

光リング共振器による 高次ローレンツ不変性検証

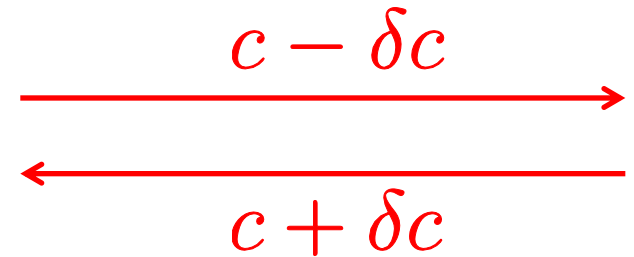
道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

安東研究室

概要

- 特殊相対論(電磁気学のLorentz不変性)の検証実験
その中でも光速の等方性検証
特にその奇パリティ成分

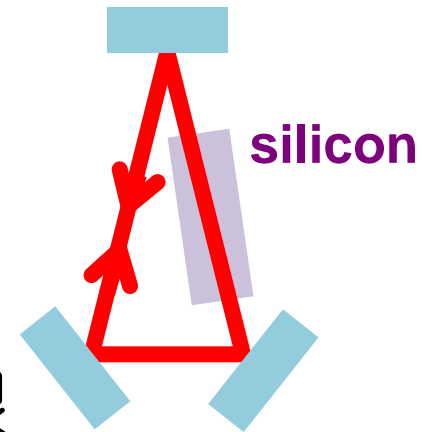


- 光リング共振器を用いた新しい手法

- 光速の等方性を

$|\delta c/c| \lesssim 10^{-15}$ の精度で検証

- 高次のLorentz不変性の破れに初の上限

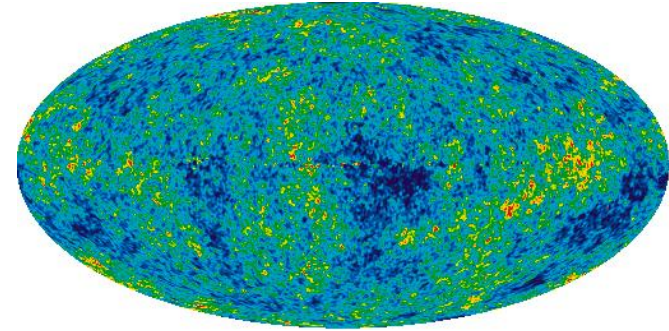


[Y. Michimura *et al.*: [Phys. Rev. Lett. 110, 200401 \(2013\)](#)]

[Y. Michimura *et al.*: [Phys. Rev. D 88, 111101\(R\) \(2013\)](#)]

Lorentz不変性の検証

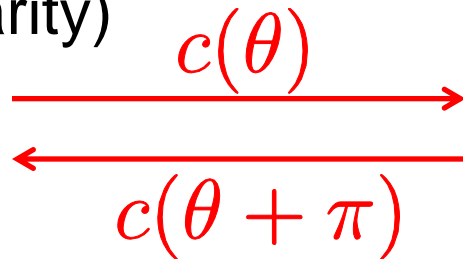
- 特殊相対論(1905) 光速度不変の原理
→ 電磁気学のLorentz不変性
- Lorentz不変性の破れ(LV)
量子重力理論、CMBの異方性



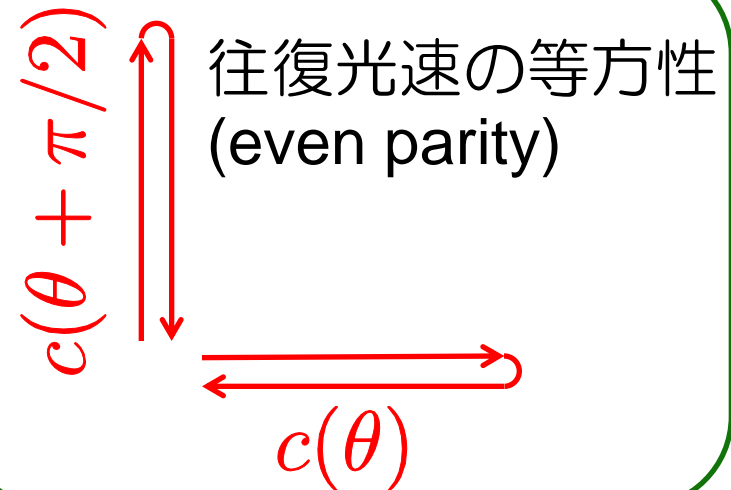
http://en.wikipedia.org/wiki/File:WMAP_2010.png

- 実験的検証が必要 → 光速の等方性の検証

片道光速の等方性
(odd parity)

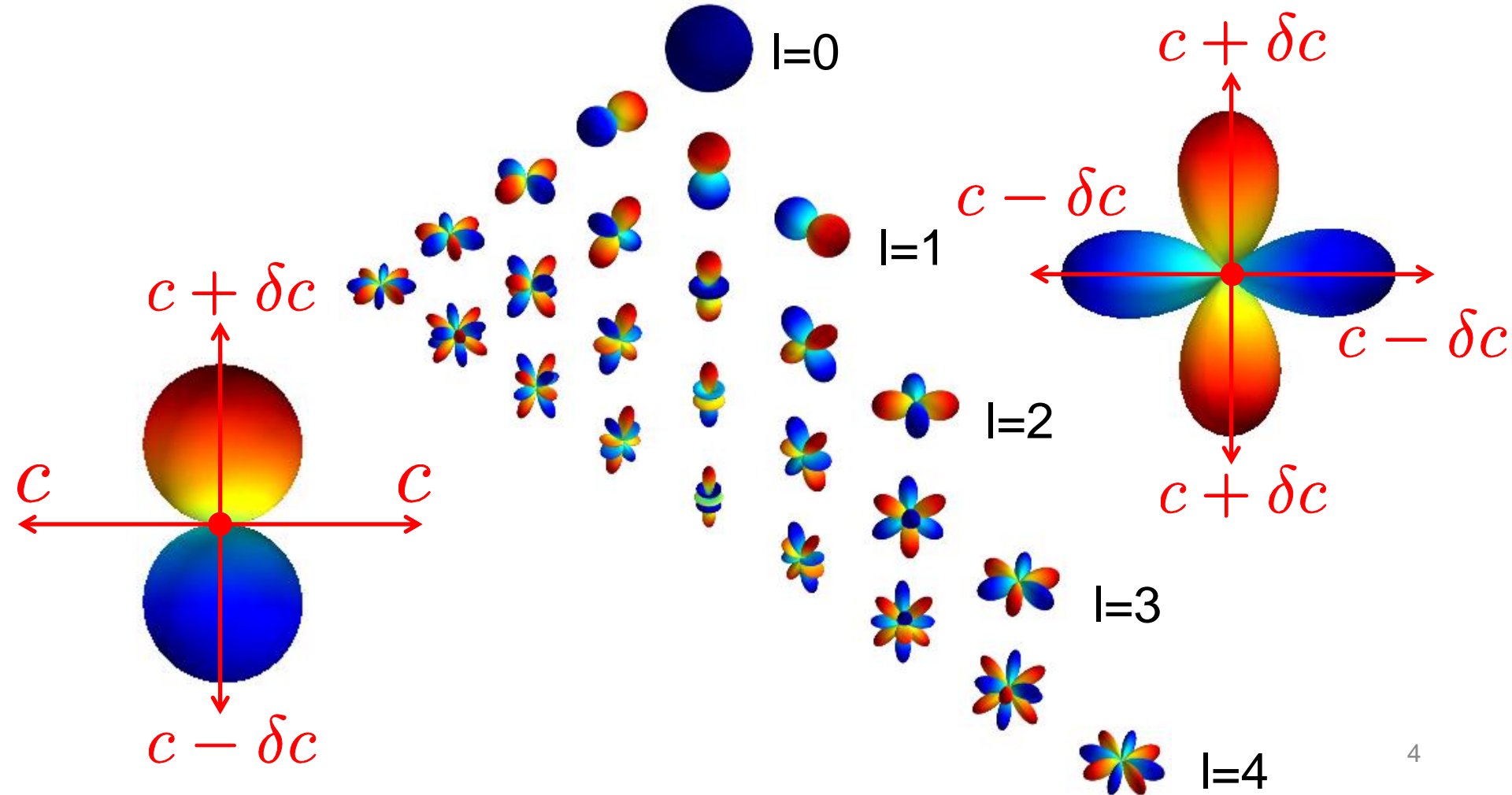


- 片道光速の等方性検証
→ 光リング共振器を利用



光速の異方性

- 球面調和関数展開できる
- $l = \text{even}$ と $l = \text{odd}$ の異方性がある

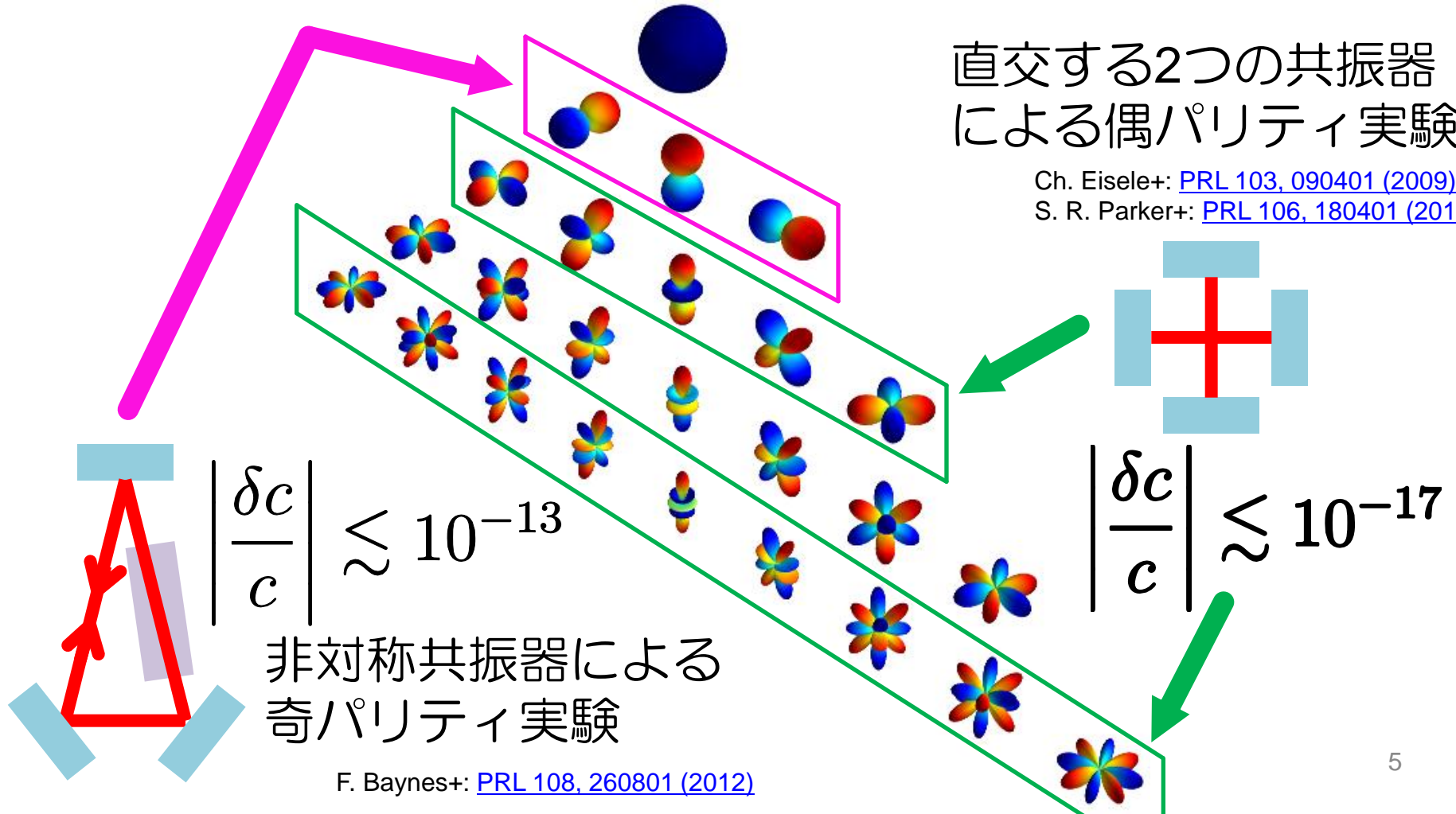


これまでの上限値

- 偶パリティ実験は $l = \text{even}$ を測定可能
- 奇パリティ実験は $l = \text{odd}$ を測定可能

直交する2つの共振器
による偶パリティ実験

Ch. Eisele+: [PRL 103, 090401 \(2009\)](#)
S. R. Parker+: [PRL 106, 180401 \(2011\)](#)



非対称共振器による
奇パリティ実験

F. Baynes+: [PRL 108, 260801 \(2012\)](#)

これまでの上限値

- 偶パリティ実験は $l = \text{even}$ を測定可能
- 奇パリティ実験は $l = \text{odd}$ を測定可能

未測定!

直交する2つの共振器
による偶パリティ実験

Ch. Eisele+: [PRL 103, 090401 \(2009\)](#)
S. R. Parker+: [PRL 106, 180401 \(2011\)](#)

低精度!

$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 10^{-13}$$

非対称共振器による
奇パリティ実験

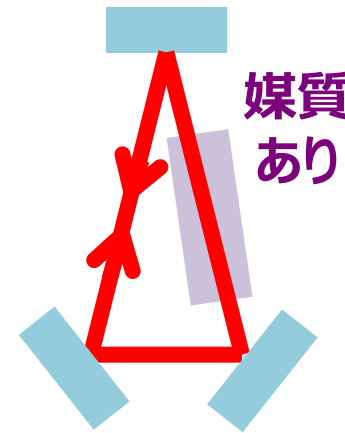
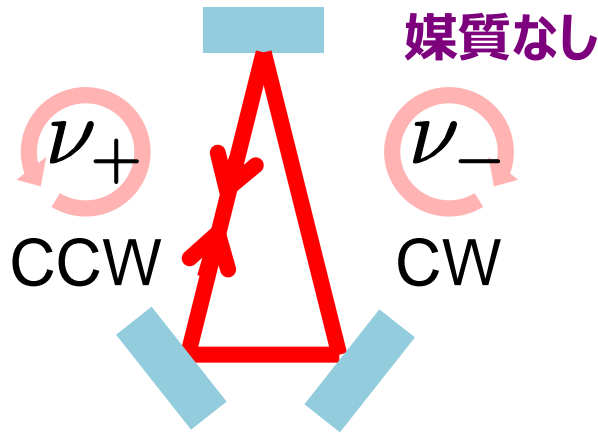
$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 10^{-17}$$

F. Baynes+: [PRL 108, 260801 \(2012\)](#)

非対称光リング共振器

- 媒質を入れて非対称にすると、Lorentz不変性の破れに感度を持つ(共振周波数がずれる)

$c + \delta c$
 $c - \delta c$



LVで光速がずれる

↓
一周した時の
位相がずれる

↓
共振する光の
周波数がずれる

共振周波数
のずれ
 $\propto LV$

Lorentz不変の
場合

$$\nu_+ = \nu_0$$

$$\nu_- = \nu_0$$

$$\nu_+ = \nu$$

$$\nu_- = \nu$$

Lorentz不変性
が破れている
場合

$$\nu_+ = \nu_0$$

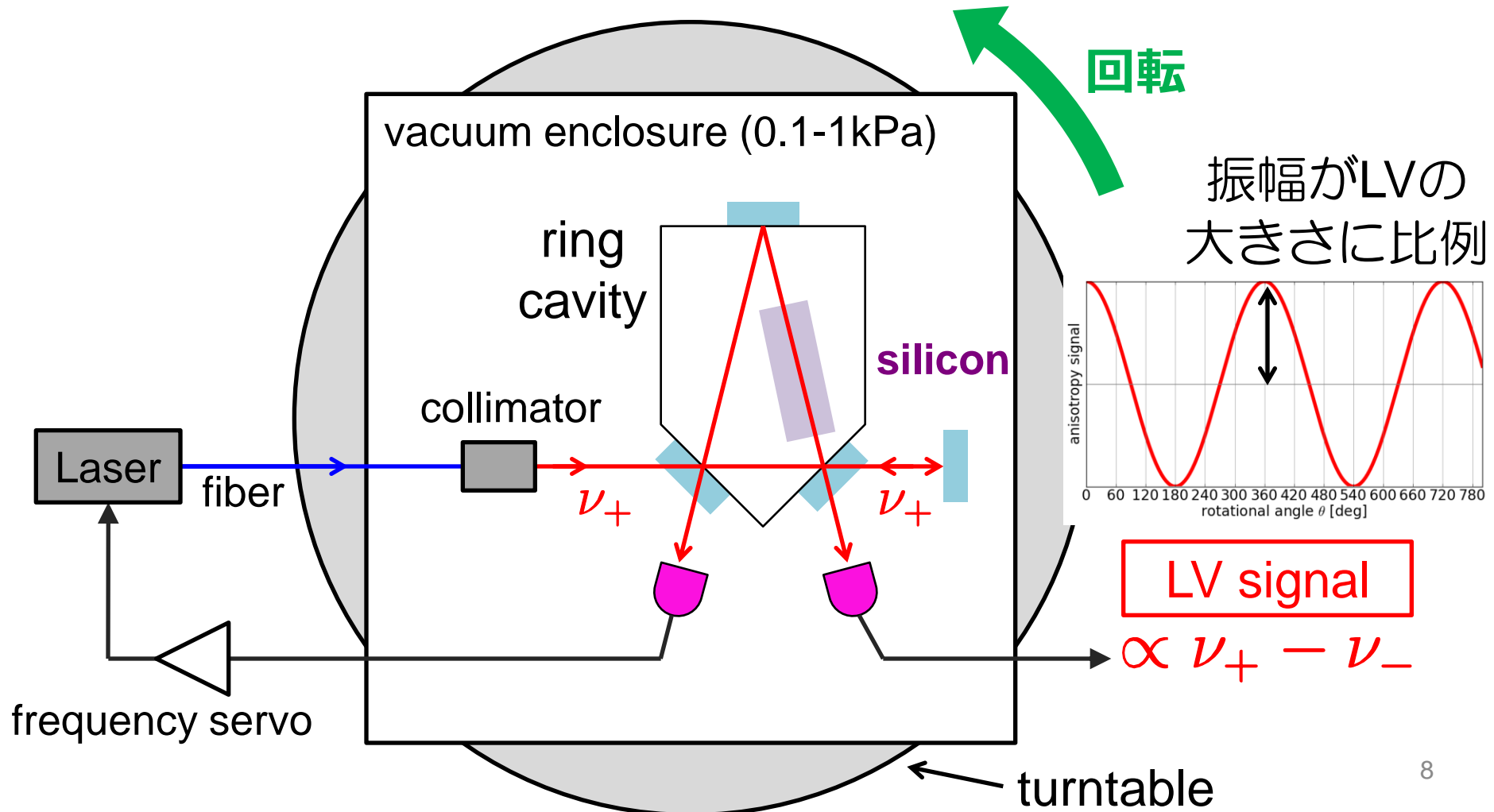
$$\nu_- = \nu_0$$

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

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

実験装置の概要

- ダブルパス構成による周波数比較
- 回転によりLorentz不変性の破れ信号を変調



光学系の写真

全体が30cm×30cm×17cm
の真空容器内に入っている

ring
cavity

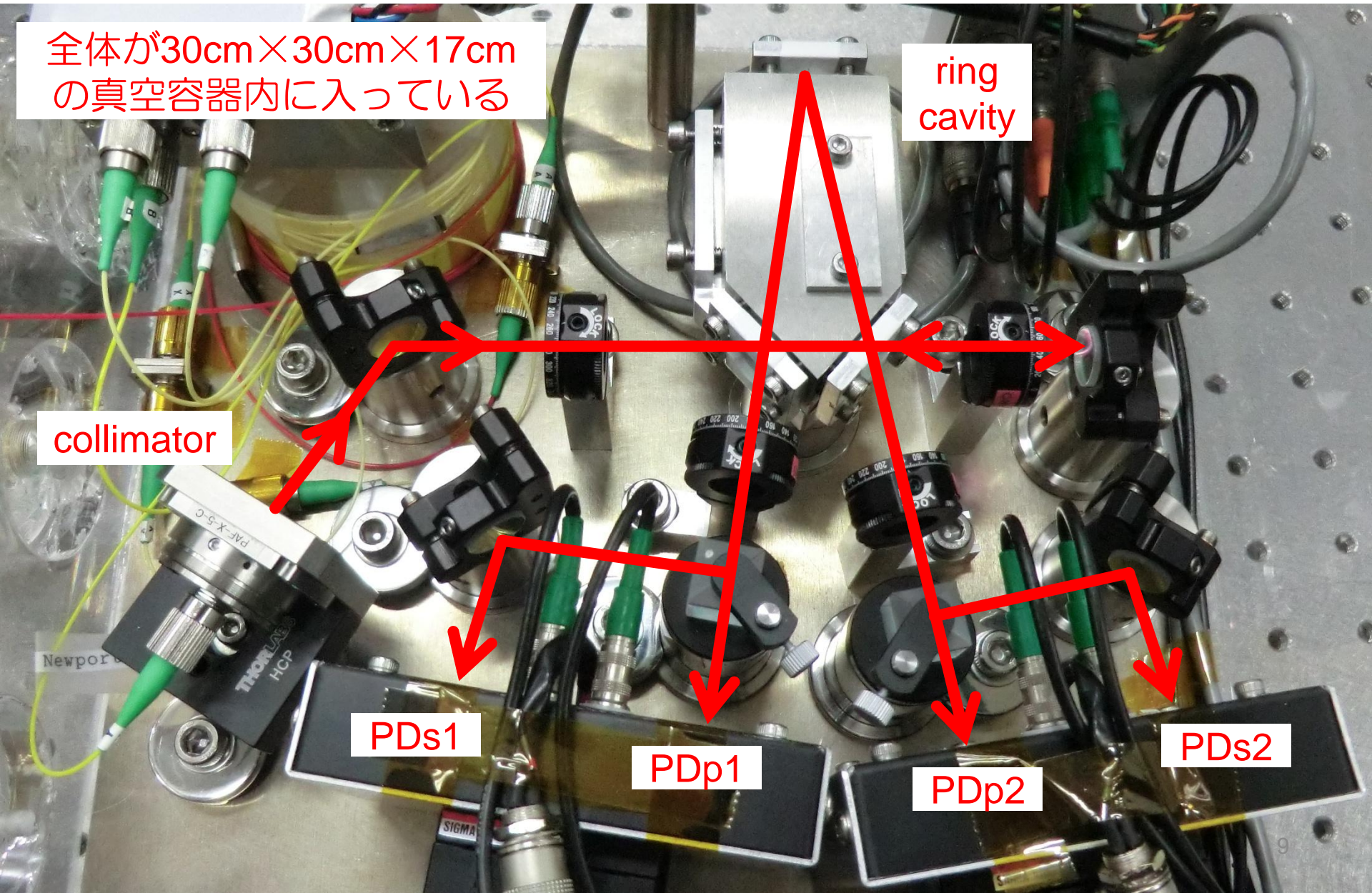
collimator

PDs1

PDp1

PDp2

PDs2



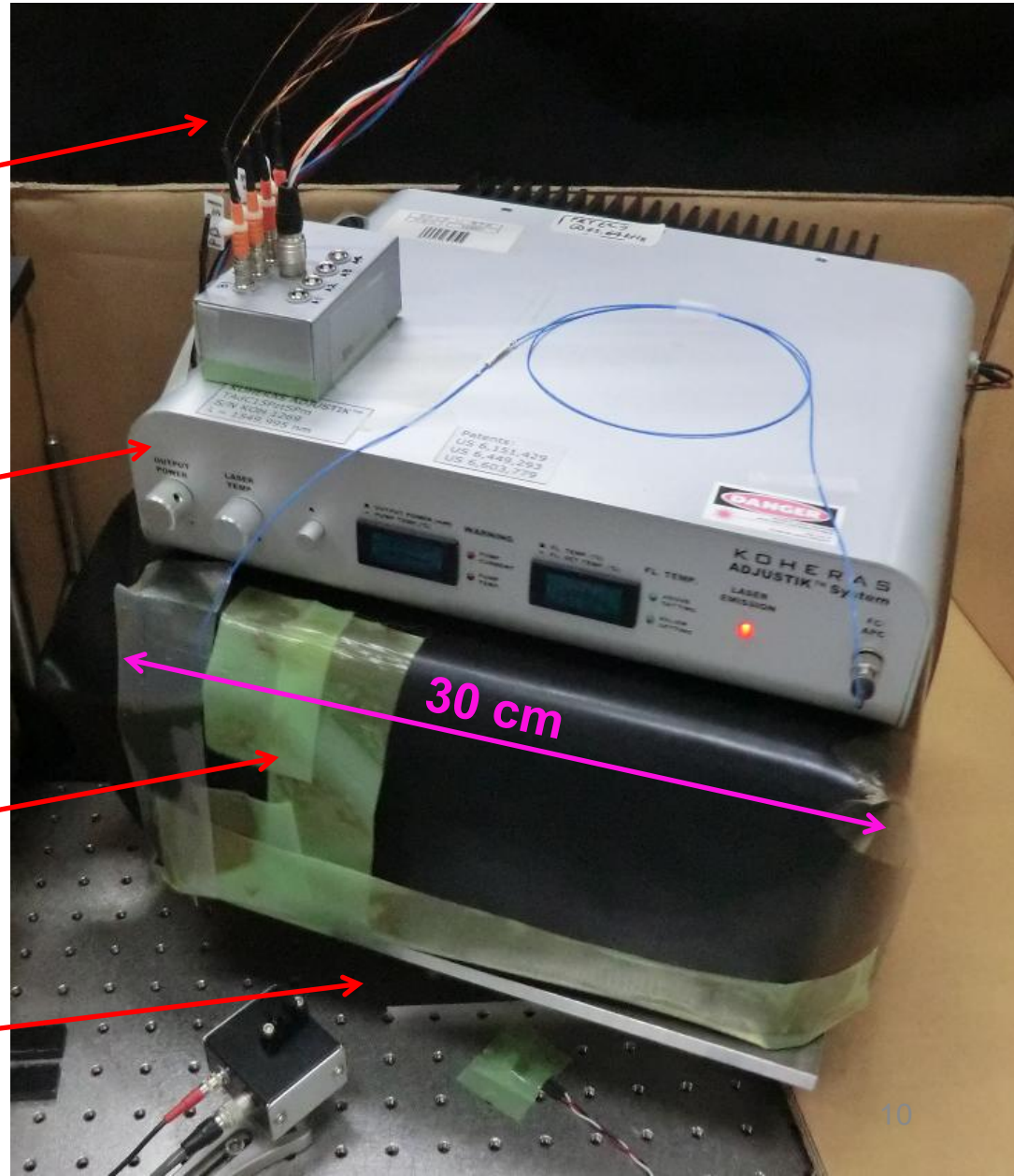
実験装置全体の写真

電源/信号ケーブル

レーザー光源

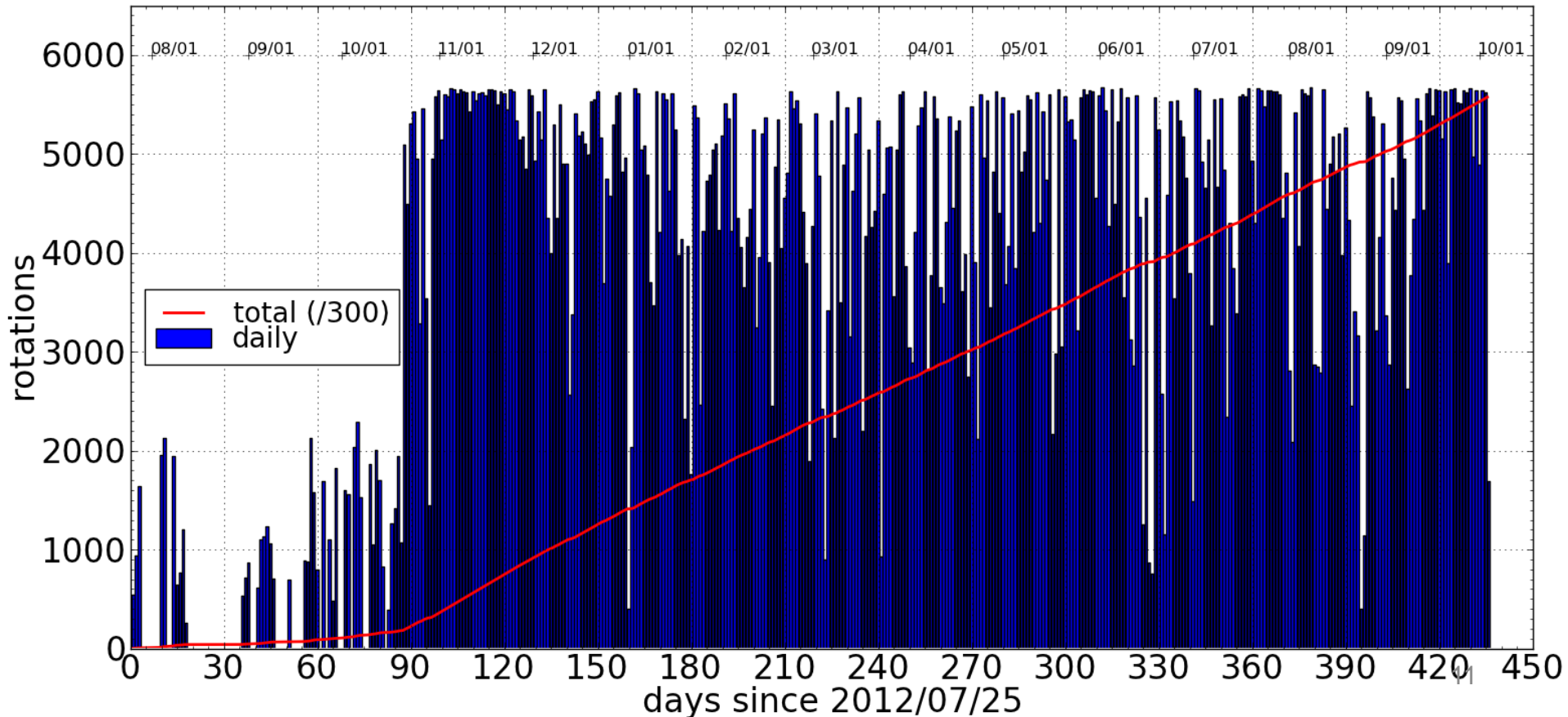
光学系の入った真空容器
+ 遮光シート

回転台



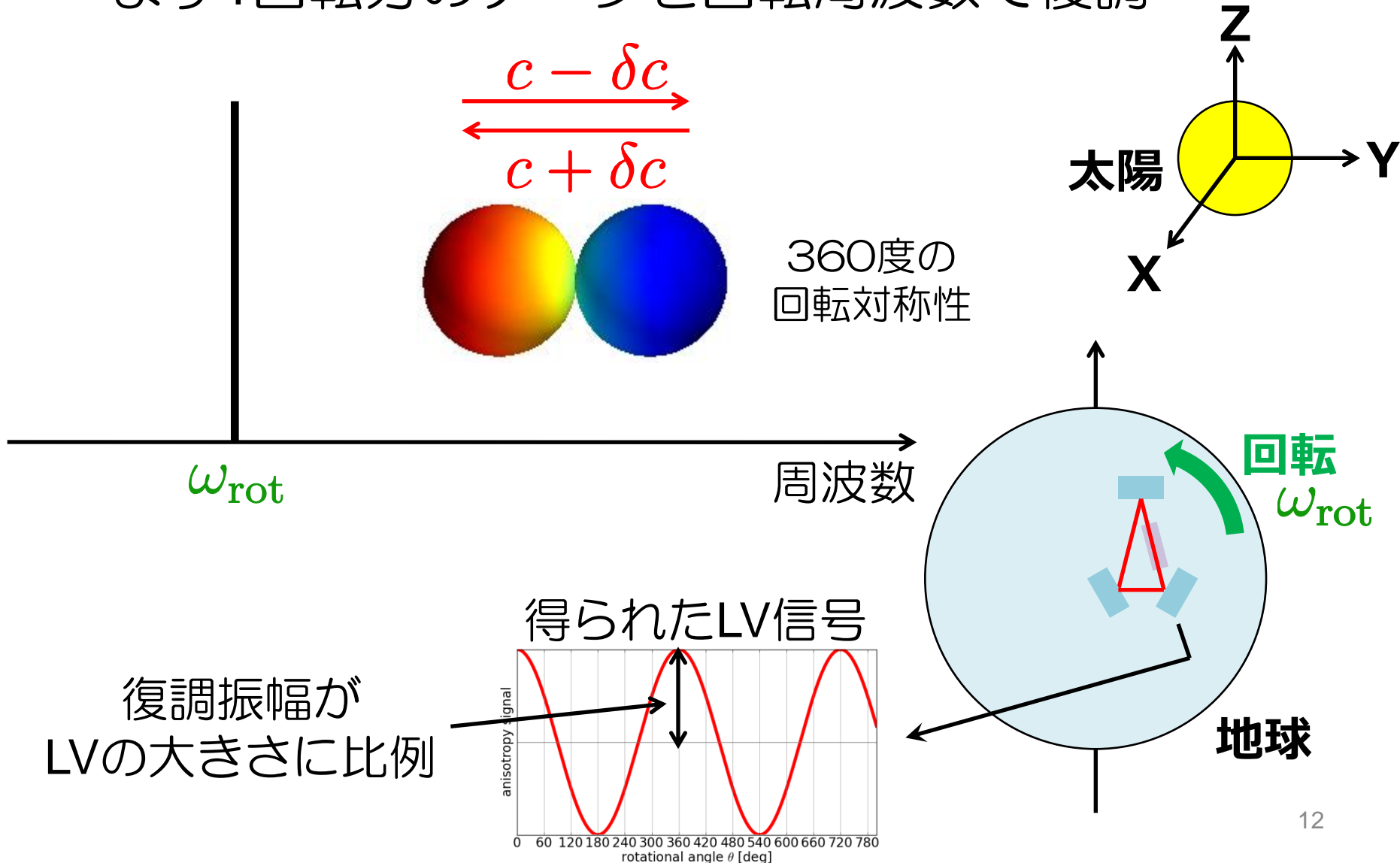
観測データ

- 2012年7月末から2013年10月初まで測定
- 測定日数: 393日 総回転数: 167万回転
- Duty cycle: 53% (10月中旬以降は64%)



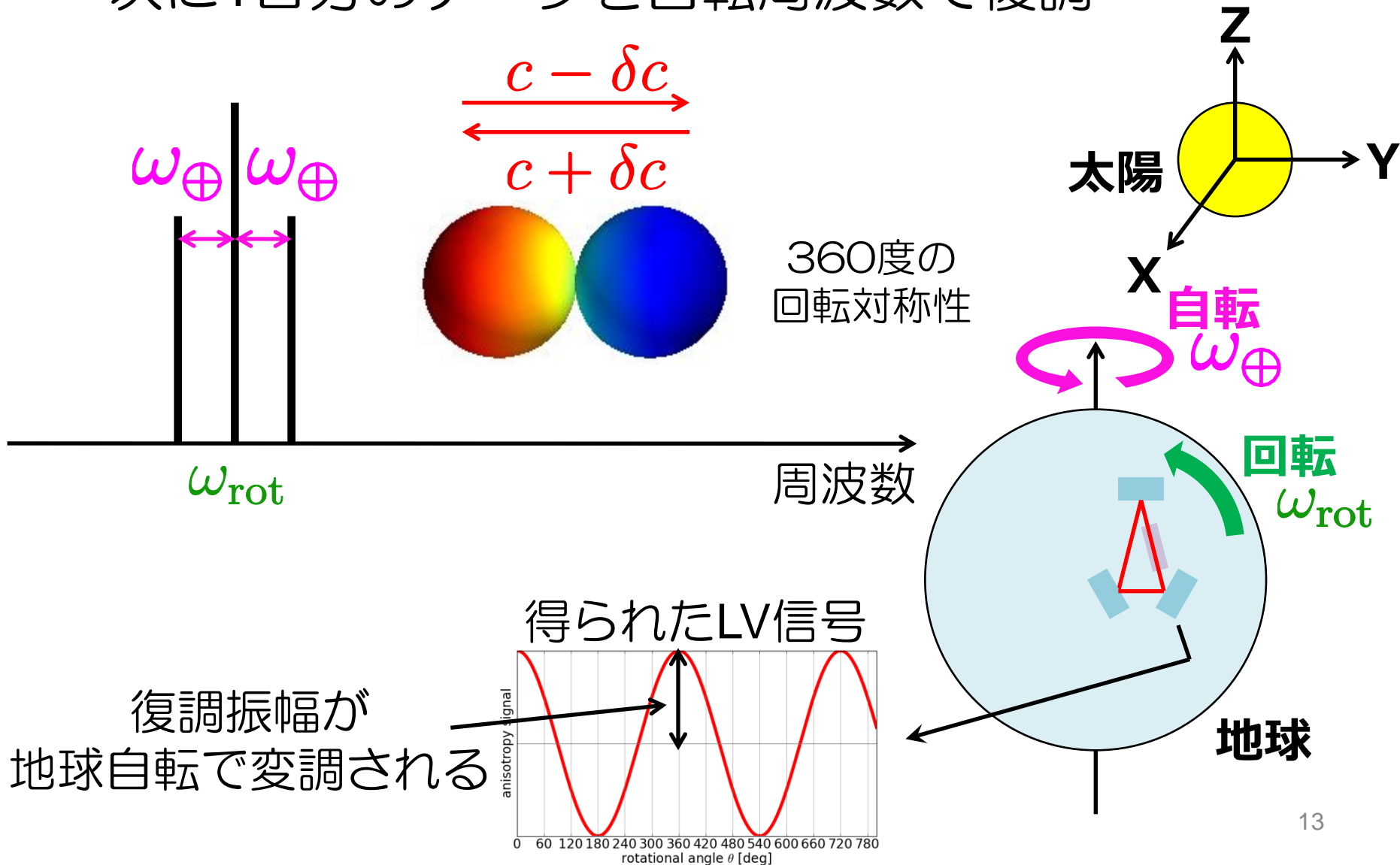
データ解析1

- まず1回転分のデータを回転周波数で復調



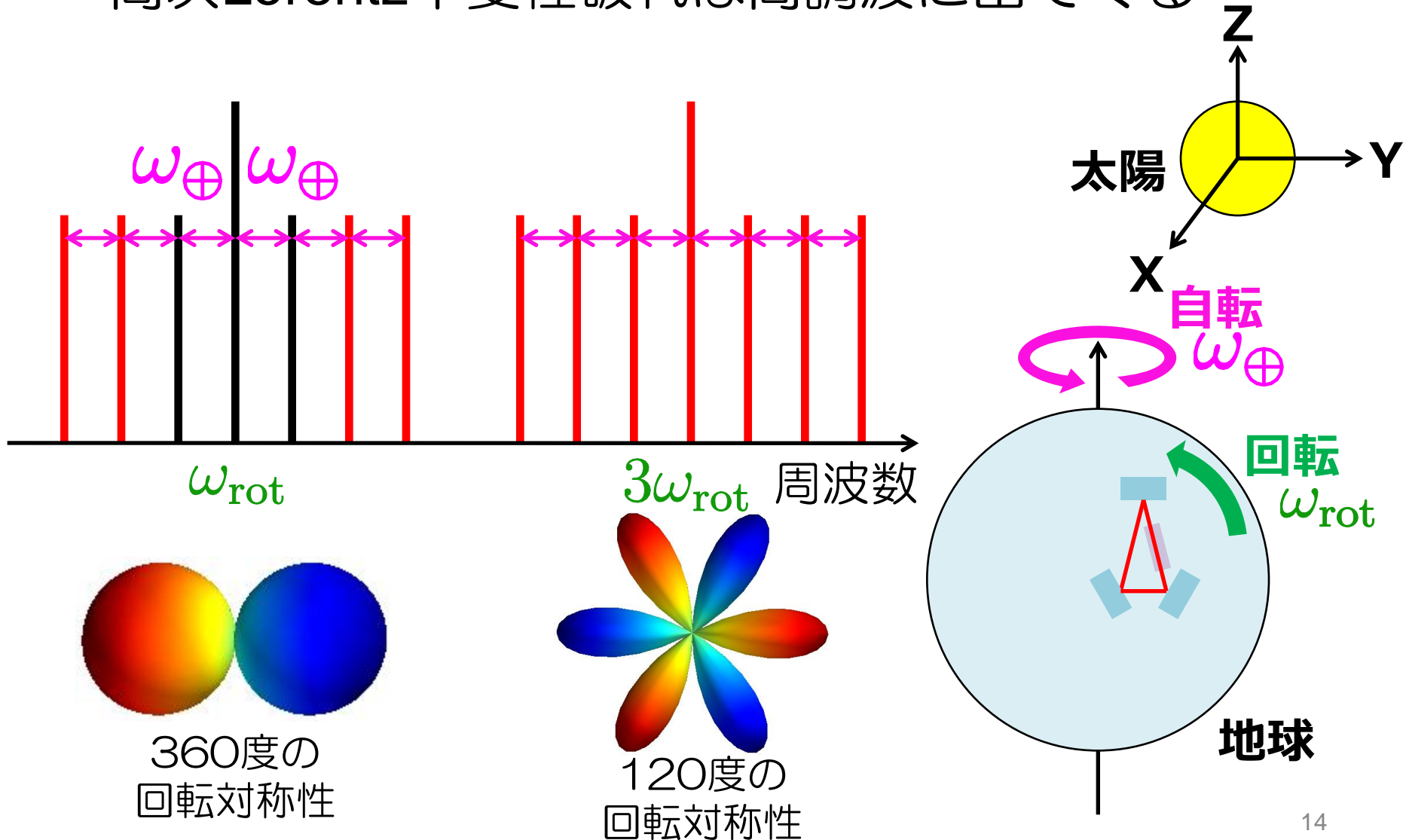
データ解析2

- 次に1日分のデータを自転周波数で復調

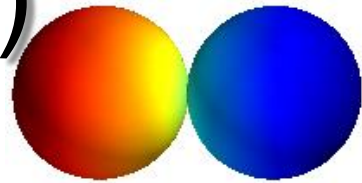


データ解析3

- 高次Lorentz不変性破れは高調波に出てくる

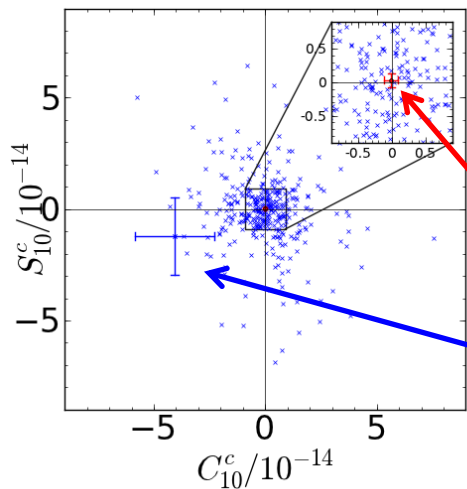


得られた復調振幅(ω_{rot})



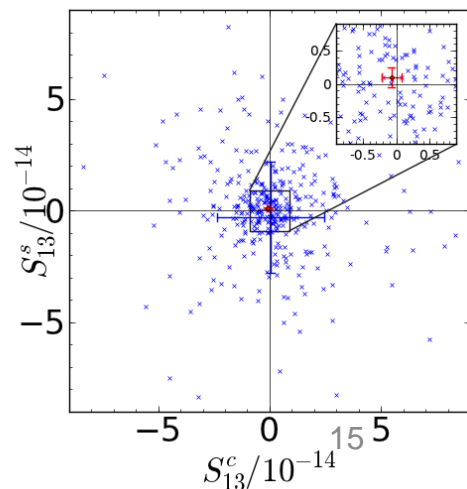
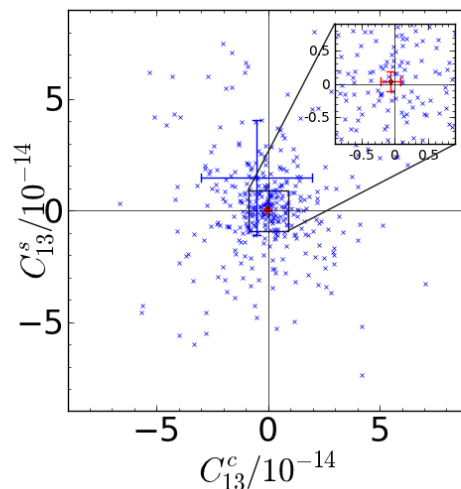
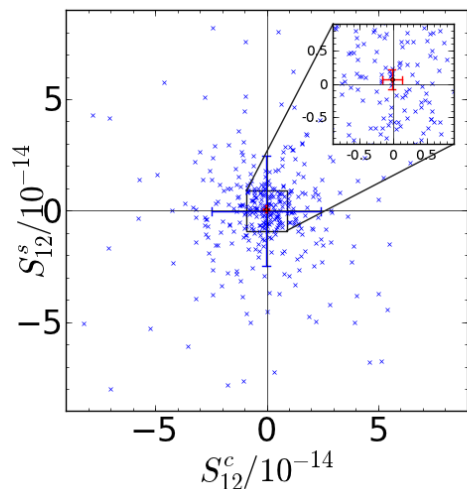
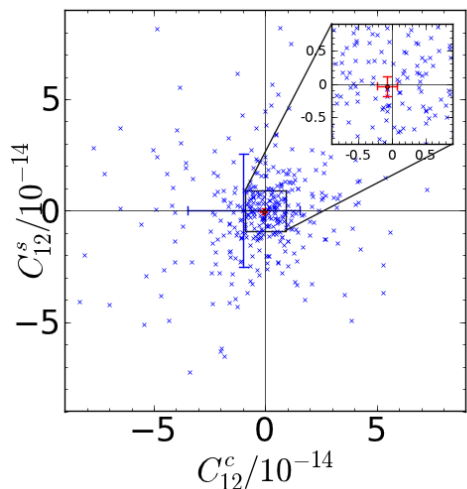
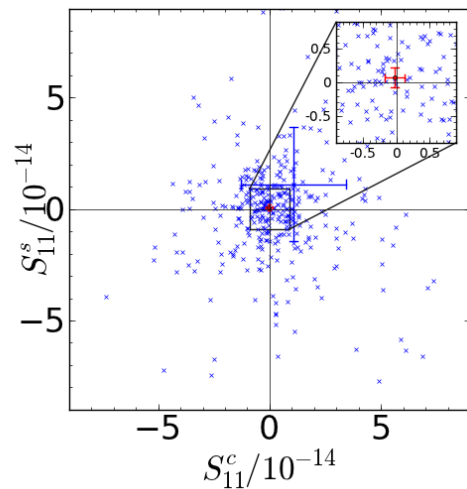
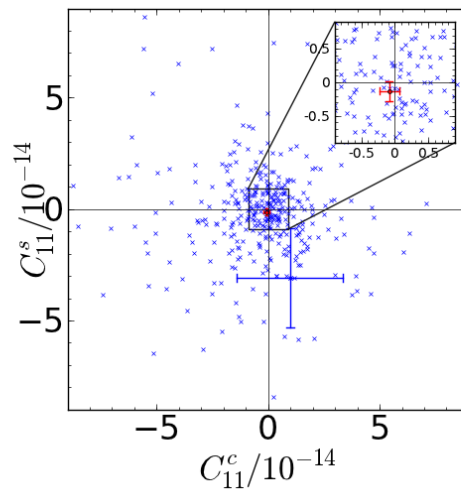
- 2σ でゼロと一致

→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず

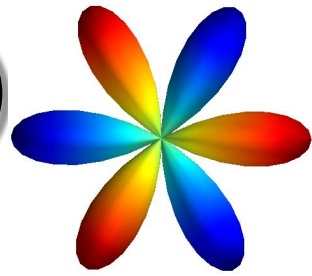


全393日の平均

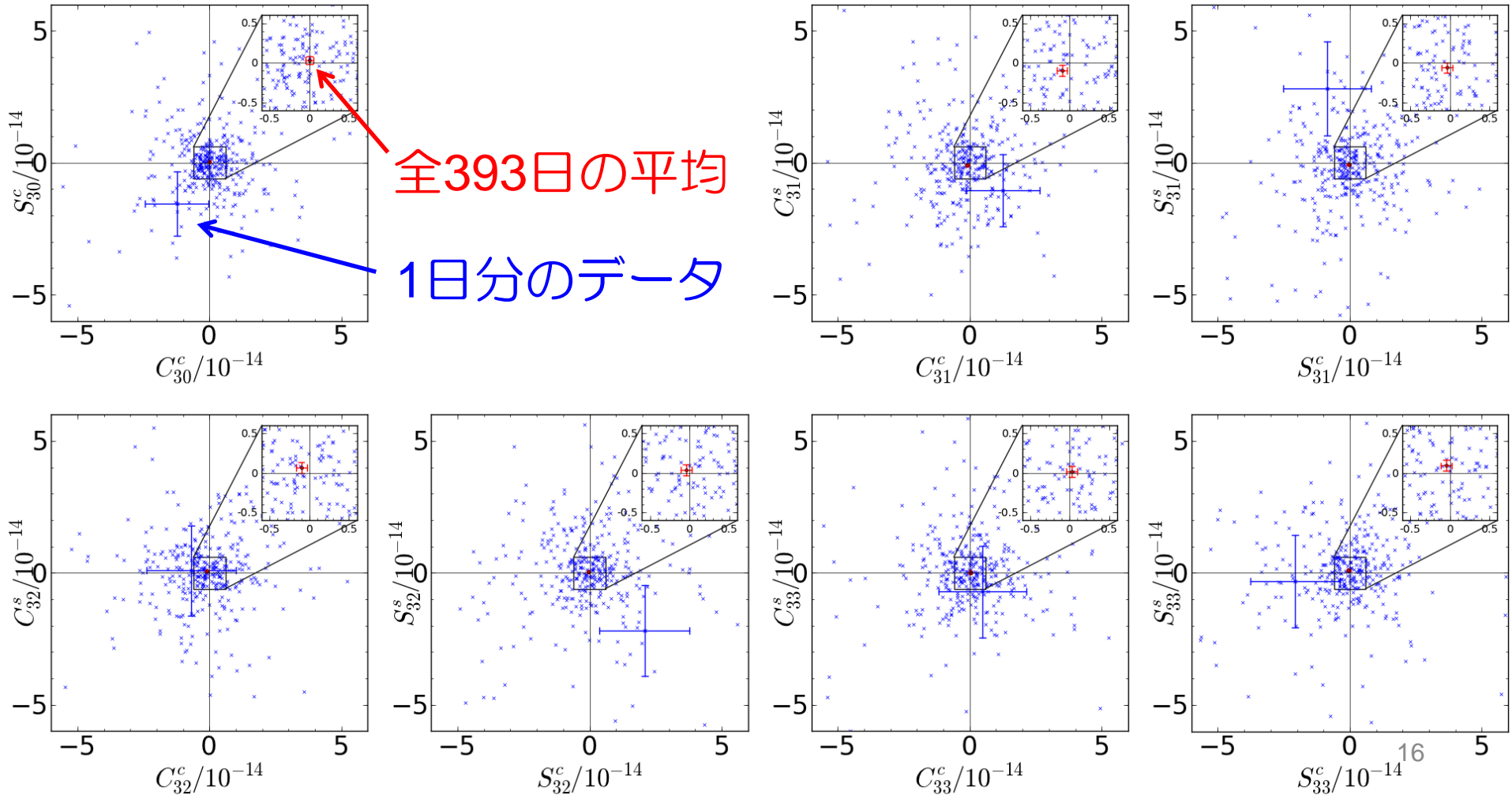
1日分のデータ



得られた復調振幅($3\omega_{\text{rot}}$)



- 2σ でゼロと一致
→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



得られた上限値

- 各復調振幅は各異方性成分と関連付けられる

- $l = 1$ の3つに

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

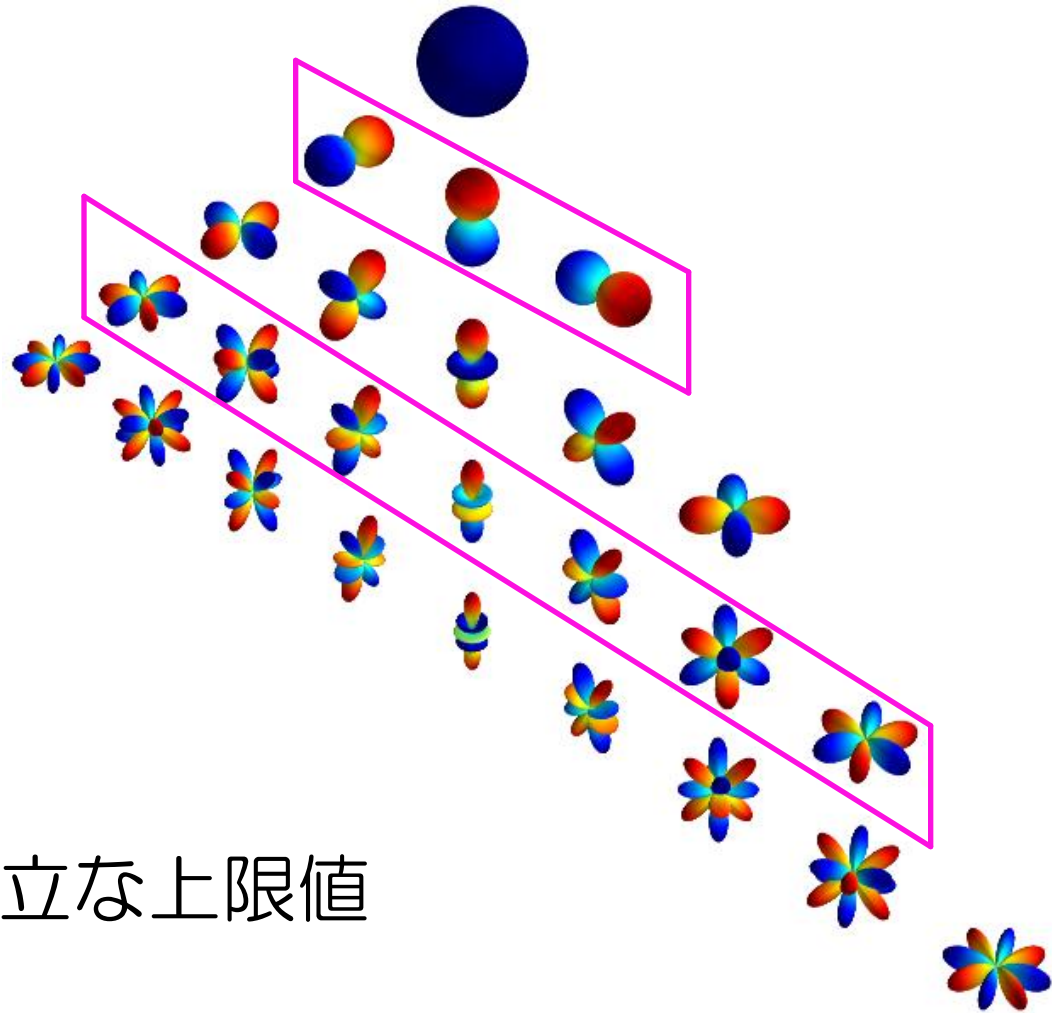
1桁以上更新

- $l = 3$ の7つに

$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 2 \times 10^{-15}$$

初の上限值

- それぞれの成分に独立な上限値



拡張標準理論での上限値

- 拡張標準理論(SME; standard model extension)
[D. Colladay and V. Alan Kostelecký: [PRD 58, 116002 \(1998\)](#)]
- 電磁場のLagrangianにLV項を追加

高次まで考えたSME

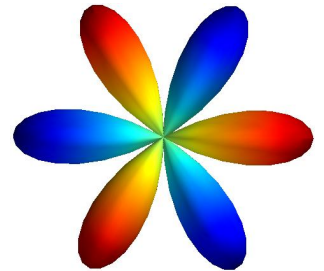
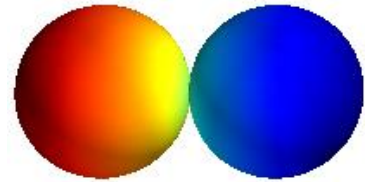
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(4)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu} + \frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(6)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu} + \frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(8)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu}$$

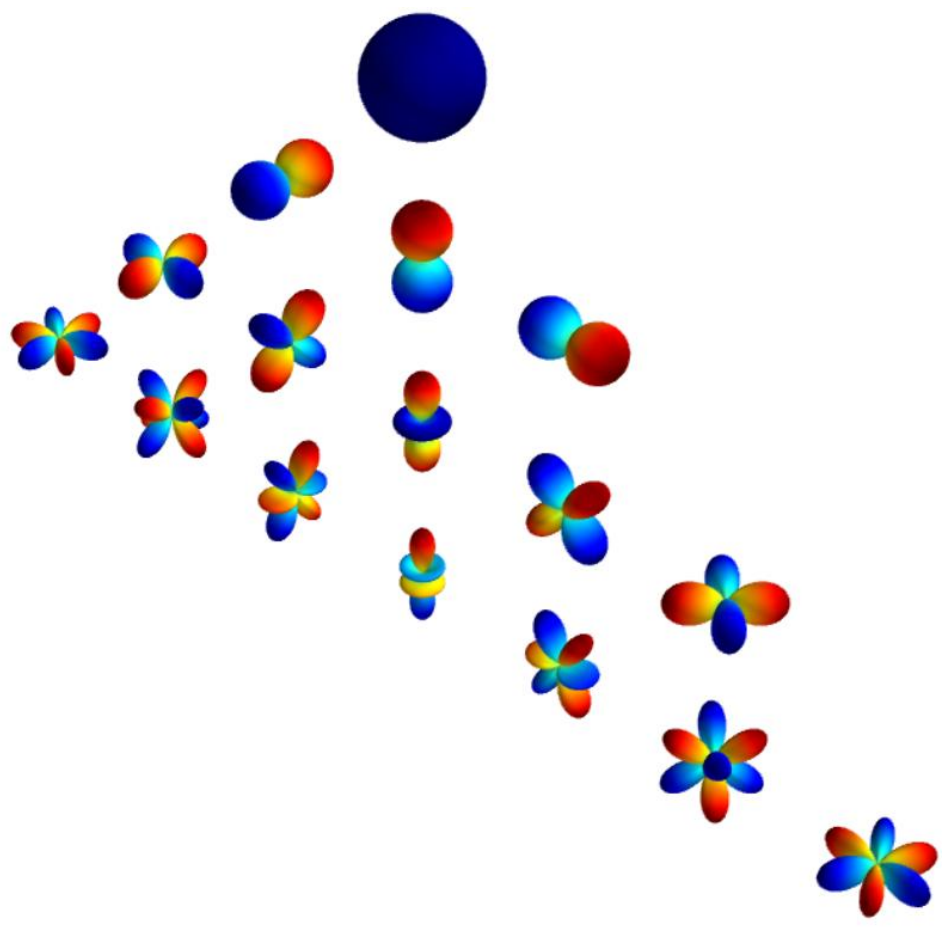
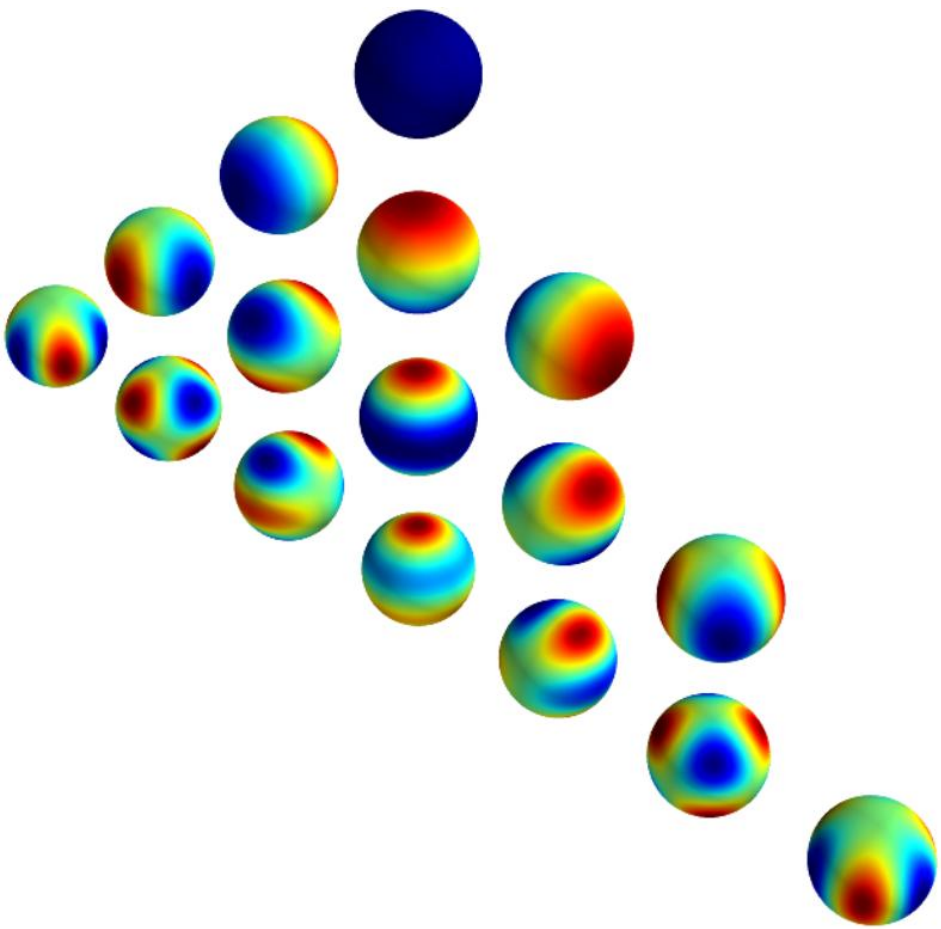
SM 4次のLV項 6次のLV項 (p²の依存性) 8次のLV項 (p⁴の依存性)

- 高次のLV項が高次の異方性を生む
6次は四重極成分、8次は八重極成分まで
- 6次の奇パリティLV項に 10^3 GeV^{-2} の上限値
初の上限值 偶に比べて6桁更新
- 8次の奇パリティLV項に 10^{19} GeV^{-4} の上限値
初の上限值 偶に比べて14桁更新

まとめ

- ダブルパス構成による光リング共振器を用いた光速の異方性探査装置を製作
- 光リング共振器は回転台で回転
- 1年に渡ってデータ取得を継続
観測日数: 393日 回転数: 167万回転
- $|\delta c/c| \lesssim 10^{-15}$ の精度で等方性を検証
- 異方性の双極子成分の上限値を**1桁更新**
- 異方性の六重極成分に**初の上限值**
- 拡張標準理論の枠組みでは、高次のLVのうち、奇パリティ成分に**初の上限值**
- これまでの偶パリティ成分への上限值に比べて、6次は**6桁更新**、8次は**14桁更新**





球面係数への上限值

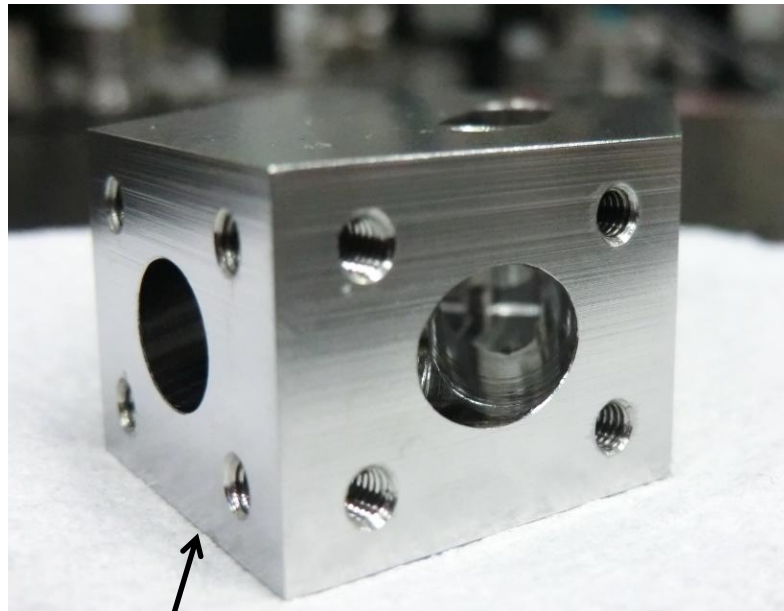
Coefficient	Measurement
\bar{y}_1^0	0.4 ± 4.4
$\text{Re}[\bar{y}_1^1]$	-5.7 ± 6.3
$\text{Im}[\bar{y}_1^1]$	-3.2 ± 6.2
\bar{y}_3^0	0.1 ± 1.9
$\text{Re}[\bar{y}_3^1]$	2.9 ± 2.2
$\text{Im}[\bar{y}_3^1]$	-3.2 ± 2.1
$\text{Re}[\bar{y}_3^2]$	2.1 ± 1.8
$\text{Im}[\bar{y}_3^2]$	1.5 ± 1.8
$\text{Re}[\bar{y}_3^3]$	-0.2 ± 2.2
$\text{Im}[\bar{y}_3^3]$	-0.7 ± 2.2

単位は全て 10^{-15}

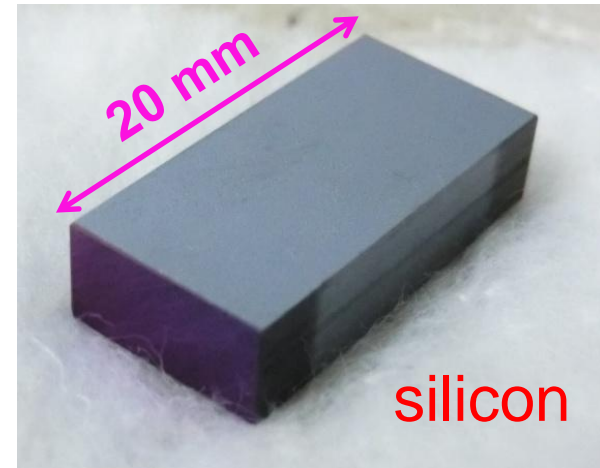
SME Camouflage係数への上限值

Dimension	Coefficient	Measurement
$d = 6$	$(\bar{c}_F^{(6)})_{110}^{(0E)}$	$(-0.1 \pm 1.5) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(6)})_{111}^{(0E)}]$	$(-0.8 \pm 1.1) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(6)})_{111}^{(0E)}]$	$(-0.6 \pm 1.0) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
$d = 8$	$-0.020(\bar{c}_F^{(8)})_{110}^{(0E)} + (\bar{c}_F^{(8)})_{310}^{(0E)}$	$(-0.2 \pm 1.9) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[-0.020(\bar{c}_F^{(8)})_{111}^{(0E)} + (\bar{c}_F^{(8)})_{311}^{(0E)}]$	$(1.4 \pm 1.3) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[-0.020(\bar{c}_F^{(8)})_{111}^{(0E)} + (\bar{c}_F^{(8)})_{311}^{(0E)}]$	$(0.1 \pm 1.3) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$(\bar{c}_F^{(8)})_{330}^{(0E)}$	$(-0.8 \pm 3.3) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{331}^{(0E)}]$	$(-0.3 \pm 1.9) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{331}^{(0E)}]$	$(-2.8 \pm 1.9) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{332}^{(0E)}]$	$(2.2 \pm 1.3) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{332}^{(0E)}]$	$(0.2 \pm 1.3) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{333}^{(0E)}]$	$(-0.1 \pm 1.6) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{333}^{(0E)}]$	$(-0.1 \pm 1.6) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$

Some Photos

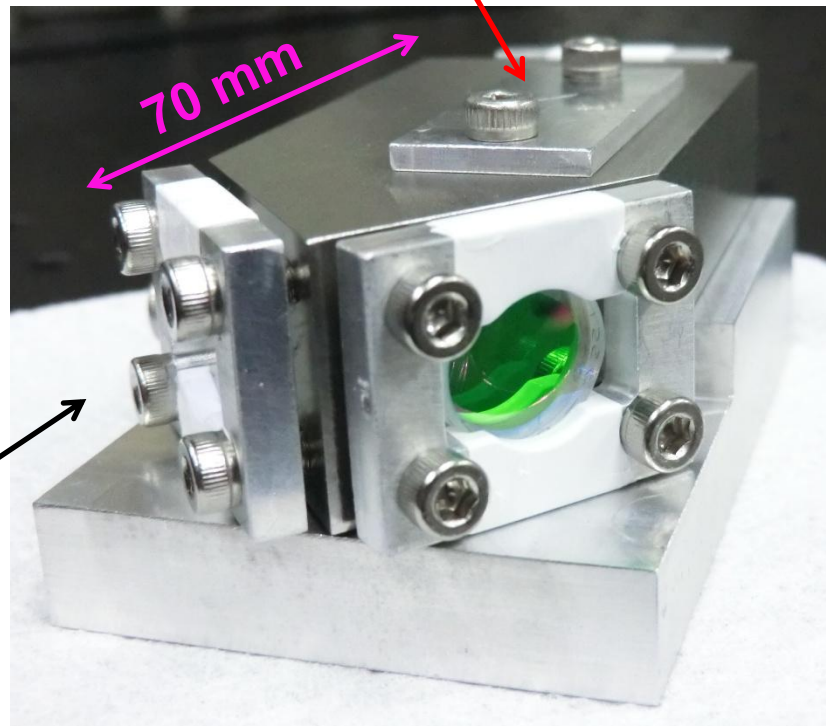


spacer made of Super Invar



silicon inside

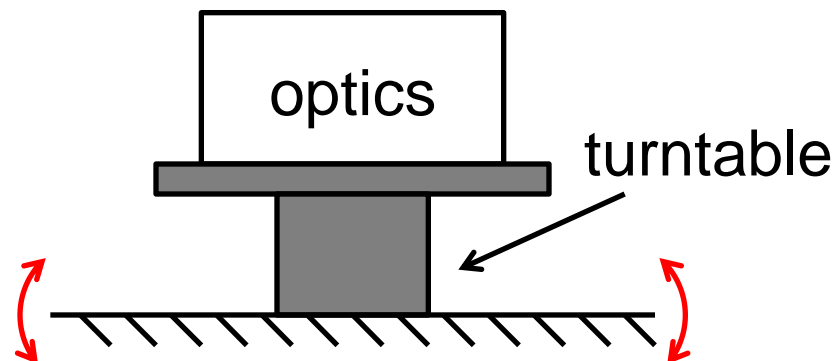
silicon



cavity mirrors

Systematic Errors

- 10% of statistical error at maximum
- sidereal tilt of turntable



Cause	Amount	Ratio compared with stat.
rotational speed fluctuation (Sagnac effect)	< 1 mrad/sec	< 2 %
turntable tilt	< 0.2 mrad	< 10 %
calibration (detuning)	-	3 %
calibration (openloop)	-	3 %
calibration (laser PZT)	-	5 %
refractive index	-	< 0.1 %

Cheat Sheet

- rotation frequency $f_{\text{rot}} = 0.083$ Hz
($T_{\text{rot}} = 12$ sec)
 - input power $P_{\text{in}} = 1$ mW
 - finesse $F = 120$
 - cavity length $L = 140$ mm
 - silicon length $d = 20$ mm
 - silicon refractive index $n = 3.69$
 - silicon AR loss $I < 0.5$ % / surface
 - incident angle $\theta = 9.5$ deg
 - FSR = 1.5 GHz
 - FWHM = 12 MHz
 - laser: Koheras AdjustiK C15
 - motor: Nikki Denso τ DISC
(ND110-85-FC)
 - sensitivity $\sim 4e-13$ /rtHz
 - shot noise $\sim 7e-14$ /rtHz
($\propto 1/F$, $\propto 1/\sqrt{P_{\text{in}}}$)
 - mirror thermal $\sim 5e-16$ /rtHz
- (all @ 0.1 Hz)