

光リング共振器の連続回転による 片道光速の異方性探査

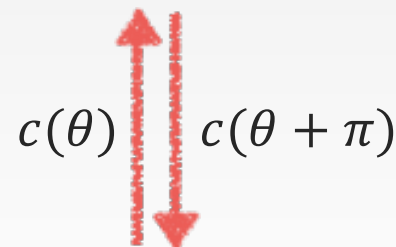
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻
安東研究室 修士課程 2 年

酒井 譲

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を記録した**装置の改良**を行った
- 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
$$\alpha + \frac{1}{2} = (0.4 \pm 1.8 \pm 2.3) \times 10^{-12} \quad \left(\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 5 \times 10^{-15} \right)$$

→ 1年間の測定で**最高精度を約5倍更新できる見込み**



目次

1. イントロダクション [1,2章]
2. 測定原理 [3章]
3. 実験装置 [4,5章]
4. データ解析 [5,6章]
5. 結論 [7章]

目次

1. イントロダクション [1,2章]
背景、検証理論、先行研究
2. 測定原理 [3章]
3. 実験装置 [4,5章]
4. データ解析 [5,6章]
5. 結論 [7章]

特殊相対性理論とLorentz不変性

➤ 特殊相対性理論の2つの原理

1) 光速不変の原理

…どの慣性系でも、真空中における光速は光源速度や伝搬方向に依らず一定。

2) 特殊相対性原理

…どの慣性系でも、物理法則は不変。

⇒ 慣性系同士は互いにLorentz変換で結ばれ、物理法則はLorentz不変性をもつ。

- ・ 物理学の基本的な対称性の1つ
- ・ 発表から100年以上経つが、まだ破れは見つかっていない

しかし…

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

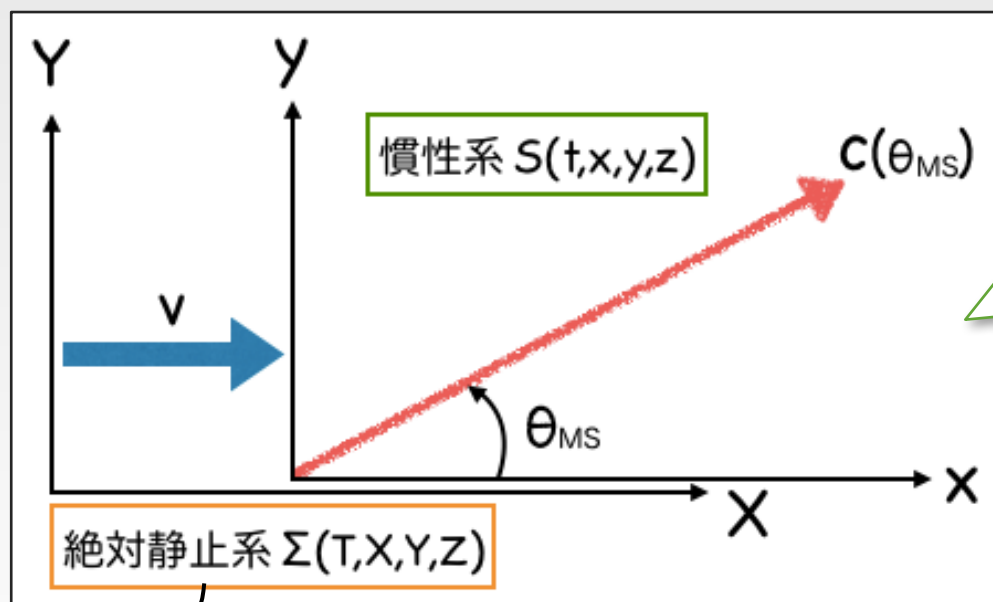
検証理論

➤ 特殊相対性理論の検証理論：Mansouri-Sexl理論

仮定 {

- ・ 絶対静止系 Σ が存在し、 Σ 系では光速は不変
- ・ Σ 系には特別な方向は無い

➤ 3つのパラメータ α, β, δ で特殊相対性理論とのずれを表す



一般の慣性系 S では
光速が一定とは限
らない

↳ CMB静止系を仮定

MS理論における光速

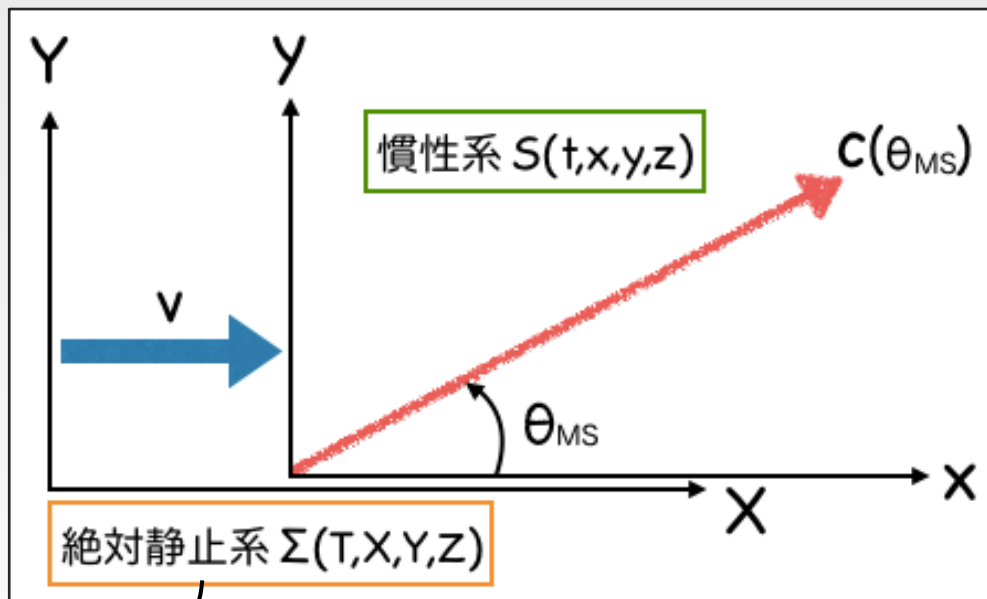
➤ 一般の慣性系 S における光速

v 依存性(等方的)

$$c(\theta_{MS}) = 1 - 2\left(\alpha + \frac{1}{2}\right)v \cos \theta_{MS} - \left(\beta - \delta - \frac{1}{2}\right)v^2 \sin^2 \theta_{MS} - (\alpha - \beta + 1)v^2$$

片道光速の異方性

往復光速の異方性

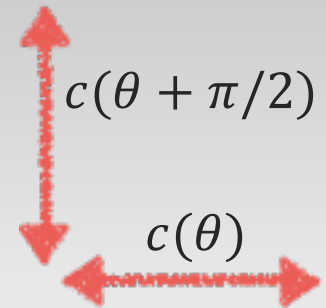
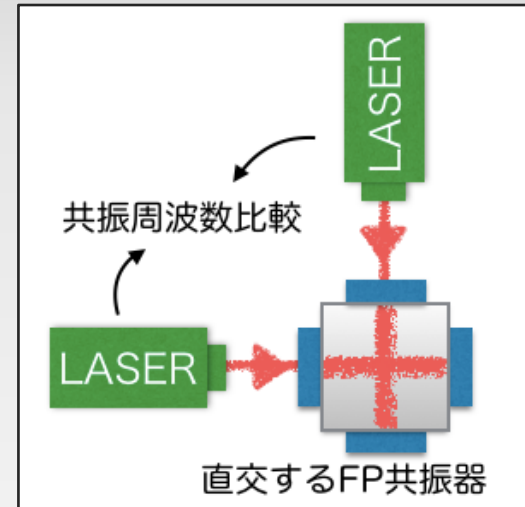
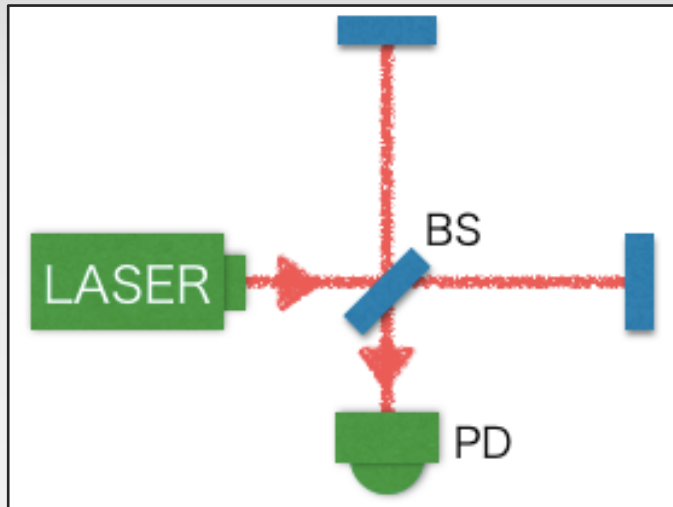


特殊相対性理論では、
 $c(\theta_{MS}) = 1$

$$\alpha = -\frac{1}{2}, \quad \beta = \frac{1}{2}, \quad \delta = 0$$

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

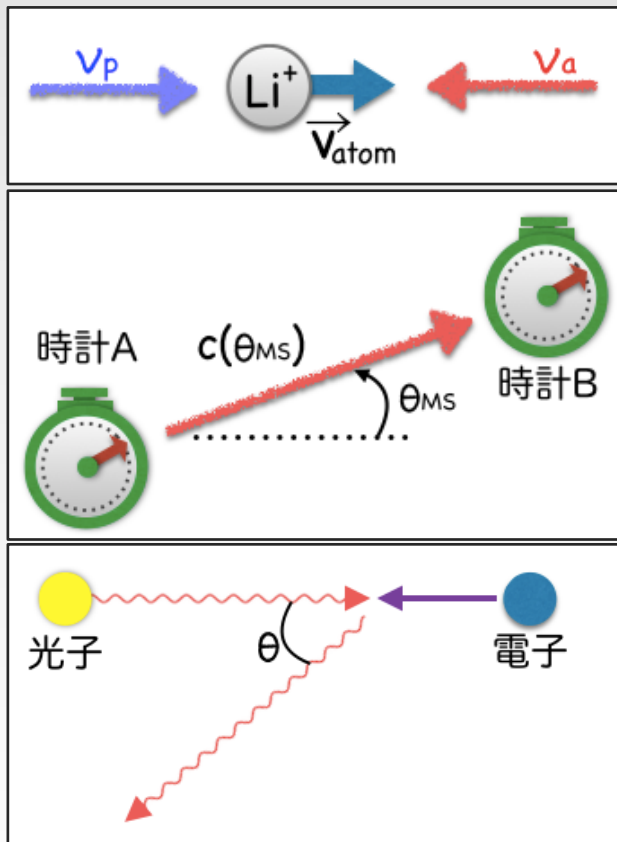
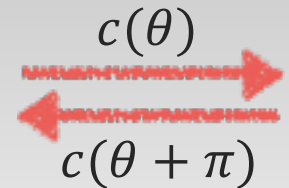


- 現在の最高精度： $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 1 \times 10^{-18}$
… 直交する2つのマイクロ波共振器を使用

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

先行研究(片道光速) [1/2]

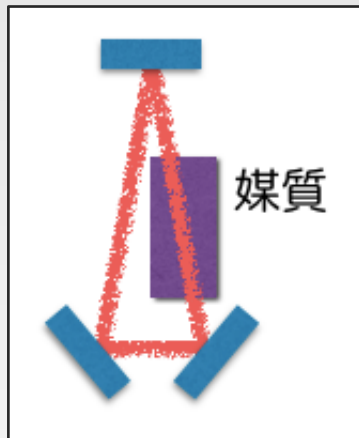
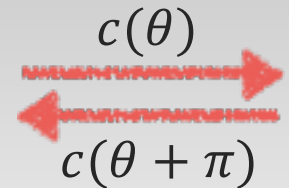
- 片道光速の異方性：行きと帰りの光速の差
 - Michelson干渉計、Fabry-Perot共振器では測定できない(行きと帰りでキャンセルされる)



- 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).

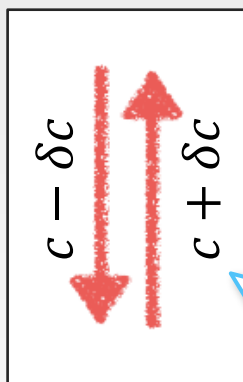
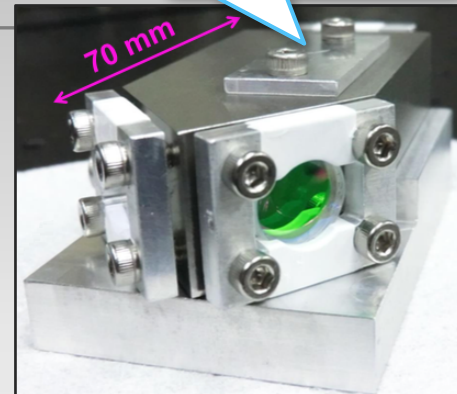
- この装置を改良して、さらなる高感度化を目指す

目次

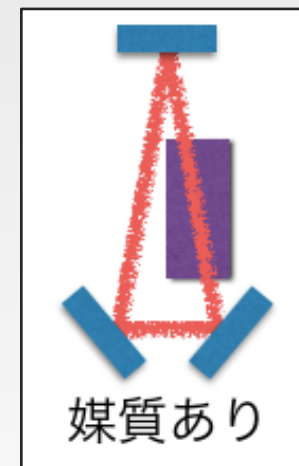
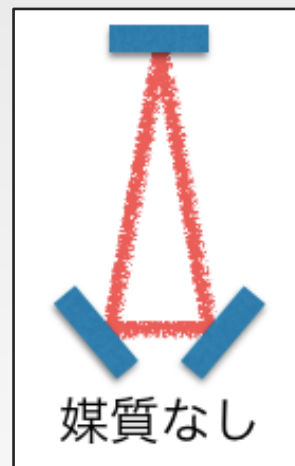
1. イントロダクション [1,2章]
2. 測定原理 [3章]
光リング共振器を用いた異方性探査
3. 実験装置 [4,5章]
4. データ解析 [5,6章]
5. 結論 [7章]

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 ($\nu_L - \nu_R \propto \alpha + 1/2 \propto \delta c$) を測定



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	$\nu_R = \nu_0$	$\nu_R = \nu + \delta\nu$

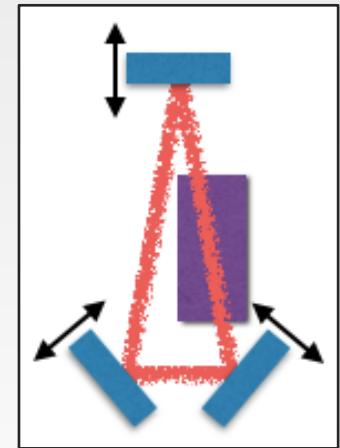
共振周波数の差を測定する利点

- 共振器長変動 → 両周りの共振周波数は同相に変化する

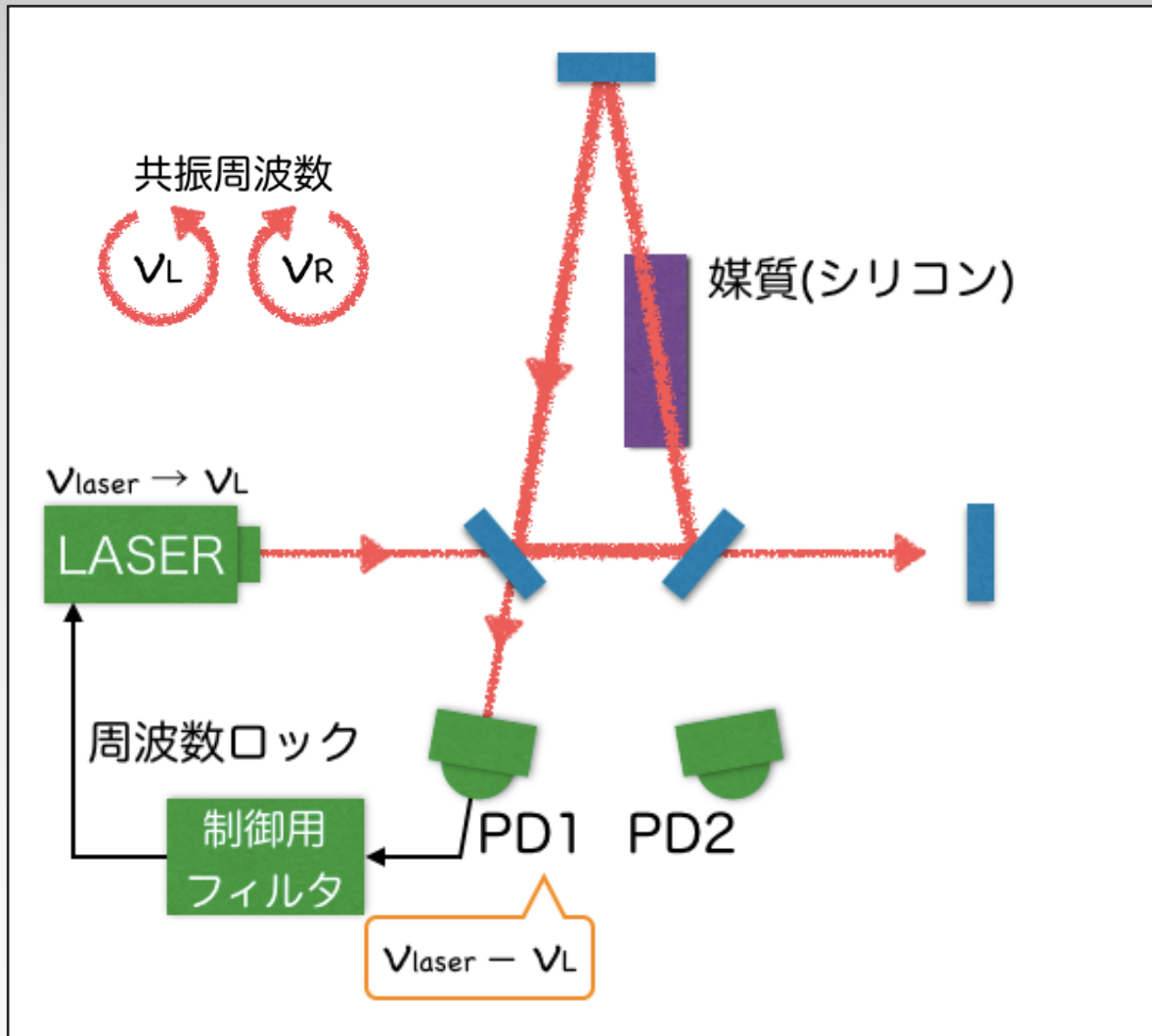
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{左回りの共振周波数: } \nu_L = \nu - \delta\nu + n \\ \text{右回りの共振周波数: } \nu_R = \nu + \delta\nu + n \end{array} \right.$$

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



共振周波数の差の測定方法 [1/2]



レーザーを左回りに入射



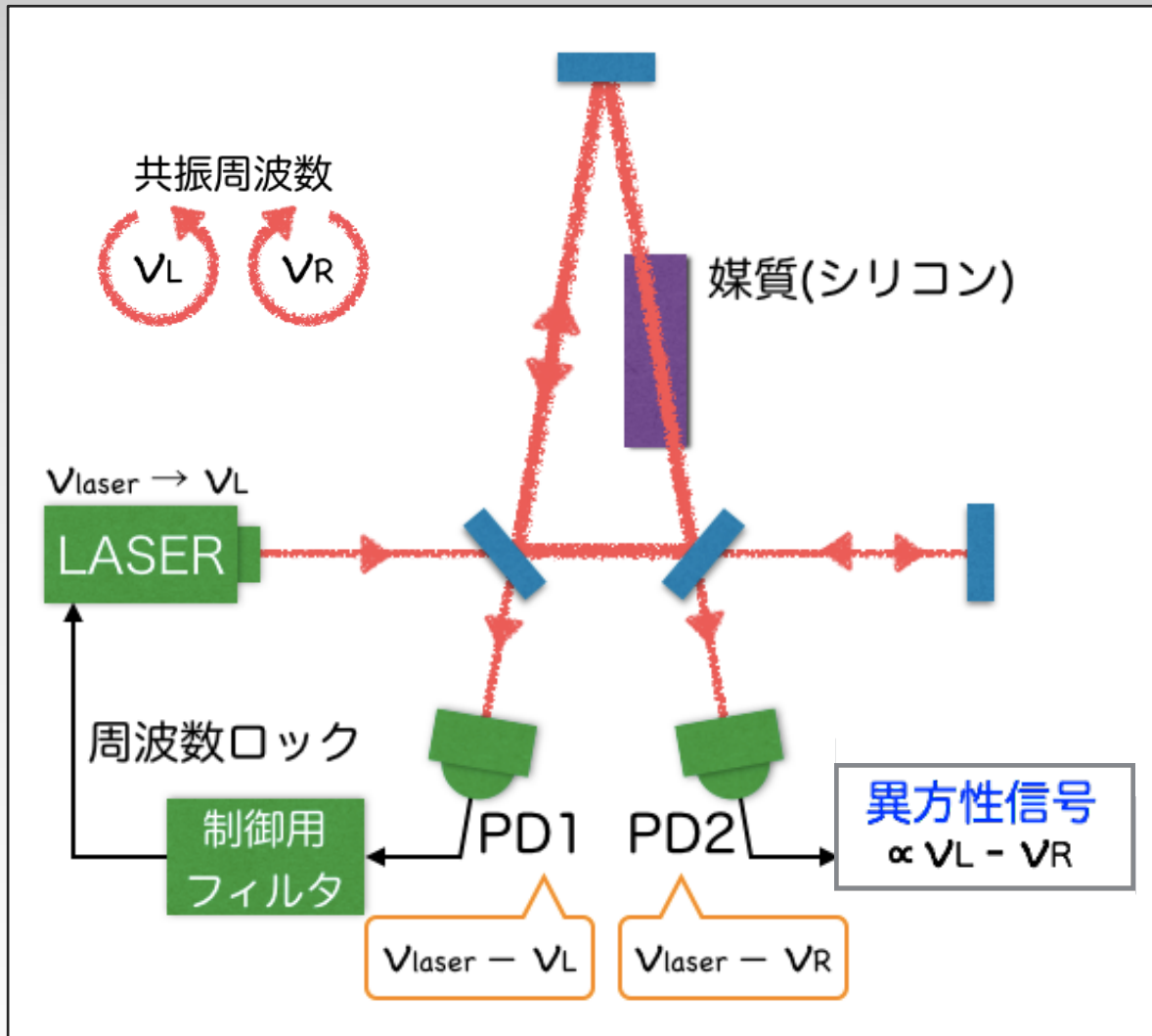
レーザー周波数 ν_{laser} を
左回りの共振周波数 ν_L
にロック



透過光が出てくる

※ エラー信号の取得は
偏光解析法を用いる

共振周波数の差の測定方法 [2/2]



透過光を打ち返して
右回りに入射
(ダブルパス構成)



レーザー周波数 ν_{laser} と
右回りの共振周波数 ν_R
の差を測定



共振周波数の差に比例
する信号を測定できる
(異方性信号)

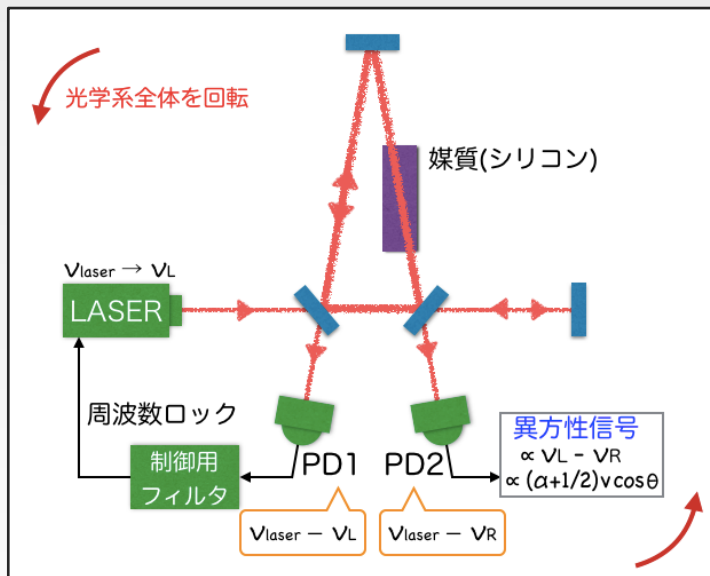
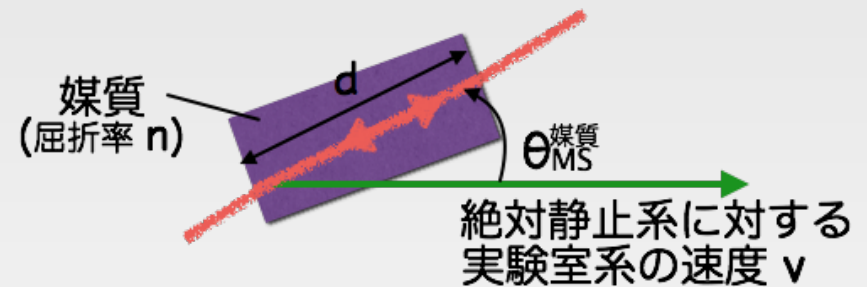
異方性信号の変調

➤ MS理論における光速： $c(\theta_{\text{MS}}) = 1 - 2 \left(\alpha + \frac{1}{2} \right) v \cos \theta_{\text{MS}}$

→ 異方性信号：
(共振周波数の差)

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = - \frac{4(n-1)d}{L_{\text{opt}}} \left(\alpha + \frac{1}{2} \right) v \cos \theta_{\text{MS}}^{\text{媒質}}$$

共振器1周の
光学的距離



光学系全体を水平方向に回転させて
異方性信号に変調をかける

→ $\theta_{\text{MS}}^{\text{媒質}} \sim \omega_{\text{rot}} t$

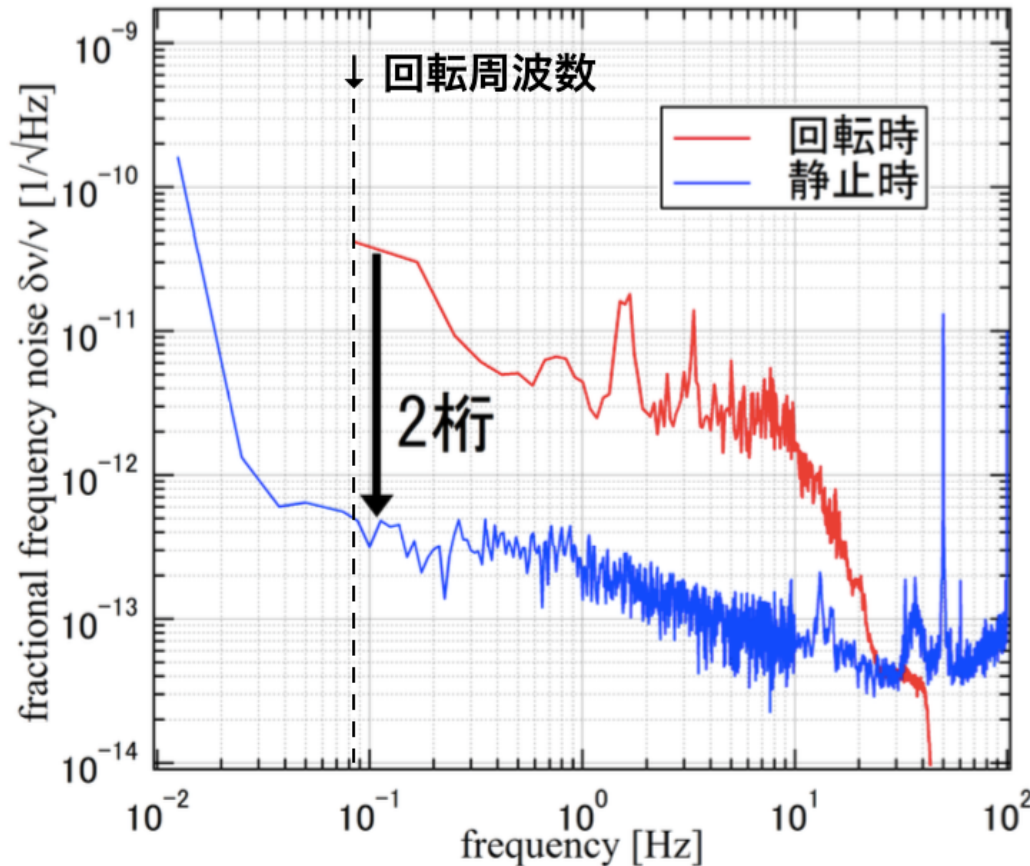
→ 異方性は回転周波数に現れる

目次

1. イントロダクション [1,2章]
2. 測定原理 [3章]
3. 実験装置 [4,5章]
先行研究からの改良点、雑音レベル、
回転と同期する雑音
4. データ解析 [5,6章]
5. 結論 [7章]

先行研究の問題点

- 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



静止時と回転時で“異方性信号”のノイズレベルを比較

回転により雑音が増加

↓
回転による振動が原因？

↓
回転による雑音を静止時の雑音レベルまで低減すれば、約2桁感度向上！

量子重力理論の研究から破れがあるかもしれないと言われている 10^{-17} レベルでの測定が可能になる！

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

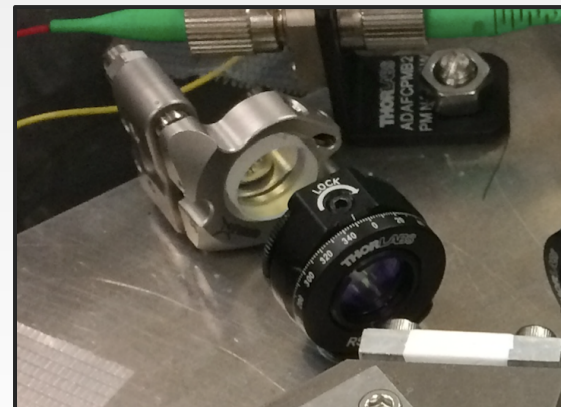
振動そのものを低減

改良点1：**回転機構**
(連続回転実現)



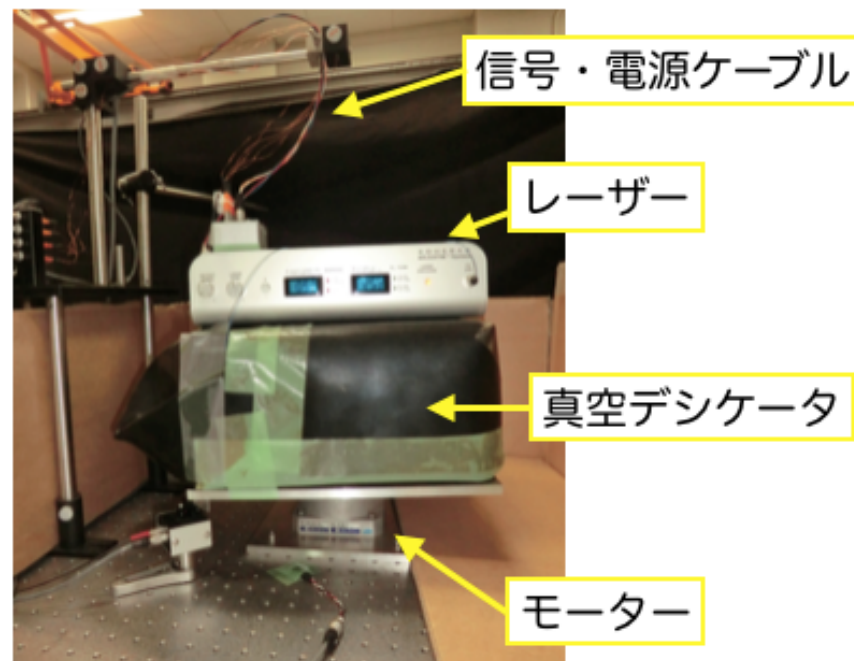
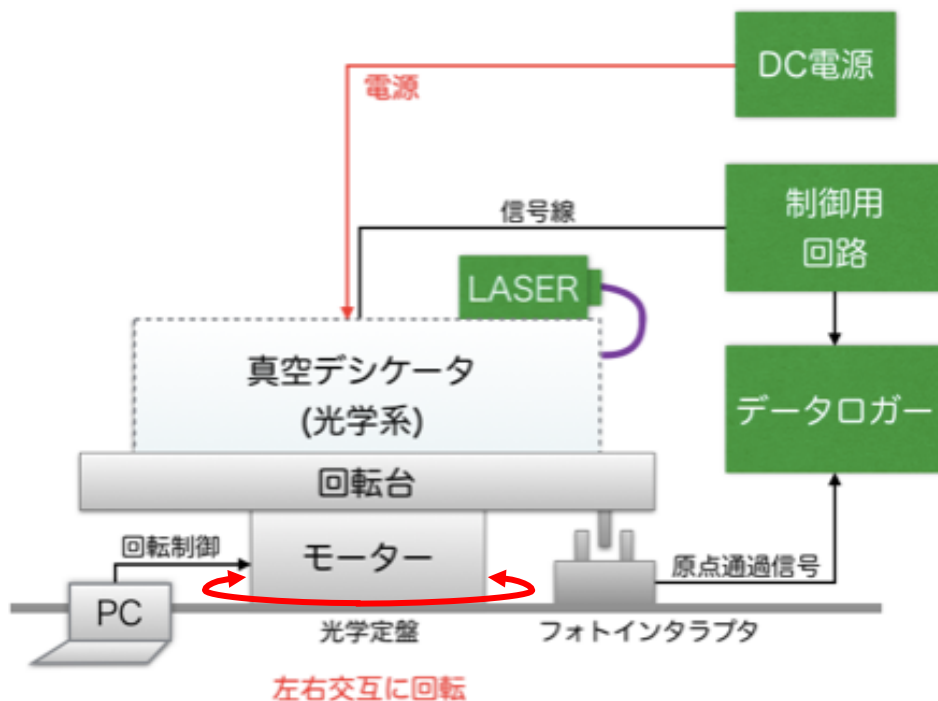
振動感度を低減

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]

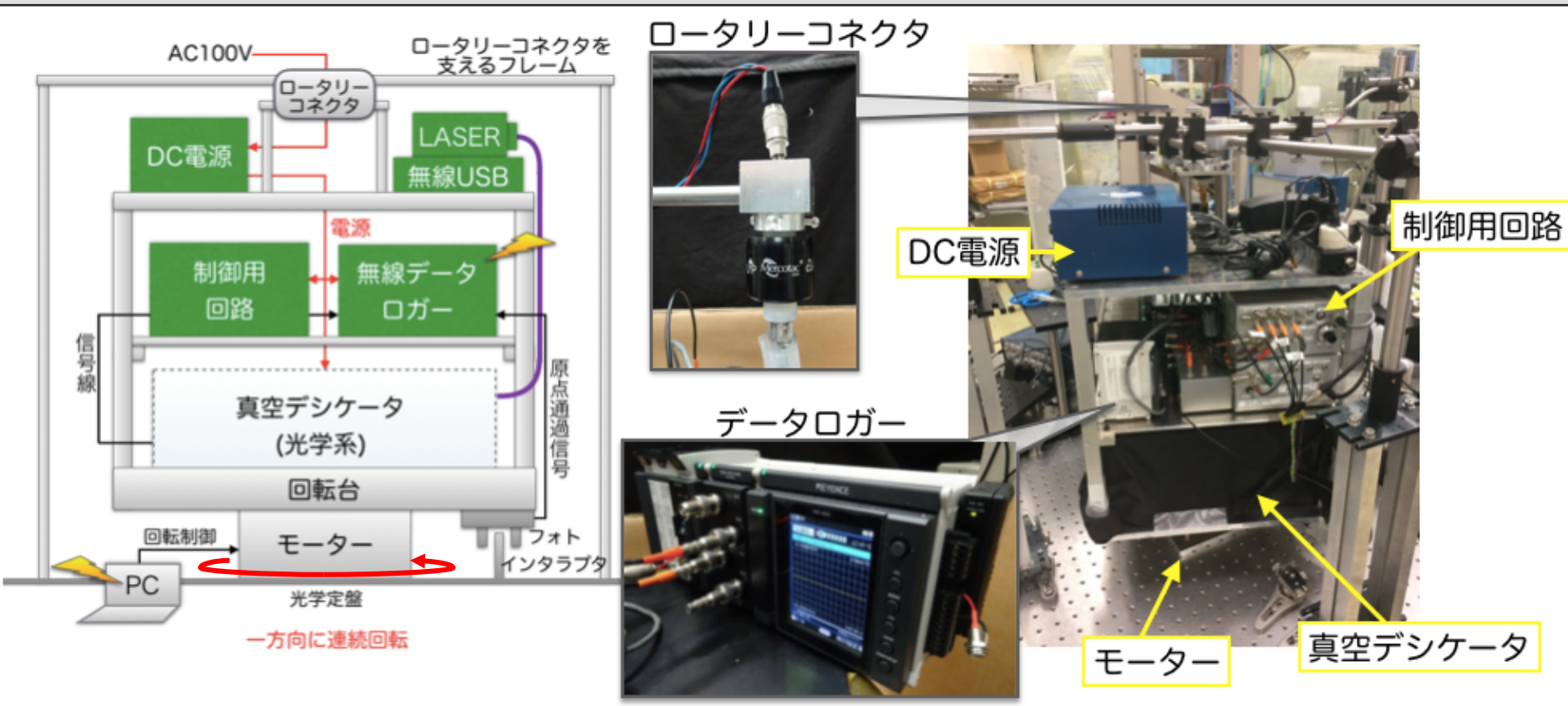
- 先行研究…電気配線上の都合で連続回転できなかった
(右回りと左回りを1回転ずつ交互に繰り返していた)
- ⇒ 回転と停止を繰り返すので、どうしても振動が大きくなる



先行研究の装置

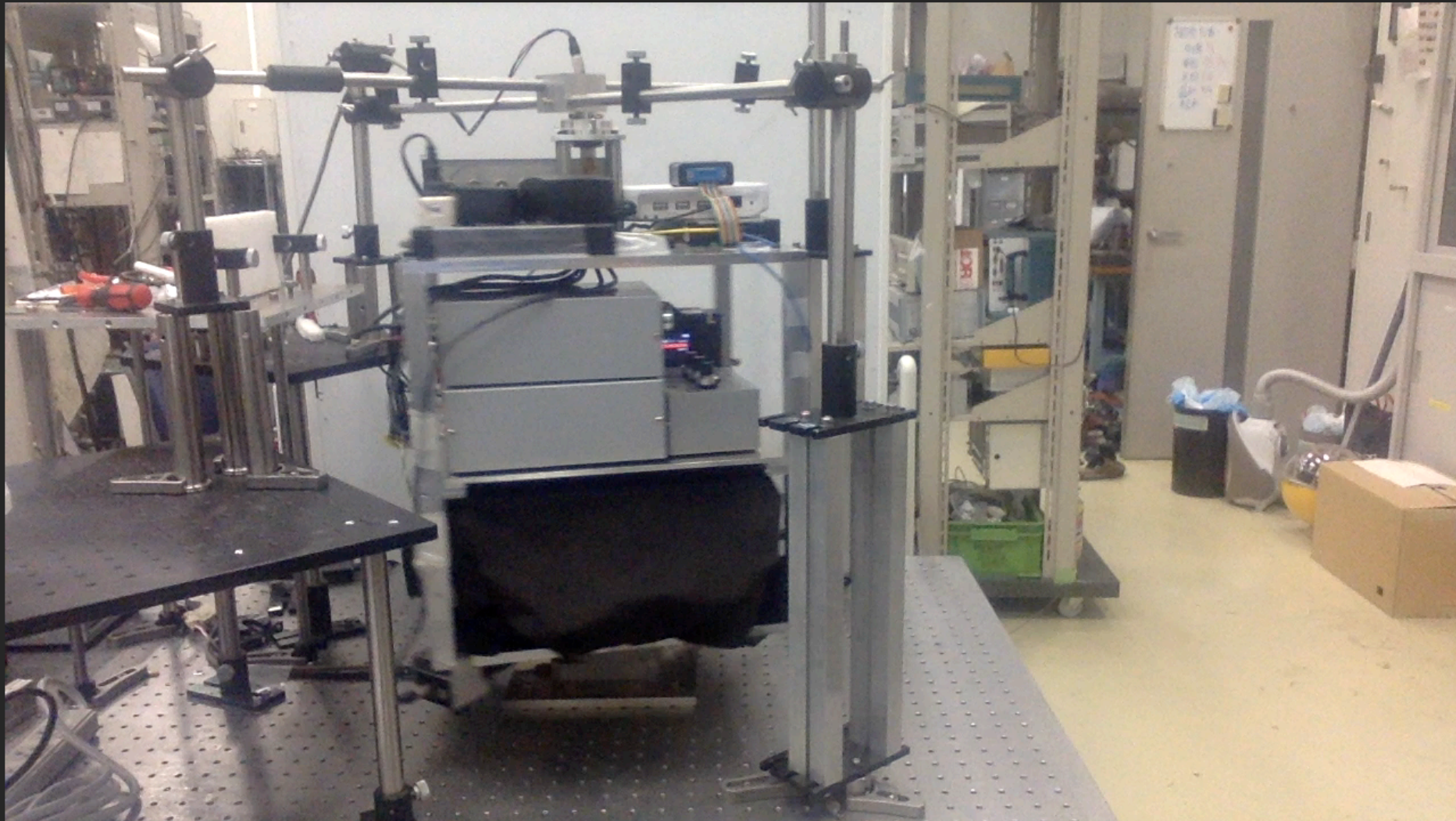
回転機構の改良 [2/2]

- 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



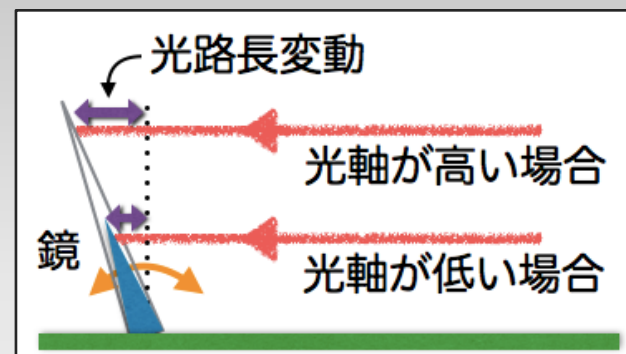
改良後の装置

装置の回転の様子 (動画)



光学系の改良 [1/2]

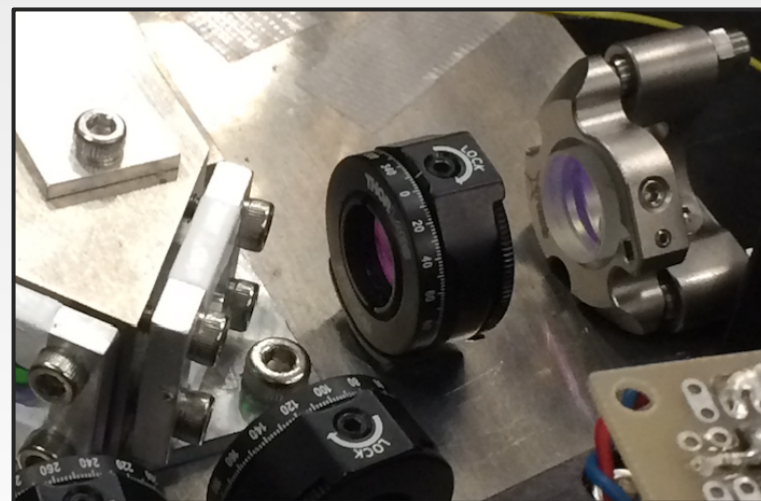
- 光軸を下げて、振動感度を低減
ペデスタルを用いず、ミラーホルダを直接土台にネジ止め
(**セミモノリシック光学系**)



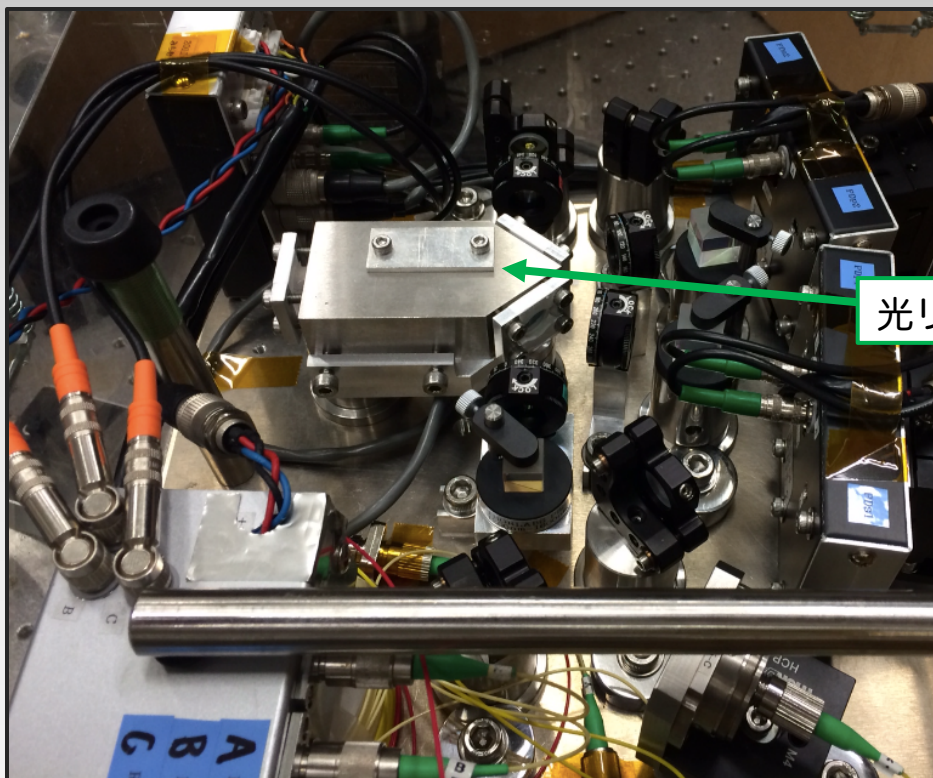
先行研究



改良後



光学系の改良 [2/2]



光リング共振器

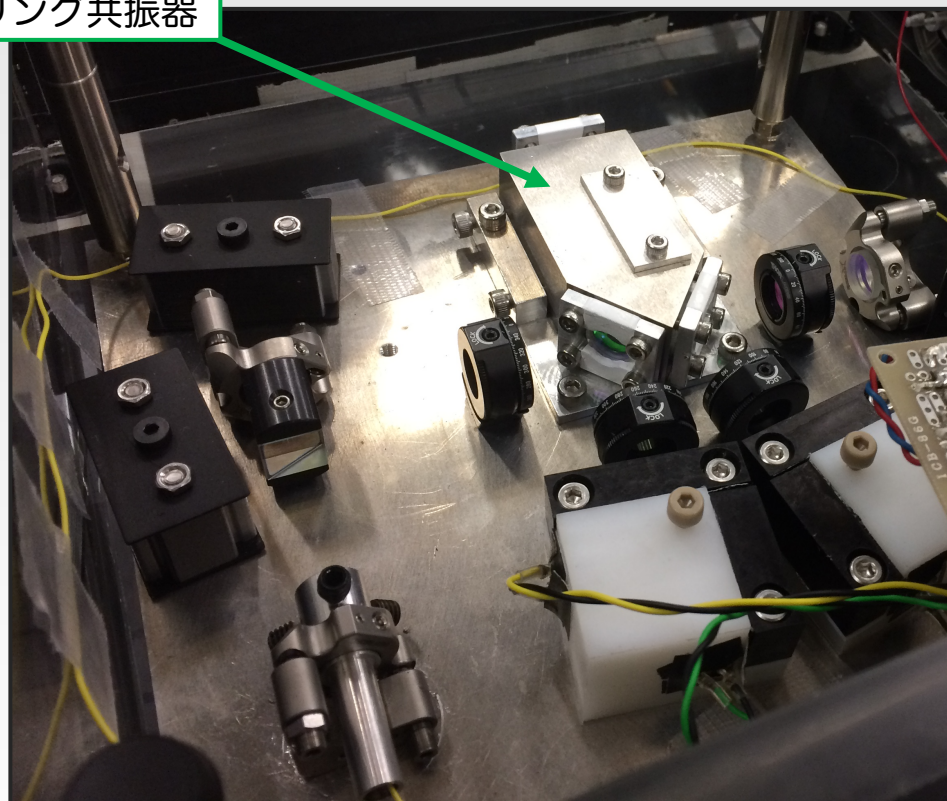
先行研究の光学系

- ・ **ペデスタル光学系**
- ・ 光軸の高さ： **50mm**



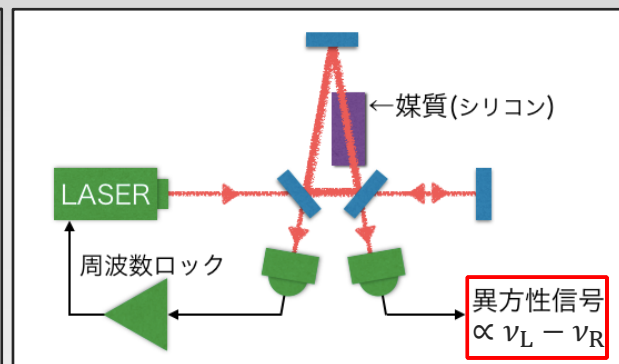
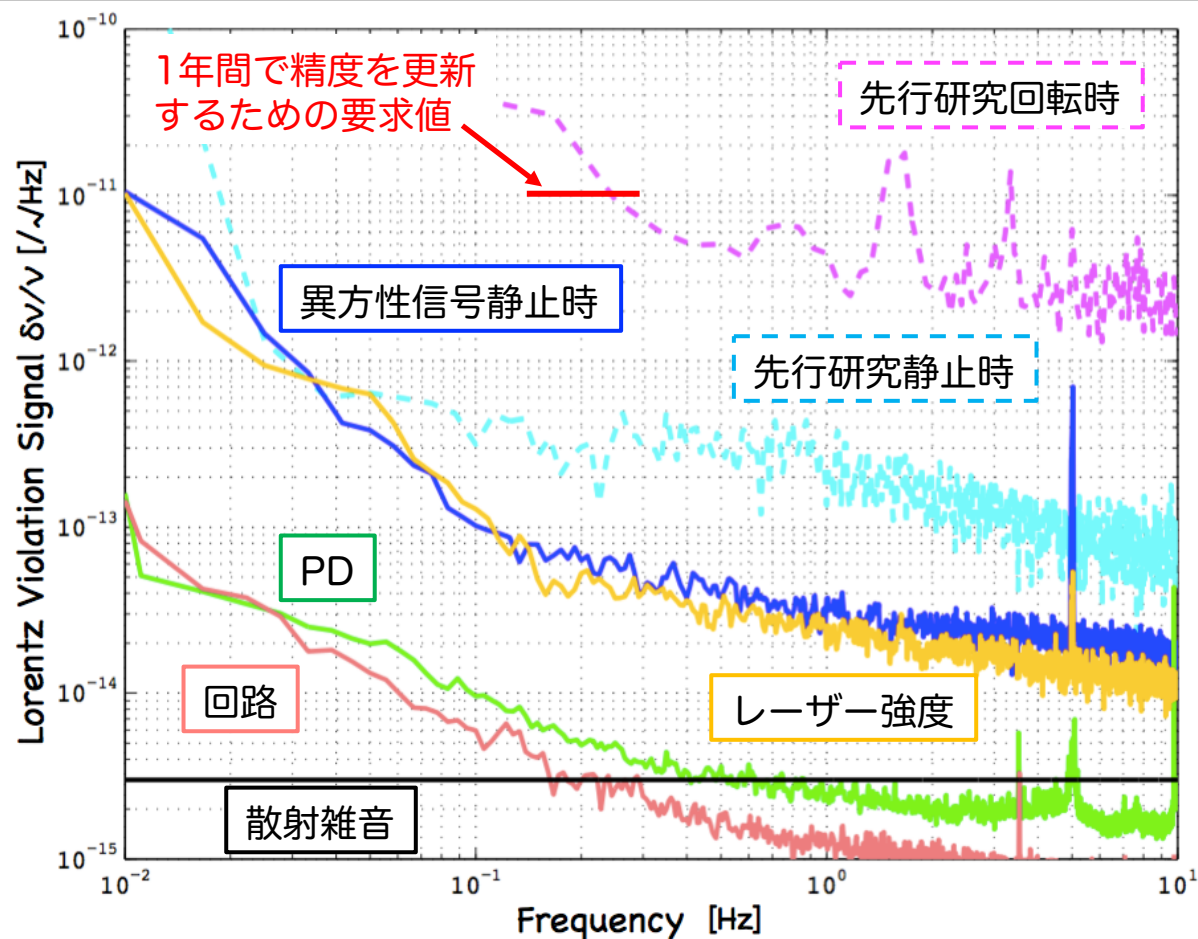
改良後の光学系

- ・ **セミモノリシック光学系**
- ・ 光軸の高さ： **15mm**



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



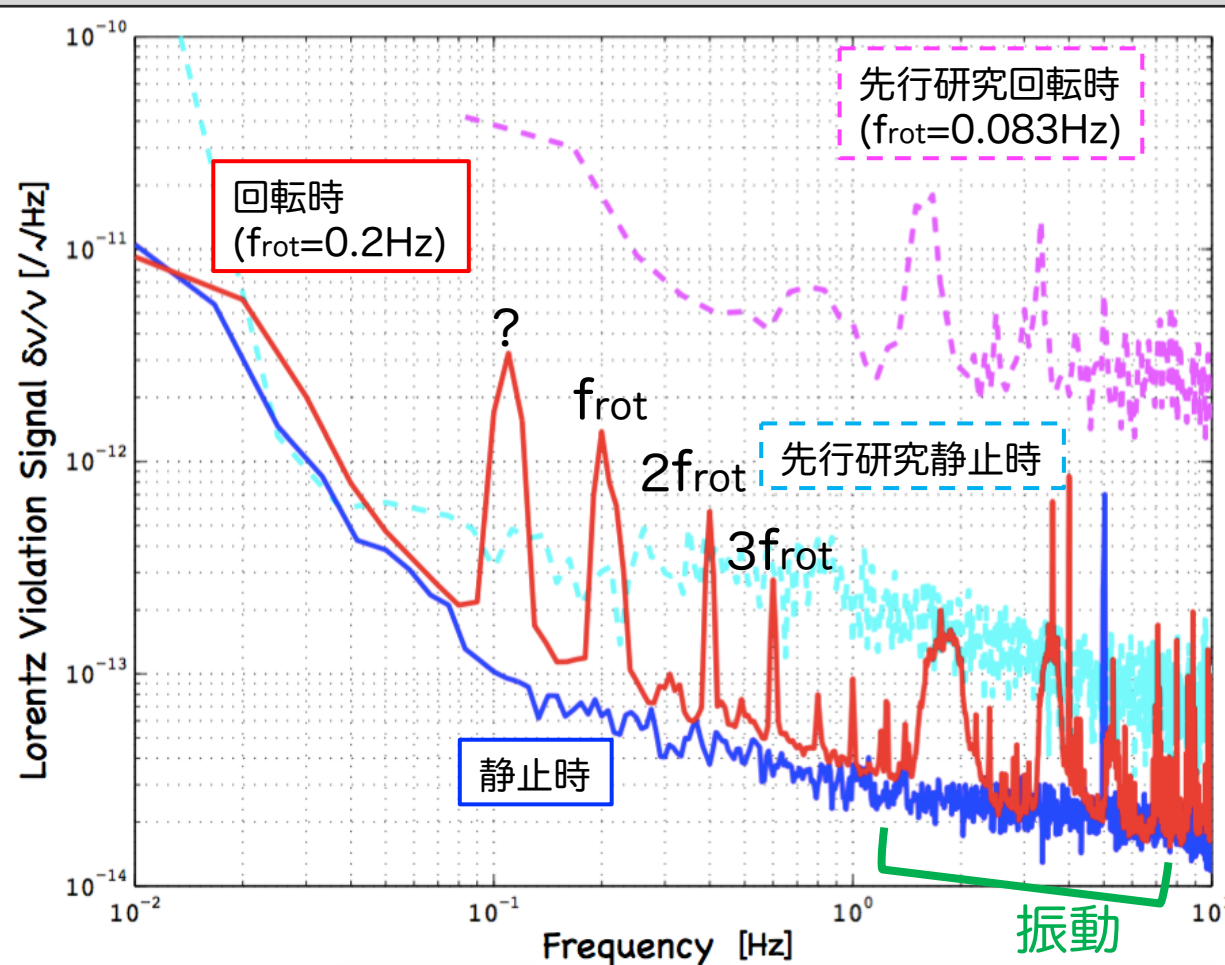
回転周波数付近で
雑音低減

→ 強度雑音で制限

主に**散乱光対策**の効果

回転時の雑音レベル

➤ 回転時の異方性信号の雑音レベルを比較



◎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)

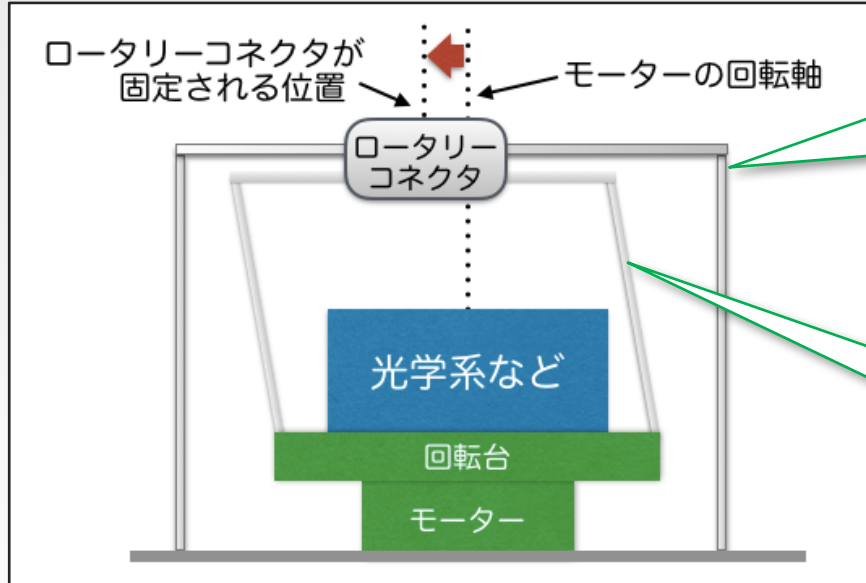
↓
異方性と区別が
つかない場合がある

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)

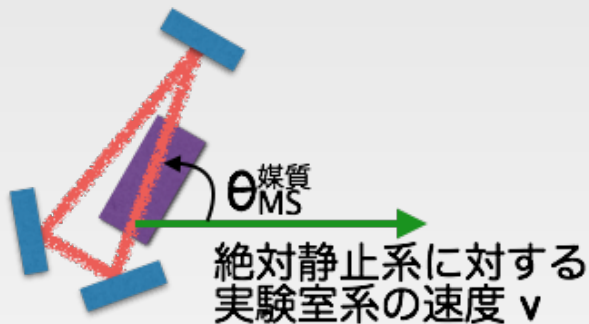
目次

1. イントロダクション [1,2章]
2. 測定原理 [3章]
3. 実験装置 [4,5章]
4. データ解析 [5,6章]
解析方法、2倍波による雑音除去、
解析結果、異方性の球面調和関数展開
5. 結論 [7章]

異方性探査

- 現在の感度を評価するため、11月上旬の7日間にわたり異方性探査を行った

- 異方性信号：
$$\frac{\delta v}{v} = -\frac{4(n-1)d}{L_{\text{opt}}} \left(\alpha + \frac{1}{2} \right) v \cos \theta_{\text{MS}}^{\text{媒質}}$$

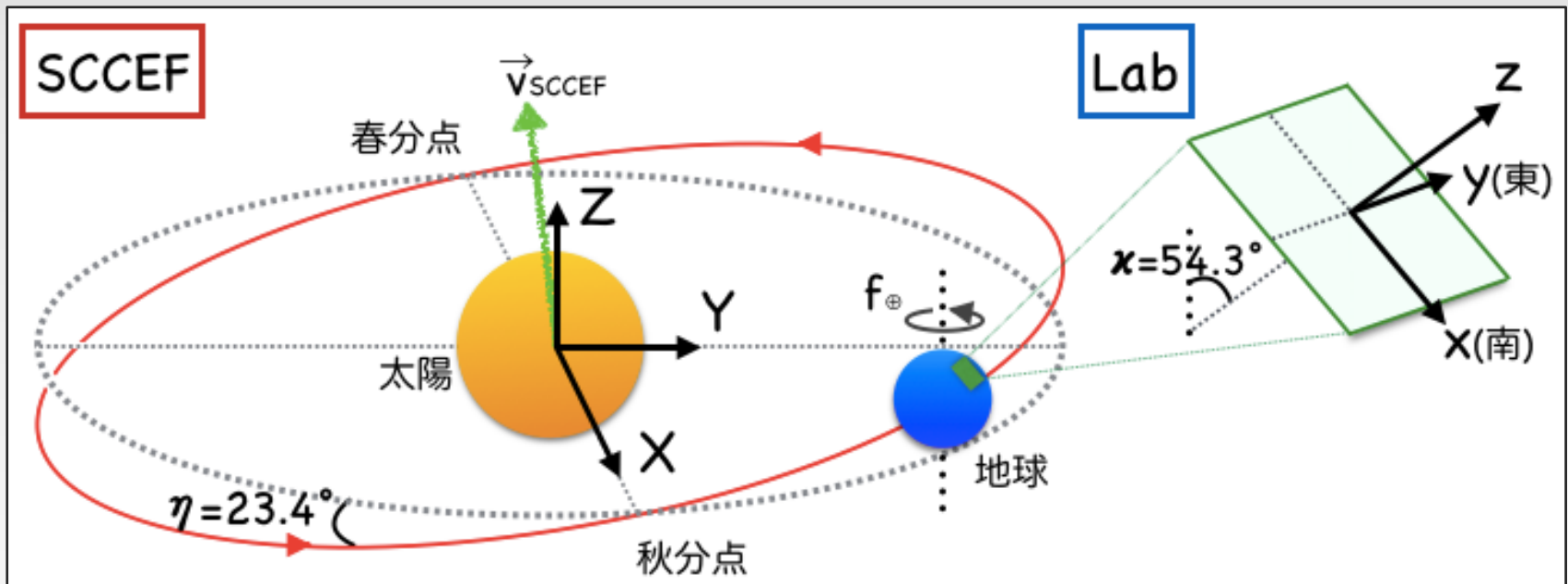


装置の回転 + 地球の自転
の影響で変化する

→ 地球の自転の影響を受けない系を考える

SCCEF

- 地球の自転の影響を受けない系を考える
→ Sun-Centered Celestial Equatorial Frame
(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° 、赤経 168° 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

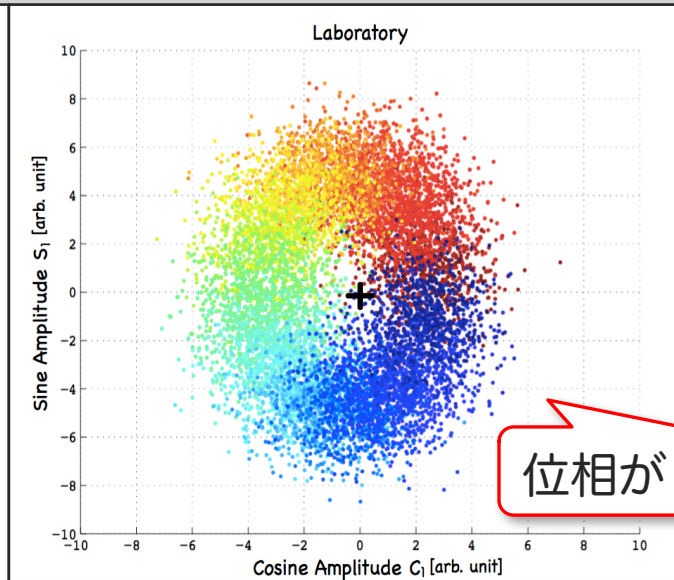
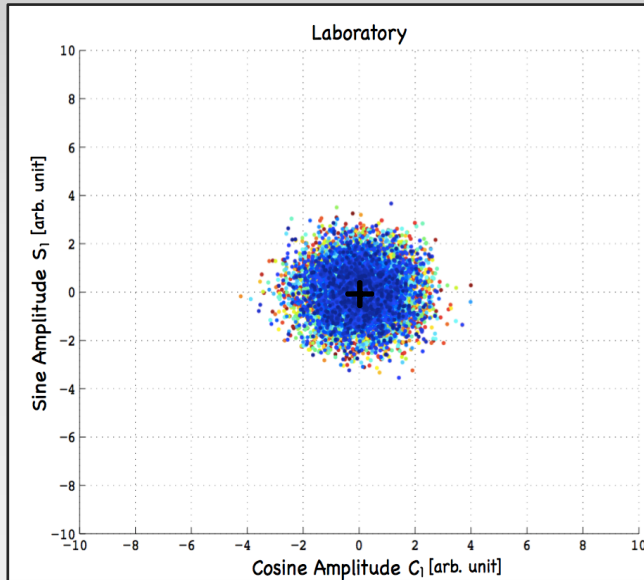
↳ MS理論では、
絶対静止系に対する運動方向に異方性が現れる

直交位相振幅のシミュレーション

異方性が無い場合

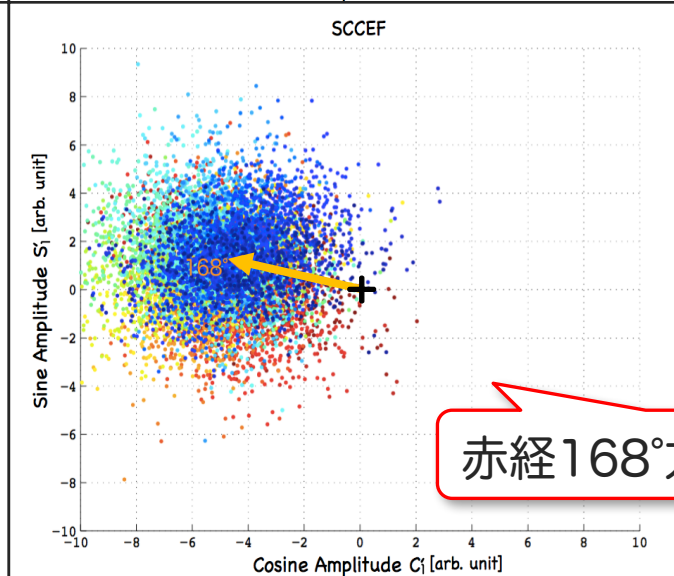
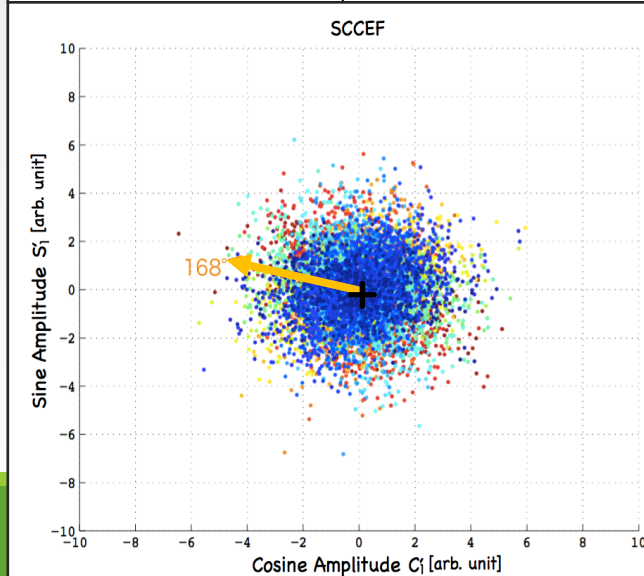
異方性がある場合

実験室系
(C_1, S_1)



位相が1日1回転

SCCEF
(C_1', S_1')

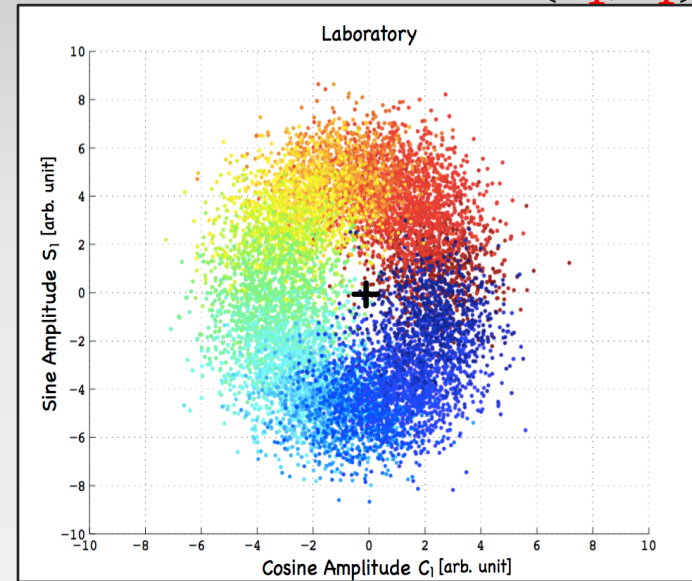


赤経168°方向に信号

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)

ここからの流れ (解析結果)

- ・ まずは素直に $\alpha + 1/2$ を求めてみる



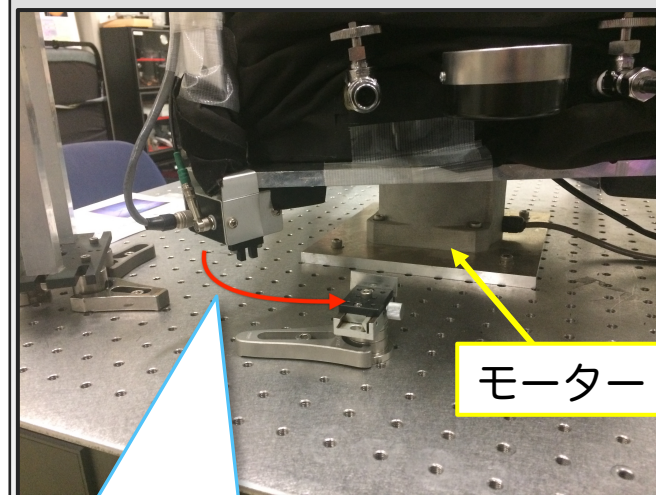
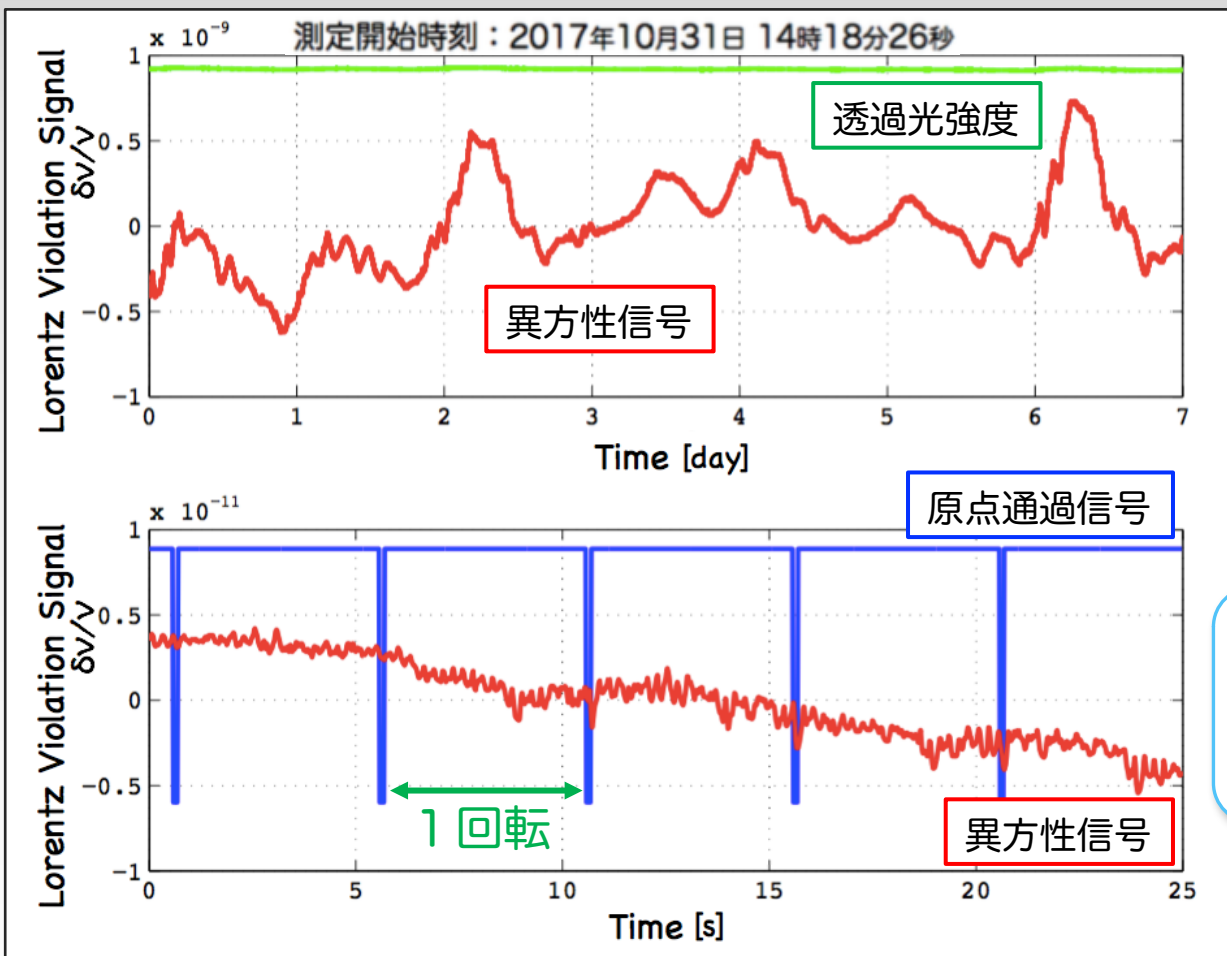
- ・ 2倍波を用いて雑音除去



- ・ 雑音除去後のデータで $\alpha + 1/2$ を求める

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

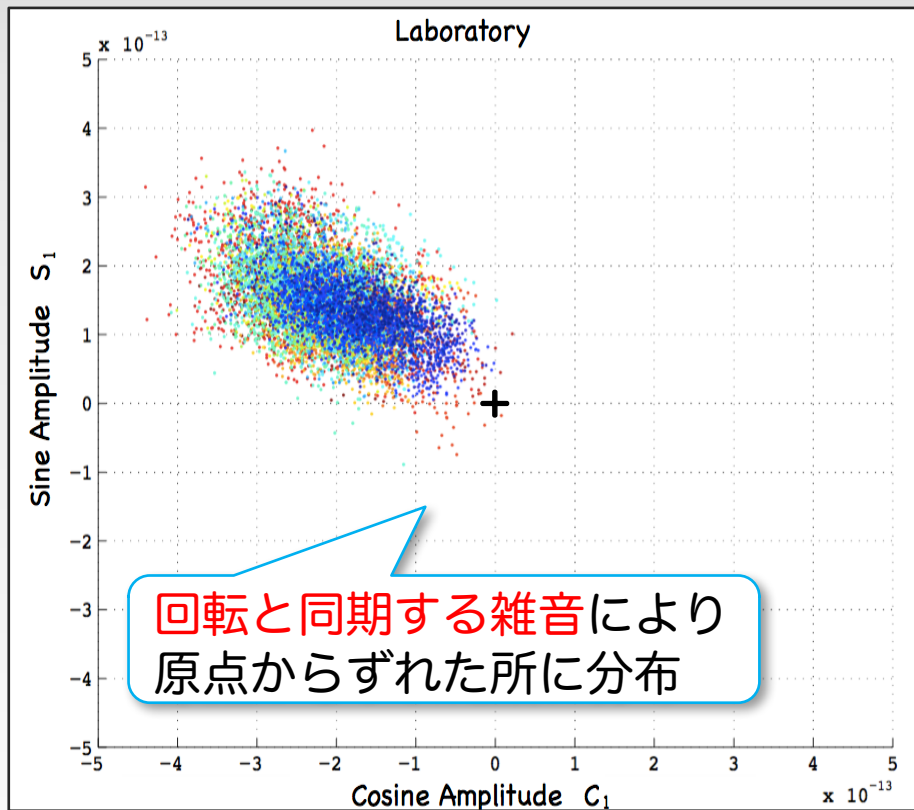


フォトインタラプタで
原点通過信号を取得
→ 回転台の向きを把握

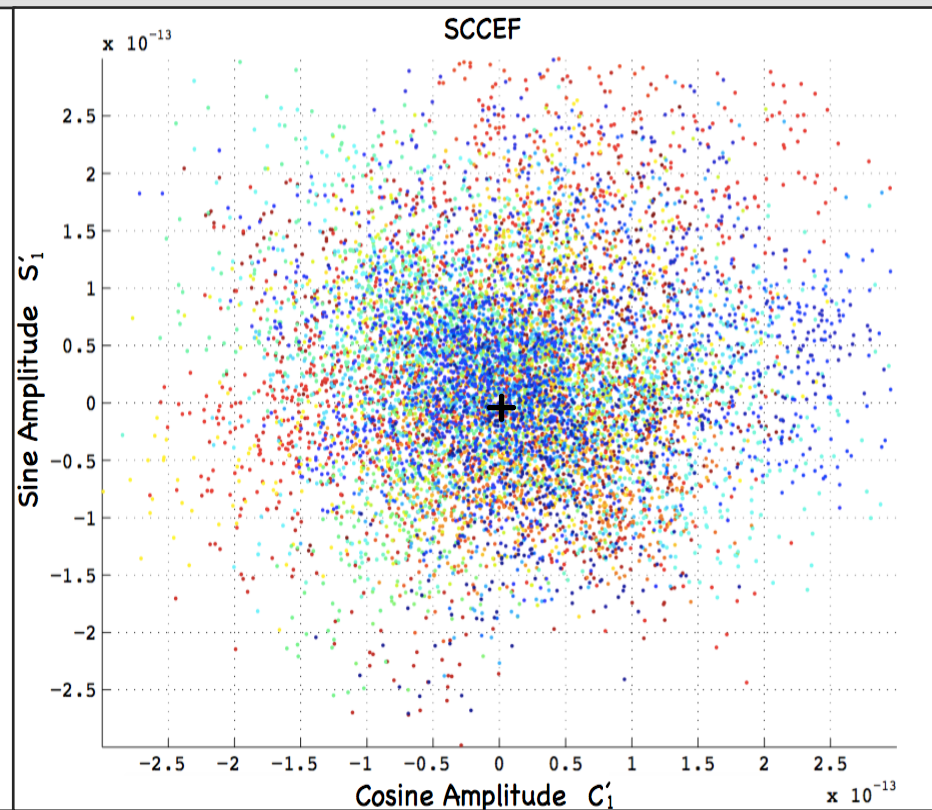
直交位相振幅 (雑音除去前)

- 12回転毎に直交位相振幅を計算

実験室系(C_1, S_1)

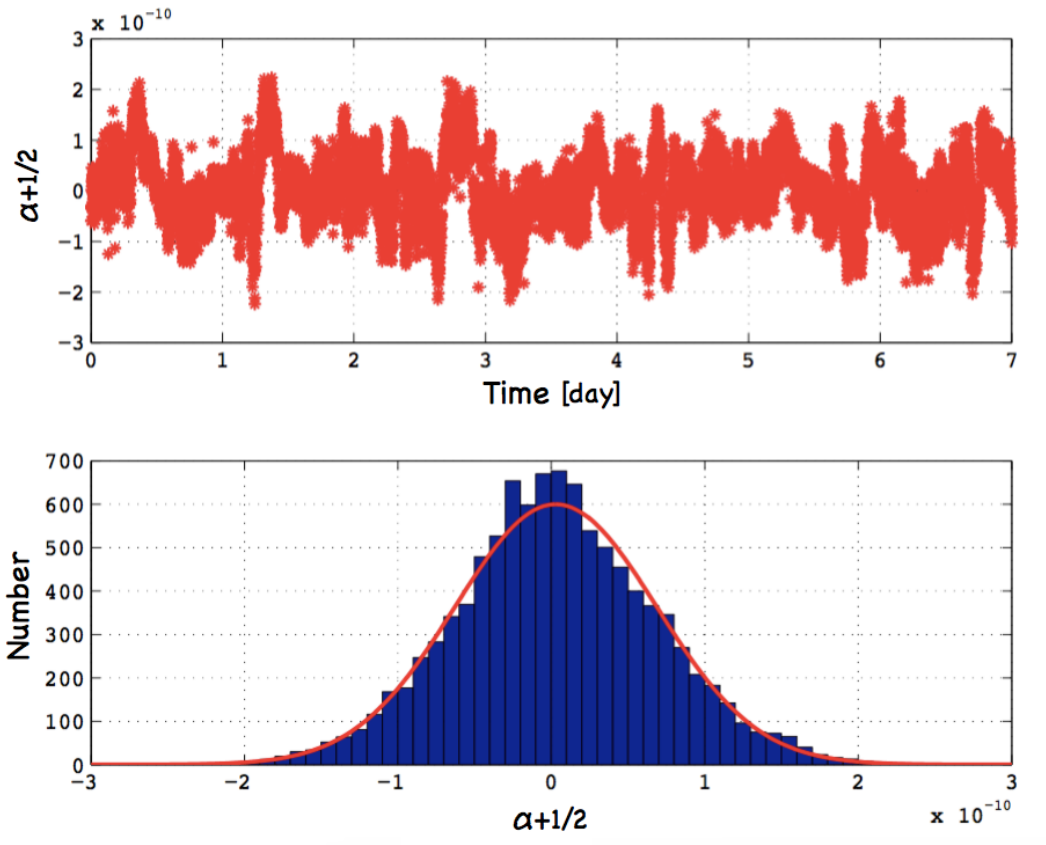


SCCEF(C_1', S_1')



$\alpha + 1/2$ (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)：

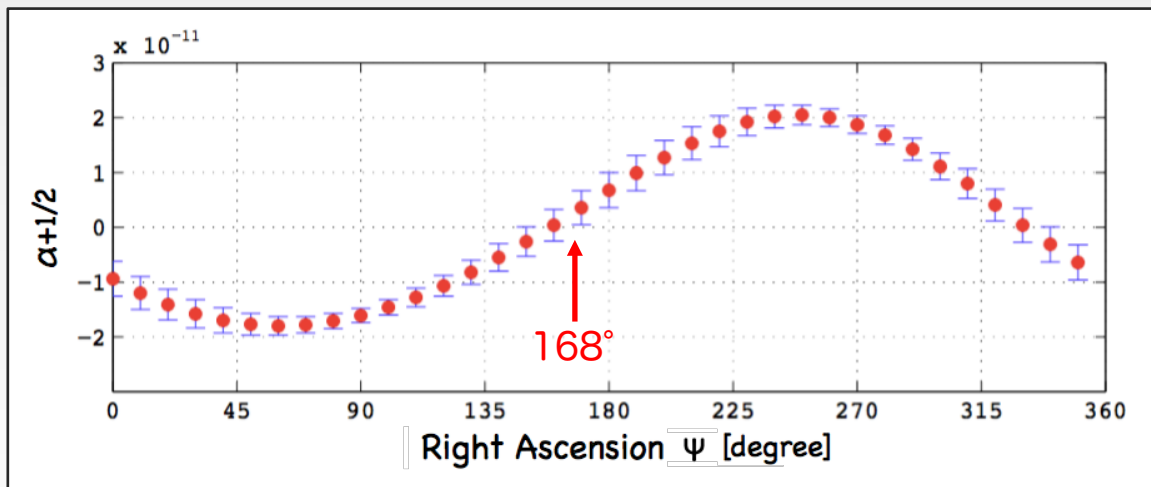
$$\begin{aligned} \sigma(\overline{\alpha + 1/2}) &= \frac{\sigma(\alpha + 1/2)}{\sqrt{N/n}} \\ &= 3.1 \times 10^{-12} \end{aligned}$$

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

$\alpha + 1/2$

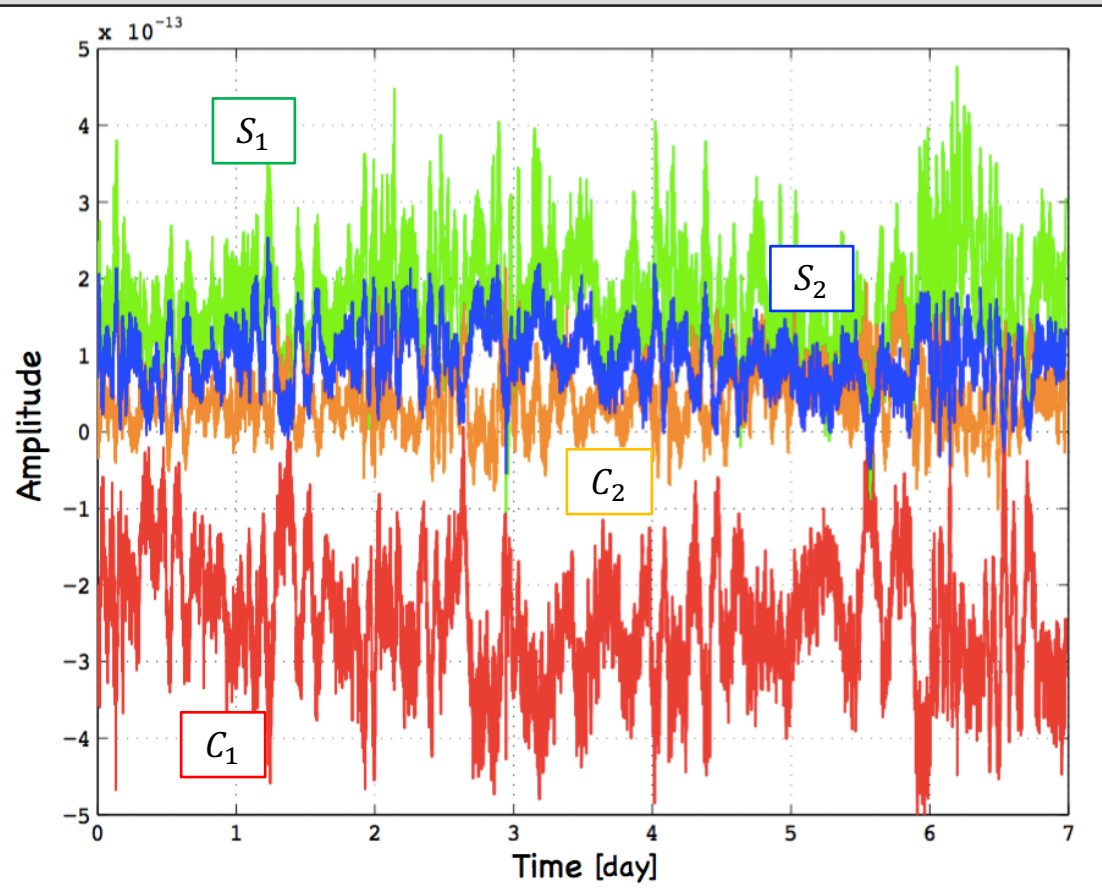
$$= (3.0 \pm 3.1 \pm 20) \times 10^{-12}$$

統計誤差 ↑ ↑ 系統誤差

※ 較正による系統誤差は
最大10%程度

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_{rot} 成分)

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

2倍波($2f_{\text{rot}}$ 成分)

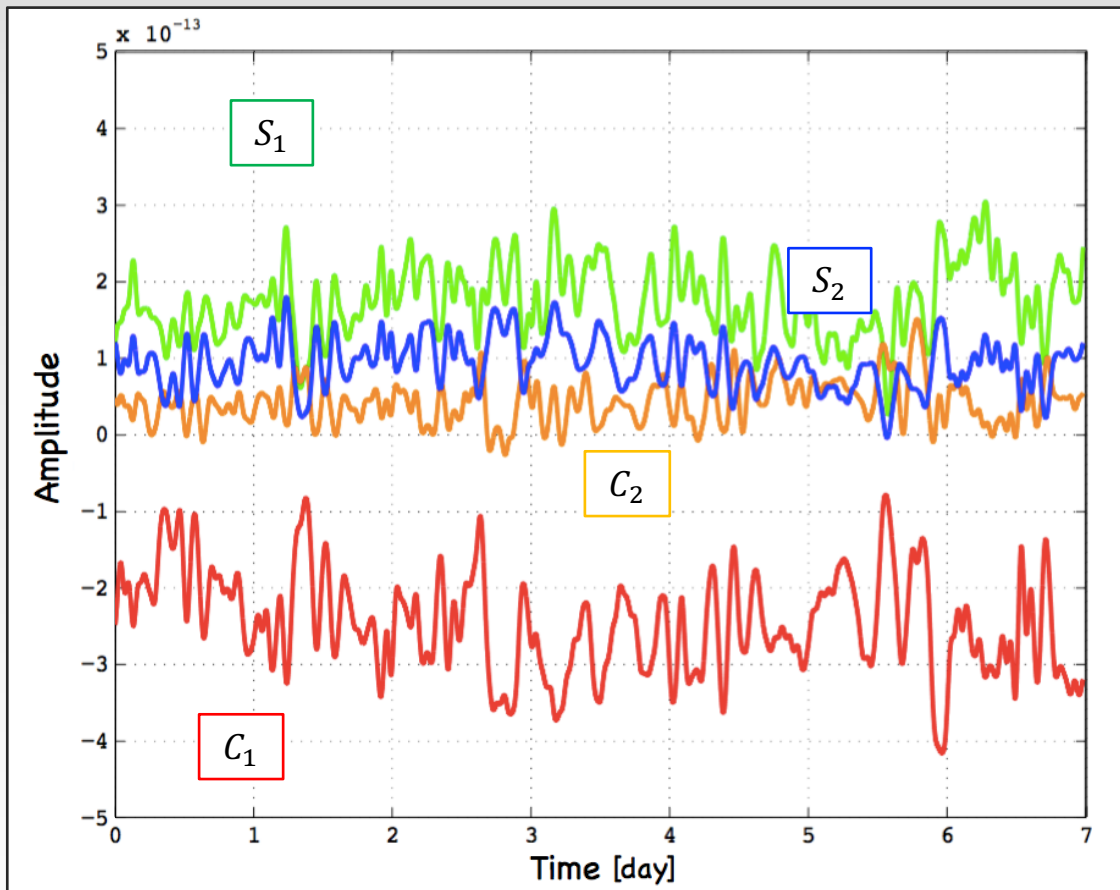
$$C_2 \text{ or } S_2 = 0 + \text{雑音}$$

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_{rot} 成分)

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

2倍波($2f_{\text{rot}}$ 成分)

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

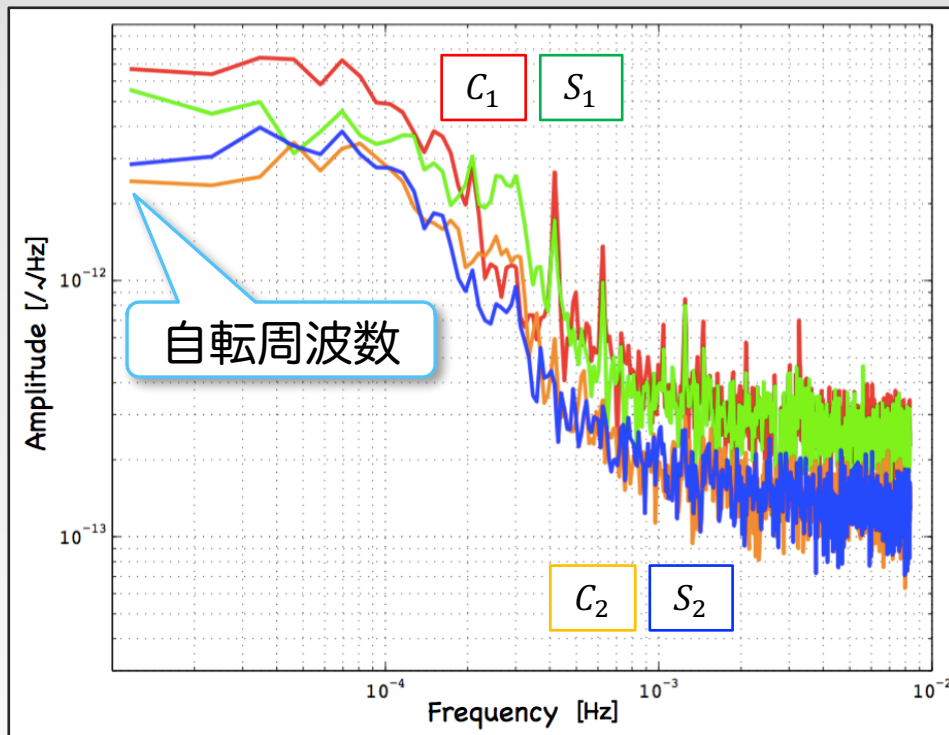
同一の原因(**温度変動?**)
による相関のある雑音

1倍波と2倍波の相関を計算
→ 雑音を除去

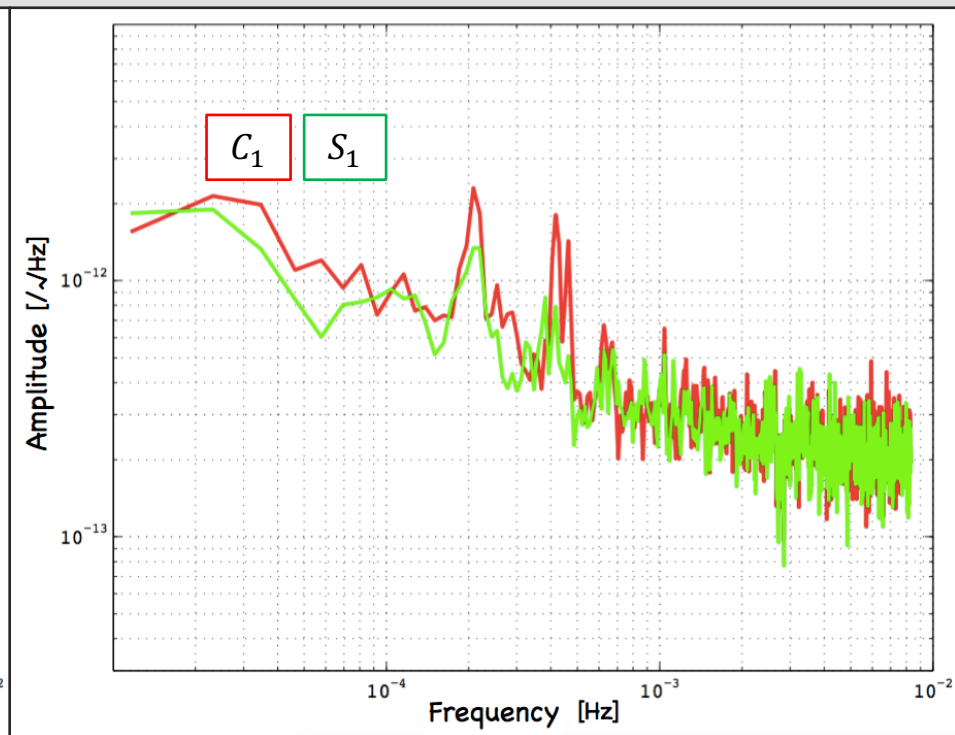
雑音除去の結果

- 2倍波による雑音除去をスペクトルで確認

雑音除去前



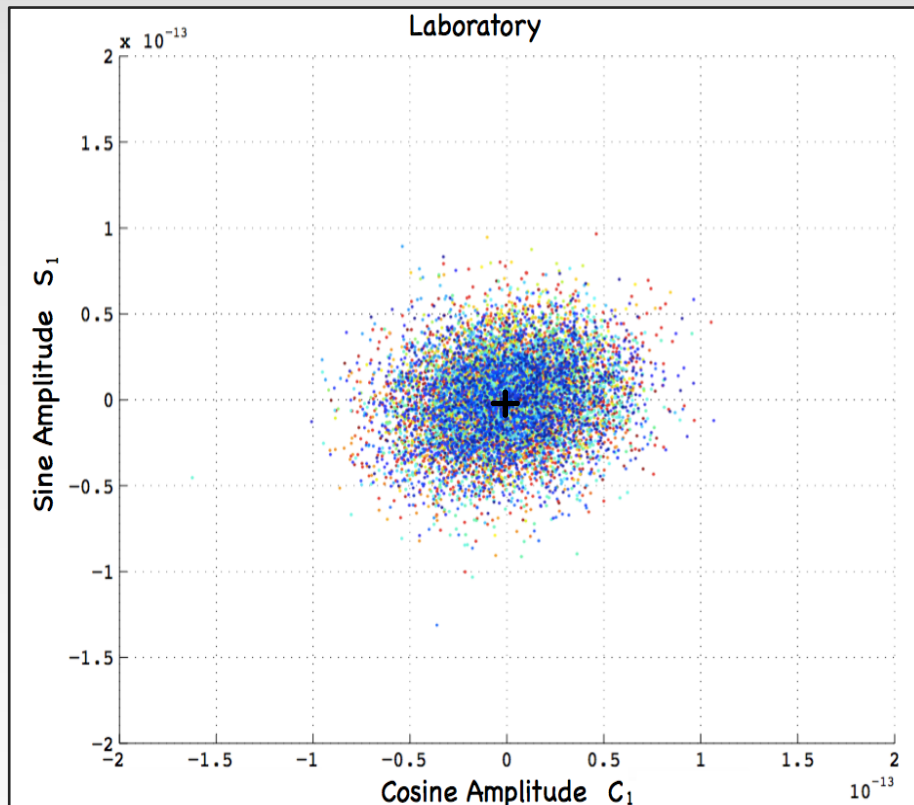
雑音除去後



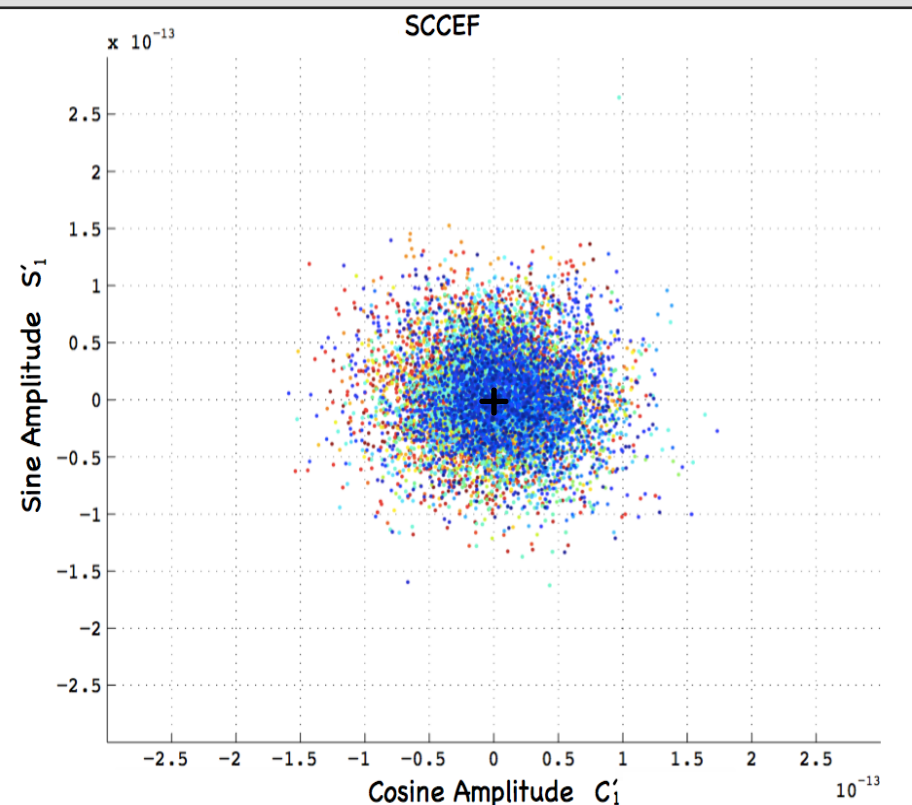
直交位相振幅（雑音除去後）

- 12回転毎に直交位相振幅を計算

実験室系(C_1, S_1)

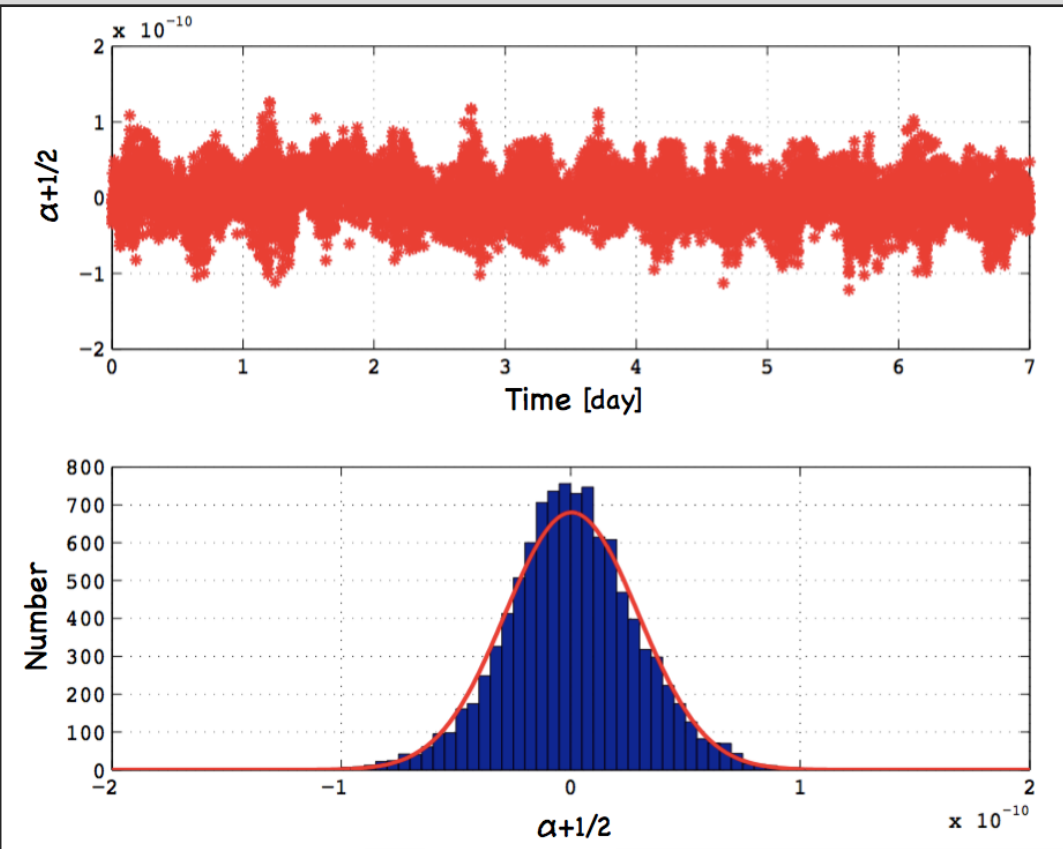


SCCEF(C_1', S_1')



$\alpha + 1/2$ (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： $n \sim 37$

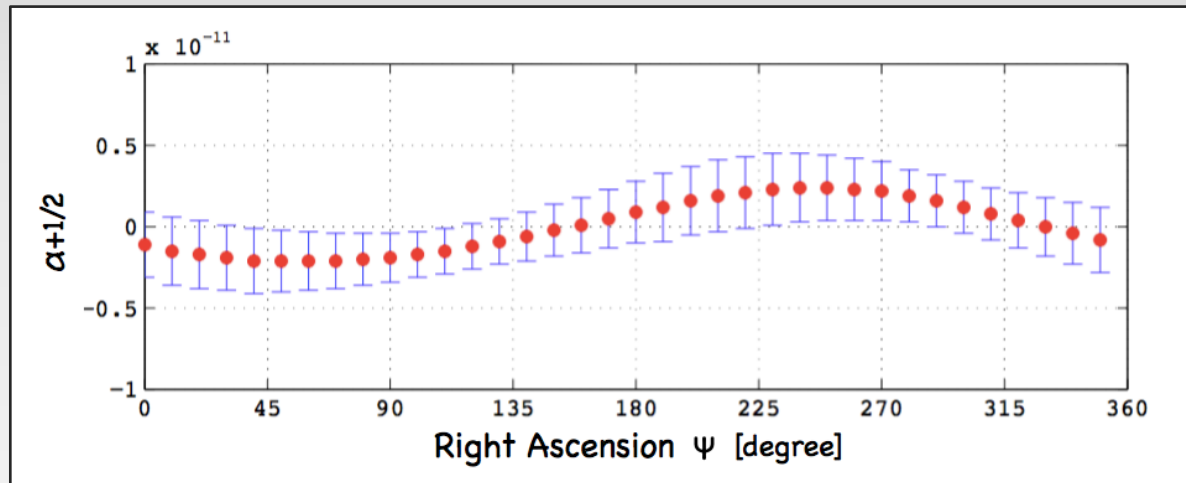


平均値の精度(統計誤差)：

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

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



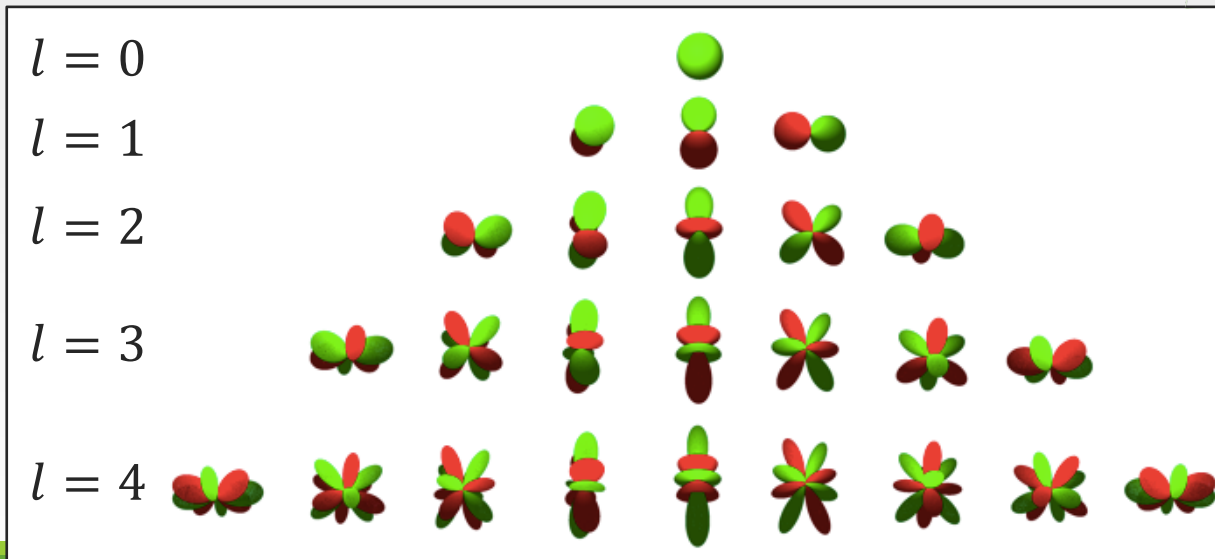
- $\alpha + 1/2$ の測定結果
- 統計誤差 ↓ ↓ 系統誤差
- 雑音除去前： $\alpha + 1/2 = (3.0 \pm 3.1 \pm 20) \times 10^{-12}$
 - 雑音除去後： $\alpha + 1/2 = (0.4 \pm 1.8 \pm 2.3) \times 10^{-12}$
- $\rightarrow |\delta c/c| \lesssim 5 \times 10^{-15}$ (先行研究と同じオーダー)

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

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

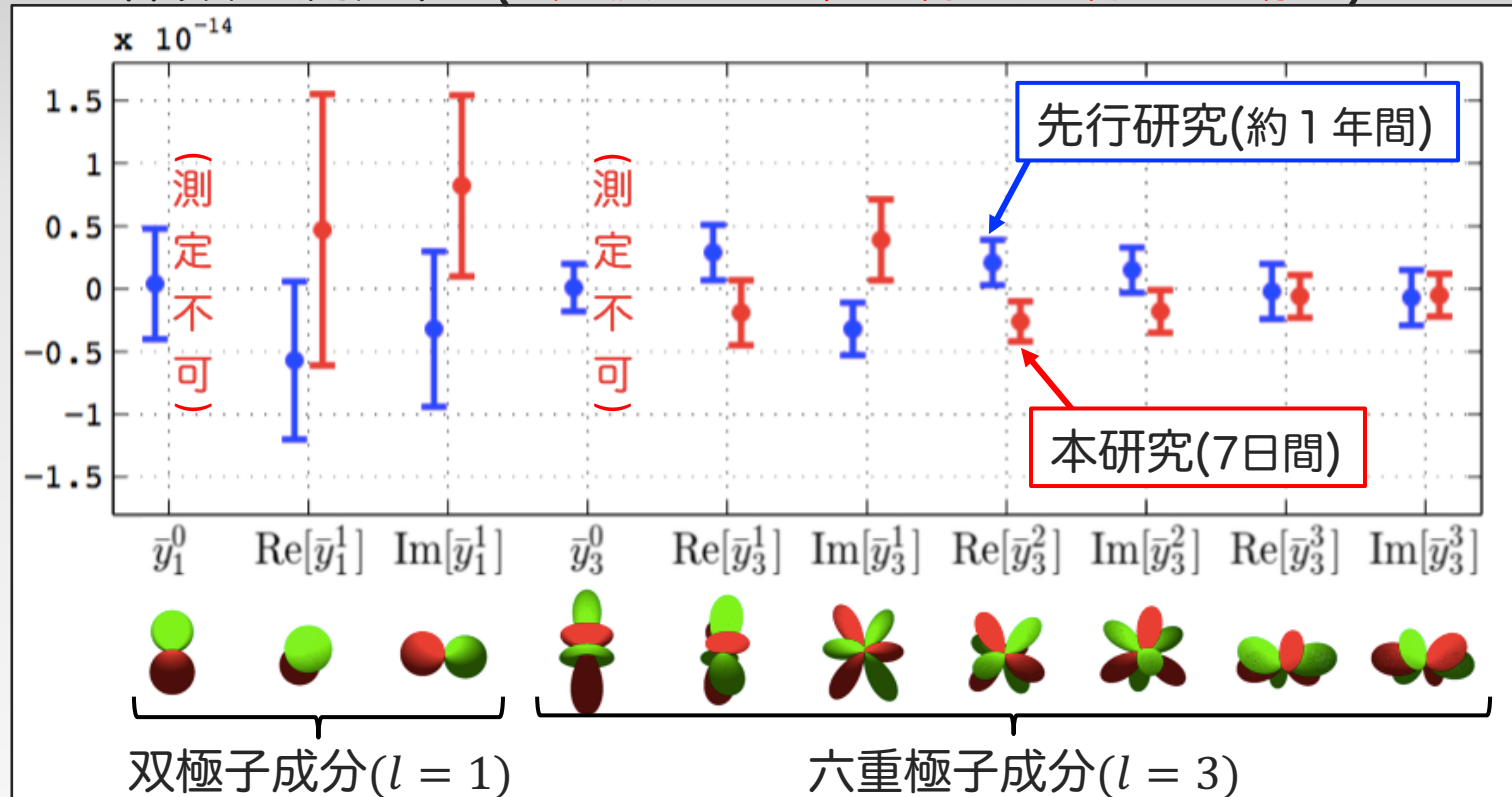


$l = 1, 3, \dots$
→ **片道光速の異方性**

$l = 2, 4, \dots$
→ **往復光速の異方性**

異方性の球面調和関数展開(結果)

- 各係数の測定値 (2倍波による雑音除去を行った場合)



1週間の測定で先行研究とほぼ同じ精度

→ 1年間(=約52週間)の測定で精度は約7倍になるので、
最高精度を5倍程度更新できる見込み

目次

1. イントロダクション [1,2章]
2. 測定原理 [3章]
3. 実験装置 [4,5章]
4. データ解析 [5,6章]
5. 結論 [7章]
 まとめ、今後の展望

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
- 現在の感度を評価するため、7日間異方性探査を行った
 - 2倍波で雑音を除去した場合、先行研究とほぼ同じ精度
$$\alpha + \frac{1}{2} = (0.4 \pm 1.8 \pm 2.3) \times 10^{-12} \quad \left(\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 5 \times 10^{-15} \right)$$
 - 1年間の測定で最高精度を約5倍更新できる見込み

今後の展望 [1/2]

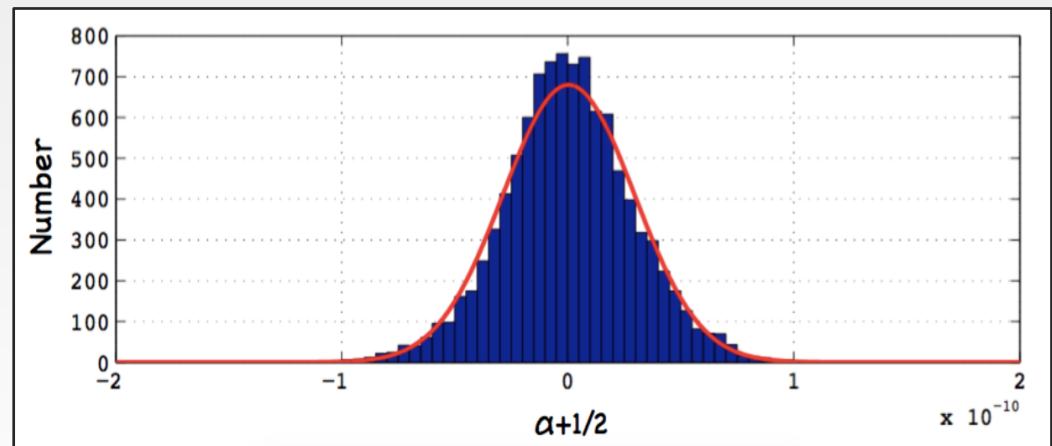
- 1年間の測定 → 約5倍精度向上
- 「回転と同期する雑音」を無くすことで約20倍精度向上

※ 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！



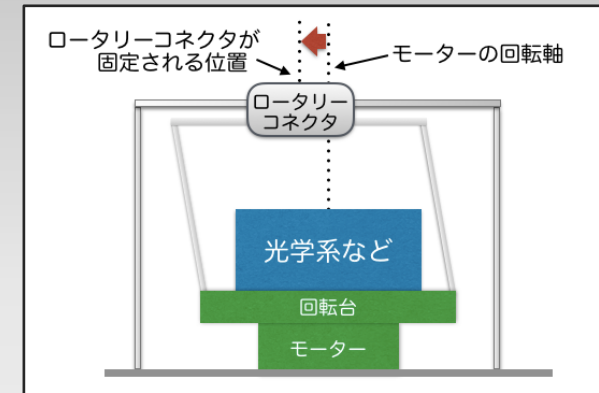
今後の展望 [2/2]

➤ 「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

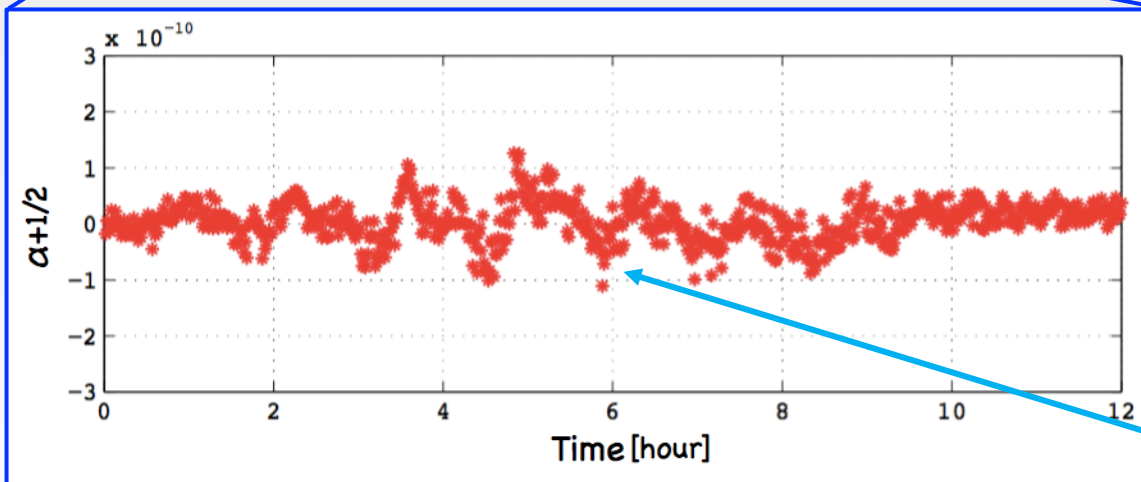
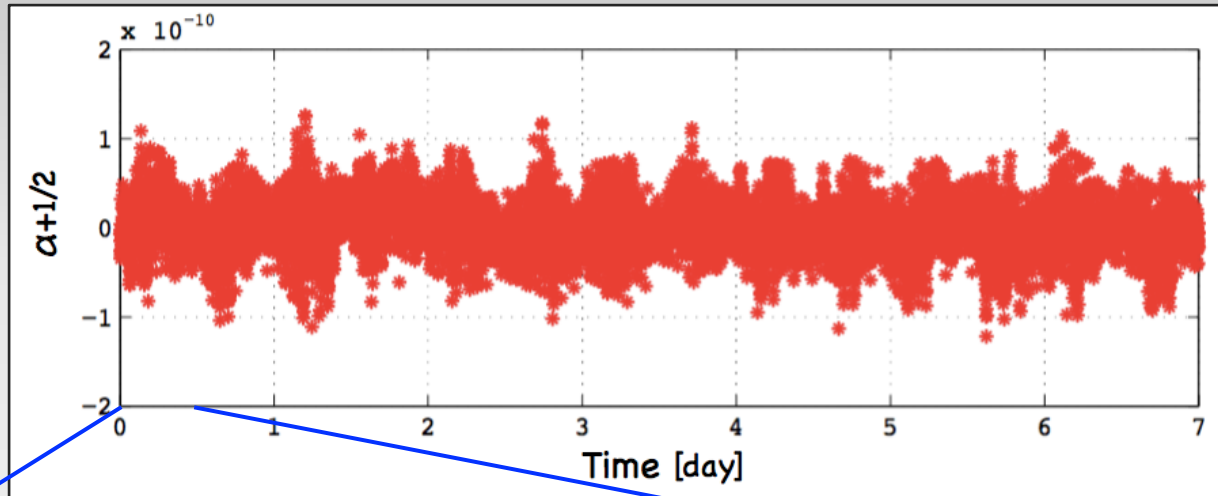


「回転と同期する雑音」を無くして 10^{-17} のオーダーでの異方性探査を目指す！

発表は以上です
ありがとうございました

以下補足

$\alpha + 1/2$ の時系列プロット

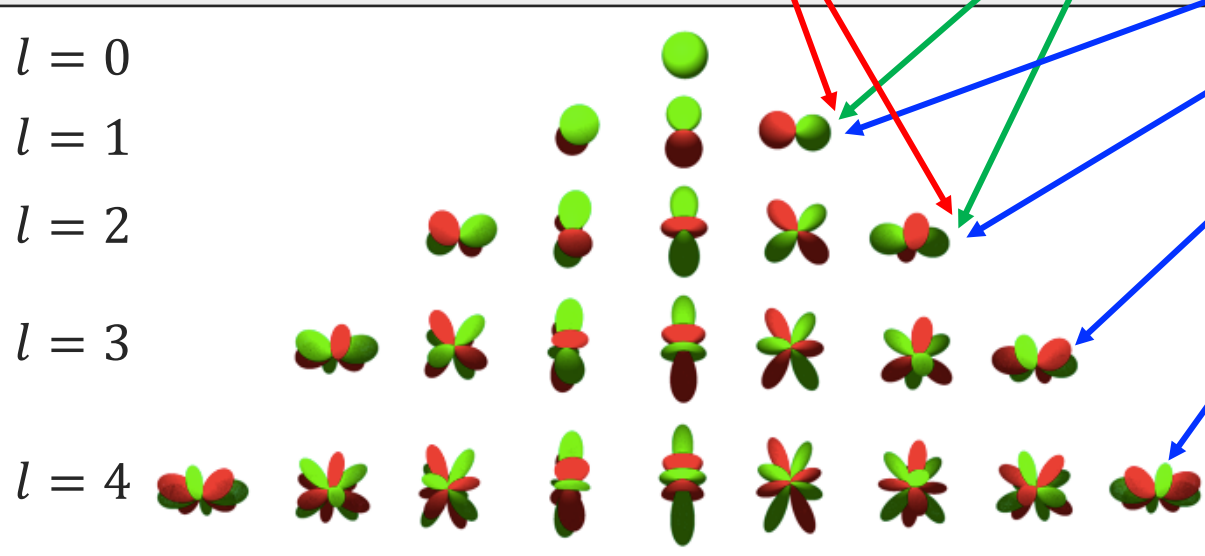


「回転と同期する雑音の変動」によって局所平均値が変化

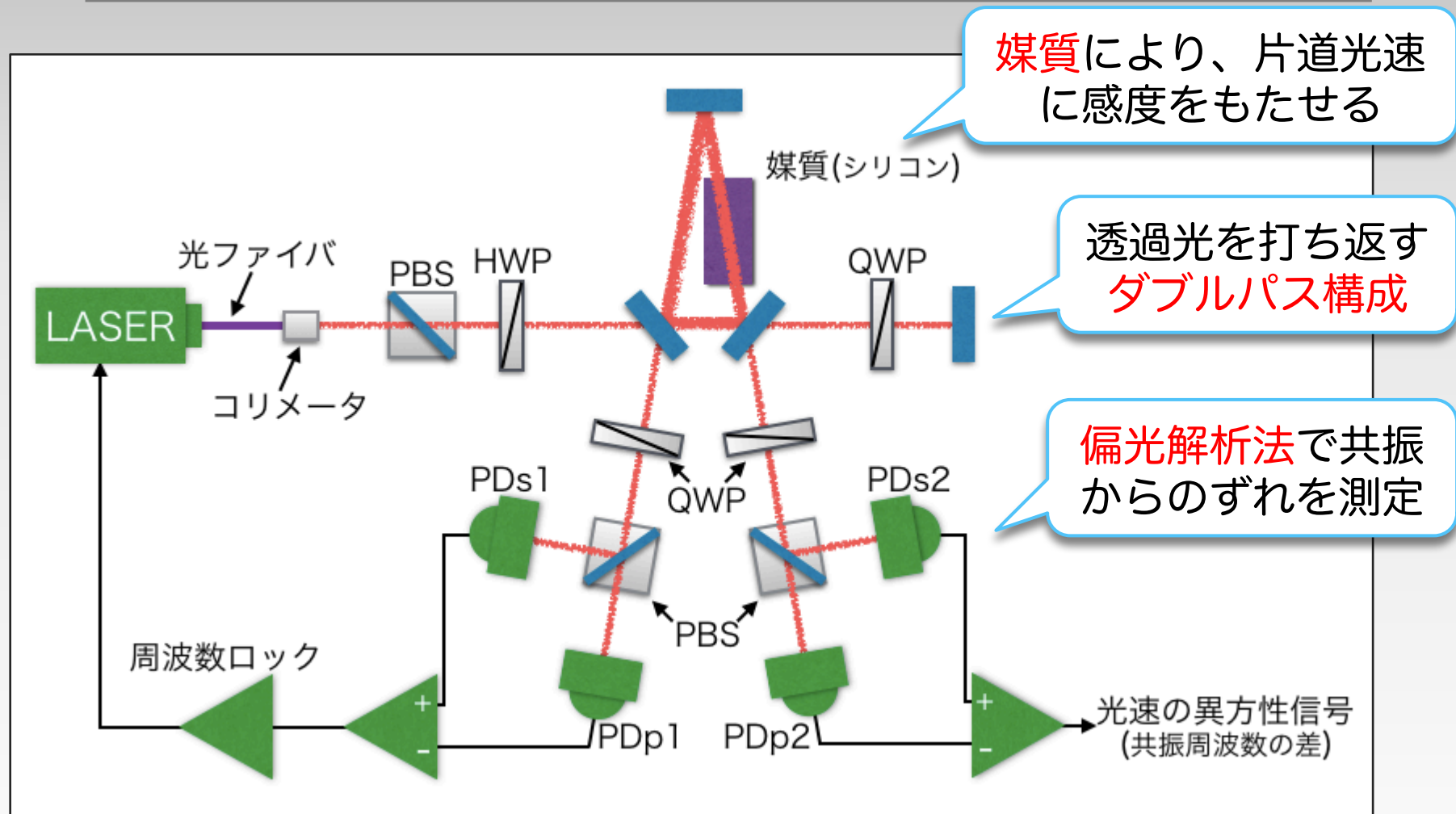
拡張標準理論と光速の異方性

➤ Lagrangian密度 (d は質量次元)

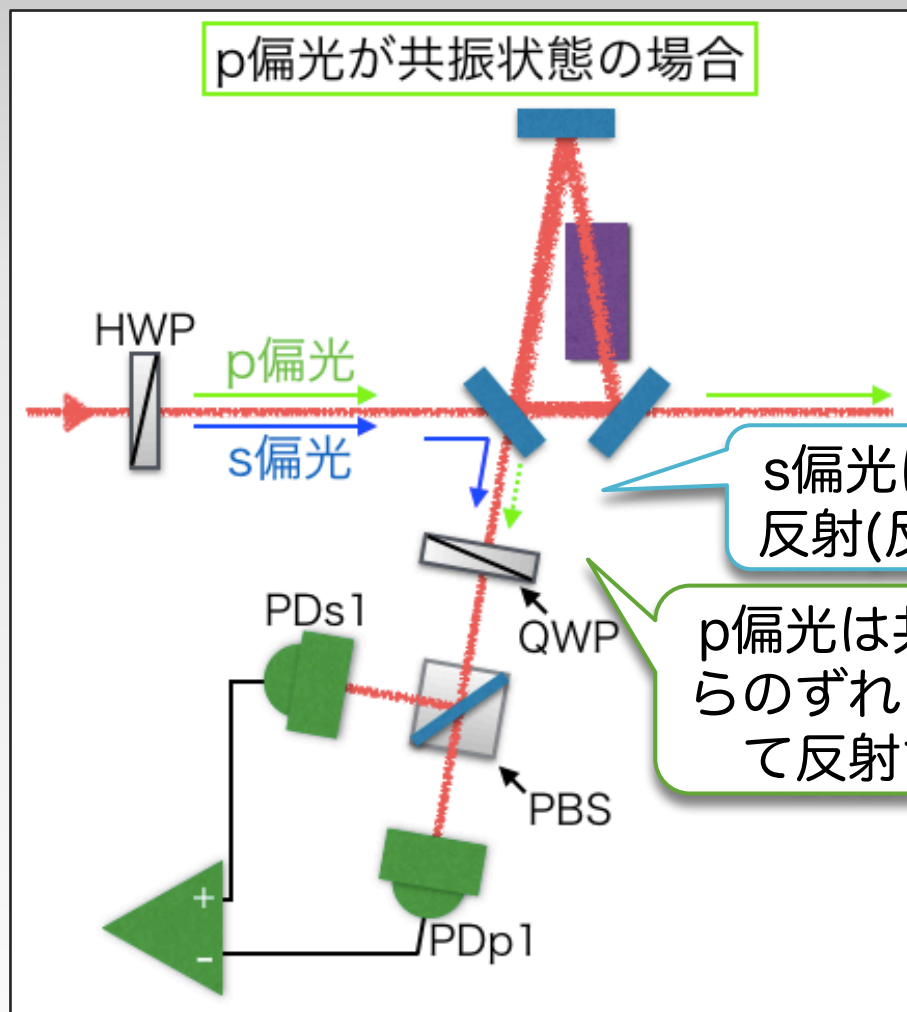
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \underbrace{\frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(4)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu}}_{d=4} + \underbrace{\frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(6)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu}}_{d=6} + \underbrace{\frac{1}{4}F_{\kappa\lambda}(\hat{k}_F^{(8)})^{\kappa\lambda\mu\nu}F_{\mu\nu}}_{d=8}$$



光学系の詳細



偏光解析法

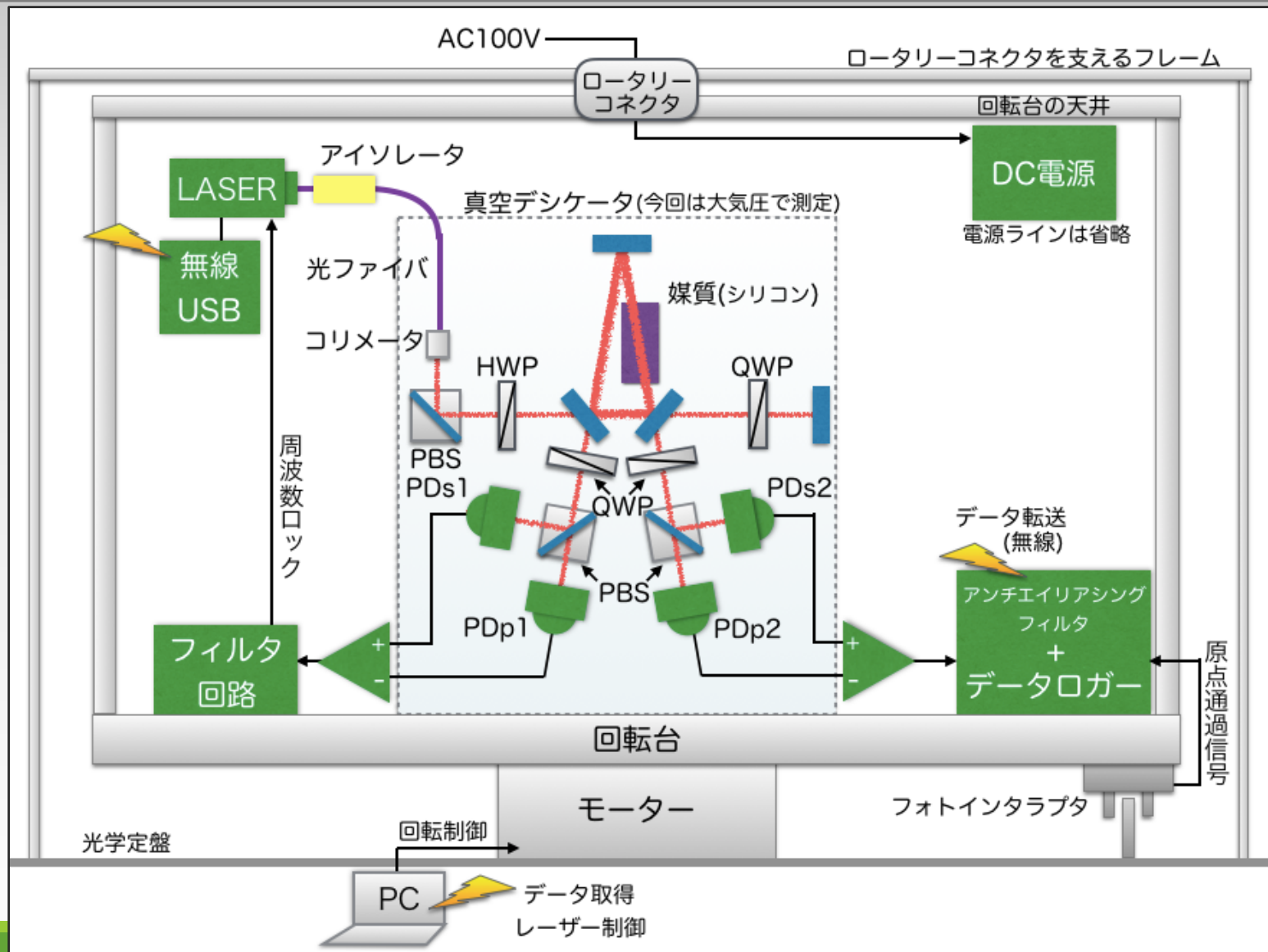


鏡が奇数枚のリング共振器
には偏光選択性がある

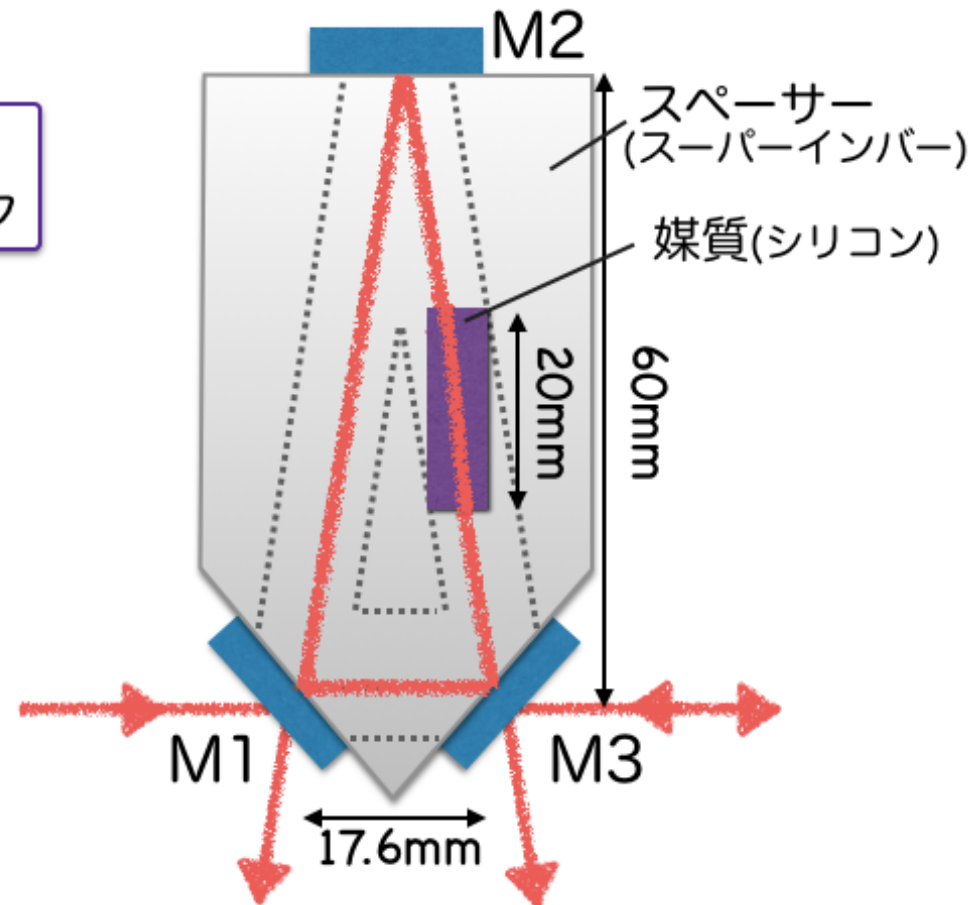
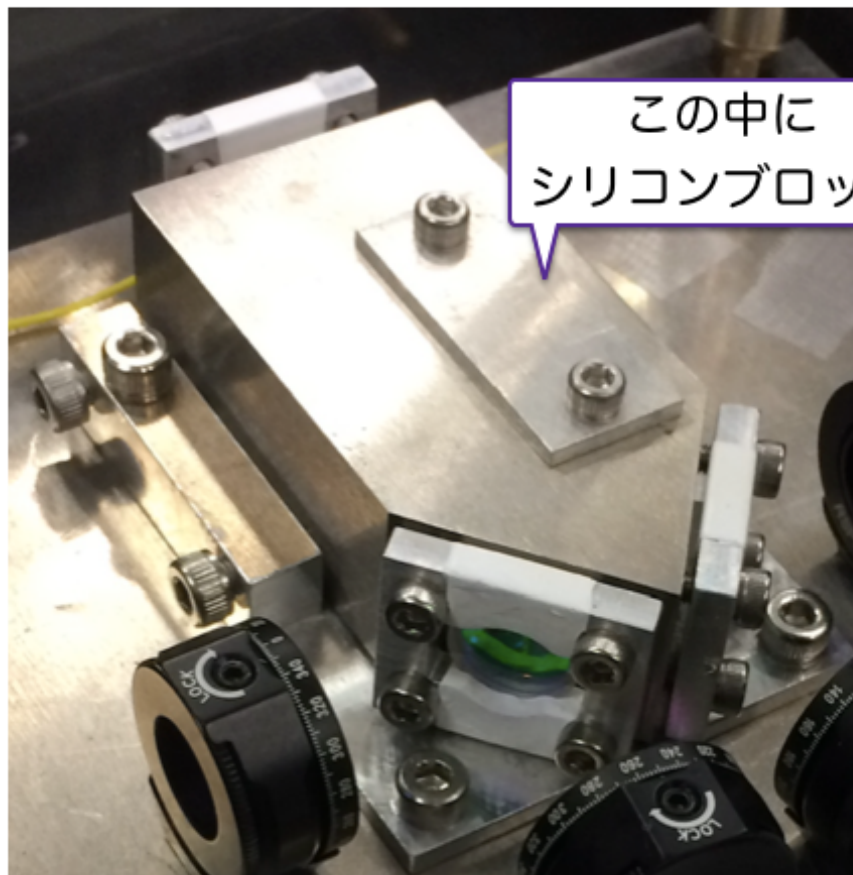
⇒ p偏光が共振のとき、
s偏光は反共振

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

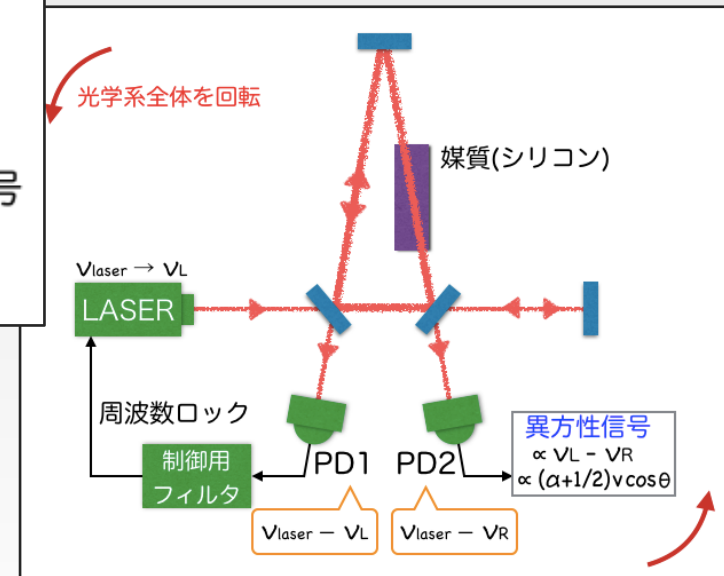
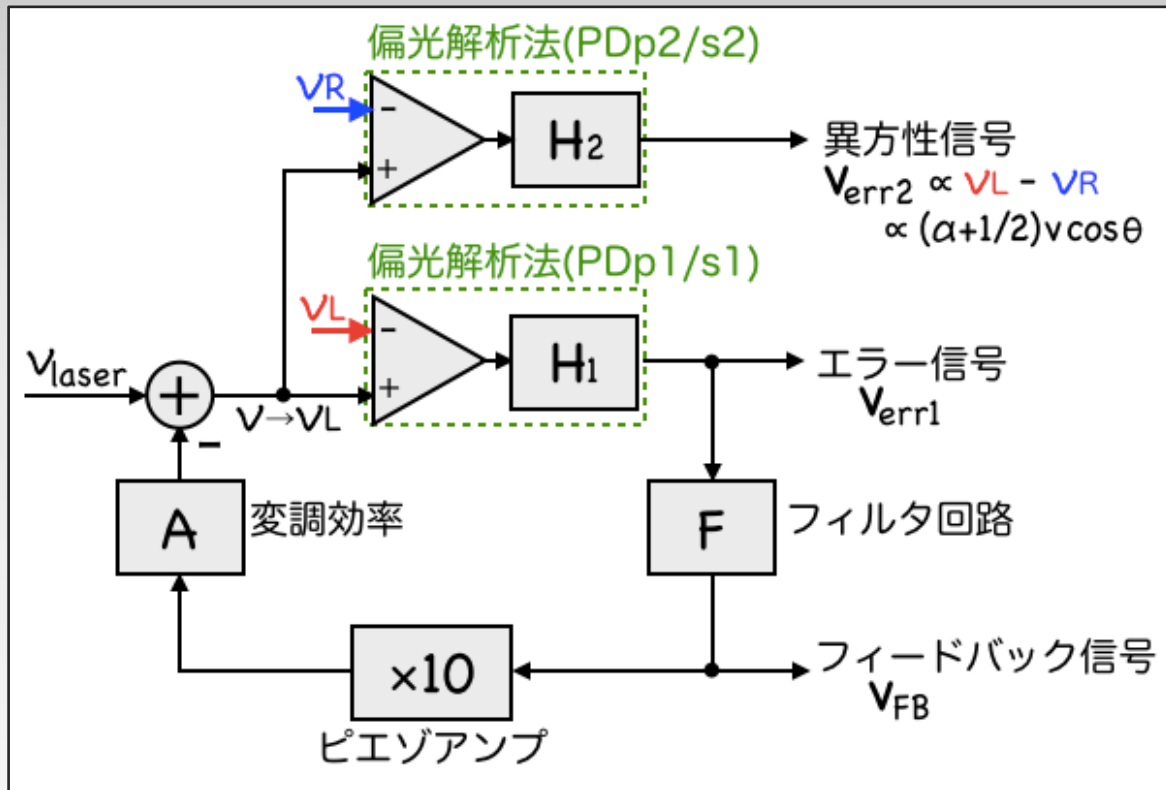
装置全体の構成



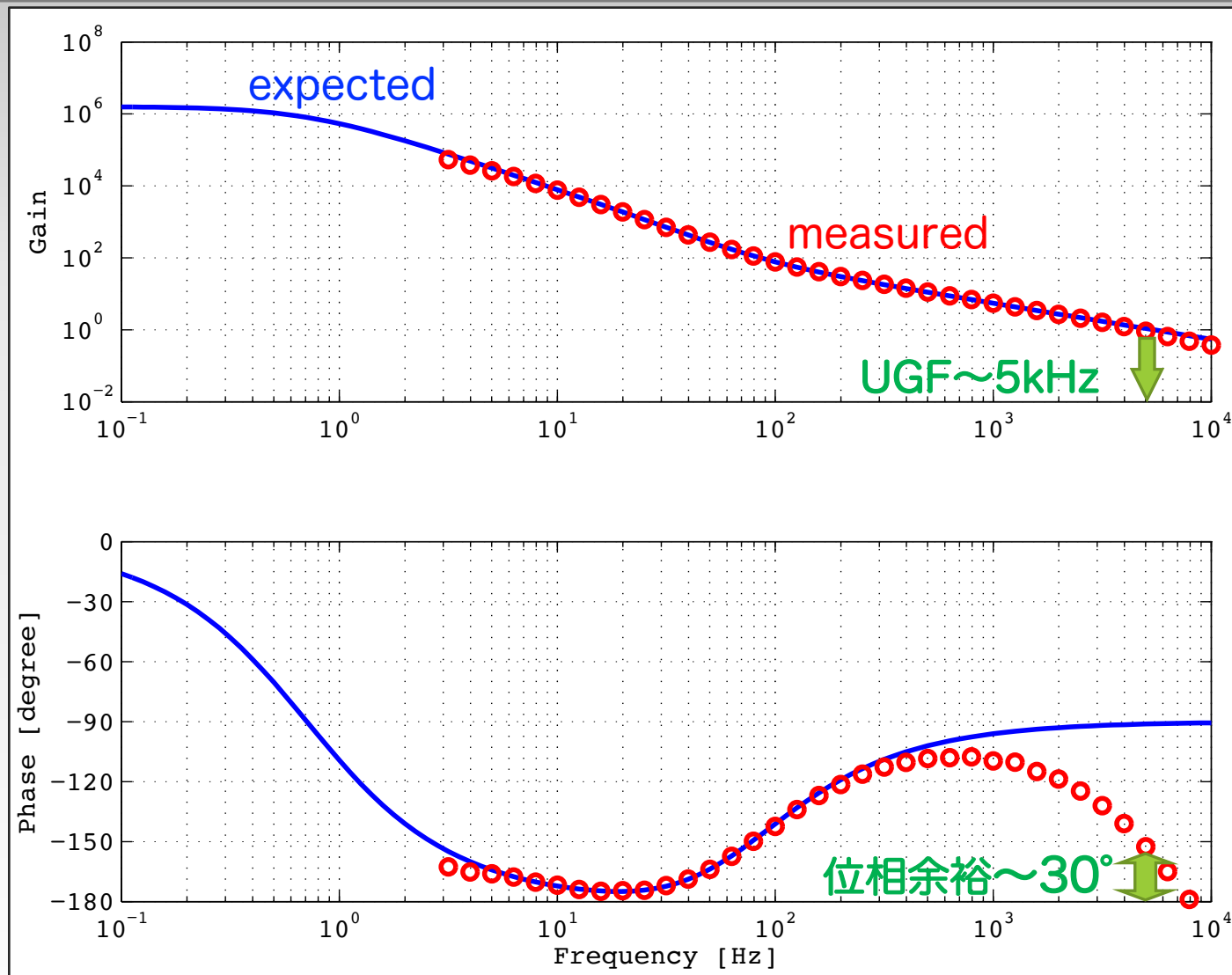
光リング共振器



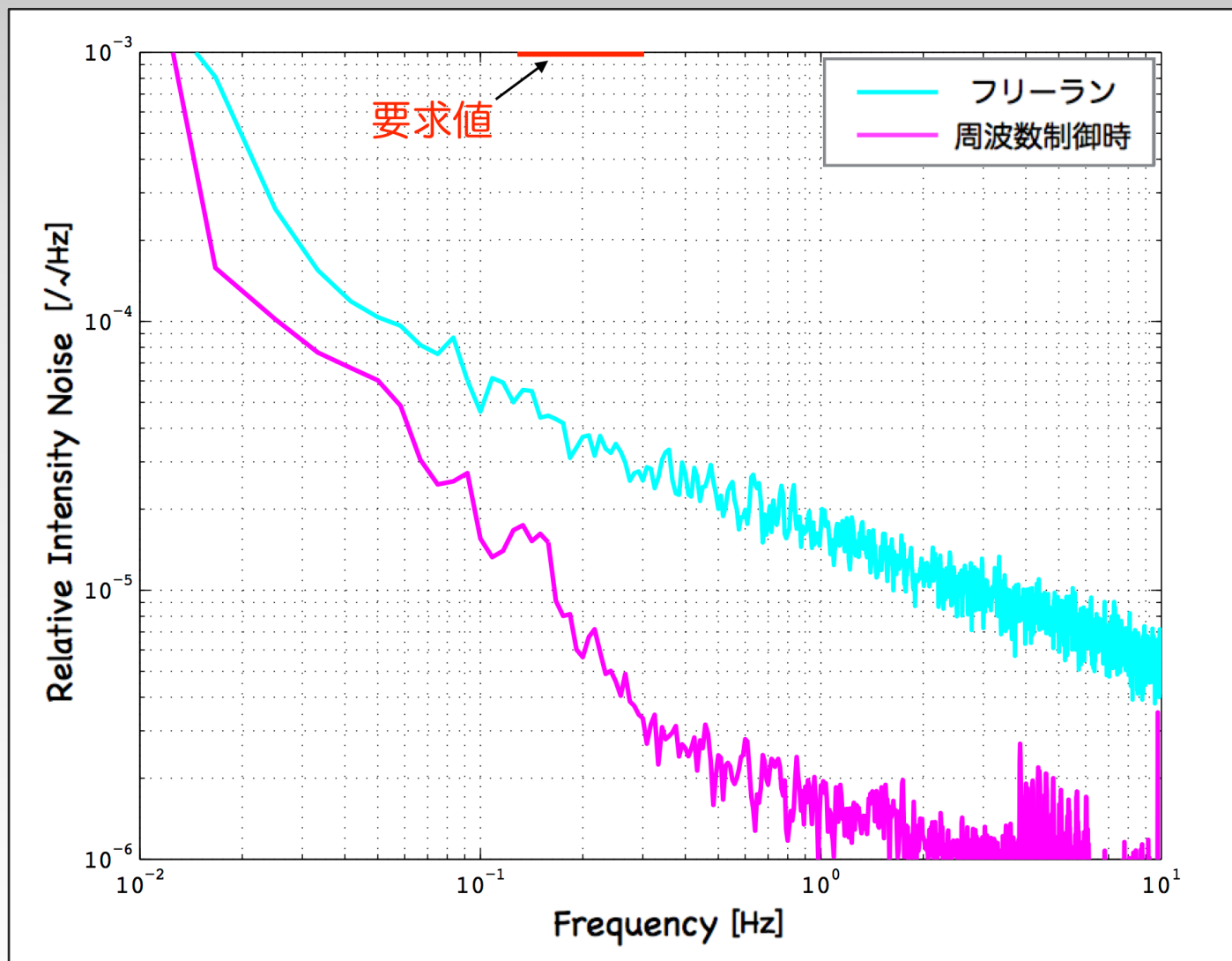
周波数制御のブロック図



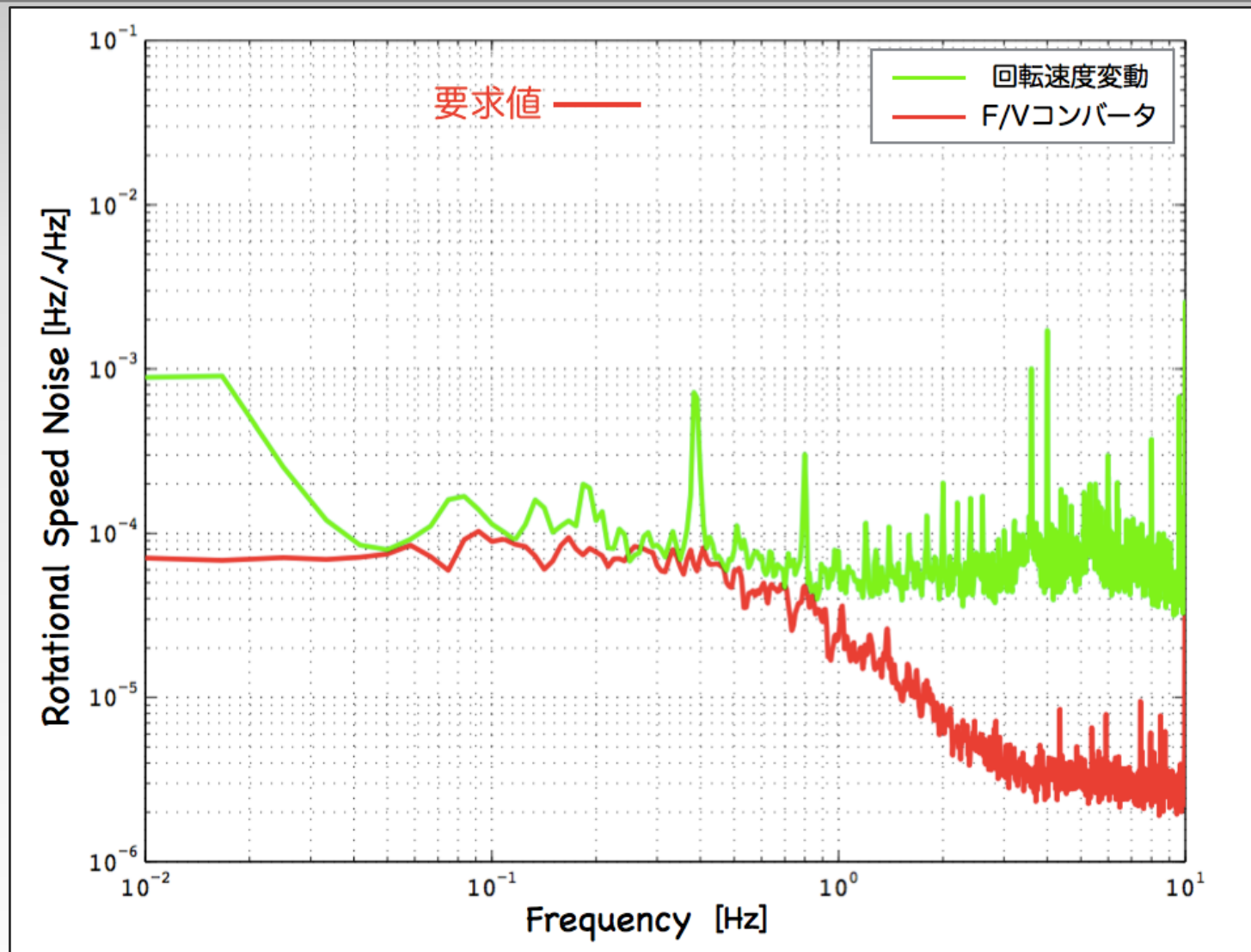
周波数制御のループ伝達関数



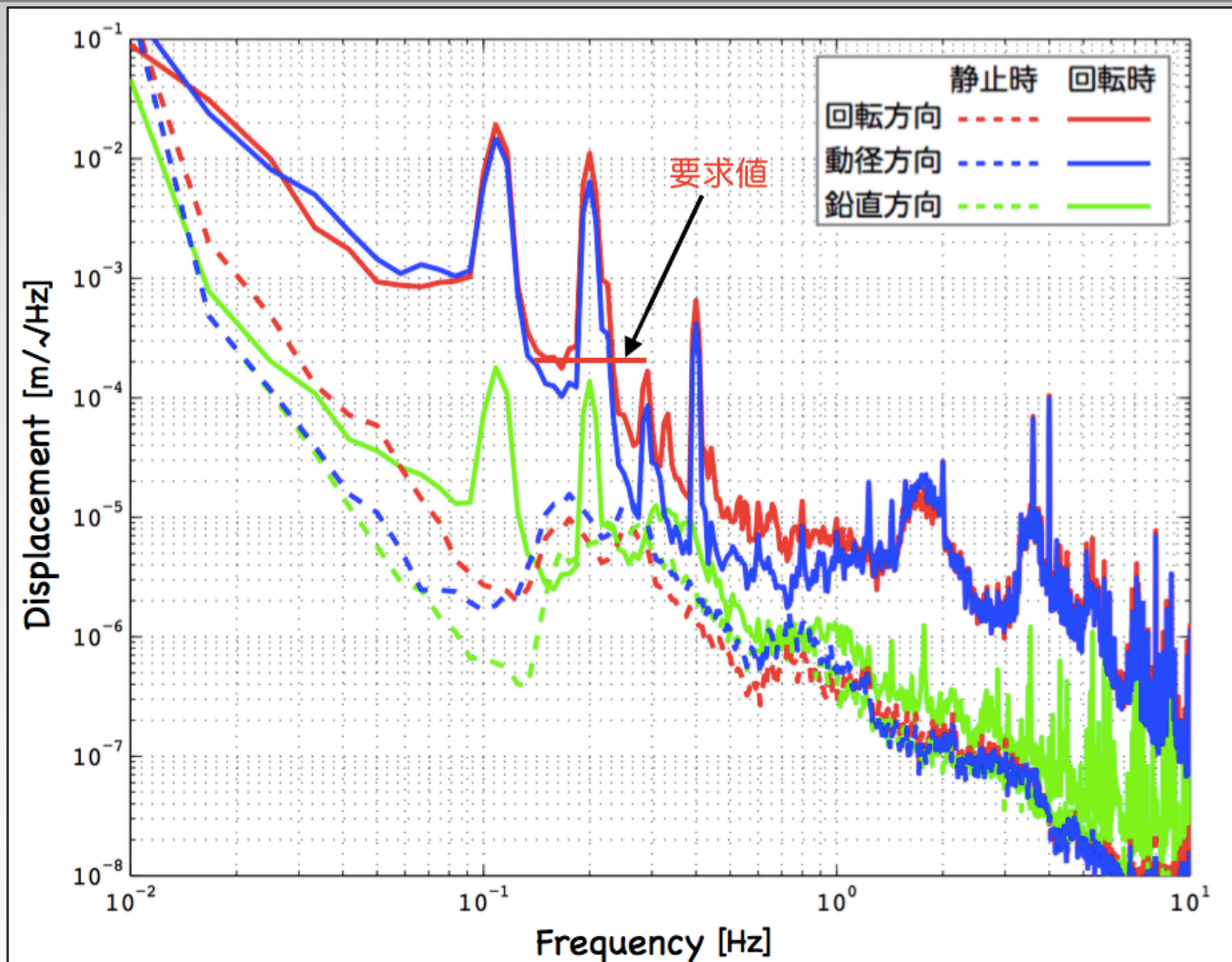
レーザー強度ゆらぎ



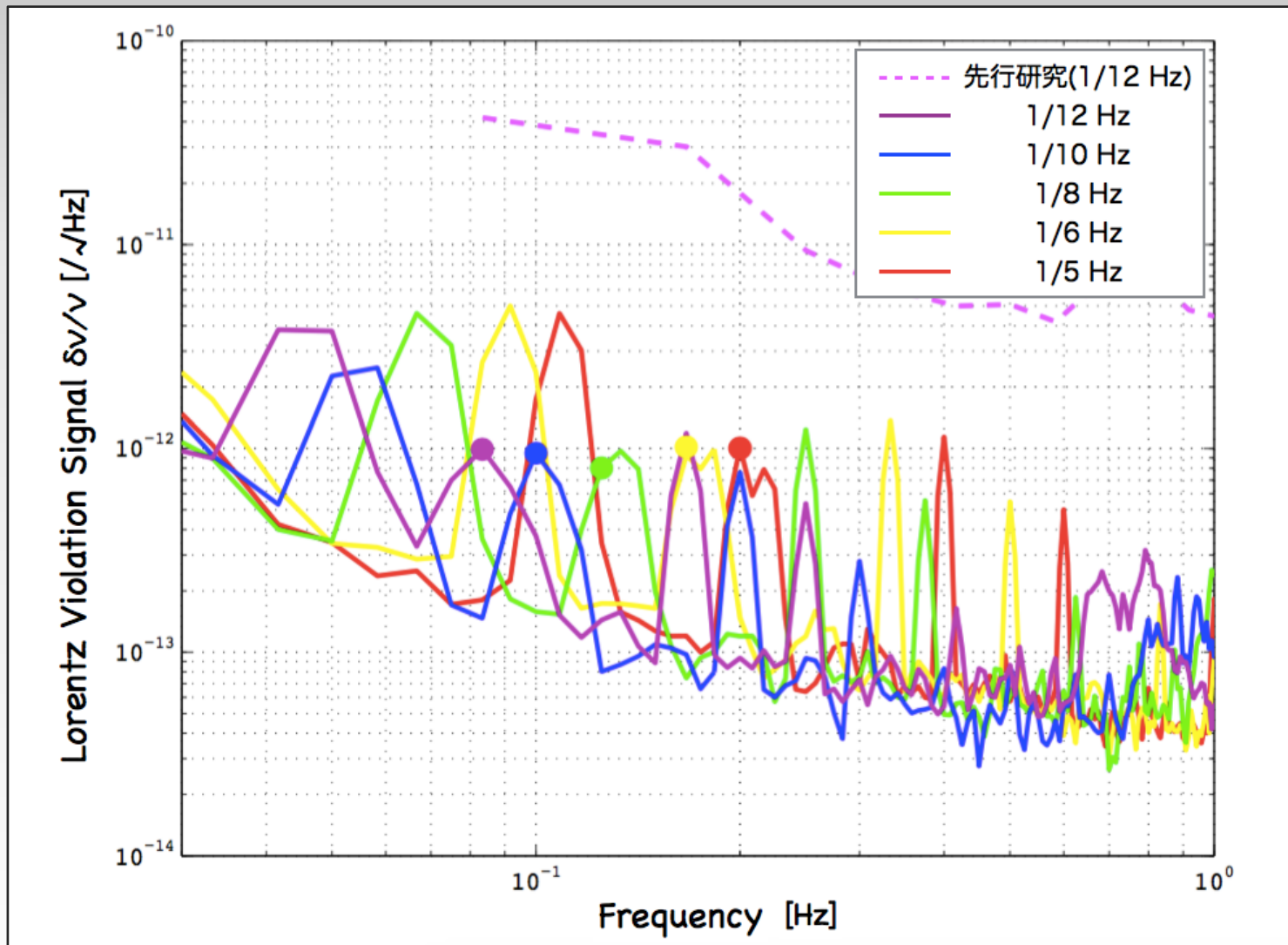
回転速度変動



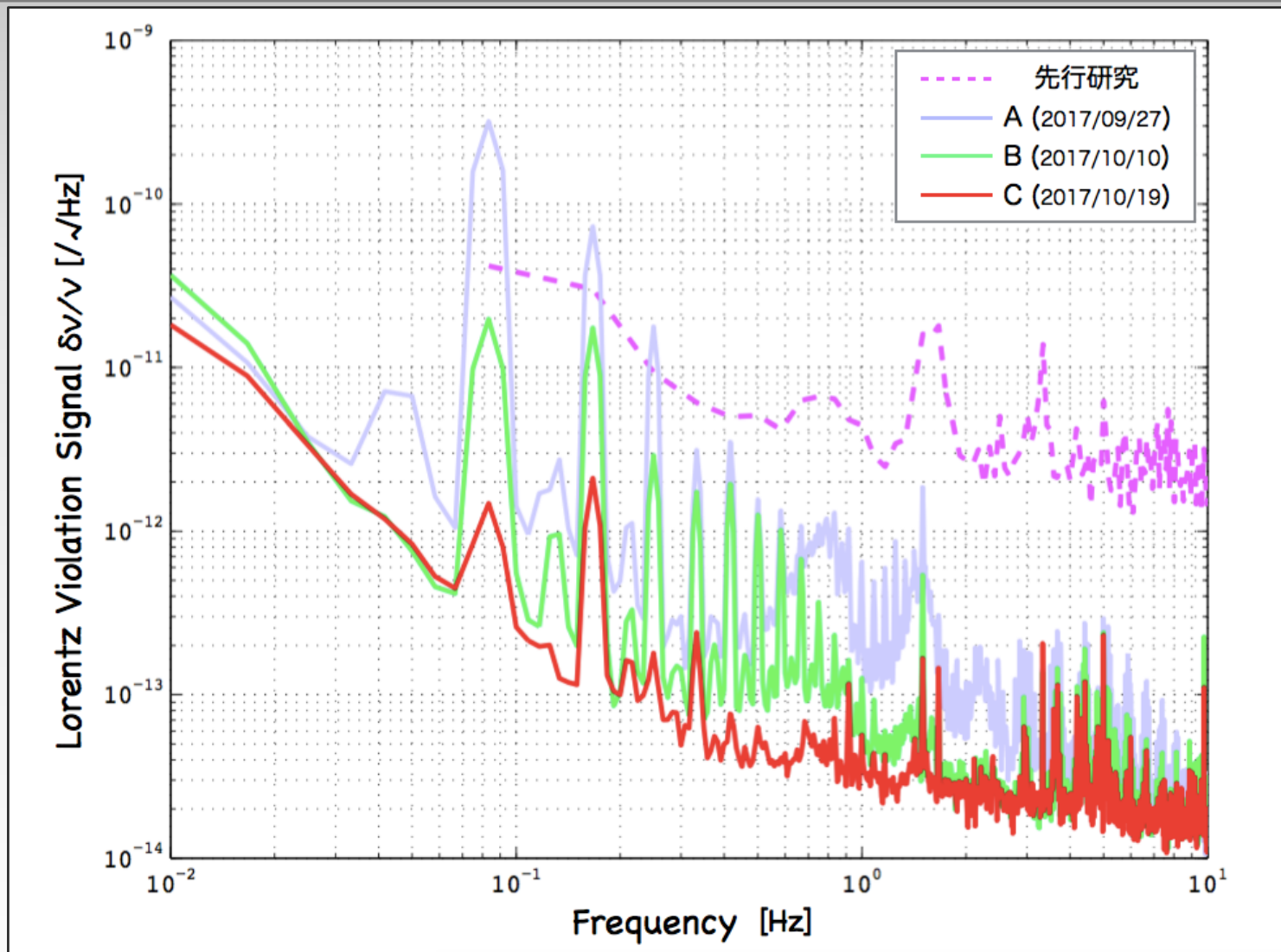
回転台の振動



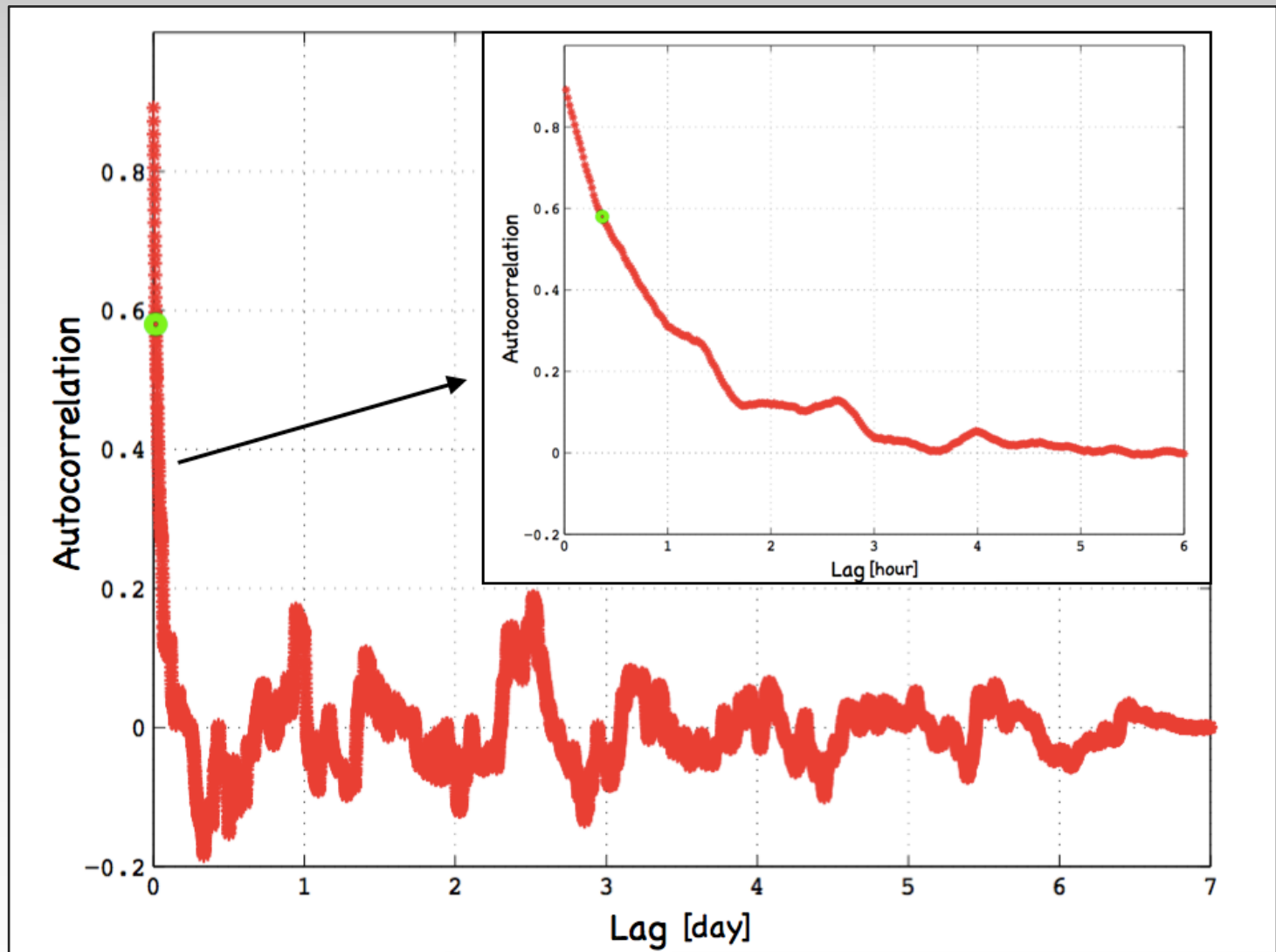
回転周波数を変えた場合



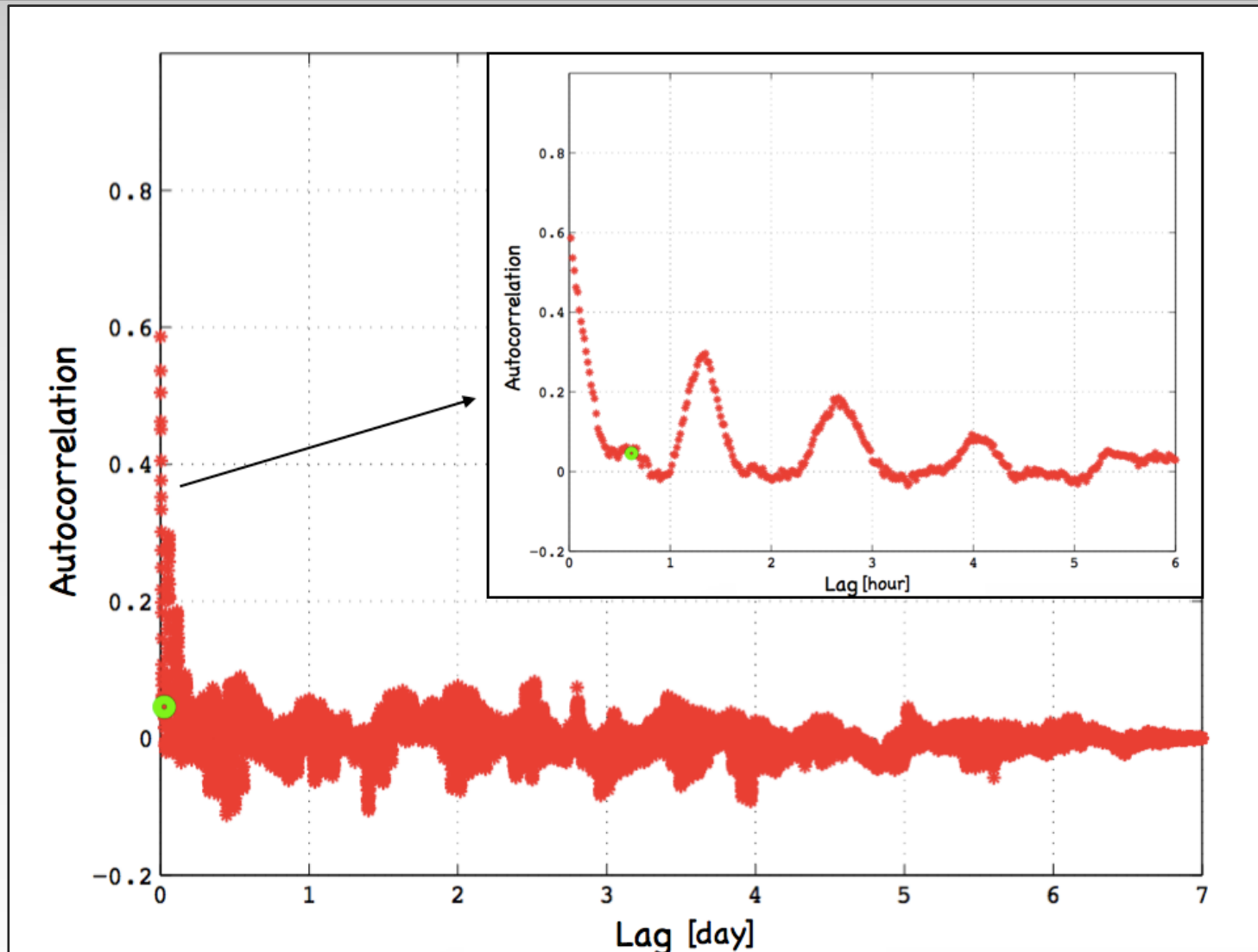
雑音レベルの変遷



$\alpha + 1/2$ 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)

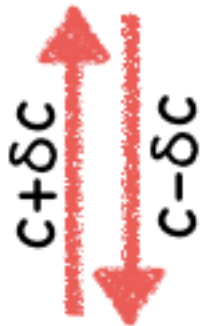


回転と同期する雑音の効き方

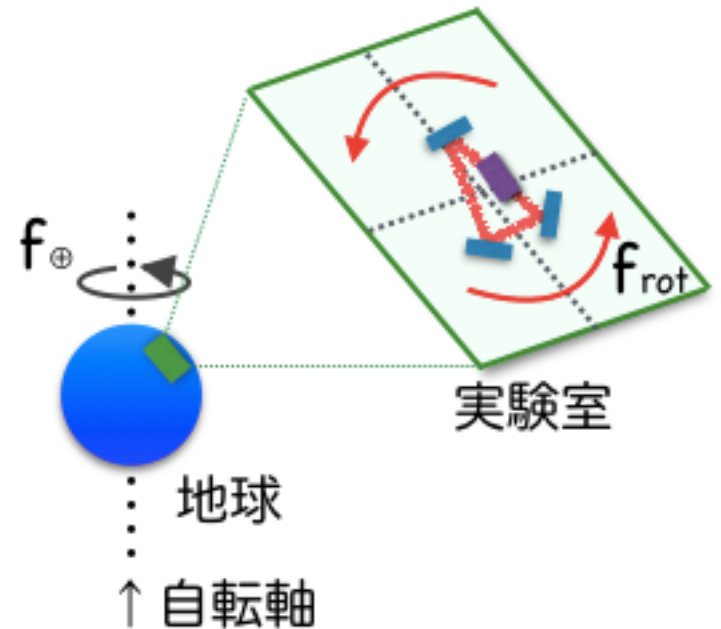
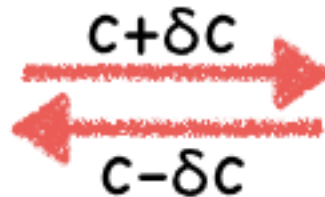
自転による変調
がかからない
(f_{rot} に信号)

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

自転軸と平行な
方向に異方性が
ある場合

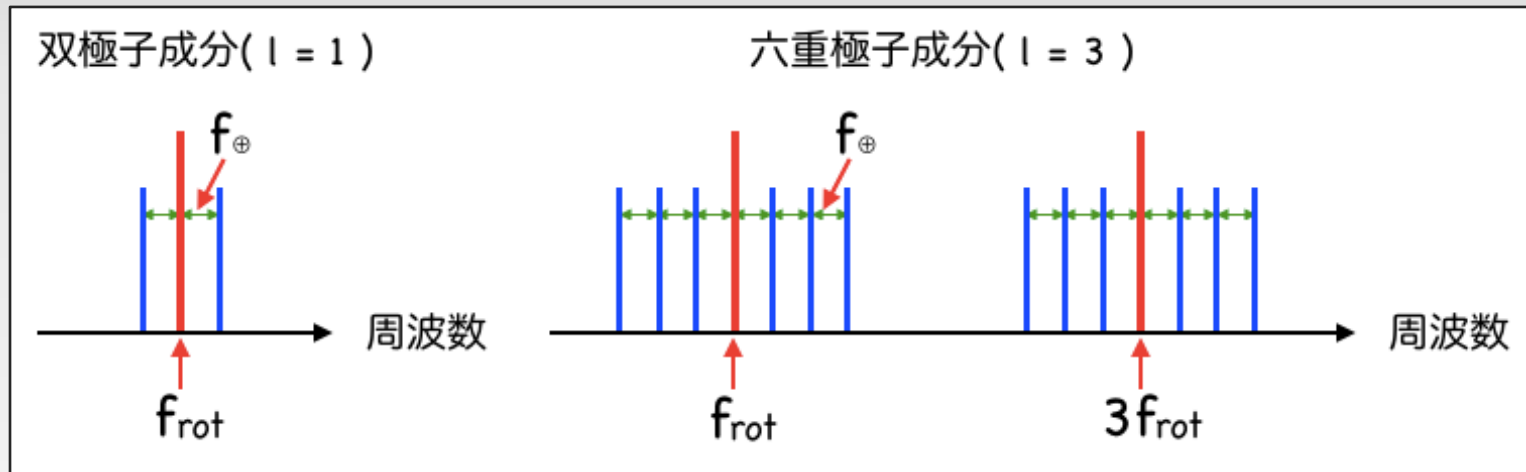


自転軸と直交する
方向に異方性が
ある場合

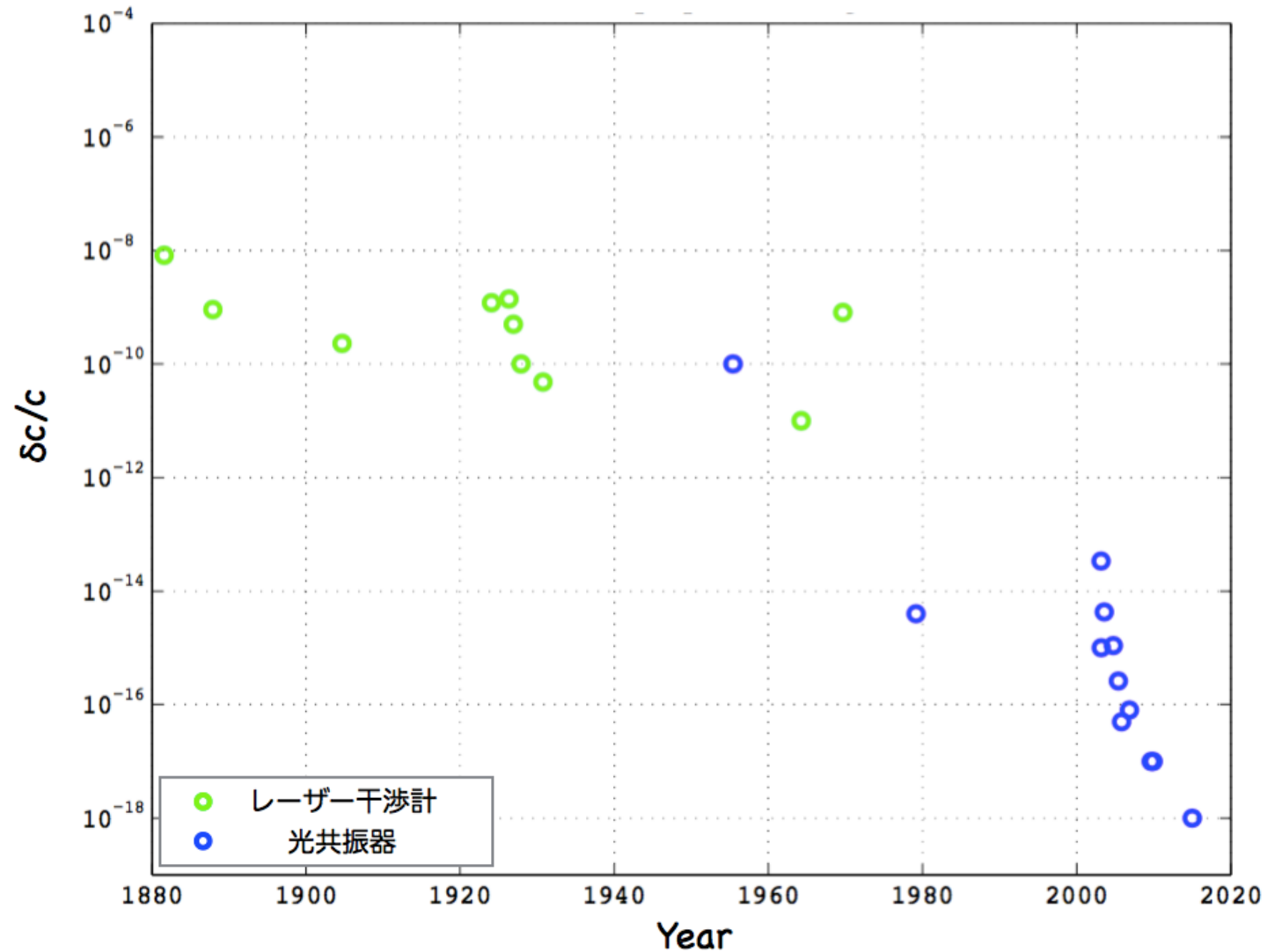


信号が現れる周波数

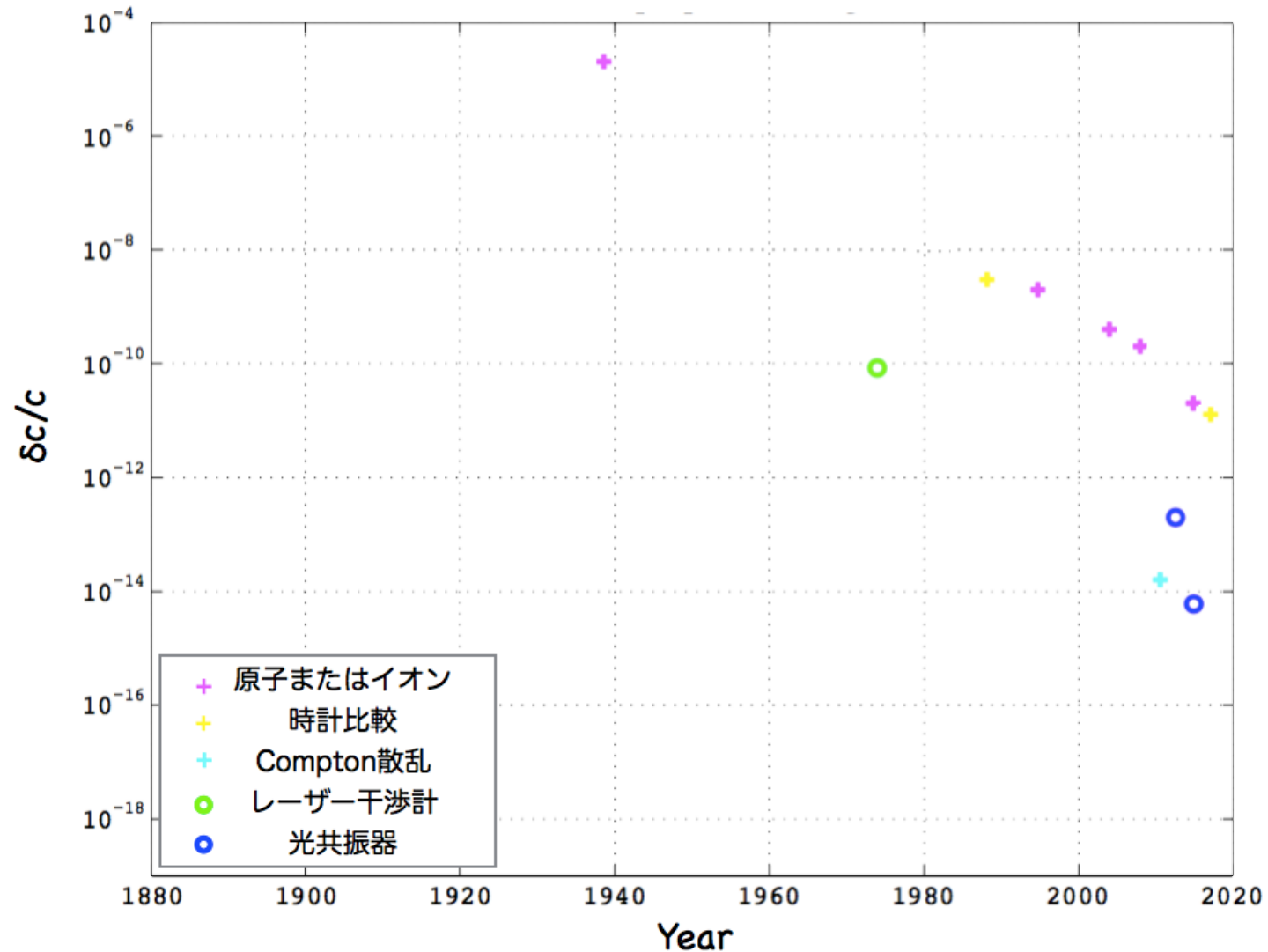
$$\delta c(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \text{Re}[(\bar{y}_l^m)^* Y_l^m(\theta, \phi)]$$



往復光速の異方性探査

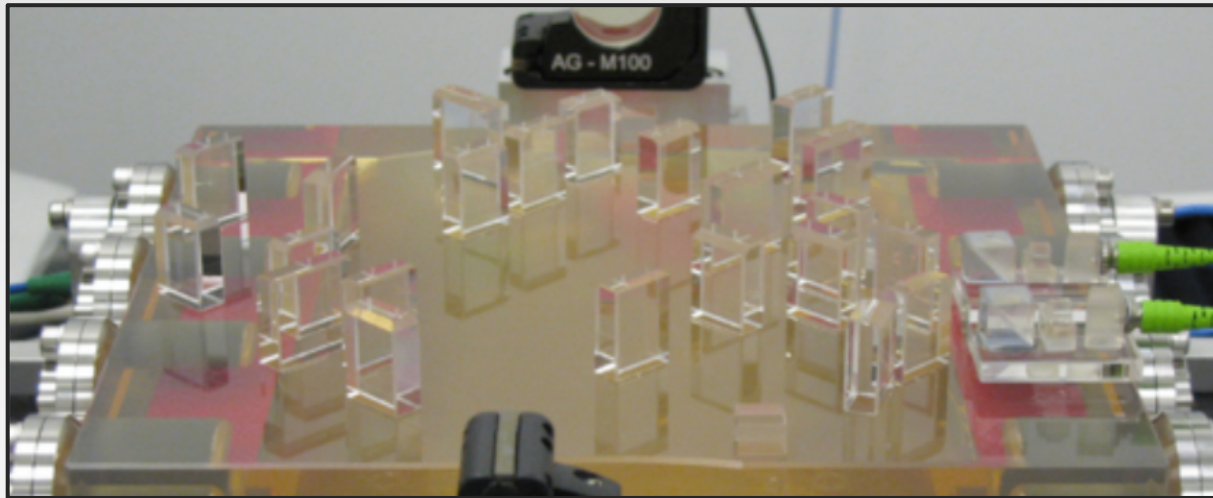


片道光速の異方性探査



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).

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 km/s 、地球の自転の速さ 0.5 km/s)

以下春季学会の磁場の話 (修士論文 補遺E)

A.1. 環境磁場によるノイズ

➤ 「回転による雑音」を低減するための改良

- ① 制御系・光学系の改良
- ② 連続回転の実現

当初、「回転による雑音」は**回転の安定性が原因**だと考えていたため、①と②を改良すれば感度が改善すると考えていた。

➤ しかし、その原因は回転の安定性だけでなく、装置の回転により**環境磁場(地磁気など)**が**雑音になる**ことが判明

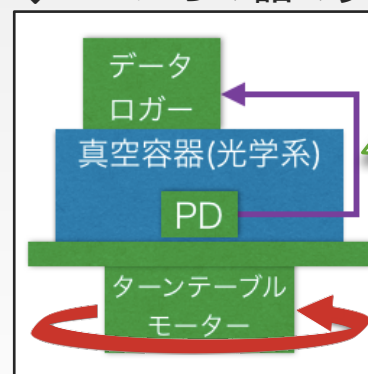


➤ ここからは、

- ③ **環境磁場による雑音の**対処方法の確立

について発表する。

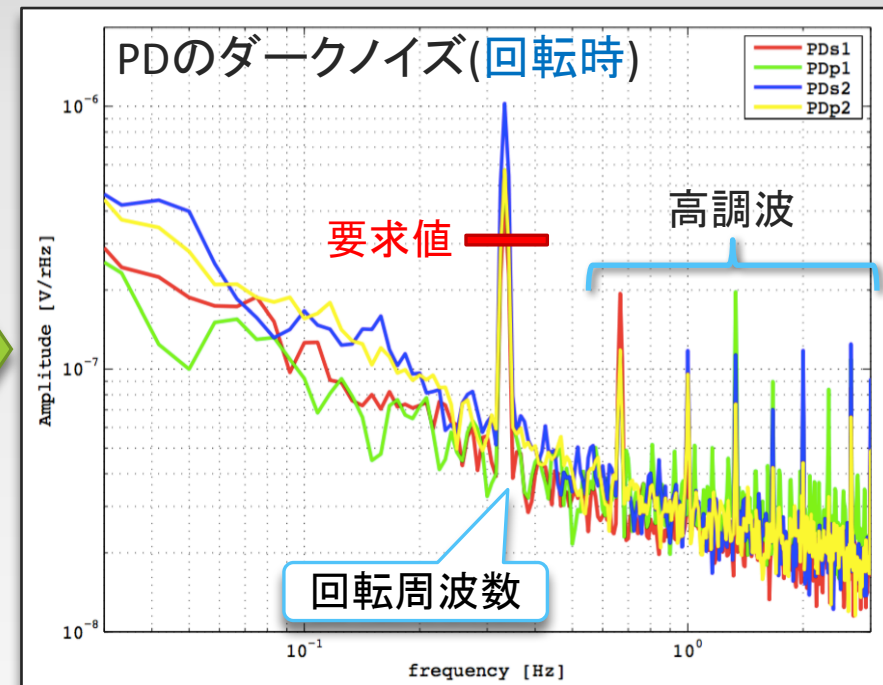
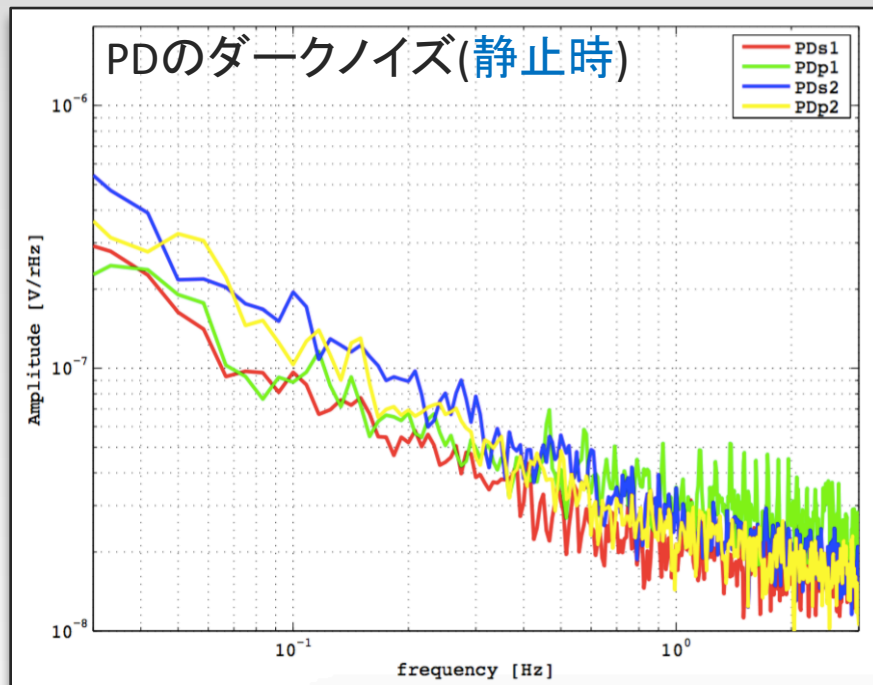
↓ ここからの話の実験セットアップ



PDのダークノイズを測定
(ここからの話ではレーザーは使用しない)

A.2. 回転周波数ノイズ

- 装置を回転させると回転周波数とその高調波にノイズが出る
(装置内にあるPD4つ分をプロット)



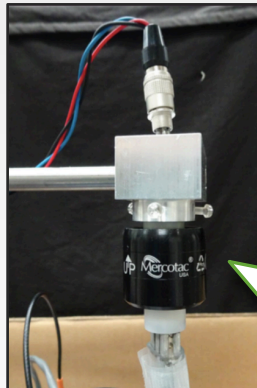
片道光速の異方性信号は回転周波数(とその高調波)に現れる
⇒ これらのノイズの原因を特定し、低減する必要がある

A.3. 回転周波数ノイズの原因 (1/3)

＜原因として考えられたもの＞

①ロータリーコネクタから電源ラインにノイズが入る？

⇒ ロータリーコネクタを使わなくても回転周波数ノイズに変化はないので、**原因ではない**



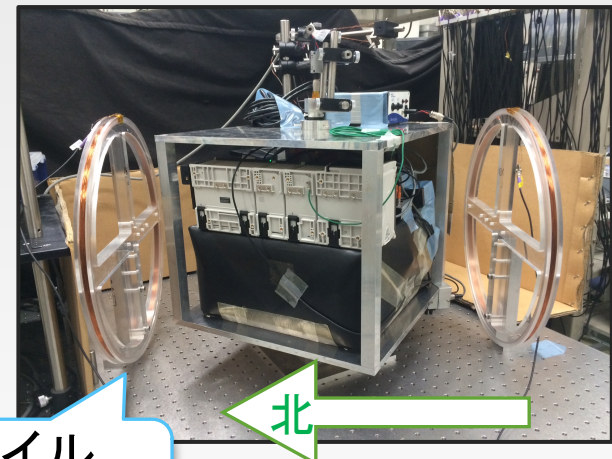
ロータリーコネクタ

外からターンテーブル上に電源を供給

※ **唯一電氣的に外とつながっている**

②環境磁場(地磁気など)の影響？

⇒ これをチェックするために、環境磁場を打ち消す向きにコイルで磁場をかけてみる

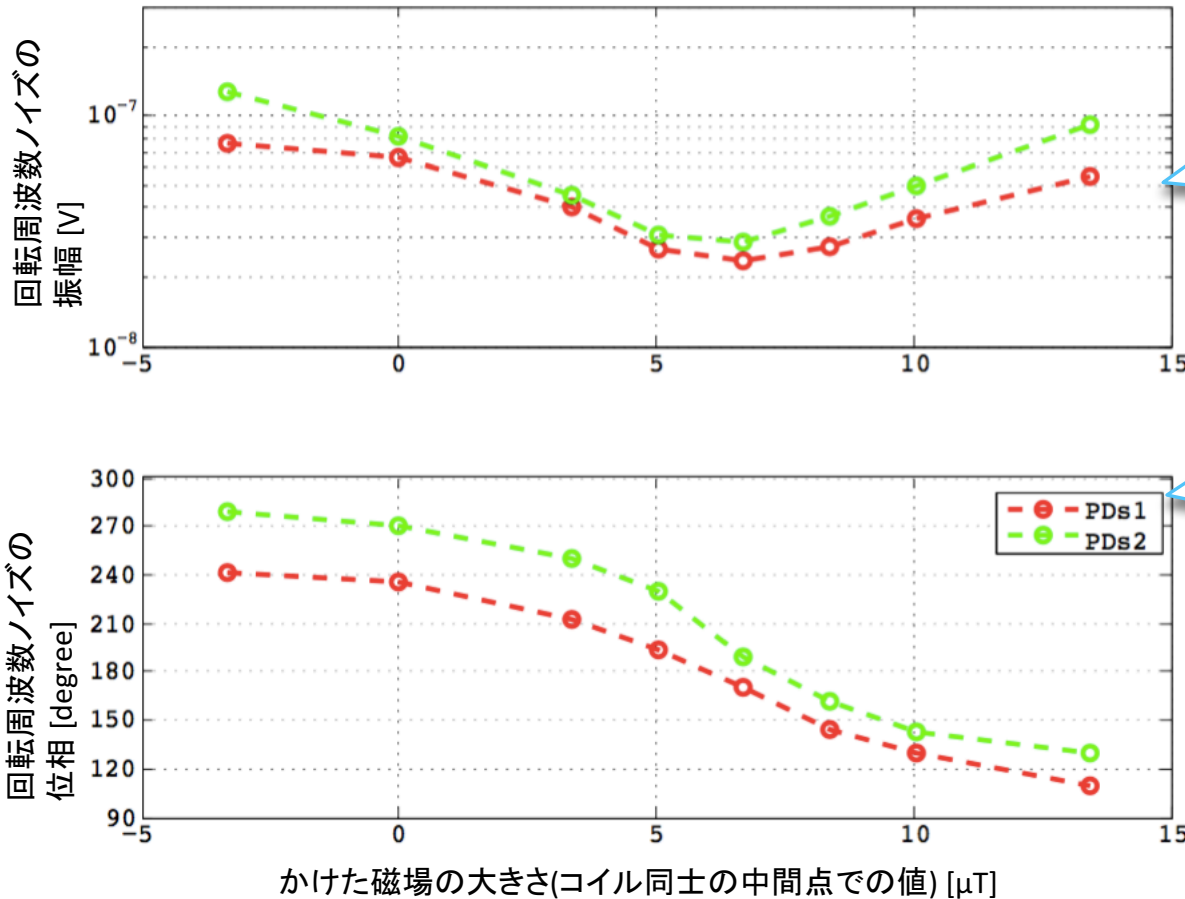


コイル
(直径40cm)

→ **結果は次のページ**

A.3. 回転周波数ノイズの原因 (2/3)

➤ 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

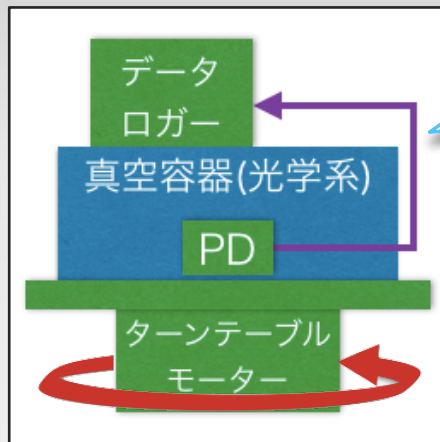
最もよく環境磁場を打ち消す点を境に位相が逆転



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。

A.3. 回転周波数ノイズの原因 (3/3)

➤ どこから環境磁場の影響が入るのか？



PD信号取得用のケーブル

← このケーブルから磁場の影響が入ると考えられる

ケーブルが磁場を横切ると、誘導起電力

$$V = \int_{\text{ケーブル}} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad \text{が生じる。}$$

⇒ 磁場 $\vec{B}$ が一様の場合でも、 $\vec{v}$ が回転するので回転周波数にノイズが生じる。

➤ ノイズの大きさを見積もってみると...

- ・ ケーブルの速さ $v \sim 0.3 \text{ m/s}$
- ・ 環境磁場の大きさ $B \sim 20 \text{ } \mu\text{T}$
- ・ ケーブルの長さ $l \sim 0.3 \text{ m}$
- ・ 同相雑音除去比 1/10



$V \sim 0.2 \text{ } \mu\text{V}$ になり、測定された回転周波数ノイズの振幅と同じオーダーになる。

A.4. 回転周波数ノイズを消す方法 (1/2)

< 方針 >

磁場によるノイズが入ったまま異方性信号を取得・・・ (a)



得られた異方性信号のうち、磁場の寄与を計算・・・ (b)



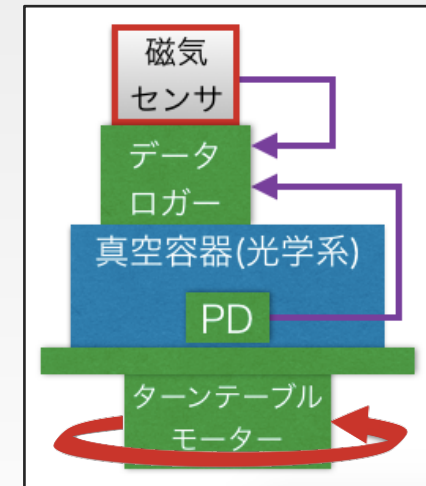
(a) - (b) によって、真の異方性信号を求める

➤ そのための方法

・・・ 磁気センサをターンテーブルにのせる

⇒ 他の装置と一緒に回転させて
2セットの測定を行う。

➡ 予備測定 + 本番



A.4. 回転周波数ノイズを消す方法 (2/2)

1セット目の測定(予備測定)

PDのダークノイズと磁場を同時に測り、磁場から電圧への
伝達関数を求める。



2セット目の測定(本番)

レーザー光を入れて異方性
信号を取得する。同時に磁場
も測定する。

伝達関数 G は、

$$y(t) = x(t) + \hat{G}B(t)$$

ロガーに記録
されるデータ

真のPD
の出力

磁場による寄与

とおくと、 $G(f) = \frac{P_{yB}^*(f)}{P_{BB}(f)}$ で求められる。

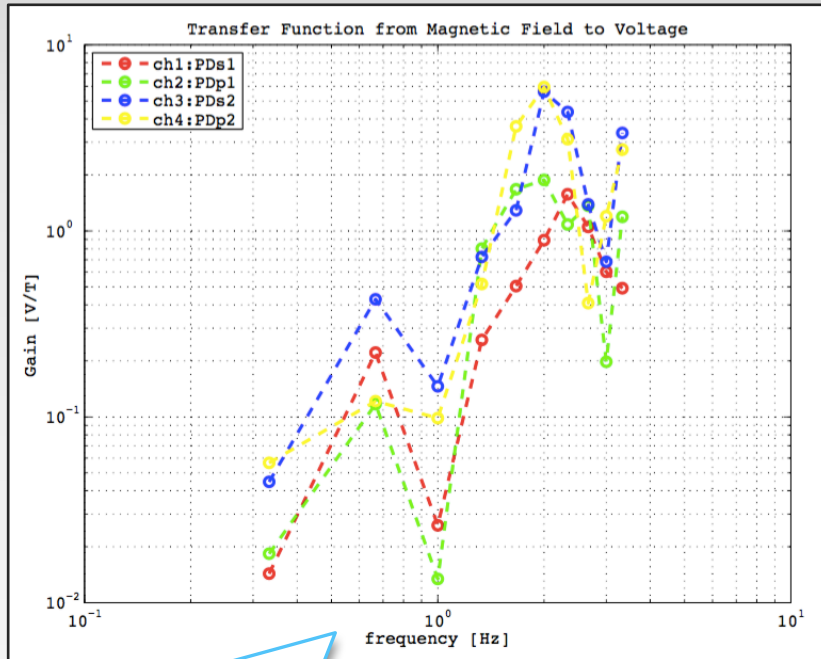
※ 今回は異方性信号ではなく、
2セット目もPDのダークノイズを測定

- 1セット目に求めた伝達関数と2セット目に測定した磁場から、磁場による寄与を求めることができる。

A.5. 計算結果 (1/2)

1セット目(予備測定)の結果

磁場から電圧への伝達関数

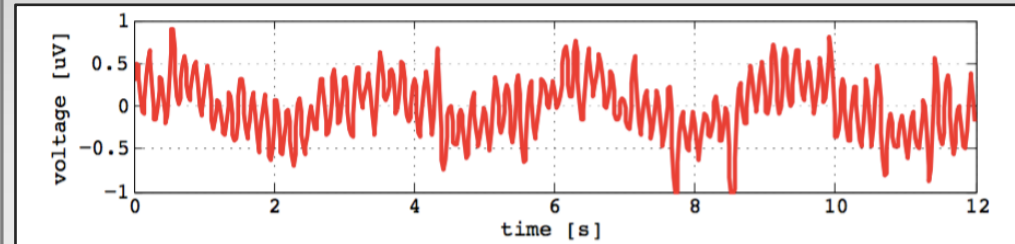


予備測定からデータから

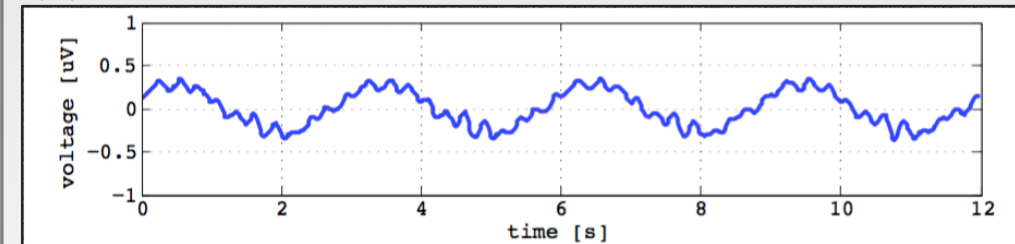
$$G(f) = \frac{P_{yB}^*(f)}{P_{BB}(f)} \text{ により計算}$$

2セット目(本番)の結果

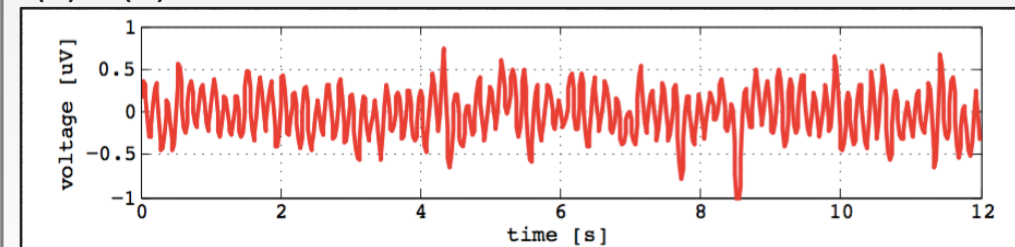
(a) ロガーに記録されたダークノイズの時系列データ



(b) 伝達関数と測定された磁場から計算した磁場の寄与



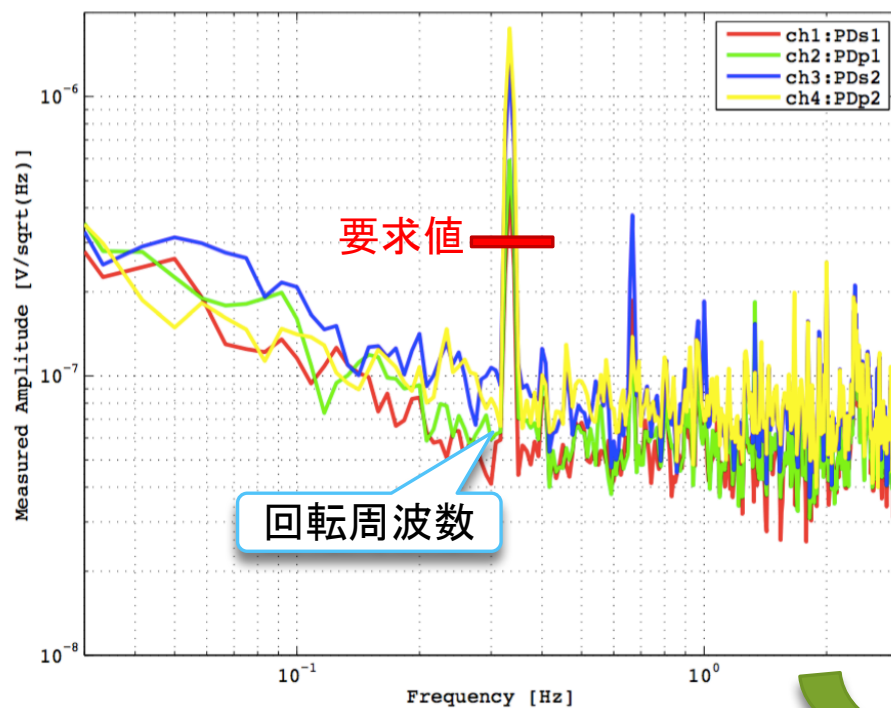
(a) - (b)



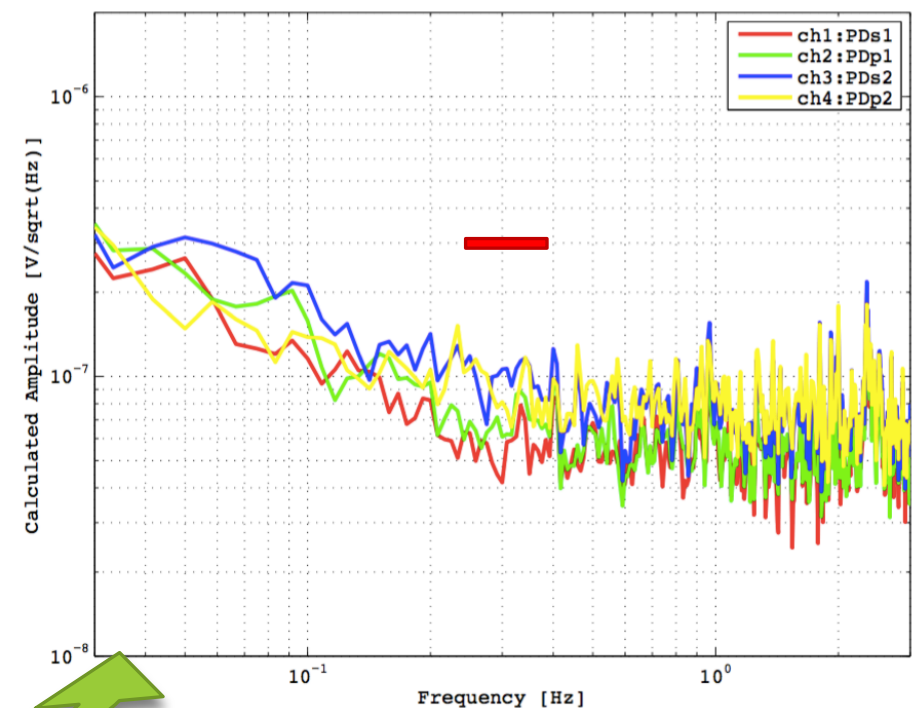
ターンテーブル4周分のデータ

A.5. 計算結果 (2/2)

PDのダークノイズ(回転時の生データ)



PDのダークノイズ(計算結果)



磁場の寄与を引き算

➤ 計算によって磁場の効果をキャンセルすることができる！

コイルで磁場を打ち消さない理由

➤ コイルで直接磁場を打ち消す場合のデメリット

△ 今持っているコイル(直径40cm)では小さすぎる。

- ※ 装置付近で一様な磁場を作るには直径～1.4mのコイルが必要。
- ※ 仮に大きなコイルを準備できても”完全に”一様な磁場はできない。

△ “完全に”一様な磁場を作れたとしても、回転周波数成分のノイズは消せるが、高調波のノイズは消せない。

- ※ 高調波のノイズは磁場の非一様成分で生じる。
- ※ “完全に”一様な磁場は作れないので、むしろ高調波ノイズは増える。

△ 地磁気の時間変化に対応する方法を考えなくてはならない。

伝達関数の導出

$$y(t) = x(t) + \hat{G}B(t) \xrightarrow{\text{フーリエ変換}} X(f) = Y(f) - G(f)B(f)$$

ロガーに記録
されるデータ

PDの
真の出力

地磁気
による寄与

※ 以下では引数は全て f なので省略する。

x のパワースペクトルは、

$$\begin{aligned} P_{xx} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X|^2}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|Y - GB|^2}{T} \\ &= P_{yy} - 2\text{Re}[GP_{yB}] + |G|^2 P_{BB} \end{aligned}$$

これを最小にする伝達関数は、 $G = \frac{P_{yB}^*}{P_{BB}}$

このとき、
$$P_{xx} = P_{yy} - \frac{|P_{yB}|^2}{P_{BB}} = P_{yy}(1 - C_{yB})$$

※ $C_{yB} = \frac{|P_{yB}|^2}{P_{yy}P_{BB}}$: コヒーレンス (0~1の値をとり、相関の程度を表す)

測定された y のパワースペクトルから、磁場 B と相関のある分だけ引いた形になる。

なぜ磁場1成分だけで良いのか？

疑問：磁場は3成分あるので、

$$y(t) = x(t) + \hat{G}_1 B_1(t) + \hat{G}_2 B_2(t) + \hat{G}_3 B_3(t)$$

ロガーに記録
されるデータ

PDの
真の出力

地磁気
による寄与

とすべきでは？

3成分を全て使うとうまいかない理由

磁場を3成分使っても同様にクロススペクトルなどから伝達関数を求める方法はある。

⇒ しかし、回転周波数付近で特に、**磁場の各成分同士の相関が非常に強くなる**。相関が強いと**伝達関数の不定性が大きくなり、正しく伝達関数を求められない**。

⇒ うまく回転周波数ノイズをキャンセルできない。

1成分だけで十分である理由

ターンテーブル付近で**磁場が十分一様とみなせるため**。

⇒ その場合、

- ▶ **水平2成分**は回転周波数で十分に相関がある。
- ▶ **鉛直成分**は回転により変化しない。

⇒ 実質1自由度しかなく、1成分だけ測れば十分である。

なぜ高調波にノイズが生じるのか？

➤ 環境磁場を①②③の成分に分解

①「**時間的に一様**」かつ「**空間的に一様**」な成分
→ 回転周波数にノイズが出る

②「**空間的に一様**」かつ「**周波数 f で時間変化する**」成分
→ 周波数 $|f - f_{\text{rot}}|$, $f + f_{\text{rot}}$ にノイズが出る
※ 磁場がランダムに時間変化する場合ピークにならない

③「**時間的に一様**」かつ「**空間的に $2n$ 重極成分をもつ**」成分
→ 周波数 $(n \pm 1)f_{\text{rot}}$ にノイズが出る
※ n は整数なのでノイズスペクトルにピークを作る
高調波に生じるノイズの原因と考えられる

高調波に生じるノイズの例

➤ 高調波のノイズは磁場の非一様性でできる

(例) 磁場の向きは一樣で、大きさに四重極成分がある場合

- (1) 中心軸の周りを一回転すると、磁場の大きさは $\sin(2\omega_{\text{rot}}t)$ で変化する。
- (2) 慣性系から回転系への座標変換によって(1)に $\sin(\omega_{\text{rot}}t)$ がかけられる。

$$\frac{\sin(2\omega_{\text{rot}}t)}{(1) \text{ 非一様性の寄与}} \times \frac{\sin(\omega_{\text{rot}}t)}{(2) \text{ 回転の寄与}}$$

回転周波数と3倍波成分が生じる

