

The 43rd International Physics Olympiad — Experimental Competition

Tartu, Estonia — Thursday, July 19th 2012

- 試験は5時間です。大問2題で合計20点です。それぞれ隣接する2つの区画に、自由に使えるテーブルが2つあり、問題E1の装置が一方のテーブルに、問題E2の装置がもう一方のテーブルにあります。それらのテーブルを自由に行き来してよいですが、**一方のテーブルの実験装置やその付属品などをもう一方のテーブルに動かしてはいけません。**
- 最初、一方のテーブルの装置はカバーされ、もう一方のテーブルの装置は箱の中にあります。**カバーを外したり、箱を開けたり、試験問題が入っている封筒を試験開始のベル(3回の短いシグナル)が鳴る前に開けてはいけません。**
- 許可なく実験場所から離れてはいけません。もし助けが必要な場合(実験装置の不調や電卓の故障、トイレなど)は、イスの上に置いてある長い柄の付いた旗(“HELP”あるいは“TOILET”)を、ボックス席の壁の上に見えるように掲げて、担当者が来るまで挙げておいて下さい。
- 用紙の表面のみを用い下さい。
- それぞれの問題に、**専用の解答用紙(SOLUTION SHEET)**(ヘッダー部分の番号と絵文字で確認)があります。解答を、対応する解答用紙に書き下さい。各問に対して、解答用紙に通し番号があります。通し番号にしたがって解答用紙を使って下さい。解答用紙には、問題のパート(Problem part)と質問(Question)番号を記入下さい。最終的な答えは、**答案用紙(ANSWER SHEET)**の対応する箇所にも記入下さい。さらに下書き用紙(**DRAFT**)もあります。採点して欲しくないことは、下書き用紙に書き下さい。もし、解答用紙に採点して欲しくないこと(間違った解答など)を書いてしまった場合には、線を引いて消して下さい。
- ある問題に、もっと用紙が必要な場合は、“HELP”の旗を掲げて担当者に問題番号を言い下さい。もう2枚の解答用紙が与えられます(何回でも)。
- 解答を、なるべく方程式や数、表や記号、図で説明し、できるだけ文章は書かないようにして下さい。
- **実験試験中は、不必要に歩き回ったり、壁をゆらしたりしないようにして下さい。レーザーを用いる実験は振動に敏感である。**
- **目を痛めるので、レーザー光線やその反射光をのぞき込まないようにして下さい。**
- 最初の1回のベルは試験終了30分前の合図です。2回のベルは終了5分前です。3回のベルは試験終了です。**3回のベルが鳴ったら、直ちに書くのを止めなさい。すべての用紙を机の上の封筒に入れなさい。部屋からどの用紙も持ち出してはいけません。最終のベルの前に終わったら、旗を揚げなさい。**

PROBLEM

Problem E1

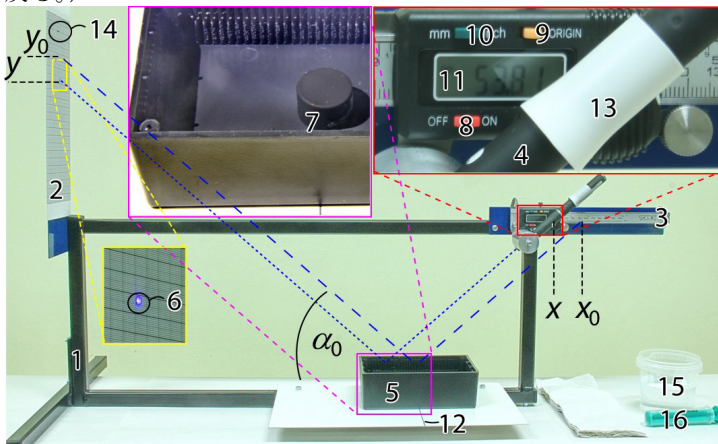


Problem E1. 水の透磁率 (10 points)

磁場が強磁性体以外の物体に及ぼす効果は微小であるが、次の事実を考慮して、適切な実験手法を用いることで測定することができる。比透磁率が μ の物体中での磁場のエネルギー密度は $w = \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2$ で与えられ、典型的には μ は 1 に非常に近い。この実験問題では、ネオジウム永久磁石が作る磁場が水に及ぼす影響を調べることで、水の透磁率を測定する。この問題では不確かさの評価は必要はない。また、表面張力による効果は無視してよい。

実験装置のセットアップ 1 スタンド (色のつきの番号は図中の番号に対応する) に 3 デジタルノギス、4 レーザーポインター、5 水の入った容器が取り付けられており、容器の中に 7 (軸方向に磁化した) 円柱形の永久磁石がある。容器はスタンドに磁石で固定してある。レーザーはノギスに固定してあり、ノギスはスタンドに固定してある。ノギスに沿ってレーザーを水平に動かすことができる。レーザーの電源スイッチは 13 白い円筒形のチューブを使って固定できる。磁石の上の水深をおおよそ 1mm に調整すること。(浅いと、水面が曲がりすぎてスクリーンの目盛りが読みにくくなる。) 調整には 15 水の入ったコップと 16 注射器を用いるとよい。(水面を 1mm 上げるためには、水を 13ml 加える) 磁石が水面上に顔を出さないようにする。14 小型のマグネットを使って 2 グラフ用紙をスタンドの鉛直な部分に貼付け、スクリーンとして用いよ。スクリーン上のレーザースポットがぼやけてしまう場合は、水面のホコリを吹き飛ばすこと。

図中の残りの番号の説明は以下の通りである。6 スクリーン上のレーザースポット。11 ノギスの液晶ディスプレイ。10 ノギスの単位を mm か inch に切り替えるスイッチ。8 電源スイッチ。9 ノギスの目盛りの零点を設定するスイッチ。図ではレーザーポインターに隠れて見えないが、電源スイッチの右側にあるもう一つのボタンを押すと、一時的に原点をリセットする。(意図せず押してしまった場合は、もう一度押すと通常モードに戻る。)



計算のための数値測定 磁石の中心とスクリーンとの水平距離は $L_0 = 490 \text{ mm}$ である。磁石の中心軸が固定台の 12 黒線、および、レーザー光線の両方と交わっているか確認し、必要ならば水平方向に動かし調整を行うこと。

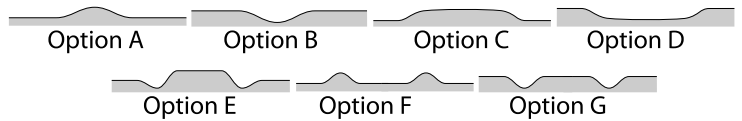
磁石の軸上にあり、平らな表面から高さ 1 mm の地点での磁束密度は $B_0 = 0.50 \text{ T}$ である。水の密度は $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、重力加速度は $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、真空の透磁率は $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ である。

WARNINGS:

- ◇ レーザーの方向は事前に調整してあるので動かさないこと。
- ◇ レーザービームやその反射光を直接覗き込まないこと。
- ◇ 無理にネオジウム磁石を引き離そうとしないこと。
- ◇ 磁石につくものをネオジウム磁石に近づけないこと。
- ◇ 使用していない時はレーザーの電源を切ること。バッテリーは 1 時間しか持たない。

Part A. 水面の定性的な形状 (1 points)

磁石が水面上に顔を出していないという条件の下で、水面の下に円柱形の磁石があると、水面は曲がる。磁石の上の水面の形状を観察し、水が反磁性 ($\mu < 1$) であるか、常磁性 ($\mu > 1$) であるかを答えよ。



上図から適切な選択肢を選び、答案用紙 (ANSWER SHEET) の下線部を埋めよ。また、 $\mu > 1$ か $\mu < 1$ も記入せよ。この問題では解答の理由を答える必要はない。

Part B. 水面の定量的な形状 (7 points)

レーザー光線の水面での反射を測定することで、高感度で水面の曲がり方を求められる。この方法で、磁石の上の水深が水平方向にどのように変化するかを計算する。

- (1.6 pts) ノギスの位置 x を変化させて、スクリーン上のレーザースポットの高さ y を測定せよ (図参照)。ノギスを動かし、測定可能な全範囲で測定すること。結果を答案用紙 (ANSWER SHEET) に記入せよ。
- (0.7 pts) 前問で得られた結果をグラフに描け。
- (0.7 pts) 前問のグラフを用いて、水面の水平な部分とレーザー光線のなす角 α_0 を求めよ。

以下では、水面の傾き $\tan \beta$ は以下の公式で与えられることに注意せよ：

$$\tan \beta \approx \beta \approx \frac{\cos^2 \alpha_0}{2} \cdot \frac{y - y_0 - (x - x_0) \tan \alpha_0}{L_0 + x - x_0}.$$

ここで、 y_0 はレーザー光線が磁石の中心の水面で反射した時のスクリーン上のレーザースポットの位置であり、 x_0 はその時のノギスの位置である。

iv. (1.4 pts) 傾きを計算し、答案用紙 (ANSWER SHEET) の表を埋めよ。グラフから前問で得た式の中の一部の文字式の値が読み取れるので、計算が簡単になることを用いるとよい。

v. (1.6 pts) 磁石から十分離れた場所を基準にして、位置 x を変えたときの水面の高さを計算し、答案用紙 (ANSWER SHEET) の表を埋めよ。

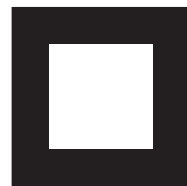
vi. (1 pt) 水面の高さを縦軸にして、得られた結果をグラフに描け。グラフ上に、磁石の上にある水面でレーザー光線が反射している範囲を示すこと。

Part C. 透磁率 (2 points)

Part B の結果を用いて、 $\mu - 1$ (磁化率と呼ばれる) を計算せよ。ここで、 μ は水の比透磁率である。答案用紙 (ANSWER SHEET) に磁化率を計算するための式と、磁化率の数値を記入せよ。

PROBLEM

Problem E2

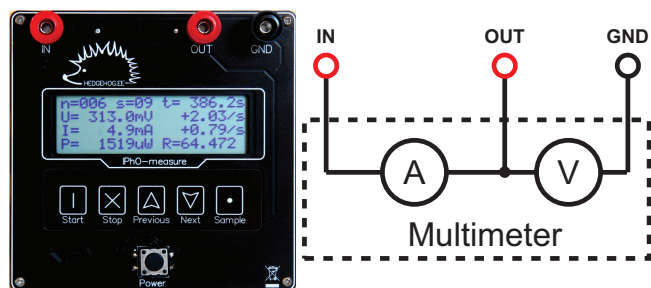


Problem E2. 非線形ブラックボックス (10 points)

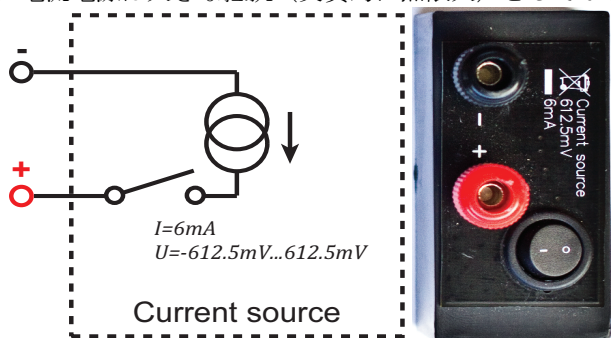
簡単な電気回路は、電気的性質が互いに直接比例するような線形素子からなる。例えば、抵抗では $V = RI$ 、コンデンサーでは $Q = CV$ 、コイルでは $V = L\dot{I}$ である。ここで、 R 、 C 、 L は定数である。しかし、この問題では、非線形素子（電気的性質の間に比例関係が成り立たない）を含んだ回路の入ったブラックボックスを調べる。

実験装置のセットアップ マルチメータ (“IPhO-measure” とラベルされている)、電流電源、非線形素子を含むブラックボックス、装置に差し込めるコネクタの付いた4本の導線が用意されている。ブラックボックスのシールをはがさないこと。

マルチメータは、電流と電圧を同時に測定することができる。電圧 V 、電流 I 、電力 $P = IV$ 、抵抗 $R = V/I$ 、電圧の時間微分 $\dot{V}$ 、電流の時間微分 $\dot{I}$ および時間 t の各々は、2000 個のデータまで記録することができる。詳しくはマニュアルを参照せよ。データが 2000 個を超えると古いものから上書きされる。

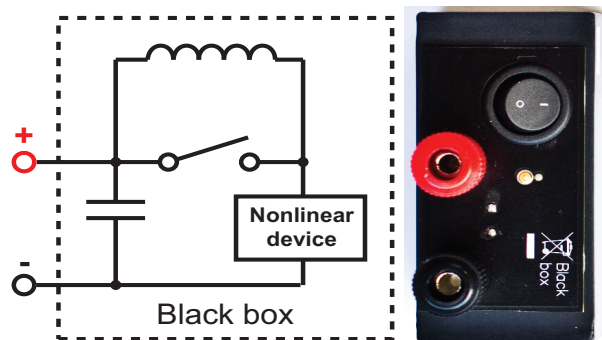


電流電源は、端子間電圧が -0.6125 V と 0.6125 V の間にあり、一定の電流を供給することができる。スイッチを切ると、電流電源は大きな抵抗（実質的に無限大）としてふるまう。



ブラックボックスには、平行平板コンデンサー（わずかに非線形で大きな容量のコンデンサー）、未知の非線形素子、 $L = 10\text{ }\mu\text{H}$ の電気抵抗の無視できるコイルが含まれている。また、回路図に示されているようにスイッチが接続されている。非線形素子は、電圧と電流の関係が非線形抵抗 [I は V の連続関数として表され、 $I(0) = 0$ である] と見なしてよい。同様に、コンデンサーの電気容量 $C(V) = dQ/dV$ は、厳密には定数ではなく、右辺の微分で定義される。赤い端子の電位が黒の端子の電位より高いとき、ブラックボックスにかかる電圧を正とする。ブラックボッ

クスと電流電源を同じ色の端子で接続したとき、ブラックボックスの電圧は正になる。（負の電圧をかけてもよい。）



ここで、ブラックボックスの入力端子同士を短絡させると、ブラックボックス内のコンデンサーを安全に放電させることができる。このコンデンサーの内部抵抗により、電流が抑えられるので、部品が壊れることはない。

この問題では不確かさの評価は必要ない。

Part A. コイルを含まない回路 (7 points)

この Part では、コイルを短絡させるために、ブラックボックスのスイッチは閉じて (“I” とマークされた側を押し下げて) おくこと。測定にはかなりの時間がかかるので、不必要な作業を避けるために、まず Part A のすべての課題を通し読みすることを勧める。

- (1 pt) 電流電源の出力電流が約 6 mA であることを確認するために、電圧を 0 から $+480\text{ mV}$ まで変化させたときの電流の変動範囲を求めよ。また、配線図を完成させよ。
- (1.2 pts) 適切に選んだ電圧 V_0 に対応する、ブラックボックスの中のコンデンサーの電気容量 $C(V_0) = C_0$ を測定し、 $C(V)$ がおよそ 2 F であることを示せ。また、配線図を完成させよ。
- (2.2 pts) コンデンサーの電気容量の非線形性を無視して [$C(V) \approx C_0$]、ブラックボックス内の非線形素子の電流 - 電圧特性を求めたい。ブラックボックスにかかる正の電圧に対する $I(V)$ を答案用紙上にプロットせよ。また、配線図を完成させよ。
- (2.6 pts) ブラックボックスにかかる正の電圧に対して、得られた測定結果を用いて $C(V)$ 計算し、結果をグラフに描け。電気容量の最小値 $C_{\min}$ と最大値 $C_{\max}$ の値を記入せよ。また、配線図を完成させよ。

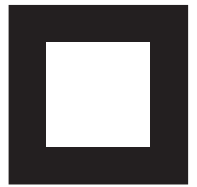
Part B. コイルを含む回路 (3 points)

ブラックボックスのスイッチを開いて (“0” とマークされた側を押し下げて)、コイルを接続する。Part A-iii と同じ方法で非線形素子の電流 - 電圧特性を測定してグラフに描け。Part A と B の曲線の明らかな違いについて述べ、その理由を定性的に説明せよ。

ここで、非線形素子は、非線形抵抗にわずかな電気容量 (約 1 nF) をもつコンデンサーが並列につながったものとしてふるまうことを知っておく必要がある。

PROBLEM

Problem E2



マルチメータ (IPhO-measure): 簡易マニュアル

IPhO-measure はマルチメータ (Multimeter) であり、電圧 V と電流 I を同時に測定できる。また、それらの時間微分 $\dot{V}$, $\dot{I}$, それらの積 $P = VI$, 比 $R = V/I$, サンプル時刻 t を記録することができる。保存された測定値は、セットの番号 s とセット内のカウント番号 n で分類される。保存されたサンプルは全て、内部のフラッシュメモリーに書き込まれ、後程、利用することができる。

電氣的な特性

デバイスは、次のようにつながれた電流計、電圧計として振る舞う



	測定範囲	内部抵抗
電圧計	0...2 V	1 M Ω
電圧計	2...10 V	57 k Ω
電流計	0...1 A	1 Ω

基本的な使用法

- “POWER” のスイッチを押すと、*IPhO-measure* のスイッチが on になる。
- すでに保存されたサンプルを見るには、“PREVIOUS” あるいは “NEXT” を押しなさい。セット間を直接に飛び移るには、それらを長く押し続けなさい。
- 測定していないとき、新たなセットの測定を始めるには、“START” を押しなさい。
- 測定中に、データサンプル（電流の読みを伴う）を保存するには “Sample” を押しなさい。
- “PREVIOUS” および “NEXT” を用いて、測定中に他の電流セットのサンプルを見ることもできる。
- セットを終了し、測定を止めるには、“STOP” を押しなさい。
- “POWER” を押すと *IPhO-measure* は off となり、保存されたサンプルは消去されない。

ディスプレイ



表示されたサンプルは、9つの変数からなる。

- セットにおけるサンプルの番号 n ;
- セットの番号 s ;
- セットを開始してから時間 t ;
- 電圧計の値 V ;
- V の変化率 (時間微分 $\dot{V}$); もし時間微分がゆらぎのために実際に測定できなければ, “+nan/s” が表示される。;
- 電流計の値 I ;
- I の変化率 (時間微分 $\dot{I}$); もし時間微分がゆらぎのために実際に測定できなければ, “+nan/s” が表示される。;
- 積 $P = VI$;
- 比 $R = V/I$ 。

もし変数が測定可能な範囲から外れた場合, “+inf” あるいは “-inf” が表示される。