

博士論文

光リング共振器を用いた
ローレンツ不変性の検証
(Tests of Lorentz Invariance
with an Optical Ring Cavity)

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

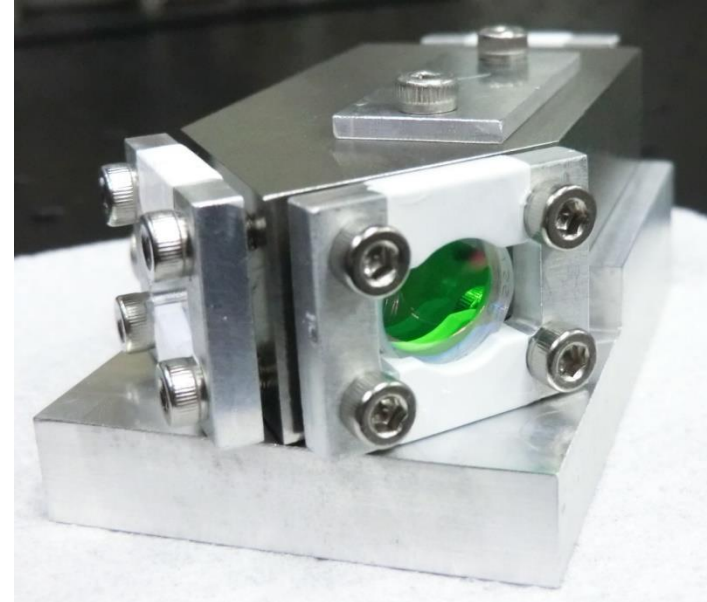
概要

- 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

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{c + \delta c} \\ \xleftarrow{c - \delta c} \end{array}$$



出版論文

- Y. Michimura, N. Matsumoto, N. Ohmae, W. Kokuyama, Y. Aso, M. Ando, K. Tsubono,
Phys. Rev. Lett. **110**, 200401 (2013)
New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity
- Y. Michimura, M. Mewes, N. Matsumoto, Y. Aso, M. Ando,
Phys. Rev. D **88**, 111101(R) (2013)
Optical cavity limits on higher order Lorentz violation
- Y. Michimura, N. Matsumoto, N. Ohmae, W. Kokuyama, Y. Aso, M. Ando, K. Tsubono,
Proceedings of the Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry, edited by V. A. Kostelecký, pp.216-219 (World Scientific, Singapore, 2014)
Testing Lorentz Invariance with a Double-Pass Optical Ring Cavity

目次

1. 研究背景
動機、光速異方性探査の先行研究
2. 測定原理
原理、目標感度
3. 実験装置
リング共振器、回転機構、データ取得
4. データ解析
異方性の球面調和関数展開、拡張標準理論、
解析方法、解析結果
5. 結論
まとめ、今後の展望

1. 研究背景

特殊相対性理論

- 2つの原理

- 光速不変の原理

- 光速は伝播方向、

- 光源の速度によらない

- 特殊相対性原理

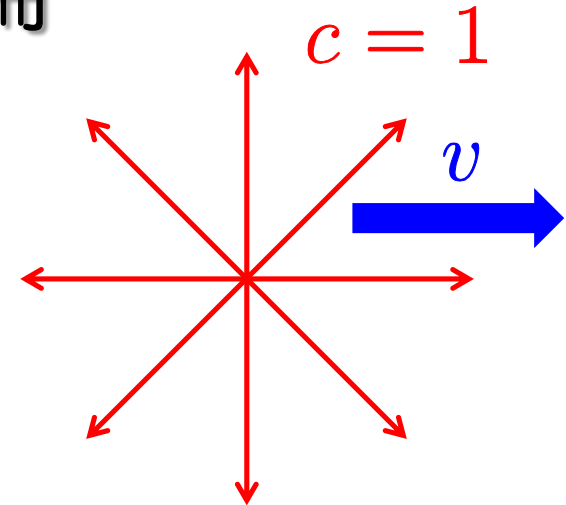
- どの慣性系においても物理法則は不変

- 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

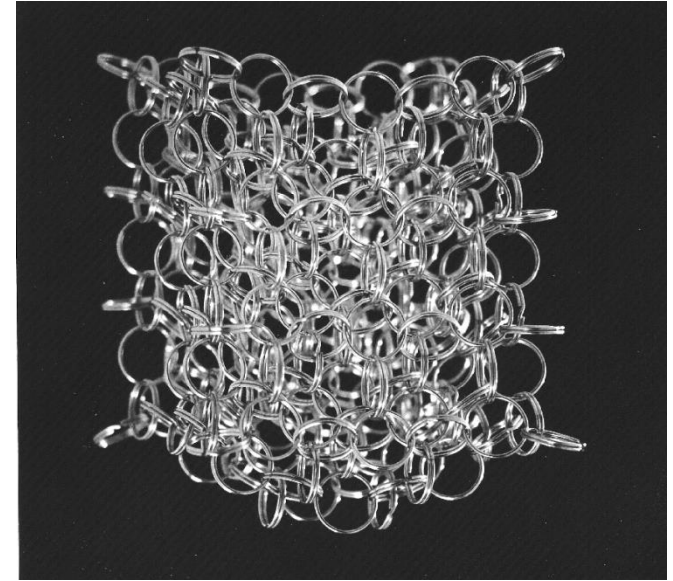
- 一度も「破れ」は見つかっていない

→全ての物理学の基礎



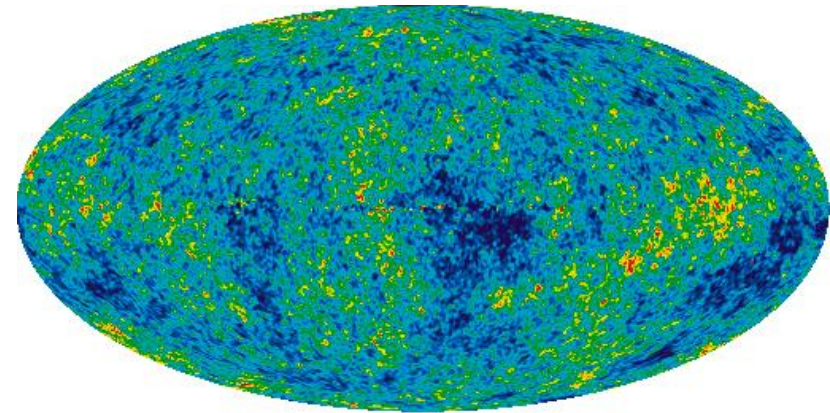
Lorentz不変性の破れ

- 量子重力理論からの示唆
あるスケールで、Lorentz
不変性が破れている可能性
例えば、 $\delta c/c \sim 10^{-17}$ の
オーダーで



http://www.cpt.univ-mrs.fr/~rovelli/loop_quantum_gravity.jpg

- CMBの観測からの示唆
絶対静止系がある可能性
(異方性の双極子成分が
ゼロになるCMB静止系)



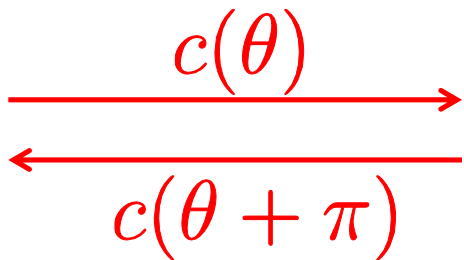
http://en.wikipedia.org/wiki/File:WMAP_2010.png

→ 実験的な検証が必要

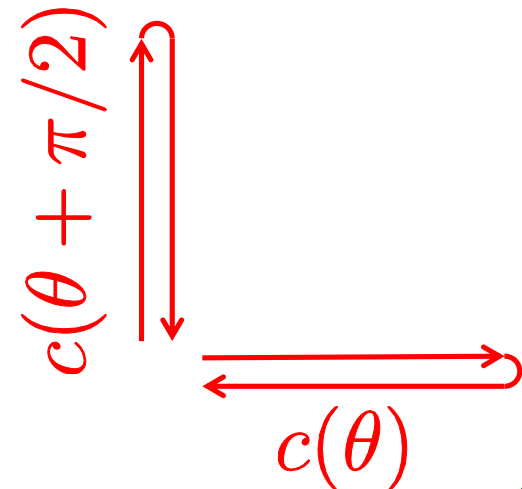
特殊相対論の検証

- 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)

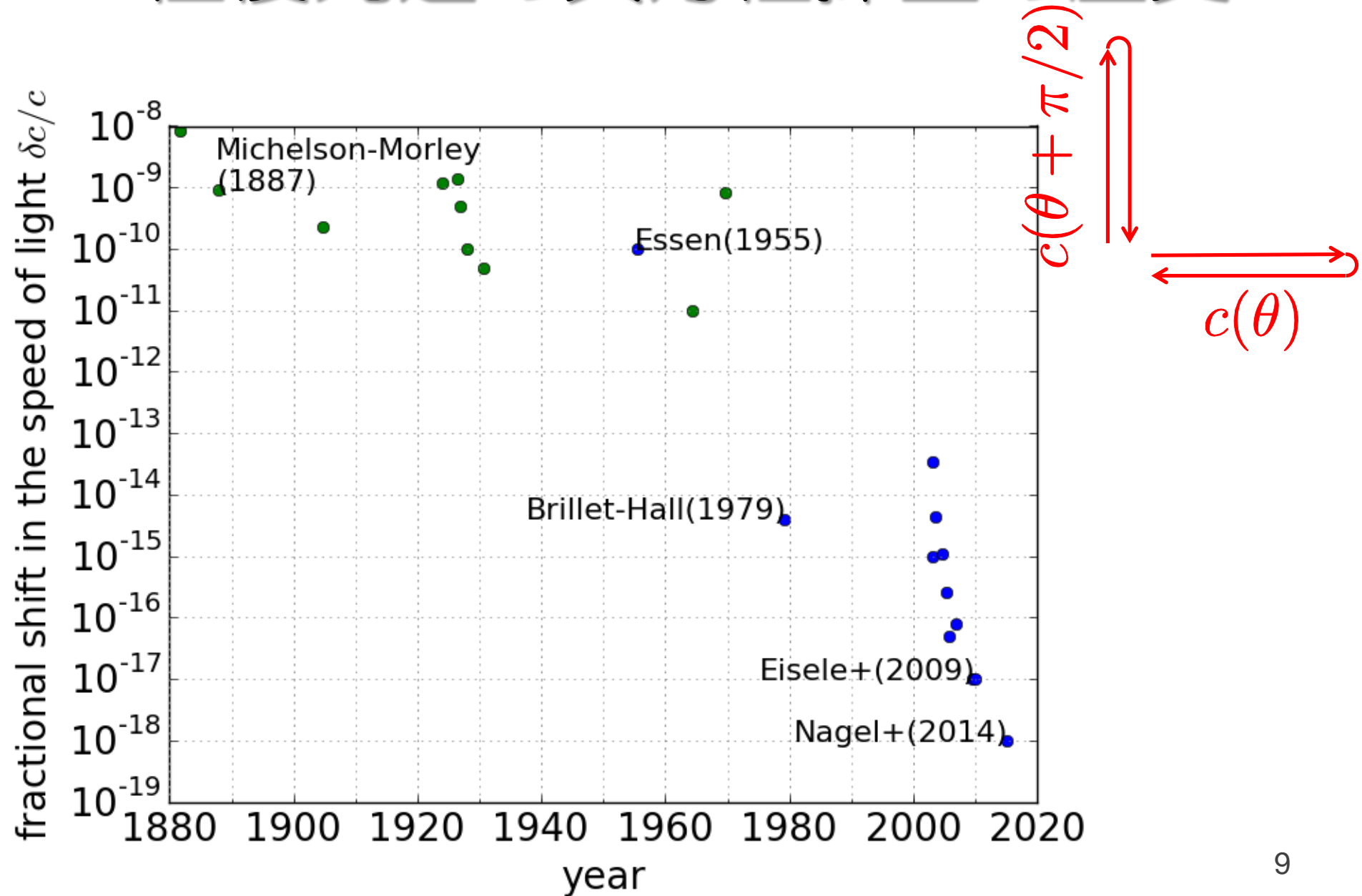
片道光速の等方性
(odd-parity)



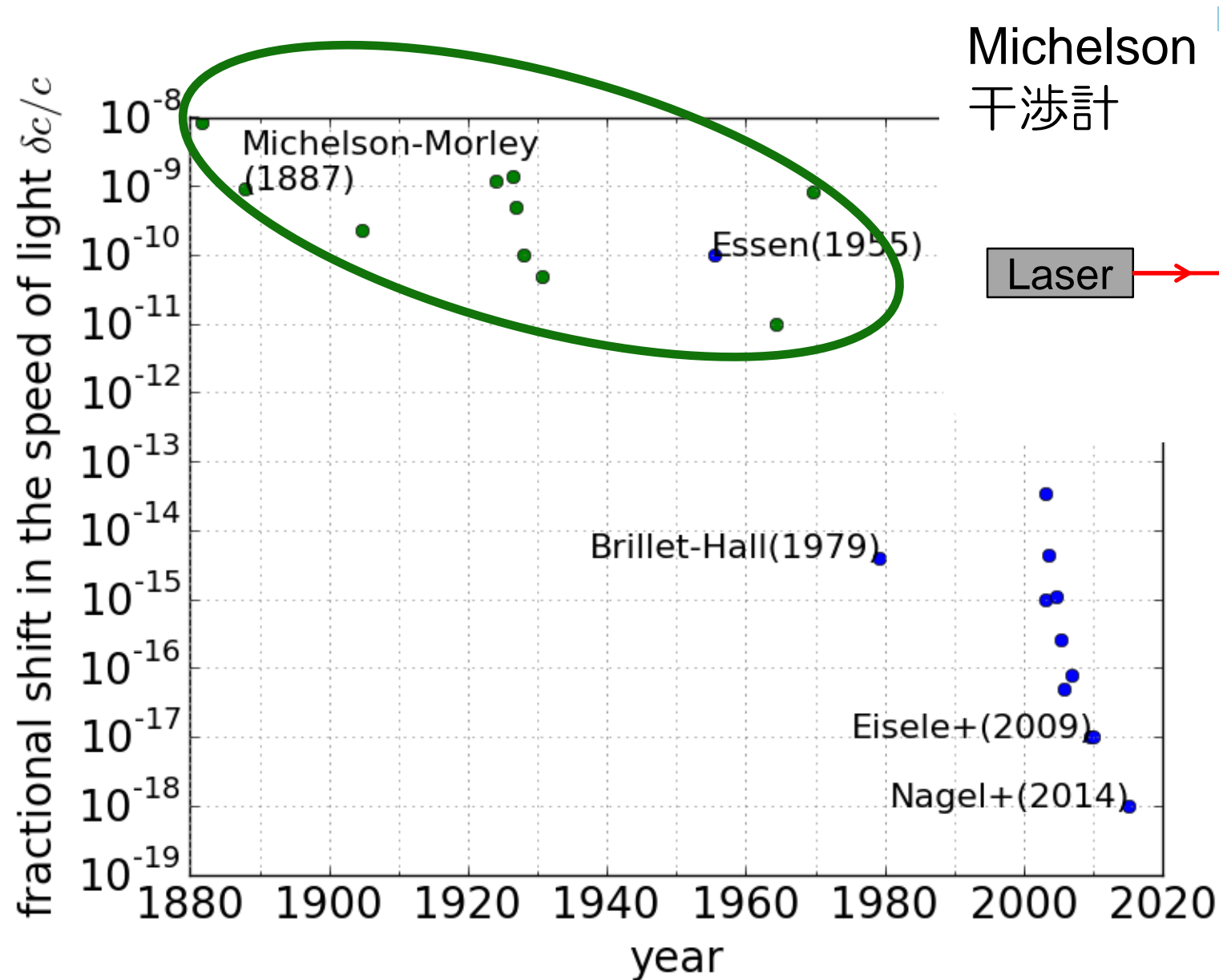
往復光速の等方性
(even-parity)



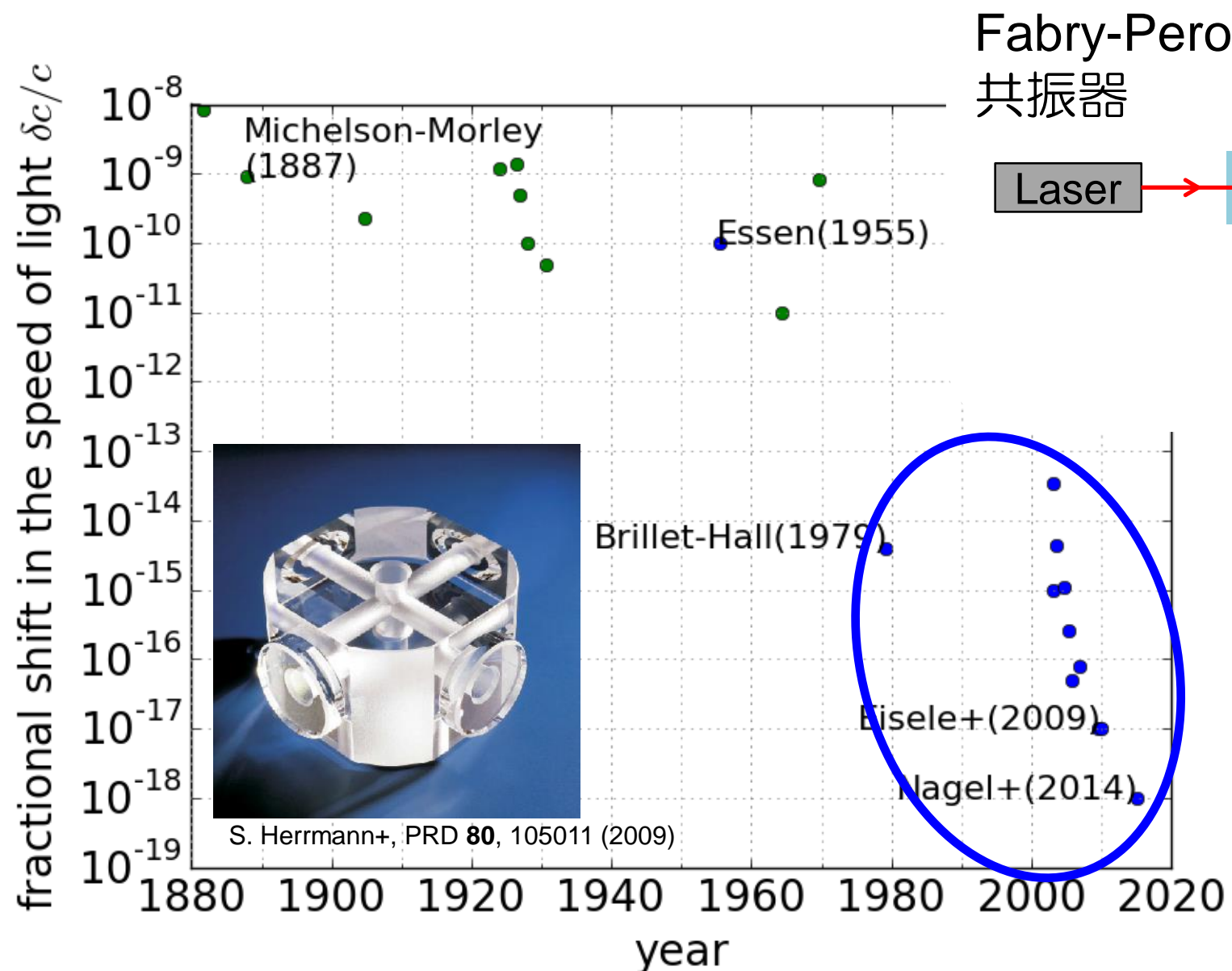
往復光速の異方性探査の歴史



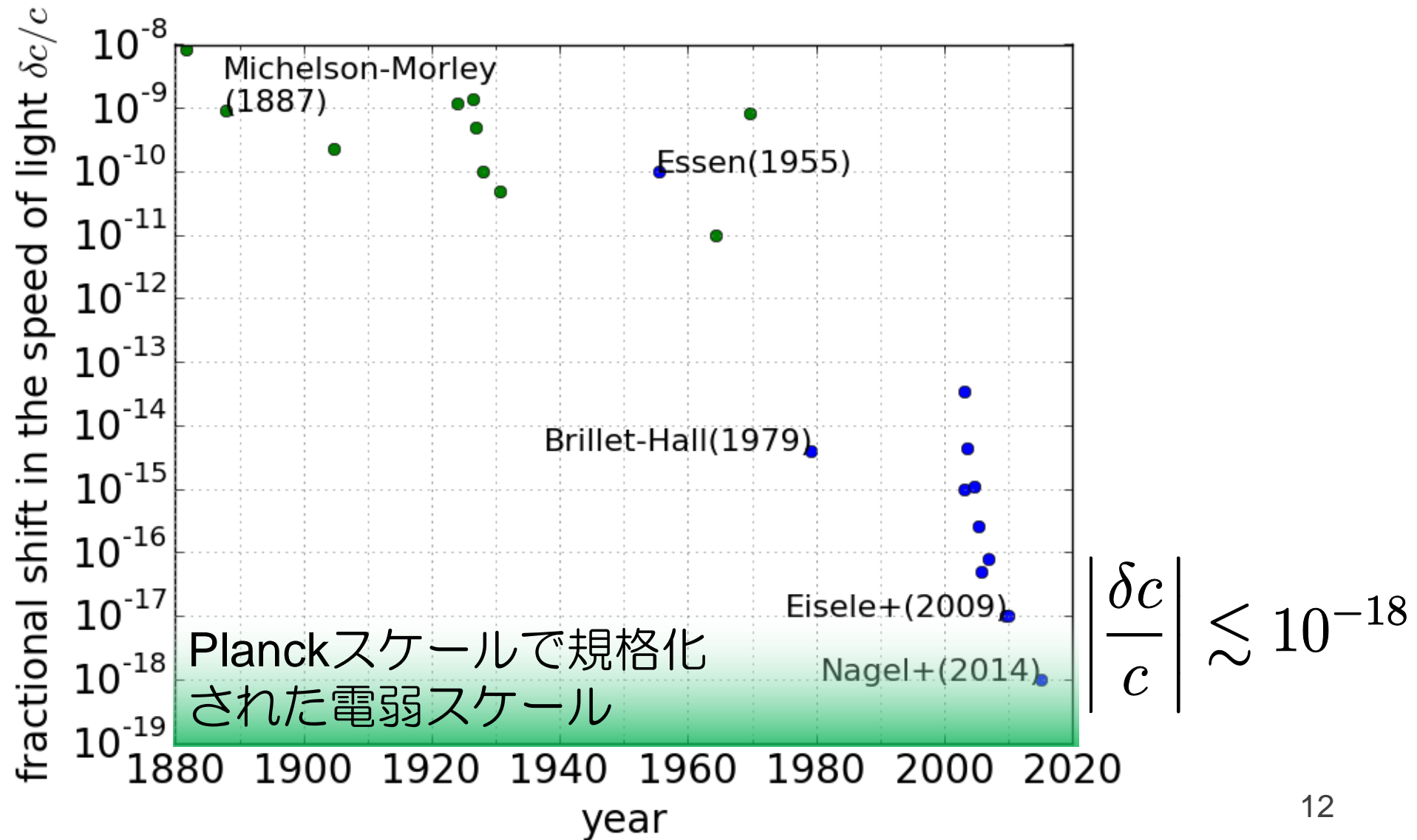
往復光速の異方性探査の歴史



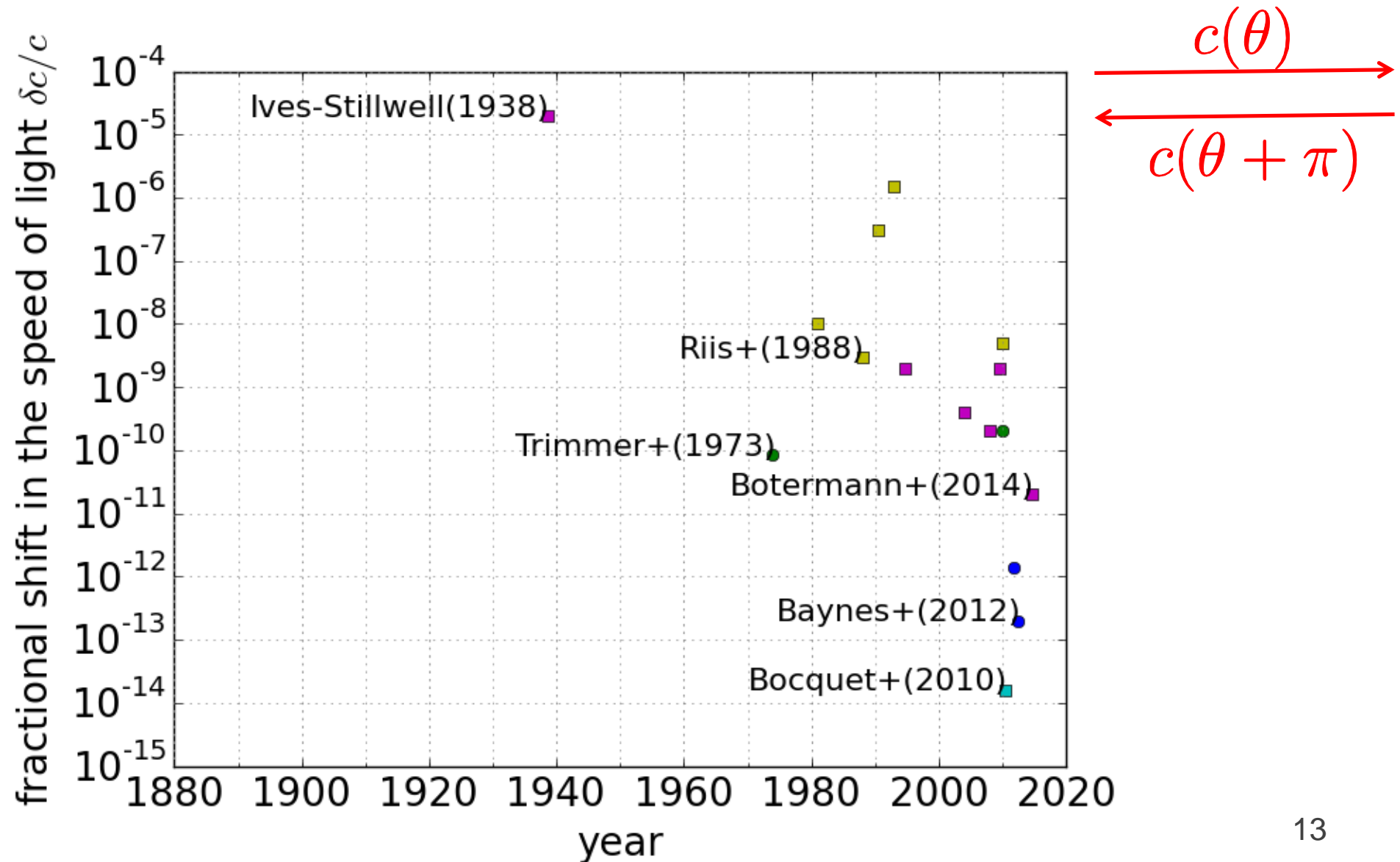
往復光速の異方性探査の歴史



往復光速の異方性探査の歴史

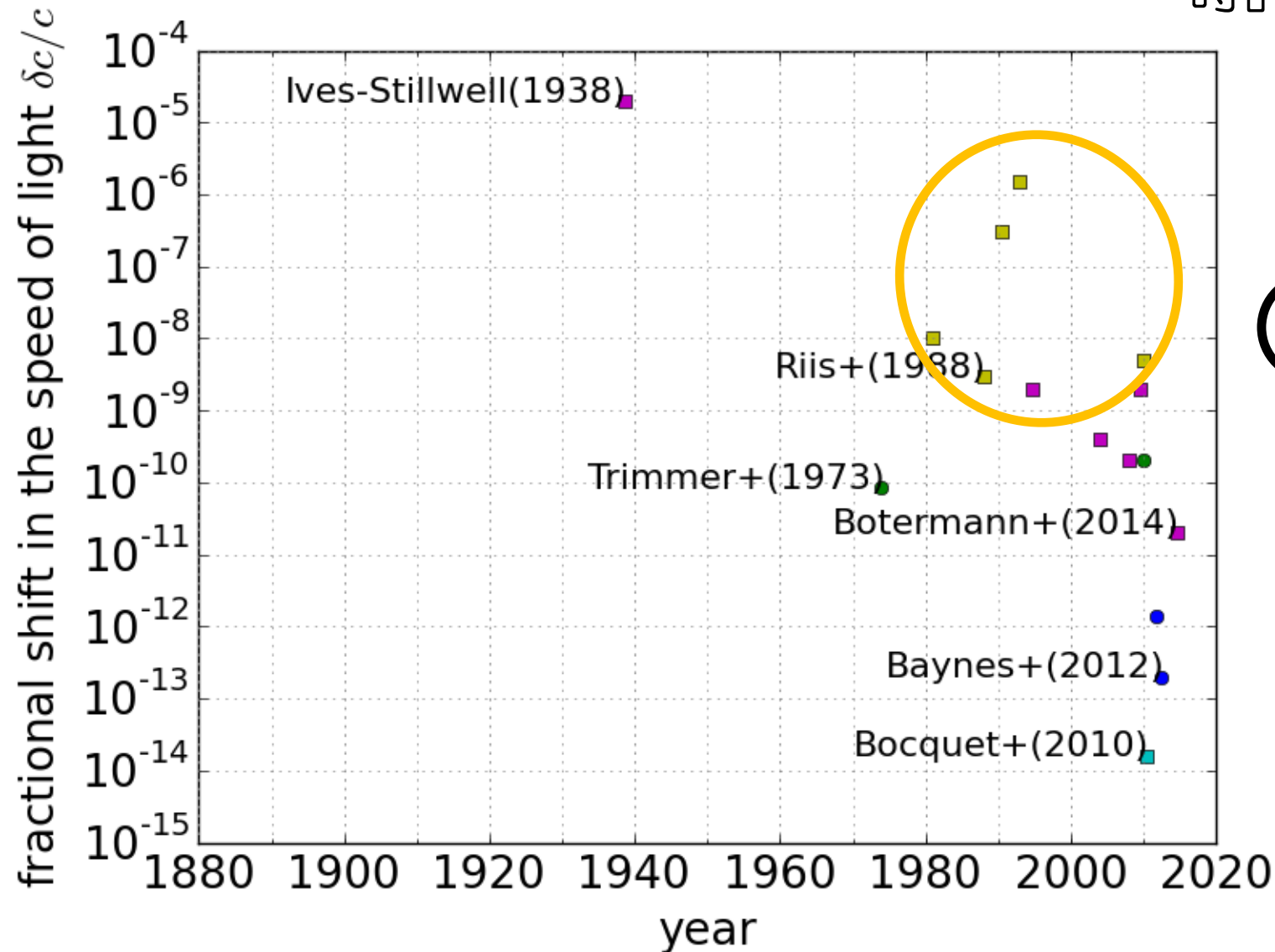


片道光速の異方性探査の歴史



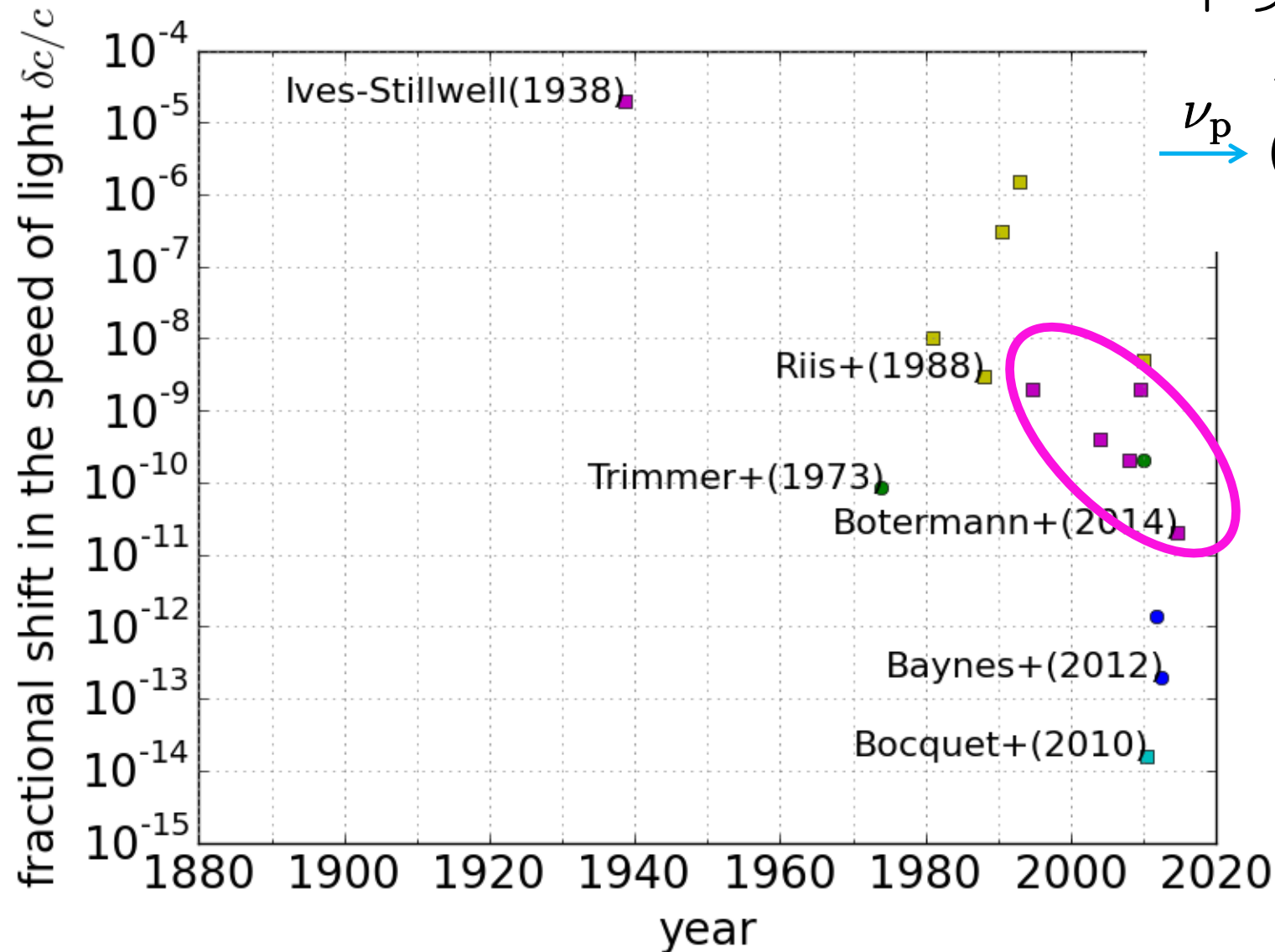
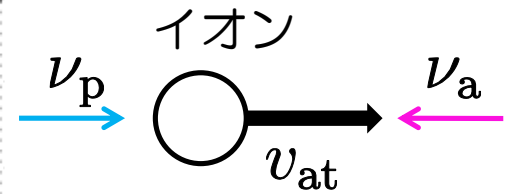
片道光速の異方性探査の歴史

時計比較実験



片道光速の異方性探査の歴史

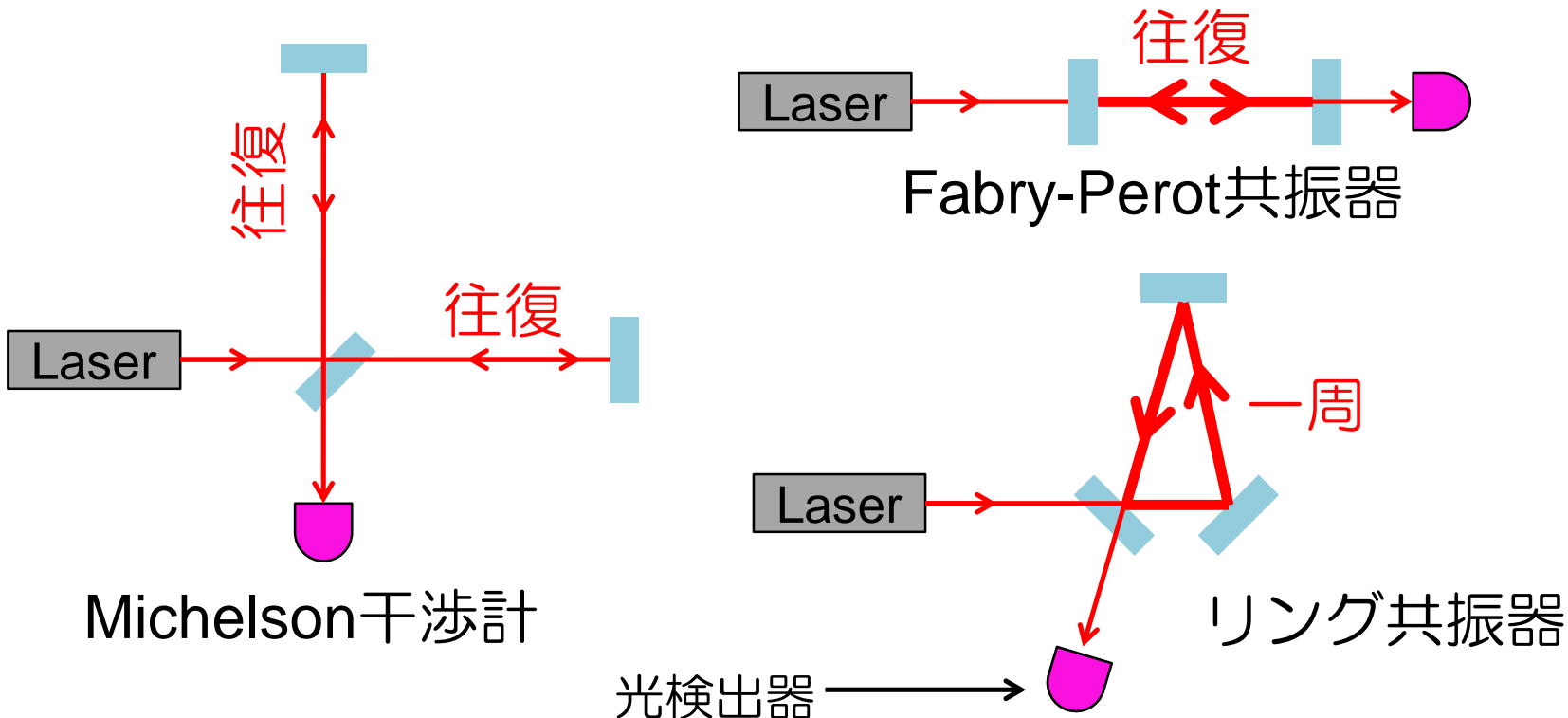
ドップラー実験



絶対静止系として
 CMB静止系を仮定
 した場合
 $(v_{lab} = 369 \text{ km/s}$
 $= 1e-3 * c)$

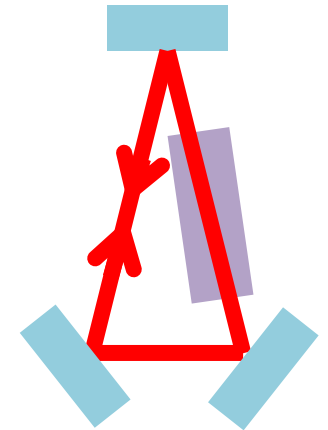
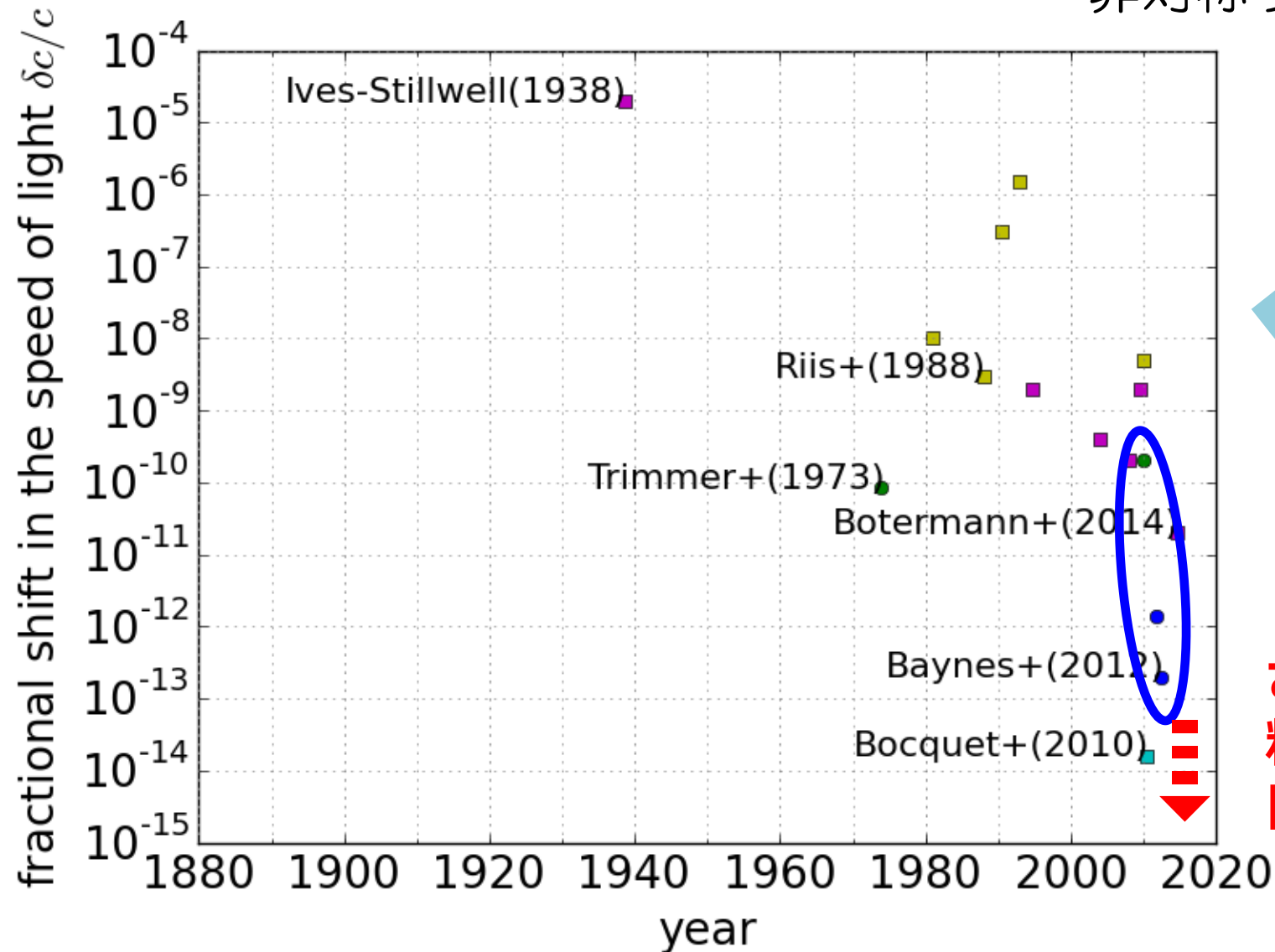
レーザー干渉計による異方性探査

- 往復に比べ、片道の検証精度は数桁悪かった
- 通常のレーザー干渉計、光共振器は往復光速の異方性にしか感度を持たない
- 媒質を入れて非対称性を作り、感度を持たせる



片道光速の異方性探査の歴史

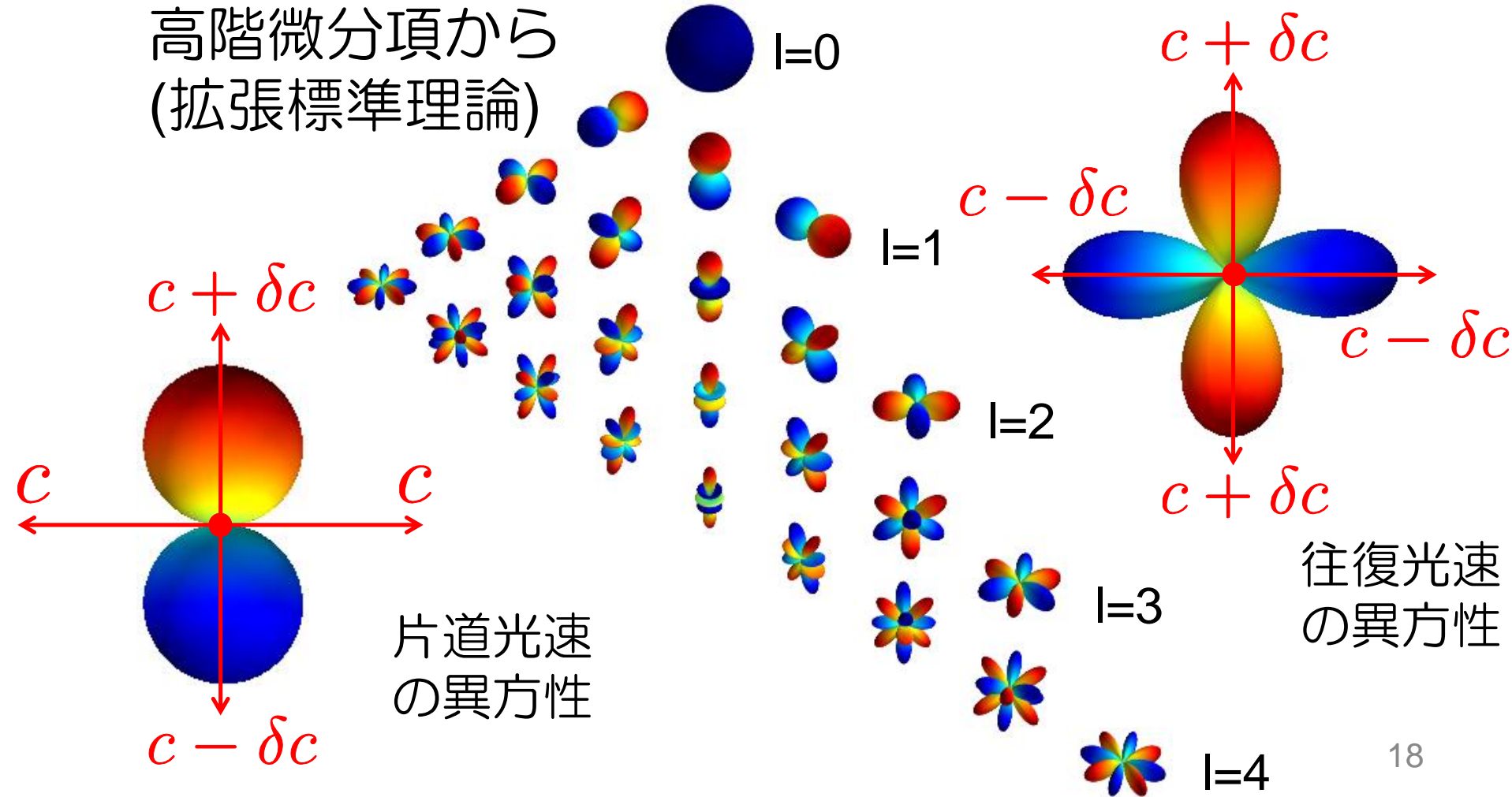
非対称リング共振器



さらなる
精度向上を
目指す

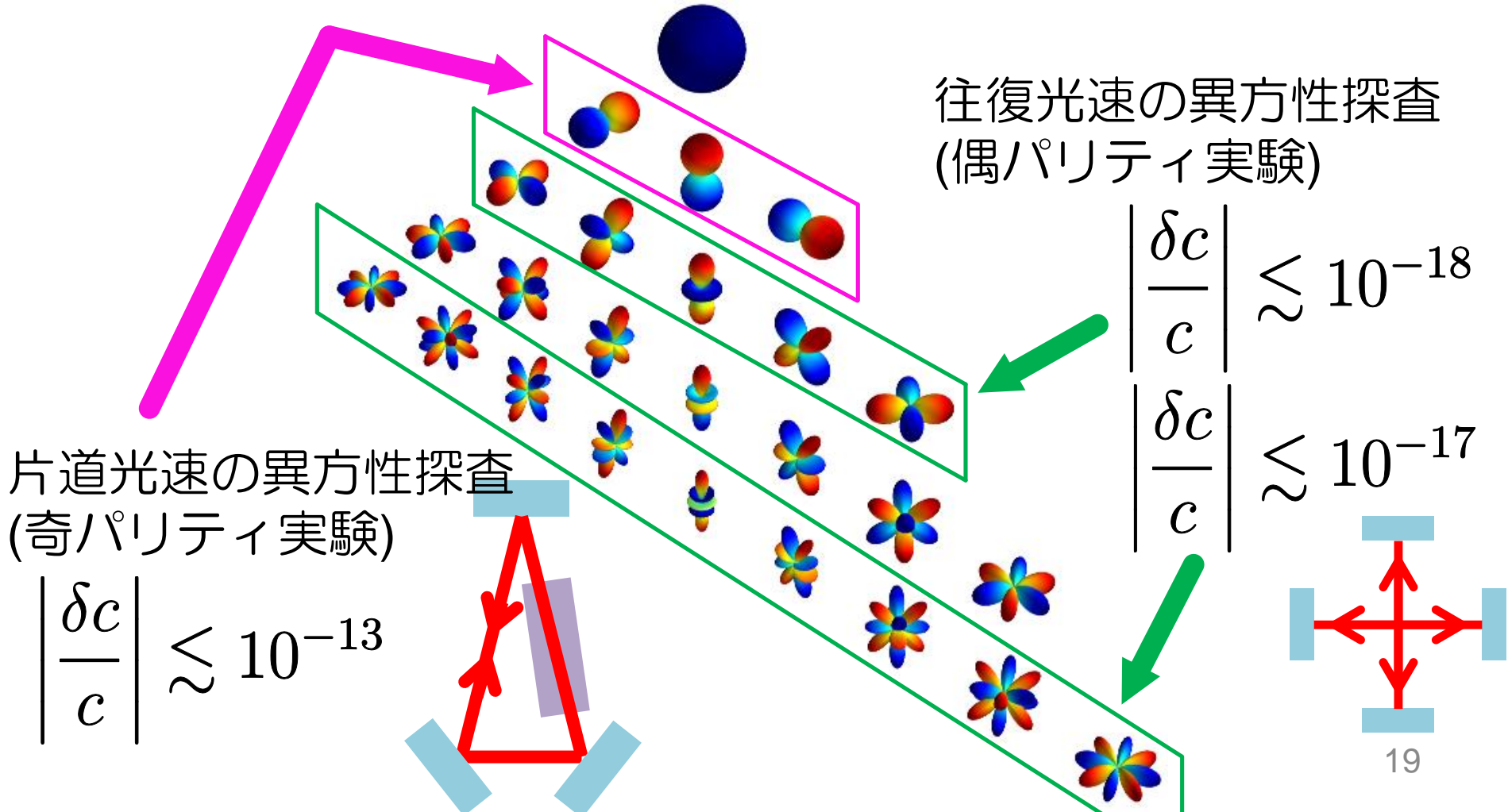
光速の高次の異方性

- 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)



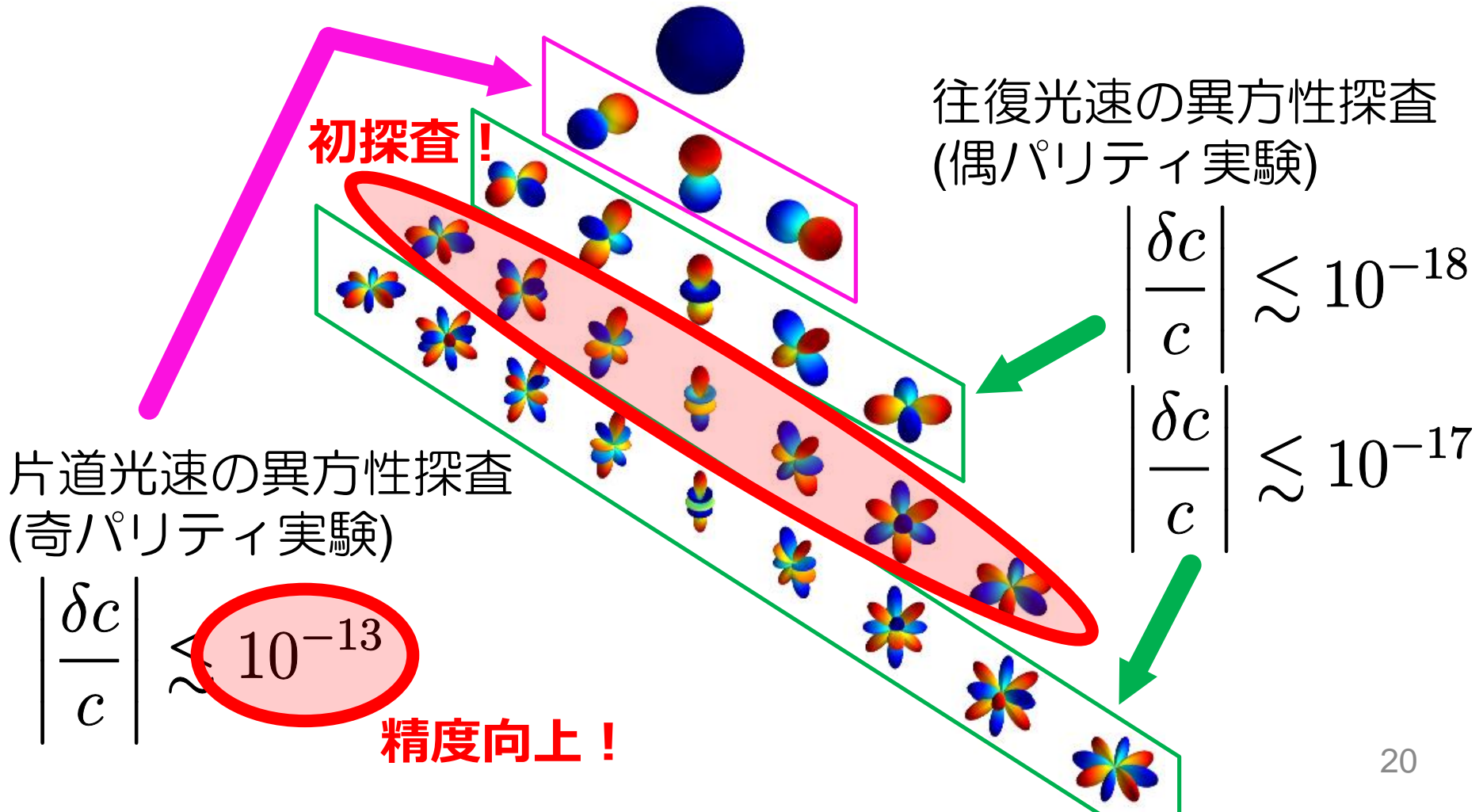
これまでの上限値

- 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



本研究の目標

- 片道光速の異方性探査の精度向上
- $l = 3$ の異方性の初探査

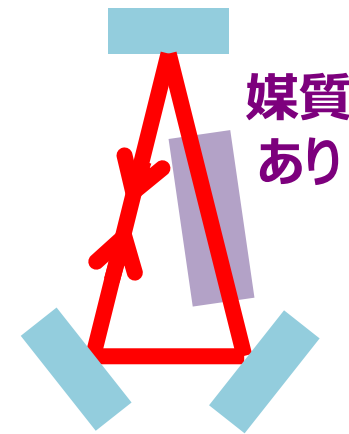
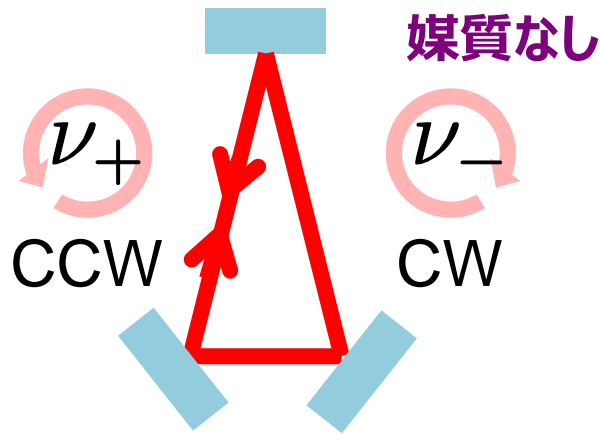


2. 測定原理

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

Lorentz不変の
場合

$$\nu_+ = \nu_0$$

$$\nu_- = \nu_0$$

$$\nu_+ = \nu$$

$$\nu_- = \nu$$

共振周波数
のずれ
 $\propto LV$

Lorentz不変性
が破れている
場合

$$\nu_+ = \nu_0$$

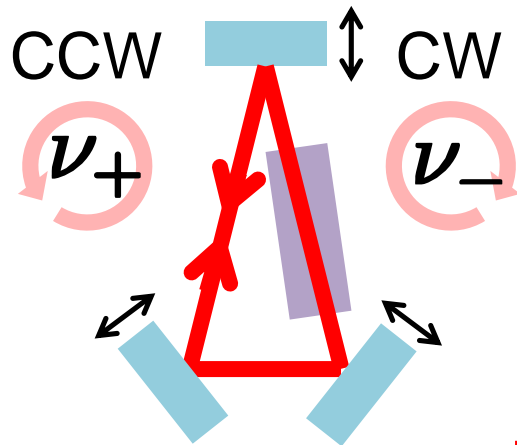
$$\nu_- = \nu_0$$

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

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

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



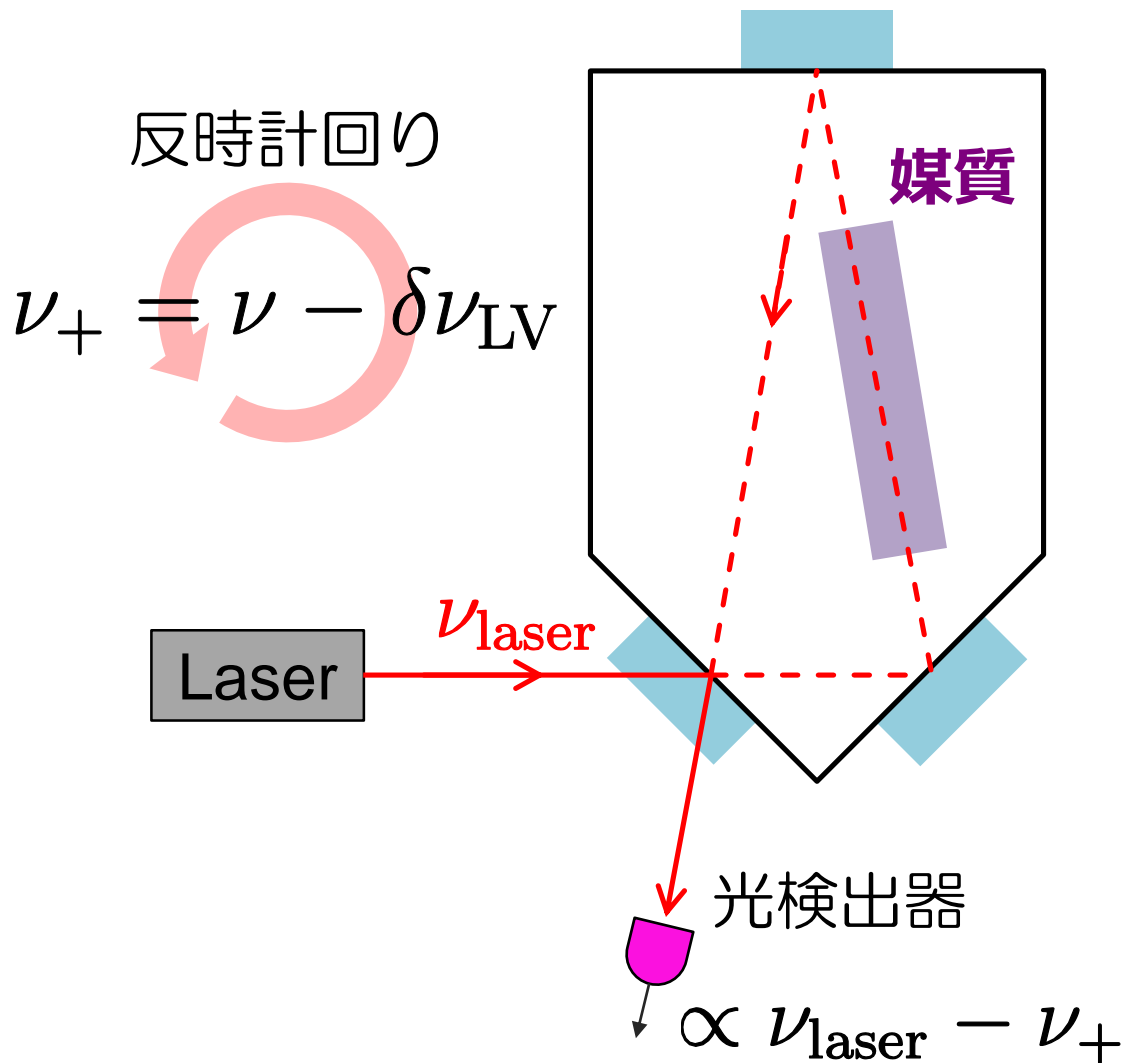
$$\begin{aligned}\nu_+ &= \nu + \delta\nu_{\text{noise}} - \delta\nu_{\text{LV}} \\ \nu_- &= \nu + \delta\nu_{\text{noise}} + \delta\nu_{\text{LV}}\end{aligned}$$

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

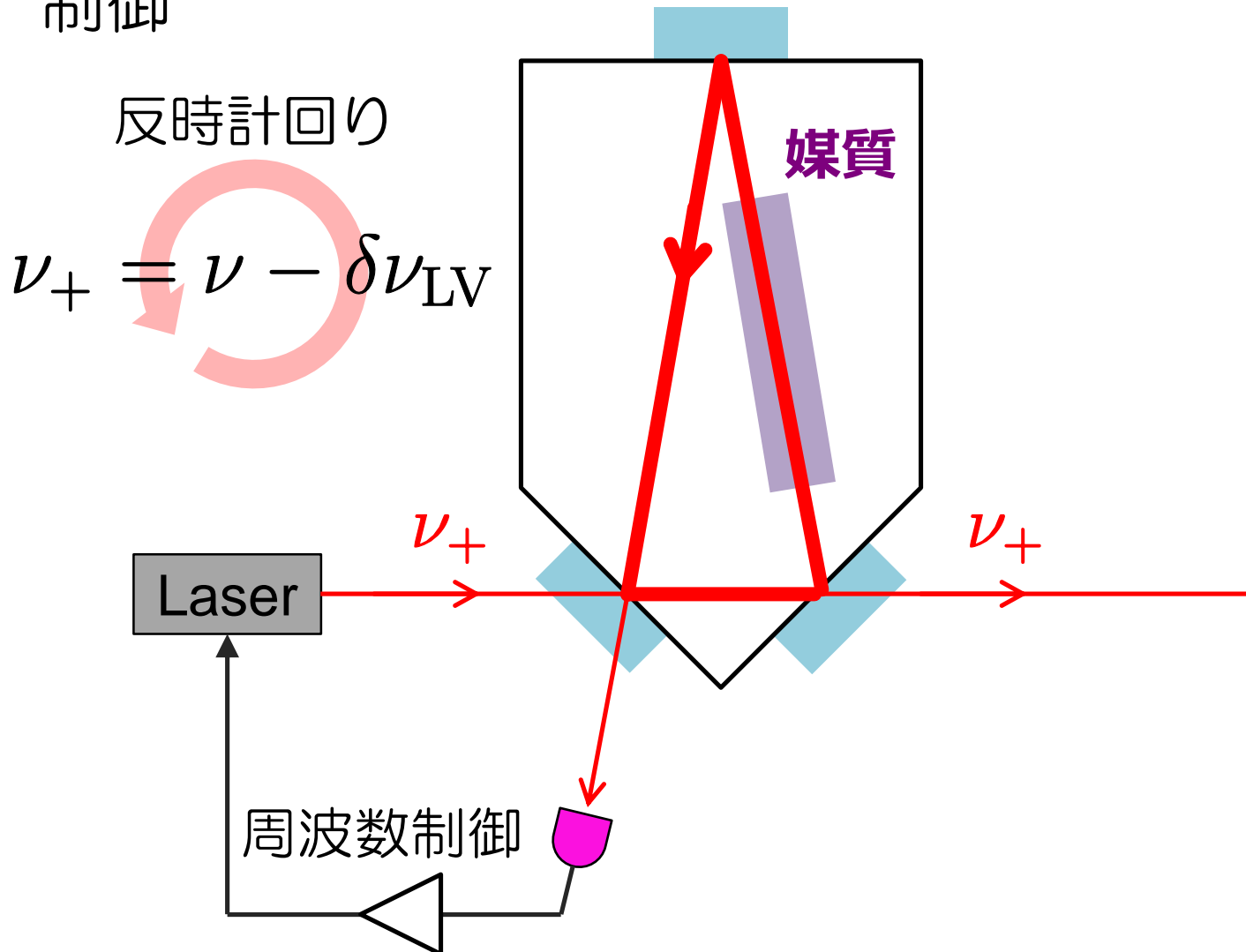
ダブルパス構成 (1/4)

- レーザー光を反時計回りに入射



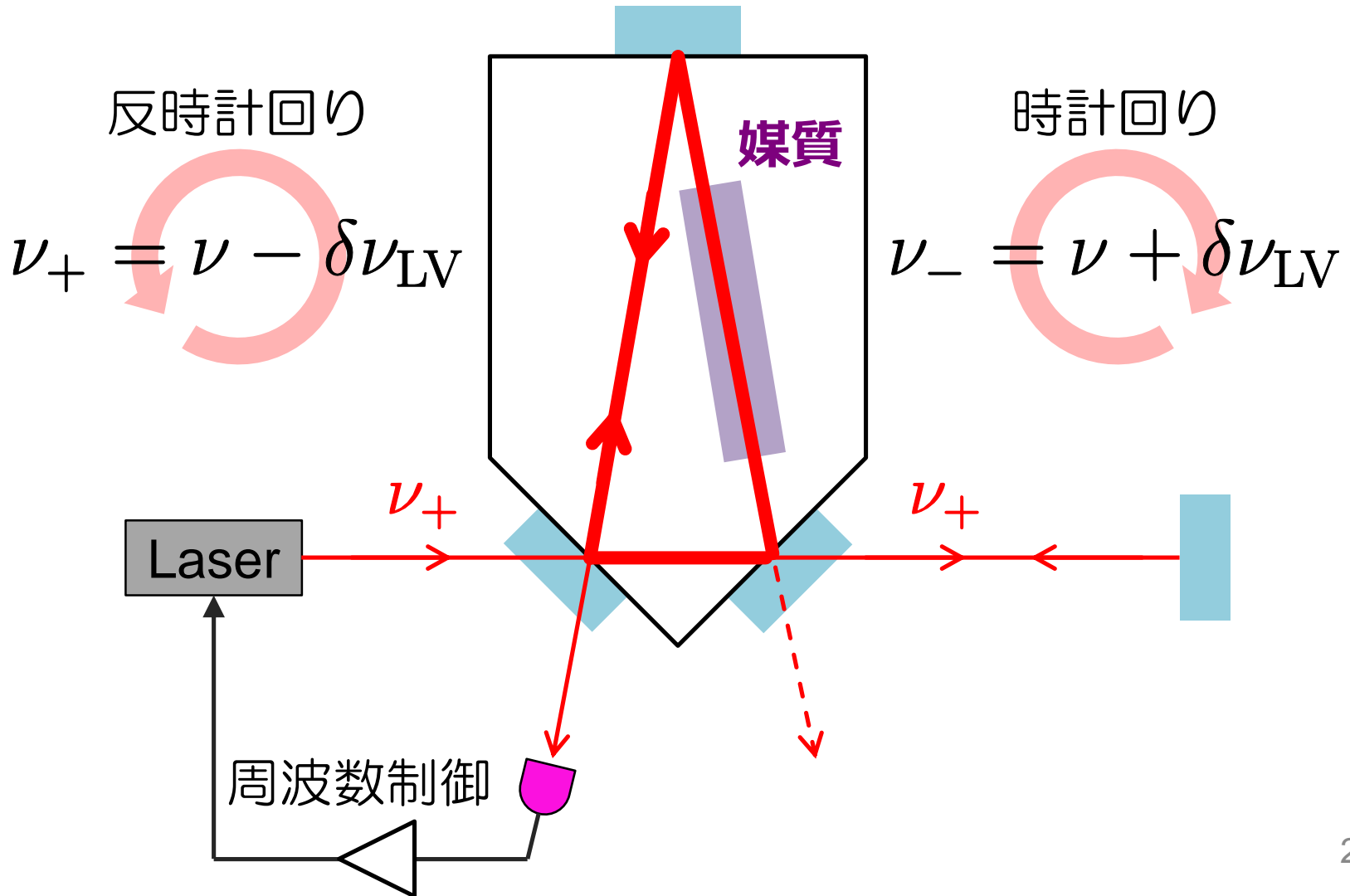
ダブルパス構成 (2/4)

- レーザー周波数を反時計回りの共振周波数(ν_+)に制御



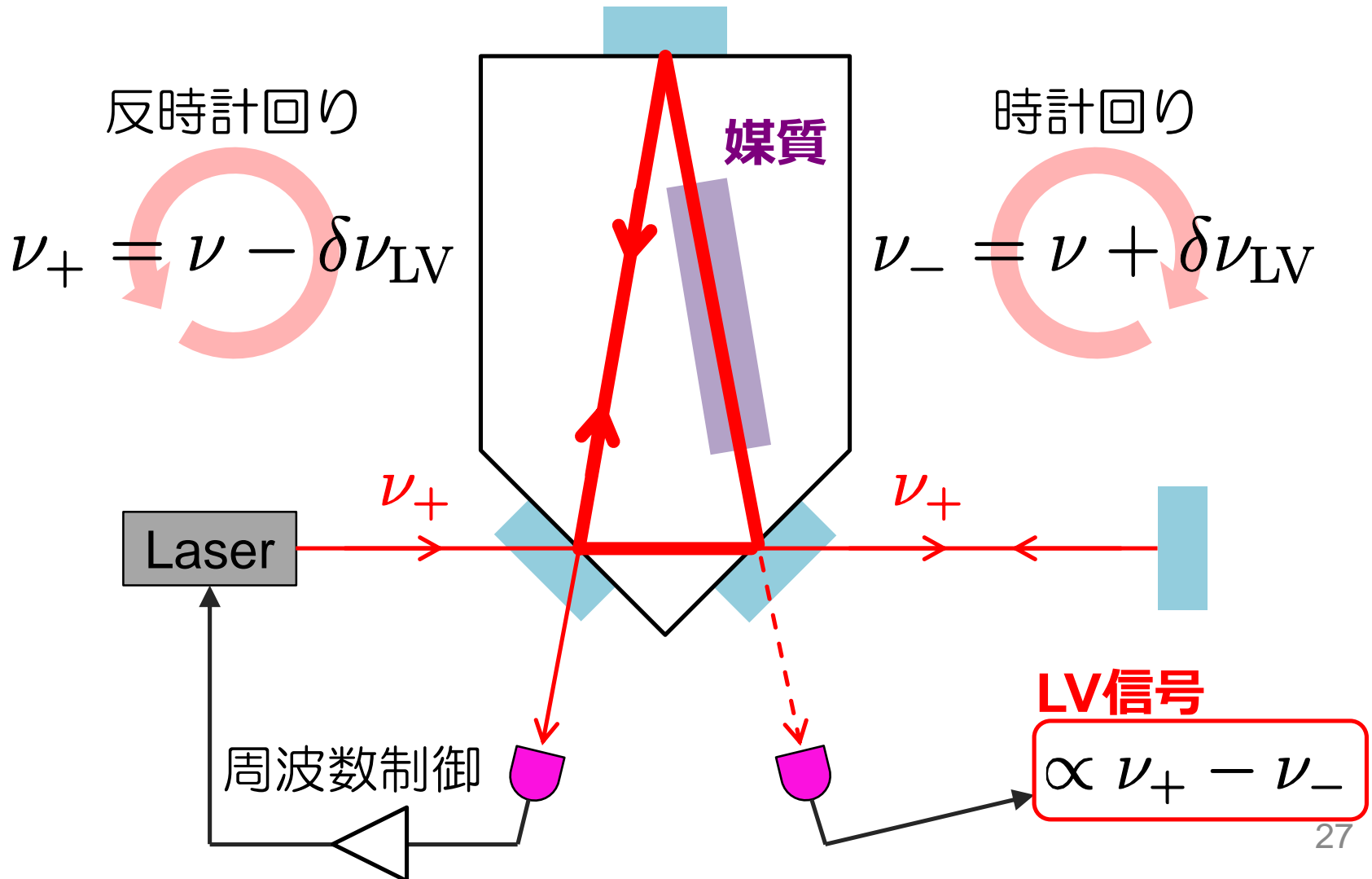
ダブルパス構成 (3/4)

- 透過光を打ち返し、時計回りに再入射



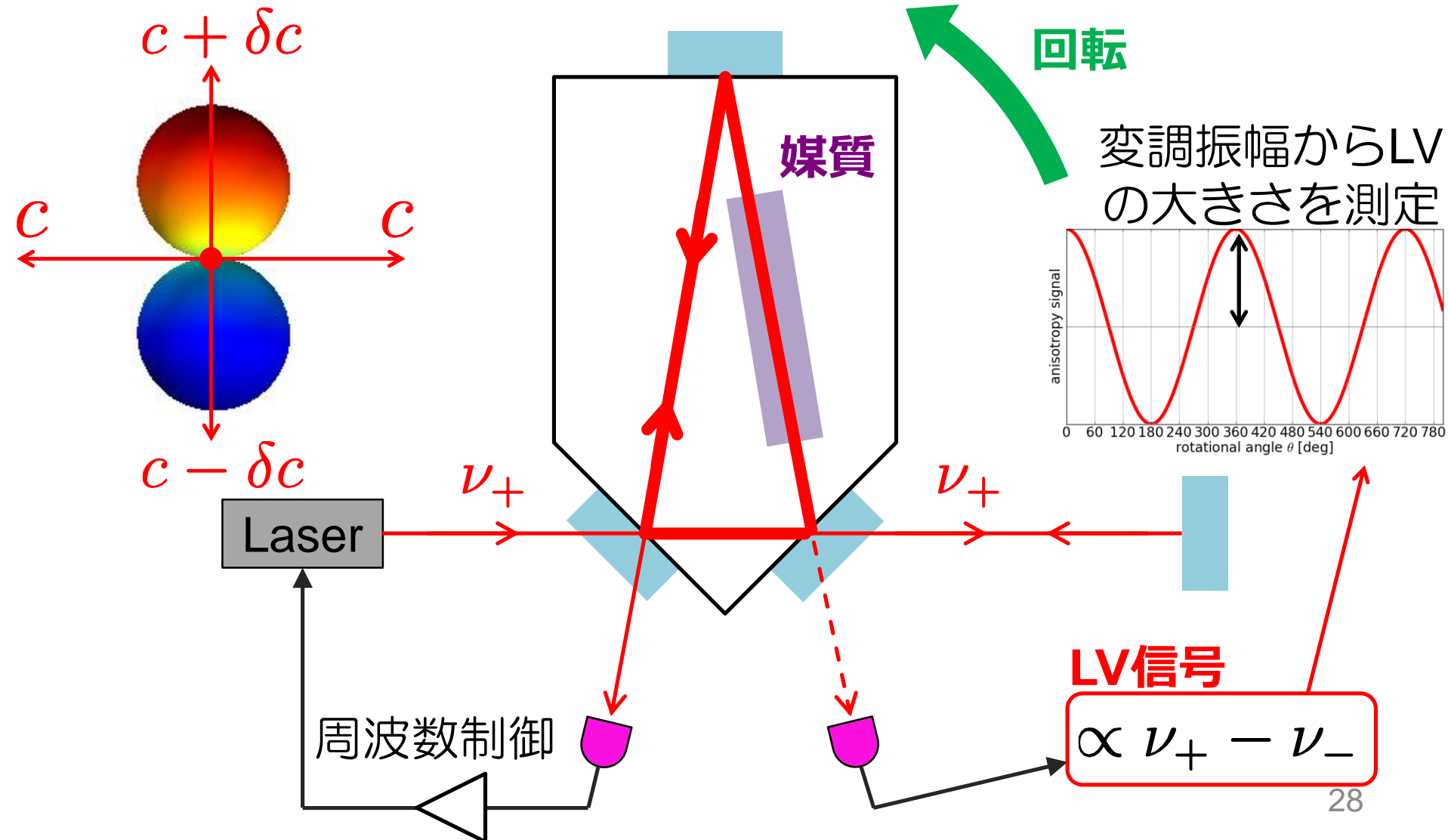
ダブルパス構成 (4/4)

- その反射光から、LV信号が得られる(**null測定**)



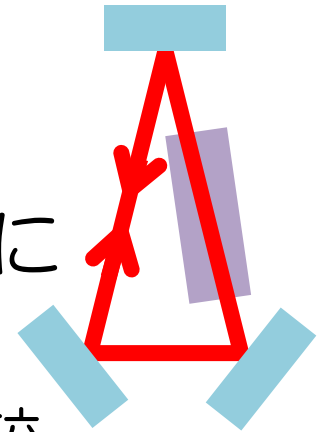
実験装置の回転

- 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

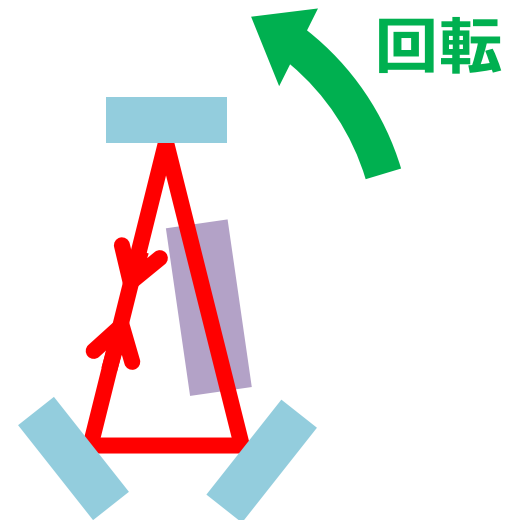
- 光路に媒質を入れる
 - 片道光速の異方性に感度を持つように
W. S. N. Trimmer+, Phys. Rev. D **8**, 3321 (1973)
- 反時計回りと時計回りの共振周波数を比較
 - 同相雑音除去によって環境変動に強くなる
F. Baynes+, Phys. Rev. Lett. **108**, 260801 (2012)
- ダブルパス構成による比較
 - null測定になる (本実験の新アイディア)
- 媒質として屈折率の大きいシリコンを使用
 - 異方性に対する感度がガラスに比べ約4倍
- 光共振器の回転中に連続データ取得
 - 高次の異方性に感度



目標感度

- $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \sim 10^{-13}$ を超える精度で異方性探査を行う
 - 1年間にわたる積分を仮定すると、
周波数雑音として
$$\frac{\delta \nu}{\nu} \lesssim 10^{-10} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (\text{装置の回転周波数で})$$

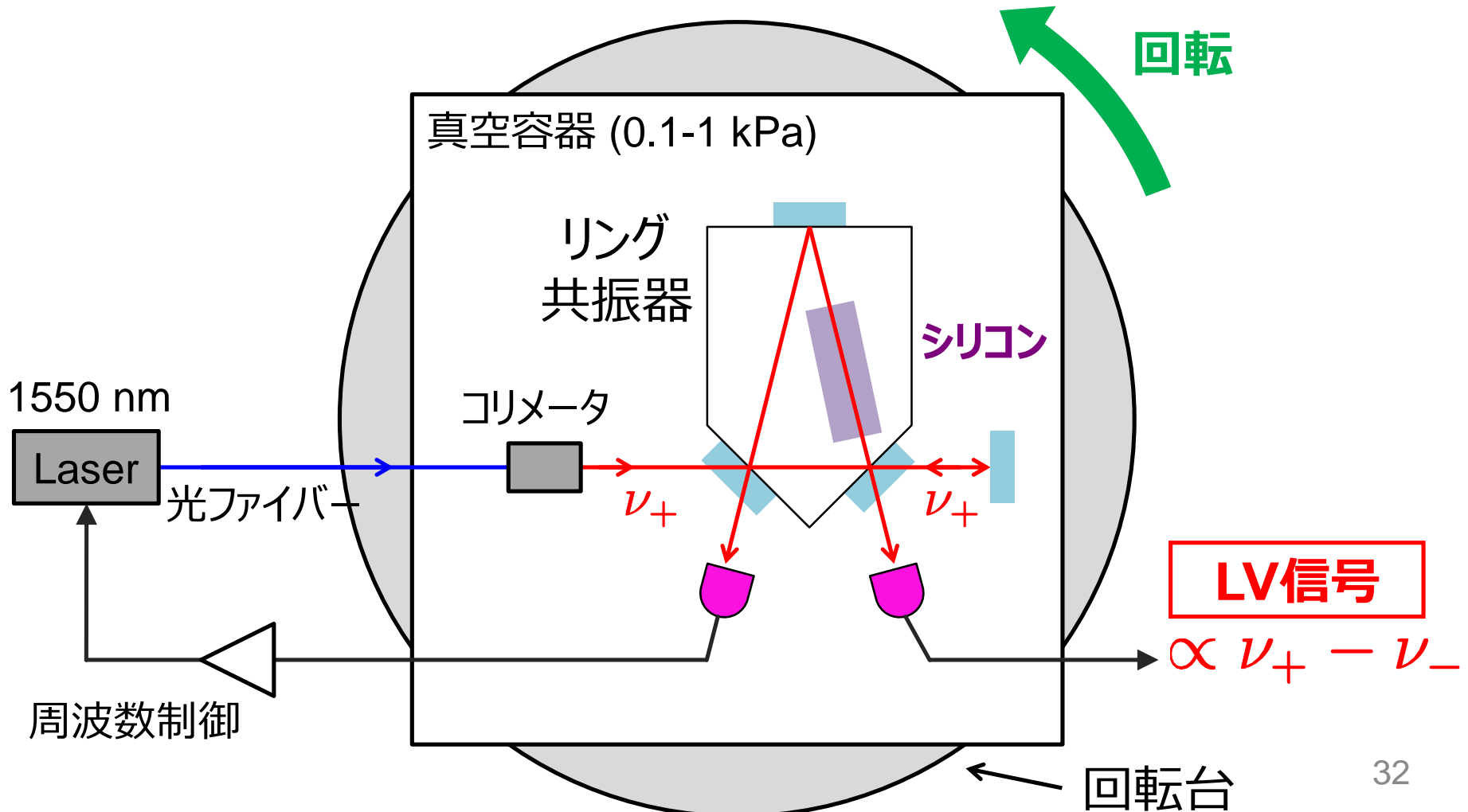
- 雑音見積もりを行い、装置を設計
 散射雑音、熱雑音は目標の6桁下
 温度安定化、防振は不要
- 回転台の回転角速度変動は
 Sagnac効果により雑音となる



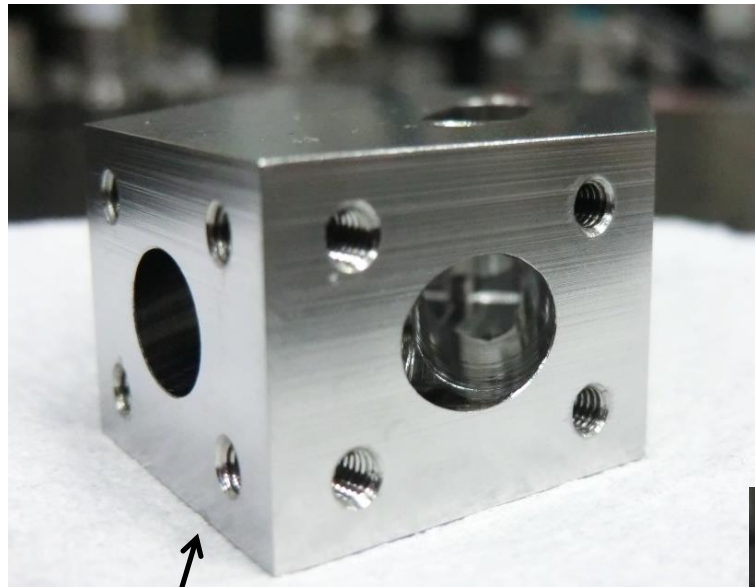
3. 実験装置

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

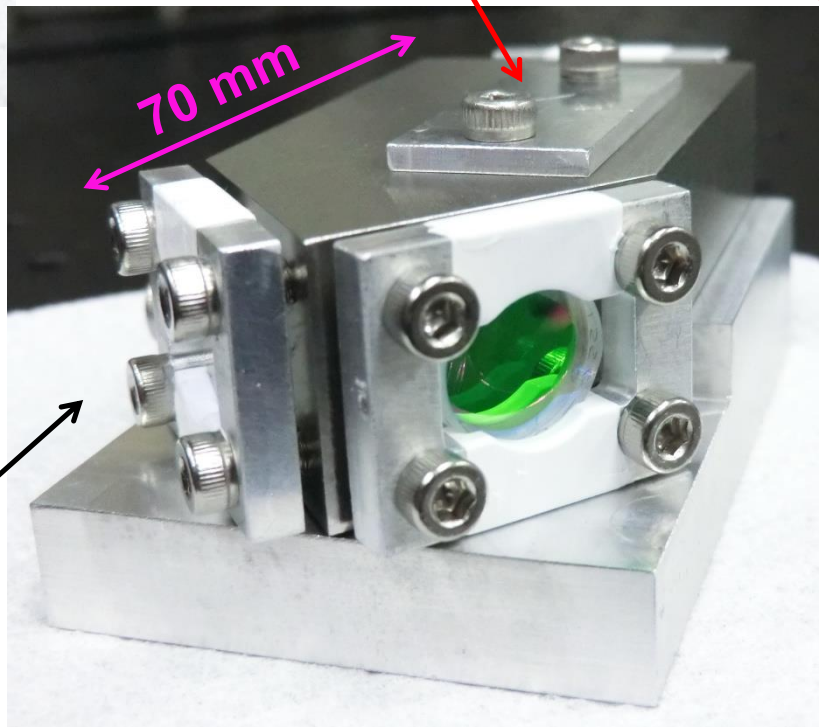


リング共振器の写真

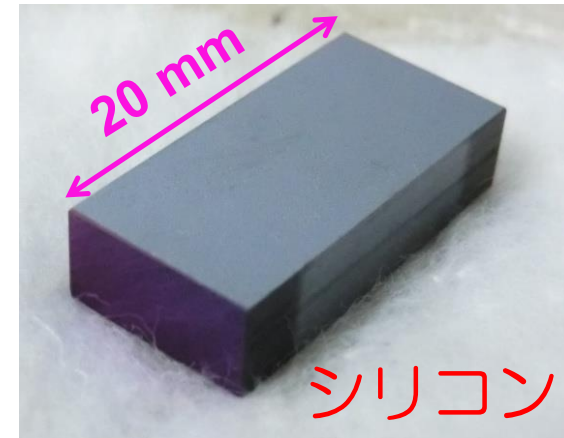


スペーサーは
スーパーインバー製
(低熱膨張合金 $10^{-7}/\text{K}$)

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

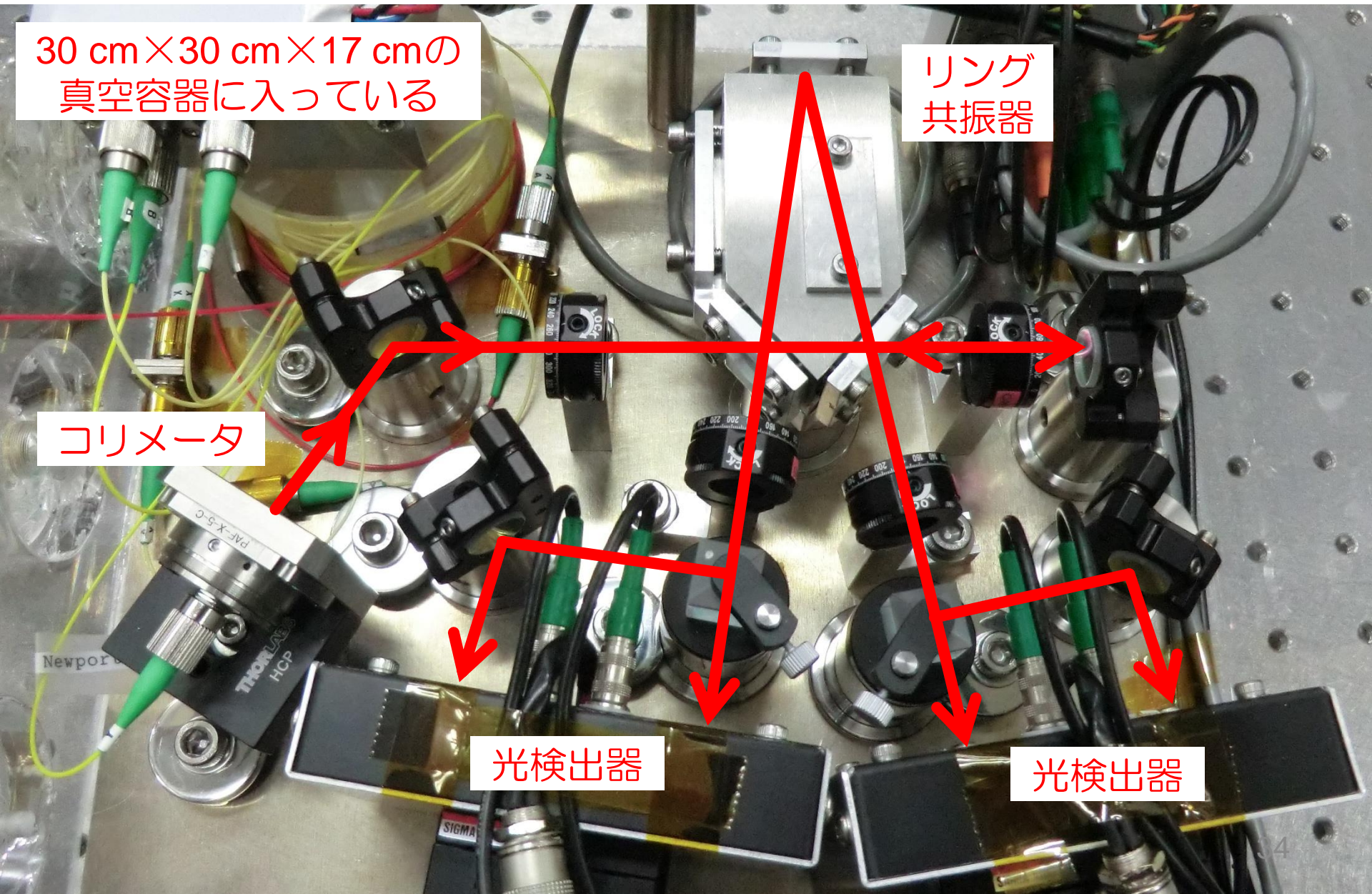
30 cm×30 cm×17 cmの
真空容器に入っている

リング
共振器

コリメータ

光検出器

光検出器



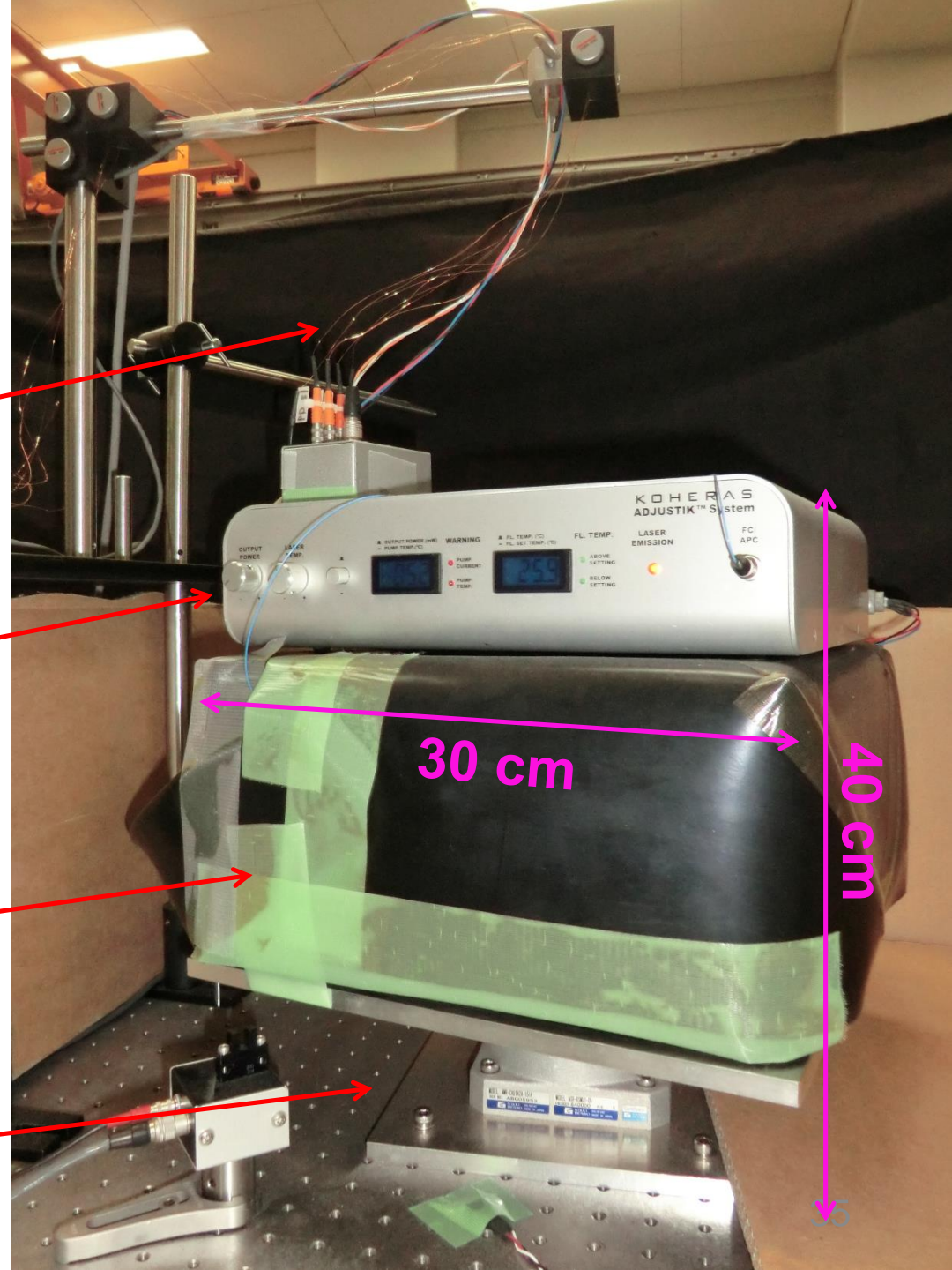
全体の写真

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

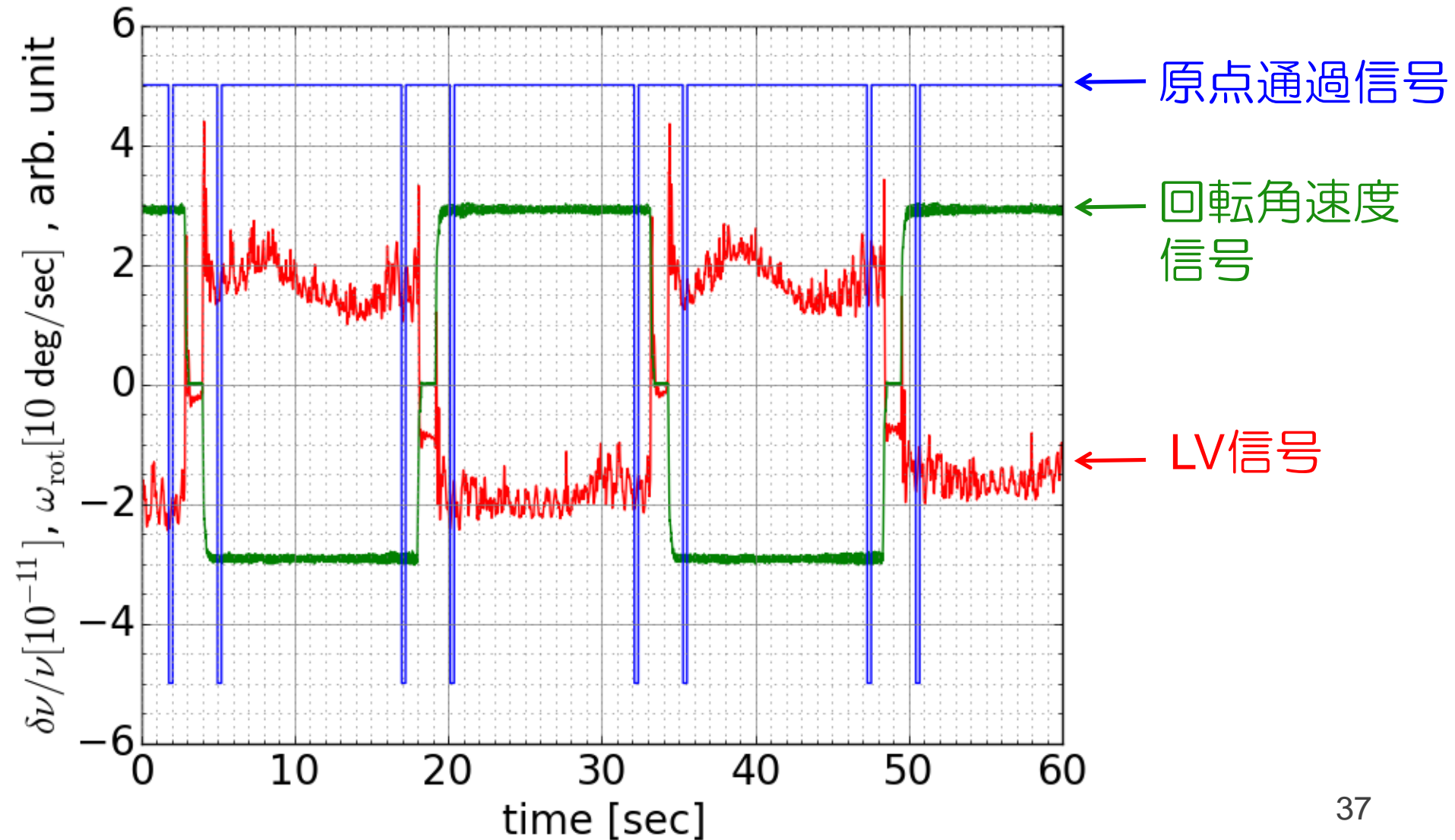


装置回転の動画

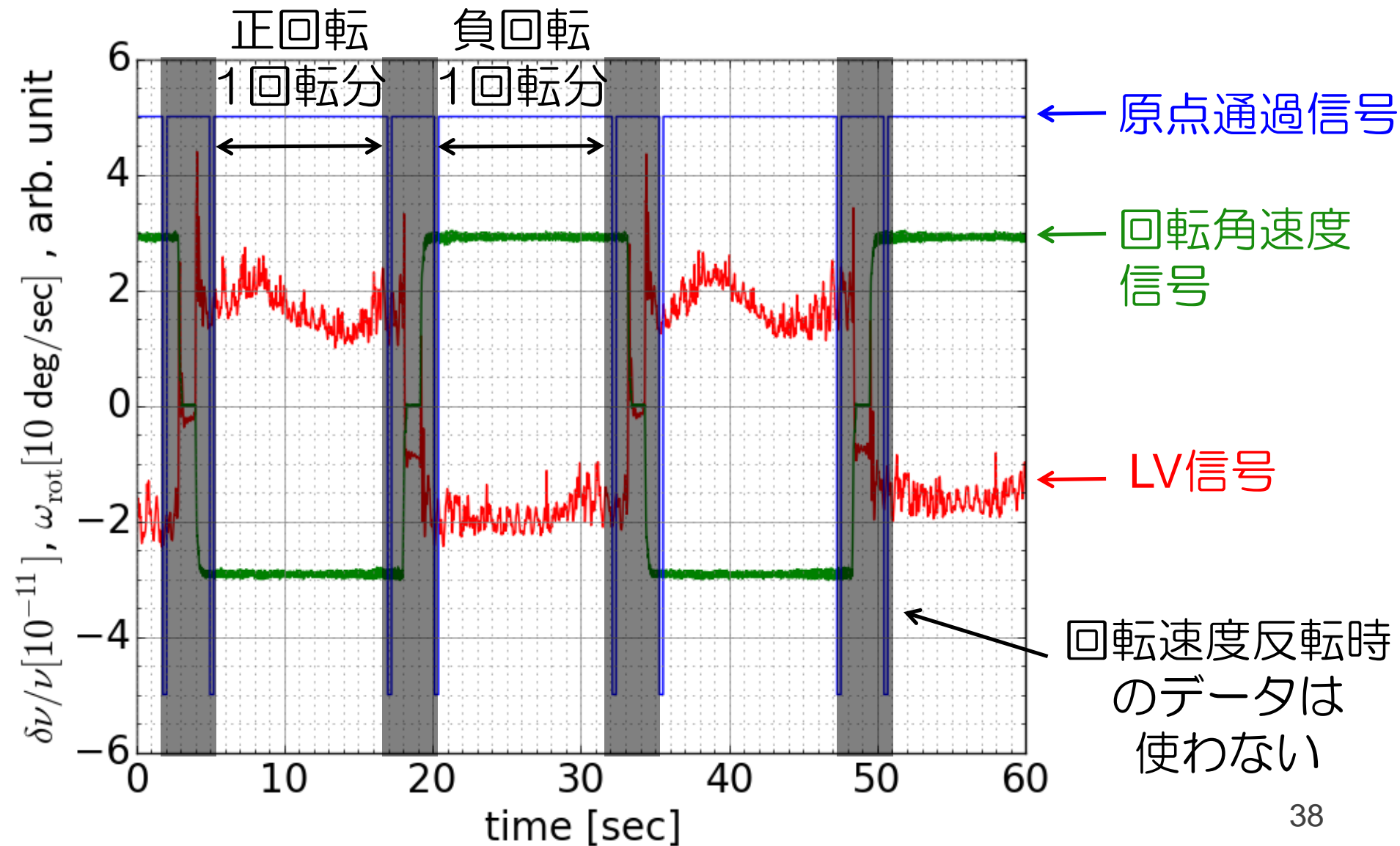
- 12秒で1回転、正回転と逆回転を繰り返す



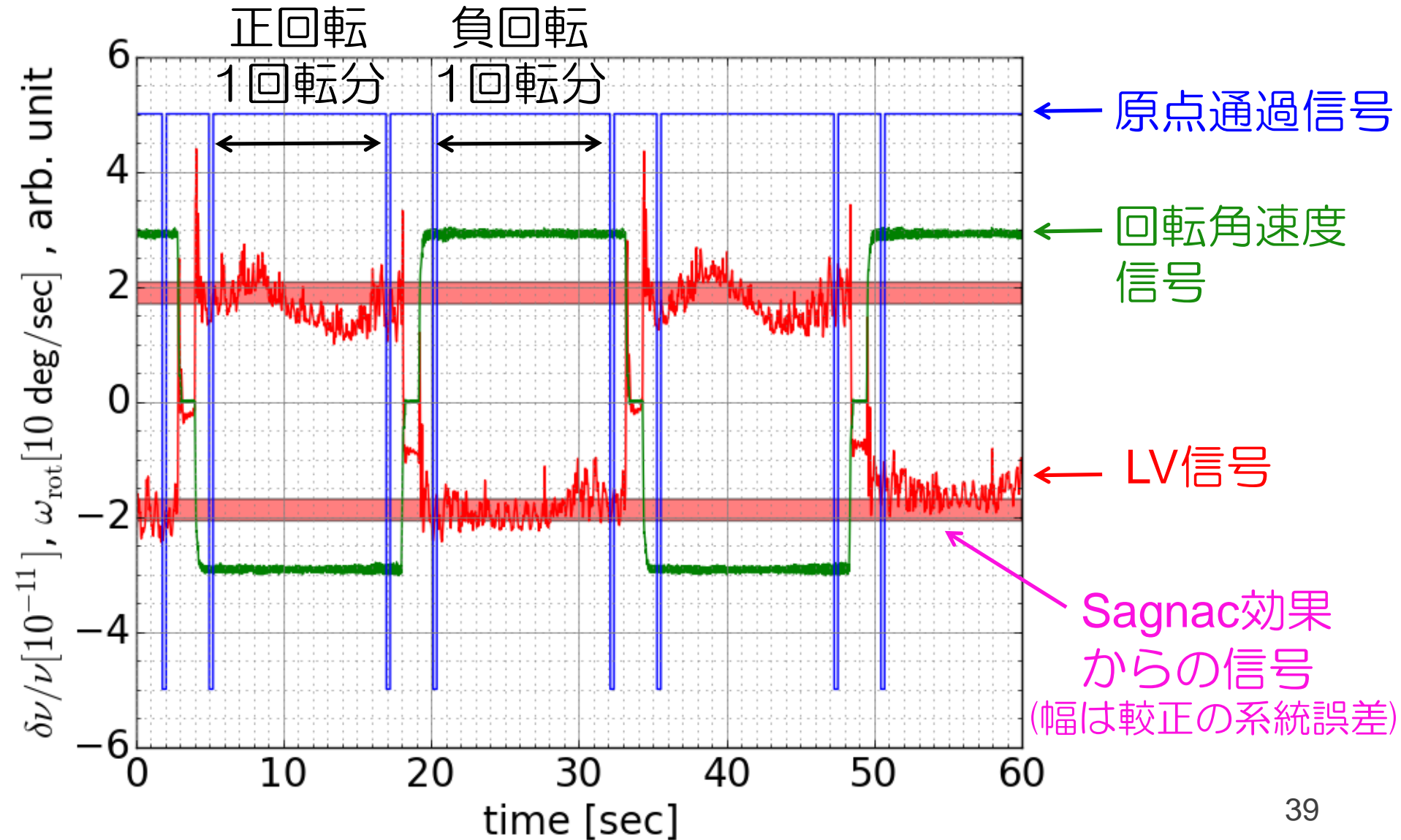
得られる生データ



用いるデータ

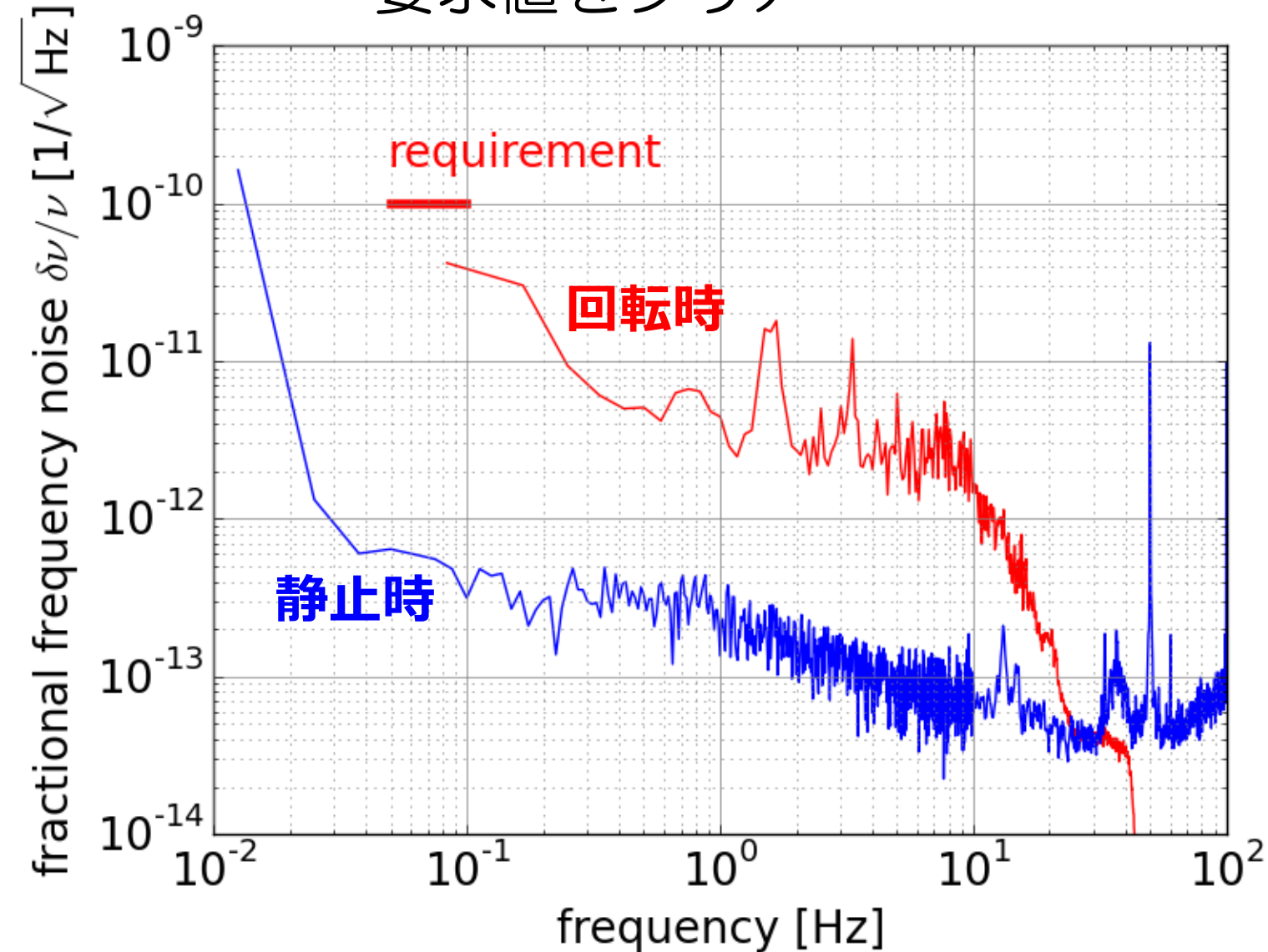


Sagnac効果



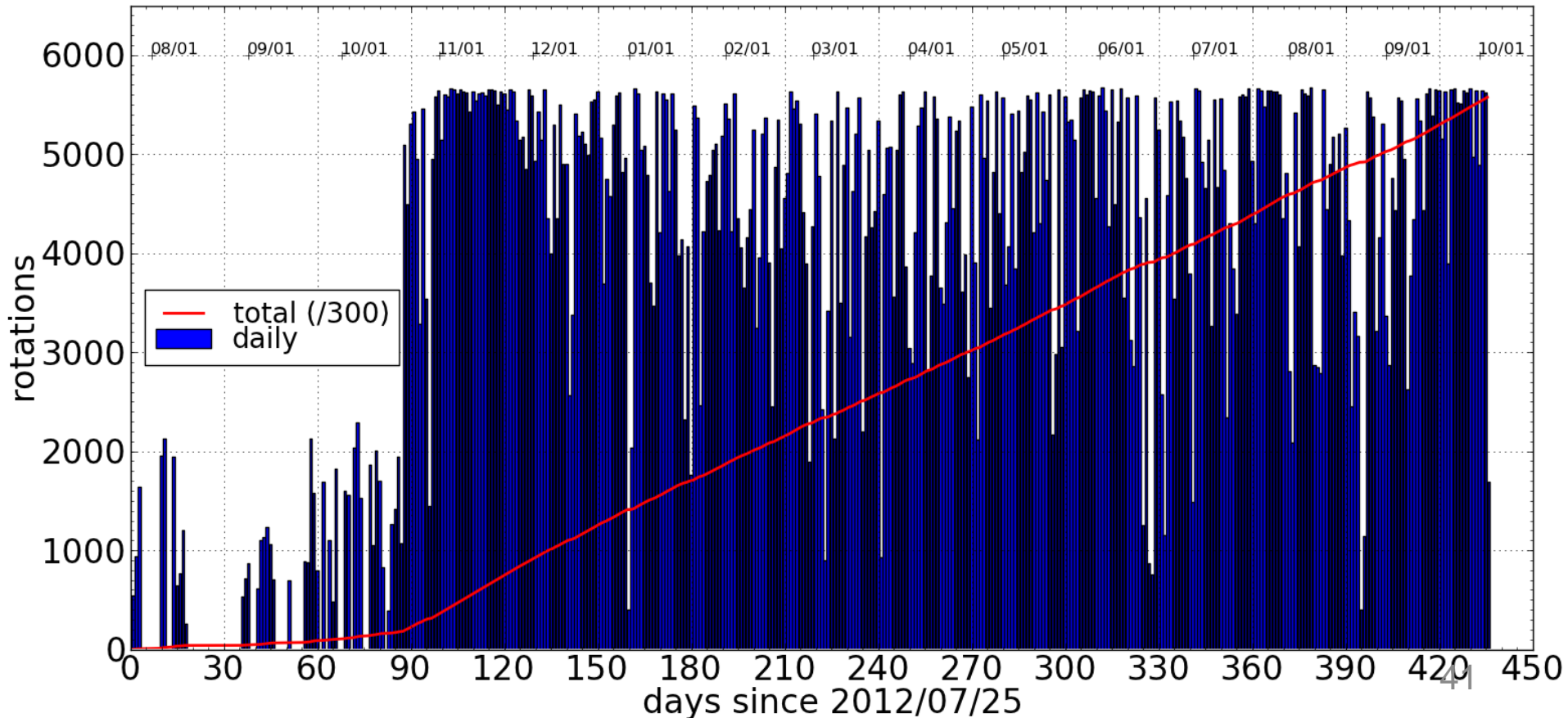
LV信号のスペクトル

- 要求値をクリア



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%)



4. データ解析

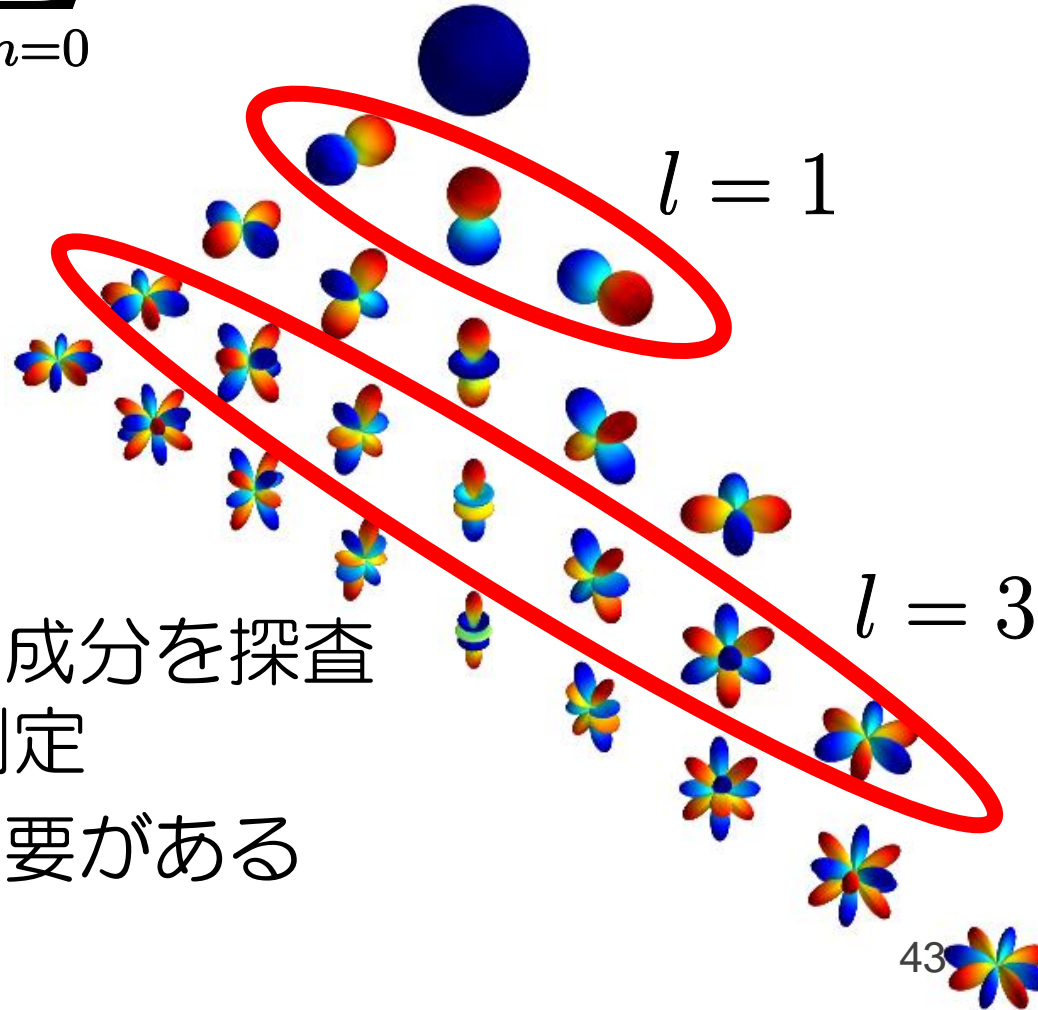
異方性の球面調和関数展開

- 展開

$$c(\theta, \phi) = 1 + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \text{Re} [(\bar{y}_l^m)^* Y_l^m(\theta, \phi)]$$

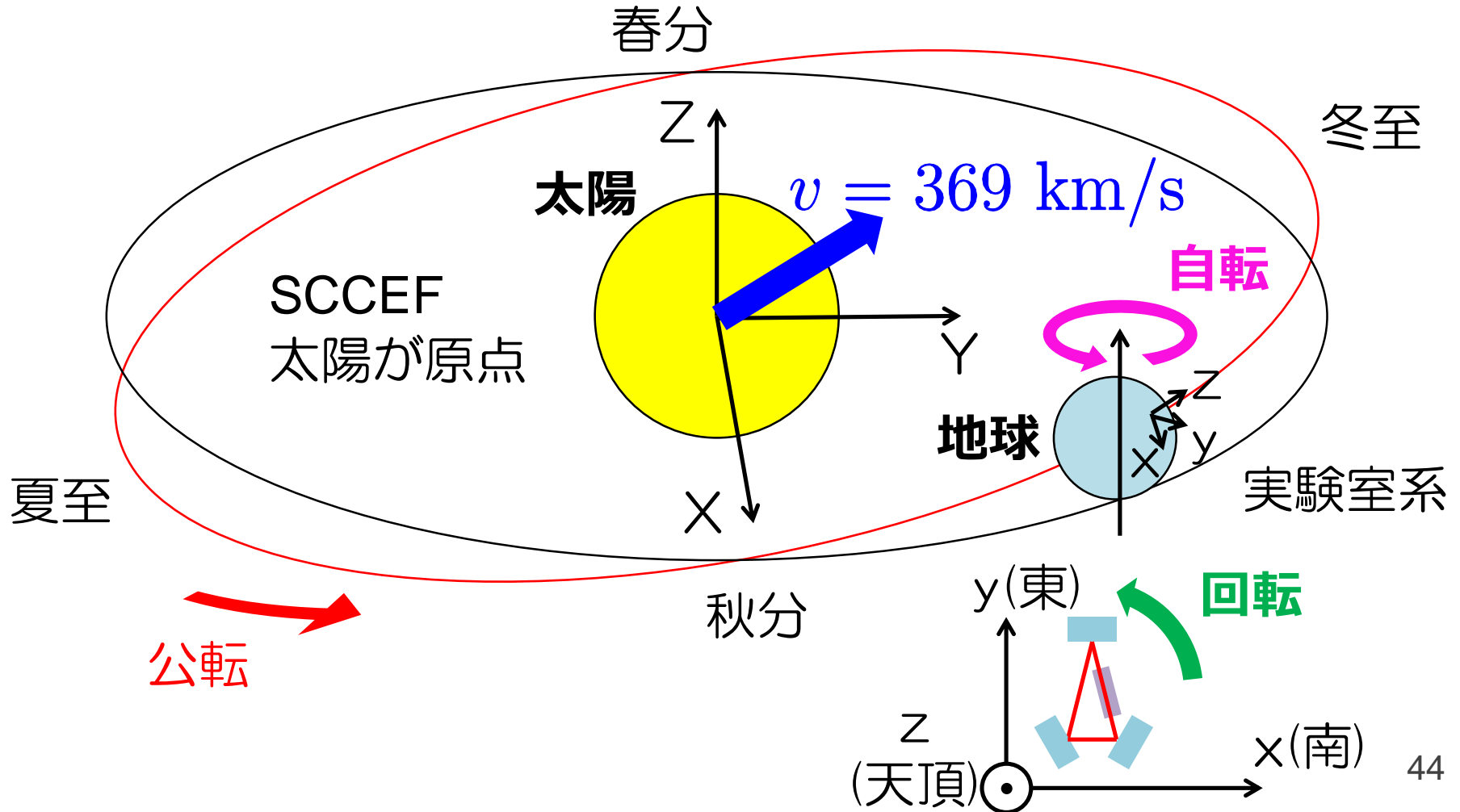
- \bar{y}_l^m は複素数で、Lorentz不変性が破れていなければゼロ

- 双極子成分と六重極成分を探查
→ \bar{y}_1^m と \bar{y}_3^m を測定
- 座標系を定義する必要がある
→ SCCEF



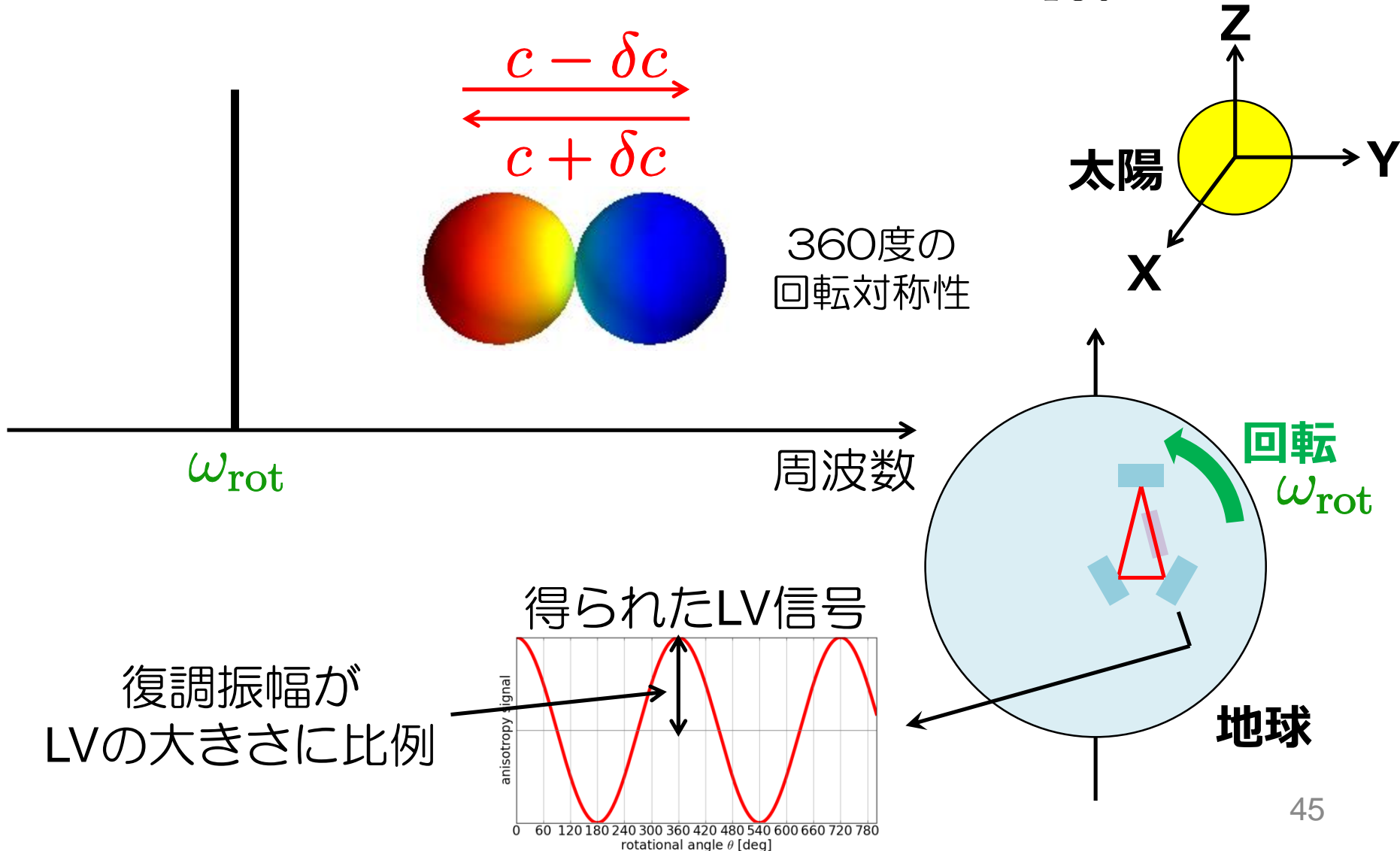
SCCEF

- Sun centered celestial equatorial frame
- CMB静止系に対して(ほぼ)一定速度で運動



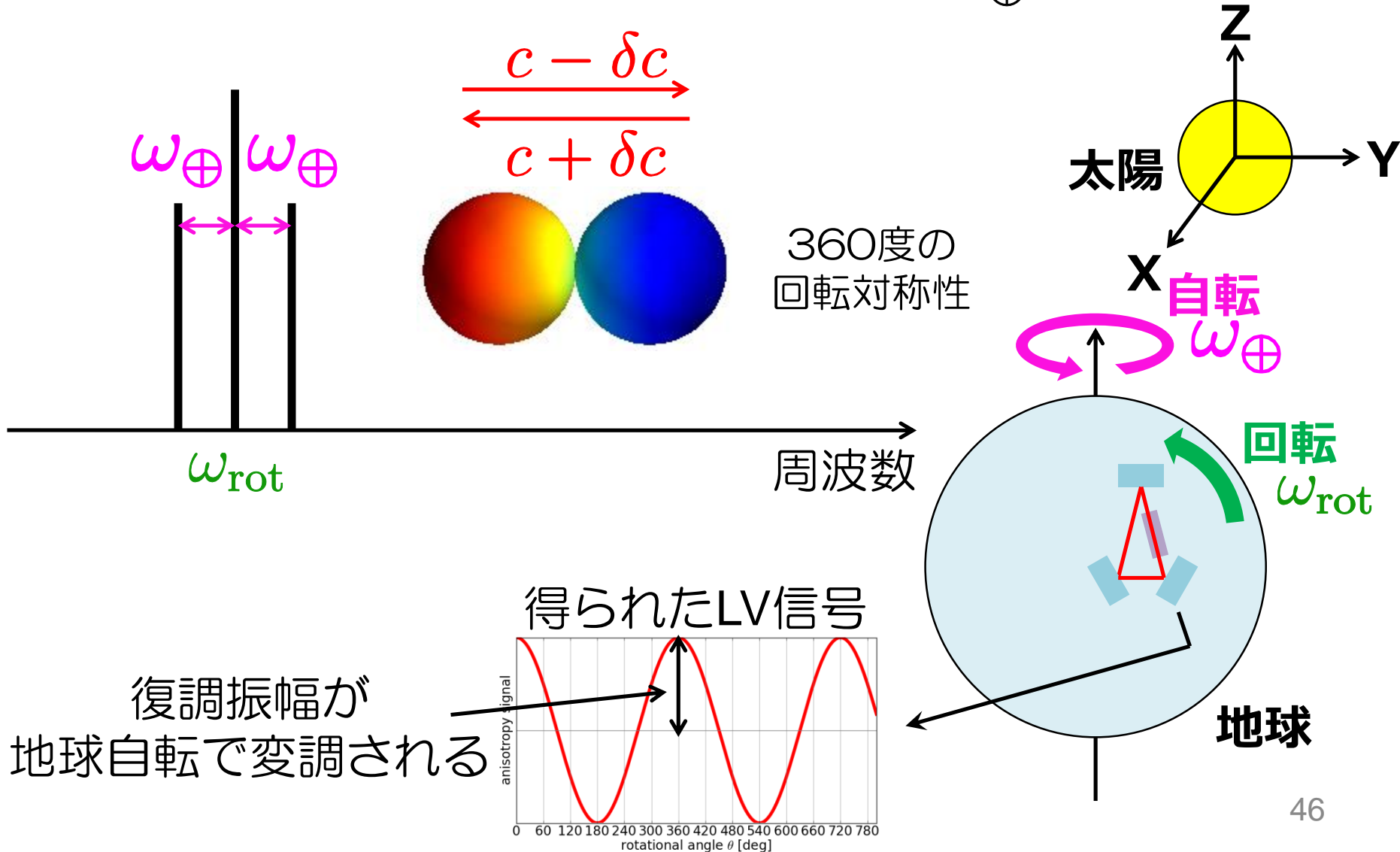
データ解析方法 (1/3)

- まず1回転分のデータを回転周波数 ω_{rot} で復調



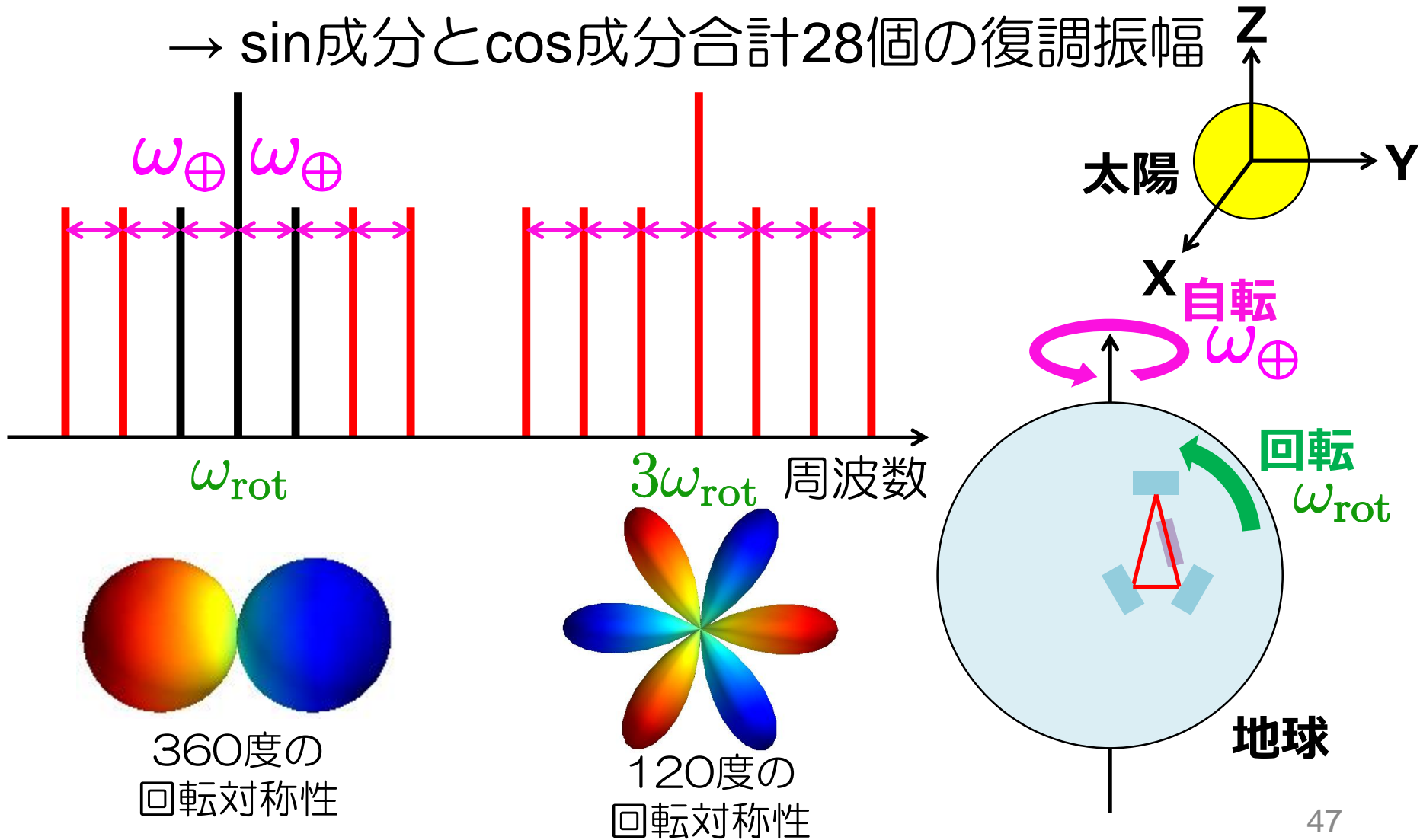
データ解析方法 (2/3)

- 次に1日分のデータを自転周波数 ω_{\oplus} で復調



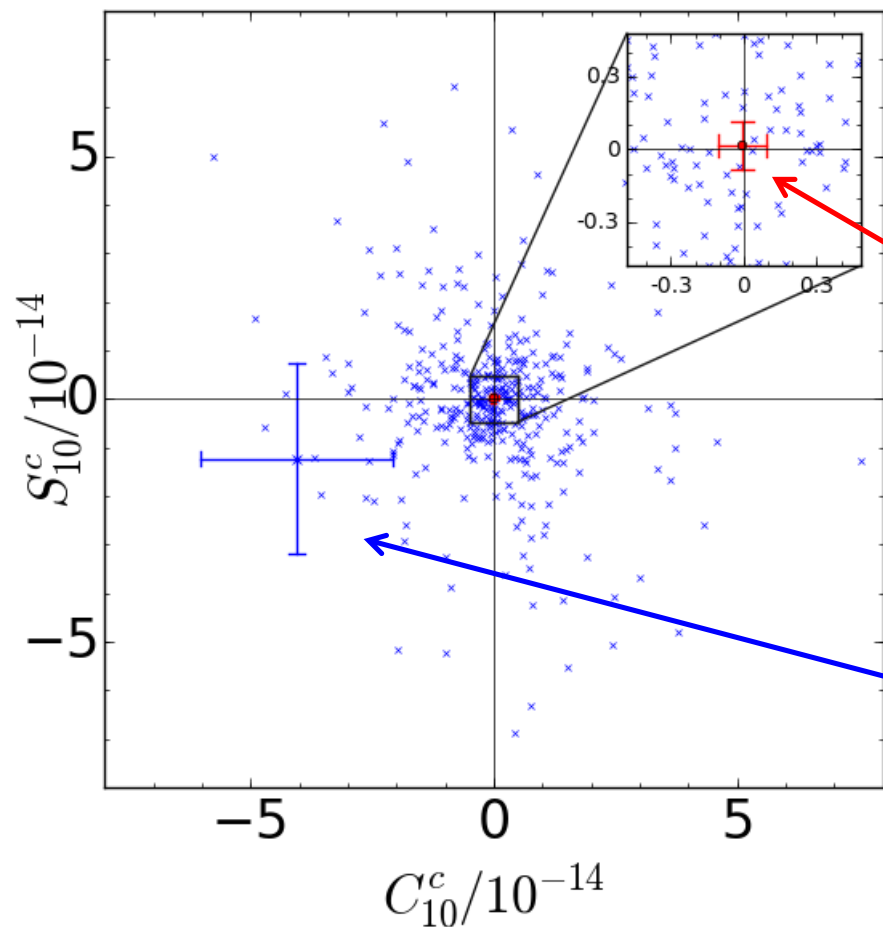
データ解析方法 (3/3)

- 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



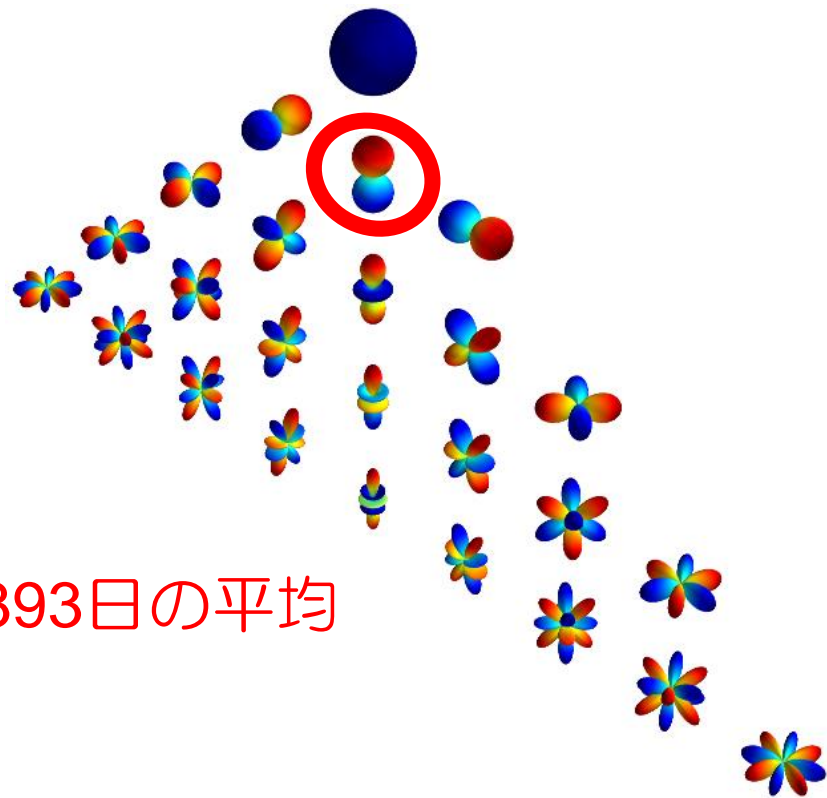
得られる復調振幅の例

- 原点からのずれの大きさが異方性の大きさを表す

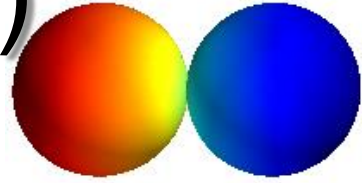


全393日の平均

1日分のデータ

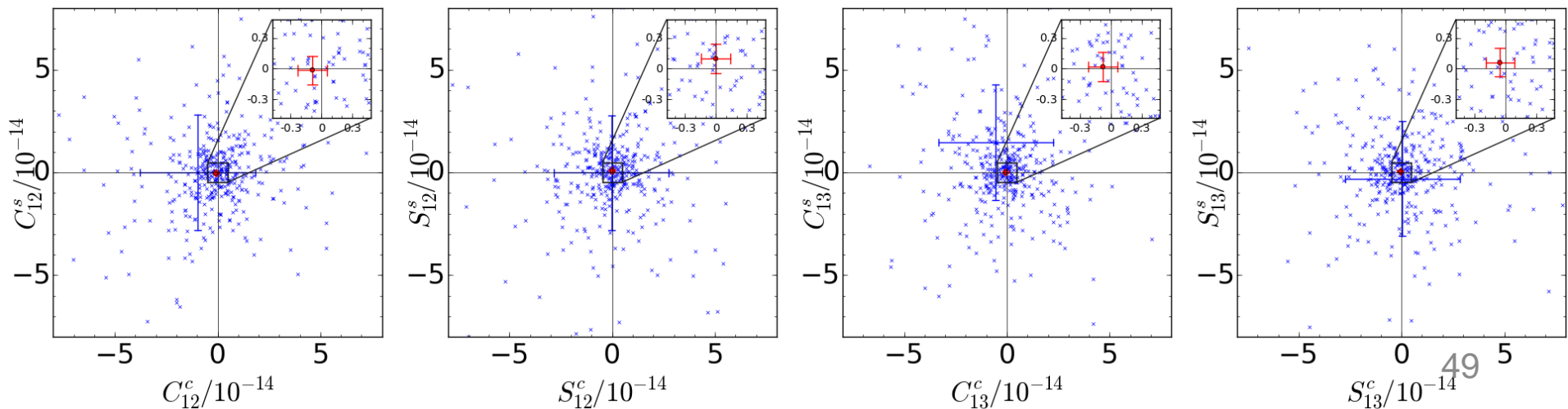
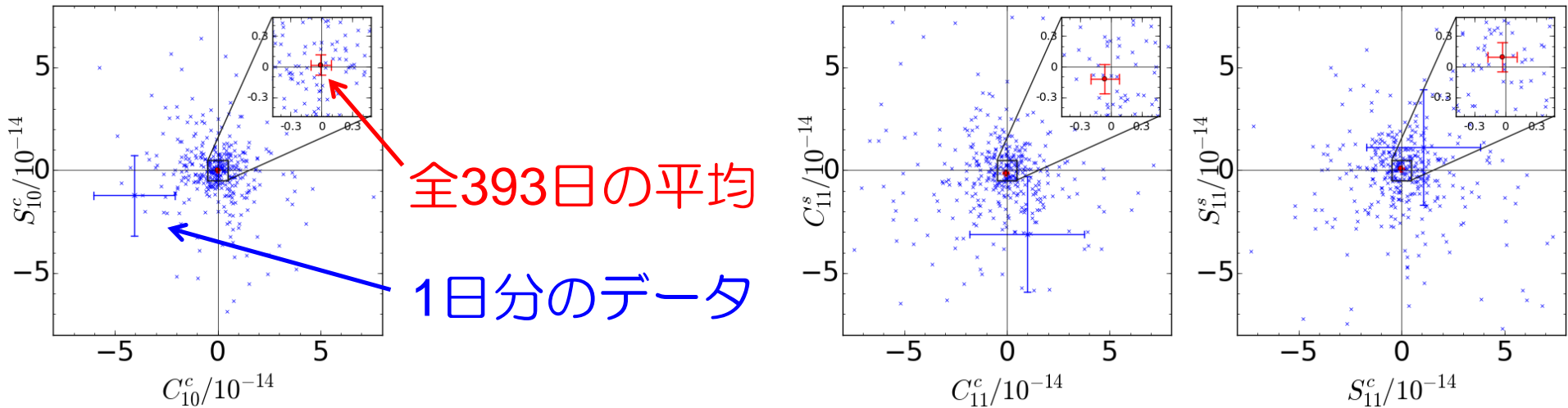


得られた復調振幅(ω_{rot})

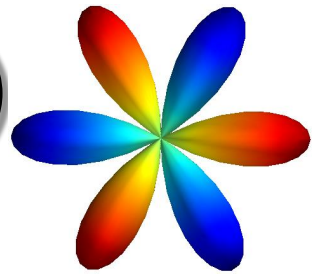


- 2σ でゼロと一致

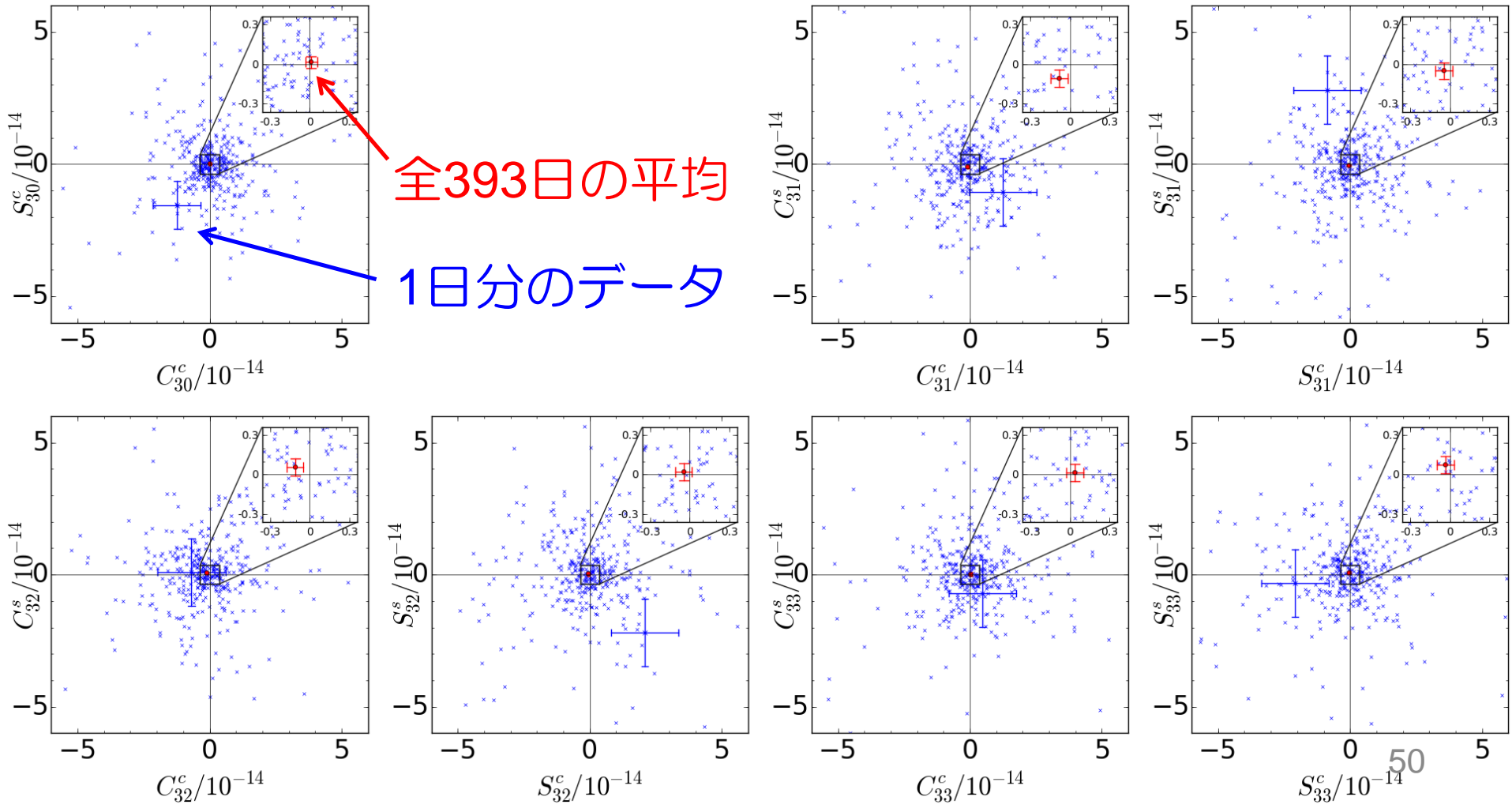
→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



得られた復調振幅($3\omega_{\text{rot}}$)

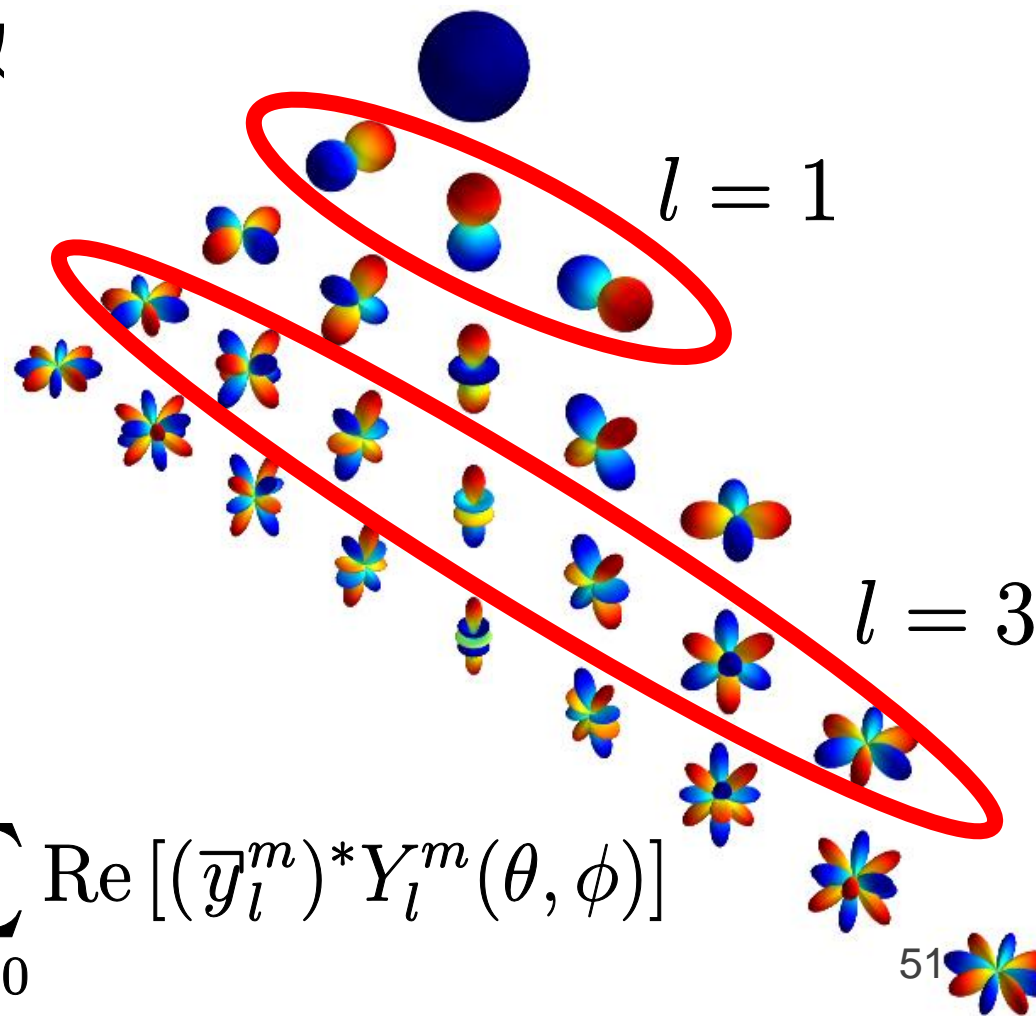


- 2σ でゼロと一致
→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



復調振幅から球面調和関数の係数

- 28個の復調振幅は係数 \bar{y}_l^m と結び付けられる
- $l = 1, 3$ を考えると実部と虚部
合わせて10個の係数



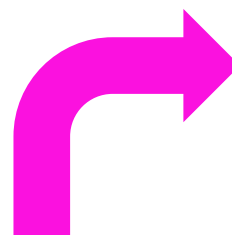
$$c(\theta, \phi) = 1 + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \operatorname{Re} [(\bar{y}_l^m)^* Y_l^m(\theta, \phi)]$$

球面調和関数の係数の測定値

- 28個の復調振幅から
10個の球面調和関数係数に

復調振幅 [10^{-15}]

m_r	m_\oplus	$C_{m_r m_\oplus}^C$	$C_{m_r m_\oplus}^S$	$S_{m_r m_\oplus}^C$	$S_{m_r m_\oplus}^S$
1	0	-0.1 ± 1.0	-	0.2 ± 1.0	-
1	1	-0.6 ± 1.4	-1.2 ± 1.4	-0.3 ± 1.4	1.0 ± 1.4
1	2	-0.9 ± 1.4	-0.2 ± 1.4	-0.1 ± 1.4	1.0 ± 1.4
1	3	-0.8 ± 1.4	0.2 ± 1.4	-0.5 ± 1.4	0.6 ± 1.4
3	0	0.12 ± 0.46	-	0.15 ± 0.46	-
3	1	-0.79 ± 0.64	-1.1 ± 0.65	-0.48 ± 0.64	-0.51 ± 0.65
3	2	-1.1 ± 0.65	0.57 ± 0.65	-0.46 ± 0.65	0.21 ± 0.65
3	3	0.40 ± 0.65	0.16 ± 0.65	-0.36 ± 0.64	0.75 ± 0.65

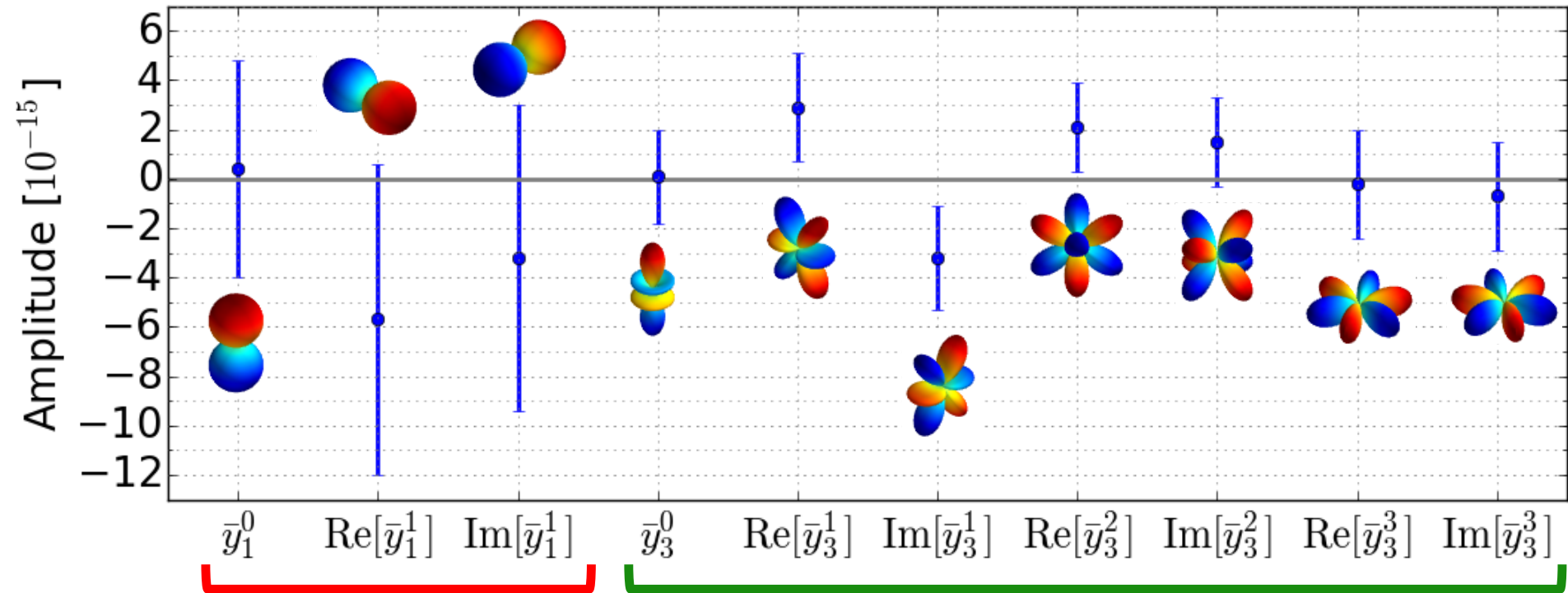


Coefficient	Measurement
\bar{y}_1^0	0.4 ± 4.4
$\text{Re}[\bar{y}_1^1]$	-5.7 ± 6.3
$\text{Im}[\bar{y}_1^1]$	-3.2 ± 6.2
\bar{y}_3^0	0.1 ± 1.9
$\text{Re}[\bar{y}_3^1]$	2.9 ± 2.2
$\text{Im}[\bar{y}_3^1]$	-3.2 ± 2.1
$\text{Re}[\bar{y}_3^2]$	2.1 ± 1.8
$\text{Im}[\bar{y}_3^2]$	1.5 ± 1.8
$\text{Re}[\bar{y}_3^3]$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

係数 [10^{-15}]

球面調和関数の係数の測定値

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



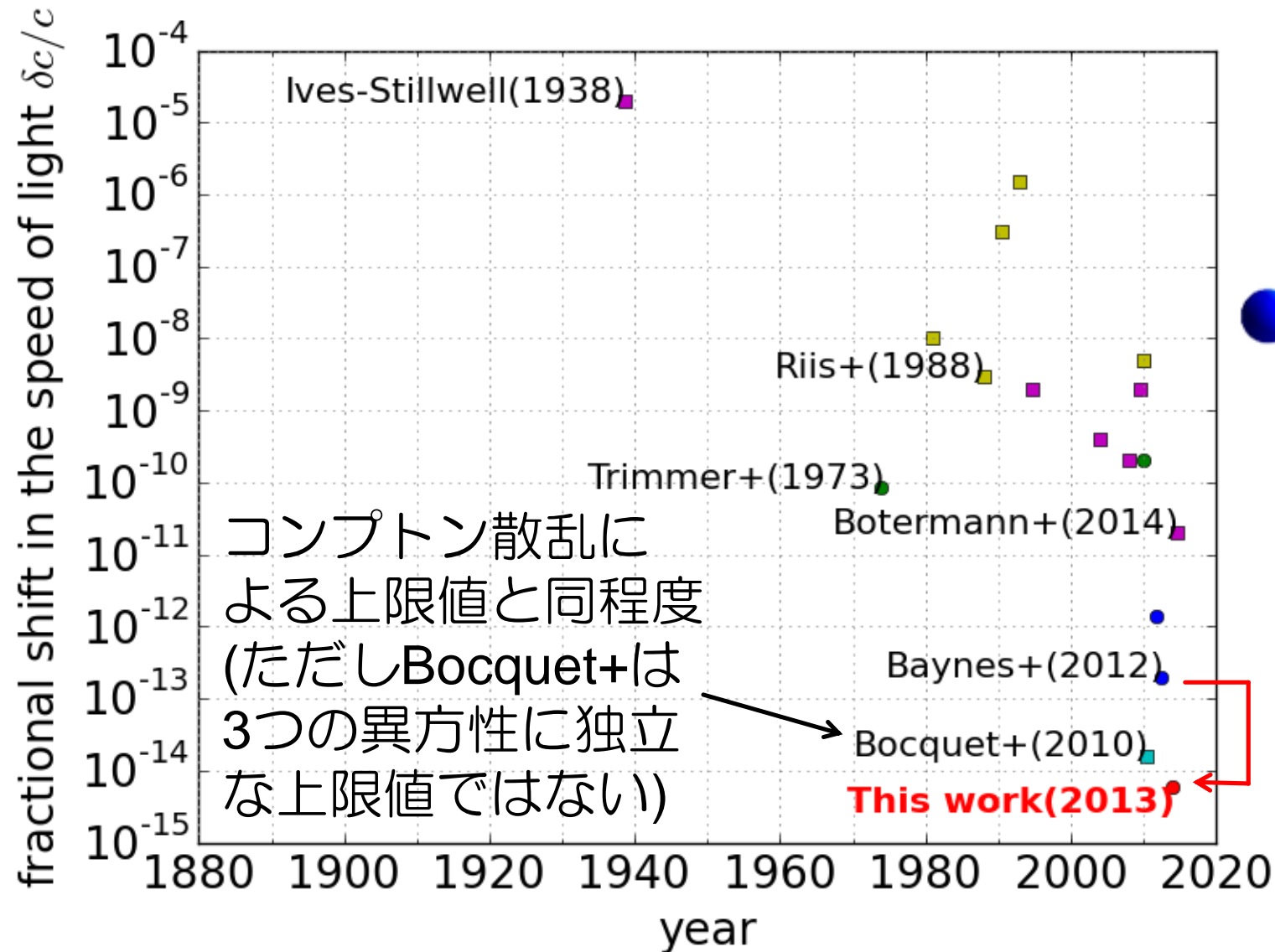
$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 6 \times 10^{-15}$$

(世界新)

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

(世界初)

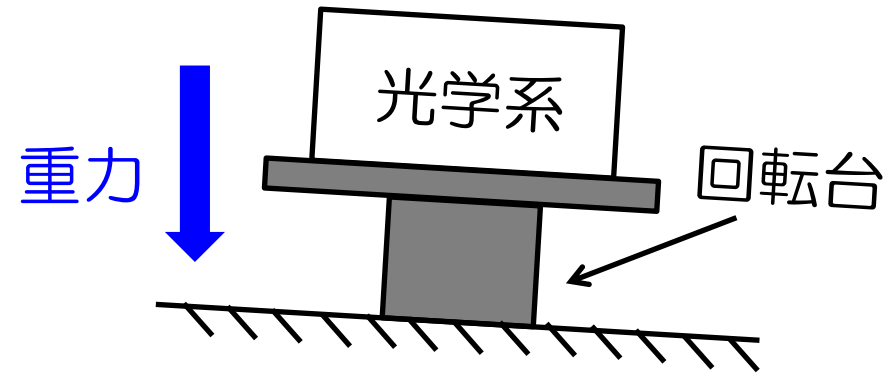
先行研究との比較



1桁以上更新

系統的な不確かさの見積もり

- 最大でも統計的不確かさの10%程度



原因	量	割合	
Sagnac効果	$< 1 \text{ mrad/sec}$	$< 2\%$	オフセットを生じるもの
回転台の傾き	$< 0.2 \text{ mrad}$	$< 10\%$	
共振器の離調	-	3%	校正の不確かさ
伝達関数測定	-	3%	
レーザー周波数変調効率測定	$12.9 \pm 0.6 \text{ MHz/V}$	5%	
シリコンの屈折率	3.69 ± 0.01	0.4%	
共振器長	$192 \pm 1 \text{ mm}$	0.5%	

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⁻² の次元

↑

8次のLV項

質量次元 8
+4階の微分
M⁻⁴ 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

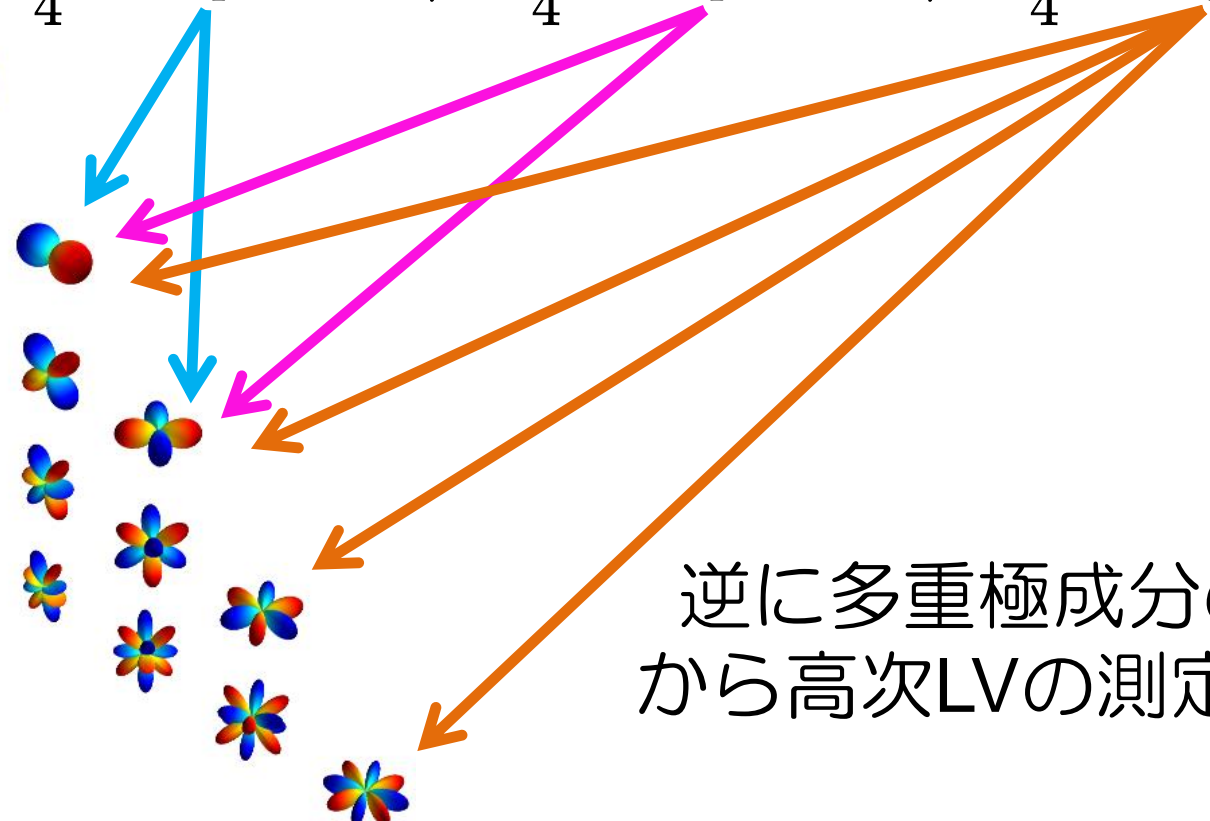
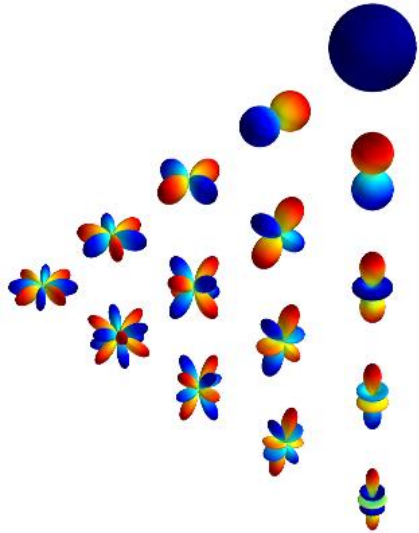
SM

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

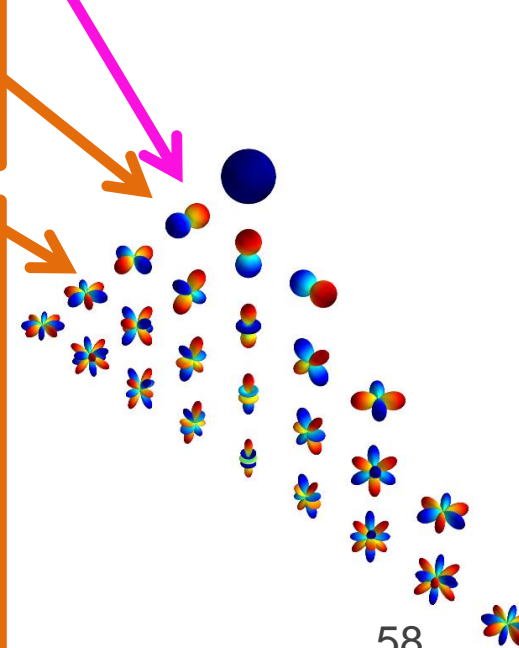
高次LVへの上限值

- $d = 6$ の奇パリティ成分へ 10^3 GeV^{-2} の上限値
- $d = 8$ の奇パリティ成分へ 10^{19} GeV^{-4} の上限値

(世界初)

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

カモフラージュ係数
 $(\bar{c}_F^{(d)})_{njm}^{(0E)}$



先行研究との比較

- これまでは偶パリティ成分への上限值しかなかった

$d = 6$ の偶パリティ成分への上限值 $\sim 10^8 \text{ GeV}^{-2}$

$d = 8$ の偶パリティ成分への上限值 $\sim 10^{33} \text{ GeV}^{-4}$

S. R. Parker+, Phys. Rev. Lett. **106**, 180401 (2011)

- これに比べると

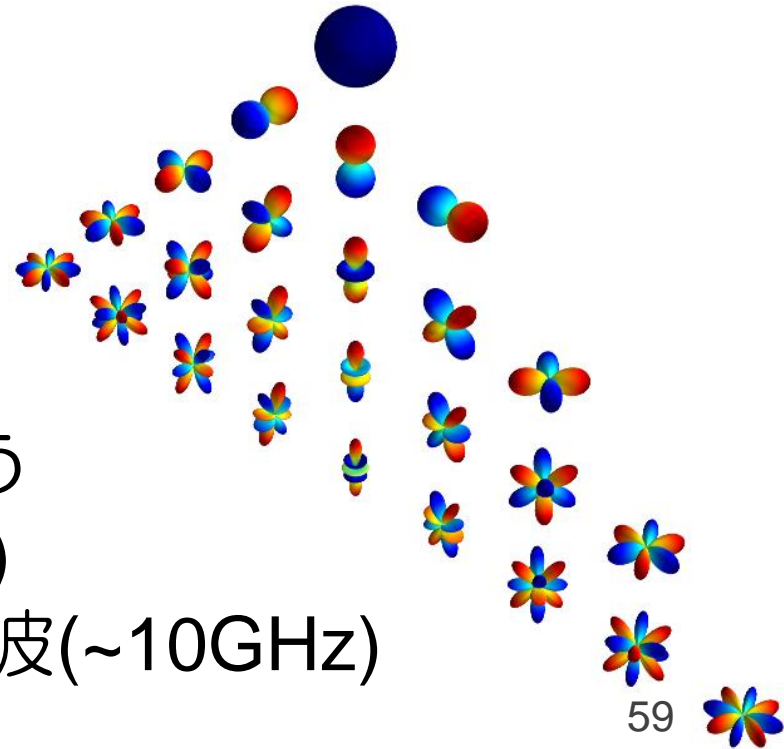
$d = 6$ は **6桁の更新**

$d = 8$ は **14桁の更新**

- 用いた電磁波の周波数が違う

本実験は赤外光 ($\sim 200 \text{ THz}$)

Parker+(2011)はマイクロ波 ($\sim 10 \text{ GHz}$)



LVエネルギースケールへの上限值

- LVが起こるエネルギースケールを M_* とすると、高次LVは $M_*^{(4-d)}$ で小さくなっていくはず
- 今回の結果は
 $M_* \gtrsim 0.03 \text{ GeV}$ ということを示唆
- c.f. Planckエネルギー: 10^{19} GeV
電弱のエネルギー: 10^2 GeV

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



$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}^{(4)} + \frac{1}{M_*^2}\mathcal{L}^{(6)} + \frac{1}{M_*^4}\mathcal{L}^{(8)} + \dots$$

5. 結論

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
1年間に渡る探索

- 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)

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

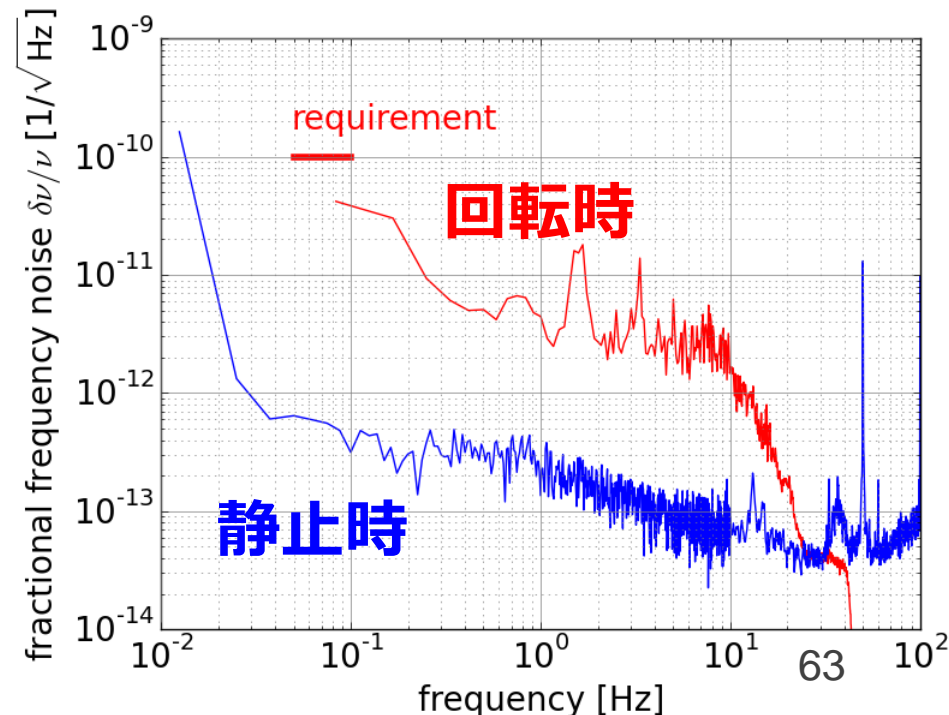
$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 2 \times 10^{-15}$$

- 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

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

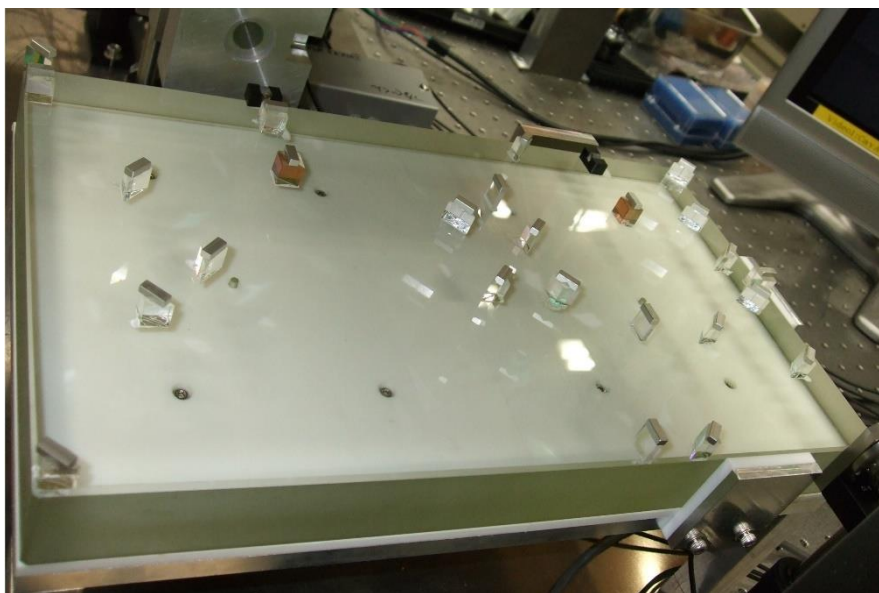
今後の展望

- Planckスケールで規格化された電弱スケール
 $\delta c/c \sim 10^{-17}$ に到達するには2桁の精度向上が必要
- 回転に起因する振動からの雑音の低減が必要
→ 回転台の改善 (より大きく、など)
光学系の改善 (モノリシック光学系など)
- 傾きに起因する系統的
不確かさの低減が必要
→ 2 urad以下
(傾き制御の導入
で十分実現可能)

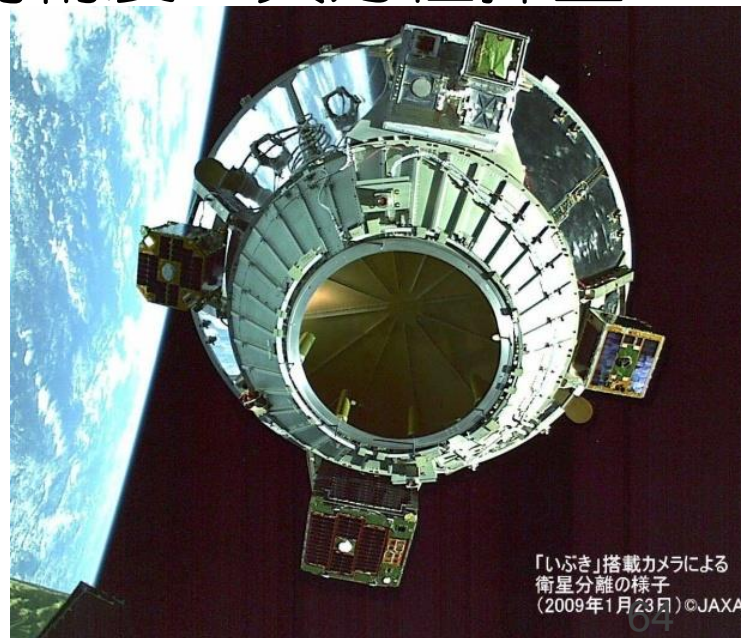


将来計画

- 原理的な雑音レベル(散射雑音、熱雑音)に到達すれば $\delta c/c \sim 10^{-20}$ も可能
 - 入射パワー 1 mW
 - フィネス 120
 - 温度 300 K のままで可能
- 衛星搭載などにより、より高精度の異方性探査



モノリシック光学系



「いぶき」搭載カメラによる
衛星分離の様子
(2009年1月23日) ©JAXA

補足スライド

拡張標準理論詳細

- SMEにおける光子のLagrangian密度

$$\mathcal{L}_{\text{photon}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}\epsilon^{\kappa\lambda\mu\nu}A_\lambda(\hat{k}_{AF})_\kappa F_{\mu\nu} - \frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F)^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu}$$

CPT対称性破る項

- CPT対称性を破る項を無視、真空の複屈折を無視

$$\mathcal{L}_{\text{photon}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{2}F_{\kappa\rho}(\hat{c}_F)^{\mu\nu}F_\nu^\rho$$

スカラー
ポテンシャル

← $(\hat{c}_F)^{\mu\nu} = \partial^\mu \partial^\nu \hat{\Phi}_F$

- スカラーポテンシャルを球面調和関数展開

$$\hat{\Phi}_F = \sum_{djlm} \omega^{d-2-j} p_0^j Y_l^m(\hat{\mathbf{p}}) (c_F^{(d)})_{jlm}^{(0E)}$$

- 真空中の分散を無視

$$\tilde{\Phi}_F = \sum_{djlm} \omega^{d-4-j} p_0^j Y_l^m(\hat{\mathbf{p}}) (\bar{c}_F^{(d)})_{jlm}^{(0E)}$$

今回測定する係数

光子の運動量ベクトル

Lorentz不変性の破れの示唆

- 量子重力理論
 - e.g. Hořava-Lifshitz gravity
- 非可換場の理論
- 時間変化する結合定数
 - 時間・空間依存性があってもおかしくない
 - LVやCPT対称性の破れと関連があるかも
- 超弦理論
 - 空間の最小単位
- 多元宇宙論、ブレーン宇宙論
- GZK限界を超える高エネルギー宇宙線の発見
- ダークマター、ダークエネルギー
 - 一般相対論を超える重力理論が必要

Hořava Gravity

- 場の量子論の紫外発散の問題を解決する方法の一つ P. Hořava, Phys. Rev. D **79**, 084008 (2009)

- 重力のLagrangianに高階微分の項を加える

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}^{(4)} + \frac{1}{M_*^2} \mathcal{L}^{(6)} + \frac{1}{M_*^4} \mathcal{L}^{(8)} + \dots$$

- 摂動可能にするためには

$$M_* \lesssim 10^{16} \text{ GeV}$$

A. Papazoglou & T. P. Sotiriou, Phys. Lett. B **685**, 197 (2010)

- 近距離重力実験から

$$M_* \gtrsim 10^{-12} \text{ GeV}$$

C. M. Will, Living Rev. Relativity **9**, 3 (2006)

J.C. Long & V. A. Kostelecký, arXiv:1412.8362

非可換幾何学

- 一般相対性理論はリーマン幾何学に基づく
- 超弦理論は非可換幾何学に基づく？

$$[x^\mu, x^\nu] = iL_{\text{NC}}^2 \theta^{\mu\nu}$$

→ Lorentz 不変性を破る

- 特徴的な長さスケールを L_{NC} とすると

$$\left(\frac{L_{\text{NC}}}{\hbar c} \right)^{d-4} = \left(\frac{L_{\text{NC}}}{2 \times 10^{-16} \text{ GeV} \cdot \text{m}} \right)^{d-4}$$

程度の LV が期待される

- 大きな余剰次元シナリオでは $1\text{e-}19 \text{ m}$ 程度 (1 TeV 程度) かもしれない

その他のLorentz不変性検証

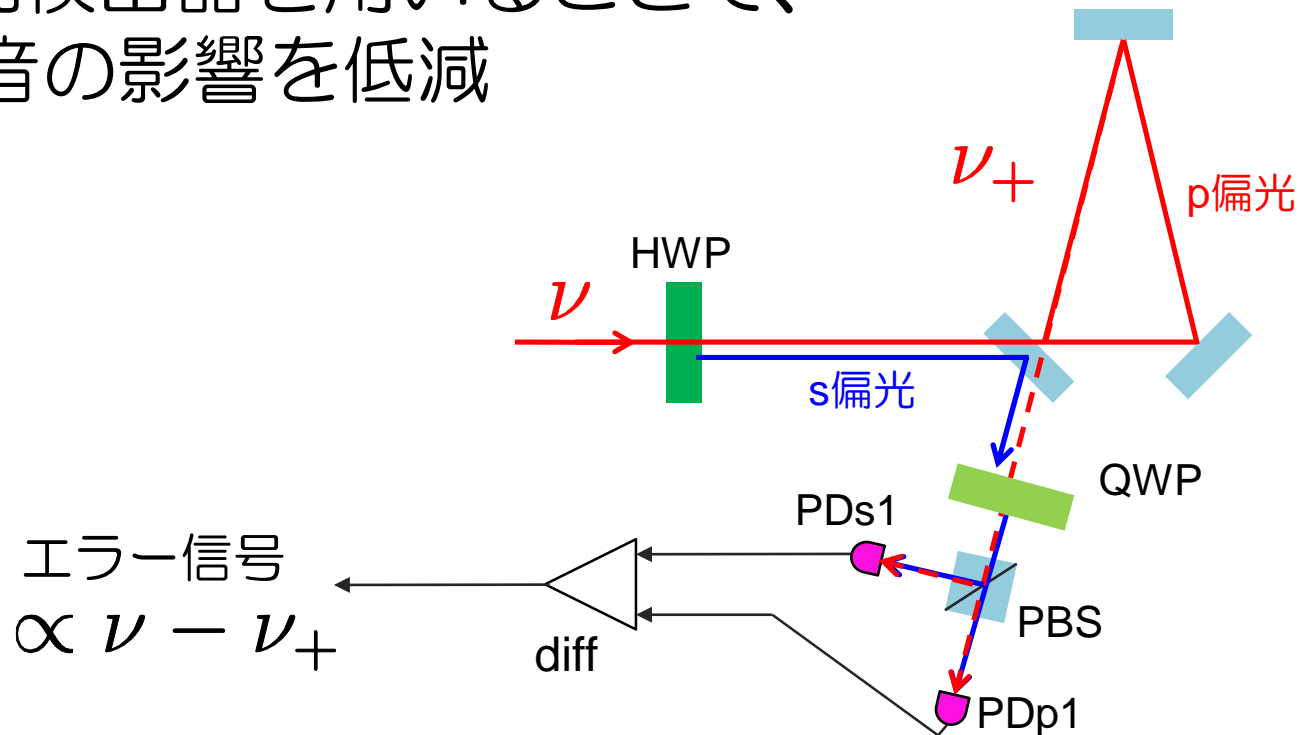
- 真空の分散、複屈折
ガンマ線バーストの観測
- 重力逆二乗則の検証
Lunar Laser Ranging、連星の軌道発展、
近距離重力
- ニュートリノ混合角、速度
Double Chooz、MINOS、IceCube、制動放射
ニュートリノ振動は質量なくてもLVあれば起こる
- 陽子、中性子、電子
メスバウアー効果、核磁気共鳴、
スピン結合の異方性
- 粒子・反粒子比較によるCPT対称性の破れ探査
CPT対称性の破れはLorentz不変性の破れを意味する

実験装置の設計

- フィネス、入射パワー
散射雑音が効かないように設計(目標の6桁下)
フィネスが高すぎても制御しにくい
- レーザー強度雑音
測定したところ、安定化不要だった
- 共振器構成
共振器が長い方が原理的には振動が効きにくい
が、長い方が振動感度が高い
→ 後者を優先し、なるべくコンパクトに
- 温度安定化
測定したところ、CMRR1/100なら効かなかった

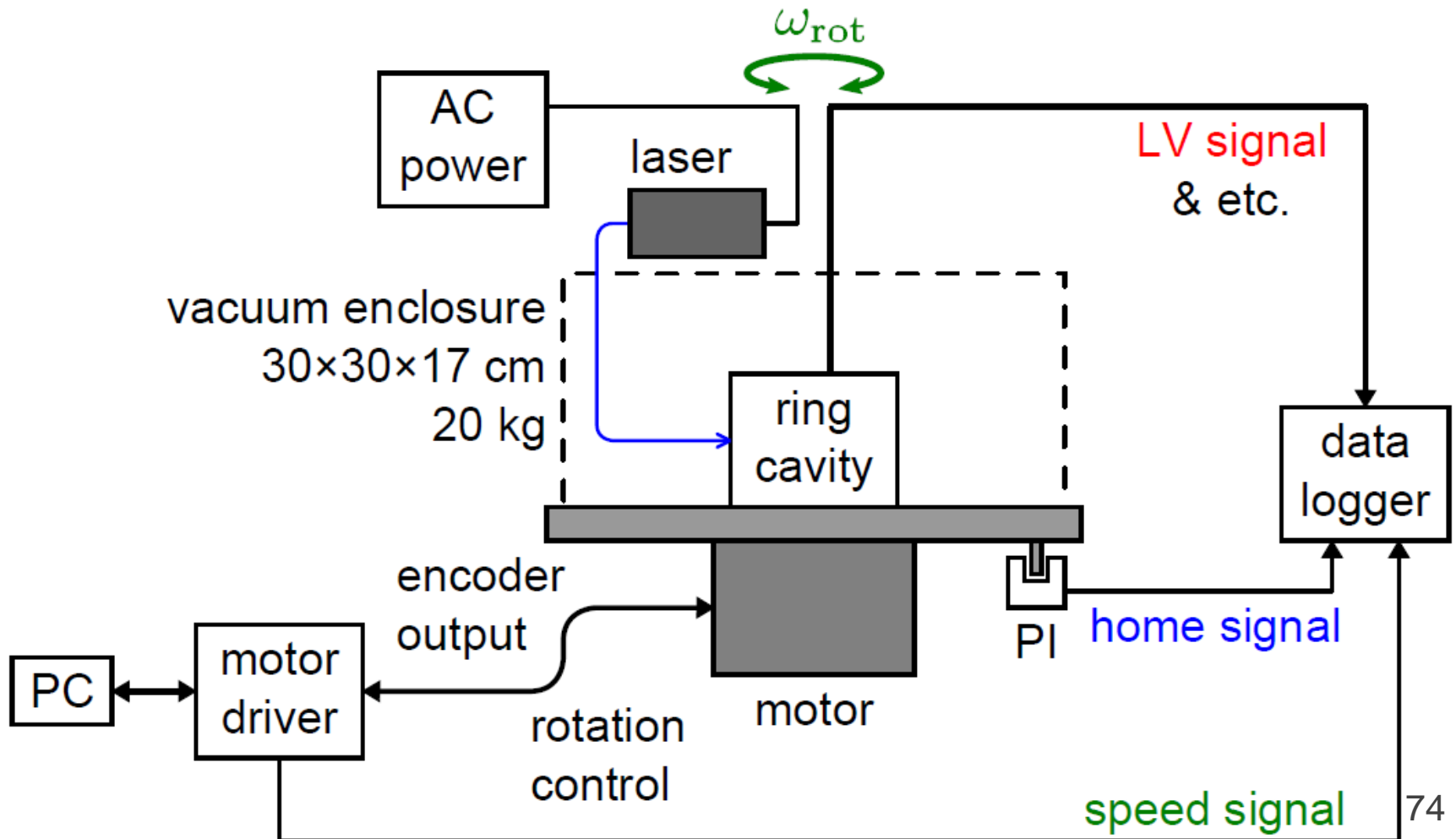
偏光解析法の原理

- 三角形リング共振器の偏光選択性を利用
p偏光が共振時はs偏光が非共振
- 反射光に含まれるs偏光とp偏光の干渉から、
共振周波数と入射光周波数の差がわかる
- 2つの光検出器を用いることで、
強度雑音の影響を低減



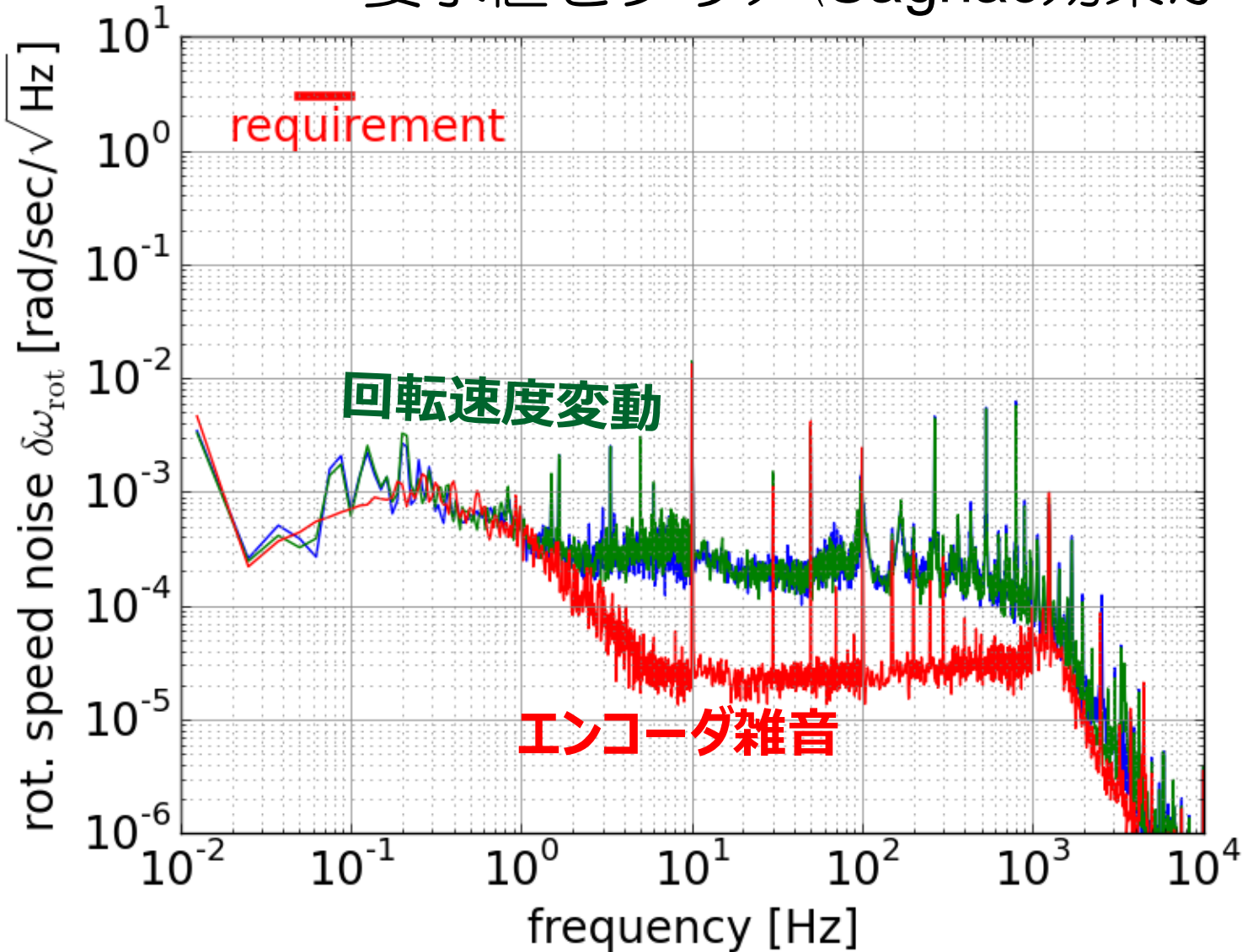
回転機構

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



回転速度変動

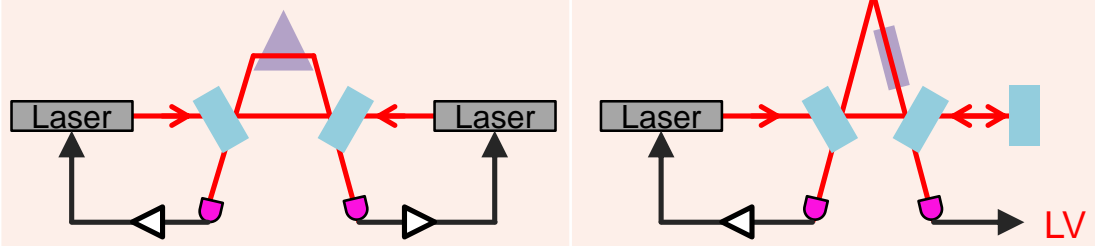
- 要求値をクリア (Sagnac効果からくる)



Baynes+(2012)との比較

	Baynes+	Michimura+
上限値	2×10^{-13}	6×10^{-15}
光学系構成	シングルパス	ダブルパス
同相雑音除去	○	○
媒質	UV融解石英 $n = 1.44$	シリコン $n = 3.69$
装置の回転とデータ取得	180°回転毎にデータ取得	360°回転中連続的にデータ取得
観測日数	50日 (6.1e3回転)	369日 (1.7e6回転)

単純化



4倍得
高次へ
感度

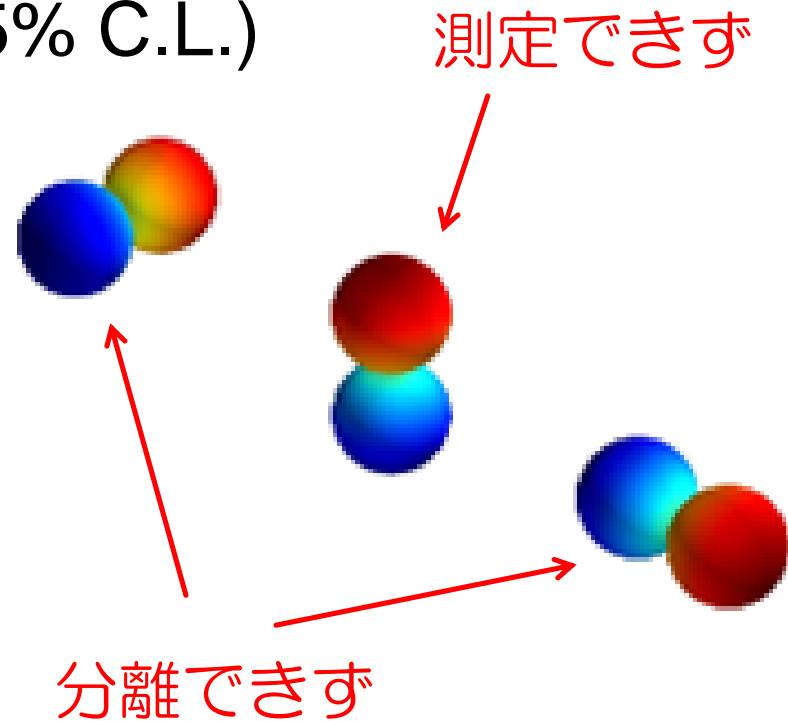
データ多

Bocquet+(2010)との比較

- コンプトンエッジのエネルギーが地球自転に伴って変化しないことから上限値

$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| < 1.6 \times 10^{-14} \text{ (95\% C.L.)}$$

- 変化の位相まで見ていないため、2方向の片道光速の異方性を分離できていない
- 装置回転を行っていないため、Z軸方向の異方性を測定できない

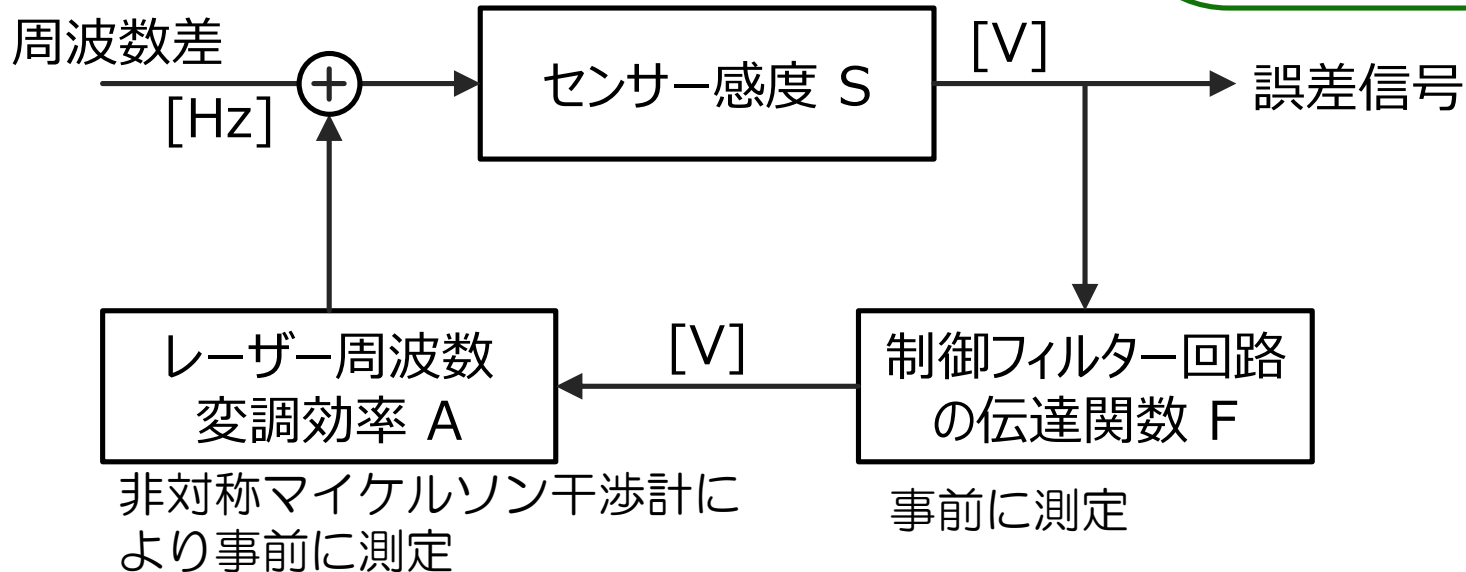
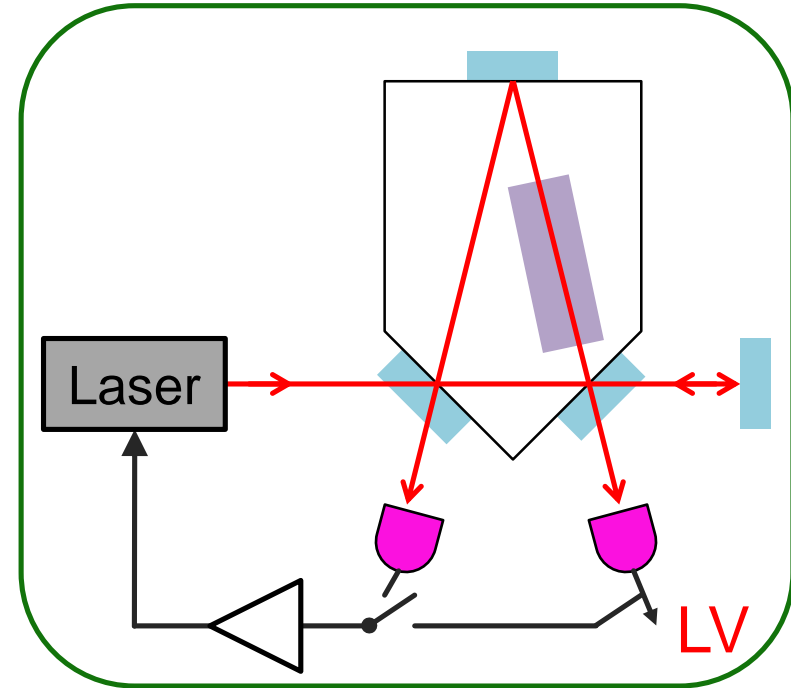


その他の系統誤差

- 環境磁場によるシリコンの屈折率変化
両回りの共振周波数の差は生まない
- 重力赤方偏移の影響
計量が変わるだけなので、原理的に共振周波数をずらさない

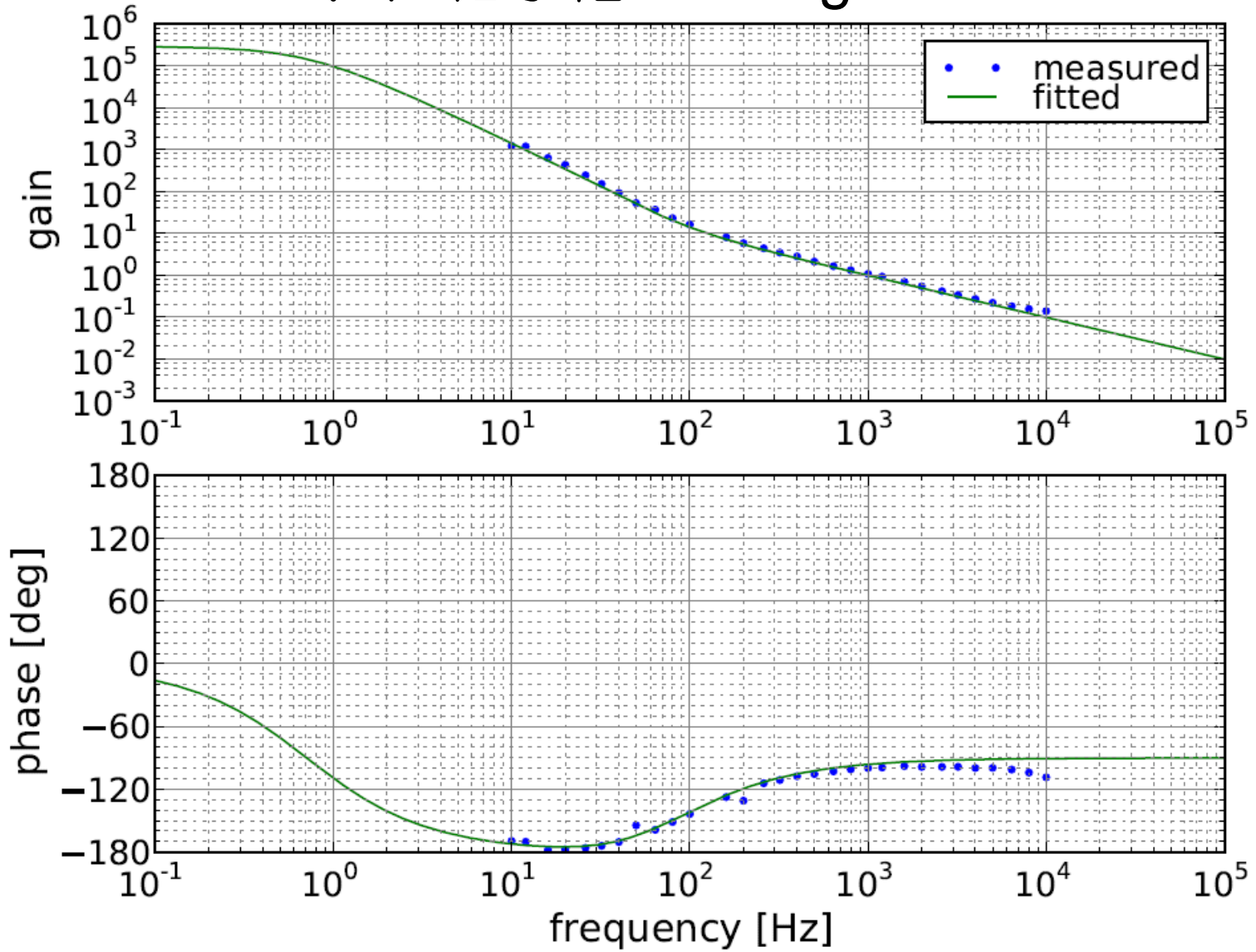
較正の方法

- 伝達関数測定により行う
- AとFは事前に測定
- $G=SFA$ はオープンループ伝達関数測定により測定
→ Sがわかる



オープンループ伝達関数

- UGF: 1 kHz、位相余裕: 80 deg



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