

# KEK サマーチャレンジ 実習テキスト 演習課題番号9

青木正治, 幅淳二, 吉村浩司

平成20年8月22日

## 1 イン트로ダクション

現代物理学では、世の中のすべての素粒子は波動性と粒子性を併せ持った量子として記述します。これを量子力学といいます。光は典型的な量子であり、それ以上分割できない最小単位の粒子として存在しながらも、波としての性質をもっています。

18世紀後半には光の粒子説が主流でした。これは1704年にニュートンが「光学」の中で展開した考え方で、光の直進性や反射を良く説明する事ができました。ニュートンの権威もあったと思いますが、万有引力にもとづく粒子論的宇宙観が大成功を収めたため光も粒子であると考えられたのでしょう。

光の波動説は、ニュートンの「光学」よりも早い1690年にホイヘンスが「光についての考察」の中ですでに論じていましたが、前述したようにニュートンの考え方が広く受け入れられていたため、しばらくは忘れられていました。

ところが19世紀に入って、1804年にヤングが光の干渉実験により波動説を復活させます。また、1818年にはフレネルが回折実験を行い、光の波動説が真剣に論じられるようになりました。光の波動説と粒子説、どちらの説が正しいのか、それを決定づけたのがフーコーによる空気中の光速度と水中の光速度の比較実験です。

この実習では、光の波動性と粒子性に関連して以下の3つの実験を行います。これらの実験を通して、光と量子の世界の不思議を学んで頂ければと思います。

### 1.1 実験の心得

以下に実験の心得をまとめておきます。留意してください。

1. 実験テーブルの周囲では飲食禁止です。ペットボトルなどは事務用机の上に置いてください。

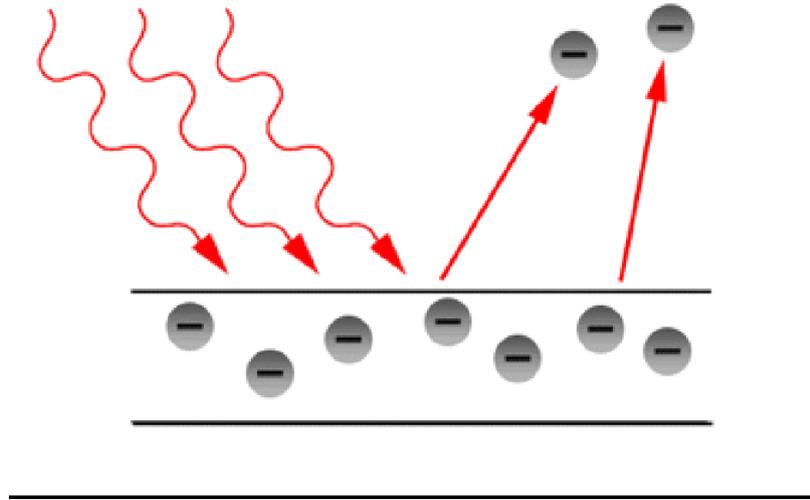


図 1: 光電効果 (フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』より抜粋)

2. 安全に注意して実験しましょう。
3. 実験の様子は、逐一詳細に「実験ノート」に記録してください。最終日には研究発表を行ってもらいますが、発表資料をまとめる時に大変役立ちます。

## 2 光の粒子性

### 2.1 光電効果と光量子仮説

金属などの物質表面に光をあてると、この光のエネルギーを吸収して物質から電子が飛び出してくる。これを光電効果 (photoelectric effect) と呼ぶ。またこの電子のことを光電子 (photoelectron) ともいう。この効果の以下の様な性質から、アインシュタインは光量子仮説を提唱し、後にノベル賞を受賞した。

1. 光電効果をおこすには、照射する光にたいして、物質に固有の最低振動数があり、それ以下の振動数の光では光電子は出てこない。
2. 光電子の最高エネルギーは、照射光の振動数が高い程大きいですが、光の強度を変えても変化しない。
3. 光電子の個数は照射光の強度に比例する。

光量子仮説では、光は粒子であってそのエネルギーは振動数を  $\nu$  とすると  $E = h\nu$  と表せる ( $h$  はプランク定数)。  $\nu > \nu'$  の時のみ光電子が放出されるとすると、そのときの電子の最大エネルギーは  $E' = h\nu - h\nu'$  であらわされ、  $W = h\nu'$  を仕事関数

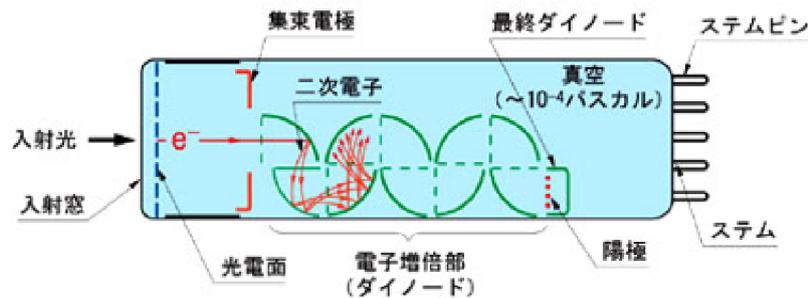


図 2: PMT の模式図 (上記説明/図は浜松フォトニクスウェブより転載)

とよぶ。この仕事関数は物質中で電子が束縛されていたエネルギー - と考えることができる。

## 2.2 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管は、光電効果を利用して光を検出する一種の真空管センサ - である。光を捉える部分には  $\nu$  が可視光領域になるような物質を蒸着した光電面と光電子を増倍する部分とからなっている。

(以下、浜松フォトニクスのウェブページより転載)

光電面に光が当たると、光電面から真空中に光電子が放出され、その光電子は集束電極によって電子増倍部に導かれて、2次電子放出効果によって増倍(増加)されます。この2次電子放出効果を利用して光電子を増倍(100万倍~1000万倍)することにより、光電子増倍管は光センサの中でも特に際立った高感度を有し、さらに高速時間応答特性など数々の優れた特性を備えています。また、光電子増倍管は、光電管と信号増幅器を用いたものと比較して、真空管内で増幅するためノイズが少ないという特徴を持っており、こうしたことから微弱光の測定に最適な光センサといえます。

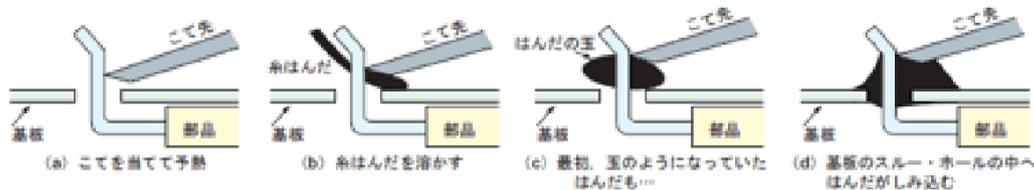
以上より明らかなように、PMTは理想的な光電効果の実験装置である。この演習では、PMTと光パルサを用いて、光電効果と光の量子性を実感してみる。

## 2.3 光パルサ - の製作

### 2.3.1 ハンダ付けの練習

まず抵抗とユニバーサル基板で練習しよう。ドーナツの穴にパーツの足(リード)を出して、これをハンダでドーナツと一体化させるのがハンダ付けだ。抵抗のリード線は手で曲げてもよいが、ラジオペンチの練習のためにペンチで曲げよう。1/6ワット

という抵抗は小さいので、基板の穴2つ分まで差すことができる。はじめは3つの間隔で差す練習をして、慣れたら2つも挑戦してみよう。直角に曲げて穴にスッと入るように曲げるのは練習が必要だ。隣り合う穴に抵抗を入れる場合は横では入らないので、Uの字に曲げる（ラジオペンチの場合は直角×2で曲げるとよいだろう）。プスプスと何本も差したらハンダ付けだ。ラジオペンチで曲げながら基盤に差す。隣り合う基盤は、左のようにU字状に曲げる



1. ハンダこてを温めておく（5分ほど電源入れて放置）
2. こて台から取って、軽く表面を拭く
3. こて先をハンダ付けしたい部分に軽く当てる
4. すかさずハンダの先をこてに当てる。すぐ溶けるので必要分だけ押し付ける
5. 半呼吸ぐらいおいてから、ハンダこてをはずす

キレイに盛り上がっていればオッケーハンダ付け終了。基板の銅箔の部分がすべてハンダでふさがり、そこから抵抗のリード線にすべて密着できただろうか。

\* 火傷に注意 \*

練習なので、ハンダの分量とか、どのくらいが「半呼吸待つ」ことなのかとか、色々試してほしい。ハンダは多すぎの方が問題なので、少な目を心がけるとよいだろう。基板の銅箔の部分がすべてハンダでふさがり、そこから抵抗のリード線にすべて密着しているのがキレイなハンダ付けだ。さて、ハンダ付けが終わったら基板をひっくり返してみよう。抵抗は基板から浮いてないだろうか？ もちろん浮いていてもかまわないが、キレイなハンダ付けを心がけるためには、基板と密着しているのが美しい。このためにはハンダつけの時に指で押さえる、なんてことをすると火傷をする。また抵抗とかはテープで仮止めするのもよい。なお、背の低いものから取り付けるのが基本だ。

最後にリード線を切り取る。可能な限りぎりぎりで切ろう。

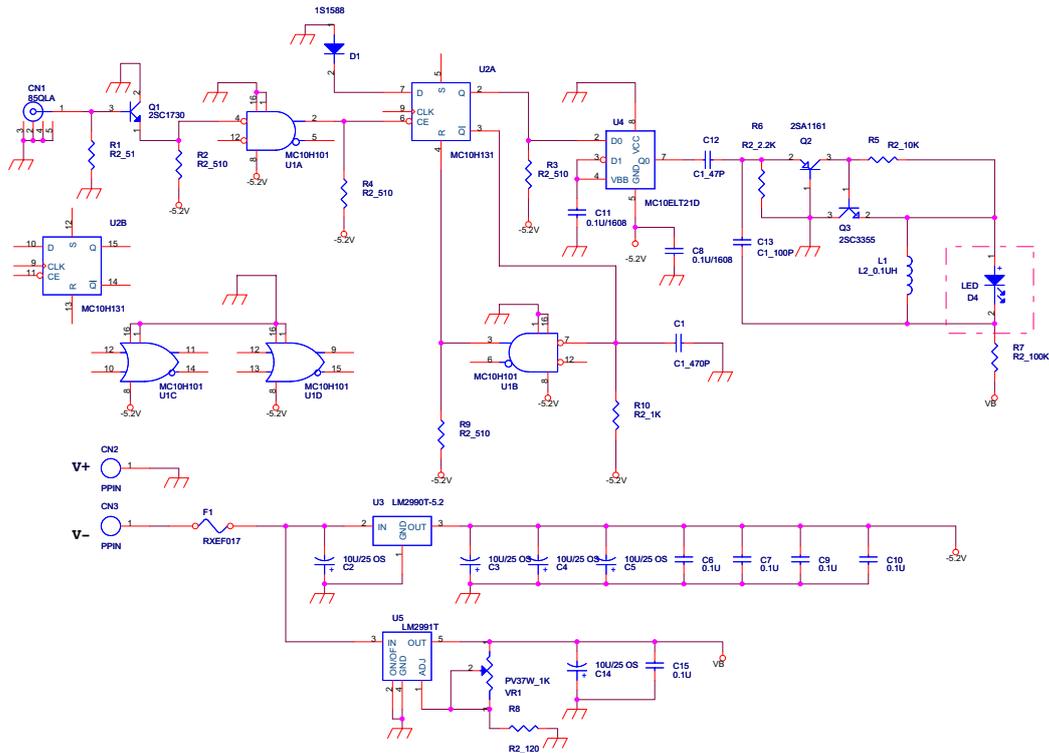


図 3: 回路図

### 2.3.2 本番

回路図、及び部品配置図を参考にしてLED 駆動光パルサ - のキットをハンダ付けで組み立てる。

完成をしたパルサ - に電池を装填し、トリガ - 端子へファンクシヨージェネレ - タから 100 kHz 程度の NIM レベルのパルスを加える。暗がり、その青白い点灯が確認されれば、製作は完了である。

## 2.4 光電子増倍管による光パルスの観察

### 2.4.1 暗箱の製作

本実験では光子（フォトン）が数え上げられるほどの微弱光を取り扱うために、まず実験を行うための暗箱を製作する。この暗箱は外部のいかなる光も侵入できないようにきちんと遮蔽を施さなければならない。サンプルを参考にして、各グループ 1 台完成させること。シャッタ - を全開とした PMT を中に入れ、1200 ボルトを印可して、その出力が暴れていないこと、外から懐中電灯などで光を当てても出力が変動しないことなどで光の遮蔽が完全であることを確認すること。

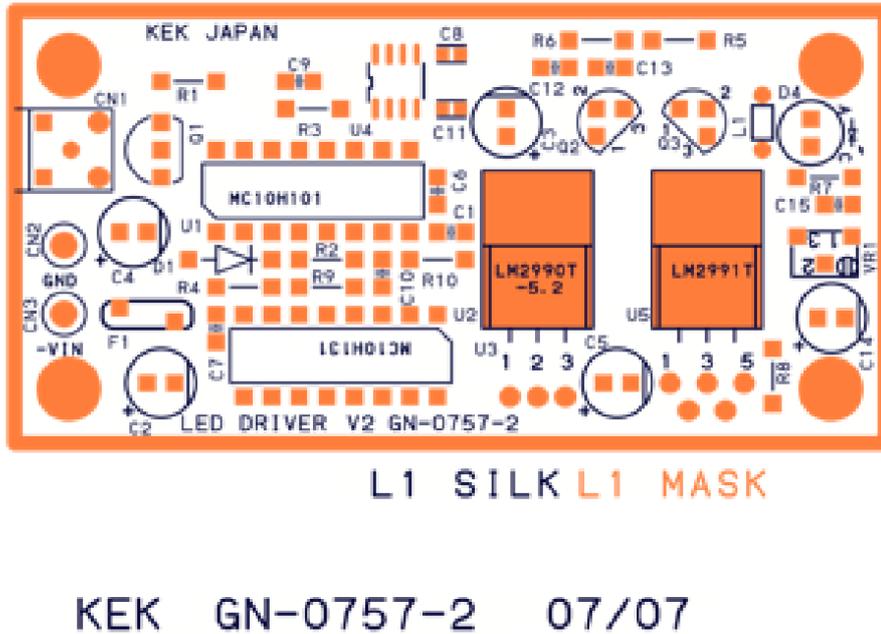


図 4: 基盤

#### 2.4.2 大光量での出力波形

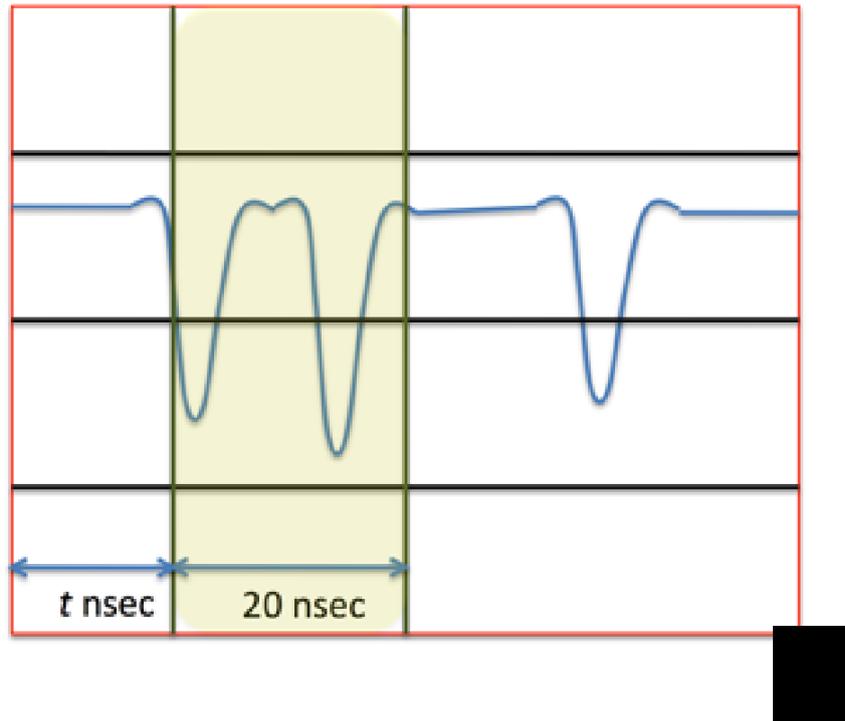
光パルサ - とシャッタ - を全開とした PMT を暗箱に据え付ける。遮蔽を施した後、光パルサ - のトリガ - にファンクションジェネレ - タで発生した 1 kHz の NIM レベルパルスを入力する。このパルスでオシロスコ - プのトリガ - も行う。PMT に高電圧を印可、その電圧を徐々に増やして行き、オシロスコ - プにて出力波形を確認する。1200 ボルトで 2 ボルト程度の波高となるのを目標とする。大き過ぎるときは、暗箱内の PMT と光パルサ - の位置関係を調整して、再挑戦する。

オシロスコ - プと PC をネットワ - ク接続して、オシロスコ - プで観測した波形を PC で取り込む手順を確立すること。

#### 2.4.3 光を絞るとどうなるのか？

次に、PMT とパルサ - の位置関係を変えないで、シャッタ - を絞ってみる。ここで、シャッタ - 位置の再現性を保証するためには、レバ - 横に方眼紙などの適当な目印を貼付しておく等の配慮が望ましい。

課題 1 シャッタ - を  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$ ,  $1/32$ ,  $1/64$ , 最小と絞っていくと出力波形がどうなって行くかを観察せよ。各シャッター絞りの設定について、観測された波形を PC に取り込んで記録に残し、議論や発表の資料として保管せよ。



#### 2.4.4 量子を実感する

シャッタを絞っていくに従い、100 ナノ秒程の幅のパルスの高さが次第に低くなって行くと共に、それがもっと短いパルスの重ね合わせで成り立っていることが次第に明らかとなる。最終的には、この短いパルスが不定期に発生する状態となる。この短いパルス一つ一つが、光電子一つずつの発生による信号と考えるのが最も素直な解釈であり、すなわち光量子の入射を観測していることにほかならない。

## 2.5 ポアソン分布を応用する

シャッタ - を絞った状態で、時間軸を拡大して波形を観察する。20nsec の時間幅の中にいくつの光電子パルスがあったかを、50 回程程度のサンプルをとってその度数分布をグラフにしてみよう。(たとえば図 2.5 では 2 コとなっている。ピ - クを含むかどうかで判定するとよい。)

課題 2 この度数分布が、ポアソン分布に従っていることを確認せよ。ポアソン分布とは、離散的に発生する事象の発生回数の確率分布のことで、平均事象数が  $\lambda$  である過程により発生する事象数  $k$  の確率  $P(N = k)$  は

$$P(N = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (1)$$

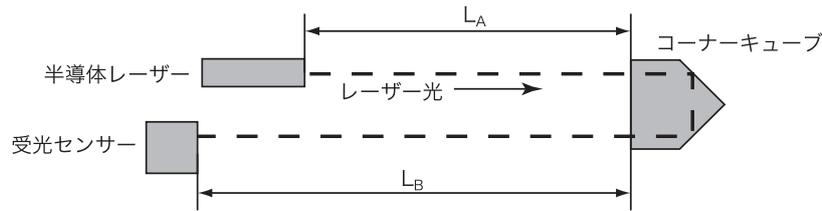


図 5: 光速測定の実理

となる。

課題 3 ある時間領域の中に観測されるパルス数の平均値を、その時間領域の場所 (光パルスの基準時間からのおくれ時間) の関数としてあらわせ。この形と、2.4.2 で観測した大光量の時の波形とを比較して、その結果をどう理解すればよいか考察せよ。

### 3 光の速さの測定

#### 3.1 目的

半導体レーザーを使用して、空気中での光の速さを測定する。相対精度で  $10^{-3}$  より高い精度の測定を目標とする。

#### 3.2 理論

図 5 のように、半導体レーザーからのレーザー光をコーナーキューブで反射して受光センサーでとらえる事を考える。半導体レーザーとコーナーキューブ間の距離を  $L_A$ 、コーナーキューブと受光センサー間の距離を  $L_B$  とすると、レーザー光は往復で  $L_A + L_B$  の距離を進む事になる。光の速さを  $c$  とすると、光は  $(L_A + L_B)/c$  だけ遅れて受光センサーに戻ってくるであろう。

半導体レーザーからのレーザー光は、レーザーモジュールへ入力する信号によって強度を変調できるようになっている。今、レーザーモジュールへ一定の周波数の正弦波を入力するとする。レーザーモジュール内部の電子回路による入力信号からレーザー強度変化までの時間遅れを  $\Delta T_{\text{out}}$ 、コーナープリズム内部でのレーザー光の遅延を  $\Delta T_{\text{prism}}$ 、受光センサーにレーザー光が入射してから外部信号が出力されるまでの遅延を  $\Delta T_{\text{in}}$  とすると、半導体レーザーを変調しているもとの正弦波信号と受光センサーから出力される正弦波信号の間の時間遅れ  $\Delta T$  は

$$\Delta T = \Delta T_{\text{out}} + \Delta T_{\text{prism}} + \Delta T_{\text{in}} + \frac{L_A + L_B}{c} \quad (2)$$

となる。さてここで、 $\Delta T_{\text{out}} + \Delta T_{\text{prism}} + \Delta T_{\text{in}}$  は未知であるが、 $L_A$  や  $L_B$  とは独立であると仮定しよう。そうすると、コーナプリズムを近距離においた場合 ( $L_{A,1}, L_{B,2}$ ) の  $\Delta T_1$  と長距離に離れた場合 ( $L_{A,2}, L_{B,2}$ ) の  $\Delta T_2$  をもちいて、

$$\Delta T_2 - \Delta T_1 = \frac{L_{A,2} + L_{B,2}}{c} - \frac{L_{A,1} + L_{B,1}}{c} \quad (3)$$

より、

$$c = \frac{(L_{A,2} + L_{B,2}) - (L_{A,1} + L_{B,1})}{\Delta T_2 - \Delta T_1} \quad (4)$$

から、 $c$  を求める事ができる。

### 3.2.1 測定精度

$c$  の測定精度は、誤差の伝搬則より

$$\begin{aligned} \delta c = & \left\{ \left( \frac{\partial c}{\partial L_{A,2}} \right)^2 (\delta L_{A,2})^2 + \left( \frac{\partial c}{\partial L_{B,2}} \right)^2 (\delta L_{B,2})^2 \right. \\ & + \left( \frac{\partial c}{\partial L_{A,1}} \right)^2 (\delta L_{A,1})^2 + \left( \frac{\partial c}{\partial L_{B,1}} \right)^2 (\delta L_{B,1})^2 \\ & \left. + \left( \frac{\partial c}{\partial \Delta T_2} \right)^2 (\delta \Delta T_2)^2 + \left( \frac{\partial c}{\partial \Delta T_1} \right)^2 (\delta \Delta T_1)^2 \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

となる。

いま、 $\Delta T$  の測定精度に関して考えよう。レーザー光の変調周期  $T$  が  $\Delta T$  よりも小さい場合には、半導体レーザーへの変調信号正弦波と受光センサーからの正弦波が1周期以上遅れる事になる。遅れた周期数を  $n$  とすれば、 $n$  はあらかじめ知る事は出来ない。従って、確実に  $n = 0$  となる実験条件を選ぶか、あるいは  $n$  を測定によって求めなければならない。

例えば、レーザーの往復距離を概ね 100 m とすると、 $c = 3 \times 10^8$  m/s より  $\Delta T$  はおよそ 330 nsec となる。確実に  $n = 0$  とするためには、 $T > 500$  nsec は必要であろう。この場合、オシロスコープの画面には変調信号と測定信号を同時に表示する必要があるから、オシロスコープの横軸はフルレンジで 500 nsec を観測できる幅にしなければならない。オシロスコープの画面で読み取れる信号の位置の精度はおそらく 1/100 程度と考えられるから、 $\Delta T$  の測定精度は高々 5 nsec となる。これは、 $\Delta T$  の 1/100 程度に過ぎないので、 $c$  の測定精度も 1/100 程度となる。

一方、 $T = 50$  nsec として測定を行えば、 $\Delta T$  の測定精度は 0.5 nsec に改善されると期待できるので、 $c$  の測定精度も 1/1000 程度となる。ただしこの場合には、 $n$  を何らかの方法で決定する必要がある。一般的には、 $n$  さえ決定出来れば、 $T$  は短い程測

定精度は向上する。本実験で使用する半導体レーザーは最大 50 MHz でレーザー発光を変調することができる<sup>1</sup>。

さらにここでは、「 $c = 3 \times 10^8$  m/s という予備知識を用いない」事を考えよう。「我々が世界で最初に  $c$  を測定するのである」という気概で実験に望む事にしたい。この場合には、前述した  $T > 500$  nsec の条件であっても  $n = 0$  になっているという保障はない。ただし、 $c$  がカタツムリの這う速さよりも遅いとは考えられないので、日常生活の経験上すくなくとも  $c$  は空気中の音速よりも速いことは分かっているとす。

課題 4  $c$  を 1/1000 よりも良い精度で測定する為には、 $\Delta T$ 、 $L$  をどの程度の精度で測定する必要があるだろうか。

課題 5  $n$  を決定する方法を考えよ。

### 3.3 装置

#### 3.3.1 半導体レーザー

波長 670 nm、出力 0.8 mW の、英国 Global Laser 社製半導体レーザーである。製品名は Beta TX Laser Diode Module。以下の URI からデータシートとユーザーガイドをダウンロードする事ができる。

[http://www.global-lasertech.co.uk/global\\_product.asp?ID=118](http://www.global-lasertech.co.uk/global_product.asp?ID=118)

レーザークラスはクラス 2 で、まばたきを含む人の反反応により目の障害を回避し得ると考えられる、比較的安全なレーザーである。とはいえ、安全のため決してビームを直接覗き込んではいけない。

レーザー発信には  $-5$  から  $-12$  V の DC を供給する。レーザー光の変調は、AC カップルの入力線に変調信号を供給すれば良い。変調信号の最大振れ幅は  $\pm 250$  mV を超えてはいけない。レーザーモジュールを壊してしまうので要注意のこと。

半導体レーザーのため、レーザー光の形は  $5 \times 2$  mm の扁平な楕円である。付属のツールを用いてレーザー出力のフォーカスを調整する事ができる。

#### 3.3.2 受光センサー

Elecro-Optics Technology, Inc. 製、モデル ET-2030A。EOT 社のホームページは

[http://www.global-lasertech.co.uk/global\\_product.asp?ID=118](http://www.global-lasertech.co.uk/global_product.asp?ID=118)

1 mW 程度の低出力レーザー光の受光を可能とする為にアンプを内蔵している。手の脂などでセンサー部分を汚さないように注意すべし。

<sup>1</sup>100 MHz 程度まで変調する事は不可能ではないが、レーザー光強度の振れ幅は小さくなってしまふ。

### 3.3.3 コーナーキューブ

三角錐の形をしたガラスで出来ており、入射光を再帰反射して入射方向へ戻す機能を持つ。コーナーキューブの再帰反射は、入射光の入射角が大きい場合でも有効である。その特性上、反射光の光軸は入射光に比べて平行にずれる。

課題 6 コーナーキューブの動作原理を説明せよ。

### 3.3.4 ビームエキスパンダー

理想的なレーザー光は完全な平行な光線であるが、実際にはある程度の広がり角を持っている。この広がり角は、半導体レーザーの場合には特に大きい。この有限の広がり角を持った「ビーム」が空間中を伝わるようすは、加速ビームが加速器中を伝わる場合とほぼ同じ運動学で記述できる。遠方でのレーザービームのビームスポットサイズを  $B_L$  とすると、

$$B_L = \beta + \theta L \quad (6)$$

と表される。ここで、 $\beta$  は距離ゼロでのビーム径、 $\theta$  はビーム広がり角、 $L$  は照射距離である。長距離でのスポットサイズを小さくする為には  $\theta$  を小さく抑える必要があることがわかる。しかし、リウビルの定理により、レンズ等の光学系では  $\beta\theta$  が保存するため、 $\theta$  を小さくする為には  $\beta$  を大きくしなければならない。本実験で使用するビームエキスパンダーの拡大率は6倍である。Beta-TX からのレーザー光を概ね 30m よりも遠くまで照射する場合には、ビームエキスパンダーが必要である。

課題 7 ビームエキスパンダーによって、遠方でのスポットサイズを小さくできる事を説明せよ。

### 3.3.5 ファンクションゼネレータ

任意の波形を生成できるデジタル方式のファンクションゼネレータを使用する。今回使用するファンクションゼネレータは、内部クロックに温度保障型の水晶発信子を使用しており、1年当たりのクロックのズレは高々1ppm/年程度である。工場出荷時に1ppmの絶対精度で校正されている。今回使用する装置は購入後数年程度経過しており、今回新たに校正を行った訳ではないが、10ppm程度の確度で発振しているとして問題なからう。

課題 8 今回は、ファンクションゼネレータのクロックの絶対精度をキチンと確認する手段は無い。とはいえ、何らかの手段である程度の様子を探る事はできるかもしれない。たとえば、ファンクションゼネレータが2台あるので、これらの間の相対的なズレから何か言えないだろうか。検討せよ。

### 3.4 実験方法

実験は、以下の段階に分けて行う。

1. 予備測定
2. 短距離実験
3. 実験誤差の検討
4. 長距離実験

#### 3.4.1 予備測定

まず、 $c$ の大きさを大雑把に見積もろう。

1. 半導体レーザーを台座に固定する。
2. DC電源を-10Vに設定し、デジタルボルトメータで出力電圧を確認する。プラスとマイナスを間違えないようにする事。電源のプラスとマイナスを間違えたり、電圧が-12Vを超えたりするとレーザーモジュールを壊してしまうので要注意。
3. ファンクションゼネレータを「正弦波」、「バーストモード」、「バースト周期1秒」とし、出力振幅を $\pm 200$  mVにする。 $\pm 250$  mVを超えるとレーザーモジュールを壊してしまうので要注意。
4. オシロスコープのch1.にT字型LEMOコネクタを差し込み、ファンクションゼネレータからの信号をコネクタの一方に接続する。オシロスコープch.1の入力インピーダンスは $50\ \Omega$ とせよ。まだレーザーモジュールに接続してはいけない。
5. ファンクションゼネレータからのパルスをおシロスコープで観察し、周波数や振幅が設定通りになっている事を確認する。確認が終わったら、ファンクションゼネレータの出力をOFFにする。
6. オシロスコープch.1に差し込んであるLEMOコネクタの空いている端子とレーザーモジュールの変調信号入力をつなぐ。オシロスコープch.1の入力インピーダンスを $1\ \text{M}\Omega$ とせよ。
7. レーザーモジュールにDC電源を接続する。電源のプラスとマイナスを間違えない事。
8. 受光センサーのBNC出力をおシロスコープのch.2へ接続する。受光センサーのAC電源を接続する。

9. レーザーモジュールの電源を ON、ファンクションゼネレータからの変調信号出力を ON にして、レーザー光を出す。レーザー光を受光センサーに当て、オシロスコープで受光センサーからの信号が観測される事を確認する。
10. オシロスコープ ch.1 と ch.2 の信号の相対的な遅れ時間を測定する。これを  $\Delta T_1$  とする。
11. コーナーキューブを数 m 遠方に置き、レーザーを反射させる。反射光が受光センサーに入射するようにコーナーキューブと受光センサーの位置を調節する。必要ならば、レーザーのフォーカスも調節する。
12. オシロスコープ ch.1 と ch.2 の信号の相対的な遅れ時間を測定する。これを  $\Delta T_2$  とすると、 $\Delta T_2 - \Delta T_1$  から  $c$  を求める事ができる。

オシロスコープの画面は、ウェブブラウザを用いてパソコンに記録する事ができる。実験の記録として、マメに記録せよ。最終日の発表資料としても活用できる。

課題 9 「 $c$  は音速よりは速い」という経験的な事実のみを出発点として、オシロスコープの表示やバースト周期などを調節することにより  $c$  の大まかな値を算出せよ。

### 3.4.2 短距離測定

照射距離を 20 m 程度にして、 $c$  を計測してみる。

課題 10 レーザーモジュールとコーナーキューブを 10 m 程度離して設置して測定し、ゼロ距離測定と比較することによって  $c$  を算出せよ。レーザー変調の周波数を可能な限り大きくして、 $\Delta T$  の測定精度を向上させよ。また、予備測定の結果をもちいて  $n$  の不定性を解決せよ。

$n$  の不定性を取り除いた後では、ファンクションゼネレータの発信モードは連続発信とした方が観測しやすい。また、オシロスコープの「平均値表示」モードを用いると、受光センサーからの信号に混ざっている高調波ノイズの影響を低減できる。信号の遅れ時間の測定には、パソコンに読み込んだオシロスコープの画面をプリンターで印刷してから定規等を用いて「計測」するのが確実かつ高精度だろう。

課題 11  $\Delta T$  測定を複数回行う事により、その偶然誤差を評価せよ。

### 3.4.3 誤差の評価

短距離測定が終わった時点で、 $c$  の誤差を評価してみよう。式 (5) から、 $L$  の誤差と  $\Delta T$  の誤差が  $c$  の誤差にきいている事がわかる。距離  $L$  の誤差として、巻尺の読み取り誤差、巻尺の公差 (巻尺の製造元が保障している誤差)、巻尺の温度による伸び、巻尺のたるみや角度に伴う誤差などが考えられる。 $\Delta T$  の誤差としては、受光センサー

からの正弦波信号のふらつき、正弦波から時間遅れを読み取る方法によるバラツキなどが考えられる。信号の遅れ時間測定や巻尺の読み取り誤差は、偶然誤差である。これらの偶然誤差は、測定を複数回繰り返して統計処理を行えば評価できる。その他、 $\Delta T_{\text{out}}$ 、 $\Delta T_{\text{prism}}$ 、 $\Delta T_{\text{in}}$  は  $L$  によらずに一定と仮定したが、この「仮定」の正当性も考察する必要がある。

課題 12  $L$  測定を複数回行う事により、その偶然誤差を評価せよ。

課題 13 短距離測定での  $c$  の測定誤差を評価せよ。

課題 14  $c$  の誤差を決めている主因はなんであるか。 $c$  の誤差を改善するにはどうしたら良いだろうか。

#### 3.4.4 長距離測定

課題 14 の結論によっては、他の方法で  $c$  の精度を改善するべきかもしれないが、ここでは、 $L$  を長くする事により  $c$  の測定誤差を改善できると仮定して長距離測定の手順を説明する。

半導体レーザーモジュール単体では口径が小さく、30 m 以上遠方でのビームスポットサイズが直径数 cm を超えてしまうため、受光センサーから十分な信号強度の出力を得られない。そこで、長距離測定ではビームエキスパンダーを使用する。

ビームエキスパンダーを使用した測定でのビーム調整は以下に述べる手順で行うと良いだろう。

1. 半導体レーザーとビームエキスパンダーを同軸線上に設置する。半導体レーザーとビームエキスパンダーの間は、半導体レーザーのフォーカスを調整するツールを挿入できるだけのスキ間を開けておく事。
2. ビームエキスパンダーの出射開口部直後に白紙を置き、拡大されたレーザービームのイメージが最大となるように半導体レーザーのフォーカスを調節する。
3. 100 m 遠方に白紙を置き、ビームスポット径が最小になるようにビームエキスパンダーのフォーカスを調節する。
4. 50 m 部分にコーナーキューブを置き、レーザービームを反射させる。
5. ビームエキスパンダー出射開口部の周囲に白紙でスクリーンを立て、コーナーキューブから反射されてくるビームのスポットを観察する。必要ならば、コーナーキューブの位置を調節して、受光センサーでの測定がしやすい位置にビームスポットを移動させる。ビームエキスパンダーのフォーカスを最適に調節した場合には、コーナーキューブの位置でのビームサイズはおよそ  $2 \text{ cm}^{\phi}$  程度となるため、コーナーキューブを光軸からずらしすぎるとビームが削れてしまうだろう。良い測定条件が得られるまで根気良く調節を行うべし。

長距離測定では、再測定を簡単に繰り返す事は出来ないので、測定の記録をしっかりとし、残す事に留意せよ。特に、設定した装置の位置関係(半導体レーザーとビームエキスパンダーの間隔、受光センサーの位置、行きビームと戻りビームの間隔、レーザーモジュールとコーナーキューブの間の距離など)は正確に記録するべし。

課題 15 長距離測定では、「ゼロ距離測定」も改めて実施するべきだろうか。考察せよ。必要ならば、ゼロ距離測定を実施せよ。

課題 16 長距離測定から  $c$  の値と誤差を評価せよ。

課題 17 空気の屈折率の影響を考察せよ。

課題 18 余談 — 現在は物理量としての  $c$  は定義値である。それでは、本測定では結局何を測った事になるのだろうか。定量的に考察せよ。

## 4 水の屈折率の測定

### 4.1 水の屈折率

空気中から水中へと光が入射するとき、入射角 ( $\theta_i$ ) と屈折角 ( $\theta_r$ ) の間には

$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} \quad (7)$$

の関係が成り立ちます。ここで  $n$  を屈折率といい、屈折現象を起こす二つの媒質によって決まる定数です。空気と水の界面における屈折では  $n = 1.3$  程度の一定値となります。

この  $n$  は、空気中の光速度  $v_1$  と水中の光速度  $v_2$  から計算する事ができるのですが、光を粒子と考えるか波動と考えるかで全く異なった結果を与えます。図 6 左に示すように、光を粒子と考えた場合の屈折現象は、光の粒子が境界で水面に垂直な方向に加速されるためと説明されます。これは、水の密度が大きいため水面の方向に万有引力を受けるからです。加速されるのは水面に垂直な方向だけであり、水平方向の速度は変化しません。したがって、

$$v_1 \sin \theta_i = v_2 \sin \theta_r$$

より、

$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_2}{v_1} \quad (8)$$

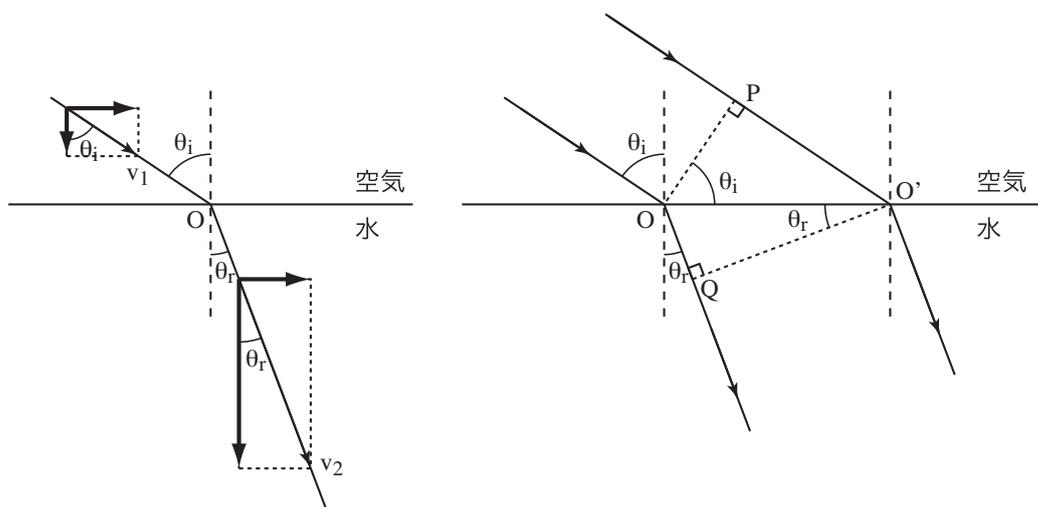


図 6: 光の屈折の説明

となります。水中での光速度は空気中の光速度の 1.3 倍となります。

一方、波動説での考えでは、図 6 右に示すように、光の波に幅をもたせて進行方向と直角な波面を考えます。波面 OP が空気と水との境界にやってきて、O で先に屈折して Q まで進んできたとき、波面の点 P はやっと境界 O' に届きます。このとき、空気中と水中の光の速さを  $v_1$ 、 $v_2$  とすると、

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} \\
 &= \frac{PO'/OO'}{QO/OO'} \\
 &= \frac{PO'}{QO} \\
 &= \frac{v_1}{v_2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

となります。この場合には、水中での光速度は空気中の光速度の 0.7 倍になります。

フーコー以前にも空気中の光速度を測定した実験がありましたが、光速度の測定精度を上げる為に光路長が長くなっており、そのままでは水中の光速度を測定する事は不可能でした。フーコーは短い光路長でも精度よく光速度を測定できる装置を開発して、水中の光速度を測定しました。

本演習では、前節に引き続きレーザーを用いた方法を用いて、水中での光速度を測定します。

## 参考文献

- [1] 西條敏美, BLUE BACKS B-1144 「物理定数とは何か、自然を支配する普遍数のふしぎ」, 講談社 (1996)