

光速の直接測定

□ 目的

真空中の光の速度を直接測定し、さらに媒質中の屈折率と光速の関係を理解する。

□ 実験用具

レーザー発信器、受信器、オシロスコープ、鏡、巻尺、付箋

□ 解説

光速が有限であることは誰でも知っている事実といえるであろう。真空中の光速は現在では厳密に以下の速さであり、長さの単位メートルの定義となっている。

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ [m/s]} \quad (1)$$

光速が有限であることが相対性理論の基本でもあり、光速が無限であれば特殊相対性理論は無い。

しかし、通常の数値に比べ、光速は桁違いに速く有限であることを実感する事は少ない。光速が有限であるかは決して明らかではなく、昔からこれについては議論があった。光速が有限であるか断定しようとしたもっとも古い記録は Galileo による実験である。Galileo は 1638 年に以下のような原理で光速を測定しようとした（図 1 参照）。距離 L （実際は 1 マイル程度であった）離れた 2 つの丘の上に 2 人が A、B のランタンを持つ。A がランタンのシャッターを開け、B はその光を見た瞬間にランタンのシャッターを開ける。A は自分がシャッターを開けてから B のランタンの光を観測するまでの時間 T を計測する。光速は単純に以下の式で求まるはずである。

$$c = \frac{2L}{T} \quad (2)$$

しかし、Galileo は有限な時間 T を測定できなかった。言い換えれば誤差内で $T = 0$ であり光速が有限であることを示せなかった。これは当時 Robert Hooke も指摘したように、単に光速が測定できないほど速いことを示す結果であり、無限である事は必ずしも意味しない。（実際、光速 (1) を用いれば Galileo の測定しようとしていた時間は 1 億分の 1 秒程度である！）

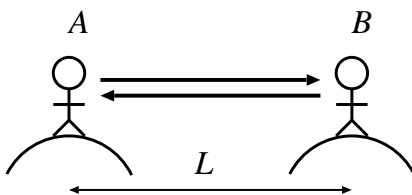


図 1 Galileo による光速の測定の試み

光速を初めて測定したのは Römer (レーマー) である。Römer は木星の衛星 (Io) が木星の裏に隠れるのが、地球から遠いときには規則的に遅れることに注目した。(遅れは 10 分のオーダーである。) 彼はこれは衛星は規則的に動いているが、光速が有限であるため遅れたように見えるだけであると考えた。そして 1676 年に光速が 2.2×10^8 m/s であると結論した。これは数 10% のずれで光速を求めており、このような速い速度を求めたのは大きな功績である。真空中の光速は速い。光速を直接測定するためには、(2) 式よりわかるように 2 通りの選択肢しかない。実質的に長い距離を測定するか、あるいは短い時間を測定するかである。Römer は前者を選んで成功した。我々は本実験では後者を選ぶ。

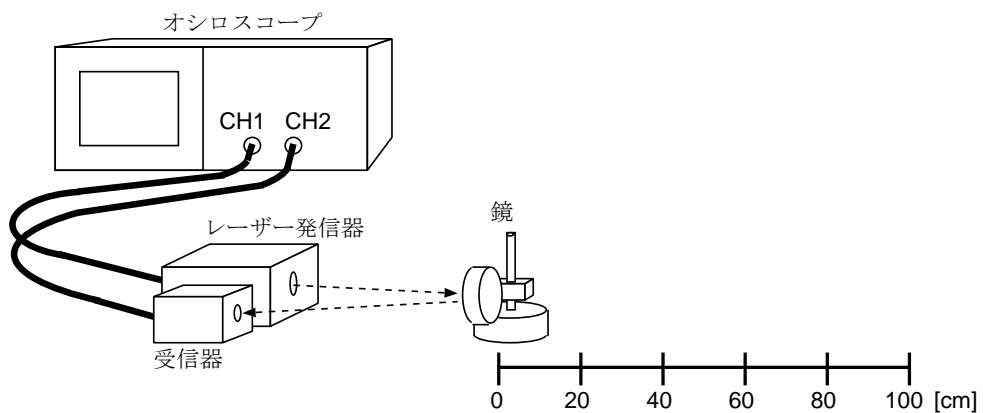


図 2 実験の構成の模式図

ここでは上で説明したシンプルな Galileo の原理を使う。Galileo の時代と違うのは非常に短い時間も測定できることである。レーザー光を使い、鏡で反射して戻ってくるまでの時間をオシロスコープを用いて測定する(図 2 参照)。本実験では 1 MHz 一定周期で 2.5 ns (nanosecond, ナノ秒 = 10^{-9} s) 間だけレーザー光を発信するパルスレーザーを使う。この光の強度が受信器で検出される。受信された信号は光路が長くなればその分ずれる。そのずれから光速が (2) 式を用いて直接測定できる。

厳密に言えば我々が測定するのは真空中の光速ではなく、空気中の光速である。屈折率 n を持つ媒質中の光速は

$$\frac{c}{n} \quad c: \text{真空中の光速} \quad (3)$$

である。空気の屈折率は $n_{\text{空気}} = 1.0003$ と 1 に近いため、実験の誤差内では真空中の光速と一致する。一般に屈折率は $n \geq 1$ であり、媒質中の光速は真空中の光速より遅い。これは媒質の原子や分子が光を一度吸収して放出しているからであると理解できる。(これが散乱現象の本質である。)

光路に屈折率 $n (> 1)$ の物質を長さ L_1 分入れた場合を考えよう。物質を光路に入れていない場合に比べて信号が伝わる時間に遅れが出る。この遅れ τ は以下のように求められる。

$$\tau = \frac{L_1}{(c/n)} - \frac{L_1}{c} = L_1 \frac{n-1}{c} \quad (4)$$

□ 実験方法

注意 直接、あるいは鏡面で反射したレーザー光を眼にあてないように注意すること。光路を確認する際は姿勢を低くせず、紙などで散乱させた光を見る。

オシロスコープの使い方については後述の「オシロスコープの使い方」を読むこと。

- (1) 図 2 のように機材を接続する。レーザー発信器は CH1 に、受信器は CH2 に接続する。
- (2) 鏡をレーザー発信器の前 20cm 程度の位置に設定し、レーザー光を鏡で反射させ、受信器にあてる。この際、鏡を反射した光が正確に受信器にあたるように光路を調節する。この鏡の位置を位置 0 とする (図 2 参照)。オシロスコープで発信器の波 (矩形波) と受信器の波 (発信器の波の立ち下がり時付近の変形したサイン波) を確認する。
- (3) オシロスコープの色々なスイッチを動かして使い方を理解する。
- (4) 鏡の位置を付箋を机に貼って記録する。
- (5) オシロスコープに検出された受信器の波形を保存する。(この際画面左半分にピークが来るように調整した方があとで楽である。)
- (6) 位置 0 より 20 cm ごとに 1 m まで付箋で位置に目印を付ける。
- (7) 位置 0 より 20 cm 離れた位置に鏡を移動する。
- (8) 受信器のレーザー光の波形を (5) で記憶した波形と比較し、それらの波形から時間のずれを記録する。(時間のずれを測定するには波のピークで比較するのが簡単である。)
- (9) (8) の 20 cm での時間差の測定と同様に、初めの鏡の位置より 40、60、80、100 cm 離れた位置で測定を行う。
- (10) 時間差と距離との関係をグラフに描く。
- (11) グラフより空気中の光速を求める。
- (12) 以下ではアクリルの屈折率を測定する。発信器, 受信器から鏡を間隔 1 m 程度離して設置する。(鏡を使わずに直接 1 m 程度離しても良い。)
- (13) 受信器で信号が受信されていることを確認し、その信号をオシロスコープで記憶する。

- (14) 長いアクリル棒を光路の 1 つに入れ、それによる時間的な遅れ τ を測定する。アクリル棒の両方の端面には触れないこと。
- (15) 遅延時間 τ よりアクリルの屈折率 n を求める。
- (16) 短い (20cm) のアクリル棒を握って端から中を通して手を見てみよう。どのように見えるのか、そしてそれはなぜかを考察する。(これは「全反射」に関連する現象であり、通信用光ファイバーなどに応用されている。)

□ オシロスコープの使い方

オシロスコープは検出される電圧の時間変化をグラフにする機器である。多少複雑な電気回路を作る際には不可欠と言える便利な機器である。この実験では光速を直接測定するのでかなり時間分解能の高いデジタルオシロスコープを用いる。オシロスコープの横軸は時間、縦軸は電圧である。

使い方がわからなければ質問をすること。

以下で、使いこなすのに必要なポイントを説明する。

電源ボタン 左上にあるのでボタンを押して電源を入れる。

メニュー 前面パネルにあるボタンを押すと、押したボタンに応じて画面の右部分にメニューが表示される。メニューのそれぞれの項目には画面右隣のボタンが対応している。項目を選んだり、パラメータを変更するには対応するボタンを押す。

オートセット **AUTOSET** ボタンを押すと自動的にオシロスコープの設定をしてくれる。わからなくなったら、まず、オートセットしてみると良い。

チャンネル 実験で使うオシロスコープは 2 チャンネルある。これは同時に 2 つの入力信号を扱えるという意味である。1 つはレーザー発信器の信号 (CH1) であり、もう 1 つは受信器の信号 (CH2) である。CH1 の信号は黄色、CH2 の信号は水色で表示される。

トリガ 画面では時間とともに電圧のグラフを描くことを繰り返すが、周期が信号の周期と同期していなければ信号は読み取れない。その設定がトリガである。トリガは信号が一定電圧になる時間が画面上同じ位置に来るように表示する。同じ電圧は上昇時と下降時に生じるがどちらにでもトリガをかけられる。トリガのかかる電圧は **トリガレベル** のつまみで調整でき、その電圧は画面に矢印で右側に表示される。本実験では、レーザー発信器の信号をトリガに使い、電圧下降時で電圧の振れ幅の大体真ん中あたりをトリガに使うと良い。

垂直軸 垂直軸 (電圧) については CH1, 2 それぞれについて個別に調整できる。スケールは **VOLTS/DIV** のつまみ、垂直位置は **垂直軸位置** のつまみで調整する。それぞれ見やすいようにいつでも調整して良い。

水平軸 水平軸 (時間) は CH1, 2 と連動しており、個別には設定できない。スケールは **SEC/DIV** のつまみ、水平位置 (時間の原点) は **水平軸位置** のつまみで調整できる。本実験ではスケールは最小の時間幅に設定し、水平位置は時間のずれを測定し始めたら固定していなければならない。

平均 信号は平均を取ることで安定させる事ができる。本実験では平均を 16 回以上取るとデータが安定して見やすくなる。平均のやり方は **波形取込** ボタンを押し、メニューから **平均** を選び、**平均回数** を設定する。平均を取っても波形が安定しない場合は、トリガレベルを調整し直すこと。

波形保存 波形は 2 つまでメモリに保存できる。この実験では位置 0 での受信器の波形を保存しておくと便利である。波形保存のやり方は **保存/呼出** ボタンを押し、メニューから **波形** を選ぶ。次にメニューの **ソース** で保存したいチャンネル、**Ref** で保存先のメモリ (A,B) を選び、**保存** のボタンを押す。保存された波形は白色で表示される。