

- ▶ 実験試験の時間は五時間である。大問は二問あり、その合計点は 20 点である。ただし、大問の配点は異なることに注意せよ。
- ▶ 試験開始の合図(ホイッスル)があるまでは、試験問題の入った封筒や実験装置の入った箱を開けてはならない。
- ▶ 各大問に対応して、解答用紙 (Answer Sheet) が用意されている(ヘッダーの番号と色を見よ)。答は解答用紙の所定の欄に正しく記入すること。
- ▶ 計算の詳細は、IPhO の答案用紙やグラフ用紙に記述せよ。答案用紙およびグラフ用紙には、**必ずすべてのヘッダーに必要事項を記入し**、さらに**オモテ面のみ**を使用すること。ウラ面は採点されない。文章による説明は必要最小限とし、なるべく表、グラフ、数式、数値、記号、および図を用いて解答せよ。採点の対象から外したい用紙には、バツを付けること。
- ▶ 許可なく席から離れてはならない。手助け(計算機の故障、用紙の追加、お手洗い、など)が必要な場合は、ガイドが来るまで手を挙げていること。
- ▶ **試験終了**の合図は、音声(ホイッスル)でなされる。試験終了の合図とともに、直ちに解答をやめて、指示があるまで席についていること。試験終了の合図が鳴る前に回答が終了した場合は、手を挙げる。
- ▶ 解答用紙はオモテ面を上にし、次の順に番号をつけて並べてから封筒に入れなさい。
 1. 大問 1 (E1) の解答用紙とそれに続く E1 の答案用紙とグラフ用紙。
 2. 大問 2 (E2) の解答用紙とそれに続く E2 の答案用紙とグラフ用紙。
 3. バツ印をつけたものを含むすべての用紙。
- ▶ **試験終了の次の合図** (ホイッスル) のあと、**席を離れて良い**。
- ▶ 部屋の外には、どの用紙も持ち出してはならない。

注意：すべての測定値と計算結果は SI 単位（教科書で用いる単位）で示し、適切な桁数で表せ。特に求められたときのみ誤差を示せ。

1.0 導入

レーザ距離計 (LDM) を使った実験

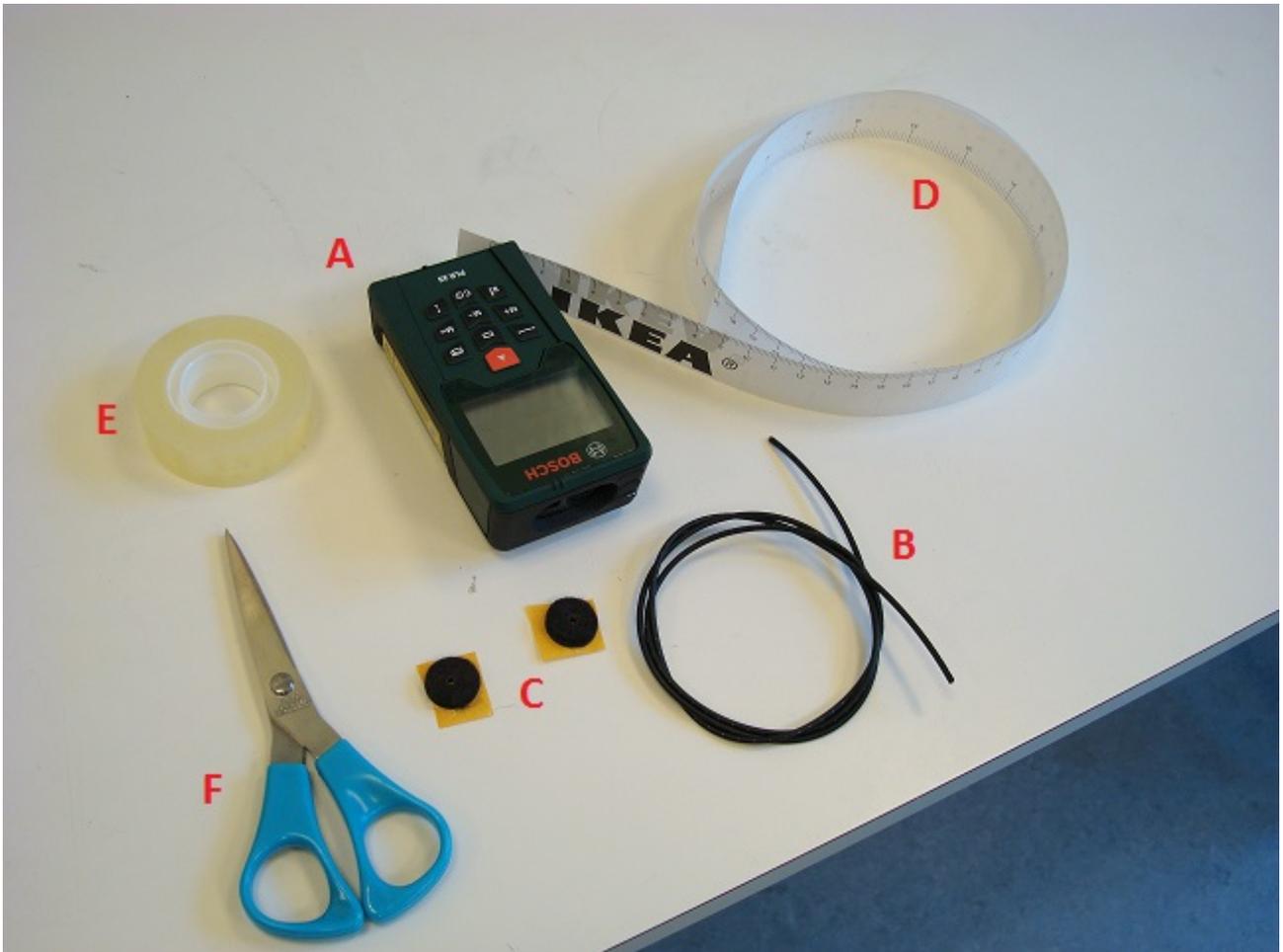


図 1.1 実験に用いる器具

- A: レーザー距離計
- B: 光ファイバーケーブル (およそ 1m)
- C: 穴のある黒いフェルトの粘着パッド
- D: メジャー
- E: テープ
- F: はさみ
- G: 黒い箱の蓋

レーザ距離計 (LDM, 図 1.2 と 図 1.3) は送信部と受信部からなる。送信部は、変調した (すなわち、振幅が変動している) レーザビームを出すことができるレーザダ

イオードである。レーザービームが物体にあたると、光はレーザーの照射点の位置からあらゆる方向に反射する。この反射光のうちあるものは、装置の発信部のすぐそばにある受信部に戻ってくる。受信部の光学部分はレーザーの照射点に焦点を合わせ、そこから戻ってくる光を受けようになっている。この装置の電気回路は、送信した光と受信した光の信号の変調のずれを比較して、時間差を測定するようになっている。

その時間差 t は、次の値に変換される：

$$y = \frac{1}{2}ct + k$$

この式での値 y は、装置のディスプレイに表示されている距離である。ここで、 $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$ は光の速さである。 k は装置の設定に依存する定数である。測定において、装置の前面（発信部・受信部のある面）からの距離を測るか、後面からの距離を測るかを切り替えることができる。レーザー距離計の電源が入ったときは、後面からの計測になるように設定してある。**この設定は、すべての計測の間変えないこと。**

視差のため、この LDM は 5cm 以下の短い距離は計測することができない。測定可能な最大の距離はおよそ 25m である。装置の形状は、前面も後面もレーザービームに対し垂直になるような形状になっている。そのため、装置がテーブルに置かれているとき、レーザー光は垂直（ディスプレイに対して垂直）方向に偏光している。

レーザーダイオードは、出力が 1mW 以下で波長 635 nm の class 2 のレーザーである。製造元によると測定精度は±2mm である。

注意：この装置のレーザー光が目にあたるとダメージを与えるので、レーザービームを覗き込んだり、人の目に向けたりしてはいけない！

LDM の設定

上の式の距離 y の計算は、もちろん光が速度 c で進むことを仮定している。この実験における正確さのレベルでは、通常の大気中の屈折率が $1.00029 \approx 1.000$ であることから、真空中の光の速さと空気中の光の速さを区別する必要はない。



図 1.2 矢印を付したラベル (A,B,D,E) 以外の6つのボタンは使わない(それらは、面積や体積を計算する時に使う) ここで使うボタンは以下のとおりである:

- A:** オン/オフ
- B:** 計測する距離を、前面からにするか後面からにするかを切り替えるスイッチ。
- C:** 前面からの計測か、後面からの計測か表示する
- D:** レーザー照射/計測開始
- E:** 連続計測
- F:** 連続計測中の表示



図 1.3 前面から見たレーザー距離計

A: 受信部：レーザーの照射点に焦点を合わせたレンズ

B: 送信部：レーザービームを覗き込んではいけない！

1.1 レーザー距離計による測定

図 1.2 に示したように、この装置はボタン **D** を一度押すとレーザーが照射され、目標に照射したところで再度ボタン **D** を押すと測定を実行する。

1.1a	テーブルの上から床までの距離 H を、LDM を使って測定する。誤差 ΔH を書け。そして、どのように測定を実施したか略図を用いて示せ。	0.4
------	--	-----

1.2 光ファイバーの実験



図 1.4 光ファイバーケーブルの略図。

長さが約 1m で直径が約 2mm の光ファイバーケーブルが 1 本ある。このケーブルは、2つの光学材料からできている。芯（およそ直径 1mm）は高い屈折率のプラスチックでできている。この芯は、わずかに低い屈折率をもつプラスチックの外装材で囲まれている。そして、これは黒いプラスチックの保護材でおおわれている。芯と外装材は、その境界で光が全反射することによって、光が芯の中を進むようになっている。なぜなら、入射角が臨界角より大きい限り、光が芯から出ていかないからである。光ファイバーケーブルが極端に曲がっていない限り、光は芯の中を進む。

LDM を連続測定 (E, 図 1.2 を見よ) に設定しなさい。それにより、ディスプレイはおよそ 1 秒ごとに y の値を更新する。LDM は、数分後に自動的にスリープモードに入る。それは、赤いスタートボタンを押すことによって計測可能状態に復帰させることができる。

直径 2mm の穴のある黒いフェルトの粘着パッド (A, 図 1.3 を見よ) の一つ（もう一つは予備である）を、受信部のレンズに取り付けるとき、パッドの粘着側をレンズに軽く押し付けるが、力を入れ過ぎないように慎重に作業せよ。先端がレンズに触れるように、長さ x の光ファイバーケーブルをパッドに差し込みなさい。図 1.5 を見よ。



図 1.5 (a) フェルトのパッドと光ファイバーケーブル (b) 光ファイバーケーブルの取り付け方

光ファイバーケーブルの反対側の端は、レーザービームの中央部分のガラスに接触したままにしなければならない。その状態のまま、表示された y の値を読みなさい。支給されたはさみは、光ファイバーケーブルを異なる長さ x に切るのに用いなさい。

これ以上は光ファイバーケーブルを支給しないので、足りなくなることがないように、切る前に慎重に考えなさい。

また、連続測定モードでしばらくすると、電子回路の過熱のため LDM のディスプレイに、温度計のマークが表示されるかもしれない。その場合、LDM を冷ますためにしばらく LDM の電源を切りなさい。

1.2a	x に対する y の値を測定しなさい。測定値の表を用意し、 x に対する y のグラフを描きなさい。	1.8
1.2b	そのグラフを用いて、光ファイバーケーブルの芯の材料の屈折率 n_{co} を求めなさい。そして、光ファイバーケーブルの芯の中での光の速さ v_{co} を計算しなさい。	1.2

1.3 鉛直からある角度をなした LDM

この実験では、図 1.6 に示す装置が必要となる。

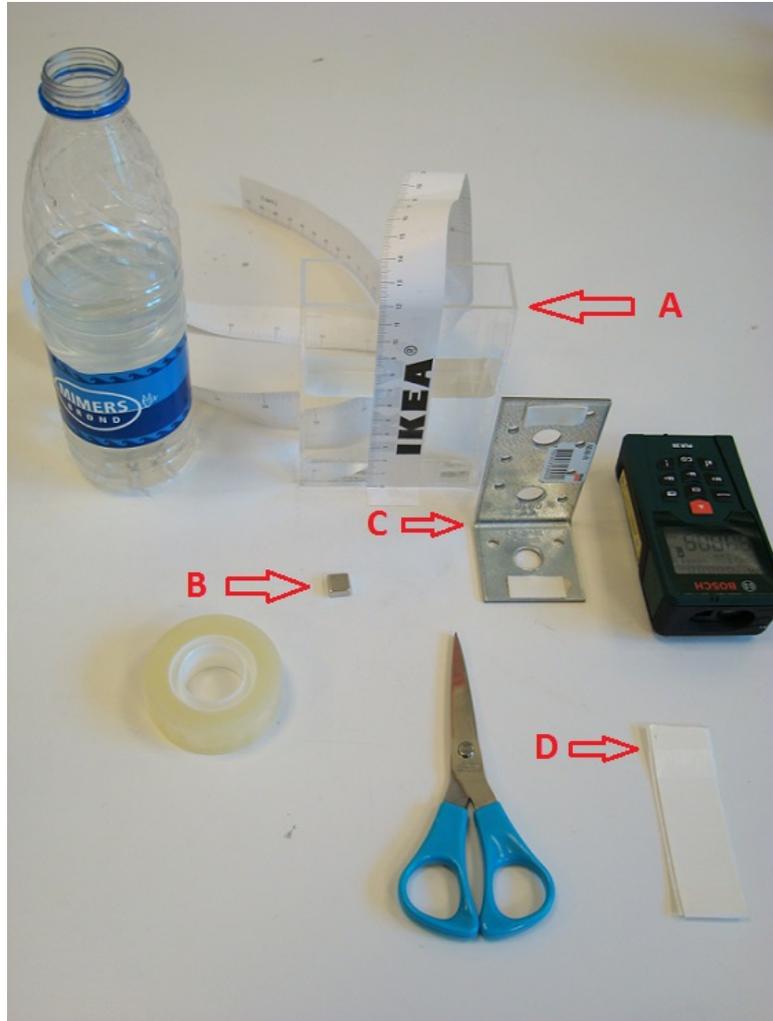


図 1.6 図に示された実験装置:

- A: 水をいれた光学容器とメジャー
- B: 黒い箱の上に L 字金具（山形鋼）を固定するマグネット（マグネットは L 字金具上に付いている）
- C: 粘着テープを貼った L 字金具
- D: 粘着テープ

レンズから黒いフェルトのパッドをとりなさい。そして、LDM を以下のように配置しなさい。

まず、L 字金具上に二つの粘着テープを貼りなさい（図 1.7 の A）。

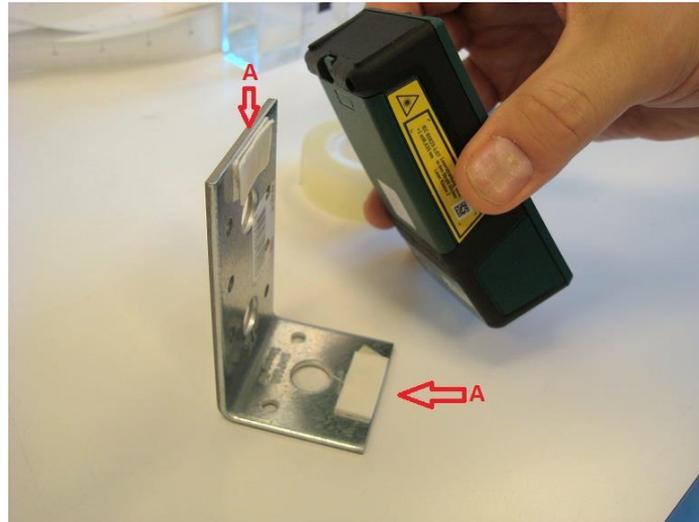


図 1.7 L 字金具への 2 つの粘着テープの貼り方

LDM を図 1.8 にあるように L 字金具上に注意して置きなさい。



図 1.8 L 字金具への LDM の置き方

LDM を置いた L 字金具は、図 1.9 に示したように黒い箱の上に置きなさい。箱の中の下にマグネットを置いて、L 字金具を箱に固定しなさい（小さなマグネットが L 時金具に付いている）。箱の上面が約 4 度傾いているので、LDM を写真にあるように正確に設置することが重要である。これでレーザー光が、金具上で遮断されずに下を向く。

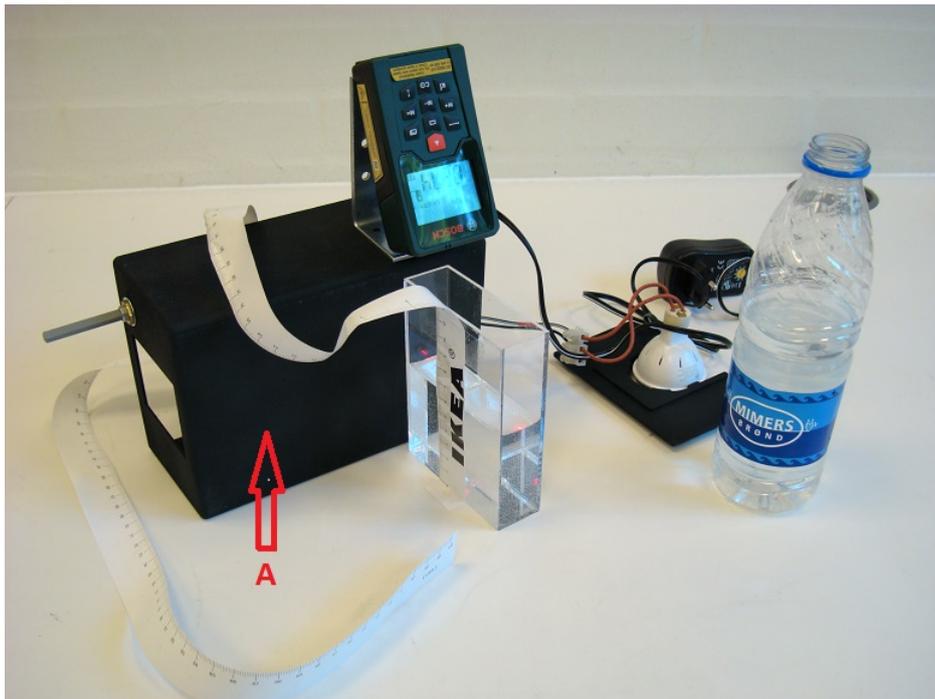


図 1.9 実験装置の配置（黒い箱は支持台としてのみ用いる。ペットボトルの後ろ側に写っている装置は使わない。）

A: 重要: 図のように、黒い箱の底が手前を向くように置きなさい。上を向いている側は水平面に対して約4度傾いている。レーザー光と鉛直方向とのなす角度 θ_1 は、この実験中同じにしておかなければならない。

LDM のスイッチを入れて、上で説明したように設置すると、レーザー光が鉛直方向に対して角度 θ_1 となる。この角度を、実験中は同じにしておかなければならない、まず、この角度を決定する。この実験では光学容器は使用しないので、別にしておく。

1.3a	机の上のレーザー光の照射点までの距離 y_1 を測定せよ。そして、LDM を置いた箱を、レーザー光が床にあたるまで、水平に動かさなさい。床の上のレーザー光の照射点までの距離 y_2 を測定せよ。誤差を評価せよ。	0.2
1.3b	測定値 H （問 1.1a より）と y_1, y_2 のみを用いて角 θ_1 を計算せよ。誤差 $\Delta\theta_1$ を評価せよ。	0.4

1.4 光学容器を用いた実験

レーザー光が容器の側面にあらず開口部から入って、底の中央付近にあたるように光学容器を置きなさい（図 1.10）。容器の中に水を入れなさい。水の深さを x とする。LDM の読みを y としなさい。

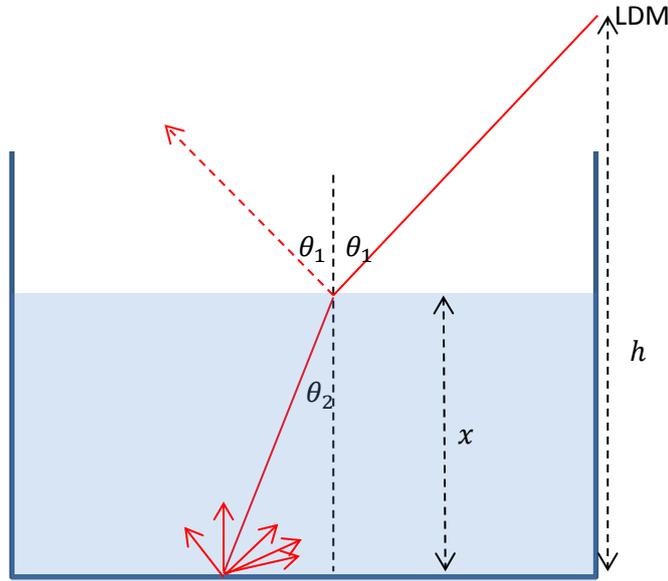


図 1.10 深さ x の水を入れた光学容器中のレーザー光の模式図

1.4a	x に対応する y の値を測定せよ。測定した値の表を作成せよ。そして、 x の関数として y のグラフを作成せよ。	1.6
1.4b	グラフがどのような形となるべきかを、方程式を用いて理論的に説明せよ。	1.2
1.4c	グラフを用いて水の屈折率 n_w を決定せよ。	1.2

2.0 導入

図 2.1 に今回の実験に用いる装置を示す。

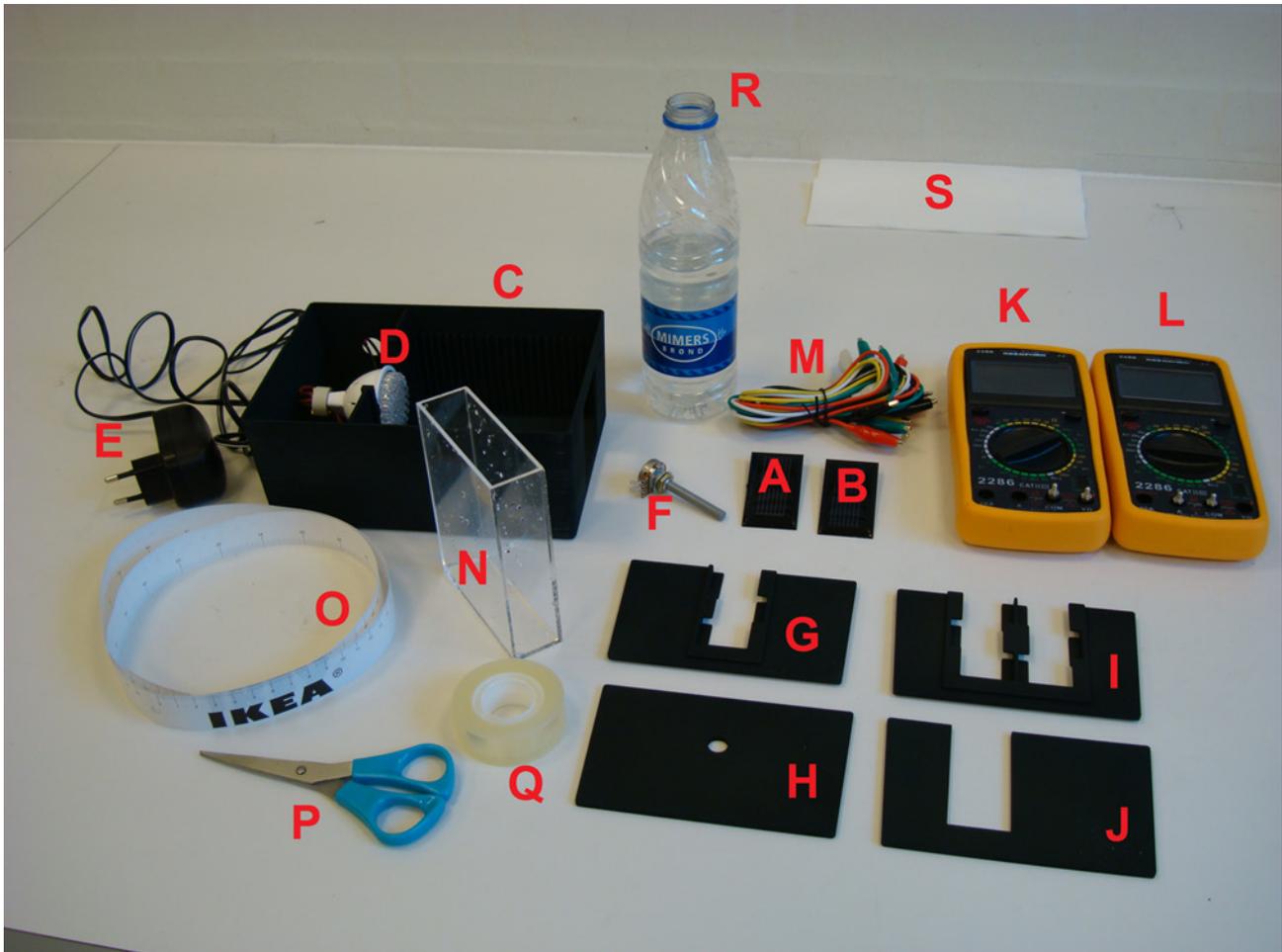


図 2.1 実験問題 E2 に用いる装置

装置リスト (図 2.1):

- A: 太陽電池
- B: 太陽電池
- C: 光源や太陽電池などを置く溝（スロット）が付いた箱
- D: LED 光源を取り付けたホルダー（U字型の切込みを持つ）
- E: 光源 D の電源
- F: 可変抵抗（軸を回すと端子間の電気抵抗値が変化する）
- G: 箱 C へ太陽電池一つを配置するためのホルダー
- H: 箱 C 中で用いる円形絞り
- I: 箱 C へ太陽電池二つを配置するためのホルダー

- J: 箱 C の中で用いる遮へい板
- K: デジタル・マルチメータ
- L: デジタル・マルチメータ
- M: みのむしクリップ付き導線
- N: 光学容器(大きな透明容器)
- O: メジャー
- P: はさみ
- Q: テープ
- R: 光学容器 N を満たす水
- S: 余分の水を拭き取る紙ナプキン
- T: 光学容器 N から水を除くプラスチックカップ (図 2.1 にはない)
- U: プラスチックピペット (図 2.1 にはない)
- V: 箱 C のふた (図 2.1 にはない)

データシート: 基本定数の表

真空中での光速	$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
素電荷	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
ボルツマン定数	$k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

太陽電池は、中の電荷が分離して電位差を生じることで、入射光の電磁エネルギーの一部を電気エネルギーへ変換する。これにより、電流を発生させることができる。実験問題 E2 は、与えられた装置を使って、太陽電池について調べることを目的とする。その装置は、いろいろな板やふたに加えて、太陽電池や光源のためのホルダーが入る箱からなる。可変抵抗は、図 2.2 にあるように、箱に取り付ける。2つの端子しか用いないので、抵抗の3つの端子の一つが取り除かれている。また、みのむしクリップ付きの導線と、背面に端子がある2つの太陽電池（シリアル番号と A か B の文字が書いてある）がある。2つの太陽電池はほとんど同じだが、多少の違いがある。2つのマルチメータには、電流計または電圧計として使用できるように、異なる端子が指定されている（図 2.3）。また、実験は、ペットボトルの飲料水とともに光学容器も用いる。

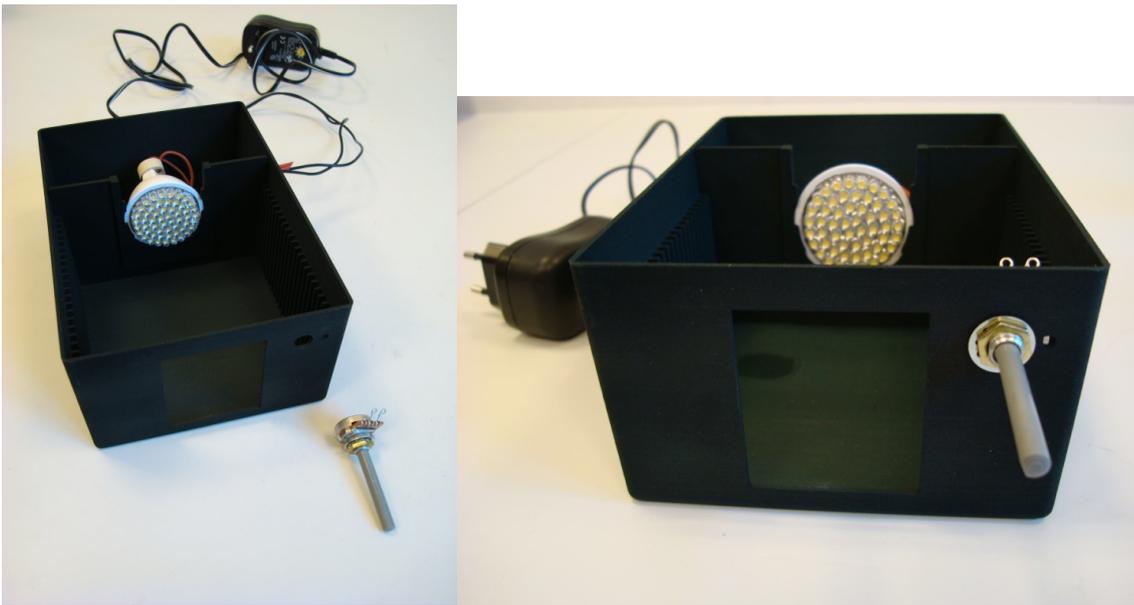


図 2.2 (a) 光源や抵抗を取り付ける箱 (b) 箱に取り付けられた抵抗。軸穴の右にある小さな穴に、抵抗の小さな突起がはまるようにせよ。



図 2.3 それぞれ、電流計 (左) や電圧計 (右) として使用するように端子を取り付け、切り替えダイヤルを合わせた状態のマルチメータ。左上の「POWER」ボタンを押すことで装置のスイッチが入る。ある時間使用しないと自動的にスイッチが切れる。この装置は、交流電流や電圧(\sim)と、直流電流や電圧(=)を測定できる。電圧計の内部抵抗は、測定レンジによらず $10\text{M}\Omega$ である。測定レンジによらず、最大の読みでの電流計の電位差は 200mV である。測定範囲を超えた場合には「1」が表示され、より上の測定レンジを用いる必要がある。測定値の表示を保持する場合以外、右上の「HOLD」ボタンを押してはいけない。

警告: 測定電流により太陽電池が損傷するおそれがあるので、マルチメータを、太陽電池に接続して抵抗計として用いてはいけません。マルチメータの測定レンジを切り替えるときには、ダイヤルを注意して回すこと。不安定になり故障する可能性がある。測定する際には、ディスプレイの下部に設定レンジが小さく表示されているか確認しなさい。ダイヤルが正しい位置にない場合は、ディスプレイに数値が表示されている場合でも、マルチメータで測定できていない場合がある。

注意: 光源の AC アダプタの電圧つまみは変更しないこと。実験中、12V とすること。（AC アダプタは、テーブルのコンセント(230 V \sim) に接続すること）

注意: 誤差は明示されたときのみ考慮すること。

注意: すべての測定値や計算結果は SI 単位（教科書で使う単位）で示すこと。

注意: この実験での電流や電圧のすべての測定で、LED 光源をつけておくこと。

2.1 光源への距離に対する太陽電池電流の依存性

この問いでは、電流計が繋がれた回路中の太陽電池によって発生する電流 I を測定し、その電流 I が光源までの距離 r にどのように依存するかを決定する。光は、個々の発光ダイオードの**内部**で発生するので、 r は図 2.4 に示すように測定する。

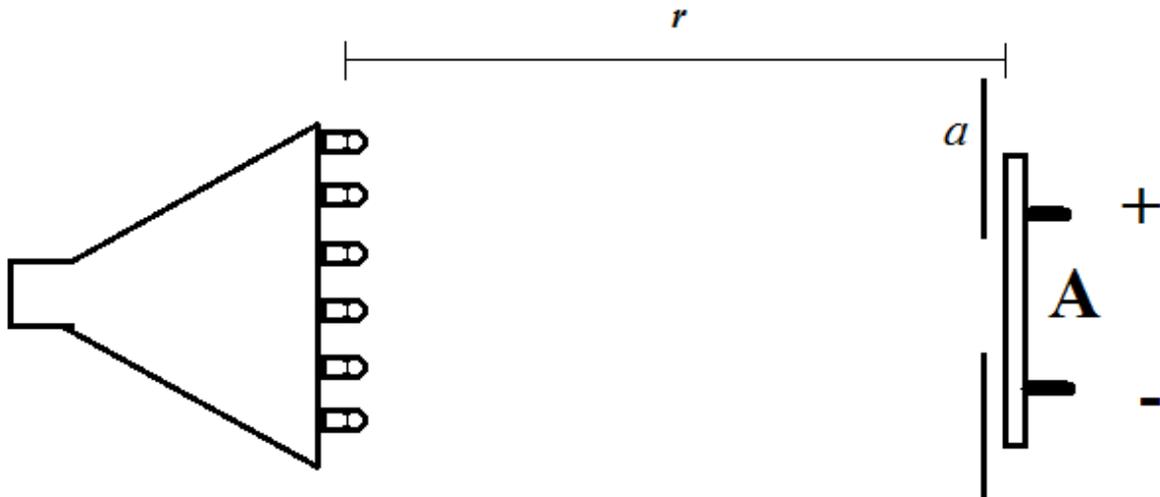


図 2.4 問 2.1 での 装置配置の上面から見た図

太陽電池 A の直前に円形絞り a を配置する。発光ダイオード内部から太陽電池の表面への距離を測定する。

この実験では電流計の測定レンジを変えないこと。電流計の内部抵抗は測定レンジに依存し、太陽電池から得られる電流に影響する。

光源と太陽電池 A のシリアル番号を解答用紙に記入すること。光源を取り付けたホルダーを配置する（光源はホルダーにぴったりの大きさなので、取り付けるときに注意しなさい）。太陽電池 A を、一つ用ホルダー G に取り付けて配置し、そのすぐ前に円形絞りを置く。光源への距離 r の関数として電流 I は、 r があまり小さくない場合には、以下の式で近似できる。

$$I(r) = \frac{I_a}{1 + \frac{r^2}{a^2}}$$

ここで、 I_a と a は定数である。

2.1a	r の関数として I を測定し、その表を作成せよ。	1.0
2.1b	適当なグラフを用いて I_a と a の値を決定せよ。	1.0

2.2 太陽電池の特性

円形絞りを取り除きなさい。図 2.2 に示したように箱に可変抵抗を取り付けなさい。抵抗から最も遠い、スロット番号 0 へ光源を設置せよ。**円形絞りなしで**、一つ用ホルダーに太陽電池 A を取り付け、スロット番号 10 へ配置しなさい。太陽電池の特性を測定できるように、図 2.5 に示したような回路を作れ。つまり、太陽電池や抵抗、電流計を含む回路中の電流 I の関数として、太陽電池の端子電圧 U を測定しなさい。

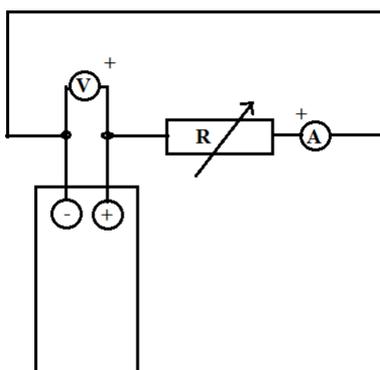


図 2.5 問 2.2 の特性測定のための回路図

2.2a	対応する U と I の表を作成せよ。	0.6
2.2b	電流の関数として電圧のグラフを描け。	0.8

2.3 太陽電池の理論特性

この実験で用いた太陽電池について、電流は電圧の関数として以下の式で与えられる。

$$I = I_{\max} - I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right) - 1 \right)$$

ここで、パラメータ I_{\max} , I_0 と η は与えられた照射条件で一定である。温度は、 $T = 300 \text{ K}$ とする。基本定数 e と k_B は、それぞれ素電荷とボルツマン定数である。

2.3a	問 2.2b のグラフから I_{\max} を決定せよ。	0.4
------	---------------------------------	-----

パラメータ η は 1 から 4 の範囲にあると仮定できる。電位差 U がある値にあるとき、上の式は、以下で近似できる。

$$I \approx I_{\max} - I_0 \exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right)$$

2.3b	上で述べた近似が成立する U の値の範囲を評価せよ。そして、与えられた太陽電池について I_0 と η の値をグラフから決定せよ。	1.2
------	--	-----

2.4 太陽電池の最大電力

2.4a	外部回路に伝達できる太陽電池の最大電力を P_{\max} とする。いくつかの適当な測定により、与えられた太陽電池の P_{\max} を決定せよ。（問 2.2 での測定値を使ってもよい）	0.5
2.4b	最適負荷抵抗 R_{opt} 、つまり太陽電池がその最大電力を供給するときの全外部抵抗 R_{opt} を推定せよ。誤差も含めて結果を表し、用いた方法を適当な計算とともに示せ。	0.5

2.5 太陽電池の比較

スロット番号 15 に、2 つ用ホルダー（図 2.1 の I）を用いて両方の太陽電池（A と B）を取り付けたものを配置せよ（図 2.6）。

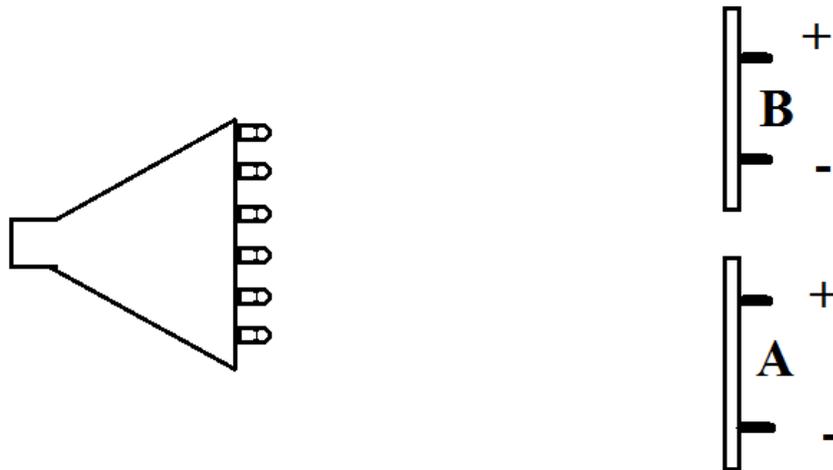


図 2.6 問 2.5 の光源と太陽電池の上面から見た図

2.5a	与えられた照射において、以下を測定せよ。 - 太陽電池 A で測定できる最大の電位差 U_A 。 - 太陽電池 A で測定できる最大の電流 I_A 太陽電池 B についても、同様の測定をせよ。	0.5
2.5b	測定に用いた回路の回路図を、太陽電池と電流計または電圧計の配線が分かるように描け。	0.3

2.6 太陽電池の組み合わせ

図 2.7 に示すように、2つの太陽電池を直列に、2つの異なる方法でつなぐことができる。また、（図には示されていないが）それらを並列につなぐ、2つの異なる方法もある。

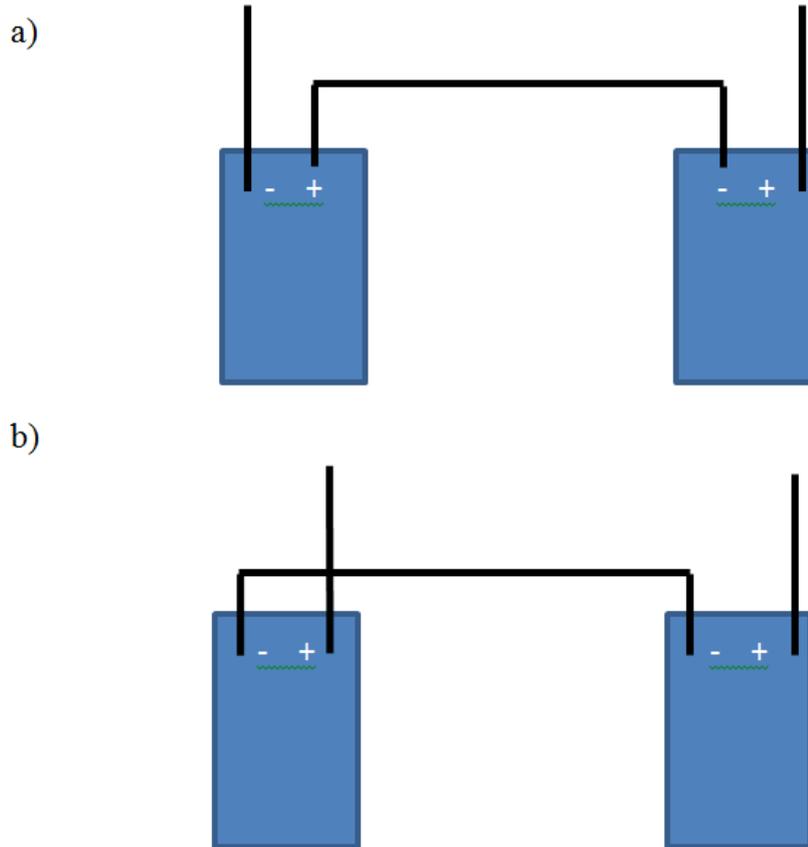


図 2.7 問 2.6 のための、直列に太陽電池をつなぐための 2 つの方法。並列につなぐ 2 つの方法は示されていない。

2.6	2つの太陽電池のうち1つが遮へい板（図 2.1 の J）で覆われているとき、外部回路に対して最も高い出力を与えることができるのは、2枚の太陽電池の4種類の接続方法のどれか決定しなさい。 ヒント ：それぞれの接続方法で測定された、最大電圧と最大電流をもとに計算することで、最大出力を推定できる。対応する回路図も描きなさい。	1.0
-----	---	-----

2.7 光学容器(大きな透明容器)の太陽電池の電流に対する効果

箱の中に光源を設置し、光源用ホルダーの前方に、光源と太陽電池の間隔がおよそ 50mm になるように、一つ用ホルダーを用いて太陽電池 A を配置しなさい。そして、太陽電池

のすぐ前方に円形絞りを置きなさい。また、図 2.8 で示すように、空の光学容器を円形絞りのすぐ前に置きなさい。

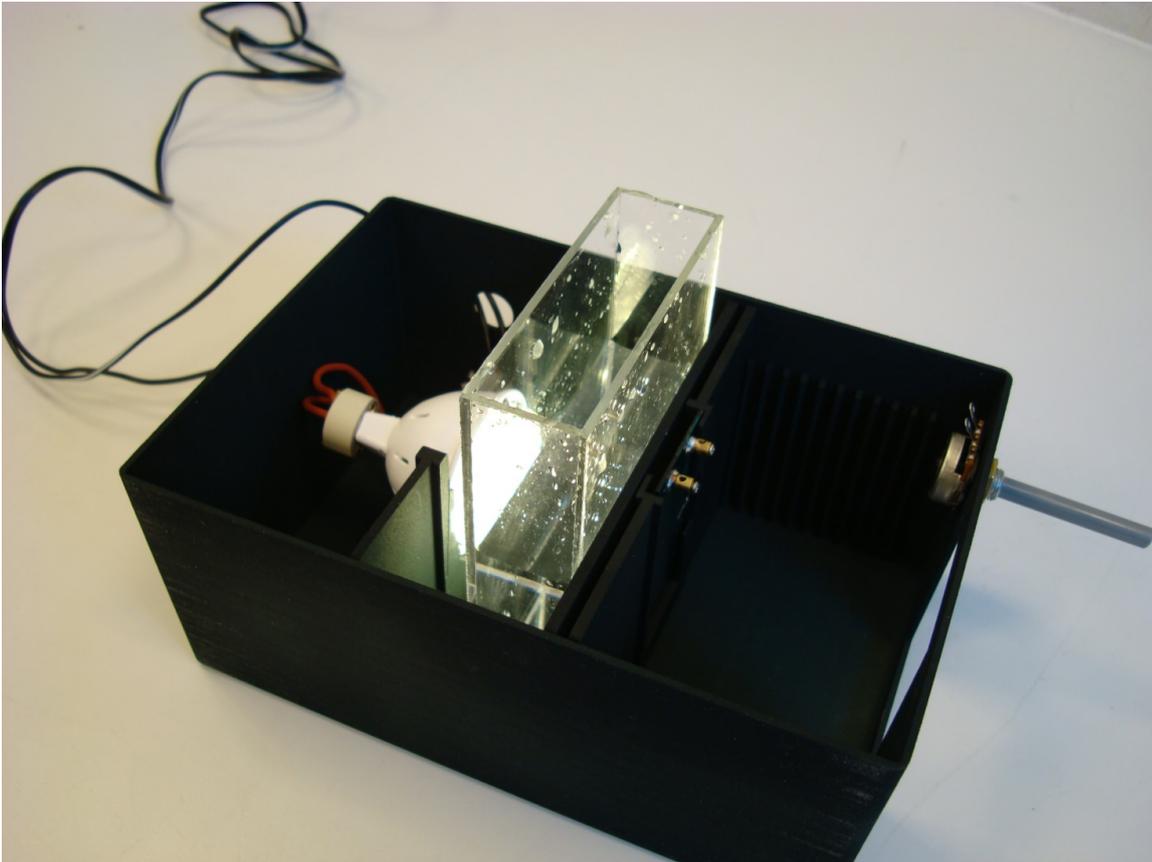


図 2.8 問 2.7 のための実験装置の配置

2.7a	光学容器の中の水の高さ h の関数として電流 I を測定しなさい。図 2.8 を見よ。測定値の表を作りグラフを描きなさい。	1.0
2.7b	グラフがなぜそのような形になるか、図と記号だけを用いて説明せよ。	1.0

光源と太陽電池の間の距離が最大になるように、箱の中に光源と太陽電池 A を取り付けた一つ用フォルダを配置しなさい。太陽電池のすぐ前に円形絞りを配置しなさい。

2.7c	<p>この配置で，以下のことをしなさい：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 光源と太陽電池間の距離 r_1 と電流 I_1 を測定しなさい。 - 円形絞りのすぐ前に空の光学容器を置き，電流 I_2 を測定しなさい。 - 光学容器のほぼいっぱいまで水を入れて電流 I_3 を測定しなさい。 	0.6
2.7d	<p>2.7c の測定結果を用いて，水の屈折率 n_w を求めよ。その方法を適当な図と方程式で示せ。追加の測定をしてもよい。</p>	1.6