

光リング共振器を用いた 光子のローレンツ不変性検証

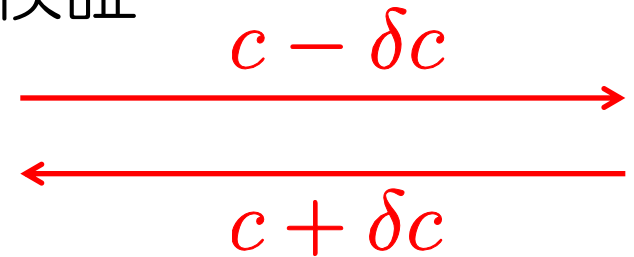
道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

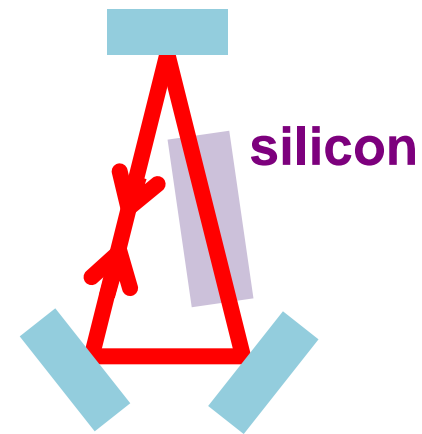
安東研究室

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
- 片道光速の等方性を
 $|\delta c/c| \lesssim 1 \times 10^{-14}$ の精度で検証

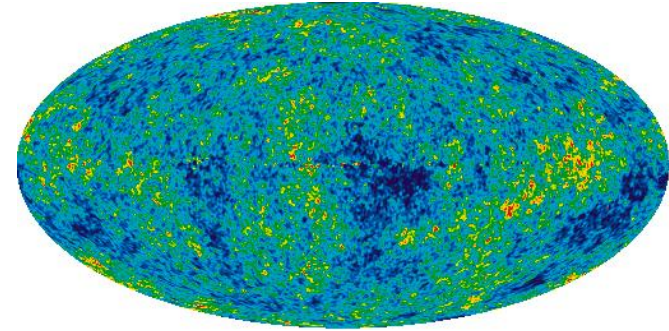


[Y. Michimura *et al.*: [Phys. Rev. Lett. 110, 200401 \(2013\)](#)]

- 高次のLorentz不変性の破れに初の上限值

Lorentz不変性の検証

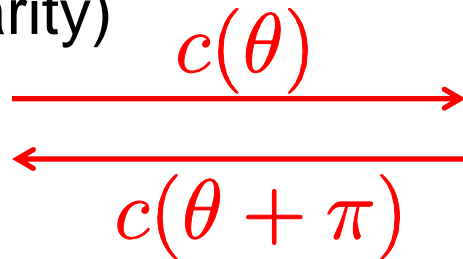
- 特殊相対論(1905) 光速度不変の原理
→ 電磁気学のLorentz不変性
- Lorentz不変性の破れ(LV)
量子重力理論、CMBの異方性



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

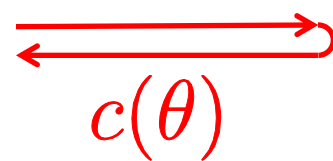
片道光速の等方性
(odd parity)



- 片道光速の等方性検証
→ 光リング共振器を利用

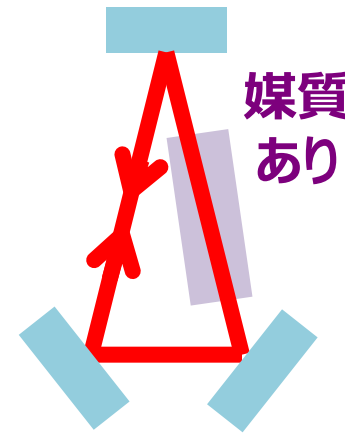
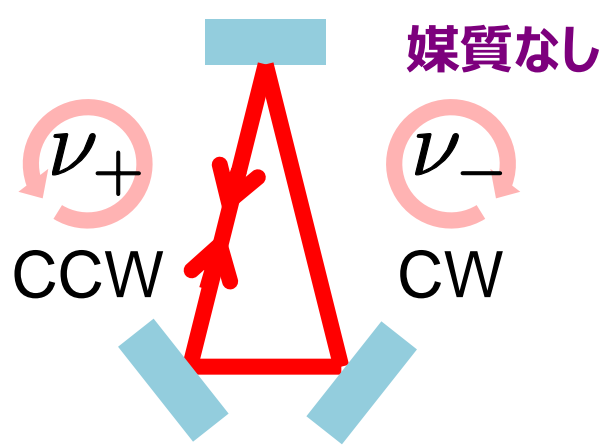
$c(\theta + \pi/2)$

往復光速の等方性
(even parity)



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)



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

$$\nu_+ = \nu_0$$

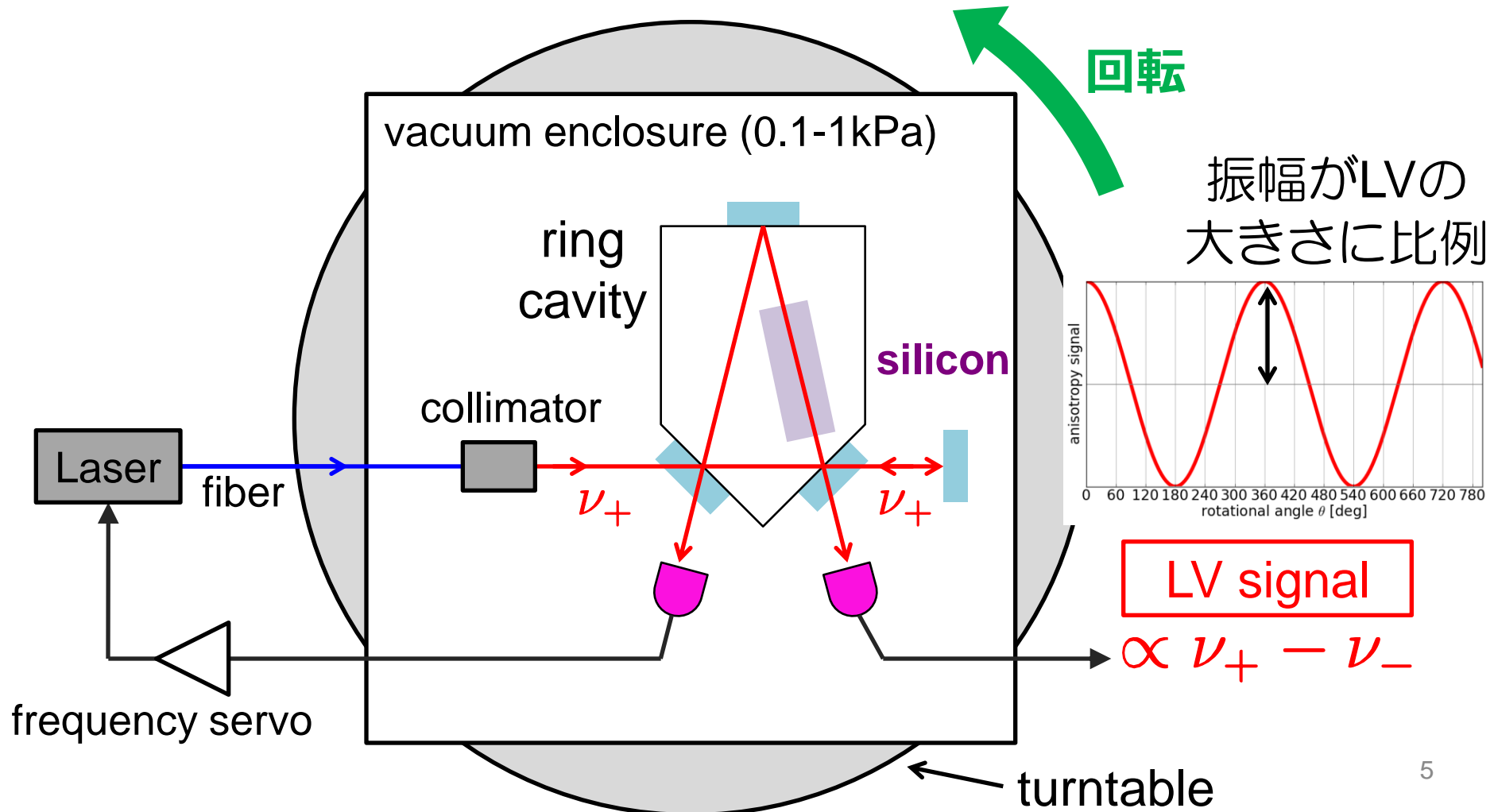
$$\nu_- = \nu_0$$

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

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

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

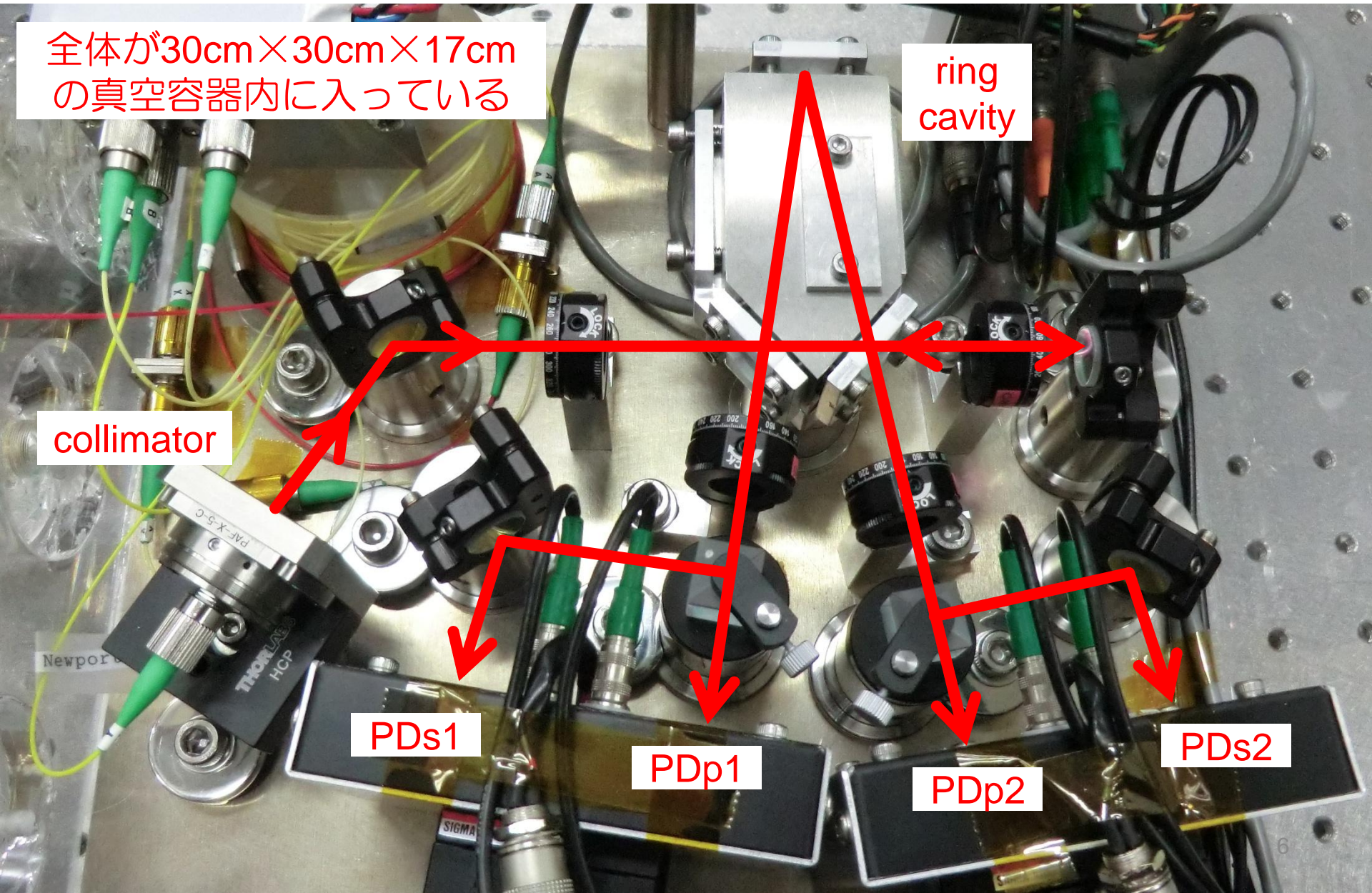
collimator

PDs1

PDp1

PDp2

PDs2



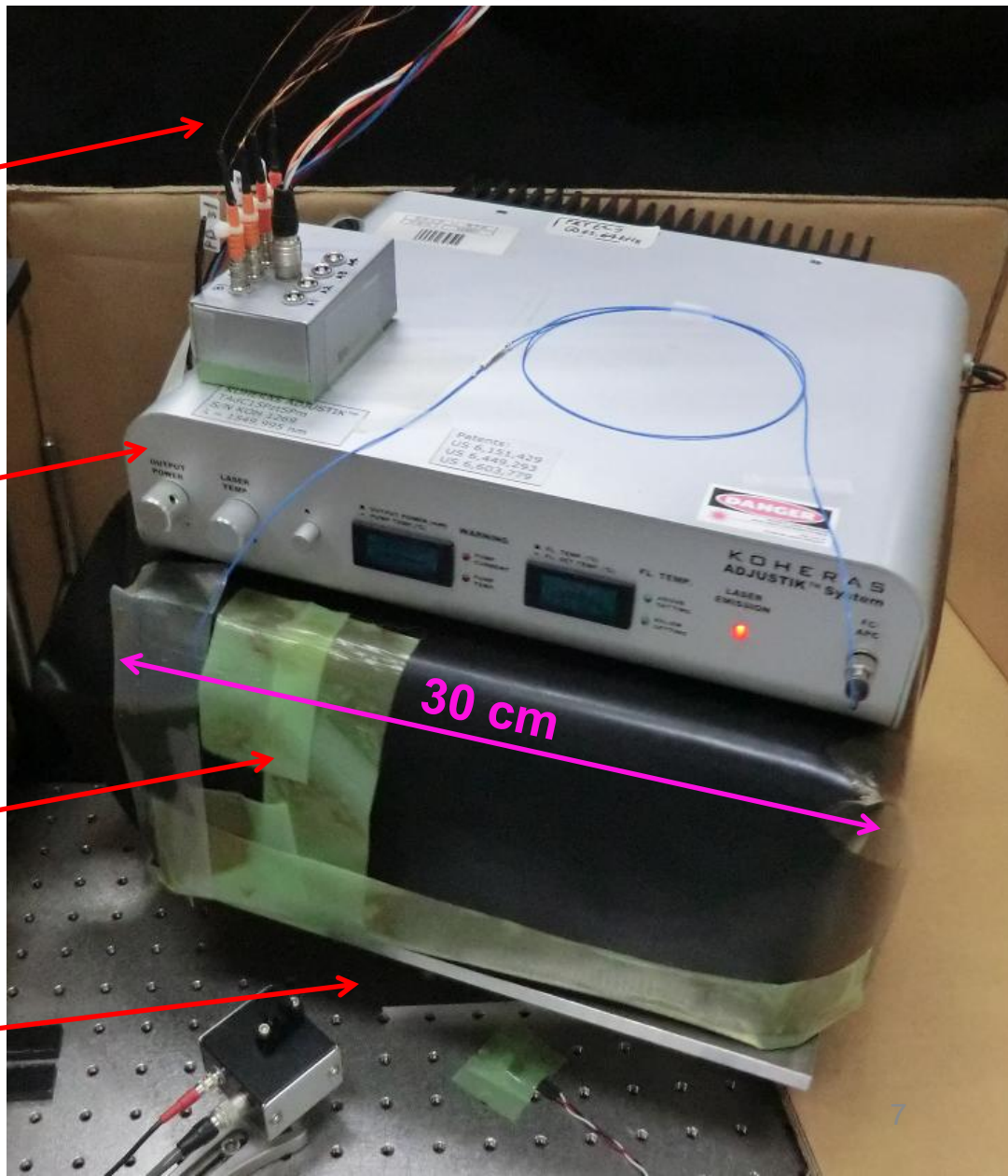
実験装置全体の写真

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



回転の様子

- 動画

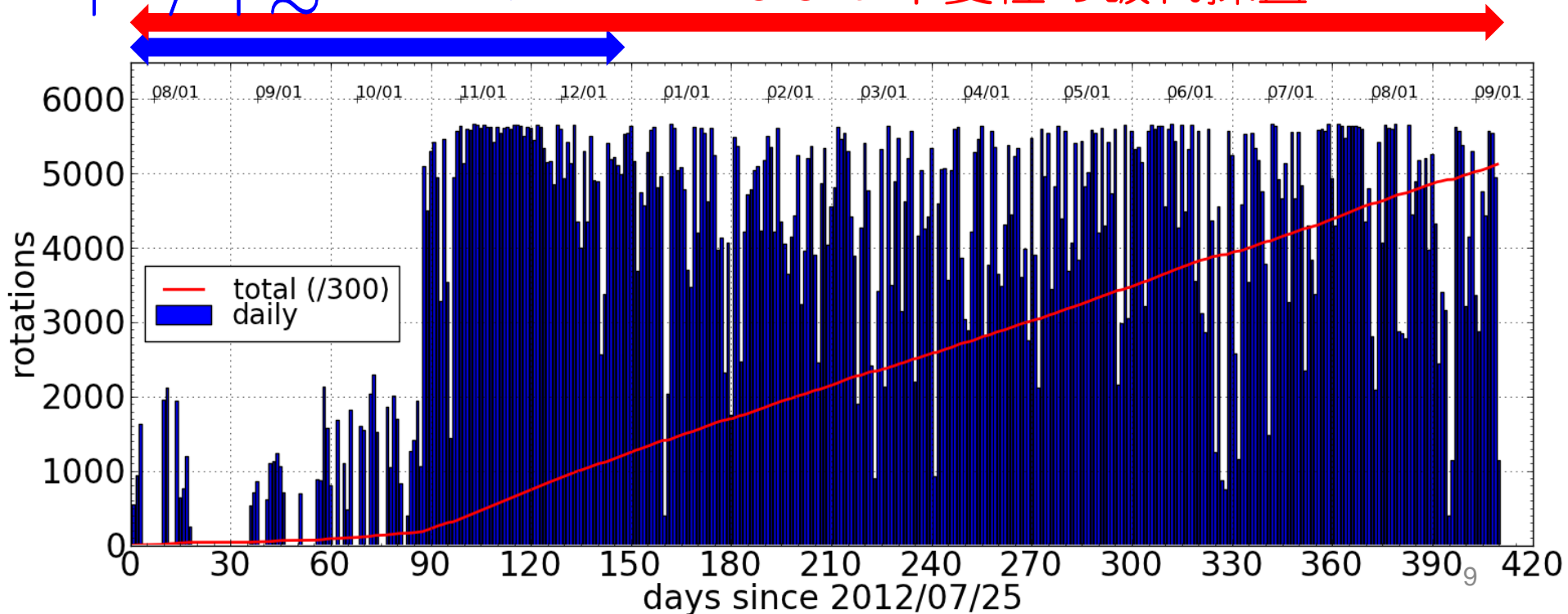
これまで得られたデータ

- 2012年8月から2013年9月まで測定
- 測定日数: 367日
- 総回転数: 154万回転

12月までのデータで
 $|\delta c/c| \lesssim 1 \times 10^{-14}$

1年にわたるデータで高次の
Lorentz不変性の破れ探査

今回のお話



高次のLorentz不変性

- 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

minimal SME

SM

4次のLV項

6次のLV項

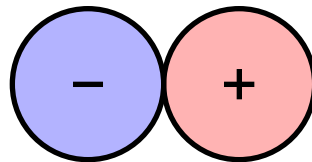
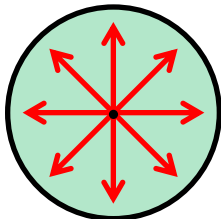
(p^2 の依存性)

8次のLV項

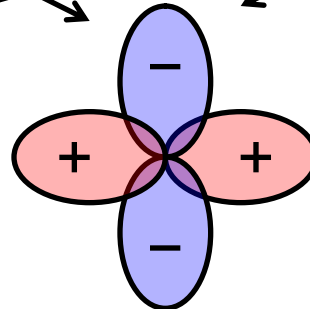
(p^4 の依存性)

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

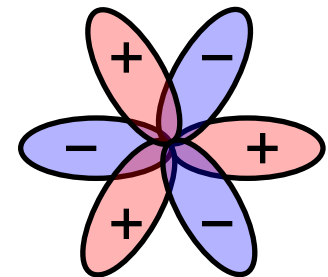
光速の異方性を
球面調和関数展開



片道光速の
異方性



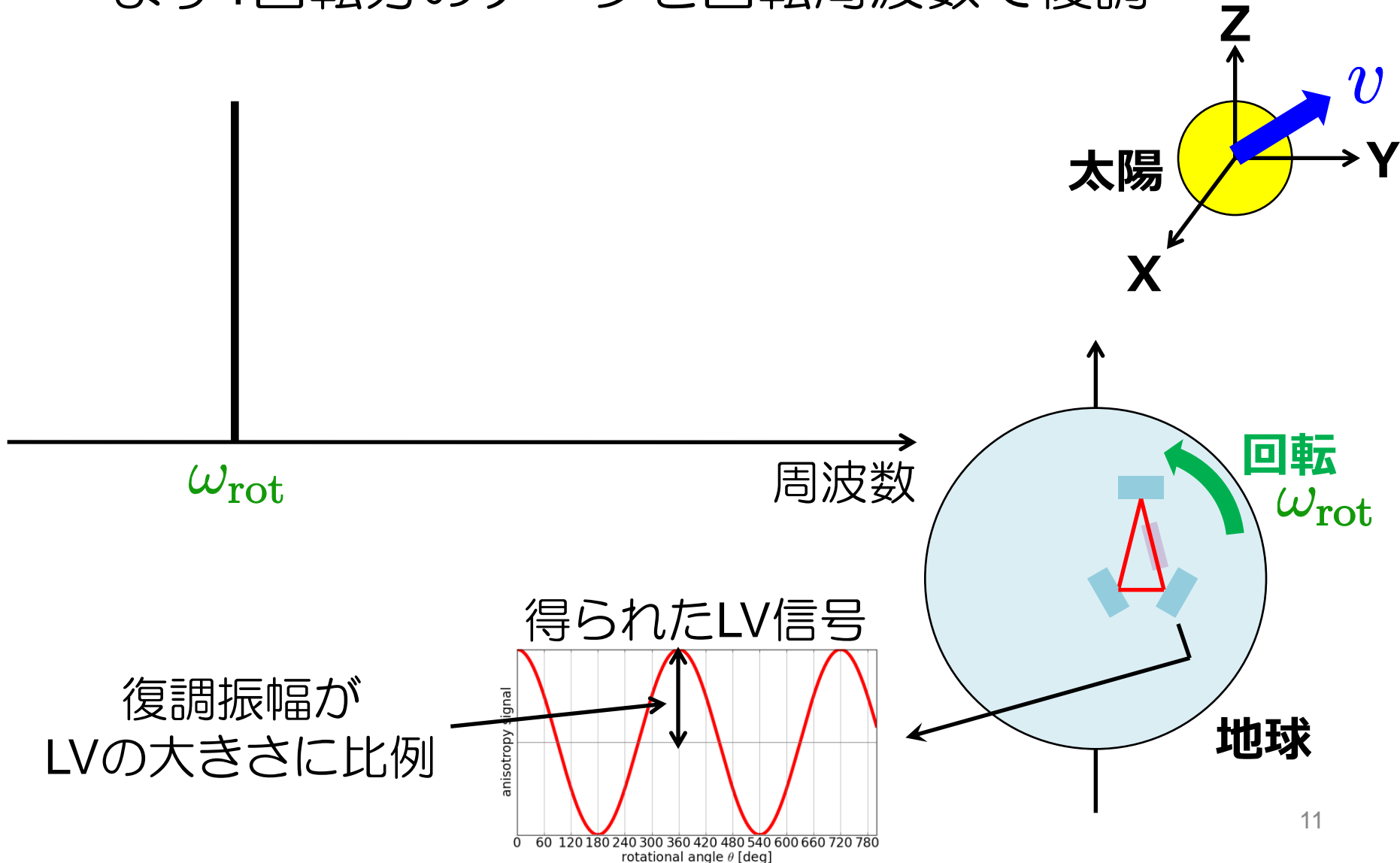
往復光速の
異方性



spin=3の
異方性

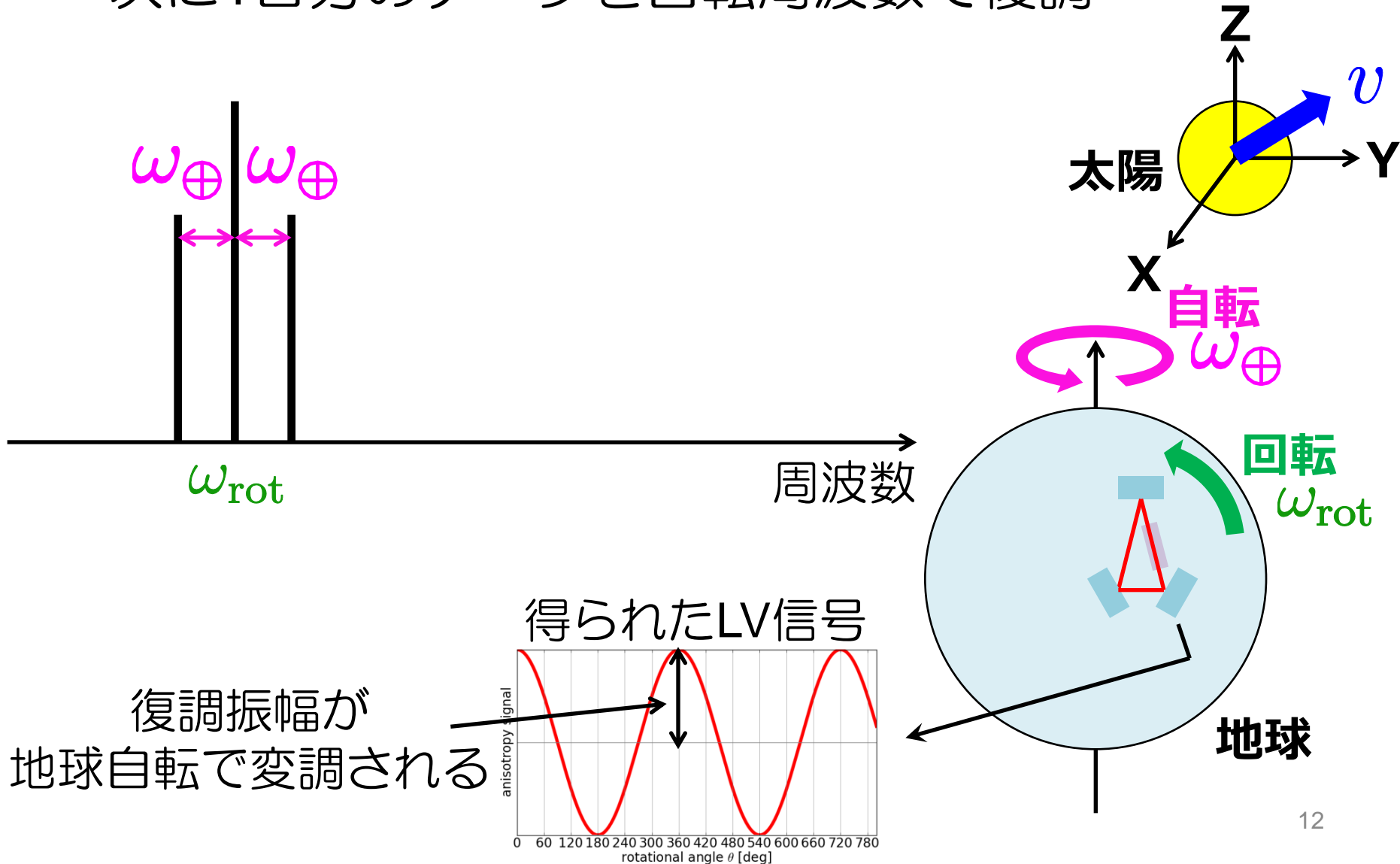
データ解析1

- まず1回転分のデータを回転周波数で復調



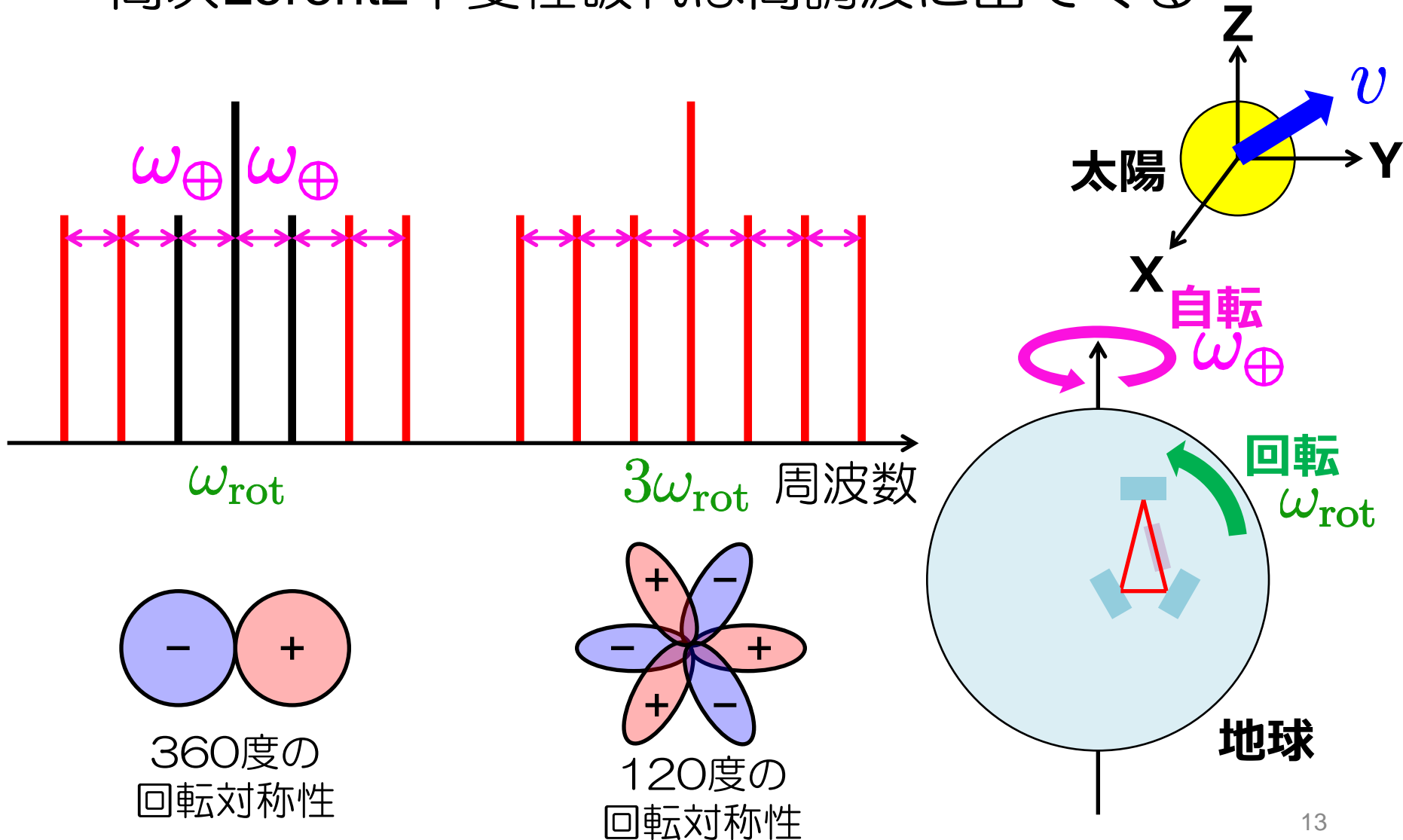
データ解析2

- 次に1日分のデータを自転周波数で復調

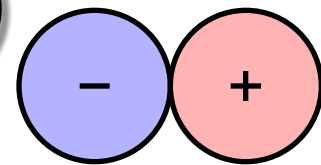


データ解析3

- 高次Lorentz不変性破れは高調波に出てくる

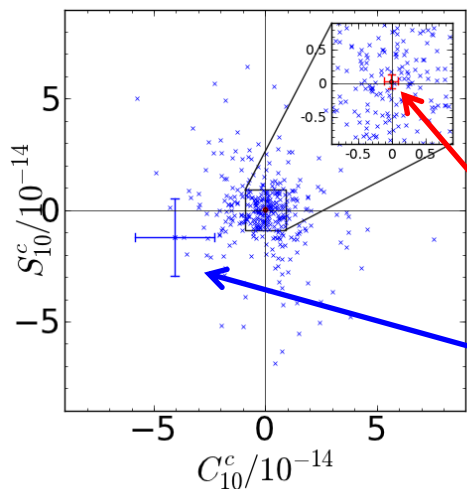


得られた復調振幅(ω_{rot})



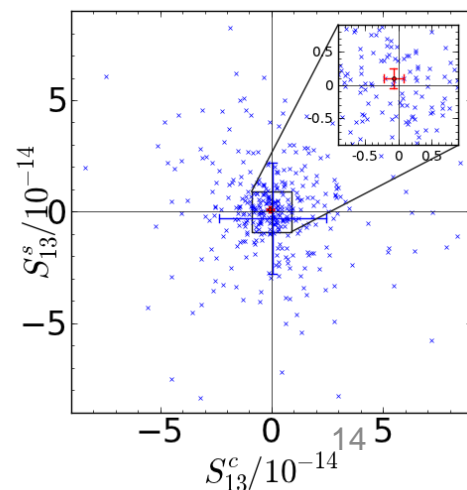
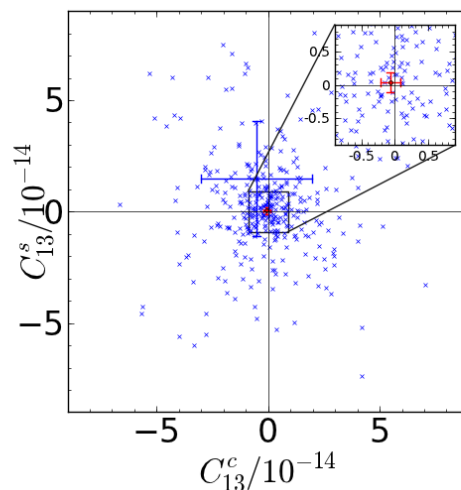
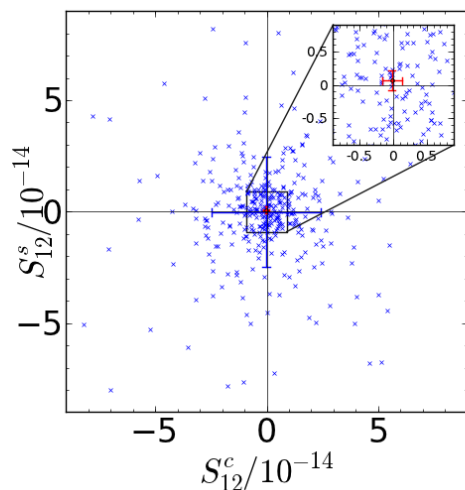
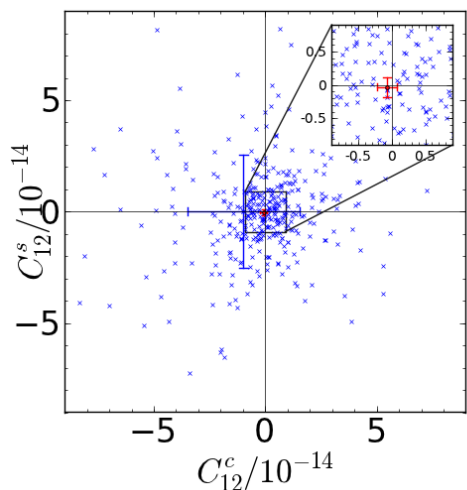
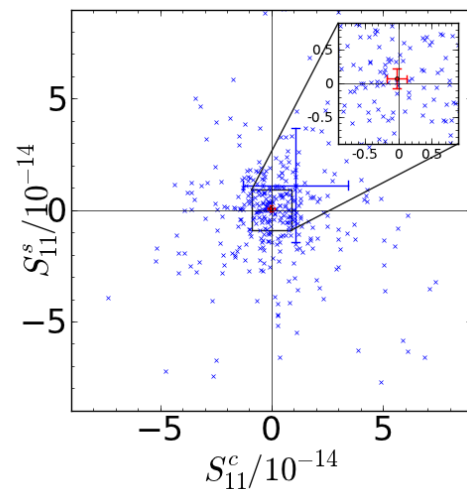
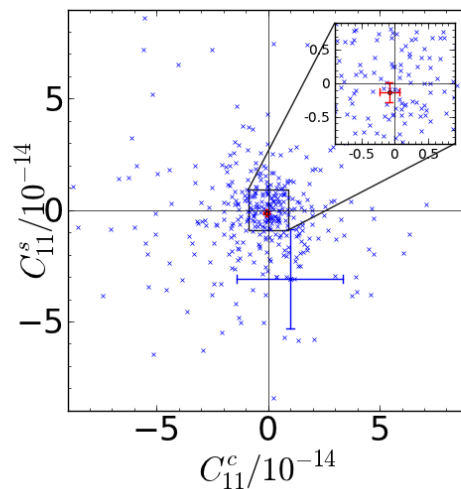
- 2σ でゼロと一致

→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず

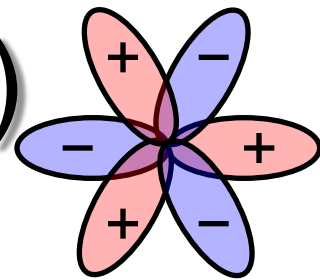


全367日の平均

1日分のデータ

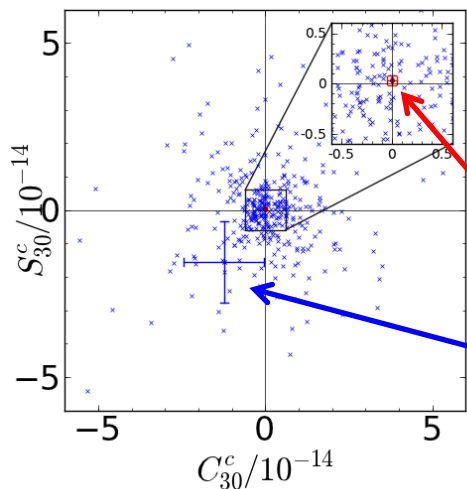


得られた復調振幅($3\omega_{\text{rot}}$)



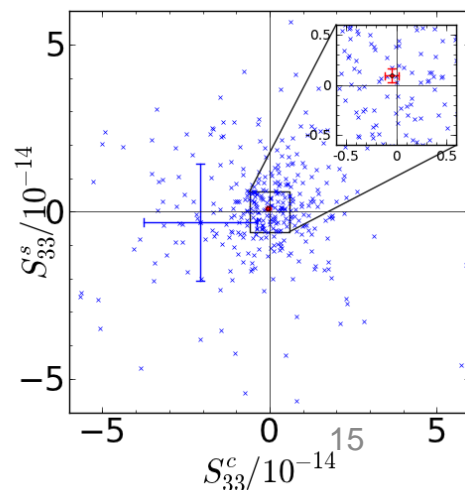
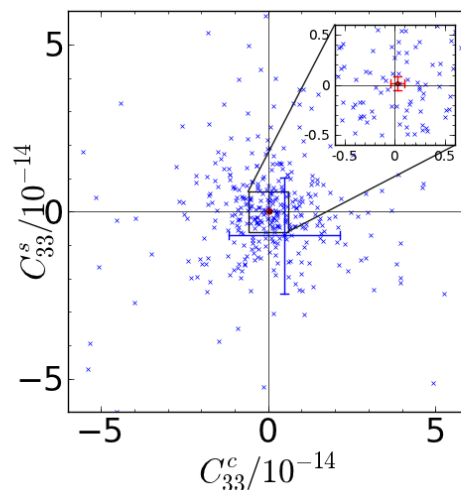
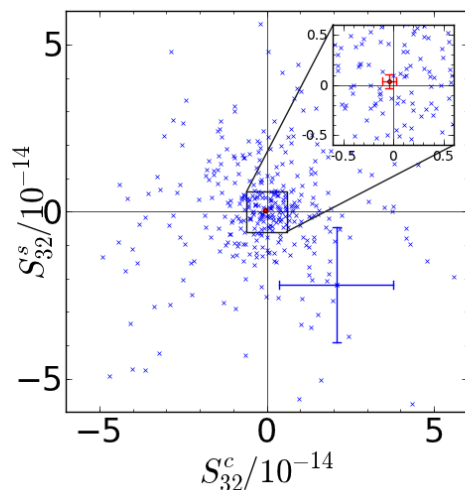
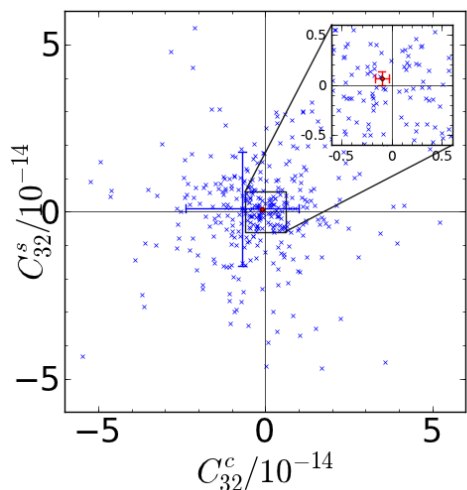
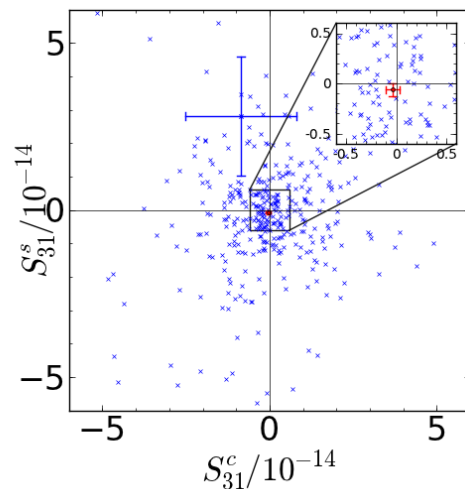
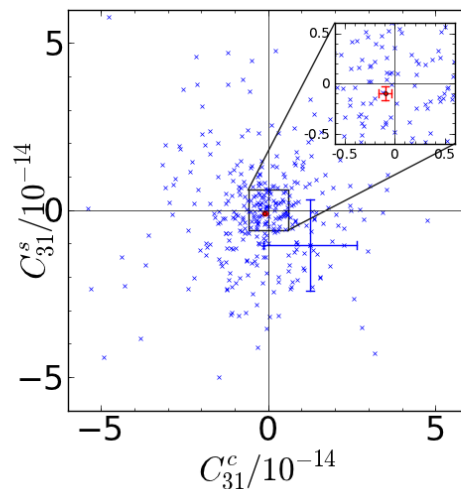
- 2σ でゼロと一致

→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



全367日の平均

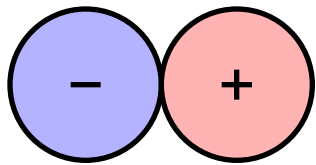
1日分のデータ



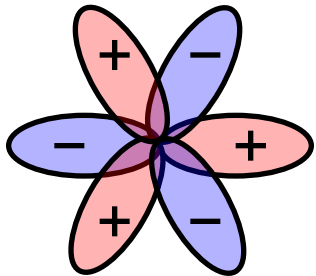
得られた上限値1

- 6次LVパラメータの奇パリティ成分
3個中3個に $\sim 1 \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
- 8次LVパラメータの奇パリティ成分
13個中10個に $\sim 1 \sim 3 \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$

Dimension	Coefficient	Result
$d = 6$	$(\bar{c}_F^{(6)})_{110}^{(0E)}$	$(-0.2 \pm 1.6) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(6)})_{111}^{(0E)}]$	$(0.8 \pm 1.1) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(6)})_{111}^{(0E)}]$	$(-0.6 \pm 1.1) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
$d = 8$	$-0.020(\bar{c}_F^{(8)})_{110}^{(0E)} + (\bar{c}_F^{(8)})_{310}^{(0E)}$	$(0.2 \pm 2.0) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$-0.020\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{111}^{(0E)}] + \text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{311}^{(0E)}]$	$(1.7 \pm 1.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$-0.020\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{111}^{(0E)}] + \text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{311}^{(0E)}]$	$(-0.2 \pm 1.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$(\bar{c}_F^{(8)})_{330}^{(0E)}$	$(-0.1 \pm 3.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{331}^{(0E)}]$	$(-0.3 \pm 2.0) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{331}^{(0E)}]$	$(-2.4 \pm 2.0) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{332}^{(0E)}]$	$(2.2 \pm 1.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{332}^{(0E)}]$	$(0.2 \pm 1.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{333}^{(0E)}]$	$(0.2 \pm 1.7) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{333}^{(0E)}]$	$(-0.1 \pm 1.7) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$



$$|\delta c/c| \lesssim 7 \times 10^{-15}$$

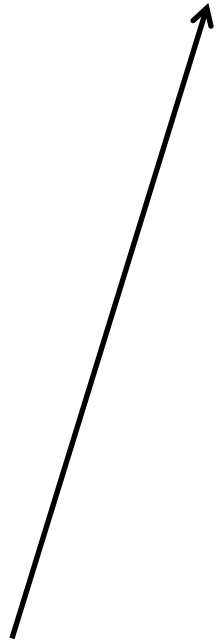


$$|\delta c/c| \lesssim 3 \times 10^{-15}$$

得られた上限値2

- 奇パリティ成分へは初の上限值
- cf. 偶パリティ成分へのこれまでの上限値
 6次LVは $\sim 10^6 \text{ GeV}^{-2}$
 8次LVは $\sim 10^{31} \sim 10^{35} \text{ GeV}^{-4}$

Dimension	Coefficient	Result
$d = 6$	$(\bar{c}_F^{(6)})_{110}^{(0E)}$	$(-0.2 \pm 1.6) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(6)})_{111}^{(0E)}]$	$(0.8 \pm 1.1) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(6)})_{111}^{(0E)}]$	$(-0.6 \pm 1.1) \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$
$d = 8$	$-0.020(\bar{c}_F^{(8)})_{110}^{(0E)} + (\bar{c}_F^{(8)})_{310}^{(0E)}$	$(0.2 \pm 2.0) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$-0.020\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{111}^{(0E)}] + \text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{311}^{(0E)}]$	$(1.7 \pm 1.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$-0.020\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{111}^{(0E)}] + \text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{311}^{(0E)}]$	$(-0.2 \pm 1.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$(\bar{c}_F^{(8)})_{330}^{(0E)}$	$(-0.1 \pm 3.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{331}^{(0E)}]$	$(-0.3 \pm 2.0) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{331}^{(0E)}]$	$(-2.4 \pm 2.0) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{332}^{(0E)}]$	$(2.2 \pm 1.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{332}^{(0E)}]$	$(0.2 \pm 1.4) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})_{333}^{(0E)}]$	$(0.2 \pm 1.7) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$
	$\text{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})_{333}^{(0E)}]$	$(-0.1 \pm 1.7) \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$



[S. R. Parker *et al.*:
[PRL 106, 180401 \(2011\)](#)]

まとめ

- 光リング共振器を用いた新しい手法により、片道光速の等方性を $|\delta c/c| \lesssim 1 \times 10^{-14}$ の精度で検証

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

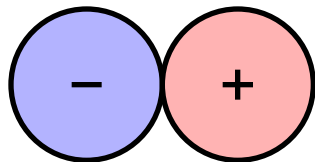
- 1年に渡ってデータ取得を継続

観測日数: 367日

回転数: 154万回転

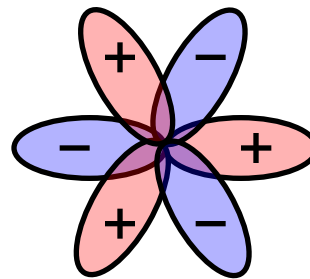
- 1年分のデータを用いて高次のLorentz不変性の破れのうち、奇パリティ成分に初の上限值

[Y. Michimura *et al.*: in preparation]



が

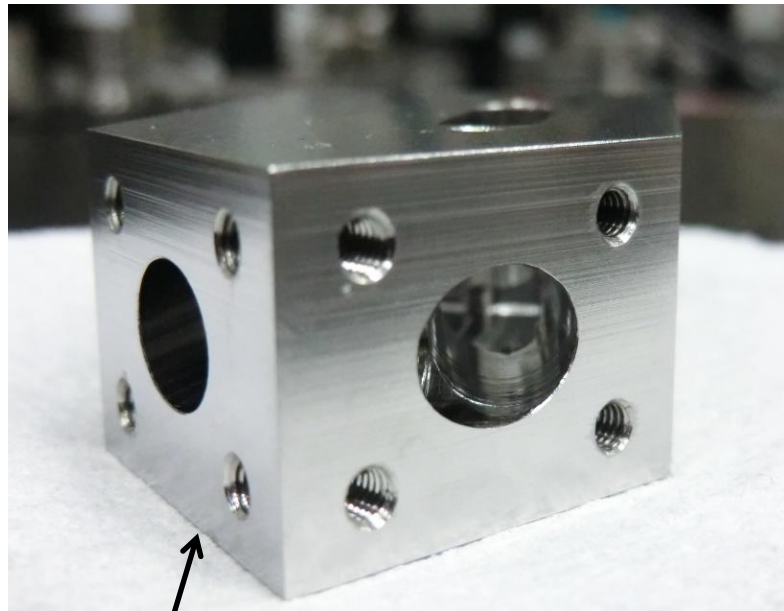
$$|\delta c/c| \lesssim 7 \times 10^{-15}$$



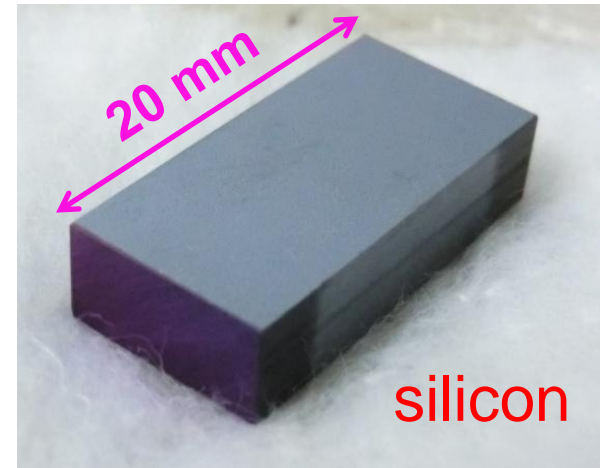
が

$$|\delta c/c| \lesssim 3 \times 10^{-15}$$

Some Photos

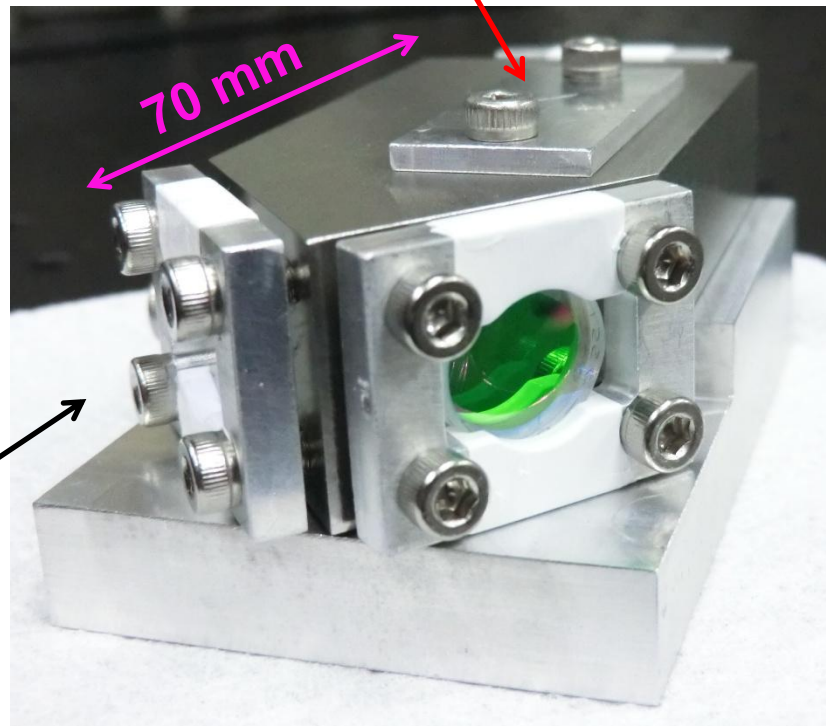


spacer made of
Super Invar



silicon inside

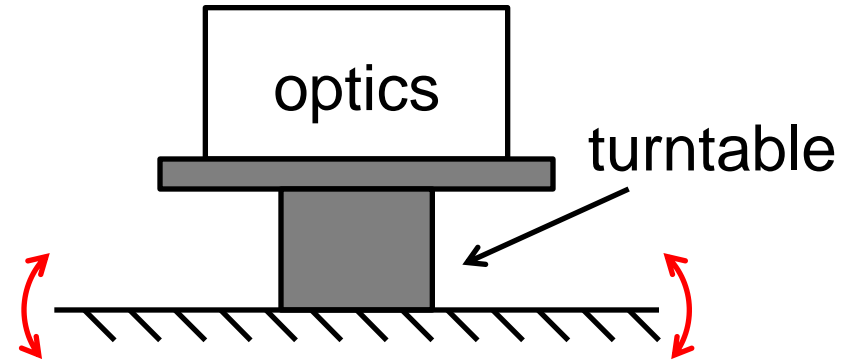
silicon



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	< 0.01 %
turntable tilt	< 0.2 mrad	< 10 %
calibration	-	3 %
refractive index	-	< 0.1 %
time	1 min	0.4 %
orientation	2 deg	3 %

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)