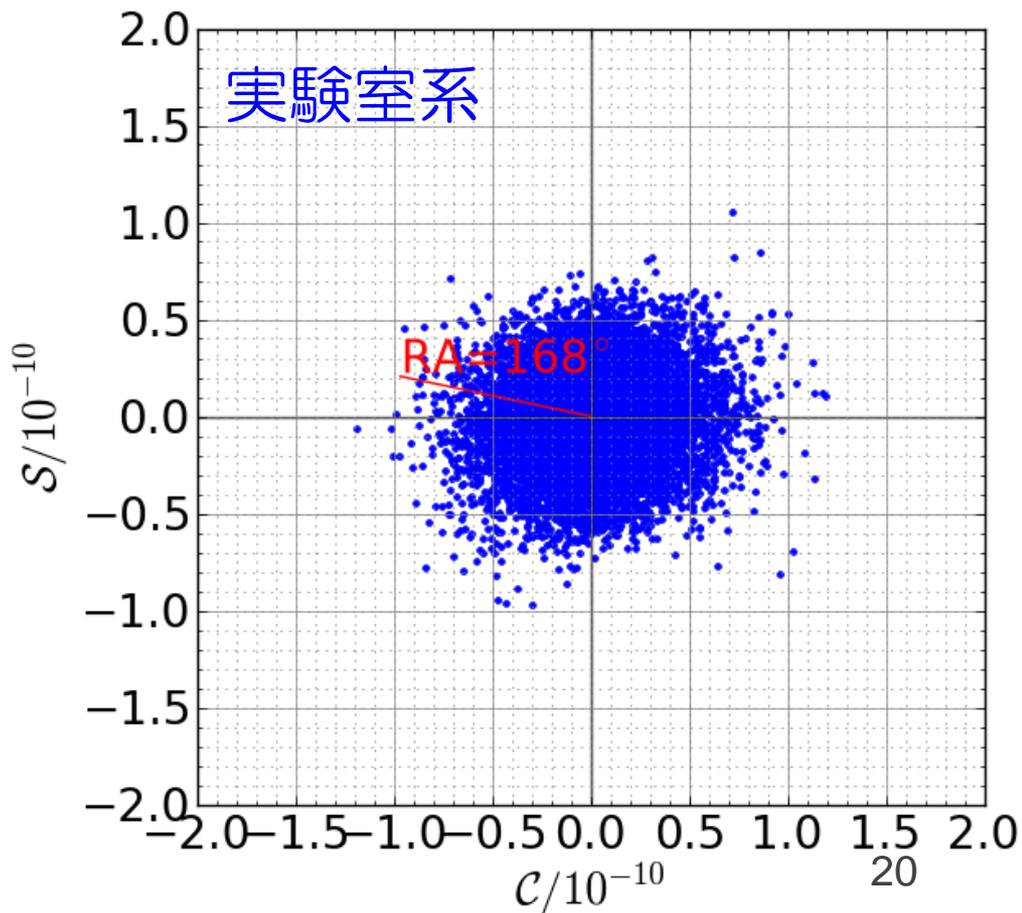
- 異方性信号の回転周波数におけるフーリエ振幅 (C, S) を求める
- フーリエ振幅 (C, S) から地球自転の影響を除去 (太陽中心系におけるフーリエ振幅 (C', S') に変換)
- (C', S') から $\alpha + 1/2$ を求める
- 1回転ごとに上記解析を行い、得られた各 $\alpha + 1/2$ の平均を最終的な値とする



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

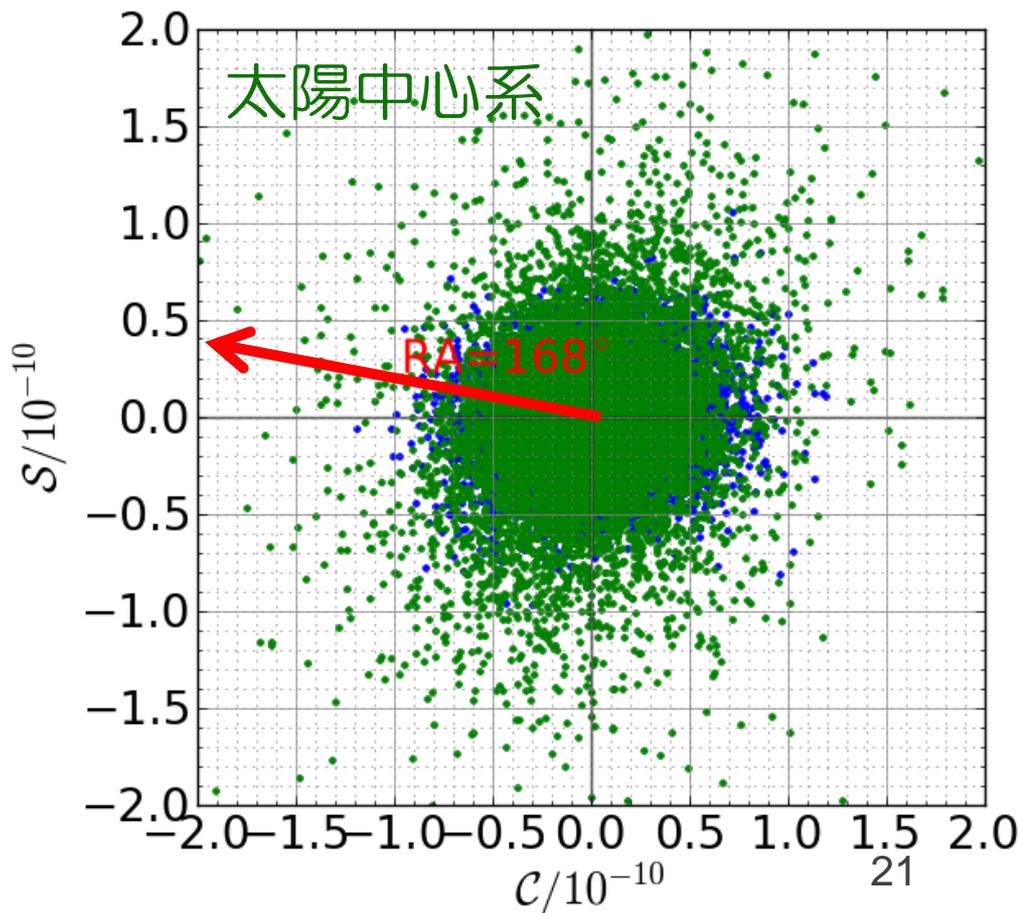
- 実験室系におけるフーリエ振幅
 (C, S) →



解析結果

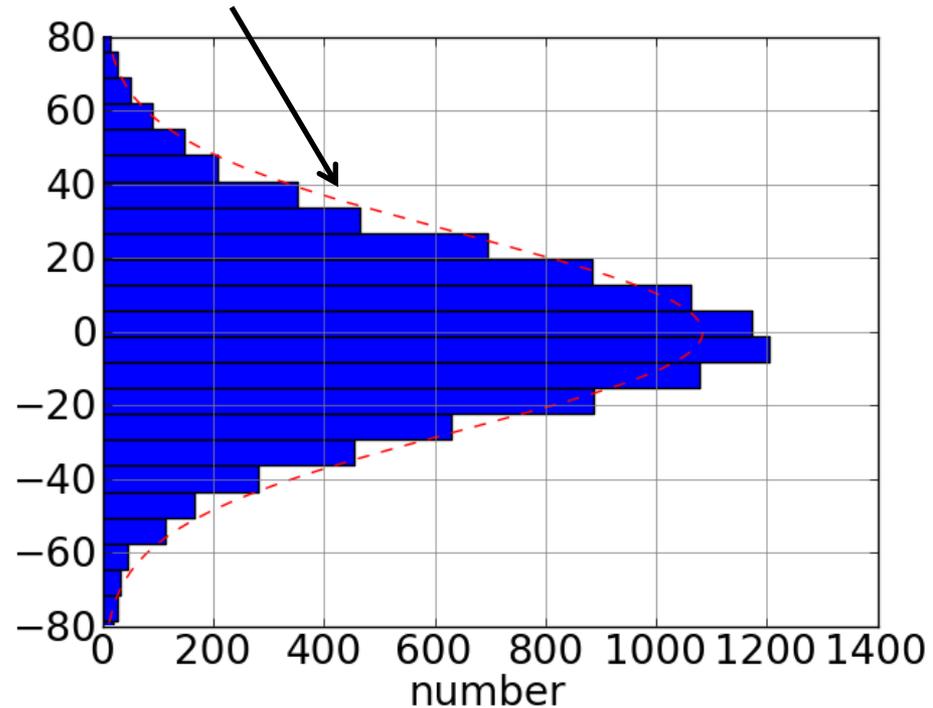
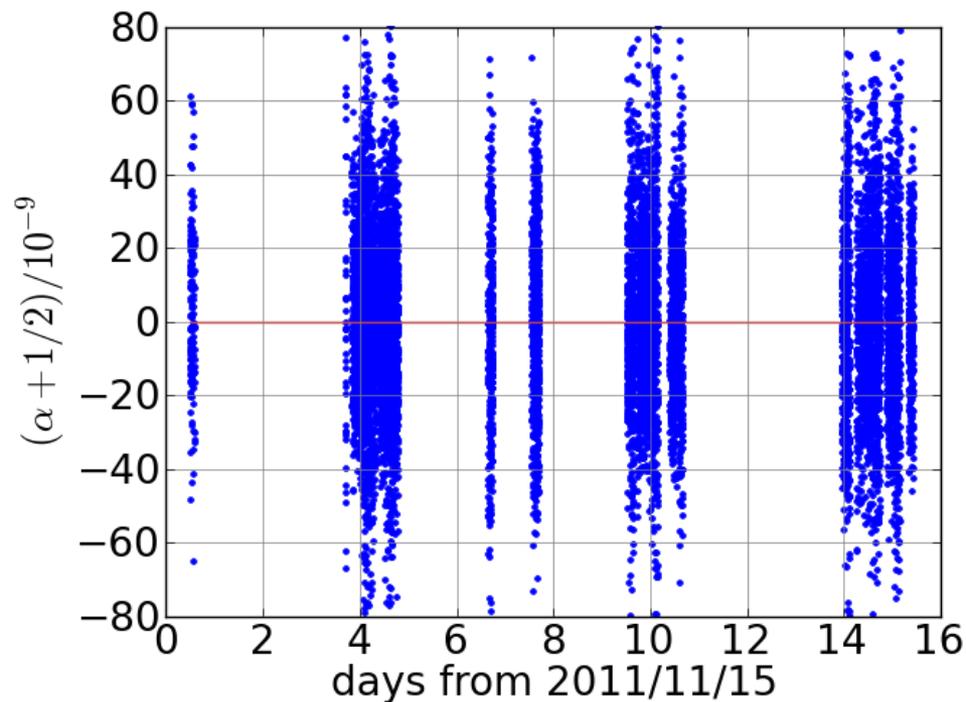
- 2011年11月後半の2週間に渡って、断続的に2.6万回転
- そのうち雑音レベルの低い1万回転(約1.2日分)を解析に使用

- 太陽中心系におけるフーリエ振幅
(C' , S')



得られた上限値

- 得られた $\alpha + 1/2$ のヒストグラム



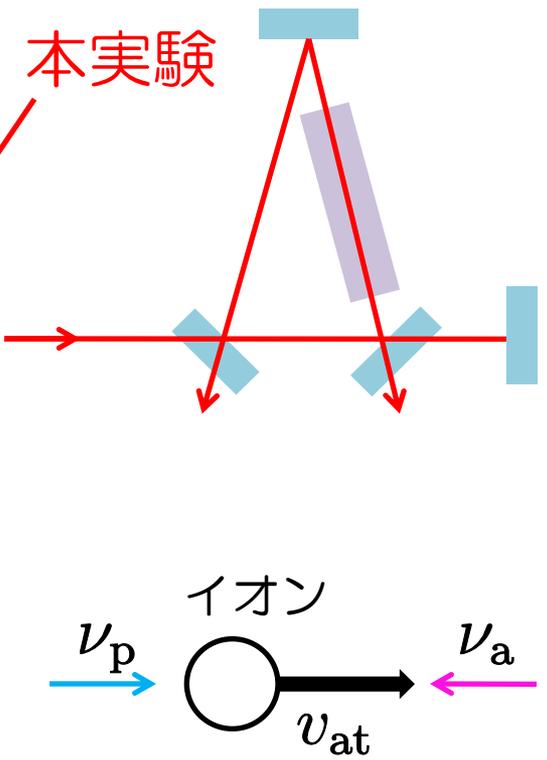
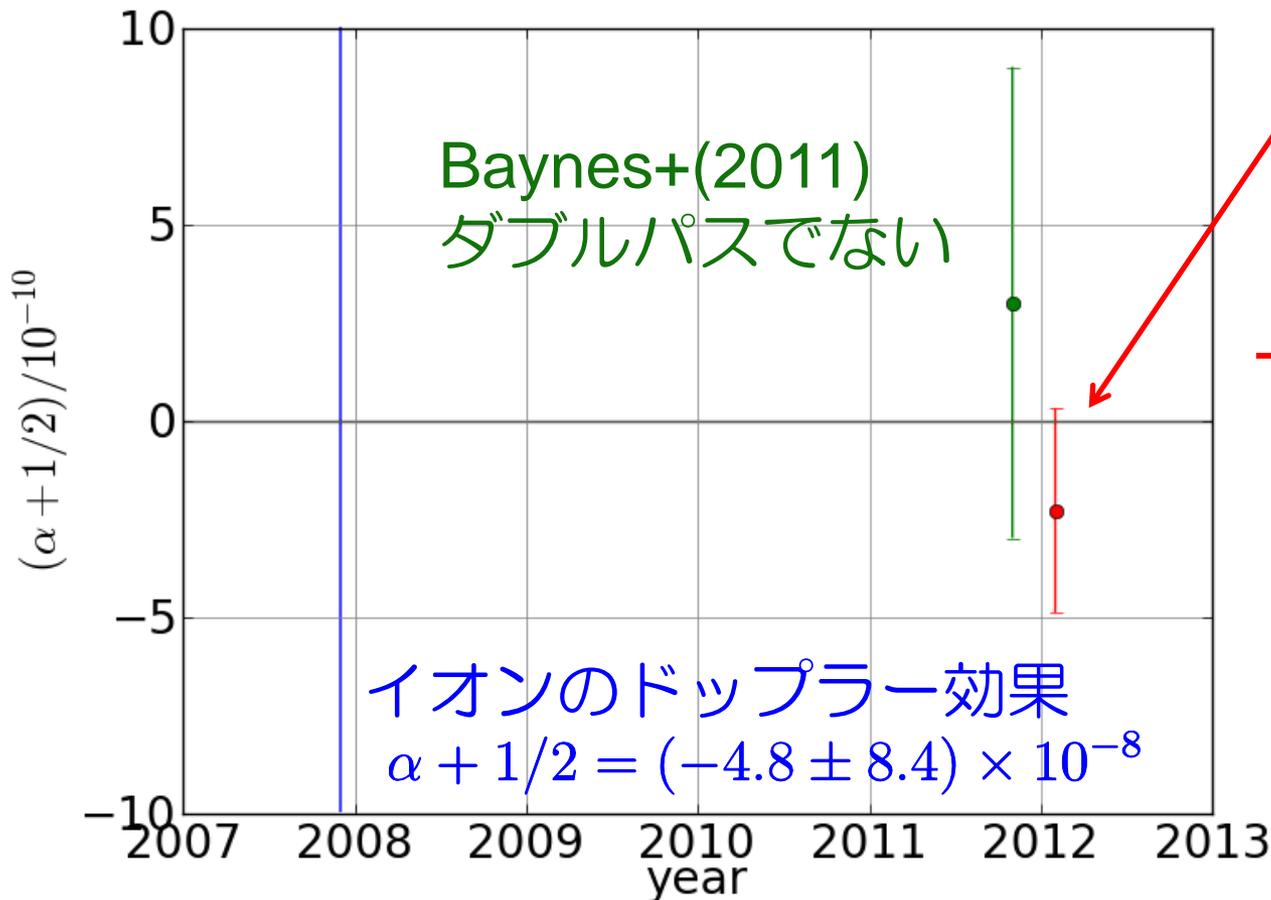
→ $\alpha + 1/2 = (-2.3 \pm 2.6) \times 10^{-10}$

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！

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



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
- 感度を制限しているのは
レーザー光の偏波面のドリフト？
- 回転に伴う雑音がありそう
→ 低減し、
さらに1桁程度
の上限値更新を
目指す

