

# 8. レーザー

## 目次

### 0. 目的と注意

### 1. レーザーの基礎

- 1.1 レーザーの原理
- 1.2 光の吸収と放出
- 1.3 反転分布

### 2. 色素レーザーの発振

- 2.1 実験用具
- 2.2 窒素レーザーの発振
- 2.3 色素レーザーの発振
- 2.4 実験例
  - 波長可変レーザー

### 3. LD(レーザーダイオード)を使った光速度測定

- 3.1 実験用具
- 3.2 LD を使った光速度の測定
- 3.3 オシロスコープの使い方、波形の保存方法
- 3.4 測定例

### 4. レーザー光の空間フーリエ変換

- 4.1 実験用具
- 4.2 回折パターン縮小の手順
- 4.3 回折フィルムによるレーザー光横モード変換
- 4.4 観測例

### 5. 輻射圧によるポリマー球の捕捉と推進

- 5.1 実験用具
- 5.2 実験手順

## 謝辞

## 参考文献

## 0. 目的と注意

レーザー技術は基礎・応用科学のさまざまな計測手段として欠かせないだけでなく、光通信や光ディスク、ホログラフィー・光ジャイロ・光加工など幅広く身の周りで応用されている。しかし自然光と人工的な光であるレーザー光の違いを発生原理に拠って説明できる人は少ないであろう。そこで本実験では、レーザー光の特性を活かした応用実験を行い、レーザーについて深い理解を得ることを目的とする。まず、実際にレーザー共振器を組んでレーザー光を発振させることにより、自然光とレーザー光の違いを体感してもらう。レーザー (Laser) という言葉は、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭文字をとって作られた語で、「放射の誘導放出による光増幅」の意味であるが、このことが実感できるだろう。また、レーザーの産業応用のほとんどは、レーザー技術と半導体技術の成果であるレーザーダイオードを利用している。そこで実際にレーザーダイオードを使って基礎物理定数である光速の測定を行う。これらにより、レーザーの扱い方に慣れ親しむとともに、光学実験の基礎も習得する。

実験ではパルスレーザーの中でも簡便に取り扱うことのできる窒素レーザーと、連続発振レーザーであるレーザーダイオード (LD)、ヘリウムネオンレーザー、LD 励起固体グリーンレーザーを用いて、パルス色素レーザーの発振および、レーザー光の特性を活かした応用実験を行う。

**注意1: 比較的高輝度のレーザーを使用するので、目に直接レーザー光を入れないように注意する(人にも向けない)。窒素レーザーを使用するときは紫外光をカットする保護眼鏡を着用する(可視光レーザーの場合も保護眼鏡を着用すること)。保護眼鏡を着用していても決してレーザー光を直接のぞきこんではならない。予期できない反射が起こる可能性があるので、光学実験中は露出している腕時計など身につけているもので反射性のものははずす(白衣着用を推奨)。同様の可能性があるのでレンズでレーザー光を反射させて見たりしてはいけない。光学配置の基本はレーザーの光路を一定の高さにそろえることで(光学台と平行に)、光学台から10-20cm程度の目より低い高さにすることが安全のために重要である。**

**注意2: レンズや鏡などの光学素子は手で触れないようにする。手で触れて指紋などがついて汚れたときは速やかにTAに報告しクリーニングしてもらう。光学素子のクリーニングは専用のクリーニングペーパーと有機溶剤を用いるので、勝手にやってはならない。**

### 実験内容:

#### 色素レーザーの発振

パルスレーザーの中でも簡便に取り扱うことのできる窒素レーザーを用いて、光共振器中の色素溶液を励起して色素レーザーを発振させる。色素の特性を生かして、波長可変レーザーも作る。

#### LD(レーザーダイオード)を使った光速度測定

DVD 書き込み用に使われている赤色レーザーダイオードを用いて、光速度を測定する。レーザーダイオードをパルス変調し、ミラー間を何回も往復させることにより遅延光学路をできるだけ長くして測定の精度向上を図る。

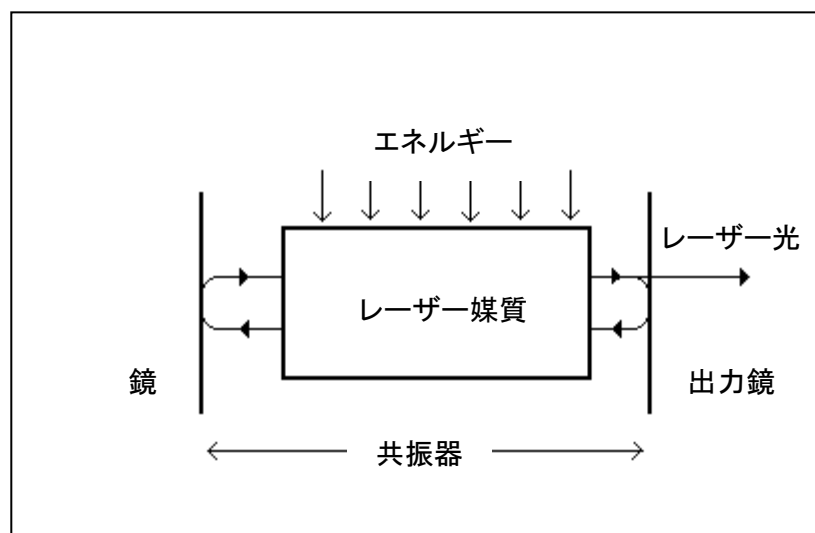
カラーテキストを <http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/eiji/3BexpLaser.pdf> に置いてある (内容は同じ)。

# 1. レーザーの基礎

## 1. 1. レーザーの原理

レーザー (Laser) という言葉は、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭文字をとって作られた語で、「放射の誘導放出による光増幅」の意味である。レーザーは図1. 1に示すように、原子や分子などにエネルギーをつぎこんで作られたレーザー媒質と光共振器とからなる。

図1. 1 レーザーの基本構成



レーザー媒質は、「特定の波長の光を増幅する状態にある物質」である。光共振器としては、反射性の高い2枚の鏡を向かい合わせたファブリ・ペロー型の干渉計が一般に用いられ、「軸方向に進む光の大部分を反射し、光を往復させて次々と増幅し、ついには発振状態にいたらしめるための光の閉じ込め」の役割をする。電気の言葉で言えば、レーザー媒質が「増幅機能を持つ能動体」、光共振器が「出力の一部を入力側にもどすフィードバック部」に対応して、「レーザー共振器」を構成する。

## 1. 2. 光の吸収と放出

レーザーの発振に関与する原子の2つのエネルギー準位について考えてみる。それらを準位1および準位2と呼ぶことにし、それぞれのエネルギーを、 $E_1$ および $E_2$  ( $E_1 < E_2$ ) とする。

励起状態にある原子あるいは分子は、まわりから何の影響を受けないでも、自発的に低いエネルギー状態に移り、最後には最も低い基底状態に戻る。準位2から準位1に移るとき、その間の差のエネルギーをなんらかの形で放出するが、光として放出するとき、その周波数 $\nu_0$ は、

$$\nu_0 = (E_2 - E_1) / h \quad (1. 1)$$

で与えられる。これはボーア (Bohr) の振動条件と呼ばれる式で、 $h$  はプランク (Planck) の定数である。このような光の自発的な放出を、自然放出 (spontaneous emission) という。

原子あるいは分子に周波数  $\nu_0$  の光が入射した場合、準位 1 にある原子あるいは分子はその光を吸収して準位 2 へ移る。これが（誘導）吸収（absorption）という。また、準位 2 の原子あるいは分子は入射した光に誘導されて、同じ周波数、同じ位相、同じ偏光状態の光を放出して準位 1 へ移る。これを誘導放出（stimulated emission）とよぶ。これらの様子を図 1. 2 に示す。

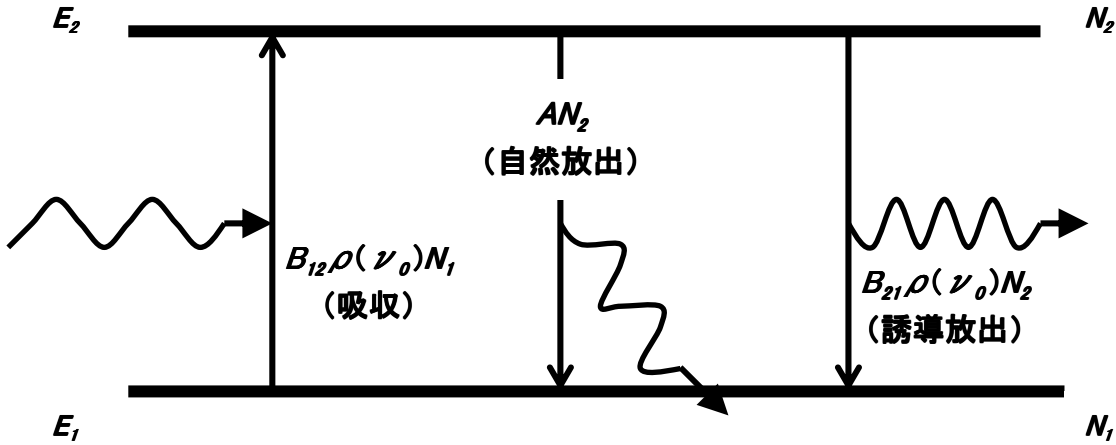


図 1. 2 2 準位系における光の吸収と放出の毎秒の確率

吸収と誘導放出はともに、入射光の分光エネルギー密度  $\rho(\nu_0)$  に比例する。また、それらの毎秒の確率をそれぞれ、 $B_{12}\rho(\nu_0)$ 、 $B_{21}\rho(\nu_0)$ 、自然放出の毎秒の確率を  $A$  とすると、

$$B_{12}=B_{21}=B \quad (1.2)$$

$$B=\frac{c^3}{8\pi\hbar\nu_0^3}A \quad (1.3)$$

の関係がある。 $A$  を自然放出係数、 $B$  を誘導放出係数とよんでいる。ここで、 $c$  は光速である。

### 1. 3. 反転分布

原子（分子）の系が温度  $T$  で熱平衡状態にあるとき、原子はボルツマン（Boltzman）分布をしており、準位 1 の原子数  $N_1$  と準位 2 の原子数  $N_2$  の比は、ボルツマン定数  $k$  を用いて、

$$N_2/N_1=\exp[-(E_2-E_1)/kT]=\exp[-h\nu_0/kT] \quad (1.4)$$

で与えられる。光の領域では一般に常温では  $h\nu_0 \gg kT$  であり、 $N_1 \gg N_2$  となる。この場合には、入射光があると誘導放出  $B_{21}\rho(\nu_0)N_2$  よりも、吸収  $B_{12}\rho(\nu_0)N_1$  のほうが多く起こり、みかけ上毎秒

$$\rho(\nu_0)B[N_1-N_2] \quad (1.5)$$

の割合で吸収が起こる。

しかし、一時的にでも  $N_2 > N_1$  の状態が準位 1 と準位 2 との間で実現すれば、式（1. 5）の場合とは逆に、誘導放出のほうが吸収を上まわり、誘導放出は毎秒

$$\rho(\nu_0)B[N_2-N_1] \quad (1.6)$$

の割合となる。これは  $\rho(\nu_0)$  の光が増幅されて、毎秒  $\rho(\nu_0)B[N_2-N_1]h\nu_0$  増加することを示している。高いエネルギー状態ほど原子分布が少ないのが普通であるので、 $N_2 > N_1$  の状態を反転分布状態という。この反転分布を実現することが、レーザーの第一の要素である。反転分布が原子や分子などの系で実現し、式（1. 6）で示される誘導放出による光の増幅が起こること、これがレーザーの原理である。

- 問 1.1 レーザー光の大きな特徴はコヒーレンス（可干渉性）の良さである。具体的には、単色性（時間コヒーレンス）、指向性（空間コヒーレンス）、集光性（波動ベクトルコヒーレンス）、超短パルスの発生可能性（周波数コヒーレンス）などがある。これらを説明せよ。（p. 19- 解説）
- 問 1.2 反転分布は負温度状態とも呼ばれる。なぜか？また反転分布はどのようにすれば実現できるか考察せよ。
- 問 1.3 レーザー光の問 1.1 の特徴は誘導放出によってもたらされる。一方、レーザー光以外の身の周りの光は自然放出光である。自然放出は光も量子化した扱い（第 2 量子化）でなければ説明できないが、誘導放出は（反転分布を単に利得媒質として与えれば）吸収の逆過程として古典的な振動子モデル（ローレンツモデル）の延長で解釈可能である。このことを説明せよ。  
（従って自然放出光よりもむしろレーザー光の方が古典的な電磁波として記述しやすい）

## 2. 色素レーザーの発振

### 2. 1. 実験用具

色素レーザーの発振特性を調べる実験に必要な用具として次のようなものが用意されている。

#### （1）光学実験台

色素レーザーを組むために鉄製の定盤が用意されている。色素レーザーの各光学素子はベースプレートにより光学台に固定される。光学台には格子状、25mm間隔のねじ孔があり、M6 のボルトでベースプレートを固定できる。

#### （2）窒素レーザー

用いる窒素レーザーの性能は次の通りである。

窒素レーザー （株式会社 宇翔 製、KEN-910T）

|      |                                   |        |        |
|------|-----------------------------------|--------|--------|
| 発振波長 | 337.1 nm                          | 発振線幅   | 0.1 nm |
| 出力   | 120 $\mu$ J/パルス at 10 Hz          | 最大繰り返し | 10 Hz  |
| ビーム径 | 3mm $\times$ 5 mm（出射口より 10cm で測定） |        |        |
| パルス幅 | 600 ps                            |        |        |

#### （3）円筒レンズ（シリンダカルレンズ）

円筒面と平面を屈折面とする石英ガラス製の凸レンズであり、窒素レーザーのビームを直線状に色素セルに集光する。

f=20 mm      合成石英

#### (4) 色素セル（高価なので取り扱い注意、キャップの部分を持ち、側面を手で触れないこと）

一辺が12.5mmの石英ガラス製の光学セルである。色素としては、ローダミン590のエタノール溶液（ $5 \times 10^{-3}$  M/L）・クマリン480のエタノール溶液（ $1 \times 10^{-2}$  M/L）が用意されている。また色素セルを傾けたり、水平面内で回転させたりできるセルホルダーに固定されている。

#### (5) 出力反射鏡

光束を2つの分ける半透鏡で、レーザー光を反射、透過（出力）光に分けるために用いる。今回用いた鏡の透過率・反射率はそれぞれ、30%・70%である。傾けることが可能となっている。

#### (6) 反射鏡

光の反射率が約100%（実際は80～90%）になるようにしてある。色素レーザーの終端の反射鏡として用いる。傾けることが可能となっている。

#### (7) 回折格子

課題2.3で終端反射鏡を置き換えて、波長可変レーザーを組み立てるのに用いる。

#### (8) セルホルダー

光学セルを固定するだけでなく、3次元空間で方向を調整できる。また、焦点距離を調整するために光軸方向の移動が可能なステージに取り付けてある。以下に詳細を示す。

### 上から、セル固定台、アルミ板、回転ステージ、アルミ板、ミラーホルダー

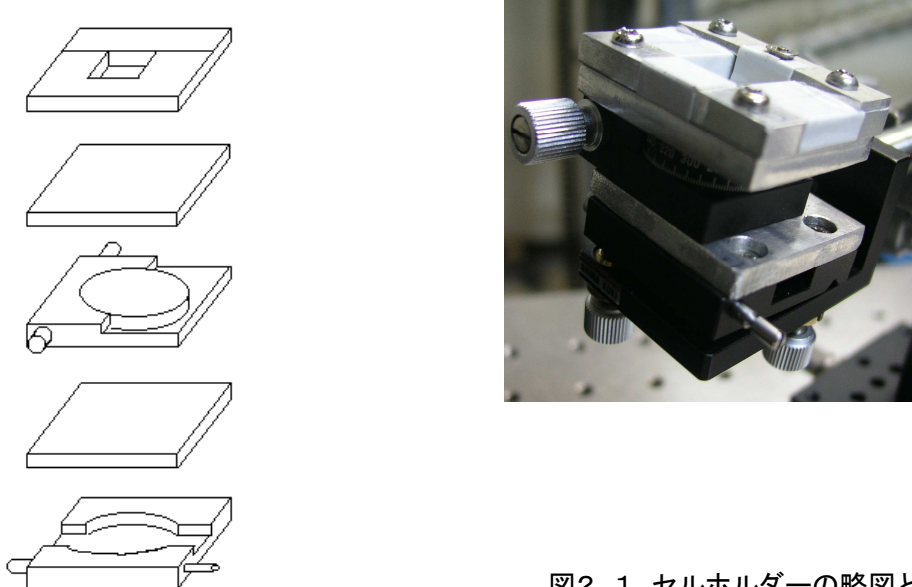


図2.1 セルホルダーの略図と写真

ミラーホルダーで傾き、回転ステージで回転をつけることができる。セル乗せにはビニールテープを用いて、セル固定と、セル抜き差し時セルに傷がつくことへの防止措置とした。セルがぐらつくようであれば、テープの巻き数を変え、対応すると良い。

## 2.2. 窒素レーザーの発振

窒素レーザーは高電圧を使用しているばかりでなく、そのレーザー光が目に見えないので、思わぬところに反射光や散乱光がとんでいる場合がある。特に、レーザー光の延長方向およびレーザー光と同じ高さに顔をもっていけないようにする。レーザー光を調整する場合には、もう一人の人が何を行っているかを充分注意する。

### 窒素レーザーの確認

- (1) 窒素レーザー本体の「POWER」スイッチが off (0) になっていることを確認。
- (2) 窒素レーザー本体の「LASER EMISSION」キースwitchが off (反時計回りにまわした状態) になっていることを確認。
- (3) レーザーの出口シャッターが閉じていることを確認する。

### 窒素レーザーの発振

- (1) 窒素ポンベの減圧弁の 2 次圧力を 0.24MPa にして窒素ガスを供給する (TA の監督下で行う)。
- (2) レーザー本体の「POWER」スイッチを on (1) にする。
- (3) 「PRESSURE CONTROL」つまみを調整し窒素ガスの圧力「PRESSURE」の値を 0.21MPa に調整する。
- (4) 「LASER EMISSION」キースwitchを on (時計回りにまわした状態) にする。
- (5) レーザー上面においてある LASER PULSE GENERATOR の「POWER」スイッチを on (1) にする。
- (6) LASER PULSE GENERATOR の「AUTO/MANUAL」切り替えスイッチが AUTO になっていることを確認する。
- (7) LASER PULSE GENERATOR の「OUTPUT」スイッチを押す。「OUTPUT」スイッチが橙色に点灯し、カチカチとレーザーの発振音がすることを確認する。
- (8) 周囲を十分に確認した後、レーザー出口のシャッターを開き窒素レーザーの出力を白い紙 (名刺など) にあててみる。名刺からの蛍光によって、窒素レーザーの出力を確認することができる。使用中にレーザーが不要になったときは必ずシャッターを閉じること。

### 窒素レーザーの止め方

- (1) レーザー出口のシャッターを閉じ、LASER PULSE GENERATOR の「OUTPUT」スイッチを押す。→「OUTPUT」スイッチが消灯し、発振音が消える。
- (2) LASER PULSE GENERATOR の「POWER」スイッチを off (0) にする。
- (3) レーザー本体の「LASER EMISSION」キースwitchを off にする。
- (4) レーザー本体の「POWER」スイッチを off にする。
- (5) 窒素ポンベを閉栓する (TA の監督下で行う)。

## 2. 3. 色素レーザーの発振

この実験では、最も簡単な構成の色素レーザー (図2. 2) を用いる。次にその調整法を述べる。

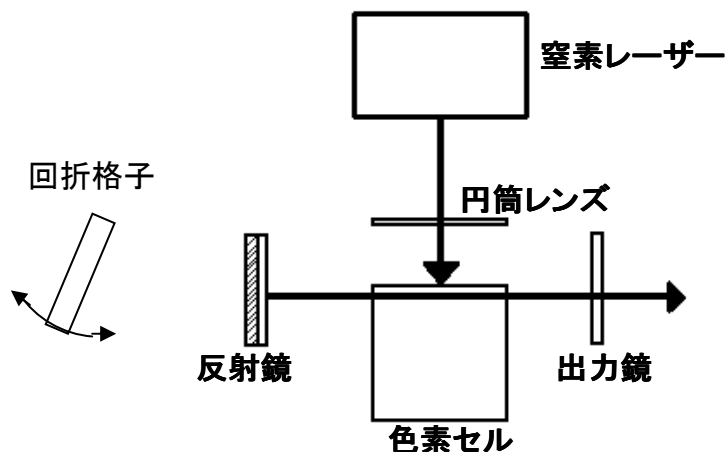


図2. 2 色素レーザーの構成

- (1) 窒素レーザーと集光レンズを同じ高さにそろえて置く。距離はできるだけ短いほうが良いが決まった距離はない。
- (2) セルホルダーを置く。ステージの稼動が窒素レーザーの光軸と直線状になるようにする。窒素レーザーがあたる高さに色素セルがくるようにしておく。
- (3) 窒素レーザーを発振させる。白い紙(名刺等)を用いて窒素レーザーのビーム形状を確認し、ビームの横幅が色素セルよりも若干広くあたる場所に色素セルを置く。
- (4) 集光レンズの焦点が色素セルの表面にくるよう、色素セルとレンズの距離を合わせる。即ち色素セル表面に窒素レーザーが水平方向に鋭い直線となるように集光する。
- (5) 白い紙(名刺など)を使って、色素セルの両側に色素からの蛍光が出ていることを確かめる。この時色素セルからの蛍光が最も強くなるように、色素セルの傾きを決めておく。(セルホルダーにあそびを持たせて固定できるようにしてあるが、もし固定できない場合はホルダーのテープの巻き数を変えてみる)
- (6) 終端側の全反射鏡を置く。この時、全反射鏡をできるだけ色素セルに近づけておくと強い発振を得ることができる。
- (7) 出力側の蛍光に、全反射鏡で反射された蛍光が重なるように全反射鏡を水平・垂直方向ともに調整する。
- (8) 全反射鏡の調整により移動する明るいスポットが見えてくるので、これが最も明るくなる場所をさがす。
- (9) 出力反射鏡を置く。
- (10) 終端側の全反射鏡と色素セルの間に白い紙を置き、(6)～(8)と同様に出力反射鏡を調整する。
- (11) 出力反射鏡の外側に白い紙を置いて終端側の反射鏡を調整し、窒素レーザーが最も強く、ビームの形状がきれいになるようにする。
- (12) 出力反射鏡と全反射鏡の調整を交互に繰り返す。

## 2. 4. 実験例

参考までにレーザー発振の遠視野像のデジカメ写真を載せる。光をデジカメにおさめるやり方も工夫せよ。



図2. 3 観測されたビームの形状(左がローダミン 590、右がクマリン 480)

緑色の場合は Coumarin 521

**課題2. 1** まずローダミン(オレンジ色)溶液でレーザー発振させる。**2. 3.**の(4)(5)で、セルへの直線状の集光が最適であればセルの両端から指向性の良い発光が観測できる。反射鏡を最適化すればさらに誘導放出光は強くなる。ベストの発振が得られたと思ったら、ビームパターンのデジカメ写真を撮る。次に、色素をクマリン溶液に置き換えて同じように発振させ、同じくデジカメ写真をとる。

**課題2. 2** 色素をローダミンに戻し、発振を最適化する。この状態で、セルと終端鏡の間に紙を入れて（鏡によるフィードバックをなくして）も、誘導放出光が見えることを確かめよ。つまり、セル中を1回通過するだけでも発振するのに十分な利得があることがわかる。ここで紙でブロックしたまま、セルから円筒レンズを遠ざけて集光をあまくする（defocus）と指向性のある光放射がなくなり、自然放出光のみが残ることを確かめよ（レーザー発振の閾値の確認）。次に、この状態で紙を取り除くと、再びレーザー発振することを確認せよ。これは鏡による正のフィードバックで、発振条件が満たされたことを示す。

### 課題2. 3 波長可変レーザー

ローダミン色素で、励起光をよく集光しレーザー発振を最適化する。ここで終端鏡を取り除き、代わりに図2. 2のように回折格子を少し傾けた配置で置く。出力鏡から出てくるビームが一つに重なるように回折格子の傾きを調節する。次にセルと回折格子の間に紙を入れると発振が止まる程度まで励起光を defocus する。回折格子を図2. 2の矢印の方向に動かすと、ビームの色がオレンジから赤の範囲で変わることを確かめよ。このように、発振波長帯域が広い色素レーザーでは、共振器中に波長選択素子を挿入することにより波長可変レーザーを作ることができる。

（回折格子は汚れると洗浄できないので、大切に扱うこと）



図2. 4 波長可変レーザー

学生実験 Website “物理学実験（三）” “レーザー” を参照して色素レーザーの色を確認すること（図2. 3 と 図2. 4 のカラー写真掲載）。

- 問2. 1 レーザー共振器の利得と損失のバランスを考察し、レーザー発振を得るための励起光強度に閾値があることを示せ。
- 問2. 2 球レンズでなく、円筒レンズを使う理由を述べよ。強い発振を得るには、励起光を色素溶液のどこに集光するとよいか。理由とともに述べよ。
- 問2. 3 回折格子はなぜ傾けて使うと波長選択できるのか説明せよ。
- 問2. 4 色素レーザーはHeNeレーザーのような気体レーザーと比べて幅広い発振スペクトルを持っている。この特徴は単原子気体とは異なる有機色素分子の吸収・発光特性に由来する。これを説明せよ。

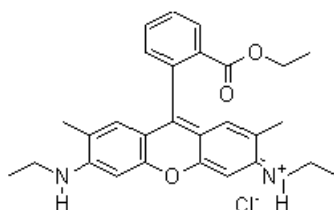


図2. 4 Rhodamine 6G  $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$

### 3. LD(レーザーダイオード)を使った光速度測定

#### 3. 1. 実験用具

レーザーを用いた光速度測定に必要な用具は以下の通りである。

##### (1) 光学実験台

##### (2) LD(レーザーダイオード)

用いる LD の性能は次の通りである。

LD (ローム社提供、RLD65PZB5、DVD 書き込み用、多重量子井戸構造)

|        |                   |
|--------|-------------------|
| 発振開始電流 | 50 mA             |
| 動作電流   | 150 mA 、光出力 80 mW |
| 発振波長   | 648 nm            |

##### (3) APD(アバランシェフォトダイオード)

光を受光し、測定するときに用いる。130 V以上の逆バイアス(145 V以下にすること)をかけることにより、アバランシェ(なだれ)増倍作用で光電流を10～50倍に増倍できる。以下のように回路を組んだ。

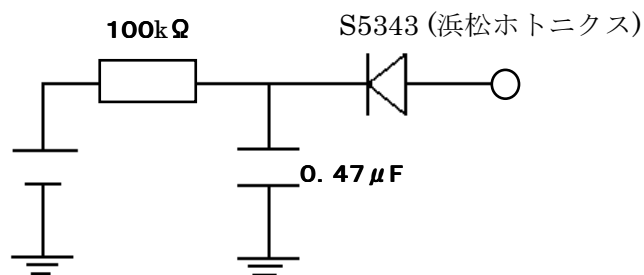


図 3. 1 APD の回路

##### (4) ファンクションジェネレーター (Agilent 33250A 80MHz)

今回は、pulse mode を使った。周波数・パルス振幅・offset 電圧・パルス幅・edge time を設定することで、さまざまな波をつくりだす。設定してから LD につなぐ。

##### (5) オシロスコープ (Yokogawa DL1620 200MHz)

送られた波形を読み取る。データを保存できるほか、解析も同時にできる。

##### (6) APD 用電源

今回読み取る光が弱いことから、APD に逆バイアス電圧(150 V以下)をかけることで微弱な光も読み取れるようにするために用いた。流す電流の最大値を決め、制限をかけることができる。

##### (7) LD 用電源 (Thorlabs LD ドライバー TCLDM9 使用)

LD は電流が大きすぎると壊れるため、これを用いて制御をかけ、設定する。レーザーを発振するときには同じ高さに人の目がないことを確認し、人が何をしているか確認してから行うこと。

##### レーザーの発振

- ① 電源を入れる。
- ②  $P_{LD}$  (最大電流値) が表示される。
- ③  $\wedge V$  ボタンで表示を  $I_{LD}$  (流す電流値) に変える。
- ④ LASER ON にする。(ランプが点灯)
- ⑤ volume を回して  $I_{LD}$  を上げる。50mA～60mA でレーザー発振するので、>60mA 程度で使用する。

### レーザーの止め方

- ①  $I_{LD}$  を 0 にする。
- ② LASER OFF にする。(ランプが消える)
- ③ 電源をおとす。

**注意: MODE で I (current mode, 電流を一定にする) と P (power mode, 光出力を一定にする) というスイッチがあるが常に I にしておくこと。P にすると power をモニタしていないので最大電流が流れて LD の寿命を縮める。**

### (8) 温度コントローラー

LD は高温で壊れる可能性があるため、これを用いて温度制御をかける。また、LD の温度を一定にしてレーザー波長、パワーを安定化するために使用。今回の実験では 50mA で低出力で、安定化も必要ないので使用しなくてよい。(使用するときは設定温度を室温か、室温より少し低い程度にする。設定温度が低すぎると結露し、故障の原因となる。)

### (9) スライドガラス

今回透過光を多重往復させて光路差をかせぐため、透過率の高いスライドガラスを用いた。  
90%以上光を透過する。

### (10) 反射鏡

多重往復させるための比較的大きな反射鏡を 3 枚、最後に APD へ受光させるのに用いる比較的小さな反射鏡を 1 枚用意する。

## 3. 2. LD を使った光速度の測定

レーザーを用いた応用実験として、光速度の測定をする。さきほどの色素レーザーを用いても可能だが、今回は LD を用いた。

LD からのレーザーをスライドガラスで反射光と透過光にわけ、透過光を反射鏡で数回反射させることにより光路差をかせいだ後、両者とも同一の APD で検出する。そこで、到着時間の遅れと光路差から光速度をもとめる。この時、LD の駆動電流をナノメーターのパルス幅でパルス変調することによりナノ秒レーザーを出力させている。ファンクションジェネレーターの Sync 出力を同軸ケーブルでオシロスコープにつなぎ、トリガー信号として用いている。以下に鏡と集光レンズの配置手順を示す。

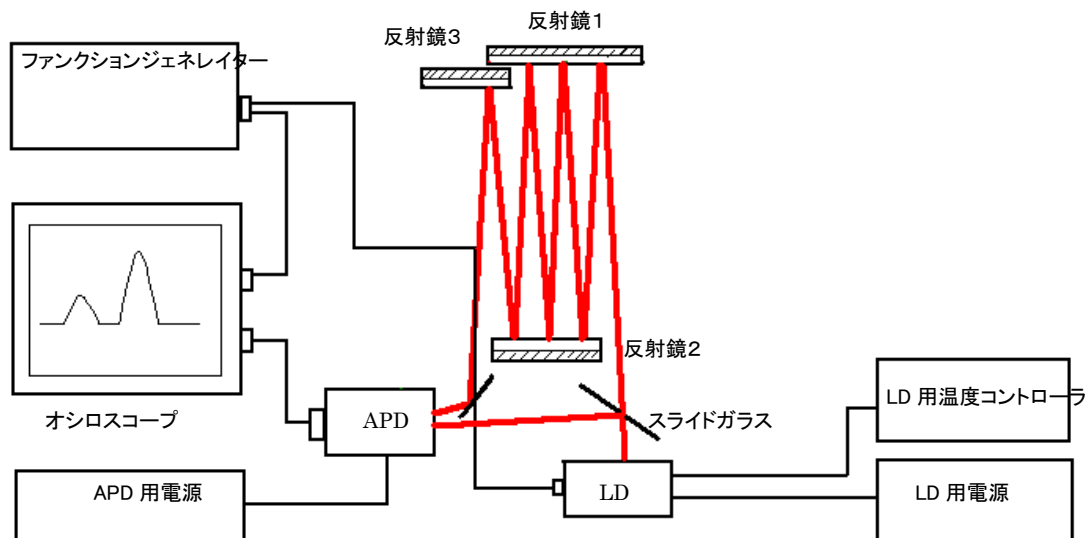


図 3. 2 光速度測定の光学系

- (1) LD からレーザーを発振させる。
- (2) LD のすぐ前にスライドガラスを置き、レーザーを反射光と透過光の二つにわけると良い。
- (3) 反射光を APD に受光させておく。
- (4) 透過光を反射鏡 1 で反射させる。この時、反射鏡 1 は傾きを与えず垂直にしておく。また多重反射させるため、鏡の右端で反射させておく。

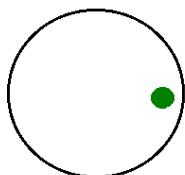


図 3. 3 反射鏡 1 にうつる光点 (最初)

- (5) 鏡からの反射光を名刺など白い紙を使って追いかける。レーザー発射口と同じ高さ、また反射鏡 1 から見てレーザー発射口の右側へ反射光がくるように、反射鏡を回転させる。
- (6) 反射鏡 1 からの光を、傾きを与えてない反射鏡 2 の左端で反射させる。その反射光の光点が、初めの光点の左側にくるように反射鏡 2 を回転させる。
- (7) 同様に、光を反射させていく。微調整にミラーホルダーのねじを用いると良い。

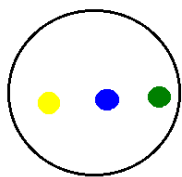


図 3. 4 反射鏡 1 にうつる光点 (最後)

- (8) 反射鏡 2 からの最終的な光を反射鏡 3 で反射させる。反射鏡 3 に傾きを与えず、光が APD へ向かうように回転させる。
- (9) 最終的に、多重反射させた透過光を集光レンズを用いて受光素子へ受光させる。
- (10) 透過光・反射光ともに、APD の受光素子にきちんと入射するように調整する。受光素子正面から受光させるのがもっとも望ましいが、多少斜めからの入射でも測定に支障はでない。
- (11) 鏡による反射の際に、光の輪が欠けていないかチェックする。欠けていると光が弱まりうまく測定できない。その場合は、(5) からやりなおす。

### 3. 3. オシロスコープの使い方、波形の保存方法

今回用いた 200MHz の YOKOGAWA のデジタルオシロスコープは、少し癖があり使いづらいかもしれない。信号を見失ったときはとりあえず **SETUP** → **Auto Setup** とすれば最適の設定条件を探して波形を表示してくれる。

2 つのパルス波形が測定できれば、カーソルをパルスのピークに移動して、時間差を読み取る (マニュアル 9. 1 を参照)。携帯等で **パルス波形の写真を撮っておくこと**。

### 3. 4. 測定例

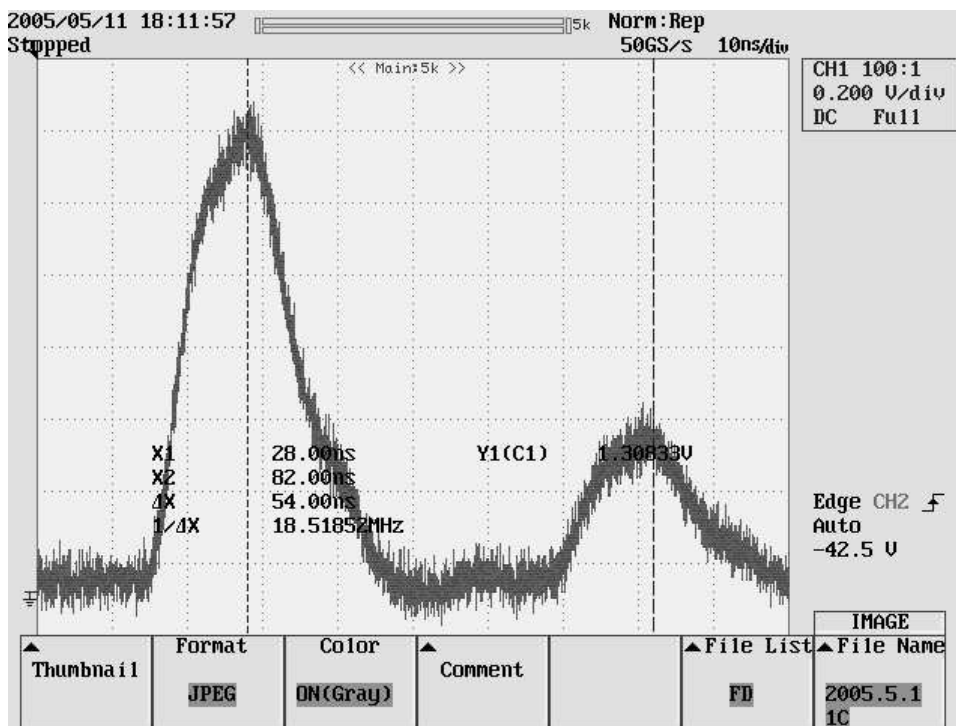


図 3. 5 オシロスコープの波形

#### <測定条件>

LD ( 50 mA ) (電流値は最大でもこの程度で使用する)

Function Generator ( pulse mode )

Frequency 2 MHz (パルスの繰り返し周波数)

パルス振幅 1.0 Vpp

(LD が壊れる可能性があるので、LD 電流×50Ω～2 Vpp 以下にすること)

offset 電圧 0 V

パルス幅 16 ns

edge time 8 ns

光路差 15.866 m

APD bias = 140 V

#### <測定結果>

オシロスコープのピークの差 54.0 ns

よって、求められる光速は、  $2.94 \times 10^8 \text{ m/s}$

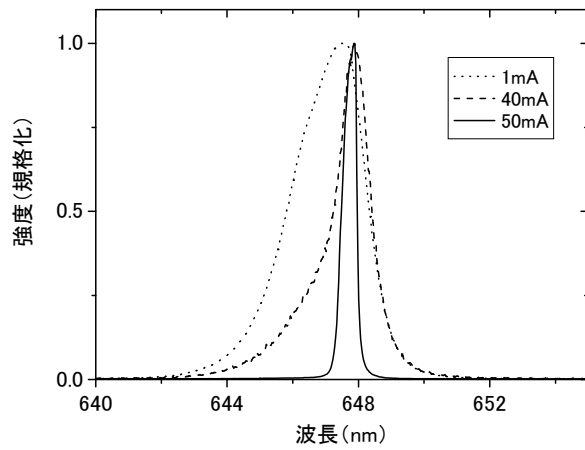
**課題3. 1** この実験では光路差を大きくとるほど精度は上がるので、以上のやり方にこだわらずに方法を工夫して光速を求めよ。上の例では実験誤差を評価してないが、時間差と光路差の誤差を適切に評価し(数回測定して確率誤差を求めるなど)、誤差の伝播を用いて測定精度も評価せよ。

**課題3. 2** 3 m程度の長い同軸ケーブルと実験装置を適当に用いて、同軸ケーブルでのパルス信号の伝播速度を求めよ。

問3.1 レーザーが出現する前にどのような方法で光速度を測定していたか調べよ。

問3.2 半導体レーザーの原理について調べ、他のレーザーとの違いを述べよ。

図3.6 ローム社赤色LD(RLD65PZB5)の発光スペクトルの電流による変化(参考)



## 4. レーザー光の空間フーリエ変換

### 4. 1. 実験用具

今回の実験に用いた実験用具は次のとおりである。

- (1) 光学実験台
- (2) ヘリウムネオンレーザー
- (3) 反射鏡
- (4) 回折フィルム

ネット上の

<http://departments.colgate.edu/physics/research/optics/oamgp/gp.htm>

のページの “forked” pattern をダウンロードして、全面にレーザー光が当たるように縮小したものを OHP 透明フィルムにコピーする。

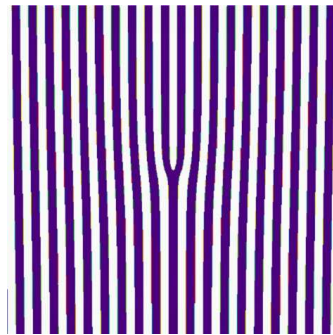


図 4. 1 “forked” pattern

### 4. 2. 回折パターン縮小の手順

- (1) “forked” pattern をダウンロードする。
- (2) Adobe photoshop を使い、何 cm にするには、何%にすればよいか縮小率を確認する。
- (3) Adobe Illustrator を使い、希望の大きさへ縮小する。(Illustrator では「何 cm に縮小」という操作ができないため、この操作をする)
- (4) 縮小・拡大する場合に、そのまま実行すると図形が粗くなる。ネット上にそれを修正する方法があり、それを使う。
- (5) OHP へレーザープリンタで印刷する。いろんな回転したものを複数作るとよい。(測定の段階でいろいろ試すことになるため)
- (6) OHP を適当な大きさに切り、厚紙のような枠組みの中にはめ込んで完成。OHP に指紋がつかないように注意する。

### 4. 3. 回折フィルムによるレーザー光横モード変換

レーザーを回折フィルムに通した後、反射鏡で壁に照射。その形〈今回はドーナツ型〉を観測する。

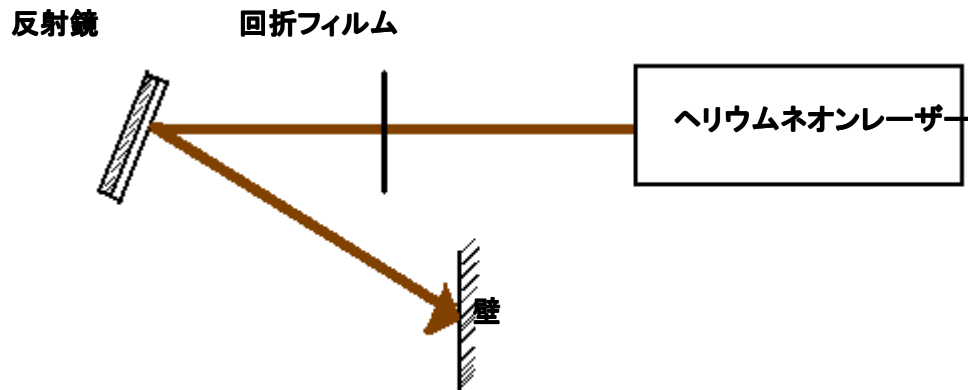


図 4. 2 観測の概略図

### 4. 4. 観測例

レーザー発射口から回折フィルムまでを約 30 cm、フィルムから反射鏡までを約 40 cm、鏡から壁までを約 140 cm の距離をとった。回折パターンは 0.5 cm に縮小し、以下のようなドーナツ型が観測された。

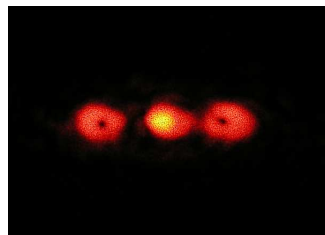


図 4. 3 観測されたドーナツ型

- 問 4. 1 この実験はレーザー光の横モードを空間フーリエ変換（2次元フーリエ変換）していると見なせる。フラウンホーファー回折について調べ、回折フィルムの空間パターンのフーリエ変換像が遠視野像として現れることを示せ。
- 問 4. 2 空間フーリエ変換であることから、きれいな回折像を観測するための条件を考察せよ。
- 問 4. 3 物理実験（二）の「光の回折」の単スリット、二重スリットの回折実験を空間フーリエ変換として解釈して説明せよ。
- 問 4. 4 凸レンズによる平行光の集光はレーザーの横モード（実空間）をフーリエ変換して波数空間に移していると見なせる。このことを説明せよ。

## 5. 輻射圧によるポリマー球の捕捉と推進

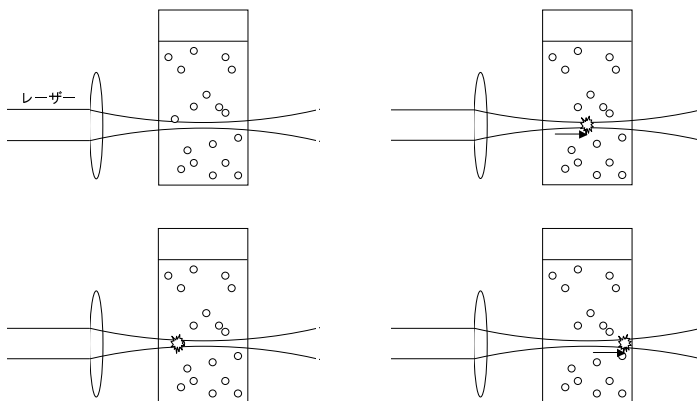
### 5. 1. 実験用具

輻射圧実験に必要な用具として次のようなものが用意されている。

- (1) 固体グリーンレーザー または 赤色LD (ローム社)  
グリーンレーザー (半導体レーザー励起  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  レーザーの二倍波)  
532nm 出力100–200mW
- (2) 直径20  $\mu\text{m}$  ポリスチレン球が分散した水の入ったセル (高価なので取り扱い注意)
- (3) 対物レンズ
- (4) カメラレンズ
- (5) セル支持台 他

### 5. 2. 実験手順

- (1) ポリマー球は時間がたつと沈殿するので、セルをしばらく逆さまにしておく。
- (2) セルを正立させて支持台に固定し、グリーンレーザーをセルの真中に一定の高さで通す。
- (3) 対物レンズをセルに近接するようにレーザー光路に挿入する。
- (4) カメラレンズとスクリーン (白い紙) を適当な位置に置き、トラップされ移動するポリマー球からの散乱光をスクリーンに投影して観察する。



問 5.1 ポリマー球がレーザー光路にトラップされる理由を説明せよ。

問 5.2 レーザーパワーが100mW、焦点でのレーザーの集光径(直径)が10  $\mu\text{m}$  とすると焦点でのレーザー強度はいくらか。これより輻射圧を計算せよ。

問 5.3 同じ条件で、光子1個当たりの運動量と光子の流束密度(単位時間・単位面積あたりの光子数)から輻射圧を計算せよ。

問 5.4 観測されたポリマー球の移動速度は妥当かどうか検討せよ。

問 5.5 地上で大人1人をを持ち上げるのに必要なレーザーパワーはどの程度か？

# 謝辞

この実験の一部は2004年度徳永研究室の佐藤洋輔・宝田直也君の卒業研究に基づいている。

## 参考文献

- [1] 「レーザー入門」 田幸 敏治、大井 みさほ 理科大図書館 425.08 || ko24 || 12
- [2] 「光物理学」 櫛田 孝司 理科大図書館 420.8 || ky5 || 11
- [3] 「光エレクトロニクスの基礎」 A. Yariv、多田・神谷訳 理科大図書館 549.1 || y59
- [4] 「レーザー物理入門」 霜田 光一 理科大図書館 549 || sh51
- [5] 「量子光学」 櫛田 孝司 理科大図書館 425 || ku86
- [6] 「光物性物理学」 櫛田 孝司 428.4 || Ku86
- [7] 「光の量子論」 R. Loudon、小島・小島訳 425.1 || L92
- [8] 「歴史をかえた物理実験」 霜田光一 丸善 (光速度測定)
- [9] 「半導体レーザ 基礎と応用」 伊藤良一・中村道治 培風館 549 || I 89
- [10] 「現代光工学の基礎」 飯塚啓吾 オーム社 (フラウンホーファ回折、フーリエ変換)
- [11] 日経サイエンス 第34巻 第1号 p.12 (2004) (光の角運動量)
- [12] “University Physics”, Young & Freedman 「電磁波」の章 (輻射圧)

## 光のコヒーレンスについて

**問 1.1** レーザー光の大きな特徴はコヒーレンス（可干渉性）の良さである。具体的には、単色性（時間コヒーレンス）、指向性（空間コヒーレンス）、集光性（波動ベクトルコヒーレンス）、超短パルスの発生可能性（周波数コヒーレンス）などがある。これらを具体的な物理例を挙げて説明せよ。これらのコヒーレンスは同時に成立するだろうか？

ヒント：波の位相  $\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$  可干渉性という言葉から予想されるように、干渉縞がどのように観測されるかでコヒーレンスを定量化できる。干渉縞が現れる空間の種類について考えよう。

レーザーの特徴を挙げろと言われたら何を思い浮かべるだろうか。まず第1に、レーザービーム、レーザー光線のイメージがあると思うが、この特徴はレーザーのある種類のコヒーレンスによる。上に挙げたどのコヒーレンスだろうか。レーザーが単色だというイメージがある人はレーザーについて比較的知識がある人かもしれない。しかし、本題目で色素レーザーの波長可変の実験を行ったことからわかるように、レーザーは単色とは限らない。しかし、コヒーレンスの説明をするとき、単色性と時間コヒーレンスの関係から入るのが最もわかりやすいと思うので説明する。次の式を見て欲しい。

$$\begin{aligned} E(\omega) &= F[E(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} E_0(t) e^{i\omega_0 t} e^{-i\omega t} dt \\ &= E_0(\omega - \omega_0) \end{aligned}$$

$$E_0(t) = E_0(\text{const}) \text{ のとき、 } E_0(\omega - \omega_0) = 2\pi E_0 \delta(\omega - \omega_0)$$

$$\text{このとき、 } E(t) = E_0 e^{i\omega_0 t}$$

時間領域で見たとき  $E(t)$  は無限に続く正弦波（実部が観測されると考えて  $E_0 \cos \omega_0 t$ ）であり、周波数領域で見たときに  $E(\omega)$  は  $\delta$  関数で幅がない、つまり単色波である。これは、時間コヒーレンスがよい極限（コヒーレンス時間が  $\infty$ ）と見なせる。では、周波数領域で見たときに  $E(\omega)$  が幅を持つとき、コヒーレンス時間はどうなるだろうか。コヒーレンス時間の長さは、時間領域に現れる干渉縞を観測することで測定できる。どのようにすればよいだろうか。

ヒント：数学的には、コヒーレンス時間は相関関数  $G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) E^*(t - \tau) dt$  からわかる。この式と干渉縞との関係は？ 発展：  $F[E(t)] = E(\omega)$  として、この  $G(\tau)$  のフーリエ変換はどうなるだろうか？

その他のコヒーレンスについても同様に考えよ。ここでいう空間コヒーレンスは、単に時間コヒーレンスを光速  $c$  を使って空間に焼きなおしたものではないことに注意する。つまり、2次元以上の空間を波が伝播するとき初めて問題になる概念で、波の伝播方向でなく伝播に垂直な方向に注目する。