異方性実験の現状

安東研中間報告会 2017

酒井　譲

東京大学 大学院理学系研究科

物理学専攻 修士２年

目次

1. 異方性実験について
2. これまでの成果と課題
3. 今後やること

目次

1. 異方性実験について
   実験の目的、光速の異方性、測定原理
2. これまでの成果と課題
3. 今後やること

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
・・・真空における光速はどの慣性系でも、伝搬方向や光源の速度によらず一定である。

2) 特殊相対性原理
・・・物理法則はどの慣性系でも、同じ形で成立する。

⇒ 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

Lorentz不変性は本当に正しいのか？

- いくつかの研究から、Lorentz不変性が破れている可能性が示唆されている。

量子重力理論からの示唆

あるエネルーギースケールではLorentz不変性が破れている可能性がある

CMB観測からの示唆

CMB異方性の双極子成分がゼロになるCMB静止系が存在する

↓

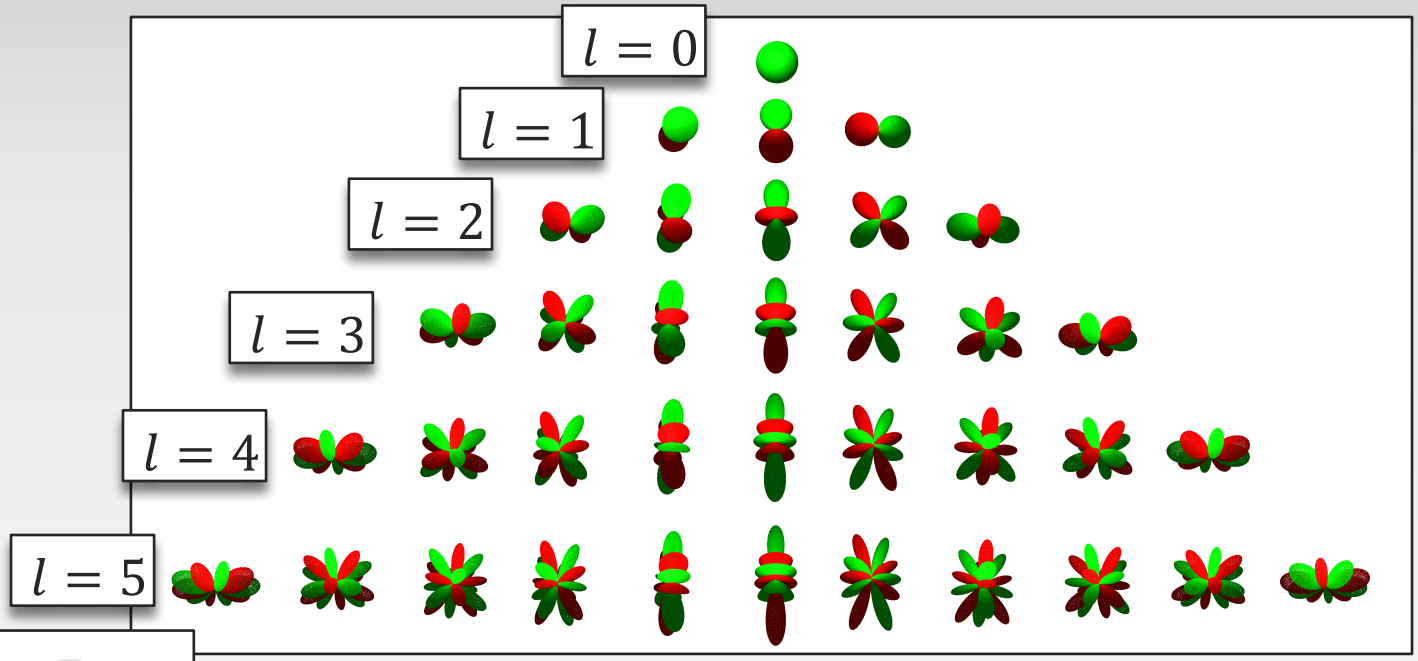
実験的な検証が必要

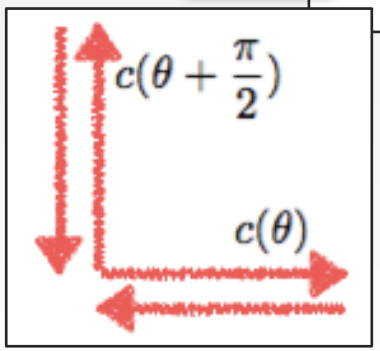
↓

光子のLorentz不変性 (= 光速の異方性) を測定する

光速の異方性

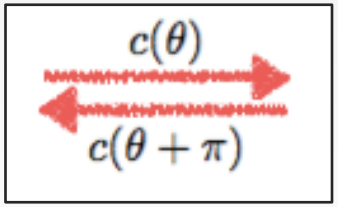
- 光速の異方性は球面調和関数で展開できる。





$l = 2,4,6, \ldots$

往復光速の異方性
(行き帰りで同符号)

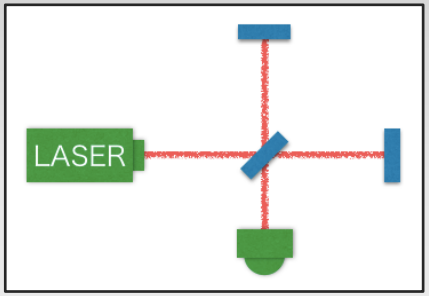


$l = 1,3,5, \ldots$

片道光速の異方性
(行き帰りで逆符号)

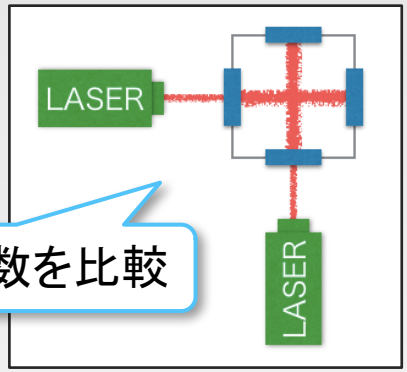
先行研究

往復光速の異方性検証



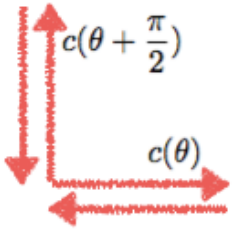
Michelson干渉計

直交する
Fabry-Perot共振器



共振周波数を比較

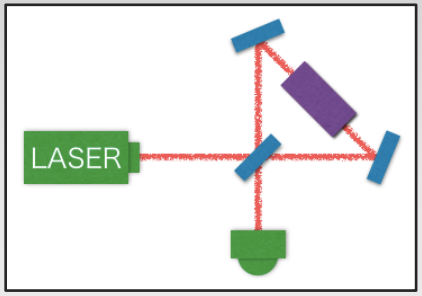
往復光速の異方性 (even-parity)



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

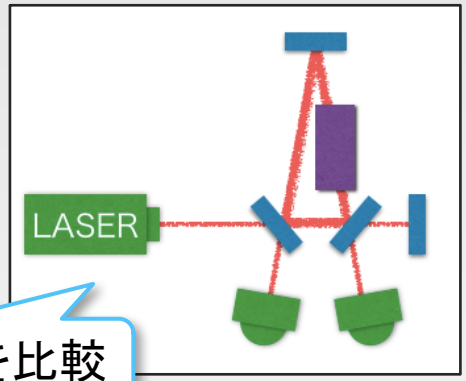
M. Nagel et al. (2015)

片道光速の異方性検証



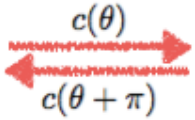
Sagnac干渉計

リング共振器



共振周波数を比較

片道光速の異方性 (odd-parity)



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

Y. Michimura et al. (2013)

異方性実験の目的まとめ

＜目的＞

「Lorentz不変性」を検証したい

↑

光子のLorentz不変性 (= 光速の異方性) を測定する

↑

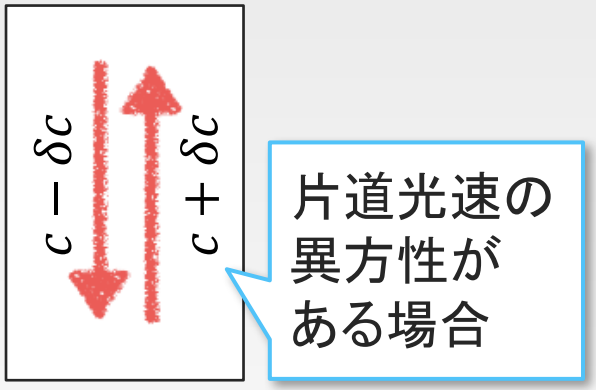
特に、往復光速よりも制限の弱い片道光速の異方性を探査する

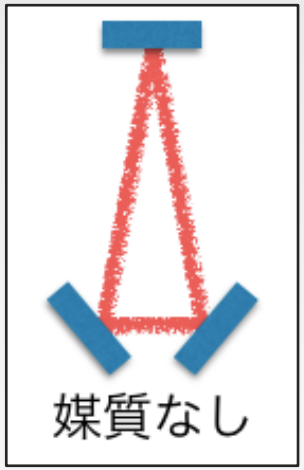
- 道村さんの実験の感度 $\delta c/c \sim 6\times10^{-15}$ を超えて世界最高感度を更新すべく装置を改良中
- 往復光速の感度レベル $\delta c/c \sim 1\times10^{-18}$ に少しでも近づきたい

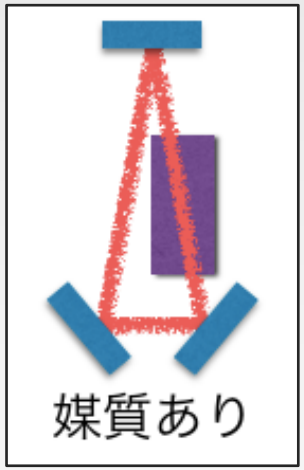
片道光速の異方性測定の原理 (1/2)

- 光路の一部に媒質を入れた非対称光リング共振器
- 片道光速の異方性があれば、時計回りと反時計回りで共振周波数がずれる。

  ⇒両周りの共振周波数の差 $\nu_{\mathrm{L}} - \nu_{\mathrm{R}}$ を測定すれば良い。

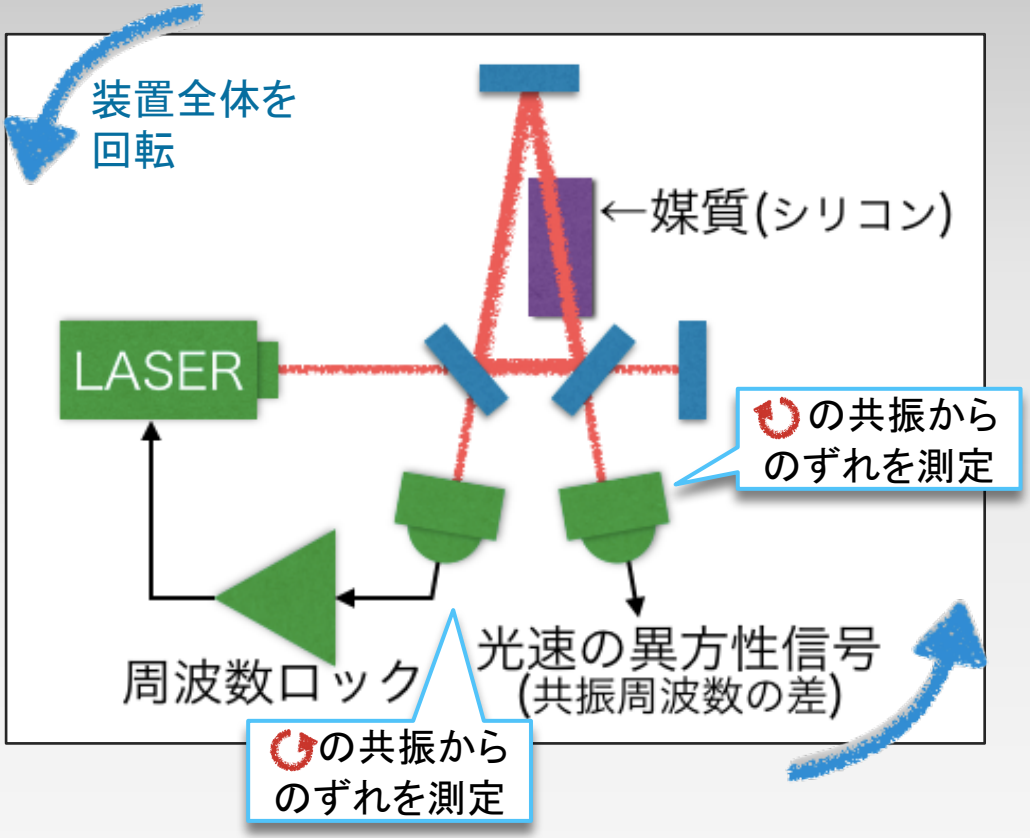






反時計回りの共振周波数	$\nu_{\mathrm{L}} = \nu_0$	$\nu_{\mathrm{L}} = \nu_0' + \delta\nu$
時計回りの共振周波数	$\nu_{\mathrm{R}} = \nu_0$	$\nu_{\mathrm{R}} = \nu_0' - \delta\nu$

片道光速の異方性測定の原理 (2/2)



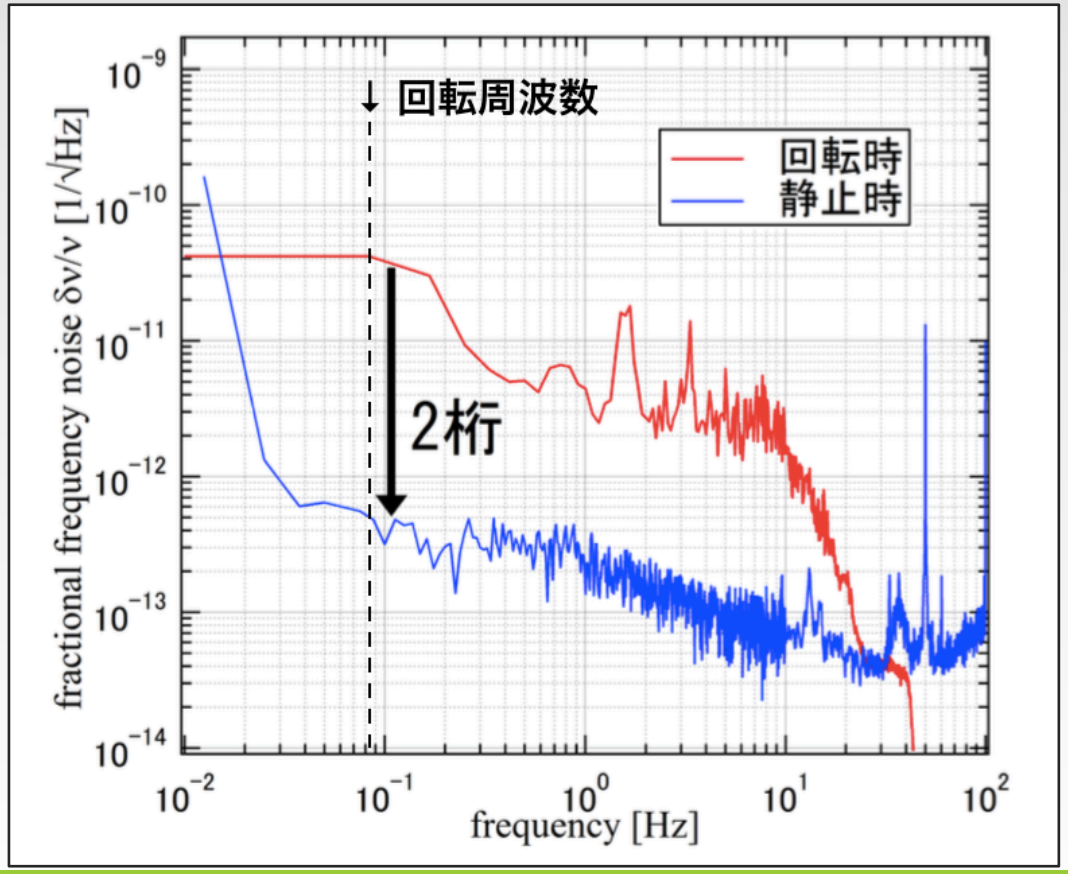
- 反時計回りの光
  → 共振状態にロック
- 時計回りの光
  →「共振からのずれ」を測定
  ||
  両周りの共振周波数の差
  ||
  片道光速の異方性信号

- 装置全体を回転させて、異方性信号に変調をかける。

⇒ 2重極成分($l = 1$)は回転周波数、高次モード($l = 3,5, \ldots$)は回転周波数の高調波に信号が現れる。

先行研究の感度を制限したノイズ源

- 片道光速で世界最高精度 $\frac{\delta c}{c} \lesssim 6\times10^{-15}$ を達成
- 主なノイズ源は**回転による雑音**(回転の安定性が悪い？ 振動？)



＜目 標＞
回転によるノイズを静止時のレベルまで下げる

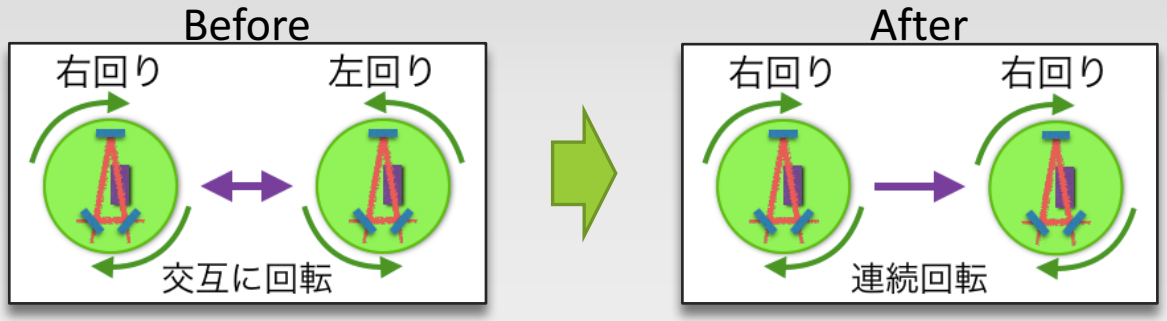
2桁感度上昇！

目次

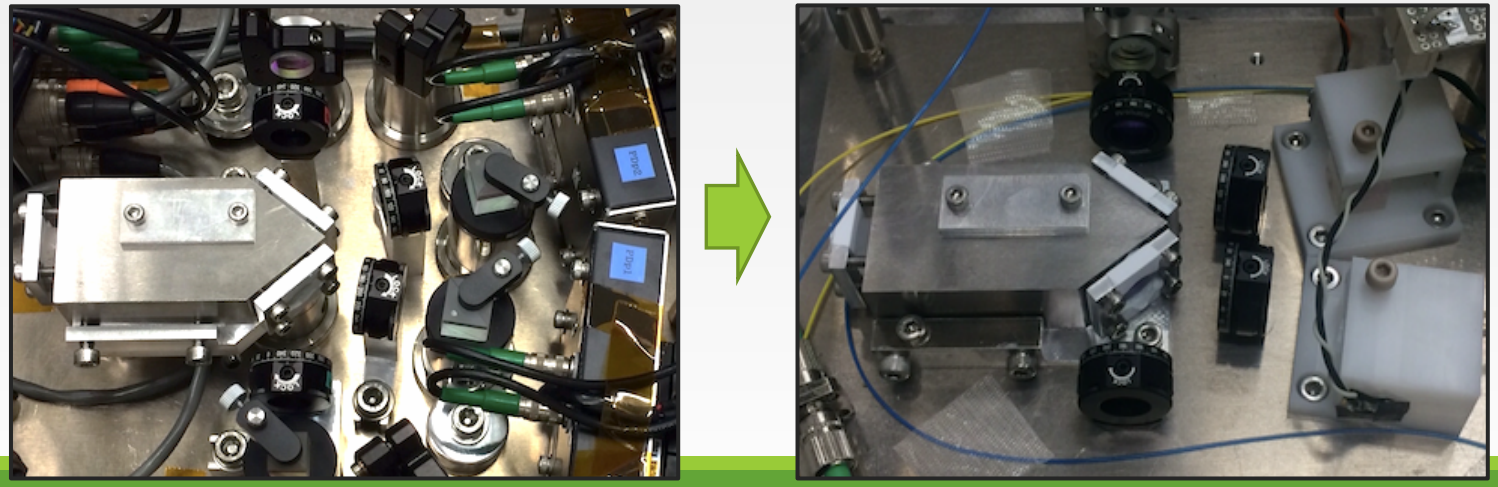
1. 異方性実験について
2. これまでの成果と課題
   連続回転の実現、回転周波数ノイズ
   環境磁場カップリング、制御用回路の改良
3. 今後やること

感度向上のための改良

- 回転による雑音を減らすために行った改良
  - 連続回転の実現 (振動そのものを減らす)

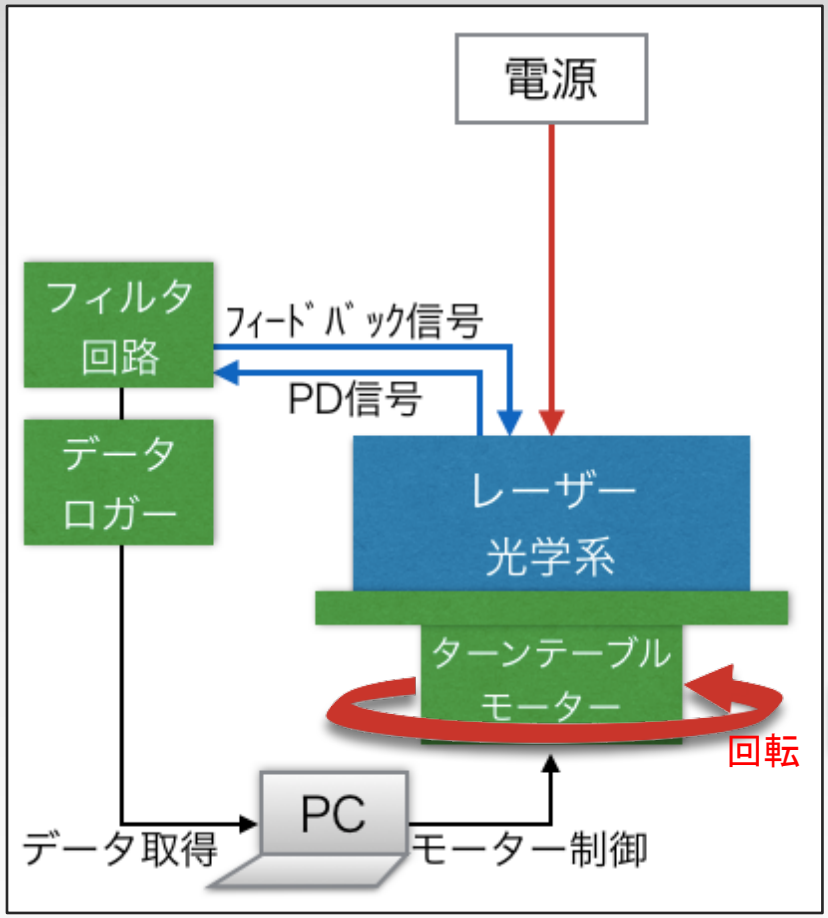


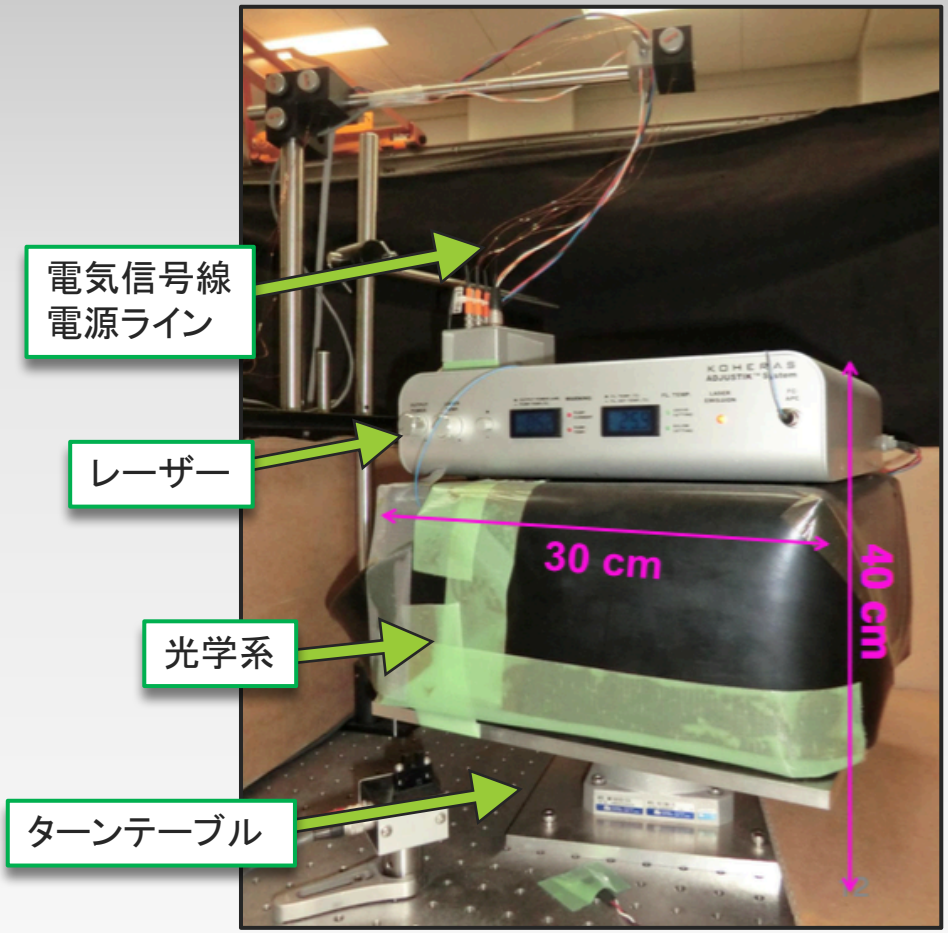
  - 光学系のセミモノリシック化 (振動感度を減らす)



連続回転実現のための改良 (1/2)

先行研究で使っていた装置

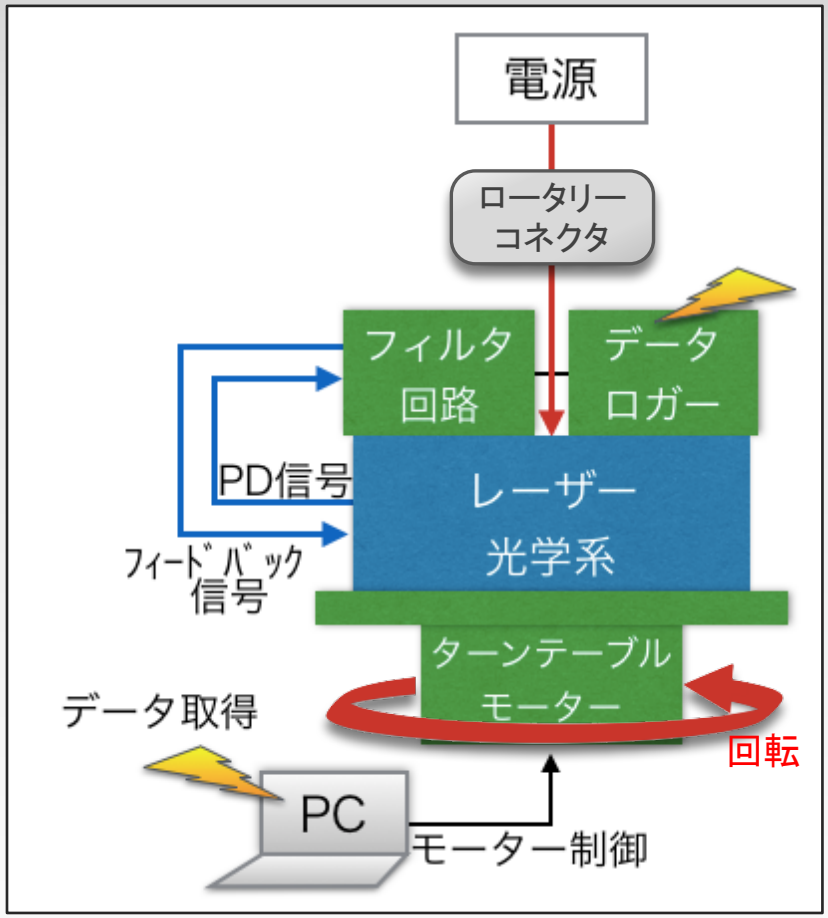




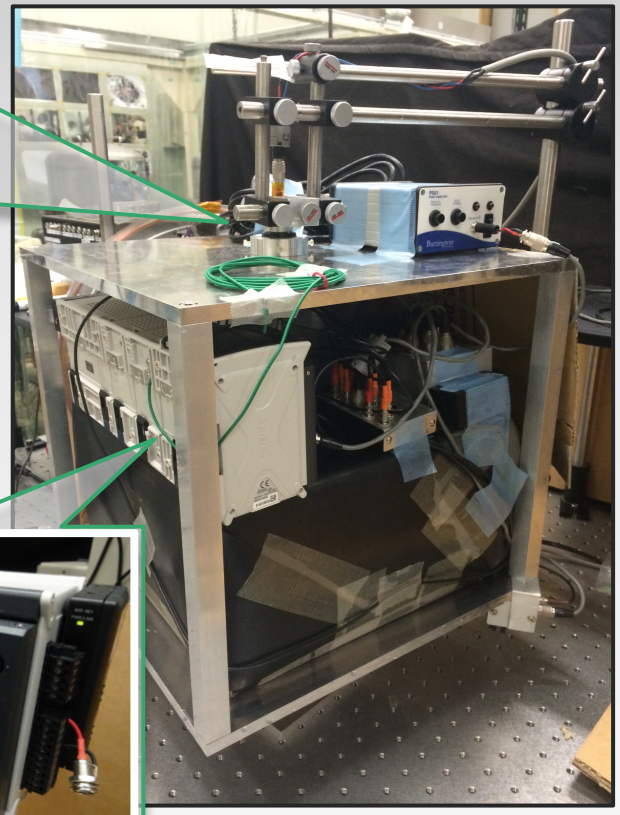
⇒ 配線上の問題により、連続回転できなかった

連続回転実現のための改良 (2/2)

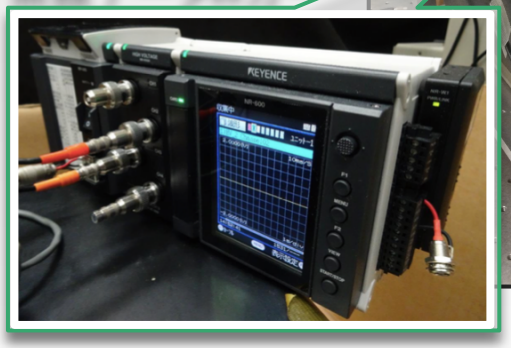
現在開発を進めている装置



ロータリーコネクタ



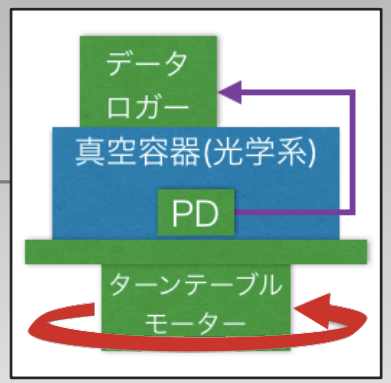
無線データロガー



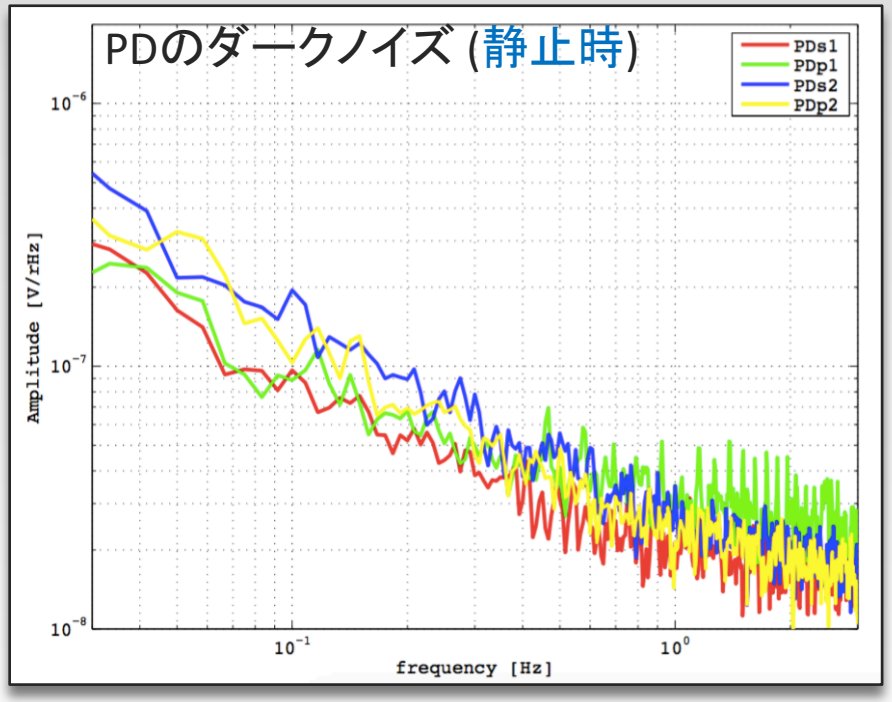
⇒ **連続回転を実現**

(回転の安定性向上による感度向上に期待)

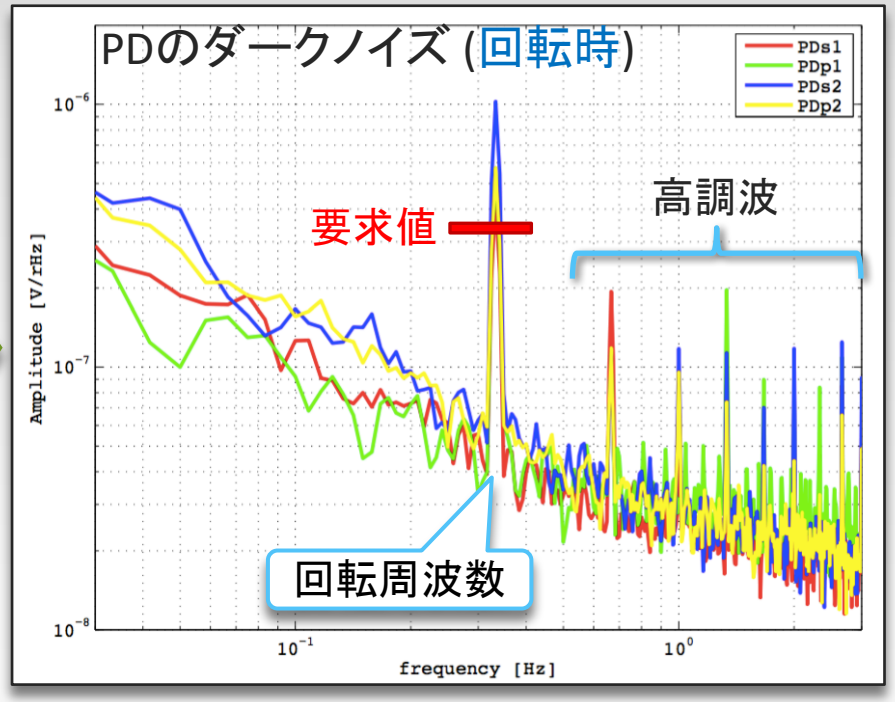
回転周波数に生じるノイズ (1/3)



- 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)



回転



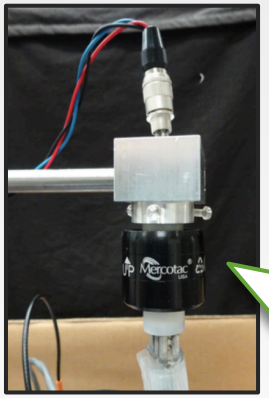
片道光速の異方性信号は回転周波数(とその高調波)に現れる
⇒ これらのノイズの原因を特定し、低減する必要がある

回転周波数に生じるノイズ (2/3)

＜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



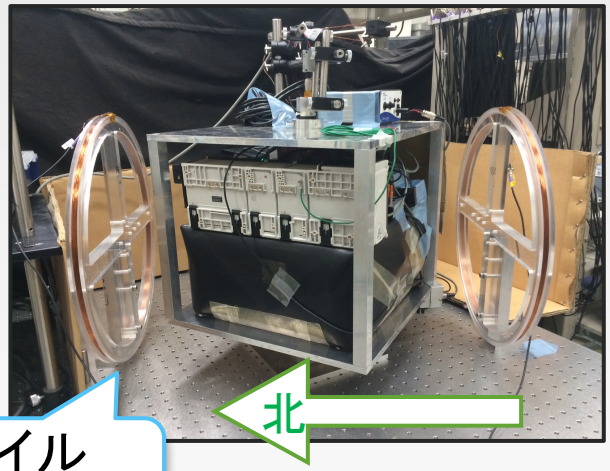
ロータリーコネクタ

外からターンテーブル上に電源を供給

※ 唯一電気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

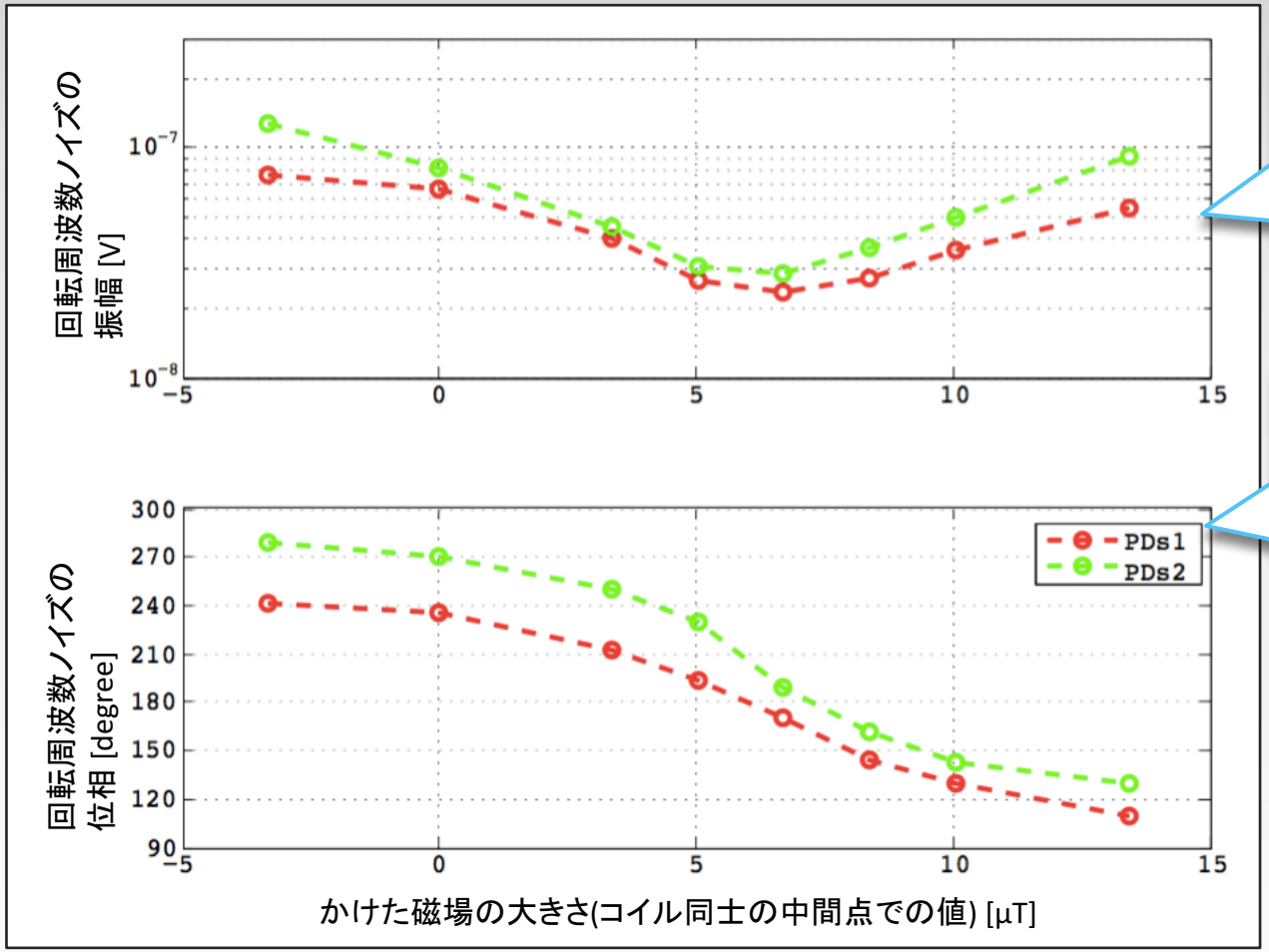


コイル
(直径40cm)

→ 結果は次のページ

回転周波数に生じるノイズ (3/3)

➢ 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



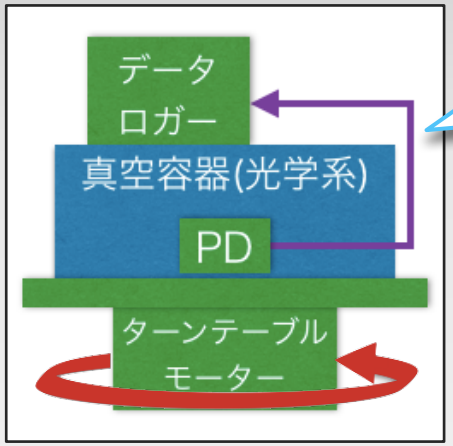
環境磁場と同程度の磁場をかけたときにノイズは最小

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。

環境磁場とのカップリング

- 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

$$V = \int_{\text{ケーブル}} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$ 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 $v \sim 0.3$ m/s
  - 環境磁場の大きさ $B \sim 20$ μT
  - ケーブルの長さ $l \sim 0.3$ m
  - 同相雑音除去比 1/10

⇒ $V \sim 0.2$ μV 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。

磁場の寄与を打ち消す方法

- コイルで打ち消せる？
  - △ 実験室にあるコイルでは小さすぎる。
  - △ コイルで一様な磁場を作れても、元の環境磁場があまり一様でないため高調波のノイズは消えない。

⇒ 別の方法を考える必要がある。

- 方針：磁場の寄与を計算で求めて後から引く

磁場によるノイズが入ったまま異方性信号を取得 ・・・ (a)

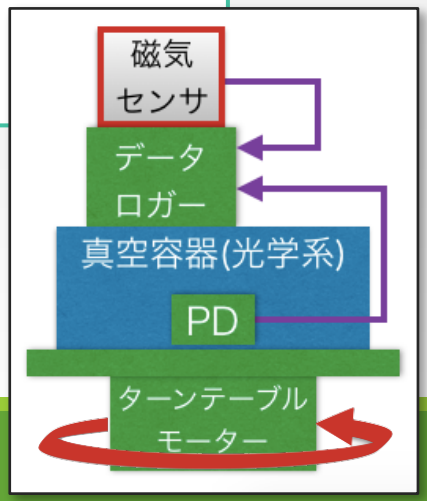
↓

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

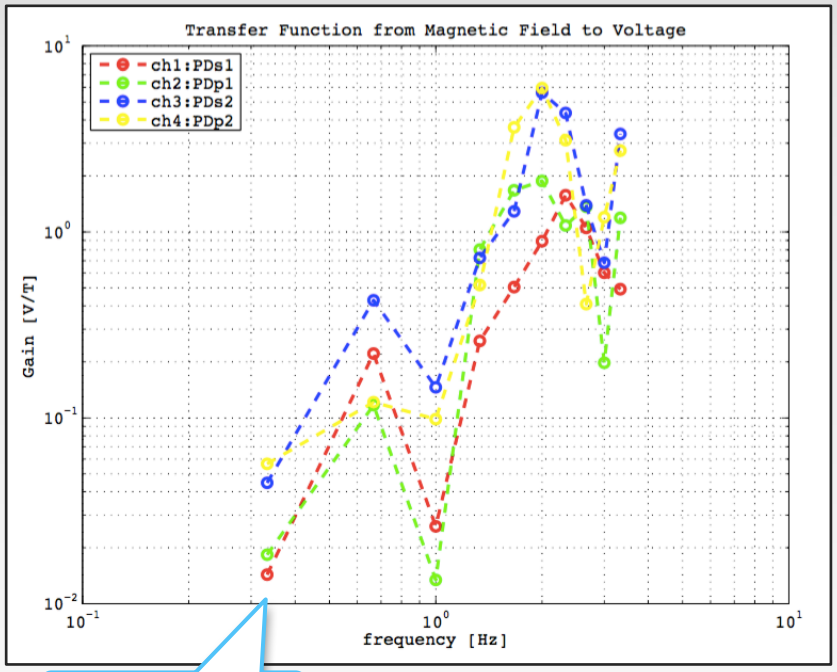
- 方法：磁気センサをターンテーブルにのせ、他の装置と一緒に回転さながら2回の測定 (磁場→ノイズの伝達関数測定と本番の測定) を行う。



計算結果 (1/2)

伝達関数測定の結果

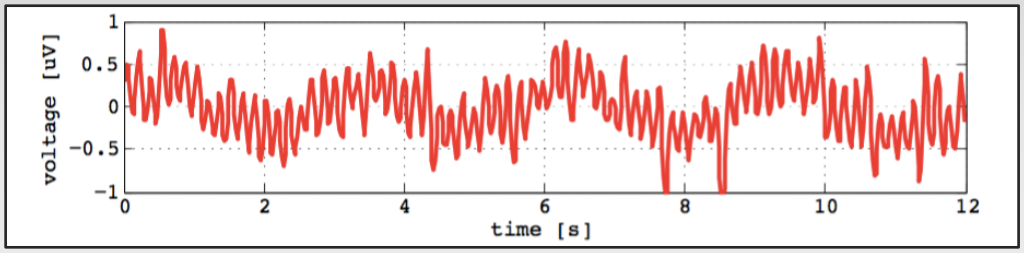
磁場から電圧への伝達関数
(装置内のPD4つ分のデータをプロット)



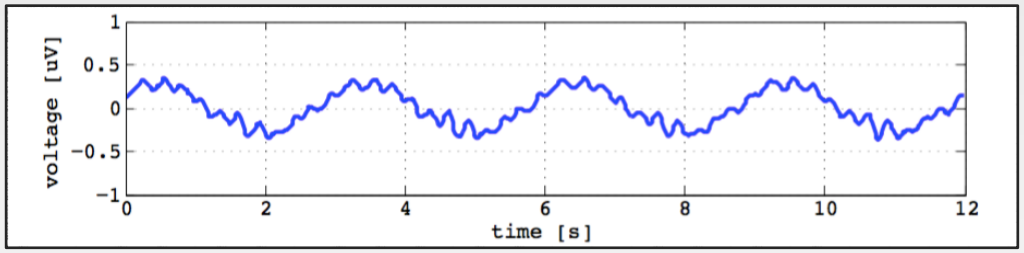
回転周波数

本当に磁場の寄与を消せるか？

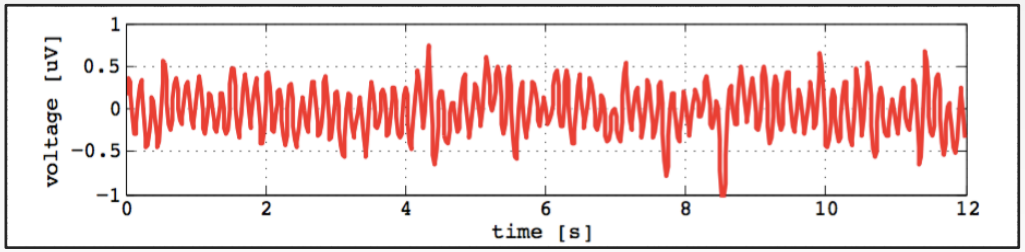
(a) ロガーに記録されたダークノイズの時系列データ



(b) 伝達関数と測定された磁場から計算した磁場の寄与



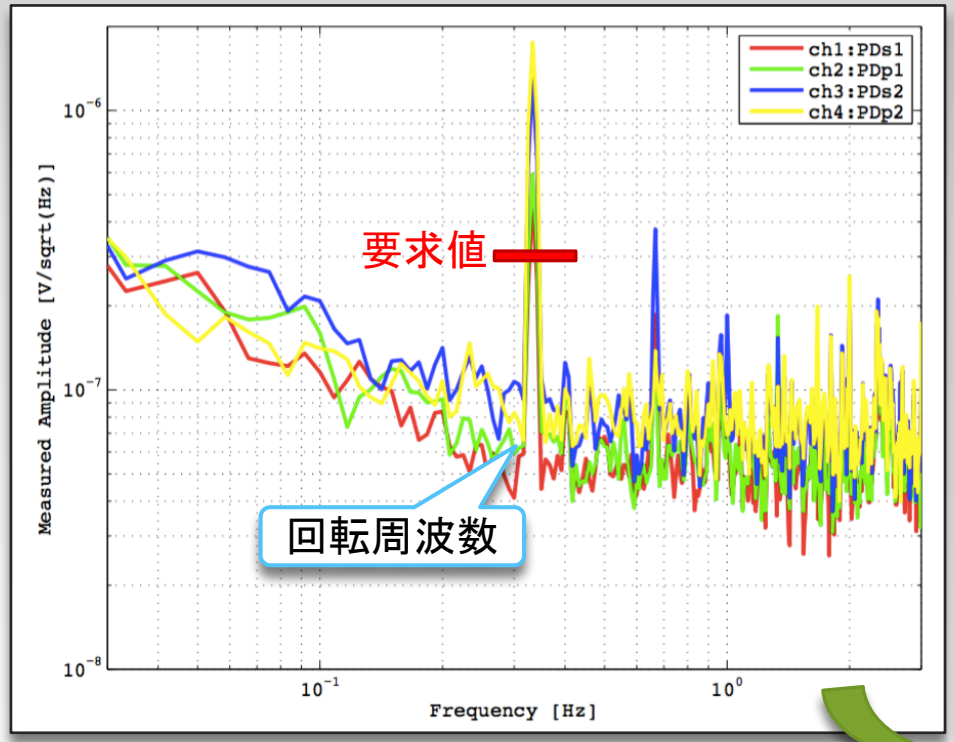
(a) – (b)



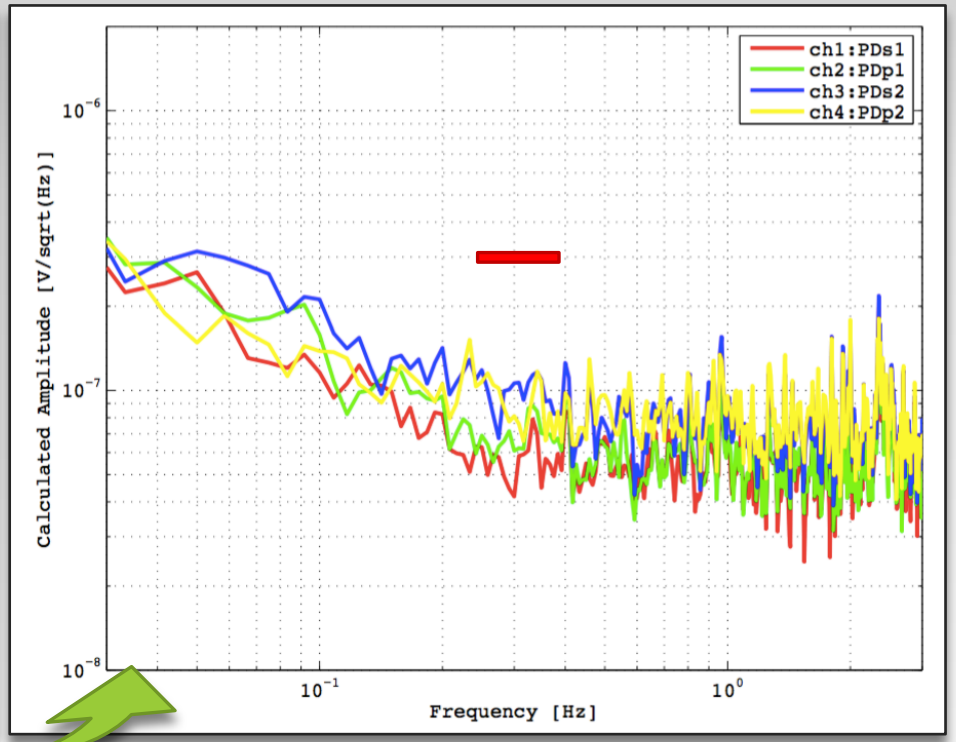
ターンテーブル4周分のデータ

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！

磁場対策についての課題

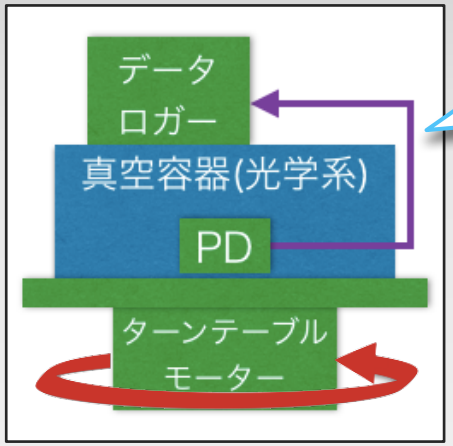
- 磁場とのカップリングによりPDの出力が 0.1 μV ゆれる。
  ⇒ 光速の異方性になおすと $\delta c/c \sim 10^{-14}$ に対応。
- 前述の方法で磁場対策をして、$\delta c/c \sim 10^{-14}$ より小さな異方性が見つかった場合、本当に異方性だと断言できるか？
  --- 磁場のカップリングが変わって磁場ノイズが消えないだけかも？

計算でキャンセルできたとしても、
できる限り磁場とのカップリングは小さい方が良い。

- カップリングを減らすためには…
  - ケーブルが磁場を横切らないようにする。
  - 同相雑音除去を効かせる。
  - (環境磁場そのものを打ち消す。)

環境磁場とのカップリング (再掲)

- 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

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

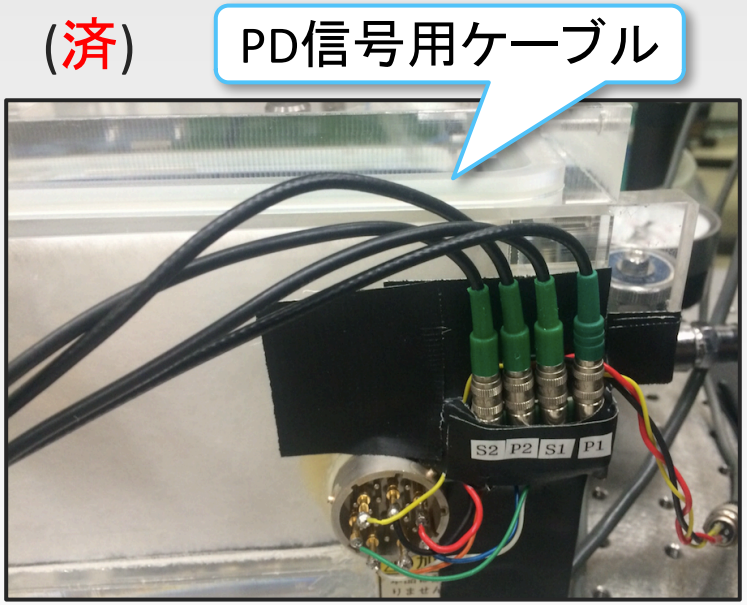
- ノイズの大きさを見積もってみると…
  - ケーブルの速さ $v \sim 0.3$ m/s
  - 環境磁場の大きさ $B \sim 20$ μT
  - ケーブルの長さ $l \sim 0.3$ m
  - 同相雑音除去比 1/10

⇒ $V \sim 0.2$ μV 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。

磁場カップリングを減らすための改良

- ケーブルが磁場を横切らないようにするための改良
  - PD信号用のケーブルが回転の中心軸上を通るようにする
    ⇒ 真空容器を再設計するときに一緒に改良予定

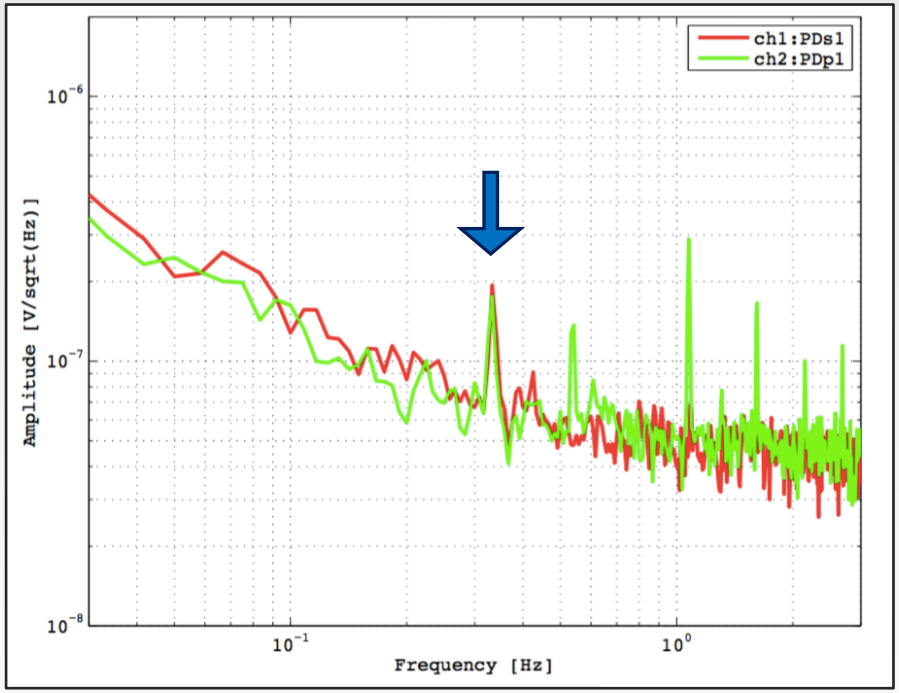
- 同相雑音除去を聞かせるための改良
  - PD信号用のケーブルを同軸にする (済)
    ⇒ 新しい真空容器ではもう少し
    なんとかしたい。
  - PD信号を受ける回路を改良 (済)
    ⇒ 次のページ以降で説明



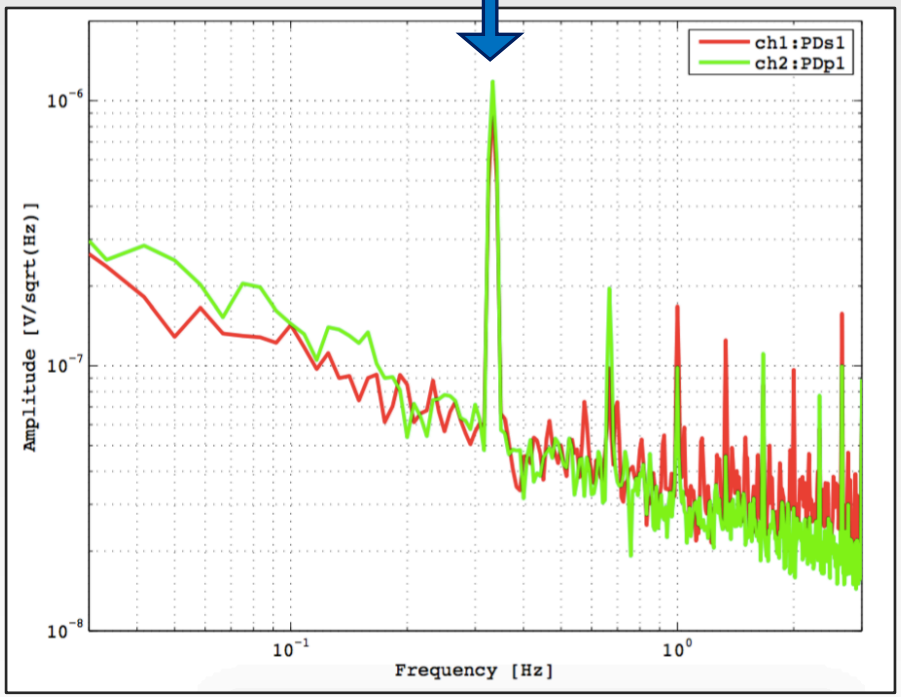
回路によりカップリングが増える謎 (1/2)

- 回転周波数ノイズの原因を探っているとき、
  「アンプをはさむと回転周波数ノイズが大きくなる」
  という問題があった。

装置を回転させてPDのダークノイズを測定



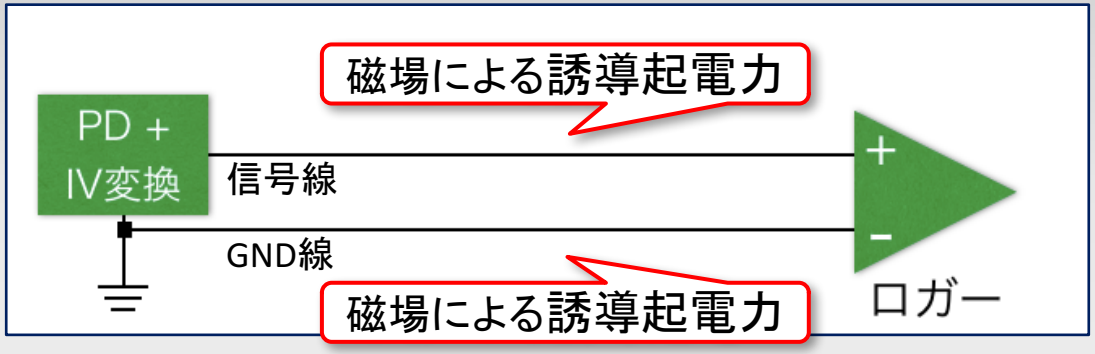
回転台上で「PD → ロガー」



回転台上で「PD → アンプ(-10倍) → ロガー」

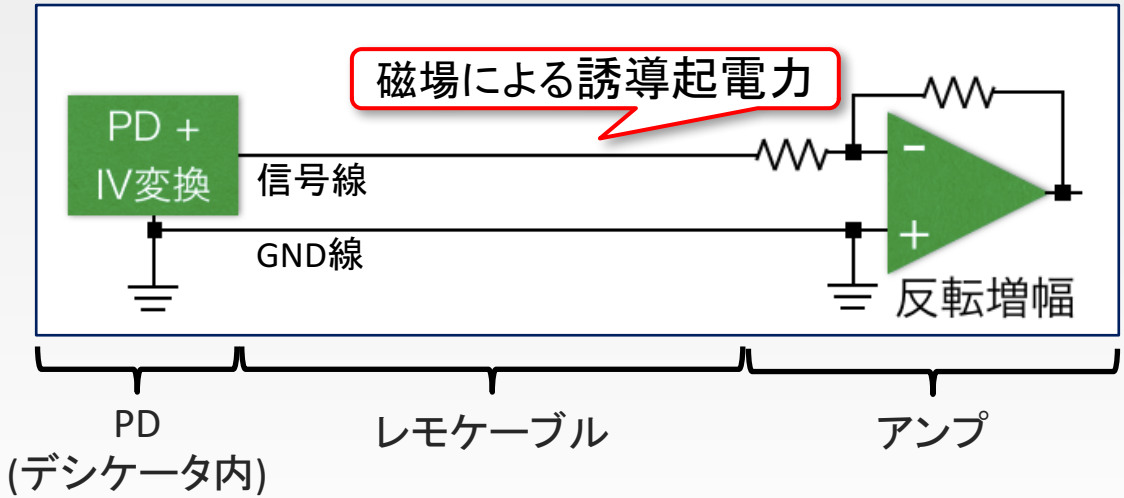
回路によりカップリングが増える謎 (2/2)

➢ PDの出力をロガーで受けた場合



信号線とGND線で
同相雑音除去が効き、
回転周波数のノイズは
小さくなる。

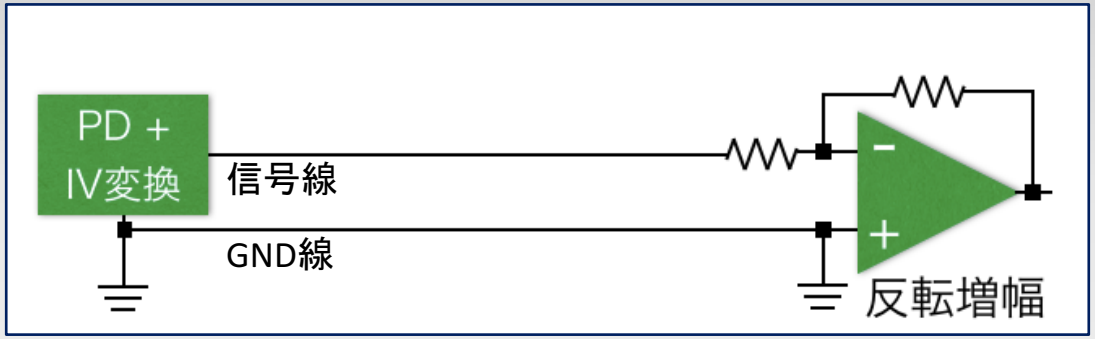
➢ PDの出力をアンプで増幅した場合



GND線がアンプのGND
に接続されているため、
同相雑音除去が効かず
回転周波数ノイズは
大きくなる。

制御用回路の入力部の改良

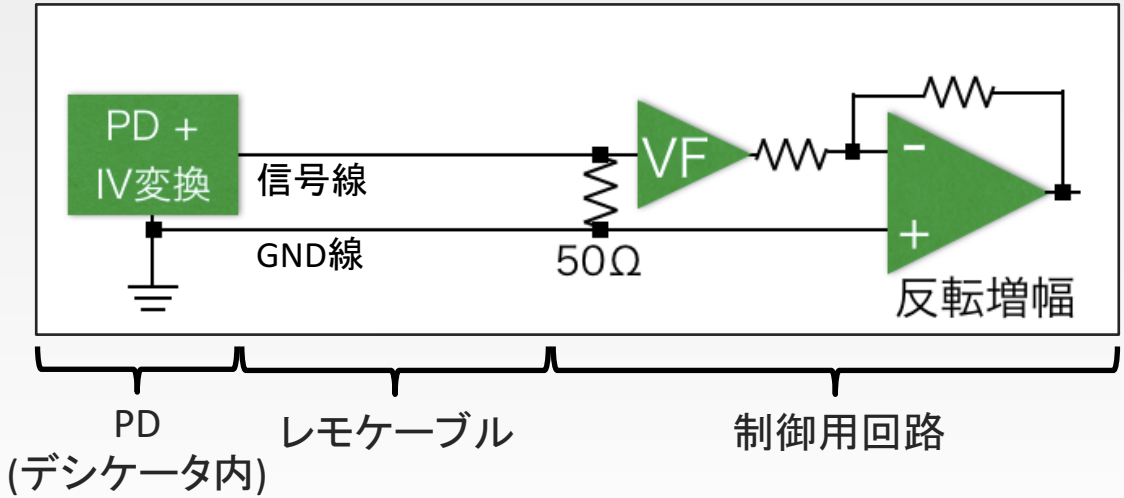
➢ Before



実際にPD信号を受ける制御用回路も初段が反転増幅だった

PD信号のGND線を回路のGNDから浮かせる

➢ After

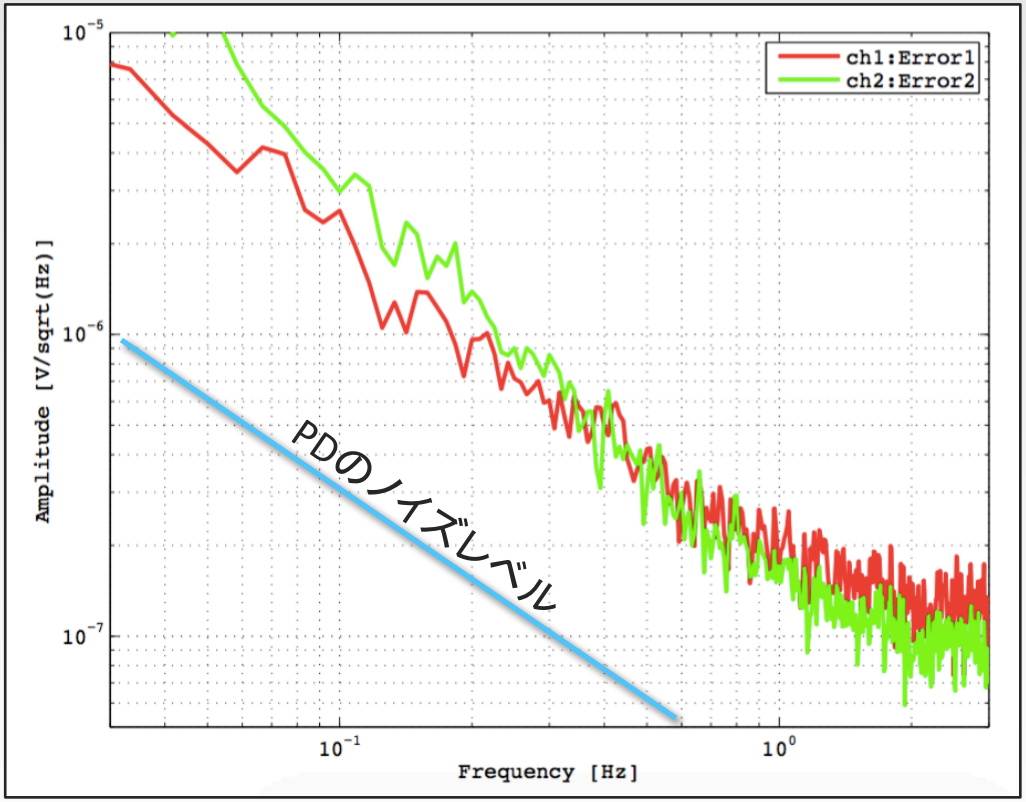


ボルテージフォロア
・・・ 電流を一方通行にしないため

50 Ω 終端抵抗
・・・ 反射防止用

改良した回路のノイズレベル

- 改良した点 ・・・ 入力部の修正、オフセット回路の修正(安定化)、その他細かい点の修正
- ノイズレベル ・・・ 改良前とほぼ変わらず (PDよりも高い)



このままだと全体の感度を制限してしまいそうなので、PDレベルまで下げたい。

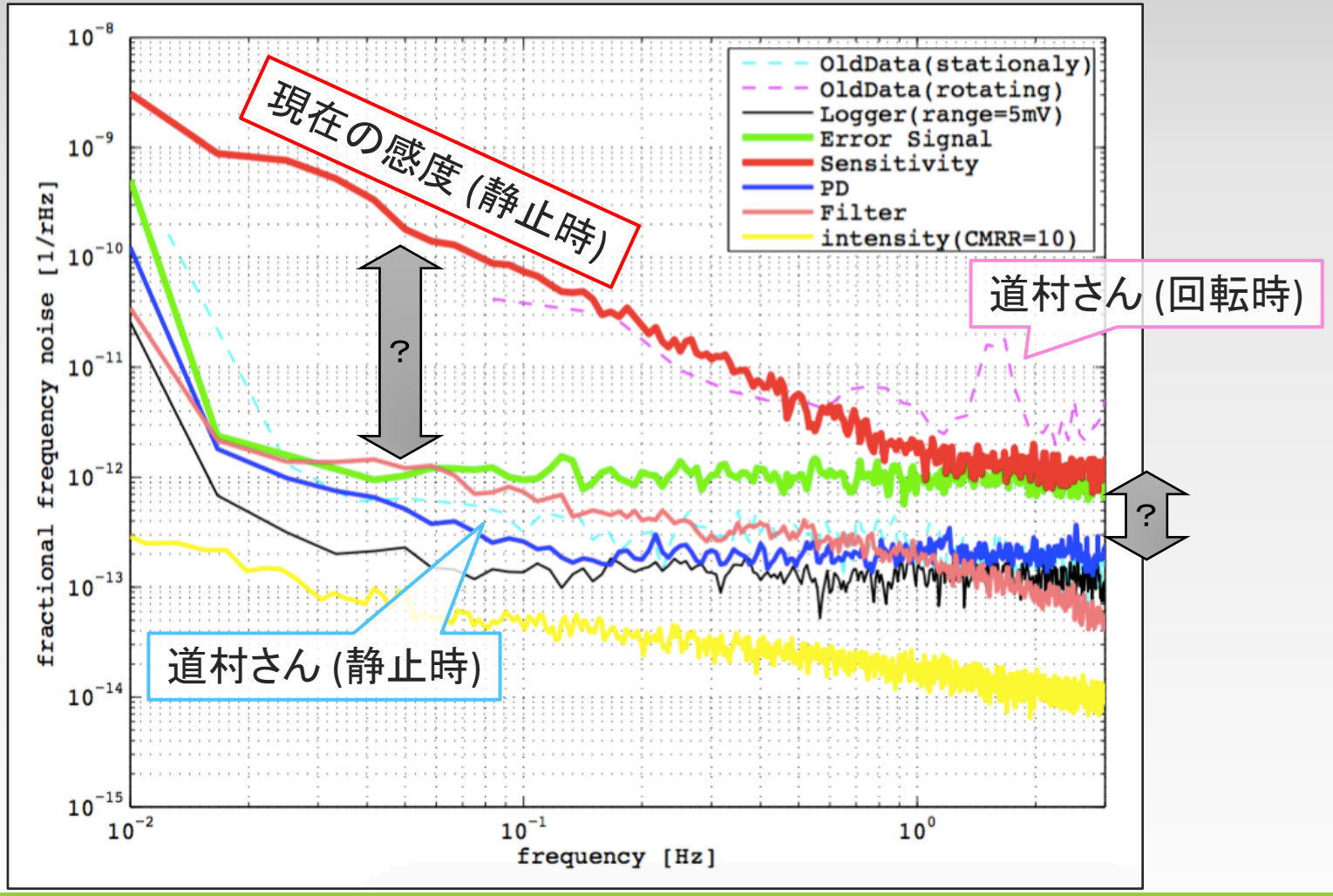
※現在回路のノイズはオペアンプのノイズで決まっているので、オペアンプを選び直す必要があるかも。

目次

1. 異方性実験について
2. これまでの成果と課題
3. 今後やること
   真空、光学系の改良、回転周波数

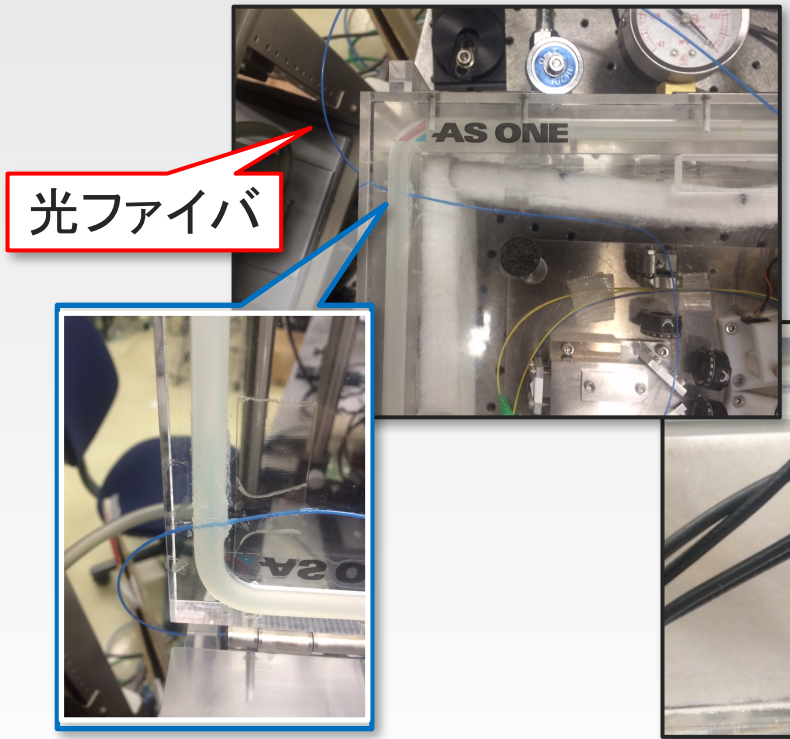
現在の感度

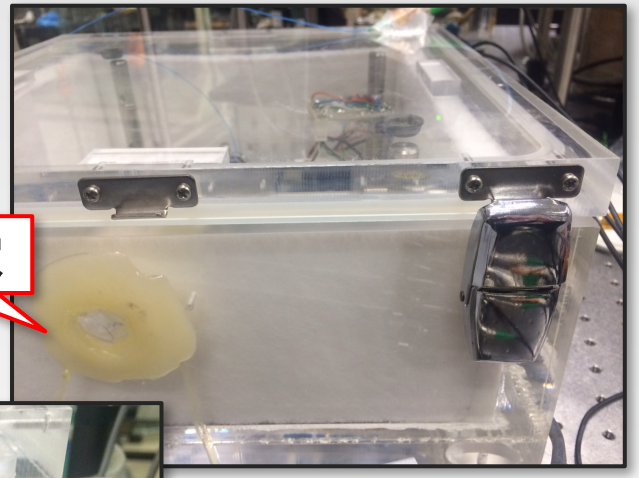
静止時・大気圧下でのノイズレベル (学会前)

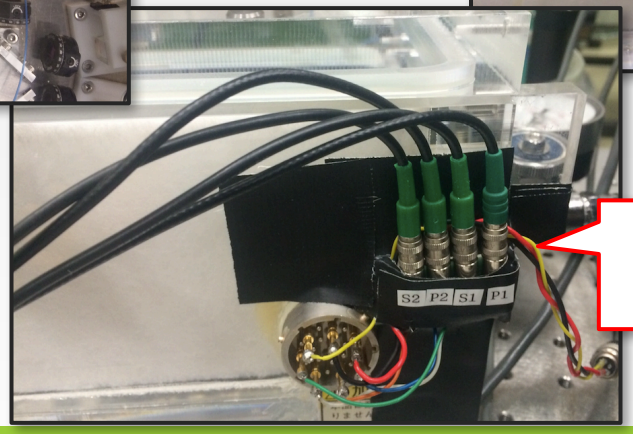


真空 (1/2)

- 音や風の影響を抑えるため、1 kPa (=0.01気圧) まで減圧。
  現在の真空デシケータでは空気の漏れがある。
  ⇒ 真空を引くとロックが落ちやすくなる気がする？
- 怪しい場所



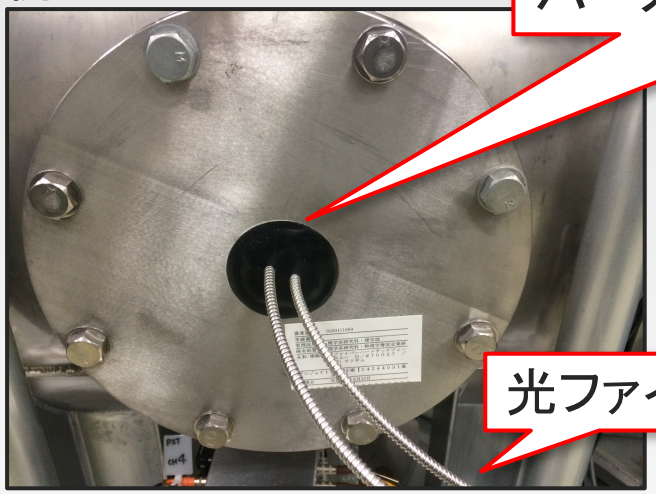




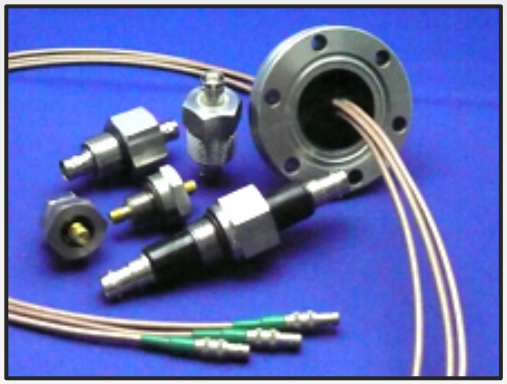
真空 (2/2)

- 今後の対策
  - ◉ 新しい真空デシケータを購入、漏れがないことを確認 (済)
    - ⇒ 光学系 (セミモノリシック) を新しいデシケータに移す
      - --- 光ファイバ・ケーブルの通し方、使用する接着剤を要検討

例えば…



※ 同軸ケーブル版もある (テクサムHPより)

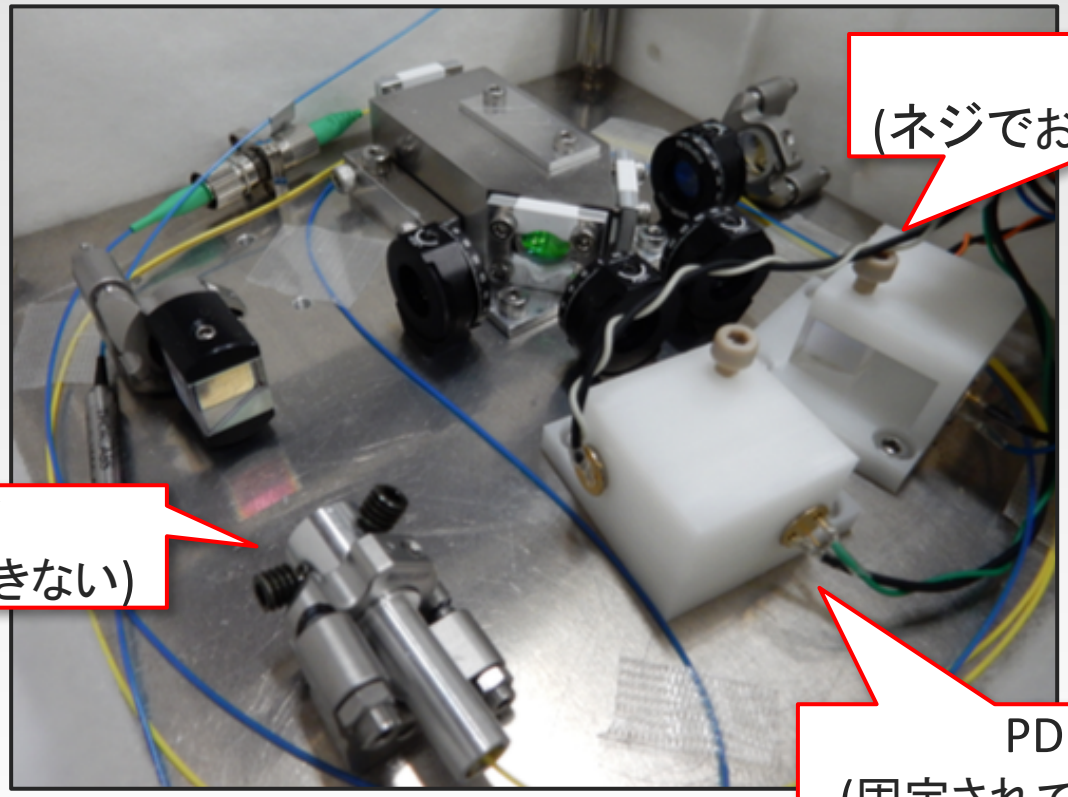


これと並行して、

- ◉ ちゃんとした真空槽を設計、オーダーメイドで作ってもらう
  - --- モノリシック光学系に合わせて設計？

光学系の改良 (⇒ 武田くん)

- コリメータ、PBS、PD等の固定方法が良くない
- モードマッチをもっとしっかりとる
- 散乱光対策



回転周波数

- 装置の回転周波数・・・まだ決まっていない

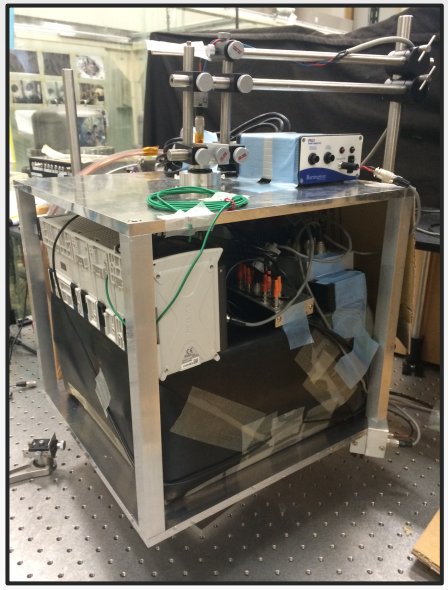
道村さん修士論文: 1/8 Hz
道村さん博士論文: 1/12 Hz
⇒ 学会前のPDノイズ測定など: 1/3 Hz

- 基本的に速く回したほうが得
  - ○ 高周波の方が色々なノイズが小さい
  - ○ 同じ測定時間でたくさん回せる

- しかし、速く回すと…
  - △ 回転の安定性や振動は大丈夫か？

⇒ 色々な速さで回転させて感度を測ってみる

- そもそも、以前よりも色々なものをのせて重くなっているが大丈夫なのか？



まとめ

- 感度を向上させるために装置を改良中

- これまでやってきたこと
  - ・連続回転の実現
  - ・磁場によるノイズのキャンセル方法を確立

- 今後やるべきこと
  - ・デシケータの空気漏れをなくす
  - ・同時にちゃんとした真空容器を設計する
  - ・コリメータ、PBS、PD等の固定方法を見直す
  - ・制御用回路のノイズレベルを下げる
  - ・武田くんとの役割分担をどうするか？　修論はどうするか？
  - ・就職活動
  - ・他にも細かいことがたくさん

発表は以上です
ありがとうございました

以下補足

磁場カップリング測定の詳細

伝達関数測定
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。

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。

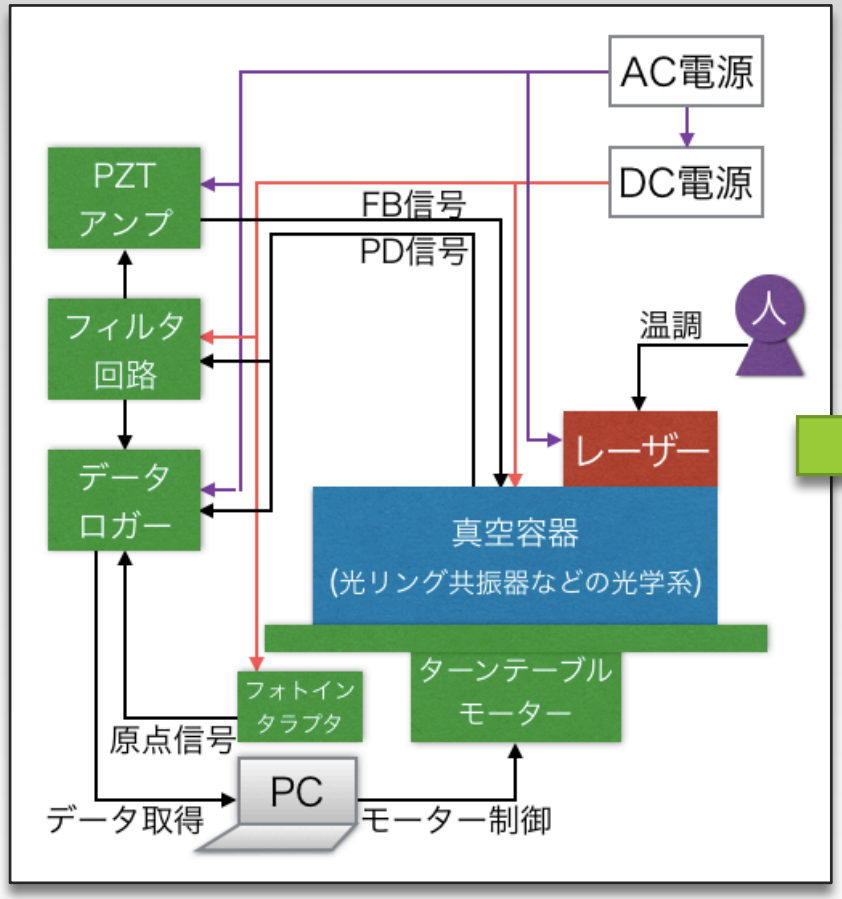
本番の測定
レーザー光を入れて異方性信号を取得する。同時に磁場も測定する。

※ 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

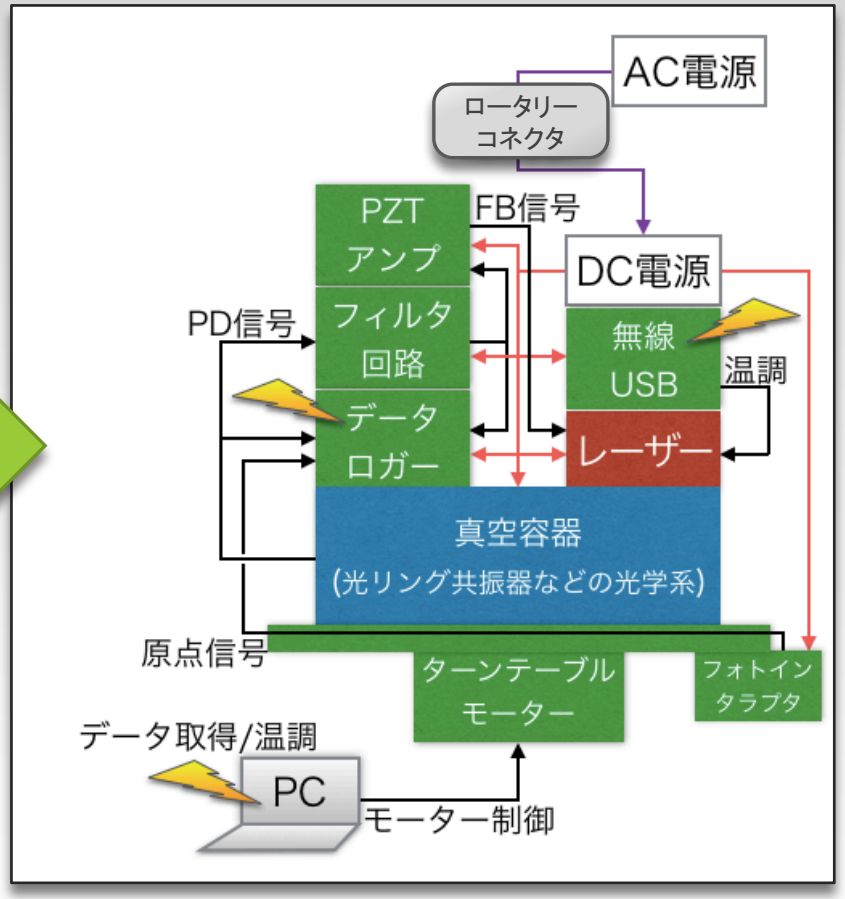
- １セット目に求めた伝達関数と2セット目に測定した磁場から、磁場による寄与を求めることができる。

連続回転実現のための改良の詳細

Before（～2013年）



After（未完成）



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

フーリエ変換

$$y(t) = x(t) + \hat{G}B(t) \;\rightarrow\; X(f) = Y(f) - G(f)B(f)$$

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、

$$P_{xx} = \lim_{T\to\infty}\frac{|X|^2}{T} = \lim_{T\to\infty}\frac{|Y-GB|^2}{T}$$
$$= P_{yy} - 2Re\left[GP_{yB}\right] + |G|^2 P_{BB}$$

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

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。

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

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

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、

$$y(t) = x(t) + \underbrace{\hat{G}_1 B_1(t) + \hat{G}_2 B_2(t) + \hat{G}_3 B_3(t)}_{\text{地磁気による寄与}}$$

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

とするべきでは？

3成分を全て使うとうまくいかない理由

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

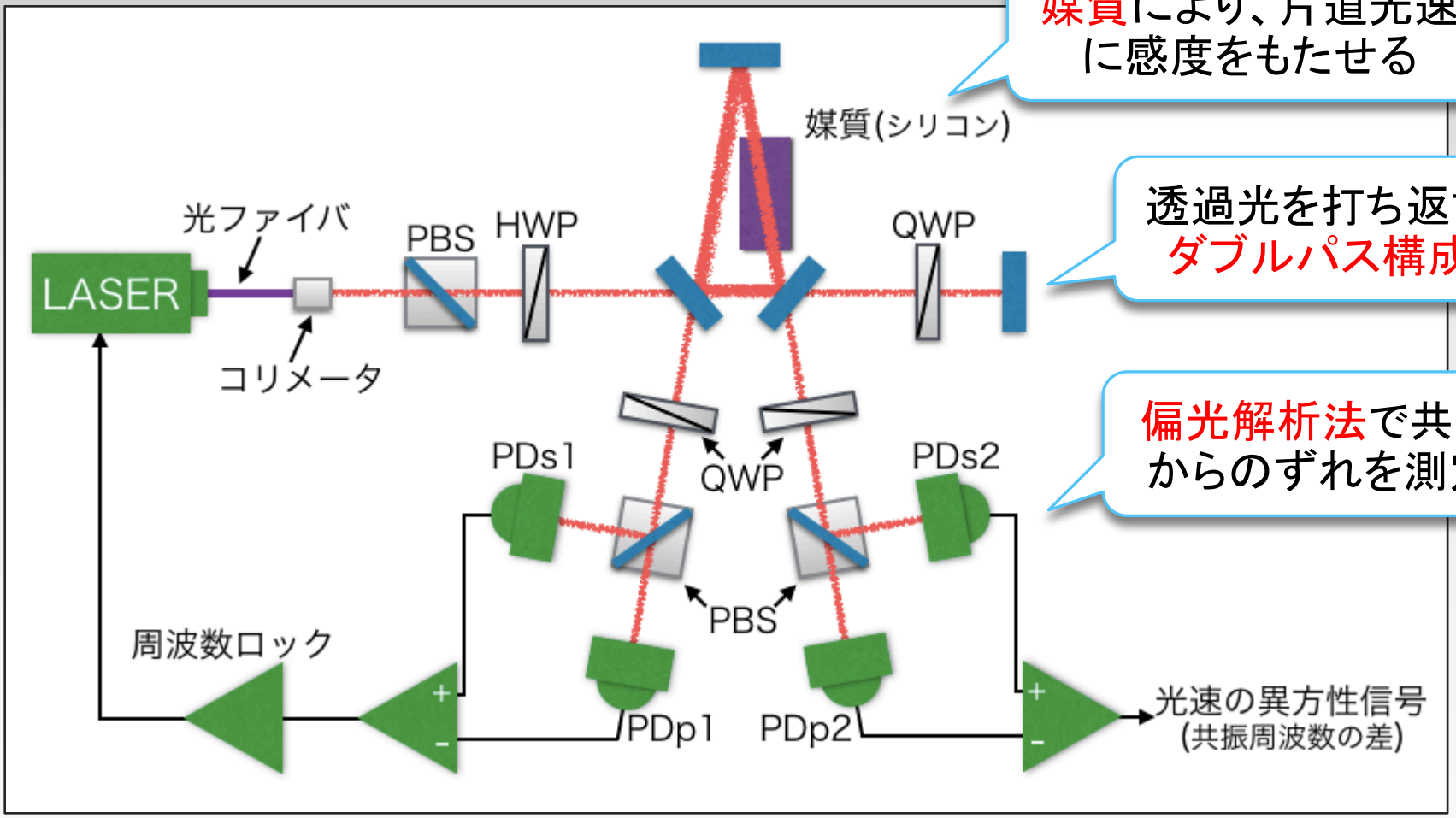
ターンテーブル付近で磁場が十分一様とみなせるため。

⇒ 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。

光学系の詳細

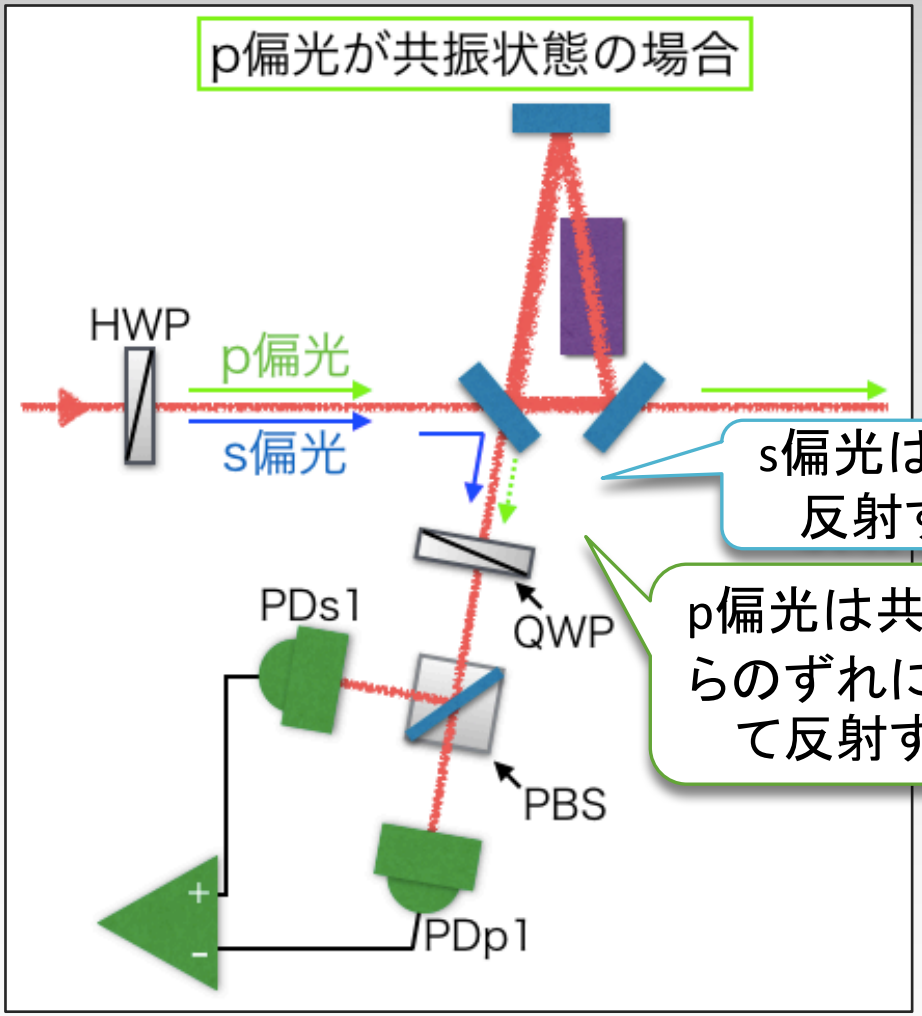


媒質により、片道光速に感度をもたせる

透過光を打ち返すダブルパス構成

偏光解析法で共振からのずれを測定

偏光解析法



s偏光は全て反射する

p偏光は共振からのずれに応じて反射する

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

これらを干渉させると、共振からのずれがわかる

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 $|f - f_{\mathrm{rot}}|$, $f + f_{\mathrm{rot}}$ 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 $(n \pm 1)f_{\mathrm{rot}}$ 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) 磁場の向きは一様で、大きさに四重極成分がある場合

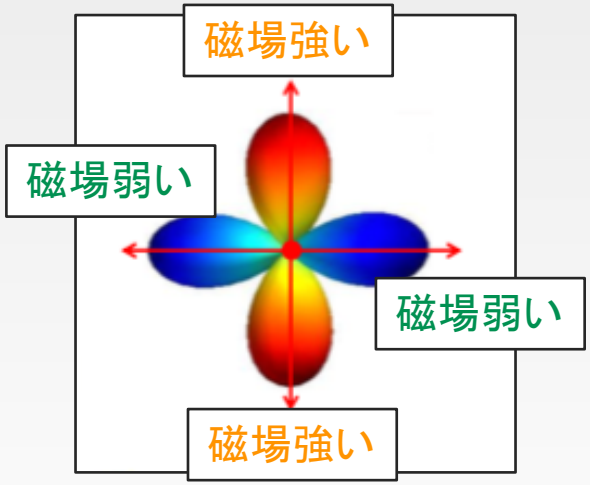
(1) 中心軸の周りを一回転すると、磁場の大きさは $\sin(2\omega_{\mathrm{rot}}t)$ で変化する。

(2) 慣性系から回転系への座標変換によって(1)に $\sin(\omega_{\mathrm{rot}}t)$ がかけられる。

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

↓

回転周波数と3倍波成分が生じる



各種パラメータの一覧

- 回転周波数 $f_{\mathrm{rot}} = 0.1\sim0.3\ \mathrm{Hz}$ (未定)
- 波長 $\lambda = 1550\ \mathrm{nm}$
- レーザー周波数 $\nu = 1.9\mathrm{e}14\ \mathrm{Hz}$
- 入力パワー $P = 1\ \mathrm{mW}$
- フィネス $F = 120$
- 共振器長 $L = 140\ \mathrm{mm}$
- 媒質の長さ $d = 20\ \mathrm{mm}$
- 媒質の屈折率 $n = 3.69$
- $\mathrm{FSR} = 1.5\ \mathrm{GHz}$
- $\mathrm{FWHM} = 12\ \mathrm{MHz}$

目次

1. 異方性実験について
2. これまでの成果と課題
3. 今後の方針
4. 就職活動について
   スケジュール、物理専攻の就活

就職活動スケジュール (1/2)

採用選考に関する指針

一般社団法人　日本経済団体連合会

2016 年 9 月 20 日改定

３．採用選考活動開始時期

学生が本分である学業に専念する十分な時間を確保するため、採用選考活動については、以下で示す開始時期より早期に行うことは厳に慎む。

広報活動　：　卒業・修了年度に入る直前の３月１日以降

選考活動　：　卒業・修了年度の６月１日以降

	12卒	13卒	14卒	15卒	16卒	17卒	18卒
広報活動 (説明会)	10月~	12月~			3月~		
選考活動 (面接)	4月~				8月~	6月~	

- 近年、短期決戦型に移行してきた。
- 経団連非加盟であれば関係ない。
- 守っていない企業も多いのでは？

就職活動スケジュール (2/2)

マイナビ2018より

(12月)

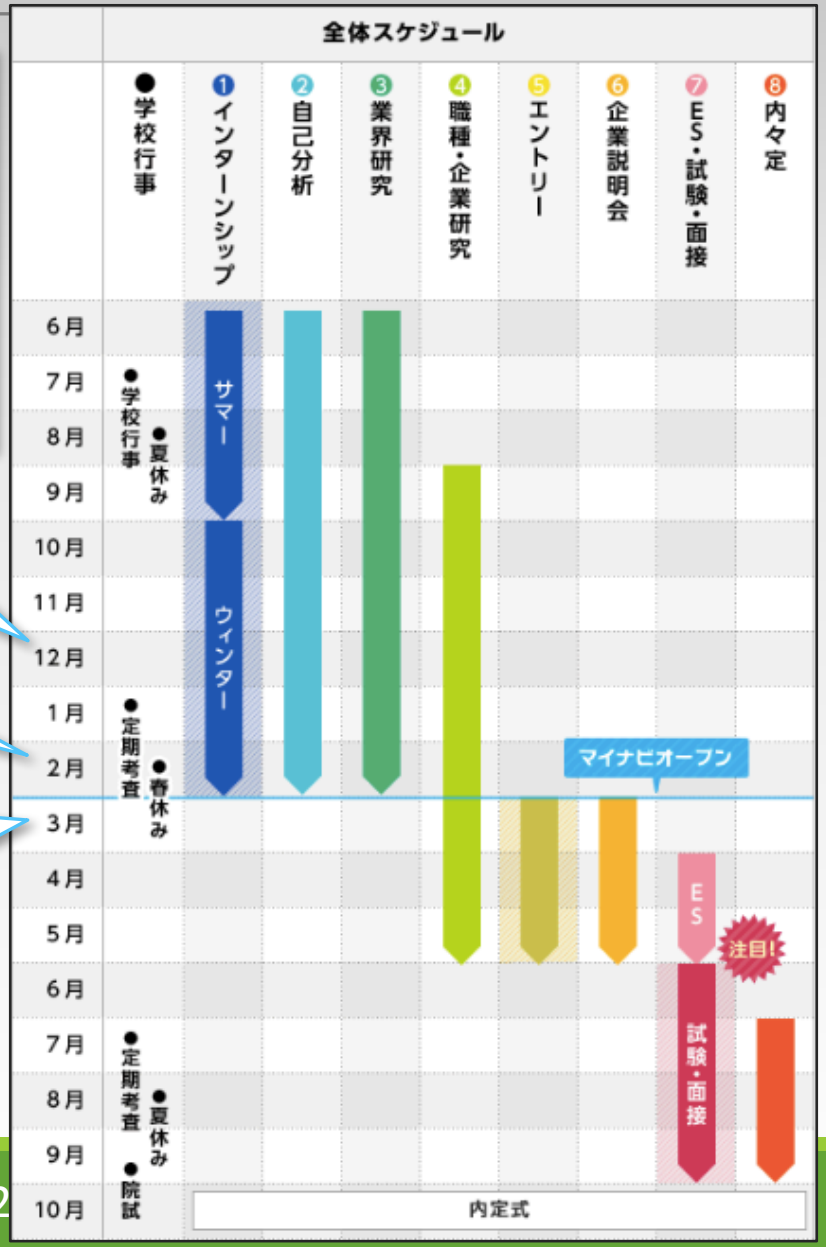
- 就職ガイダンス (理工連携キャリア支援室)
- 就職ガイダンス (物理専攻就職支援室)
  → 個人カード登録
- 公務研究セミナー ＠駒場

(2月)

- キャリアフォーラム ＠本郷
  (物理学会キャリア支援センター)

(3月)

- 企業説明会 (理工連携キャリア支援室)
- 企業説明会 (物理専攻就職支援室)



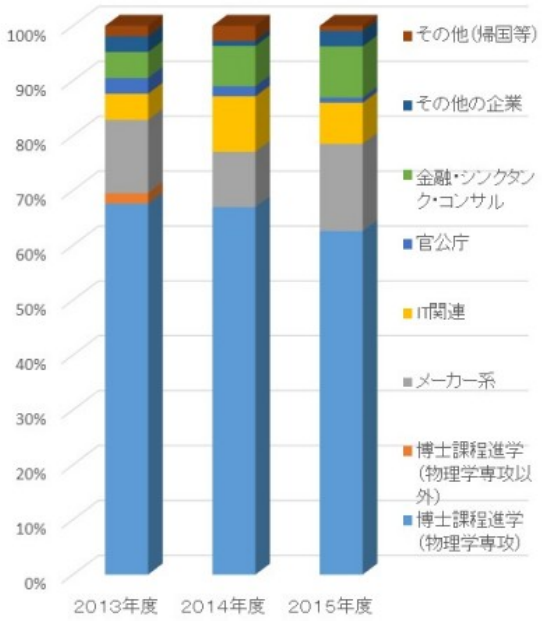
物理専攻の学生に求められること

★ 理系的思考力 (≠専門知識)

特に { モデル化・数値化・可視化
装置・プログラムを作る力 }

⇒ 選択肢が非常に広い
(広すぎて逆に大変)

修士課程修了者の進路



【就職先 －過去3年間の実績による－】

官公庁
特許庁、気象庁、科学警察研究所、厚生労働省、国土交通省、大学職員

メーカー系 (電機・精密・機械等)
日本電気、富士通、東芝、日立製作所、キャノン、三菱電機、富士ゼロックス、SONY、京セラ、ニコン、住友重機械工業、トヨタ自動車、マツダ、IHI、キーエンス、コニカミノルタ、サンケン電気、東京エレクトロン、東陽テクニカ、日亜化学工業、三菱重工業、東京計器、スタンレー電気、村田製作所

IT関連 (通信・ソフト・情報)
NTT(基礎研)、日本IBM、Yahoo Japan、モルフォ、CIJ、MS&ADシステムズ、NTTデータ、NTTドコモ、ナビタイムジャパン、日本コンピュータサイエンス、ネットプロテクションズ、パナソニックシステムネットワーク、日立ソリューションズ、三菱スペース・ソフトウェア、メタテクノ、リコーITソリューションズ、テクノスデータサイエンス、東芝ソリューションズ、ルネサスエレクトロニクス

金融・シンクタンク・コンサル
大和総合研究所、三菱総合研究所、EYアドバイザリー、鈴榮エンジ・センター、フリービット、ビッグツリーキャピタル、日本銀行、みずほFG、みずほ第一フィナンシャルテクノロジー、野村證券、カブドットコム証券、ゴールドマンサックス、日新火災海上保険

その他の企業 (マスコミ、広告、航空会社等)
朝日新聞、サントリー、テクノプロデザイン、日本たばこ産業

理物ホームページより

物理専攻の学生が最低限やること

- 12月の就職ガイダンスに出る。
  ⇒「物理専攻の学生の就職活動」の全体像をつかむ
- 就職支援室に個人カードを提出する。
  ⇒ 就活の情報がメールで送られてくる。
- 3月の企業説明会に出る。
  ⇒ 約1週間で数十社が参加 (1社あたり1時間)
- 支援室から送られてくる求人票で興味のある会社を調べる。

＜企業説明会の参加企業＞
本田技研工業・日立建機・ニコン・シャープ・三菱電機・住友重機械工業
金融庁・ウシオ電機・キヤノン・住友電気工業・パナソニック・フジキン
東芝・日本銀行・環境省野村證券・NTT東日本・NEC・ニコン・トプコン
日立製作所・日置電機・NTT・富士ゼロックス・JFEスチール
テクノスデータサイエンスエンジニアリング・モルフォ・特許庁
JFEエンジニアリング・NTTデータ・スズキ・三菱モルガンスタンレー証券
サンディスク・ルネサスエレクトロニクス

学校推薦

➢ 推薦について

◉ 学校推薦で応募できる企業が 80 社以上ある(2018卒のデータ)。
⇒ 物理専攻の学生の約8割(?)が学校推薦を使う。

＜学校推薦のメリット＞
- 就職活動期間の短縮
- 応募者数が少なく合格率が高い
- 企業によっては希望職種を選べる

＜学校推薦のデメリット＞
- 推薦書発行後は断れない
- 応募するタイミングが難しい

◉ 推薦の応募方法、応募締め切り、推薦書発行のタイミングは企業により様々
⇒ よく調べ、よく考えて応募する必要あり。
※うまくやれば、複数の推薦ありの企業に並行して応募できる。