

特別実験II (坪野研究室) レポート  
「空間の等方性の検証」

理学部物理学科4年 西田祐介  
学生証番号 01562C

平成14年2月14日

# 1 本実験の目的と概要

慣性系は等方的である、という特殊相対論の提出した自然哲学の最も根元的な要請は様々な実験によって高い精度で検証されてきた。一方で、一般相対論は重力を含む一般の系の持つ緒性質について言及している。地球は自転・公転といった加速度運動をするため地球上に設置された実験系は慣性系でないが、この点を考慮し実験の精度をさらに高めることによって、等方的な空間からのずれを検出することが可能になるだろう。その意味で、空間の等方性をさらに高い精度で確認しておくことは、非等方性の検出のための信頼できる基準を提供するという点で有意義である。我々はマイケルソン型干渉計に改良を加えて、空間の等方性の検証をより高い精度で達成するため、本実験を計画した。

実験装置に工夫を加えて注意深い調整を行うことで、1979年のプリレ・ホールの実験より精度の良い結果を得ることを目指した。しかし結果は、後に定義する空間の異方性の割合を表すパラメータ  $\sqrt{\xi^2 + \eta^2}$  の値は

$$\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 5.74 \times 10^{-10}$$

に終わった。

## 2 歴史的背景

### 2.1 光の干渉実験

19世紀にヤングやフレネルによる光の干渉・回折の実験が行われて以降、光は波動であるという説が有力になっていった。しかし光が波動であるなら、それを伝える媒質が存在しなければならぬ。そこで光を伝える媒質としてエーテルという物質の存在が想定され、エーテルを検出するための実験が数多く行われた。

エーテルの検出を試みる実験は、光の干渉現象を利用したものが多い。以下の節で歴史上行われてきたいくつかの実験について概観するが、各実験の到達した精度を評価するために空間の歪みの割合を表す量  $h$  をここで導入する。

マイケルソン型干渉計において、基線長  $L_1, L_2$  の腕を往復して観測点に到達した光の位相差  $\Delta\phi$  は、光の波長を  $\lambda$  とすると

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{2L_1}{\lambda} - 2\pi \frac{2L_2}{\lambda} = \frac{4\pi\Delta L}{\lambda} \quad (\text{ただし、}\Delta L = L_1 - L_2)$$

である。エーテルの検出実験では、エーテルの運動方向に対応した光速度の相違を検出することを目的としていた。しかし、光速度が変わると考えるか、空間が異方的であるという性質によって長さが変わると考えるかは等価である。干渉計において  $L_1 = L_2 = L$  とすれば、 $\Delta L$  は干渉計の向きを変えたときの空間の異方性による両腕の基線長の長さの差である。従って、 $h$  を

$$h \equiv \frac{\Delta L}{L} = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi$$

と定義すれば、これは空間の歪みの割合を表す。

#### 2.1.1 マイケルソン (1881年)

マイケルソンは、光がエーテルの流れに対して平行に進むときと垂直に進むときでは同じ距離を往復するのにかかる時間に差が出ることに気づき、干渉計の向きによる干渉縞の変動を観測し、

エーテルに対する地球の相対速度を検出しようとした。

結果、空間の歪みの割合は  $h = 2.5 \times 10^{-9}$  であった。この観測結果は予想された値より小さく、エーテルに対する地球の相対運動を検出することはできなかった。このことから地球はエーテルに対して静止しているか、エーテルは存在しないかのどちらかということになる。マイケルソンはこの実験の論文において後者を選択し、静止エーテルの仮説を否定した。

### 2.1.2 マイケルソン、モーレー (1887 年)

マイケルソンとモーレーは、1881 年のマイケルソンの実験装置をもっと堅牢なものに改良し、マイケルソンの実験 (1881 年) を追試した。1.5 m 四方の正方形で厚さが 30 cm ある岩石の上に光学系を配置し、それを水銀の上に浮かべて 6 分周期で回転させた。液体に浮かべることで回転軸が鉛直方向からずれることを防止し、光路長を延長するために 16 個の鏡で多重反射させ、合計 11 m の基線長を得た。

光源として丸芯ランプのアルガン灯 ( $\lambda = 6 \times 10^{-7}$  m) を使い、空間の歪みの割合は  $h = 1.4 \times 10^{-10}$  という結果を得た。これは、エーテルの地球に対する相対運動の速さが地球の公転速度の 6 分の 1 以下であることを意味し、静止エーテルに対しやはり否定的結果に終わった。

### 2.1.3 ブリレ、ホール (1979 年)

周波数の絶対的安定度の高い、波長  $3.39 \mu\text{m}$  のメタン安定化ヘリウム・ネオンレーザーを基準にして、回転する高安定ファブリペロー共振器の共振周波数の方位による振動を観測した。

ファブリペロー共振器の共振周波数の変動周期は、回転台の回転周期の 2 倍である。この実験では 0.1 Hz の回転周波数で台を回したので、0.2 Hz の信号として共振周波数の変動を抽出した。結果は  $h = 5 \times 10^{-15}$  であった。

## 3 実験の原理と方法

### 3.1 実験装置と基本原理

#### 3.1.1 実験装置

実験装置の概念図を図 1 に示す。光源を出た光はビームスプリッターによって 2 つの光に分けられ、それぞれ別々の鏡の方向に進み反射する。ほぼ同じ経路を通過して戻ってきた光は、再びビームスプリッターのところで干渉した 2 つの光に分けられ、それぞれフォトディテクターに入る。このフォトディテクターによって干渉光の強度が電圧に変換されるので、オシロスコープを使って干渉の様子を測定できる。

光源としては波長 1064 nm の YAG レーザーを用い、基線長は  $L_1 = L_2 = 26.0 \pm 0.2$  cm にとった。また、実験装置全体を真空容器の中に入れ、さらにその真空容器を回転台の上に固定した。実験装置の回転はモーターによって行い、コンピュータープログラム vee で制御した。回転周波数は 0.01 Hz に設定し、等速回転時間は 110 秒とした。また、回転の折り返しでの慣性による振動を避けるために折り返しは台形加減速させ、加減速時間はそれぞれ 1 秒とした。

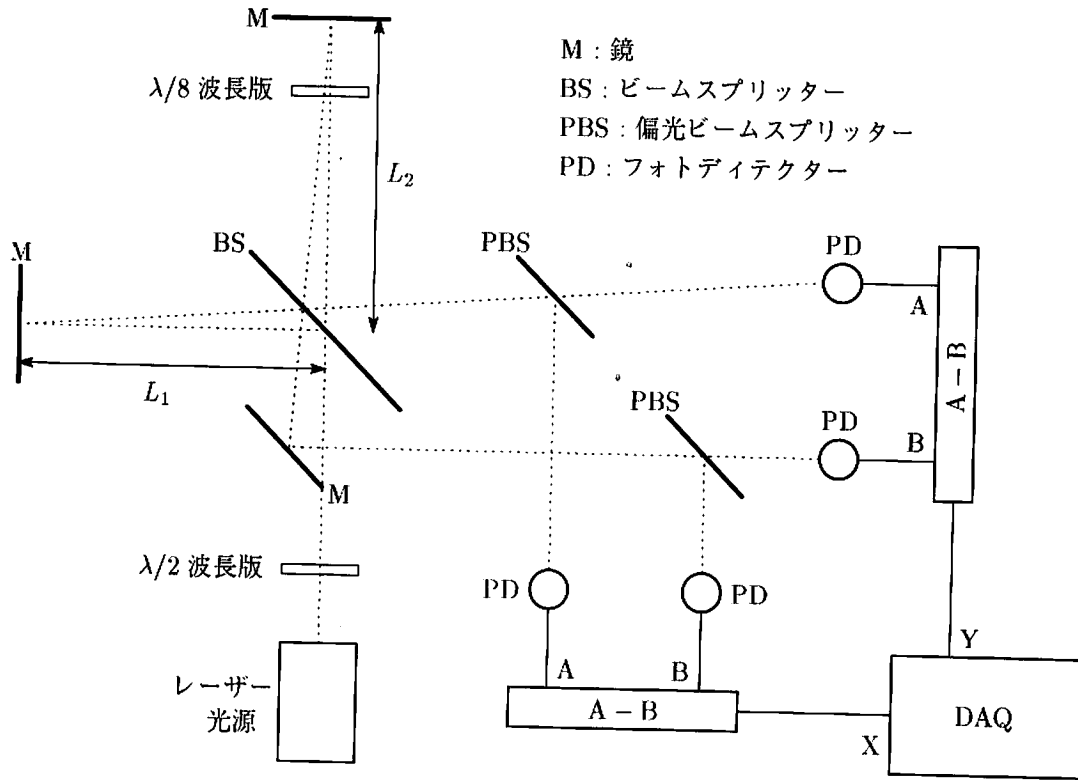


図 1: 実験装置の概念図

### 3.1.2 測定の原理

この実験装置において、レーザー光の波長を  $\lambda$  とし、中央のビームスプリッター (以下 BS) への入射光の電場を

$$E_{in} = E e^{i2\pi ct/\lambda}$$

とすると、2つ鏡で反射して再び BS に戻ってくる光の電場は、それぞれ

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} e^{-i2\pi 2L_1/\lambda}, \quad E_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} e^{-i2\pi 2L_2/\lambda}$$

と書ける。その後 BS から出る 2つの干渉光の電場を  $E_{anti}$ ,  $E_{sym}$  とすると

$$E_{sym} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_1 - \frac{1}{\sqrt{2}} E_2 = \frac{1}{2} E_{in} e^{-i\phi_+/2} (e^{-i\phi_-/2} + e^{i\phi_-/2})$$

$$E_{anti} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} E_2 = \frac{1}{2} E_{in} e^{-i\phi_+/2} (e^{-i\phi_-/2} - e^{i\phi_-/2})$$

となる。ただし

$$\phi_+ = \frac{4\pi}{\lambda} (L_1 + L_2), \quad \phi_- = \frac{4\pi}{\lambda} (L_1 - L_2)$$

とおいた。これから sym 方向と anti 方向の光の強度は、それぞれ

$$P_{\text{sym}} = |E_{\text{sym}}|^2 = E^2 \cos^2(\phi_-/2) = \frac{E^2}{2} (1 + 2 \cos \phi_-)$$

$$P_{\text{anti}} = |E_{\text{anti}}|^2 = E^2 \sin^2(\phi_-/2) = \frac{E^2}{2} (1 - 2 \cos \phi_-)$$

と計算できるから、その差は

$$P_{\text{sym}} - P_{\text{anti}} = 2E^2 \cos \phi_-$$

となる。ここで  $\phi_-$  は  $L_1$  を通った光と  $L_2$  を通った光の位相差  $\Delta\phi$  であるから、sym 方向の光の強度と anti 方向の光の強度の差を測定することによって空間の歪みの効果を測ることが可能となる。

### 3.2 いくつかの工夫

本実験は基本的にはマイケルソン型干渉計による光の干渉を利用するものであるが、次のような工夫がなされている。

- 干渉計を回転させながら測定することにより、検出すべき信号の周波数を自由に設定できる。
- 回転方向を1回転ごとに反転させることにより、解析の段階で装置の性質に起因するノイズを相殺することができる。また、電源の供給や信号の取り出しを容易にすることにもなる。
- $\lambda/8$  波長板を用いた2位相検出を行うことにより、干渉縞をフィードバック回路で制御する必要がなくなる。
- DAQの前にローパスフィルターを通すことにより、不必要な高周波成分を取り除くことができる。

以下の節で各項目について詳しく説明する。

#### 3.2.1 干渉計の回転

空間の異方性として、ある軸方向には縮み、それと垂直な方向には伸びる、というモデルを用いて考える(図2参照)。このような空間の中でマイケルソン型干渉計を回転させると、回転角が  $180^\circ$  異なる位置関係にある2つの干渉計に対する空間の歪みによる影響は等しいことが分かる。従って、干渉計全体が1周する間に位相差は2回同じ変動をする。空間の歪みによる位相差の変動を測定するためには、自由に設定した干渉計の回転周波数の2倍の周波数成分を測定することになる。

#### 3.2.2 ノイズの相殺

本実験では干渉計の回転方向を1回転ごとに反転させた。すると、1回転の間に観測される位相差の変動と反対周りの1回転の間に観測される位相差の変動とは、時間的に反転されているはずである。データ処理する際に、逆回転のデータを反転させた上で正回転のデータとの平均をとると、装置のゆっくりとしたドリフトに起因するノイズを相殺し、直流成分にしてしまうことができる(図3参照)。直流成分は測定したい周波数成分に影響を与えないので、余計なドリフトによる影響を消すことになる。

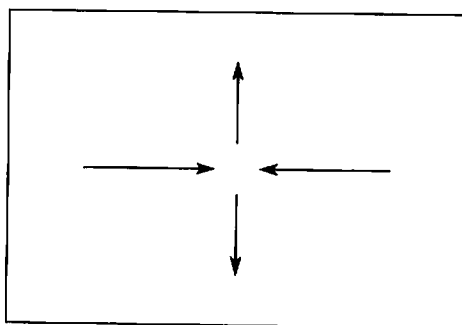


図 2: 空間の歪み方のモデル

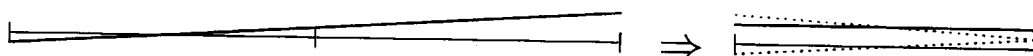


図 3: ドリフトを直流成分にする原理

### 3.2.3 2 位相検出

従来のマイケルソン型干渉計では動作点を決めなければ信号が取れない。この不具合を解消するために、実験装置に  $\lambda/2$  波長板と  $\lambda/8$  波長板、さらに  $P$  偏光と  $S$  偏光を分ける偏光ビームスプリッター (PBS) を取りつける。

実験装置において、光源を出た光はまず  $\lambda/2$  波長板を通過し、直線偏光面が回転するので、 $\lambda/2$  波長板の角度を調節することによってレーザーの高速軸成分と低速軸成分の大きさが等しくなるようにする。次に BS で反射した光は  $\lambda/8$  波長板を 2 回通過するので、BS に戻ってきたときには低速軸成分は高速軸成分に対して位相が  $\pi/2$  だけ遅れる。このため、PBS で高速軸成分だけを取り出して差を持ったもの ( $X$  とする) は  $\cos \Delta\phi$  に比例するが、低速軸成分だけを取り出して差を持ったもの ( $Y$  とする) は  $\cos(\Delta\phi - \pi/2) = \sin \Delta\phi$  に比例する。従って、これら 2 つの信号は

$$X = 2E^2 \cos \Delta\phi, \quad Y = 2E^2 \sin \Delta\phi$$

となり、オシロスコープの XY モードで表示させれば円を描く。

通常のマイケルソン型干渉計では位相差の変動をフィードバックで制御する必要があるが、 $\lambda/8$  波長板を通すことで 2 位相を取り出すことができれば、動作点を固定することなく位相差の変動を追うことができる。

### 3.2.4 ローパスフィルタ

3.2.1 節で述べたように、本実験で興味のある信号は干渉計の回転周波数の 2 倍の周波数の信号である。今回の実験では 0.01 Hz で回転させるので、1 Hz 以上の信号は必要ない。また、DAQ のサンプリング周波数が 20 Hz であるから、高周波成分があるとエイリアシングによって本来存在しない低周波信号を作ってしまうことになる。以上の理由から、DAQ の前にカットオフ周波数 1.06 Hz のローパスフィルターを挟んだ。

## 4 データ解析

### 4.1 解析方法

データ解析の方法として次のような方法を使う。1回転毎のデータの  $\cos 2ft$  成分と  $\sin 2ft$  成分を、それぞれ  $(X, Y)$  として座標平面上にプロットし、その原点からの距離の平均として空間の歪みの割合  $h$  を測定する。ただし、ここで得られた  $(X, Y)$  は地球に固定した座標系のものであるため、地球の自転を考慮するとき、これを太陽系に固定した座標系 (恒星座標系) に変換しなければならない。

さて、地球の自転角速度を  $\omega$  とし、恒星座標系で考える。実験系が置かれた緯度を北緯で  $\beta$  としたとき、ある時刻  $t$  に北を向く単位ベクトル  $\hat{N}$  と西を向く単位ベクトル  $\hat{W}$  が、それぞれ

$$\hat{N} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & 0 \\ \sin \omega t & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \beta \\ 0 \\ \cos \beta \end{pmatrix}, \quad \hat{W} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & 0 \\ \sin \omega t & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

となるように、地球の公転面内に  $x$  軸と  $y$  軸を、それに垂直に地球の北極側に  $z$  軸をとる。いま、 $(x, y)$  はそれぞれ  $x$  軸の向き、 $y$  軸の向きに置かれたオリジナルの長さ  $x, y$  のものであり、それが空間の異方性によって  $(x', y')$  と観測されたとする。このとき、次の関係を仮定する。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \xi & \eta \\ \eta & 1 - \xi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

ただし、 $\xi$  と  $\eta$  はそれぞれ  $x$  軸方向と  $y$  軸方向に関する空間の歪みを表す微小パラメータであり、 $z$  方向の異方性はないとする。

ここで、オリジナルの長さ  $L$  のものを北向きに置くと、先端の位置を示すベクトル  $\vec{L}_N$  は、空間の異方性を考慮すると

$$\vec{L}_N = L \begin{pmatrix} (1 + \xi) \sin \beta \cos \omega t + \eta \sin \beta \sin \omega t \\ \eta \sin \beta \cos \omega t + (1 - \xi) \sin \beta \sin \omega t \\ \cos \beta \end{pmatrix}$$

となる。同様に西向きに置くと、先端の位置を示すベクトル  $\vec{L}_W$  は

$$\vec{L}_W = L \begin{pmatrix} -(1 + \xi) \sin \omega t + \eta \cos \omega t \\ -\eta \sin \omega t + (1 - \xi) \cos \omega t \\ 0 \end{pmatrix}$$

となる。よって、それぞれのベクトルの長さは、 $\xi, \eta$  の2次以上の項は無視すると

$$L_N \simeq L(1 + \xi \sin^2 \beta \cos 2\omega t + \eta \sin^2 \beta \sin 2\omega t)$$

$$L_W \simeq L(1 - \xi \cos 2\omega t - \eta \sin 2\omega t)$$

と計算でき、その差は  $X$  に等しいので

$$X = L_N - L_W = (\xi \cos 2\omega t + \eta \sin 2\omega t)(1 + \sin^2 \beta)L$$

を得る。同様に、西向きと南向きに置いたときの差  $Y$  は、上式で  $2\omega t \rightarrow 2\omega t + \pi/2$  として

$$Y = L_W - L_S = (-\xi \sin 2\omega t + \eta \cos 2\omega t)(1 + \sin^2 \beta)L$$

を得る。以上より、空間の異方性を表すパラメータ  $\xi, \eta$  は

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \frac{1}{(1 + \sin^2 \beta)L} \begin{pmatrix} \cos 2\omega t & -\sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & \cos 2\omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

と求められる。本実験では  $\sqrt{\xi^2 + \eta^2}$  によって空間の異方性を検証する。

## 4.2 プログラム

### 4.2.1 解析に用いるファイル

実験装置の回転を制御しているプログラム `vee` を用いて、DAQ に通して電圧から変換された時系列データを 4 個のファイルにセーブした。DAQ のサンプリングレートは 20 Hz である。また、解析をする際に必要となるファイルを `vee` を用いて 4 個作った。それぞれのファイル名とその内容は次の通りである。

- `ch1.dat` 高速軸成分に関する波形  $P_{\text{sym}} - P_{\text{anti}} = 2E^2 \cos \Delta\phi$  の時系列データファイル
- `ch2.dat` 低速軸成分に関する波形  $P_{\text{sym}} - P_{\text{anti}} = 2E^2 \sin \Delta\phi$  の時系列データファイル
- `temperature.dat` 温度の時系列データファイル
- `intensity.dat` レーザー強度の時系列データファイル
- `number.dat` 1 回転毎に時系列データのデータ点数を記録したファイル
- `time.dat` 1 回転毎に測定開始時刻を記録したファイル
- `data.dat` 1 周のデータ点数を記録したファイル 本実験では  $20 [\text{Hz}] \times 100 [\text{sec}] = 2000$  [点]
- `rate.dat` サンプリングレートを記録したファイル 本実験では 20

### 4.2.2 解析プログラムの解説

本実験では解析は全て Mathematica を用いて行った。この節では用いた解析プログラムの流れを解説する。なお、実際の Mathematica のプログラムリストは **Appendix** に掲載した。

1. 各種パッケージの読み込みと、基線長とレーザー光の波長の設定をする
2. 各種データファイルを読み込む
3. 高・低速軸成分に関する波形の時系列データを、それぞれ各回転毎に端の余分のデータを取り除いて 1 周分のデータ (本実験では 2000 個) を取り出し、新しい波形データを作る
4. 正回転のデータと反転させた逆回転のデータとの平均を取る
5. 2 つの波形データから位相変動に変換する
6. 1 周ごとにウィンドウを施す
7. ウィンドウを施していない位相変動のデータから  $2f$  成分を取り出しプロット、さらに空間の歪みの割合  $h$  を計算する



8. ウィンドウを施した位相変動のデータから  $2f$  成分を取り出しプロット、さらに空間の歪みの割合  $h$  を計算する
9. ウィンドウを施していない位相変動のデータとウィンドウを施した位相変動のデータ、それぞれについて恒星座標系に変換したあとプロット、さらに空間の異方性を表すパラメータ  $\xi, \eta$  を計算する
10. 温度の時系列データとレーザー強度の時系列データ、それぞれのサンプリングレートを 1000 分の 1 に減らした上で全体をプロットする
11. 1 周毎にウィンドウを施した位相変動のデータからスペクトルの平均を計算し、プロットする

## 5 実験結果

実験は次の 4 つの条件のもとで行った。以下の節でそれぞれの実験結果について解説する。

節	回転	真空	測定時間
5.1.1	させない	引かない	80 時間
5.1.2	させない	引く	12 時間
5.2.1	させる	引かない	38.5 時間
5.2.2	させる	引く	34.5 時間

### 5.1 光学系を回転させない測定

実験装置を回転させることで初めて、空間の異方性に起因する信号が回転周波数の 2 倍の周波数で得られる。従って、実験装置を回転させない状態で測定したデータを回転させた場合と同じ手順で解析すれば、実験装置のノイズによる信号の大きさ、つまりこの実験装置で信号として測定できる上限を見積もることができる。

真空を引かない場合と真空を引いた場合について、1 周毎にウィンドウを施した位相変動のデータから計算したスペクトルの平均を図 4 に示す。真空を引くことによって周波数が  $0.01 \sim 1$  Hz の範囲のノイズが大きくカットさせていることが分かる。

ここでは実際には光学系を回転させないが、回転周波数  $0.01$  Hz、等速回転時間  $110$  秒の回転を想定して解析した。その結果を真空を引かない場合と引いた場合について以下の節で示す。

#### 5.1.1 真空を引かない場合

回転させず真空を引かない測定 (1 月 10 日から約 80 時間) について、ウィンドウを施した位相変動のデータから  $2f$  成分を取り出しプロットしたグラフを図 6 に、さらにそれを恒星座標系に変換したあとプロットしたグラフを図 7 に示す。

また、これらのデータから計算した空間の歪みの割合  $h$  と空間の異方性を表すパラメータ  $\xi, \eta$  は

$$\begin{aligned} \text{ウィンドウなし} \quad h = 5.52 \times 10^{-9} \quad \xi = -3.30 \times 10^{-11} \quad \eta = -1.91 \times 10^{-11} \\ \sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 3.81 \times 10^{-11} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ウィンドウあり} \quad h = 5.48 \times 10^{-9} \quad \xi = -3.47 \times 10^{-11} \quad \eta = -3.24 \times 10^{-11} \\ \sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 4.75 \times 10^{-11} \end{aligned}$$

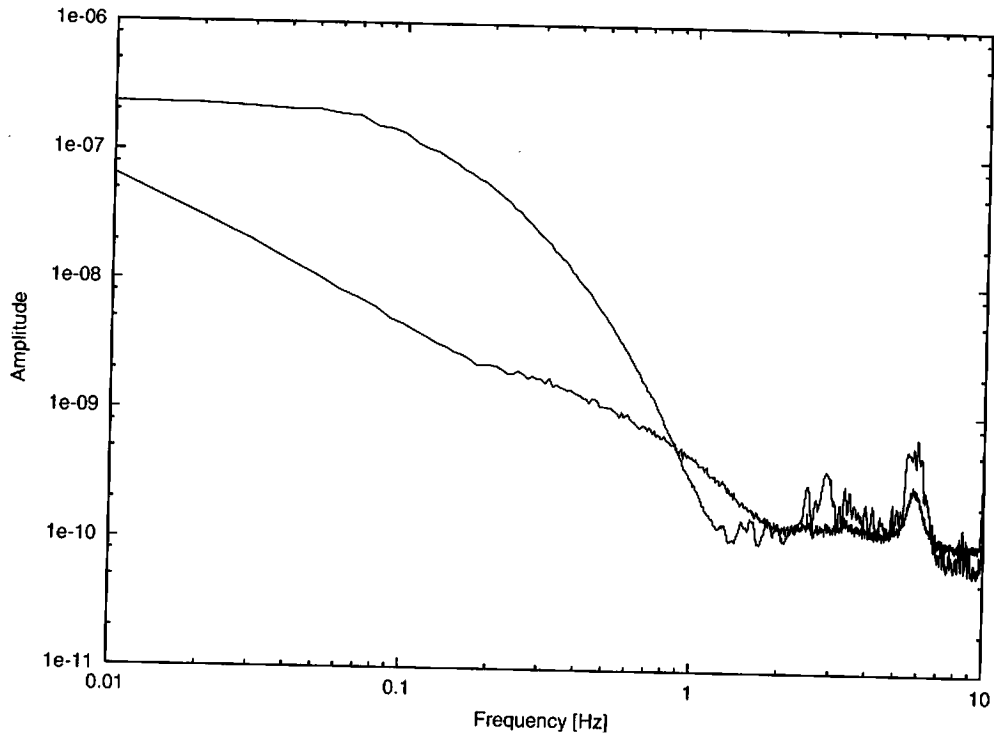


図 4: 回転させないときのスペクトル

となった。

### 5.1.2 真空を引いた場合

回転させず真空を引いた測定(1月23日から約12時間)について、ウィンドウを施した位相変動のデータから  $2f$  成分を取り出しプロットしたグラフを図8に、さらにそれを恒星座標系に変換したあとプロットしたグラフを図9に示す。

また、これらのデータから計算した空間の歪みの割合  $h$  と空間の異方性を表すパラメータ  $\xi, \eta$  は

ウィンドウなし	$h = 7.72 \times 10^{-10}$	$\xi = 3.51 \times 10^{-11}$	$\eta = -1.45 \times 10^{-11}$
		$\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 3.80 \times 10^{-11}$	
ウィンドウあり	$h = 7.46 \times 10^{-10}$	$\xi = 3.69 \times 10^{-11}$	$\eta = 2.82 \times 10^{-12}$
		$\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 3.70 \times 10^{-11}$	

となった。

## 5.2 光学系を回転させた測定

実際に実験装置を回転周波数 0.01 Hz、等速回転時間 110 秒で回転させて、回転周波数の 2 倍の周波数で現れる空間の異方性に起因する信号を測定した。

真空を引かない場合と真空を引いた場合について、1 周毎にウィンドウを施した位相変動のデータから計算したスペクトルの平均を図 5 に示す。真空を引くことによって周波数が 0.01 ~ 1 Hz の範囲のノイズが大きくカットされていることが分かる。また、2, 4, 6, 8 Hz の周波数に原因不明の大きなピークが見える。

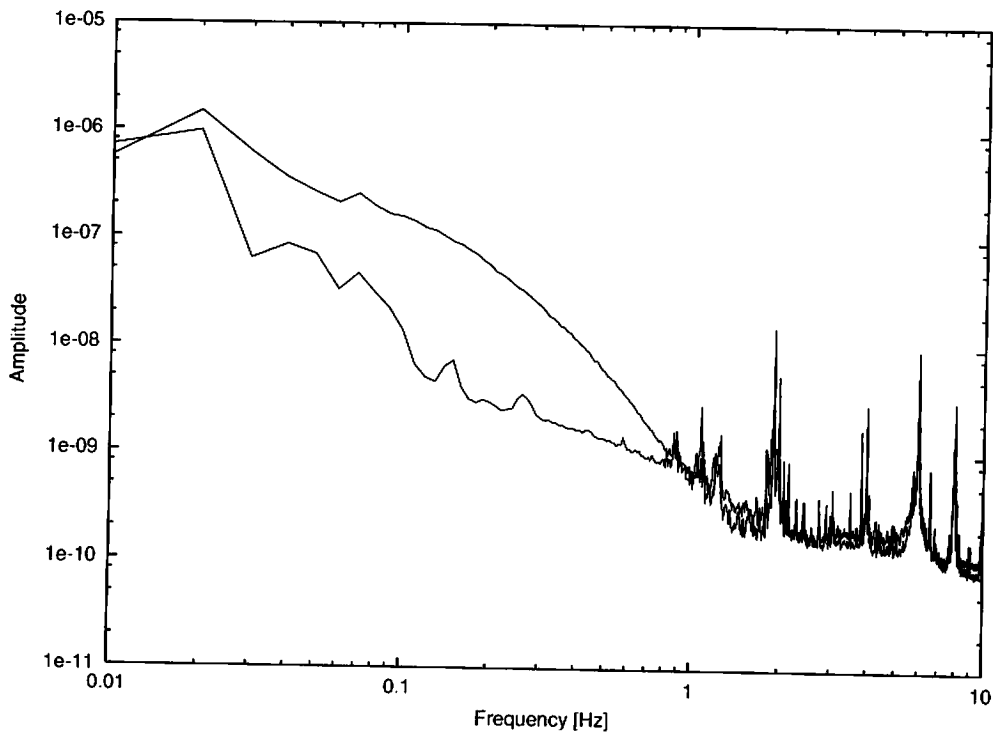


図 5: 回転させたときのスペクトル

ここでは実際に光学系を回転周波数 0.01 Hz、等速回転時間 110 秒で回転させて解析した。その結果を真空を引かない場合と引いた場合について以下の節で示す。

### 5.2.1 真空を引かない場合

回転させて真空を引かない測定 (1 月 17 日から約 38.5 時間) について、ウィンドウを施した位相変動のデータから  $2f$  成分を取り出しプロットしたグラフを図 10 に、さらにそれを恒星座標系に変換したあとプロットしたグラフを図 11 に示す。

また、これらのデータから計算した空間の歪みの割合  $h$  と空間の異方性を表すパラメータ  $\xi, \eta$  は

$$\text{ウインドウなし} \quad h = 4.25 \times 10^{-8} \quad \xi = 1.14 \times 10^{-9} \quad \eta = 1.04 \times 10^{-9}$$

$$\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 1.54 \times 10^{-9}$$

$$\text{ウインドウあり} \quad h = 4.03 \times 10^{-8} \quad \xi = 9.74 \times 10^{-10} \quad \eta = 9.94 \times 10^{-10}$$

$$\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 1.39 \times 10^{-9}$$

となった。

### 5.2.2 真空を引いた場合

回転させて真空を引いた測定 (1月24日から約34.5時間) について、ウインドウを施した位相変動のデータから  $2f$  成分を取り出しプロットしたグラフを図12に、さらにそれを恒星座標系に変換したあとプロットしたグラフを図13に示す。

また、これらのデータから計算した空間の歪みの割合  $h$  と空間の異方性を表すパラメータ  $\xi, \eta$  は

$$\text{ウインドウなし} \quad h = 2.67 \times 10^{-8} \quad \xi = -5.38 \times 10^{-10} \quad \eta = 2.65 \times 10^{-10}$$

$$\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 5.99 \times 10^{-10}$$

$$\text{ウインドウあり} \quad h = 2.64 \times 10^{-8} \quad \xi = -4.87 \times 10^{-10} \quad \eta = 3.05 \times 10^{-10}$$

$$\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 5.74 \times 10^{-10}$$

となった。

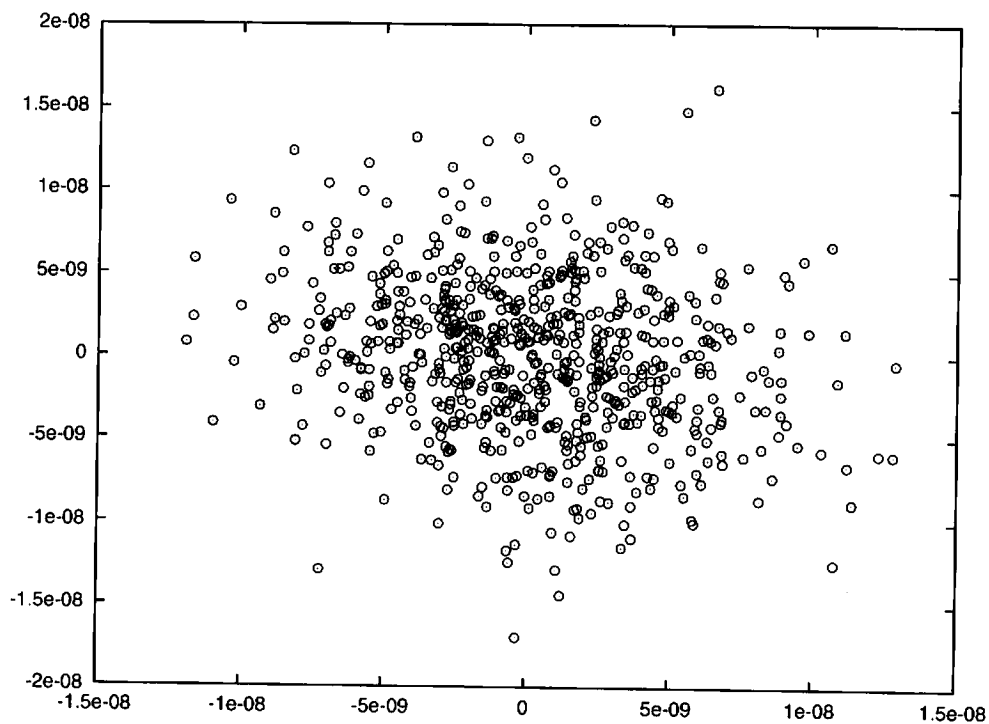


図 6: 回転させず真空を引かないときの位相変動の  $2f$  成分

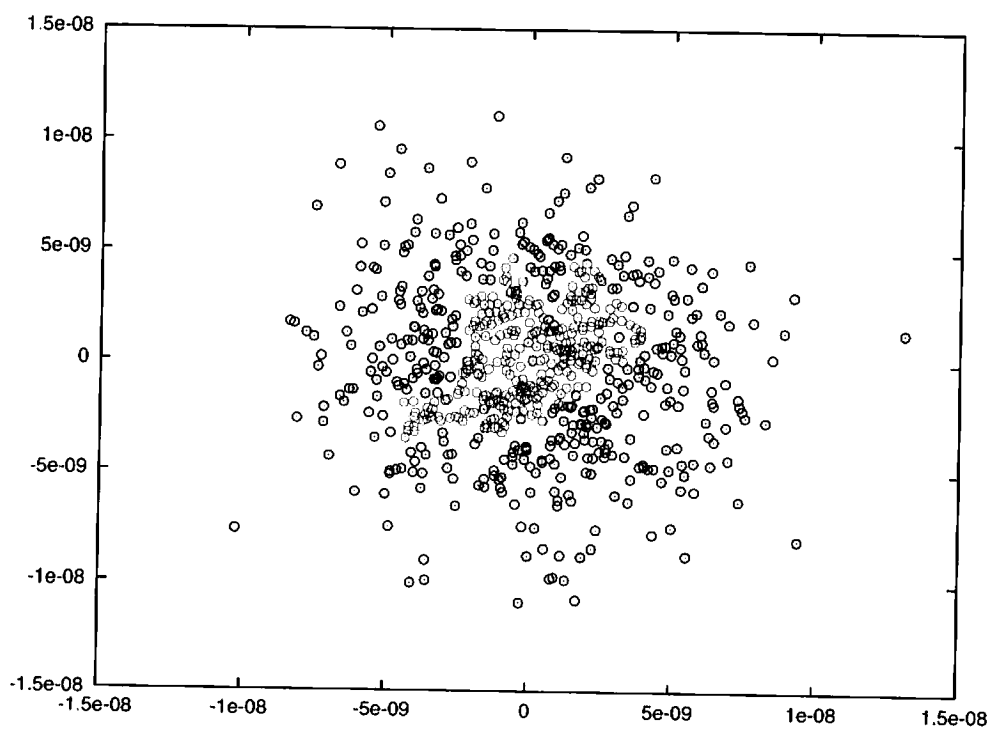


図 7: さらに恒星座標系に変換した位相変動の  $2f$  成分

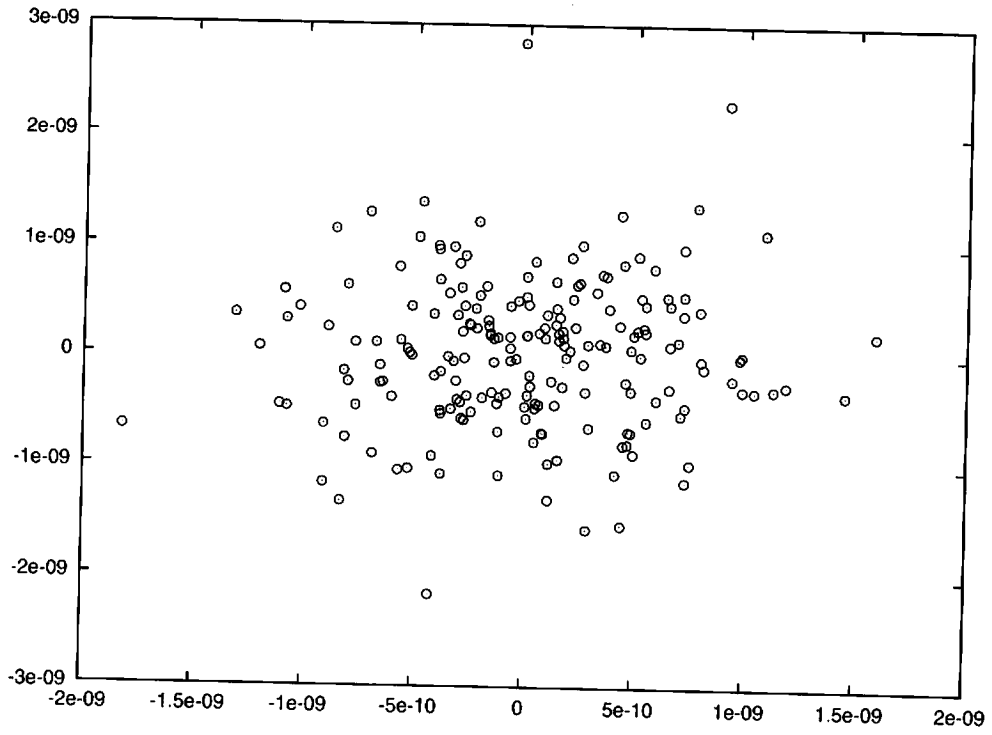


図 8: 回転させず真空を引いたときの位相変動の  $2f$  成分

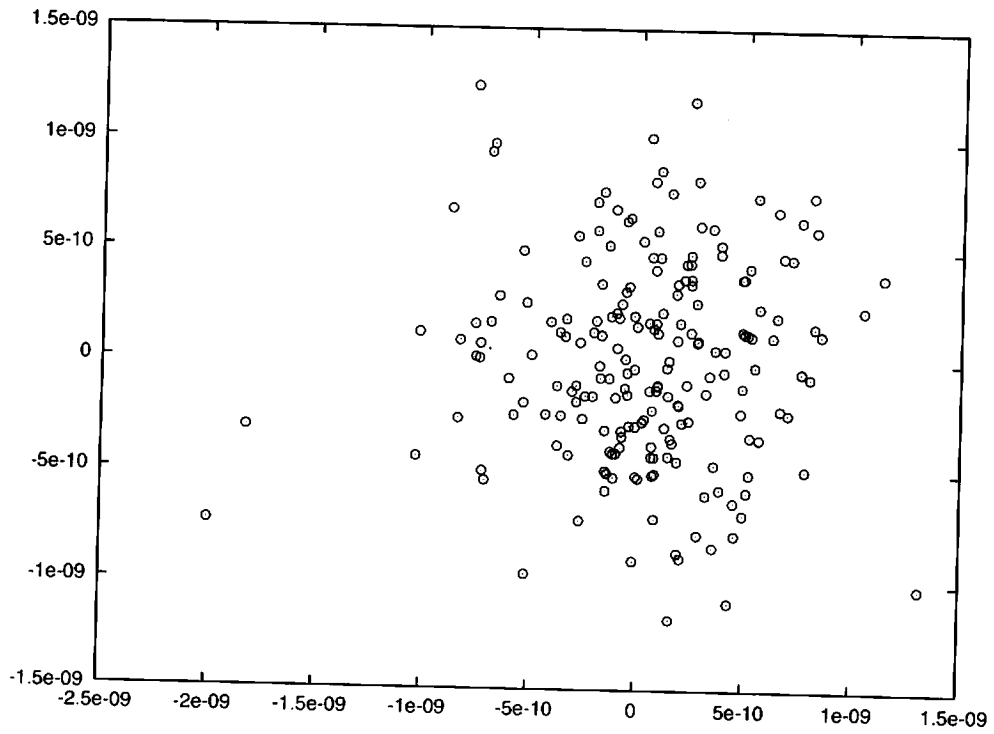


図 9: さらに恒星座標系に変換した位相変動の  $2f$  成分

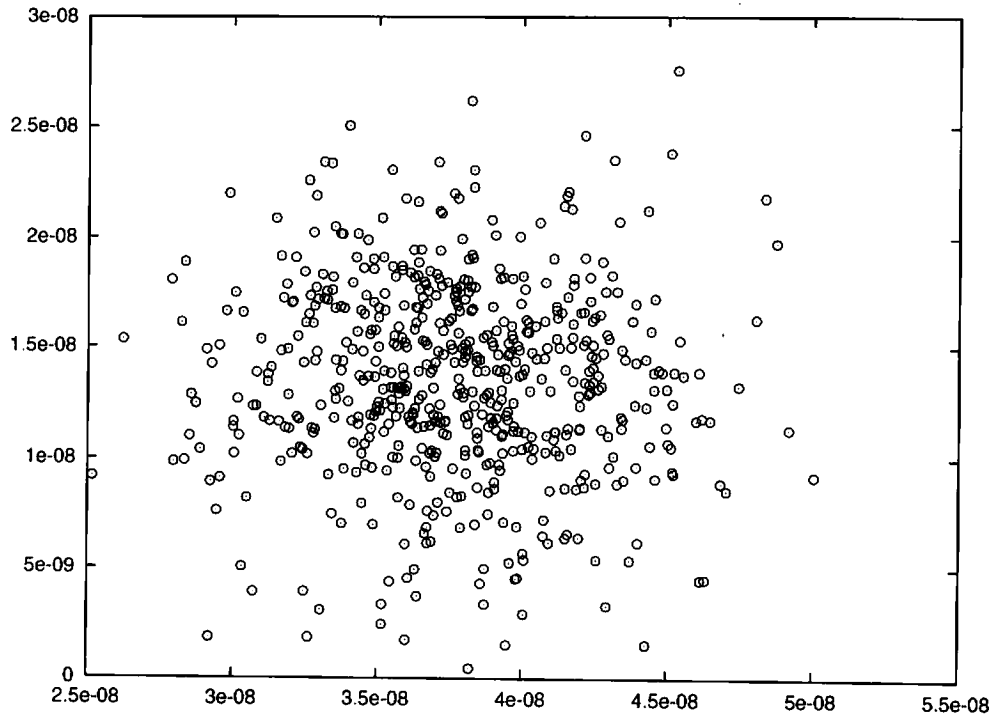


図 10: 回転させて真空を引かないときの位相変動の  $2f$  成分

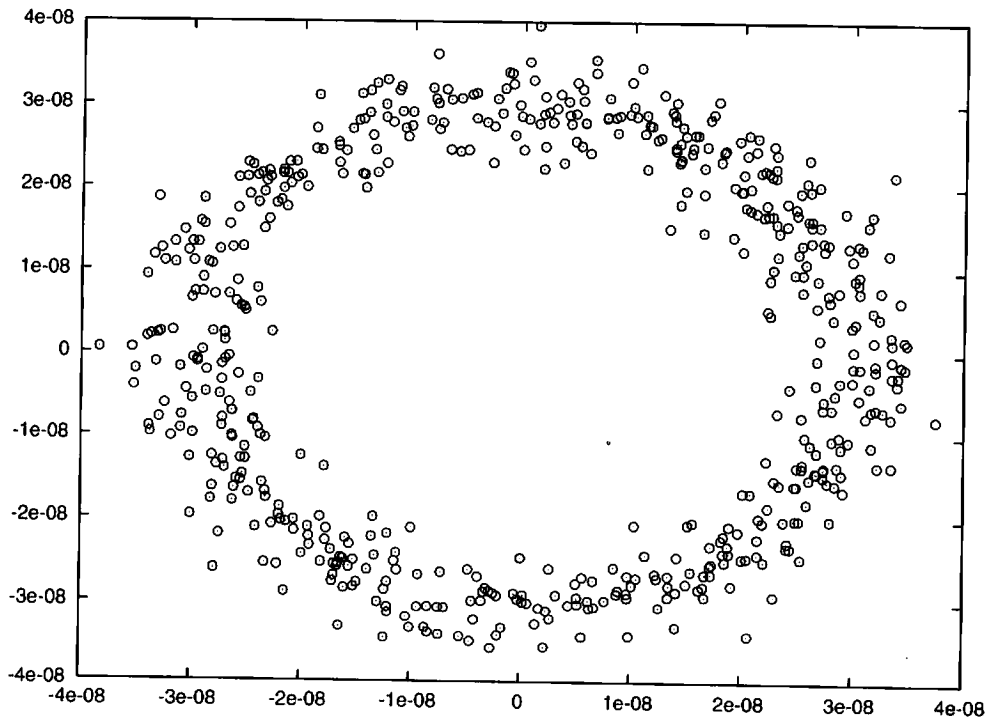


図 11: さらに恒星座標系に変換した位相変動の  $2f$  成分

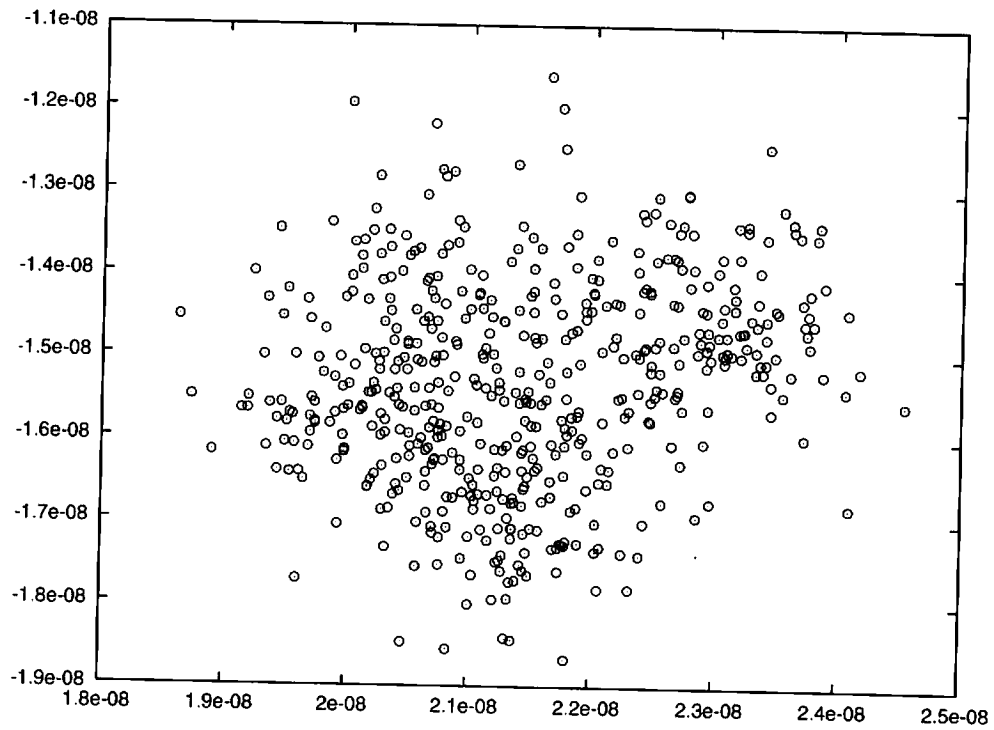


図 12: 回転させて真空を引いたときの位相変動の  $2f$  成分

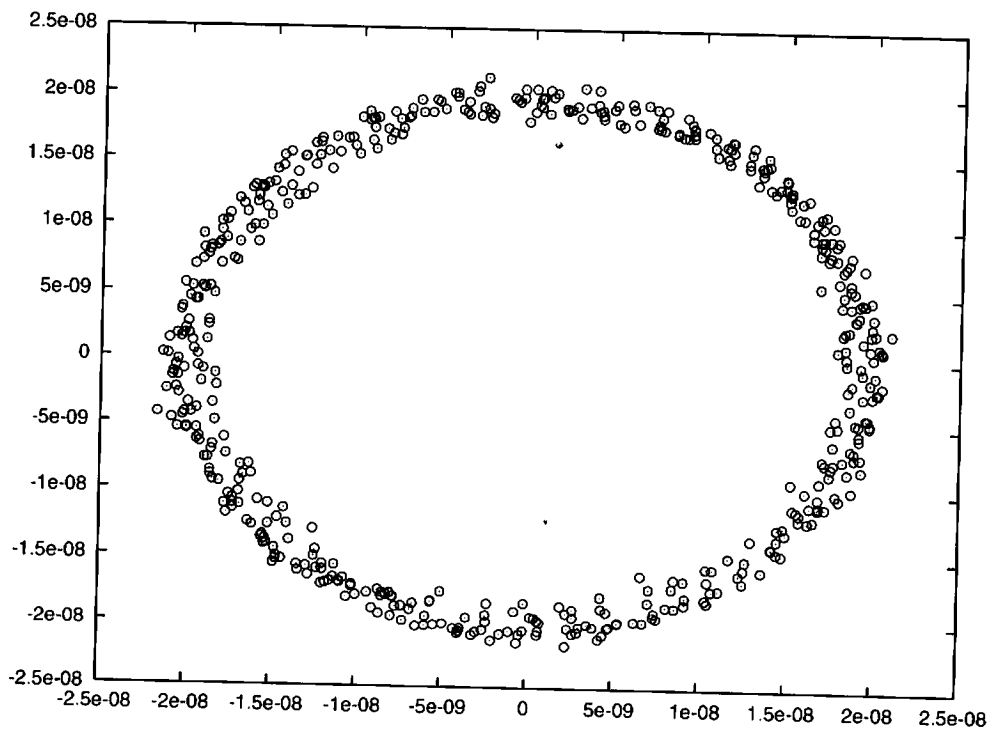


図 13: さらに恒星座標系に変換した位相変動の  $2f$  成分



## 6 考察

まず、実験結果をまとめると次のようになる。

回転	真空	異方性 $\sqrt{\xi^2 + \eta^2}$
させない	引かない	$4.75 \times 10^{-11}$
させない	引く	$3.70 \times 10^{-11}$
させる	引かない	$1.39 \times 10^{-9}$
させる	引く	$5.74 \times 10^{-10}$

### 6.1 測定結果について

光学系を回転させない測定により、空間の異方性を測ることのできる上限値は  $10^{-11}$  のオーダーであることが分かった。

さらに光学系を回転させる測定により、空間の異方性の割合を表すパラメータ  $\sqrt{\xi^2 + \eta^2}$  の値は

$$\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 5.74 \times 10^{-10}$$

となった。この実験の測定精度  $\sqrt{\xi^2 + \eta^2} = 5.74 \times 10^{-10}$  は、ブリレ・ホルの実験(1979年)の  $h = 5 \times 10^{-15}$  と比べてはるかに及ばなかった。

#### 6.1.1 温度変化とレーザー強度の関係

実験精度が悪い原因として、温度変化の影響が挙げられる。1月24日から約34.5時間、温度の時間変化とレーザー強度の時間変化を測定した。その結果をそれぞれ図14と図15に示す。

図14,15から良く分かるように、レーザー強度が温度変化の影響を受けて変化している。温度変化にともなってレーザー光の強度と周波数が変化するが、基線長  $L_1, L_2$  のわずかなずれなどのために、位相変動がレーザー周波数の変化の影響を受けて、精度の悪化につながったと考えられる。

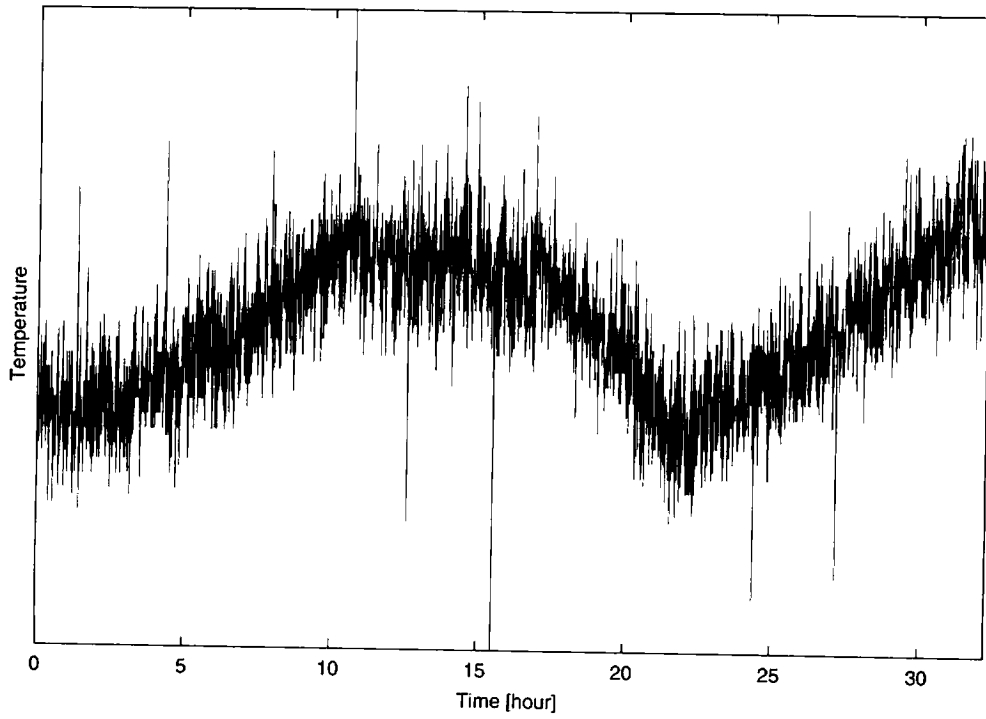


図 14: 温度の時間変化

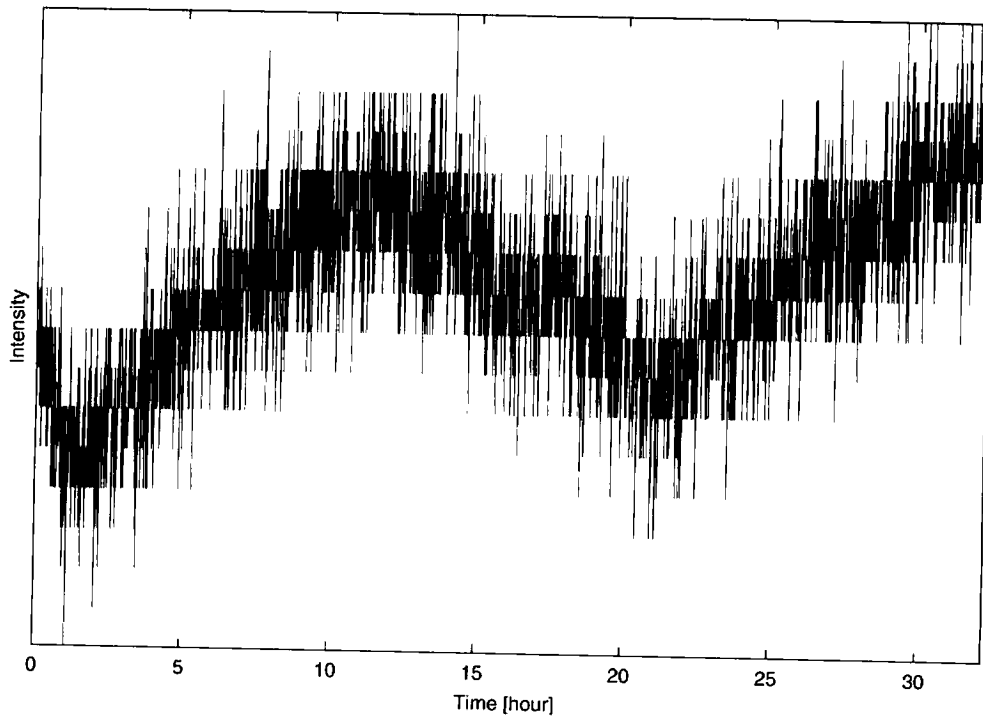


図 15: レーザー強度の時間変化

## 6.2 実験の精度を高めるためには

実験精度を上げるためには、さらなる工夫が必要である。

### 6.2.1 delay-lineの利用

今回行うことができなかつた工夫として、限られた大きさの実験装置の中で基線長を稼ぐ delay-line の利用がある。delay-line とは、ある曲率半径  $R$  を持つ凹球面鏡をある間隔  $l$  で置き、その間で光を多重反射させることで光路長を稼ぐ方法である (図 16 参照)。 $l = R(1 - \pi/N)$  とすることで  $N$  回折り返したあと、光は delay-line を抜ける。例えば、 $R = 1.2$  で 20 回折り返すには  $l = 0.7024$  m とすればよい。このとき全光路長は  $Nl = 14.0487$  m となる。

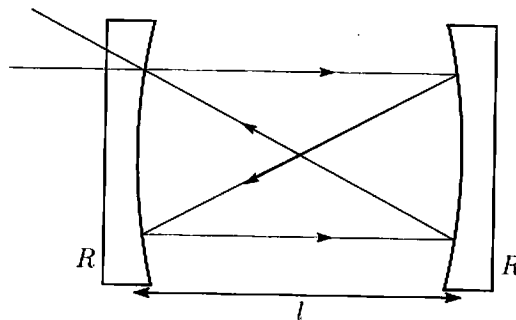


図 16:  $N = 4$  の delay-line

しかし、多重反射させるときに注意しなければならないのは反射率である。 $N$  回反射させると、反射率  $R_R$  の鏡の実質的な反射率は  $R_R^N$  になってしまう。従って、例えば 16 回反射させるのであれば、反射率が最低でも  $R = 0.999$  の凹球面鏡が必要であることが分かる (表 1 参照)。

表 1:  $N = 16$  のときの実質的な反射率

$R$	16 回反射時
0.9	0.1216
0.99	0.8179
0.999	0.9802
0.9999	0.9800
0.99999	0.9998

### 6.2.2 その他の工夫

また、細かい工夫としては以下のようなものを挙げることができる。

#### 1. 実験室の環境

実験装置の周りの環境は重要である。実験室内の人のたてる音はもちろんであるが、実験室内の機械類の振動音、空気の流れ (気圧の変化) などがノイズの原因となり得るので、実験を

する場の選択はしなければならない。さらに、地面振動などの影響も無視できないので、装置に対する耐震、あるいは実験台を吊るなどの措置が必要となる。

また、温度変化も実験機器を膨張・収縮させるため、耐温機器の選択や実験室の温度調整なども注意すべきである。例えば、アルミは熱膨張率が $\sim 10^{-6}$ であるが、インバーなどの材料にすれば台の変形を減らすことができる。

## 2. レーザー光源

6.1.1 節で見たように光源は温度変化などに対して強度・周波数が安定でなければならないし、長い距離を進んでも線幅が変わらないものが望ましい。また、精度が高くなったときにはドップラー効果による周波数の変化も考慮しなければならないようになるであろう。

## 3. 実験機器

光学系の機器に関しては、光が透過するものは透過性や反射するものは反射性が優れていなければならない。それによって光の減衰を防ぎ、強度を保つことができる。また、電気系統に関しては配線を工夫するなど、電流の熱雑音などに注意が必要である。

## 4. その他

人の腕に関わることには光学系などの配置や調整の仕方などがある。基線長  $L_1, L_2$  は可能な限り一致させなければならないし、コントラストも最大限まで上げなければならない。また、2 位相検出のための調整もさらに厳密にしなければならない。

# 7 感想と参考文献

## 7.1 感想

物理学における実験とは、1つのことを長期にわたってかつ精密にやり遂げなければならない忍耐の必要なものであることが分かった。僕は理論志望であるが、ここで学んだ経験は今後の研究生活においても生かされるであろうと思う。

## 7.2 参考文献

本実験を行うにあたって、以下の文献を参考にした。

- A.Brillet and J.L.Hall, Phys.Rev.Lett.42.549 (1978)
- 霜田光一 「歴史を変えた物理実験」 丸善 (1996)
- 安東正樹 坪野件輪講資料
- 小川・高城 前期実験レポート (2001)

## Appendix

4.2.2 節で解説したデータ解析のための Mathematica のプログラムリストをここに掲載する。各番号は 4.2.2 節の番号と対応している。

- ```
<<Graphics`
<<Statistics`
L=26.0/100;
lambda=1064*10^(-9);
```
- ```
wave1ch=ReadList["ch1.dat",Number,RecordSeparators -> {"",""}];
wave2ch=ReadList["ch2.dat",Number,RecordSeparators -> {"",""}];
temperature=ReadList["temperature.dat",Number,RecordSeparators -> {"",""}];
intensity=ReadList["intensity.dat",Number,RecordSeparators -> {"",""}];
Numdata=ReadList["number.dat",Number,RecordSeparators -> {"",""}];
time=ReadList["time.dat",Number,RecordSeparators -> {"",""}];
Num=ReadList["data.dat",Number][[1]];
Hz=ReadList["rate.dat",Number][[1]];
```
- ```
Kai=Dimensions[Numdata][[1]]
Numtotal=Table[0,{i,1,Kai}];
Do[Numtotal[[i]]=Numtotal[[i-1]]+Numdata[[i-1]],{i,2,Kai}]
hundred=Table[IntegerPart[(Numdata[[i]]-Num)/2]+Numtotal[[i]],{i,1,Kai}];
wave1=Table[wave1ch[[j+hundred[[i]]]],{i,1,Kai},{j,1,Num}];
wave2=Table[wave2ch[[j+hundred[[i]]]],{i,1,Kai},{j,1,Num}];
```
- ```
neowave1=Table[(wave1[[i,j]]+wave1[[i+1,Num+1-j]])/2,{i,1,Kai-1,2},{j,1,Num}];
neowave2=Table[(wave2[[i,j]]+wave2[[i+1,Num+1-j]])/2,{i,1,Kai-1,2},{j,1,Num}];
```
- ```
data=Table[(Arg[neowave1[[i,j]]+I neowave2[[i,j]]]),
  {i,1,IntegerPart[Kai/2]},{j,1,Num}];
Do[For[j=2,j<=Num,j++,
  If[data[[i,j]]-data[[i,j-1]]>Pi*3/2,
    Do[data[[i,k]]=data[[i,k]]-2 Pi,{k,IntegerPart[j],Num}]];
  If[data[[i,j]]-data[[i,j-1]]<-Pi*3/2,
    Do[data[[i,k]]=data[[i,k]]+2 Pi,{k,IntegerPart[j],Num}]]],
  {i,1,IntegerPart[Kai/2]}]
average=Table[Mean[data[[i]]],{i,1,IntegerPart[Kai/2]}];
data=Table[(data[[i]]-average[[i]])*lambda/(2 Pi),{i,1,Kai/2}];
```
- ```
modified=data;
Do[modified[[i,j]]=data[[i,j]]*1/2*(1-Cos[Pi*10/Num*j]),
  {i,1,IntegerPart[Kai/2]},{j,1,IntegerPart[Num/10]}]
Do[modified[[i,j]]=data[[i,j]]*1/2*(1-Cos[Pi*10/Num*j]),
  {i,1,IntegerPart[Kai/2]},{j,IntegerPart[9*Num/10]+1,Num}]
```

```

7. component=Table[2/Num*Sum[data[[i, r]]*Exp[2*Pi*I*(r-1)*2/Num],
  {r, 1, Num}], {i, 1, IntegerPart[Kai/2]};
result=Table[{Re[component[[i]]]/L, Im[component[[i]]]/L},
  {i, 1, IntegerPart[Kai/2]};
ListPlot[result, PlotRange -> All]
h=Mean[Abs[component]]/L

8. window=Table[(7/8 + 1/(200*Pi))(-1/2)*2/Num*Sum[modified[[i, r]]
  *Exp[2*Pi*I*(r-1)*2/Num], {r, 1, Num}], {i, 1, IntegerPart[Kai/2]};
reswin=Table[{Re[window[[i]]]/L, Im[window[[i]]]/L},
  {i, 1, IntegerPart[Kai/2]};
ListPlot[reswin, PlotRange -> All]
h_win=Mean[Abs[window]]/L

9. hokui=2 Pi*35/360;
omega=2 Pi/(24*3600);
matrix=Table[1/(1+Sin[hokui]2)*
  {{Cos[2*omega*time[[2*i]]], -Sin[2*omega*time[[2*i]]]},
  {Sin[2*omega*time[[2*i]]], Cos[2*omega*time[[2*i]]]}},
  {i, 1, IntegerPart[Kai/2]};
starsys=Table[matrix[[i]].result[[i]], {i, 1, IntegerPart[Kai/2]};
starwin=Table[matrix[[i]].reswin[[i]], {i, 1, IntegerPart[Kai/2]};
ListPlot[starsys, PlotRange -> All]
ListPlot[starwin, PlotRange -> All]
xi=Mean[Transpose[starsys][[1]]]
eta=Mean[Transpose[starsys][[2]]]
xi_win=Mean[Transpose[starwin][[1]]]
eta_win=Mean[Transpose[starwin][[2]]]

10. NN=1000;
ondo=Table[{i/Hz/60, temperature[[i]]}, {i, 1, Dimensions[temperature][[1]], NN};
kyoudo=Table[{i/Hz/60, intensity[[i]]}, {i, 1, Dimensions[intensity][[1]], NN};
ListPlot[ondo, PlotJoined -> True]
ListPlot[kyoudo, PlotJoined -> True]

11. allft=Table[(7/8+1/(200*Pi))(-1/2)*Abs[Sqrt[2*Hz]*Fourier[modified[[i]]]],
  {i, 1, Kai/2};
allfrequency=Table[{{(i-1)/(Num/Hz),
  Sqrt[Sum[allft[[j, i]]2, {j, 1, Kai/2}]/(Kai/2)}}, {i, 2, Num/2}];
LogLogListPlot[ allfrequency, PlotJoined -> True, PlotRange -> All ]

```