

# 光リング共振器を用いた Lorentz不変性検証 (3)

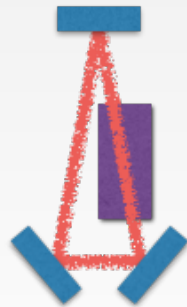
---

東大理<sup>A</sup>, 国立天文台<sup>B</sup>

酒井 譲<sup>A</sup>, 武田紘樹<sup>A</sup>, 道村唯太<sup>A</sup>, 安東正樹<sup>A,B</sup>

# 概要

- 光リング共振器を用いてLorentz不変性を検証  
特に、**片道光速の異方性**を探查
- さらなる感度向上を目指して、1年間の測定で世界最高精度( $|\delta c/c| \lesssim 6 \times 10^{-15}$ )を記録した**装置を改良**
- 現在の感度を評価するため、**7日間異方性探查**を行った
  - 先行研究とほぼ同じ精度を達成
  - 1年間の測定で**最高精度を約5倍更新**できる見込み



$$c(\theta, \phi)$$
$$c(\pi - \theta, \pi + \phi)$$



# 目次

---

1. イントロダクション
2. 装置の改良
3. 7日間の異方性探査
4. まとめ

# 1-1 実験の目的

＜ 特殊相対性理論の2つの原理 ＞

光速不変の原理：光速はLorentz変換のもとで不変

特殊相対性原理：物理法則はLorentz変換のもとで共変

Lorentz不変性は宇宙の基本的な対称性の1つ

しかし！

量子重力理論の研究[1]、宇宙マイクロ波背景放射の観測[2]

⇒ Lorentz不変性が破れている可能性を示唆

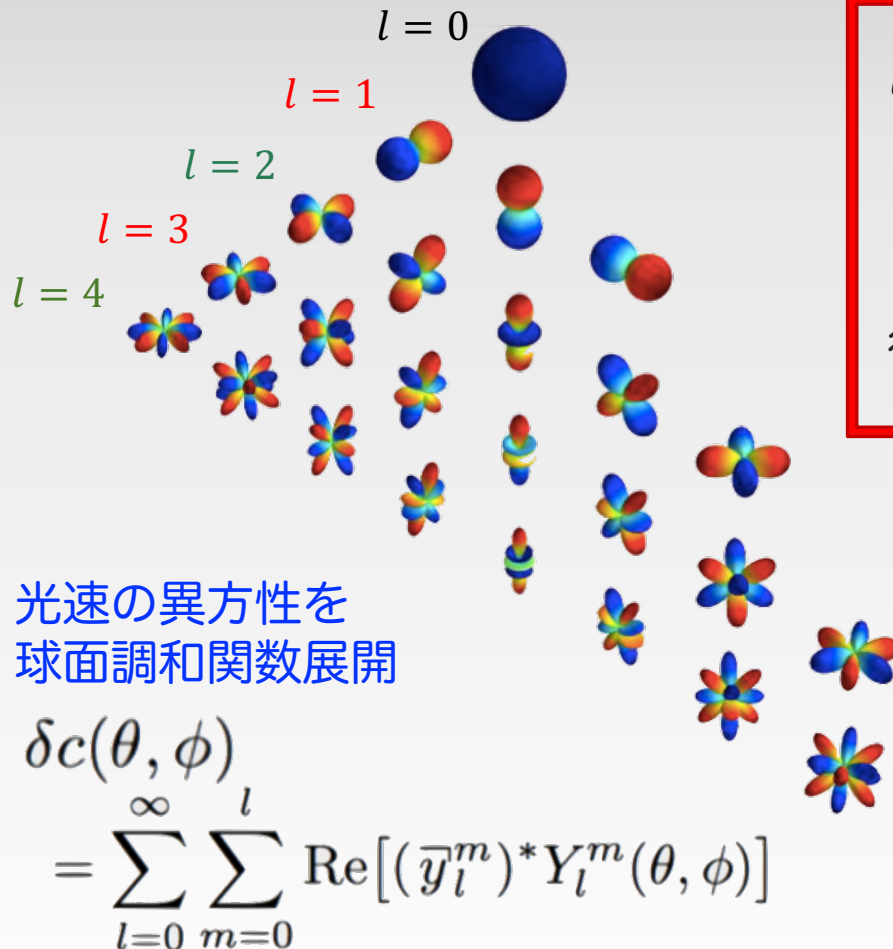


より高い精度で、実験的にLorentz不変性を検証したい

[1] V. A. Kostelecky' & S. Samuel, PRD **39**, 683 (1989). [2] C. H. Lineweaver *et al.*, Astrophys. J. **470**, 38 (1996).

# 1-2 光速の異方性

➤ Lorentz不変性の破れの検証 → 光速の異方性を調べる



$l = 1, 3, \dots$  : 片道光速の異方性

$$c(\theta, \phi) \neq c(\pi - \theta, \pi + \phi)$$

行き帰りの光速差

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

Y. Michimura+ (2013)

$l = 2, 4, \dots$  : 往復光速の異方性

$$c(\theta, \phi) = c(\pi - \theta, \pi + \phi)$$

直交方向の  
光速差

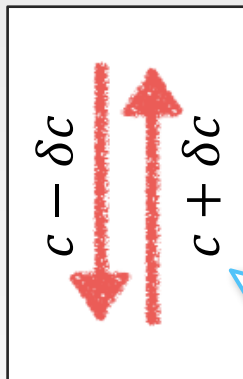
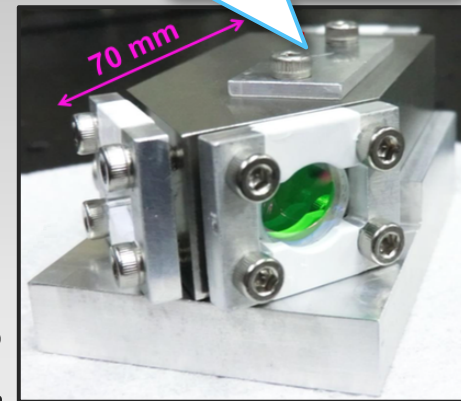
$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 1 \times 10^{-18}$$

M. Nagel+ (2015)

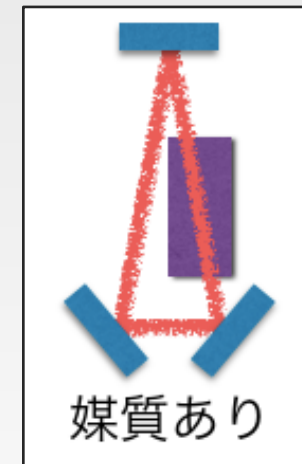
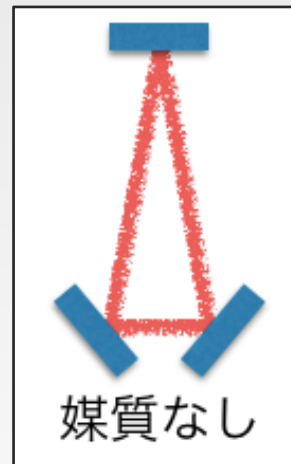
# 1-3 測定原理

- 光路の一部に媒質(シリコン/ $n = 3.69$ )を入れた非対称光リング共振器
- 片道光速の異方性がある場合
  - ⇒ 両周りの共振周波数 ( $\nu_{L/R}$ ) が逆方向にずれる
  - ⇒ 両周りの共振周波数の差 ( $\nu_L - \nu_R \propto \delta c$ ) を測定

この中にシリコンブロック

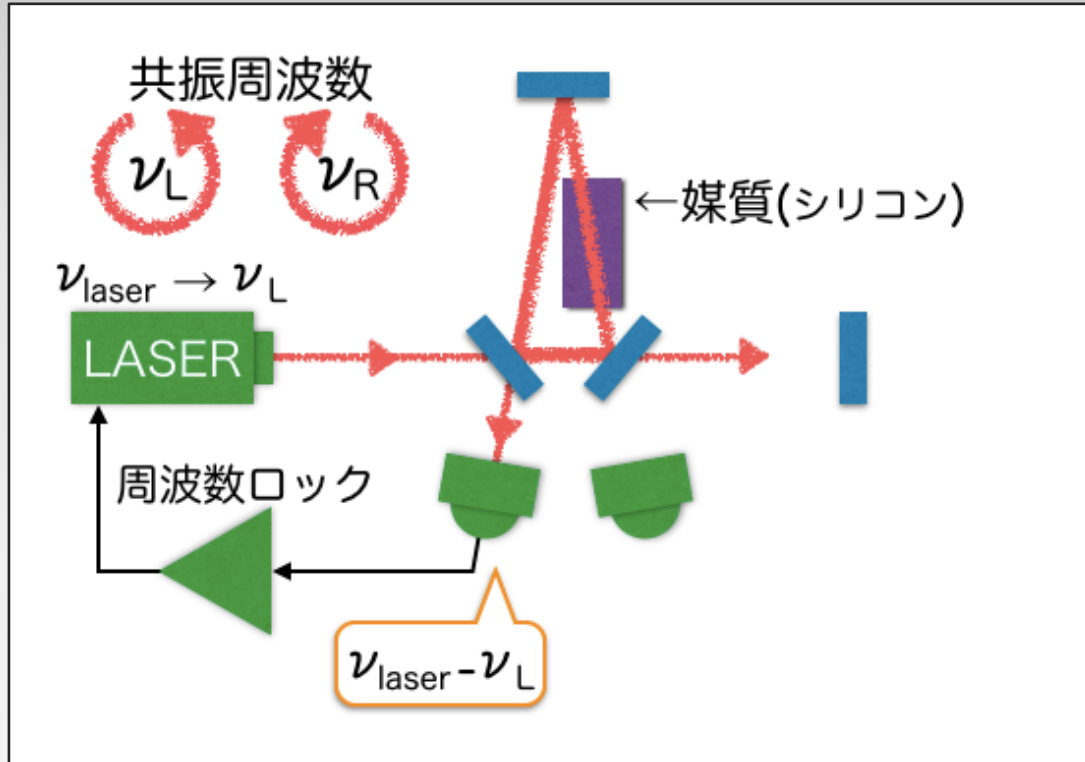


片道光速の異方性がある場合



|           |                 |                           |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 左回りの共振周波数 | $\nu_L = \nu_0$ | $\nu_L = \nu - \delta\nu$ |
| 右回りの共振周波数 | $\nu_R = \nu_0$ | $\nu_R = \nu + \delta\nu$ |

# 1-4 共振周波数の差の測定



- ① 左回りの光  
 … 共振状態にロック  
 (レーザー周波数  $\nu_{\text{laser}} \rightarrow \nu_L$ )



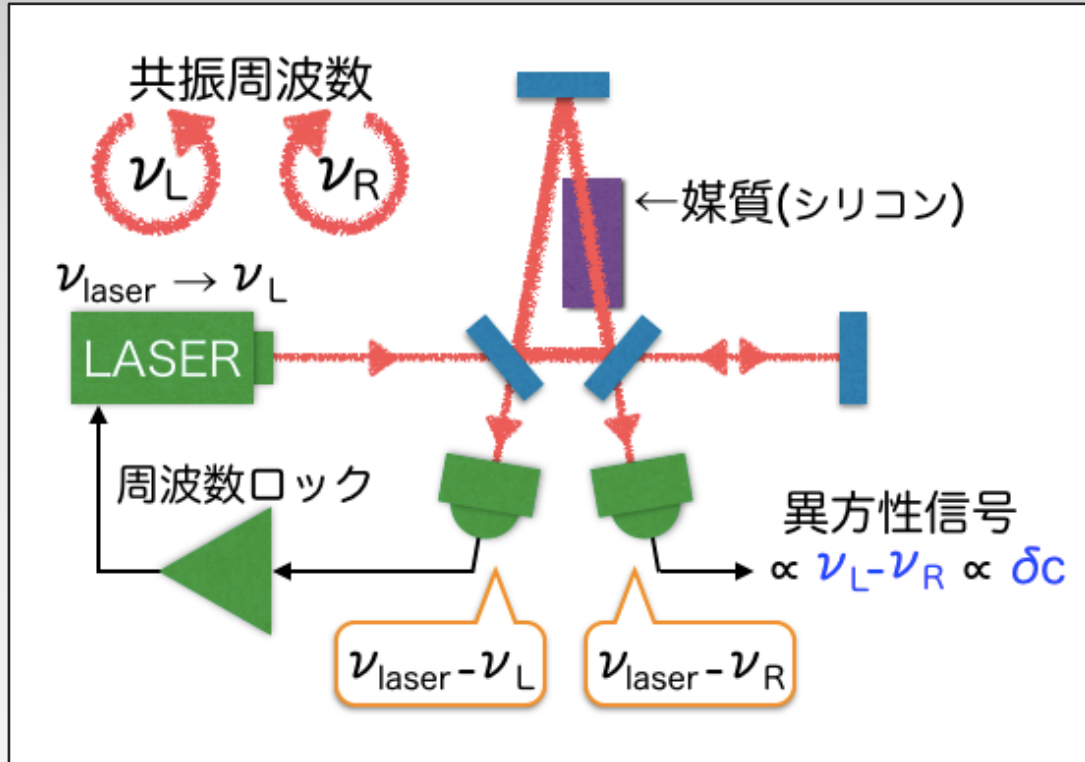
透過光を再び共振器へ



- ② 右回りの光  
 … 共振からのずれを測定  
 $\propto \nu_L - \nu_R \propto \delta c$   
 = 異方性信号

- ③ 装置全体を水平方向に回転させて、異方性信号を変調  
 $\Rightarrow$  異方性は装置の回転周波数に現れる

# 1-4 共振周波数の差の測定



## ① 左回りの光

… 共振状態にロック  
(レーザー周波数  $\nu_{\text{laser}} \rightarrow \nu_L$ )



透過光を再び共振器へ

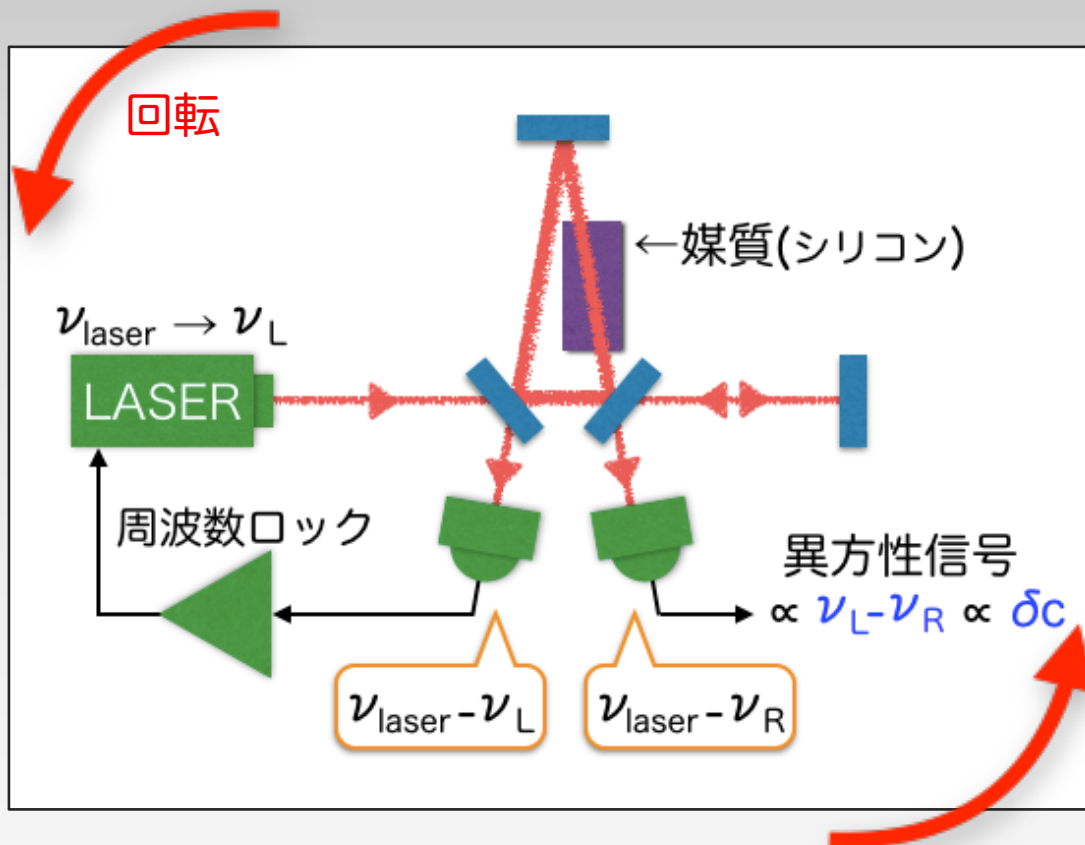


## ② 右回りの光

… 共振からのずれを測定  
 $\propto \nu_L - \nu_R \propto \delta C$   
= 異方性信号

③ 装置全体を水平方向に回転させて、異方性信号を変調  
⇒ 異方性は装置の回転周波数に現れる

# 1-4 共振周波数の差の測定



- ① 左回りの光  
 ... 共振状態にロック  
 (レーザー周波数  $\nu_{\text{laser}} \rightarrow \nu_L$ )

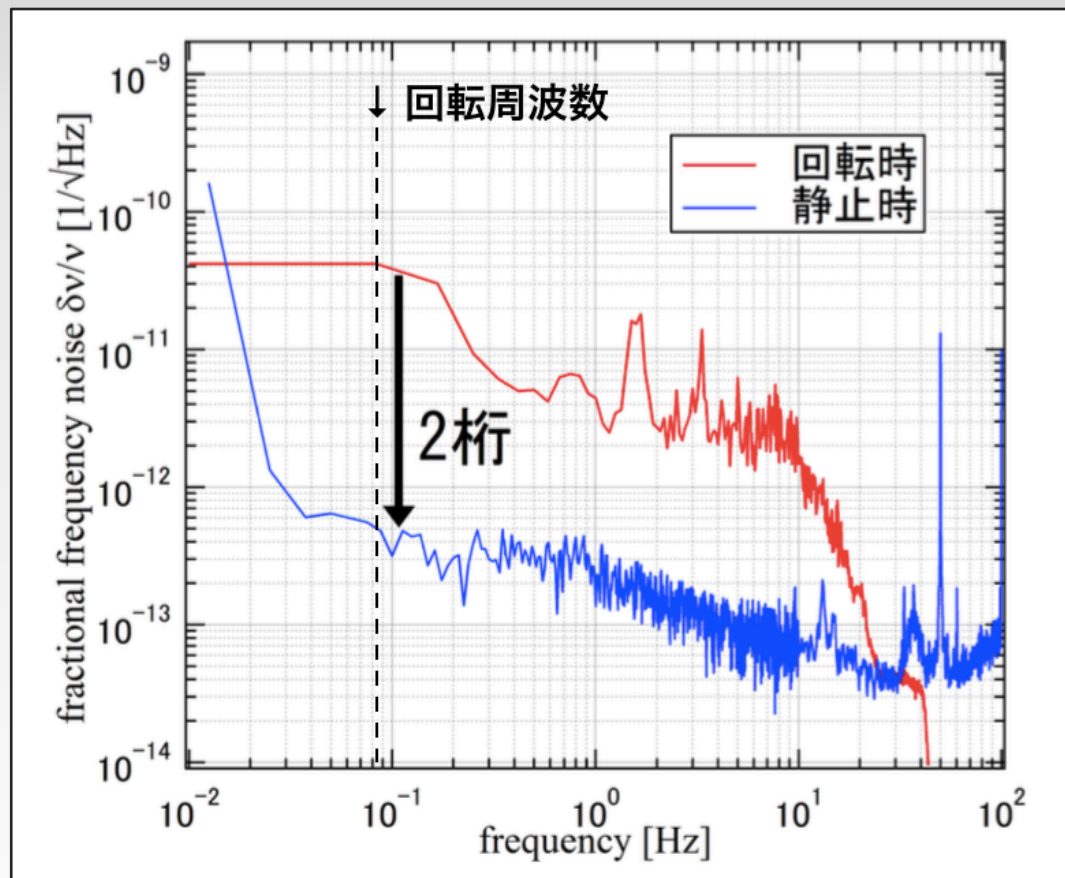
透過光を再び共振器へ

- ② 右回りの光  
 ... 共振からのずれを測定  
 $\propto \nu_L - \nu_R \propto \delta C$   
 = 異方性信号

- ③ 装置全体を水平方向に回転させて、異方性信号を変調  
 ⇒ 異方性は装置の回転周波数に現れる

## 2-1 先行研究

- 片道光速の異方性で世界最高精度  $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 6 \times 10^{-15}$  を達成  
(測定時間：約1年)



静止時と回転時で“異方性信号”のノイズレベルを比較

主なノイズ源は回転により  
生じる雑音 (振動?)



回転によるノイズを静止時の  
雑音レベルまで下げれば、  
2桁感度上昇!



## 2-2 雑音低減のための改良

- 振動の影響を抑えるため回転機構と光学系を改良

振動そのものの低減

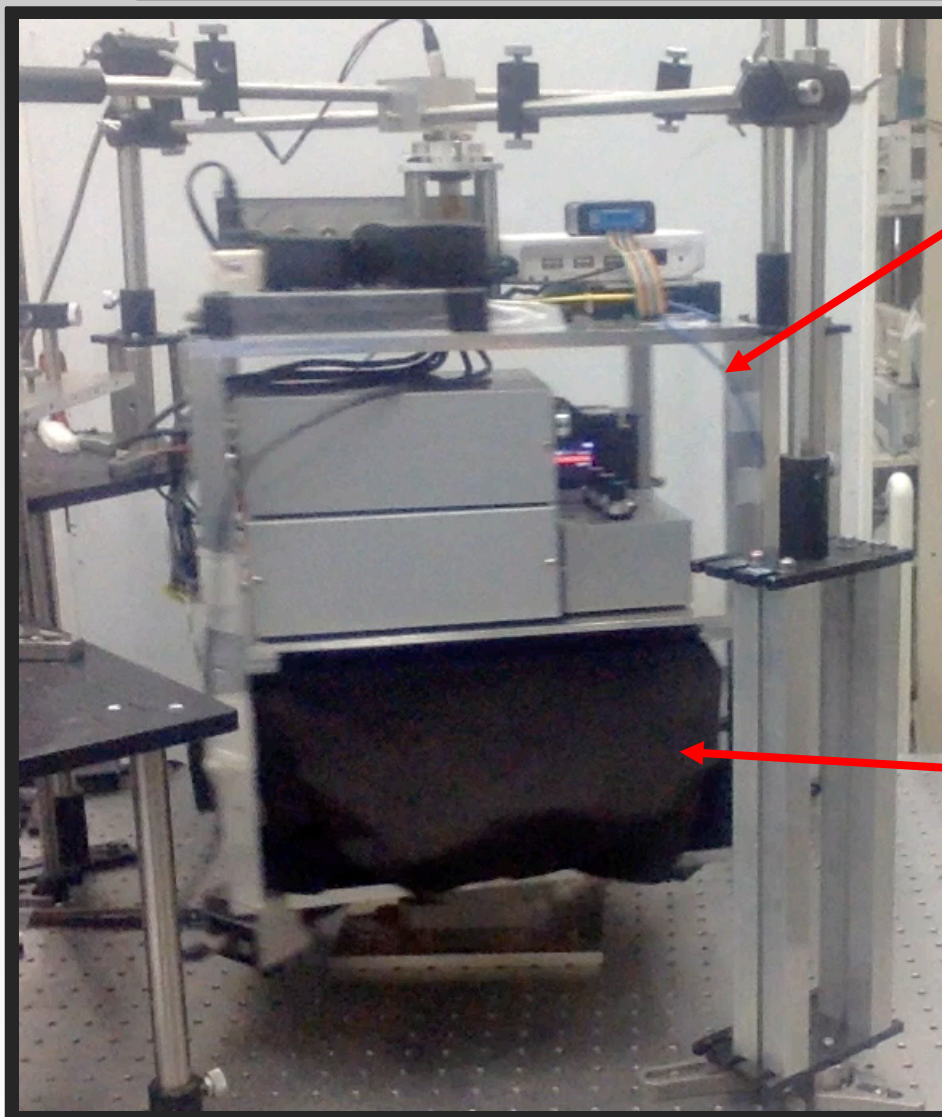
振動感度の低減

|      | 先行研究    | 現在     | 将来    |
|------|---------|--------|-------|
| 回転機構 | 左右交互に回転 | 連続回転   | -     |
| 光学系  | ペDESTAL | セミノリシク | モノリシク |

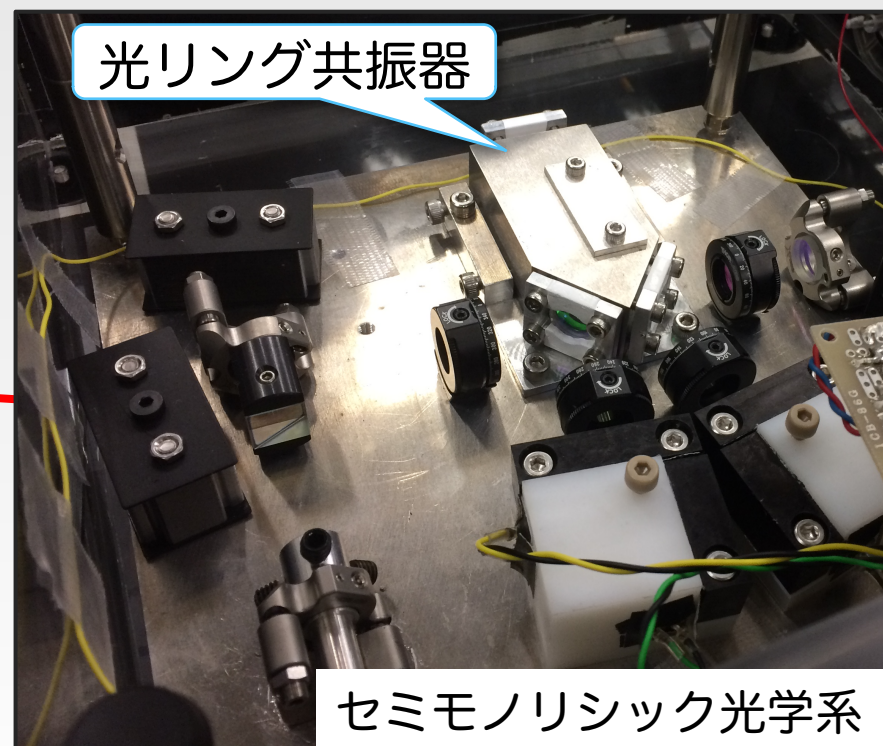
本講演(酒井)
次の講演(武田くん)



## 2-3 現在の実験装置



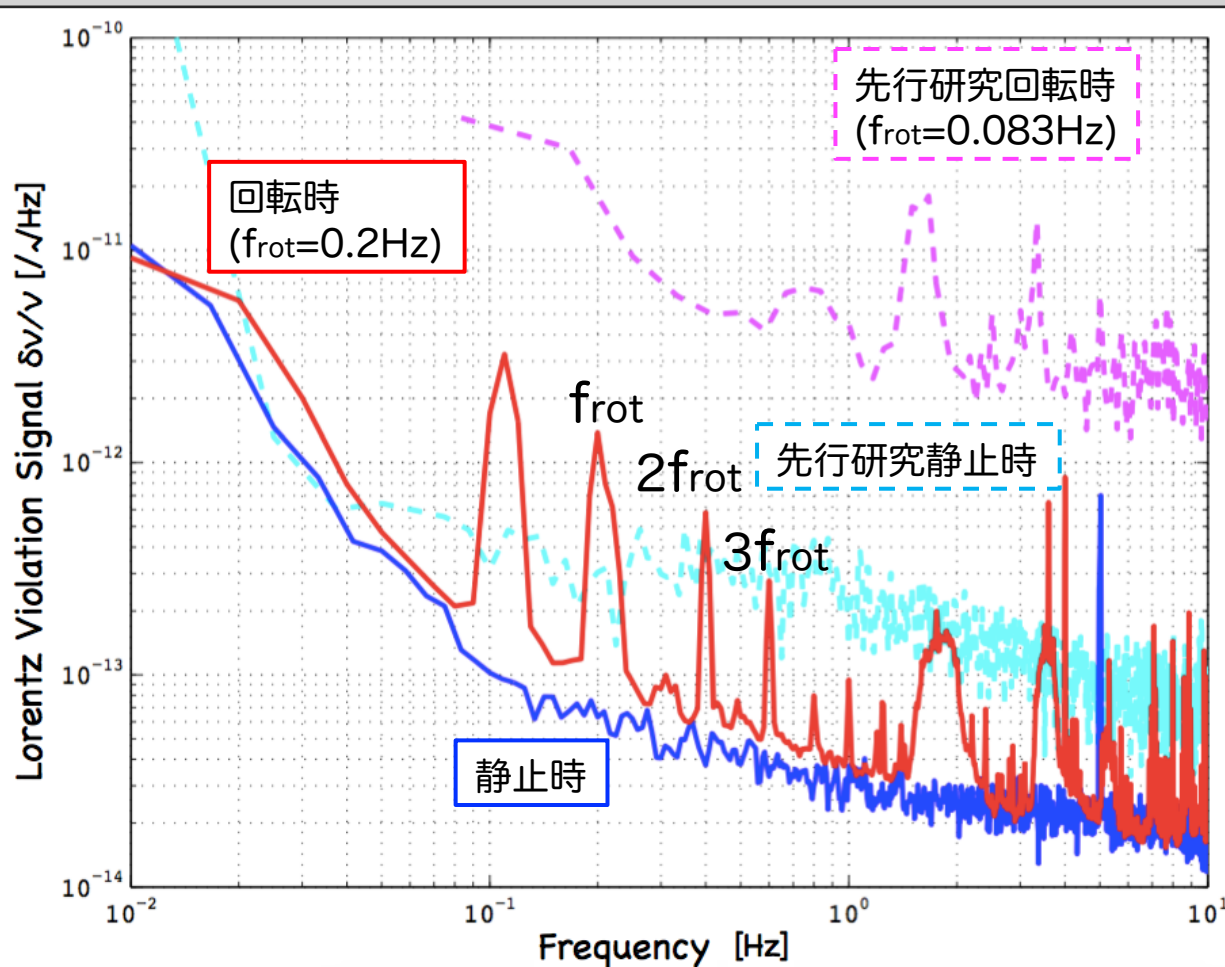
レーザー、制御用回路、  
データロガーなども  
回転台上にある



光リング共振器

セミモノリシック光学系

## 2-4 異方性信号の雑音レベル

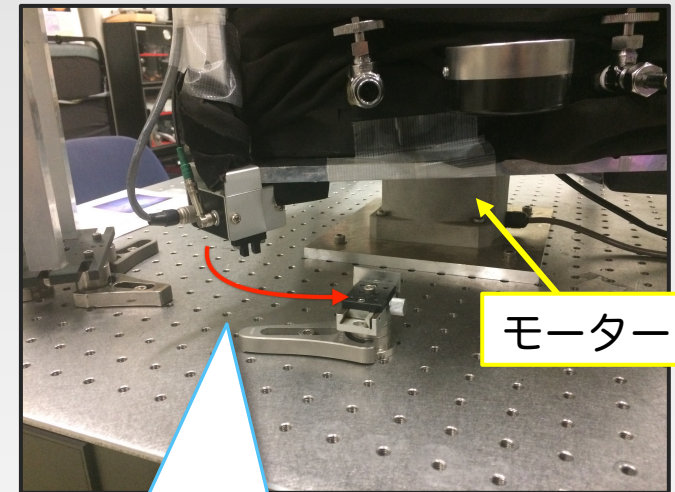
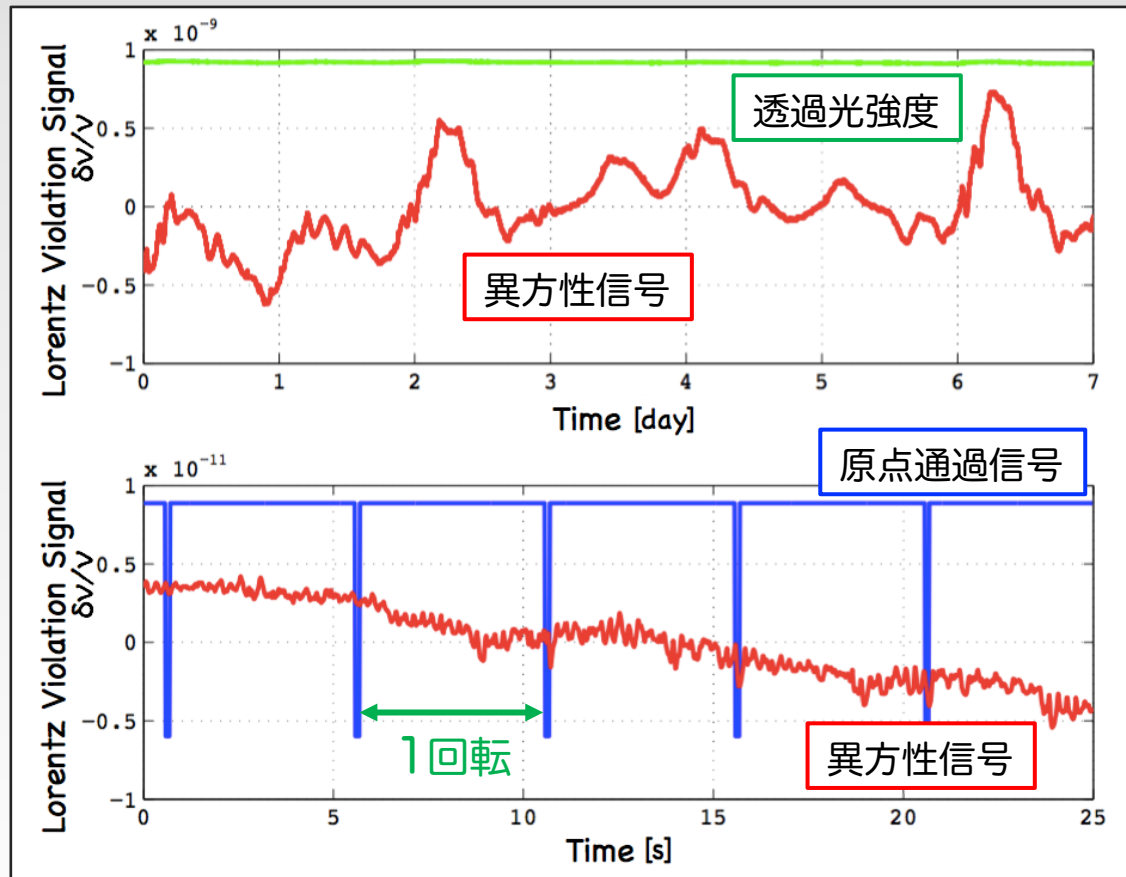


- ◎ 散乱光対策により  
静止時の雑音が低減  
(現在はレーザー強度で制限)
- ◎ フロアレベルは  
先行研究の静止時  
よりも低減  
(改良の成果！)
- △ 回転周波数とその  
高調波にピーク  
(回転と同期する雑音)



## 3-1 測定されたデータ

- 2017/10/31から7日間にわたり異方性探査
  - 回転周波数  $f_{\text{rot}} = 0.2 \text{ Hz}$
  - 測定期間中レーザーの周波数ロックは落ちなかった



フォトインタラプタで  
原点通過信号を取得  
→ 回転台の向きを把握

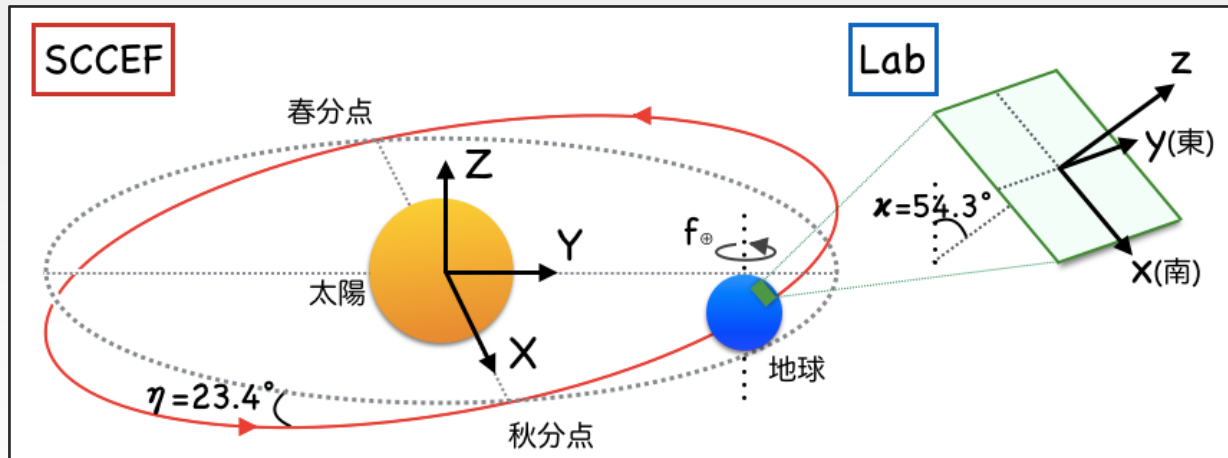
## 3-2 球面調和関数展開

- 光速の異方性を球面調和関数展開

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

※  $\bar{y}_l^m$  は複素数であり、  
Lorentz不変性の破れがなければ0

- 展開のための基準：SCCEF(太陽中心赤道座標系)を採用  
→ Z軸 = 地球の自転軸方向



## 3-3 異方性信号

- 光速の異方性を球面調和関数展開

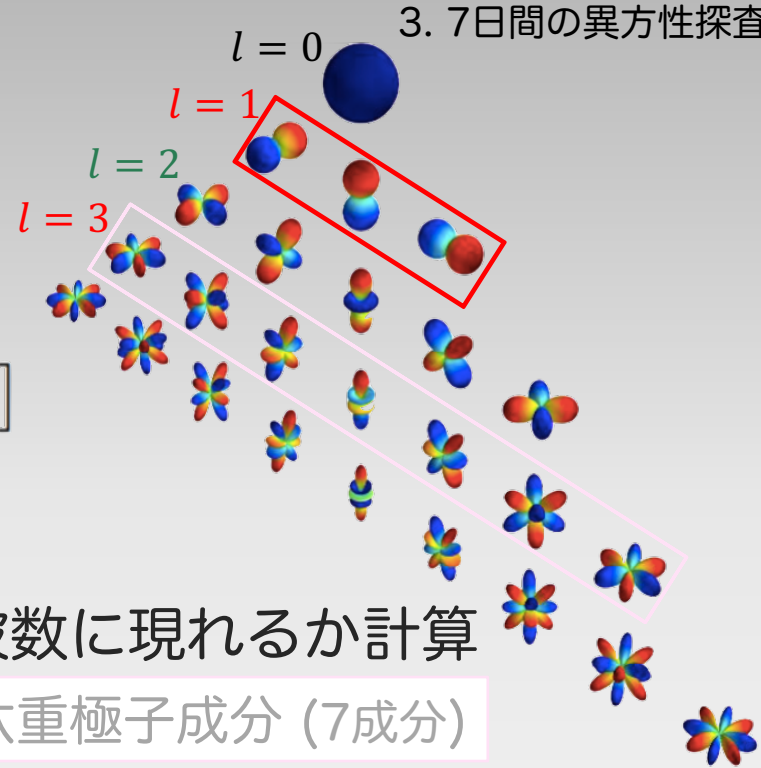
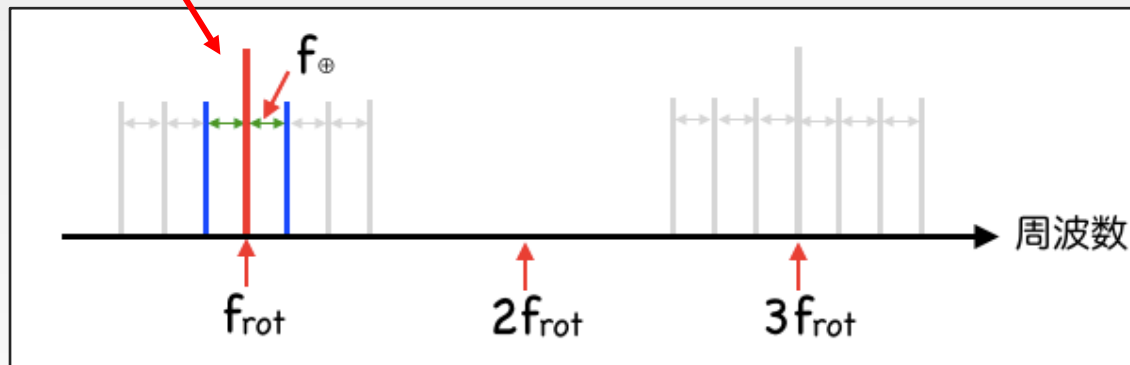
$$\delta c(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \text{Re}[(\bar{y}_l^m)^* Y_l^m(\theta, \phi)]$$

- $l = 1, 3$  について調べる

→ 各成分が異方性信号のどの周波数に現れるか計算

$l = 1$  : 双極子成分 (3成分)

$l = 3$  : 六重極子成分 (7成分)



## 3-3 異方性信号

- 光速の異方性を球面調和関数展開

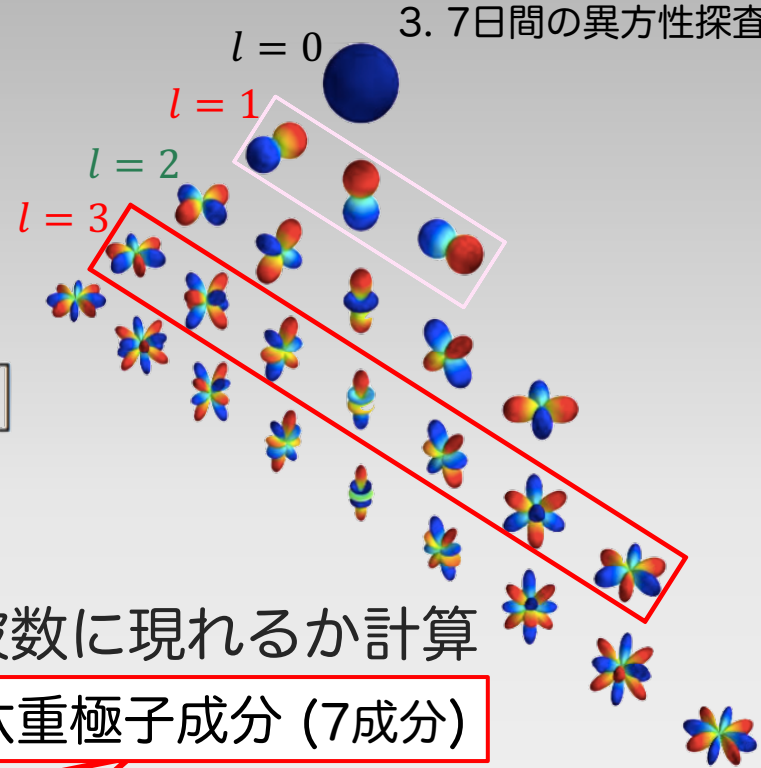
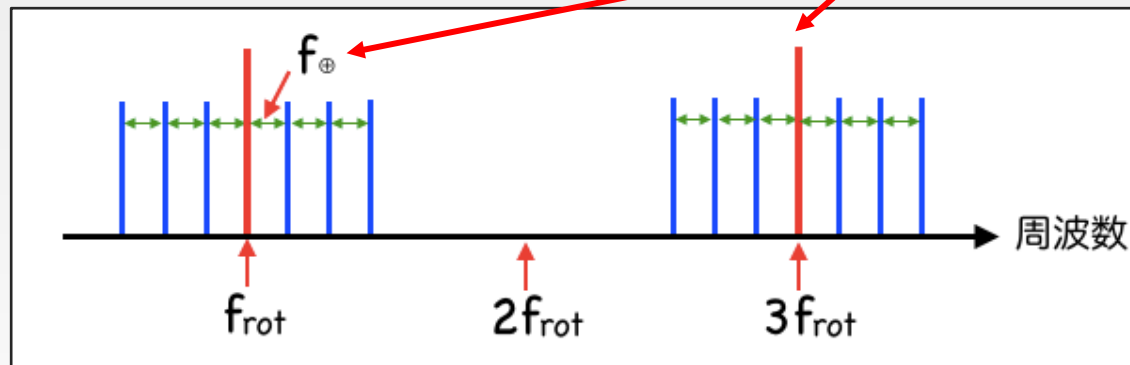
$$\delta c(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \text{Re}[(\bar{y}_l^m)^* Y_l^m(\theta, \phi)]$$

- $l = 1, 3$  について調べる

→ 各成分が異方性信号のどの周波数に現れるか計算

$l = 1$  : 双極子成分 (3成分)

$l = 3$  : 六重極子成分 (7成分)



# 3-3 異方性信号

- 光速の異方性を球面調和関数展開

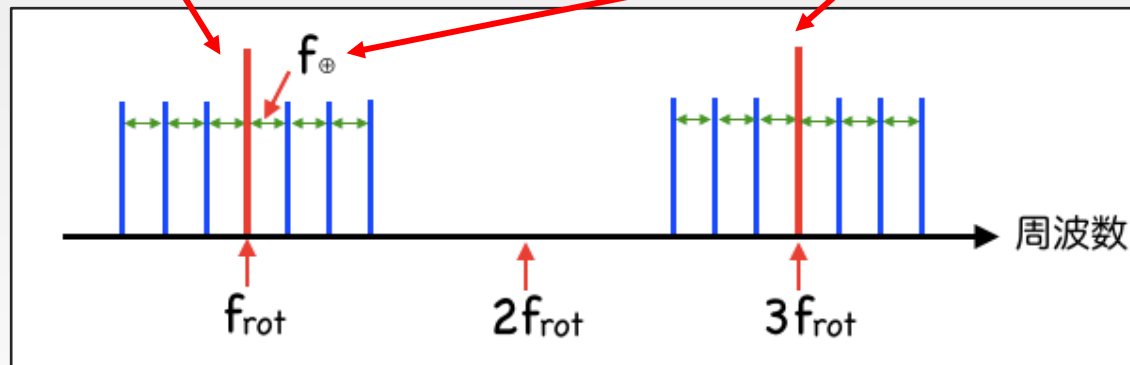
$$\delta c(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \text{Re}[(\bar{y}_l^m)^* Y_l^m(\theta, \phi)]$$

- $l = 1, 3$  について調べる

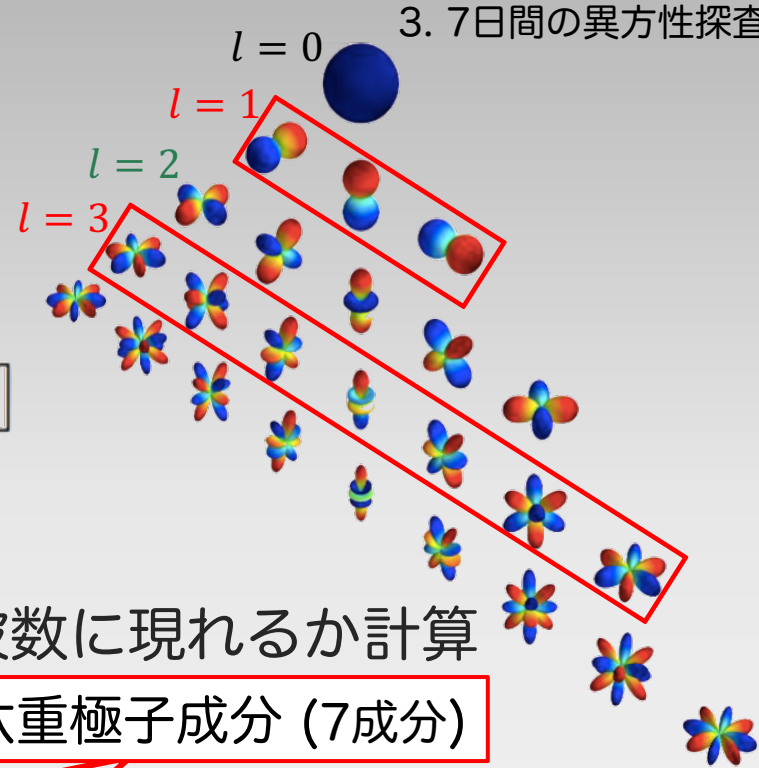
→ 各成分が異方性信号のどの周波数に現れるか計算

$l = 1$  : 双極子成分 (3成分)

$l = 3$  : 六重極子成分 (7成分)



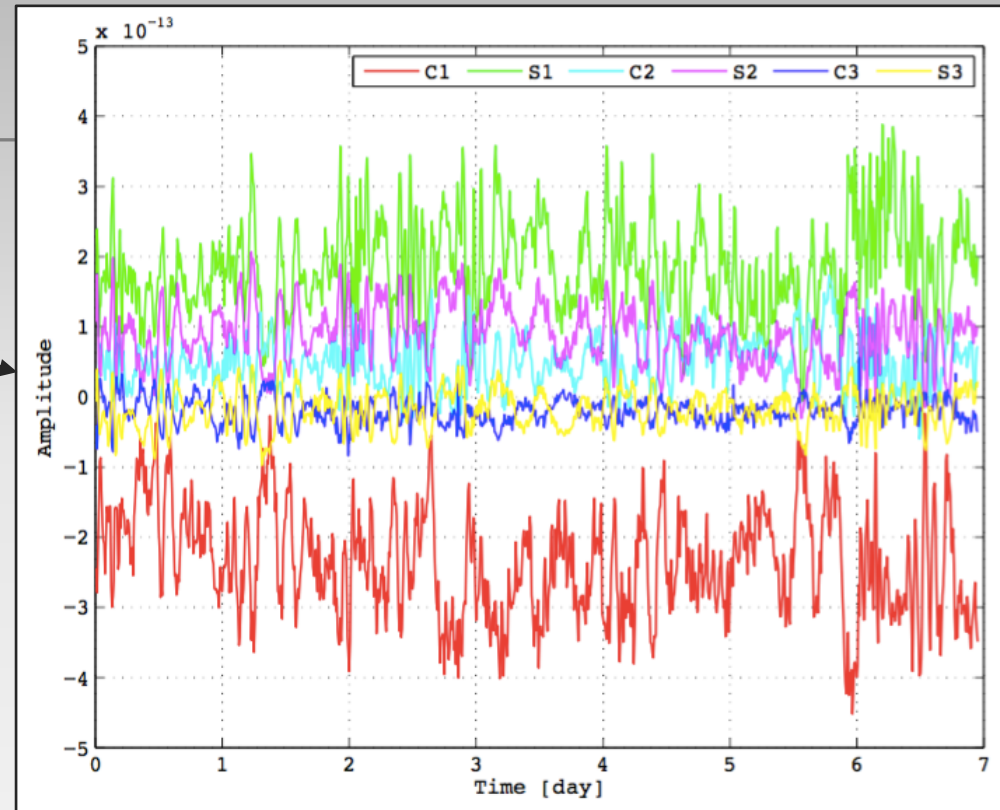
- 各周波数成分から  $\bar{y}_1^m$ 、 $\bar{y}_3^m$  を求められる



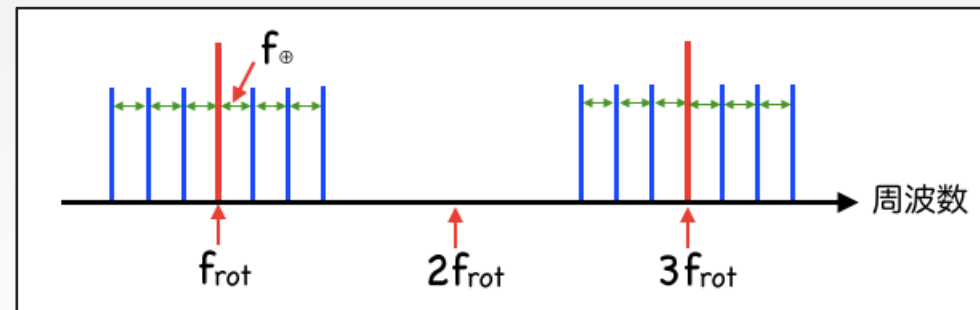


## 3-4 解析の流れ

- (1) 回転周波数  $f_{\text{rot}}$  で復調
  - ✓ 120回転毎にフーリエ変換 (=10分)
- (2) 2倍波により雑音を除去
  - ✓ 回転と同期する雑音により相関が生じている
  - ✓ 2倍波と相関のある分は雑音とみなせる
  - ✓ 異方性による信号は消さない
- (3) 自転周波数  $f_{\oplus}$  で復調
  - ✓ 1自転毎にフーリエ変換
- (4) 復調振幅から  $\bar{y}_l^m$  を求める
  - ✓ 最小二乗法

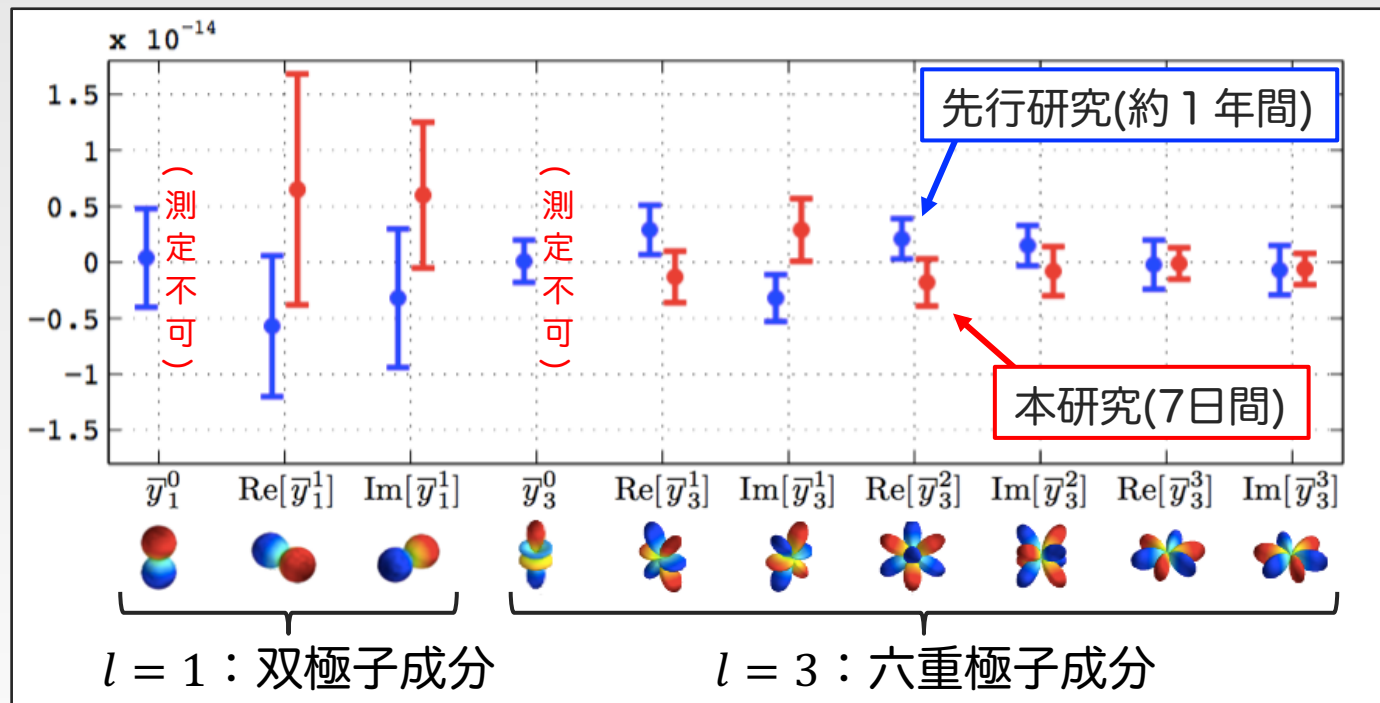


1,2,3倍波について時系列にプロット(7日分)



## 3-5 解析結果

- 誤差棒は $1\sigma$ の統計誤差 →  $2\sigma$ で0と一致
- 7日間の測定で先行研究とほぼ同じ精度を達成  
→ 先行研究と同様に約1年間測定することで、  
最高精度を約5倍更新できる見込み



※ 自転軸に対称な成分は回転と同期する雑音と区別できないため測定不可

## 4 まとめ

---

- 光リング共振器を用いて片道光速の異方性を探査
- 先行研究で問題となっていた振動の影響を低減するため、主に回転機構と光学系を改良
- 7日間異方性探査を行った結果、先行研究の精度(約1年間の測定で $|\delta c/c| \lesssim 6 \times 10^{-15}$ )とほぼ同じ精度を達成  
→ 1年間測定すれば最高精度を約5倍更新できる見込み
- 「回転と同期する雑音」をなくすために、回転機構をさらに改良する必要がある  
(回転台に負荷がかかっている?)

発表は以上です  
ありがとうございました

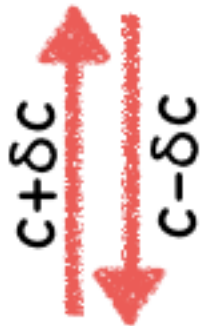
以下補足

# 地球の自転の効き方

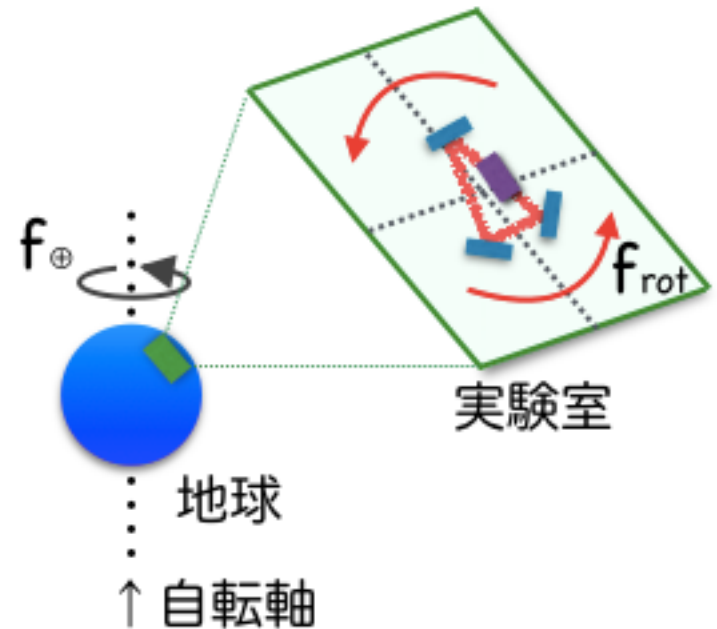
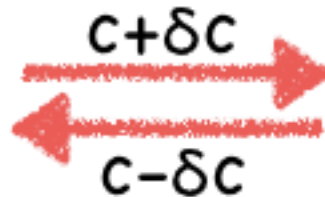
自転による変調  
がかからない  
( $f_{\text{rot}}$ に信号)

自転による変調  
がかかる  
( $f_{\text{rot}} \pm f_{\oplus}$ に信号)

自転軸と平行な  
方向に異方性が  
ある場合



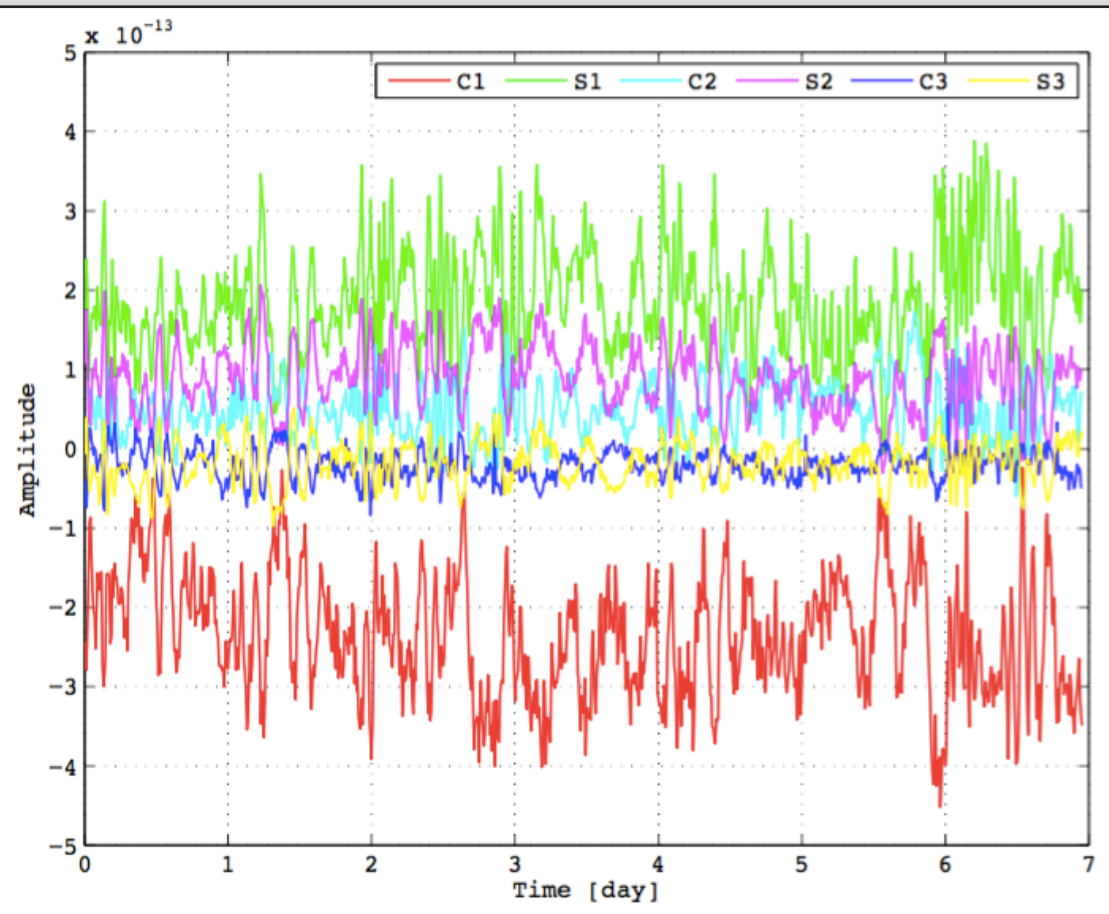
自転軸と直交する  
方向に異方性が  
ある場合





# 2倍波による雑音除去

- 「**回転と同期する雑音の振幅の変動**」を取り除きたい  
 → 回転周波数の**2倍波**を使って雑音を**モニタ**できる



1倍波( $f_{\text{rot}}$ 成分)

$$C_1 \text{ or } S_1 = \text{異方性} + \text{雑音}$$

2倍波( $2f_{\text{rot}}$ 成分)

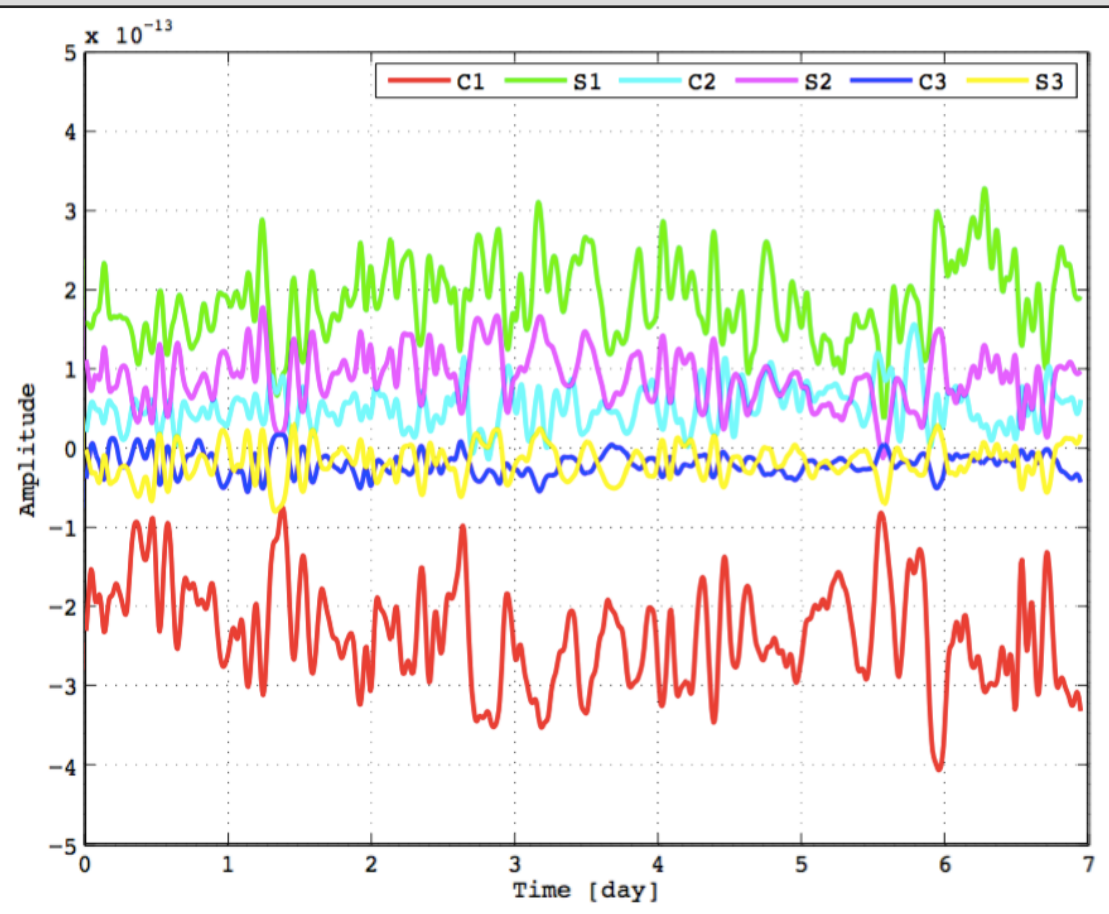
$$C_2 \text{ or } S_2 = 0 + \text{雑音}$$

同一の原因(**温度変動?**)  
 による相関のある雑音

1倍波と2倍波の相関を計算  
 → 雑音を除去

# 2倍波による雑音除去

- 「**回転と同期する雑音の振幅の変動**」を取り除きたい  
 → 回転周波数の**2倍波**を使って雑音を**モニタ**できる



1倍波( $f_{\text{rot}}$ 成分)

$$C_1 \text{ or } S_1 = \text{異方性} + \text{雑音}$$

2倍波( $2f_{\text{rot}}$ 成分)

$$C_2 \text{ or } S_2 = 0 + \text{雑音}$$

同一の原因(**温度変動?**)  
 による相関のある雑音

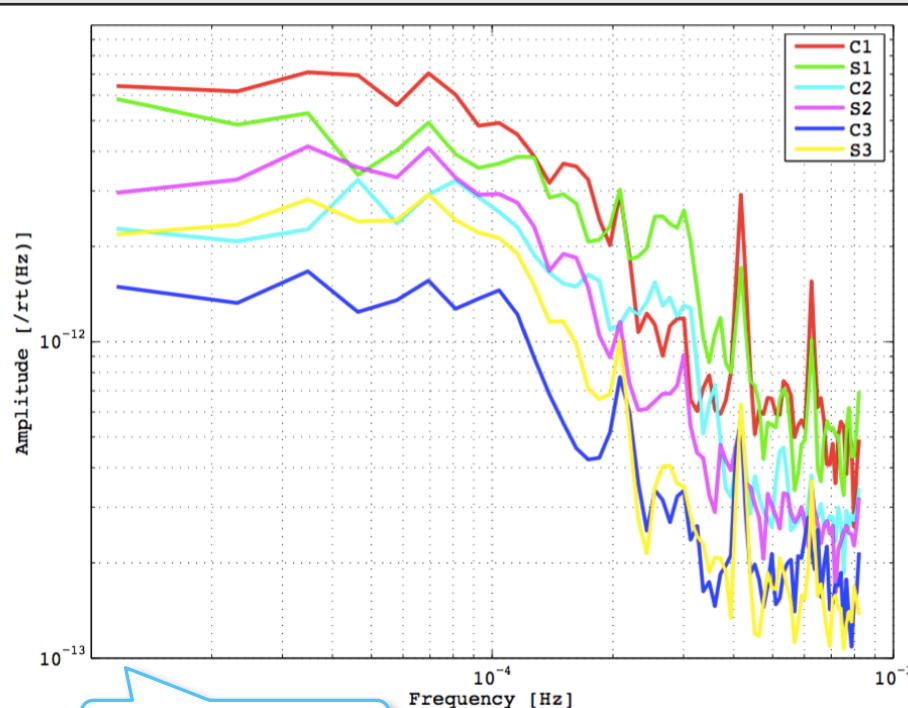
1倍波と2倍波の相関を計算  
 → 雑音を除去

# 2倍波による雑音除去の結果

- 1 倍波( $C_1, S_1$ )および3 倍波( $C_3, S_3$ )に含まれる雑音を、2 倍波( $C_2, S_2$ )を使って除去
- 雑音除去前後をスペクトルで比較

雑音除去前

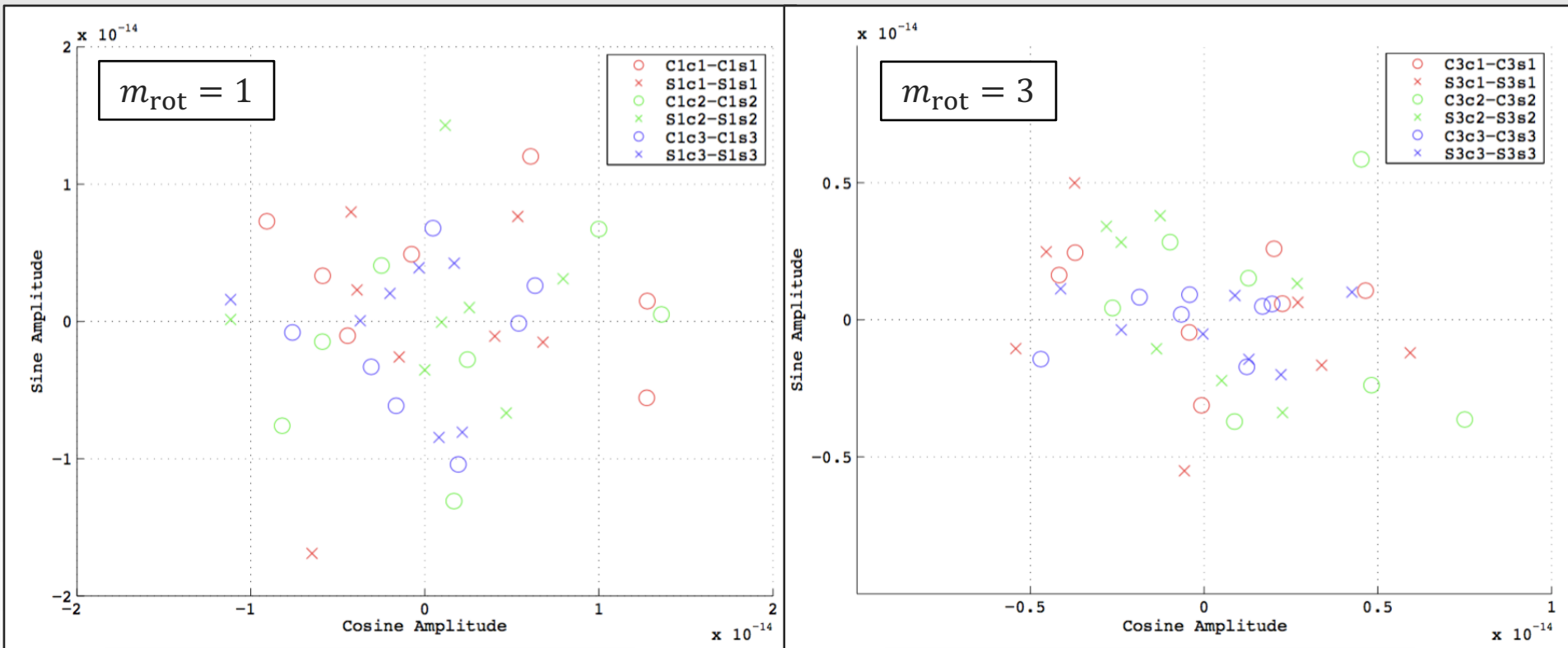
雑音除去後



自転周波数

# 求めた復調振幅

- 回転周波数 $f_{\text{rot}}$ で復調 → 直交位相振幅( $C_{m_{\text{rot}}}$ ,  $S_{m_{\text{rot}}}$ )
- $(C_{m_{\text{rot}}}, S_{m_{\text{rot}}})$ をさらに自転周波数 $f_{\oplus}$ で復調  
→ 復調振幅( $C_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^C$ ,  $C_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^S$ ,  $S_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^C$ ,  $S_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^S$ )



# 各周波数成分と展開係数の関係

表 A.1: 各復調振幅に含まれる異方性の寄与。

| $m_{\text{rot}}$ | $m_{\oplus}$ | $C_{m_{\text{rot}} m_{\oplus}}^C$                                | $C_{m_{\text{rot}} m_{\oplus}}^S$                                | $S_{m_{\text{rot}} m_{\oplus}}^C$                                | $S_{m_{\text{rot}} m_{\oplus}}^S$                                 |
|------------------|--------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1                | -            | $\bar{C}_1 : -0.22 \bar{y}_1^0 + 0.089 \bar{y}_3^0$              |                                                                  | $\bar{S}_1 : 0$                                                  |                                                                   |
|                  | 1            | $0.11 \text{Re}[\bar{y}_1^1]$<br>$+0.16 \text{Re}[\bar{y}_3^1]$  | $0.11 \text{Im}[\bar{y}_1^1]$<br>$+0.16 \text{Im}[\bar{y}_3^1]$  | $0.19 \text{Im}[\bar{y}_1^1]$<br>$-0.032 \text{Im}[\bar{y}_3^1]$ | $-0.19 \text{Re}[\bar{y}_1^1]$<br>$+0.032 \text{Re}[\bar{y}_3^1]$ |
|                  | 2            | $-0.0025 \text{Re}[\bar{y}_3^2]$                                 | $-0.0025 \text{Im}[\bar{y}_3^2]$                                 | $-0.14 \text{Im}[\bar{y}_3^2]$                                   | $0.14 \text{Re}[\bar{y}_3^2]$                                     |
|                  | 3            | $-0.067 \text{Re}[\bar{y}_3^3]$                                  | $-0.067 \text{Im}[\bar{y}_3^3]$                                  | $-0.12 \text{Im}[\bar{y}_3^3]$                                   | $0.12 \text{Re}[\bar{y}_3^3]$                                     |
| 3                | -            | $\bar{C}_3 : -0.17 \bar{y}_3^0$                                  |                                                                  | $\bar{S}_3 : 0.18 \bar{y}_3^0$                                   |                                                                   |
|                  | 1            | $0.10 \text{Re}[\bar{y}_3^1]$<br>$+0.19 \text{Im}[\bar{y}_3^1]$  | $-0.19 \text{Re}[\bar{y}_3^1]$<br>$+0.10 \text{Im}[\bar{y}_3^1]$ | $-0.11 \text{Re}[\bar{y}_3^1]$<br>$+0.18 \text{Im}[\bar{y}_3^1]$ | $-0.18 \text{Re}[\bar{y}_3^1]$<br>$-0.11 \text{Im}[\bar{y}_3^1]$  |
|                  | 2            | $-0.19 \text{Re}[\bar{y}_3^2]$<br>$-0.17 \text{Im}[\bar{y}_3^2]$ | $0.17 \text{Re}[\bar{y}_3^2]$<br>$-0.19 \text{Im}[\bar{y}_3^2]$  | $0.20 \text{Re}[\bar{y}_3^2]$<br>$-0.16 \text{Im}[\bar{y}_3^2]$  | $0.16 \text{Re}[\bar{y}_3^2]$<br>$+0.20 \text{Im}[\bar{y}_3^2]$   |
|                  | 3            | $0.14 \text{Re}[\bar{y}_3^3]$<br>$+0.15 \text{Im}[\bar{y}_3^3]$  | $-0.15 \text{Re}[\bar{y}_3^3]$<br>$+0.14 \text{Im}[\bar{y}_3^3]$ | $-0.14 \text{Re}[\bar{y}_3^3]$<br>$+0.14 \text{Im}[\bar{y}_3^3]$ | $-0.14 \text{Re}[\bar{y}_3^3]$<br>$-0.14 \text{Im}[\bar{y}_3^3]$  |

# 復調振幅(雑音除去あり)

| $m_{\text{rot}}$ | $m_{\oplus}$ | $C_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^C$ | $C_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^S$ | $S_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^C$ | $S_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^S$ |
|------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1                | -            | $\bar{C}_1 : -$                  |                                  | $\bar{S}_1 : -$                  |                                  |
|                  | 1            | $1.6 \pm 3.7$                    | $3.2 \pm 2.3$                    | $0.0 \pm 2.2$                    | $-0.6 \pm 3.4$                   |
|                  | 2            | $1.6 \pm 3.3$                    | $-1.9 \pm 2.8$                   | $0.9 \pm 2.4$                    | $1.2 \pm 2.7$                    |
|                  | 3            | $0.3 \pm 2.0$                    | $-1.6 \pm 2.3$                   | $-1.8 \pm 1.9$                   | $-0.7 \pm 2.2$                   |
| 3                | -            | $\bar{C}_3 : -$                  |                                  | $\bar{S}_3 : -$                  |                                  |
|                  | 1            | $0.1 \pm 1.3$                    | $0.7 \pm 0.8$                    | $-0.3 \pm 1.8$                   | $-0.2 \pm 1.4$                   |
|                  | 2            | $2.2 \pm 1.5$                    | $0.1 \pm 1.5$                    | $-0.3 \pm 0.9$                   | $0.7 \pm 1.2$                    |
|                  | 3            | $-0.4 \pm 1.0$                   | $-0.0 \pm 0.4$                   | $0.3 \pm 1.1$                    | $-0.2 \pm 0.5$                   |



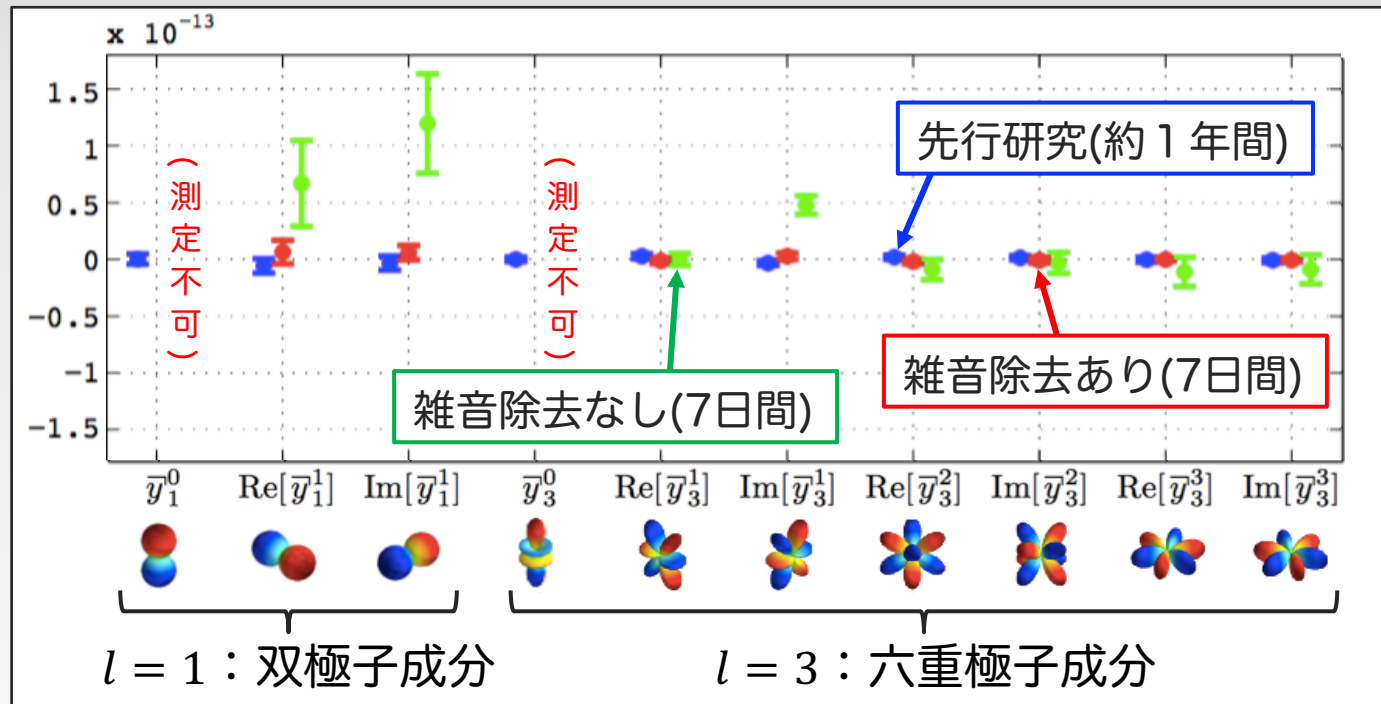
# 復調振幅(雑音除去なし)

| $m_{\text{rot}}$ | $m_{\oplus}$ | $C_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^C$ | $C_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^S$ | $S_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^C$ | $S_{m_{\text{rot}}m_{\oplus}}^S$ |
|------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1                | -            | $\bar{C}_1 : -$                  |                                  | $\bar{S}_1 : -$                  |                                  |
|                  | 1            | $3.3 \pm 8.9$                    | $24.0 \pm 3.9$                   | $9.5 \pm 9.9$                    | $-13.5 \pm 5.2$                  |
|                  | 2            | $0.2 \pm 10.4$                   | $-8.2 \pm 10.3$                  | $1.0 \pm 4.5$                    | $1.6 \pm 5.4$                    |
|                  | 3            | $2.5 \pm 7.0$                    | $11.9 \pm 11.6$                  | $-6.4 \pm 6.4$                   | $-15.0 \pm 8.0$                  |
| 3                | -            | $\bar{C}_3 : -$                  |                                  | $\bar{S}_3 : -$                  |                                  |
|                  | 1            | $0.8 \pm 2.6$                    | $6.4 \pm 1.1$                    | $-2.2 \pm 4.1$                   | $-6.2 \pm 0.8$                   |
|                  | 2            | $3.1 \pm 1.6$                    | $-1.4 \pm 2.1$                   | $-0.6 \pm 2.9$                   | $2.7 \pm 4.1$                    |
|                  | 3            | $-1.6 \pm 2.1$                   | $3.3 \pm 2.2$                    | $0.8 \pm 2.9$                    | $-6.3 \pm 4.2$                   |



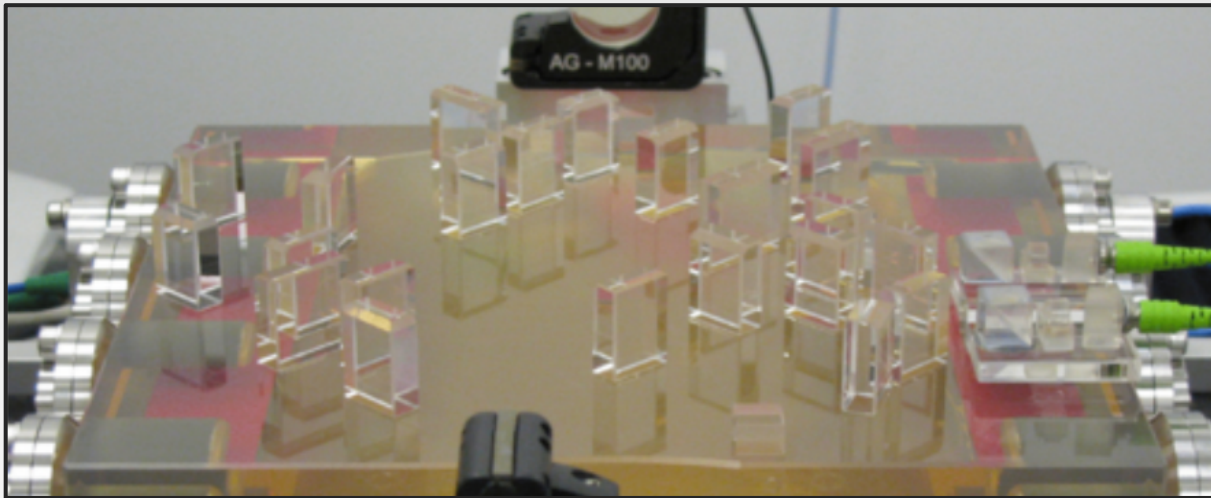
# 雑音を除去しない場合

- 誤差棒は $1\sigma$ の統計誤差
- $2\sigma$ で0にならない成分が出る、統計誤差も大きくなる



# モノリシック光学系

- 光軸を下げることで、振動感度が低減
- 光学素子を直接接着することで、振動が生じてても光学系全体が同相に動き、光路長は変化しない



LISA pathfinderの光学系

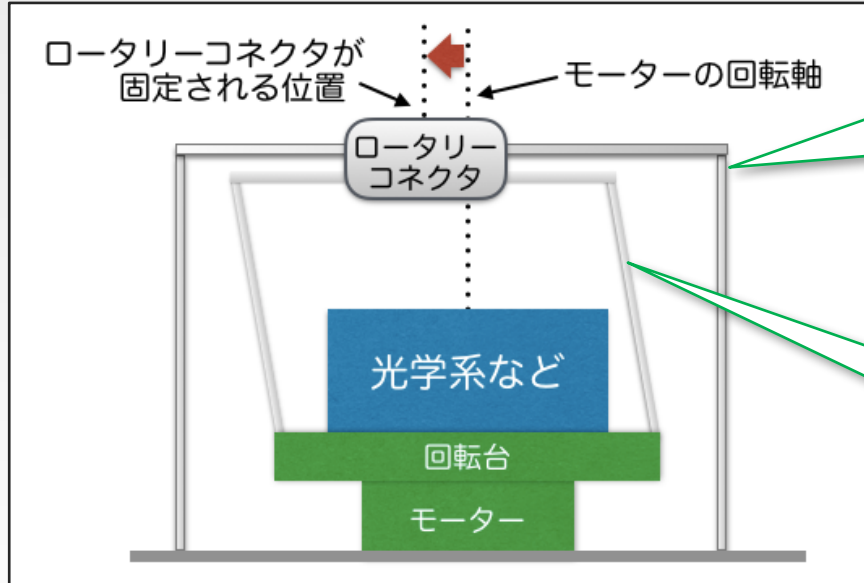
D. I. Robertson *et al.*, Class. Quantum Grav. 30, 085006 (2013).

# 回転と同期する雑音の原因

- ロータリーコネクタを固定する位置をずらすと、回転と同期する雑音の振幅や位相が変わる



- 回転と同期する雑音の原因：ロータリーコネクタを固定する位置が、モーターの回転軸からずれている  
→ 回転台にかかる負荷を通じて光学系に伝わる？

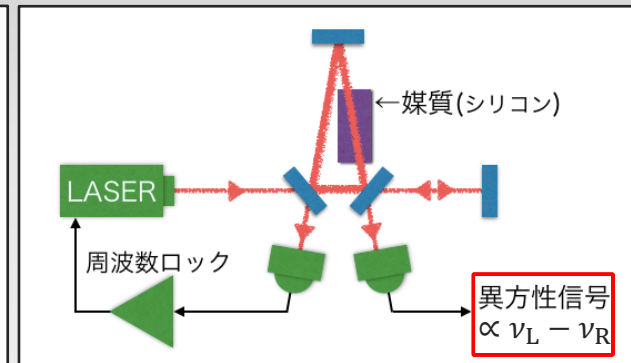
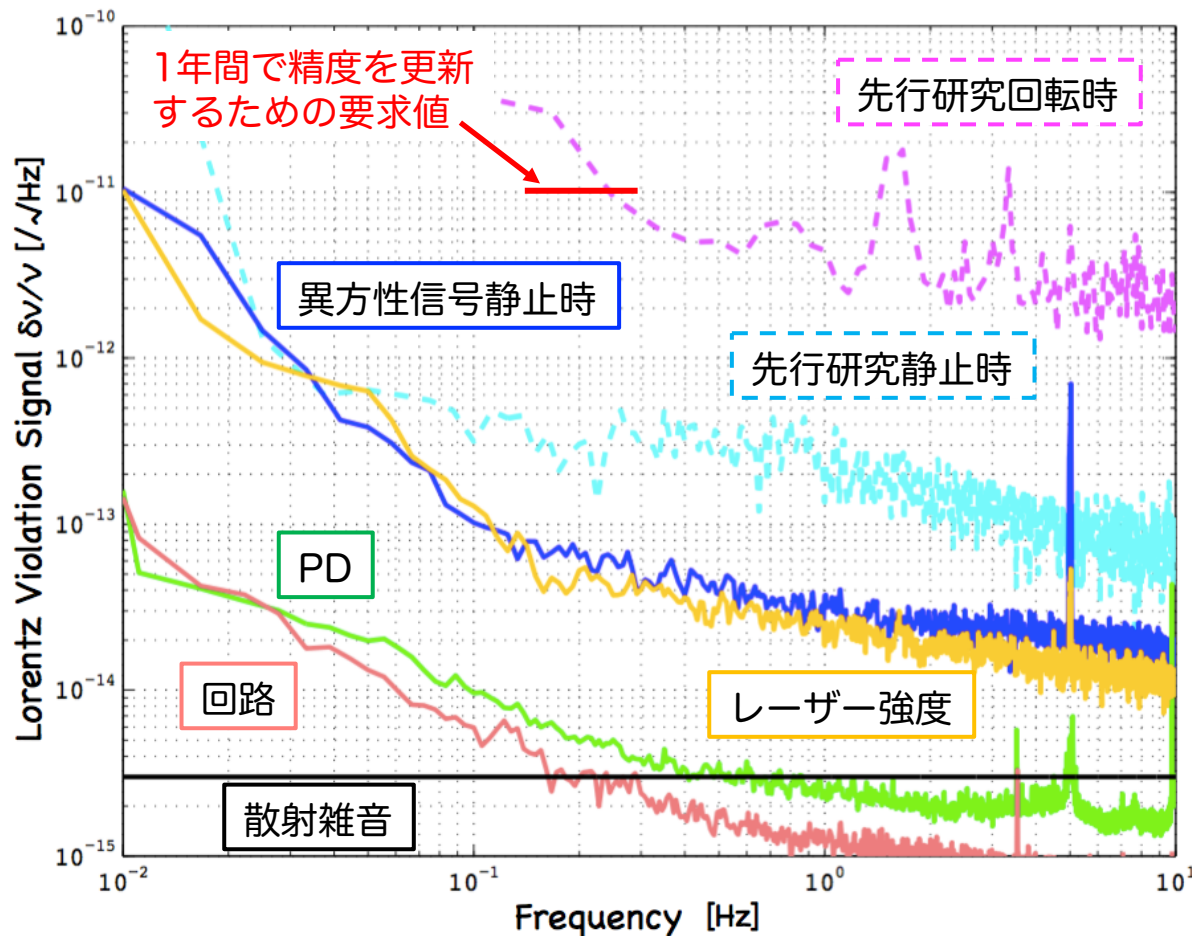


ロータリーコネクタを支えるフレーム  
(定盤に固定、回転しない)

回転台の柱と天井  
(光学系と一緒に回転する)

# 静止時の雑音レベル

➤ 静止時の異方性信号の雑音レベルと既知の雑音源の寄与



回転周波数付近で  
**雑音低減**

→ 強度雑音で制限

主に**散乱光対策**の効果

# 共振周波数の差を測定する利点

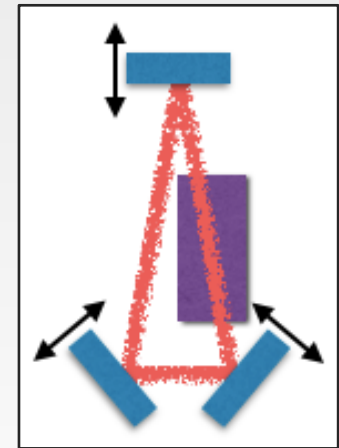
- 共振器長変動 → 両周りの共振周波数は同相に変化する

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{左回りの共振周波数: } \nu_L = \nu - \delta\nu + n \\ \text{右回りの共振周波数: } \nu_R = \nu + \delta\nu + n \end{array} \right.$$

異方性による  
信号は逆相

共振器長変動による  
雑音は同相

- $\nu_L - \nu_R$  を測定すると、同相雑音除去が働く  
→ 共振器長変動を経由する雑音が効きにくい  
↳ 振動・温度変動など



# Lorentz不変性の破れ

- 様々な研究から「Lorentz不変性の破れ」が示唆される

## 量子重力理論からの示唆

あるエネルギースケールでLorentz不変性が破れている可能性がある。

→  $\delta c/c \sim 10^{-17}$  くらい？

V. A. Kostelecký & S. Samuel, PRD 39, 683 (1989).

## CMB観測からの示唆

CMB異方性には双極子成分があり、双極子成分が0になるCMB静止系が存在する。

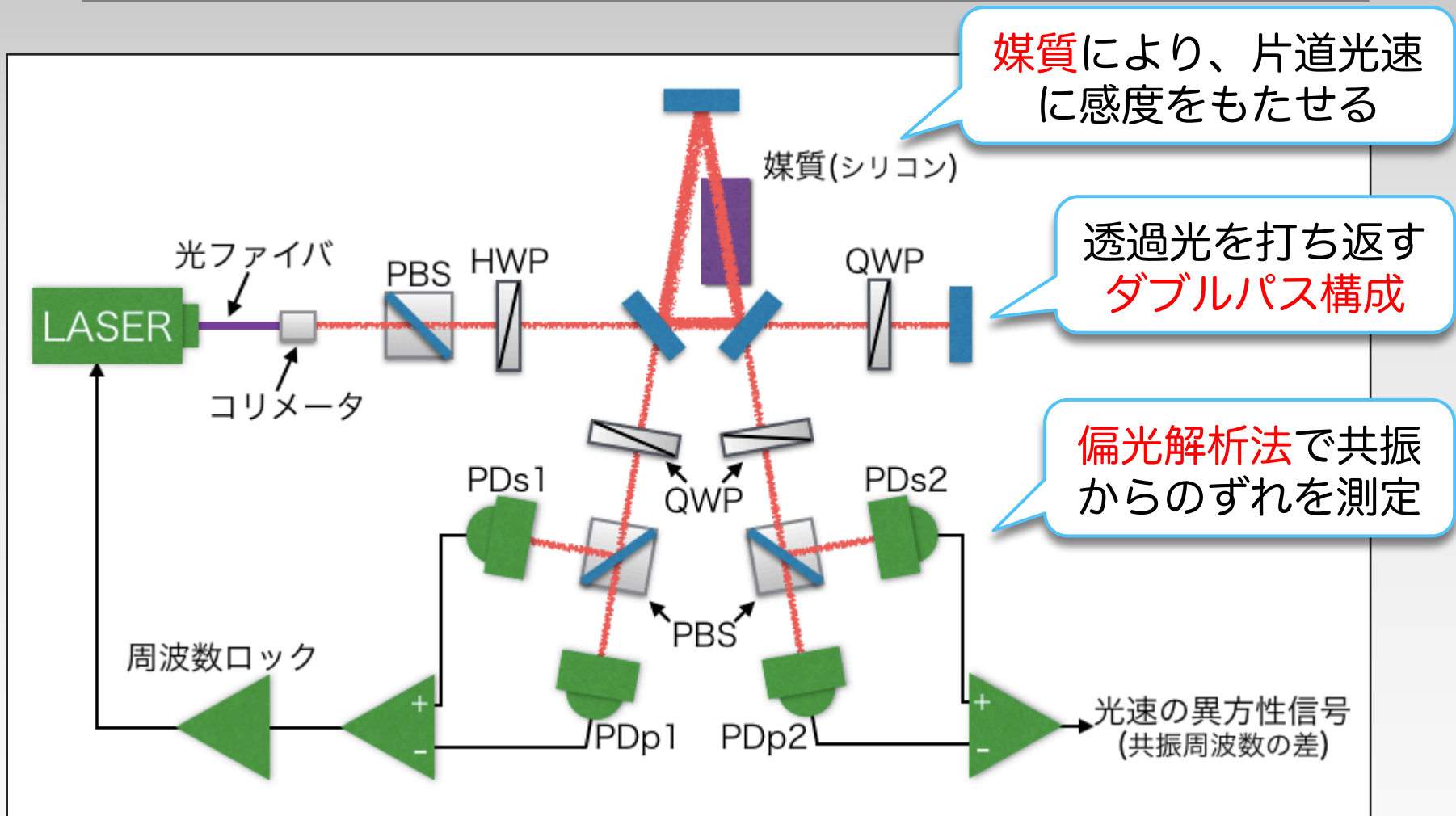
→ 絶対静止系？

C. H. Lineweaver *et al.*, Astrophys. J. 470, 38 (1996).



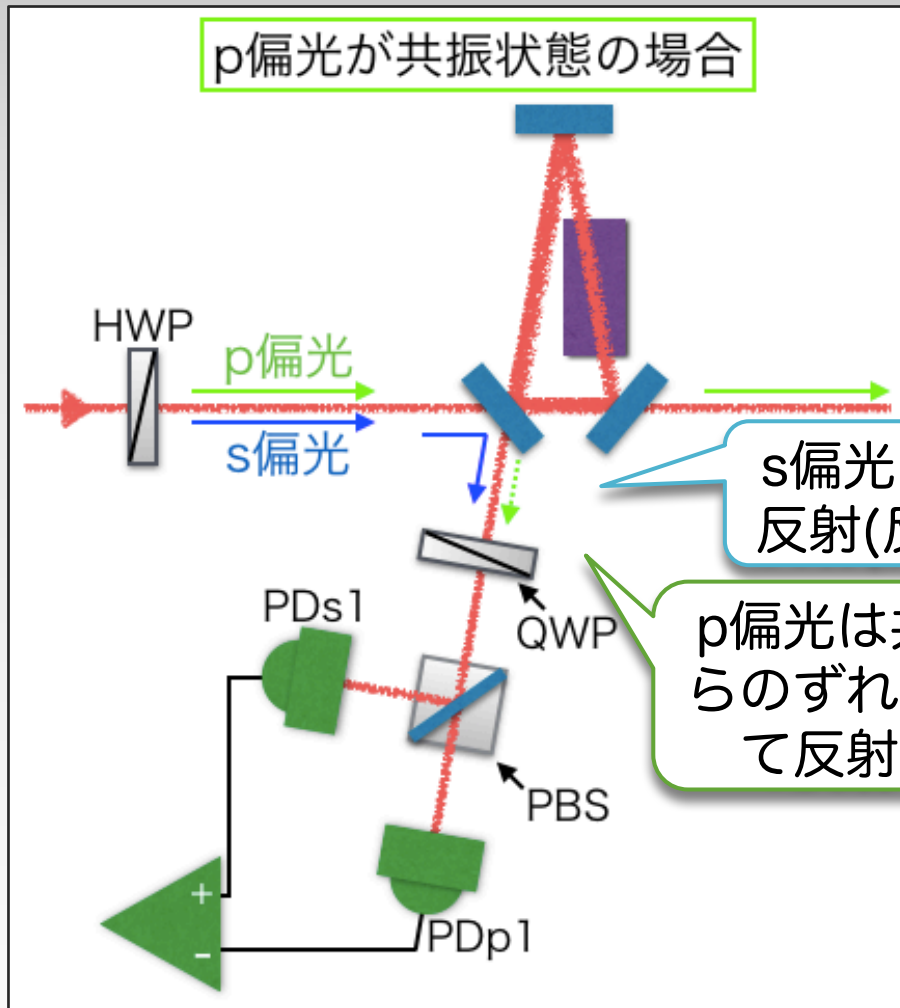
- より高い精度で、実験的にLorentz不変性を検証したい  
→ 光速の異方性探査

# 光学系の詳細





# 偏光解析法

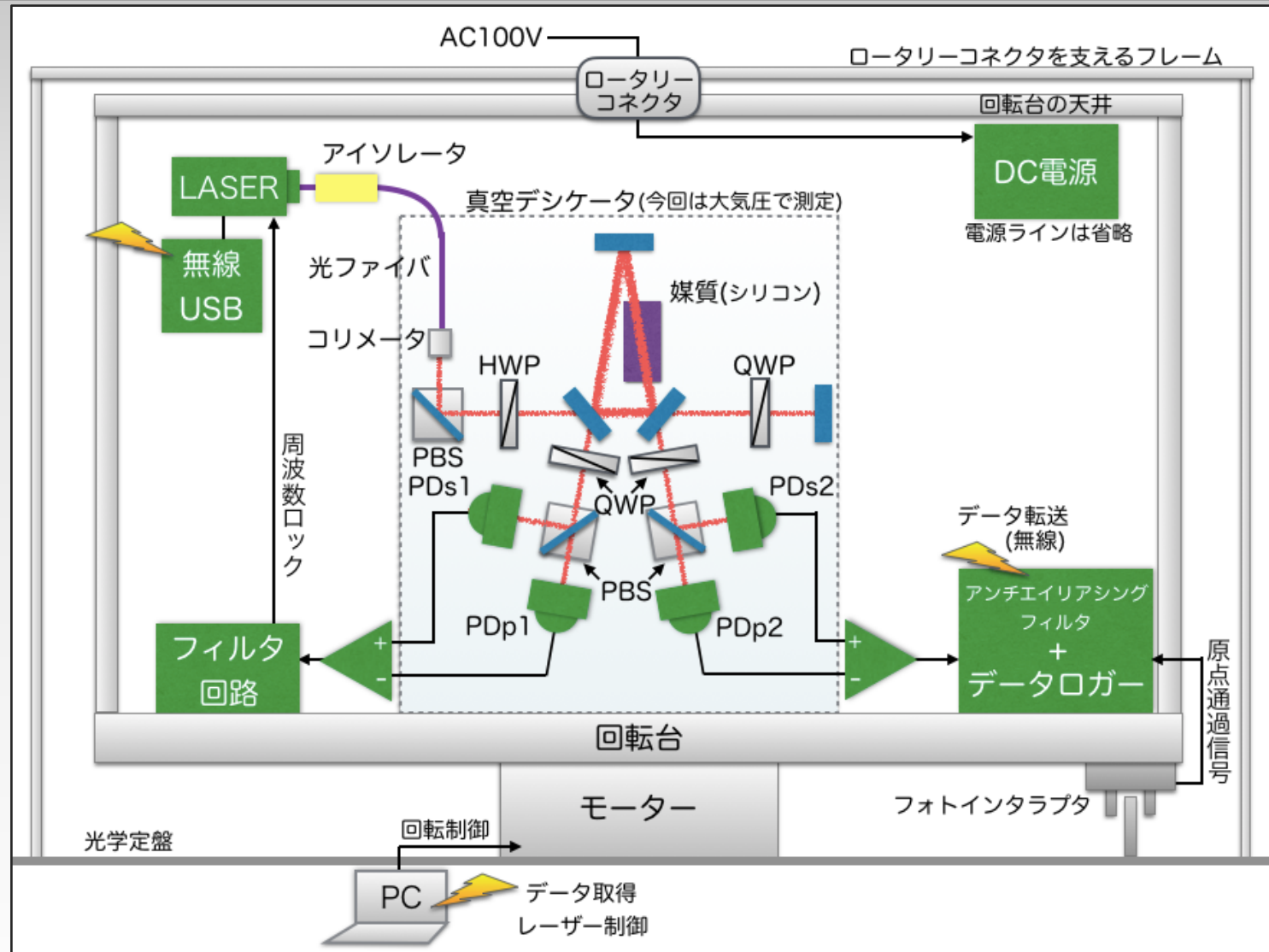


鏡が奇数枚のリング共振器  
には偏光選択性がある

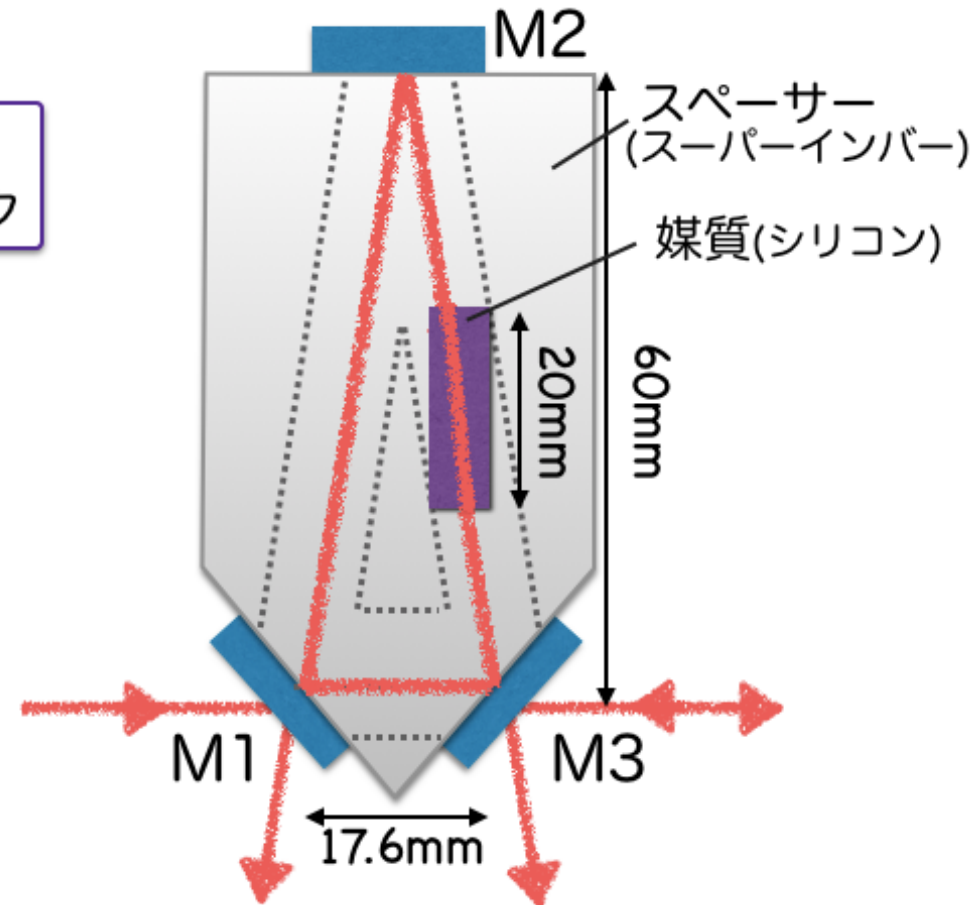
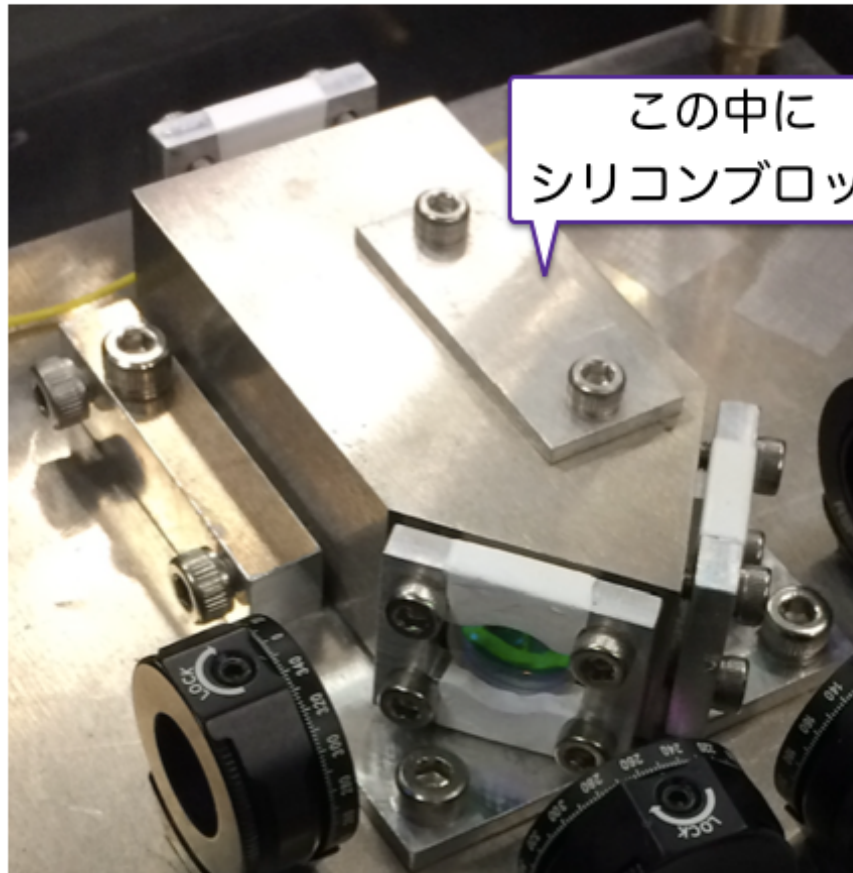
⇒ p偏光が共振のとき、  
s偏光は反共振

これらを波長板  
で干渉させると、  
共振からのずれ  
がわかる

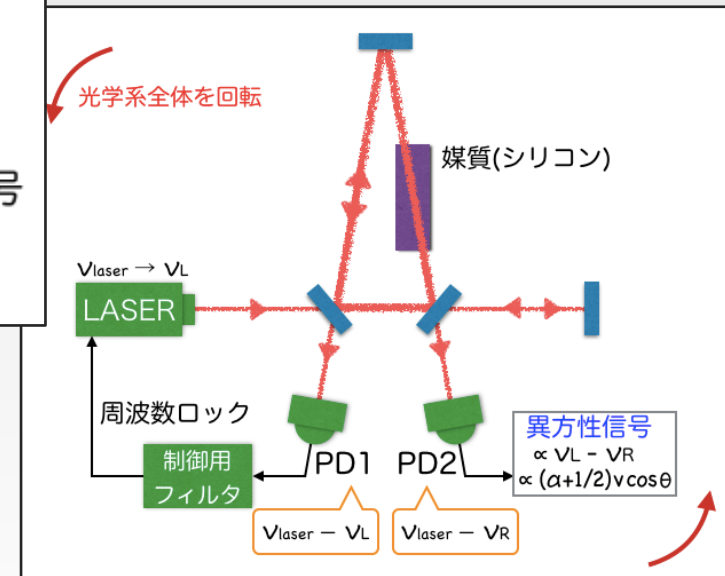
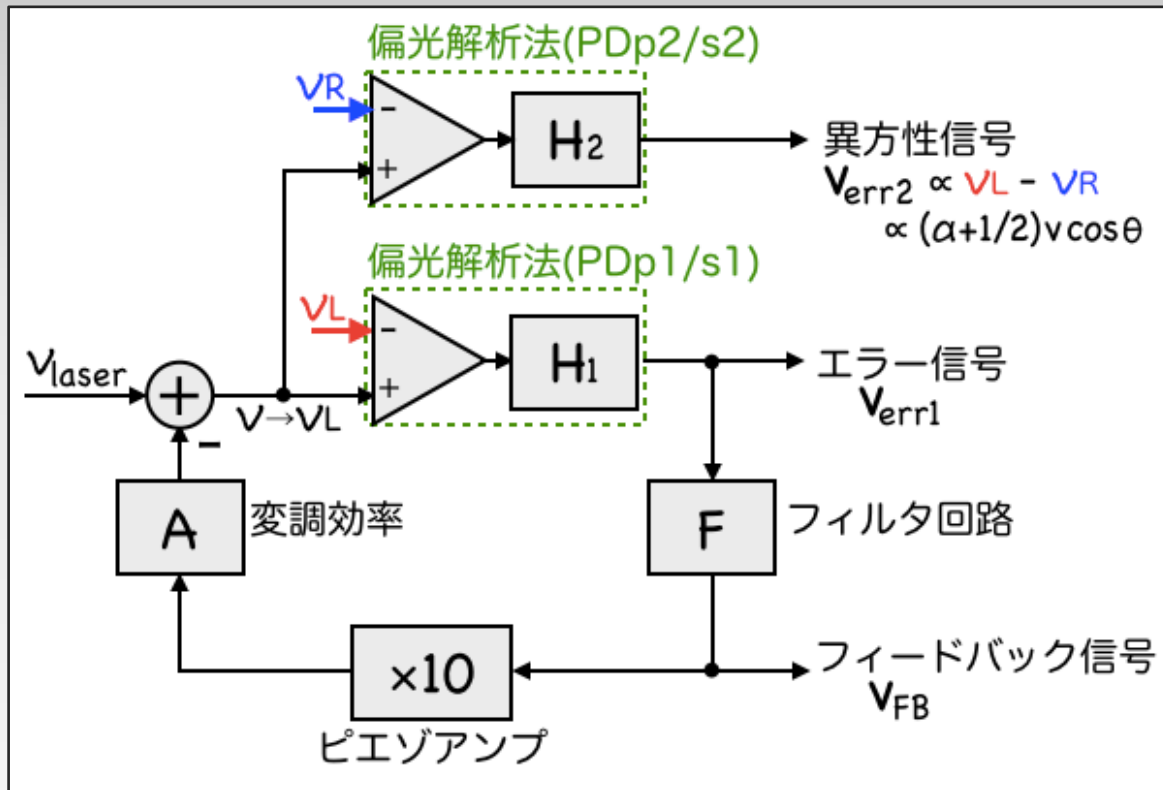
# 装置全体の構成



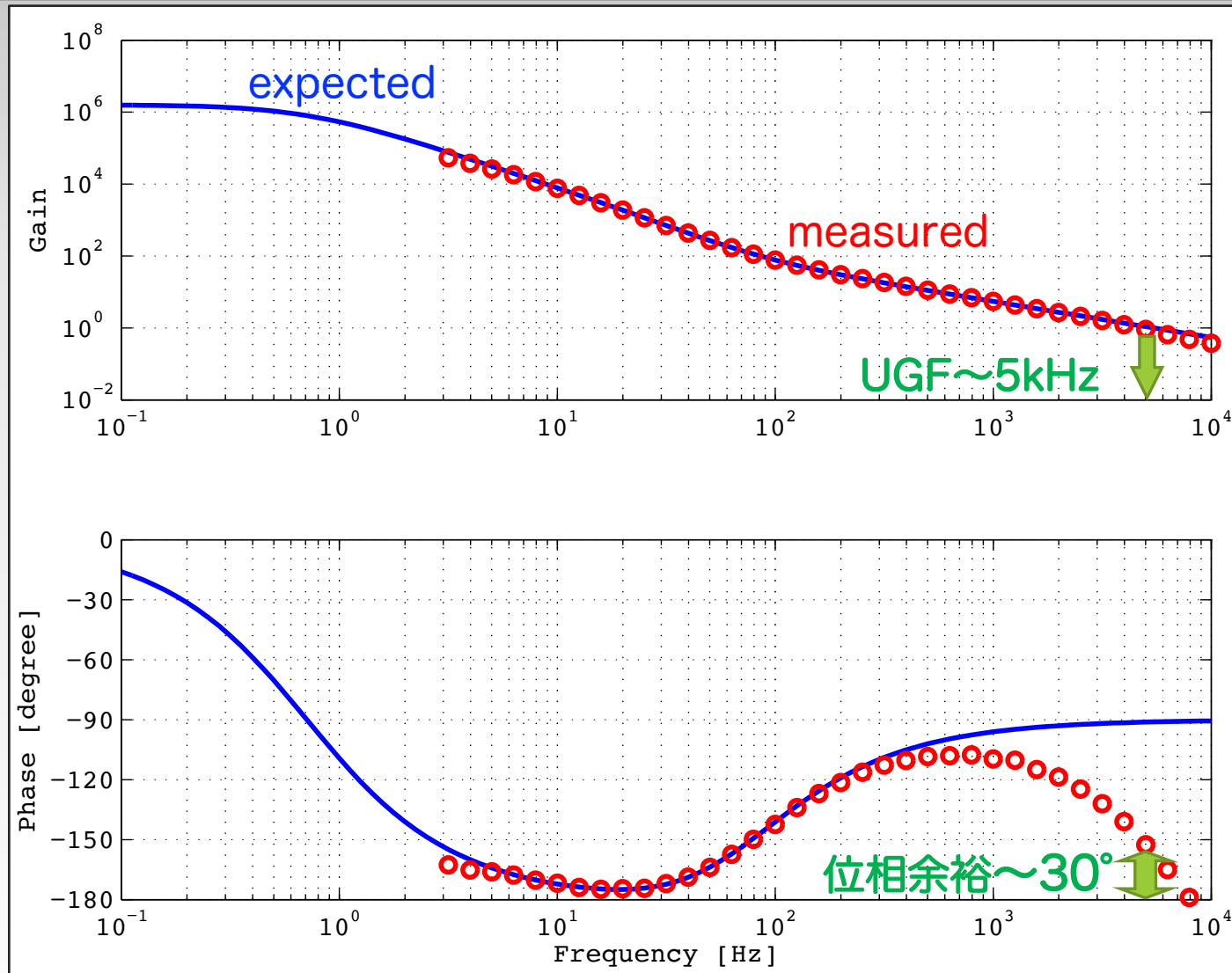
# 光リング共振器



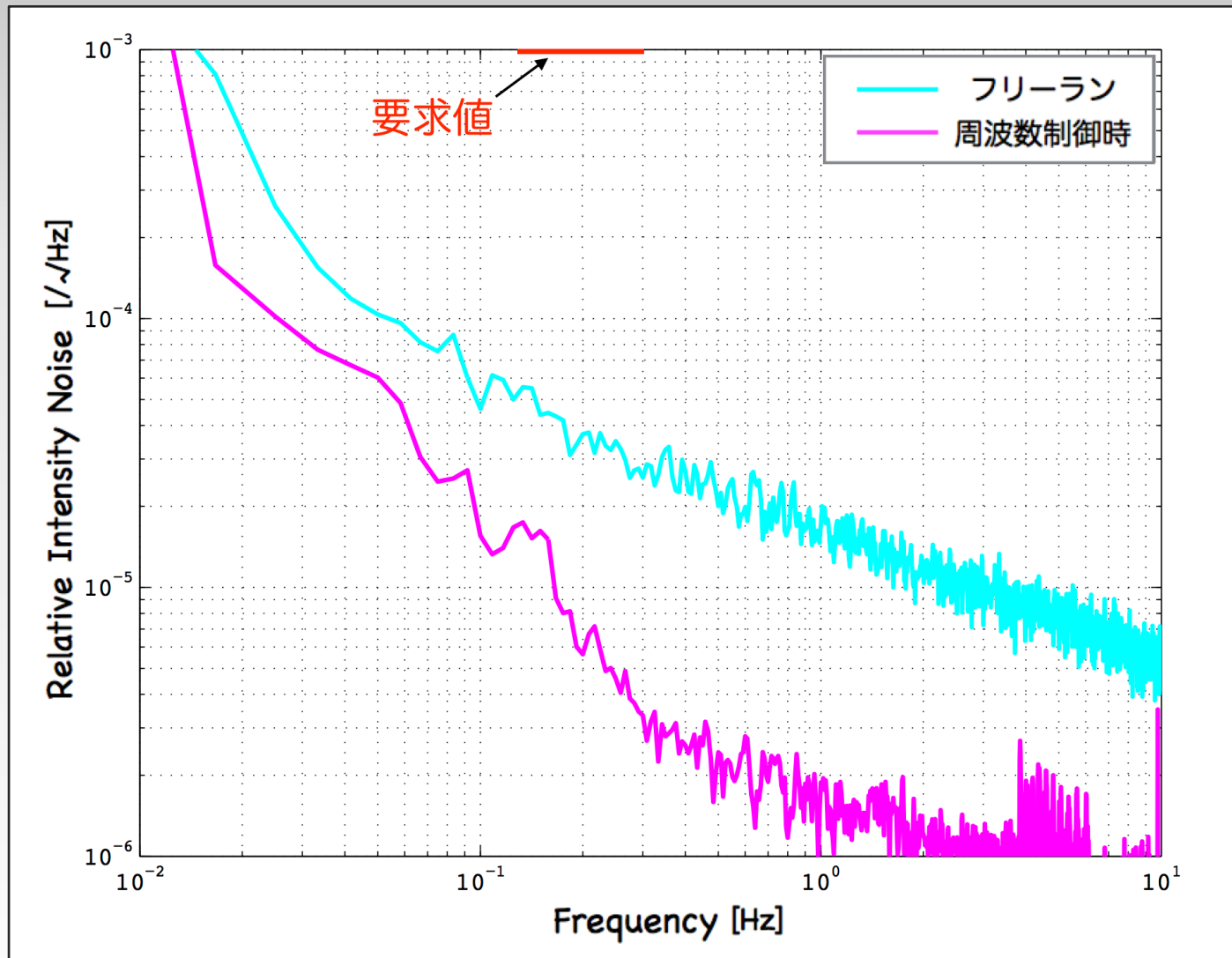
# 周波数制御のブロック図



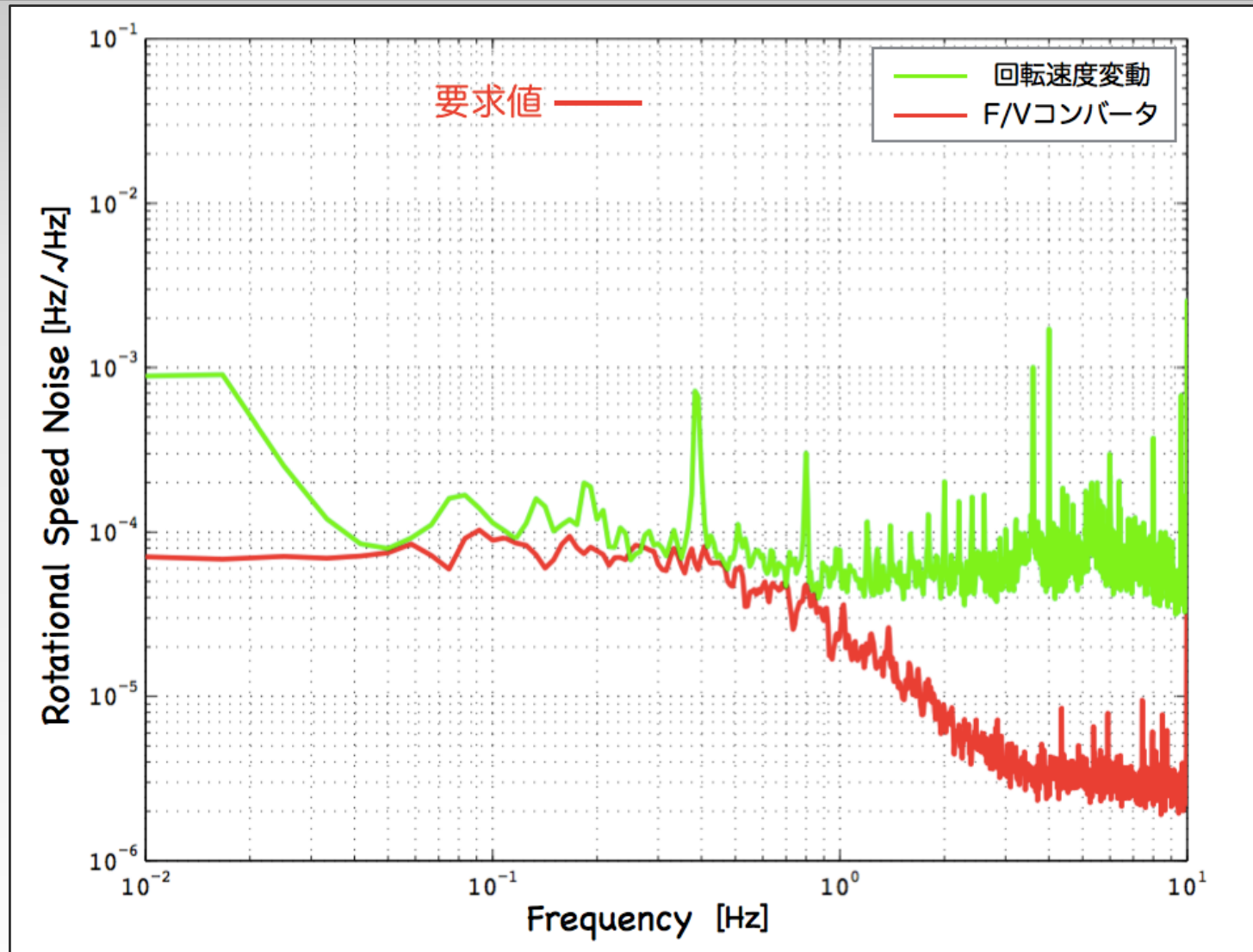
# 周波数制御のループ伝達関数



# レーザー強度ゆらぎ

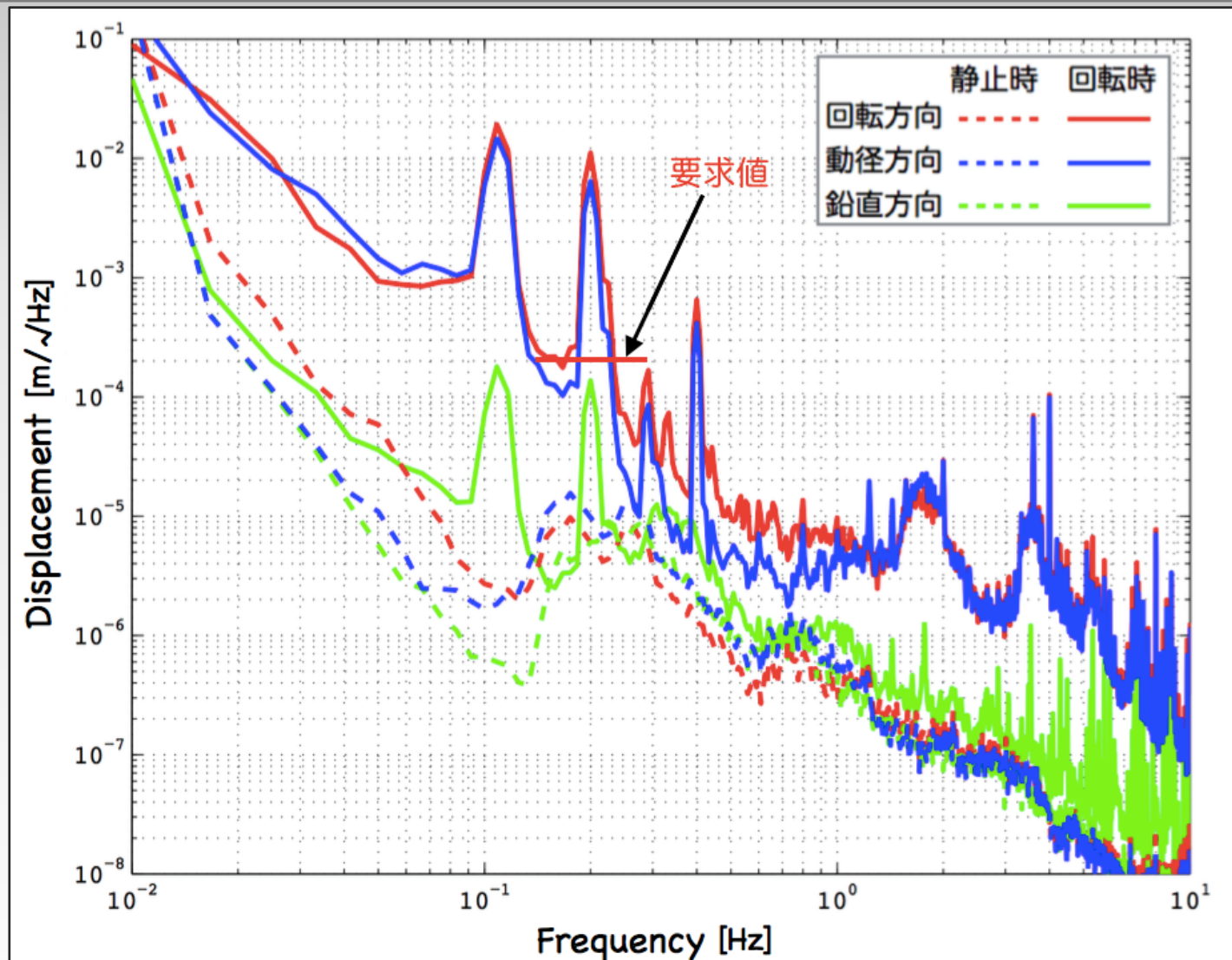


# 回転速度変動

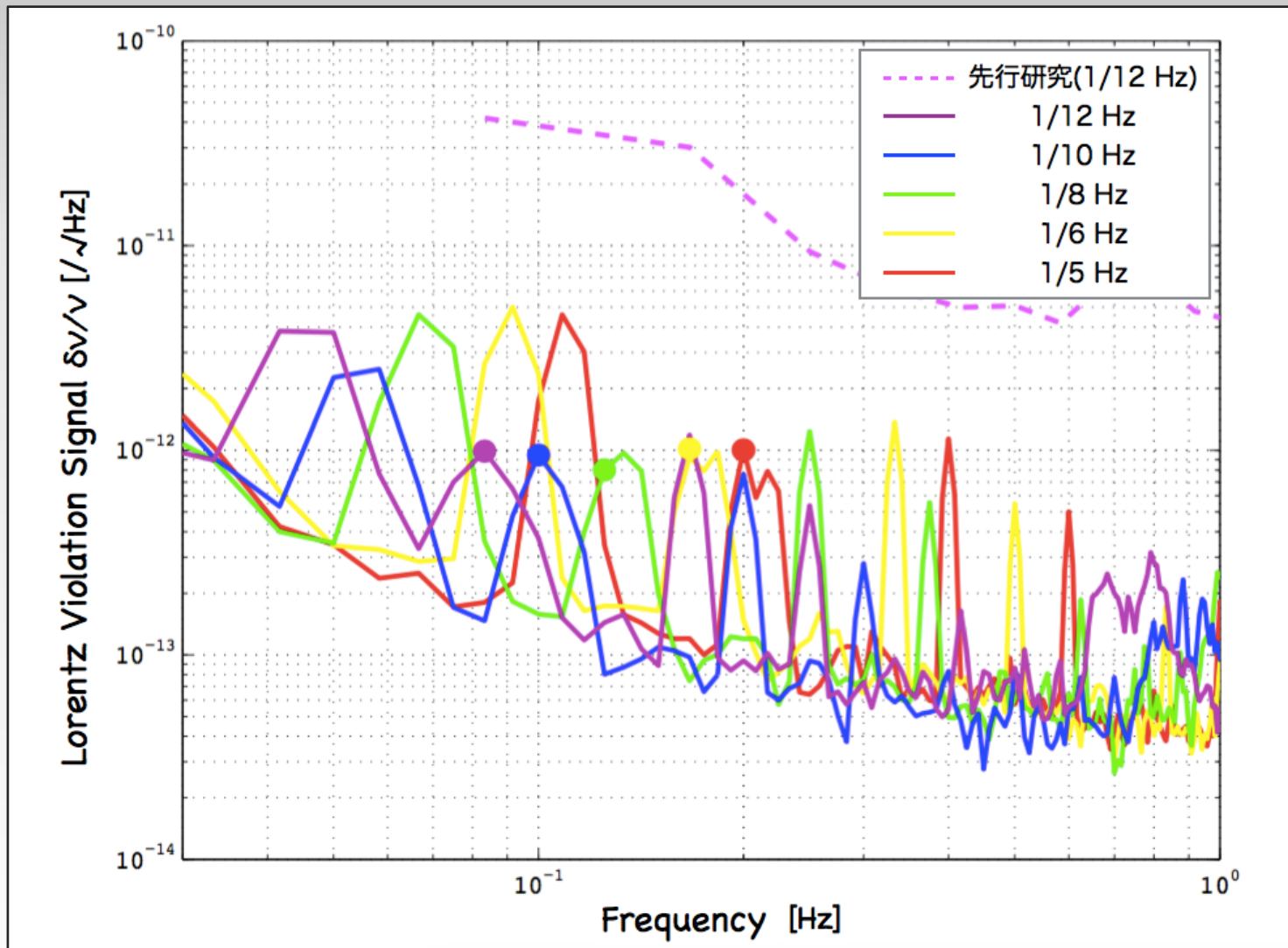




# 回転台の振動



# 回転周波数を変えた場合



# パラメータの一覧

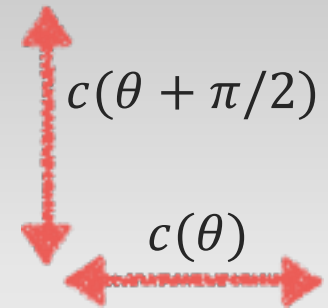
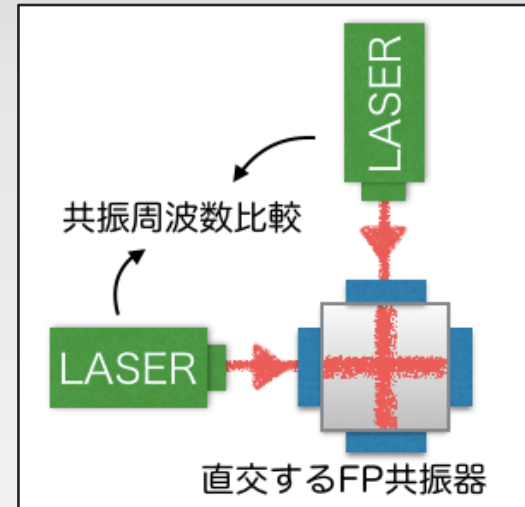
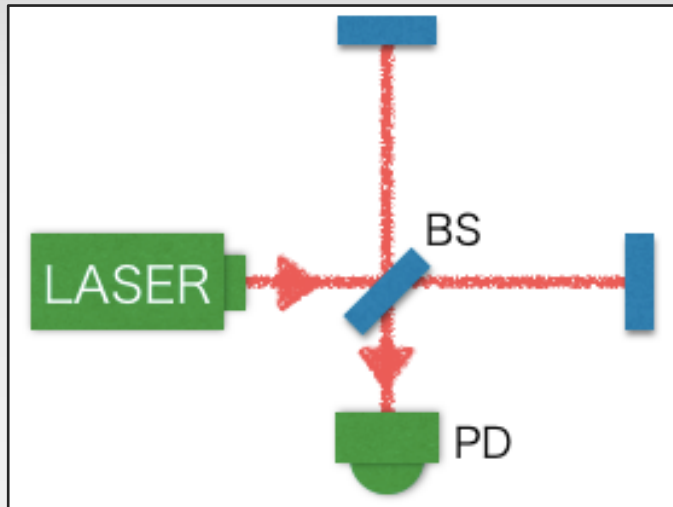
---

- 回転周波数  $f_{\text{rot}} = 0.2 \text{ Hz}$
- レーザー波長  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、周波数  $\nu = 1.9 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- 入力パワー  $P \sim 30 \text{ mW}$
- フィネス  $F \sim 50$ 、 $\text{FSR} \sim 1.5 \text{ GHz}$ 、 $\text{FWHM} \sim 30 \text{ MHz}$
- 共振器長  $L = 140 \text{ mm}$
- 媒質の長さ  $d = 20 \text{ mm}$ 、媒質の屈折率  $n = 3.69$
- CMB静止系に対する太陽系の速さ  $v = 369 \text{ km/s}$   
(地球の公転の速さ  $30 \text{ km/s}$ 、地球の自転の速さ  $0.5 \text{ km/s}$ )

以下必要なさそうな補足資料

# 先行研究(往復光速)

- 往復光速の異方性：直交する方向との光速の差  
→ Michelson干渉計、Fabry-Perot共振器で測定

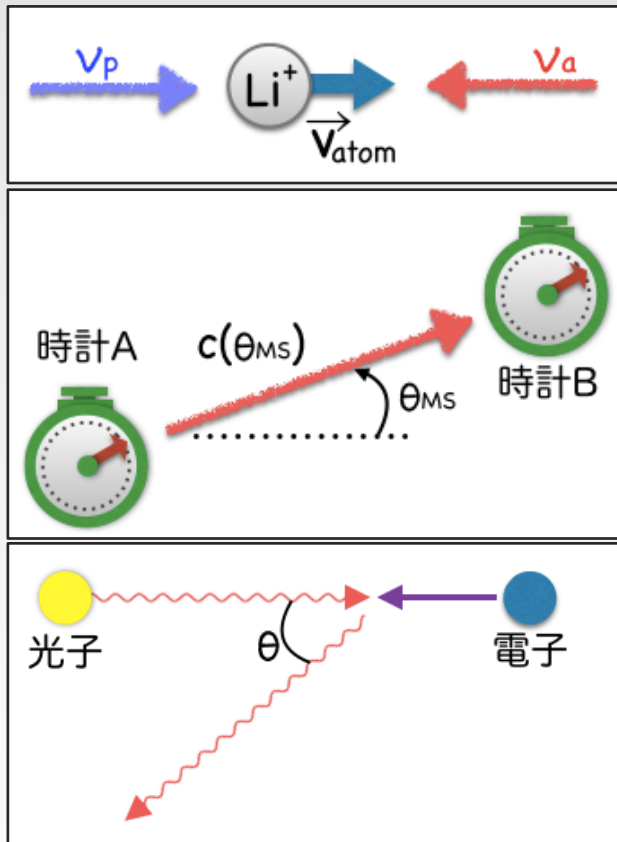
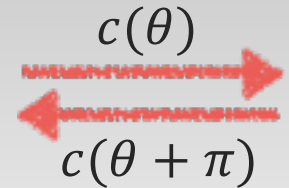


- 現在の最高精度： $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 1 \times 10^{-18}$   
… 直交する2つのマイクロ波共振器を使用

M. Nagel *et al.*, Nat. Commun. 6, 8174 (2015).

# 先行研究(片道光速) [1/2]

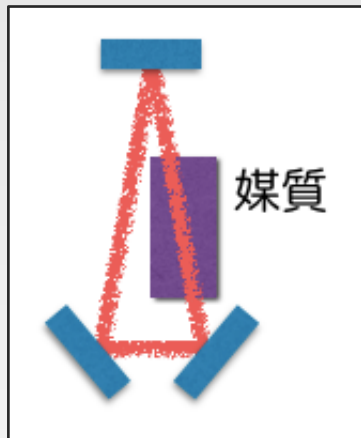
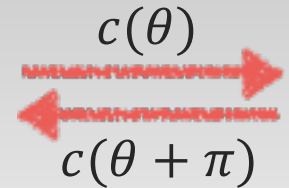
- 片道光速の異方性：行きと帰りの光速の差  
 → Michelson干渉計、Fabry-Perot共振器では測定できない(行きと帰りでキャンセルされる)



- 高速で動く原子またはイオン  
 →  $|\delta c/c| \lesssim 2 \times 10^{-11}$   
 B. Botermann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 120405 (2014).
- 2地点間で時計比較  
 →  $|\delta c/c| \lesssim 1 \times 10^{-11}$   
 P. Delva *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 221102 (2017).
- Compton散乱  
 →  $|\delta c/c| \lesssim 2 \times 10^{-14}$   
 J.-P. Bocquet *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 241601 (2010).

# 先行研究(片道光速) [2/2]

- 片道光速の異方性：行きと帰りの光速の差
  - Michelson干渉計、Fabry-Perot共振器では測定できない(行きと帰りでキャンセルされる)



光リング共振器 + 光路の一部に媒質

- 行きと帰りを非対称にする
- 片道光速の異方性に感度をもつようになる

- 現在の最高精度： $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 6 \times 10^{-15}$

Y. Michimura *et al.*, Phys. Rev. D **88**, 111101 (2013).

- この装置を改良して、さらなる高感度化を目指す



# 雑音低減のための装置の改良

- 先行研究の感度は**振動**で制限されていると考えられる  
回転時の雑音を静止時のレベルまで下げるため、  
主に次の2種類の装置改良を行った

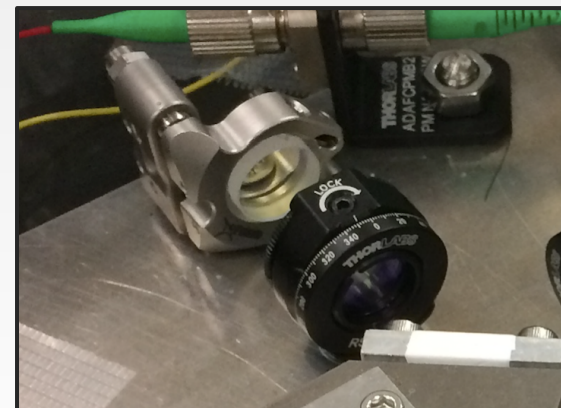
振動そのものを低減

改良点1：**回転機構**  
(連続回転実現)



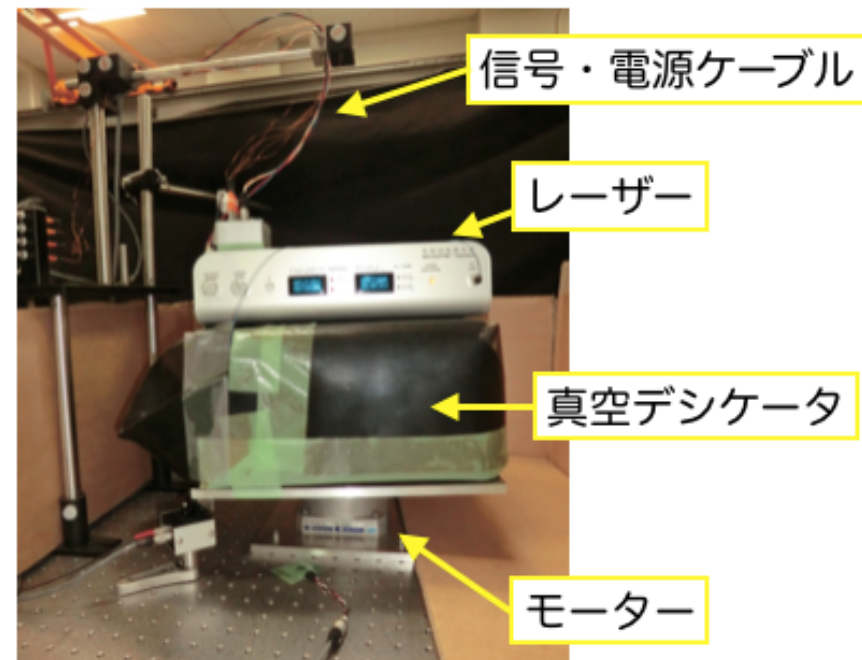
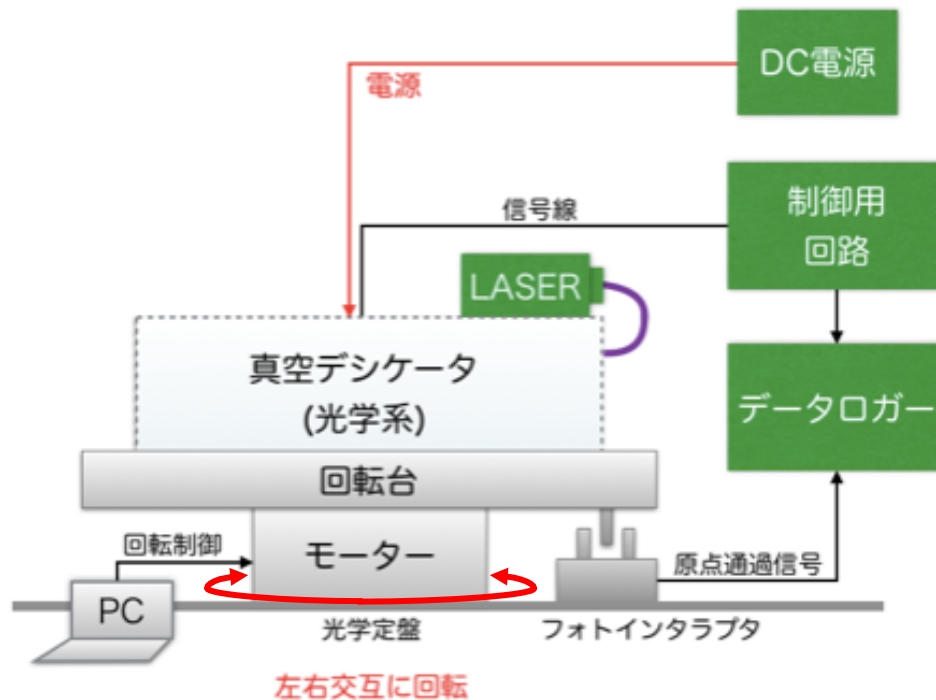
振動感度を低減

改良点2：**光学系**  
(セミモノリシック光学系)



# 回転機構の改良 [1/2]

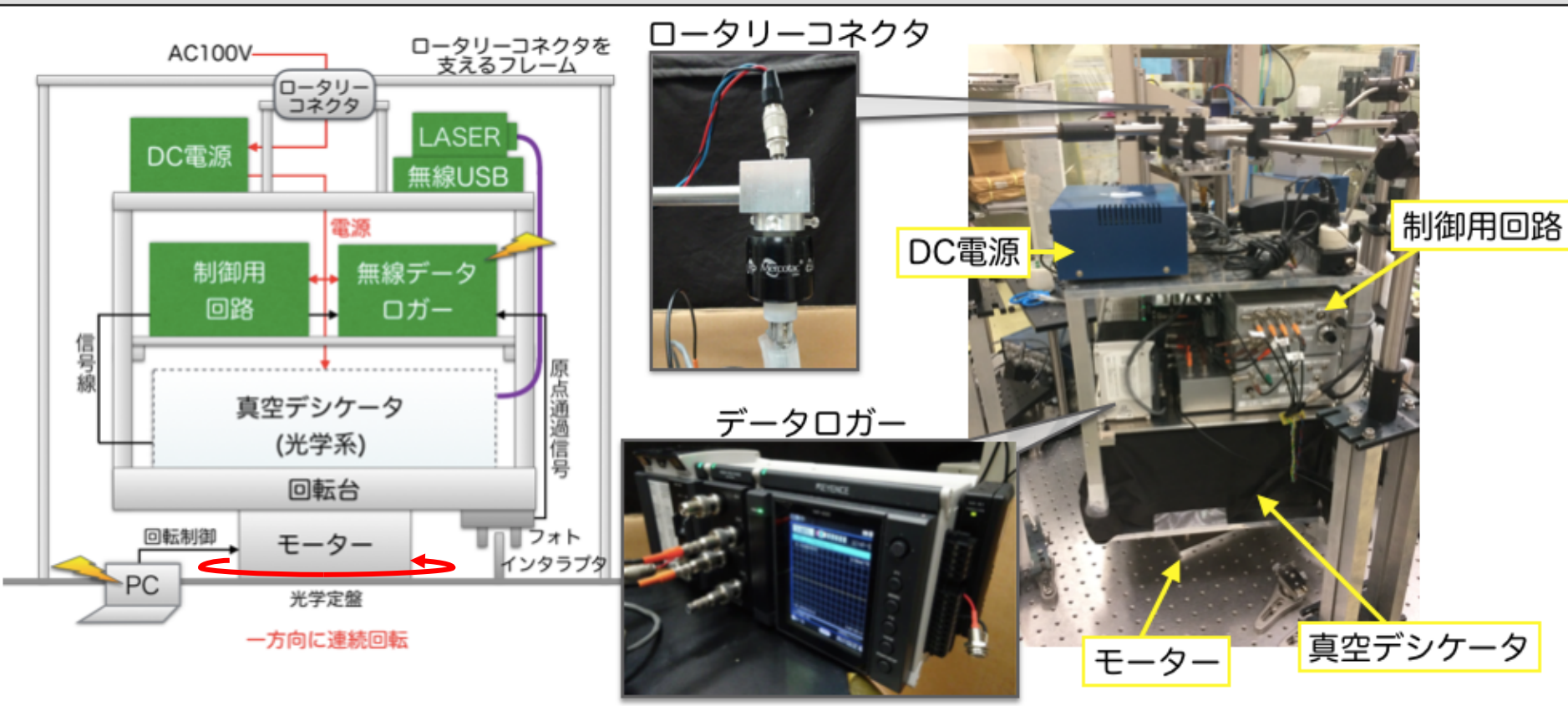
- 先行研究…電気配線上の都合で連続回転できなかった  
(右回りと左回りを1回転ずつ交互に繰り返していた)
- ⇒ 回転と停止を繰り返すので、どうしても振動が大きくなる



先行研究の装置

# 回転機構の改良 [2/2]

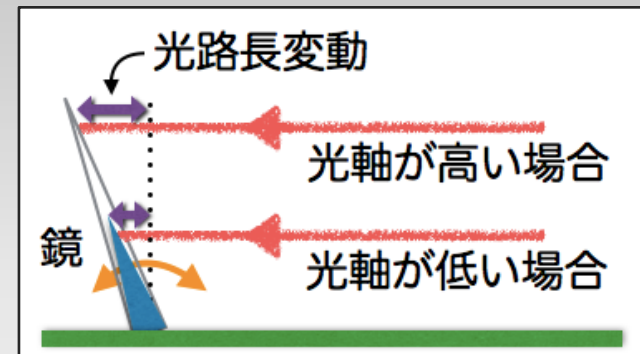
- ロータリーコネクタと無線データロガーを導入して、  
**連続回転を実現** ⇒ 振動が低減される



改良後の装置

# 光学系の改良 [1/2]

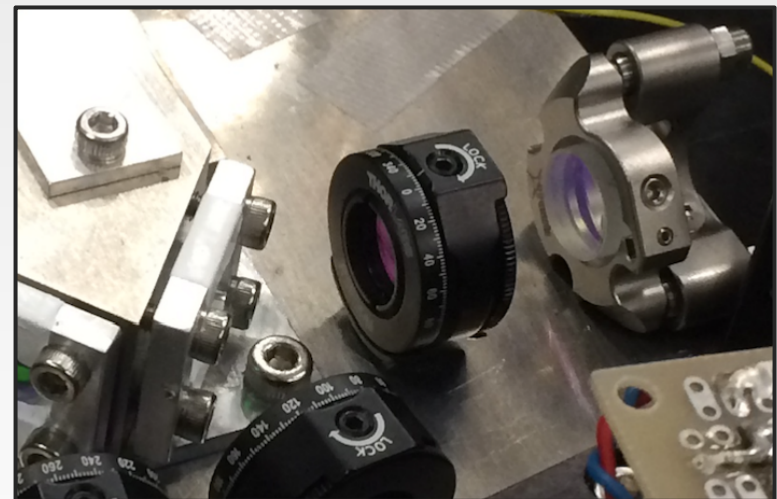
- 光軸を下げて、振動感度を低減  
ペデスタルを用いず、ミラーホルダを直接土台にネジ止め  
(**セミモノリシック光学系**)



先行研究



改良後



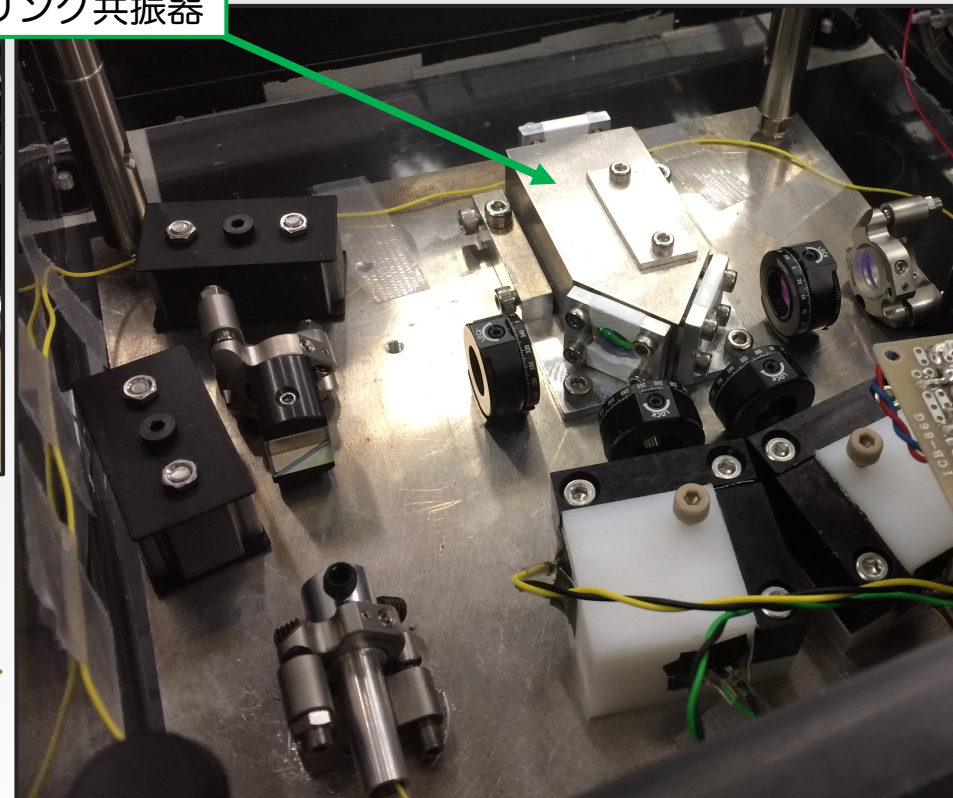


# 光学系の改良 [2/2]

## 改良後の光学系

- ・ セミモノリシック光学系
- ・ 光軸の高さ：15mm

光リング共振器



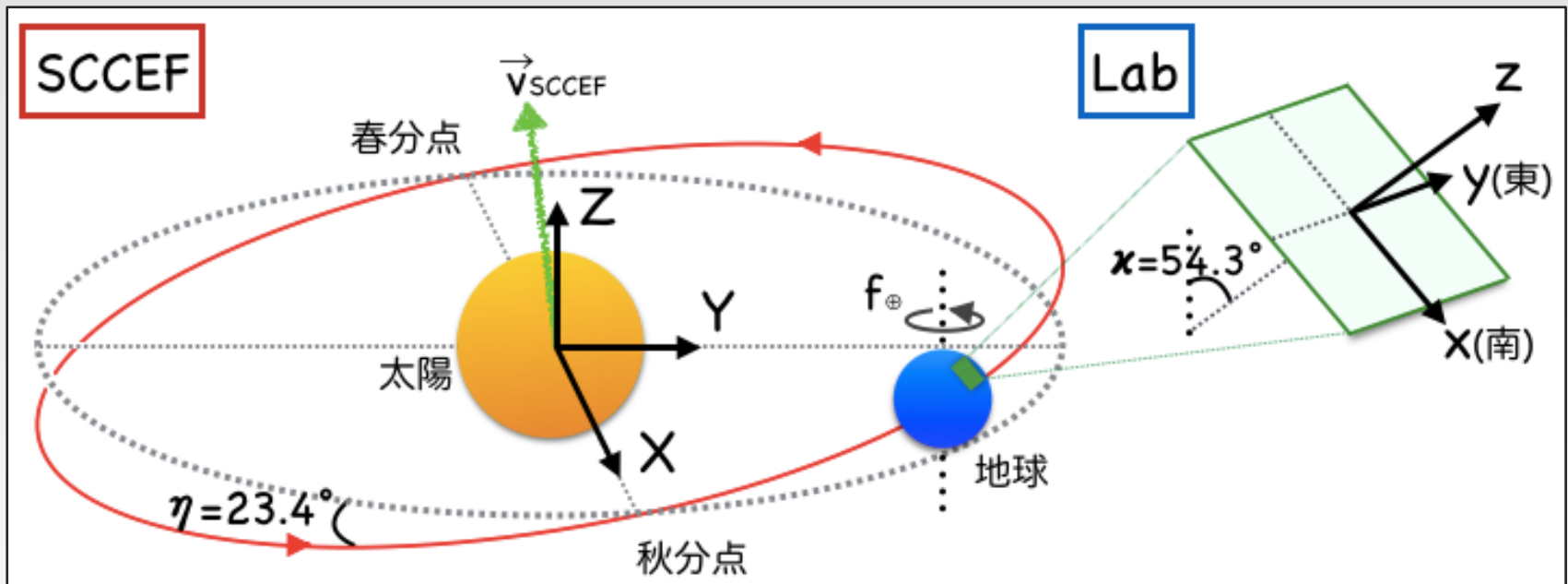
## 先行研究の光学系

- ・ ペデスタル光学系
- ・ 光軸の高さ：50mm



# SCCEF

- 地球の自転の影響を受けない系を考える  
→ **S**un-**C**entered **C**elestial **E**quatorial **F**rame  
(太陽中心赤道座標系)



- CMB静止系に対してほぼ一定速度で動いている  
(CMB観測より、**赤緯** $-7.2^\circ$ 、**赤経** $168^\circ$ 方向に  $v_{SCCEF} = 369 \text{ km/s}$ )

# 解析方法

- 1) 異方性信号から12回転(=1分)ごとに直交位相振幅( $C_1, S_1$ )を計算

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = C_1 \cos \omega_{\text{rot}} t + S_1 \sin \omega_{\text{rot}} t$$

- 2) ( $C_1, S_1$ )をSCCEFの直交位相振幅( $C_1', S_1'$ )に座標変換

自転の影響で時間変化する

自転により時間変化せず、異方性のある方向に信号が出る

- 3) ( $C_1', S_1'$ )のCMB静止系に対する運動方向(赤経168°方向)の成分を調べることで、 $\alpha + 1/2$ を求める

↳ MS理論では、絶対静止系に対する運動方向に異方性が現れる

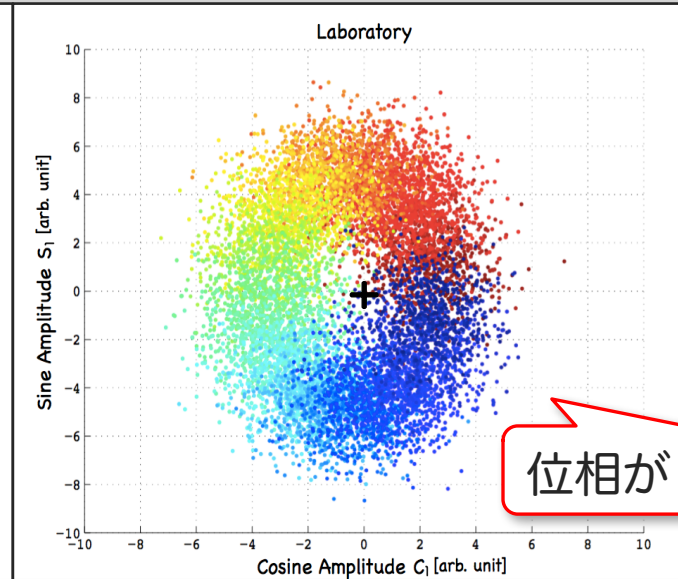
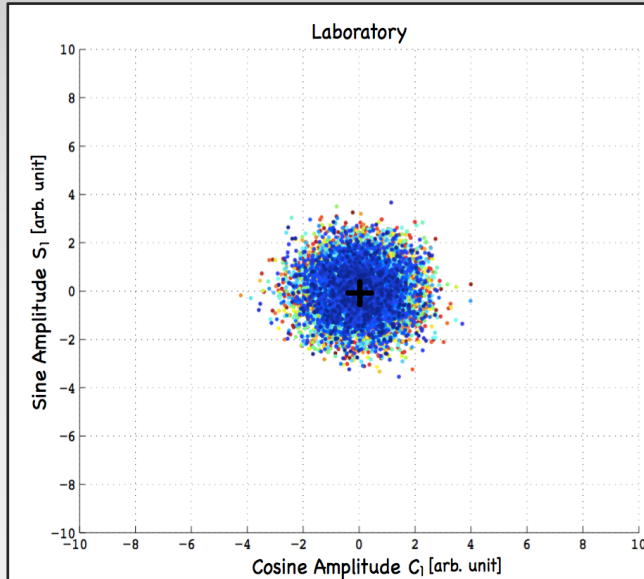


# 直交位相振幅のシミュレーション

異方性が無い場合

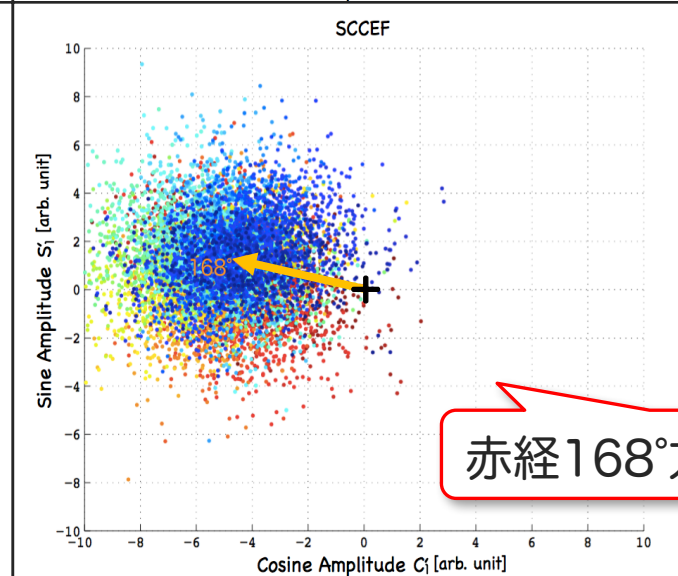
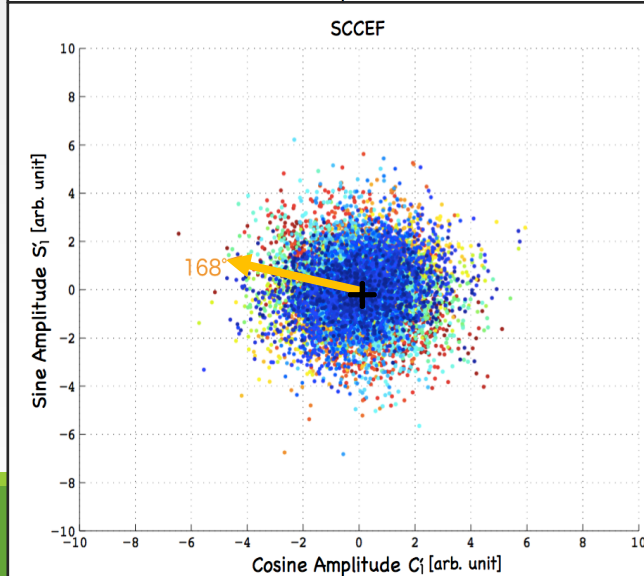
異方性がある場合

実験室系  
( $C_1, S_1$ )



位相が1日1回転

SCCEF  
( $C_1', S_1'$ )

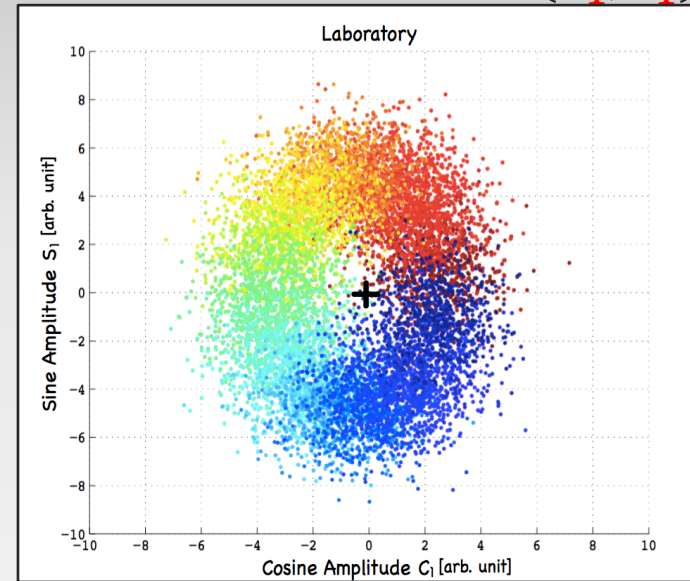


赤経168°方向に信号

# 回転と同期する雑音の問題点

- $(C_1, S_1)$ の1日周期の変動を測定することで異方性探査
- 回転と同期する雑音があっても、ずっと一定で $(C_1, S_1)$ の変動に寄与しなければ問題無い
- 「**回転と同期する雑音の振幅が変動**」すると問題になる

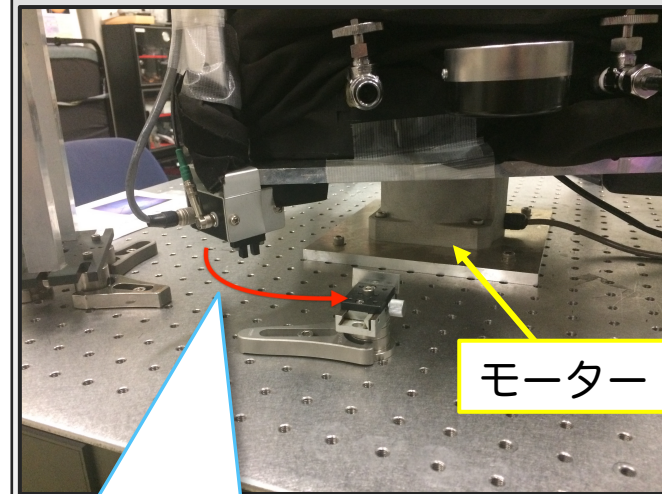
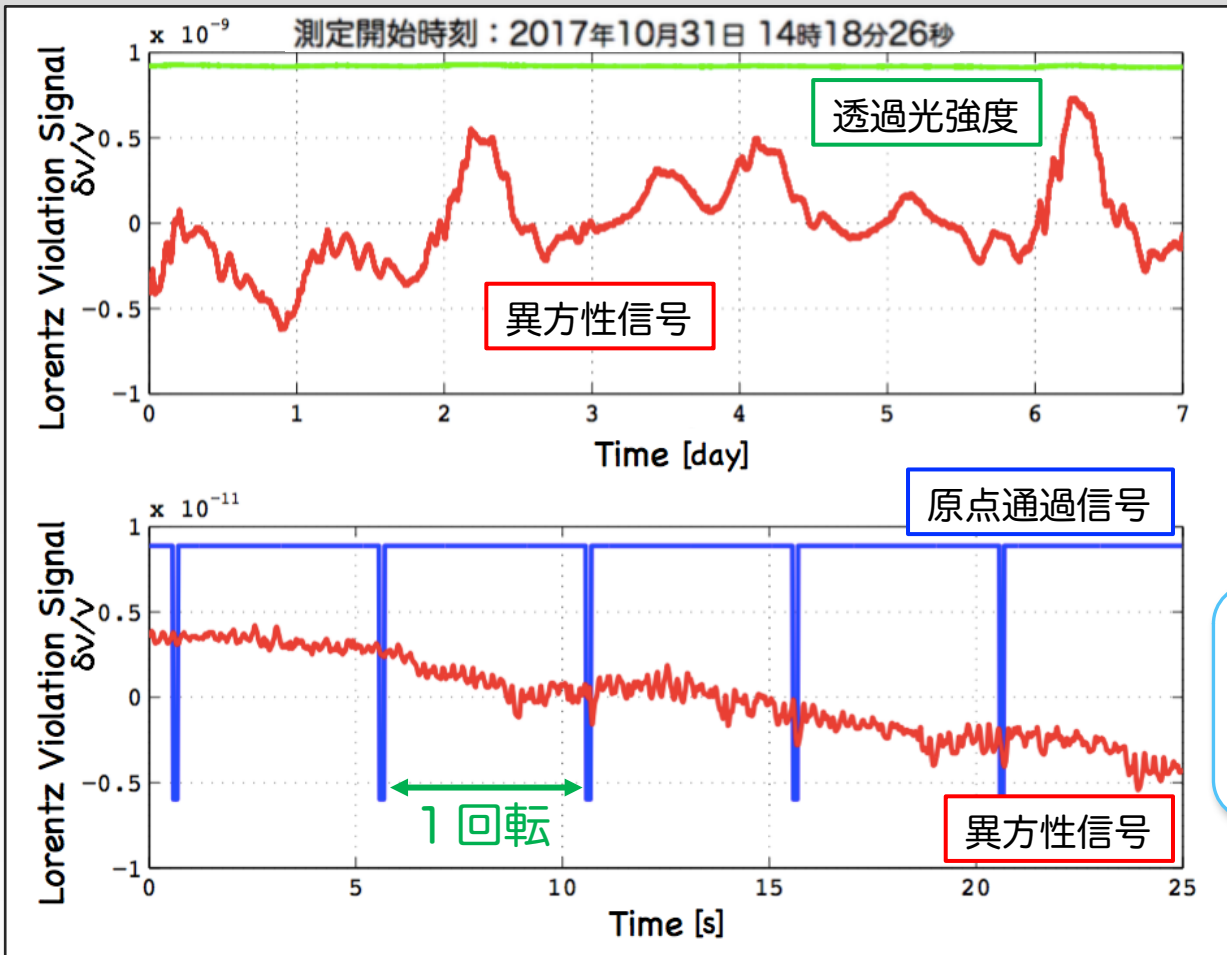
異方性がある場合の $(C_1, S_1)$



- ✓ ランダムに変動する場合 → 感度悪化につながる  
(統計誤差が増える)
- ✓ 自転に同期して変動する場合 → 異方性と区別できない  
(系統誤差が増える)

# 測定されたデータ

- 7日間の測定期間中レーザーの周波数ロックは落ちなかった

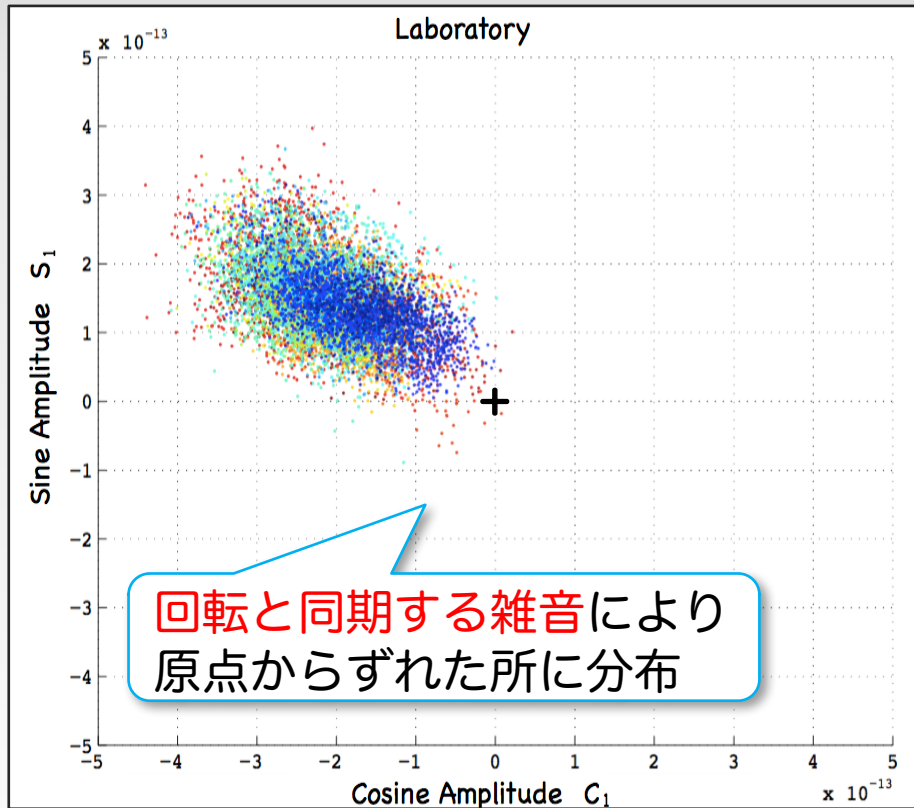


フォトインタラプタで  
原点通過信号を取得  
→ 回転台の向きを把握

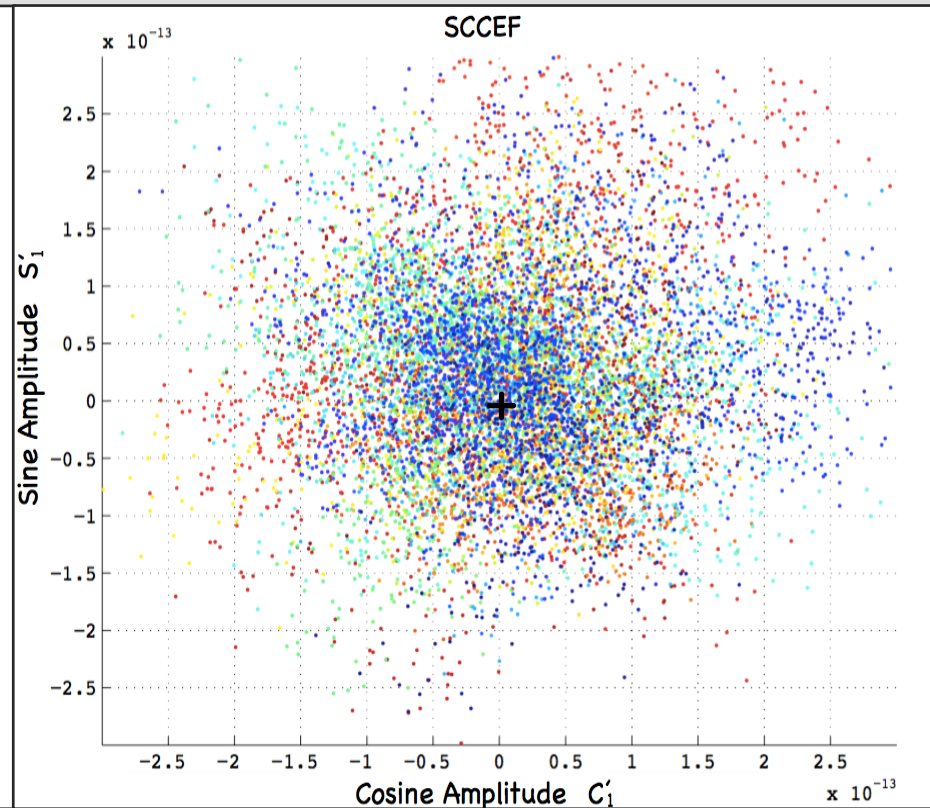
# 直交位相振幅 (雑音除去前)

- 12回転毎に直交位相振幅を計算

実験室系( $C_1, S_1$ )

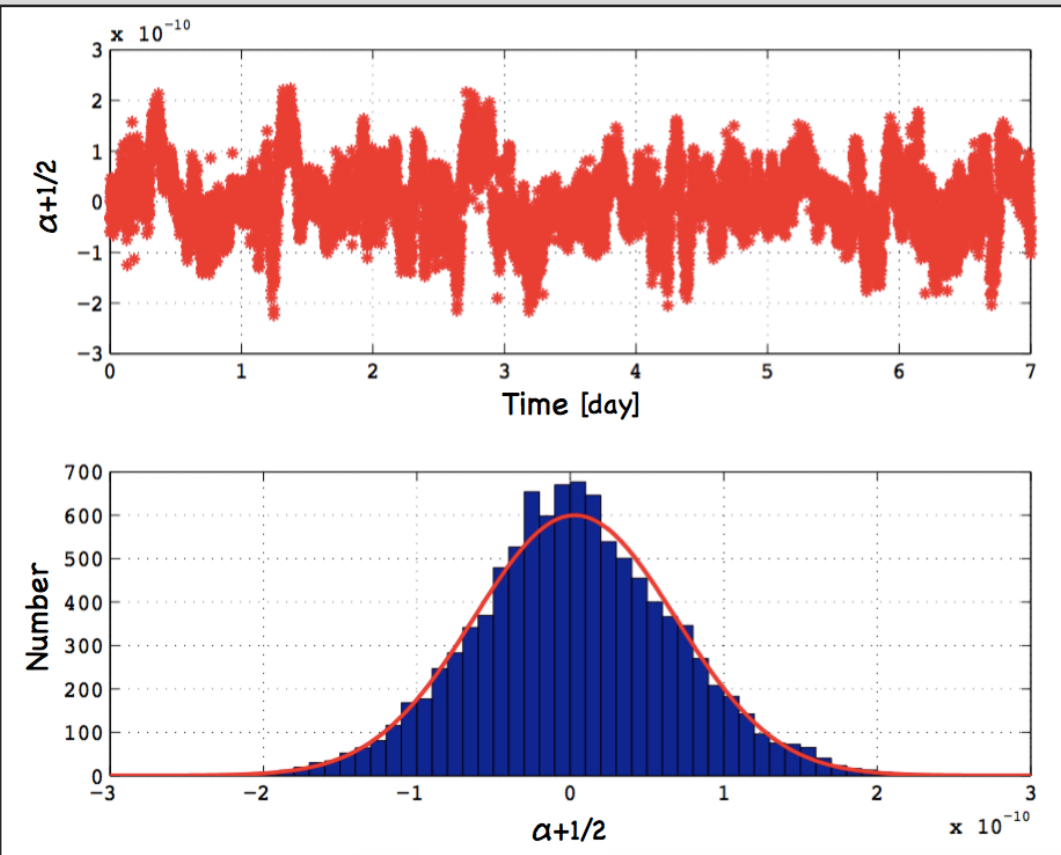


SCCEF( $C_1', S_1'$ )



# $\alpha + 1/2$ (雑音除去前)

➤ 直交位相振幅の赤経168°成分から $\alpha + 1/2$ を計算



平均：

$$\overline{\alpha + 1/2} = 3.0 \times 10^{-12}$$

標準偏差：

$$\sigma(\alpha + 1/2) = 6.6 \times 10^{-11}$$

全データ数： $N \sim 1 \times 10^4$

相関の残るデータ数： $n \sim 22$



平均値の精度(統計誤差)：

$$\begin{aligned} \sigma(\overline{\alpha + 1/2}) &= \frac{\sigma(\alpha + 1/2)}{\sqrt{N/n}} \\ &= 3.1 \times 10^{-12} \end{aligned}$$

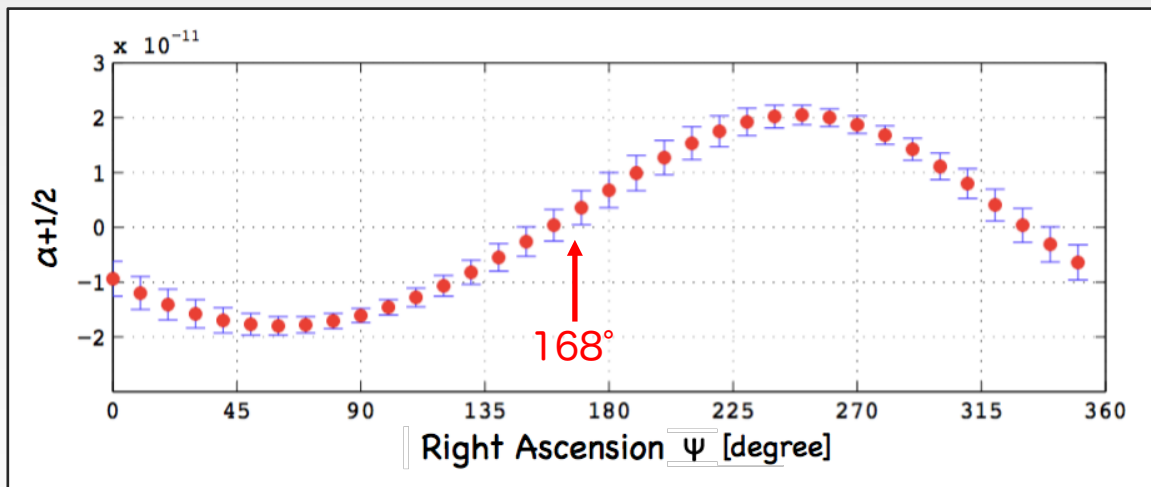


# 系統誤差の見積もり（雑音除去前）

- 「**回転と同期する雑音の振幅が自転と同期して変動**」  
 する場合は  $\alpha + 1/2$  の値をずらす（系統誤差が生じる）  
 → この効果を確認するために「**別の方向の異方性**」を測定

※ CMB静止系を絶対静止系と仮定する場合

→ 実験室系の速度方向(**赤経168°方向**)の異方性を求めている



➤  $\alpha + 1/2$ の測定結果

$\alpha + 1/2$

$$= (3.0 \pm 3.1 \pm 20) \times 10^{-12}$$

統計誤差 ↑      ↑ 系統誤差

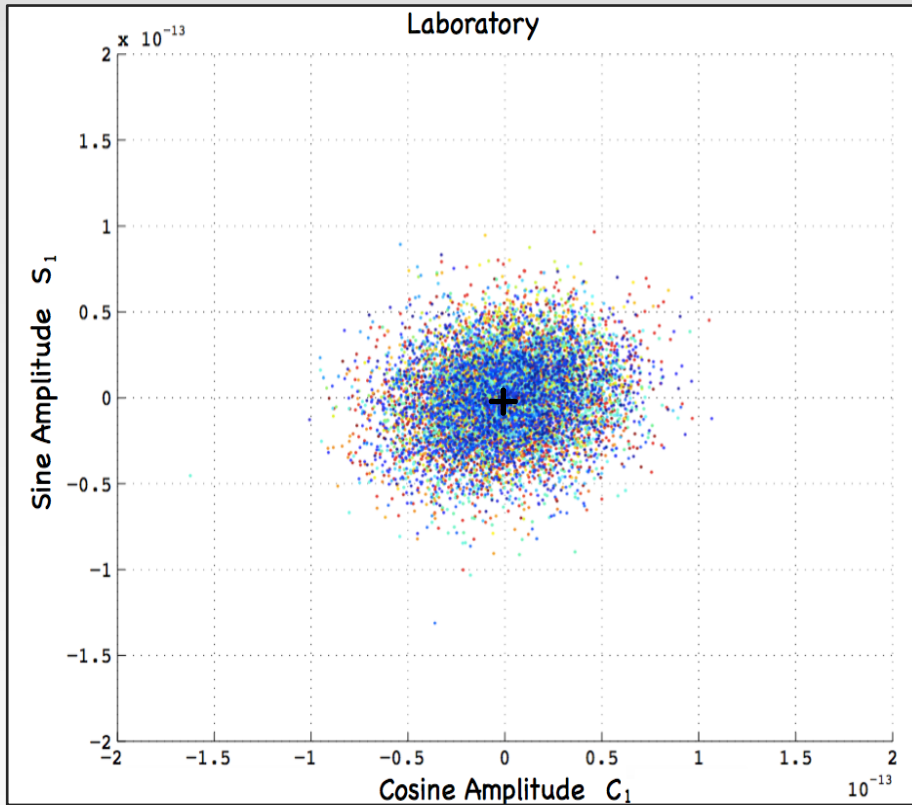
※ 較正による系統誤差は  
最大10%程度



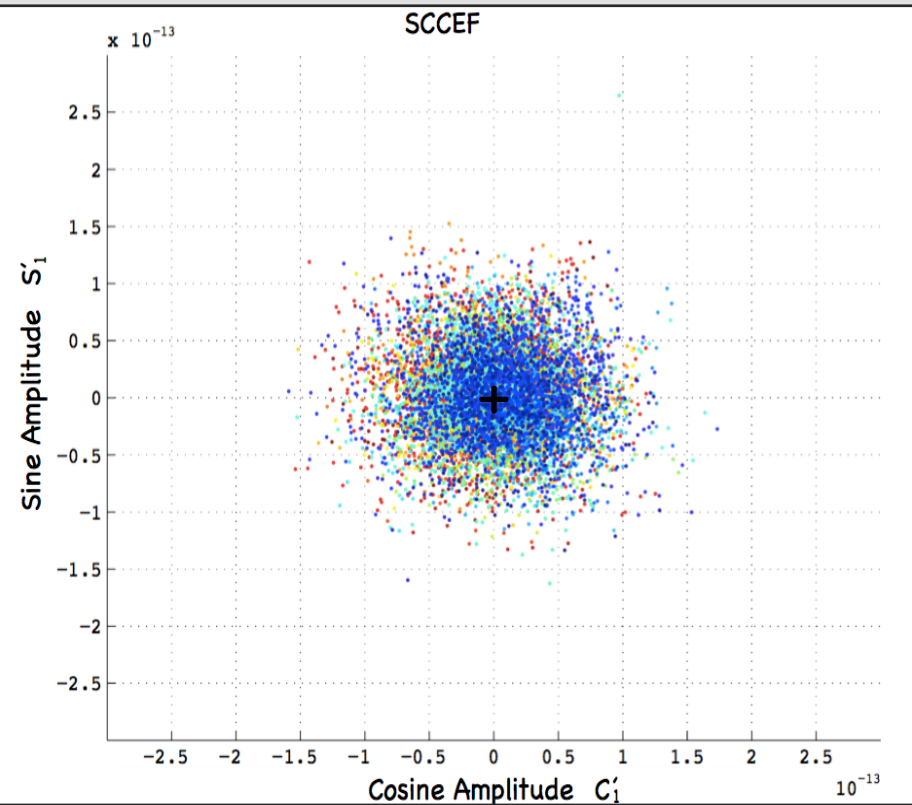
# 直交位相振幅（雑音除去後）

➤ 12回転毎に直交位相振幅を計算

実験室系( $C_1, S_1$ )

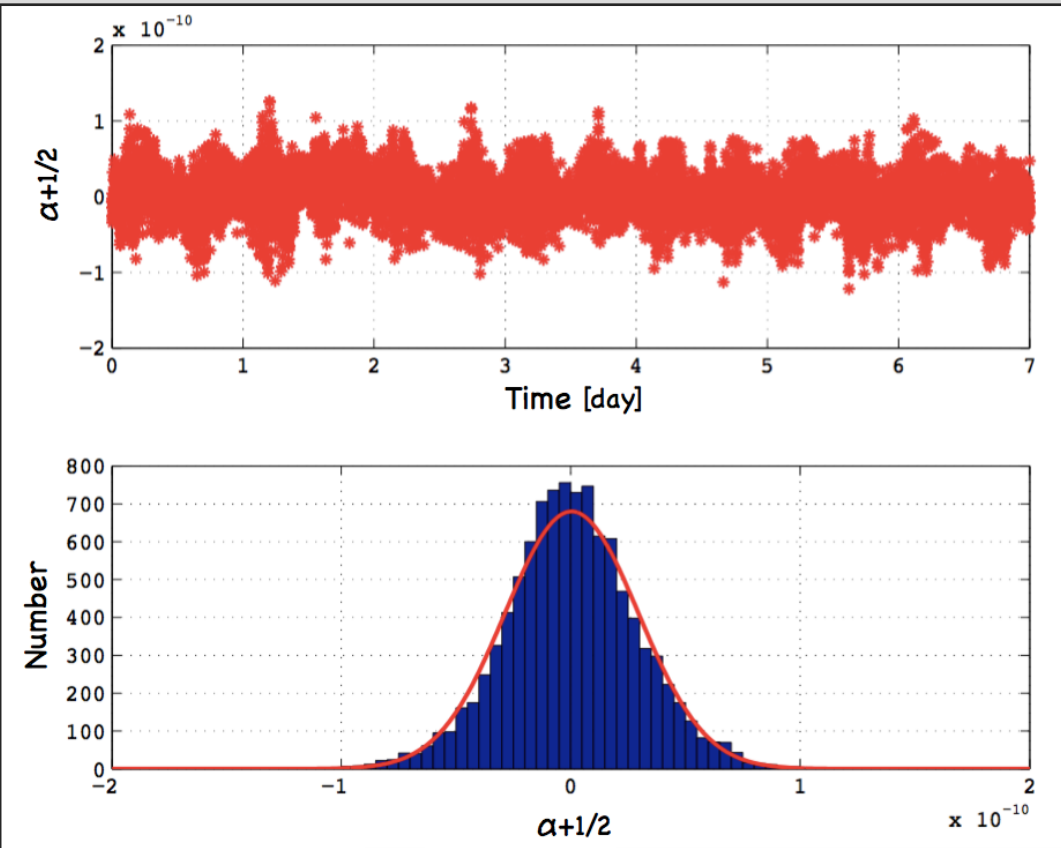


SCCEF( $C_1', S_1'$ )



# $\alpha + 1/2$ (雑音除去後)

- 直交位相振幅の赤経168°成分から $\alpha + 1/2$ を計算



平均：

$$\overline{\alpha + 1/2} = 4.3 \times 10^{-13}$$

標準偏差：

$$\sigma(\alpha + 1/2) = 2.9 \times 10^{-11}$$

全データ数： $N \sim 1 \times 10^4$

相関の残るデータ数： $n \sim 37$

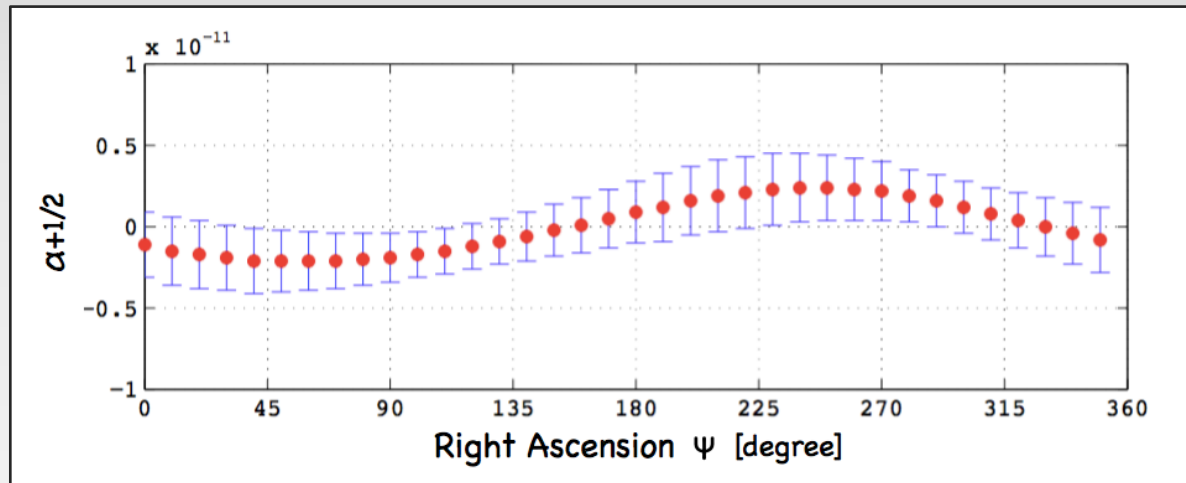


平均値の精度(統計誤差)：

$$\begin{aligned} \sigma(\overline{\alpha + 1/2}) &= \frac{\sigma(\alpha + 1/2)}{\sqrt{N/n}} \\ &= 1.8 \times 10^{-12} \end{aligned}$$

# 系統誤差の見積もり（雑音除去後）

- 「**回転と同期する雑音の振幅が自転と同期して変動**」する効果を見積もるために「**別の方向の異方性**」を測定



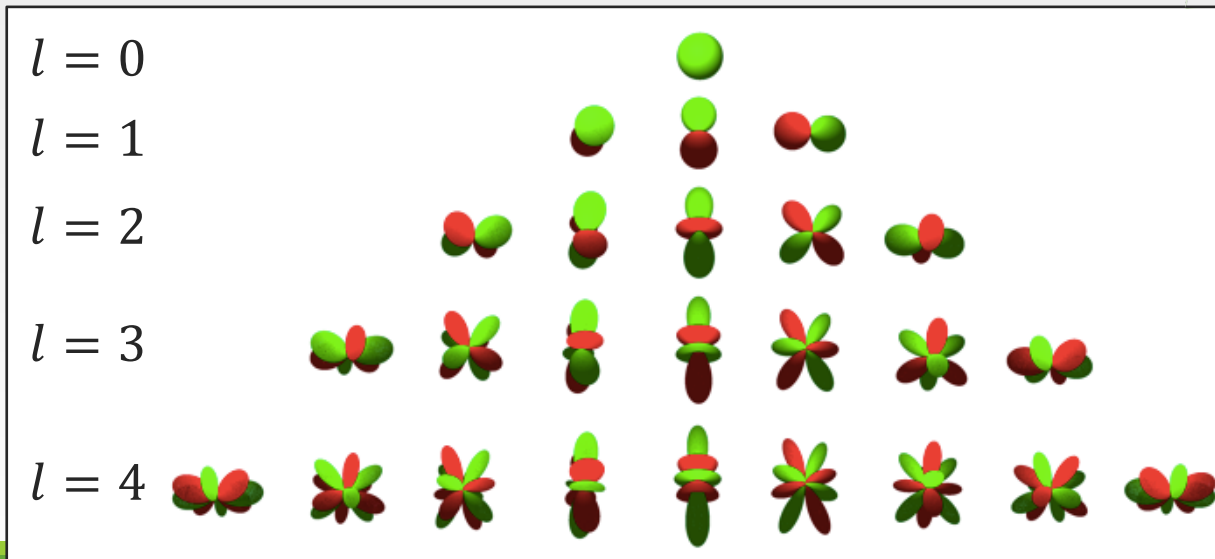
- $\alpha + 1/2$ の測定結果
- 統計誤差 ↓      ↓ 系統誤差
- 雑音除去前： $\alpha + 1/2 = (3.0 \pm 3.1 \pm 20) \times 10^{-12}$
  - 雑音除去後： $\alpha + 1/2 = (0.4 \pm 1.8 \pm 2.3) \times 10^{-12}$
- $|\delta c/c| \lesssim 5 \times 10^{-15}$  (先行研究と同じオーダー)

# 異方性の球面調和関数展開(概要)

- 「**拡張標準理論**」：近年よく用いられる別の検証理論
- ・ 標準模型のLagrangian密度にLorentz不変性を破る項を加える
  - ・ 光速の異方性は光子のLorentz不変性の破れに対応
  - ・ **任意の異方性が生じる**

→ 異方性を球面調和関数  $Y_l^m$  で展開

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



$l = 1, 3, \dots$   
→ **片道光速の異方性**

$l = 2, 4, \dots$   
→ **往復光速の異方性**

# 今後の展望 [1/2]

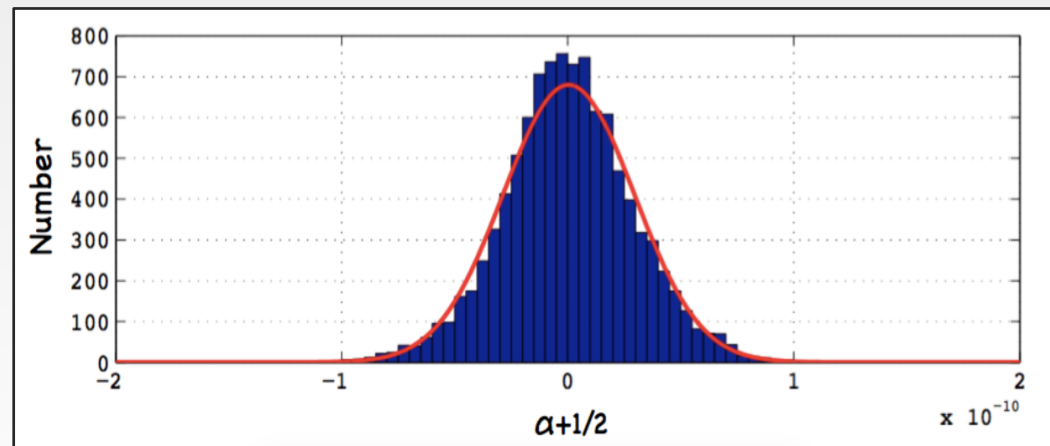
- 1年間の測定 → 約5倍精度向上
- 「回転と同期する雑音」を無くすことで約20倍精度向上

※ 回転と同期する雑音があると…

- ・ 自己相関により実効データ数が減少(相関のあるデータ数:37)  
→ 約6倍精度向上できる
- ・  $\alpha + 1/2$  のヒストグラムの幅が広がる  
→ 約3倍精度向上できる

- 合わせると約2桁精度向上できる

$10^{-17}$  のオーダーでの  
異方性探査が可能！



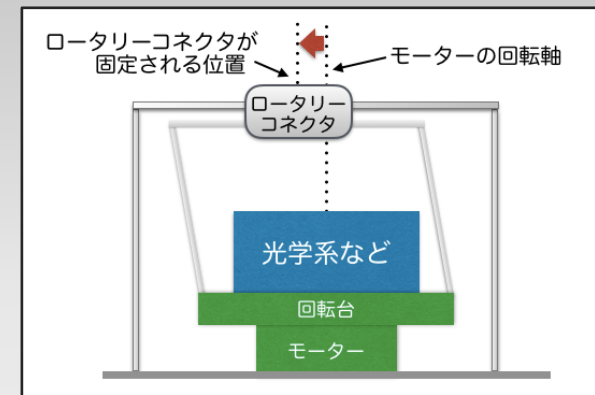
# 今後の展望 [2/2]

➤ 「回転と同期する雑音」の原因：

ロータリーコネクタの位置のずれ

→ 回転台に負荷がかかる

→ 光学系に負荷が伝わる



➤ 「回転と同期する雑音」を無くすために…

- ・ ロータリーコネクタ位置の調整機構
- ・ ロータリーコネクタを取り付ける位置
- ・ 光学系の固定方法の見直し



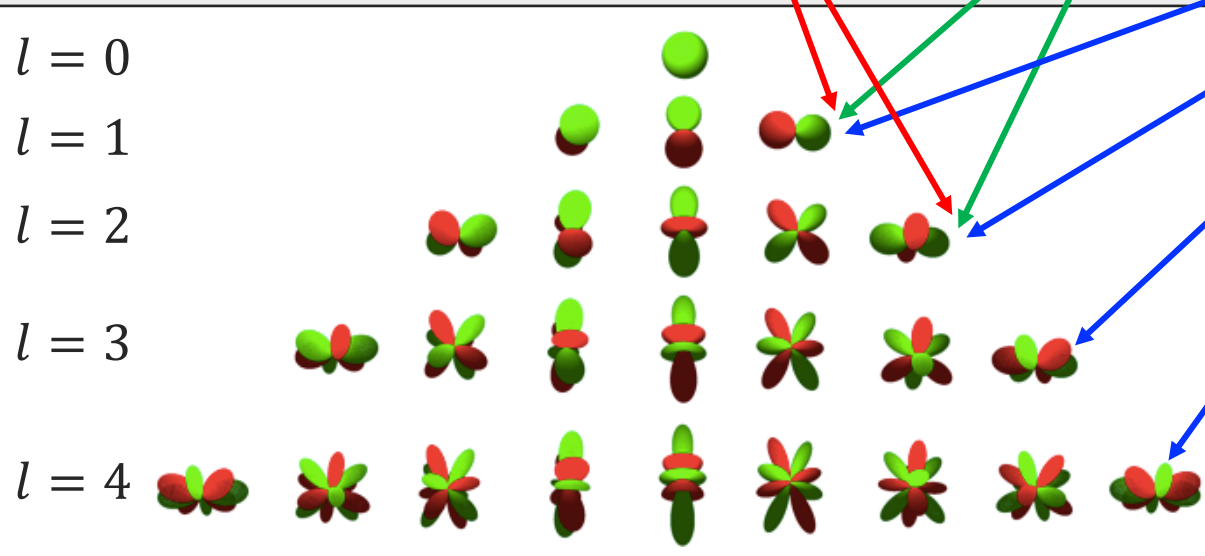
「回転と同期する雑音」を無くして $10^{-17}$ のオーダーでの異方性探査を目指す！



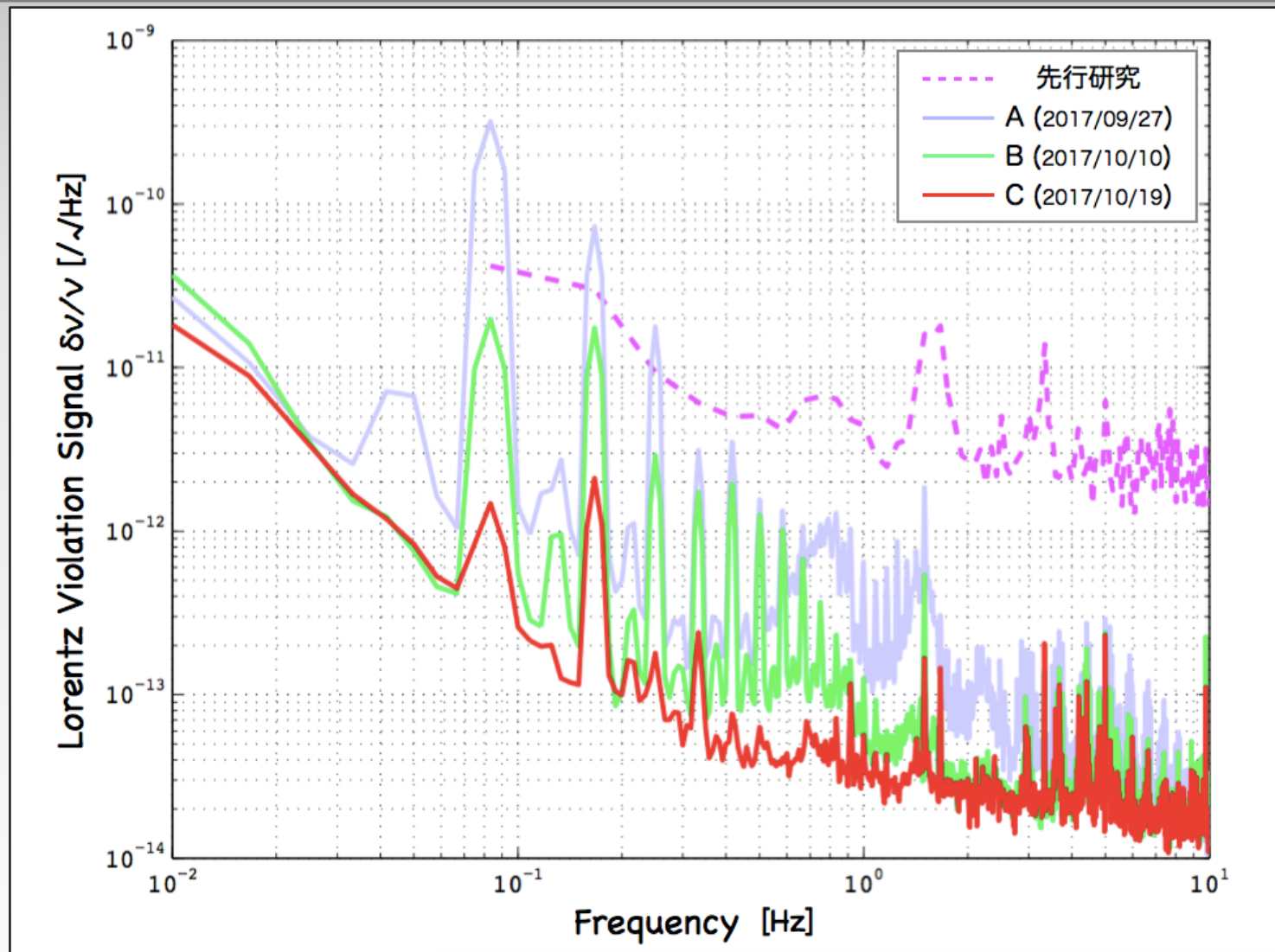
# 拡張標準理論と光速の異方性

➤ Lagrangian密度 ( $d$ は質量次元)

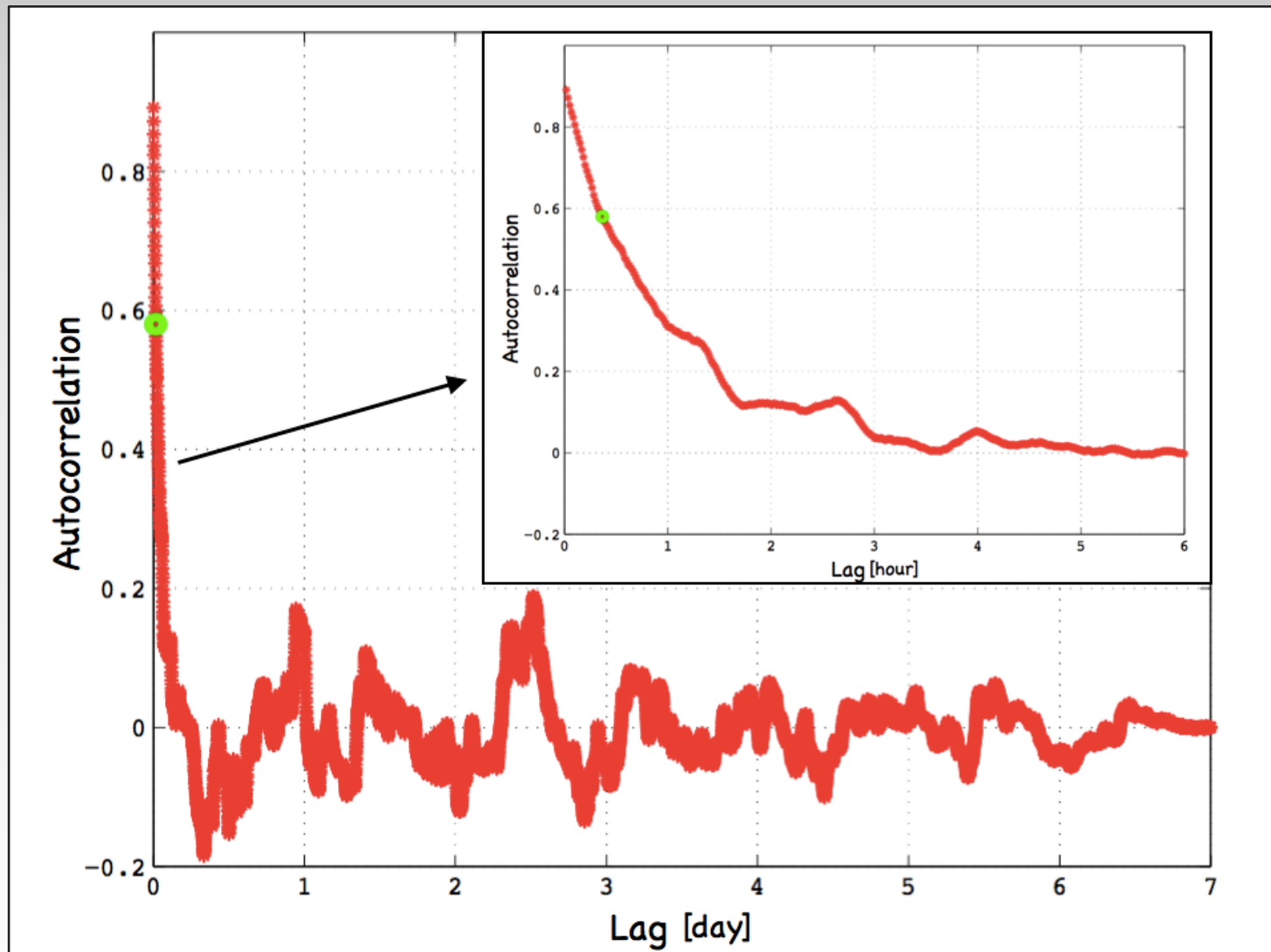
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \underbrace{\frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(4)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu}}_{d=4} + \underbrace{\frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(6)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu}}_{d=6} + \underbrace{\frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(8)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu}}_{d=8}$$



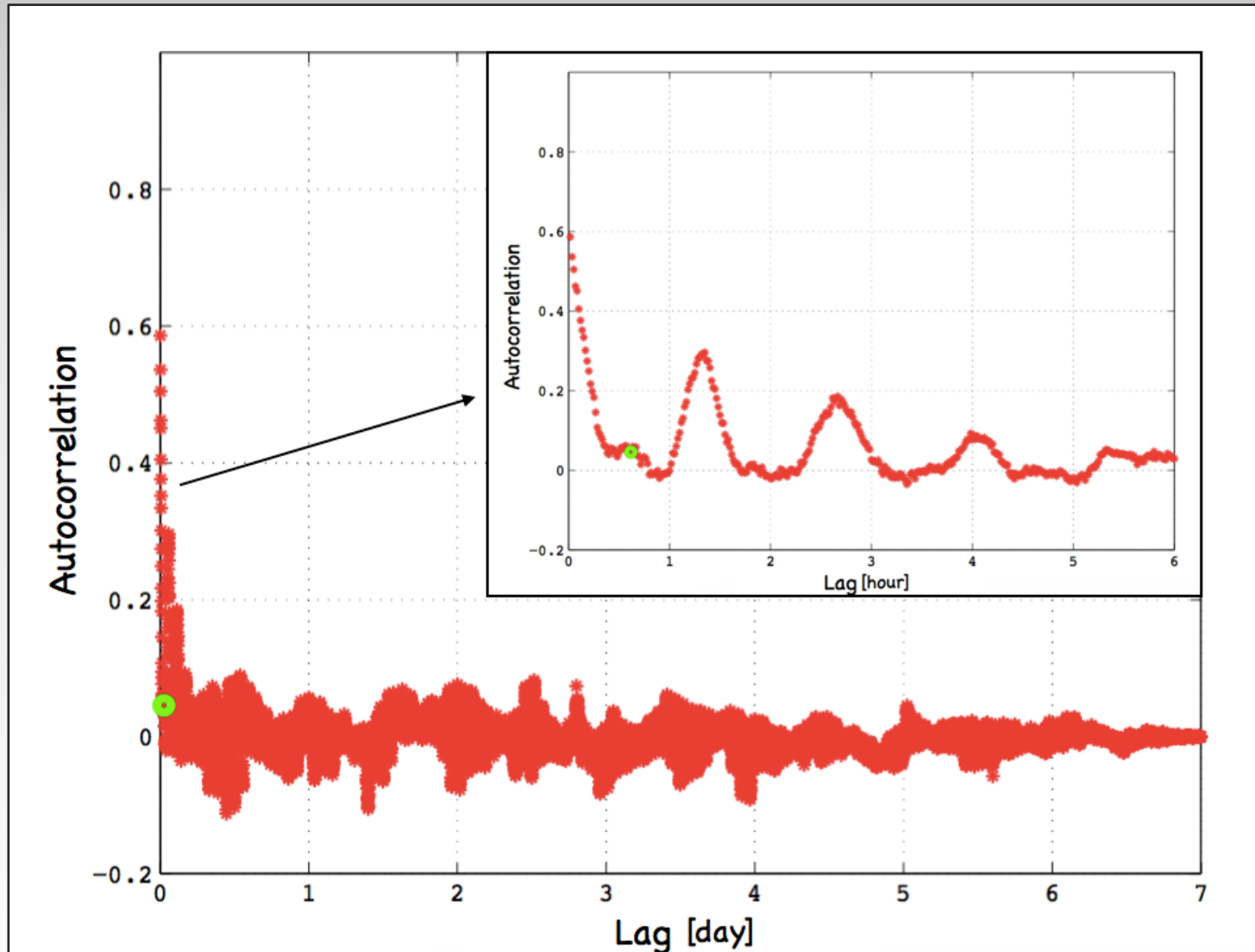
# 雑音レベルの変遷



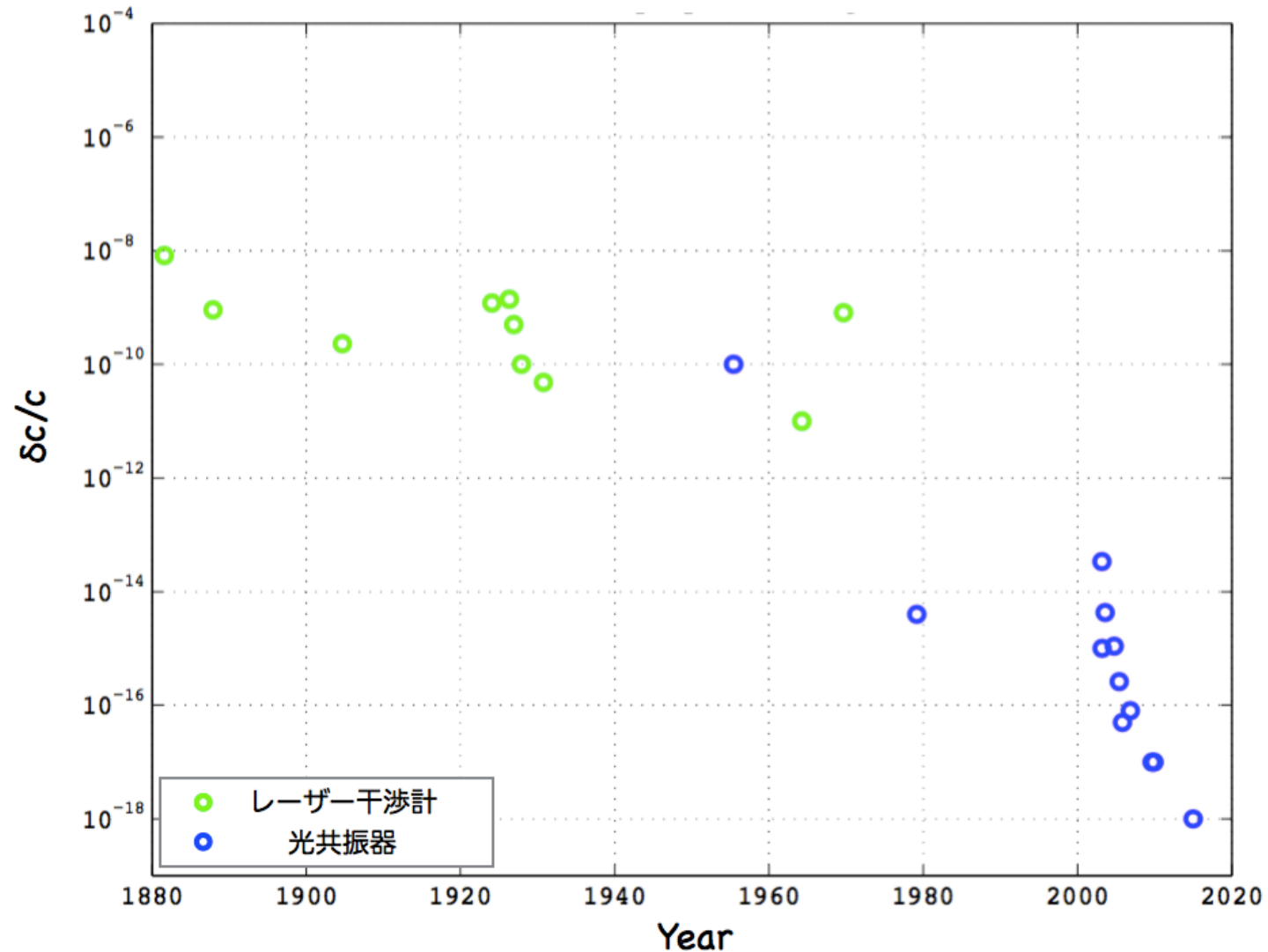
# $\alpha + 1/2$ の自己相関関数(雑音除去前)



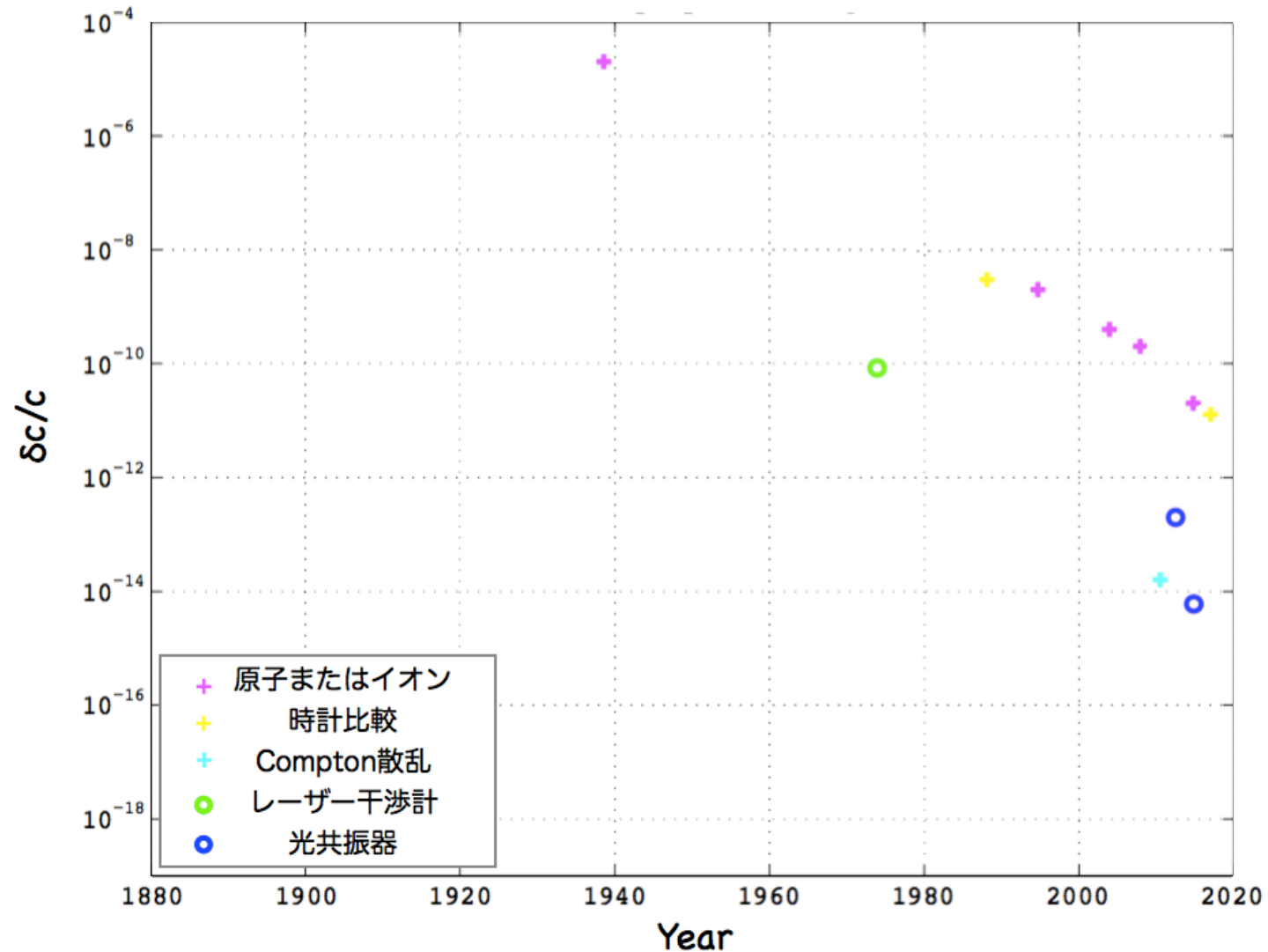
# $\alpha + 1/2$ の自己相関関数(雑音除去後)



# 往復光速の異方性探査



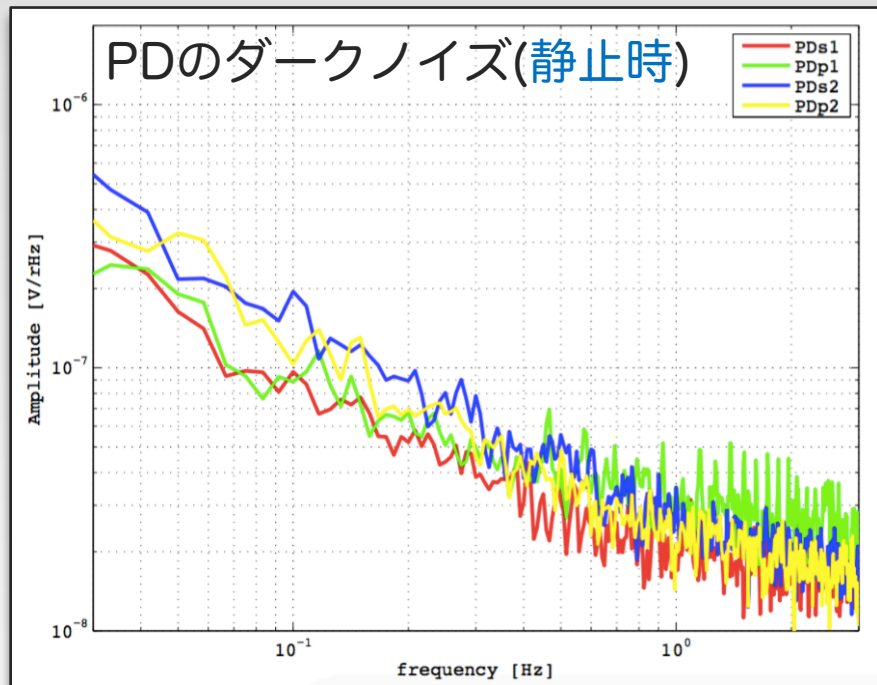
# 片道光速の異方性探査



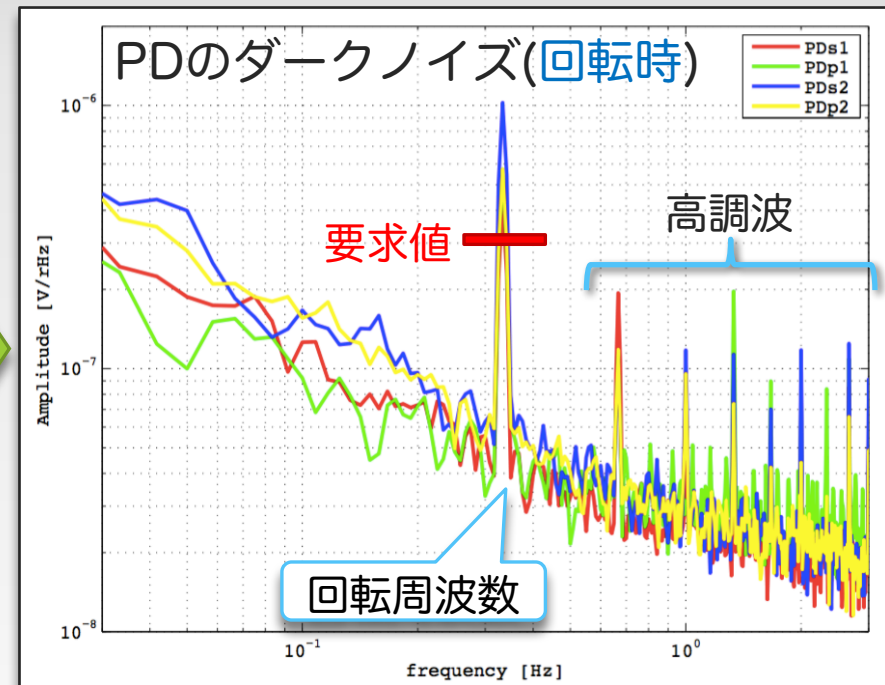


# PDの回転周波数ピーク

- 装置を回転→回転周波数(とその高調波)にノイズが出る  
(装置内にあるPD 4つ分をプロット)

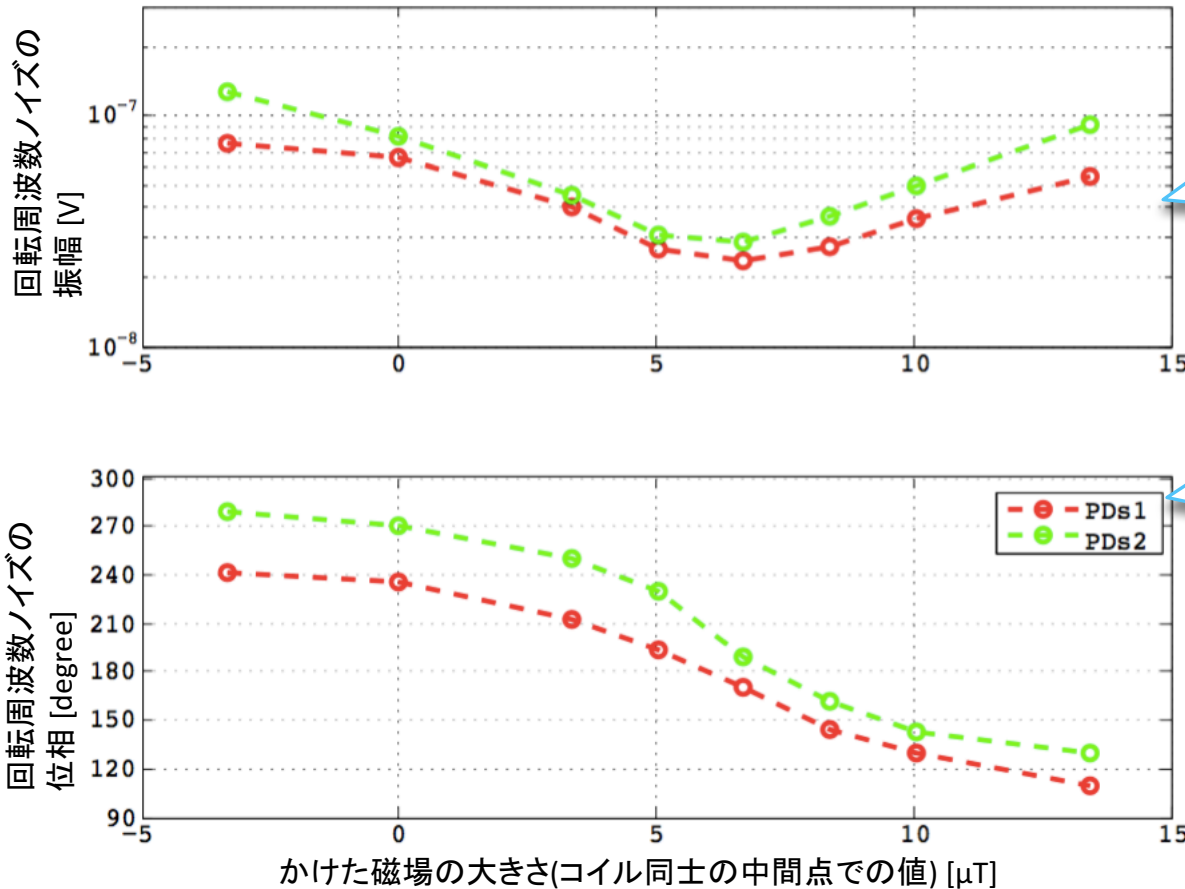


回転



# 回転周波数ノイズの原因

➤ 環境磁場を打ち消す向きにコイルで磁場をかけてみた結果



環境磁場と同程度の磁場をかけたときにノイズは最小

最もよく環境磁場を打ち消す点を境に位相が逆転



以上のことから**環境磁場**(地磁気など)が原因と考えられる。