

# 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

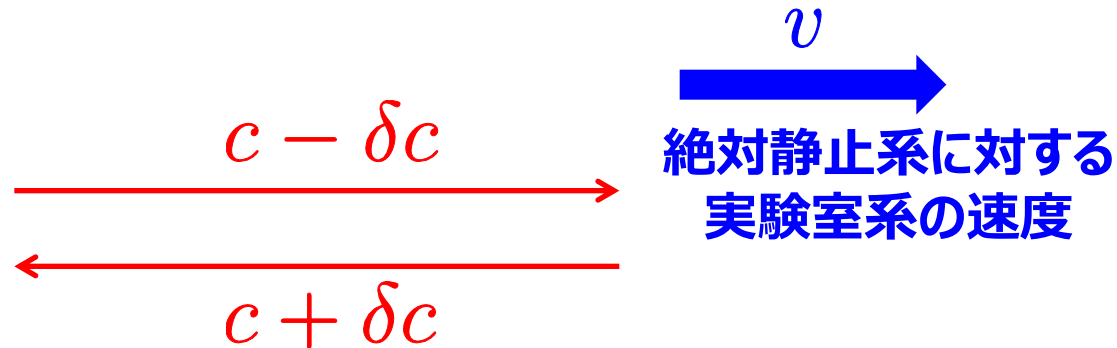
I will give an impressive talk

# 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

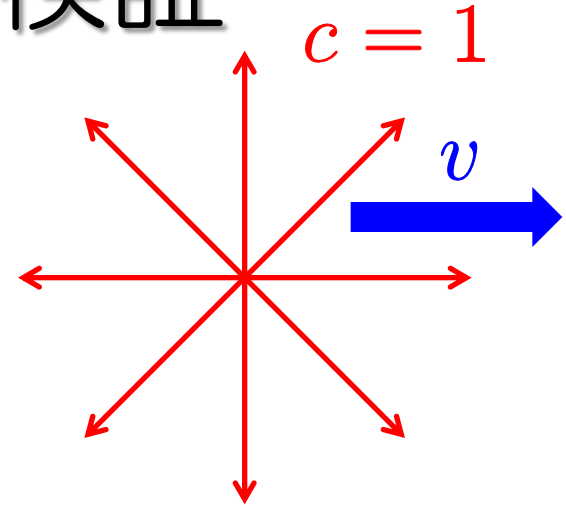


# 目次

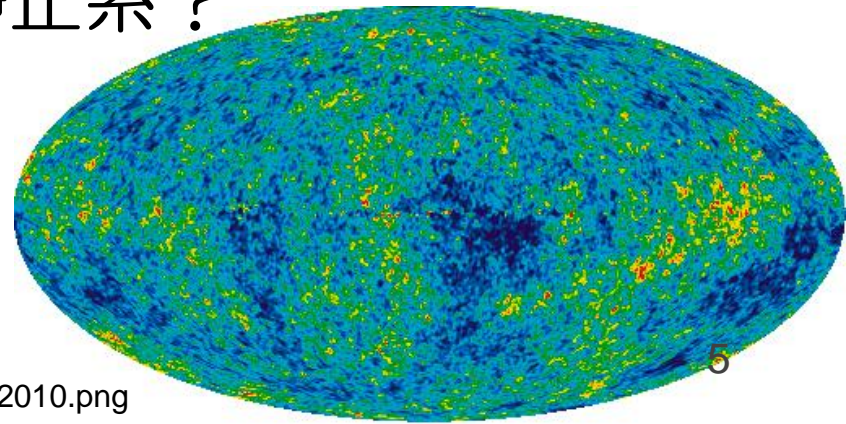
1. 研究背景  
なぜ光速の異方性を考えるのか
2. 測定原理  
なぜ光リング共振器で測定できるのか
3. 実験装置  
強度安定化系、リング共振器、回転機構
4. データ解析  
解析の流れ、結果
5. まとめ

# 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？



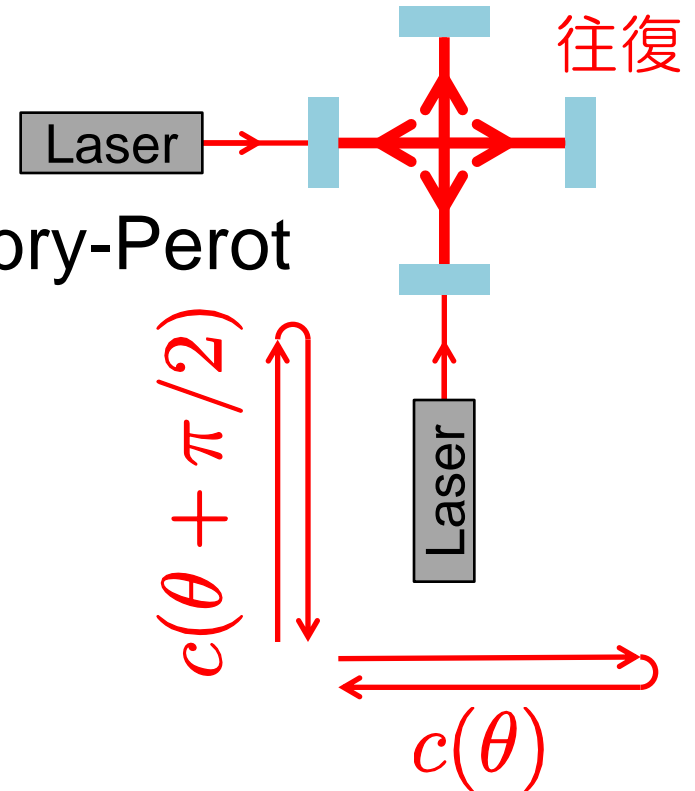
→実験的検証が必要



# 光速の等方性検証

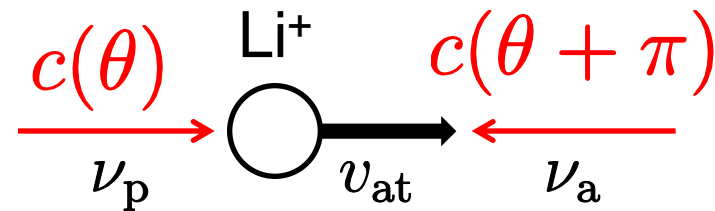
- 往復光速の等方性検証  
 Michelson-Morleyの実験  
 最新版は直交した2つのFabry-Perot  
 共振器の共振周波数差  
 $\rightarrow \delta c/c < 10^{-17}$

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



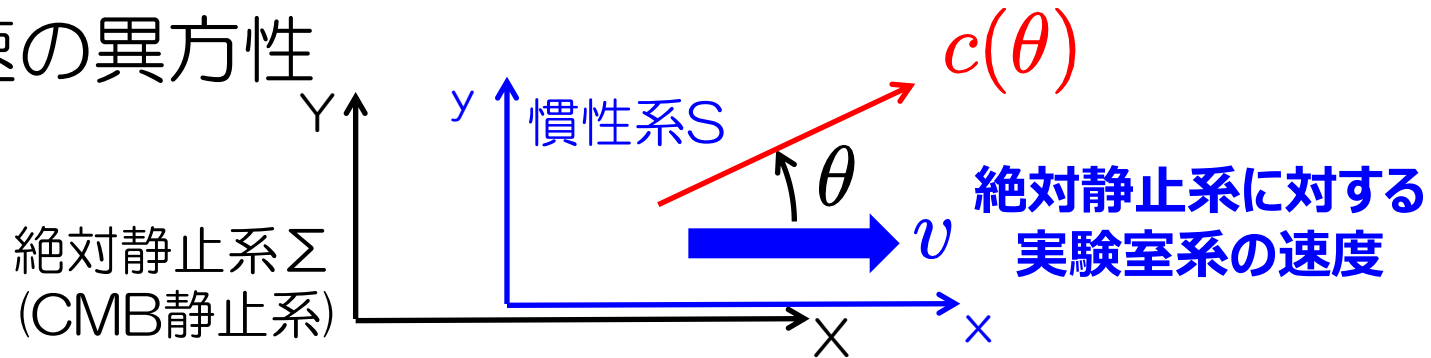
- 片道光速の等方性検証  
 イオンのDoppler遷移した共鳴周波数の測定  
 $\rightarrow \delta c/c < 10^{-10}$

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



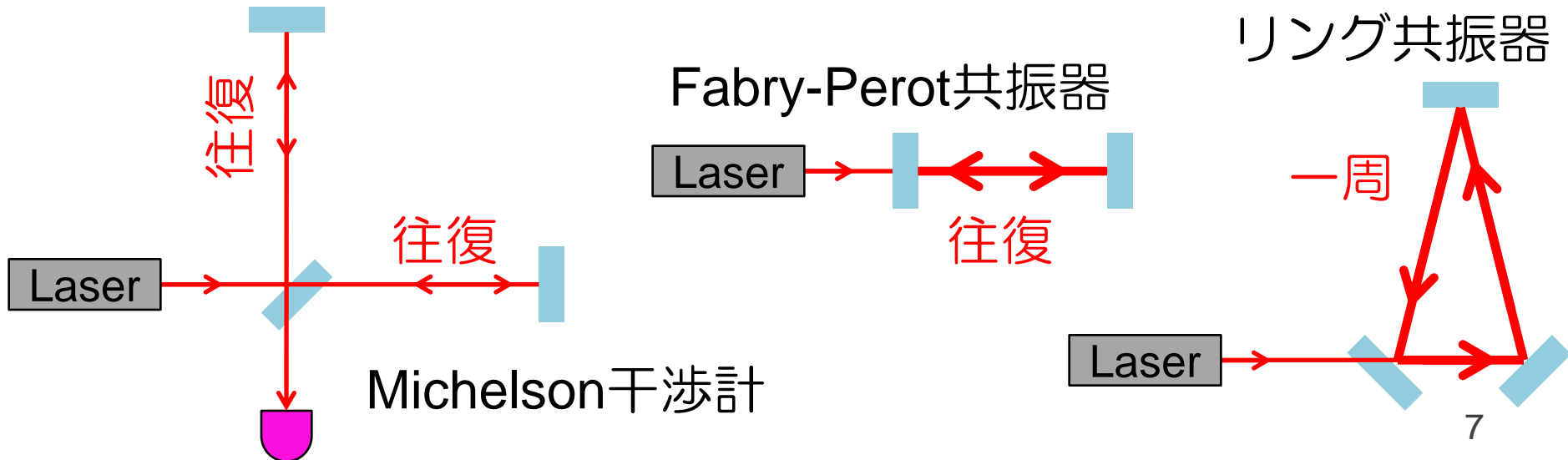
# 片道光速の異方性測定

- 片道光速の異方性



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

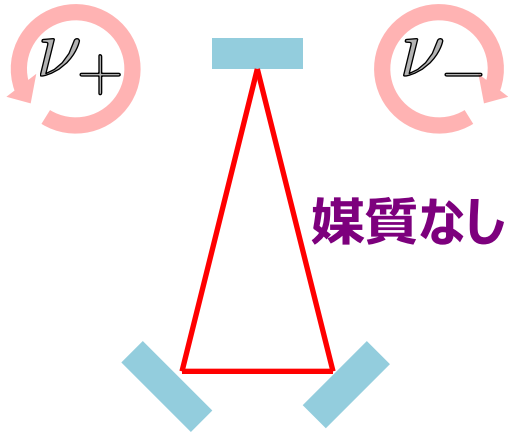
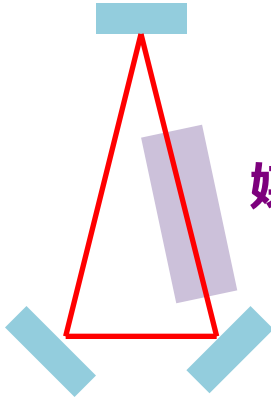
- 通常の干渉計では往復光速の異方性だけ



# 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

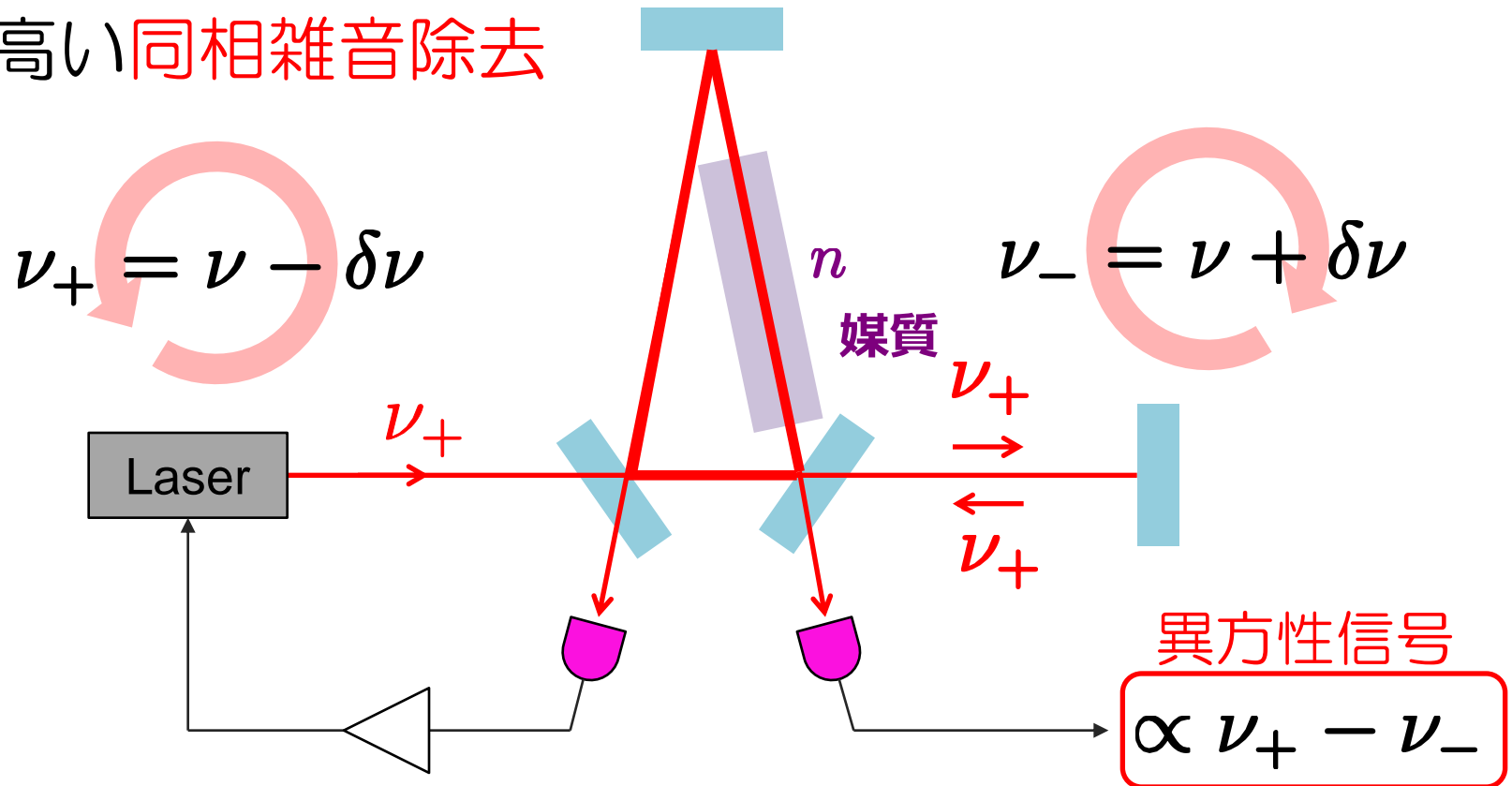
$$c(\theta) = 1 - 2(\alpha + 1/2)v \cos \theta + \mathcal{O}(v^2)$$

	 <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;"> <math>\alpha + 1/2</math> 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**



$\nu_+$  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

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

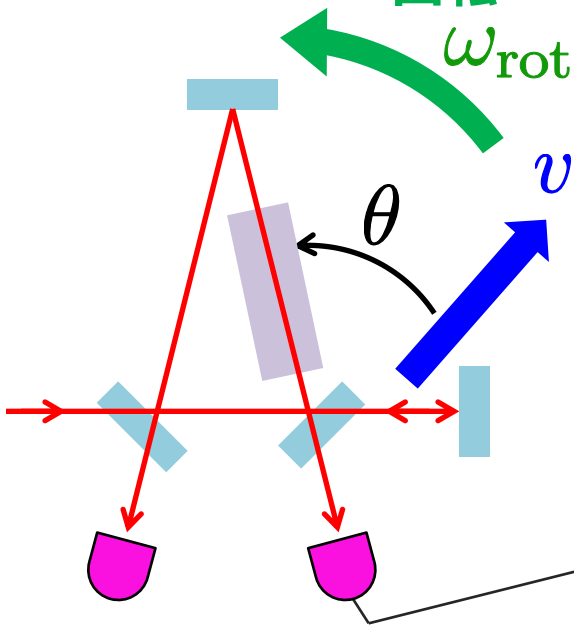
CMBに対する  
実験室系の速さ  
 $v \simeq 10^{-3}$

一周長

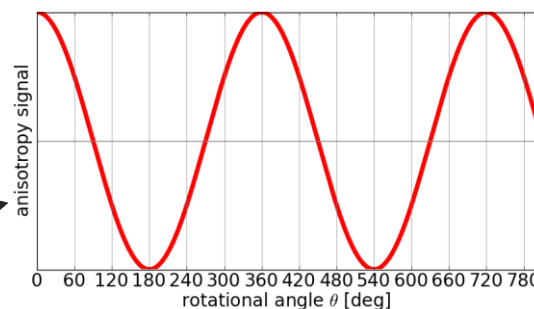
媒質長

実験装置を回転させ、  
異方性信号を変調

回転  
 $\omega_{rot}$

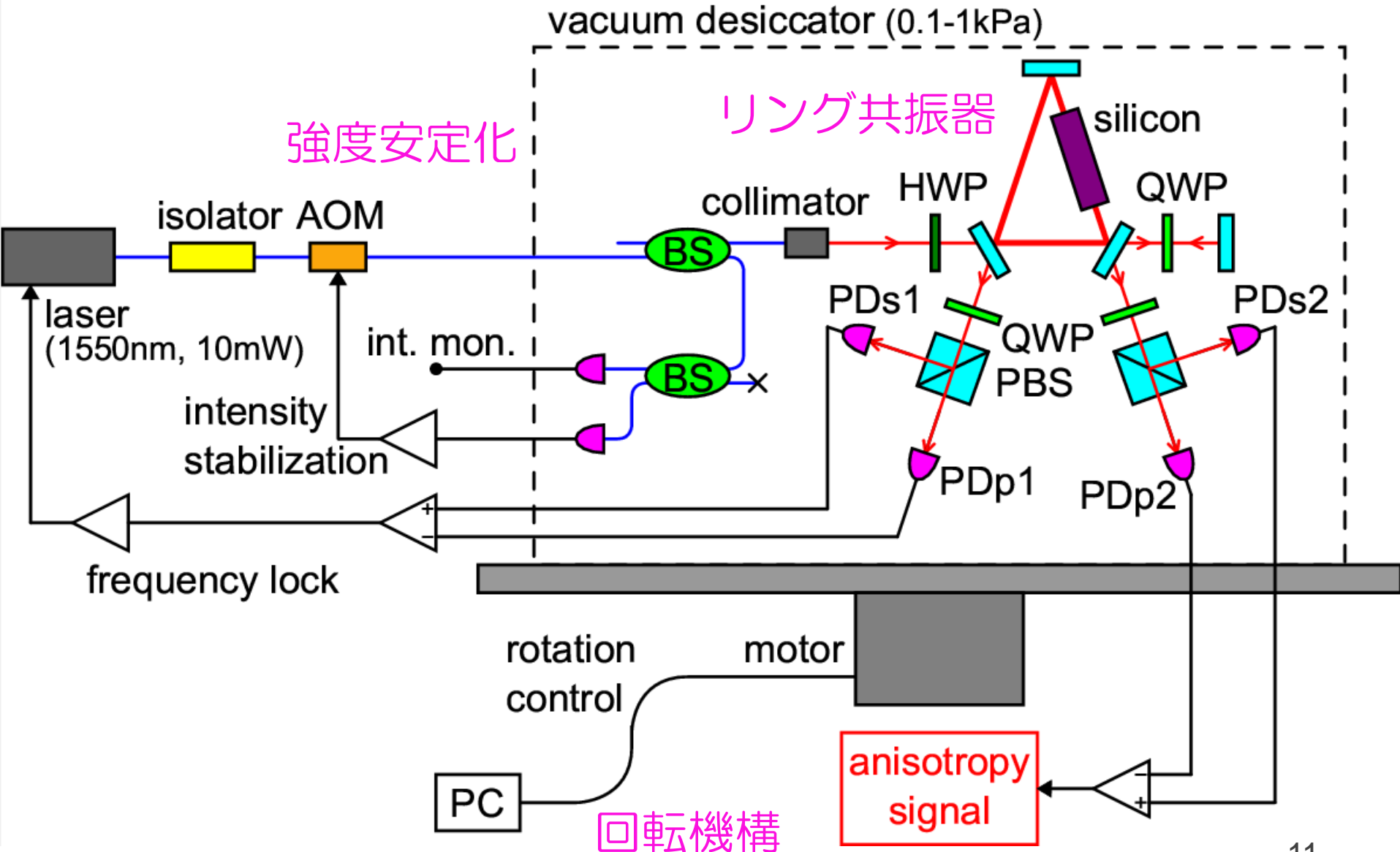


媒質を入れることが本実験のポイント  
屈折率が高いほど感度が高い  
→ シリコン( $n=3.69$ )を使用  
(波長1550nmの光に対して透明)

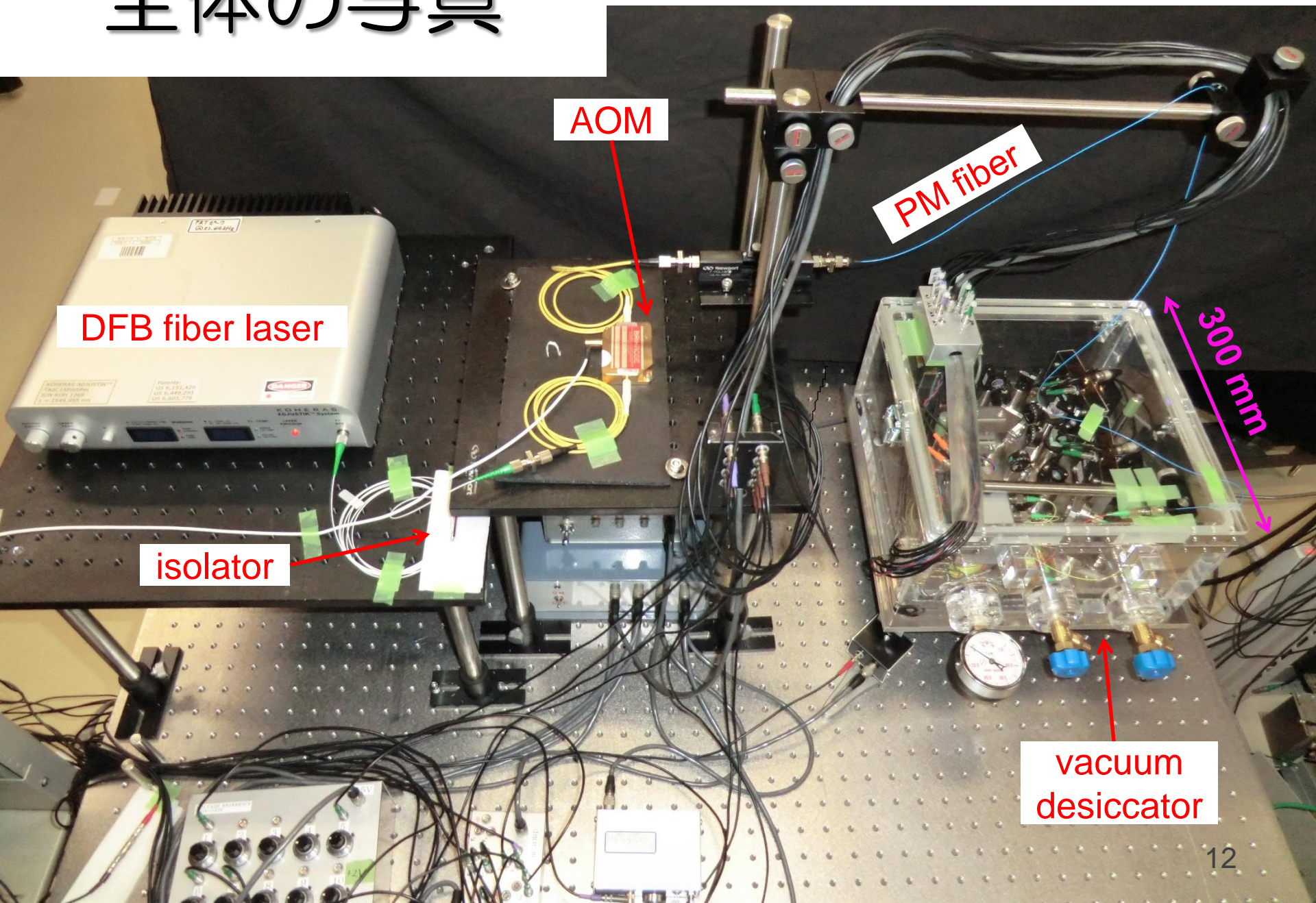


$\propto \alpha + 1/2$

# 実験装置全体の構成



# 全体の写真



DFB fiber laser

AOM

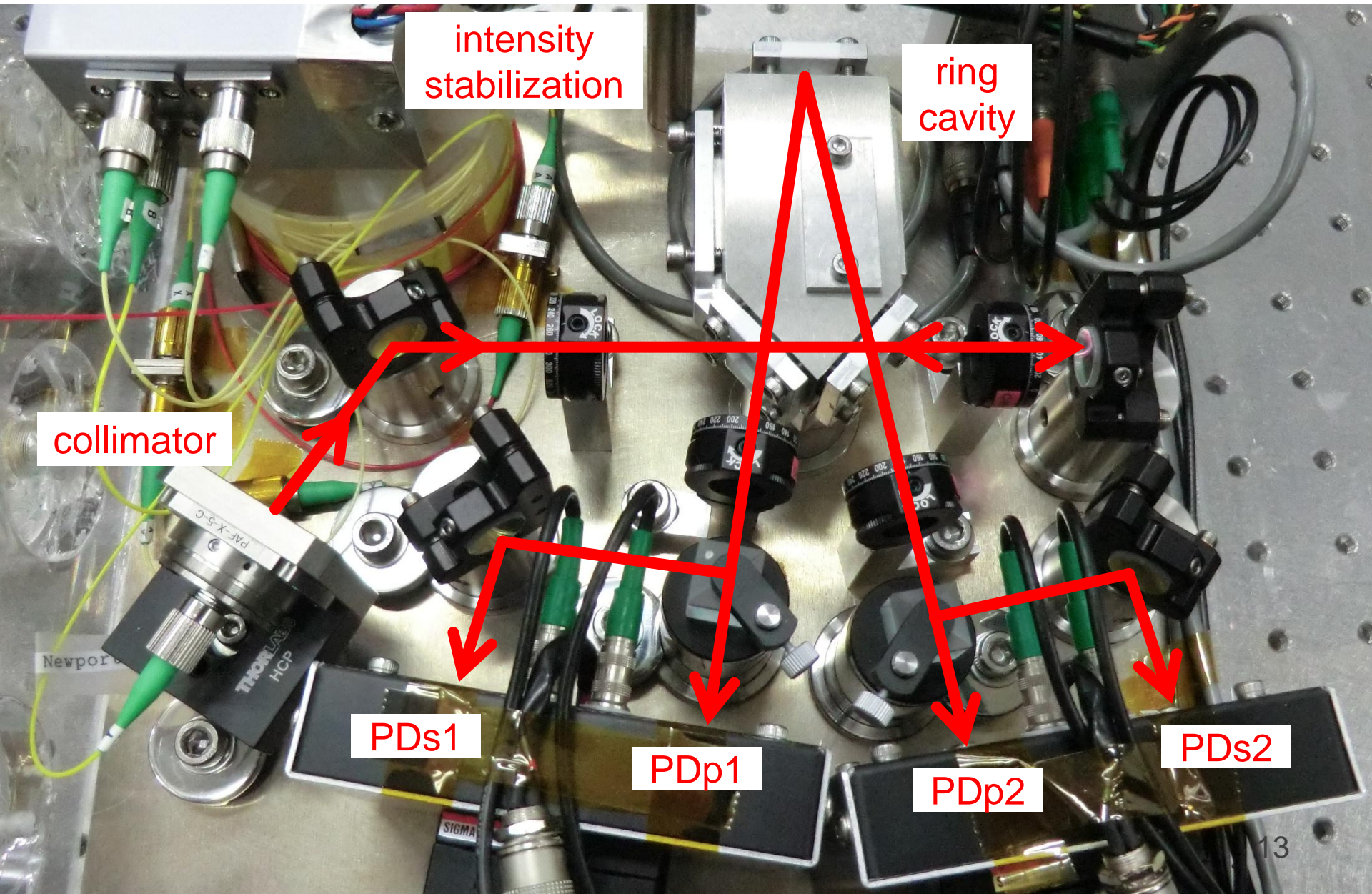
PM fiber

isolator

300 mm

vacuum desiccator

# 光学系の写真



intensity  
stabilization

ring  
cavity

collimator

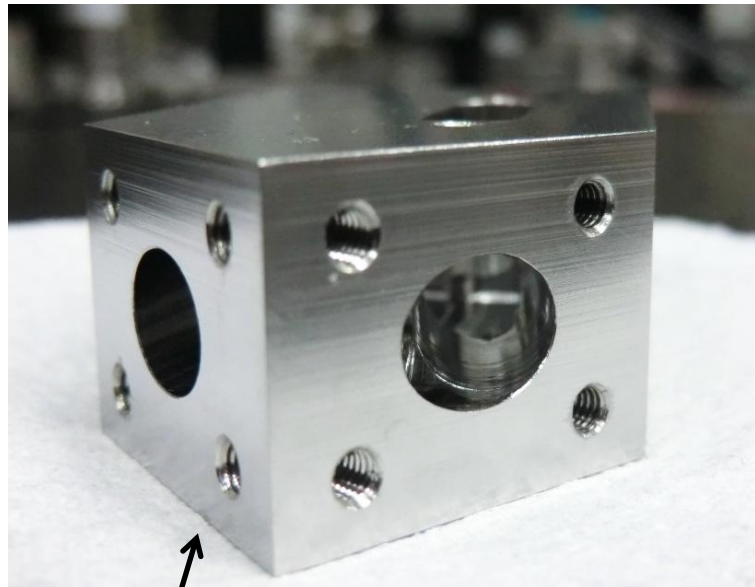
PDs1

PDp1

PDp2

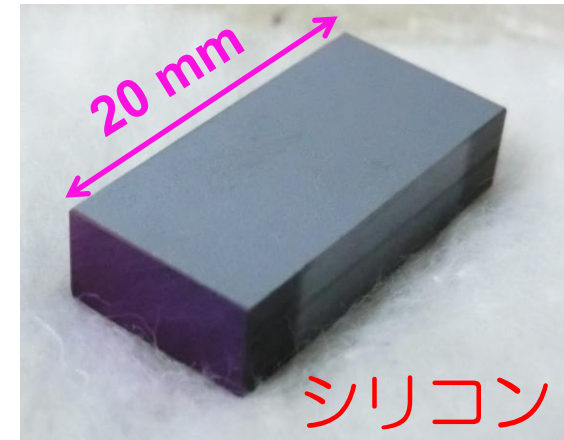
PDs2

# リング共振器の写真

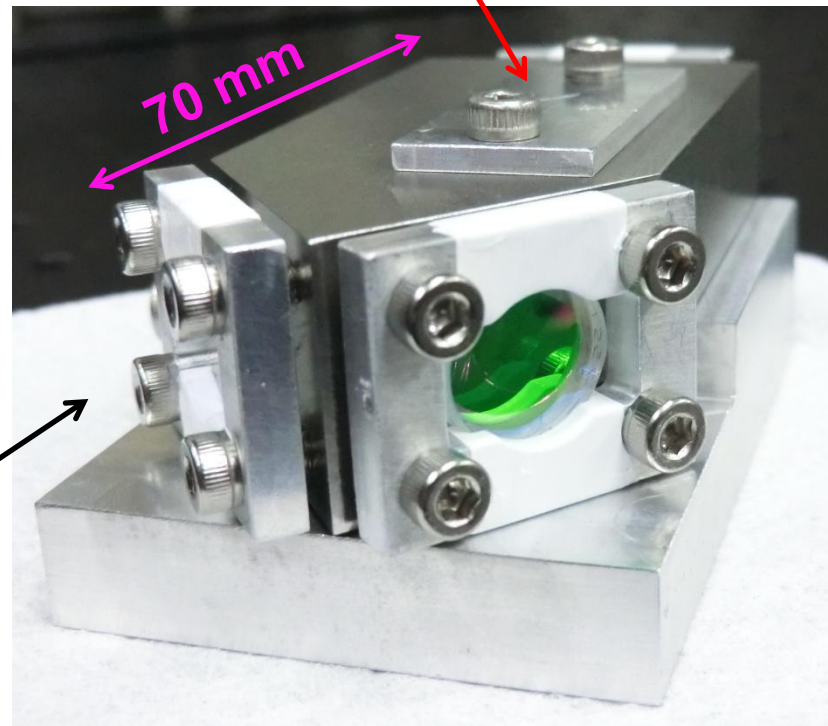


スペーサーは  
スーパーインバー製  
(低熱膨張合金)

鏡を取り付けた状態

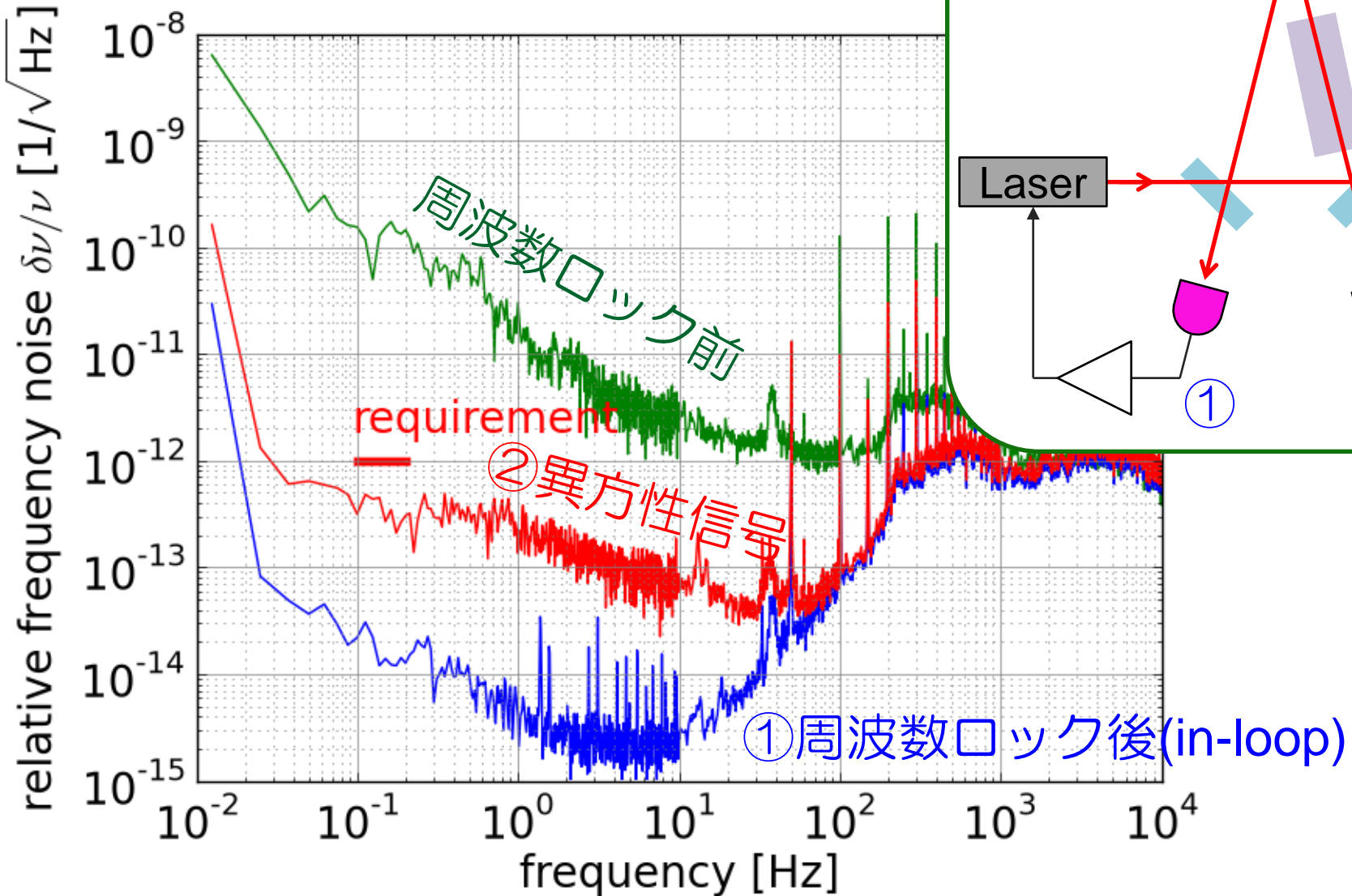


この中にシリコン



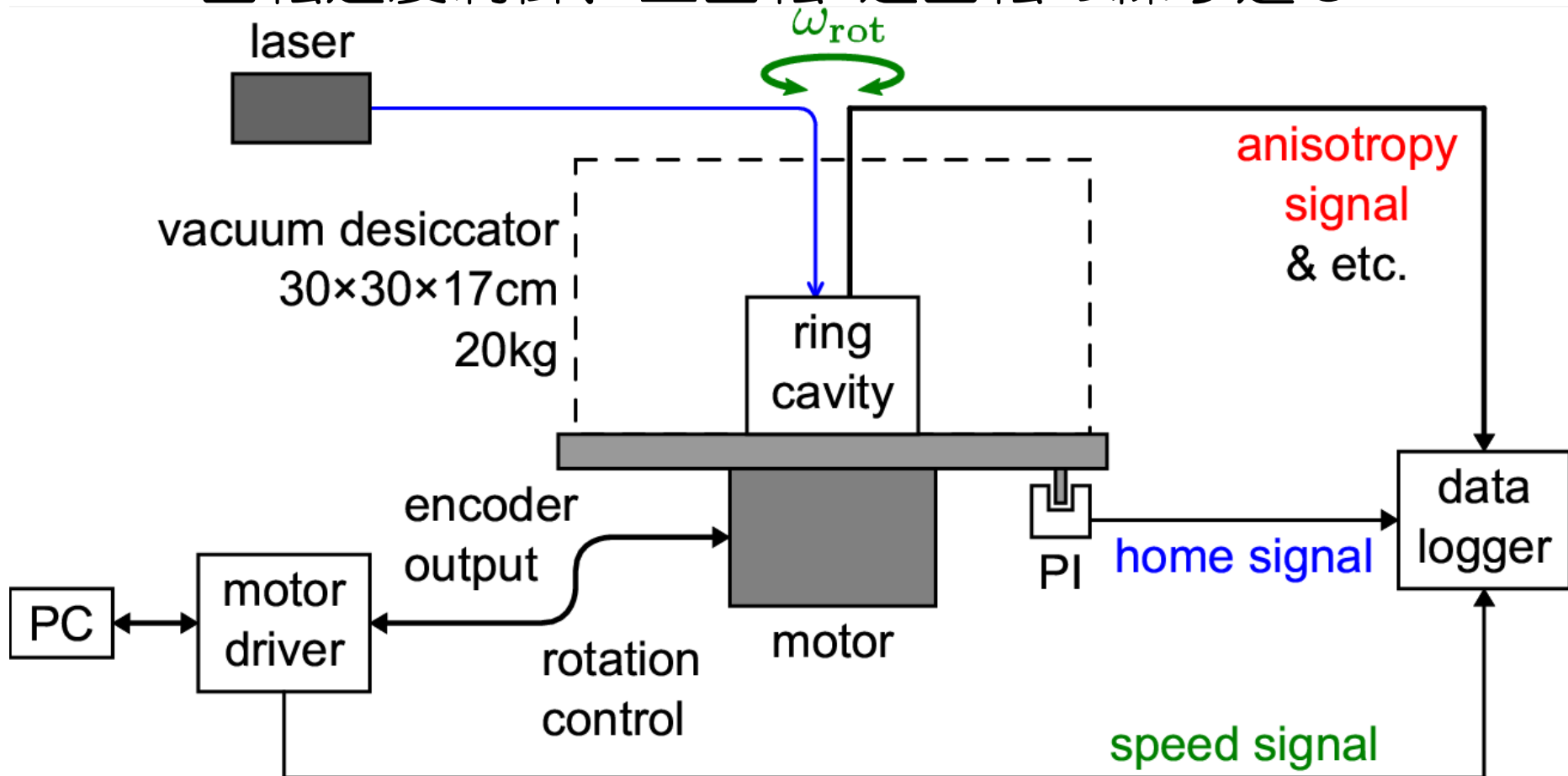
# 異方性への感度

- 上限値更新が可能な感度



# 回転機構

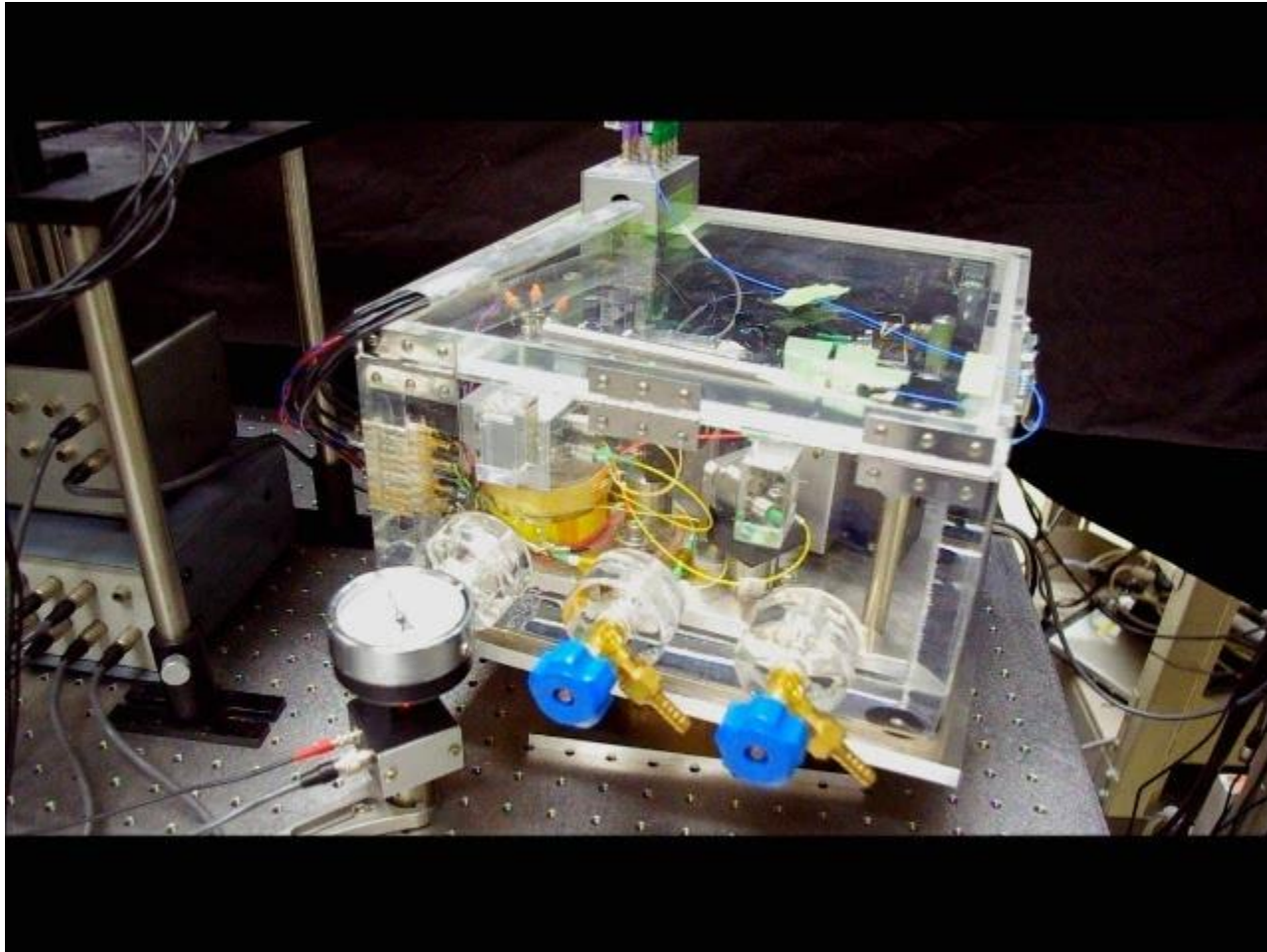
- 市販のモータとその制御システムを利用  
回転速度制御、正回転+逆回転の繰り返し





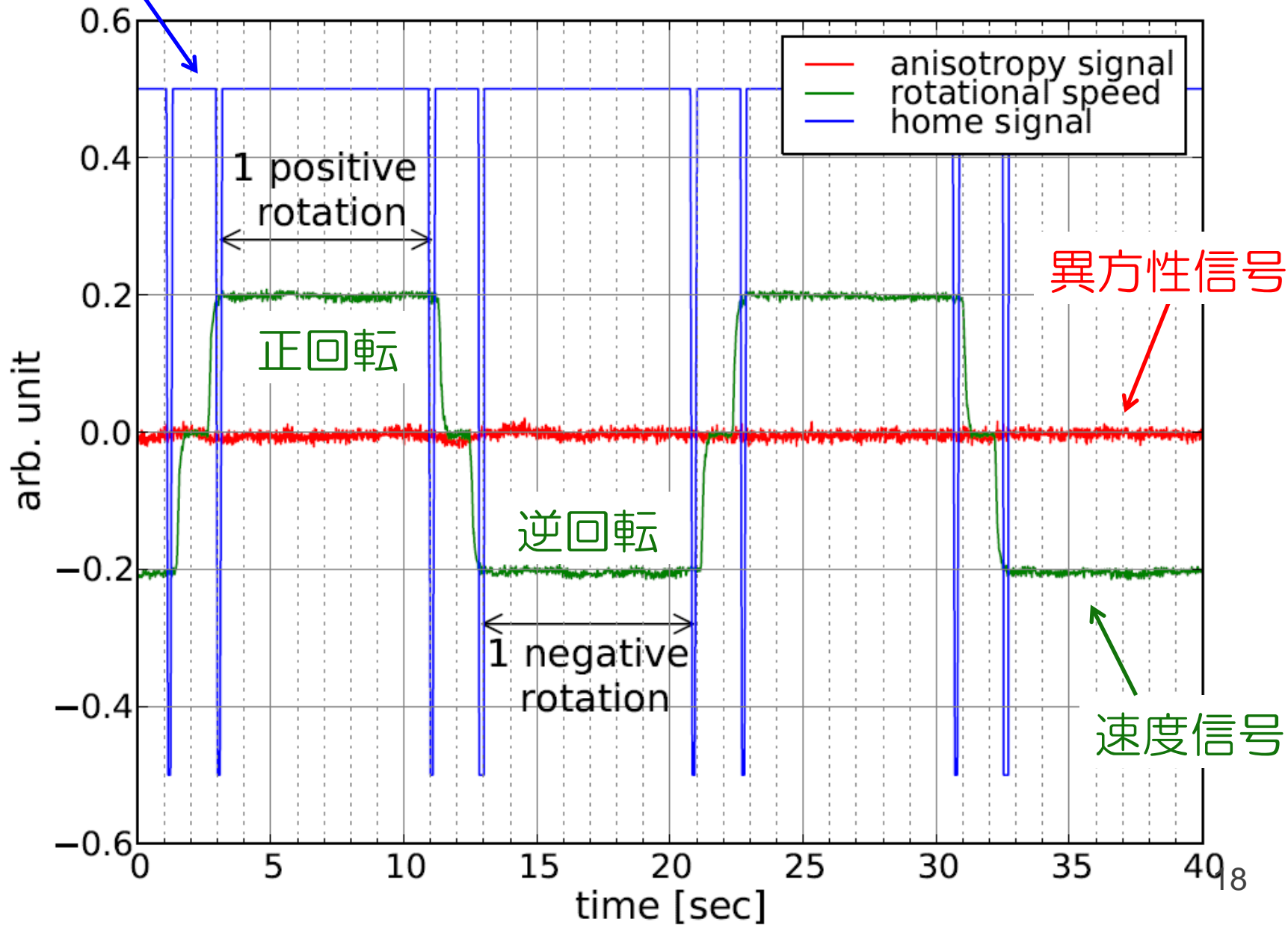
# 回転の様子

- 動画



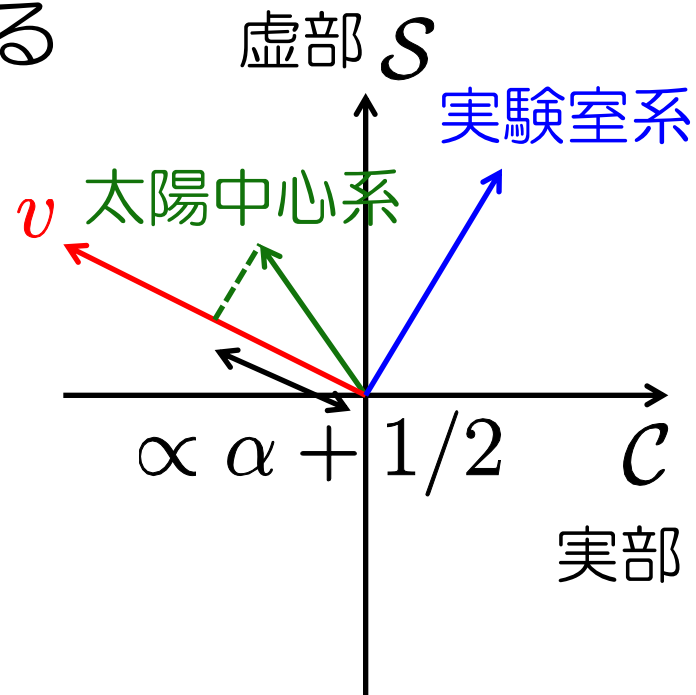
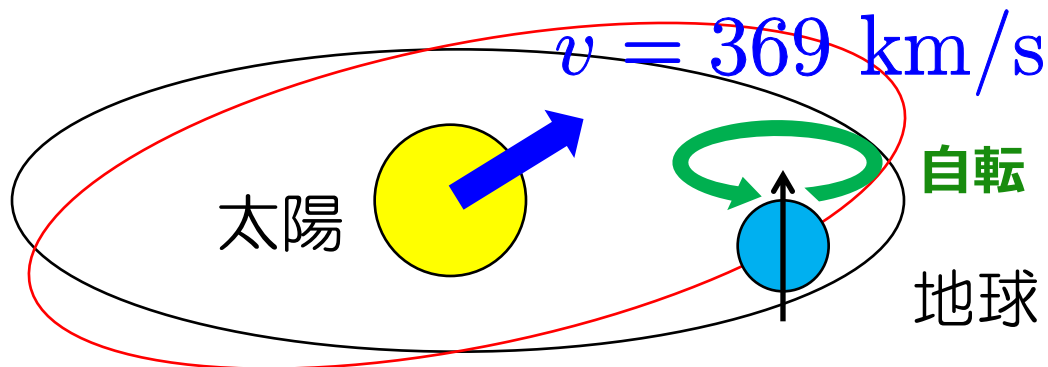
# 生データ

原点通過信号



# データ解析の流れ

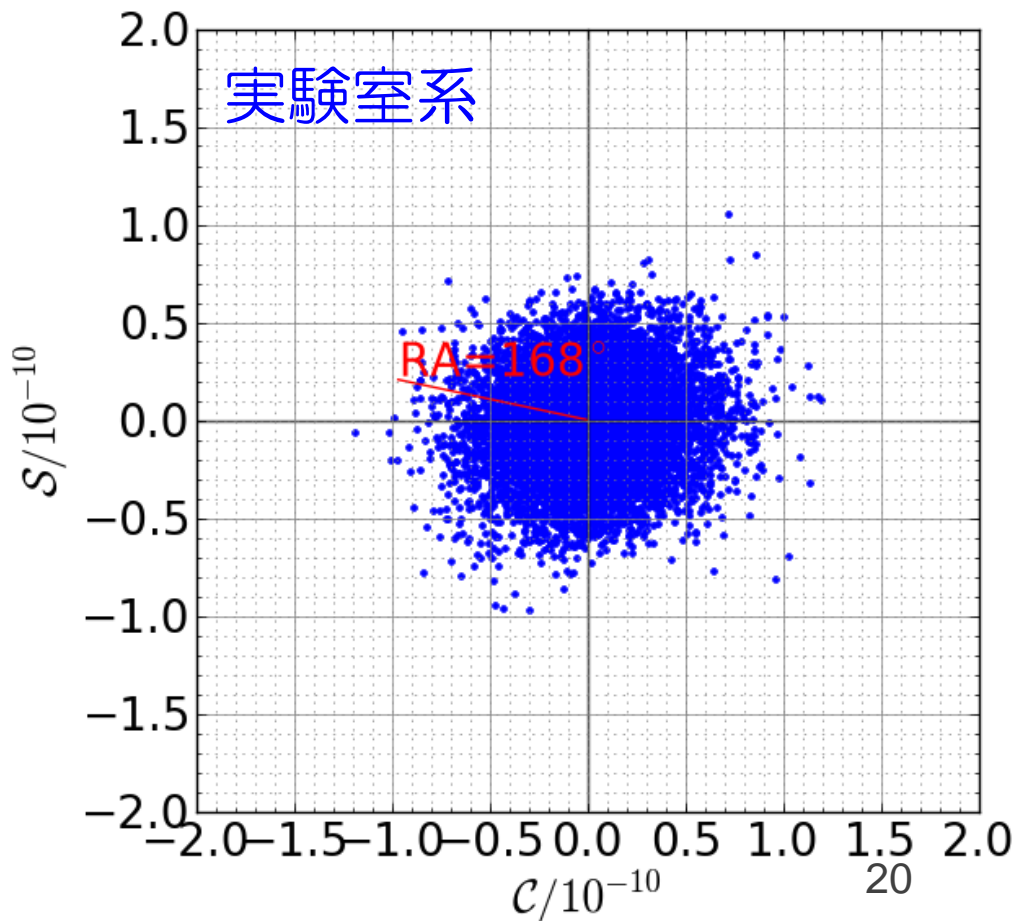
- 異方性信号の回転周波数におけるフーリエ振幅 ( $C, S$ ) を求める
- フーリエ振幅 ( $C, S$ ) から地球自転の影響を除去 (太陽中心系におけるフーリエ振幅 ( $C', S'$ ) に変換)
- ( $C', S'$ ) から  $\alpha + 1/2$  を求める
- 1回転ごとに上記解析を行い、得られた各  $\alpha + 1/2$  の平均を最終的な値とする



# 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

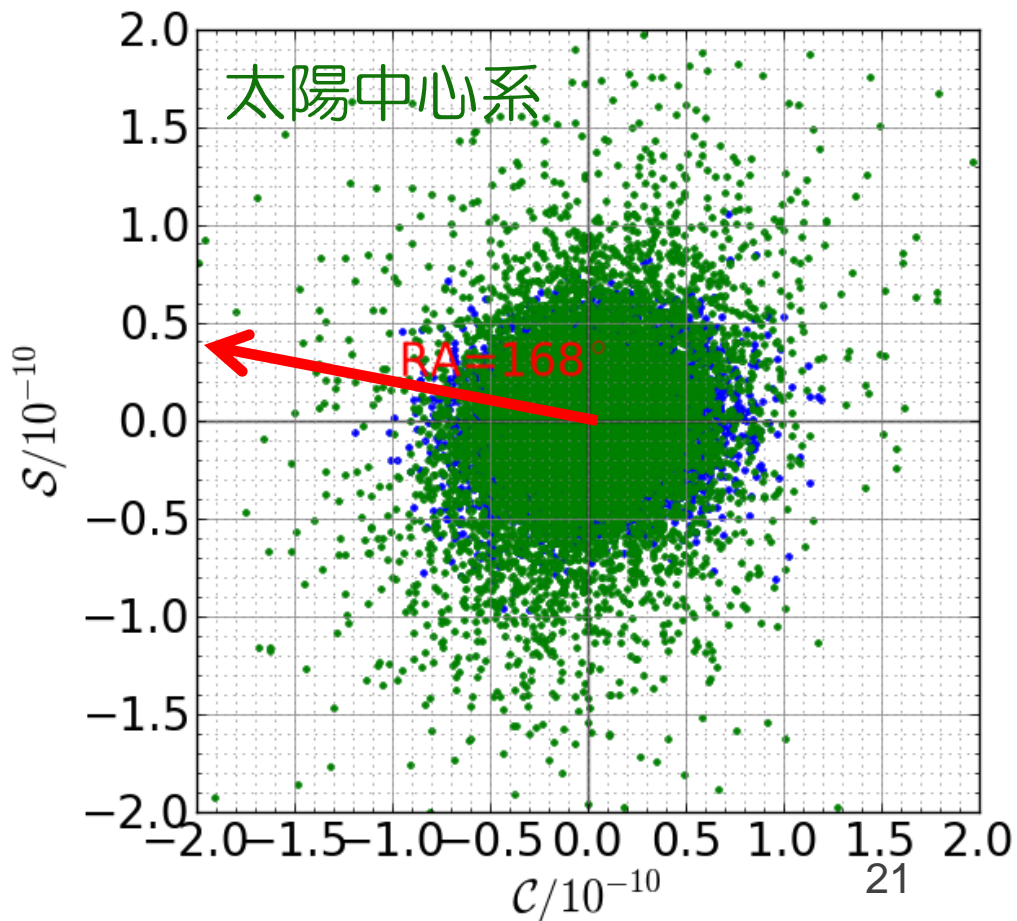
- 実験室系におけるフーリエ振幅  
( $C$ ,  $S$ )



# 解析結果

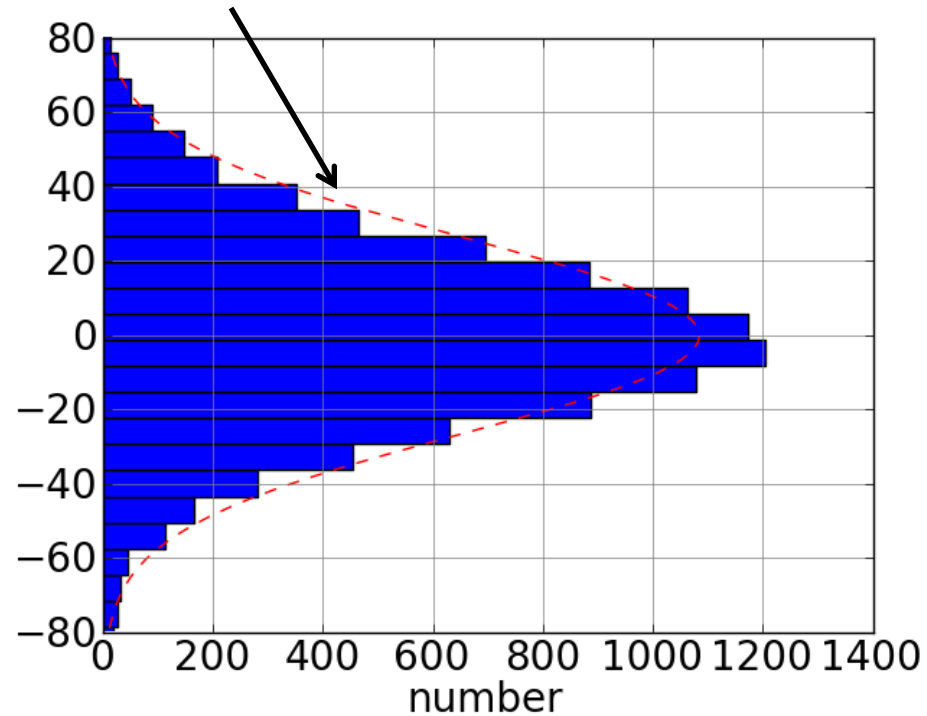
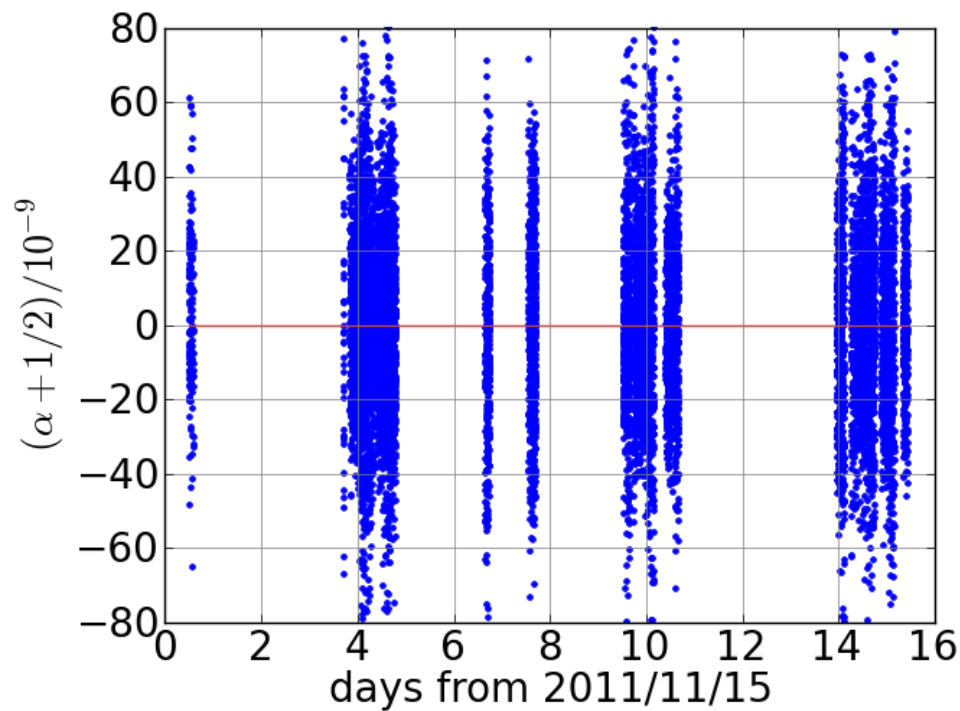
- 2011年11月後半の2週間に渡って、断続的に2.6万回転
- そのうち雑音レベルの低い1万回転(約1.2日分)を解析に使用

- 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



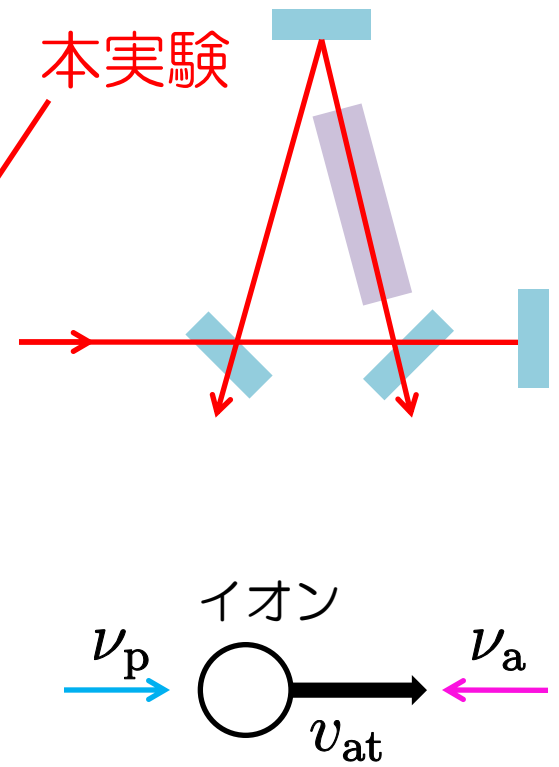
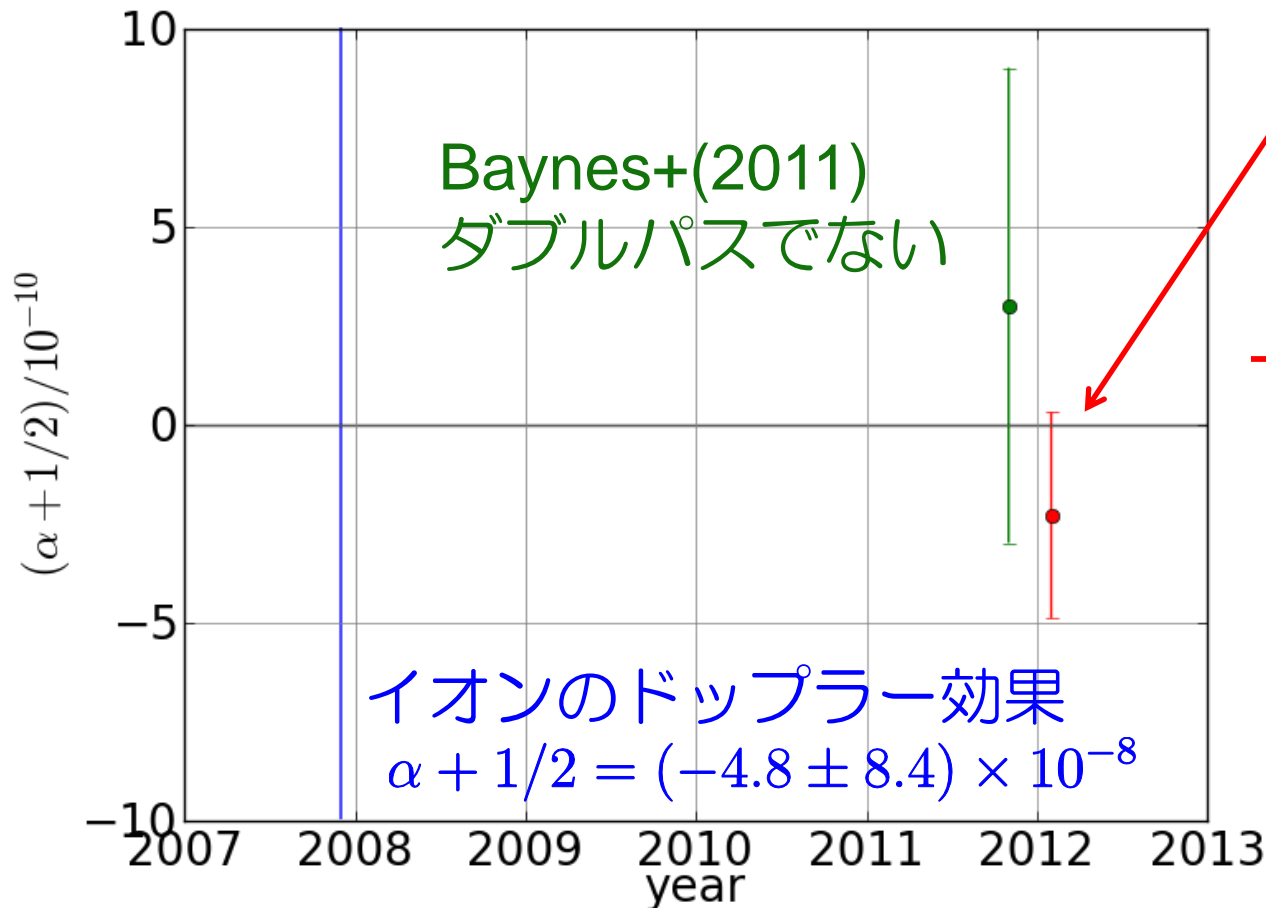
→  $\alpha + 1/2 = (-2.3 \pm 2.6) \times 10^{-10}$

統計誤差 ( $1\sigma$ )

# 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

