

修士論文「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」の補足資料

安東研究室修士2年 酒井 譲

2018 年 3 月 9 日更新

概 要

酒井の修士論文「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」に書ききれなかった補足的な内容や装置の詳細、修士論文審査会でもらったコメントをもとにやり直してみたデータ解析、これまで行ってきた実験などについてまとめたものです。異方性実験を継いでくれる人のために作ったので、かなり細かい内容も含まれます。参考となる資料は以下の通りです。これらの資料を見てもわからないところがある場合は酒井まで連絡してください。なお、icrr および granite のメールアドレスは卒業後もチェックするかは不明です。メールを送っても反応がない場合は、yuzuru930sakai(at)gmail.com ¹ に連絡してみてください。

- 修士論文「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」
<http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/sakai/masterthesis.pdf>
- 修士論文審査会発表スライド
<http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/sakai/masterthesis0.pdf>
- 2017 年春学会発表スライド「Lorentz 不変性検証のための連続回転機構の開発」
磁場によって生じる「回転と同期する雑音」を取り除くための解析について
http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/sakai/2017-03_springJPS_sakai.pdf
- 2017 年秋学会発表スライド「光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (1)」
初めて光学系の連続回転に成功したことについて
http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/sakai/2017-09_autumn_jps_sakai.pdf
- 2018 年春学会発表スライド「光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (3)」
7 日間の異方性探査の結果について (修論提出後に解析し直したデータで発表 ²)
http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/sakai/2018-03_springJPS_sakai.pdf

¹(at) を@に変える。

²解析し直した理由については、本補足資料の第 3 章を参照。

目 次

1	実験装置について	3
1.1	モーター	3
1.2	データロガー	4
1.3	無線 USB	5
1.4	レーザー	5
1.5	周波数制御用フィルタ回路とピエゾアンプ	6
1.6	散乱光対策について	6
2	データ解析について	7
2.1	貰ったコメントなど	7
2.2	その他の考察	7
2.3	120 回転毎にフーリエ変換した場合の結果	8
3	検証理論について	11
3.1	なぜ MS 理論はまずいのか？	11
3.2	SME で $d = 4$ に感度が無い問題について	11
4	時系列順にこれまでやってきたこと	12
5	データ置き場等について	14

1 実験装置について

修士論文で対応する部分は第4章など。主に各装置の写真とその使い方(使用するソフト、基本操作など)について簡単にまとめる。最後に、雑音を下げられるために行った光学系の散乱光対策についてもまとめる。

1.1 モーター

多分道村さんのほうが使い方を詳しく知っている。専用ソフトは「NikkiDES」であり、「リモート操作」→「スイッチBOX」からモーターを操作できる。回転速度制御を行う「SON」を押した状態で、右下の「FJOG」または「RJOG」を押すと回転する(それぞれ正回転および逆回転)。回転速度は2種類設定しておける(Speed1 および Speed2)。

回転速度などを変えたい場合は「データ編集」→「パラメータ」。P400 および P401 の寸動速度で2種類の速度を設定できる³。なお、オンラインマニュアルがパソコン上にあるので、詳細はそちらを参照のこと⁴。

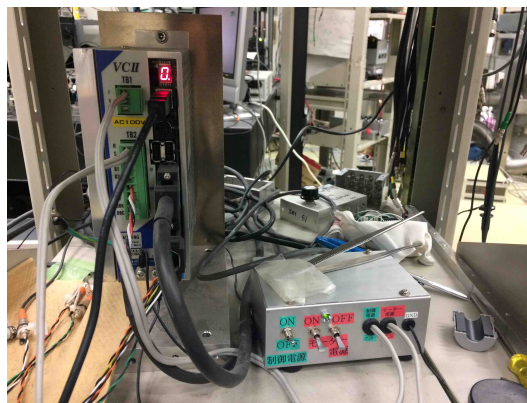


図 1: モーター制御用ドライバ

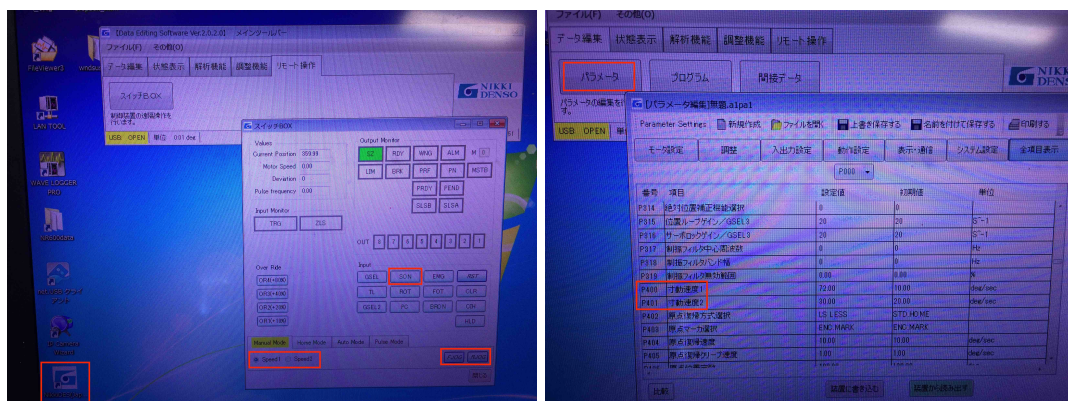


図 2: スイッチボックス、パラメータ調整

³他のパラメータや左右交互に回転したい場合については、詳しくないので説明書を読むか道村さんに訊くとよい。

⁴「nikkides」でファイル検索すると日本語版と英語版が出てくる(保存されている場所は忘れた)。

1.2 データロガー

9～27 V 直流電源または専用バッテリー (図 3 左下) で動く。このロガーはユニットを買い足すことで測定チャンネルを増やすことができる。現在使っているユニットは HV-04(高電圧用：最小測定レンジ ± 2 V) と ST-04(精密計測用：最小測定レンジ ± 2 mV) であり、それぞれ 4 チャンネルずつある。パソコンから NR600-... (図 4 左) というネットワークにつなぐと無線で通信できる。このネットワークのパスワードは「KEYENCE-NR」。

専用ソフトには、「WAVE LOGGER PRO」と「LAN TOOL」がある。「WAVE LOGGER PRO」は通常実験を行う際に波形を観察したりするのに使う。「収集設定」によりサンプリング周期や測定時間、使用チャンネルなど測定条件を設定できる。「Excel 転送/CSV」タブから CSV ファイルとしてデータを保存できる。「ウィンドウ」タブから時系列データを FFT してスペクトルを観察したりできる。一方、「LAN TOOL」は長時間測定を行う場合に用いる。定期的に信号の現在値などをメールで送信したり、ロックが落ちたときにメールで知らせたりしてくれる。



図 3: データロガー本体、専用バッテリー、説明書

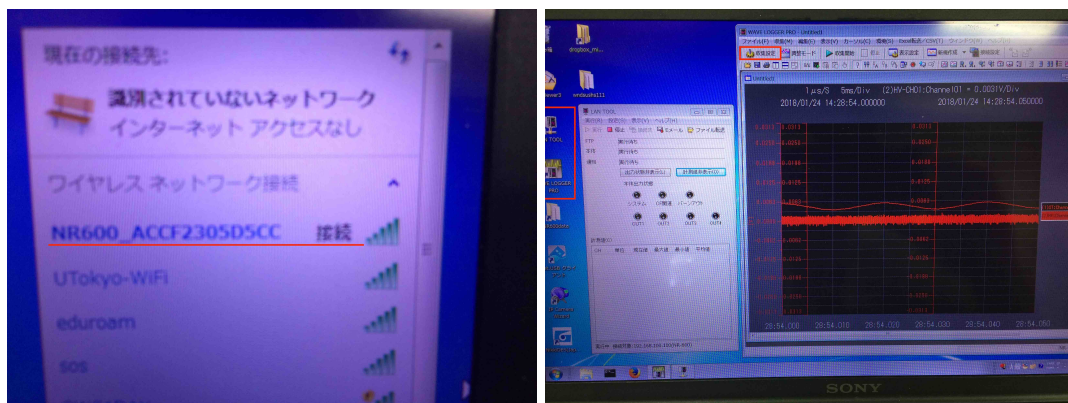


図 4: ネットワーク、データロガー用ソフト

1.3 無線 USB

無線 USB の説明書はあまり長くないので、書いてある通りに設定すれば使える。セットアップガイドに従って本体をネットワークに接続すると、専用ソフト「net.USB クライアント」の画面上に、本体に接続されている USB 機器が表示される。その中から使用したい USB 機器を選択することで、パソコンに有線接続している場合と同じように USB 機器を使用できる。

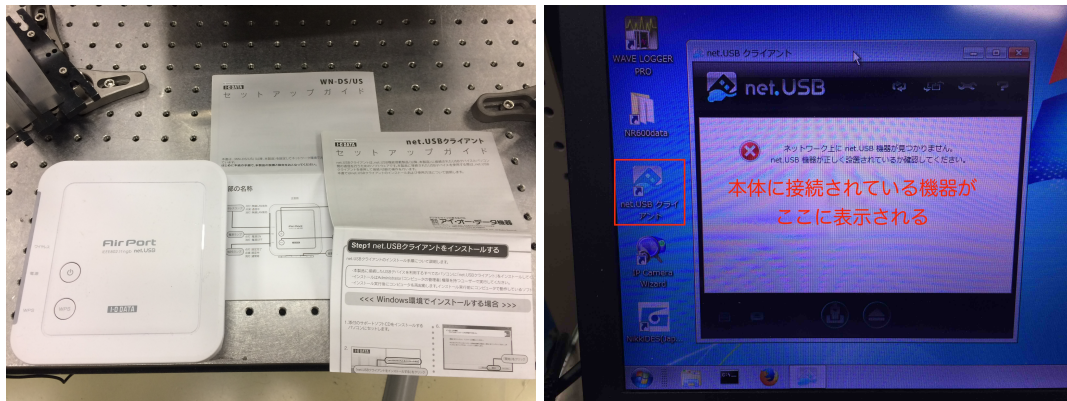


図 5: 無線 USB 本体、専用ソフト

1.4 レーザー

波長 1550 nm で、50 mW 弱まで出せる。本体から伸びる青いファイバが本出力、黄色いファイバがモニタ出力である。専用ソフトは「GraphiK」であり、「Communication」タブにある Connect ボタンで本体と接続した後、「Laser」タブで色々操作できる。図 6 の でレーザー出力の ON/OFF、でピエゾ素子による変調の ON/OFF を操作できる。また、 の値を変えるとレーザー温度が変わり、周波数が変化する。ピエゾ素子にかけて良い信号は 0 ~ 120 V なので、フィードバック信号がこの範囲を超えそうな場合は の値を変える。

ファイバや特にファイバ接続部をしっかりと固定していなかったりすると、偏光雑音が大きくなり、PBS の後 (共振器への入射光) の強度ゆらぎが大きくなるので注意が必要である。ファイバ接続部にはマッチングジェルを使用。この辺りをしっかりとっておけば偏光雑音は十分小さく、PBS の後の強度ゆらぎは PBS の前での強度ゆらぎの大きさとほぼ変わらない。

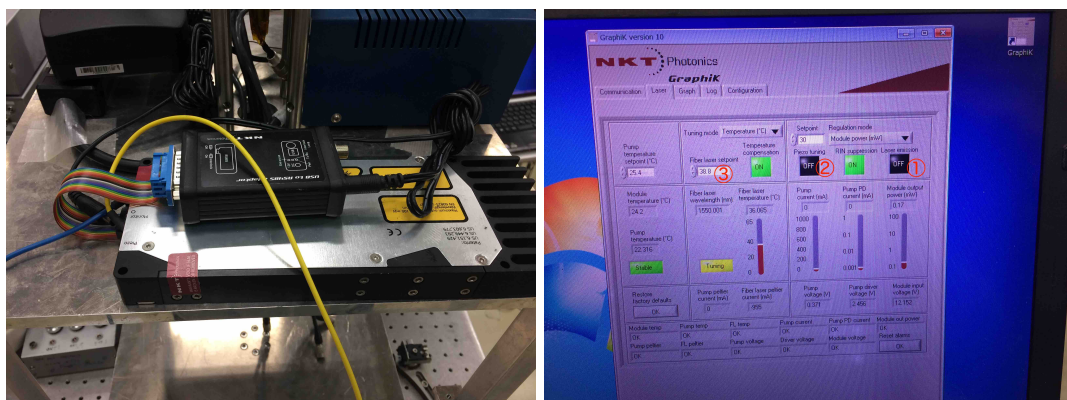


図 6: レーザー本体、専用ソフト

1.5 周波数制御用フィルタ回路とピエゾアンプ

周波数制御用フィルタ回路は図 7(左) の上に載っている方である。中身は修論図 F.3 の回路図に書いた通り。手前にある可変抵抗調整つまみでゲインを調整できる。反対側にも同様のつまみが 5 つあり、それぞれ Error1 および Error2 のオフセットとバランス⁵、フィードバック信号のオフセットを調整できる。また、Boost ポートに GND をつなぐことで低周波で 10000 倍ゲインを上げることができる。スイッチではなくこのような形になっているのは、ローガーからショートまたは切断の信号を出すことができ、例えばロックが落ちたときにブーストを解除するというようなことができるためらしい⁶。また、EXC ポートに信号を注入し、その前後の MON1 と MON2 の信号の比を取ることで、オープンループゲインを測れるようになっている。

一方、下の回路ボックスにはピエゾアンプが入っている。IN ポートに信号を入れると 10 倍されて OUT ポートから出てくる。MON ポートでは、OUT ポートから出てくる出力の 1/100 の信号をモニタできる。実は同じ箱にアンチエイリアシングフィルタも入れてみたが、調子が悪いので使っていない⁷。アンチエイリアシングフィルタは別の箱に入っている道村さん作のものを使った。

1.6 散乱光対策について

異方性信号の静止時の雑音を下げるために行った散乱光対策は図 7(右) の ①② の 2 つ。①は PBS を透過する使わない光のためのビームダンパ。②は PD に余計な光が入らないための遮光板。この遮光板は間違えて透明なものを発注してしまったため、黒く塗ってテープを巻いている。今のところこれで問題無く遮光できているが、強度安定化などをしてより雑音を下げたい場合は作り直したほうが良いと思われる。

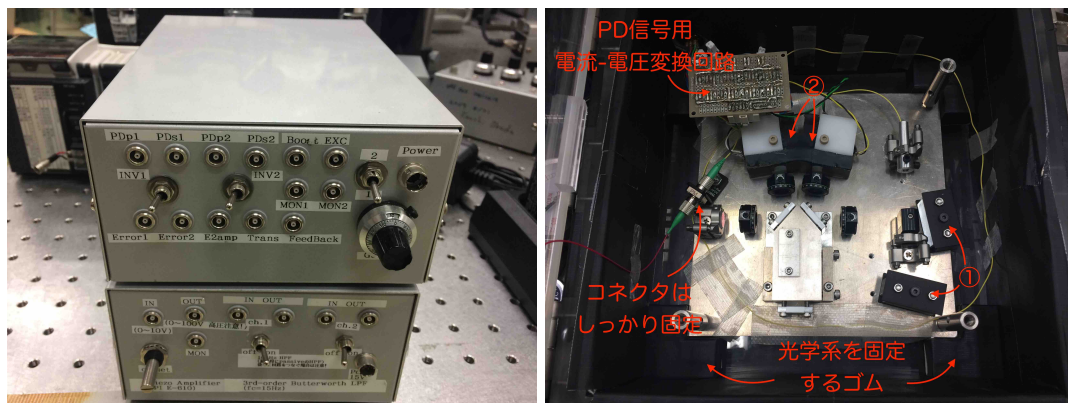


図 7: 周波数制御用フィルタ回路 (左上)、ピエゾアンプ (左下)、光学系 (右)

⁵ $i = 1, 2$ として、PD_{pi} の出力を V_{PDpi} 、PD_{si} の出力を V_{PDsi} としたとき、エラー信号は $V_{PDpi} - gV_{PDsi} + V_{offset}$ のようになる。オフセット調整によって V_{offset} 、バランス調整によって g を変えることができる。

⁶結局方法がわからなくてそのような機能は使っていない。必要ならロガーの説明書等を読んで各自で調べる。

⁷高電圧を出力するピエゾアンプと一緒に箱に入ると、その影響で雑音が大きくなる？

2 データ解析について

修士論文で対応する部分は第 6 章など。副査を務めてもらった日下先生は CMB の解析などで似たような方法の解析をしているようで、色々と鋭いコメントを貰った。日下先生の方でも、高調波を使って雑音を除去したりするらしい。

2.1 貰ったコメントなど

直交位相振幅を求める回転数について

12 回転は少なすぎる。回転数が少なすぎると、窓関数の影響が大きくなるためもっと増やしたほうが良い。120 回転なら問題無いだろうとのこと。一応 12 回転だけでなく、数十回転に増やしても結果に有意な変化が生じないことは確認したので問題無いと思うが、12 回転に減らす意味は無かった。

回転台の方向 or 回転速度をモニタした方が良い

現在の解析方法だと、回転速度に自転周期程度の時間スケールでの変動があると雑音になる。回転速度変動への要求値は Sagnac 効果から求めたが、このような効果は Sagnac 効果とは別に考えなくてはならない。そこで、異方性信号 $\delta\nu(t)/\nu$ と同時に回転台の方向 $\theta(t)$ または回転速度をモニタしておく⁸。今回は異方性信号を時間の関数として Fourier 変換したが、異方性信号を回転台の方向 θ の関数に焼き直してから Fourier 変換したほうがより確実になる。

異方性が見つかったときどうやって異方性だと判断するのか？

今回は、修論図 6.8 のように異方性のような信号が見えても、先行研究よりも大きな雑音だったことと、2 倍波による雑音除去で取り除けたことから、異方性ではなく雑音として処理することができた。しかし、本当に異方性があったときに、それが雑音ではなく本物だとどのようにして判断するかが問題になる。今のところこの点についての結論は出ていない。

平均値の精度の求め方

測定により求めた $\alpha + 1/2$ の平均値 $\overline{\alpha + 1/2}$ の精度を評価するときに、自己相関関数から有効無相関時間を計算して独立なデータ数を見積もるという方法をとった。おそらく問題ないとのことだが、他の評価方法もあるらしい。まず、 $\alpha + 1/2$ の時系列データからスペクトルを求める。モンテカルロ法によって、逆にそのスペクトルになる $\alpha + 1/2$ の時系列データをランダムに生成し、平均 $\overline{\alpha + 1/2}$ を求めるという操作を繰り返す。このようにして求めた $\overline{\alpha + 1/2}$ の分布から、平均の精度を評価するという方法がよく使われるらしい。

2.2 その他の考察

系統誤差 (修論図 6.8) について

温度変動が原因でこのような系統誤差が生じていると仮定する。さらに年間を通して実験室の 1 日の温度変動はほぼ同じとする。このとき、夏と冬で昼夜の地球の向きが逆転するため、 $\alpha + 1/2$ の系統誤差は逆方向になるはずである。別の言い方をすれば、温度変動は 1 日周期であり、自転周期とはややずれているためということもできる。したがって、1 年間にわたって異方性探査を行えば、このような系統誤差はちょうどキャンセルする可能性がある。

⁸ただし、今のセットアップでは回転台の方向 or 回転速度は回転台の外ではモニタできるが、回転台上にあるロガーで異方性信号と同時取得はできないので、この点を何とかする必要がある。

2.3 120 回転毎にフーリエ変換した場合の結果

上述のように、フーリエ変換する回転数が 12 回転だと少なすぎるという指摘を貰ったため、120 回転にして解析をやり直した。ここでは、光速の異方性を球面調和関数展開してその係数を求めるという立場の解析について、その結果をまとめる。なお、120 回転としたのには特別な意味はない。ちょうど 10 分に対応するため、計算が簡単になるように 120 回転としているが、他の回転数 (60, 120, 240, 360 回転など) で解析しても、結果に有意な違いが出ないことは確認済みである。

120 回転毎に直交位相振幅を求めると図 8 のようになり、2 倍波を用いて雑音を除去する前後でスペクトルを比較すると図 9 のようになる。最終的に復調振幅と展開係数を求めると図 10、図 11、表 1 のようになる。参考までに、2 倍波を用いて雑音を除去しない場合についても求めると、表 2 のようになる。

修士論文では、12 回転毎にフーリエ変換したが、12 回転でも 120 回転でも最終的に求まる展開係数 $\bar{y}_l^m$ には有意な違いが生じないことがわかる。したがって、修士論文で考察した「先行研究と同じ約 1 年間の測定を行うことで、先行研究で記録した世界最高感度を 5 倍程度更新できる」という主張に変更は無い。

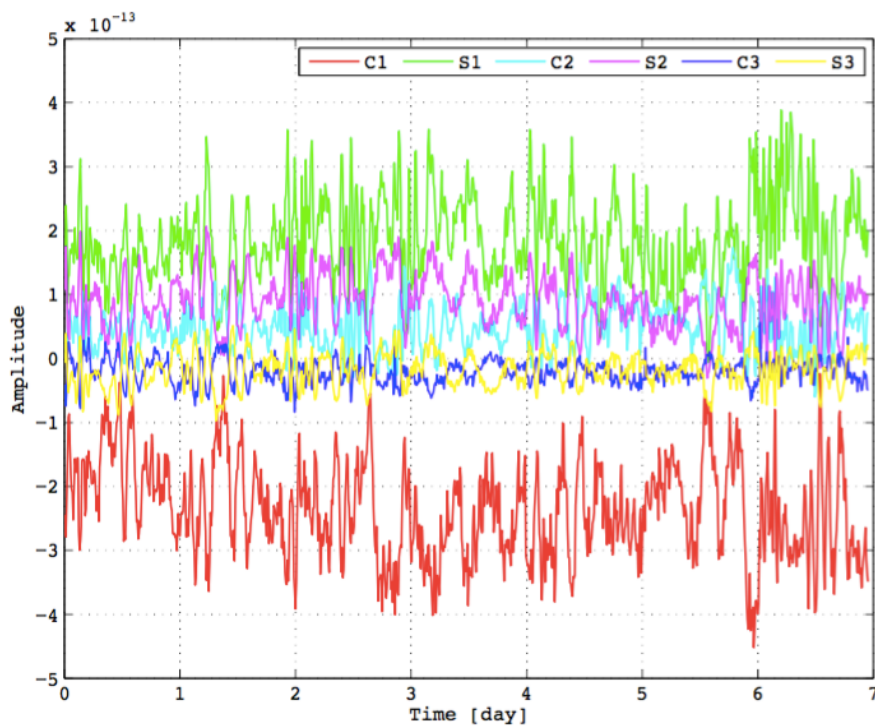


図 8: 120 回転 (=10 分) 毎に求めた直交位相振幅

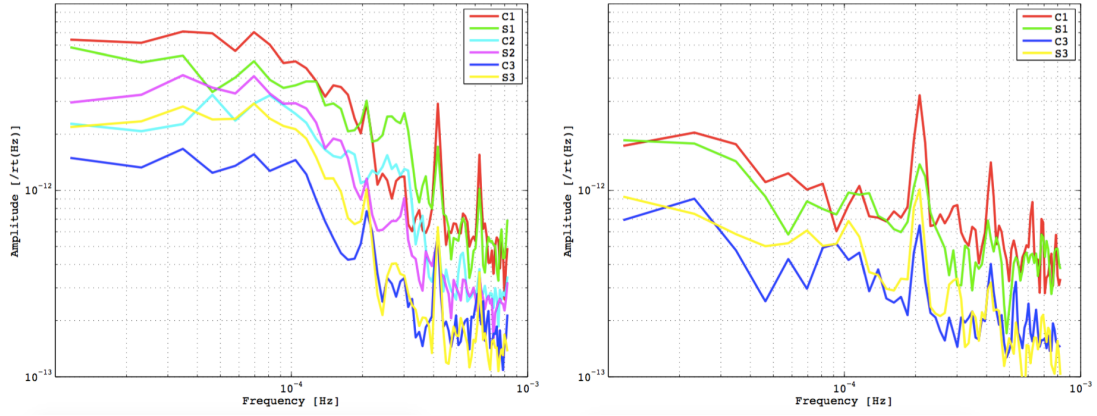


図 9: 2 倍波による雑音除去の前 (左) と後 (右) のスペクトル

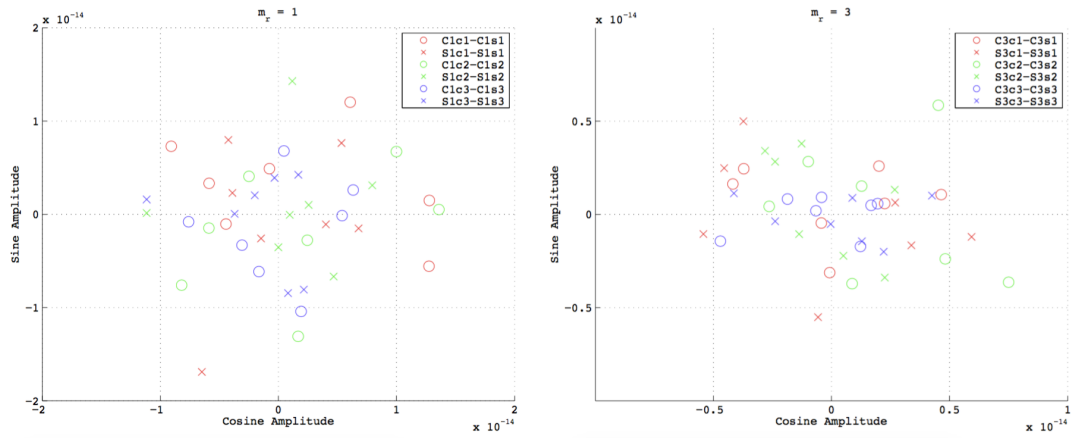


図 10: 求めた復調振幅

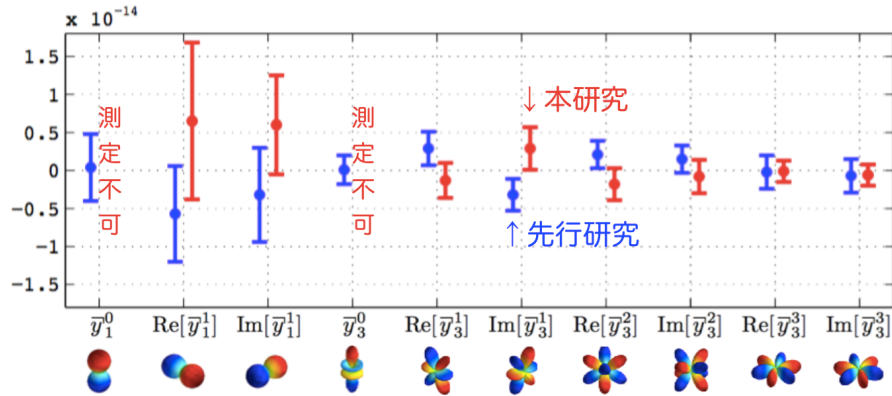


図 11: 求めた展開係数

表 1: 2 倍波により雑音を除去した場合の復調振幅と展開係数 $[10^{-15}]$ 。

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

	係数	実部	虚部	先行研究の精度
双極子成分	$\bar{y}_1^0$	測定不可	(無し)	~ 6
	$\bar{y}_1^1$	6.0 ± 10.3	6.0 ± 6.6	
六重極子成分	$\bar{y}_3^0$	測定不可	(無し)	~ 2
	$\bar{y}_3^1$	-1.3 ± 2.3	3.0 ± 2.8	
	$\bar{y}_3^2$	-1.8 ± 2.1	-0.8 ± 2.2	
	$\bar{y}_3^3$	0.1 ± 1.4	0.6 ± 1.4	

表 2: 2 倍波により雑音を除去しない場合の復調振幅と展開係数 $[10^{-15}]$ 。

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

	係数	実部	虚部	先行研究の精度
双極子成分	$\bar{y}_1^0$	測定不可	(無し)	~ 6
	$\bar{y}_1^1$	66.9 ± 37.7	112.0 ± 43.8	
六重極子成分	$\bar{y}_3^0$	測定不可	(無し)	~ 2
	$\bar{y}_3^1$	0.0 ± 5.3	48.0 ± 8.1	
	$\bar{y}_3^2$	-9.0 ± 8.9	-3.0 ± 9.2	
	$\bar{y}_3^3$	-10.9 ± 12.8	8.7 ± 12.8	

赤字は 0 から 2 σ 以上離れているものを表す。

3 検証理論について

修士論文で対応する部分は第 2 章など。本当は MS 理論を使うのはあまり良くないので、早めに SME(拡張標準理論) を勉強すると良いと思う。

3.1 なぜ MS 理論はまずいのか？

MS 理論は真空中の理論であり、媒質中でのようになるかは実はこの理論には入っていない。つまり、「媒質中の光速」を考えると次の仮定が入ってしまう。

仮定 真空中における光速が $c(\theta_{\text{MS}}) = 1 - 2(\alpha + 1/2) \cos \theta_{\text{MS}}$ のとき、
屈折率 n の媒質中の光速は $c_n(\theta_{\text{MS}}) = [1 - 2(\alpha + 1/2) \cos \theta_{\text{MS}}]/n$ になる。

妥当そうな仮定であるが実はけっこう怪しい。異方性が無い場合に、 $c = 1 \rightarrow c_n = 1/n$ となるのは問題無いが、異方性による寄与も同様に $1/n$ になるとは限らない。仮に、異方性による寄与が媒質中で $1/n^2$ になるとすると、この実験のセットアップで異方性に対する感度が無くなってしまいうことが示せる。実際に、次節で述べるように SME の質量次元 $d = 4$ の項は、片道光速の異方性を生じさせるが、この実験のセットアップで感度が無いことがわかっている。

ちなみに、「高速で動く原子やイオン」「離れた 2 点間で時計比較」による片道光速の異方性探査の場合は、ファイバの屈折率などを考慮したとしても屈折率の差を使っているわけではないのでこの問題は生じない。

3.2 SME で $d = 4$ に感度が無い問題について

SME の $d = 4$ の場合については、道村さんの修論の AppendixD が参考になる。この前半は問題無いが、次に述べる通り D.1.5 節に間違いがあり、 $d = 4$ には感度が無くなっている。なお、AppendixD の内容は Baynes *et al.*(2011) を参考にしているが、参考元の論文が間違っている。

道村さんの修論は、式 (D.35) までは正しい。この式は、屈折率 $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ の媒質中を θ 方向に進む光が、Lorentz 不変性の破れによって受ける角周波数のずれを表す。これを式 (D.28) で表される電磁場のエネルギーで重み付けして平均を取ることによって、共振器を 1 周したときの寄与を求めることができるが、道村さんの修論では真空中と媒質中で E_0 が違うという点に見落としがある。すなわち、媒質内外で保存する量は電場ではなくポインティングベクトルなので、 E_0^2 ではなく $E_0 H_0$ が保存する。 $H_0 = B_0/\mu = n E_0/\mu$ なので、式 (D.28) より電磁場のエネルギーは、

$$U = \frac{l \epsilon_r E_0^2}{2} (\epsilon_0 + \mu_0^{-1}) = \frac{l \epsilon_r \mu}{2n} \times \underbrace{\frac{n E_0^2}{\mu}}_{\text{保存}} \times (\epsilon_0 + \mu_0^{-1}) = nl \times (\text{保存量})$$

のように表せる。したがって、式 (D.36) を正しく書き直すと、

$$\begin{aligned} \frac{\delta \omega_+}{\omega_0} &= -\frac{1}{(l_1 - d) + l_2 + l_3 + \textcolor{red}{n}d} \times \left[\text{各第 4 項の係数は、} d\epsilon_r \frac{n}{\epsilon_r} \text{ではなく } d\textcolor{red}{n} \frac{n}{\epsilon_r} \right] \\ &= -\frac{(\mu_r - 1)d}{L_{\text{opt}}} (\kappa_{DB}^{yz} \cos \theta - \kappa_{DB}^{xz} \sin \theta) \end{aligned}$$

のようになり、誘電率によって屈折率を変えるだけでは感度が無く、透磁率を変えなければならぬことがわかる。本実験で使っているシリコンは、透磁率は $\mu_r \approx 1$ なので、 $d = 4$ に感度が無くなってしまふ⁹。

⁹ $d = 6, 8, \dots$ の高次の破れについては感度があるらしいが、ちゃんと計算を追っていないので誰か確かめたほうがよい (道村さんの D 論の AppendixA 参照)。

4 時系列順にこれまでやってきたこと

これまでの異方性実験の流れを示す。酒井は M1 秋までは宇宙線研にいたため冬から異方性実験を始めた。それ以前については、道村さんの修論および D 論を参照。道村さんの後は、留学生の Jake 氏、同期の武田くんなどが異方性実験を担当。

2016/11 色々な事情により宇宙線研究所川村研究室から安東研究室に事実上移籍¹⁰。この時の異方性実験の状態は、道村さんが無線データロガーとロータリーコネクタを準備していたため、既に連続回転はできるようになっていたが、現在のような天井付きの回転台ではなかったため、ロータリーコネクタを固定することができず、ロータリーコネクタがスムーズに回らないという問題があった。一方、光学系のアライメント調整、異方性信号の較正などは武田くんが担当していた。

2016/12 道村さんの提案で異方性実験を始める。修論の図 E.2 のように PD の出力に回転と同期する雑音が出ることを原因の調査を命じられる。並行して現在のように天井付きの回転台を設計。

2017/2 最初は電源ラインを疑っていたが、環境磁場が回転と同期する雑音の原因であることに気づく。TOBA で使っていた直径 40cm のコイルで磁場をかけたりしてそのことを確かめ、修論補遺 E のような解析方法を考案して実証実験。

2017/3 磁場による雑音とその効果を取り除くための解析方法について学会で発表。

2017/4 周波数制御用のフィルタ回路を再設計。オフセット回路のボルテージフォロアの雑音でリミットされていたので、それが効かないように修論図 F.3 のように変更。修論図 F.4 のように、PD の雑音レベルまで入力換算雑音を下げること成功。

2017/5 セミモノリシック光学系を武田くんから引き継ぎ、アライメント、波長板などを再調整。真空デシケータを発注し、ファイバ導入部や信号線導入部を加工¹¹。

2017/6 共振器のロックはできるようになったが、異方性信号の雑音が $10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}}$ 以下に下がらない問題が発生。また、入射光の強度ゆらぎにも悩まされる。強度ゆらぎの原因はファイバであり、ファイバの接続や固定が甘いとかかなり偏光が回って PBS の後の強度が揺れるということが判明。ファイバコネクタをアルミ板に固定、接続部にマッチングジェルを使用。

2017/7 上旬 デシケータを 0.1 気圧に減圧して共振器をロックしてみる。ファイバをデシケータに導入する部分には被覆なしファイバを使用。減圧状態は数時間は保つことを確認。しかし、ファイバをパッキンに挟むことによる戻り光で、レーザー強度が不安定になる。もともとデシケータ内になったアイソレータをデシケータ外の現在の位置に変更。強度ゆらぎは解決したが、異方性信号の雑音レベルは減圧してもしなくても変化なし。

2017/7 下旬 静止時の異方性信号の雑音下がらない原因がエイリアシングであることに気づき、10Hz3 次ローパスフィルタ (バターワースフィルタ) を使う。初めて回転台上に光学系を載せて共振器をロック。とりあえず回転させてもロックが落ちないことを確認。

2017/8 上旬 回転台の振動を測定。TOBA で使っている地震計を借りて測定。この頃修論のテーマが異方性探査で決まる。一方で武田くんはモノリシック光学系の設計開発を担当。

¹⁰正式に籍を移したのは 4 月から。

¹¹5 ~ 7 月は基本的に武田くんと一緒に実験。

2017/8 下旬 回転と同期する雑音の原因を探り始める。ロータリーコネクタの固定が甘いことが判明し、元々 1 方向からフレームを伸ばして支えていたのを、現在のように 4 方向に変更。1 方向のみの場合はロータリーコネクタの位置が動いてしまい、異方性信号や回転台の振動の特に回転周波数の倍波成分が大きくなる。

2017/9 月上旬 異方性信号の静止時の雑音が散乱光で制限されていることが判明。散乱光対策により修論図 4.13 のレベルまで低減。現在は強度雑音で制限されている。ここまでの内容を学会で発表。再びデシケータ内の減圧を試みるが、やはり異方性信号の雑音レベルに変化無し。

2017/9 月下旬 回転と同期する雑音の原因を探る。定盤ごと傾けることで、回転軸の傾きによる効果などをチェック。

2017/10 光学系の固定法とロータリーコネクタの位置が原因であることが判明。修論図 5.3 のように雑音が低減。修論図 4.22 のように回転周波数を変えた場合を比較。異方性探査に向けて長時間ロックを試す。

2017/11 月上旬 10/31 からの 7 日間で異方性探査。7 日目が終わったところで不注意¹²によってロックが落ちる。その後雑音レベルが悪化¹³。原因を探っていたが一旦諦め、異方性探査は切り上げる。

2017/11 月下旬 データ解析。

2017/12 月上旬 修論執筆を本格的に始める¹⁴。

2017/12 月下旬 解析以外の章を書き終えてから、解析を再開。倍波による雑音除去を思いつく。ちなみに、倍波以外に異方性信号と同時にデータを取っていた、透過光 (p_2+s_2) や回転台上に載せていた加速度計の出力とも相関を計算して雑音除去を試したが、上手く相関は現れず雑音除去ができなかった。

2018/1 月上旬 修士論文提出。

2018/1 月下旬 修士論文再提出。

2018/2 修士論文審査会でもらったコメントをもとに、もう一度データ解析 (フーリエ変換する回転数を 12 回転毎から 120 回転毎に変更)。

2018/3 月上旬 武田くんのモノリシック光学系を回転台で回してみる。

2018/3 月下旬 修士論文提出。

¹² 温調 (手動フィードバック) の調整方向を間違えてしまった。

¹³ フロアレベルや回転と同期する雑音の振幅はあまり変化しないが、回転と同期する雑音の変動が大きくなる。

¹⁴ 10 月頃には L^AT_EX でテンプレを作っておき、書けるところから書き始めていた。

5 データ置き場等について

安東研 wiki に異方性実験のページが用意されている。

→ <https://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/wiki/Lab/index.php?LorentzInvarianceTest>

この wiki の「内部向けページ」の中に、異方性実験の感度、振動、回路雑音等のデータが置いてあり自由に使用できる。また、酒井が設計した回転台や光学系の部品についての CAD ファイルも置いてある。その他、異方性実験で使用している電気回路の詳細（回路図、雑音、伝達関数等）がまとめられているページへのリンクも貼ってある。

wiki とは別に、通常実験で出たデータを保存するために異方性実験用の dropbox も用意してある¹⁵。この dropbox には、上記の通り wiki においてあるデータの他、異方性実験についてのこれまでの学位論文や学会スライド、その他有用と思われるスライドや装置の写真・動画等も置いてある。

¹⁵ 異方性実験をすることになった場合は、武田くんに dropbox の使い方を訊くこと。