

# 光リング共振器を用いた ローレンツ不変性の検証

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

# 自己紹介

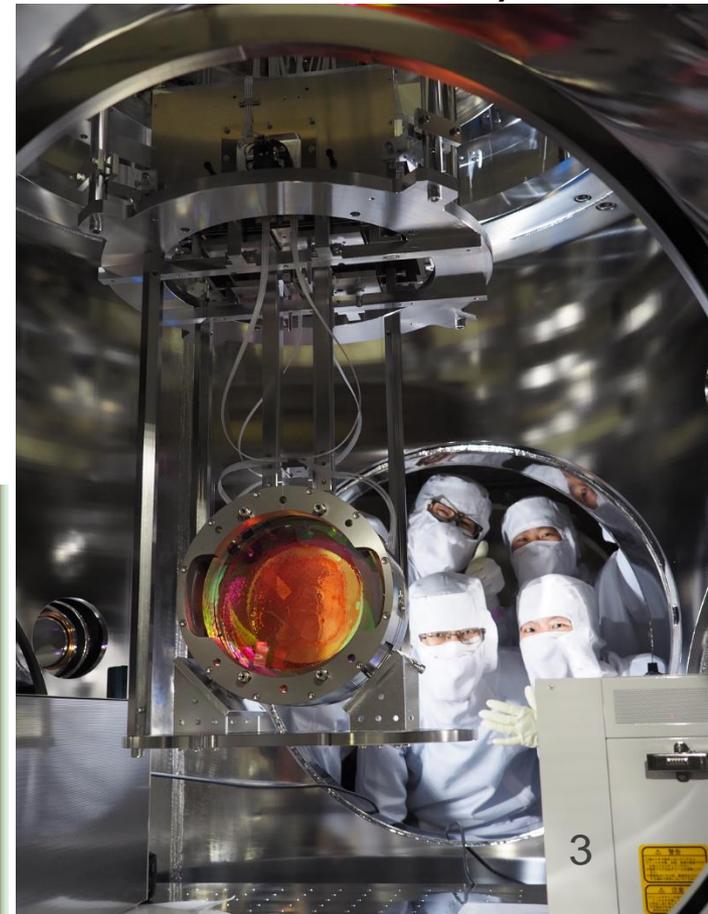
- 東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻  
安東研究室 助教(2014年7月から)
- 重力波望遠鏡KAGRA  
レーザー干渉計開発



- 博士論文(2014年10月)  
光リング共振器を用いたローレンツ不変性検証
- 干渉計技術を用いた基礎物理学実験  
巨視的量子力学、重力逆二乗則検証、暗黒物質探索 etc.....

# 重力波望遠鏡KAGRAの紹介

- 岐阜県神岡鉱山地下に建設中
- 2015年11月 第一期観測施設完成記念式典
- (2016年2月 aLIGOによる重力波の初検出発表)
- 2016年3月末 KAGRA最初の試験運転開始予定
- KAGRA関連講演  
21日午後 CE会場  
22日午前・午後 AZ会場



KAGRA Logbook 1.7

Sections... Tasks... username ..... LOG-IN

Quick search

Home Search Help

Displaying reports 21-40 of 1011. Go to page 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 End

**MIF (General)**

osamu.miyakawa - 20:32, Friday 18 March 2016 (1080)

Michelson locked!

**3km Michelson has been locked!**

Details will be reported by Kokeyama-san or Aso-kun. I only post a video file for the locking.

Upper line shows feedback signal, lower line shows DC power of reflected light. The lock lasted 25sec in this video. Typically Michelson lock lasted 10sec to 1min tonight.

**Congratulation for commissioning team and all KAGRA people!**

Non-image files attached to this report

img8848.mov

Comments related to this report

takashi.uchiyama - 21:17, Friday 18 March 2016 (1081)

# 概要

- 特殊相対論、電磁気学のLorentz不変性の検証実験  
特に、光速の行き帰りの差
- 光リング共振器を用いた新手法の装置を開発
- 1年に渡る光速の異方性探査
- これまでの上限値を1桁更新(世界最高精度)

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

- 高次のLorentz不変性の破れに初の上限值



$$c + \delta c$$



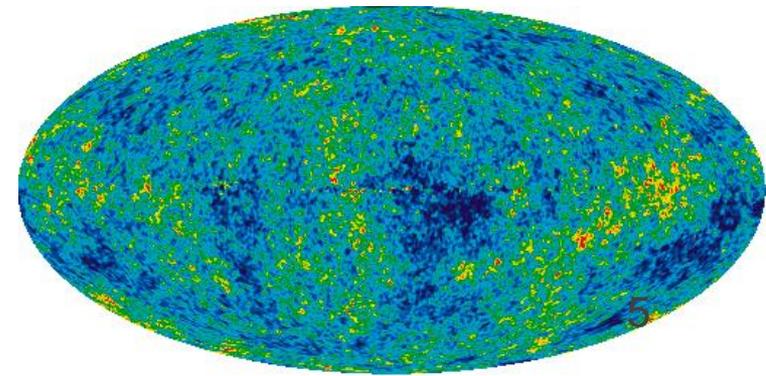
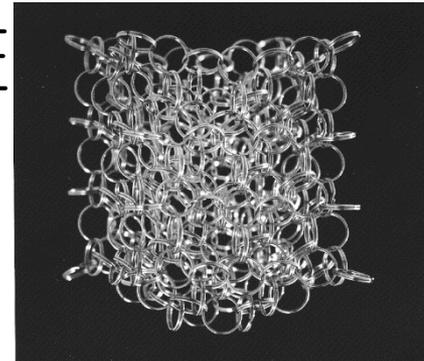
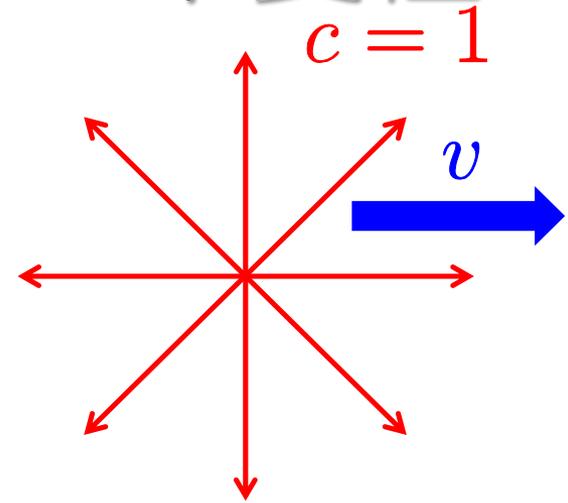
$$c - \delta c$$

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

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

# 特殊相対性理論とLorentz不変性

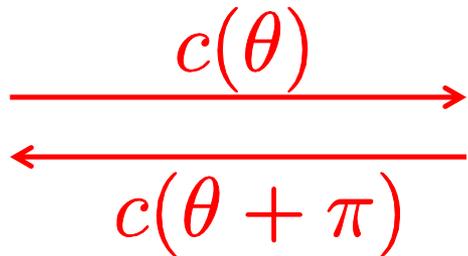
- 特殊相対性理論(1905)
  - 特殊相対性原理
  - 光速不変の原理
- Lorentz不変性は宇宙の基本的な対称性である
- 発表から100年以上、様々な実験的検証
  - 一度も「破れ」は見つかっていない
  - 全ての物理学の基礎
- Lorentz不変性の破れ
  - 量子重力理論からの示唆
  - CMBの異方性
  - 実験的検証が必要



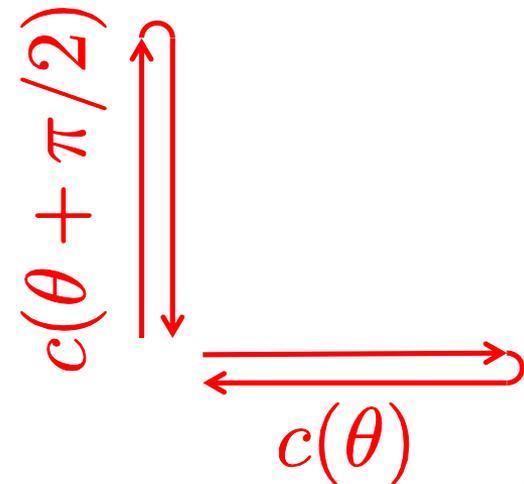
# 特殊相対性理論の検証

- その中でも「光速不変の原理」を検証
- 2種類の光速の等方性
  - 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)

片道光速の等方性  
(odd-parity)

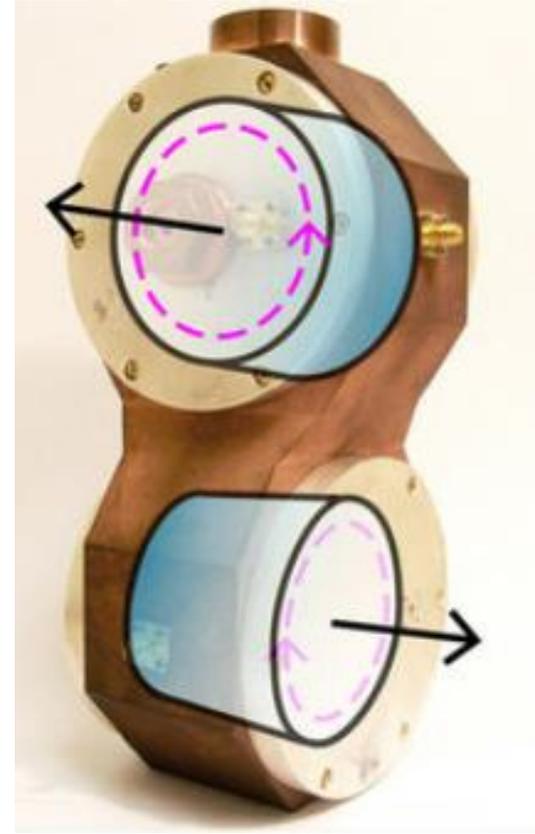
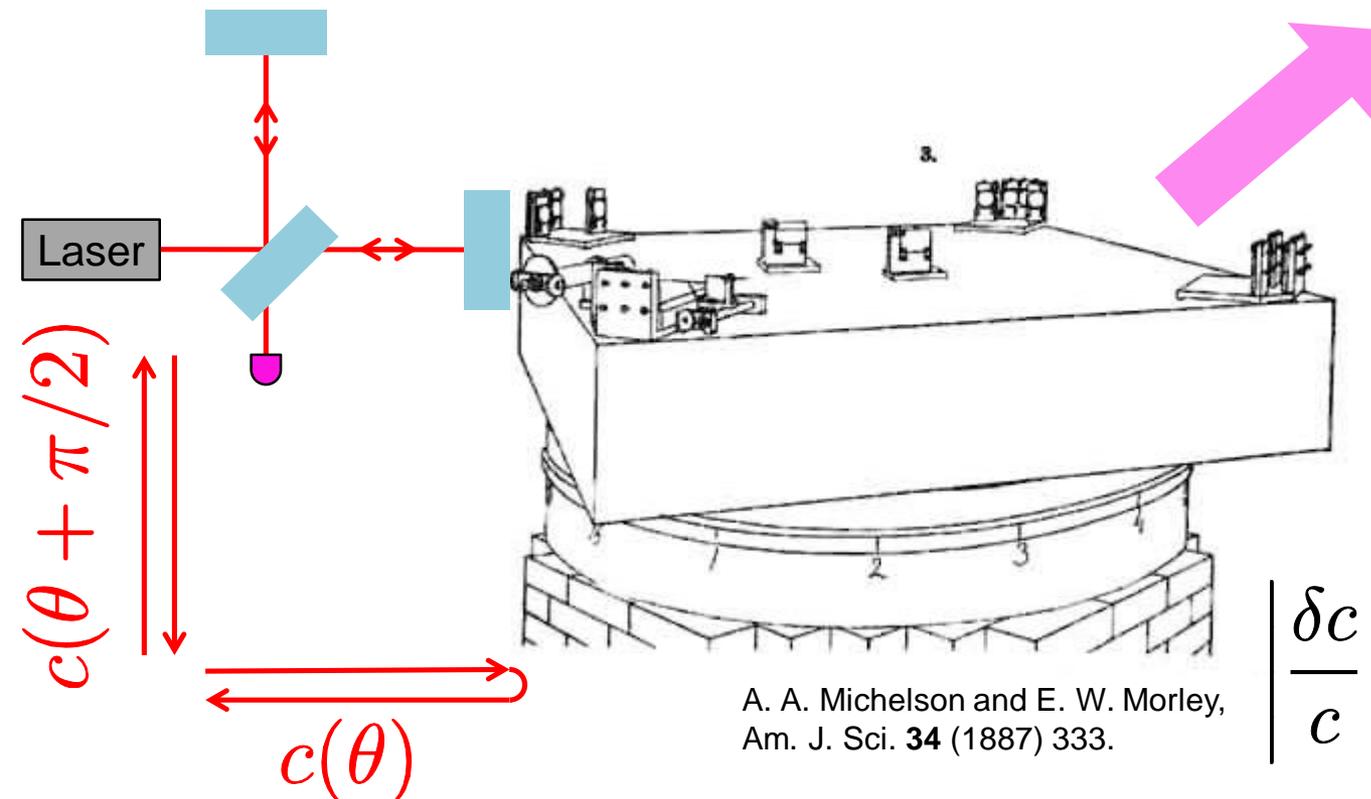


往復光速の等方性  
(even-parity)



# 往復光速の等方性検証

- Michelson-Morley型の実験
- 100年以上にわたり行われてきた
- 現在では  $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 10^{-18}$  レベルの  
上限値



M. Nagel+, Nature Communications 6,8174 (2015)

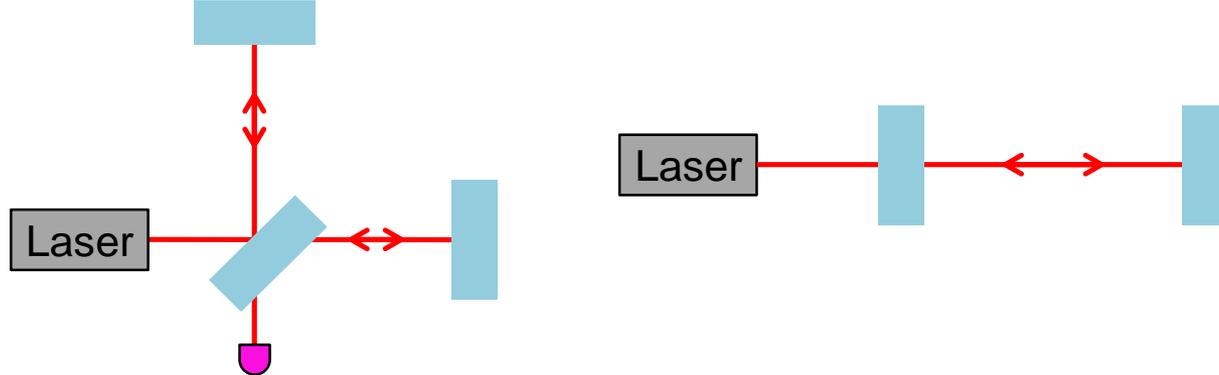
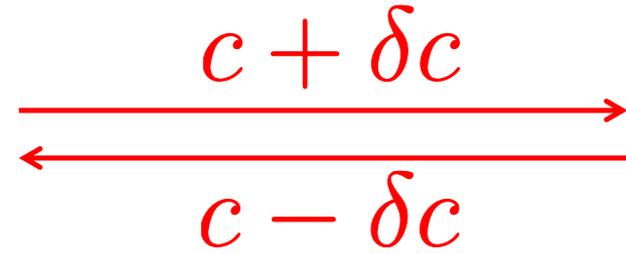
$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 10^{-9}$$

A. A. Michelson and E. W. Morley,  
Am. J. Sci. **34** (1887) 333.

# 片道光速の等方性検証

- 通常の干渉計、共振器では検証することができない

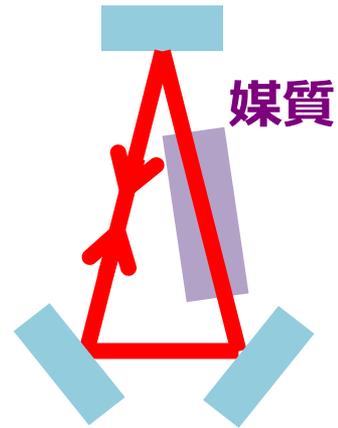
行き帰りの差がキャンセル  
されてしまうため



- 非対称リング共振器を使うとできる

提案: M. E. Tobar+, PRD **71**, 025004 (2005)

実証: F. Baynes+, PRL **108**, 260801 (2012)  $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 10^{-13}$

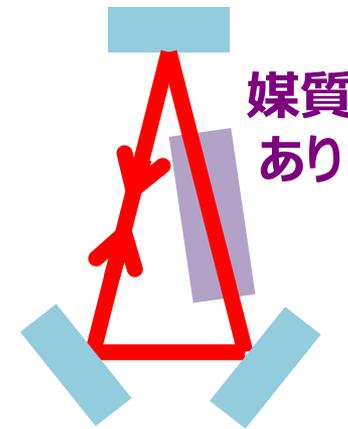
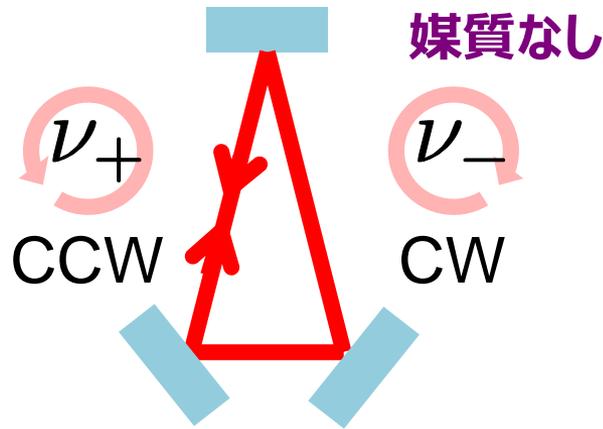


→我々はさらなる精度向上を行った

# 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

$$\nu_+ = \nu_0$$

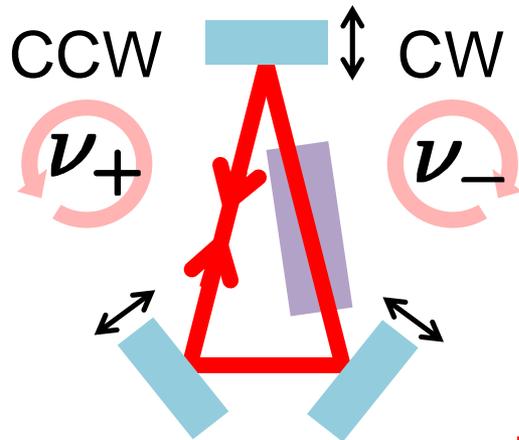
$$\nu_- = \nu_0$$

$$\nu_+ = \nu - \delta\nu_{LV}$$

$$\nu_- = \nu + \delta\nu_{LV}$$

# 両回りの共振周波数を比較

- 共振器長変化は両回りに同相に効く
- 同相雑音除去により、環境変化に強くなる  
→ 高真空、高レベル防振、温度制御が不要
- 比較はダブルパス構成で行う



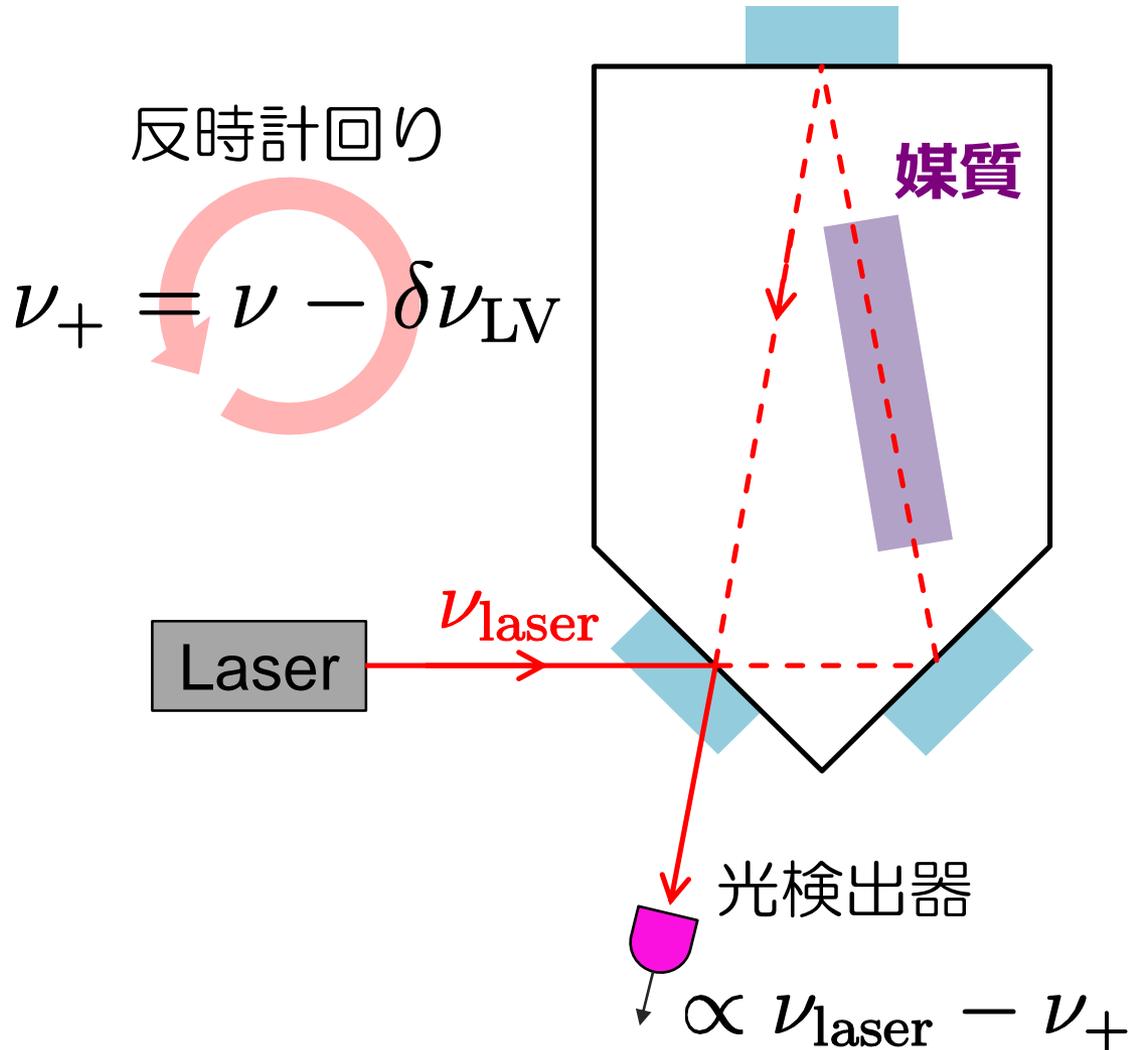
$$\begin{aligned}\nu_+ &= \nu + \delta\nu_{\text{noise}} - \delta\nu_{\text{LV}} \\ \nu_- &= \nu + \delta\nu_{\text{noise}} + \delta\nu_{\text{LV}}\end{aligned}$$

LVによる  
共振周波数ずれは差動

共振器長変化による  
共振周波数変動は同相

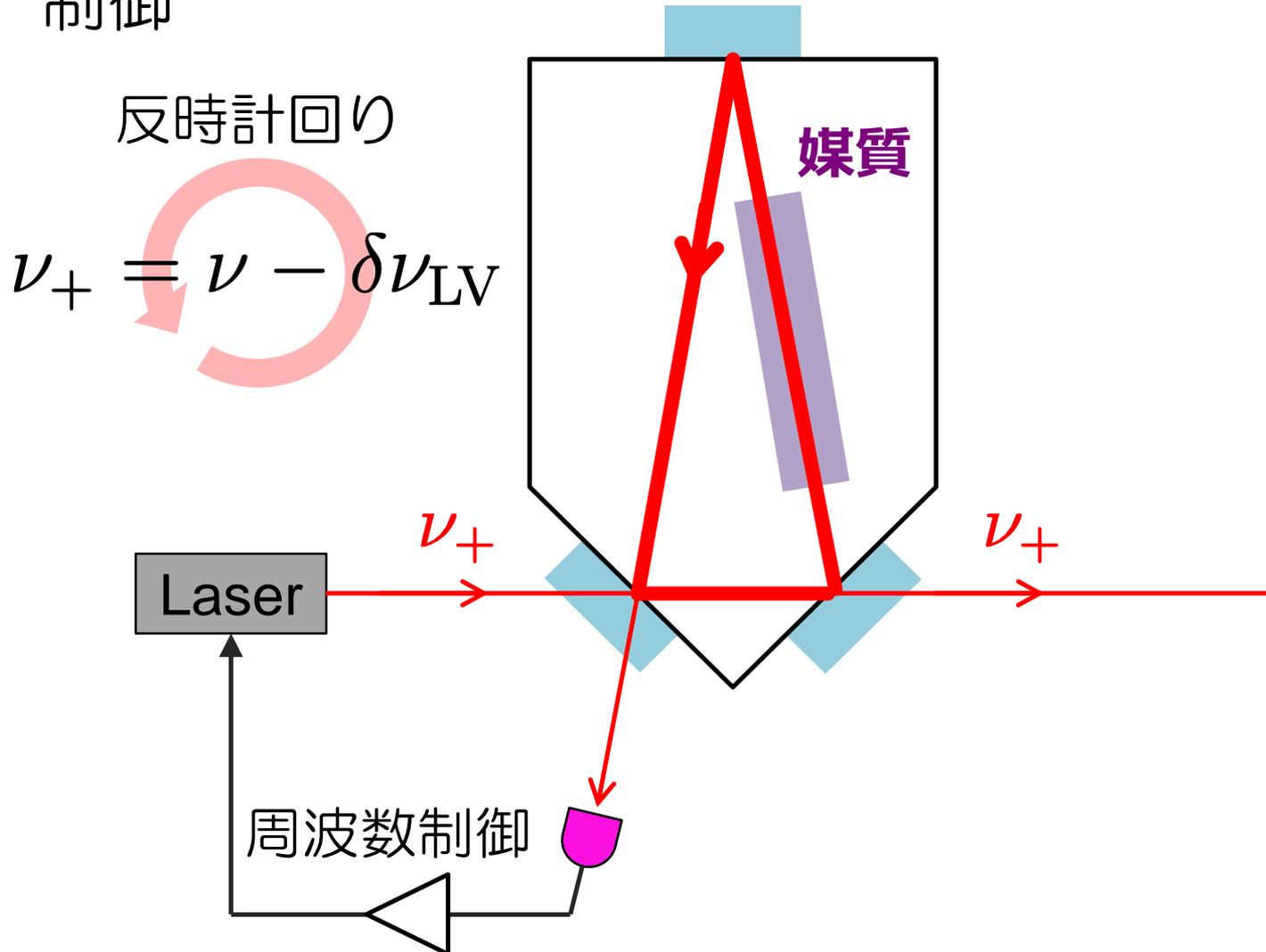
# ダブルパス構成 (1/4)

- レーザー光を反時計回りに入射



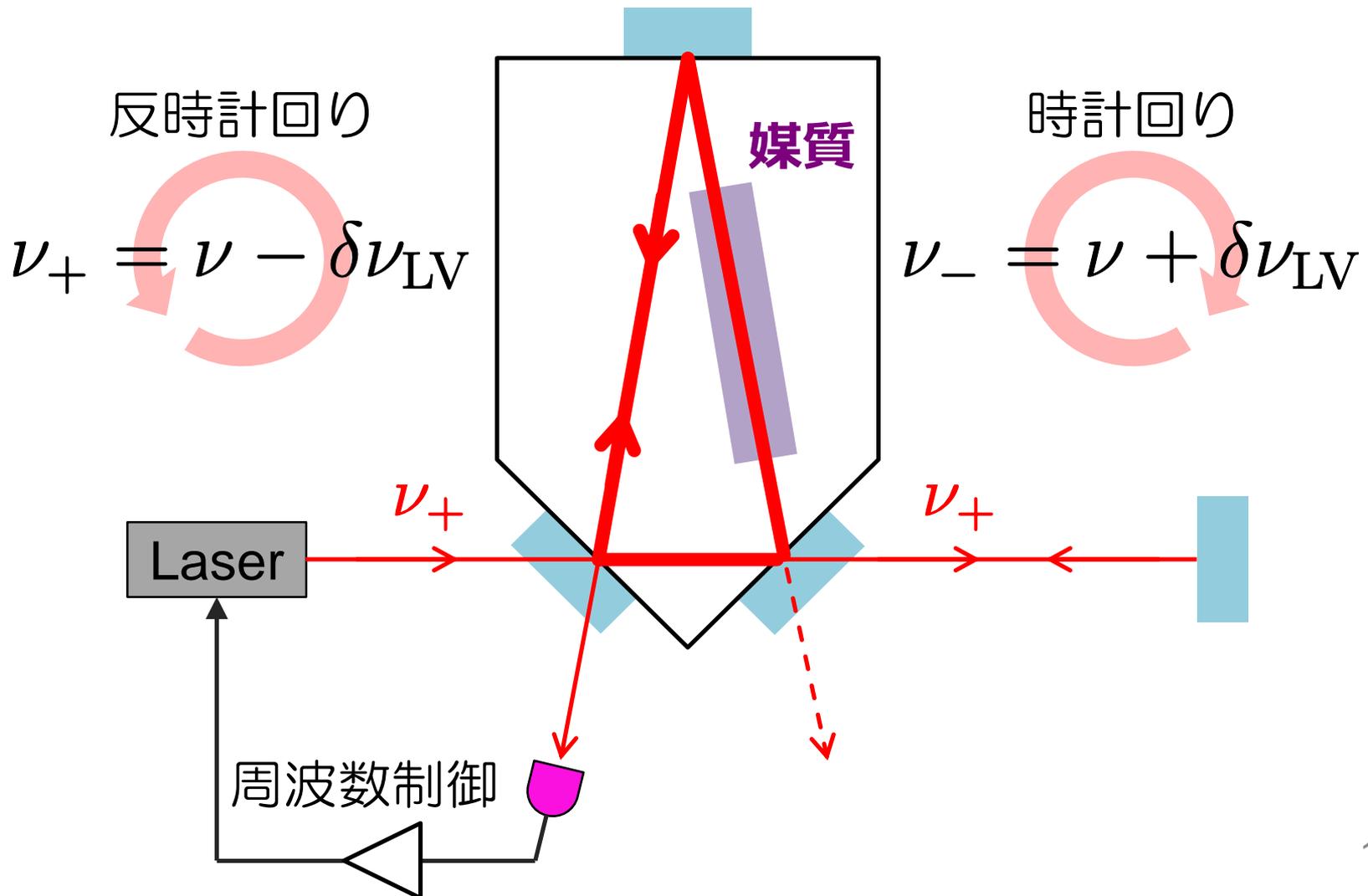
# ダブルパス構成 (2/4)

- レーザー周波数を反時計回りの共振周波数( $\nu_+$ )に制御



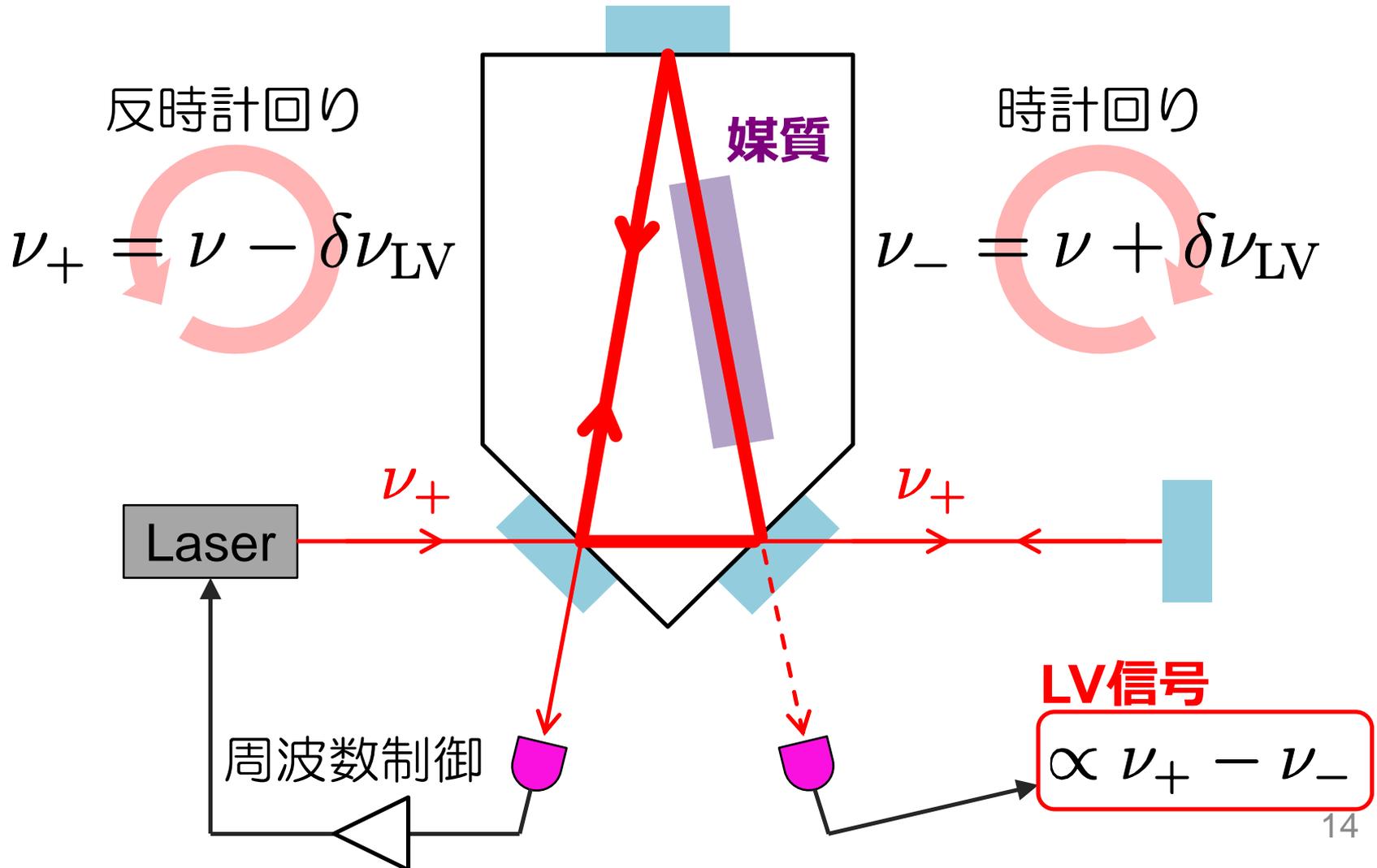
# ダブルパス構成 (3/4)

- 透過光を打ち返し、時計回りに再入射



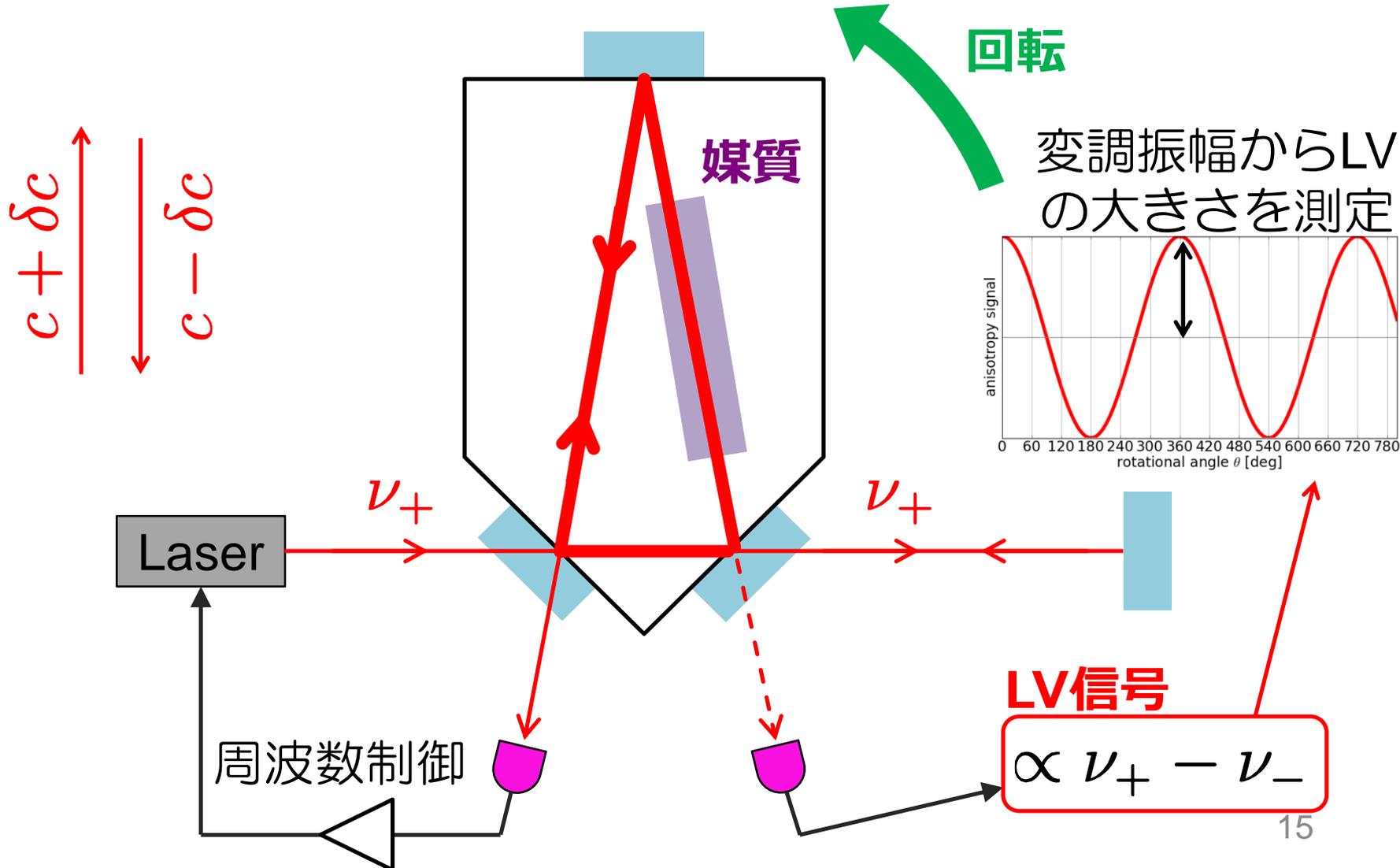
# ダブルパス構成 (4/4)

- その反射光から、LV信号が得られる(**null測定**)



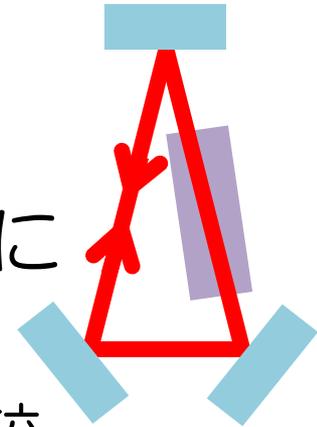
# 実験装置の回転

- 全体を回転させることにより、LV信号を変調



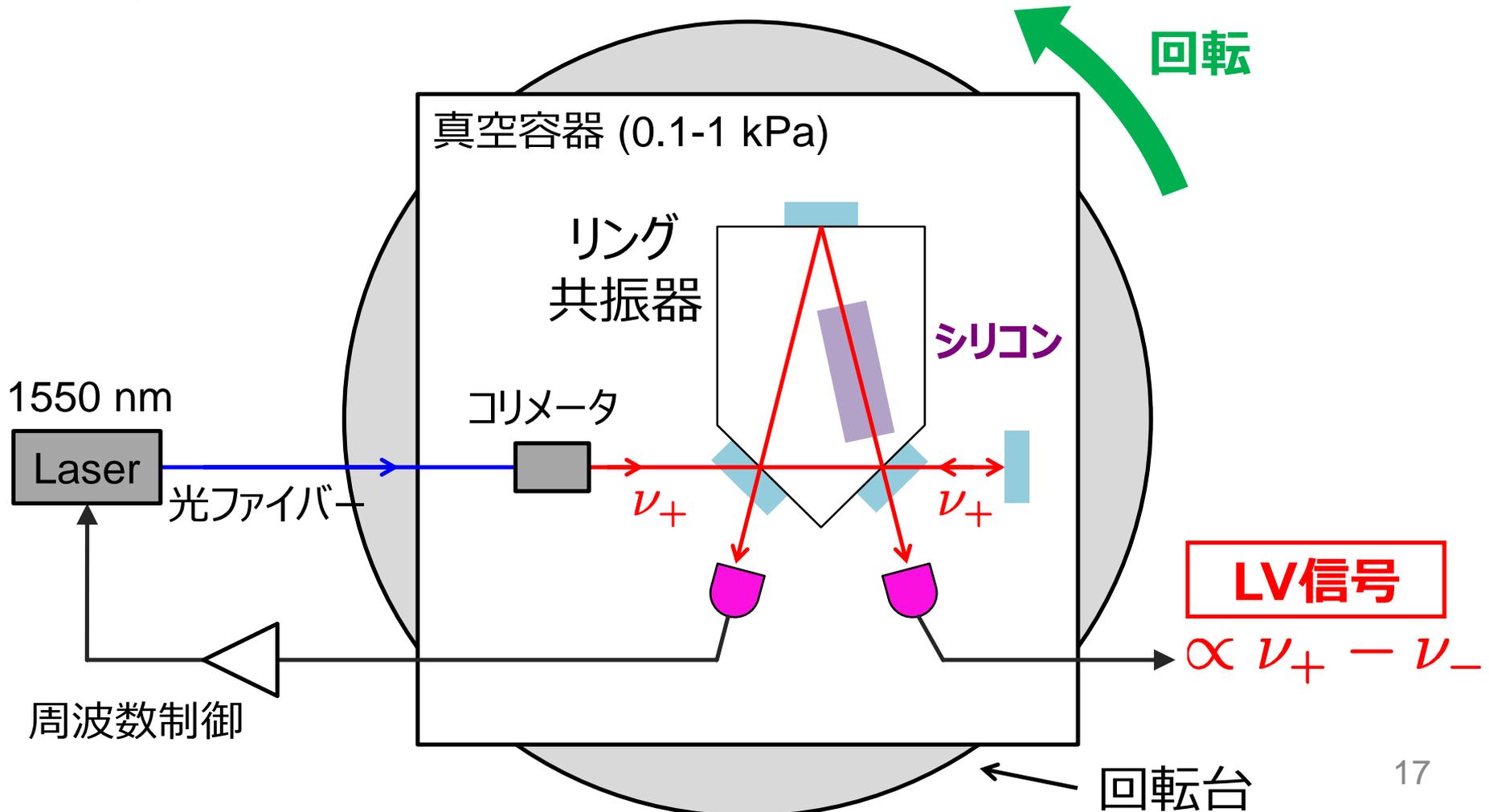
# 本実験装置の特徴

- 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  
M. E. Tobar+, Phys. Rev. D **71**, 025004 (2005)
- 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+, Phys. Rev. Lett. **108**, 260801 (2012)
- 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)
- 媒質として屈折率の大きいシリコンを使用
  - 異方性に対する感度がガラスに比べ約4倍
- 光共振器の回転中に連続データ取得
  - 高次の異方性に感度

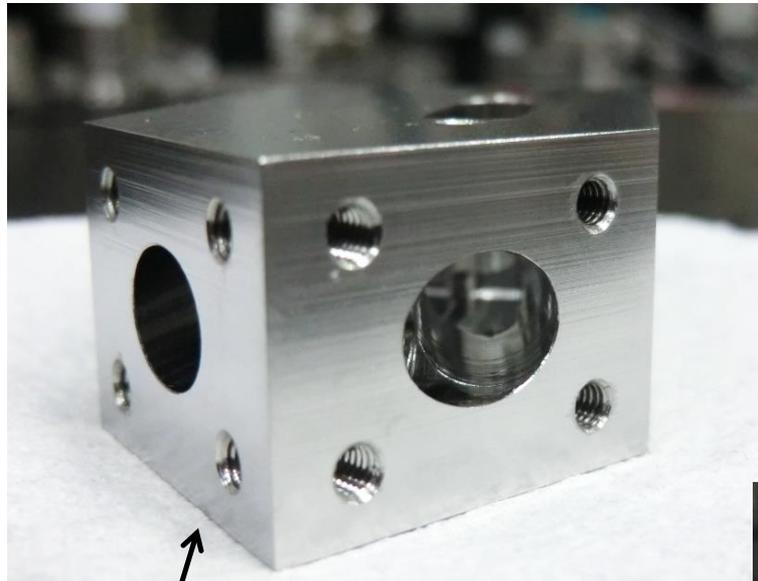


# 実験装置の概念図

- ダブルパス構成による共振周波数比較
- 装置回転によるLV信号の変調

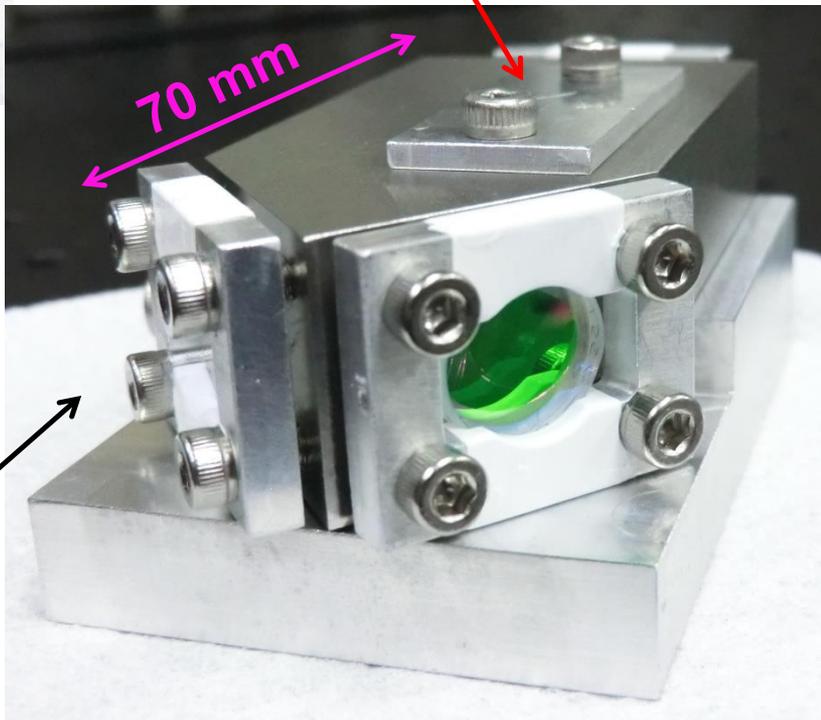


# リング共振器の写真

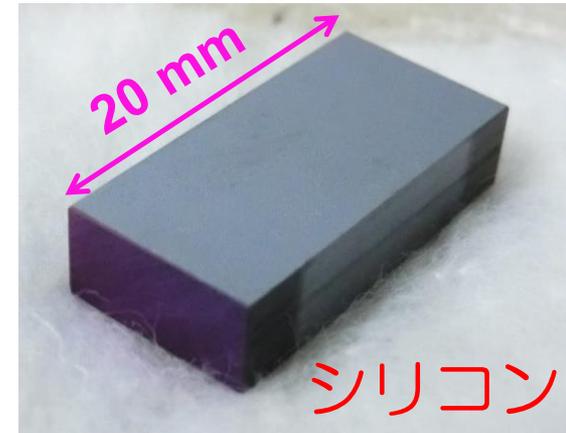


スペーサーは  
スーパーインバー製  
(低熱膨張合金  $10^{-7}/K$ )

鏡を取り付けた状態



この中にシリコン



シリコン  
(赤外光に  
対して透明  
 $n = 3.69$ )

# 光学系の写真

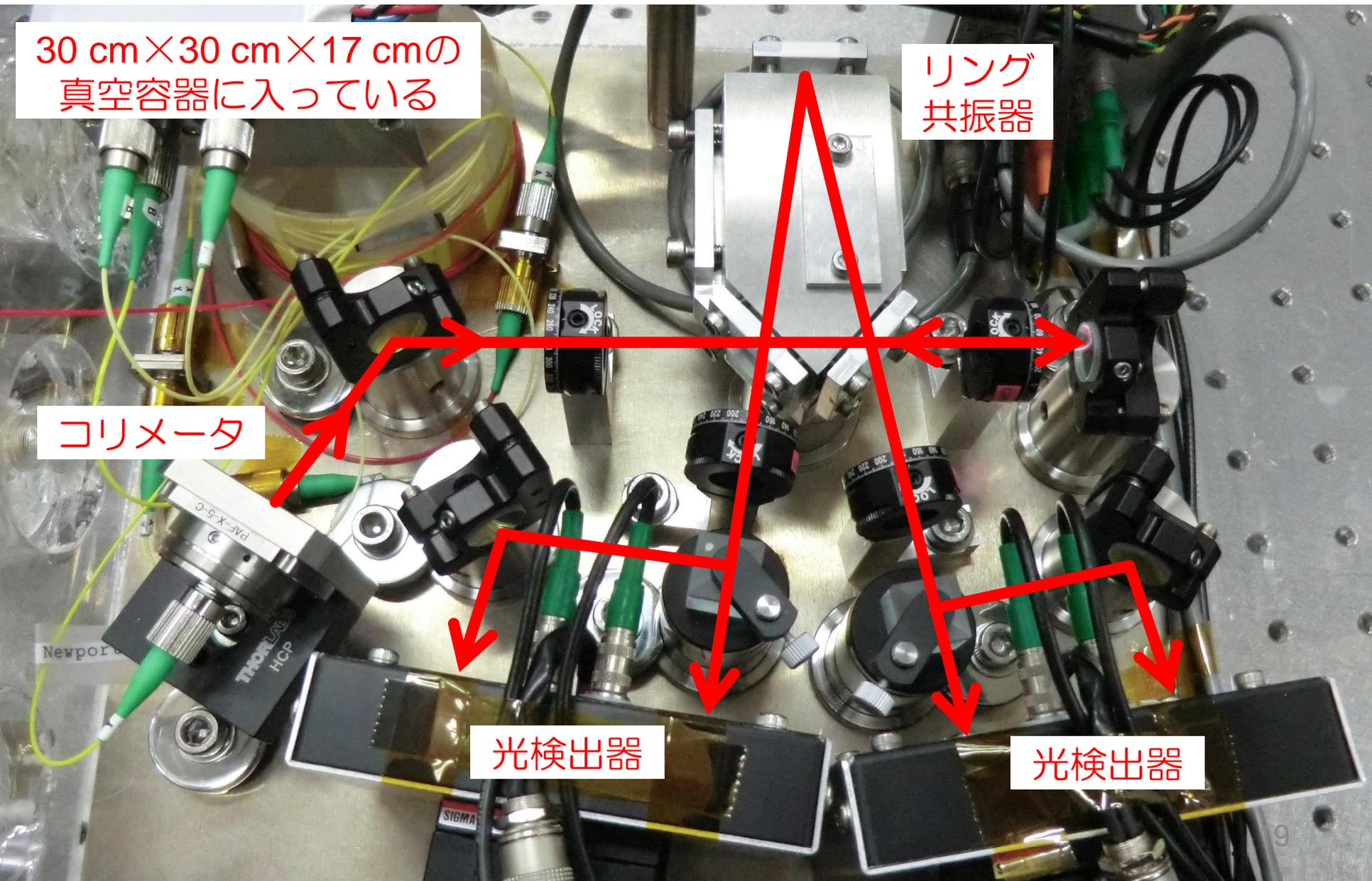
30 cm×30 cm×17 cmの  
真空容器に入っている

リング  
共振器

コリメータ

光検出器

光検出器



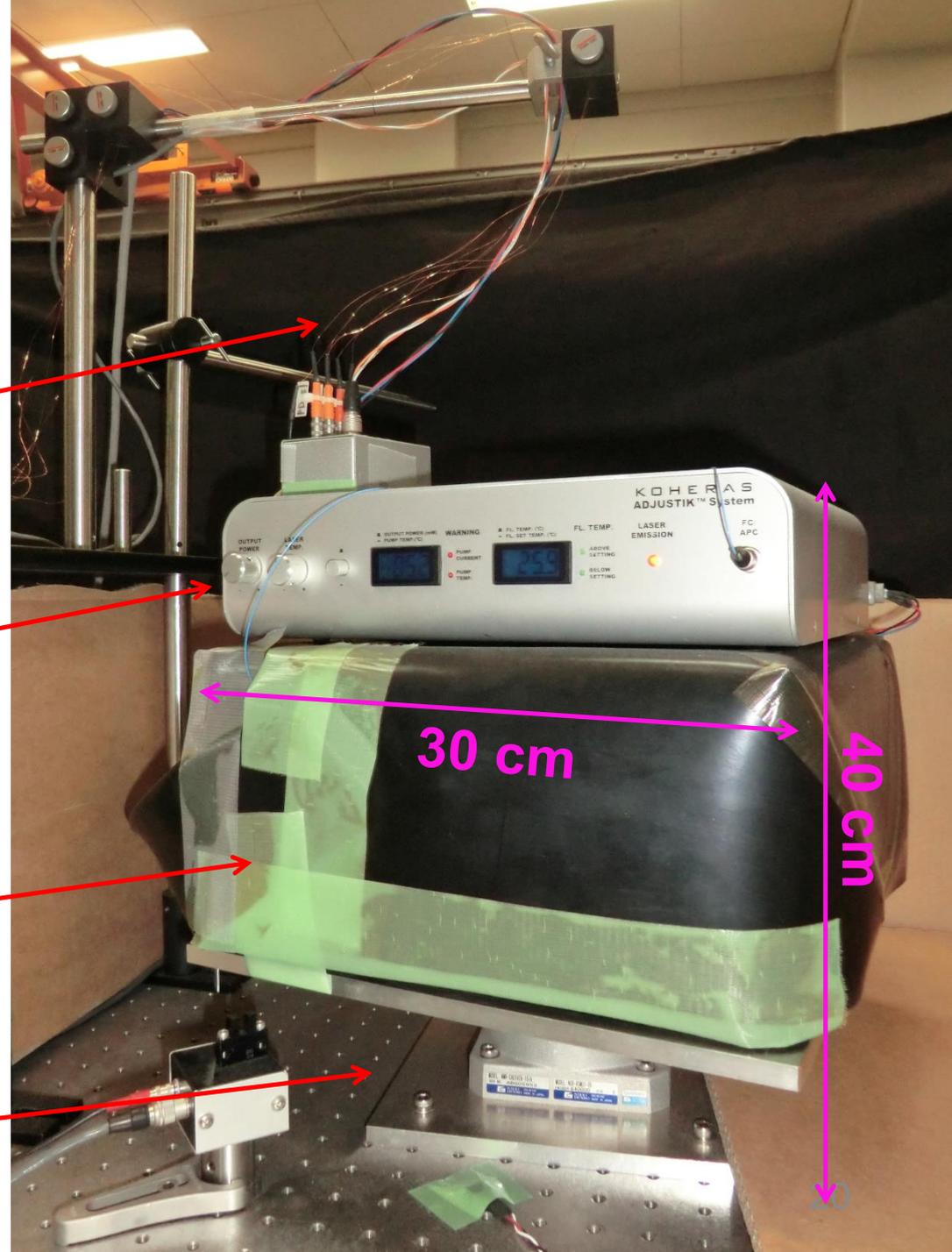
# 全体の写真

電気信号線  
(信号取得、電源供給)

レーザー光源  
(1550 nm)

真空容器+遮光シート  
(中に光学系)

回転台



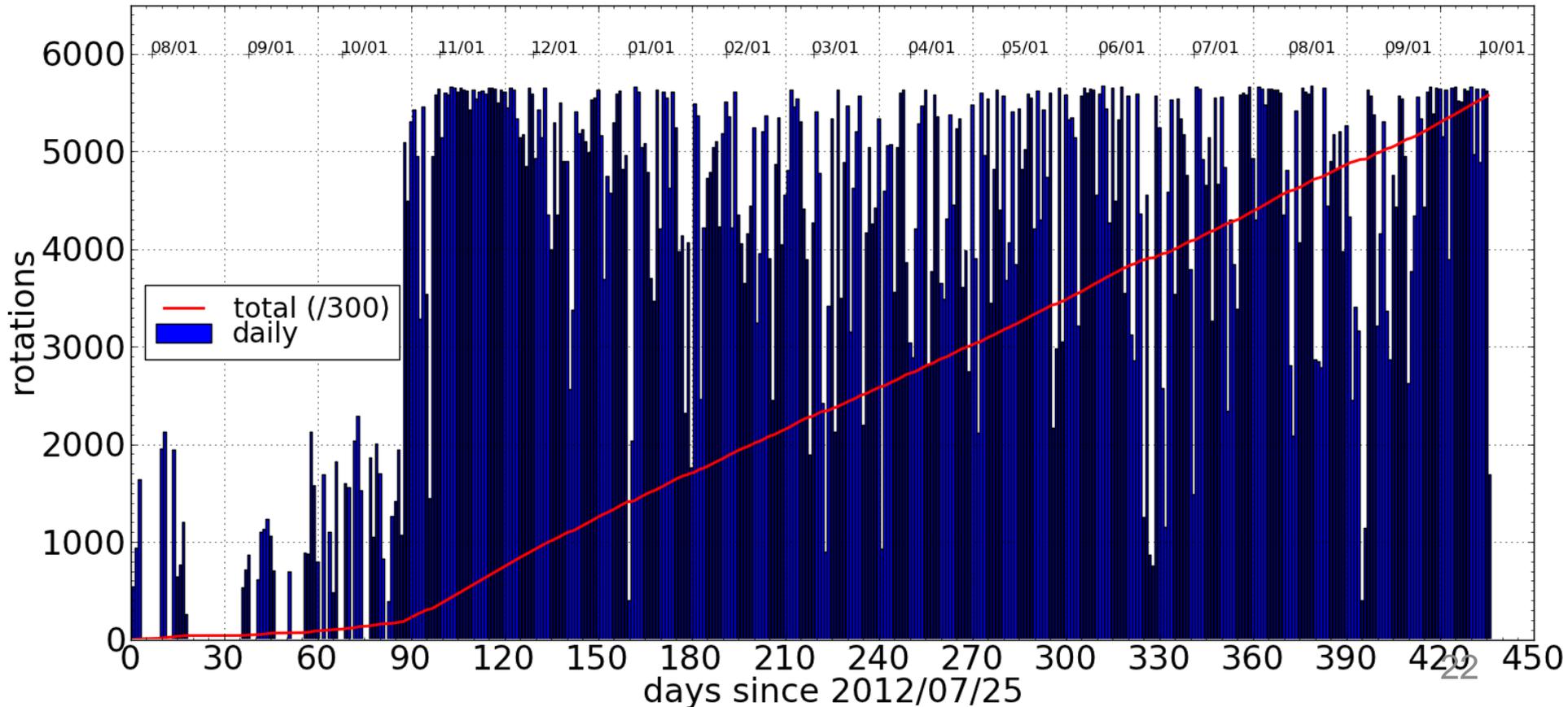
# 装置回転の動画

- 12秒で1回転、正回転と逆回転を繰り返す



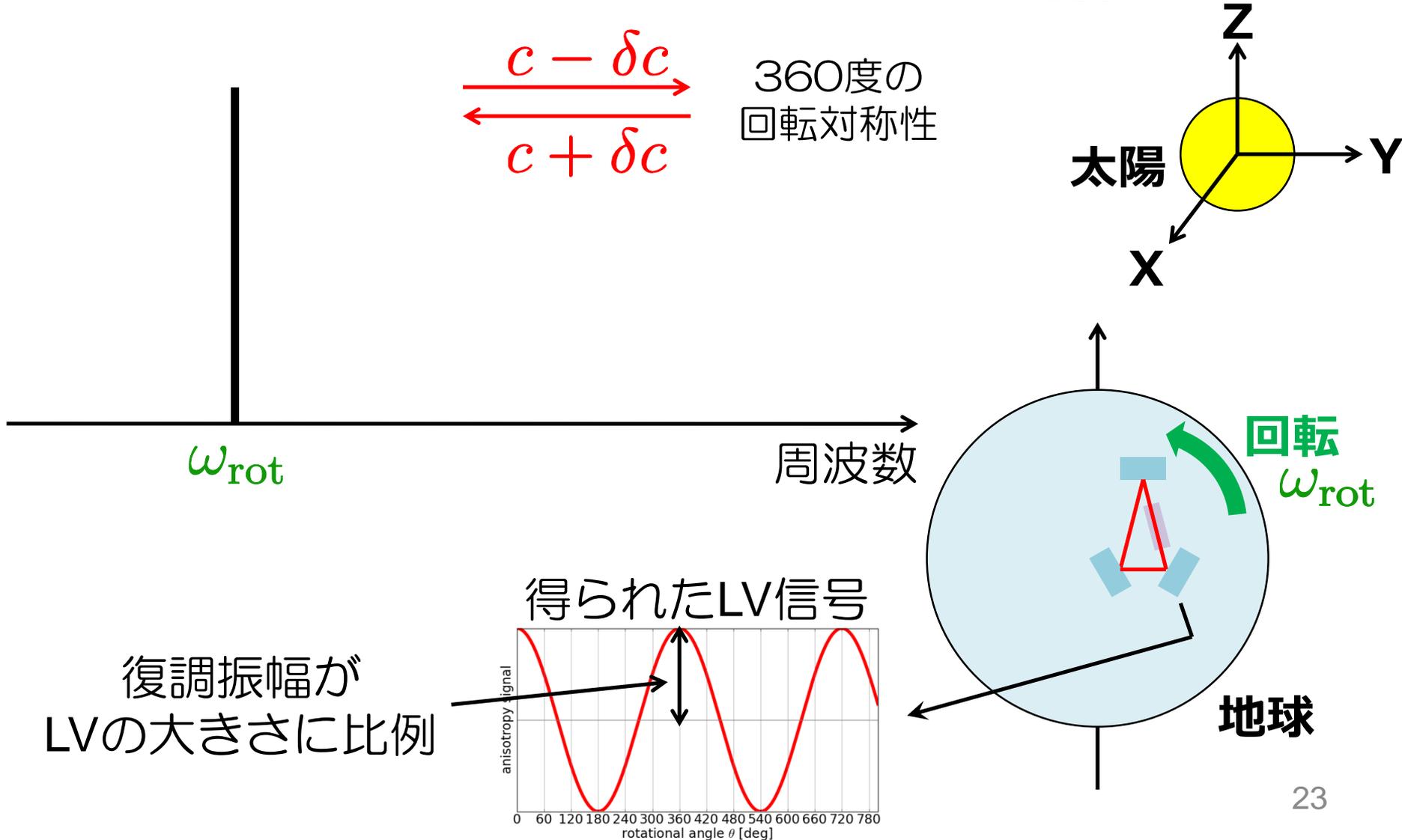
# 観測データ

- 東京大学(本郷)で2012年7月から2013年10月まで
- 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%)



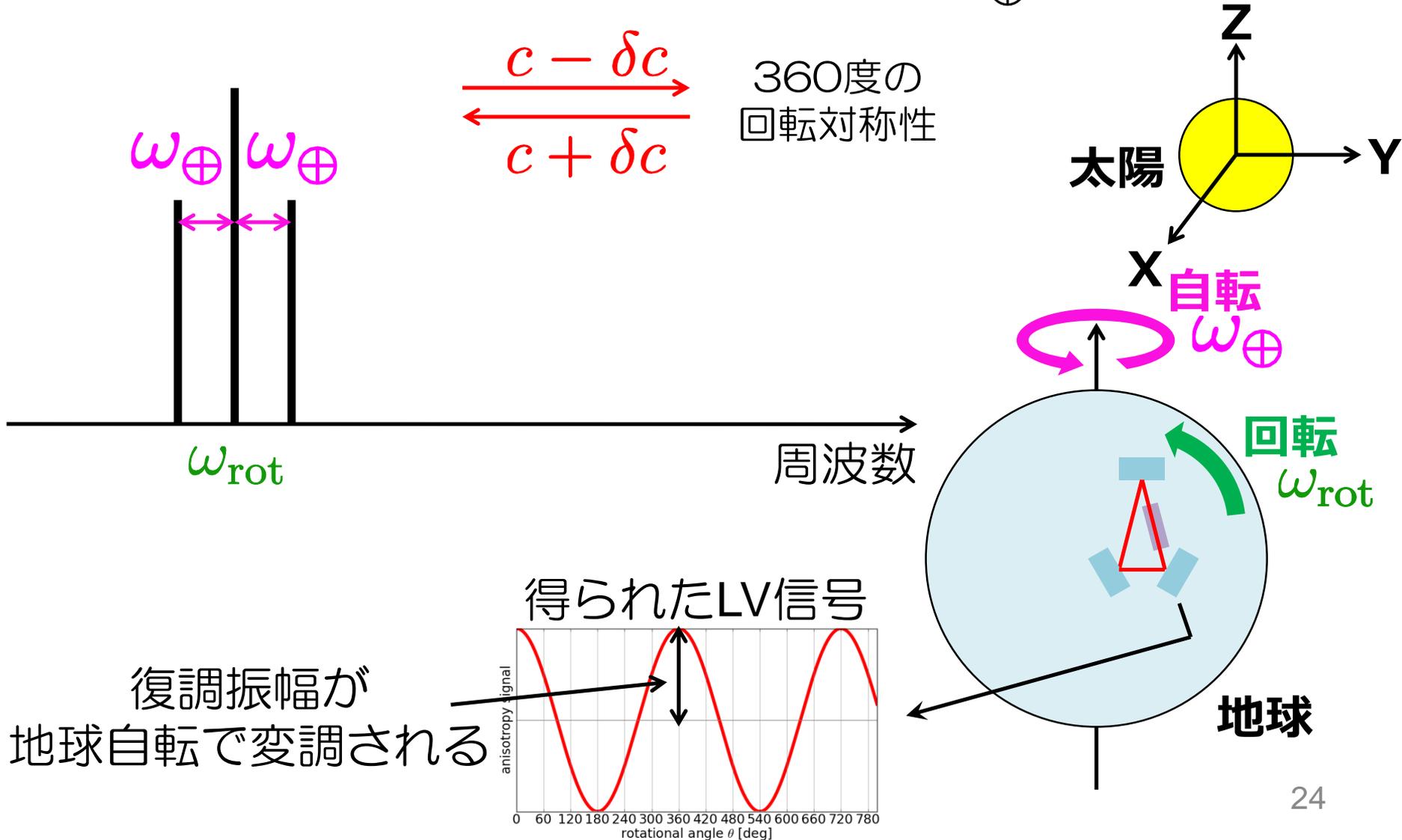
# データ解析方法

- まず1回転分のデータを回転周波数  $\omega_{rot}$  で復調



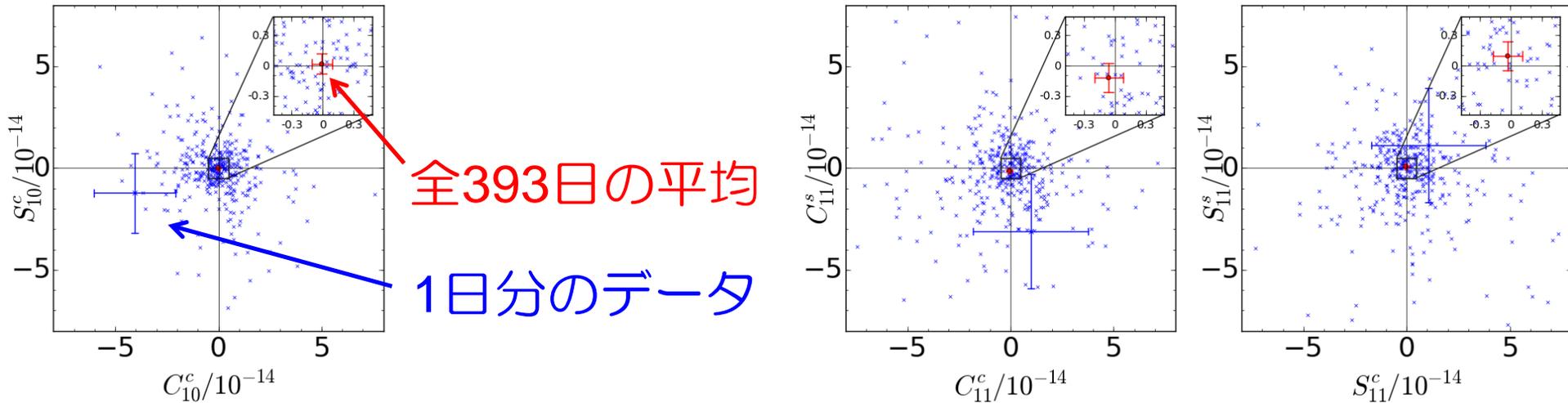
# データ解析方法

- 次に1日分のデータを自転周波数  $\omega_{\oplus}$  で復調



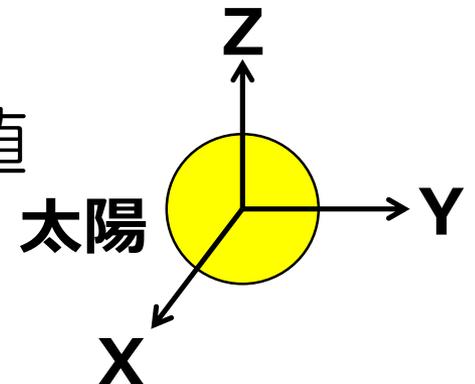
# 得られた復調振幅( $\omega_{\text{rot}}$ )

- $2\sigma$ でゼロと一致  
→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



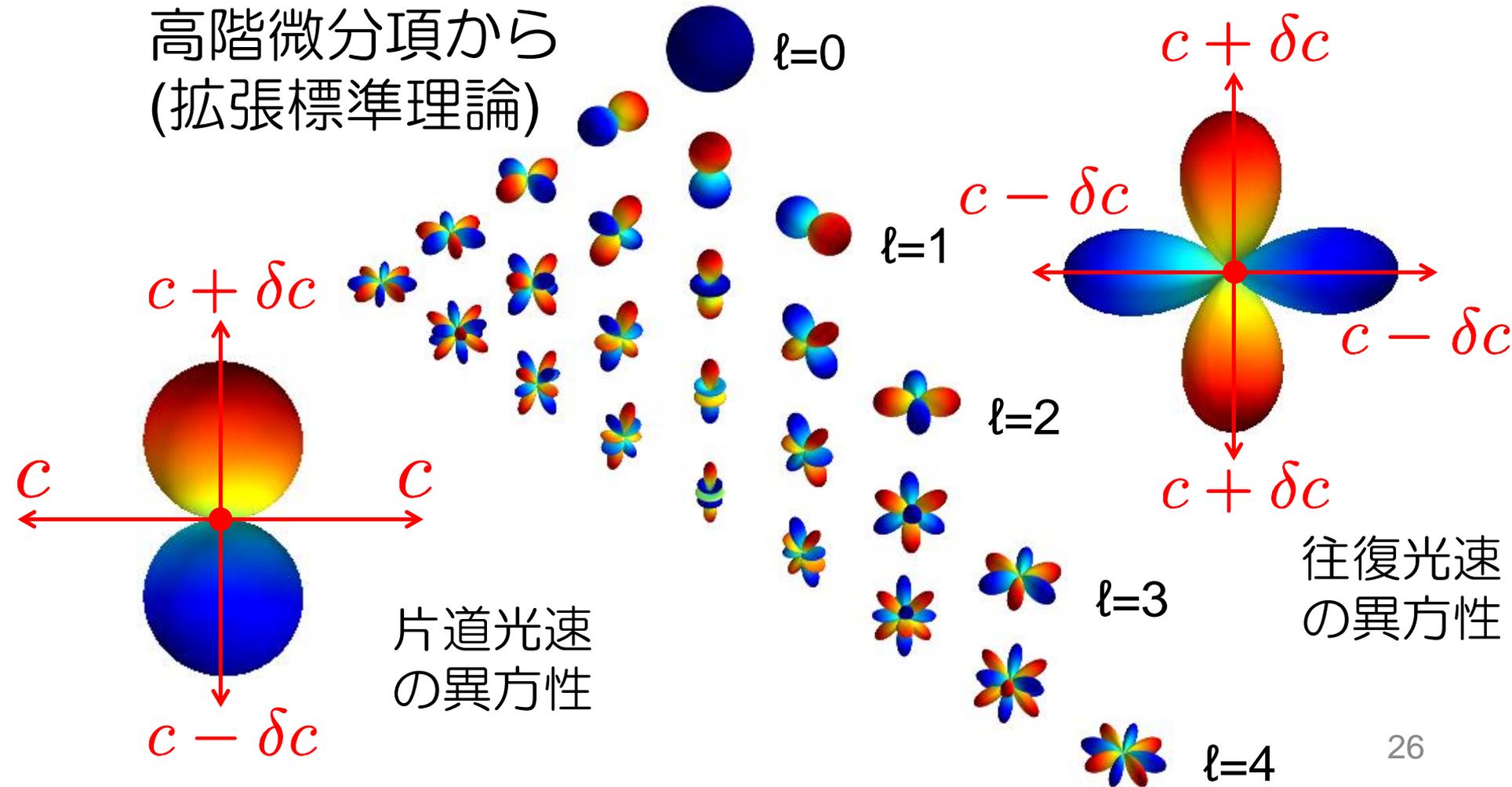
- 各成分に  $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 10^{-15}$  レベルの上限值

- これまでの上限値を**1桁以上更新**



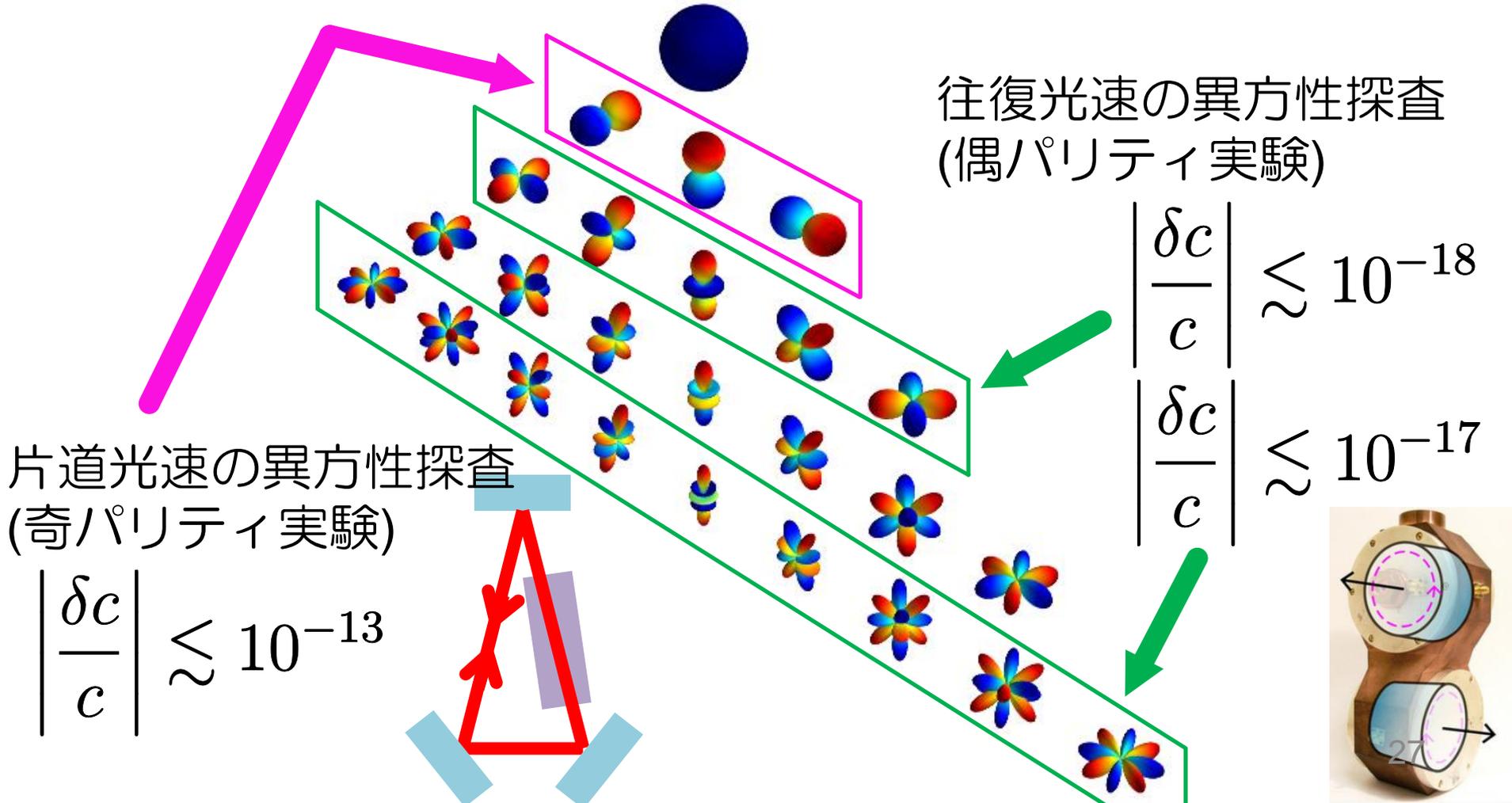
# 光速の高次の異方性

- 光速の異方性は球面調和関数展開できる
- 高次の異方性はLagrangianのLorentz不変性を破る  
高階微分項から  
(拡張標準理論)



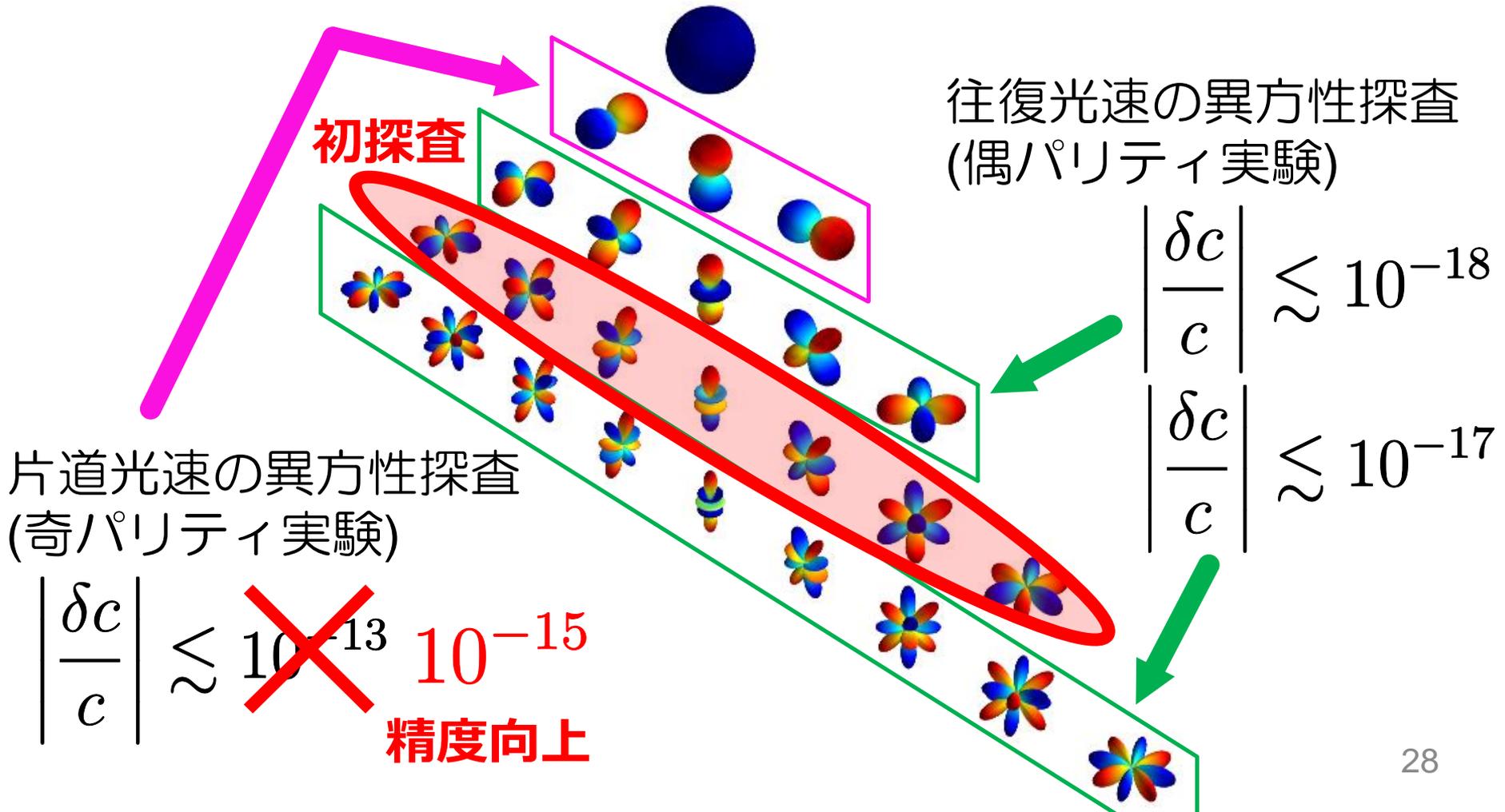
# これまでの上限値

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



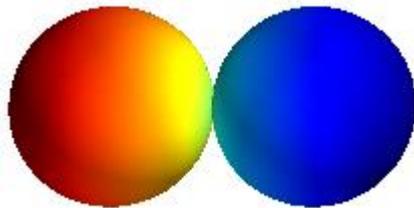
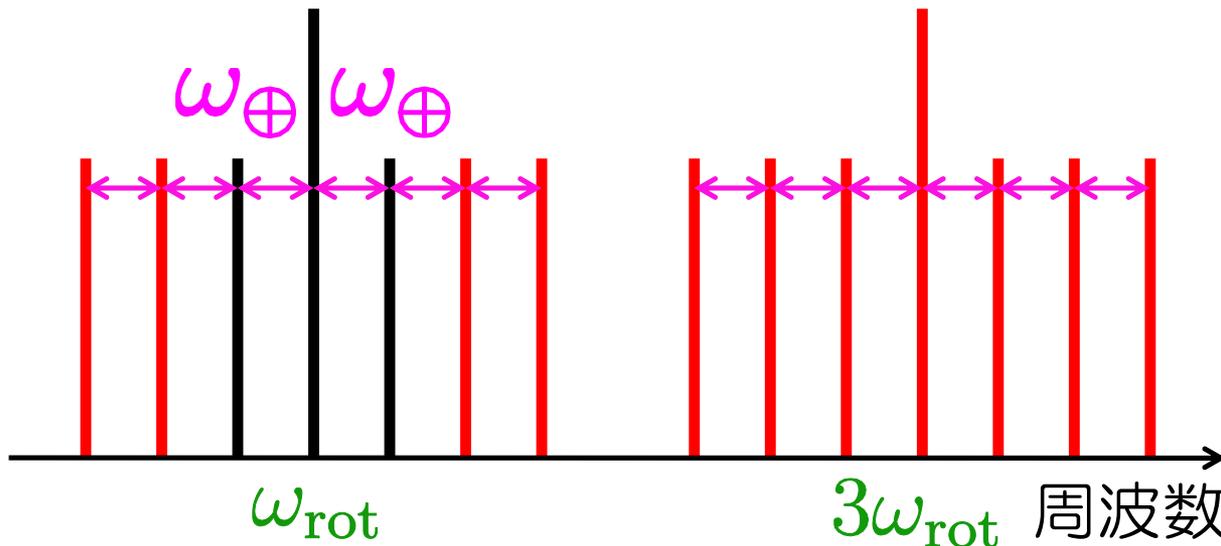
# 本研究では

- 片道光速の異方性探査の精度向上
- $l = 3$  (六重極成分)の異方性の初探査

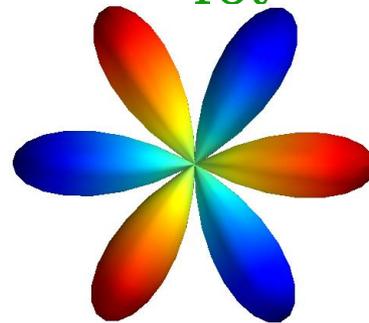


# 高次のデータ解析方法

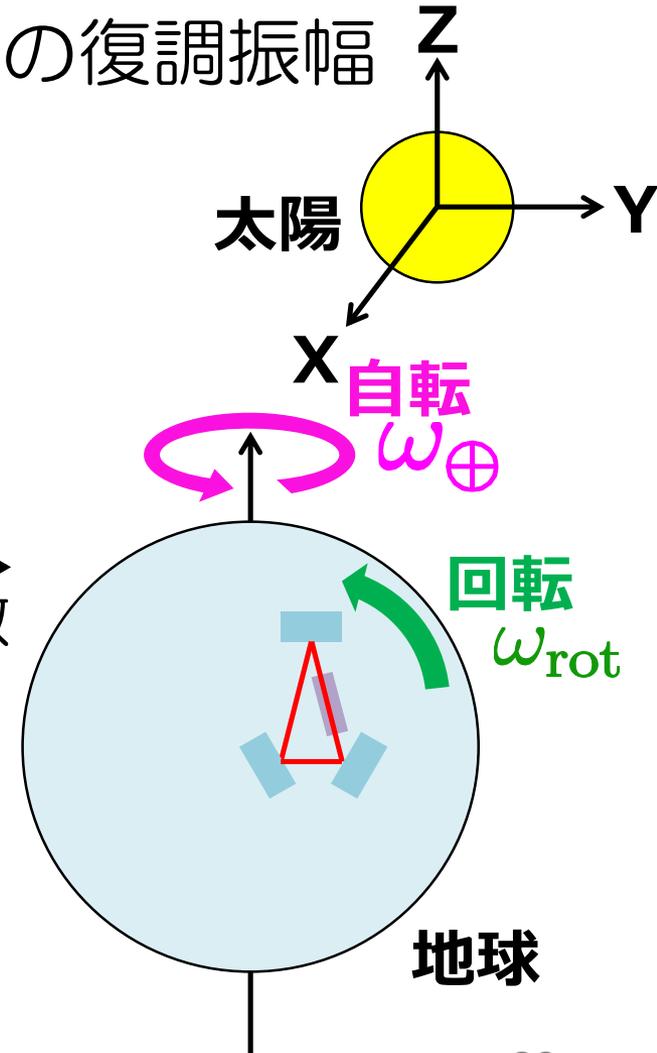
- 六重極成分は高調波に出てくる  
→ sin成分とcos成分合計28個の復調振幅



360度の  
回転対称性

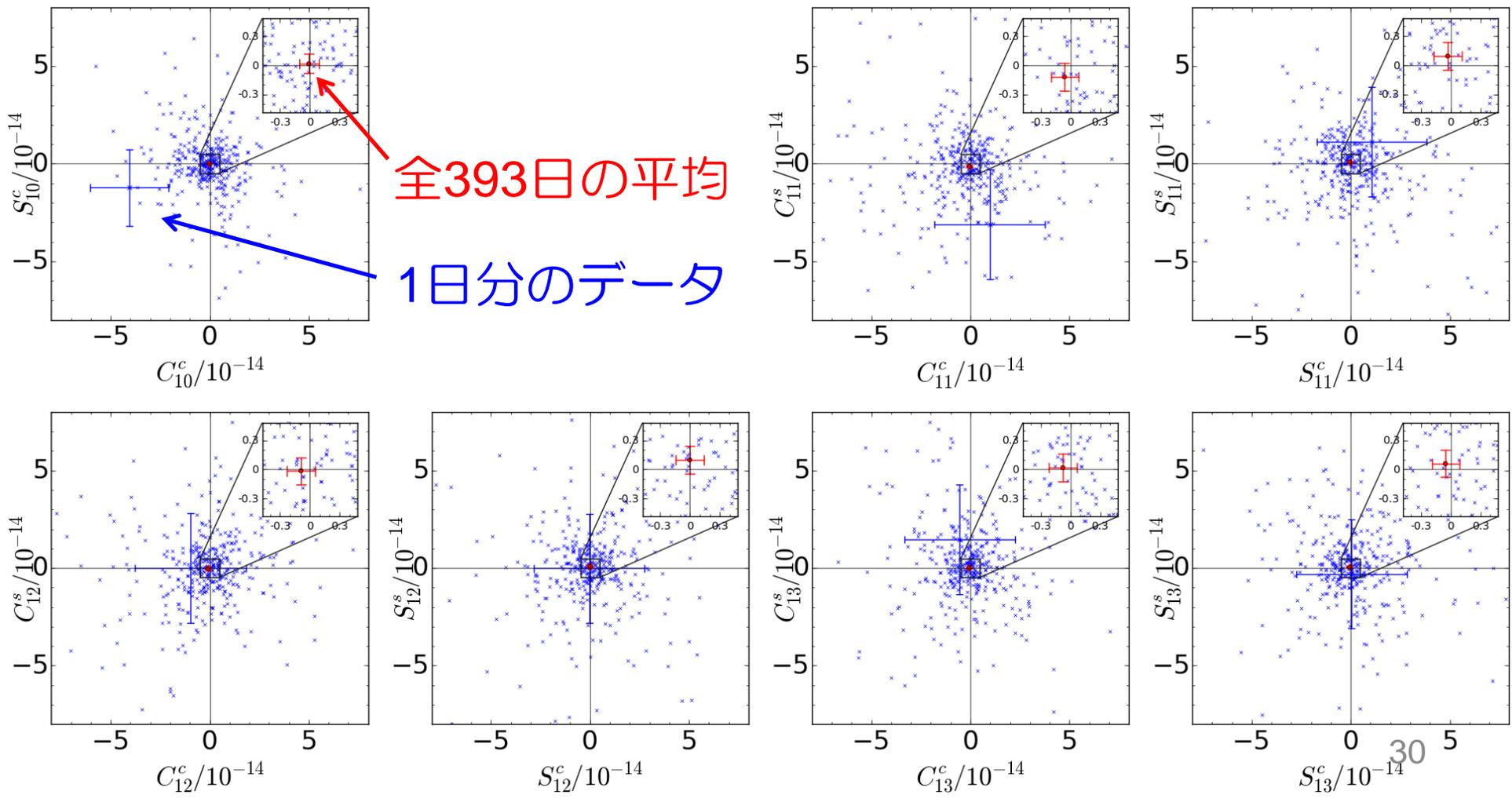


120度の  
回転対称性



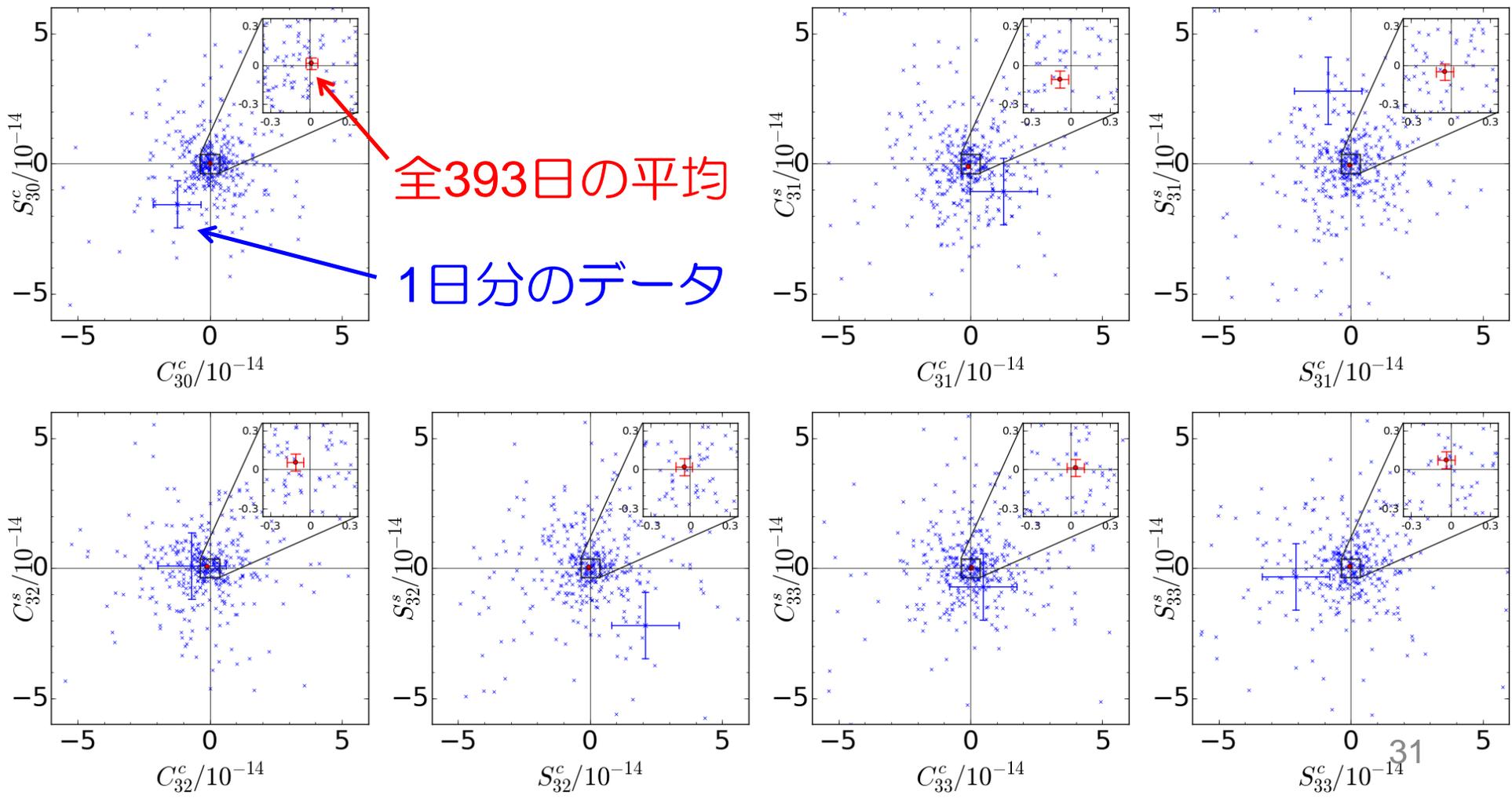
# 得られた復調振幅( $\omega_{\text{rot}}$ )

- $2\sigma$ でゼロと一致  
→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



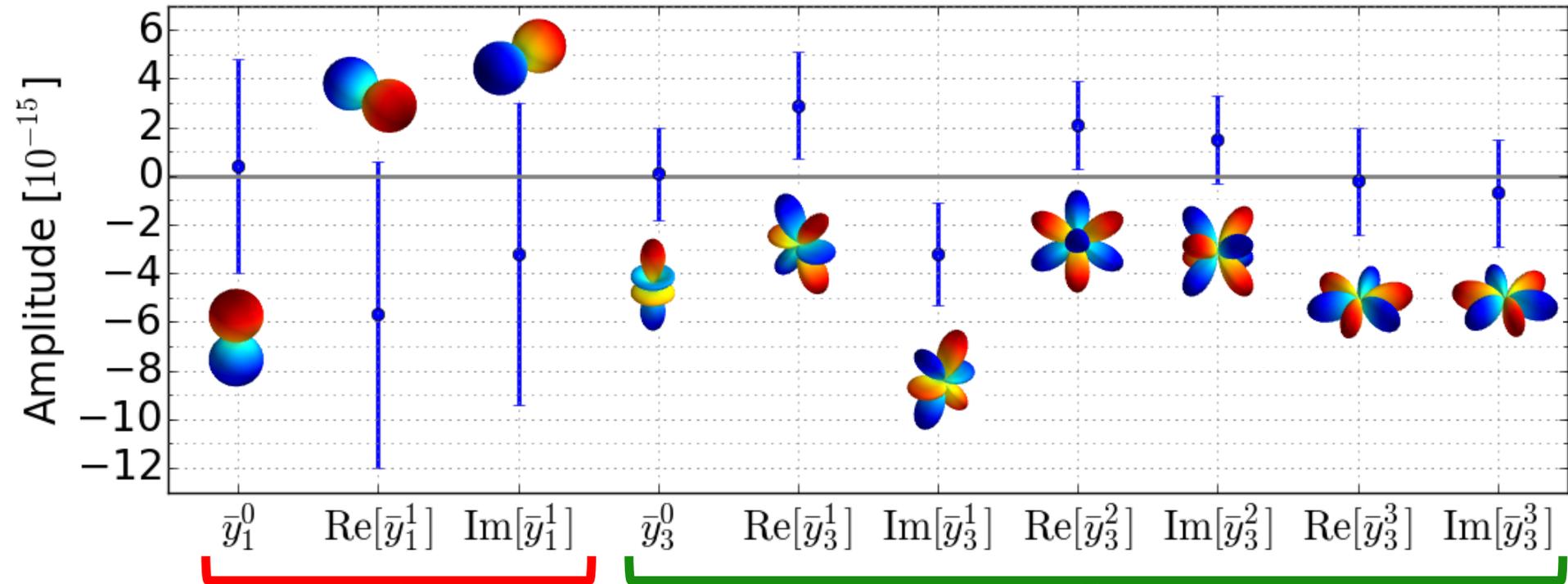
# 得られた復調振幅( $3\omega_{\text{rot}}$ )

- $2\sigma$ でゼロと一致  
→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



# 球面調和関数の各成分の測定値

- $1\sigma$ の統計的不確かさを表示
- $2\sigma$ でゼロと一致  $\rightarrow$  Lorentz不変性を検証



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

(世界新)

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

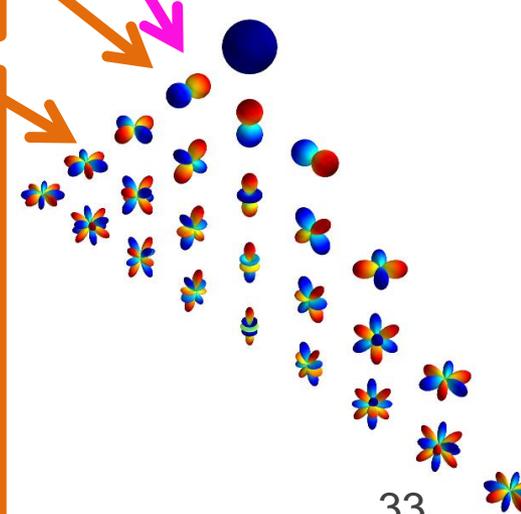
(世界初)

# 拡張標準理論の高次LVへの上限值

- 拡張標準理論 (SME: standard model extension)  
D. Colladay & V. A. Kostelecký, PRD **58**, 116002 (1998)

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

$$(\bar{c}_F^{(d)})_{njm}^{(0E)}$$



# まとめ

- 光リング共振器により光速の行き帰りの差を探索  
シリコンによる大きな非対称性  
ダブルパス構成によるnull測定  
回転させながら1年間に渡るデータ取得

- 有意な異方性は見つからず、上限値をつけた  
双極子成分(世界新)      六重極成分(世界初)

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

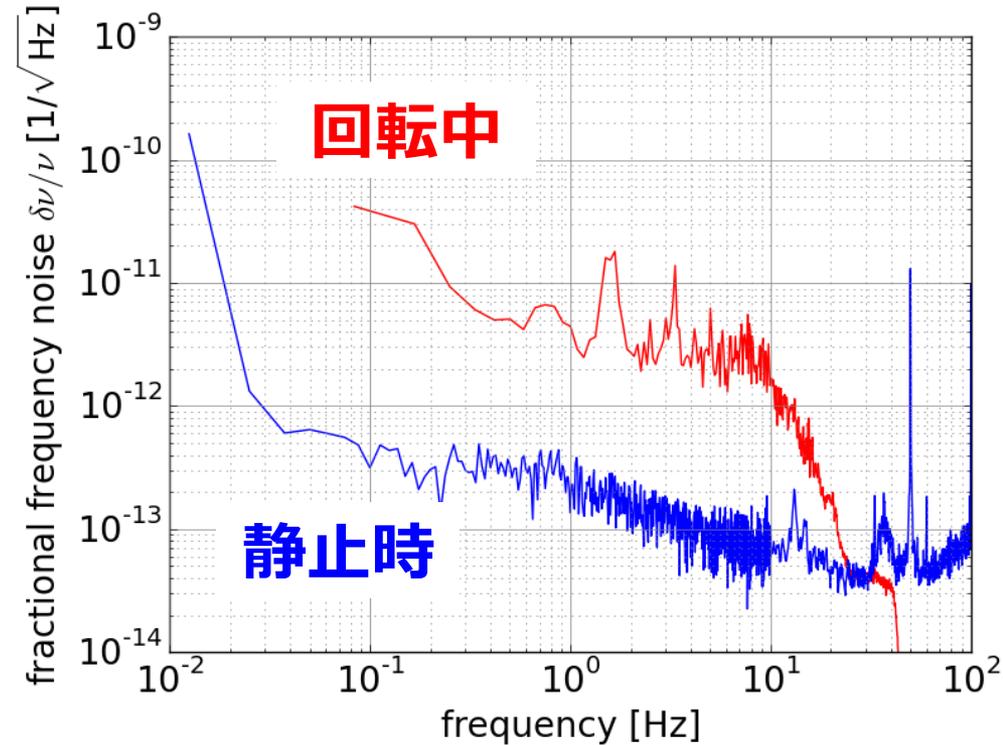
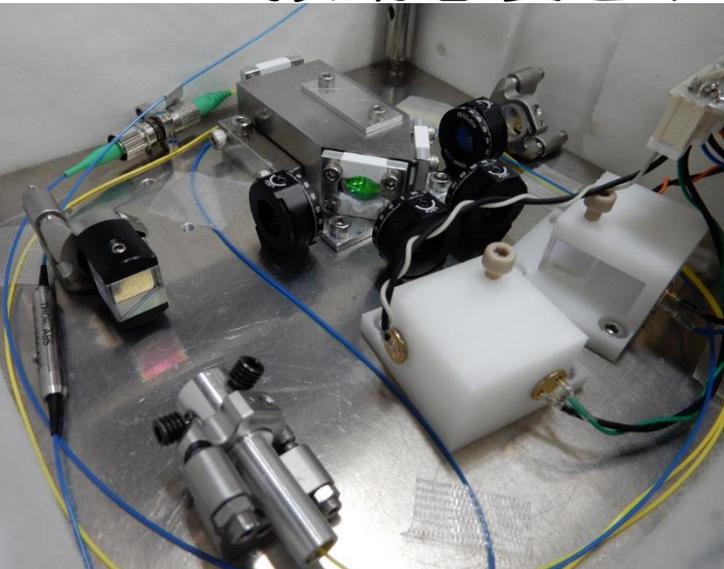
$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 2 \times 10^{-15}$$

- 拡張標準理論の高次のLorentz不変性破れのうち奇  
パリティ成分に初の上限值

$$(\bar{c}_F^{(6)})_{njm}^{(0E)} \lesssim 1 \times 10^3 \text{ GeV}^{-2} \quad (\bar{c}_F^{(8)})_{njm}^{(0E)} \lesssim 2 \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$$

# 今後の展望

- 現在の精度は回転に伴う振動で制限されている
- 光学系のセミモノリシック化で振動感度を下げる



- 連続回転により回転安定度向上、周波数分解能向上をはかる
- 2桁の精度向上を目指す



# 高次のLorentz不変性の破れ

- 拡張標準理論 (SME: standard model extension)  
可能な限りのLVをパラメータ化した検証理論  
D. Colladay & V. A. Kostelecký, PRD **58**, 116002 (1998)
- 電磁場のLagrangianにLV項を無限に追加
- $\hat{k}_F^{(d)}$  はLVがなければゼロ、 $d$  は質量次元を表す

高次LVまで考えたSME

minimal SME  
 SM

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

↑

4次のLV項

質量次元 4  
無次元

↑

6次のLV項

質量次元 6  
+2階の微分  
M<sup>-2</sup> の次元

↑

8次のLV項

質量次元 8  
+4階の微分  
M<sup>-4</sup> の次元

# 高次LVと光速の異方性

- 高次LVから多重極成分が出てくる

高次LVまで考えたSME

minimal SME

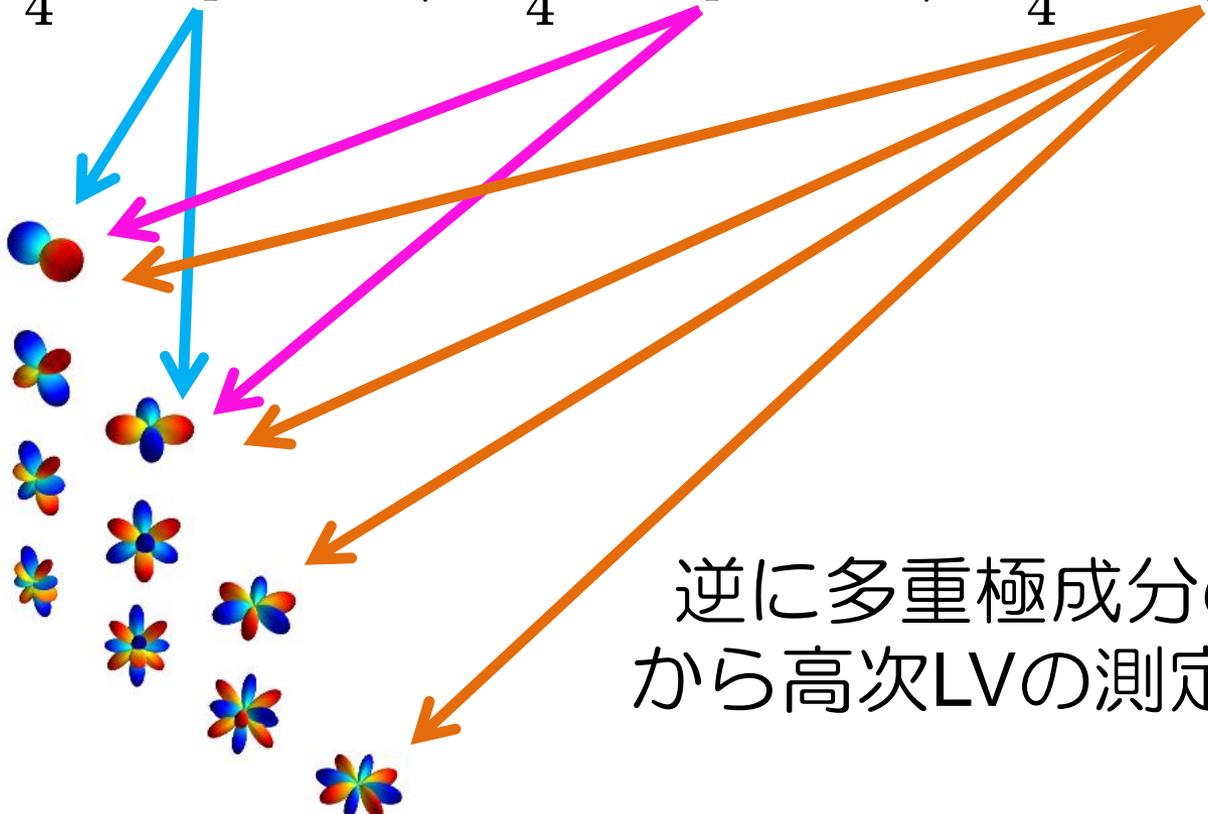
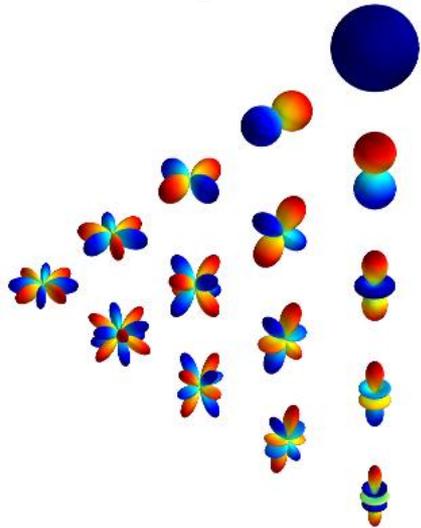
SM

4次のLV項

6次のLV項

8次のLV項

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



逆に多重極成分の測定から高次LVの測定が可能

# Cheat Sheet

- rotation frequency  $f_{\text{rot}} = 0.083$  Hz  
( $T_{\text{rot}} = 12$  sec)
- wavelength  $\lambda = 1550$  nm
- laser frequency  $\nu = 1.9e14$  Hz
- input power  $P_0 = 1$  mW
- finesse  $F = 120$
- cavity length  $L = 140$  mm
- silicon length  $d = 20$  mm
- silicon refractive index  $n = 3.69$
- silicon  $dn/dT = 2e-4$  /K
- silicon thermal expansion =  $3e-6$  /K
- Super Invar thermal exp. =  $\sim 1e-7$  /K
- silicon AR loss  $I < 0.5$  % / surface
- incident angle  $\theta = 9.5$  deg
- FSR = 1.5 GHz
- FWHM = 12 MHz
- current sensitivity  $\sim 6e-13$  /rtHz  
( $\sim 4e-11$  /rtHz when rotated)
- shot noise  $\sim 6e-16$  /rtHz
- thermal noise  $\sim 8e-16$  /rtHz  
(all @ 0.1 Hz)
- Sun speed in CMBR = 369 km/s
- orbital speed of Earth = 30 km/s
- rotational speed of Earth = 0.4 km/s
- History
  - Jul 2011: idea
  - Nov 2011: first run (10hour)
  - Jul 2012: data taking started
  - Oct 2012: continuous data taking
  - Oct 2013: shut down
- cost  $< \sim 200$ 万円