

物理チャレンジ

(2005年～2010年)

国際物理オリンピック

(2006年～2010年)

実験問題および解説・解答例

物理チャレンジ・オリンピック日本委員会

2011年1月

まえがき

この冊子は、2005年から2010年に開催された全国物理コンテスト 物理チャレンジの第1チャレンジ（予選コンテスト）で出題された実験レポートの課題と講評、および第2チャレンジ（全国大会）で出題された実験問題と解答例、さらに2006年から2010年に開催された国際物理オリンピックでの実験コンテストの問題および解答例をまとめたものである。すべて、物理チャレンジのホームページ (<http://www.phys-challenge.jp/>) に掲載されている。第1チャレンジの実験課題については、解答のかわりにレポートの例と講評を載せている。また、国際物理オリンピックの問題は、現地に同行した役員団による日本語翻訳版を載せているが、解答例は開催国が準備した英文のままとなっている。日本代表選手は日本語に翻訳された問題文を読んで日本語で解答している。

物理チャレンジと国際物理オリンピックでは、ペーパー試験の理論コンテストだけでなく、実際にその場で実験をする実験コンテストが大きな特徴となっている。第2チャレンジおよび国際物理オリンピックの実験コンテストでは、選手一人一人に実験装置が与えられ、それを組み立てて実験し、データを取得して解析し、指定されている物理量を求める。だから、実験装置がなければ実験問題を解くことはできないが、ここに記載されている問題文および解答例から、その内容を理解できると思う。日本の高校などで行われる物理実験では、このような問題形式をとっていない場合が多いので、極めてユニークな実験教育の一助となると考えている。

2011年1月

物理チャレンジ・オリンピック日本委員会

物理チャレンジ・国際物理オリンピック
実験問題および解説・解答例

目 次

第1 チャレンジ実験課題レポート編

	ページ
2005 年実験課題レポート	
課題	2
講評	3
2006 年実験課題レポート	
課題	9
講評	10
2007 年実験課題レポート	
課題	13
講評	14
2008 年実験課題レポート	
課題	16
講評	19
2009 年実験課題レポート	
課題	23
講評	26
2010 年実験課題レポート	
課題	31
講評	34

第2 チャレンジ 実験コンテスト編

2005 年 実験コンテスト	
問題	38
解答例	51
2006 年 実験コンテスト	
問題	56
解答例	81
2007 年 実験コンテスト	
問題	93
解答例	112
2008 年 実験コンテスト	
問題	125
解答例	141
2009 年 実験コンテスト	
問題	147
解答例	165

2010年 実験コンテスト	ページ
問題	176
解答例	197

国際物理オリンピック 実験コンテスト編

2006年 シンガポール大会 実験コンテスト	
問題	218
解答例	233
2007年 イラン大会 実験コンテスト	
問題	253
解答例	260
2008年 ベトナム大会 実験コンテスト	
問題	269
解答例	282
2009年 メキシコ大会 実験コンテスト	
問題	297
解答例	311
2010年 クロアチア大会 実験コンテスト	
問題	335
解答例	343

物理チャレンジ

第1チャレンジ 実験課題レポート編

物理チャレンジ2005 第1チャレンジ実験課題レポート問題

物理チャレンジ 2005 応募実験問題

実験課題：単振り子の振動周期を測定し、その場所での重力加速度を求める。

実験の方法：おもりの質量・材質・大きさ・形状、振り子の振れ角度、糸の材質・長さ、支点の固定の仕方、周期や糸の長さなどの計測法、データ解析法、測定場所や環境などの諸条件を変えて測定してみよう。

レポートの作成：その実験過程、実験結果、データ解析などをレポートにまとめなさい。レポート作成においては、以下のフォームを参考にし、実験に用いた器具や手順など詳細に記述する。高校物理の教科書などで扱われている実験や課題研究のレポートのまとめ方などを参考にしてもよい。レポートに記載してある情報をもとに他人が実験を再現できるように詳細な事柄まで記述する。測定精度を向上させるために工夫した点とその根拠についても詳しく、かつ、分かりやすく記述する。また、図書室やインターネットなどで調べた関連事項なども必要に応じて利用してよい。レポートの枚数は制限しない。

<評価の観点>

測定データの適切な解析はもちろん大切であるが、重力加速度の測定結果が理科年表などに記載の値に近いかどうかを競うわけではない。また、高価な測定装置を使った実験を高く評価するわけでもない。身近にある材料を使った簡便な実験であっても、測定精度を向上させるために行った創意工夫や、独自の明確な観点から実験を行っているか、レポートを要領良くまとめているかどうか、などを評価する。

<レポート形式> (例)

題目：単振り子による重力加速度の測定

—振れ角度及び重りの質量に対する依存性の測定—

実験日時：2005年〇〇月〇〇日(〇曜日) 〇〇：〇〇～〇〇：〇〇

実験場所：

報告者氏名：

実験目的：(どのような観点からこの実験を行うのか明確にする。)

方法(理論的背景、実験器具、実験手順など)：

(必要なら模式図や写真などもつける。)

実験結果：(グラフ等を活用したデータ処理などを行う。)

考察：(実験誤差の考察も行うことが望ましい。)

結論：(測定した重力加速度が既知の値に近いかどうか比較するだけでなく、今回の実験によってわかったこと、学んだことをまとめる。)

参考文献：

物理チャレンジ2005 第1チャレンジ実験課題レポート講評とレポート例

実験課題レポート採点の総評および優れたレポート例

総評：

- ・ 下記の5段階評価を行った。実験内容、創意工夫などの点で、極めて素晴らしいレポートから熱意が感じられないレポートまで、大きな差が出た。
- ・ 自宅で実験を行ったものが多く、身近な道具を使って工夫している様子がよく伝わってきた。
- ・ 独自の観点やユニークなアイデア（下記参照）を取り入れたレポートがいくつかあった。しかし、狙った結果が出ていないもの、あるいは間違った結果になっているものもあったが、着眼点やアイデアを高く評価した。
- ・ 測定データを一覧表に羅列したのみのレポートが多かった。グラフを有効に活用し、わかりやすく、かつ説得力のあるまとめ方の工夫が必要。
- ・ 振り子の長さに、支点から錘の重心までの距離ではなく、単に糸の長さを用いたレポートが多かった。

5段階評価

- ・ S（16名）独自の観点・ユニークなアイデアにもとづく独創的なレポート
- A（22名）きちんとした実験・解析を行っている優れたレポート
- B（60名）平均的なレポート
- C（56名）少し努力が足りないレポート
- D（23名）熱意が感じられないレポート
- x（10名）レポート未提出者

独自の観点やユニークなアイデアにもとづいた実験の例：

測定条件：

1. 満潮・干潮の影響（月の引力の影響を調べようとした）
2. 水中での測定（減衰の影響を調べた）（図1）
3. マンション2階と13階での測定（高度の違いの影響を調べた）
4. 様々な測定条件（錘の質量や糸の長さ、材質、振り角）200通り以上の条件の組合せでの測定（図2）

糸：

1. 自宅4階ベランダから長さ8mの振り子をたらし実験（図3）
2. 空気抵抗の小さい糸を捜す予備実験を行ったあと本実験を行った
3. 糸の重さ（線密度）まで測定して解析時に考慮した

4. 糸の長さを変えた系統的な測定 (図 4)

錘：

1. 釣り用錘などで質量を系統的に変えた実験 (図 5)
2. 錘の重心を求める工夫 (球形の容器に粘土とティッシュをつめる)

支点：

1. ナイフエッジの利用 (強制振動の効果を除く)
2. 割り箸に糸をはさむ
3. ベアリングの利用

測定法：

1. 細いスリットの利用 (スリットを横切る瞬間を見て周期を測定) (図 6)
2. フォトゲートによる高精度測定
3. 自作LED/フォトダイオード検出器による測定 (図 7)
4. ビデオ撮影とコマ送りによる測定
5. 楕円振り子にならないようにするための振り始めの工夫 (図 6)
(錘に他の玉を衝突、または、錘を固定している糸を焼き切るなど)
6. 振り角を変えて測定し、振り角ゼロに外挿して結果を求める。(図 8)
7. サイクロイド曲線に沿った大振り角の振り子

解析：

1. 楕円積分、振り角の高次の項まで取り入れた解析
2. ラップタイムや振れの回数を変えた測定などによって統計誤差を減らす (図 9, 10)

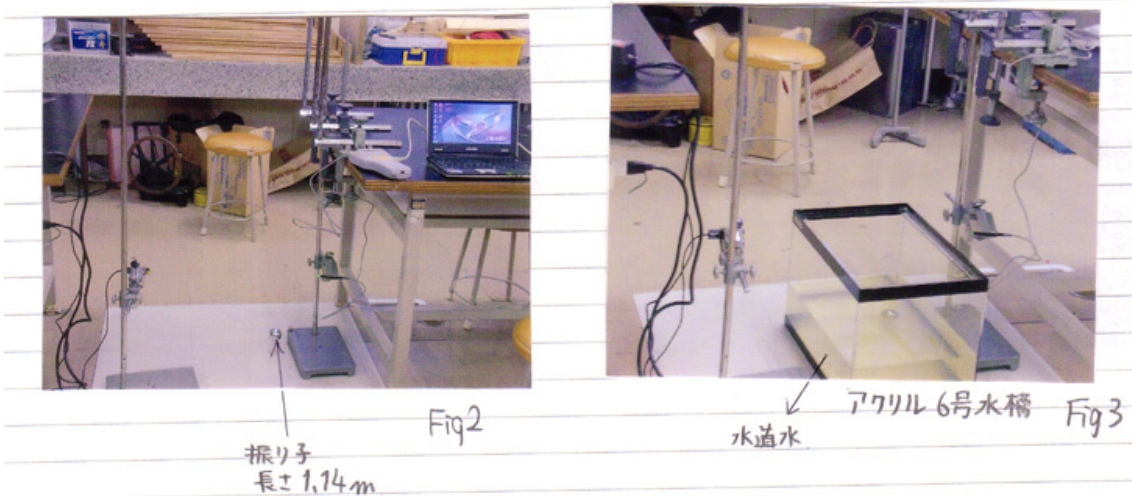


図1. 空気中および水中での振り子実験。減衰の影響を調べた。(札幌北高Aさん)

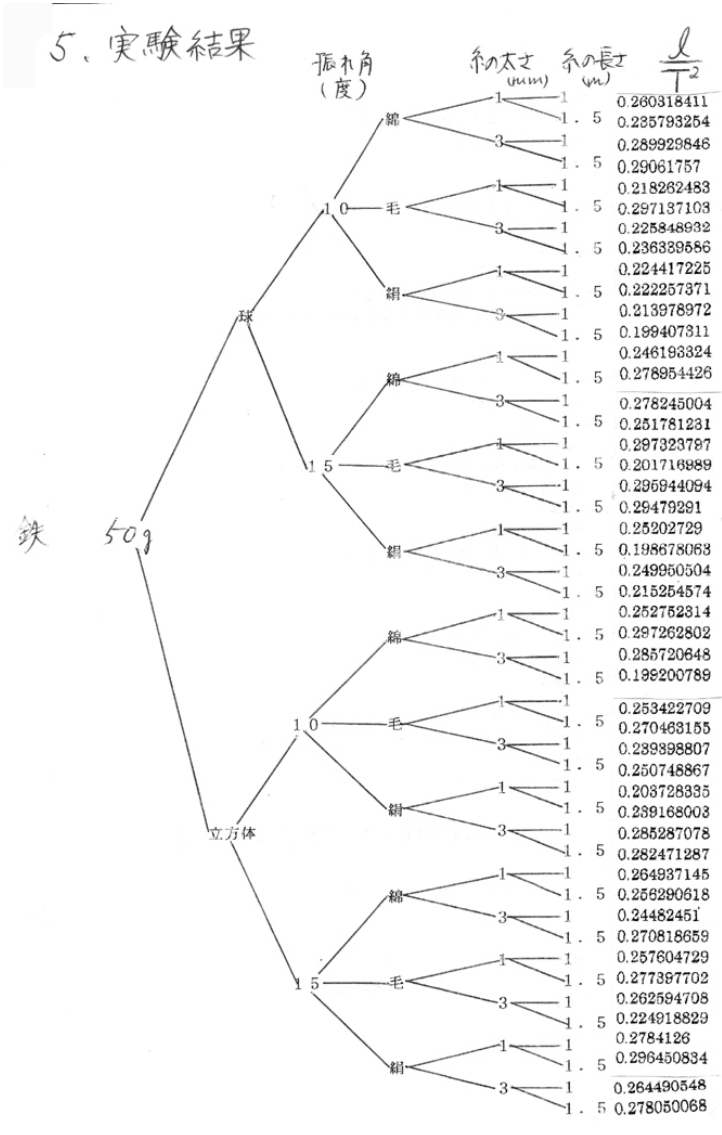


図2. さまざまな測定条件（錘の材質、質量、形、振れ角度、糸の太さや長さを変える）での実験結果。この「樹形図」が5ページにわたって記載されており、合計で200通りを超える測定条件の組み合わせで実験を行った。(広大附属福山高Bさん)



図3. 自宅4階のベランダから長さ8 mの振り子をた
らして実験。(渋谷高Cさん)

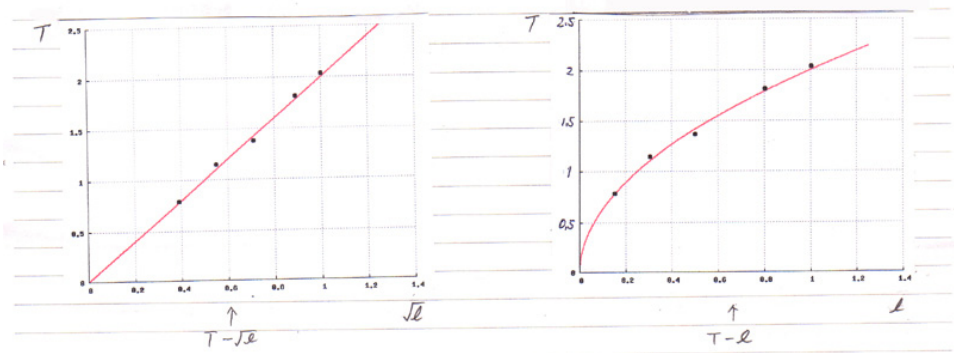


図4. 振り子の長さ (l) を系統的に変えて周期 (T) を測定。データのまとめ方が上手。
(岡山芳泉高Dさん)



図5. さまざまな錘を利用
した実験。(旭丘高Eさん)

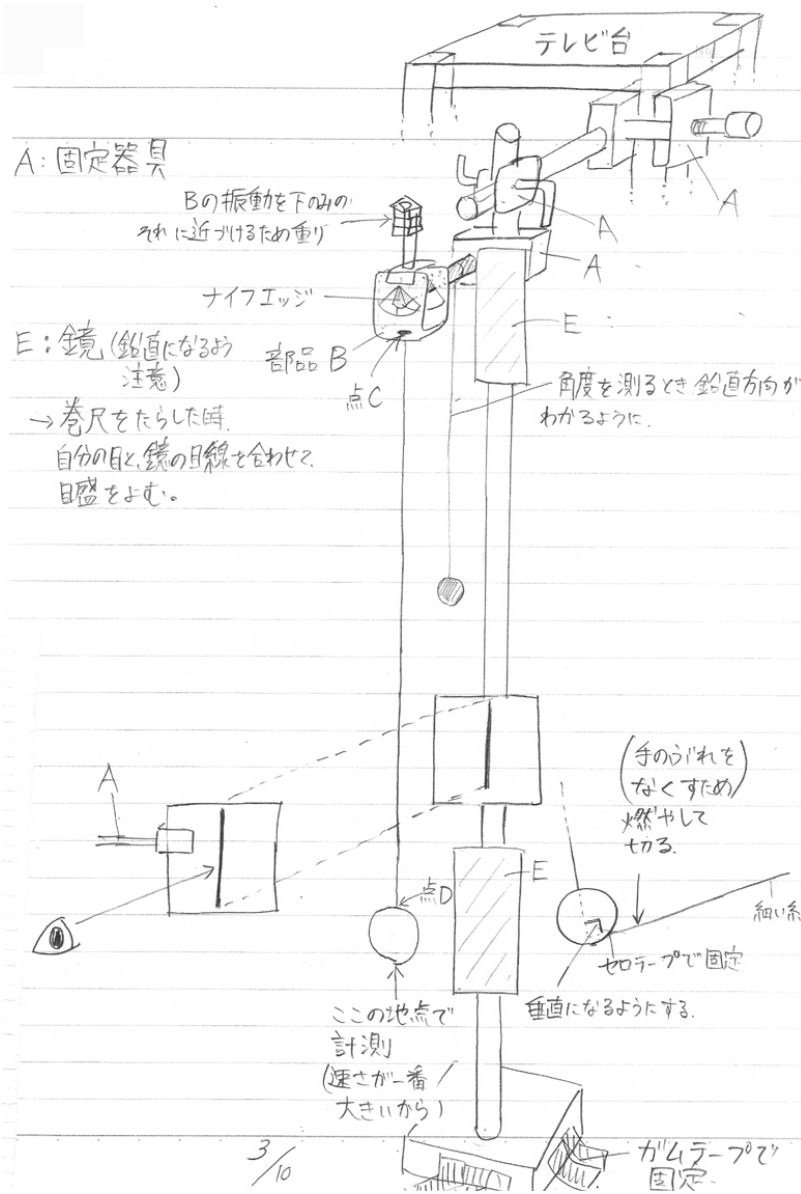


図6. さまざまな工夫が施された実験装置。細いスリットの利用 (スリットを横切る瞬間を見て周期を測定)、鏡の利用、支点による強制振動の抑制、楕円振動にならないようにするための振り始めの工夫 (錘をささえている細い糸を焼き切る)、など。要領のよい模式図である。(秀光中等教育学校Fさん)

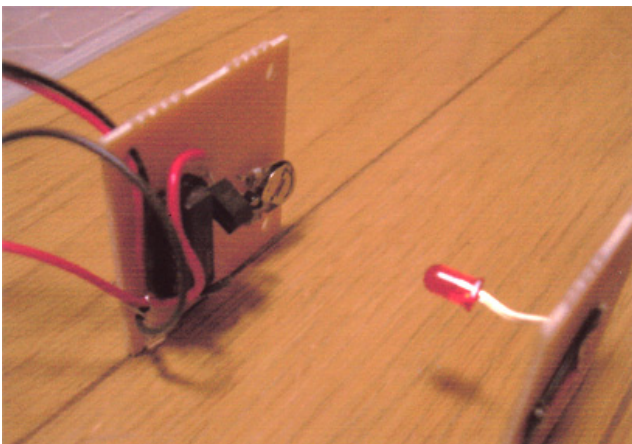


図7. 自作LED・フォトダイオード検出器 (フォトゲート) による周期の高精度測定。(池田高Gさん)

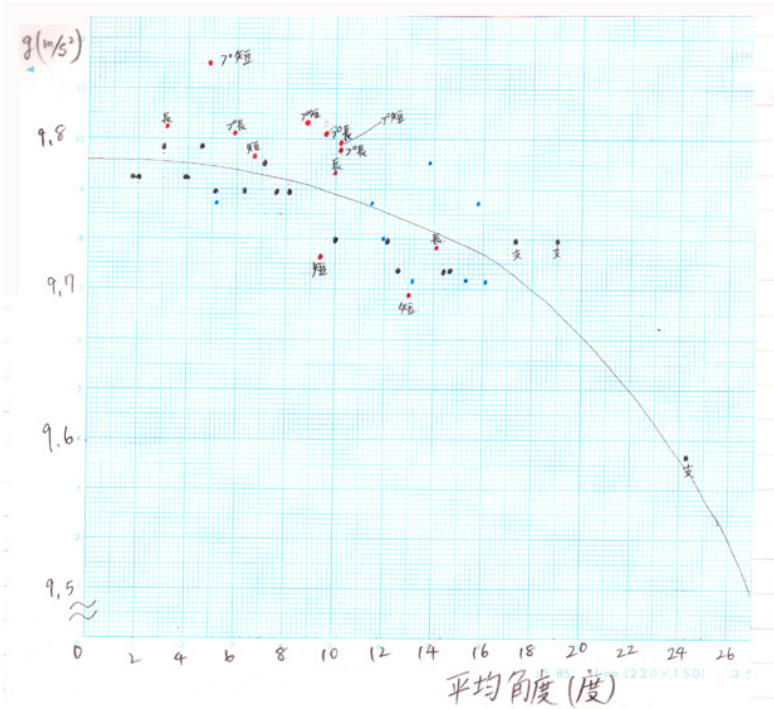


図8. さまざまな糸や錘の振り子で振り角を変えて測定し、振り角ゼロに外挿して結果を求める。(大宮高Hさん)

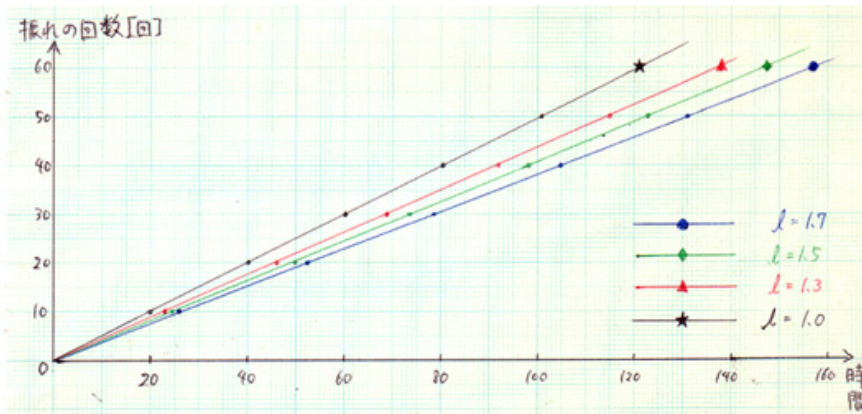


図9. さまざまな長さの振り子で、振れの数を変えて測定。測定精度が向上する。(甲陵高Iさん)

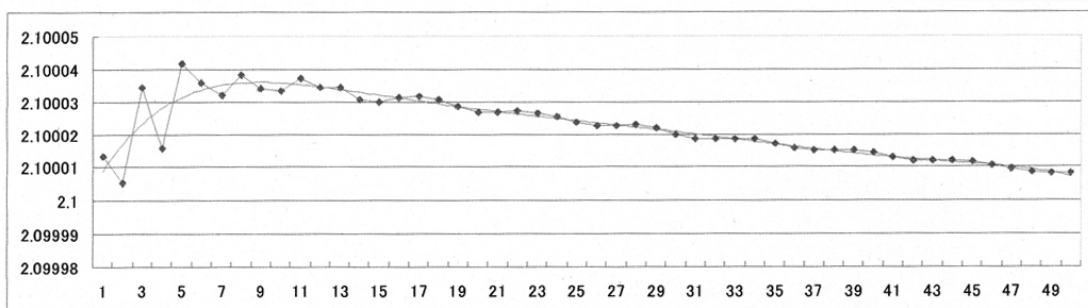


図10. フォトゲートによる高精度測定。振れ回数に依存して周期が徐々に変化していることがわかる。(横軸と縦軸の記述が欲しかったが。)(広島国泰寺高Jさん)

物理チャレンジ 2006 第 1 チャレンジ応募実験問題

私たちは空気の中で生きている。普段はその存在や重さをあまり意識することはない。しかし、毎日の天気予報に登場する気圧は空気の重さがその原因であり、実は日常生活にも密接に関連している。空気の密度を測定することが実験課題である。

(1) 実験の方法について

各自で安全に留意しながら測定方法を工夫して、実験を行う。測定手法、解析方法、実験条件などを変えた測定も試みるとよい。利用する機器や材料には危険でない限り制限は設定しないので、自宅にある物で工夫することも可能であるし、学校にある測定装置を利用しても差し支えない。

(2) レポートの作成

- ・ 実験内容を的確に表現するレポート題目をつけること。
- ・ 実験過程、実験結果、データ解析などをレポートにまとめること。
- ・ レポートの作成においては、用いた器具や手順などを詳細に記述すること。
- ・ 教科書で扱われている実験や課題研究のレポートのまとめ方などを参考にしよう。
- ・ レポートに記載してある情報をもとに他人が実験を再現できるように詳細な事項まで記載すること。
- ・ 測定精度を向上させるために工夫した点とその根拠についても詳しく記述すること。
- ・ 結果は、図や表を有効に使って、分かりやすく述べること。
- ・ 本やインターネットなどで調べた関連事項なども必要に応じて利用して良いが、引用元を必ず明記すること。

(3) 評価の観点

測定データの適切な解析はもちろん大切であるが、得られた密度が『理科年表』などに記載されている値に近いかどうかを競うわけではない。また、高価な測定装置を使った実験を高く評価するわけでもない。身近にある材料や器具を使った実験であっても、測定精度を向上させるための創意工夫がなされているか、独自の観点から実験を行っているか、レポートを要領よくまとめているかどうかなどを評価する。

(4) 安全に関して

安全面には十分注意して実験すること。実験を進める過程で、なんらかの危険が考えられる場合は、それに対してどのような対策を考えて実行したかもレポートに記述すること。この点もレポート評価の対象に含める。

例えば、次のような安全面に対する注意と対策を考えること。

- ・ 気体を加圧してペットボトルなどの容器に詰める場合は、容器の強度などに十分注意する。ペットボトルが破裂した場合、鋭利な破片が飛び散り大変危険である。
- ・ 高温（または低温）になる可能性がある場合は、火傷などに注意する。
- ・ 空気以外のガスを大量に使う場合は、窒息事故に注意する。
- ・ 酸素などの支燃性ガスや、爆発のおそれのある可燃性ガスを使用しない。

次の参考文献などにも容器の破裂事故に関する記載がある。

左巻信男・山本明利・石島秋彦・西潟千明『理科の実験安全マニュアル』（東京書籍, 2003）

物理チャレンジ 2006 第 1 チャレンジ 応募実験問題解答例およびレポート採点の講評

1. 標準的な方法

空気の密度を測定することが課題ですが、密度の定義にしたがって一定量の空気の質量と体積を測定することによって密度を求めるのが標準的な方法です。気体の体積は温度や圧力によって変わるので、測定条件を明らかにしておくことが重要です。課題では条件を指定していませんが、常温・常圧での値を求めるのが妥当でしょう。

理想気体の状態方程式と、空気の分子量が約 29 g/mol であることから、標準状態で 22.4 l の空気の質量は 29 g 程度です。これにより手ごろな量として数リットルの空気を対象とすると数グラムの質量を求められる（希望する）精度で測定する必要があることが分かります。

数 g の質量を測定すること自体はさほど難しくはありませんが、対象が空気のように密度が小さい物質の場合は注意が必要です。普通、質量の測定は地上での重力の大きさを測定し、その地点での（あるいは、標準の）重力加速度を用いて質量に換算します。大気中での測定では大気による浮力の影響があり、その補正は密度の小さい物質では特に重要です。極端な場合、大気圧の空気を容器に密閉して重力を測っても、空気に働く重力と浮力は相殺し、容器に働く重力だけが得られます。したがって、空気の密度を重力の測定から求めるためには、大気の影響にされない方法を考案するか、その影響を正しく補正することが必須です。

容積が変わらない（硬い）容器に圧力を加えて空気を詰めた状態での質量 M_1 を測定し、容器から取り出した空気の常圧での体積 V を測定し、容器と残った空気の質量 M_2 を測定すれば、密度は

$$\rho = (M_1 - M_2) / V$$

によって求められます。このとき、 M_1 、 M_2 は真の質量ではなく、大気による浮力を差し引いたものですが、容器の体積が変わらなければそれらは相殺するので、容器から取り出した空気の質量は正しく求められます。

事前の予想通り、この方法によるレポートが大半でした。容器はペットボトル、自転車の空気入れによる加圧、水上置換による体積測定、高等学校にある電子天秤を利用した質量測定が代表的な組み合わせでした。大気による浮力の影響を認識していることを明記したレポートが少なかったのは残念です。

この方法に近いものとして、次のような方法で測定したレポートもありました。

- ・ 容器を加熱して、膨張によってあふれ出た空気の体積と質量変化を測定した。
- ・ 加圧する代わりに、真空ポンプを用いて、真空と大気圧での質量差を測定した。
- ・ 上記の変形として、水を沸騰させて容器を真空にし、空気を入れる前後の質量差を測った。

容器を真空にする方法では、実際に入出力した空気の体積を測定せず、容器の体積で代用しているものが多かったが、真空の積りのときに残っていた空気の量を吟味す

る必要があります。

2. 大気による浮力を利用する方法

逆に、大気による浮力（容器の容積変化）を積極的に利用したレポートがありました。ポリエチレン袋にドライアイスを入れ、気化前後の質量 M を測定すると、 CO_2 の気化により増加した体積 V に対する大気による浮力、すなわち、体積 V の空気の質量が得られます。密度は

$$\rho = M/V$$

によって求められます。 CO_2 は水に溶けるので、水上置換で体積 V を求めるのは難しいので、あらかじめドライアイスの質量を測っておき、 CO_2 の分子量と状態方程式から V を求めていましたが、理論を援用した点が借しまれます。空気の分子量を用いれば測定なしで結果が得られるからです。体積 V を実測する工夫が欲しいものです。

Heを詰めた容器の質量を測定したレポートもありましたが、状態方程式を用いた点は同様です。

体積を測定した水を入れた容器と空の容器の質量測定から、水に働く空気の浮力を算出したレポートもありましたが、この方法では、水の真の質量を求めるために高精度の水の密度の値が必要となり、文献値に頼ることになりました。

3. その他の方法

A. : 高度差による圧力差の測定

ある場所での大気の圧力はそこより上にある空気にはたらく重力によって生じます。底面積 S 、高さ h 、の気柱を考えると、その上下での圧力 Δp と気柱に働く重力の釣り合いの式

$$\rho h S g = \Delta p S$$

から空気の密度が得られます。ここで g は、重力加速度の大きさを示します。

高層ビルを利用して、高度差12m、60mでの測定のレポートがありました。

B : 慣性質量を求める方法

多くのレポートは空気に働く重力から質量を求めていましたが、空気の慣性から質量を求めようとしたレポートもありました。発泡スチロールなどの容器に空気を閉じ込めたものに力を加えて加速度運動させると、運動方程式から慣性質量を知ることができます。この場合は大気による浮力は影響しないが、大気との摩擦、いわゆる、空気抵抗の影響があるので高精度の測定には工夫が必要です。その難点を避ける巧妙な方法が次のものです。

B' : 音速から密度を求める

気柱の一部分の運動方程式を建てると、気体中の音波を表す波動方程式が得られ、音波の速度すなわち音速は

$$v = \sqrt{\gamma p / \rho}$$

によって与えられます。ここで、 ρ, p は気体の密度、圧力であり、 $\gamma = c_p / c_v$ は気体の比熱比（定圧比熱と定積比熱の比）です。

これを利用すると、気圧と音速を測定することにより、空気の密度を求めることができます。音速を気柱の共鳴実験によって測定したレポートが複数ありました。

4. レポートの評価

レポートの評価結果は次の5段階に分類しました。

- S：独自の発想、装置、方法、考察などが見られる独創的なレポート
- A：必要なことがきちんと書かれた優れたレポート
- B：平均的なレポート
- C：努力、工夫が望まれるレポート
- D：未提出、白紙あるいは白紙同然のレポート

5. 特記事項

最後に、レポート評価の中で、特に評価した事項例を列挙します。

- ・物差しを用いて天秤を自作し、1円硬貨を1gの分銅として用いた。
- ・水上置換に用いる水をあらかじめ良くかくはんして空気を十分に溶かしておいた。
- ・注射器を加圧・減圧に用いた。
- ・自動車のタイヤの空気圧を測るエアゲージを用いて、容器内の気体の圧力と質量の関係を求めた。
- ・始めと終わりだけでなく途中までの体積変化と質量変化の関係を求め、測定精度を見積もった。
- ・水上置換して気体の体積を測定するとき、容器内外の水面を一致させ、大気圧での体積が測れるように気を付けた。
- ・重力から質量への換算のため、重力加速度も実測した。
- ・高度差による圧力差を測定する際、ビル内の空調で気圧を人工的に変えていないことを確かめた。
- ・高度差による圧力差を測定する際、気温の違いも測定して補正した。
- ・音速から密度を求めるとき必要になる比熱比も実測した。
- ・複数の異なった方法で測定し、比較した。

る必要があります。

2. 大気による浮力を利用する方法

逆に、大気による浮力（容器の容積変化）を積極的に利用したレポートがありました。ポリエチレン袋にドライアイスを入れ、気化前後の質量 M を測定すると、 CO_2 の気化により増加した体積 V に対する大気による浮力、すなわち、体積 V の空気の質量が得られます。密度は

$$\rho = M/V$$

によって求められます。 CO_2 は水に溶けるので、水上置換で体積 V を求めるのは難しいので、あらかじめドライアイスの質量を測っておき、 CO_2 の分子量と状態方程式から V を求めていましたが、理論を援用した点が借しまれます。空気の分子量を用いれば測定なしで結果が得られるからです。体積 V を実測する工夫が欲しいものです。

He を詰めた容器の質量を測定したレポートもありましたが、状態方程式を用いた点は同様です。

体積を測定した水を入れた容器と空の容器の質量測定から、水に働く空気の浮力を算出したレポートもありましたが、この方法では、水の真の質量を求めるために高精度の水の密度の値が必要となり、文献値に頼ることになりました。

3. その他の方法

A. : 高度走による圧力差の測定

ある場所での大気の圧力はそこより上にある空気に働く重力によって生じます。底面積 S 、高さ h の気柱を考えると、その上下での圧力 Δp と気柱に働く重力の釣り合いの式

$$\rho h S g = \Delta p S$$

から空気の密度が得られます。ここで g は、重力加速度の大きさを示します。

高層ビルを利用して、高度走 12m、60m での測定のレポートがありました。

B : 慣性質量を求める方法

多くのレポートは空気に働く重力から質量を求めていましたが、空気朗貫性から質量を求めようとしたレポートもありました。発泡スチロールなどの容器に空気を閉じ込めたものに力を加えて加速度運動させると、運動方程式か慣性質量を知ることができます。この場合は大気による浮力は影響しないが、大気との摩擦、いわゆる、空気抵抗の影響があるので高精度の測定には工夫が必要です。その難点を避ける巧妙な方法が次のものです。

B' : 音速から密度を求める

気柱の一部分の運動方程式を建てると、気体中の音波を表す波動方程式が得られ、音波の速度すなわち音速は

$$v = \sqrt{\gamma p / \rho}$$

によって与えられます。ここで、 ρ, p は気体の密度、圧力であり、 $\gamma = c_p / c_v$ は気体の比熱比（定圧比熱と定積比熱の比）です。

これを利用すると、気圧と音速を測定することにより、空気の密度を求めることができます。音速を気柱の共鳴実験によって測定したレポートが複数ありました。

4. レポートの評価

レポートの評価結果は次の5段階に分類しました。

- S：独自の発想、装置、方法、考察などが見られる独創的なレポート
- A：必要なことがきちんと書かれた優れたレポート
- B：平均的なレポート
- C：努力、工夫が望まれるレポート
- D：未提出、白紙あるいは白紙同然のレポート

5. 特記事項

最後に、レポート評価の中で、特に評価した事項例を列挙します。

- ・物差しを用いて天秤を自作し、1円硬貨を1gの分銅として用いた。
- ・水上置換に用いる水をあらかじめ良くかくはんして空気を十分に溶かしておいた。
- ・注射器を加圧・減圧に用いた。
- ・自動車のタイヤの空気圧を測るエアゲージを用いて、容器内の気体の圧力と質量の関係性を求めた。
- ・始めと終わりだけでなく途中までの体積変化と質量変化の関係を求め、測定精度を見積もった。
- ・水上置換して気体の体積を測定するとき、容器内外の水面を一致させ、大気三万の体積が測れるように気を付けた。
- ・重力から質量への換算のため、重力加速度も実測した。
- ・高度差による圧力差を測定する際、ビル内の空調で気圧を人工的に変えていないことを確かめた。
- ・高度差による圧力差を測定する際、気温の違いも測定して袖正した。
- ・音速から密度を求めるとき必要になる比熱比も実測した。
- ・複数の異なった方法で測定し、比較した。

物理チャレンジ2007 第1チャレンジ

実験レポート課題

課 題

身の回りにある材料を使って、1オクターブの音階（ド、レ、ミ、ファ、ソ、ラ、シ、ド）を奏でることのできる楽器を作ってみよう。音程（音の高さ）は何によって決まるかを調べてみよう。

楽器には弦楽器、管楽器、打楽器などの区別があります。強く張った弦を擦ったりはじいたりして音をつくるバイオリンやギターなどが弦楽器です。弦楽器でも、ピアノは鍵盤がドレミファ…と並べてあり、また黒鍵を用いると、半音だけ異なる音が出せるようになっていますが、これらの鍵はそれぞれ長さ・太さ・張力（弦を張る強さと考えて下さい）の異なる弦を叩いています。ギター、ウクレレ、マンドリンのような弦楽器は、弦を固定した端（サドル）と押さえるところ（フレット）の間隔によって音程が変わります。管の一部を口で吹いて息を吹き込むことによって音をつくるフルートやトランペットなどが管楽器で、管の長さを変えると音程が変わります。太鼓、シンバルのように叩いて音を出すのが打楽器です。多くの打楽器は音程が一定ですが、太鼓の場合ならば、膜の太さや張力を変えると別の高さの音を出すことができます。木琴では、長さの異なる木片を叩いて音階を奏でます。

このように異なる物体で異なる高さの音を出すこともできますし、同じ物体でも長さや加える張力を変えることによって異なる高さの音を出すこともできます。

今日、高価な楽器もありますが、身の回りにある材料を使って自分で楽器を作ることもできます。昔の人々は手作りの素朴な楽器を作って楽しんでいました。また地域に伝えられる素朴な民俗楽器もあります。私たちも手作りの楽器を作ってみましょう。

参考のために次に簡単な例を示しますが、この例にとらわれずに、皆さんそれぞれにアイデアを出してあなたの楽器を作ってみてください。

[参考例]

例1：板の上に針金やテグス（天蚕糸、釣り糸に用いる）等を張って、それを擦ったりはじいたりして音を出す。針金・テグス等の長さ、張力等を変えると音の高さが変化する。

例2：コップに水を入れて叩くと音が出るが、入れる水の分量を変えると違う高さの音が出る。同じ形のコップを並べてそれぞれ異なる分量の水を入れると、一つひとつ異なる高さの音を出すので、音階を奏でることが出来る。

[レポート作成に当たっての注意]

- ・自分がどのような考えでどのような楽器を作ったか、誰にでも分かるように書くこと。また製作の過程で苦労したこと、工夫したことも書いてください。
- ・音程が何によって変化するのか、自分の考えや調べたことがあれば、それも書いてください。

[評価の観点]

- ・あなた自身の創意工夫で、どのような単純な材料で楽器を作ったかという点を重視します。高価な材料や高価な測定装置を用いたレポート、複雑な統計処理を行ったレポートを高く評価するとは限りません。
- ・レポートをどれだけ分かり易く書いてあるか、それを読んで他の人が同じような楽器を作れるように書いてあるか、という点も評価の対象です。
- ・書籍を参考にしても、また先生や友人と相談しても構いませんが、最終的には自分で作り、自分の考えでレポートをまとめてください。

以上

物理チャレンジ 2007 第1チャレンジ実験レポート例と講評

1. 「楽器」の種類

本年の課題は、「身の回りにある材料を使って、1オクターブの音階（ド、レ、ミ、ファ、ソ、ラ、シ、ド）を奏でることのできる楽器を作ってみよう。音程（音の高さ）は何によって決まるかを調べてみよう。」というものである。事前の予想通り、大部分のレポートが気性の振動を利用した管楽器か、弦の振動を利用した弦楽器を採り上げていた。解析の難しい、水を入れたコップや棒の振動を利用した打楽器は少数派であった。

管楽器では、小はストローから大は太い塩化ビニルのパイプまで、色々な材料が使われていた。紙筒やストローを入れ子にして長さを可変にしたトロンボーン型のもので、音階ごとに長さの異なる管を用意したパイプオルガン型（パンフルート型）に分かれたが、後者では、実際に出た音が正しい音階になるように管長を修正する工夫が必要となる。管に押さえ穴を開けたフルート型のレポートは皆無であった。

弦楽器では、一本の弦でギターのように押さえる位置にフレットを設けたものが多かった。フレット無しのヴァイオリン型のもので正しい音階を出すには演奏者の技量が必要となる。割り箸と輪ゴムによる簡便なものから、共鳴箱を備えたものまで多様なレポートがあった。琴のように音の数だけ弦を備えたものもあり、駒（可動式のフレット）の位置あるいは張力を変えて音階を作っていた。

打楽器の類としては、コップやワイングラスに水を入れてたたいたり、ヘリをこすったりするものが多かった。気性の振動とは逆に、水が多いほど（上部の気性が短いほど）低い音が出るが、定量的な規則性を見つけることは容易ではない。細長い棒を糸でつるしたり（両端自由）、一端を固定したものの横振動（たわみによる振動）を利用した木琴型や、板に櫛状に切れ目を入れたオルゴール型のももいくつかあった。変わり種としては、加圧した空気を封入して張力を変えたペットボトルをたたくティンパニー型や、カリブのスティールドラムのように、1つの物体の異なった場所をたたいて音階を探したものもあった。

他に、電気振動をスピーカーに送るもの、機械的振動をその振動数の音波に変換するタイプとしては、洗濯板（死語？）状の物体をこすり、速度あるいは凹凸の間隔で音程を変えるメロディーロード型やモーター自身の回転あるいはそれにより羽根車を回転するサイレン型のものなどが見られた。

2. オクターブの音が出たか？

課題では、1オクターブの音階（ド、レ、ミ、ファ、ソ、ラ、シ、ド）を出すことが求められているが、その精度は特に指示されていない。楽器をどのような考えの下に設計したか、また、どのような音が出たかの記述の仕方が物理実験レポートとしての評価基準のひとつである。設計の段階では理科年表などに載っている音階（十二平均律）の振動数の表を利用して、気柱の長さを決めたり、振動数の比を利用して弦楽器のフレットの位置を決めているものが多かった。

実際に出た音の音階の判定法は、製作者もしくは「絶対音感のある」友人等の耳にたよるもの、楽器の調律用の道具を使うもの、マイクロフォンでコンピュータに取り込んで色々な（フリー）ソフトで振動数を調べるもの、オシロスコープを利用するものなど、多種多様であった。特に、コンピュータおよびさまざまなソフトの利用が進展していることに驚かされた。設計・製作して1オクターブの音が出ましたという定量的評価の無いレポートもかなりあったが、大部分のレポートでは、出た音の振動数を測定し、設計値とのズレを評価したり、チューニングし直して正しい音階に近付けるなどしていたのは良かった。

3. 音程は何によって決まるか？

音の高さが振動数で決まることはほぼ全員が理解していたようであるが、音階と振動数の関係、楽器の構造の何が振動数を決めているかについての理解にはやや差が見られた。1オクターブで振動数が2倍になることは良く知られていたが、途中の音階の振動数については、文献の数値を利用した音から平均律では半音ごとに公比 $^{12}\sqrt{2}$ の等比数列になることを記している者まであったが、中には、全音・半音の区別が無く、公比 $^7\sqrt{2}$ の等比数列としている音もあった。

気柱の振動に関しては、空気中の音速と温度の関係式は良く知られているようである。ほとんどが開管もしくは閉管の基本振動を利用していたが、振動数と管長の関係式では多くが開口端補正を採り入れていた。

弦を伝わる波の速さと張力、線密度の間関係式もかなり良く知られているようであるが、実際には、弦の長さ（フレットの位置）で音階を作っていたのでこの知識は直接必要とはされなかった。張力や線密度の異なる複数の弦を用いた例や、ゴムひものように張力を変えると線密度も変わる弦を用いた例もあった。

打楽器において、何が振動数を決めているかの定量的理解はかなりの難問であるが、水を入れたコップでは水が多いほど「質量が大きいので」振動数が小さくなる、と定性的に正しい推論をしている例が見られた。断面が一樣な棒の横振動では、振動数が長さの2乗に反比例する。この事実は構造力学や材料力学において梁（はり）の振動の理論で導くことができるが、直感的に理解するのは困難であろう。実際に振動数の長さ依存性を測定してこの事実を見つけ、それにしたがって楽器を設計した優れたレポートがあった。

4. レポートの評価

レポートの評価は、結果はS, A, B, C, D 5段階に大別した。「1オクターブの音階（ド、レ、ミ、ファ、ソ、ラ、シ、ド）が出たか」、「音の高さが何によって決まるかを考察しているか」の2点が満たされているものを平均的なレポートとしてBとしいずれかが欠けているものはその度合いに応じてC, Dとした。装置、方法、考察、レポートの書き方などが優れているものをAとし、独自の発想のものや特に優れたものをSとした。Bランクはさらに、B⁺, B, B⁻の3つに分類した。

成績の分布は、S : 5、A : 35、B⁺:14、B:82、B⁻ : 18、C:96、D:35、計:285であった。

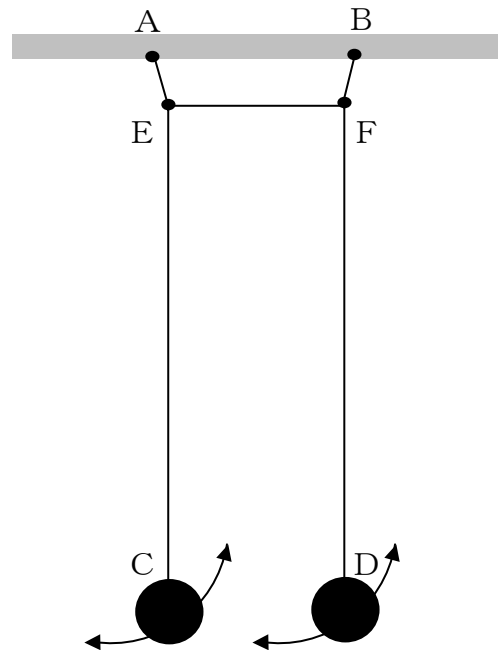
第4回全国物理コンテスト 物理チャレンジ2008

第1チャレンジ 実験課題

下図のような振り子を作る。糸の長さとおもりの質量が同じ2つの単振り子を支点AとBに並べて取り付け、これらの糸の間を別の糸で連結する。このような振り子を「連成振り子」という。この連成振り子で次の実験①～③を行い、振動のようすを観察して、振動の周期や振幅の変化のしかたを調べる。その際、おもりを振る方向や振幅に注意する。

- ① おもりCを静止させておいて、おもりDだけを振らせる。
- ② おもりCとDを同じ向きに（同位相で）振らせる。
- ③ おもりCとDを逆向きに（逆位相で）振らせる。

それらの結果をもとに、この連成振り子の運動にはどのような規則性があるのか、運動で一定に保たれる量は何かなどを考察してみよう。



注意：2つの単振り子を連結する糸をそれぞれの振り子の糸に結びつけた点をE,Fとする。そのとき、 $AE=BF$ 、 $EC=FD$ とし、EFはたるまないようにする。A,Bの間は、おもりどうしがぶつかるほど狭くしないこと。

【安全に関する注意】 実験するときには、ケガをしないよう十分注意すること。また、まわりの人にも注意して行うこと。

【参考】

単振り子は、糸の長さによって決まる周期で振動する。この周期をその振り子の固有周期と呼び、その逆数を固有振動数と呼ぶ。単振り子に固有振動数と同じ振動数で変化する力をおよぼすと単振り子の振幅が変わる。これを共振（または共鳴）という。

このレポート課題の連成振り子のように、同じ長さの糸をもつ2つの単振り子を連結させると、互いに共振する。このような現象が実験①で見られる。さらに、この連成振り子の場合には、糸 EF の位置 (AE の長さ) によって2つの振り子の間でおよぼしあう力が変わるので、その影響を実験①で確かめることもできる。その際、実験②と③の結果がどうなるかは興味深い。

分子や結晶の中では多数の原子が熱のエネルギーによって振動しているが、原子どうしが力を及ぼしあっているいわば連結しているので、このような共振がごく普通に見られ、物質の性質を理解する上でも役に立つ考え方となっている。

【レポートの書き方および形式】

1. 自分がどのような考えにもとづいて、どのような実験および観察・測定を行ったのか、他の人に分かるように、しかも他の人が同じことを繰り返して実験できるように詳細なことまで記述する。とくに、自分で工夫したこと、そのもとになった考えや調べたことを明確に書くと独創性の高いレポートとなる。

2. レポートの表紙は最後のページに載せたものあるいはコピーを使用すること。

3. レポートは次の7つのセクションに分けて書く。

(1) 実験の目的

このレポートで何を報告するのか、何を目的とした実験なのか、などをはじめに書く。だから実験やデータの解析が終わって結論が得られてからレポートを書く。特に、自分なりの視点、自分の独創性がどこにあるのか、このセクションにあらかじめ書いておくとよい。レポートの表題もそれらが反映されたものであることが望ましい。

(2) 実験手法

実験の原理、装置や計測器具の説明、測定方法などを詳しく述べる。つまり、このセクションを読んで、他の人が同じことを繰り返して実験できるように必要な情報はすべて書く。写真や模式図などを活用するとよい。

(3) 実験結果

観察や測定の結果をまとめ、そこから直ちに明らかになったことを述べる。実験結果は数値の羅列ではなく、グラフや表などを上手に使ってわかりやすく表現する。

(4) 考察

実験結果を解析し、どのようなことが明らかになったか、あるいは明らかにならなかったかを述べる。その際、実験誤差などについての考察も行うとさらによい。また、改善の余地や解明できなかったことなどがある場合には、そのことも指摘すると、あなたの後に続く「後輩」に有益な情報となり、科学の発展に寄与することになる。

(5) 結論

「(1)実験の目的」に照らしあわせ、実験およびその解析の結果、どのような結論が得られたのか述べる。これはあくまでも結論であって単なる実験の結果ではないので注意すること。

(6) 参考資料

実験の実施やレポート作成にあたり、参考にした本や論文、インターネットのサイトなどをリストアップする。それぞれの資料に番号をつけ、セクション「(1)実験の目的」～「(5)結論」の中で引用するときは、その番号で引用する。参考資料から仕入れた他の人の発想や考えを自分のもののようにレポートに書くのは一種の盗作であるので、それらの出所を明示することは重要である。

(7) 共同実験者と役割分担

もし実験や解析を先生や友達など他の人と協力して行った場合には、名前を挙げ、その人たちおよび自分の役割分担を明確に記す。また、先生をはじめ他の人から助言などを受けたときは、それも明記する。

【評価の観点】

- ・ 実験や解析の内容もさることながら、レポート自体がわかりやすく要領よくまとめてあるかどうか重要な評価のポイントです。グラフや写真、模式図などを有効に利用してわかりやすく表現することが大切です。
- ・ 実験や解析に、あなた自身の工夫がどのように入っているのかも重視した評価をします。だから、レポートは自分の独創性がはっきり分かるように書く必要があるのです。高価な材料や高価な測定装置を用いたレポートを高く評価するとは限りません。
- ・ 本やインターネットを参考にしたり、あるいは先生や友人と相談しても構いませんが、最終的には、すべてのセクションを自分の考えにもとづいて自分のことばで書いてまとめてください。

【レポートの提出について】

物理チャレンジ 2008 第1チャレンジ実験課題レポートの提出期限は、2008年6月2日（当日消印有効）です。みなさんに、時間をかけてじっくりと取り組んでいただくため、参加申し込み受付よりも早めに公開しています。ぜひ自分らしさを発揮した素敵なレポートに挑戦してみてください。優秀な実験課題レポートは、特別に表彰する予定です。

なお、実験課題レポートは、物理チャレンジ 2008 の参加申込みをして、第1チャレンジ番号をもらったうえで提出してください。

参加申し込み受付期間は、2008年4月1日から20日までです。参加申込み方法などの詳細は、2008年3月にホームページ（<http://www.phys-challenge.jp>）および募集要項・ポスターなどでご案内します。

物理チャレンジ 2008 第 1 チャレンジ実験課題レポート講評

2008/06/24 実験問題部会

1. 出題の狙い

今年の実験課題は、2つの同等な単振り子を連結した「連成振り子」の実験を行い、その運動の規則性について解析することであった。どのような観点から実験・解析するか、あるいはどの程度まで定量的に解析するか、具体的に指定することはしなかった。各自それぞれの観点で実験を行って解析して欲しかったからである。しかし、やるべき実験を3つ明記して、ある程度やるべきことを指定した：①一方の振り子だけを振った場合、②同位相で2つを振った場合、③逆位相で2つを振った場合、である。これら3つの実験について、あるいは、それらを手がかりに下記のような内容のレポートを期待した。

- ・実験方法や現象の観察を正確に記述し、その上、定量的な測定を行う。
- ・運動の保存量（エネルギー）を定量的に示す。
- ・単振り子と連成振り子の関係を定量的に示す。
- ・可能なら、実験①②③を結び付けて、うなり現象、基準振動、波の重ね合わせ、まで考察を進める。

また、レポートの書式を指定して、レポートの書き方のトレーニングも意図した。

2. 総評

片方の振り子だけを振る上記の実験①を実行してみて、振動が2つの振り子の間で行き来する現象を観察し、それが多くの参加者に驚きを与えたようだ。その新鮮な驚きが伝わってくるレポートが多数あった。しかし、それに引きずられて上記の実験②と実験③の意味や解析がおろそかになった例も少なからずあった。

振り子の運動の定性的な記述にとどまるレポートが1/3程度あったが、定量的な測定を工夫しているレポートも多数見られた。振り子の周期やうなりをストップウォッチで測定するものが多かったが、ビデオカメラや携帯電話のカメラで振り子の運動を撮影し、それを解析しているレポートも見られた。自宅で身近にあるものを使って連成振り子を作っている姿もほほえましい。

今年の特徴として、通学している学校の先生方の支援・協力、あるいはグループによる共同実験が目立った。そのため、指導者の助言がレベルアップにつながっているレポートが多かった。ただし、グループ実験でもレポートは各自がそれぞれ独自にまとめなければならぬが、必ずしもそれが実行されていないグループがあったのは残念である。

レポートを採点してみて気づいた点（良かった点と残念な点）を具体的に列挙する。

(1) 良かった点

- ・身の回りにあるものを使って実験装置をつくり、そこにいろいろな工夫が見られた。

- ・出題者が想定しなかった様々な実験条件で観測を行っていた。
- ・測定方法・ツール（デジタルカメラ・携帯カメラ，照明の陰の利用，インクによる振動の可視化など）に工夫が見られた。
- ・参考文献を明記している人が多かった。
- ・グループ実験でも各自が独自の解析・まとめをしている人が多かった。
- ・全体のレベルは上がった。特に，底上げされた（白紙に近いレポートが皆無）。
- ・中学生や女子生徒の意欲的なレポートが目立った。

(2) 残念な点

- ・終わりに反省を書いているレポートが多かったが，その反省を踏まえてもう一度実験をやり直して欲しかった。成功するまで，あるいは満足いくまで実験するという態度が欲しい。
- ・グラフを有効的に使って欲しい。測定値を羅列した一覧表が目立った。
- ・グラフはグラフ用紙を使って描くべき。グラフの横軸・縦軸・単位を明記すべき。エクセルのグラフには要注意（コンピュータ出力そのままのグラフが多かった）。
- ・有効なグラフの形式を用いていない（棒グラフ，折れ線グラフの使い分け）。
- ・測定ツール・解析ソフトに振り回されて，解析・考察が不十分なものが見られた。
- ・結論や考察に感想を書いた例が多かったが，感想は書くとしても，結論や考察と区別するのが望ましい（実験レポートとしては感想は不要）。
- ・グループ実験で，考察・まとめが全員同じグループがあったのは残念。
- ・全く同じレポートのコピーは論外。
- ・測定精度を高める工夫，精度を落とす原因の考察が安易（安易に空気の抵抗や自分の測定技術の未熟のせいにするレポートが多かった。）
- ・実験①②③を結び付けて，うなり現象までの考察まで行ったレポートが少なかった。
- ・言葉の定義があいまいな場合が多かった（eg.「糸の長さ」がどこの長さなのか不明，「周期」が振り子の周期なのかうなりの周期なのか不明）。
- ・実験結果による考察，さらにその考察を確かめる実験（実証実験）を行うというフィードバックの過程があまり見られなかった。
- ・連結糸の位置を支点側に上げて単振り子に帰着させるという実験が無かった。

3. 採点

1点から9点までの9段階評価を行った。

9点：4名， 8点：6名， 7点：35名， 6点：54名， 5点：142名，
4点：107名， 3点：171名， 2点：67名， 1点：63名， 合計649名

【評価基準】

9，8点：特に優れている

- ・何かオリジナルなこと，飛びぬけたことが入っている。

- ・振る方向が面内の場合と面直の場合の違いを議論している。
- ・基準振動を定量的に議論している。

7, 6点：優れている

- ・条件を変えて系統的にやっている。(3つの実験をやっている。)
- ・定量的な議論から「うなり」(②と③のの差が①のうなり)に気づいている
- ・保存量に関する定量的な議論

5, 4点：標準的

- ・定量的な測定がある。
- ・解析に有効な意味のあるグラフがある。
- ・定量的に優れていれば3つやっっていなくともいい。

3, 2点：やや劣っている

- ・3つの実験を(あまり定量的でないが)やっている。
- ・定量的にやっていれば1, 2つの実験でもよい。
- ・実験方法, データの記述がある。

1点：劣っている

- ・定性的な観察だけにとどまっている。
- ・実験方法, データの記述が不十分。
- ・他人のレポートのコピー。

4. 実験優秀賞

実験や解析に工夫が見られたユニークなレポートを実験優秀賞として決定した。これらは、必ずしも上記の点数の成績上位者ではない。

- ・大竹洋輔 838019 大成中学高等学校(高3) 7点評価
面内・面直の混在した振動の実験を行い、固有振動の概念まで近づいている。
- ・佐々木裕典 804001 岩手県立盛岡第一高等学校(高2) 6点評価
ビデオカメラのコマ送りによって美しいデータを取得。
- ・小幡哲士 838006 愛知県立岡崎高校(高2) 5点評価
3つの連成振り子の追加実験を行った。
- ・上原悠治 821005 筑波大学附属駒場中学(中2) 8点評価
固有振動の概念から優れた解析を行った。
- ・大野悟 820002 小石川中等教育学校(中1?) 6点評価
2つの振り子の間の距離や振り子の長さを系統的に変え、規則性を見出そうと工夫していた。
- ・共同実験優秀賞
グループ実験でも各自がそれぞれの観点から実験および解析を行っている。

- ・平良裕人 971003 私立昭和薬科大学附属高校（高3） 9点評価
- ・加藤本子 971002 私立昭和薬科大学附属高校（高3） 9点評価
- ・上間優美 971001 私立昭和薬科大学附属高校（高3） 9点評価

物理チャレンジ2009 第1チャレンジ実験レポート課題

次の課題Aまたは課題Bのどちらか一つを選択して実験を行い、そのレポートを後で述べる「レポートの書き方および形式」にしたがってまとめ、提出締め切り日までに郵送してください。

課題A：床に物体を落としたときの跳ね返り

ボールなどをいろいろな高さからそっと落とし、跳ね返る高さを測定して規則性を見出そう。テニスボールやスーパーボール、ピンポン球など、いくつかの物体について実験してみよう。また、板張り床やコンクリート床など、床の種類も変えて実験してみよう。

<実験上の注意>

実際に跳ね返る高さを目測で測定するには工夫がいる。たとえば、明瞭な目盛板を後ろに置き、その前面でボールを落とし、跳ね返る高さをすばやく読み取る練習をしてから本番の測定に入るとよい。目測に失敗したと思われる値は解析には使用せず、確かに読み取れた値だけをデータとして解析に用いる。測定の誤差を考慮すると、同じ条件の実験を何度か繰り返してデータを取るのがよい。

課題B：お湯の冷め方

容器に入れた湯がどのように冷めていくのか、時間に対する温度の変化を測定してグラフを描いてみよう。そこから、どのような場合に早く冷めるのか、あるいは逆に冷めにくいのか調べてみよう。はじめのお湯の温度、お湯の量、容器の形、容器の材質などを変えて実験してみよう。それらの実験から、なるべく早く冷ます工夫、あるいは冷めないようにする工夫についても考えてみよう。

<実験上の注意>

お湯の冷め方はいろいろな実験条件によって変わる。たとえば、気温による違い、冷房・暖房の風が当たっているかどうか、容器にふたをしているかどうかなど。このため、自分の実験で注目する実験条件以外の条件はすべて同一にして実験するのがよい。

<安全上の注意>

実験をするときに、ボールを身体に強くあてたり、高いところから落として怪我などをさせない（しない）よう十分に気をつけること。また、お湯で火傷をする危険性もあるので、十分注意すること。

【レポートの書き方および形式】

1. 自分がどのような考えにもとづいて、どのような実験および観察・測定を行ったのか、他の人に分かるように、しかも他の人が同じことを繰り返して実験できるように詳細なことまで記述する。とくに、自分で工夫したこと、そのもとになった考えや調べたことを明確に書くと独創性の高いレポートとなる。
2. レポートは A4 版のレポート用紙に書き、このファイルの最後の（レポート表紙）のページをプリントアウトし、必要事項を記入して表紙としなさい。散逸を防ぐために必ずホッチキスで綴じて提出すること。なお写真やグラフをレポートに添える場合にも、A4 版のレポート用紙に貼り付け、一緒に綴じて提出すること。
3. レポートは次の 7 つのセクションに分けて書く。
 - (1) 実験の目的
このレポートで何を報告するのか、何を目的とした実験なのか、などをはじめに書く。だから実験やデータの解析が終わって結論が得られてからレポートを書く。特に、自分なりの視点、自分の独創性がどこにあるのか、このセクションにあらかじめ書いておくとよい。レポートの表題もそれらが反映されたものであることが望ましい。
 - (2) 実験手法
実験の原理、装置や計測器具の説明、測定方法などを詳しく述べる。つまり、このセクションを読んで、他の人が同じことを繰り返して実験できるように必要な情報はすべて書く。写真や模式図などを活用するとよい。
 - (3) 実験結果
観察や測定の結果をまとめ、そこから直ちに明らかになったことを述べる。実験結果は数値の羅列ではなく、グラフや表などを上手に使ってわかりやすく表現する。
 - (4) 考察
実験結果を解析し、どのようなことが明らかになったか、あるいは明らかにならなかったかを述べる。その際、実験誤差などについての考察も行うとさらによい。また、改善の余地や解明できなかったことなどがある場合には、そのことも指摘すると、あなたの後に続く「後輩」に有益な情報となり、科学の発展に寄与することになる。
 - (5) 結論
「(1)実験の目的」に照らしあわせ、実験およびその解析の結果、どのような結論が得られたのか述べる。これはあくまでも結論であって単なる実験の結果ではないので注意すること。
 - (6) 参考資料
実験の実施やレポート作成にあたり、参考にした本や論文、インターネットのサイトなどをリストアップする。それぞれの資料に番号をつけ、セクション「(1)実験の目的」～「(5)結論」の中で引用するときは、その番号で引用する。参考資料から仕入れた他の人の発想や考えを自分のもののようにレポートに書くのは一種の盗作であるので、それらの出所を明示することは重要である。
 - (7) 共同実験者と役割分担
もし実験や解析を先生や友達など他の人と協力して行った場合には、名前を挙げ、その人たちおよび自分の役割分担を明確に記す。また、先生をはじめ他の人から助言などを受けたときは、それも明記する。

【評価の観点】

- ・実験や解析の内容もさることながら、レポート自体がわかりやすく要領よくまとめているかどうか重要な評価のポイントです。グラフや写真、模式図などを有効に利用してわかりやすく表現することが大切です。
- ・実験や解析に、あなた自身の工夫がどのように入っているのかも重視した評価をします。だから、レポートは自分の独創性がはっきり分かるように書く必要があるのです。高価な材料や高価な測定装置を用いたレポートを高く評価するとは限りません。
- ・本やインターネットを参考にしたり、あるいは先生や友人と相談しても構いませんが、最終的には、すべてのセクションを自分の考えにもとづいて自分のことばで書いてまとめてください。

【レポートの提出について】

物理チャレンジ 2009 第1 チャレンジ実験課題レポートの提出期限は、2009年5月25日(月) (当日消印有効)です。みなさんに、時間をかけてじっくりと取り組んでいただくため、参加申し込み受付よりも早めに公開しています。ぜひ自分らしさを発揮した素敵なレポートに挑戦してみてください。優秀な実験課題レポートは、特別に表彰する予定です。

なお、実験課題レポートは、物理チャレンジ 2009 の参加申し込みをして、第1 チャレンジ番号をもらったうえで提出してください。

参加申し込み受付期間は、2009年4月1日から30日までです。参加申し込み方法などの詳細は、2009年3月にホームページ (<http://www.phys-challenge.jp>) および募集要項・ポスターなどでご案内します。

物理チャレンジ 2009 第 1 チャレンジ実験課題レポート講評

2009/07/1 第 1 チャレンジ部会

1. 出題の狙い

今年の実験課題は課題 A と B の 2 つのテーマを用意し、参加者がどちらか一方を選択して実験に取り組めるようにした。課題 A は、ボールなど物体を床に落としたときの跳ね返りに関する実験で、跳ね返り係数などの法則性を見出す課題であった。課題 B は、お湯の温度の時間変化を調べ、その冷める速さを決定している要因を突き止め、冷め方を制御する課題であった。両方とも、実験の方法や着目すべき観点などを具体的に指定することはしなかった。各自それぞれの視点・観点で実験を行って解析させることを意図したからである。

両課題とも以下の観点から採点した。

- ① 実験条件を適切に制御して、自分の観点・目的に合った測定および解析ができているか。
- ② 自分のやったことや考えたことを正確に要領よく伝える体裁になっているか。
- ③ 独自の創意工夫や独自の視点を取り入れた実験および解析をおこなっているか。

2. 総評

両課題とも、採点者をうならせる研究論文のようなすばらしいレポートから、レポートの体裁をなしていないものまで、さまざまなレベルのレポートが集まった。素晴らしいレポートとして、課題 A では、跳ね返りのときのボールや床の変形、ヤング率との関係、さらにはエネルギー損失の考察まで行っていたのには感心した。課題 B では、お湯の温度変化と質量変化を同時に測定し、蒸発による放熱と伝導による放熱を区別したレポートにも感心した。

しかし、両課題ともに、ある一定のレベルまでの実験および解析を多くの生徒が行っていたが、さらに一步踏み込んだものは多くなかった。つまり、課題 A では、跳ね返りの高さを測定して跳ね返り係数を求めること、課題 B では、温度が下がっていく時間変化を測定してグラフにすること、まではほとんどのレポートでなされていた。しかし、その先、さらに踏み込んだ実験・解析が欲しかった。実験条件をさまざまに変えて測定するまではできているが、そこから定量的に何が言えるのか、自分の仮説や理論と比較し、踏み込んだ解析と、必要なら追加実験などが欲しいものが多かった。

しかし、実験手法にはさまざまな工夫が見られ、学校の授業で時間制限の厳しいなかで行う実験ではできない試行錯誤や追加実験、あるいはコンピュータによるデータ解析などを行った力作も多数あった。デジタルビデオ、高速カメラ、パソコン接続の熱電対やマイクロフォンなど、さまざまな最新鋭の計測機器を使ったレポートもあり、測定精度やデー

タ量で格段に優れたレポートもあった。中学生や女子生徒の意欲的なレポートが目立った。

グループ実験でもレポートは各自がそれぞれ独自にまとめなければならないが、必ずしもそれが実行されていないグループがあったのは残念である。ワープロで作成した一字一句同じレポートも少ないながらあったのは極めて残念であった。

優れたレポートやユニークな観点からのレポートの例を課題別に具体的に列挙する。

課題A：物体の跳ね返り

- ・身の回りにあるものを使って実験装置をつくり、測定方法やツールにいろいろな工夫が見られた。たとえば、ボールを初速度ゼロで落とすために、掃除機のホースでボールを吸いつけてから落としたり、跳ね返りの高さを直接測らずにバウンドして床に着くまでの時間を測定したりしていた。また、時間計測については、ボールが床に着くときの音をマイクで拾ってパソコンで記録する工夫も見られた。
- ・跳ね返り係数が衝突速度に依存していることを系統的な実験から発見している。
- ・跳ね返り係数の落下高さ依存性から、ボールの落下中での空気抵抗による効果を考察し、落下高さをゼロにする極限をとって（外挿して）跳ね返り係数を求めた。
- ・ボールの空気圧による跳ね返り係数の違いを系統的に調べた。
- ・ボールの温度による違いを調べた。ゴムボールは温度が高いほど跳ね返るが、ピンポン玉は逆の傾向を示した。
- ・跳ね返るときのエネルギー損失やボールの変形と跳ね返り係数との関係を調べた。
- ・発泡スチロールに物体を落として、その凹む深さと高さの関係を調べ、跳ね返るときのエネルギー損失を考察した。
- ・落下速度の測定から空気抵抗の影響を調べ、ストークスの法則まで確認した。
- ・参考文献を明記している人が多かった。
- ・グループ実験でも各自が独自の解析・まとめをしている人が多かった。

課題B：お湯の冷め方

- ・冷却速度が容器の表面積に比例することを定量的に示した。
- ・蒸発による質量変化も温度変化と同時に測定し、高温分子の蒸発による温度低下と伝導による放熱を区別した。
- ・水に磁場をかけたり音波をあてたりして、冷め方の違いを調べた。
- ・お風呂の冷め方、深さによる違いを系統的に調べた。
- ・なめこ汁が冷めにくい原因を調べた。
- ・水に絵の具を溶かし、色がある場合と透明な水での冷め方を比較した。

残念な点

- ・グラフはグラフ用紙を使って描くべきだが、レポート用紙に直接、しかもフリーハンドで描いているレポートが少なからずあった。グラフの横軸・縦軸に単位を明記

すべきである。エクセルのグラフには要注意（コンピュータ出力そのままのグラフが散見された）。

- ・測定ツール・解析ソフトに振り回されて、解析・考察が不十分なものが見られた。
- ・計算の結果から求められた数値を7桁も8桁も書いているものがあったが、意味ある桁数にとどめて表記すべきである。
- ・結論や考察に感想を書いた例が多かったが、感想は書くとしても、結論や考察と区別するのが望ましい（実験レポートとしては感想は不要）。
- ・グループ実験で、考察・まとめが全員同じになっていたグループがあったのは残念。
- ・全く同じレポートのコピーは論外。
- ・測定精度を高める工夫、精度を落とす原因の考察が安易（安易に空気の抵抗や自分の測定技術の未熟のせいにするレポートが多かった。）
- ・実験結果による考察、さらにその考察を確かめる実験（実証実験）を行うというフィードバックの過程が見られるレポートが少なかった。実験を1日で終わらせるのではなく、データ解析と改良再実験を繰り返すという努力があまり見られなかった。

3. 採点

1点から9点までの9段階評価を行った。

レポート総数 796 通

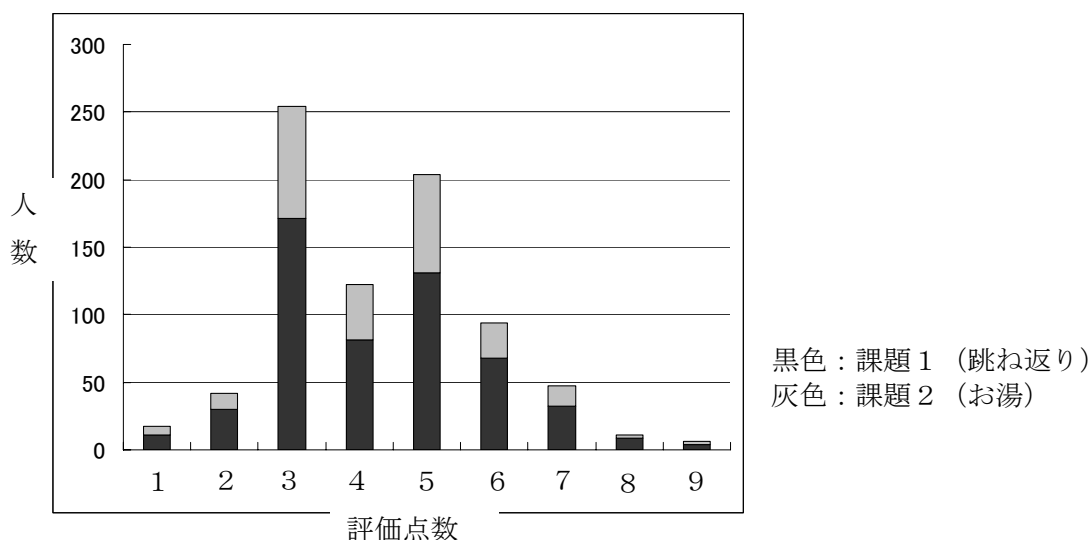
課題1（跳ね返り） 537 通

課題2（お湯の冷め方） 261 通

（2名が両方の課題で提出。しかし、一方の課題でしか評価しなかった。）

成績分布

評価	9点	8点	7点	6点	5点	4点	3点	2点	1点	合計
課題1	4	9	32	68	131	81	171	30	11	537(人)
課題2	2	2	15	26	74	41	83	12	6	261(人)



【評価基準】

9, 8点：特に優れている

- ・何かオリジナルなこと、飛びぬけたことが入っている。

7, 6点：優れている

- ・実験条件を適切に制御して系統的に測定を行っている。
- ・焦点の絞られた実験と考察を行っている。

5, 4点：標準的

- ・定量的な測定がある。
- ・解析に有効な意味のあるグラフがある。

3, 2点：やや努力を要する

- ・実験、解析、考察が系統的でない、または焦点が絞られていない。
- ・実験方法やデータの記述がある。

1点：たいへん努力を要する

- ・実験方法やデータの記述が不十分。

4. 実験優秀賞

実験や解析に工夫が見られた特に優れたレポートを実験優秀賞として決定した。

【課題 A：跳ね返り】

- ・ **918002 石川貴史**（東邦大学附属東邦高校 2年）

跳ね返るときボールにはたらく力と変形（ひずみ）の関係を考察し、跳ね返り係数とヤング率の関係を解析した。

- ・ **923001 蘆田祐人**（慶応義塾高等学校 3年）

跳ね返り係数がボール落下高さに依存することから、空気抵抗の影響に気づき、大きさの異なるボールを使って系統的な測定を行い、ストークスの法則までも実験的に検証した。

- ・ **929005 船曳敦漠**（桐朋中学 3年）

ボール落下中での空気抵抗まで考慮した解析を行うと同時に、跳ね返るときに失う力学的エネルギーの考察を行い、床の種類によってエネルギー損失のメカニズムが異なることを明らかにした。

- ・ **949024 藤原孝将**（岡山城東高校 3年）

精度の高い実験から、跳ね返り時のエネルギー損失に疑問ともち、高速カメラを用いた詳しい実験を行い、ボールの変形と跳ね返り係数との関係を考察した。

- ・ **942005 大森 亮**（灘中学 2年）

ボールを初速度ゼロで落とす工夫をし、極めて多数回の測定から測定誤差まで

考慮した系統的な解析を行っている。跳ね返り係数が衝突速さに依存すること、空気の抵抗の影響などを明らかにしている。

【課題 B：お湯の冷め方】

・ 920017 坂本路果（立教女学院高校 1 年）

3つの放熱過程を考え、それを遮る条件をさまざまに設定して系統的な実験を行っている。データ整理も適切であり、自ら立てた仮説に対応させた考察を行っている。

・ 920033 山川真以（桜蔭高校 3 年）

熱の移動について確かなイメージを持ちながら的確に条件制御して実験を行っている。特に、温度変化と同時に湯の質量変化も測定し、高温分子の蒸発と放熱を区別した。結果の解析では理論的な予測との相違から、実験上の克服すべき課題がよく整理されている。

・ 920005 上原雅俊（筑波大学附属駒場中学 3 年）

さまざまな材料・素材を用い、条件制御を系統的に行って実験し、その結果の解析も文献などを参考にしながら現象の理解を深めている。

物理チャレンジ2010 第1チャレンジ実験課題

<氷の密度をはかってみよう>

ものには重いもの、軽いものがありますが、物質の性質としては、同じ体積で比較する必要があります。単位体積あたりの質量を密度といいます。密度をはかりやすいものとはかりにくいものがあるでしょう。

そこで、自分なりの工夫をして、氷の密度をはかってみてください。

また、可能ならば他の方法で氷の密度をはかって、比較してみてください。

<安全上の注意>

冷凍庫の温度は -20°C くらいですので、冷凍庫から取り出したばかりの氷は、非常に冷たく、素手でさわると手にくっついたりします。長時間氷にさわっていると凍傷になることがあるので注意すること。

【レポートの書き方および形式】

1. 自分がどのような考えにもとづいて、どのような実験および観察・測定を行ったのか、他の人に分かるように、しかも他の人が同じことを繰り返して実験できるように詳細なことまで記述すること。とくに、自分で工夫したこと、そのもとになった考えや調べたことを明確に書くと独創性の高いレポートとなります。

2. レポートはA4版のレポート用紙に書き、ホームページで公開されるレポート表紙のページをプリントアウトし、必要事項を記入して表紙としてください。散逸を防ぐために必ずホッチキスで綴じて提出すること。なお写真やグラフをレポートに添える場合にも、A4版のレポート用紙に貼り付け、一緒に綴じて提出すること。

3. レポートは次の7つのセクションに分けて書いてください。

(1) 実験の目的

このレポートで何を報告するのか、何を目的とした実験なのか、などをはじめに書きます。レポートを書くのは、実験やデータの解析が終わって結論が得られてからになります。特に、自分なりの視点、自分の独創性がどこにあるのか、このセクションにあらかじめ書いておくとよいです。レポートの表題もそれらが反映されたものであることが望ましいです。

(2) 実験手法

実験の原理、装置や計測器具の説明、測定方法などを詳しく述べます。つまり、このセクションを読んで、他の人が同じことを繰り返して実験できるように必要な情報はすべて書きます。写真や模式図などを活用するとよいでしょう。

(3) 実験結果

観察や測定の結果をまとめ、そこから直ちに明らかになったことを述べます。実験

結果は数値の羅列ではなく、グラフや表などを上手に使ってわかりやすく表現します。

(4) 考察

実験結果を解析し、どのようなことが明らかになったか、あるいは明らかにならなかったかを述べます。その際、実験誤差などについての考察も行うとさらによいです。また、改善の余地や解明できなかったことなどがある場合には、そのことも指摘すると、あなたの後続く「後輩」に有益な情報となり、科学の発展に寄与することになります。

(5) 結論

「(1)実験の目的」に照らしあわせ、実験およびその解析の結果、どのような結論が得られたのか述べます。これはあくまでも結論であって単なる実験の結果ではないので注意すること。

(6) 参考資料

実験の実施やレポート作成にあたり、参考にした本や論文、インターネットのサイトなどをリストアップします。それぞれの資料に番号をつけ、セクション「(1)実験の目的」～「(5)結論」の中で引用するときは、その番号で引用すること。参考資料から仕入れた他の人の発想や考えを自分のもののようにレポートに書くのは一種の盗作であるので、それらの出所を明示することは重要です。

(7) 共同実験者と役割分担

もし実験や解析を先生や友達など他の人と協力して行った場合には、名前を挙げ、その人たちおよび自分の役割分担を明確に記します。また、先生をはじめ他の人から助言などを受けたときは、それも明記すること。

4. レポートは個人で、独自のものを書くこと

共同で実験を行い、データが共通でも、レポートは個々人で独自のものを書いてください。考察などがまったく同じ文章だった場合、採点の対象とできないことがあります。

【評価の観点】

- ・実験や解析の内容もさることながら、レポート自体がわかりやすく要領よくまとめられているかどうか重要な評価のポイントです。グラフや写真、模式図などを有効に利用してわかりやすく表現することが大切です。
- ・実験や解析に、あなた自身の工夫がどのように入っているのかも重視した評価をします。だから、レポートは自分の独創性がはっきり分かるように書く必要があるのです。高価な材料や高価な測定装置を用いたレポートを高く評価するとは限りません。
- ・本やインターネットを参考にしたり、あるいは先生や友人と相談しても構いませんが、最終的には、すべてのセクションを自分の考えにもとづいて自分のことばで書いてまとめてください。

【レポートの提出について】

物理チャレンジ2010第1チャレンジ実験課題レポートの提出期限は、2010年5月31日（月）（当日消印有効）です。みなさんに、時間をかけてじっくりと取り組んでいた

だくため、参加申し込み受付よりも早めに公開しています。ぜひ自分らしさを発揮したレポートに挑戦してみてください。優秀な実験課題レポートは、理論コンテストの結果にかかわらず表彰する予定です。

なお、実験課題レポートは、物理チャレンジ2010の参加申込みをして、第1チャレンジ番号をもらったうえで提出してください。

参加申込み受付期間は、2010年4月1日から30日までです。参加申込み方法などの詳細は、2010年3月にホームページ (<http://www.phys-challenge.jp>) および募集要項・ポスターなどでご案内します。

物理チャレンジ2010 第1チャレンジ実験課題レポート講評

1. 出題のねらい

今年の課題は「氷の密度をはかってみよう」であった。

常温では解けてしまう氷の密度を、いかに工夫して測るか、コンテストの創造力に期待した。さまざまな制約の中で、正確な測定を目指すためにどのような工夫をしたか、特に以下の点を評価した。

- ① 複数回、または複数の条件下で測定をし、精度・信頼度の向上を目指している
- ② 複数の方法を試み、その適否の評価をしている
- ③ 誤差などデータの客観的な解析を行っている
- ④ 実験手順、結果、考察などわかりやすく表現できている

2. 総評

非常に緻密な実験を行い、また、研究論文としての構成をじゅうぶん踏まえた力作がいくつか見られた。昨年のようにグループでワープロのレポートで名前を変えただけ、というコピーレポートは減ったようにも思われるが、中には、共同実験者を書かずに同一データを用いているものもあった。「こうすれば測れるはずだが、時間がないのでできなかった」という内容のものもいくつかあったのは残念であった。実際に実験を行うことで思ってもみなかった多くの発見が得られることは、他の応募レポートから感じられることでもあった。

しかしながら、多くの応募者から、工夫や努力に富んだレポートが寄せられ多のは事実であり、チャレンジャーの知的好奇心を刺激することには成功したようである。高2以下の優秀レポートが多かったことも収穫であった。

いくつか、特徴的な工夫を列記する。

- ・ 純粋な氷を作るために精製水を利用し
- ・ 溶存気体を取り除くために加熱したのちに冷却した。
- ・ 0℃以下の液体で氷が沈む液体をいくつか用意して比較した。
- ・ 水に完全に沈めるためにおもりを利用した。
- ・ 体積と質量を測るのではなく、浮力を測って液体との密度の比を求めた。
- ・ 氷と同じ比重になる液体を調製した。
- ・ 温度の影響をなくすため、冷凍室内で実験を行った。
- ・ 液体状態と凍らせたのちの体積変化をはかった。
- ・ さまざまな液体を凍らせ、その密度を測った。

3. 採点

採点の結果，9段階の評価段階に分けた。9点，8点の8名には実験優秀賞を授与することとした。

【評価基準】

9点，8点：特に優れている

- ・オリジナルな考察，緻密な解析などがある

7点，6点：優れている

- ・複数の方法や，誤差など客観的な結果の評価がある

5点，4点：標準的

- ・複数回測定するなどの努力をしている

3点，2点：やや努力を要する

- ・原理的には測定に成功しているが，ものたりない

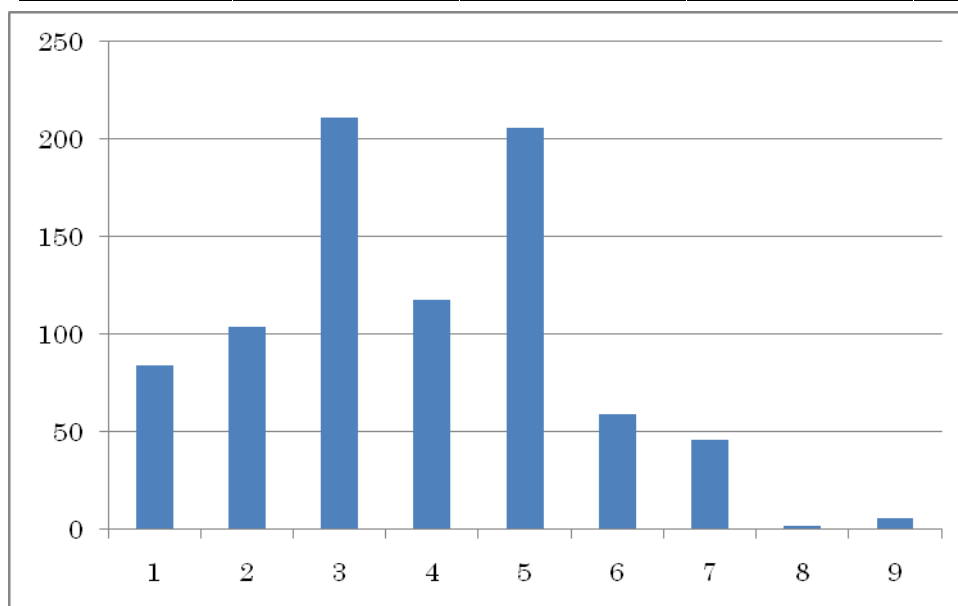
1点：たいへん努力を要する

- ・原理を理解していない，実験を行っていないなど

レポート総数 836通

成績分布

評価	1	2	3	4	5	6	7	8	9
人数	84	104	211	118	206	59	46	2	6



上原雅俊	東京都	筑波大学附属駒場高等学校1年
上原悠治	東京都	筑波大学附属駒場高等学校1年
佐藤 遼太郎	宮城県	秀光中等教育学校5年
鈴木仙里	千葉県	暁星国際高等学校3年
濱崎 立資	神奈川県	栄光学園高等学校3年
福岡和也	福井県	藤島高等学校3年
福永健悟	千葉県	東邦大学付属東邦高等学校2年
船曳 敦漠	東京都	桐朋高等学校1年

物理チャレンジ

第2チャレンジ 実験コンテスト編

物理チャレンジ 2005

実験問題



2005年8月14日（日）

諸注意・実験器具確認	8:30 ~ 8:40
実験問題へチャレンジ	8:40 ~ 13:20
実験器具後片付け	13:20 ~ 13:30

実験問題へチャレンジを始める前に下記の **<注意事項>** をよく読むこと。

チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の **<実験問題の背景>** および **<実験で使用する部品・装置>** を読み、そのうえで、**実験問題1** および **実験問題2** にそれぞれ取り組むこと。

<注意事項>

1. 開始の合図があるまで、問題冊子、解答用紙およびグラフ用紙が入った封筒、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 解答用紙およびグラフ用紙のすべてのページに、チャレンジ番号と氏名を記入すること。
3. 実験結果や計算結果、式の変形など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の場所に記入すること。下書き用紙など、採点してほしくない用紙には、用紙全体に大きく×を書きなさい。
4. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓、セロテープ以外は使用してはならない。
5. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、手をあげて監督者に申し出ること。2回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。
6. チャレンジ開始後から 12:00 まではチャレンジを終了することはできない。
7. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、手をあげて監督者に知らせること。
8. 終了の合図があれば、解答用紙とグラフ用紙および下書き用紙を封筒の中に入れ、机におくこと。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。また、机に貼られたチャレンジ番号と氏名が書かれた紙をはがし、箱に張り付けること。問題冊子は持ち帰ってよい。

《光の波動性と粒子性に関する実験問題》

＜実験問題の背景＞

物理学は、私たちの身のまわりにあるさまざまな物質の成り立ちや、自然現象を解き明かすことなどを目的とした学問であるが、「光」は物理学の重要な課題の一つである。現在の一般的な理解は、光は波動の一種であり、空間を媒体として伝わっていく電磁波というものである。波長によって「可視光線」、「赤外線」、「紫外線」などという名前で区別している。

このような光の波動性を、実験結果をもとに初めて明らかにしたのがヤング (Young, 1773~1829) である。これ以前の 18 世紀までは、ニュートンの主張を中心とした粒子論の方が優勢な情勢であった。ところが 1804 年に、ヤングは 2 つの穴に光を通したときにできる縞模様の様子を観察し、この現象が 2 つの波が重なり合うことによって生じることを示し、光が波動であることを確固たるものにした。この現象は波の干渉とよばれる。

実験問題 1 で取り組むこのような干渉や回折の他に、屈折や反射と呼ばれる現象も波動に特徴的なものであり、光がこれらの性質を持つことから、ヤング以来 100 年近く、光が波動であるということは疑いのないことだった。**実験問題 1** では、発光ダイオードから放射される光を用い、ヤングが行った干渉現象と類似の回折格子を使った干渉実験を行い、光の波長を測定する。

ところが、19 世紀の終わり頃 (1888 年) になって、光が波動であることだけでは説明できない現象が注目されるようになった。この現象は「光電効果」と呼ばれ、金属に紫外線などの光を当てると、金属の表面から金属中の電子が放出される。当時は、そもそも、原子の構造や電子の存在すら明らかになっていなかった時代であり、1897 年に、ようやくトムソン (J. J. Thomson, 1856~1940) によって電子の存在が示され、光については、1900 年に高温の物体から放出される光のスペクトルに関するプランクの理論が発表されている。プランク (Planck, 1858~1947) は実験から得られる光のスペクトルが、一つの理論式で表すことができないという困難な問題を、ある定数を導入することによって解決できることを示した。

さて、光を当てると、なぜ、金属から電子が飛び出てくるのであろうか？ もし、光が波動であるならば、よりまぶしく輝く光を当てれば多くの電子が出てきてよいはずである。ところが、どんなにまぶしく明るい光を当てても電子が出てこないのに、それぞれの金属によって決まったある波長以下の光 (多くは紫外線) ならば、暗くて弱い光でも、たちまち電子の放出を観測することができることがわかってきた。これは、どのような理由なのだろうか？

今からちょうど 100 年前、1905 年の 3 月にアインシュタイン (Einstein, 1879~1955) が発表した論文の中で、彼は、このような光電効果の特徴を説明するために、光を、ある大きさのエネルギーを持った粒子と考える仮説を提案した。アインシュタインは、光の波

動性を否定したわけではない。光は、波動としての性質を持つ一方で、同時に、一定の大きさのエネルギーを持つ粒子であると考えたのである。このような光の粒子を、我々は光量子または光子 (Photon) と呼んでいる。アインシュタインは、ひとつの光子が持つエネルギー (E) が光の振動数 (ν) に比例すると考え、プランクが導入した定数 h (プランク定数と呼ぶ) を用いて、

$$E = h\nu \quad \dots \quad (1)$$

と表した。光電効果において、金属中の電子が光から受け取ることができるエネルギーは常にこの大きさであり、エネルギーの大きさは光の明るさ (光子の数) と無関係である。また、金属中の電子は金属原子に束縛されており、金属の外へ出るためには、この束縛を振り切って離れるだけの十分なエネルギーを得なければならない。これを、その金属の仕事関数 (W) と呼ぶ。もし、光子のエネルギー $h\nu$ が W よりも大きければ、電子は金属外へ $h\nu - W$ の運動エネルギーを持って放出されることになる。仕事関数の大きさは、金属原子の種類によって異なるので、光電効果が生じるぎりぎりの光の振動数 ($h\nu = W$ のときの ν) は、金属の種類によって異なる。

こうして、光は、ある波長 (あるいは振動数) を持つ波動であると同時に、 $h\nu$ というエネルギーを持つ粒子でもありと考えられるようになった。波長 λ は振動数 ν を使って

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \dots \quad (2)$$

と書ける。ただし、 c は光の速さで、およそ $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ である。このような考え方は、やがて電子などにも適用できることが明らかとなり、量子力学というミクロの世界を記述する自然法則が確立された。このように現代物理学の基礎が、アインシュタインにより形作られたのである。

実験問題 2 では、発光ダイオードから放射される光のエネルギー E を測定する。さらに、**実験問題 1** で測定した光の波長から (2) 式を使って光の振動数 ν を計算し、それらを組み合わせ、(1) 式からプランク定数 h を求める。**実験問題 1** と **実験問題 2** を通して、光の波動性と粒子性という二重性を理解したい。

＜実験で使用する部品・装置＞

(1) 簡易分光器 (図1)

回折格子による光の干渉現象を利用して光の波長を求めるときに使う実験装置である。長方形の金属製の箱の両側に、スリット①と回折格子（グレーティングとも言う）やCDを貼り付ける孔②が開けられている。スリット①の下には、スペクトルの各色がスリットの位置からどれくらい離れたところに見えるのか、その距離を測定するための工夫として、細長い孔（マーカ）の開いたスライド板③が取り付けられている。孔②に貼り付けられている回折格子をすかして箱の中を覗き、スリットを通して室内の照明灯や発光ダイオード、豆電球などを見ると、スライド板③のある箱の内側側面にスペクトルが観察される。スライド板を手で動かし、スペクトルの目的とする位置にスライド板の細長い孔（マーカ）を合わせ、スリットとその細長い孔（マーカ）との距離を、箱の外から定規で測定する。（注）孔②を覗く際、眼鏡や眼を傷つけないように十分注意すること。

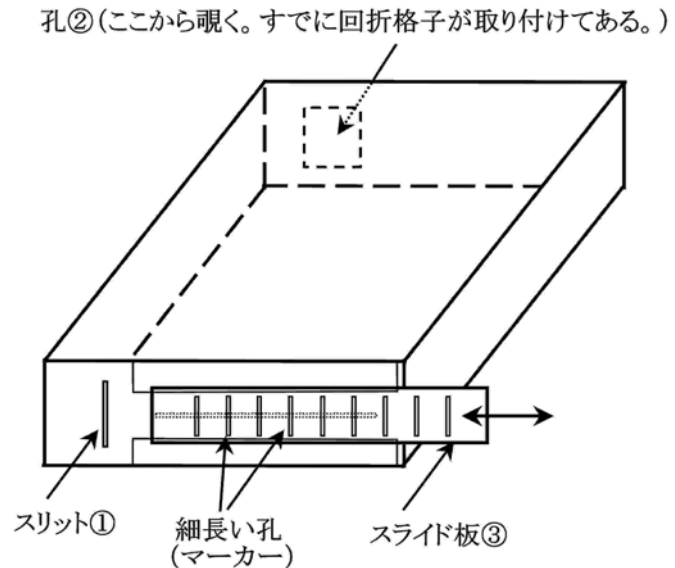


図1. 簡易分光器

(2) 発光ダイオード・豆電球の点灯装置 (図2)

電池ホルダーに単3電池4個を正しく入れ、出力電圧調節つまみを回すことによって、クリップ端子の出力電圧を0～6Vの間で連続的に変化させることができる。クリップ端子の赤色がプラス、黒色がマイナスである。このクリップ端子を発光ダイオードや豆電球の電極棒につないで点灯させる。接続の際、プ

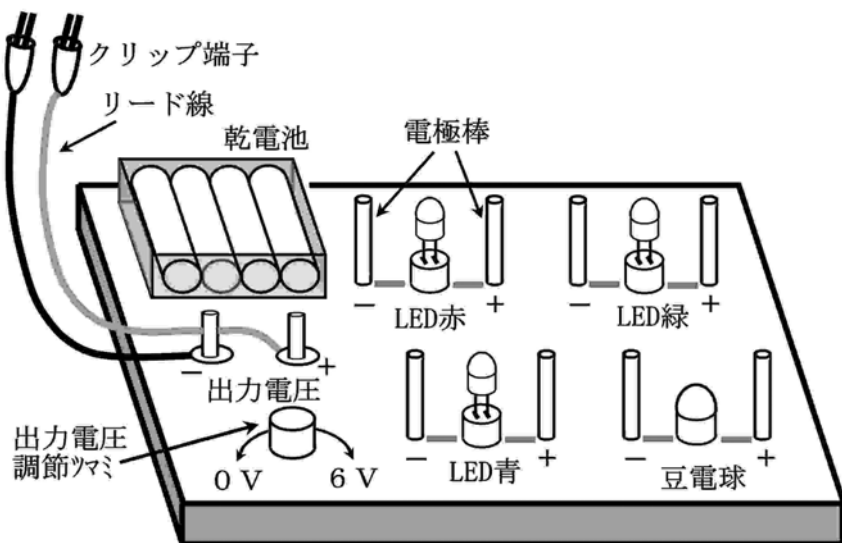


図2. 発光ダイオード・豆電球の点灯装置

ラスとマイナスの極性を間違えないように注意すること。また、発光ダイオードは大きな電圧をかけると非常にまぶしく輝くので、眼の保護のため、長時間にわたって注視しないこと。

(3) 発光ダイオード (LED) (図3)

端子間に電圧を加えることによって発光させることができる素子である。豆電球とちがって、端子を電池につなぐとき極性に注意する必要がある。端子の長い方をプラス、短い方の端子をマイナスに接続する。図2の点灯装置のソケットに極性を間違えないように差し込み、電極棒に記された極性どおりにリード線を接続すること。点灯装置には発光ダイオードが取り付けられていないので、各自で取り付けること。なお、発光ダイオードを破損したときには、発光ダイオードのソケットから引き抜き、添付の予備の発光ダイオードに交換する。また、発光ダイオードに十分大きな電圧を加えると、大変まぶしく発光するが寿命が短くなるので、この状態で長時間放置しないこと。また、まぶしく輝いている状態の発光ダイオードを長い時間にわたって注視しないこと。

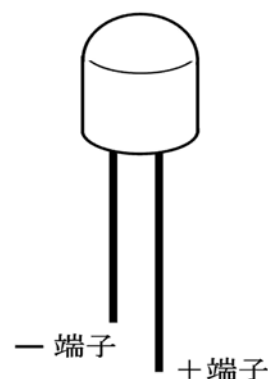


図3. 発光ダイオード (LED)

(4) デジタル・マルチテスター (図4)

(※ 実験問題1では使用しない)

デジタル・マルチテスターは、直流電流や直流電圧、交流電圧、電気抵抗などを測定するために用いる。マルチテスター用の黒のリード線を下部中央のCOMと書かれたジャックに差し込み、赤のリード線を下部右のVΩmAと書かれたジャックに差し込む。次に、中央のダイヤル(ロータリースイッチ)を、測定をおこなう位置にセットして測定回路に組み込んで使用する。測定レンジごとに最大電流値や最大電圧値が定められているので、それ以上の電流や電圧が加わらないように注意すること。特に、200 mA以下のレンジで直流電流を測定する際、200 mA以上の電流を流すと内部の保護ヒューズが切れてしまい、測定できなくなるので注意すること。ヒューズが切れたと考えられる場合には、監督者に申し出ること。なお、ヒューズが切れた場合には、1回だけ新しいものと交換できる。2回以上交換はできるが、減点対象となる。また、ホールドボタンは押さないこと(もし押してしまった場合は、もう一度押せば、それが解除できる)。今回の実験で電圧計として使用する場合は、2 Vレンジか20 Vレンジを使用

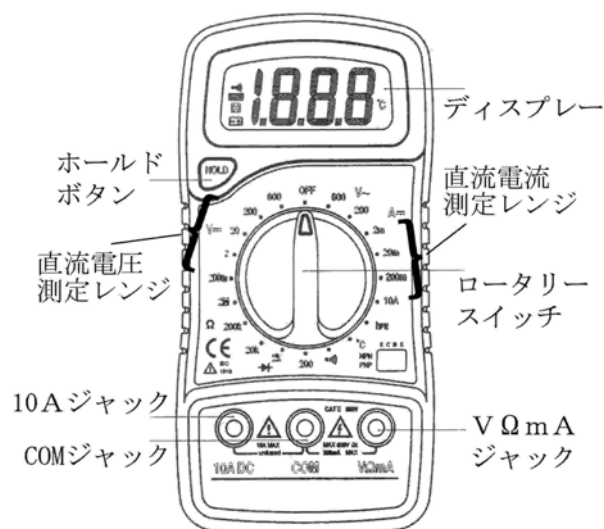


図4. デジタル・マルチテスター

こと。特に、200 mA以下のレンジで直流電流を測定する際、200 mA以上の電流を流すと内部の保護ヒューズが切れてしまい、測定できなくなるので注意すること。ヒューズが切れたと考えられる場合には、監督者に申し出ること。なお、ヒューズが切れた場合には、1回だけ新しいものと交換できる。2回以上交換はできるが、減点対象となる。また、ホールドボタンは押さないこと(もし押してしまった場合は、もう一度押せば、それが解除できる)。今回の実験で電圧計として使用する場合は、2 Vレンジか20 Vレンジを使用

する。直流電流計として使用する場合は、2 mA レンジか 20 mA レンジを使用する。

図5に示すように、デジタル・マルチテスターを電圧計として用いるときは、電圧を測定しようとする素子（発光ダイオードや豆電球）と並列に接続し、電流を測定する場合には直列に接続する。

注1： ロータリースイッチを電流計にしたまま、測定しようとする素子に並列につないでしまうと、デジタル・マルチテスターに過電流が流れて、内部ヒューズが瞬時に切れるので十分注意すること。

注2： デジタル・マルチテスターが電池切れの場合には、ディスプレイ左下にバッテリーマークが表示され、正しい測定ができなくなるので、その場合は監督者に申し出ること。

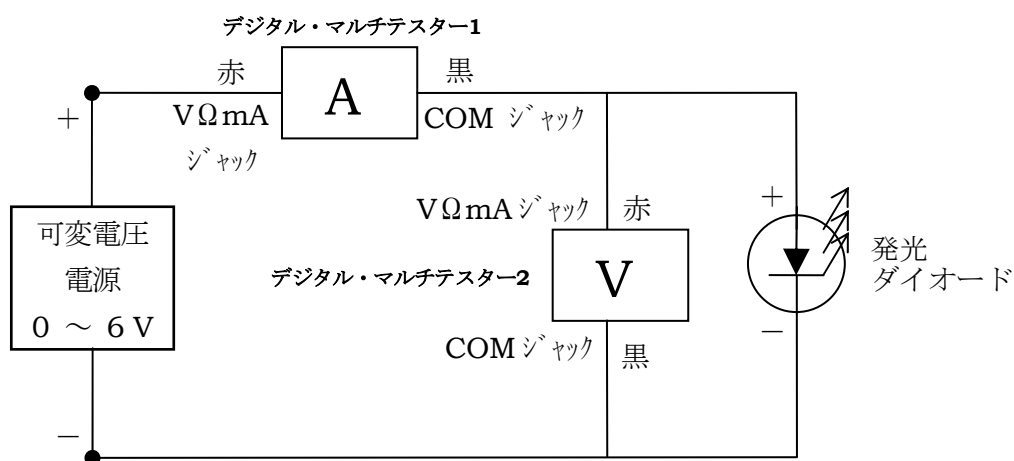


図5. デジタル・マルチテスターの接続の仕方

実験問題 1

実験の目的： 回折格子による光の干渉を利用して，赤色，緑色，青色それぞれの発光ダイオードが発する光の波長を求める。また，CDを回折格子として用い，CDのトラックピッチを算出する。

実験の原理： たとえば，図6のように回折格子にレーザー光を垂直に当てると，スクリーン上に明るい点が幾つも並ぶ。回折格子には1mm中に数百本の割合で細かい溝が等間隔で刻み込まれていて，溝の部分にあたった光はさまざまな方向に散乱されるが，溝と溝の間の平面の部分にあたった光はスリットのように通り抜ける。そのため，通り抜けた光どうしの干渉が起こる。この場合，スクリーンまでの距離 l に比べて回折格子の平面部分の間隔 d は非常に

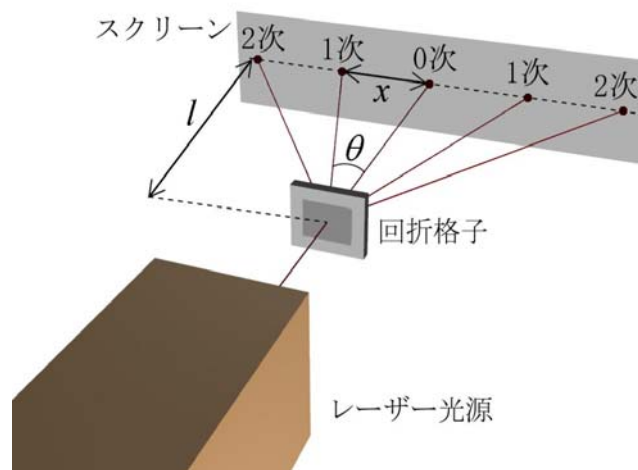


図6．回折格子による干渉実験

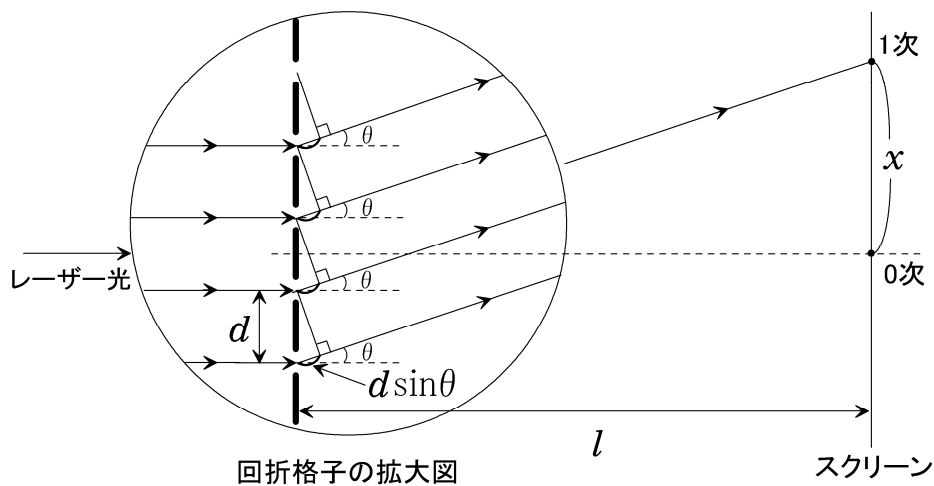


図7．回折格子を通過する光路の拡大図

小さいため，光路を平行とみなすことができる。図7に回折格子を通過する光路の拡大図を示す。スクリーン上の点（中心からの距離が x の点）が明るくなるのは，隣り合う平面部分から通りぬけた光の光路差 $d \sin \theta$ が光の波長 λ の整数倍のときで，

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots \dots (3)$$

である。これに、 $\sin \theta = \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}$ を代入すると、

$$\frac{xd}{\sqrt{l^2 + x^2}} = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots \dots (4)$$

が得られる。

これと同じ原理で、図1に示した簡易分光器を使い、図8のように回折格子とスリットを通して発光ダイオードを観察すると、回折光のスペクトルを観測できる。図8で、回折光が強め合っただけでスペクトルが見えるための条件を、 L 、 x 、 d 、 λ 、 m (m は整数) を用いて表すと

$$\frac{xd}{\sqrt{L^2 + x^2}} = m\lambda \quad \dots \dots (5)$$

と表せる。ただし、 λ は明るく見える光(スペクトル)の波長であり、この実験では $m=1$ のスペクトル(1次回折光)を測定することになる。

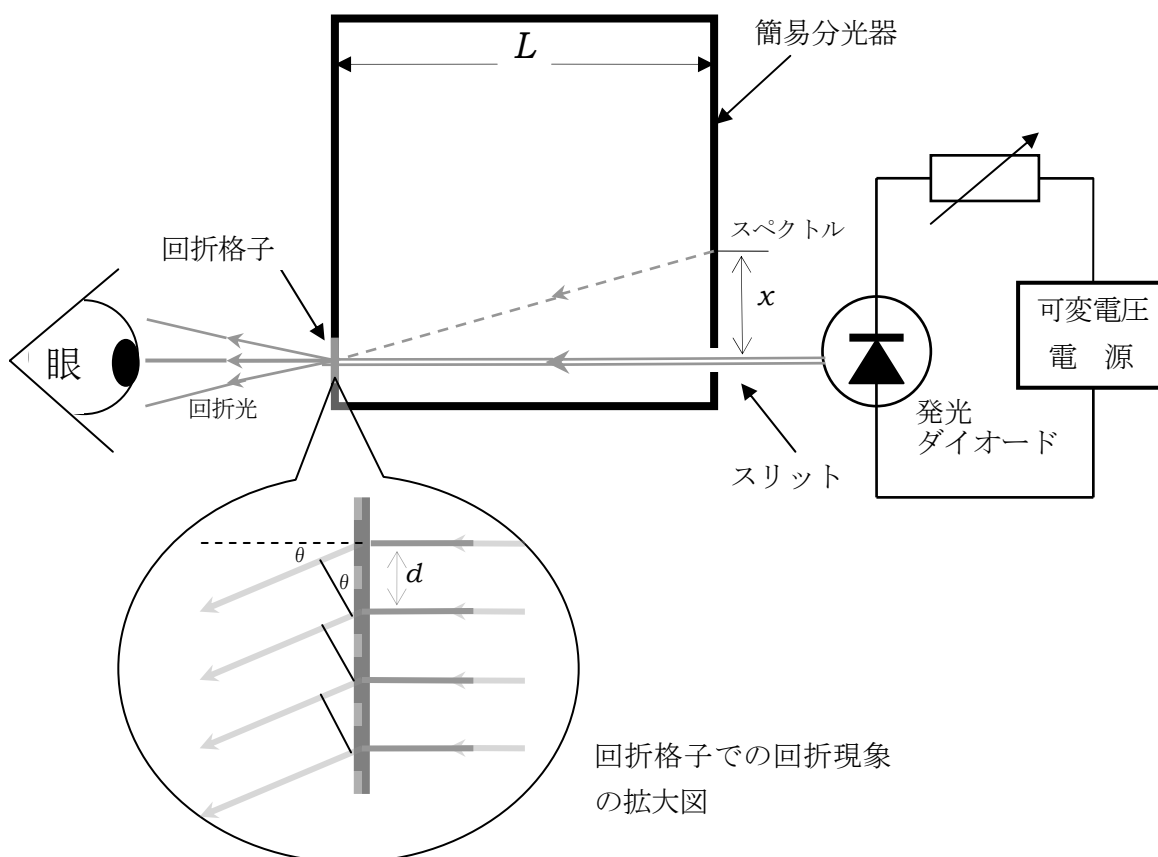


図8. 簡易分光器による干渉縞

実験の準備：

- ① 図8に示す簡易分光器に透過型回折格子（格子定数 $d=2.00 \times 10^{-6} \text{ m}$ ）のフィルムがセロテープで取り付けてあるので、それを確認する。
- ② 回折格子を通してスリットから室内の照明灯の光を見て、箱の中のスリットの下部にスペクトルが見えることを確認する。スライド板をスライドさせて、移動する小孔から漏れる光をマーカーとして用いる。
- ③ 発光ダイオード・豆電球の点灯装置の出力電圧調節つまみを0Vにしておく。電池を電池ホルダーに正しい向きで入れる。出力電圧リード線のクリップ端子を赤色発光ダイオードの電極棒に接続する。その際、極性に注意する。最後に出力電圧つまみを徐々にまわして発光ダイオードが点灯することを確認する。
- ④ 同じ手順で、緑色と青色の発光ダイオードも点灯することを確認する。

実験問題 1-1 発光ダイオードの出す各色の波長の測定

簡易分光器を用いて、赤色、緑色、青色の各発光ダイオードが発する光の波長を測定する。

問1 まず、赤色の発光ダイオードを点灯させ、スライド板をスライドさせてマーカーを赤色のスペクトルの中心に一致させる。次に、そのマーカーからスリットまでの距離 x を、簡易分光器箱の外側で定規を使って測定し、測定結果をメートル単位で解答用紙に記入しなさい。同じ要領で緑色と青色の発光ダイオードについても測定し、測定結果を解答用紙に記入しなさい。なお、測定に際し、緑色の発光ダイオードおよび青色の発光ダイオードでは、それぞれ緑色および青色スペクトルの中心位置を測定すること。

問2 問1の測定結果と式(5)を用いて、それぞれのダイオードが発する光の波長を計算し、その結果をメートル単位で解答用紙に記入しなさい。

問3 回折格子を使って光の波長を測定する実験で、測定精度を向上させるためには、どのような工夫を行えばよいか。簡潔に書きなさい。

実験問題 1-2 CD(コンパクトディスク)のトラックピッチの測定

CDに白色光を当てると反射光が色づいて見える。これは、図9に示すように、CDには渦巻状にトラックと呼ばれる溝があり、トラックの間隔(トラックピッチ)は一定のため、回折格子と類似の働きをするからである(図9は模式図であり、実際のトラック幅はもっと狭い)。CDは透明な樹脂でできており、溝の上に金属光

沢フィルムや保護層など（レーベル面と呼ばれる）が貼り付けてある。

作業 1 実験器具箱のなかに入っている CD のレーベル面には、カッターですでに傷を付けてある。その上にセロテープをしっかりと貼り、一気にセロテープをはがすと金属フィルムから上の部分が一緒にはがれて透明になる。レーベル面がはがれた後の、溝の残った透明なディスク部分を回折格子として実験に使う。

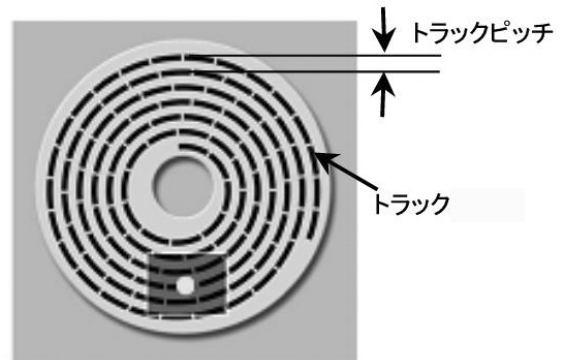


図 9. CD のトラックとトラックピッチ

作業 2 簡易分光器の回折格子を取り去り、その代わりに**作業 1** で作った透明な CD をトラックの向きに注意してセロテープで取り付けなさい。

問 4 青色の発光ダイオードを用い、**実験問題 1-1** と同じ要領でスペクトルの中心位置 x を求め、この測定結果と**問 2** で得られた青色発光ダイオードの波長を用いて、CD のトラックピッチをメートル単位で算出なさい。

問 5 CD の代わりに記憶容量の多い DVD を使ったら、スペクトルはどのように観察されるか。その理由とともに簡潔に述べなさい。

実験問題 2

実験の目的： 光が $h\nu$ というエネルギーを持つことを、発光ダイオードの電流・電圧特性曲線を用いて調べ、**実験問題 1** で得られた波長の値と合わせて、プランク定数 h の値を求める。

実験の原理： 発光ダイオードは半導体と呼ばれる物質で作られている。電流を流すことができるかどうかという観点で見ると、我々の身の回りには、電流が流れやすい金属と、流すことのできない絶縁体と、さらにこの中間の性質を持った半導体の3つに大きく区別することができる。電流は一般的には電子の移動であるが、この電子はすべての原子が持っている。しかし、それぞれの原子の中で電子がどのようなエネルギー状態にあるか、電流として移動できる状態にあるかどうか、3つの区別の原因になっている。このような物質の結晶中での電子のエネルギー状態を、下図のように簡単に表すことができる。

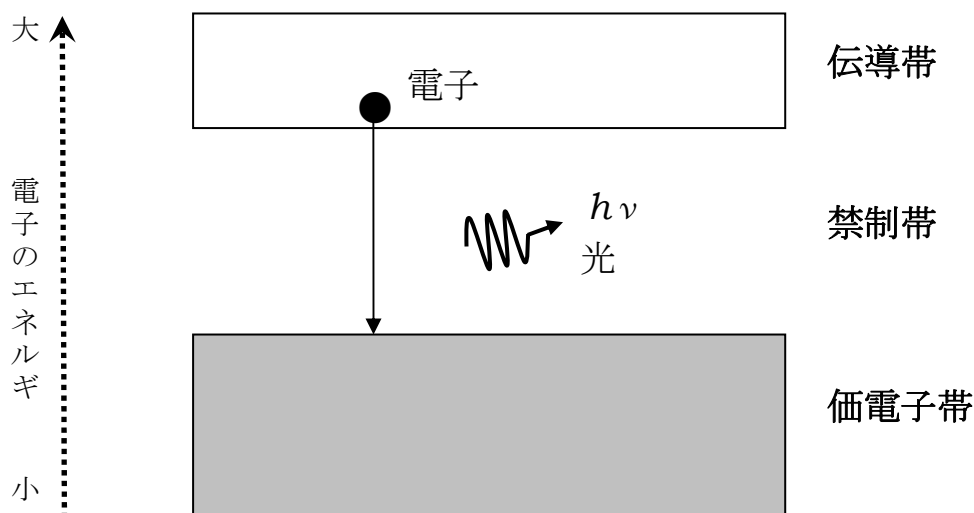


図 10. 固体結晶の中での電子のエネルギー状態

結晶を作っている原子が持っている電子の多くは価電子帯と呼ばれるエネルギーの低い状態にある。この状態よりも高いエネルギー状態は、伝導帯と呼ばれているが、価電子帯と伝導帯の間には、電子が存在することのできない禁制帯と呼ばれる部分がある。エネルギーの高い伝導帯に電子が入ると、物質に電流が流れることができる。

発光ダイオードは、電池のエネルギーで価電子帯の電子を上伝導帯にくみ上げ、電子がここから価電子帯に落ちるときのエネルギー差を、光のエネルギーとして放射している。禁制帯の幅は、発光ダイオードを作る半導体の種類で変えることができるし、光のエネルギーは振動数によって決まっているため、禁制帯の幅を調節することで、色々な振動数（または波長）の光を発する発光ダイオードを作ることが可能である。

電圧が V の電池で電子をくみ上げるとき、電子が持つエネルギー E は素電荷を e とすると、 $E = eV$ とあらわすことができる。このエネルギーが、禁制帯を越えるのに必要最小

のエネルギー eV_0 より大きくなると、つまり、 V_0 以上の電圧をかけるとダイオードに急激に電流が流れて発光し始める。電子が価電子帯に戻るときには、このエネルギーが光のエネルギーになるので、発光ダイオードから出てくる光のエネルギーは、

$$E = h\nu = eV_0 \quad \dots \quad (6)$$

という式を満たしている。

実験の準備： 発光ダイオードの点灯装置に、デジタル・マルチテスターを図5にあるように、一つを直流電流計、もう一つを直流電圧計として接続する。出力電圧調節ツマミを回し、デジタル・マルチテスターの電圧および電流の数値が表示され、それらが変化することを確認する。その際、デジタル・マルチテスターが電池切れの場合には、ディスプレイ左下にバッテリーマークが表示されていないか確認する（バッテリーマークが表示されている場合は監督者に申し出ること）。また、200 mA以上の電流を流すとテスターのなかのヒューズが切れるので注意すること（ヒューズが切れた場合にも監督者に申し出ること）。

実験問題 2-1

- 問1** 実験問題 1-1 の問2で求めた各ダイオードの光の波長 λ から、式(2)を使って光の振動数 ν を計算し、ヘルツ単位で解答用紙に答えなさい。ただし、光速 $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ とする。
- 問2** 次に、各ダイオードに加わる電圧を徐々に増加させ、わずかに点灯し始めるときの電圧 V_0 を求めよ。その V_0 からエネルギー $E = eV_0$ を計算し、ジュール単位で解答用紙に答えなさい。ただし、電気素量 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ とする。
- 問3** それぞれのダイオードについて、 E を縦軸に、光の振動数 ν を横軸にとり、別紙グラフ用紙(1)上に点をプロットしなさい。これらの点を直線近似して得られる直線をひき、その傾きから、式(6)を用いてプランク定数 h を求めなさい。単位も忘れずにつけること。
- 問4** 各発光ダイオードについて、発光ダイオードに加える電圧と発光ダイオードに流れる電流の大きさを測定する。ただし、20 mAを超えないように測定すること。電圧の測定にはマルチテスターの2 Vまたは20 Vレンジを使用し、電流の測定には2 mAまたは20 mAレンジを使用すること。測定結果は、解答用紙の表に記入し、この表をもとに、各ダイオードの電圧と電流の関係を表すグラフを、別紙グラフ用紙(2)および(3)に描きなさい。ただし、赤色、緑色、青色の各発光ダイオードのデータ(3種類)を1つのグラフにまとめて描きなさい(この各曲線は、各発光ダイオードの電流・電圧特性曲線と呼ばれる)。グラフは、方眼紙(別紙グラフ用紙(2))および片対数グラフ用紙(別紙グラフ用紙(3))の両方に描きなさい。各グラフ用紙に指定されている電流・電圧の範囲内のデータ点だけをプロットすればよい。

(注意)

- ・測定では、出力電圧調節ツマミをまわす際、ツマミをゆっくりとまわし、0 Vから徐々に電圧を増加させていくこと。
- ・測定する電圧の間隔は、測定を行いながらグラフを描いて、各自で判断すること
- ・測定範囲に対応するデジタル・マルチテスターのレンジの切り替えを、適切に行なうこと（不適切なレンジで測定すると、ヒューズが切れてヒューズの交換が必要になる場合がある）。

問5 問2で求めた V_0 は測定には個人差があるうえに、そもそもダイオードの性質として V_0 を特定するのは困難である。そこで、問4で求めた電流・電圧特性曲線を利用してプランク定数を求める。問4で描いた緑色ダイオードと青色ダイオードの電流・電圧特性曲線は、赤色ダイオードの電流・電圧特性曲線を横方向に平行移動するとほぼ重なることがわかる。このことから、電流値0.1 mAにおける電圧を V_0 と定義し、それぞれのダイオードの V_0 を片対数グラフから読み取りなさい。その V_0 から計算した $E=eV_0$ を縦軸に、それぞれの発光ダイオードから出る光の振動数 ν を横軸にとり、別紙グラフ用紙(4)上に点をプロットしなさい。これらの点を直線近似して得られる直線をひき、その傾きからプランク定数 h を求めよ。

問6 発光ダイオードの場合と同様に、豆電球についても、電圧と電流の関係を求めて表とグラフ(別紙グラフ用紙(5))を完成させなさい。この測定では、電圧測定レンジを20 V、電流測定レンジを200 mAに設定しなさい。また、豆電球の電流・電圧特性曲線と発光ダイオードの電流・電圧特性曲線とを比較し、なぜ曲線の形が異なるか、その理由を考察して書きなさい。さらに、発光ダイオードと比べて消費電力の違いを考察せよ。

ここまでの測定が終了したら、いったんすべての回路の接続をはずしなさい。

実験問題 2-2

赤色発光ダイオードの2つの電極棒に、1台のデジタル・マルチテスターを直流電圧計(200 mV レンジ)にして、直接接続しなさい。

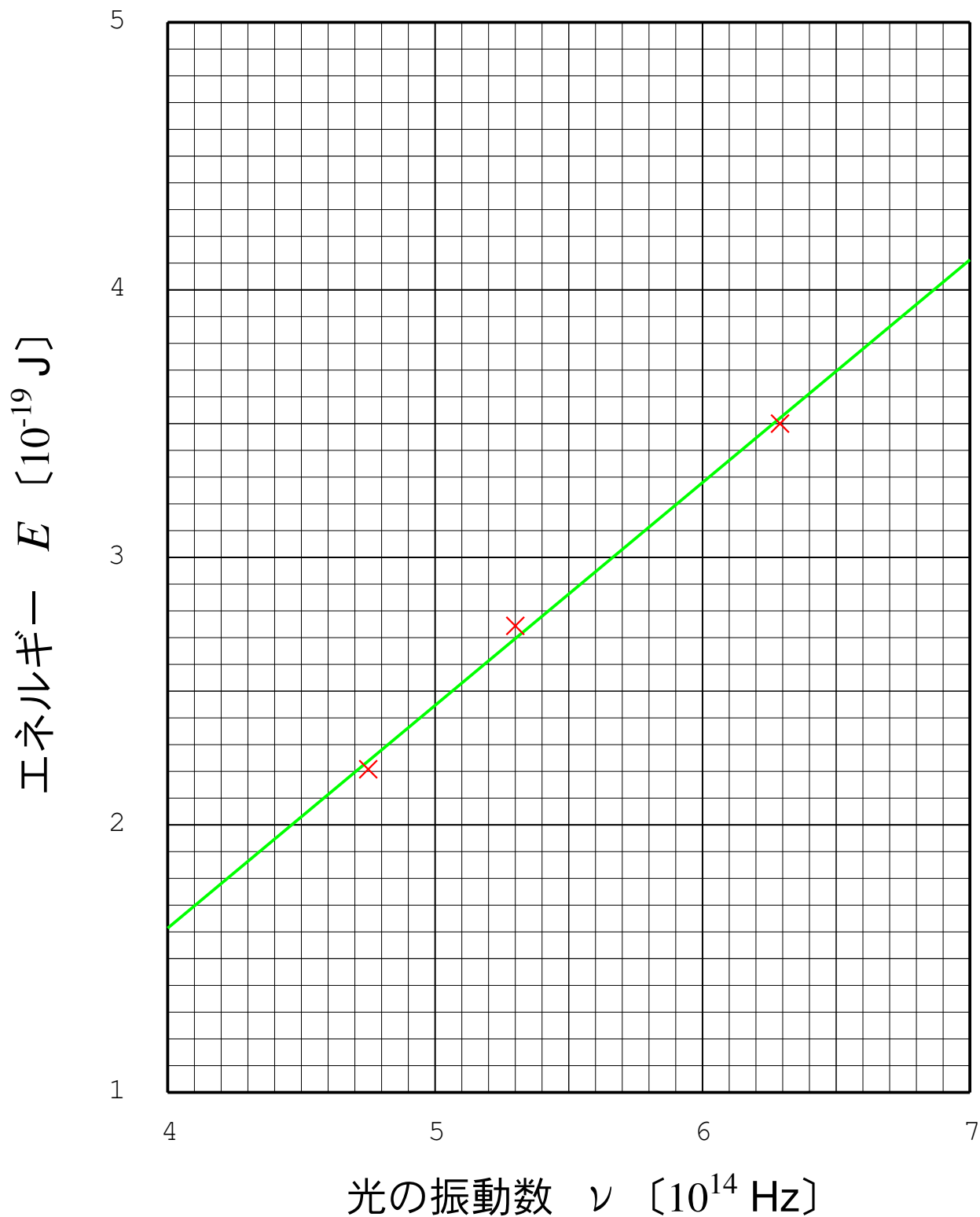
問7 赤色発光ダイオードに室内照明光が当たると、ダイオードの端子間に電圧(起電力)が発生することを確認し、その値を解答用紙に記入しなさい。手でダイオードに当たる光をさえぎると、起電力が低下することも確認しなさい。このように、発光ダイオードに光が当たると起電力が発生する理由を考察して書きなさい。

問8 問7と同様のことを、緑色ダイオードと青色ダイオードについても行い、生じる起電力の大きさを赤色ダイオードと比較しなさい。なぜ、起電力の大きさが異なるのか、その理由を考察して書きなさい。

チャレンジ番号	123	氏名	一石 量子
---------	-----	----	-------

実験問題 2-1 問 3

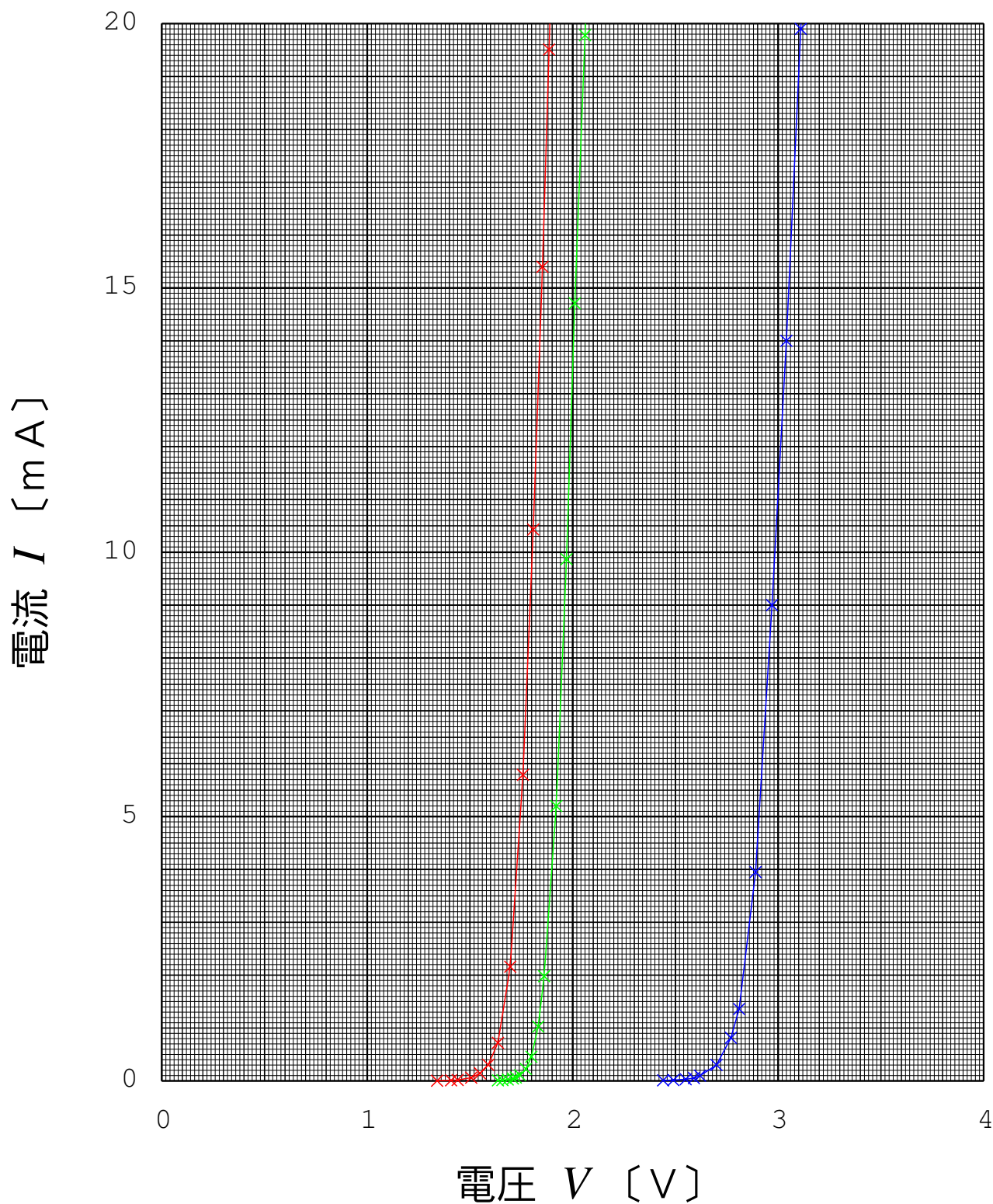
光の振動数とエネルギーのグラフ



チャレンジ番号	123	氏名	一石 量子
---------	-----	----	-------

実験問題 2-1 問 4 グラフ用紙 (方眼紙)

発光ダイオードの電流・電圧特性曲線

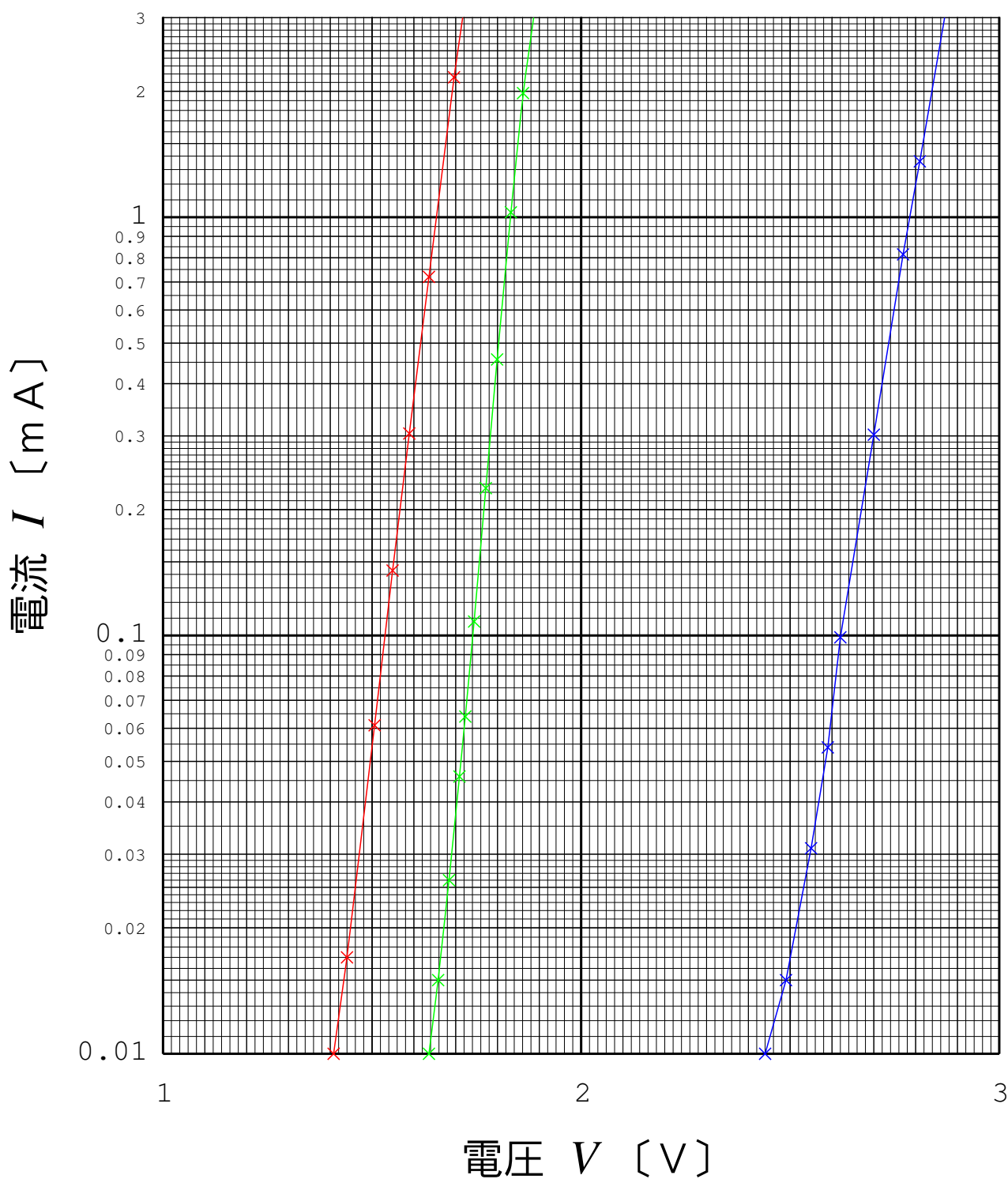


チャレンジ番号 123

氏名 一石 量子

実験問題 2-1 問 4 片対数グラフ用紙

発光ダイオードの電流・電圧特性曲線

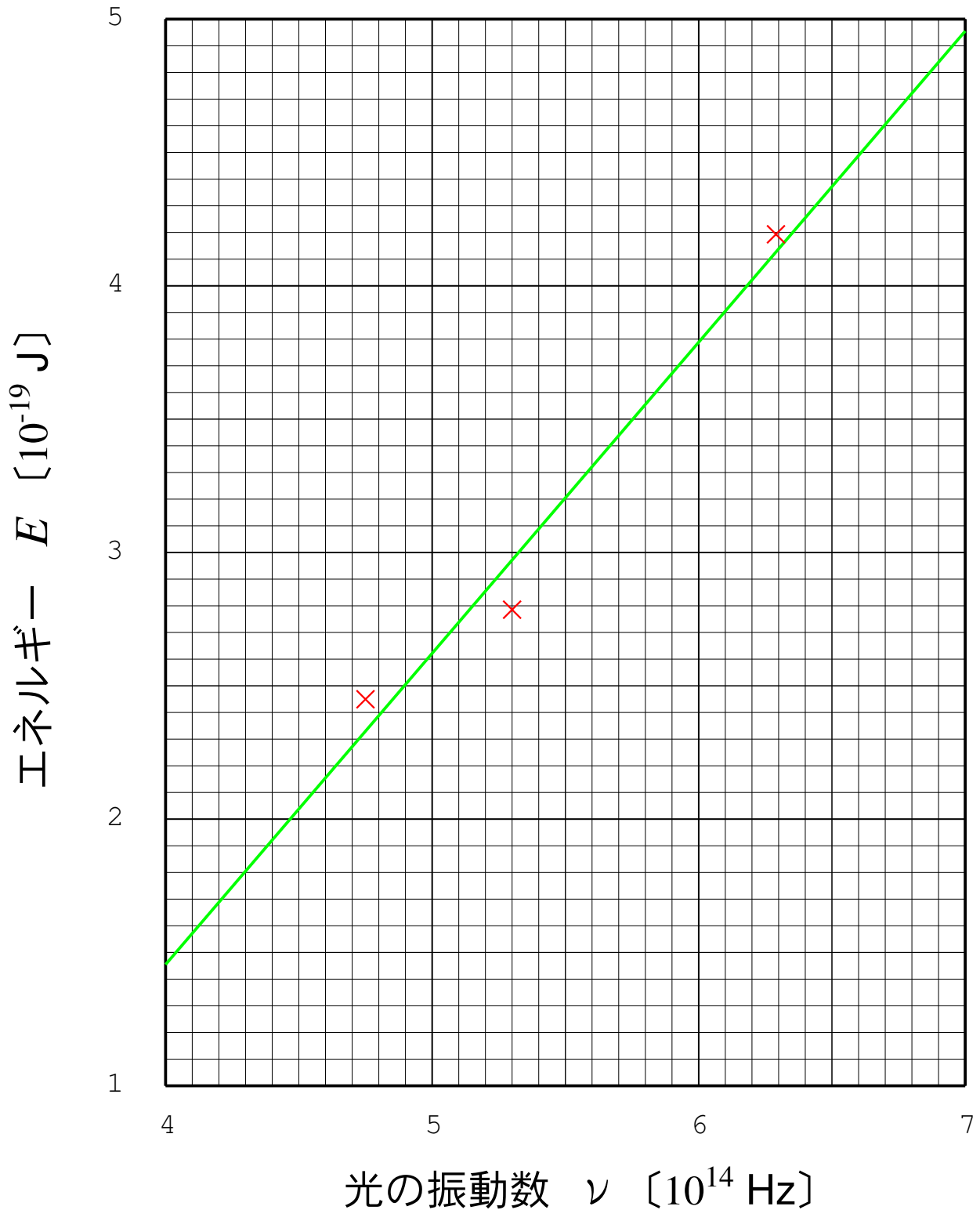


チャレンジ番号 123

氏名 一石 量子

実験問題 2-1 問 5

光の振動数とエネルギーのグラフ

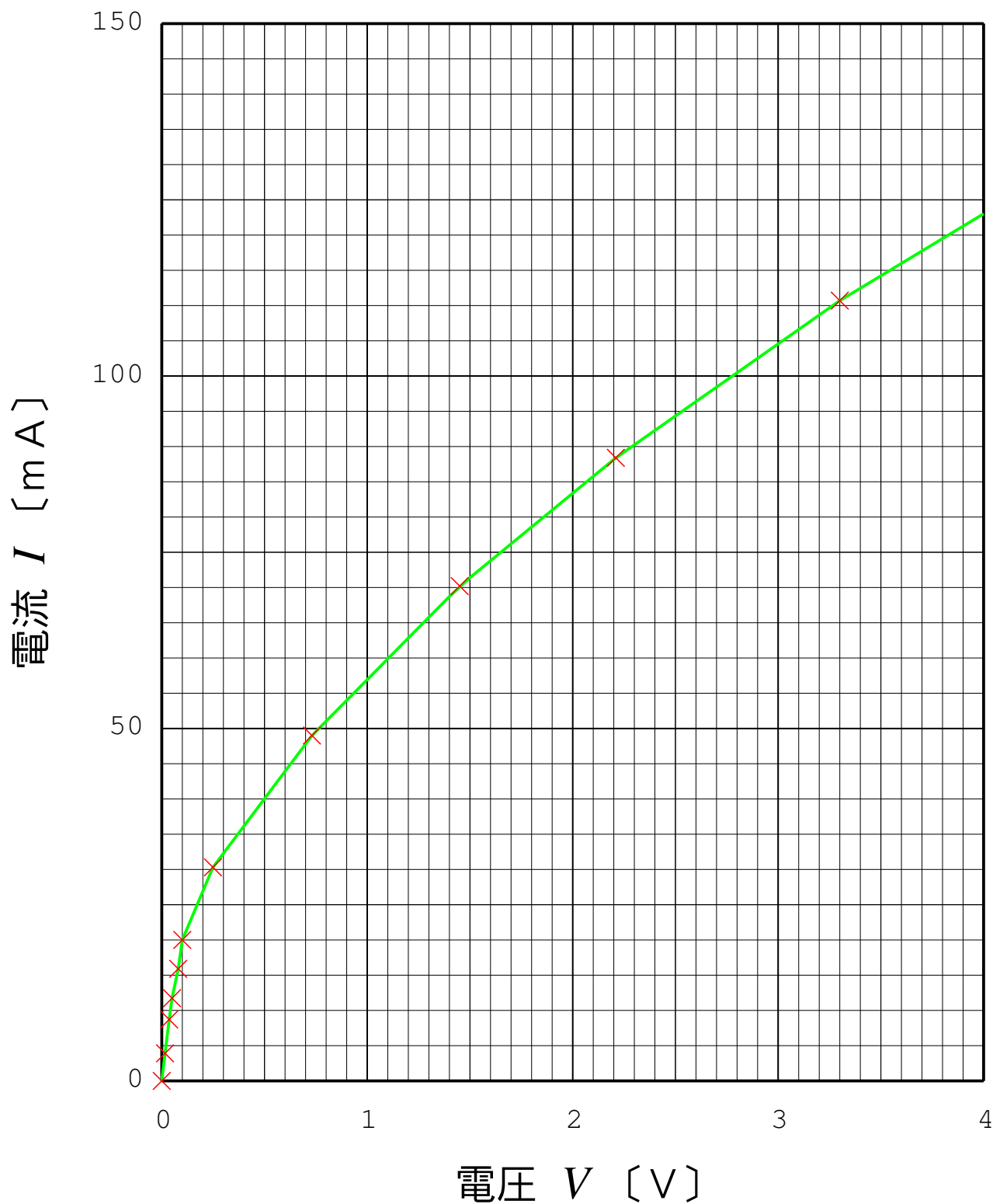


チャレンジ番号 123

氏名 一石 量子

実験問題 2-1 問 6

豆電球の電流・電圧特性曲線



物理チャレンジ 2006

第2チャレンジ 実験問題

2006年8月1日(火)

諸注意・実験器具確認 8:20～ 8:30

実験問題にチャレンジ 8:30～13:20

実験器具後片づけ 13:20～13:30

<注意事項>

1. 実験器具の確認や注意事項の伝達，チャレンジの開始と終了などについては，チャレンジの監督者の指示に従うこと。
2. 実験問題は実験問題1，実験問題2，実験問題3の3つある。どの問題からチャレンジしても良いが，時間の配分をよく考えてチャレンジすること。
3. 解答用紙およびグラフ用紙のすべてのページ，それに封筒に，チャレンジ番号と氏名を必ず記入すること。
4. 机上有る白紙をデータ記入用紙として使用すること。
5. 持参した筆記用具と，与えられた実験装置，電卓以外は使用してはならない。
6. 実験中に，測定装置に不具合が生じた場合や実験の部品を紛失した場合は，監督者に申し出ること。
7. チャレンジ開始から12:00まではチャレンジを終了することはできない。
8. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき，質問があるとき，チャレンジを終了するときは，手をあげて監督者に知らせること。
9. 終了の合図があった場合は，提出する解答用紙とグラフ用紙にチャレンジ番号と氏名が記入されていることを確認の上，これらをまとめて封筒の中に入れ，机上に置くこと。
10. チャレンジ終了後，実験装置をもと通りに机上にまとめること。問題冊子とデータ記入用紙は持ち帰ること。また，机に貼られたチャレンジ番号と名前が書かれた紙をはがすこと。

《実験問題で使用する物品》

実験問題のために各自に配布されているのは以下の物品である。

物品が不足している場合はチャレンジの監督者に申し出ること。

【実験問題1で使用する物品】

- ・ ビースピ[®]（+単4電池2本） 1（使い方は別に記す。2台使用してもよい。）
- ・ バネばかり(1N用) 1

実験で使用するバネばかりは1N(ニュートン)用のはかりであり、最小目盛りは0.01Nである。

質量1kgのおもりに働く重力は9.8Nであるから、質量10gのおもりをこのバネばかりに吊り下げると、目盛りは0.098Nを示すはずである。

はかりの零点調節は、目盛りが書いてある金属板を上下にスライドさせることによっておこなう。

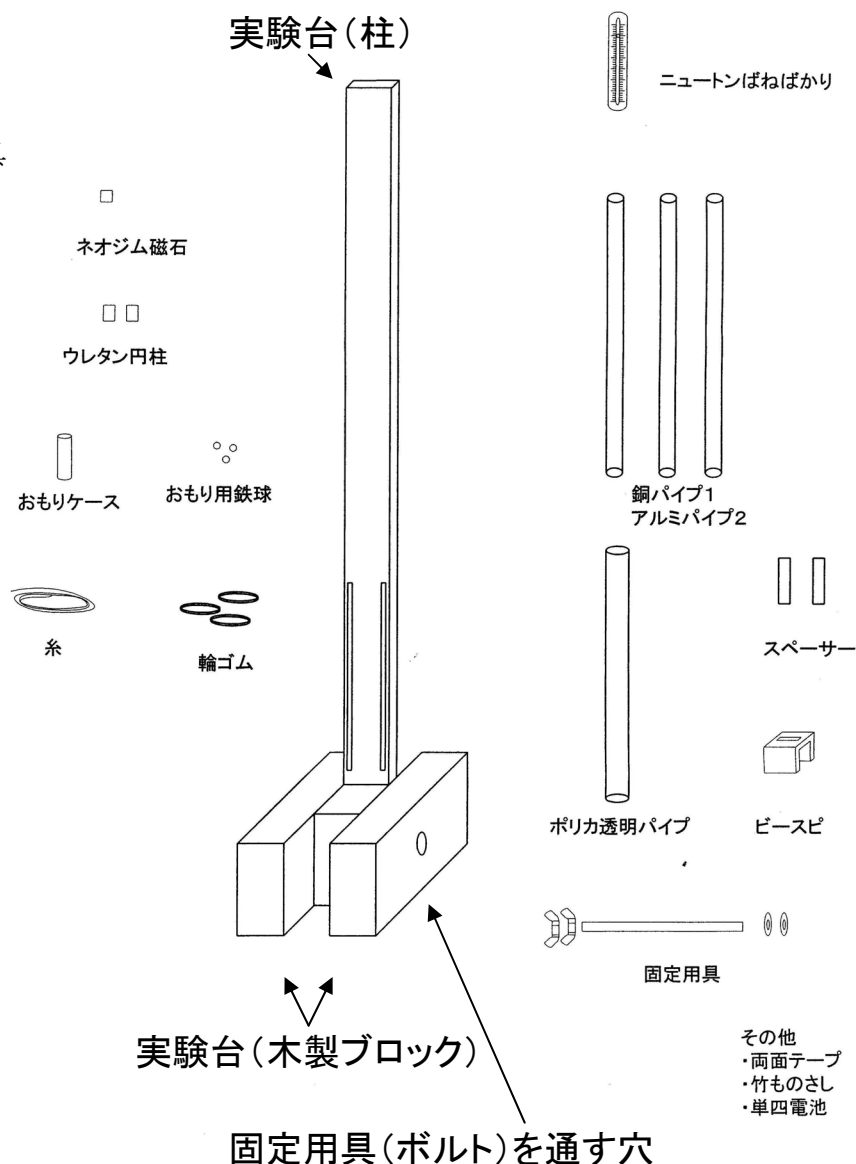
- ・ 実験台(柱) 1
- ・ 実験台(木製ブロック) 2
- ・ ボルト 1
- ・ 蝶ねじ 2
- ・ ワッシャー 2

固定用具

- ・ スペーサー(透明な板) 2
- ・ 輪ゴム 大3 小1
- ・ ネオジウム円柱形磁石
(直径8mm;高さ1cm) 1
- ・ 金属パイプ(長さ50cm)
アルミ製(肉厚0.5mm) 1
アルミ製(肉厚1.0mm) 1
銅製(肉厚0.5mm) 1

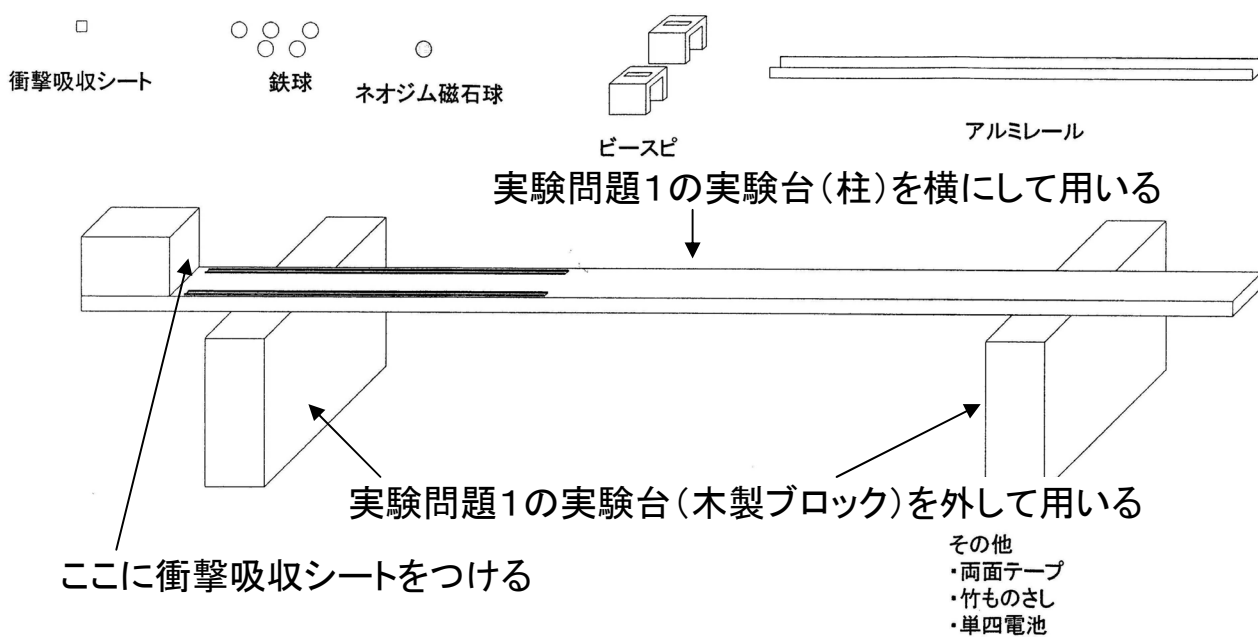
- ・ 赤いプラスチックの円筒
(おもりケース) 1
- ・ ウレタン製の円柱
(直径9mm;高さ1cm) 2
- ・ 鉄球(大:質量約4g) 2
- ・ 鉄球(小:質量約2g) 1
- ・ 透明なパイプ 1
- ・ セロハンテープ 1
- ・ 両面テープ 1
- ・ 木綿糸 1巻き
- ・ はさみ 1
- ・ ゼムクリップ 1
- ・ ものさし 1
- ・ 電卓 1

- ・ 厚紙 1枚:(実験台の傾きを調節するために、必要に応じて切り取って重ね、木製ブロックの下に敷く。)



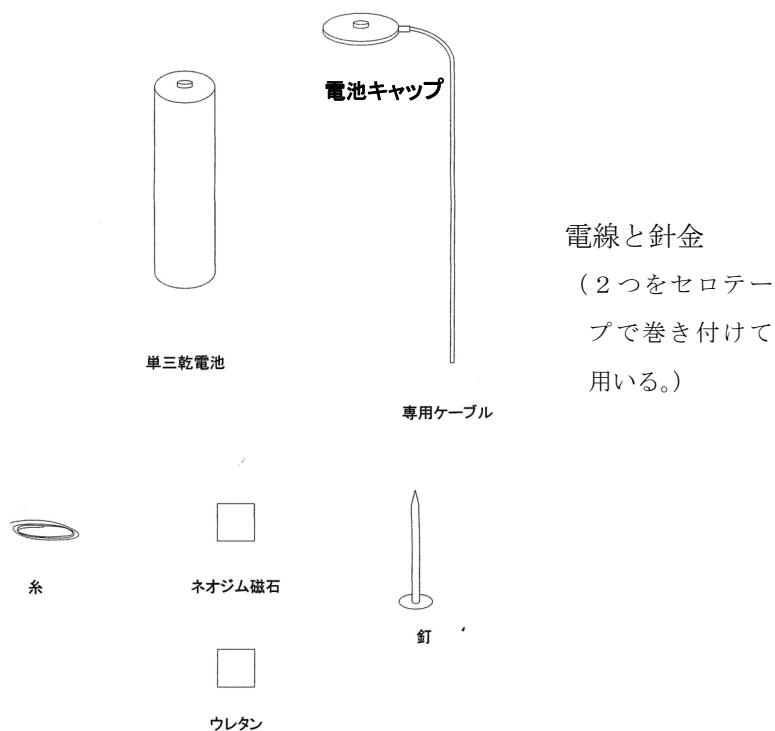
【実験問題2で使用する物品】

- ・ アルミ製のレール 1
- ・ 電卓 1
- ・ ものさし 1:実験問題1と共通
- ・ 実験台(柱) 1:実験問題1と共通
- ・ 両面テープ 1:実験問題1と共通
- ・ 実験台(木製ブロック):実験問題1と共通 2
- ・ バネばかり(1kg用) 1
- ・ ビースピ 2 :実験問題1と共通
- ・ ポリエチレンテープ
- ・ ネオジボール(=ネオジウム磁石球)(直径 10mm) 1
- ・ はさみ 1:実験問題1と共通
- ・ 鉄球(大:直径約 10mm) 5 :一部実験問題1と共通
- ・ 厚紙(厚手のもの)
- ・ 衝撃吸収シート(1cm四方) 2 :レールの延長上のストッパーとなる木片の壁に貼り付けて用いる。
- ・ 厚紙:実験問題1と共通(レールの水平を保つために、必要に応じて、支え足の下に敷いて用いる。)



【実験問題3で使用する物品】

- ・ ネオジウム磁石(円柱状)
1:実験問題1と共通
 - ・ 単三電池 1(予備1)
 - ・ 電池キャップ(配線コード付き) 1
 - ・ 釘 1
 - ・ 糸 1巻き:実験問題1と共通
 - ・ ウレタンの円柱 1:実験問題1と共通
- ※ 糸を外して使うこと



※ 実験問題1と2で使用した実験台
を実験問題3の最後に、自作スタンド
として用いる。

《実験問題で使用する装置の説明》

- ・ ビースピ：簡易速度測定装置



ビースピは光センサーを使って、装置の中を通過する物体の速さを測定する装置である。裏側から単四電池を2本入れて使用する。電池を入れるカバーが外れにくいので、すこしスライドさせて隙間を作り、はさみの先を差し込んではずすと良い。電池を正しく入れると時刻表示になる。(下図①)

本体上面にある表示窓は、測定に使用しない状態では時刻を示しているが、表示窓の下のボタンを長押し（1.5秒程度）すると、速さを測定できるモードに切り替えることができる。この時、図②に示すとおり、画面に0が並び、画面右下の小さな文字（km/h）が点滅する。（下の黒丸の中）

注意：ボタンを長押しするときに、装置の内側に指などを入れて光センサー部をかくさないこと。



① 時刻モードの時の表示

② 測定モードの初期表示

③ 測定結果の例

②の状態では、内部の2カ所のセンサー部分を物体が通過すると、センサー部分を通るときの平均の速さを測ることができる（上図③）。ただし、センサー部分は直径が小さいため、ビースピの中を通過しても、センサー部分を横切らない場合は測定ができない。指などを通過させて、速さを測定してみよ。測定がうまくいって、測定を繰り返す場合は、ボタンを短く押すと③の画面が②の状態に切り替わる。

時刻表示から速さ測定モード：長めに押す（1.5秒程度）

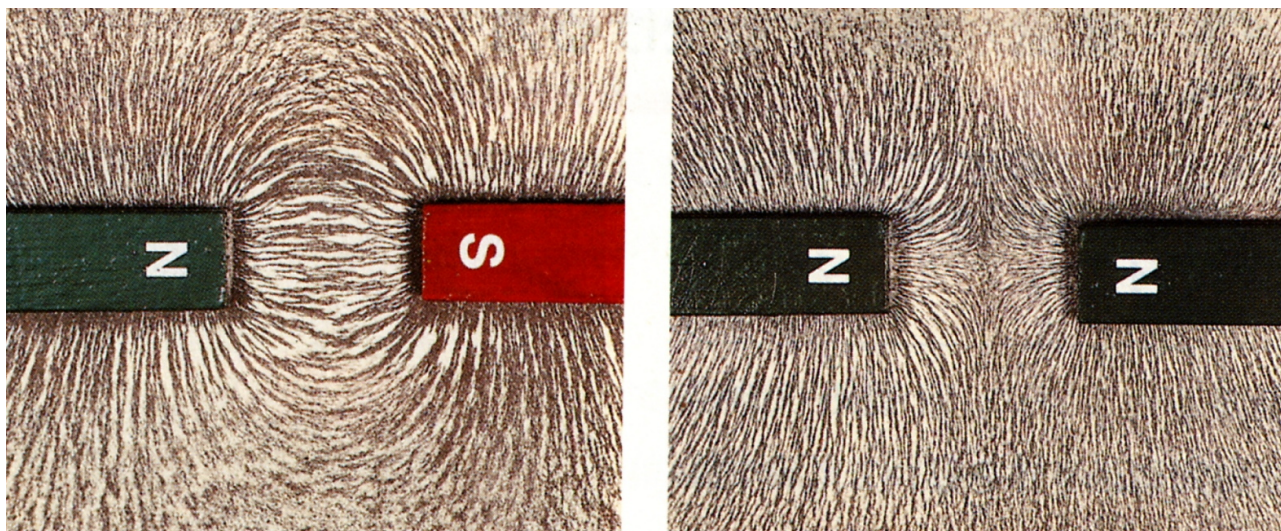
測定モードの測定を繰り返す：短く押す

測定モードのまま長く放置しておくと時刻表示に戻ってしまう。その場合はボタンを長く押して、速さの測定モードに直せばよい。ビースピには積算時間を測るモードなどもあるが、今回の実験では使用しない。その他、使用中に表示がおかしくなった場合は、電池を外してしばらくおいた後に、再び電池を入れると時刻表示モードとなる。（詳しくは、箱の中に添付されている説明書を参考にする。）

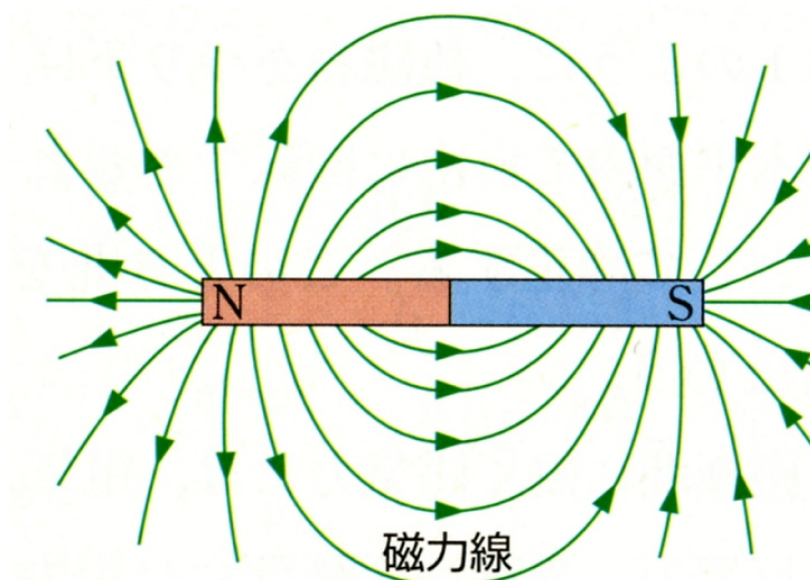
実験問題

《はじめに》

磁石のまわりには、鉄などの一部の物質を引きつけるような、力が働く空間がある。このような空間を磁場（磁界と呼ぶ場合もある）と呼んでいる。磁場は空間そのものの性質であり、直接目で見ることができないが、磁石のまわりに砂鉄をまくことによって、その様子を見ることができる。



このような砂鉄が描く模様になぞらえて、物理学では、磁場の様子を磁力線や磁束線と呼ばれる曲線で表すことにしている。



物理チャレンジ 2006 の実験問題のテーマは、このような磁場と磁石に関する現象の解明である。良い実験を行って、良い測定結果を出し、良い考察によって、良い解答が書かれることを期待する。（このページの図は 実教出版 物理Ⅱの教科書に掲載されている図を引用させていただいたものである。）

実験問題1

予備実験:

与えられた3本の金属パイプ（どれも長さ 50cm）の中から、アルミ製のパイプ（灰色で肉厚の薄い方でよい。）を取りだして垂直に立て、中に円柱形のネオジウム磁石を入れて落下させ、磁石の落下のようすを観察しなさい。

次に、磁石をパイプの中に入れてから、外に出るまでのおよその時間を測りなさい。ストップウォッチなどは用意していないので、各自の時計等でおよその秒数を求めればよい。

続いて、銅パイプ（赤褐色）で同じ実験を行ない、磁石がパイプを通過するおよその時間を求めなさい。それぞれの場合のおよその時間を解答用紙に書きなさい。

次に、アルミ製のパイプと銅製のパイプの外側から、これらの金属が磁石に引きつけられるかどうかを試しなさい。静止している磁石は、アルミや銅の金属を引きつける働きを示さないのに、動いていると力が働くのはなぜだろうか。

実験の目的:

銅やアルミなどの磁石の性質を持たない金属のすぐ近くを磁石が運動すると、磁石に対して運動を妨げる力が働くために、磁石の運動が遅くなる。金属パイプと円柱形のネオジウム磁石を使って、磁石に働く力と磁石の運動の速さの関係を調べ、この力の物理的な意味を解明する。

実験の背景：（電磁誘導の式）

予備実験で試みたように、金属のすぐ近くで磁石が動くと、磁石に力が働くのは、電磁誘導によって金属の中に電流が流れるからであると考えられる。このような電磁誘導の実験は、学校の実験ではコイルと検流計（敏感な電流計）でおこなうことが多いが、磁石の動きによって電流が流れる仕組みは、金属パイプの場合も同じであると考えられる。

コイルの場合で考えると、コイルの断面を通過する磁石の磁力線（磁石のまわりの磁場の強さを表す力線）の本数（磁束 Φ （ファイ）で表す）が、ある一定時間（ t で表す）の中で変化すると、その変化によってコイルに起電力（ V で表す）が生じると考えられる。このような変化を Δ という記号で表すと、コイルに生じる起電力は

$$V = -\Delta\Phi/\Delta t$$

と書くことができる。

この式のマイナスの符号は、電磁誘導によってコイルに生じる起電力が、コイルに生じる磁束の変化を妨げる向きに働くことを表している。

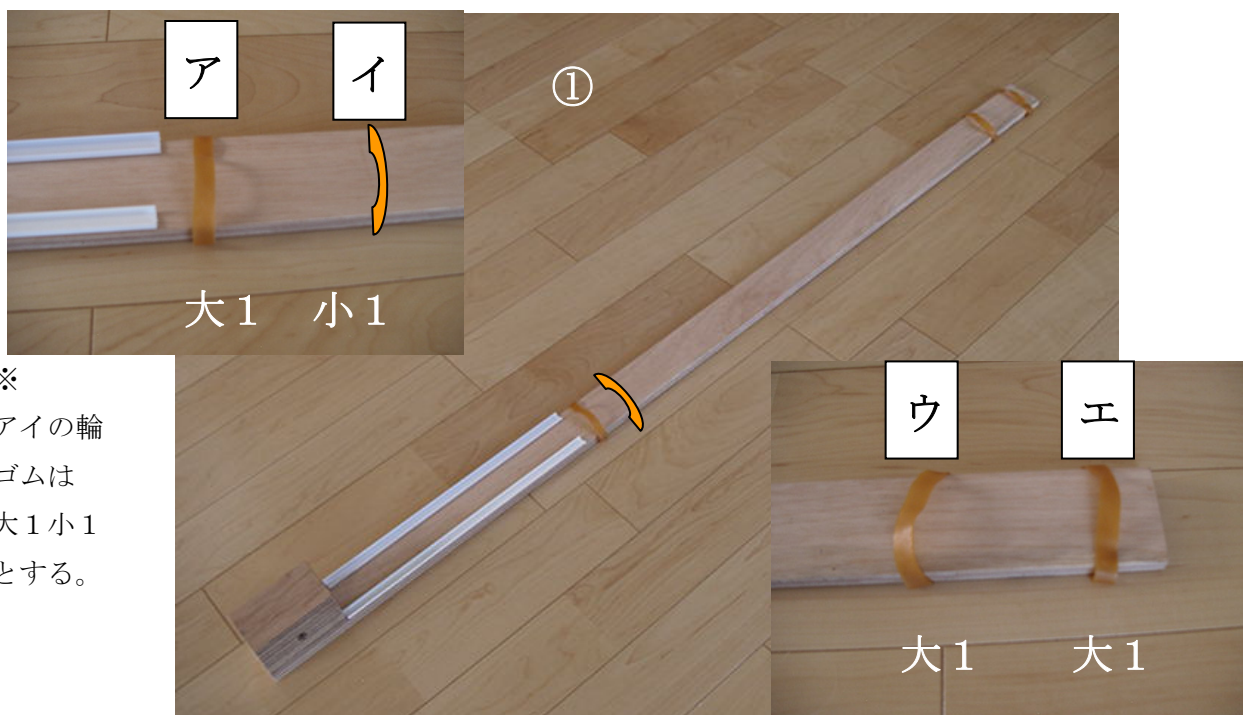
また、この電磁誘導は、磁石が静止していてコイルが動く場合にも、コイルの断面を貫く磁束が変化をするので、上記の式が同様に成り立つ現象である。

実験の準備：

1 実験装置の組み立て

実験装置の各部品を，測定をおこなうために以下の順序で組み立てる。

- ① 実験台（長さ約 140cm の合板）に，輪ゴムを 4 つ（大 3 小 1）通して，図の位置に取り付ける。



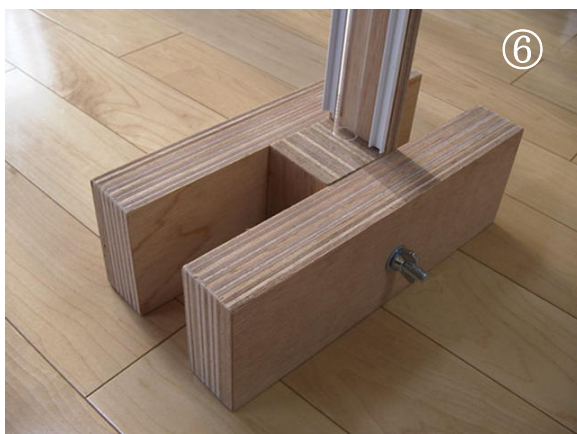
- ② 透明なパイプに両面テープでスペーサー（透明な厚いプラスチックの板）を貼り付ける。
③ バネばかりの裏側に両面テープでスペーサー（透明な厚いプラスチックの板）を貼り付ける。



- ④ ①で付けた輪ゴムのうち，ア・イの輪ゴムで②の透明なパイプを図のようにスペーサーの位置で実験台に固定する。この透明パイプはおもりケースが落下するときのガイドとなる。台から 2 cm 間隔をあけておく。

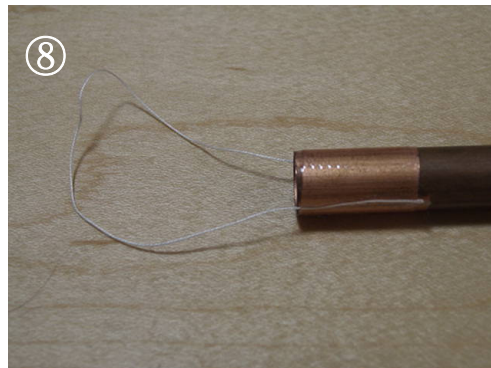


- ⑤ ①で付けた輪ゴムのうち、ウとエの輪ゴムでバネばかりを図の位置で実験台に固定する。このとき、バネばかりの針を指で傷つけないように注意する。
- ⑥ 実験台を垂直に立て、支えとする2つの木製ブロックで両側から挟み、穴にボルトを通して、両側からワッシャーを入れ、蝶ねじで締めて軽く固定する。



- ⑦ 1N用バネばかりの目盛りがついた金属板は、上下にずらすことができる。目盛りがちょうど0(ゼロ)を示すように、金属板をずらして調節する。

- ⑧ 糸を約12cm程度の長さに切り取り、銅パイプ(赤褐色)の一端に、右図のようにセロハンテープで貼り付ける。



- ⑨ ⑧の糸を付けた金属パイプをバネばかりに吊り下げる。このとき、金属パイプが正面から見たときに測定台のほぼ中心にあり、真横から見たときに、測定台とほぼ並行になるように調整する。

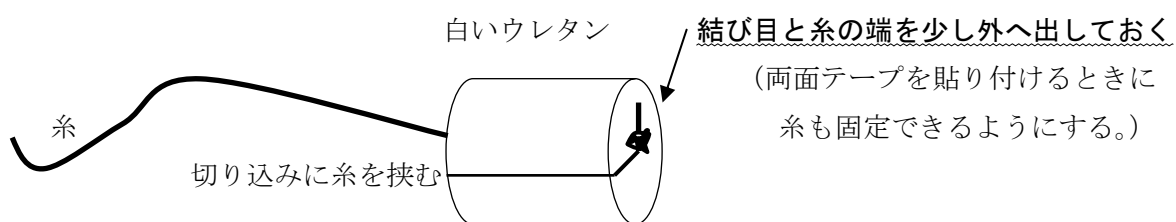
この傾きの調整は、ボルトのまわりの測定台の回転と、木製ブロックの下に厚紙を切って重ねることでおこなう。

この⑨の調整は磁石をスムーズに落下させるためのものである。

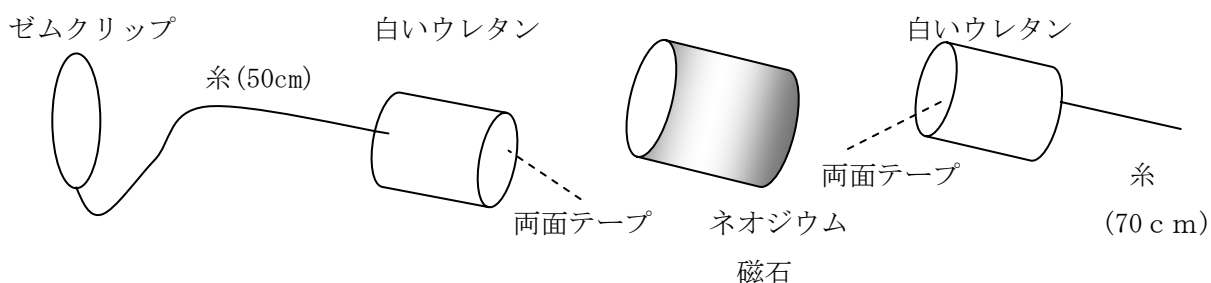
調節ができれば、蝶ねじをしっかりと締めて固定する。



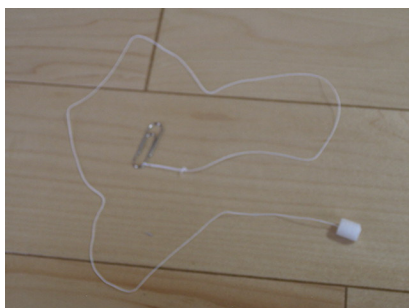
- ⑩ 実験用の小物が入ったビニール袋から、白いウレタンの円柱を2個取り出す。次に、糸を長さ約50cm と約70cm の2本切り取り、一方の端に結び目を作り、下図のようにウレタンの切り込みに糸を挟み込む。2個とも同様に糸を挟むこととする。



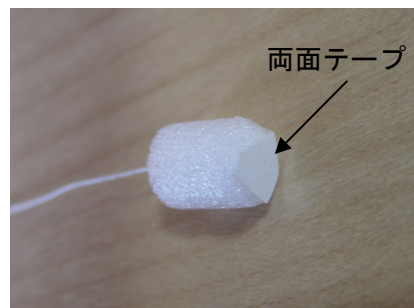
ウレタンの糸の結び目が出ている面に両面テープを丸く切り取って貼り付ける。このとき、両面テープが磁石の底面からはみ出さないように注意すること。はみ出ていたら、はさみで切り取ればよい。次に、両面テープの上面のシールを剥がしてウレタンを円柱状のネオジウム磁石に貼り付ける。



糸をクリップに結びつける



クリップ+糸+ウレタン



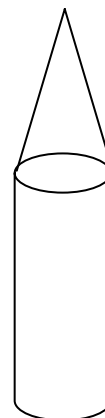
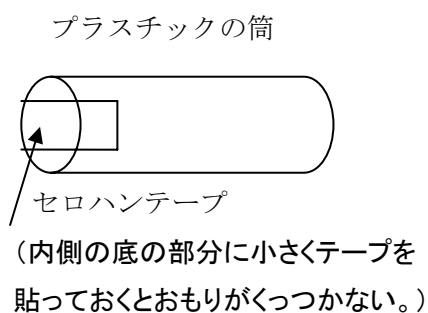
ウレタンの裏に両面テープ



↑ウレタンと糸のみ

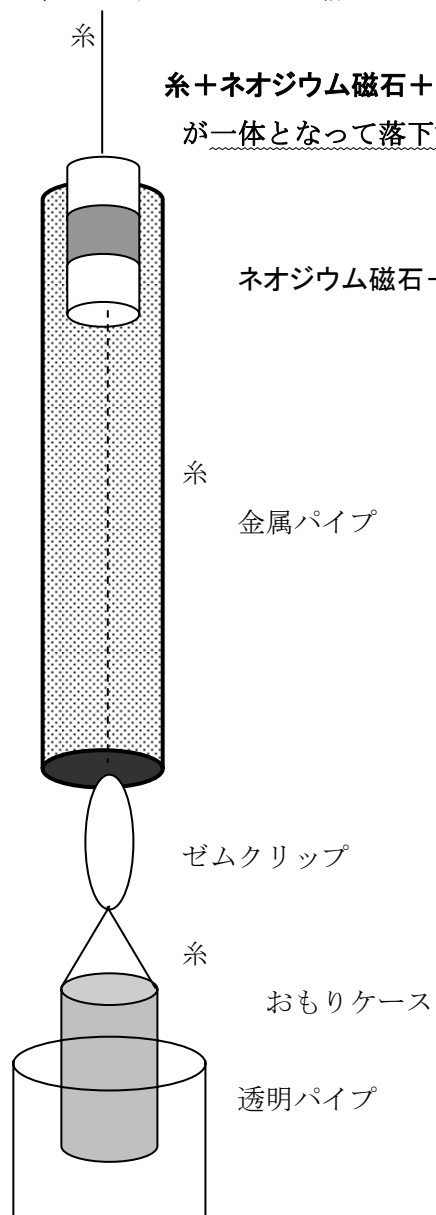
磁石とウレタンができるだけ一直線になるようにする。また、両面テープが側面にはみ出していないか、に注意する。

- ⑪ 赤いプラスチック製の円筒に図のようにセロハンテープで底を作る。底ができれば、筒の上部に金属パイプの時と同様に、吊り下げるための糸を取り付ける。



- ⑫ ⑩で作った磁石とウレタン糸(+ゼムクリップ)の部品を、ゼムクリップを取り付けた方を下にして、銅パイプの中に入れ、図のような位置で上の糸を板の上部に貼り付けた両面テープで固定する。スムーズに入らない場合は、⑩のステップをやり直せ。

ゼムクリップがパイプの下端から出たところに、おもりを入れるための筒を糸で吊り下げる。この筒は透明パイプの中に入るようにする。筒の中に磁石を落下させるときには糸を止めた両面テープから糸をはずし、糸を指で支えてから静かに糸を放すこととする。



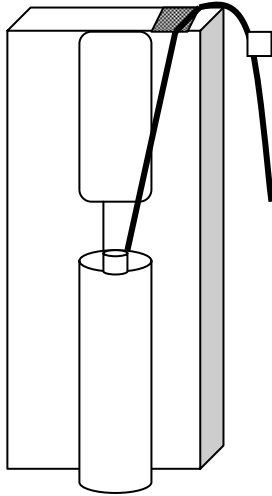
実験台の上部に
両面テープで糸を止める



この位置で糸を
放して磁石を落
下させる！！

- ⑬ 上の糸のウレタンから長さ 55cm ほどの場所の所を，図のように長さ 3 cm ほどのセロハンテープを真ん中から折りたたんで挟む。このようにセロハンテープを付けておくと，磁石が金属パイプの中を通過して金属パイプの外に出ても，上の糸は金属パイプから出てしまうことはない。

両面テープ(糸を貼り付け止めておくときに用いる)



セロハンテープで糸を挟む

(糸が金属パイプから抜けてしまわないようにする。)

磁石を落下させるときは，セロハンテープの所を持って上に持ち上げ，両面テープから糸をはがして，糸・・・磁石・・・おもりケースが鉛直にまっすぐ並ぶようにしてから，静かに放す！！

- ⑭ 磁石を支えている糸を放して磁石を落下させてみる。※

このとき，バネばかりの目盛りが，少し変化することを確かめること。

磁石が落下しているとき，バネばかりは，銅パイプが受ける力（落下中に磁石が受ける力の反作用の力）を示している。したがって，このときのバネばかりの目盛りの増加分を測定することによって，磁石が受けている力を測定することができる。

磁石がパイプから出ると，バネばかりの目盛りがどのように変化するかも確かめること。

※ 磁石やおもりケースがなめらかに落下しない場合は，金属パイプや透明パイプ，磁石などの位置を調節しなさい。磁石に取り付けたウレタンがパイプに引っかかっている場合も考えられる。

また，磁石がパイプ中を落下していくときに，バネばかりの目盛りの変化が，どのようになっているかをよく観察しなさい。この観察から，どの場所にビースピを取り付けるとよいかを考えなさい。

- ⑮ 銅パイプの上部の口にかかっている糸（磁石につながっている）を，銅パイプの下端から出ている磁石を下からパイプの中に差し込みながら，ゆっくり引き上げ，磁石を最初の位置に戻し，糸を再び実験台の上面に貼り付けた両面テープにくっつけて，磁石を支える。

- ⑯ ビースピのボタンを長押しして速度測定モードにし，⑨と同じように磁石を支えている糸を，指でつまんで支えて静止させてから放して落下させ，ビースピによって磁石（+おもりケース）が落下する速さが測定できていることを確認する。

注意： 次ページの課題 1—1 等の測定は，バネばかりの値の測定と，ビースピによる速さの測定の 2 つである。ここまでの準備が不十分であると，以後の測定を行うことが困難になる。ここまでの実験のやり方に十分習熟してから次の実験を行うこと。

装置の組み立てとセッティングがうまくいかず，この測定がうまくできない場合は，手をあげて席を離れ，試験会場の後ろに用意されている装置の見本を見に行っても良い。

課題 1-1. 銅製パイプ (肉厚 0.5mm) の中を落下する磁石に働く力と落下の速さの測定

前頁の予備実験で行った操作を精密におこなう。

- ① おもりケースは空のまま、磁石を銅製パイプの中に落下させる。このとき、落下中の磁石に働く力 (N) をバネばかりによって測定せよ。
 - ② このときの磁石の落下の速さを、ビースピによって測定せよ。(測定値は km/h であることに注意する。結果の記録はこの値のままでもよい。)
 - ③ ①②の実験を何度か繰り返し、測定結果 (測定の平均値) を解答用紙に記入せよ。※
速度の測定に大きなばらつきがあるときには、大きく異なる測定結果を除いた残りの測定値で平均を計算するなどの処理をしてかまわない。
- ※ 解答用紙に記入するときに、速さの単位は km/h を m/s に直すこと。
- ④ おもりケースの中に、おもりを小 1 個, 大 1 個, 小・大各 1 個, 大 2 個と入れ, それぞれのおもりの場合に①~③と同様の測定を行い, 測定結果 (測定の平均値) を解答用紙に記入せよ。

おもりとして用いた鉄球の質量は、大きな鉄球が 4.07g, 小さな鉄球が 2.11g である。おもりケースと磁石及び糸の合計の質量は 4.10g とする。(作り方によって若干のちがいが生じると考えられるが、結果の整理はこの値でおこなってよい。)

これらの値を、自分で測定したい場合は、部屋の後ろに用意してある電子天秤を用いて測定すること。また、重力加速度の大きさは 9.8m/s^2 とする。

- ⑤ 以上の測定結果から、磁石の速さ (m/s) と磁石に働く力 (N) のグラフを描け。グラフの横軸 (x 軸) を磁石が銅製パイプの中を通過する速さとし、縦軸 (y 軸) を磁石が受ける力の大きさとする。

課題 1-2. アルミ製パイプ (肉厚 0.5mm) の中を落下する磁石に働く力と落下の速さの測定

- ⑥ 実験課題 1-1 の最後の実験の状態から、金属パイプを取り替える。
おもりケースをクリップからはずし、磁石を持ち上げて銅製パイプから抜き出す。肉厚 0.5mm のアルミ製パイプ (肉厚の薄い方) の一端に吊り下げる糸を取り付け、実験台の銅製パイプに代えて、このアルミ製パイプを吊り下げる。
- ⑦ アルミ製パイプの中にネオジウム磁石を入れ、おもりケースを空として下のクリップに吊り下げ、磁石をアルミ製パイプの中を落下させる。
このとき、落下中に磁石に働く力をバネばかりによって測定せよ。
- ⑧ 磁石の落下の速さをビースピによって測定せよ。
- ⑨ 鉄球のおもり (大・小) を用いて、課題 1-1 と同じ実験を何度か繰り返して測定の精度を高め、測定結果を解答用紙に記入せよ。
- ⑩ 以上の測定結果から、磁石の速さ (m/s) と磁石に働く力 (N) のグラフを描け。グラフの横軸を磁石がアルミ製パイプの中を通過する速さとし、縦軸をこのとき磁石が受ける力の大きさとする。

課題 1-3. アルミ製パイプ(肉厚 1.0mm)の中を落下する磁石に働く力と落下の速さの測定

- ⑪ 肉厚 1.0mm のアルミ製パイプ (肉厚の厚い方) の一端に吊り下げる糸を取り付ける。実験台の肉厚の薄いアルミ製パイプに代えて、肉厚が厚いアルミ製パイプを吊り下げる。
- ⑫ アルミ製パイプの中にネオジウム磁石を入れて糸を支えてから、おもりケースを空として、磁石をアルミ製パイプの中を落下させる。このとき、落下中に磁石に働く力をバネばかりによって測定せよ。
- ⑬ 磁石の落下の速さをビースピによって測定せよ。
- ⑭ 鉄球のおもりを用いて課題 1-1 と同じ実験を何度か繰り返して測定の精度を高め、測定結果を解答用紙に記入せよ。
- ⑮ 以上の測定結果から、磁石の速さ(m/s)と磁石に働く力(N)のグラフを描け。グラフの横軸を磁石がアルミ製パイプの中を通過する速さとし、縦軸をこのとき磁石が受ける力の大きさとする。

課題 1-4.

課題 1-1, 課題 1-2, 課題 1-3 で描いたグラフから、パイプの中を落下している磁石が受ける力 (f) は、磁石の速さ (v) の何乗に比例しているとみなすことができるか。

下記の式の□の中にとどのような数字が入るか、その数字を答えよ。

$$\text{磁石が受ける力} : f = k \cdot v \quad \square$$

(k は比例定数である)

課題 1-5.

- (1) 上記の式の比例定数 k の値を、銅製のパイプの中を磁石が動く場合について、課題 1-1 で書いたグラフを用いて求めよ。求めた値を $k(\text{Cu})$ とする。
- (2) 上記の式の比例定数 k の値を、肉厚が薄いアルミ製のパイプの中を磁石が動く場合について、課題 1-2 で書いたグラフを用いて求めよ。求めた値を $k_1(\text{Al})$ とする。
- (3) 上記の式の比例定数 k の値を、肉厚が厚いアルミ製のパイプの中を磁石が動く場合について、課題 1-3 で書いたグラフを用いて求めよ。求めた値を $k_2(\text{Al})$ とする。

課題 1-6. 実験の考察

$k(\text{Cu})$ と $k_1(\text{Al})$ の比, $k(\text{Cu})/k_1(\text{Al})$ を求めよ。また $k_2(\text{Al})$ と $k_1(\text{Al})$ の比, $k_2(\text{Al})/k_1(\text{Al})$ を求めよ。これらの値は、アルミニウムと銅の、物質としての性質の何の比を表していると考えることができるか。また、これらの実験の結果から金属パイプ中で磁石が受ける力を、どのように説明することができるか、簡潔に述べよ。解答欄が不足する場合は解答用紙の裏に記しても良い。

課題 1-7.

以上の実験問題 1 の測定において、良い測定結果を得るために、どのような理由で、どのような事柄に工夫・留意して実験をおこなったか。各自の実験の工夫について簡潔に述べよ。解答欄が不足する場合は解答用紙の裏に記しても良い。

実験問題2

実験の目的：

図1のように磁石球と鋼球を直線レール上で組み合わせ、鋼球1を磁石球めがけて衝突させると、予想もできないほどの猛スピードで鋼球2が飛び出す。いったいこのエネルギーはどこから来るのだろうか。ガウス加速器と呼ばれるこの衝突実験の仕組みを解明する。

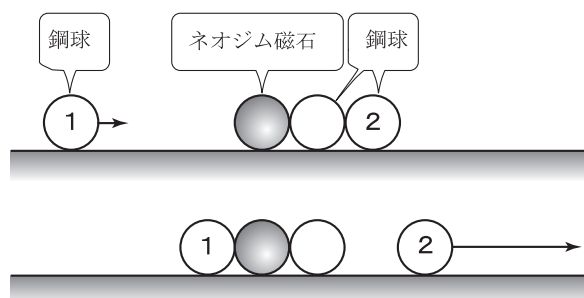


図1

実験問題2で使用する物品：

- | | | |
|---------------------------|-----------------------------|---------|
| (1) ビースピ 2個 | (2) 鋼球（鉄球 大：直径10mm） 5個 | |
| (3) ネオジボール(球形のネオジウム磁石) 1個 | (4) アルミレール（長さ500mm, 幅4.3mm） | |
| (5) 実験台 | (6) セロハンテープ 1個 | |
| (7) 厚紙（画用紙） | (8) 30cm のものさし 1 | |
| (9) 1 kg バネばかり | (10) ポリエチレンテープ 少々 | |
| (11) はさみ | (12) 厚紙（厚手のもの） | (13) 電卓 |

※ (3)ネオジボール, (4)アルミレール, (9), (10), (12)以外は実験問題1と共通である。

実験の背景：

(1) 運動量保存の法則

質量 m [kg] の物体が速度 \vec{v} [m/s] で運動するとき、この物体は速度の向きに運動量 $m\vec{v}$ [kgm/s] を持つ。運動量は向きと大きさを持つベクトルである。

いま、一直線上を速度 \vec{v}_1 , \vec{v}_2 で運動している質量 m_1 の物体1と質量 m_2 の物体2が衝突

し、それぞれの速度が \vec{v}'_1 , \vec{v}'_2 になったとする。

もしこれらの物体がお互いに及ぼしあう力以外の力を受けなければ、衝突前後で物体1, 2の持つ運動量の合計は不変である。

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$$

これを運動量保存の法則という。一直線上であれば、速度 \vec{v} の向きを v の正、負で表すことができる。

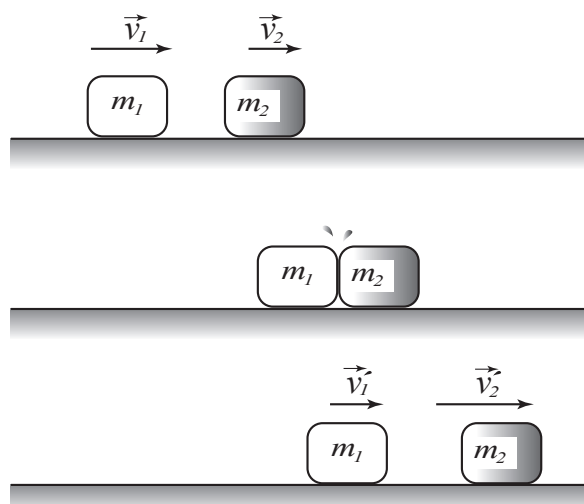


図2

(2) 運動エネルギー

質量 m [kg] の物体が並進速度 \bar{v} [m/s] で運動するとき、この物体の並進運動のエネルギーは

$$K_T = \frac{1}{2}mv^2 \text{ [J]}$$

で表される。 K_T のみを持つ物体は、止まるまでのあいだ、他の物体に対して K_T [J] の仕事を行うことができる。もし、この物体が回転運動を伴う場合には、

$$K_R = \frac{1}{2}I\omega^2 \text{ [J]}$$

の回転運動のエネルギーをあわせ持つ。 ω [rad/s] は回転の角速度である。 I [kgm²] は慣性モーメントと呼ばれる量で、その物体の回転運動のしにくさを表す。

質量 m [kg]、半径 R [m] の球体が、球の中心を通る軸の周りに回転運動する場合には、

$$I = \frac{2}{5}mR^2$$

である。

図3のように、球が平面上を滑らずに回転するとき、

$$v = R\omega$$

の関係がある。

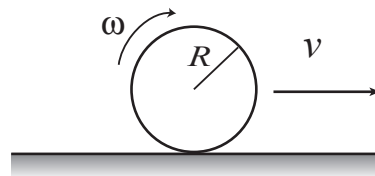


図3

球体がレール上を滑らずに回転する場合、 v と ω の関係はもう少し複雑になる。

図4で、レール幅を Δ [m]、球の中心から左右のレールの先端を結んだ水平面までの距離を r [m] とすれば、これらのあいだには

$$\begin{cases} R^2 = r^2 + \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 \\ v = r\omega \end{cases}$$

の関係がある。

球体がレール上を回転しながら運動するとき、その並進速度を \bar{v} とすると、このときの回転運動のエネルギーは

$$K_R = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2} \times \frac{2}{5}mR^2 \times \left(\frac{v}{r}\right)^2 = \frac{1}{2}mv^2 \times \left[\frac{2}{5}\left(\frac{R}{r}\right)^2\right] = \frac{1}{2}mv^2 \times \frac{2}{5} \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta}{2R}\right)^2}$$

と表せる。したがって、球体がレール上を速度 \bar{v} で並進運動しているとき、球体の持つ並進運動と回転運動のエネルギーの合計は

$$K_T + K_R = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}mv^2 \left[1 + \frac{2}{5} \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta}{2R}\right)^2} \right]$$

と表すことができる。

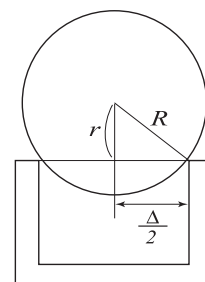


図4

(3) 磁力による位置エネルギー

磁石球 A が原点に固定されているとき、そこから x の位置にある鋼球 B を磁力に逆らって無限遠方まで引き離すのに必要な仕事を $W(x)$ とする。磁石球 A—鋼球 B 間の距離が無大のときの、磁力による位置エネルギーを 0 とすると、点 x における磁力による位置エネルギー $U(x)$ は

$$U(x) = -W(x)$$

と表すことができる。磁石球 A—鋼球 B 間に他の鋼球 C がはさまれているときは、両球間が真空であるときに比べて働く磁力は大きくなるが、同様に x の位置にある鋼球 B を磁力に逆らって無限遠方まで引き離すのに必要な仕事を $W'(x)$ とすると、この場合の点 x における磁力による位置エネルギーは

$$U(x) = -W'(x)$$

と表すことができる。

もちろん作用反作用の法則により、磁石球 A (+鋼球 C) の受ける力と鋼球 B の受ける力は大きさが等しく向きは反対である。

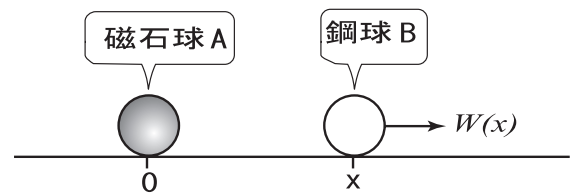


図5

(4) 鋼球の衝突

ニュートンボール、あるいはカチカチボールと呼ばれるおもちゃがある。左端の鋼球が図6①のようにして衝突すると、弾性パルス波が生じそれが②、③と伝わって、右端のボールをはじく(④)。第一近似として左端の鋼球の衝突直前の運動エネルギーがすべて右端の鋼球の衝突直後の運動エネルギーになると考えることができる。

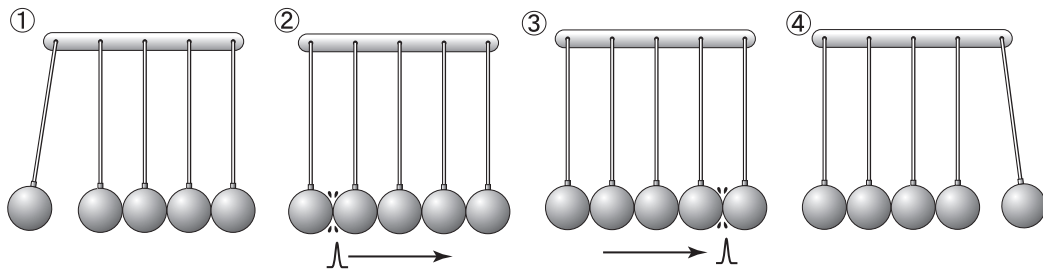
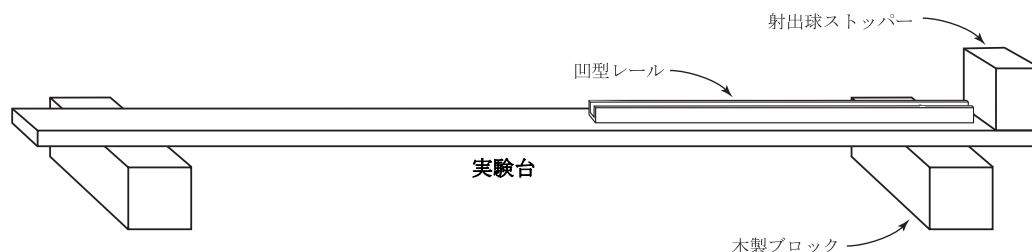


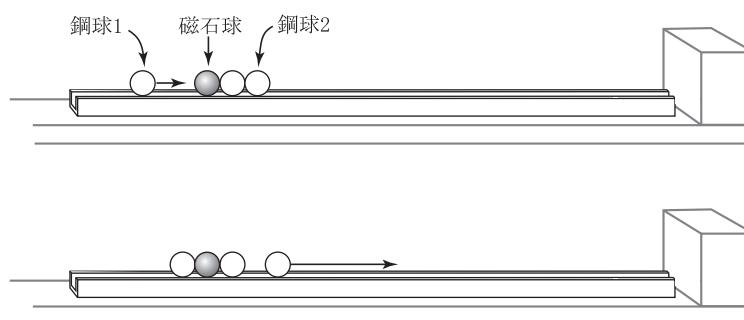
図6 衝突するとパルス波が伝播してエネルギーを伝える。

実験の準備：

- 1 実験問題1で実験台の台座に用いた木製ブロックを机の左右に配置し、その上に実験台（柱）を置く。その際、実験台はビースピをセットするプラスチックレールが固定されている面を上にし、これらの間に、凹型のアルミレールを置く。次に、衝撃球ストッパーのアルミレールの延長上の壁に、衝撃吸収シートを1枚、両面の保護フィルムをはがしてストッパーの壁に貼り付ける。このシートがストッパーに当たる鉄球が飛び跳ねることを防いでくれる。もう一枚は予備である。

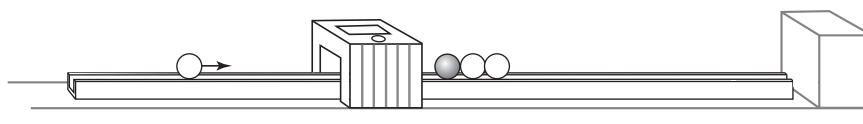


- 2 凹型のアルミレールが水平になるように、木製ブロックと実験台の間に厚紙を挟んで調節する。レール上に鋼球を置いたとき、どちらにも転がらなければ、水平がとれていると判断する。
- 3 凹型のアルミレール上に鋼球2個と磁石球1個を図のように配置し、磁石球側から鋼球（これを鋼球1とする）をゆっくりとした速さで衝突させる。すると反対側の鋼球（これを鋼球2とする）が猛スピードで飛び出すことを確認する。

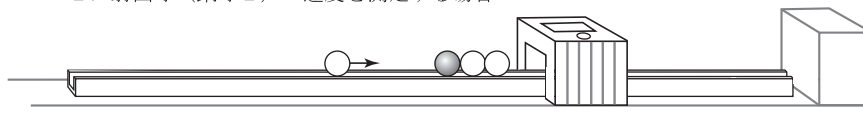


- 4 入射球（鋼球1）や射出球（鋼球2）の速度を求める際、ビースピを図のように配置して測定する。実際にうまく測定できるかどうか確認する。

1. 入射球（鋼球1）の速度を測定する場合



2. 射出球（鋼球2）の速度を測定する場合



課題2-1. 鋼球3個による衝突実験

図1-1のようにレール上に鋼球を2個並べ、そこに入射球1を衝突させると射出球2が飛び出す。入射球1が直接衝突する鋼球は動かさないようにセロハンテープでレールに固定する。球1の入射速度 v_1 と球2の射出速度 v_2 をビースピ2個を用いて測定し、 v_1 と v_2 の関係を調べる。

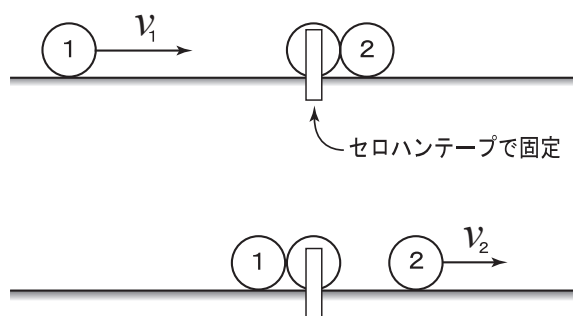


図1-1

入射球1の速度を測定するときは、できるだけ衝突直前の速度を知りたいので、ビースピを十分に鋼球2個側に近づけて測定する。(図1-2)

また、射出球2の速度を測定するときは、できるだけ衝突直後の速度を知りたいので、ビースピを十分に射出側から鋼球に近づけて測定する。(図1-2)

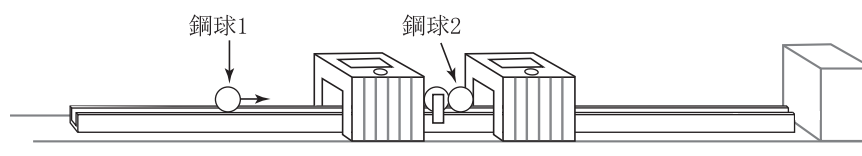


図1-2

なお、鋼球の半径は $R = 4.95\text{mm}$ 、凹型レールの幅は $\Delta = 4.05\text{mm}$ とする。

- ① 入射球1を鉛筆などではじき、異なる速度で衝突させ、 v_1 と v_2 のセットを何通りか求めよ。等しい v_1 に対して異なる v_2 が得られたときは、より大きな値の v_2 を持つセットを採用せよ。より大きな v_1 に対し、より小さな v_2 が得られたときは、そのセットを破棄せよ。測定した中から、適切なセットを3つ記録せよ。 v_1 の値は、 $1.0 \sim 2.0\text{km/h}$ の範囲にあるものとする。
- ② 入射球1をガウス加速器を利用して高速で鋼球2個に衝突させ、①と同じ方法で測定し、適切な v_1 と v_2 のセットを3つ記録せよ。 v_1 の最小値は 6.0km/h 程度とする。

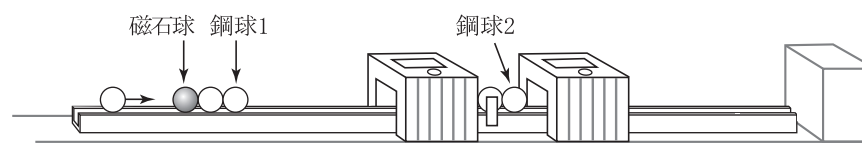


図1-3

- ③ 実験①も②も、 v_2 は v_1 より小さくなっており、摩擦によるエネルギーの散逸がその原因の一つであることは明白である。しかしそれでも実験①のデータセットと実験②のデータセットでは、異なる傾向が見られる。二つの測定結果は、どのような点で異なる傾向にあるか。
- ④ 実験①、②のデータセットに、このような異なる傾向が見られたのはなぜか、その理由を推察せよ。

課題 2-2. ガウス加速器の実験

図 2-1 の実験で、運動量は保存されているのだろうか。衝突後、合体した左 3 個の球（以下「3 個球」と）と射出球 2 の速度を求めて調べてみよう。

入射球 1 の速度をできるだけ小さくして衝突させる。衝突直後の射出球 2 と 3 個球、それぞれの運動量を以下の要領で求める。

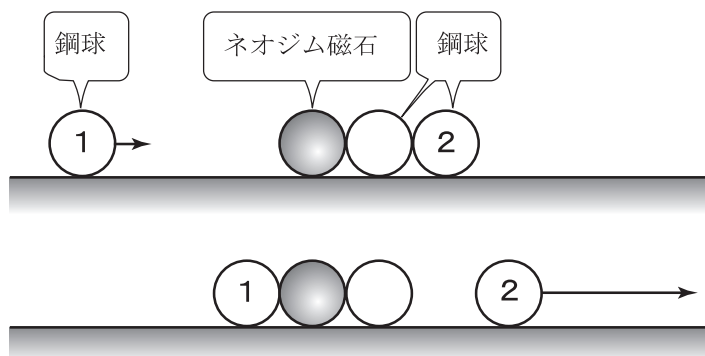


図 2-1

【射出球 2 の運動量】

射出球 2 の速度は、ビースピの測定位置により異なることが予想される。

そこで図 2-2 のように、射出球 2 の右側面がビースピ 1 の左側ゲート面に接するように、またビースピ 2 をビースピ 1 に接するように配置する。この配置により、各ビースピは射出球 2 の 3.0cm, 9.0cm の位置における瞬間の速度を測定するものとする。（ビースピの長さは 6.0cm である）

射出球 2 の運動を等加速度運動と考える。射出球 2 の衝突前の位置を原点 0 として、そこでの衝突直後の速度を v_0 、位置 x における速度を v 、加速度を a とすれば、 $v^2 = v_0^2 + 2ax$ の関係が成り立つ。

- ① ビースピ 1, 2 の測定結果 v_1, v_2 を $v^2 - x$ グラフに記入し、 $x = 0$ の点に外挿することにより、 v_0 を求め、これを射出球 2 の速度とせよ。データは 3 回取り、それぞれから得られた v_0 の平均値を求めよ。
- ② 鋼球 1 個の質量は 4.07g である。これより射出球 2 の運動量を求めよ。

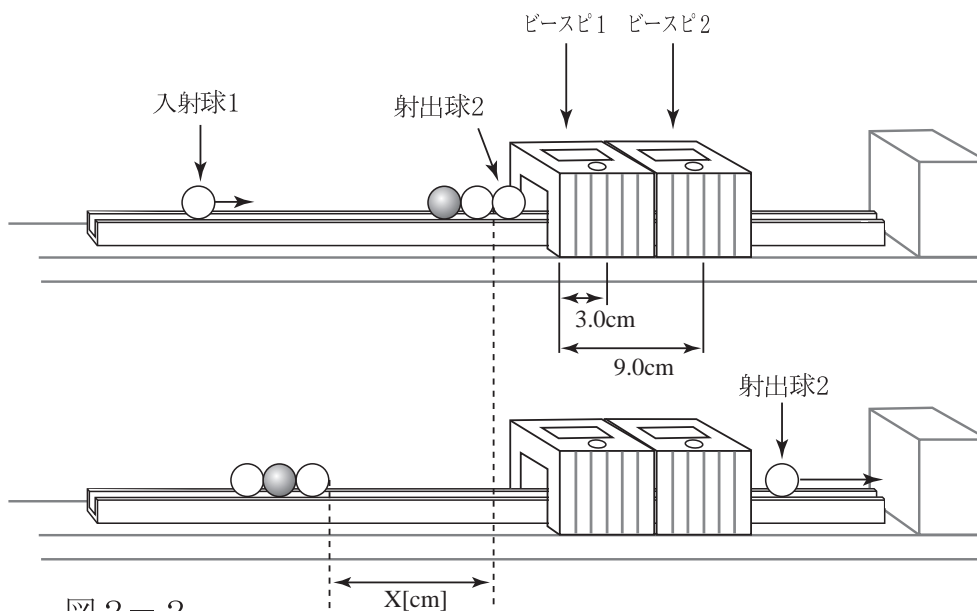


図 2-2

【3個球の分裂直後の速度】

3個球の分裂直後の速度 v は、3個球がレール上を滑って止まるまでの距離 X [cm] より求める。(図2-2) 重力加速度の大きさを g 、動摩擦係数を μ' とすれば、 $v^2 = 2\mu'gX$ と表される。 g は重力加速度の大きさで、 $g=9.8\text{m/s}^2$ である。

3個球のレールとの動摩擦係数 μ' は、図2-3のようにレールを傾け、3個球を滑らせることにより求める。ビースピ1、2を適当な距離 z 離して設置する。ビースピ1、2の速度をそれぞれ v_1 、 v_2 、3個球の受ける動摩擦力を f' 、3個球の質量を M とすれば、

$$\frac{1}{2}Mv_1^2 + Mgz \sin \theta - \frac{1}{2}Mv_2^2 = f'z$$

一方、斜面上の3個球の受ける垂直抗力 N と動摩擦力 f' の関係 $f' = \mu'N$ より、

$$f' = \mu' Mg \cos \theta$$

以上の2式より、

$$\mu' = -\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g \cos \theta \times z} + \tan \theta$$

となる。 $\tan \theta$ 、 $\cos \theta$ は

$$\tan \theta = \frac{b}{a}, \quad \cos \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

の関係式より計算する。

- ③ X [cm] を3回測定し、その平均値を X の値とせよ。
- ④ 3個球がすべる条件で、 a 、 b 、 z を適当に決め、 v_1 、 v_2 を3回測定し、それぞれ μ' を求めよ。その平均値を μ' の値とせよ。
- ⑤ 3個球の分裂直後の運動量を求めよ。鋼球1個の質量は4.07g、磁石球1個の質量は3.93gである。

【実験結果の検討】

- ⑥ ②と⑤の結果は適当であるか、検討せよ。

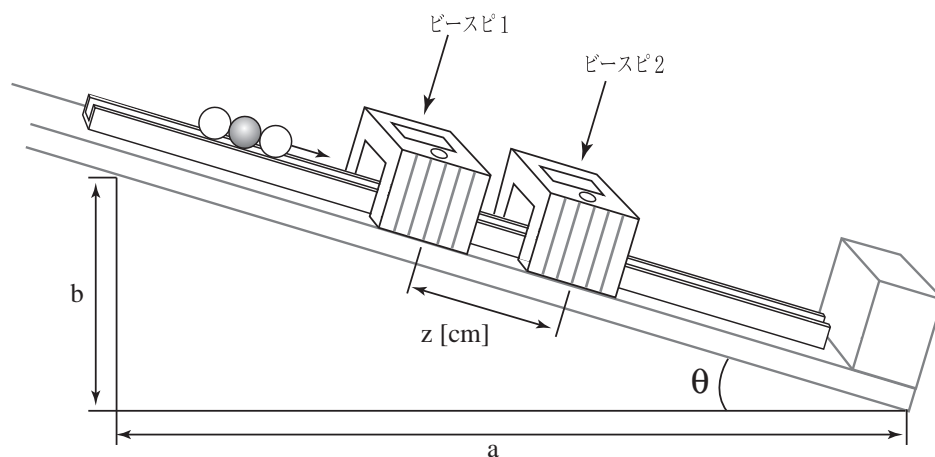


図2-3

【ガウス加速器のエネルギー】

- ⑦ 衝突直後の射出球2と3個球の持つ運動エネルギーの合計を②と⑤の実験結果より求めよ。ただし、射出球2の射出直後の速度は大きいので、球は滑ったまま並進運動し、回転運動は伴わないとする。

チャレンジ実験 【磁力のする仕事】

この実験は、3つの実験問題がすべて終了し、時間に余裕のある場合におこないなさい。

なお、解答の内容については、ボーナスポイントを与えることとする。

⑦で生じた運動エネルギーは、磁石球と鋼球の磁力による位置エネルギーが転化したものと考えられる。入射球1が磁石球と合体する過程で、磁力のする仕事を W_1 とする。もし摩擦が無視できれば、 W_1 のエネルギーが弾性波として反対側の射出球2に伝わる。射出球2が磁力を振りはらって飛び出するのに必要な仕事を W_2 とすれば、衝突後に解放されるエネルギーは $W_1 - W_2$ である。そこで W_1 、 W_2 を以下の要領で測定して $W_1 - W_2$ を求め、⑦の結果と比較する。

⑧ 厚紙を20mm×20mmのサイズに十数枚切り取り、すべて重ねて10mm程度の厚さとし、重ねたまま物差しを目盛り当てて全体の厚さを測る。この測定値を枚数で割って、厚紙1枚の厚さを求めよ。(図2-4)

⑨ 図2-5のようにして磁石球から鋼球を引き離すのに必要な力を求める。磁石-鋼球間に厚紙を0枚、1枚、2枚、3枚・・・と順に挿入していき、それぞれの場合で引き離すのに必要な最低限の力をバネばかりを用いて求めよ。鋼球をバネばかりで引く際、結んで輪の形にしたポリエチレンテープを利用する。また、鋼球が勢い余って飛び出ないように、セロハンテープで鉄球をポリエチレンテープに貼り付けておくとよい。

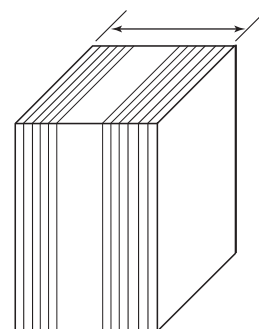


図2-4

まず、1kg用のバネばかりを用いて磁石球-鋼球の実験をおこなって、結果を表にまとめよ。

直接接触しているときの両球間距離を0とし、以下、厚紙1枚分、2枚分・・・と、離れるときの磁力を測定する。離れる瞬間ははかりの目盛りが大きく動くので、注意が必要である。

次に磁石球・鋼球-鋼球の2つの場合について実験をおこなう。

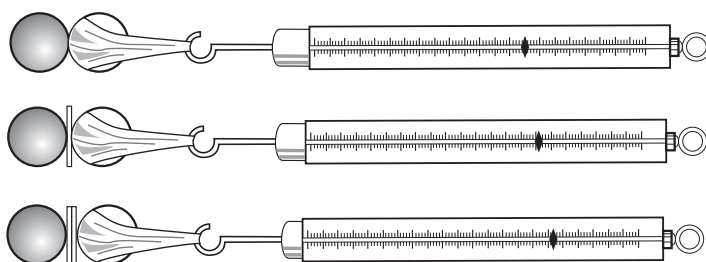
このときは、1Nのバネばかりも、力が小さい時に用いるとよい。

⑩ それぞれの表から磁力-距離グラフを作成せよ。

⑪ 磁力-距離グラフの面積が仕事である。それぞれのグラフのマス目の数を数えて W_1 、 W_2 を求めよ。1マスの中をグラフが横切っているときは0.5マスとして数えよ。

⑫ こうして得られた $W_1 - W_2$ が⑦の結果と整合的かどうかを検討せよ。

(1) 磁石球-鋼球



(2) 磁石球・鋼球-鋼球

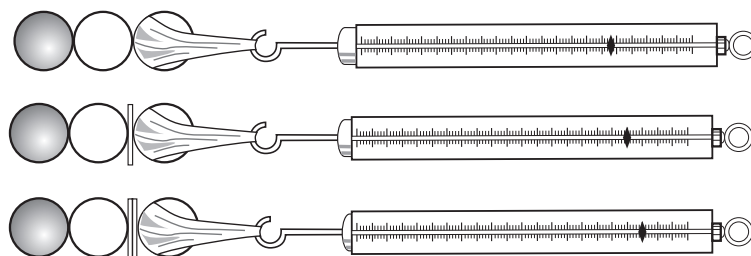


図2-5

(引く力が50gw以下の時は1Nバネばかりを使うとよい。)

実験問題3

目的：この実験では、単極モーターと呼ばれる現象を体験し、その仕組みを考察する。

使用物品：単3乾電池、電池の+極に押し込むことができるリード線付のスナップ端子（※1）、円柱状ネオジウム磁石及び円柱状ウレタン、（※2）、鉄釘、糸、自作スタンド（※3木製ブロックと柱を組み合わせる）、セロハンテープ、両面テープ

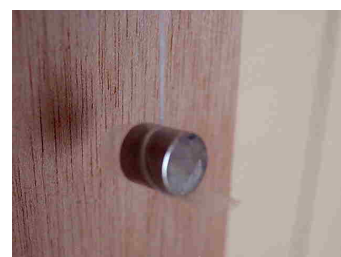
※1 スナップ端子にはリード線と針金に取り付けてある。リード線と針金をセロハンテープで束ねると、リード線を一定の形に固定することができる(図1, 図5を参照)。

※2 実験問題1で使用した物。両面テープの糊のあとや糸をきれいにとっておくこと。

※3 自作スタンドの様子は図6として問題の最後に示す。

予備実験：まず、ネオジウム磁石の円柱面に糸をセロハンテープで貼り付けて吊り下げ、N極とS極を見分け、目印を付ける。(右図)

※ 会場の南北の方向は試験監督から示される。



課題3-1. 実験1

ネオジウム磁石のN極側の面の中心に鉄釘を吸い付かせて立てる。電池の+極にリード線付スナップ端子を押し込んで取り付ける。電池の+極を上にして片手で保持し、鉄釘を付けた磁石を電池の-極から釘を介してぶら下げる。

図1のように、リード線の他端を磁石の円柱面に触れてみよう。磁石は円柱軸の周りに回転するであろう。このとき、大電流が流れるので、短時間だけ接触させること。長時間流し続けると、電池が消耗するだけでなく、リード線や電池が加熱される。

これが、単極モーターと呼ばれる現象である。磁石の極性（NSの向き）を入れ替えて、回転の方向を調べ、磁石の極性と回転方向の関係を記録せよ。

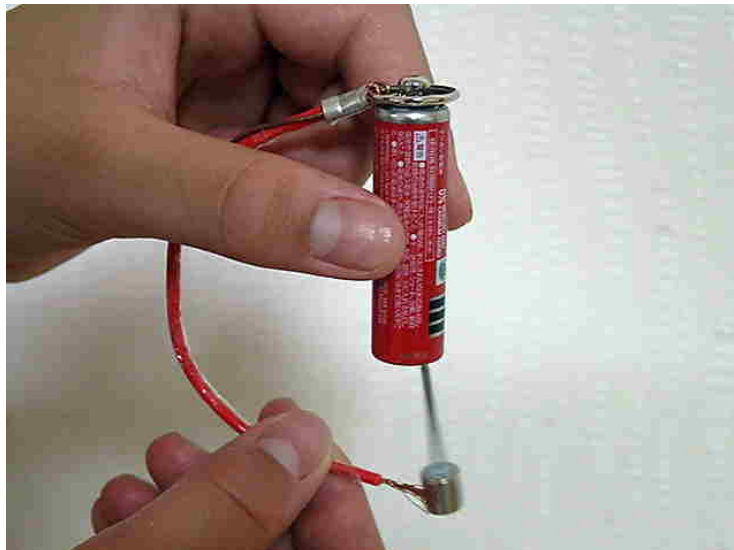


図1

実験問題3の目的は、この回転がどのような仕組みで起こるかを解き明かすことである。予備知識として次の事柄を挙げておこう。

(1) 電流の作る磁場（磁界）（磁束密度 B ）

1 A. 直線電流の周りには、電流に垂直な平面内に電流を中心とする同心円状に磁場が生じる。向きは、

電流の向きに進む右ねじが回転する向きである (図 2 A)。

1 B. 一周する電流は、電流を縁とする面を貫くように磁場を作る。向きは電流の向きに回転する右ねじの進む向きである (図 2 B)。

直線電流のまわりの磁力線

ねじの進む向き→電流の向き
ねじを回す向き→磁場の向き

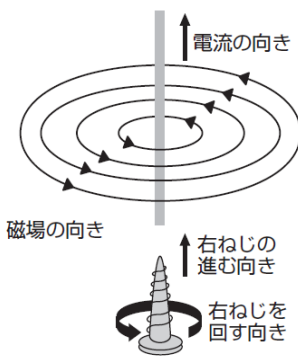


図 2 A

磁場 電流

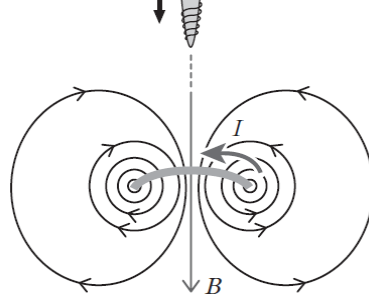


図 2 B

フレミングの左手の法則

電流は親指のさす向きに力を受ける。

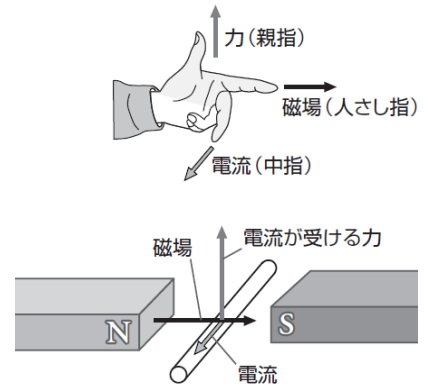


図 3

(2) 電流 (の流れている導体) が磁場から受ける力 (ローレンツ力)

磁場中の電流は磁場と電流の両方に垂直な方向に力を受ける。向きは磁場と電流の両方に垂直においた右ねじを電流の向きが磁場の向きに重なるように回転するとき、右ねじの進む向きである。この関係はフレミングの左手の法則とも呼ばれる (図 3)。

課題 3-1 では、ネオジム磁石自身に電流が流れる。この電流がネオジム磁石の作る磁場から受ける力を考えてみよう。それには磁石内部の磁場の様子を知る必要がある。単独の N 極や S 極が存在しないことから、電荷が電場を作るのと同様に磁極が磁場を作るのではなく、磁場はすべて電流が作ると考えられている。磁石の場合は、それを構成する原子や分子が微小な円電流として磁場を作ると考える。円柱形の磁石では、磁石内部の隣り合った微小円電流の重なり合う部分は打ち消し合い、全体では、円柱面に沿って流れる電流だけが残る。したがって、円柱形の磁石はソレノイドと同じような磁場を作ることになる。つまり、磁場の向きは、磁石の外では N 極から S 極へ向かい、磁石の内部では、S 極から N 極へ向かい、磁場の向きを表す磁束線は始点も終点も無く、ループを描く (図 4)。

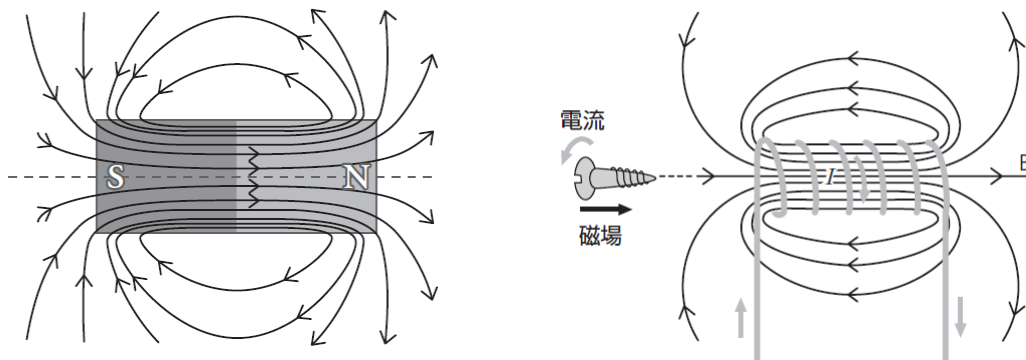


図 4 永久磁石の内外の磁場とソレノイドの周りの磁場

課題3-2. 考察1

課題3-1で流れる電流は、リード線と磁石の円柱面の接点から円柱の軸方向に流れ、中心軸に達した後は軸に沿って流れて釘に流れ込むものと仮定しよう。このとき磁石内の電流が受けるローレンツ力の向きおよび、それによる円柱軸の周りの回転力（力のモーメント、これを T_1 と呼ぶ）の向きを考察せよ。課題3-1で観測された回転の向きと一致するか？

ところで、私たちは2つの物体が及ぼしあう力について運動の第3法則（作用・反作用の法則）が成り立つことを知っている。ローレンツ力の場合にもこれが成り立つとすると、電流が受けるローレンツ力の反作用は磁場を作り出している磁石が受けるはずである。

課題3-1では、磁石内の電流が受ける回転力 T_1 の反作用（これを T_1' と呼ぶ）は磁場を作っている磁石自身が受けることになる。結局、磁石には回転力 T_1 と T_1' の和が働くことになるが、 T_1 と T_1' は打ち消しあうので、磁石には円柱軸の周りの回転力は働かないはずである。

このことと、課題3-1で磁石が回転したことは矛盾しないのだろうか？ 磁石を回転させている力の反作用はどこへ行ったのだろうか？ これを直接探る実験をしてみよう。電池とリード線を支えて、磁石を自由にして行った課題3-1では磁石が回転した。今度は逆にしてみよう。

課題3-3. 実験2

リード線付スナップ端子に糸（スナップの穴から抜けないように結び目を作っておくこと）を付け、自作スタンドから吊り下げる。（次頁の図6を参照すること。）

N極に釘を吸い付けた磁石のS極に、円柱状ウレタンを両面テープで貼り付ける。

糸を付けたリード線付スナップ端子を電池の+極に取り付け、釘を吸い付けた磁石がぶら下がったとき、磁石の円柱面にリード線の他端が触れる位置になるようにリード線を折り曲げる。

図5のように、ウレタンの部分を手で持ち、釘の先端が糸で吊られた電池の一極の中心付近に接し、同時に、磁石の円柱面がリード線の端に触れるように磁石を支える。このとき起こる現象を記録しなさい。

また、手を放した状態で、釘の先端と電池の一極、および、リード線の端と磁石の円柱面が触れるようにすると何が起こるか？

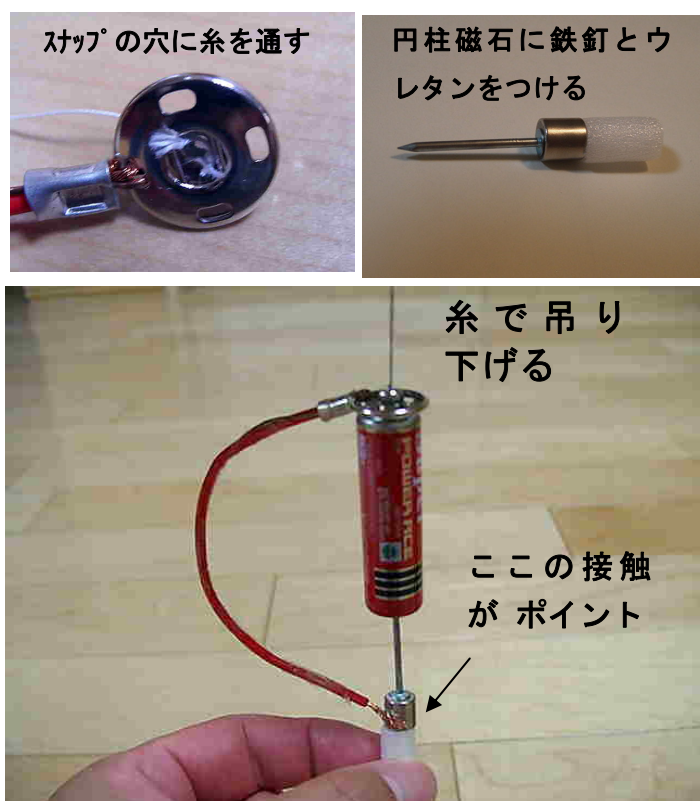


図5

課題3-1と課題3-3の実験結果から、磁石と電池+リード線の間で回転力を及ぼし合っているらしいことが分かるが、これをさらに詳しく調べて見よう。

課題3-4. 実験3

2つの実験から、課題3-1の場合に限らず磁石の近くを電流が流れれば磁石は回るのではないか？という疑問が湧いてくる。これを調べるため、課題3-1の配置で、リード線他端を磁石の円柱面以外のいろいろなところ（上下の底面、その縁あるいは中心、釘、電池の一極）に触れてみよう。また、思いつくいろいろな場合を実験して、どのような場合に磁石が回転するか、規則性を探ってみよう。

私たちは、方位磁針に磁場を加えると、磁針を磁場と平行な向きにするような回転力が働くことを知っている。ところが、課題3-1で磁石を回転させた力は、方位磁針の向きを変えるような力ではなく、NS極を結ぶ軸の周りに磁針あるいは磁石を自転させるような力である。

課題3-5. 考察2

棒磁石をNS極を結ぶ軸の周りに自転させようとするような力を及ぼすには、どのようにすれば良いか、考察せよ。

課題3-6. 結論

以上の実験や、疑問点の考察から、課題3-1で磁石を回転させた力はどのようなものであるか、またその回転力は T_1 とどのような関係にあるか説明しなさい。



図6

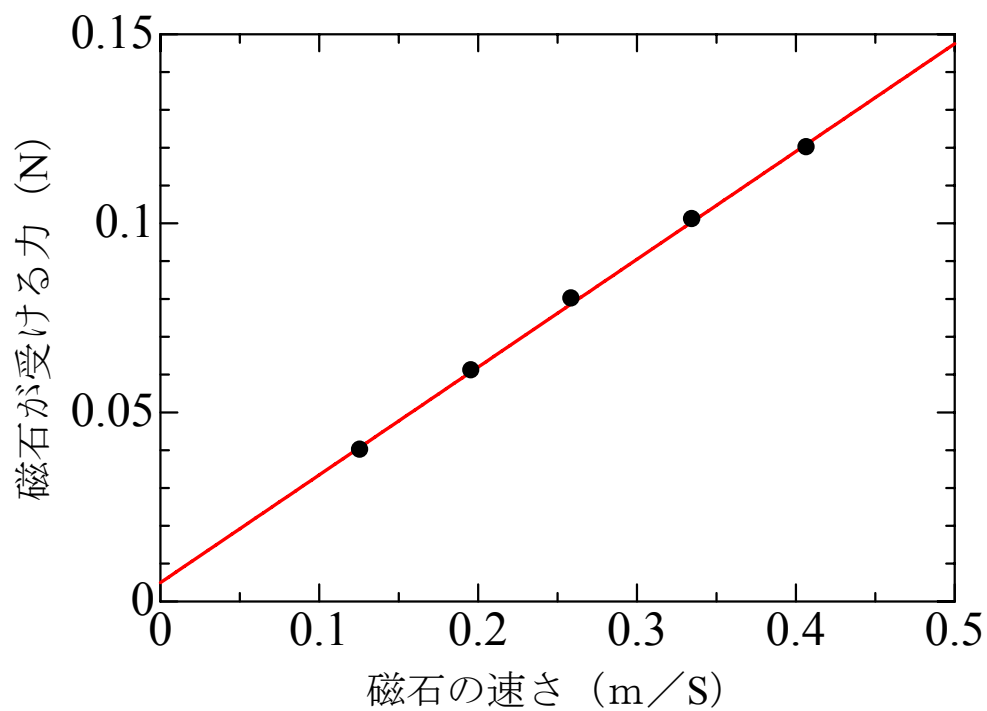
2006 年第2チャレンジ実験問題 測定結果例

実験課題1の解答用紙 (グラフは別紙)					
予備実験	アルミパイプの場合	約 5 秒	銅パイプの場合	約 7 秒	
課題1-1. 銅製パイプ(肉厚0.5mm)による実験の結果					
おもりの状態	空	小1個	大1個	小・大各1個	大2個
磁石の速さ	(0.454 km/h) 0.126 m/s	(0.704) 0.196	(0.932) 0.259	(1.206) 0.335	(1.464) 0.407
磁石が受ける力	0.0402 N	0.0609	0.0801	0.101	0.12
課題1-2. アルミ製パイプ(肉厚0.5mm)による実験の結果					
おもりの状態	空	小1個	大1個	小・大各1個	大2個
磁石の速さ	(0.63 km/h) 0.175 m/s	(0.998) 0.277	(1.378) 0.383	(1.766) 0.491	(2.09) 0.581
磁石が受ける力	0.0402 N	0.0609	0.0801	0.101	0.12
課題1-3. アルミ製パイプ(肉厚1.0mm)による実験の結果					
おもりの状態	空	小1個	大1個	小・大各1個	大2個
磁石の速さ	(0.380 km/h) 0.106 m/s	(0.6) 0.167	(0.8) 0.222	(1.012) 0.281	(1.17) 0.325
磁石が受ける力	0.0402 N	0.0609	0.0801	0.101	0.12
課題1-4.	1				
課題1-5.	k(Cu)=	0.285	k1(Al)=	0.195	
	k2(Al)=	0.362			
課題1-6.	k(Cu)/k1(Al)=	1.46	k2(Al)/k1(Al)=	1.86	
※書ききれない場合はこの解答用紙の裏に書いても良い。	実験の考察:	次のような項目について論理的に記述できているかを評価する。 ・磁石の落下によってパイプの中に生じる誘導起電力のようすについて、断面を通る磁束の変化が速度に比例していることを述べる。 ・パイプの中に流れる誘導電流が、パイプの金属の抵抗率の逆数に比例し、受ける力の大きさは電流と磁場に比例していることについて述べる。 ・以上のことから、描いたグラフの傾きは金属の抵抗率の逆数の比となっていることについて述べる。等 (参考) 銅の抵抗率=1.67×10 ⁻⁶ Ωcm(20°C)、アルミニウムの抵抗率=2.655×10 ⁻⁶ Ωcm(20°C)			
課題1-7.	(測定値の平均をどのように得たのかなど、データの処理についての工夫と、摩擦などの測定値に対する影響を小さくする具体的な工夫に対して評価を与える)				

チャレンジ番号	氏名

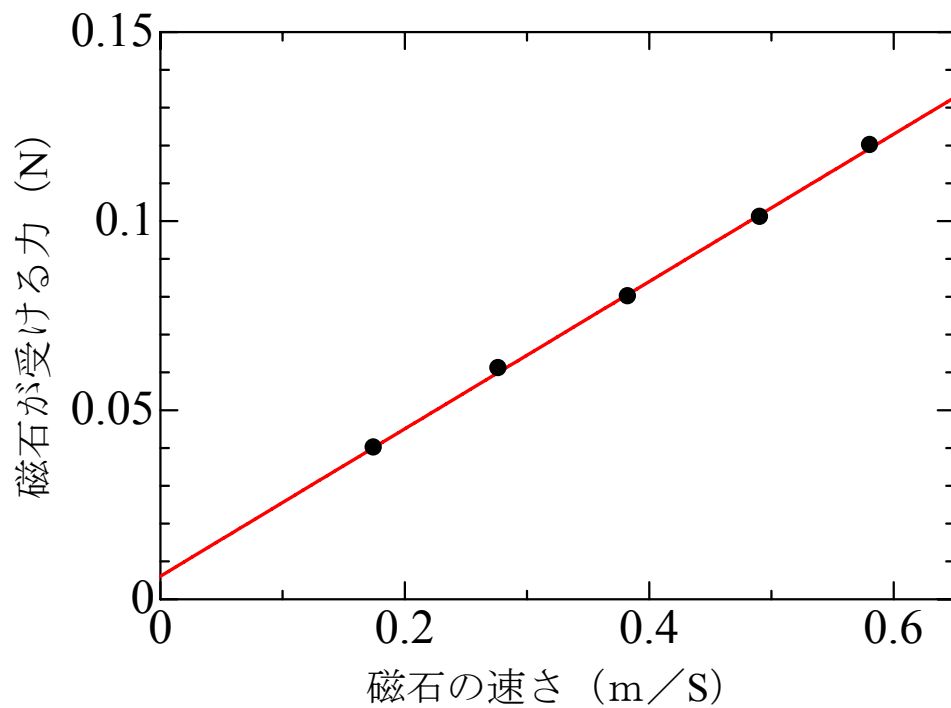
課題 1 - 1 の測定結果

銅製パイプの中を落下する磁石が受ける力



課題 1 - 2 の測定結果

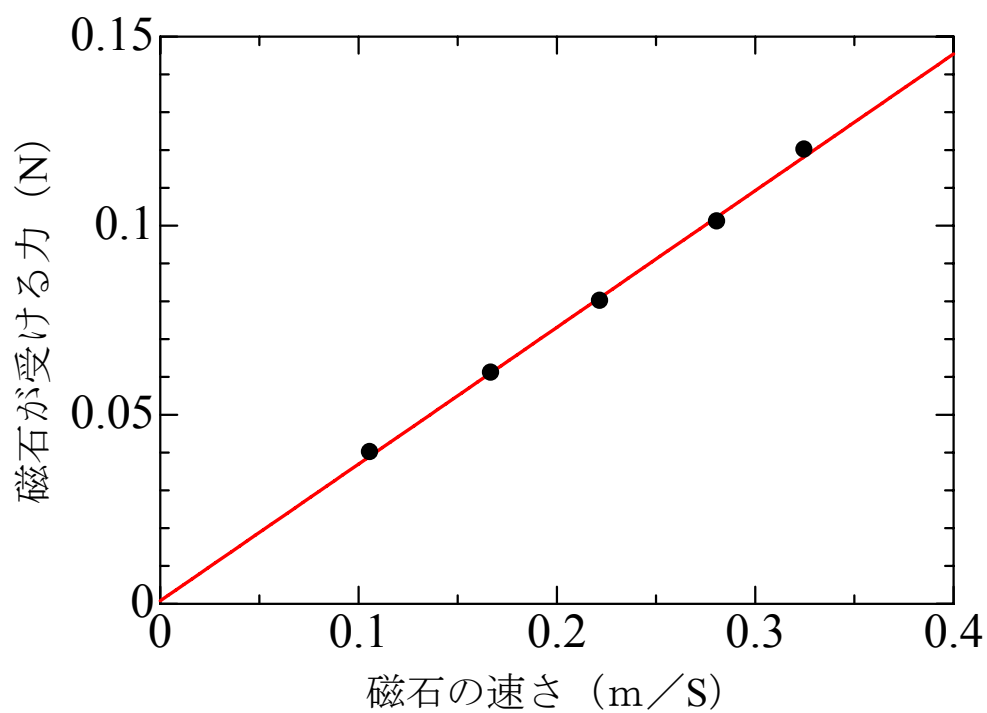
アルミ製パイプの中を落下する磁石が受ける力



チャレンジ番号	氏名

課題 1 - 3 の測定結果

アルミ製パイプの中を落下する磁石が受ける力



実験問題2の解答用紙（両面3枚）

チャレンジ番号	氏 名

課題2-1. 鋼球3個による衝突実験

①

	測定1	測定2	測定3
v_1 [km/h]	1.44	1.53	1.67
v_2 [km/h]	1.09	1.17	1.33

②

	測定1	測定2	測定3
v_1 [km/h]	6.35	6.56	6.72
v_2 [km/h]	6.34	6.07	6.22

③

上の①について v_2/v_1 を求めると、測定1から3の順に 0.76, 0.76, 0.80 となる。
 また、同様に②について v_2/v_1 を求めると、測定1から3の順に 1.0, 0.93, 0.93 となる。
 ①と②では比 v_2/v_1 の値が異なり、②の値は1に近い傾向にある。

④

入射球1は衝突の際、並進運動の運動エネルギーのみを伝えることができる。①の場合、射出球2は低速なので転がり、並進運動と回転運動のエネルギー両方を持つ。一方、②の場合、射出球2は高速なのではじめはレール上をすべり、射出直後は回転運動していないと考えられる。鋼球1の速度を v_1 、射出球2の速度を v_2 とすれば、力学的エネルギー保存の法則より、それぞれ、

$$\text{①} : \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 \left[1 + \frac{2}{5} \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta}{2R}\right)^2} \right], \quad \text{②} : \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 \text{ となる。}$$

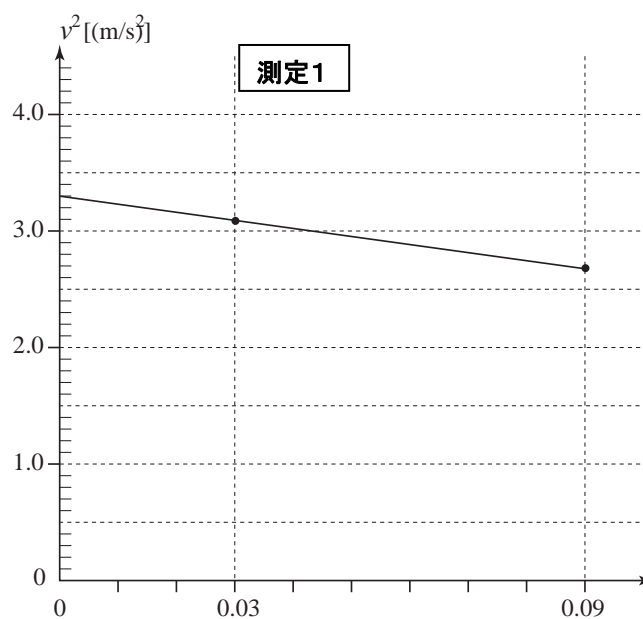
$R = 5.0 \text{ mm}$, $\Delta = 4.3 \text{ mm}$ とすれば① : $\frac{v_2}{v_1} = 0.82$, ② : $\frac{v_2}{v_1} = 1$ となることが推察できる。

課題 2-2. ガウス加速器の実験

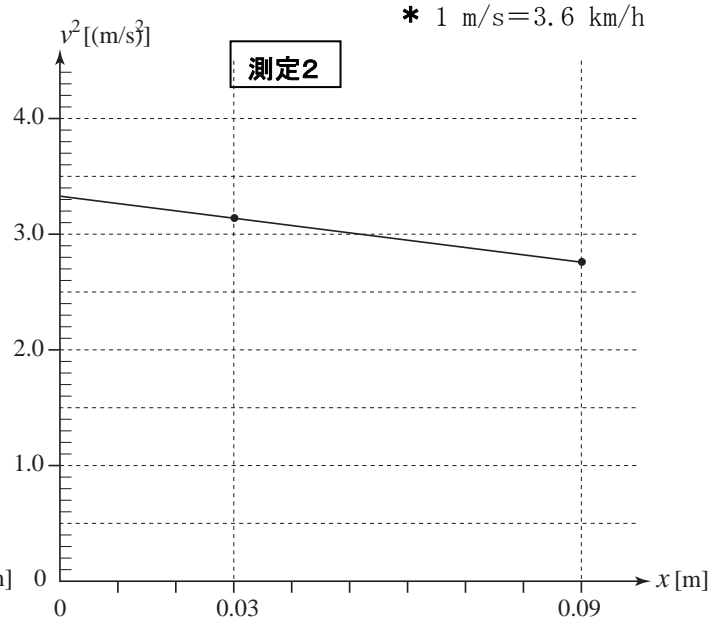
①

	v_1 [km/h]	v_1 [m/s]	v_1^2 [(m/s) ²]	v_2 [km/h]	v_2 [m/s]	v_2^2 [(m/s) ²]
測定1	6.33	1.76	3.09	5.90	1.64	2.69
測定2	6.39	1.78	3.15	5.98	1.66	2.76
測定3	6.34	1.76	3.10	5.92	1.64	2.70

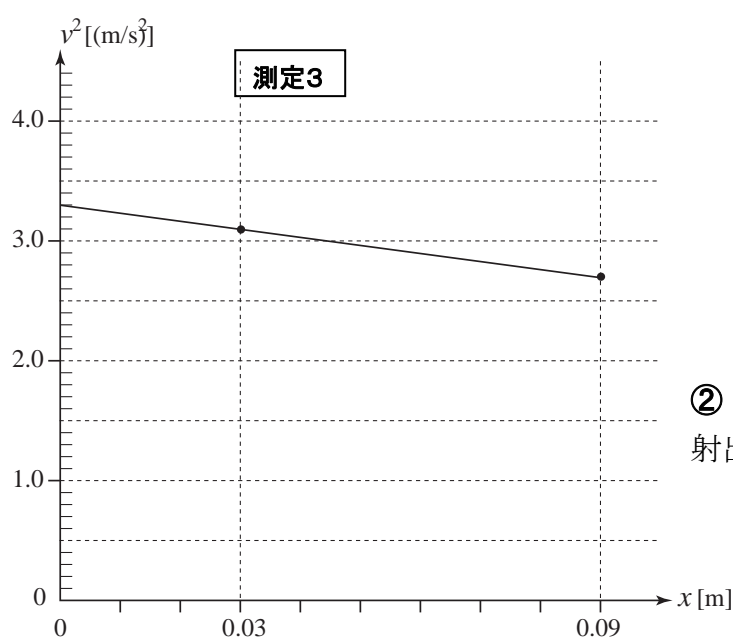
* 1 m/s = 3.6 km/h



$$v_0^2 = \boxed{3.30} \text{ (m/s)}^2 \quad v_0 = \boxed{1.82} \text{ m/s}$$



$$v_0^2 = \boxed{3.32} \text{ (m/s)}^2 \quad v_0 = \boxed{1.82} \text{ m/s}$$



$$v_0^2 = \boxed{3.30} \text{ (m/s)}^2 \quad v_0 = \boxed{1.82} \text{ m/s}$$

$$v_0 \text{ の平均値} = \boxed{1.82} \text{ m/s}$$

②

$$\text{射出球 2 の運動量} = \boxed{7.4 \times 10^{-3}} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

チャレンジ番号	氏名

③

	測定1	測定2	測定3	平均
X [cm]	9.0	9.2	8.3	8.8

④

	a[cm]	b[cm]	$\cos \theta$	z[cm]	v_1 [km/h]	v_1 [m/s]	v_2 [km/h]	v_2 [m/s]	μ'
1	30	7.2	0.97	10	1.55	0.431	2.19	0.608	0.143
2	30	7.2	0.97	10	1.22	0.339	2.01	0.558	0.137
3	30	7.2	0.97	10	1.64	0.456	2.27	0.631	0.140
								平均	0.140

⑤

3個球の運動量 = 5.9×10^{-3} kg · m/s

⑥

射出球の運動量は 7.4×10^{-3} kg · m/s, 3個球の運動量は 5.9×10^{-3} kg · m/s で, 射出球の運動量がやや多い。この差額は衝突直前の入射球の運動量と考えられる。実験誤差の範囲内で, 衝突前後の運動量は保存されており、妥当な結果である。

なお入射球1の速度をほとんど0にしてレール上に置いたとき, 磁力によって入射球1が加速したとしても, そのとき残りの磁石球と鋼球がやはり磁力により反対向きに加速するので, 衝突直前の運動量の合計は変わらない。これが増加したとすると, 摩擦力により, 残りの磁石球と鋼球の運動が妨げられたからである。

⑦

	質量[kg]	速度[m/s]	運動エネルギー[mJ]
射出球2	4.07	1.82	6.74
3個球	12.1	0.492	1.46
		合計	8.2

* 1 mJ = 10^{-3} J

【これよりチャレンジ問題】

⑧ 厚紙 枚の厚さは である。

1枚の厚さ =

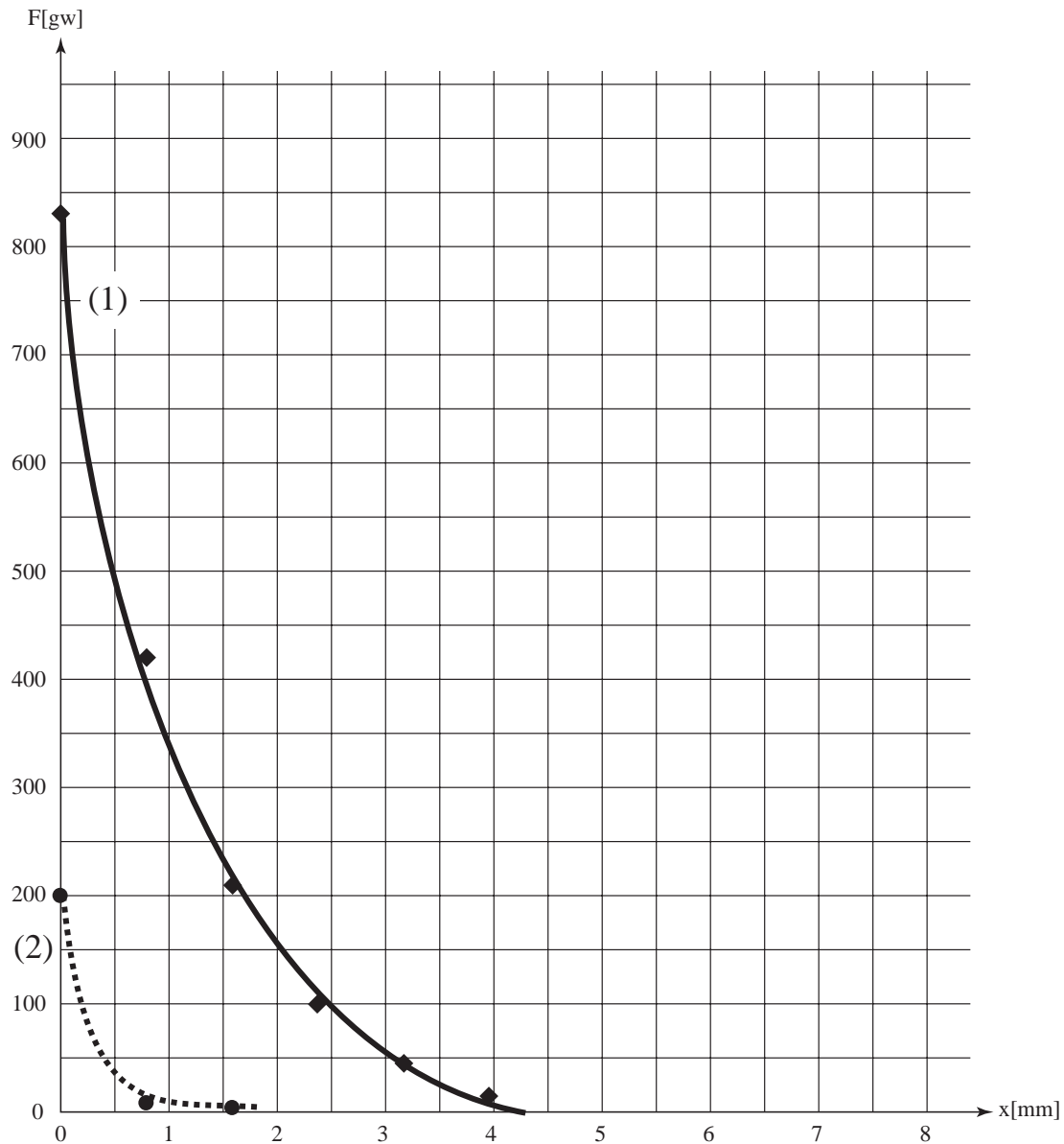
⑨

紙の枚数	距離[mm]	(1) (磁石球—鋼球) 力[gw]	(2) (磁石球・鋼球—鋼球) 力[gw]
0	0	830	200
1	0.79	420	10
2	1.58	210	7
3	2.37	100	—
4	3.16	45	—
5	3.95	15	—
6	—	—	—
7	—	—	—
8	—	—	—
9	—	—	—
10	—	—	—

(注) 紙の枚数は測定できるところまででよい。

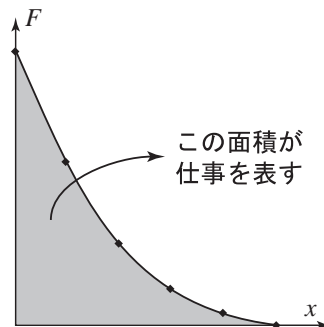
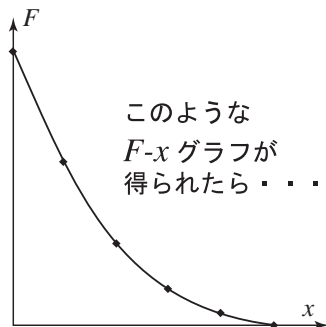
チャレンジ番号	氏名

⑩



(注1) 1 gwは、ばねはかりの値が1 gを指すときの力の大きさを、 9.8×10^{-3} Nである。

(注2)



⑪

グラフのマス目1個の面積 = $50 \text{ g w} \times 0.5 \text{ mm} = 0.245 \text{ mJ}$

(1) 磁石球—鋼球の場合

マス目の数 = $W_1 =$ mJ

(2) 磁石球・鋼球—鋼球の場合

マス目の数 = $W_2 =$ mJ

⑫

上の⑪から $W_1 - W_2 = 8.0 \text{ mJ}$ となるが、これは⑦で得られた運動エネルギーの増加分 8.2 mJ にきわめて近い値である。

予想通り、磁力による位置エネルギーが運動エネルギーに転化していると考えられる。

実験問題 3 の解答用紙（両面 1 枚）

チャレンジ番号	氏 名

課題 3 - 1. 実験 1

磁石のN極が上のとき、磁石は上から見て反時計回りに回転した。
磁石のNSを入れ替えると、逆向きに回転した。

課題 3 - 2. 考察 1

磁石のN極が上のとき、磁石の中の磁場 B は上向きである。
リード線と磁石の円柱面の接点から円柱の軸へ向かう半径に沿って流れる電流は、上から見て反時計回りの向きにローレンツ力を受ける。
中心軸に沿って流れる電流は（磁場と平行なので）ローレンツ力を受けない。
磁石内の電流は全体として、上から見て反時計回りに回転させる力（力のモーメント）を受ける。
これは、実験 1 で観測された回転の向きと一致する。

課題 3 - 3. 実験 2

釘の先端が電池の一極に、磁石の円柱面がリード線の端に触れて電流が流れたとき、電池とリード線が一体となって、上から見て時計回りに回転し始めた。
また、釘の付いた磁石を電池の一極から磁力でぶら下げ、リード線の端が磁石の円柱面に触れるようにして手を放したら電池とリード線は時計回りに、磁石は反時計回りに回転した。
磁石に比べ、電池とリード線がゆっくり回る（回りにくい）のは、慣性モーメントが大きいためである。

課題3-4. 実験3

課題3-1の配置で、リード線の他端をいろいろなところに触れたときの結果

磁石の回転の様子	リード線の触れた場所
よく回った	磁石の円柱面, 上下の底面の縁
ほとんど回らなかった	上下の底面の中心付近, 釘, 電池の一極

磁石が回るのは、磁石自身に電流が流れる場合だけであるようだ。

磁石の中心軸に沿って電流が流れても回転しない。

課題3-5. 考察2

一周する電流は磁石の位置に、ある方向の磁場 \mathbf{B} を作る。

磁石はそのNS軸が磁場 \mathbf{B} の向きに平行になるような回転力を受けるが、NS軸の周りに回転させるような力は受けない。

もし、電流の一周する道筋に磁石自身が含まれていると、磁石内の部分を流れる電流と磁石の間で及ぼし合う力は磁石にとっては内力であり、磁石の運動には寄与しない。

一周する電流全体は磁石をNS軸の周りに回転させるような力を及ぼさないが、内力になる部分を除いた、磁石以外の部分だけを流れる電流は、磁石をNS軸の周りに回転させるような力を及ぼすと考えられる。

実際に、課題3-4で、電流の道筋に磁石自身が含まれていると磁石はNS軸の周りに回転した。

課題3-6. 結論

電流の一周する道筋に磁石自身が含まれている場合を考え、電流の道筋のうち、磁石の中の部分を c_1 、残り（釘・電池・リード線）を c_2 とする。 c_1 と c_2 の部分を流れる電流が磁石をそのNS軸の周りに回そうとする回転力を、それぞれ、 T_1' と T_2' とすると、 T_1' は磁石内の c_1 を流れる電流が磁石から受ける回転力 T_1 の反作用となっている。

作用と反作用の関係から、 $T_1 + T_1' = 0$

一周する電流はNS軸の周りに回転させる回転力を及ぼさないから、 $T_1' + T_2' = 0$

したがって、 $T_2' = T_1$

すなわち、磁石以外の部分 c_2 を流れる電流が磁石をNS軸の周りに回そうとする回転力 T_2' を及ぼし、その大きさと向きは磁石内の部分 c_1 を流れる電流が磁石から（内力として）受ける回転力 T_1 に等しい。

物理チャレンジ 2007

第2チャレンジ 実験問題

2007年7月31日(火)

諸注意・実験器具確認 8:25～ 8:30

実験問題にチャレンジ 8:30～13:20

実験器具後片づけ 13:20～13:30

<注意事項>

1. 実験器具の確認や注意事項の伝達，チャレンジの開始と終了などについては，チャレンジの監督者の指示に従うこと。
2. 実験問題は実験問題1，実験問題2の2つある。どの問題からチャレンジしても良いが，時間の配分をよく考えてチャレンジすること。
3. すべての解答用紙（両面）の表面および封筒に，第2チャレンジ番号と氏名を必ず記入すること。
4. 机上に配布されている白紙をデータ記録用紙として使用し，提出した解答用紙を後日再現できるように，持ち帰ること。
5. 持参した筆記用具と，与えられた実験装置，電卓以外は使用してはならない。
6. 実験中に，測定装置に不具合が生じた場合や実験の部品を紛失した場合は，監督者に申し出ること。
7. チャレンジ開始から12:00まではチャレンジを終了することはできない。
8. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき，質問があるとき，チャレンジを終了するときは，手をあげて監督者に知らせること。
9. 終了の合図があった場合は，提出する解答用紙に第2チャレンジ番号と氏名が記入されていることを確認の上，これらをまとめて封筒の中に入れ，机上に置くこと。
10. チャレンジ終了後，実験装置をもと通りに机上にまとめること。問題冊子とデータ記録用紙は持ち帰ること。また，机に貼られたチャレンジ番号と名前が書かれた紙をはがすこと。

物理チャレンジ 2007

実験問題

《はじめに》

音叉や弦などのように一定の振動周期を持つ物体（振動体）に、同じ周期で振動している別の振動体（たとえば、スピーカ）を近づけると、音叉や弦が振動を始める現象が観察される。これは、《共振現象》と呼ばれる物理現象の1例である。この《共振現象》では、2つの振動体が互いに相互作用して、それぞれの振動の様子が緩やかに時間変化する。《共振現象》は、我々の身の回りにもいろいろなかたちで存在する。例えば、ブランコをこいだり、つり鐘を指先一本で揺らしたりするとき、我々は巧まずしてその原理を利用している。

物理チャレンジ2007の実験問題のテーマは、このような《共振現象》の解明である。良い実験を行って、良い測定結果を出し、実験精度を考慮した良い解答が書かれることを期待する。

実験問題 1

実験の目的：

両端を固定された弦は、弦の長さ、弦の線密度、および弦に加えられた張力によって決まる振動数（固有振動数）で振動する。この実験では、正弦波発振器に接続された電磁石の振動と弦の振動との共振現象を利用して、弦の固有振動数と弦の長さ、張力および線密度との関係を調べる。さらに、弦の密度が不連続だったり、離散的であったりした場合の固有振動数について調べる。

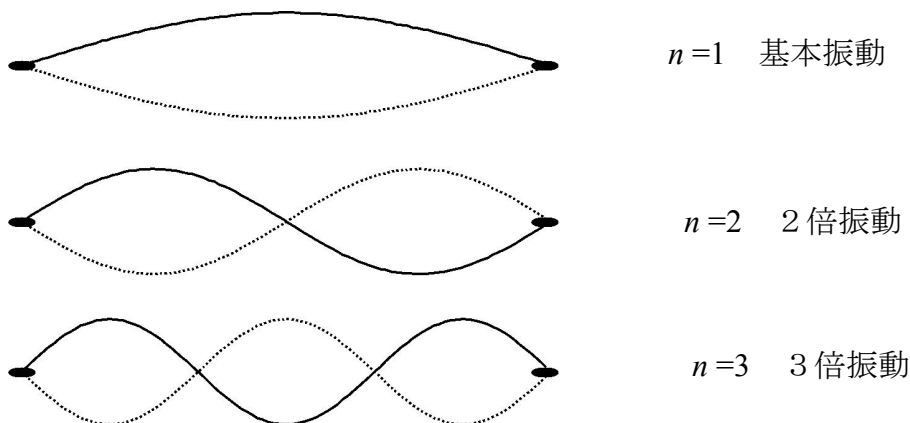
実験の背景：

弦の一端を連続的に振動させると、その振動は波となって弦を伝わり、他端で反射して反射波を生じる。反射波と元の波を重ね合わせたものが、実際の弦の運動として観察される。振動の振動数を調整すると、ある特定の振動数のときに限って、弦上で大きく振動する部分（腹）と全く振動しない部分（節）が明確に区別できる状態になる。つまり、定常波ができる。

両端を固定した弦にできる定常波について考えてみる。両端を固定した弦にできる定常波は、図に示すように両端が節にならなければならない。弦の長さを L [m]、弦に生じた波の波長を λ [m] とする。このとき、半波長の整数倍が弦の長さ L に等しいことから、

$$\frac{n\lambda_n}{2} = L \quad (n=1,2,3,\dots) \quad \dots \dots (1)$$

となる必要がある。この条件を満たす場合に限り、定常波が発生する。



弦を伝わる波の速さ v [m/s] は、弦の張力を T [N]、線密度（長さ 1 m あたりの質量）を ρ [kg/m] とすると、

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad \dots \dots (2)$$

で与えられる。また、波長が λ_n [m] のとき、波の振動数 f_n [Hz] は、

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad \dots \dots (3)$$

となる。(3)式から、定常波ができるときの振動数は、弦の長さ、弦の線密度、および弦に加えられた張力から決まるある特定の値となることがわかる。そのような振動数を固有振動数という。

実験装置：

実験問題1で使用する装置の配置を写真1に示す。これらは①から⑥に示した物品より構成されている。以下それぞれについて簡単に説明する。



写真1

- ① 架台 (滑車・物差し付)
- ② 電磁石：詳細を写真2に示す。直径6mm、長さ約140mmの軟鉄棒に直径0.55mmの被覆(ひふく)銅線を4層巻いてある。片方の端はナットで支持台と平行になるように固定されている。反対側の先端は、直径約2mmと細くなっており弦を通す穴があいている。両側にはフェライト磁石が2個固定されている。支持台の裏にはゴム製の磁石が数枚貼られており鉄製の架台に安定して固定できるようになっている。電磁石を動かすときは支持台の両側を指ではさむようにして持ち上げると簡単に架台からはずすことができ、必要な場所に置けばよい。

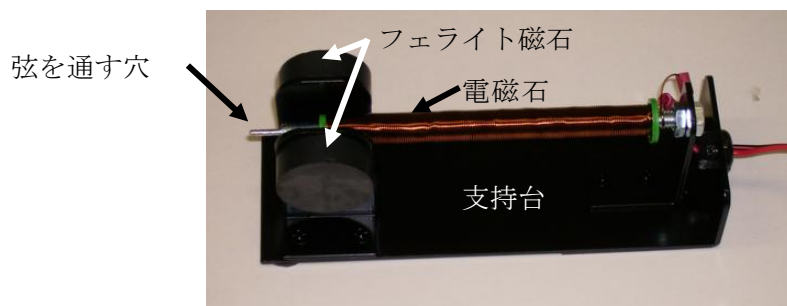


写真2

- ③ リード線 (端子つき)：電磁石棒のコイルに電流を流すための、長さ約1mのビニールコード。このコードの先端の端子をそれぞれ⑥の発振器の出力端子+、-に接続する。今回の場合どちらのコードを+あるいは-に接続してもよい。

④ おもり：フックと分銅よりなる。

フック：(分銅をつるすための直径 3 mm の銅線 重さ 9.5 g) 1 個

分銅：直径 30 mm, 厚さ 2 mm の鉄製ワッシャー (1 個の重さ 9.5 ± 0.1 g) 15 枚

⑤ 弦

被覆銅線：直径 0.1 mm, 長さ約 3 m, 1 本, 線密度 7.3×10^{-5} kg/m

被覆銅線：直径 0.2 mm, 長さ約 1 m, 3 本, 線密度 2.9×10^{-4} kg/m

被覆銅線：直径 0.3 mm, 長さ約 1 m, 3 本, 線密度 6.5×10^{-4} kg/m

ビーズ玉 10 個 (予備を含む) と長さ約 1 m の釣り糸 1 本

⑥ 発振器：詳細は次の実験の手順の項で述べる。

実験の手順：

1 実験装置の設置

写真 1 のように、架台を実験機の左側手前に置き、滑車が左端にくるようにする。電磁石棒の先端に指定された弦を接続し、弦のもう片方の先にフックを取り付け、おもりの分銅をつるし、左端の滑車を通し鉛直にぶら下げる。

2 弦を振動させる方法

写真 2 の電磁石に電流を流すことによって、軟鉄棒の先端はその電流の向きによって N 極または S 極に磁化する。そのとき、左右に設置されているフェライト磁石によって、電磁石棒の先端は、左または右に磁気力を受ける。写真 2 のコイルの電流導入端子を写真 3 の発振器の出力端子に接続して、発振器の電源スイッチを ON にすると、コイルに交流電流が流れ、電磁石棒の先端は、N 極または S 極に交互に変化する。これによって、電磁石棒は左右に振動する。このとき電磁石に流れる交流電流の周波数と電磁石棒の振動数は等しい。

3 発振器の使用法



写真 3

写真 3 の発振器は、電磁石棒を振動数を変えて振動させるために使用する交流電流発生装置である。出力電流の波形、装置の使用方法を以下に述べる。

①出力波形および周波数

出力波形は正弦波で、出力の周波数は 1Hz から 200Hz まで可変である。1.0Hz～99.9Hz は 0.1Hz ステップで可変。100Hz～200Hz は 1 Hz ステップで可変。

②出力周波数の設定方法

アップダウン式。写真3に示すように、発振器上面にある **HERTZ** Δ 表示のボタンを押し続けると発振周波数が大きくなり、前面のカウンターにデジタルで発振周波数が表示される。ボタンを押している間は、周波数カウンターの表示は変わるが、出力される周波数はボタンを押す直前の値のままである。ボタンを離すとそのとき表示されている周波数の出力が得られる。発振周波数を下げるときはその下にある、**HERTZ** ∇ 表示のボタンを同じように押し続け、必要な周波数になったとき、ボタンを離すとそのとき表示されている周波数の出力が得られる。

③出力電圧の調整方法

発振器からの出力電圧は **POWER** と表示されているつまみを回すことによって変えられる。右側に回すほど出力電圧が大きくなり、左側に回すほど出力電圧が小さくなる。

4 実験を進める上での注意

この実験では、両端を固定された場合の弦の振動を調べることを目的としている。滑車で支えられている側は固定端とみなして問題はない。つまり振動の節になる。振動源である、電磁石棒に接続されているところの弦は、厳密には固定端ではない。しかし今回の実験では、目に見えない程度の小さな電磁石棒の振幅でも、その共振状態においては、振動の腹の部分に十分な振幅が見られ、電磁石棒に接続されているところを共振振動の節とみなすことができる。

ここで使用している電磁石棒は、周波数が約 40～50Hz 付近で電磁石棒が目に見える程度に大きく振動する場合がある。このような場合は当然電磁石の先端部分を振動の節とみなすことはできない。このようなときは出力 **POWER** のつまみを左に回して、先端部分の振動の振幅が十分小さくなるように調整すること。また、弦を付け替える時は、発振器の出力を最低にして電源を OFF にすること。

課題 1. 弦に垂直な方向に振動させたときの固有振動を観測する

課題 1-1. 基本振動, 2 倍振動, 3 倍振動の観測

- ① 直径 0.3 mm の被覆銅線を電磁石棒の先端の穴に通し、電磁石棒の先端に十分からませ、引っ張っても抜けないようにする。銅線のもう片方の先を下図のように丸めてよじり、その中に分銅をつるすためのフックの丸くなった先端部分をはめてつるす。

フックにおもりをつるしても弦からフックが落ちないようにすること。写真5のように、フックのついたほうの弦を架台の左端に取り付けられている滑車を介して鉛直にぶら下げる。その際フック、おもり、弦が机の脚等に触れないように注意すること。写真4に示すように、電磁石の台の手前の面が、架台の手前の面に一致するように平行に置くと、水平に張られた弦がちょうど架台に張られた物差しの端付近にくるようになる。



- ② フックにおもりのワッシャーを7枚つるす。このとき、おもり全体の質量は(8×9.5) g になる。

- ③ 電磁石棒の先端を架台に張ってある物差しで、70 cm の位置にくるように置く。このとき弦の長さが 70 cm となっていることを確認せよ。もしずれていた場合は、弦の長さが 70 cm になるように電磁石の位置を調整せよ。
- ④ 電磁石棒のコイルからのリード線はまだ発振器に接続させない。接続した場合ははずすこと。発振器の出力 POWER のつまみを左いっぱいに戻す (0 の方向)。発振器の右端の POWER のスイッチが OFF の方向に押されていることを確認せよ。ON の状態になっていたら必ず OFF の状態にせよ。次に発振器の電源コードのプラグを AC 100 V のコンセントに差し込む。発振器の POWER のスイッチを ON にする。発振周波数の表示ランプが点灯することを確認せよ。点灯しない場合は連絡せよ。発振器からの出力周波数が 20 Hz 付近になるように HERTZ ▽ または HERTZ △ のボタンを押して調整せよ。20 Hz 付近の周波数が得られたら、一度発振器の電源 POWER を OFF する。次に電磁石棒のコイルからのリード線を発振器の左端にある出力端子に接続する。接続の際、+、- を区別する必要はない。結線に間違いがなければ発振器の POWER を ON にする。次に、POWER のつまみを最大出力の約 1/4~1/5 程度右に回してみると電磁石棒が水平方向に振動しているのがわかる。指でそっと電磁石棒の先端に触れてみると振動しているのが確認できる。発振周波数を HERTZ △ のボタンを押して 1~2 Hz 程度上げ、ボタンを離し、弦の振動の様子を観察する。さらにまた 1~2 Hz 程度上げ、振動の様子を観察し、弦の振幅の大きくなる周波数をさがす。周波数を上げすぎたと思ったら HERTZ ▽ のボタンを押して周波数を下げる。このように、徐々に追い詰めて弦の振動の振幅が最大となるときの発振周波数すなわち、共振振動数を求める。これが基本振動である。基本振動が観測されたら、次に 2 倍振動、さらに 3 倍振動の固有振動を観測して、それぞれの共振振動数を記録する。

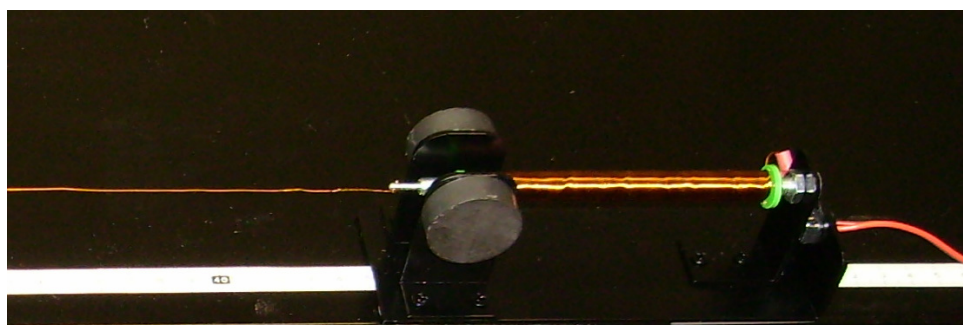


写真 4

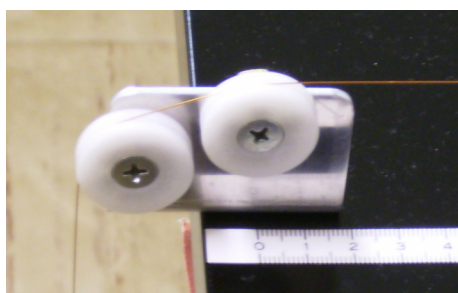


写真 5

注意：2倍振動の観測の際、弦の節の状態が安定せず上下に振動しはじめる場合がある。このようになったときには節の位置で弦を下側からそっと指でもちあげ弦の上下方向の振動をおさえてやると、安定した振動状態が得られる。また出力 POWER を小さくしてやると安定した振動が得られる場合がある。

課題1-2. 実験の整理・考察

課題1-1の測定値から、倍振動数の基本振動数に対する倍数を求めよ。直径0.3mmのこの銅線の線密度は 6.5×10^{-4} kg/m、また重力の加速度は 9.80 m/s²として、基本振動数の測定値と(3)式による計算結果とを比較検討せよ。

課題2. 弦の長さ一定の時の、張力と基本振動の共振振動数の関係を調べる

課題2-1. 共振振動数の測定

- ① 弦として、課題1で用いた、直径0.3 mmの被覆銅線をそのまま用いる。弦の長さが50 cmになるように電磁石棒を架台にセットする。フックにおもりのワッシャーを1個つるす(おもりの総質量は 2×9.5 g)。
- ② 発振周波数を調節して基本振動を観察し、その共振振動数を測定し記録する。
- ③ 同様にして、おもりのワッシャーを2枚ずつ増やし、弦の張力を変えて、それぞれの場合の基本振動の共振周波数を測定し解答用紙に指定されている表に記録する(フックもおもり1個と数える)。

課題2-2. 実験の整理・考察

おもりの重さに対する基本振動の共振振動数の関係をグラフにプロットし、その結果について考察せよ。このとき振動数とおもりの質量の平方根を両軸にとって、グラフにプロットすると、両者の関係が分かりやすい。

課題3. 張力一定の時の、弦の長さとおもりの質量と基本振動の共振周波数の関係を調べる

課題3-1. 共振振動数の測定

- ① 弦として、直径0.3 mmの被覆銅線を用い、フックにワッシャーを7個つるし、おもりの質量を (8×9.5) gとする。
- ② 電磁石棒を移動させ、弦の長さを、40 cmから80 cmまで10 cmおきに変化させ、それぞれの基本振動の共振振動数を測定し記録する。

課題3-2. 実験の整理・考察

弦の長さに対する基本振動の周波数の関係をグラフにプロットし、その結果について考察せよ。その際グラフの両軸をどのようにとれば、両者の関係が見やすくなるか考えてプロットしなさい。

課題4．弦の長さ，張力を一定として，線密度と基本振動の共振振動数の関係を調べる

課題4－1．共振振動数の測定

- ① いまセットされている直径 0.3 mm の銅線で，弦の長さを 50 cm，おもりの重さを(6×9.5) g とし，発振周波数を調節して弦に基本振動をつくり，その共振振動数を記録する。
- ② 弦を直径 0.2 mm の被覆銅線に変えて，同様な測定を行う。すなわち，弦の長さは 50 cm，おもりの重さを(6×9.5) g とし，基本振動の共振振動数を測定し記録する。
- ③ 同様な測定を直径 0.1 mm の被覆銅線（長さ約 1m に切って使用）に変えて基本振動の共振振動数を測定し記録する。

課題4－2．実験の整理・考察

ここで使用した被覆銅線の線密度はそれぞれ次のようになっている。

直径 0.1 mm の被覆銅線の線密度は， $7.3 \times 10^{-5} \text{kg/m}$

直径 0.2 mm の被覆銅線の線密度は， $2.9 \times 10^{-4} \text{kg/m}$

直径 0.3 mm の被覆銅線の線密度は， $6.5 \times 10^{-4} \text{kg/m}$

弦の線密度と，基本振動の共振振動数の間の関係について考察せよ。

これまでは，弦上のすべての位置で線密度が均一な弦について，その固有振動を調べた。つぎに，線密度が均一でない弦についての固有振動を調べる。

課題5．線密度が不連続な弦の振動

課題5－1．弦にビーズを等間隔につけた場合の振動を調べる

- ① ビーズの穴に下図のように，釣り糸を2回通しからませる。さらにその先に同じようにして，ビーズを釣り糸にからませ，合計7個のビーズを一本の釣り糸にからませる。糸の片方の端にはおもりのつるすフックをつける。釣り糸は弾力があるので縛りにくいが工夫してフックが外れないようにセットする。
- ② ビーズのついた，釣り糸のはしを電磁石棒の先端の穴に通し，糸を2回ほどしばり，引っ張っても糸が電磁石棒からぬけないようにする。釣り糸はすべりやすいので，糸をゆるめてやると，簡単にビーズの位置をすべらして，動かすことができる。まず最初のビーズが電磁石棒の先端から約 6 cm の位置にくるようにする。さらに約 6 cm はなれて2番目のビーズがくるようにする。このようにして，釣り糸に7個のビーズがそれぞれ，約 6 cm 間隔に固定された弦ができる（写真6）。したがって弦の長さは，約 48 cm となる。

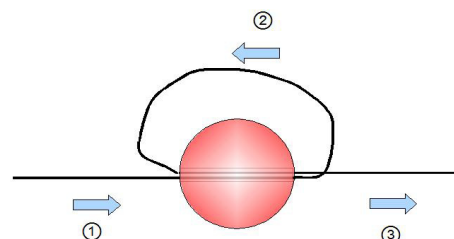




写真6

- ③ この弦にかかるおもりの個数を 4, 6, 8, 10 個（フックもおもり 1 個と数える）と変えて、それぞれの場合の基本振動の共振振動数を測定し記録する。

課題5-2. 実験の整理・考察

- ① おもりの質量に対する基本振動の共振振動数の関係をグラフにプロットし、その結果について考察せよ。
- ② 弦（ビーズのついた釣り糸）が均一な線密度の弦であったと仮定したときの基本振動の振動数を計算し、測定値と比較せよ。ただし、7 個のビーズと釣り糸の質量は、0.76g とする。
- ③ ②の結果について考察せよ。

ヒント：長さ L の間隔で質量 m のビーズがつながった弦がある。これが真っ直ぐになった状態を考える。いま、あるビーズが弦と垂直な方向に h だけ動いたとする。このとき、すぐ隣のビーズへのその動きが伝わる時間は次のようにして推定できる。隣のビーズが力を受けなくなる平衡の位置はビーズと同じ方向に $h/2$ 移動した位置である。平衡の位置からずれたビーズは、両側の弦の張力 T によって復元力を受ける。その運動は、バネ定数 $k=2T/L$ のバネで平衡の位置に束縛されている質量 m の質点に同じと考えてよい。このとき、平衡の位置に戻るまでの時間は、 h の大きさとは無関係に、 $\frac{1}{4} \times 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{mL}{2T}}$ となる。この時間に動きが長さ L だけ伝わったことになる。したがって、ビーズの動きが弦上で伝播する速度は

$$L \div \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{mL}{2T}} \right) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\frac{TL}{m}} \approx \sqrt{\frac{TL}{m}} \text{ になると推定できる。}$$

課題6. パラメトリック励振

課題6-1. 弦に平行な方向に振動させたときの固有振動（パラメトリック励振）を観測する

今までは振動源である電磁石棒の振動によって弦に垂直な方向に振動が与えられた。今回は写真5のように振動源である電磁石棒を弦に垂直にセットすることによって、弦と平行な方向に振動が与えられる。このようにして弦を振動させると、写真5において、振動棒が向かって右側に振動したとき弦は一直線に引っ張られる。そこから振動棒が左側に振動し始めると弦はゆるめられ、たとえば下側にたるみ

始める。そして、振動棒がもっとも左側に来たとき弦はもっともたるんだ状態になる。次に振動棒が右に動き始めると、弦は引っ張られて上昇しはじめ振動棒がもっとも右に来たとき弦は一直線に引っ張られる。さらに振動棒が左に動き始めると、弦は上向き速度を持っているため、慣性でそのまま上昇し上側にたるむ。さらに振動棒が右側に動き始めると弦は一直線に引っ張られる。以下このような振動を繰り返す。このような振動では、振動棒が2回振動する間に、弦は1回しか振動しない。

これから、(電磁石棒の振動数) = (弦の振動数) × 2 となる。

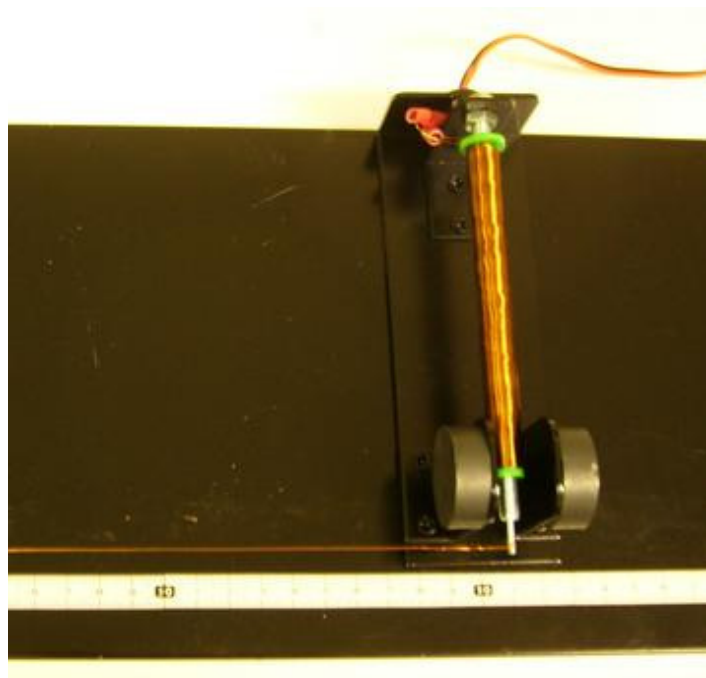


写真7

- ① 電磁石棒を写真7のように弦に垂直にセットする。直径0.3 mmの被覆銅線を電磁石棒の先端の穴に通し、弦にからませ、引っ張っても抜けないようにセットする。
- ② 課題1-1と同じように、弦の長さが70 cmとなるようにセットし、フックにおもりのワッシャーを7枚つるし、おもり全体の質量を(8×9.5) gとする。
- ③ 発振器の周波数を調整し、課題1-1で観測された基本振動の振動数付近で共振が得られることを確認する。
- ④ 課題1-1で観測された2倍振動の共振振動数付近で上下方向に大きな振幅で振動する共振が見られる。発振器の出力POWERを小さくして安定な振動が得られるように調整する。この振幅の大きな振動がパラメトリック共振の基本振動に対応する。さらに2番目の固有振動を観測して、それぞれの共振振動数を記録する。

課題6-2. 実験の整理・考察

課題1-1における測定値と比較検討せよ。また、課題1-1の観測の際2倍振動の節付近が安定せず振動しだすような現象が見られたと思うが、その理由を考えてみよ。

実験問題 2

実験に向けて：

実験のテーマは、おもりを糸でつるした単振り子の共振(あるいは共鳴)である。単振り子の周期 T は、つり下げるおもりの質量には関係せず、糸の長さ l と重力加速度 g を用いて、 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ で表すことができる。例えば、図1のように1本のひもに同じ長さの単振り子A、Cと、これと長さが異なる単振り子Bをつるし、Aを振動させると、Aと長さの異なるBの振れは小さく、Aと同じ長さのCが大きく振れる「共振」と呼ばれる現象が現れる。次に、Cの振り子が振れているときに、Aの振り子をいったん止めたのち新たにAを振動させると、振動させるタイミングの違いによりA、Cの振動の様子が異なることが観測される。これは、Cの振り子が一周期の振動の中のどの位置にあるときに、Aの振動が加えられたかによるものである。一周期の振動の中の位置は、振動を表す式 $y = A\sin\theta$ の θ で表され、この θ を「位相」という。

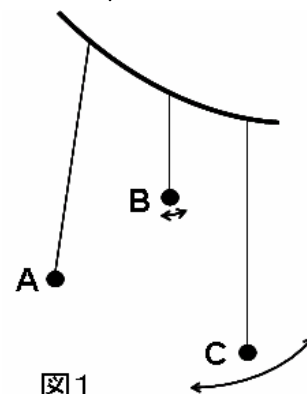


図1

この実験問題では、単振り子の支点を水平に一定の周期で振動させたり、つり下げている糸の長さを一定の周期で伸ばしたり縮めたりする外部からの作用と、単振り子の振動との間の共振について調べる。共振は互いの振動の振動数に関係するばかりではなく、どのような位相にあるかにより、それぞれ現れる現象が異なる。初めに、外部からの作用と共振を起こす単振り子の振動数を調べ、次に、その振動数からわずかにずれた振動数を単振り子に持たせた場合に現れる現象を調べる。さらに、外部からの作用と単振り子の動きの間の位相の違いにともない、共振がどのように変化して現れるかを観測する。位相を変化させるには、外部から作用している振動に対して、単振り子を振らせ始めるタイミングを変えることで行うが、なれていないと初めのうちは難しく感じるかもしれないので注意深く行う必要がある。応用例として、走行クレーンで荷物を運ぶときに生じた荷物の揺れに対して、どのようにクレーンを動かしたら揺れを止められるか、また、ブランコをこぐときに重心をどのように移動させたら効果的か、について考察する。共振現象は、力学的な振動のみならず電磁気学的な振動でも数多く見られる、普遍的で物理的に大変興味深い現象であり、幾多の応用と共に抑制手法が考案されている。

実験の目的：

おもりを糸でつるした単振り子は一定の周期で振動する。(1) 支点を一定の周期で水平に振動させながらおもりを振らせると、おもりはどのような動きをするであろうか。また、(2) 糸の長さを一定の周期で伸ばしたり縮めたりさせながらおもりを振らせると、おもりはどのような動きをするであろうか。実験では、単振り子に現れる2種類の共振現象が、どのような振動数のときに観測されるか、また、位相の変化にともないどのように現象が変わって現れるかを、直接眼で見て確認し理解する。

実験で使用する装置・物品の説明：

実験装置の全体図を図2に示す。

実験装置は、(1) モータ (毎分 80 回転)、(2) 水平振動板、(3) 単振り子 (2 種類)、(4) 糸長および振れ角測定スケール付背面ボード、(5) おもり支え板、で構成されている。

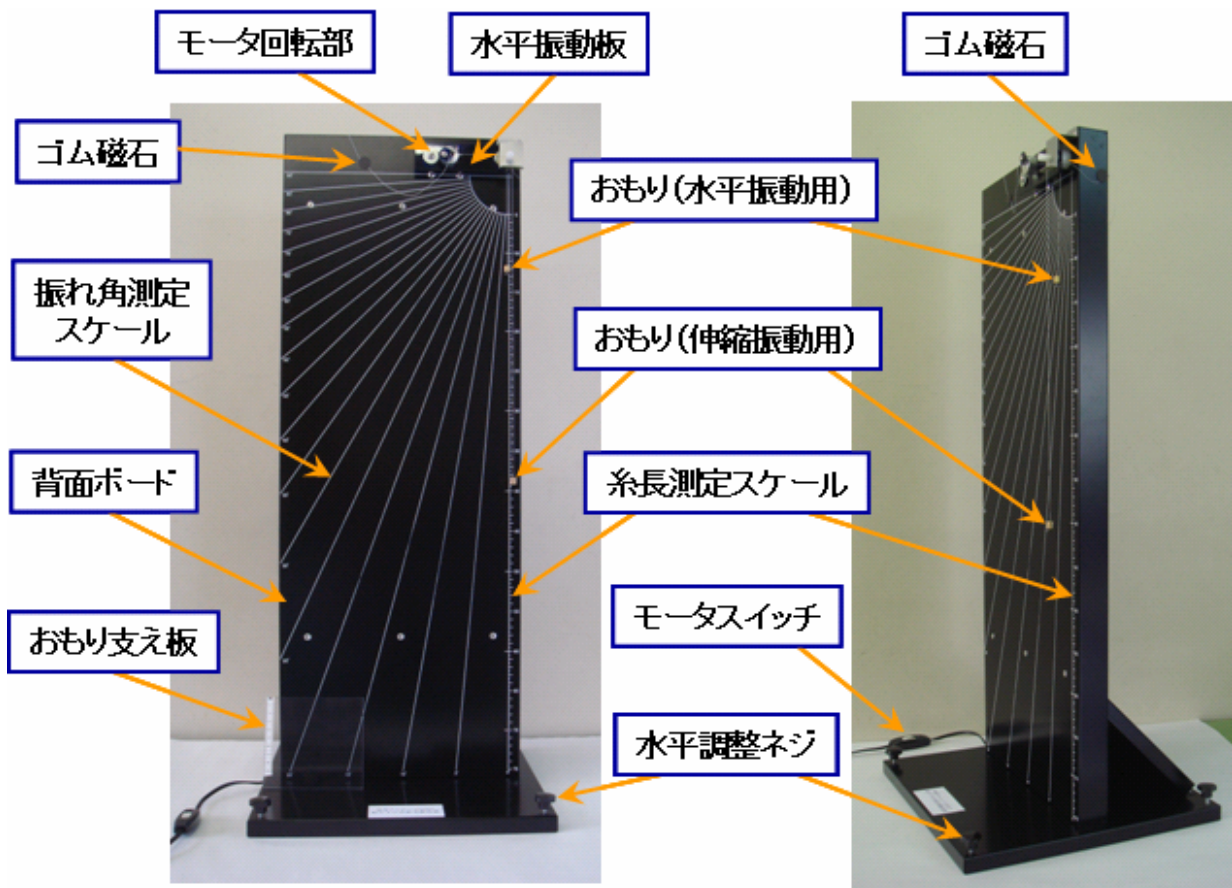


図2 正面図

側面図

装置上部の拡大図を図3に示す。

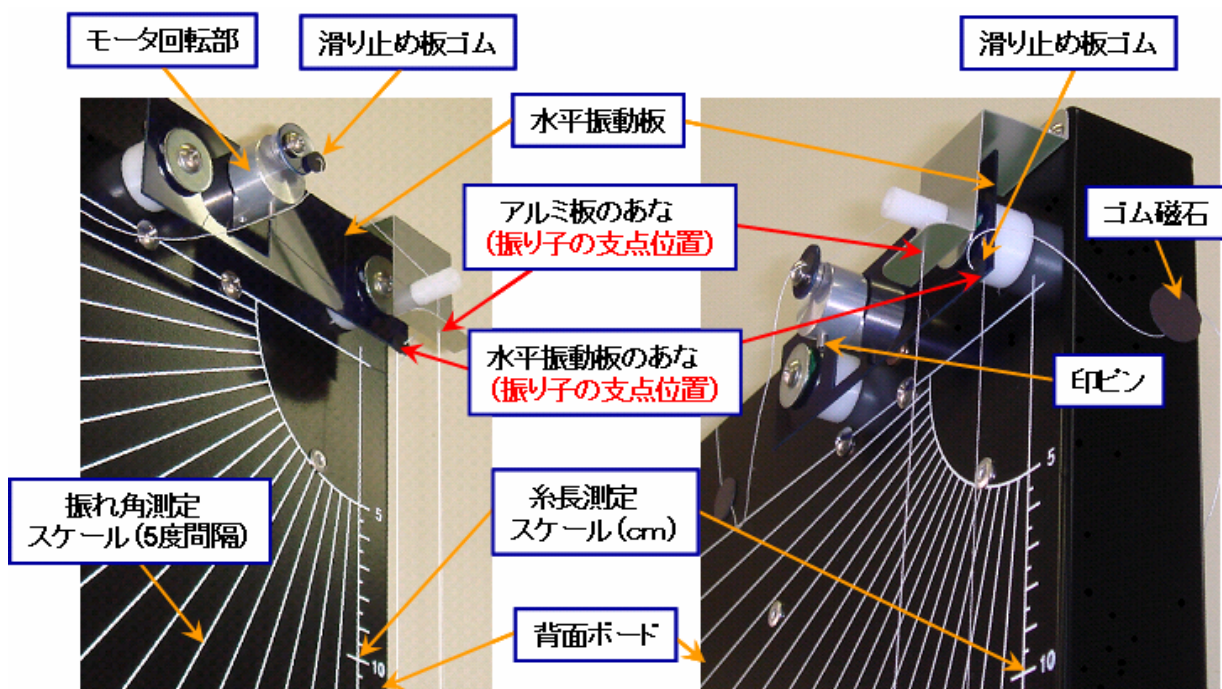


図3 上部拡大図

以下各物品について説明する。

◆モータ

交流 100 V を入力とし、毎分 80 回転の回転運動を行う。実験装置の下方に付いているスイッチのオン・オフにより、回転運動の開始・停止を行う。

◆水平振動板

モータの出力回転を、水平振動に変える。振動板はプラスチック平板で下方の隅に小さい孔（あな）が開けられ、糸を通して振り子の支点としている。支点は水平に -5 mm から $+5\text{ mm}$ の間を単振動する。

◆モータ回転部

モータの回転軸から少しずらした位置に小さなプラスチック板がゆるく取り付けられ、板の隅の小さい孔（あな）に糸が通されている。糸の一方は滑り止め板ゴム（②）に通され、他方は鉛直下方に曲げられて、アルミ板の小さい孔に通されたのち、おもりをつり下げている。アルミ板の孔が振り子の支点で、振り子の糸の長さは -15 mm から $+15\text{ mm}$ にわたって伸びたり縮んだりする。また、モータの回転が見やすいように、回転部に印ピンが目印としてとり付けられている。

◆滑り止め板ゴム 4枚（①，②，③，④） 直径 $\sim 5\text{ mm}$ ，厚み $\sim 1\text{ mm}$

糸を通した針により板ゴムに通された糸は、ゴムの弾力で滑りが止められている。板ゴムは、水平振動板の孔の直上（①）と、モータ回転部のプラスチック板の孔の直上（②）、および各振り子のおもりの下部（③，④）に、それぞれ取り付けられている。

◆単振り子 2セット

振り子のおもりは真鍮（しんちゅう）製の円柱（直径 8 mm ，高さ 8 mm ）で中心軸に沿って小さい孔が開けられており、その孔にポリエステル製のミシン糸が通されている。下部に滑り止め板ゴム（③，④）があり、糸が固定されている。各単振り子の支点は、水平振動板の小さい孔と、アルミ板の小さい孔の位置である。糸の長さを変えるときは、板ゴム（①）あるいは（②）を糸に沿ってずらして変える。糸が切れたり抜けてしまった場合は、新しい糸を通した針を用いて振り子を再現する。2種類の振り子は、モータの回転にともない同時に振動を始めるので、使用していない振り子の糸は短くしておき、測定対象の振り子の振れの妨げにならないようにする。

◆ゴム磁石 2枚

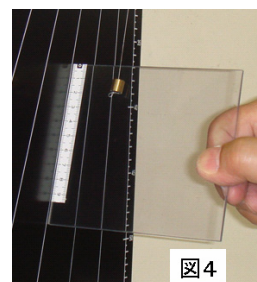
滑り止め板ゴム（①，②）を通したのちの余った糸は、少したるませてゴム磁石で背面ボードにはさんだのち、裏側の糸巻きで巻き取る。

◆背面ボード

黒塗りのステンレス板で、前面に 5 mm 間隔の糸長測定スケールと 5 度間隔の振れ角測定スケールが白線で目盛られている。ボードの下側には四隅に水平調整用のネジが付けられており、実験を始めるまえに、背面ボード上の糸長測定スケールの白線が、おもりを下げている糸の鉛直線と平行になるように正面と側面から見ながらネジを回して調整する。

◆おもり支え板（補助スケール付）

$3\text{ mm}\times 120\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ のプラスチック板で、図4のように振り子を振らせ始めるとき、おもりを支えるのに使用する。また、 1 mm 間隔の目盛りが付けられており、 5 mm 間隔の糸長測定スケールを補い、より精度よく糸の長さを求めるとき、糸長測定スケールにあてがって測定する。



◆ストップウォッチ

振り子の周期の測定に用いる。スタート・ストップ及びリセットのボタンを右図に示す。



課題 1. 単振り子による重力加速度の測定

課題 1-1. 単振り子の実験

単振り子の周期 T と糸の長さ l との関係式 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ を用いて、重力加速度 g を算出し、標準値 ($g = 9.80 \text{ m/s}^2$) と比較する。

- (1) 水平振動用振り子の支点が糸長測定スケール上にくるように、モータを短時間オン・オフして動かし、支点の位置を調整しなさい。次に、板ゴム①をずらして糸の長さを約 0.7 m にして静止させ、おもりを下げている糸の鉛直線を参考にして、背面ボードが垂直に立つように、正面と側面の両方から見てボードの下側のネジを回し調整しなさい。
- (2) 板ゴム①をずらして単振り子の糸の長さ l (支点からおもりの重心までの距離) を 0.640 m になるように調整しなさい。
- (3) おもり支え板におもりをのせ、図 4 に示されているように、振れ角測定スケールに沿って支え板を 10 度に傾け、おもりを静止させたのち、支え板をスケールに沿って静かに下方に滑らせ、静かにおもりをはなしなさい。
- (4) ストップウォッチを用いて、 10 周期の時間を測定しなさい。
- (5) 同様の測定を 3 回くりかえし、周期 T を求めなさい。
- (6) 糸の長さ l を 0.490 m , 0.360 m , 0.250 m , 0.160 m に変え、 10 周期の時間をそれぞれ 3 回測定して、各糸の長さに対する周期 T を求めなさい。

課題 1-2. 実験の整理・考察

- (1) 糸の長さの平方根を横軸に周期を縦軸にとり、測定点を記入してグラフを作り、各点が一つの直線の近傍に位置することを確かめなさい。
- (2) 測定により得られた周期から重力加速度 g を算出し、平均値を記入しなさい。

課題 2. 支点の水平振動と単振り子の振動との共振

課題 2-1. 共振振動数の実験

- (1) 単振り子の振動数 $f = 1/T$ と糸の長さ l の関係式を求めなさい。また、モータの回転振動数 $f_s (= 80/60 = 1.33 \text{ Hz})$ に一致する振動数を持つ単振り子の糸の長さ l_s , 及び l_s の $1/2$ 倍, 2 倍, 3 倍, 4 倍の糸の長さを、重力加速度の標準値 ($g = 9.80 \text{ m/s}^2$) を用いて計算しなさい。
- (2) 支点の直上の板ゴム (①) をずらし、糸の長さを l_s の 4 倍にしなさい。他方の振り子の糸

の長さは測定の邪魔にならないように短めにしなさい。

- (3) おもりをのせた支え板をスケールに沿って 10 度に傾け、モータを始動させて、おもりが支え板上で上下することを確認しなさい。
- (4) 支え板をスケールに沿って静かに下方に滑らせて、おもりが上部に来たときに振り子を振らせ、同時にストップウォッチをスタートさせなさい。
- (5) 振動開始後 5 秒経ったのちの振れ角の振幅を、振れ角測定スケールを用いて測定し、記録しなさい。同じ測定を 2 回繰り返し、平均値をとりなさい。
- (6) 振り子の糸の長さを l_s の 3 倍, 2 倍, 1 倍, 1/2 倍にして、振動開始後 5 秒経ったのちの振れ角の振幅を、それぞれ 2 回測定し、平均値をとりなさい。

課題 2-2. 実験の整理・考察

- (1) 振り子の糸の長さ ($l_s/2$, l_s , $2l_s$, $3l_s$, $4l_s$) の値と、測定した 5 秒後の振れ角の振幅 (平均値) を記入しなさい。
- (2) 共振し振幅が増大する時の振り子の糸の長さ l_r を求めなさい。以下の課題ではこの l_r の値を用いなさい。

課題 2-3. 共振近傍での振動の実験

共振を起こす振動数からわずかにずれた振動数を持つように振り子の糸の長さを変えると、振り子の振幅がゆっくりと増えたり減ったりするうなりが現れる。この実験では、うなりを直接眼で見て確認し理解する。

- (1) 共振を起こす振り子の糸の長さ l_r より 0.020 m だけ糸の長さを短くしたり, 0.020 m, 0.030 m, 0.040 m, 0.050 m だけ糸の長さを長くしたりして、以下の (2), (3) の実験を繰り返しなさい。
- (2) 糸の長さを確かめたのち、おもりをのせた支え板をスケールに沿って 10 度に傾けて静かに下方に滑らし、おもりが最も上がったときにおもりをはなしなさい。振り子の振幅は振らせ始めてから徐々に大きくなり、最大になったのちに小さくなり始め、最小になったのちにまた大きくなることをくりかえすと予想される。
- (3) 振り子を振らせ始めてから、最初とその次に現れる最小振幅の間の時間差 (うなりの周期) T を、ストップウォッチを用いて測定しなさい。同じ測定を 3 回繰り返しなさい。

課題 2-4. 実験の整理・考察

- (1) l_r の糸の長さを持つ振り子の振動数 f_r を求めなさい。また、 $\Delta l = -0.020$ m, 0.020 m, 0.030 m, 0.040 m, 0.050 m のそれぞれの場合について、 $l_r + \Delta l$ の糸の長さを持つ振り子の振動数 $f_r + \Delta f$ を算出し、 f_r との振動数の差 Δf を記入しなさい。さらに、それぞれの場合について測定したうなりの周期の平均値を記入しなさい。
- (2) 振動数 $f_r + \Delta f$ の振り子固有の振動に、振動数 f_r の外からの作用が加わった場合を単純化したモデルの式 $y = \sin(2\pi f_r t) + \sin(2\pi(f_r + \Delta f)t)$ を考える。合成された振動の振幅の変化 (うなり) の周期 T を表す式を求めなさい。

必要なら、三角関数の公式 $\sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$ を用いなさい。

また、2 種の振動を図に描き、うなりの発生を説明しなさい。

- (3) 方眼紙に、糸長を横軸にうなりの周期を縦軸にして実験点を記入し、上記の単純化した式の結果と比較しなさい。横軸と縦軸を工夫しグラフを見やすい形にするのも良い。

課題 2 - 5. 共振の位相依存性の実験

支点の水平振動と振り子の振動との共振では、振り子が振れ始めてから振幅が徐々に大きくなる場合と、振れ始めてから振幅が徐々に小さくなり、ほとんど振れなくなってからまた振幅が大きくなる場合がある。この2つの場合の違いの原因は、振り子を振らせ始めたときの支点の振動の位相の違いにある。

- (1) 糸の長さを l_p に合わせ、おもりをのせた支え板を 10~30 度のいずれかのスケールの線に合わせなさい。水平振動板（プラスチック平板）、またはモータ回転部の印ピンの動きに注目し、振り子を振らせ始めるタイミングとして、支点の位置が振り子に、
- 最も近づいているとき、
 - 最も遠ざかっているとき、
 - 前兩者のちょうど中間で遠ざかる向きするとき、
 - 同じくちょうど中間で近づく向きするとき、
- に分けて、振り子を振らせ始めなさい。振らせ始めるときの支点の位置と振り子の振幅の変化とに注目して実験しなさい。良い実験をするために、振り子の振り幅を変えるなどして、現象が現れ易くなるように工夫しなさい。

課題 2 - 6. 実験の整理・考察

- 振り子の振幅が、振らせ始めてから徐々に最も大きく増大し続けるときの、振動開始時の支点の位置は、(a), (b), (c), (d) の何れの場合になるか、見いだしなさい。
- 振り子の振幅が、振らせ始めてから最も大きく減少し、ほとんど振れなくなったのちに増大し始めるときの、振動開始時の支点の位置は、(a), (b), (c), (d) の何れの場合になるか、見いだしなさい。
- 前問の (1), (2) の場合、時間が経つにつれおもりがどのように動いたか、時間を横軸に振れ角を縦軸にとり大体の動きを図示しなさい。またどうしてその様な動きになるのか、支点の動きと振り子の動きを図に描いて説明しなさい。
- 室内の走行クレーンで荷物をつり上げ、水平に運んで止めたところ荷物が揺れ始めた。荷物を振り子のおもり、ワイヤーロープを糸と見なして、支点を左右に動かせるとしたとき、揺れを小さくするには荷物の動きに対して支点をどのように動かしたら良いか、実験結果と対応させて説明しなさい。

課題 3. 糸の伸縮振動と単振り子の振動との共振

課題 3 - 1. 共振振動数の実験

- (1) 単振り子の振動数 $f = 1/T$ と糸の長さ l との関係式を求めなさい。モータの回転振動数 $f_s (= 80/60 = 1.33 \text{ Hz})$ に一致する振動数をもつ単振り子の糸の長さ l_s と、 l_s の 2 倍, 3 倍, 4 倍, 5 倍の糸の長さを算出しなさい。

- (2) モータ回転部の滑り止め板ゴム (②) を糸に沿ってずらし、伸縮振動用の振り子の糸の長さを l_s の 5 倍の長さになるようにしなさい。他方の振り子の糸は短くするなど、測定の邪魔にならないように工夫しなさい。
- (3) おもりをのせた支え板をスケールに沿って 10 度に傾け、モータを回転させて、おもりが支え板上を上下に動くことを確かめなさい。
- (4) 支え板をスケール線に沿って 10 度そのまま静かに下方に滑らせて、おもりが上りきったときに支え板から外して振らせ始め、同時にストップウォッチをスタートさせなさい。
- (5) 振らせ始めてから 30 秒経ったのちの振れ角の振幅を、振れ角測定スケールを用いて測定し記録しなさい。同じ測定を 2 回繰り返し、平均値を求めなさい。
- (6) 同様にして、振り子の糸の長さを l_s の 4 倍, 3 倍, 2 倍, 1 倍にして、振らせ始めてから 30 秒経ったのちの振れ角の振幅を、2 回ずつ測定し、平均値を求めなさい。

課題 3 - 2. 実験の整理・考察

- (1) 振り子の糸の長さ ($l_s, 2l_s, 3l_s, 4l_s, 5l_s$) の値と、測定した 30 秒経過後の振れ角の振幅 (平均値) を記入しなさい。また、共振し振幅が増大するときの振り子の糸の長さ l_r 、および振動数 f_r を求めなさい。
- (2) 糸を伸ばしたり縮めたりして振動させるときに共振する振子の長さが、支点を水平に振動させるときに共振する長さとは異なるのは何故だと考えるか、理由を説明しなさい。

これよりチャレンジ問題：以下の実験は時間に余裕がある場合に行いなさい。
解答内容に応じて加点します。

課題3-3. うなりの観測

糸の伸縮振動と単振り子の振動との共振条件の近くで発生するうなりを、直接眼で見て確認し理解する。

- (1) 共振する振り子の糸の長さ l_r より例えば $\Delta l = 0.020 \text{ m}$ だけ長くしなさい。
- (2) 支え板をスケールに沿って 10 度に傾け、同様な方法で振り子を振らせ始めなさい。振り子の振幅は振らせ始めたあと徐々に大きくなって飽和し、その後減少し始めて最小振幅になったのち、また大きくなることを繰り返すと予想される。
- (3) 振り子を振らせ始めてから、最初とその次に現れる最小振幅の間の時間差（うなりの周期） T を、ストップウォッチを用いて測定しなさい。同じ測定を 3 回繰り返しなさい。
- (4) 余裕があれば、他の Δl の場合について上記と同様の測定をしなさい。

課題3-4. 実験の整理・考察

- (1) 糸の長さ l_r を持つ振り子の振動数 f_r および $l_r + \Delta l$ の糸の長さ持つ振動数 $f_r + \Delta f$ を算出し、 f_r との振動数の差 Δf を記入しなさい。
- (2) 課題2-4(2) で用いた単純化した式から得られた振幅変化の周期と実験値とを比較し考察しなさい。

課題3-5. 共振の位相依存性の実験

- (1) 糸の長さを l_r にして、おもりをのせた支え板をスケール線に沿って 10 度に傾けなさい。モータ回転部に付いている印ピンの動きと糸の動きに注目し、(a) 糸が最も長くなったとき、(b) 糸が最も短くなったとき、(c) 前両者のちょうど中間で短くなる向きするとき、(d) 同じくちょうど中間で長くなる向きするとき、の何れのとときに振り子を振らせ始めたら、①振り子の振れが大きくなり続けるか、また②振り子の振れが始め小さくなりその後大きくなり始めるかを、それぞれ観測しなさい。

課題3-6. 実験の整理・考察

- (1) 振り子の振幅が最も大きく増大するときと、始め最も大きく減衰しその後増大するときは (a), (b), (c), (d) のどの場合か求めなさい。
- (2) 振幅が最も大きく増大するとき、振幅の増大理由を必要なら支点の運動とおもりの運動を図に描くなどして説明しなさい。
- (3) 振り子の振幅が増大するときの原理は、ブランコをこいで振れを大きくする場合の原理と同じである。ブランコをこぐ場合の重心の移動はどのように行われているのか、最も大きく増大する場合の実験結果と対応させ説明しなさい。

物理チャレンジ2007 第2チャレンジ 実験問題 測定例

実験問題1の解答用紙 (両面3枚)

第2チャレンジ番号	氏 名

課題1-1

測定結果を表の2行目にまとめよ。

共振モード	基本振動	2倍振動	3倍振動
共振振動数 (Hz)	24.9	50.3	75.1
基本振動数 との比	1	2.02	3.02

課題1-2

結果の考察

- ① 観測された倍振動数と基本振動数のあいだにはどのような関係がみられるか。必要とあれば表の空欄部分を活用せよ。 **基本振動数の2倍、3倍になっている。**
- ② 観測された基本振動数の測定値と(3)式から推定される振動数の計算結果と比較検討せよ。

$$n = 1 \text{ と置いた(3)式: } f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \text{ に}$$

$L = 0.7 \text{ m}$, $\rho = 6.5 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$, $T = 8 \times 9.5 \times 10^{-3} \times 9.8 \text{ N}$ を代入して計算すると、

$$f_1 = 24.2 \text{ Hz}$$

測定値と計算値はほぼ一致している。

20

点

課題 2-1

測定結果を表の 2 行目にまとめよ。

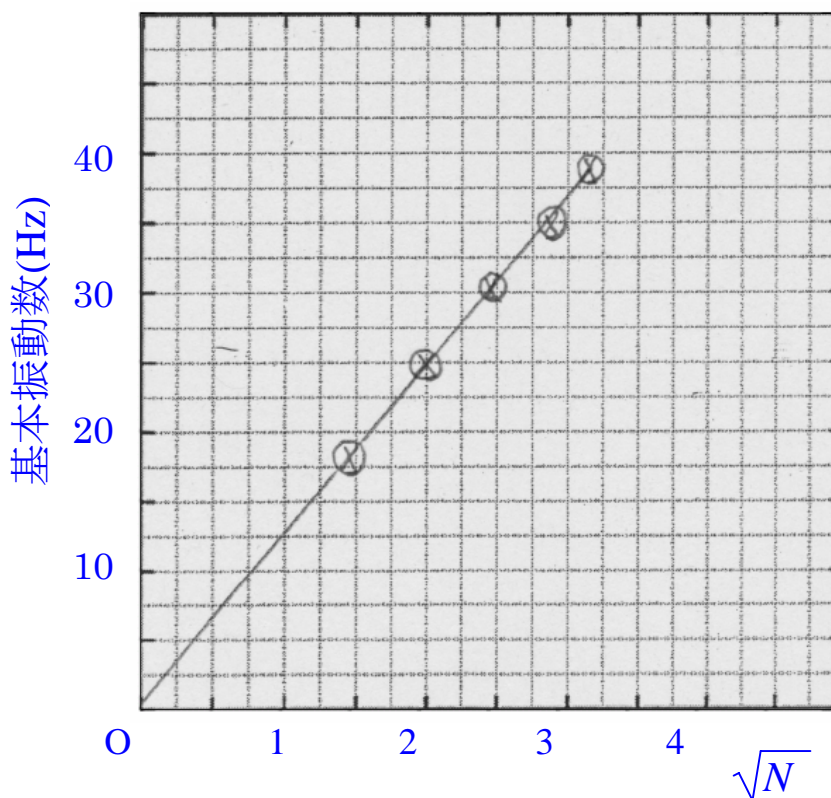
おもりの 個数	2	4	6	8	10
基本振動数 (Hz)	18.0	25.1	30.5	34.8	39.0
\sqrt{N}	1.41	2.00	2.45	2.83	3.16

課題 2-2

測定結果のまとめと考察

必要とあらば下のグラフ用紙や上表の空欄部分を活用せよ。

おもりの個数を N と置く。 $T \propto N$ であるので(3)式から、 $f \propto \sqrt{N}$ となることが予想される。基本振動数 f とおもりの個数 N の平方根との関係をグラフにすると、原点を通る直線となり、 $f \propto \sqrt{N}$ が確認された。



15

点

第2チャレンジ番号	氏 名

課題3-1

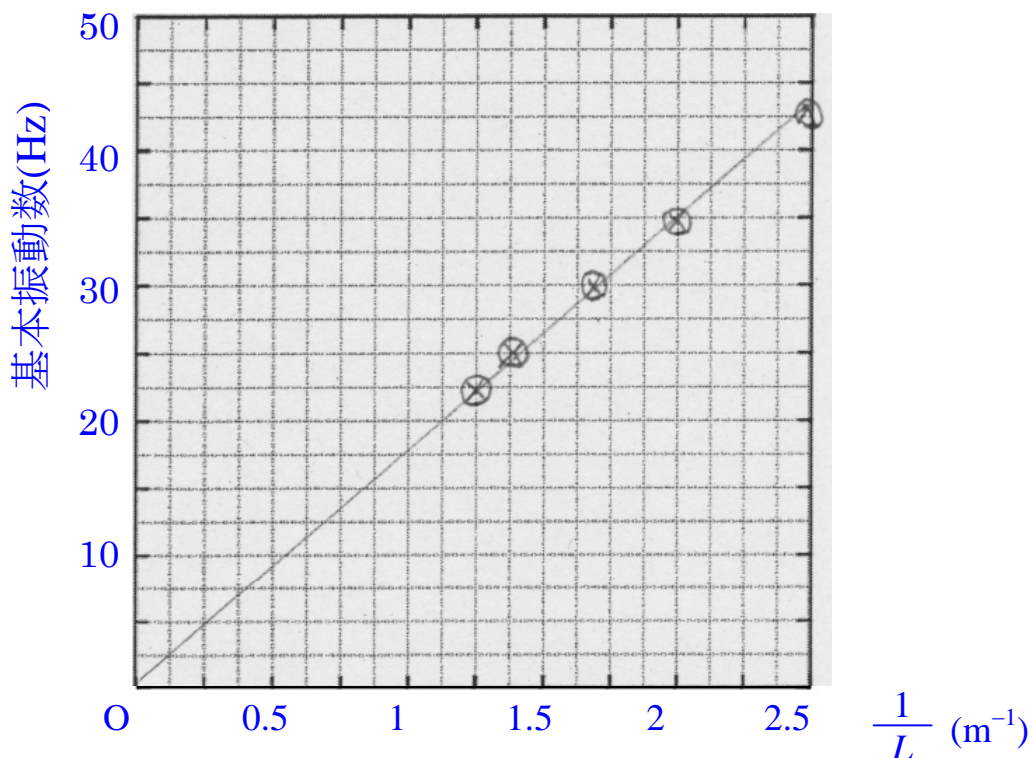
測定結果を表の2行目にまとめよ

弦の長さ (cm)	40	50	60	70	80
基本振動数 (Hz)	43.4	34.5	29.3	25.4	22.4
$\frac{1}{L}$ (m ⁻¹)	2.50	2.00	1.67	1.43	1.25

課題3-2

測定結果のまとめと考察

必要とあらば下のグラフ用紙や上表の空欄部分を活用せよ。

弦の長さを L と置く。(3)式から、 $f \propto 1/L$ となることが予想される。基本振動数 f と弦の長さ L の逆数との関係をグラフにすると、原点を通る直線となり、 $f \propto 1/L$ が確認された。

15 点

課題4-1

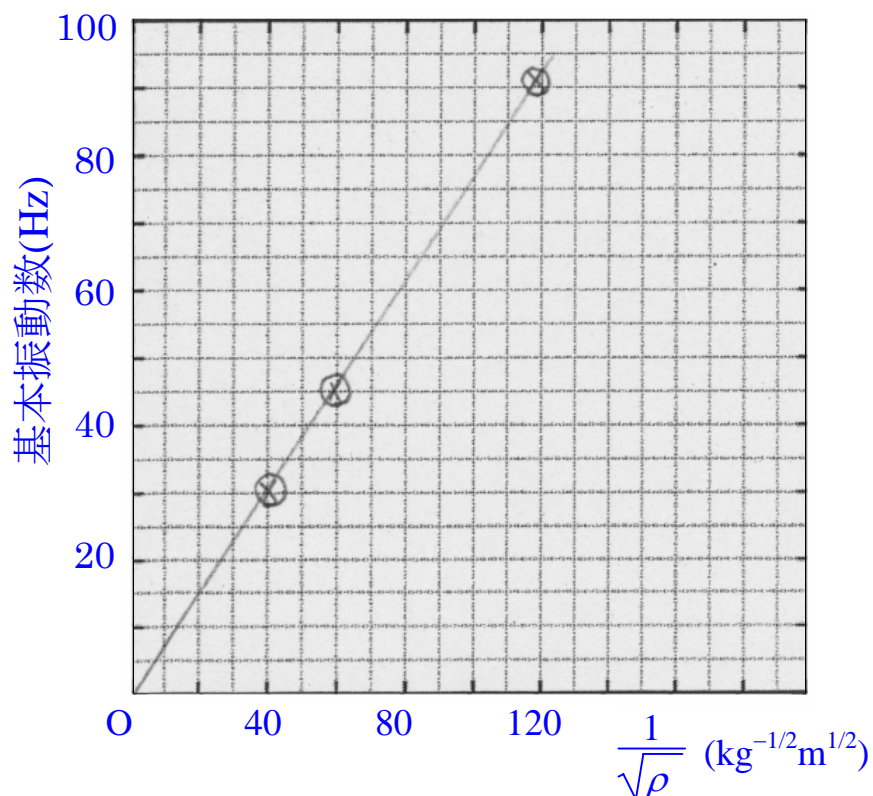
測定結果を表の2行目にまとめよ

弦の直径(mm)	0.3	0.2	0.1
基本振動数 (Hz)	30.8	44.9	91.8
線密度(kg/m)	6.5×10^{-4}	2.9×10^{-4}	7.3×10^{-5}
$\frac{1}{\sqrt{\rho}}$ ($\text{kg}^{-1/2}\text{m}^{1/2}$)	39	59	117

課題4-2

測定結果のまとめと考察

必要とあらば下のグラフ用紙や上表の空欄部分を活用せよ。

弦の線密度を ρ と置く。(3)式から、 $f \propto 1/\sqrt{\rho}$ となることが予想される。基本振動数 f と弦の線密度 ρ の平方根の逆数との関係をグラフにすると、原点を通る直線となり、 $f \propto 1/\sqrt{\rho}$ が確認された。15
点

第2チャレンジ番号	氏名

課題5-1

測定結果を表の2行目にまとめよ。

おもりの 個数	4	6	8	10	12
基本振動数 (Hz)	15.6	19.1	21.9	24.5	26.8
\sqrt{N}	2.00	2.45	2.83	3.16	3.46

課題5-2

測定結果のまとめと考察

必要とあらば下のグラフ用紙や上表の空欄部分を活用せよ。

① $f \propto \sqrt{N}$ となることから、基本振動数が張力の平方根に比例することが分かった。

② 一様な弦と仮定すると線密度は、 $\rho = 0.76 \times 10^{-3} / 48 \times 10^{-2} = 1.58 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$ となる。

おもりの数 $N=4$ のとき、 $T = 4 \times 9.5 \times 10^{-3} \times 9.8 = 0.372 \text{ N}$ であり、 $L = 0.48 \text{ m}$ として、

基本振動数を計算すると、

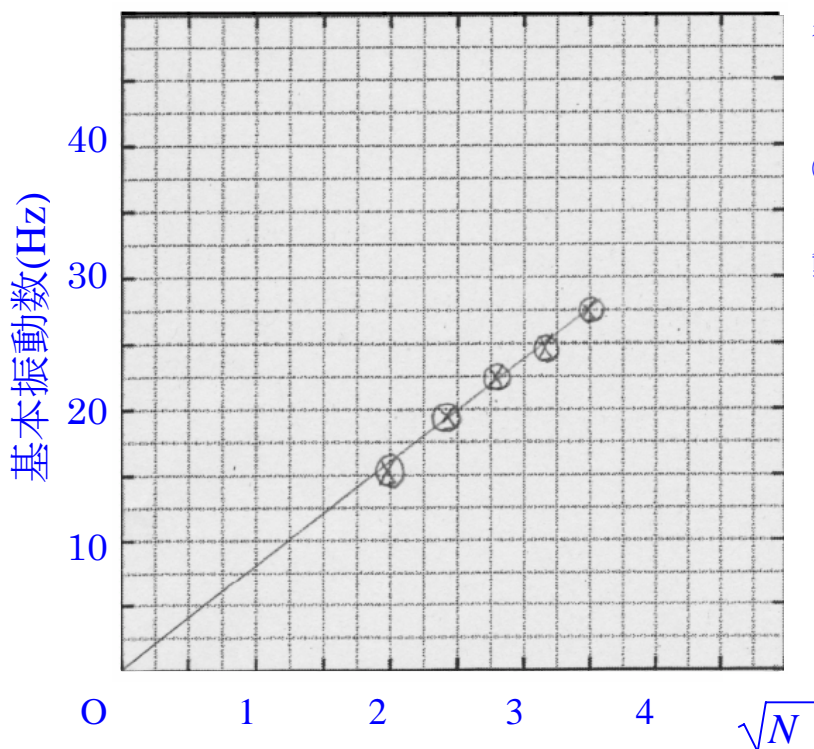
$$f = 15.8 \text{ Hz}$$

となり、測定値とほぼ一致している。

③ ②の結果から、長さ L の間隔で質量 m のビーズが7個つながった弦の基本振動では、波の速さは弦を線密度 $\rho = m/L$ の一様な弦とみなしたときの速さ

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho}} = \sqrt{\frac{TL}{m}}$$

にほぼ一致することが分かった。



20

点

課題6-1

測定結果を表にまとめよ。

基本振動数(Hz)	47.7
2倍振動数(Hz)	98.0

課題6-2

測定結果の考察

弦の一端に、弦に平行な振動を与えると、弦に垂直な振動を与えた課題1-1の場合の2倍振動数(50.3 Hz)の近く(47.7 Hz)で大きな基本振動の共振が見られ、その約2倍の振動数(98.0 Hz)で2倍振動の共振が観測された。

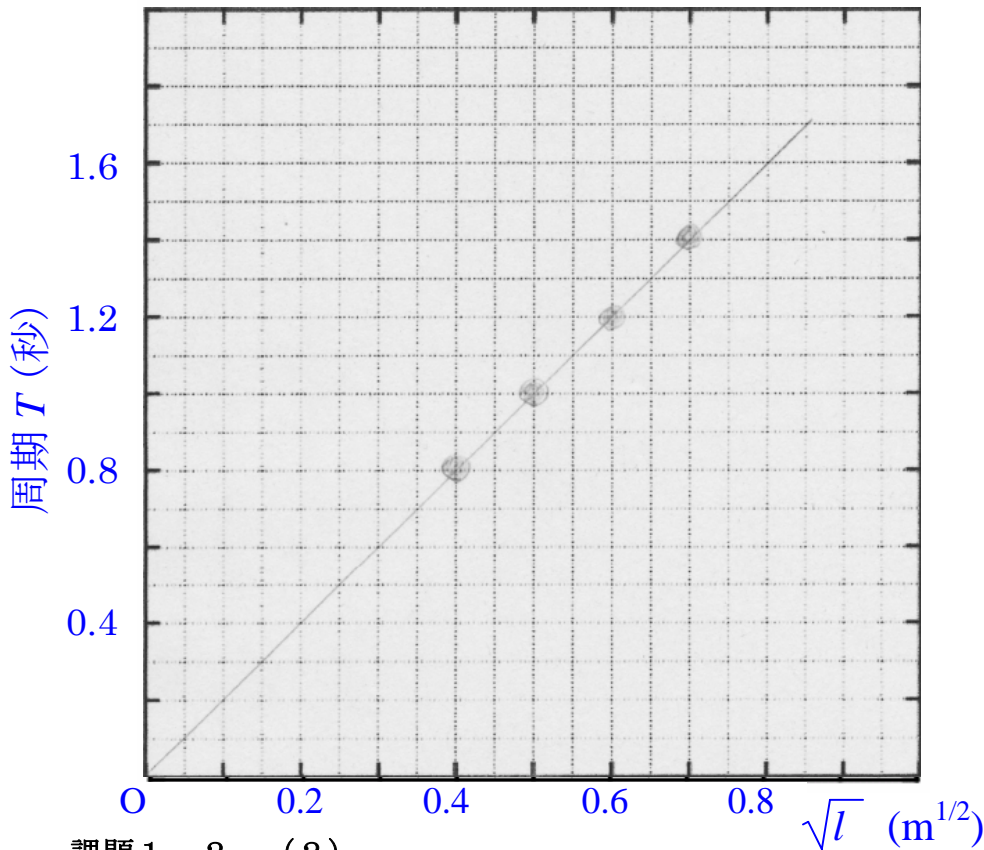
課題1-1の2倍振動のとき、節付近が不安定な振動をしたのは、ここで観測したパラメトリック励振の基本振動が同時に起こったためと考えられる。

15
点

実験問題 2 の解答用紙 (両面 4 枚)

第 2 チャレンジ番号	氏 名

課題 1-2 (1)



5

点

課題 1-2 (2)

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$

5

点

課題 2-2 (1)

10

点

	$l_s/2$	l_s	$2l_s$	$3l_s$	$4l_s$
長さ(m)	0.070	0.140	0.281	0.421	0.561
振幅(度)	1×10^1	4×10^1	1×10^1	1×10^1	1×10^1

課題 2-2 (2)

$$l_r = 0.140 \text{ m}$$

5 点

課題 2-4 (1)

$$f_r = 1.33 \text{ Hz}$$

15 点

Δl (m)	-0.020	0.020	0.030	0.040	0.050
Δf (Hz)	0.108	-0.084	-0.122	-0.156	-0.187
うなりの 周期 (s)	~9	~10	~8	~6	~5

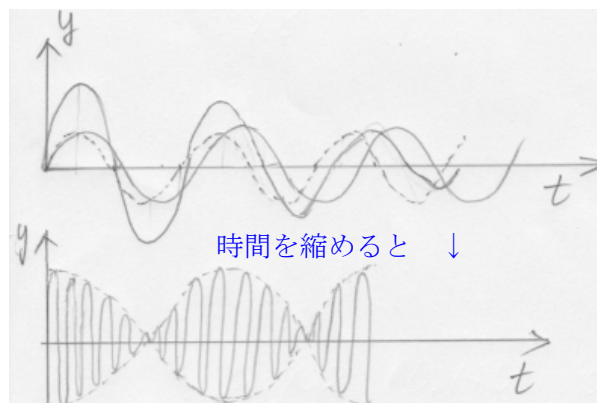
課題 2-4 (2)

$$T = 1/|\Delta f|$$

10 点

$$y = \sin(2\pi f_r t) + \sin(2\pi(f_r + \Delta f)t) = 2\cos(\pi\Delta f t) \sin(2\pi(f_r + \Delta f/2)t)$$

2つの振動数の平均値 $f_r + \Delta f/2$ の振動の振幅が、 $|\cos(\pi\Delta f t)|$ で振動する。これは2つの振動数の差の半分 $|\Delta f|/2$ の2倍の振動数 $|\Delta f|$ で増減する。

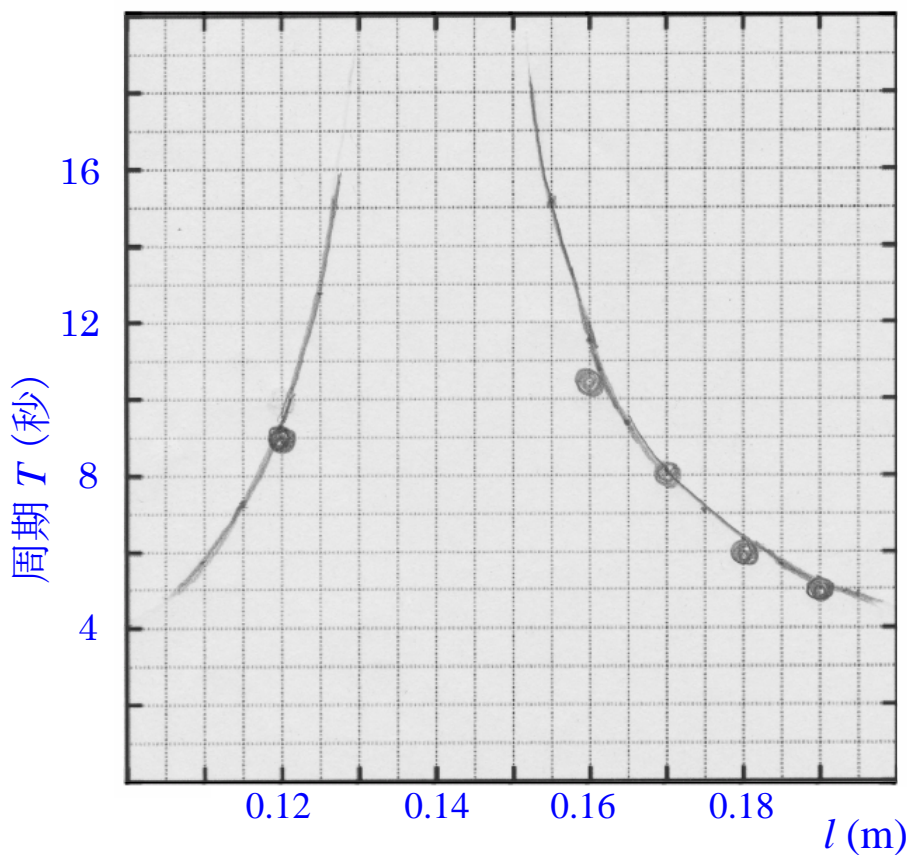


山と山が重なる ↑

↑ 山と谷が重なる

第2チャレンジ番号	氏名

課題2-4 (3)

5
点

(2)で求めたうなりの周期(曲線)と実測(黒丸)の値はほぼ一致した。

課題2-6 (1)

支点の初期位置	(c)
---------	-----

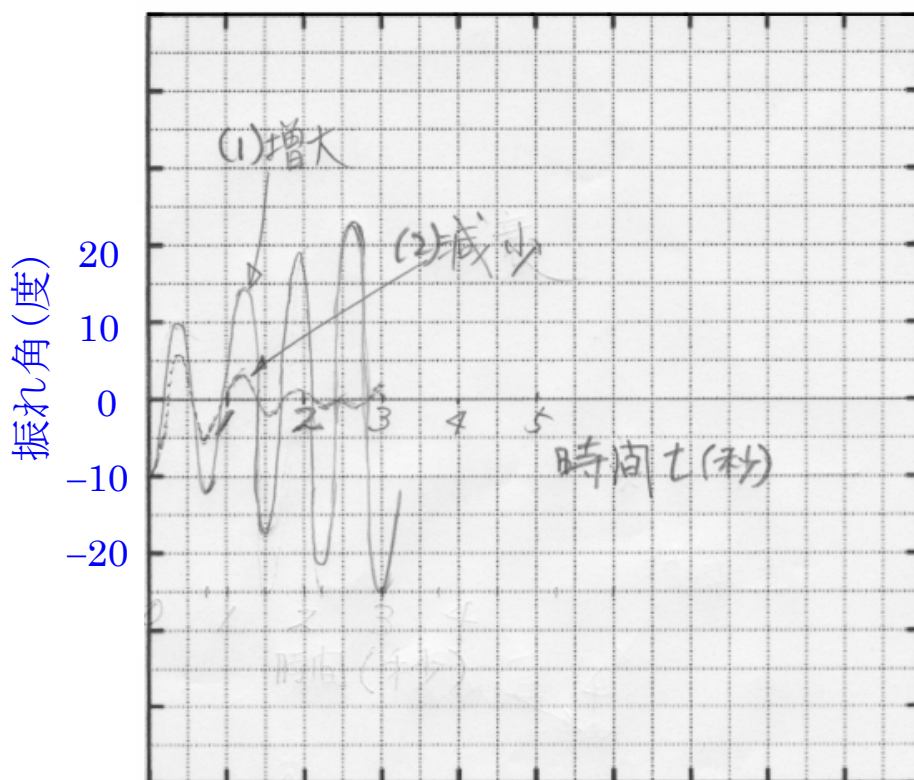
5
点

課題2-6 (2)

支点の初期位置	(d)
---------	-----

5
点

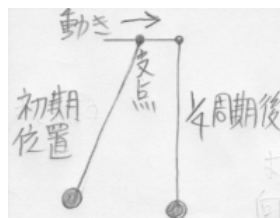
課題 2-6 (3)



10

点

(1) 振幅増大時：
おもりに働く張力の水平成分と
同じ向きに支点が動いている。



(2) 振幅減少時：
おもりに働く張力の水平成分と
逆の向きに支点が動いている。



課題 2-6 (4)

5

点

おもりに働く張力の水平成分が弱まる(強くならない)方向に支点を動かせば良い。すなわち、荷物が真下を通過するとき荷物の動く方向にクレーンを動かす。

第2チャレンジ番号	氏 名

課題3-2 (1)

15
点

	l_s	$2l_s$	$3l_s$	$4l_s$	$5l_s$
長さ(m)	0.140	0.281	0.421	0.561	0.701
振幅(度)	~10	~10	~10	~40	~10

$$l_r = 0.561 \text{ m}$$

$$f_r = 0.67 \text{ Hz}$$

課題3-2 (2)

5
点

おもりに働く糸の張力の水平成分はおもりの振動数と同じ振動数で増減している（向きが変わる）のに対して、おもりに働く張力（の鉛直成分）はおもりの振動数の2倍の振動数で増減するから。

これよりチャレンジ問題：

第2チャレンジ番号	氏 名

課題3-4 (1)

$$f_r = 0.67 \text{ Hz}$$

点

Δl (m)	0.020				
Δf (Hz)	-0.012				
うなりの 周期 (s)	45				

課題3-4 (2)

点

振動数 $f = f_r + \Delta f$ の振り子の N 周期分の時間がうなりの周期 T であるとすると、この間に糸長は振動数 $f_s = 2f_r$ で $2N \pm 1$ 周期だけ振動する。

したがって、

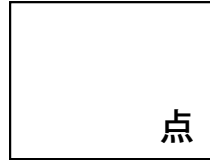
$$T = \frac{N}{f} = \frac{2N \pm 1}{f_s} = \frac{2N}{2f} = \frac{1}{|f_s - 2f|} = \frac{1}{|2f_r - 2(f_r + \Delta f)|} = \frac{1}{2|\Delta f|}$$

$\Delta f = 0.012 \text{ Hz}$ を代入すると、 $T = 1/(2 \times 0.012) = 42 \text{ s}$ となり、実測値 45 s とほぼ一致する。

この関係式は、課題2-4 (2) で求めた公式 $T = 1/|\Delta f|$ とは2倍異なる。

課題3-6 (1)

最も大きく増大	(d)
最も大きく減衰	(c)



課題3-6 (2)

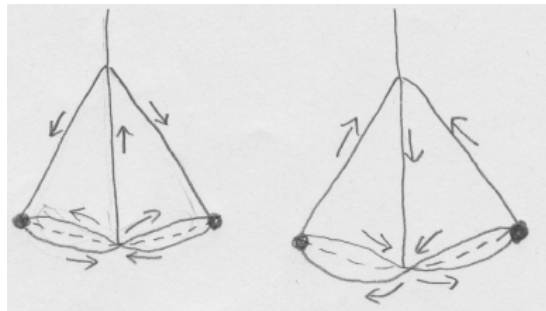


おもりが真下に来た(振れ角0の)とき、速度が最大となり、遠心力により糸の張力も最大となる。

張力が最大(最小)のとき糸を短く(長く)すると、1周期の間におもりに対して正の仕事をするので振幅は増大し、逆に、張力が最大(最小)のとき糸を長く(短く)するとおもりに対して負の仕事をするので振幅は減少する。

(1) 振幅増大時

(2) 振幅減少時



課題3-6 (3)



ブランコでは、糸の伸縮の代わりに重心を上下させて仕事をする。
真下に来た(振れ角0の)とき、立ち上がり、振れが最大のときにしゃがめば振幅を増大させることができる。

物理チャレンジ 2008

第2チャレンジ 実験問題

2008年8月5日(火)

諸注意・実験器具確認 8:30～8:40
実験問題にチャレンジ 8:40～13:20
実験器具後片付け 13:20～13:30

実験問題へチャレンジを始める前に下記の **<注意事項>**をよく読むこと。

チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の **<実験問題の背景>** および **<実験で使用する部品・装置>** を読み、そのうえで、課題1から課題5に取り組むこと。

<注意事項>

1. 合図があるまで、問題冊子、解答用紙および方眼紙が入った封筒、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 解答用紙のすべてのページおよびすべての方眼紙の右上隅に、チャレンジ番号と氏名を記入すること。
3. 実験結果や計算結果、式の変形など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の場所に記入すること。下書き用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙と方眼紙に記入すること。
4. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓、セロテープ以外は使用してはならない。ただし、電卓は自分のものを使用してもよい。
5. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、手をあげて監督者に申し出ること。ただし、数には限りがあるので、交換できない場合もある。
6. チャレンジ開始後から12:00まではチャレンジを終了することはできない。
7. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、手をあげて監督者に知らせること。
8. 終了の合図があれば、解答用紙とグラフ用紙を封筒の中に入れ、机におく。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。また、机に貼られたチャレンジ番号と氏名が書かれた紙をはがし、箱に張り付けること。問題冊子と下書き用紙は持ち帰ってよい。

《波動の性質に関する実験問題》

＜実験問題の背景＞

＜縦波と横波＞

音とは、空気を伝わる「疎密波」である。つまり、強くたたいた太鼓の皮に顔を近づけると、空気の振動が伝わってくるのがわかるが、これは、図 0-1 に示すように、太鼓の皮の振動によって空気分子の振動的な運動が引き起こされ、その結果、空気の密度の濃い部分（密）と薄い部分（疎）が周期的にできて、それが空気中を伝わってくるのである。この空気の疎と密の振動が耳の鼓膜を

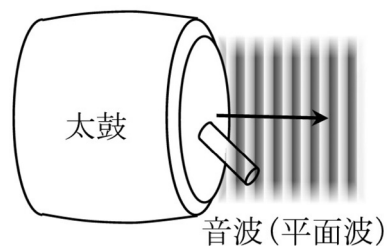


図0-1

振動させて音が聞こえる。空気の分子は波の進行方向に沿って振動する。このような波を「縦波」とよぶ。一方、静かな池の水面に小石を投げ入れると、水面に波ができて広がっていくが、このときの波、つまり、水面の上下動は、波の進行方向に対して直角である。このような波を「横波」という（実は厳密には水面の動きは、単純な上下動ではなく、回転運動を伴っているので純粋な横波ではない）。

＜波の基本量＞

縦波にしろ、横波にしろ、波を記述するには、いくつかの量が使われる。つまり、「振幅」、「振動数（または周波数）」、「波長」、「速度」、「位相」と呼ばれる量である。音の大きさが大きいということは空気分子が大きく振動していることであり、これを「振幅 A が大きい」という。水面の波でも上下動が大きいときを振幅が大きいという。高い音とは、空気分子がすばやく振動していることであり、「振動数（または周波数） f が高い」という。振動数とは、1秒あたりの空気分子の振動の繰り返し回数であり、単位は秒の逆数であるが、これをヘルツ（Hz）と呼ぶ。テレビの時報の「ピッ、ピッ、ピッ、ポー」の「ピッ」が $f = 440 \text{ Hz}$ の音であり、「ポー」が $f = 880 \text{ Hz}$ の音である。また、遠くで打ち上げられた花火を見ると、音が遅れてやってくるのがわかる。つまり、音は速度 v で進むが、その速度は光の速度よりずっと遅い。つまり、音は1秒間に $v \text{ m}$ だけ進むわけで、その間に空気は f 回だけ振動している。よって、空気の疎密波の1周期分の長さ、つまり波長 λ は

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \dots(0-1)$$

と書ける。そうすると、 x 軸の原点 ($x=0$) で発生した音は、そこでの空気の密度が

$$A(0) = A_0 \sin(2\pi ft) \quad \dots(0-2)$$

と表される振動とみなせる。ここで A_0 は原点での空気密度の振動の振幅を表し、 t は時間を表す。その音が、原点から距離 x の地点まで伝わると、そこでの空気の振動は、

$$A(x) = A_0 \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad \dots(0-3)$$

と表せる。つまり、この地点に音が届くまでの時間 $\frac{x}{v}$ だけ遅れた波となっている。(0-3)式のように、波が正弦関数で表されるとき、[] 中の量を「位相」という。同一時刻 t では、 x の値が大きくなると位相の値が小さくなっている。このことを、地点 x ($x > 0$) では、原点 ($x = 0$) より位相が遅れているという。

<球面波と平面波>

図 0-2 に示すように、花火から出る音は、花火が上空ではじけた地点から四方八方に広がってゆく。このような波を「球面波」と呼ぶ。だから、花火を北側で見ていたボブと東側で見ていたアリスには、2 人の位置が花火から同じ距離ならば、音は 2 人に同時に届く。つまり、花火を中心に半径 x の球面を描くと、その球面上にいる人には同時に音が届くことになり、それは方角に依らずに(0-3)式で書ける。この球面を「波面」、または「等位相面」と呼ぶ。(0-3)式の位相が等しい地点が波面を作っているからである。音が遠くに伝わることは、その球面が大きくなっていくと表現でき、(0-3)式での x の値が大きくなることを意味している。つまり、遠くの地点での波の位相は遅れていると言える。

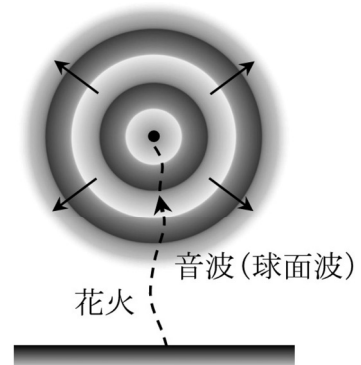


図0-2

図 0-1 に示すように、大きな太鼓の近くでは、近似的に太鼓の皮に平行な波面を持つ音とみなせる。このような波は、広がらずに前方へのみ進む。このような波を「平面波」と呼ぶ。

図 0-1 に示すように、大きな太鼓の近くでは、近似的に太鼓の皮に平行な波面を持つ音とみなせる。このような波は、広がらずに前方へのみ進む。このような波を「平面波」と呼ぶ。

(0-3)式を見ると、位相が 2π ごとに同じ状態になる。そのため、波面は波長 λ の間隔で描くと分かりやすい。 x が λ だけ増えると、位相が 2π だけ変わるからである。

<波の進み方>

波面の各部分は、その法線方向に進んでいく。だから平面波は、その波面に垂直方向に伝播していき、球面波として広がる波は、同心球として波面が広がっていく。前方から見て凹面の波面を持っている波は集束していく。一般に、波の伝播の仕方は、「ホイヘンスの原理」から理解できる。図 0-3 に示すように、どんな形の波面でも、1 波長分(λ)だけ進んだ次の波面は、次のようにして作図できる。もとの波面の各点は振動しており、そこを中心に球面波が

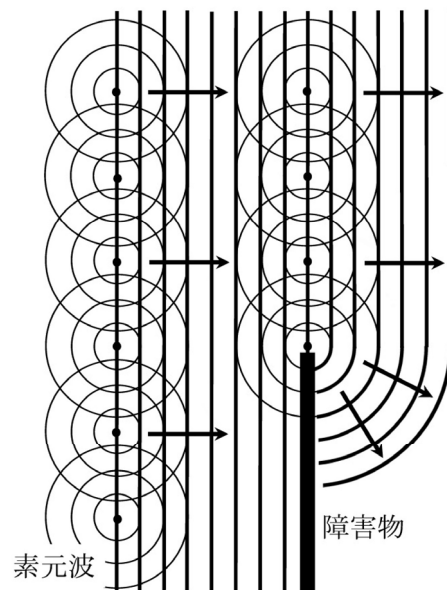


図0-3

発生すると考える。その球面波は「素元波」と呼ばれており、その素元波の波長 λ の間隔で描いた波面の接線を描いて包絡面を作ると、実際の波の次の波面が得られる。

このホイヘンスの原理を使うと、障害物の陰に波がまわりこむ「回折」という現象を理解できる。つまり、図 0-3 に示すように、障害物の後ろには、素元波である球面波がそのまま伝播する。花火が見えない裏庭にいても花火の音が聞こえるのはそのためである。

波の別な重要な性質として「干渉」現象がある。2つのスピーカー S_1 と S_2 から同じ周波数の音を出してみると、聞く位置によって大きな音に聞こえたり小さな音に聞こえたりする。これは、2つのスピーカーから出る音波の空気の疎と密の振動が一致した場合、波が強められるためである。反対に、スピーカー S_1 からの音波の疎と密の場所が S_2 からの波の密と疎にちょうど一致してしまう場合には、お互いに打ち消しあってほとんど音が消えてしまうのである。別な言い方をすれば、それぞれのスピーカーから来る音波の位相の差が 2π の整数倍のとき、2つの音波は強め合い、その位相差が π の奇数倍のときに弱めあう。

<超音波>

人間が聞こえる音の周波数は約 20 Hz から 20 kHz の範囲である。それ以上の周波数の音波を超音波と呼ぶ。この実験では、周波数 $f=40$ kHz の超音波を使用するが、空気の疎密波である縦波であることは可聴音波と変りはない。

課題 1 では、波面（等位相面）の間隔を測定して、この超音波の波長と速度を測定する。課題 2 では、細いスリットを通過した場合の回折と干渉現象を観測する。課題 3 では、細いスリットを特定の規則にしたがって並べると、超音波に対してレンズ作用を持たせることができるが、それを実際に波面の形を測定して確かめてみる。課題 4 では、超音波を硬い壁で反射させたときの位相の変化を調べてみる。課題 5 では、規則的に並んだ釘の列から反射・回折される超音波を測定し、いわゆる「ブラッグ反射」の現象を観測してみる。これは、電磁波である X 線を結晶に照射すると見られる「X 線回折」の実験を、超音波を使って再現していることになる。

＜実験で使用する部品・装置＞

まず、以下の装置・部品が机の上にあることを確認する。

- (1) 超音波発生器（電源、発信器および受信器がコードでつながっている）1台（図0-4）
- (2) 30 cm 定規 1本, 50 cm 定規 1本, およびセロテープ 1個
- (3) 二重スリットが付いた白いついたて 2枚（スリットの間隔が異なる）
- (4) 特殊な形のスリットが空いた白いついたて（ゾーンプレート）1枚（図0-5）
- (5) 周りからの超音波を遮る黒い遮蔽板 2枚
- (6) ブラッグ反射実験用の結晶格子の模型（釘の格子）1個（図0-6）
- (7) ブラッグ反射実験用の回転台つきパンタグラフ 1台（図0-7）
- (8) 電卓

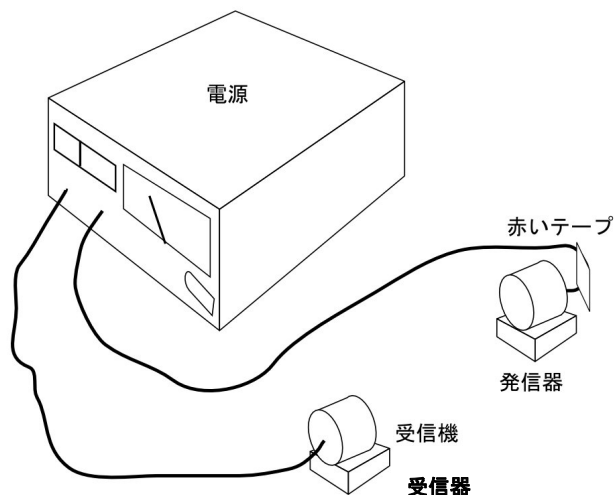


図 0-4

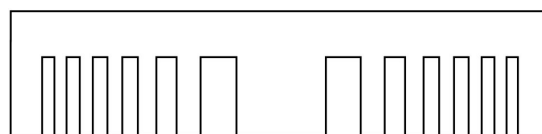


図 0-5

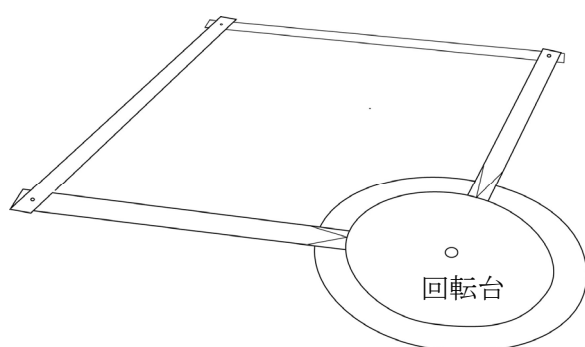


図 0-7

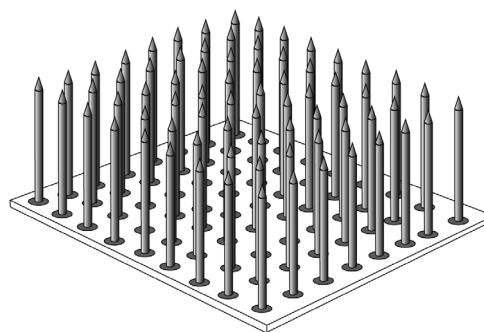


図 0-6

以上の装置・部品がすべて揃っていない場合には、手をあげて監督者に知らせること。

次に、超音波発信器および受信器の使い方について説明する。図 0-4 に示すように、電源などが入った本体部分と、そこからコードでつながっている超音波発信器、および同様にコードでつながっている超音波受信器の 3 つの部分からなる。発信器と受信器は形状が似ているので、発信器のコードにだけ赤いテープを付けて区別している。

この装置の発信器では、水晶発振器を用いて超音波を発生している。そのため、その周波数は非常に正確で、40 kHz である。以下の実験と考察では、この 40 kHz を誤差のない値と考えて用いてよい。

本体の正面パネルには、図 0-8 のように電源スイッチ、振幅測定用メータ（右）、および位相測定用メータ（左）が付いている。電源スイッチのオン・オフはランプで確認できる。スイッチは実際の測定時のみオンにして、解析や計算中には電源をオフにすること。これは、電池の消耗を防ぐのと同時に、不必要な超音波を発生して周りの人の実験の迷惑にならないようにするためである。また、周りの人の発信器からの超音波を防ぐために、黒い遮蔽板を適宜使用するとよい（隣の人の装置からの超音波はそれほど強くないが、念のため）。

波の振幅は右のメータを用いて値を読む（図 0-8）。振幅測定用のメータは電圧計で最大 4 V となっている。波の振幅と電圧が比例するようになっているので、振幅の測定値としてはこの電圧値を用いる。

一方、左のメータは位相測定用で、発信音波に対する受信音波の相対的位相を示す。位相は $-\pi$ から $+\pi$ まで変るので、メータの中央がゼロ、その左側が負（-）、右側が正（+）の位相となっている。位相測定用メータは位相信号がゼロとなる位置の検出のみに用いるので、値の大きさは気にしなくてよい。この実験では、波の進行方向に沿って位相信号が+から-に変るとき通過するゼロを「位相ゼロ」と定義する。逆に位相が-から+に変化するときに通過するゼロは、位相 π となるので注意すること。

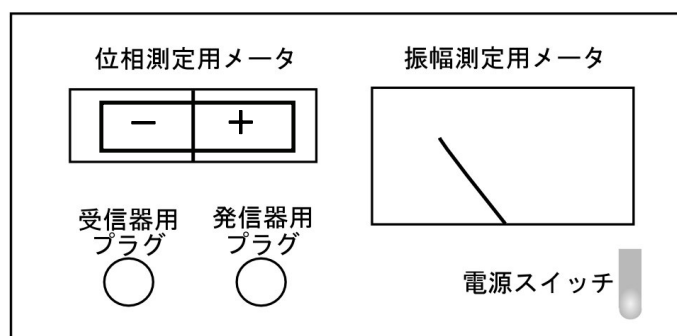


図 0-8

発信器と検出器は 2 枚の磁石の上に乗っており、下の磁石は取り外すことができる。課題 1 から課題 4 までは下の磁石を取り外して実験を行い、課題 5（ブラッグ反射の実験）のとき、検出器や受信器をパンタグラフの腕の上に置く場合にのみ、もう一つの磁石を下に取り付けて行う。

<課題 1> 超音波の波長と音速の測定

図 1-1 に示すように、発信器と受信器をおよそ 10 cm 離して向かい合わせに置く。この実験では、発信器は固定し、受信器を移動させる。30 cm 定規を使い、その縁に沿って両者を置いて受信器をすべらせると両者の距離を測定しやすい。定規や発信器は、セロテープを使って机上に軽く固定するとよい。

問 1-1 発信器と受信器の間の距離 d を少しずつ大きくして、位相を測定する（振幅測定用メータはこの場合には使わない。「位相ゼロ」になる位置での d を測定する。 d を変えていくと「位相ゼロ」になる位置がいくつもあるはずである。そのときの d を d_n ($n=1, 2, 3, \dots$) と書く。その差の絶対値 $|d_n - d_{n+1}|$ が超音波の波長である。これを λ_n と書く。 $\lambda_n = |d_n - d_{n+1}|$ 。連続する 6 つの d_n ($n=1, 2, 3, \dots, 6$) の測定値からの 5 つの λ_n

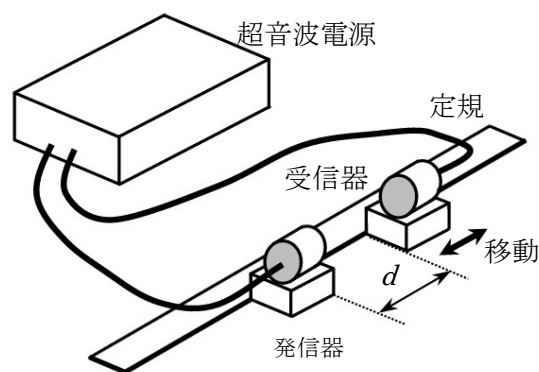


図 1-1

($n=1, 2, 3, 4, 5$) の値の平均値をとることによって超音波の波長 λ の測定値 $\bar{\lambda}$ を求めよ。

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 \lambda_n$$

問 1-2 このとき、 λ の測定誤差 $\Delta\lambda$ は $\Delta\lambda = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{n=1}^5 (\lambda_n - \bar{\lambda})^2}$ で計算できる。 $\Delta\lambda$ を求めよ。

問 1-3 超音波の振動数 f ($=40$ kHz) と問 1-1 で求めた波長の値から超音波の音速 v を誤差とともに求めよ。

＜課題2＞ ヤングの二重スリット干渉実験

次に、細いスリットがある場合に、波がどのような振る舞いをするか測定してみる。

【発信器から出る波の波面】

問 2-1 はじめに、発信器から出る超音波の波面の形を測定する。図 2-1 に示すように、方眼紙を置いて（セロテープで軽く固定するとよい）、その端に発信器を固定し、方眼紙にその位置の印を付ける。発信器からおよそ 10 cm ほど離れた位置に受信器を置き、発信器から

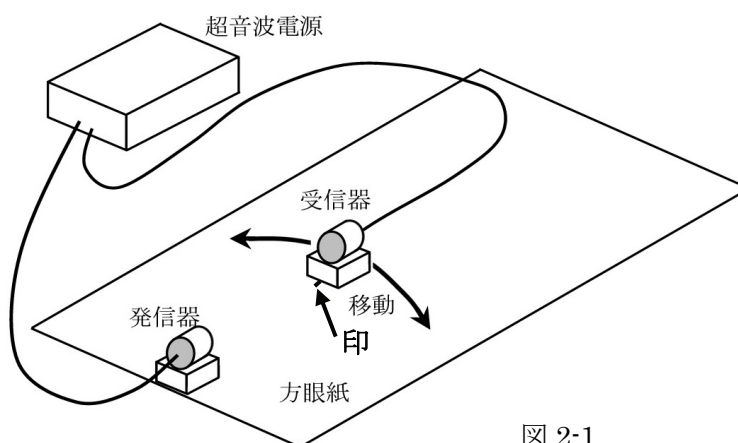


図 2-1

から少しずつ遠ざけて「位相ゼロ」になる位置を探す。見つかったらそのときの受信器の位置（台座前面の中心の位置）に印を付ける。そのまま位相信号をゼロに保つように、受信器を左右に少しずつ動かし、適当な間隔で位相信号ゼロの位置を方眼紙に印をつけて記録する。このような操作を行って付けた印を結ぶとどのような図形となるか、方眼紙上に付けたいくつかの印を適当な曲線で結んで示しなさい。これは、位相が等しい面なので、等位相面、または波面である。[注意：一波長ずれると、位相が 2π だけずれた隣の波面に飛んでしまうので、注意して受信器を動かすこと。]

次に、発信器から 15 cm 程度離れた位置で同様に「位相ゼロ」の位置を探し出し、それを出発点として、同様に波面の形を描き出しなさい。これらの結果から、発信器から出た超音波は 2 次元的にある程度広がりを持つ波であることがわかるであろう。

この方眼紙の隅に「問 2-1」と書き、また名前とチャレンジ番号も書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出しなさい。

【単一スリット】

新しい方眼紙に交換する。図 2-2 に示すように、方眼紙の端に発信器を固定し、方眼紙にその位置の印を付ける。

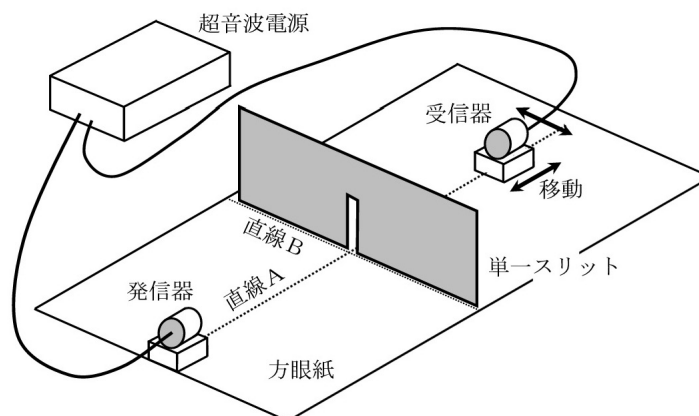


図2-2

そこから方眼紙の中央に直線Aを引く。発信器から15 cmほど離れたところに、その直線に直角に交わる直線Bを引く。1つだけスリットが開いているついで（単一スリット）を直線Bに沿って置く。このとき、スリットは直線Aと直線Bの交点に載るように置く。単一スリットは、2つスリットが開いている二重スリットのうちの一方をセロテープで両側からふさいだものである。自分でセロテープを使って片方のスリットをふさぐこと。

受信器を、直線A上でスリットから8 cm程度離れた位置に置く。直線Aに沿って検出器をスリットから少しずつ遠ざけ、「位相ゼロ」になる地点を一つ探して、方眼紙にその位置の印を付ける。

問 2-2 その点を出発点として、問 2-1 と同じ要領で波面を描く。つまり、「位相ゼロ」に保ちながら左右に受信器を動かして、適当な間隔で受信器の位置に印をつけ、波面を描く。このような操作を行って付けた印を結ぶとどのような図形になるか、方眼紙上でいくつかの印を適当な曲線で結んで示しなさい。

また、直線A上で、スリットから約13 cm離れた場所に受信器を置き、その付近で「位相ゼロ」となる点を探し出す。そこを出発点として同様に波面を描きなさい。

この結果からスリットから波が広がっていることがわかであろう。何故、波面がこのような形状になるのか、解答用紙に書きなさい。

この方眼紙の隅に「問 2-2」と書き、また自分の名前とチャンレンジ番号も書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出しなさい。

【二重スリット】

方眼紙を新しいものに取り替える。図 2-3 に示すように、方眼紙の端に直線Bを描き、それに直交する直線Aを描く。今度は、2つのスリットが開いているついで（二重スリット）を直線B上に置く（問 2-2 で使ったスリットのセロテープを剥がして二重スリットとする）。スリットの位置（各スリットの中心位置）を方眼紙上に印をつけて記録しておく。ついでから約50 cm程度離れた机の上に発信器を固定する。二重スリットから12 cm離れた方眼紙上に直線Bに平行に直線Cを引く。さらに直線Cに平行にその両側に2 cm間隔でそれぞれ3本の直線を描く。

問 2-3 直線Cに沿って受信器を動かし、振幅信号（位相信号ではないので注意する）が極大とな

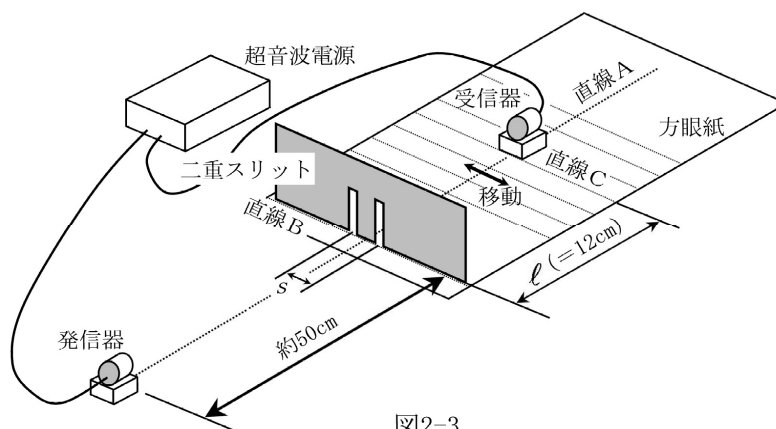


図2-3

る位置（検出器を動かしていくと振幅信号が増加から減少に転じる位置）を数箇所見つけ出し、方眼紙上にそれらの場所の印を付ける。そして、隣り合う印の間隔をすべて測定して、すべての値を解答用紙に記し、その間隔の平均値 a を求めなさい。これは、二重スリットによる干渉縞の間隔である。

問 2-4 上で測定した間隔 a とスリットの間隔 s （それぞれのスリットの中心の間隔）、ついたてから直線 C までの距離を l ，超音波の波長を λ とすると、これらは

$$s \cdot a = \lambda \cdot l \quad \dots (2-1)$$

という関係にある。この関係式が成り立つ理由を説明しなさい。

問 2-5 (2-1)式を用いて、測定した間隔 a から波長 λ を求めなさい。次に、この値を課題1で求めた波長 λ と比較しなさい。課題2と課題1の誤差を検討して、どちらの結果がより正確か、考えを述べなさい。

問 2-6 直線 C に平行な直線 6 本に沿って受信器を移動させ、同様に振幅信号が極大となる位置をいくつか探し出してその場所に印をつけなさい。異なる直線上の近接する印どうしを適当な曲線で結ぶとどのような図形になるか、方眼紙に描きなさい。また、この図形は、何を意味するのか、解答用紙に書きなさい。

この方眼紙も提出するので、隅に「問 2-6」と書き、名前とチャレンジ番号を書いておくこと。

問 2-7 新しい方眼紙に交換して図 2-3 と同じ配置にセットする。スリットの間隔が違うもう一枚の二重スリットついたてを用いて問 2-6 と同様に振幅信号が極大になる位置を示す図形を描きなさい。二つのスリットの中心位置も方眼紙上に印しておくことを忘れずに。この図形は、問 2-6 で得られた図形とどのような関係にあるのか、解答用紙に書きなさい。この方眼紙の隅には「問 2-7」と書き、名前とチャレンジ番号を書いて提出すること。

＜課題3＞ ゾーンプレート

課題2では、1つまたは2つのスリットを超音波が通過するとどのような現象が起きるのか調べた。回折と干渉の現象が見られたのがわかったと思う。その発展として、不等間隔で並んだ幾つかのスリットを考える。このスリットの間隔をある規則に従って変えると、一点から発散する超音波（球面波）を平行で直線的な波面を持つ平行波（平面波）に変換したり、一点に向かって集束する集束波に変換することができる。光の場合との類推で言えば、レンズの働きをするものである。この超音波に対するレンズ作用を、波面を実際に測定することによって確かめ、焦点距離を求めてみる。このようなものを回折レンズ、またはゾーンプレートと呼んでいる。

問3-1 新しい方眼紙を使って図3-1に示すように発信器および受信器を配置する。中心の直線Aに沿って受信器を少しずつ動かし、「位相ゼロ」になる点の一つ探して、方眼紙にその位置の印を付ける。その地点から出発して受信器を左右に少しずつ

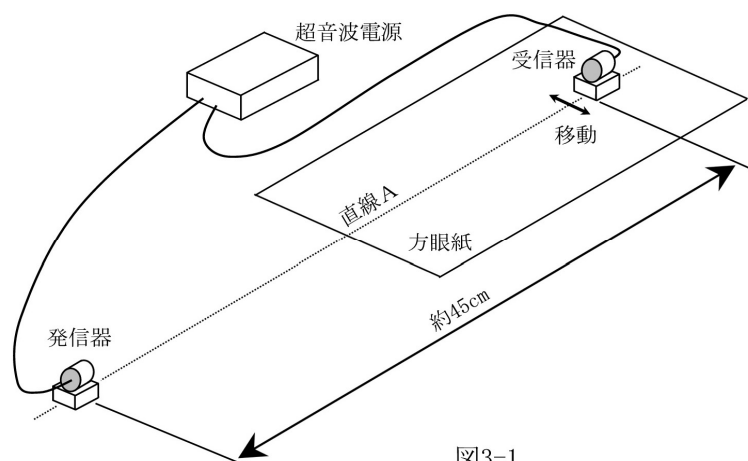


図3-1

動かし、問2-1と同様に波面を描く。つまり、位相信号をゼロに保つように、受信器を左右に少しずつ動かし、適当な間隔でその位置を方眼紙に印をつけて記録する。このような操作を行って付けた印を結ぶとどのような図形となるか、方眼紙上でいくつかの印を適当な曲線で結んで示しなさい。

問3-2 次に、このままの状態ですべての装置を置き、ゾーンプレート（ゾーンプレート）を置く。つまり、発信器から15 cm離れた位置に、ゾーンプレートの中心が直線A上に載るように置く。この状態で問3-1と同様に波面を描く。つまり、問3-1で探し出した直線A上での「位相ゼロ」の地点を出発点として左右に

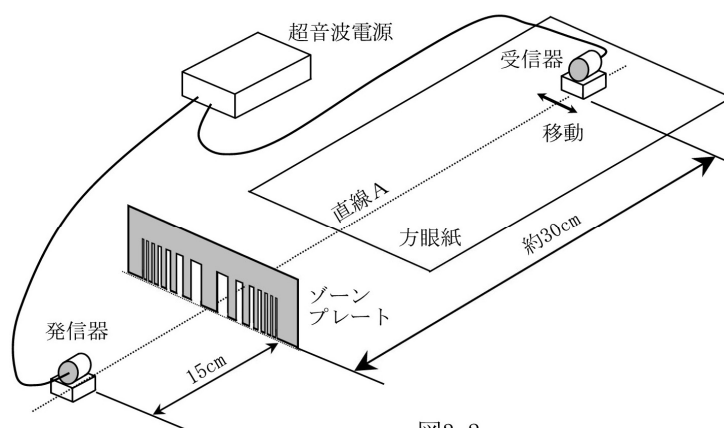


図3-2

受信器を動かして波面を描く。

この方眼紙の隅に「問 3-2」と書き、また名前とチャレンジ番号も書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出しなさい。

問 3-3 問 3-1 と問 3-2 の結果から、ゾーンプレートがどのような働きをしたか、解答用紙に答えなさい。

問 3-4 新しい方眼紙に交換し、図 3-3 に示すような配置にする。つまり、今度は、ゾーンプレートと発信器の距離を 30 cm にし、ゾーンプレートからおよそ 20 cm および 25 cm の位置において方

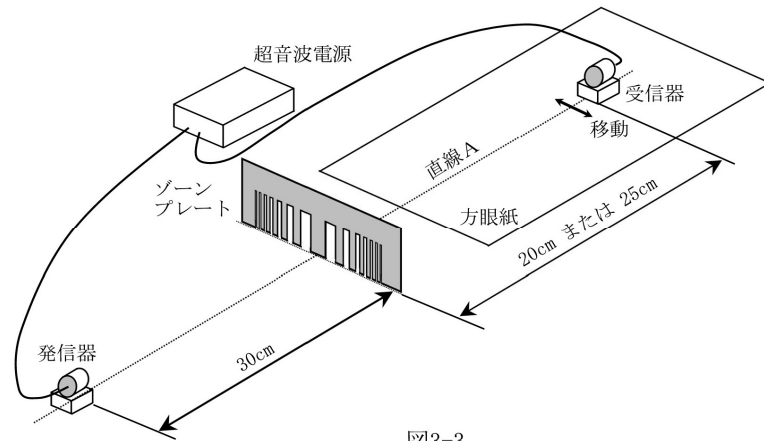


図3-3

眼紙上で波面を 2 つ描く。波面の形から、ゾーンプレートがどのような働きをしていると考えられるか解答用紙に書きなさい。この方眼紙の隅に「問 3-4」と書き、また名前とチャレンジ番号も書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出しなさい。

問 3-5 問 3-4 で求めた波面を利用し、波の各部分はその法線方向に進行することを考慮して作図し、波が集束する地点を方眼紙上に明記しなさい。

以上の結果から、このゾーンプレートを凸レンズと考えた時の焦点距離を求めよ。その求め方も省略せずに解答用紙に書きなさい。

問 3-6 ゾーンプレートの原理を考えてみる。図 3-4 に示すように、平面波がゾーンプレートに入ってきた場合、ゾーンプレートは凸レンズの働きをして、波は焦点 O に集束する球面波に変換される。この球面波は、ゾーンプレートの各スリットから出てくる球面波（素元波）が干渉してできたものである（ホイヘンスの原理）。つまり、素元波の同位相面（波面）の接線（包絡面）を描くと、焦点 O に集束する球面波となる。この原理から、図 3-4 で示した一対のスリットの間隔 d_n ($n=1,2,3,\dots$) が満たすべき関係式を求めよ。

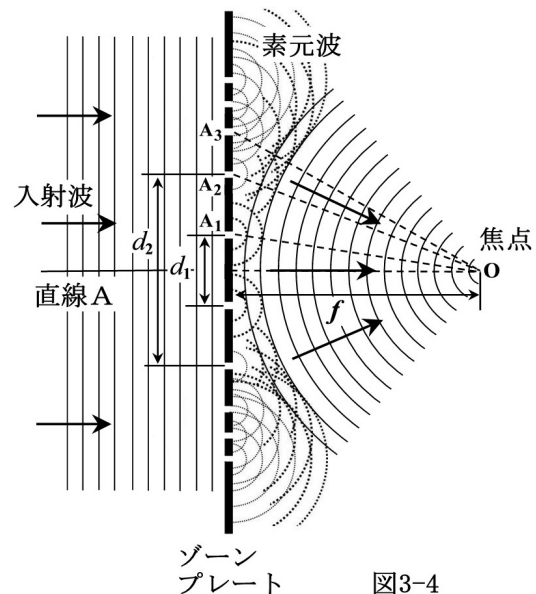
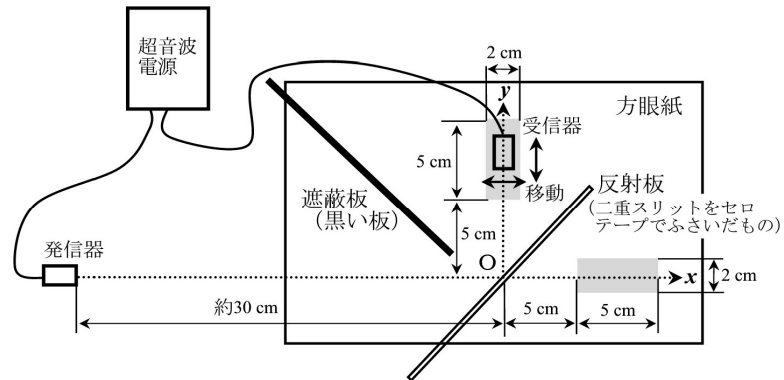


図3-4

＜課題4＞ 波の反射

次に、波が反射するときの位相の変化を測定する。

図4-1に示すように、方眼紙上に xy 座標軸をとる。発信器を x 軸上の原点 O から約30 cmのところ設置して $+x$ 方向に向かって超音波を発信させる。



問4-1 図4-1に示すよう

図4-1

に、 x 軸に対して 45° の方向に反射板を設置する。この反射板は、課題2で使用した二重スリットの両方のスリットをセロテープで両側からふさいでものである（自分でセロテープを貼りなさい）。そうすると、波が反射されるので、 y 軸上に受信器を置いて検出する。発信器からの直接波が受信器に入らないように、図のように遮蔽板（黒いついたて）を置くことよ。図4-1で y 軸上で影をつけた領域（ $-1\text{ cm} < x < 1\text{ cm}$, $5\text{ cm} < y < 10\text{ cm}$ ）で「位相ゼロ」の波面をいくつか描きなさい。「位相ゼロ」の波面の描き方は、いままでやってきた要領で行う。

問4-2 次に、反射板と遮蔽板をはずし、受信器を x 軸上に移す。今度は、図4-1で x 軸上で影をつけた領域（ $5\text{ cm} < x < 10\text{ cm}$, $-1\text{ cm} < y < 1\text{ cm}$ ）の範囲で同様に「位相ゼロ」の波面をいくつか描きなさい。この方眼紙の隅に「課題4」と書き、また名前とチャレンジ番号も書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出しなさい。

問4-3 反射板がない場合に x 軸上にできる「位相ゼロ」の波面と、反射板がある場合に、 y 軸上にできる「位相ゼロ」の波面の位置を比較し、どのようなことがわかるか解答用紙に書きなさい。その際、測定誤差も考慮しなさい。

問4-4 以上のことから、入射波と反射波の位相がどのような関係にあるのかを考察しなさい。つまり、反射板がない時にできる $+x$ 方向に進行する波の位相と、反射板がある時にできる $+y$ 方向に進行する波の位相はどのような関係にあるのかを考えなさい。

問4-5 超音波は空気の粗密波であることを考えると、反射板を置いた場合に、その表面で、入射波と反射波の重ね合わせで作られる空気分子の変位がどのような条件を満たす必要があるのか答えなさい。反射板の表面は十分硬いとしてよい。

＜課題5＞ ブラッグ反射

X線が結晶に入射すると、結晶中の原子1個1個によって散乱される。その散乱波どうしが干渉して、特定の方向にのみ強い反射X線が得られる。この現象はブラッグ反射として知られている。同様の現象が同じ波動である超音波にも期待できる。超音波によるブラッグ反射を測定してみる。

図5-1は釘をアクリル板に取り付けた結晶格子の模型である。各釘の間隔は縦にも横にも1 cmである（正方格子と呼ばれる）。格子定数（結晶を構成する原子間距離）2Å程度の実際の結晶で、波長2Å程度のX線によるブラッグ反射が生じるので、超音波の波長と同じ程度の格子定数を持つ結晶模型を用意した。

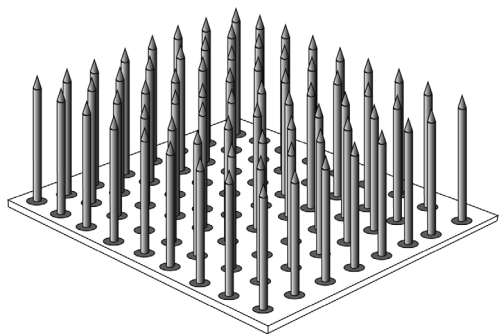


図 5-1

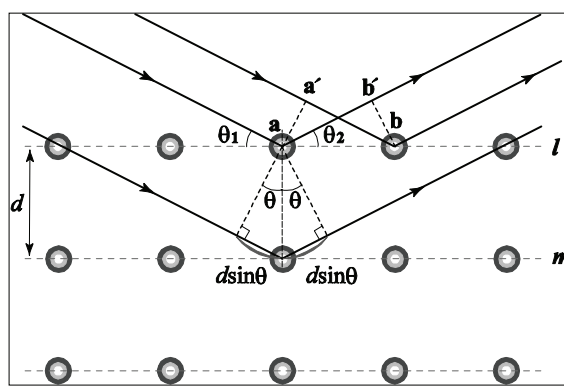


図 5-2

図5-2の結晶模型で、釘の並んだ平行な面（原子面） l, m, \dots の間隔（面間隔）を d 、入射超音波の波長を λ とする。原子面に対して入射超音波のなす角と反射超音波のなす角を等しく θ とすれば、

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3) \quad \dots(5-1)$$

の関係を満たすときに、強い反射が現れる。

図5-2の原子面 l 内にある釘による反射では、 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ となつて、反射の法則が満たされていれば、面内にある釘による反射超音波は、すべて同位相となつて強め合う。このとき隣り合う原子の反射による行路差が $a'b = ab'$ となつて、等しくなるからである。だから必ずしも(1)式を満たす必要がない。

しかし、隣り合う釘の原子面 l, m での反射が強め合うためには、反射の法則に加え、さらに条件が必要である。超音波が原子面 l と m で反射するときの行路差は $2d \sin \theta$ なので、そ

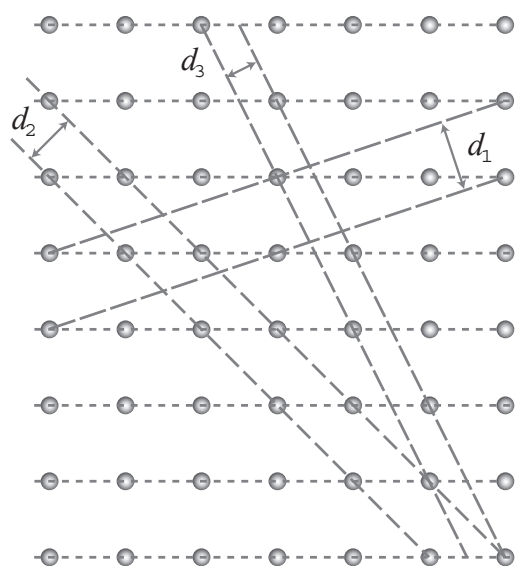


図 5-3

の分だけ位相がずれる。この行路差が λ の整数倍になると、位相はちょうど 2π の整数倍ずれるので、結局、反射超音波はすべて同位相となって強め合う。こうしてブラッグ反射の条件式(5-1)が得られる。つまり、ブラッグ反射は、等間隔で並んだ原子面の列からの反射波の干渉によって起こる。

原子が規則的に配列している結晶格子においては、図 5-3 に示すように、いろいろな向きの原子面があると考えられる。ブラッグ反射の条件式(1)の面間隔 d に $d_1, d_2, d_3 \dots$ を代入した条件が満たされるとき、それぞれの原子面によるブラッグ反射が起こる。

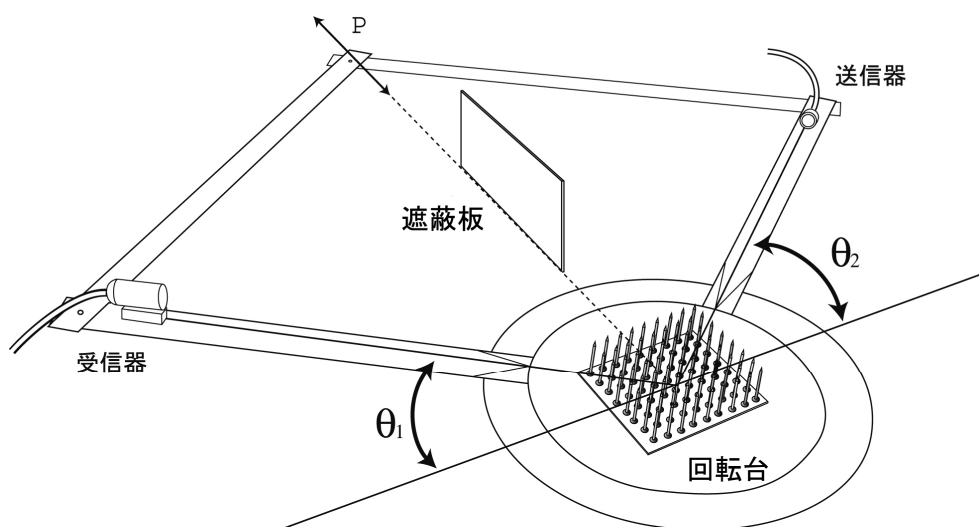


図 5-4

問 5-1 図 5-4 に示すように、回転台つきパンタグラフを用いて超音波のブラッグ反射を観測してみる。結晶模型を回転台の中心に設置する。パンタグラフの腕の上に発信器および受信器を固定する。その際、発信器および受信器の磁石の下にもう一つの磁石を付けてパンタグラフの腕に固定する。両者とも回転台の中心から約 35 cm のところに固定する。磁石だけでは動いてしまう可能性があるため、セロテープで固定するとよい。

点 P を移動させてパンタグラフを伸び縮みさせたとき、結晶模型の一つの辺に対して超音波の入射角 θ_1 および反射角 θ_2 が常に等しくなるように結晶模型の置く角度を調節する。分度器を利用して角度を直接読めるような方向にすると測定が容易になる。

入射角 $\theta_1 = \text{反射角 } \theta_2 (= \theta)$ を $20^\circ \sim 70^\circ$ まで 2.5° 間隔で変えながら反射超音波の振幅を測定して解答用紙の表を完成せよ。次に、横軸に角度 θ 、縦軸に振幅信号 (電圧 V) をとり、方眼紙にグラフを描け。得られたグラフより、ブラッグ反射によるピークが観測されているはずである。

問 5-2 課題 1 で求めた超音波の波長 λ 、および問 5-1 で観測されたブラッグ反射を起こす角度 θ の値を用い、(5-1)式から面間隔 d を求めよ。

問 5-3 図 5-5 に示すように、問 5-1 の状態から結晶模型だけを 45° 回転させて回転台の上に設置する。この状態でパンタグラフを伸び縮みさせて問 5-1 と同じ測定を行う。つまり、入射角 (= 反射角) θ を $20^\circ \sim 70^\circ$ まで 2.5° 間隔で変えながら反射超音波の振幅を測定し、解答用紙の表を完成させよ。次に、横軸に角度 θ 、縦軸に振幅信号 (電圧 V) をとり、方眼紙にグラフを描け。この方眼紙は、問 5-1 で使ったものと同じものでよい。つまり、問 5-1 と問 5-3 の2つのデータのグラフを1枚の方眼紙に描く。この方眼紙の隅に「課題 5」と書き、また名前とチャレンジ番号も書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出しなさい。

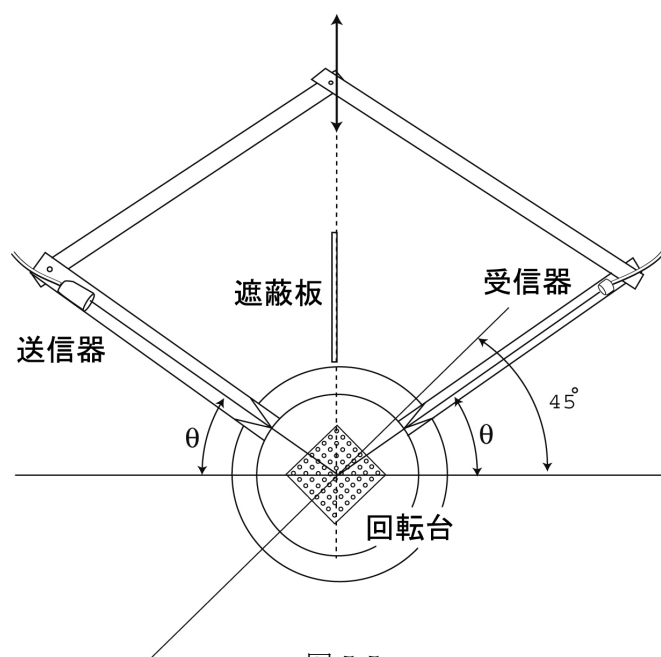


図 5-5

問 5-4 得られたグラフより、図 5-3 の場合にブラッグ反射を引き起こしている面間隔を推定せよ。この面間隔は結晶模型のどの原子面の間隔に対応するのか、解答用紙に図示せよ。

物理チャレンジ2008 第2チャレンジ 実験問題 解答例

<課題1> 超音波の波長と音速の測定

問1-1, 問1-2

間隔 d [mm]	波長 λ [mm]
37 ± 1	8 ± 1
45 ± 1	10 ± 1
55 ± 1	9 ± 1
64 ± 1	8 ± 1
72 ± 1	9 ± 1
81 ± 1	
	平均値 $\bar{\lambda} = 8.8 \text{ mm}$ 誤差 $\Delta\lambda = 0.8 \text{ mm}$

問1-3

$$v = f\lambda$$

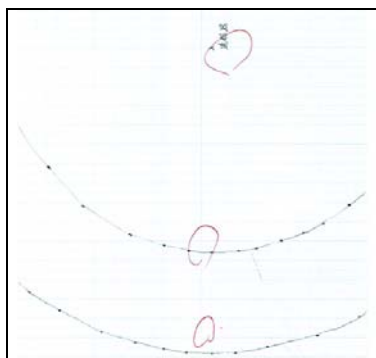
$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial f}\right)^2 (\Delta f)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \lambda}\right)^2 (\Delta \lambda)^2} = \left|\frac{\partial v}{\partial \lambda}\right| \cdot \Delta \lambda = |f \Delta \lambda| = f \Delta \lambda$$

$$f = 4.0 \times 10^4 \text{ Hz}, \quad \lambda = (8.8 \pm 0.8) \times 10^{-3} \text{ m}$$

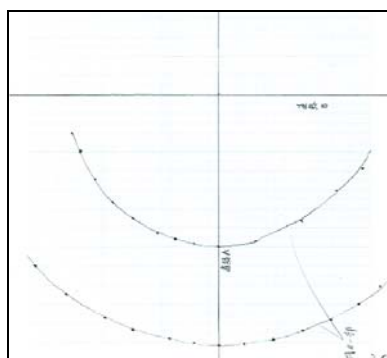
$$\therefore v = (3.5 \times 0.3) \times 10^2 \text{ m/s}$$

<課題2> ヤングの二重スリット干渉実験

問2-1



問2-2



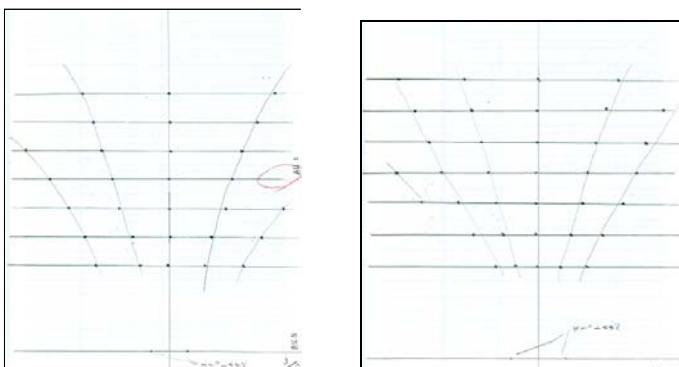
問2-2

スリットの後方で観測されるのは、スリットの部分で発生した素元波のみであるから、素元波の形状である球状に波が伝播する。

問2-3

$$a \text{ [mm]} \quad 43 \pm 1, \quad 40 \pm 1, \quad 43 \pm 1, \quad 41 \pm 1$$

$$\text{よって} \quad a = 42 \pm 2 \text{ mm}$$

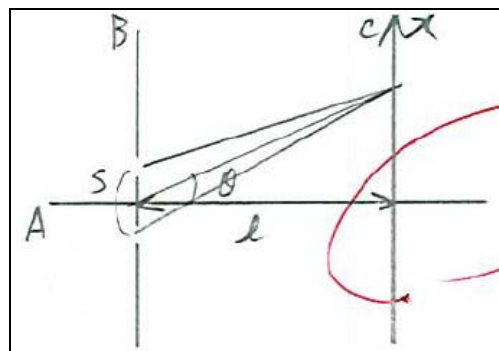


問2-4

図のように、直線Cにそってx軸をとる。また、図のように θ を定める。

$$\tan \theta = \frac{x}{l} \quad \text{よって、} |\theta \ll 1| \text{ のとき } \theta \doteq \frac{x}{l} \quad x \text{ において極大となるには}$$

$$\sin \theta = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \text{ となればよい。}$$



$$x = \frac{n\lambda l}{s}$$

よって、極大の間隔である a は、 $a = \frac{\lambda l}{s}$ となる。よって $sa = \lambda l$

問2-5

$$\lambda = \frac{sa}{l}, \quad \Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta s}{s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2}$$

$$s = 25 \pm 1 \text{ mm}, \quad a = 42 \pm 2 \text{ mm}, \quad l = 120 \pm 1 \text{ mm} \quad \therefore \lambda = 8.8 \pm 0.5 \text{ mm}$$

課題1でのほうが誤差が小さい。問2-3では極大の測定の微妙さが誤差を大きくしていることや問2-5では誤差を持つ測定値が多いことが原因だろう。

問2-6

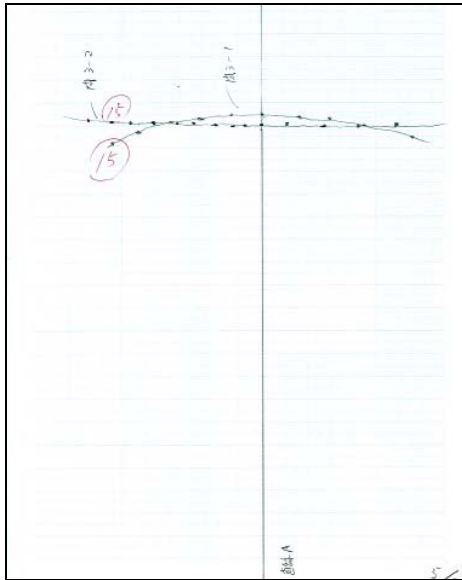
各スリットからの距離の差が波長の整数倍の点の軌跡、すなわち両スリットを焦点とする双曲線となる。

問2-7

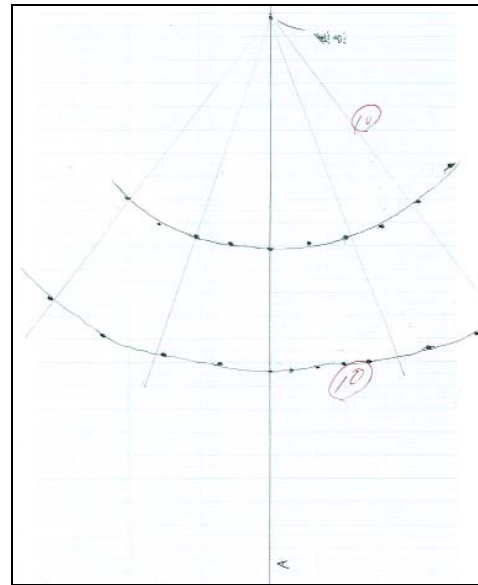
問2-6で得られた図形よりも曲線の間隔がせまい。これは式(2-1)と整合している。

<課題3>ゾーンプレート

問3-1, 問3-2



問3-4



各弦の垂直二等分線の集約される点を求めると、ほぼ受信機の位置に集まることが分かる。

問3-3

球面波をほぼ平面波に変えている。焦点15cm程のレンズとしてはたらいたことが分かる。

問3-4

平行波を1点に集める凸レンズのようなはたらきをしている。

問3-5

発信器プレート間 : 300 ± 1 mm

発信器焦点間 : 349 ± 5 mm

焦点距離を f とすると、レンズの公式より、

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{300} + \frac{1}{349} \quad \therefore f = 161 \pm 2 \text{ mm}, \quad \Delta f = f \sqrt{\left(\frac{1}{300}\right)^2 + \left(\frac{5}{349}\right)^2}$$

問3-6

$O A_{n+1} - O A_n = n\lambda$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) とならなければ、焦点で同じ位相にならない。

$$\text{よって, } \sqrt{f^2 + \left(\frac{d_{n+1}}{2}\right)^2} - \sqrt{f^2 + \left(\frac{d_n}{2}\right)^2} = n\lambda, \quad f\sqrt{1 + \left(\frac{d_{n+1}}{2f}\right)^2} - f\sqrt{1 + \left(\frac{d_n}{2f}\right)^2} = nf$$

$$f\left\{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{d_{n+1}}{2f}\right)^2\right\} - f\left\{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{d_n}{2f}\right)^2\right\} \doteq n\lambda$$

$$\therefore \frac{d_{n+1}^2 - d_n^2}{8f} = n\lambda \quad d_{n+1}^2 - d_n^2 = 8n\lambda f$$

特に, 与えられたものは $n=1$ であり,

$$d_{n+1}^2 - d_n^2 = 8\lambda f$$

<課題4> 波の反射

問4-1, 問4-2, 問4-3



問4-3

グラフ用紙を折り, x 軸と y 軸を重ねると分かるように, 原点から位相 $0(2\pi)$ の波面ま

での距離は、誤差 1mm の範囲ではほぼ完全に一致することが分かる。

問 4-4

問 4-3 の結果より、入射波と反射波の位相は等しいということがわかる。

問 4-5

反射板の表面では空気分子は板に垂直方向に変位してはならない。

(平行な方向は可能)

<課題 5>ブラッグ反射

問 5-1

角度 θ	20	22.5	25	27.5	30.0	32.5	35	37.5	40	42.5	45
振幅信号	0.7	0.5	2.5	1.2	0.1	0.5	0.3	0.8	0.4	0.6	0.6

角度 θ	47.5	50	52.5	55	57.5	60	62.5	65	67.5	70
振幅信号	0.2	0.2	0.3	1.8	1.5	0.7	0.3	0.5	1.2	1.4

問 5-2

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$\theta = 25^\circ \text{ のとき, } d_n = 1.04n$$

$$\theta = 55^\circ \text{ のとき, } d_{n+1} = 0.54n$$

よって、 $\theta = 25^\circ$ のとき $n = 1$ 、 $\theta = 55^\circ$ のとき $n = 2$ と考えられるので、

$$\bar{d} = \frac{d_n + d_{n+1}}{2} = \frac{1.04 + 1.07}{2} = 1.06, \quad \text{よって } d = 1.1 \text{ m}$$

問 5-3

角度 θ	20	22.5	25	27.5	30.0	32.5	35	37.5	40	42.5	45
振幅信号	1.1	0.2	0.1	0.2	0.5	0.3	1.5	0.5	0.2	0.6	0.1

角度 θ	47.5	50	52.5	55	57.5	60	62.5	65	67.5	70
振幅信号	0.1	0.3	0.3	0.5	0.8	0.0	0.7	0.3	0.5	0.8

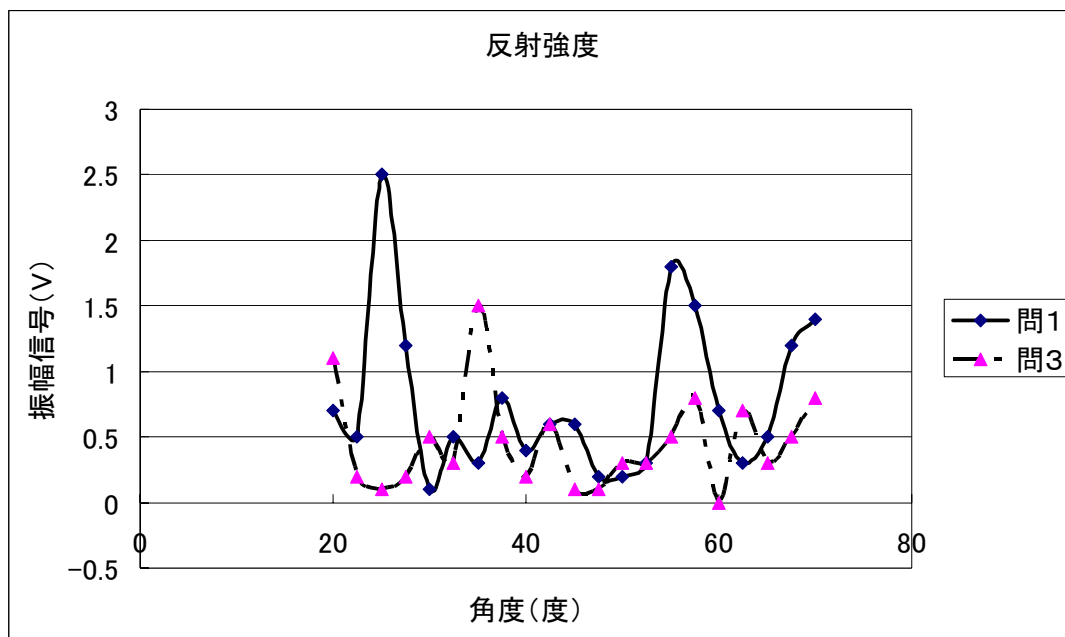
問 5-4

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$n = 1, \quad \theta = 35^\circ \text{ とすると, } d = 0.767 \text{ cm} = \frac{1.08}{\sqrt{2}} \text{ cm}$$

よって、面間隔は格子間隔の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍程度である。すなわち、図のような面によるもので

ある。



物理チャレンジ 2009

第2チャレンジ 実験問題

2009年8月4日(火)

諸注意・実験器具確認 8:30～8:40
実験問題にチャレンジ 8:40～13:20
実験器具後片付け 13:20～13:30

実験問題へチャレンジを始める前に下記の **<注意事項>**をよく読むこと。

チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の**実験の目的**や**実験で使用する装置・部品**などを読み、そのうえで、実験問題 I, II の課題 1 から課題 4 の順に取り組むこと。

<注意事項>

1. 開始の合図があるまで、問題冊子、解答用紙および方眼紙が入った封筒、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 解答用紙のすべてのページおよびすべての方眼紙の右上隅に、チャレンジ番号と氏名を記入すること。
3. 実験結果や計算結果、式の変形など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の場所に記入すること。下書き用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙と方眼紙に記入すること。
4. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓、ビニールテープ以外は使用してはならない。
5. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、手をあげて監督者に申し出ること。2回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。ただし、数には限りがあるので、交換できない場合もある。
6. チャレンジ開始後から 12:00 まではチャレンジを終了することはできない。
7. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、手をあげて監督者に知らせること。
8. 終了の合図があれば、解答用紙とグラフ用紙を封筒の中に入れ、机におく。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。また、机に貼られたチャレンジ番号と氏名が書かれた紙をはがし、箱に張り付けること。問題冊子と下書き用紙は持ち帰ってよい。

実験問題 I (ばねの弾性実験)

実験に向けて：

実験のテーマは、プラスチックばねを使用したばね定数の測定と、その測定結果を用いて、おもりを付けずにばねをつり下げた時の、ばね自体の質量によるばねの振動周期を調べて考察することである。

よく知られているように、万有引力や電磁気のクーロン力は2物体の距離が離れるにしたがって弱くなる。他方、距離が離れるにしたがって引きつける力が強くなる力も存在する。例えば、2つのクォーク粒子間にはたらく力は遠くに離すほど作用が強くなる。このように、自然現象の中にはさまざまな力が現れている。この実験では、距離が離れるに従って引きつける力が強くなる身近な例として、ばねの弾性力を取り上げた。

ばねの弾性力は平衡位置からのずれの大きさに比例し、ずれた部分にはもとに戻そうとする力がはたらくため、振動現象が現れる。ばねの伸縮に伴う振動が伝わっていく波は音波にみられると同じく縦波で、弦の振動や電磁波のような横波とともに、われわれの身の回りに数多く見受けられる現象である。

実験の目的：

ばねを引っ張るとばねは伸び、伸びの長さが加えた張力に比例することはフックの法則として知られている。そのときの比例係数をばね定数と言い、ばねを特徴づける定数である。水平に張った丈夫な支え糸をばねの輪の中に通してばねを水平に支え、ばねの一端を板に固定して他端に軽い細糸を付け、支え糸に沿って軽い細糸を水平に引っ張る。軽い細糸は水平にのびされ、仕切り板に取り付けられた定滑車を通して鉛直下向きに曲げられ、先端には留め具（フック）が取り付けられている。留め具（フック）におもりを掛けることによりばねの張力を調整し、ばね定数を求める。

ばねの質量が無視できる軽いばねにおもりを付けて鉛直につるし、静止した位置から少しおもりを下げて静かに離すと、おもりは振動をはじめますが、この振動についてはすでに学んでいることと思う。それでは、ばねの質量を考えに入れたときのおもりの振動はどうなるであろうか。おもりをまったく付けずに極端な場合でも、ばね自体には質量があるため、同様な振動をはじめます。では、どのくらいの違いがでるであろうか。

実験では、ばねの張力とばねの伸びを測定してばね定数を求め、ばね定数がばねの長さによりどのように変化するか調べる。次に、ばねの向きを水平から鉛直に変え、ばねにおもりを付けずにつり下げ静止させる。ばねの下端部を静止の時の位置より少し押し上げ離すと、ばねは自体に質量があるため振動をはじめます。ばねにおもりを付けずに、ばね自体の質量を考慮した振動が、ばねにおもりを付け、ばね自体の質量を無視した時に予想される振動と、どのように異なるか直接測定して確認し理解する。

実験で使用する装置・物品：

ばねの弾性実験装置を以下の写真に示す。

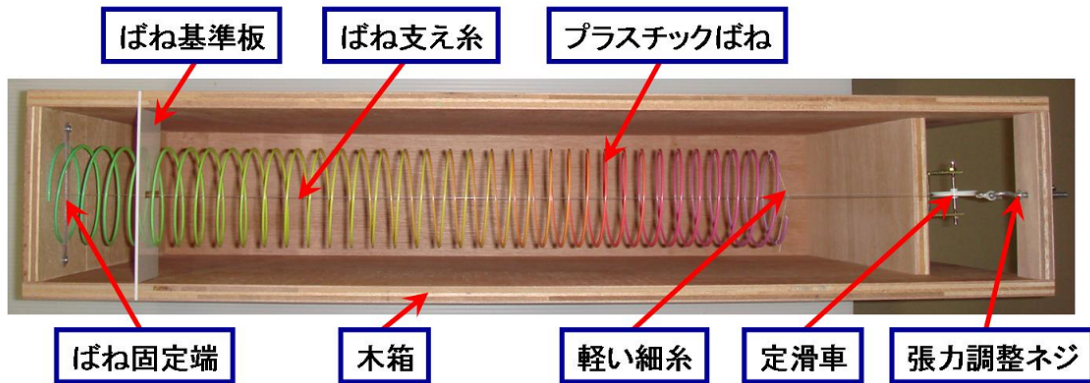


写真 1-1 ばね弾性実験装置上面図

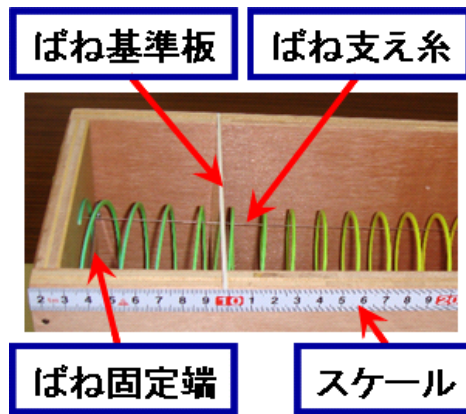


写真 1-2 端部拡大図

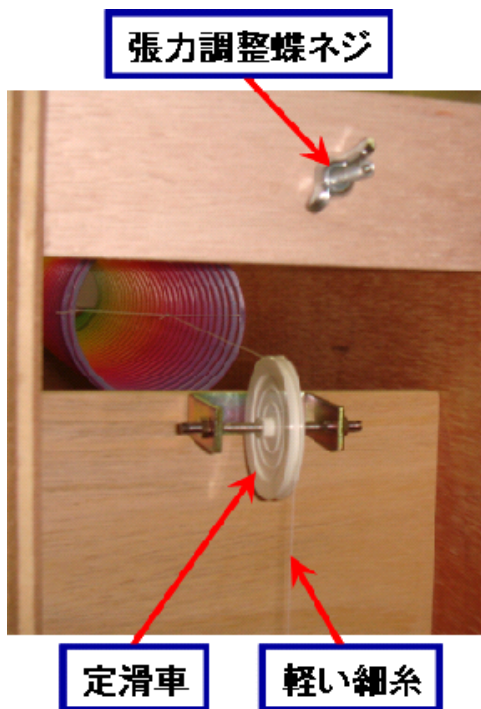


写真 1-3 定滑車拡大図

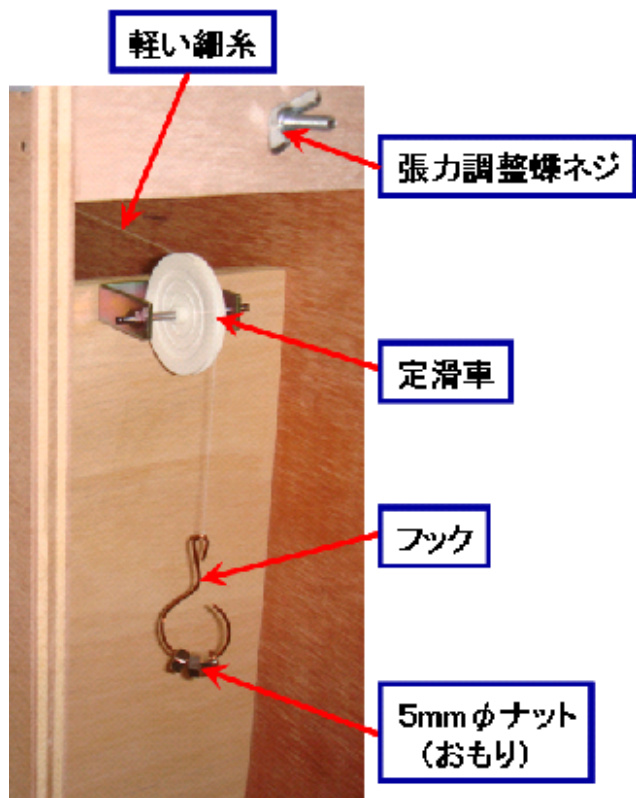


写真 1-4 フックとおもりの拡大図

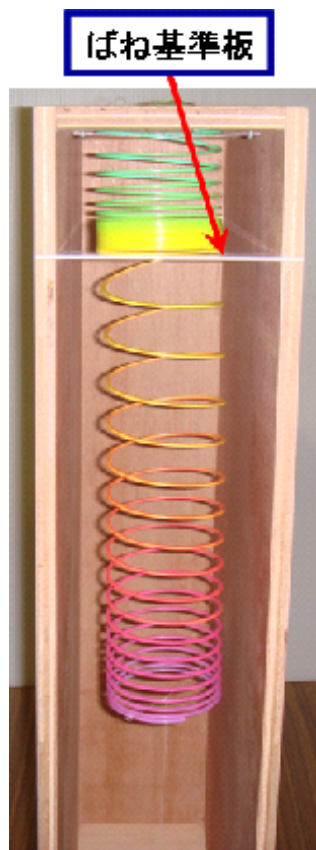


写真 1-5 ばねつり下げ図

実験装置は、

- (1) 木箱,
- (2) ばね固定用プラスチック細板,
- (3) ばね基準板,
- (4) ばね支え糸,
- (5) 張力調整ネジ,
- (6) プラスチックばね,
- (7) 軽い細糸,
- (8) 定滑車,
- (9) フック,
- (10) 5mmφナットのおもり,
- (11) 赤印厚板 (伸び測定用),
- (12) 小型プラスチック定規 (つり下げ伸び測定用),
- (13) 黒印ばね支持板 (つり下げ振動開始用),
- (14) ストップウォッチ

で構成されている。

以下各物品について説明する。

◆木箱

ばね定数測定には写真 1-1 のように木箱を横にして、木箱に沿ってばね支え糸を水平に張り、支え糸によってばねを水平に支える。ばねつり下げ実験の時は、張力調整ネジをはずしてその面を下にし、写真 1-5 のように木箱を立ててばねをつり下げる。つり下げるばねの長さは、ばね基準板を差込み調整する。

◆ばね固定用プラスチック細板

ばねの端の一巻きを木箱に固定するのに使用する。この透明プラスチック細板と木箱の板の間にばねの端の一巻きを差し込んだり引き出したりする。ばねの切り口が、写真 1-1 のように上側に来るようにする。留めネジは動かさない。

◆ばね基準板

白いプラスチック板で、写真 1-1 のように木箱の両方の横板に渡って板の切れ目に差し込む。ばねの伸びはこの位置を基準として求める。写真 1-2 に示されているように、横板に取り付けたスケールで 10cm の場所にばね基準板は位置している。

◆ばね支え糸

丈夫な糸 (テグス) で、写真 1-1 に見られるようにばねの輪の中を通して水平に張り、ばねを水平に保つ。ばね支え糸の一端は糸の張力調整ネジに結びつけられており、写真 1-3 にあるように張力調整蝶ネジを回すことによりばね支え糸の張力を調整する。ばねとばね支え糸の間には摩擦があるため、ばねはおもりに対応して伸びないので、ばね支え糸を手ではじいてばねを適度にゆすり、ばねが等間隔で安定するように調整する必要がある。

◆張力調整ネジ

ばね支え糸の張力は蝶ネジを回して調整する。

◆プラスチックばね

ばね支え糸により水平に保たれ、一端は木箱の板に固定され、約4巻き後にばね基準板が差し込まれて、他端に付けられた軽い細糸を通してばねに張力が加えられる。質量はばねを入れる箱の透明部分に記載されている。

◆軽い細糸

ばねの終端部の直径に沿って付けられ、またその中心から伸びてばねを引っ張っている白のミシン糸である。ばね定数測定の時、ばねから水平に伸びたこの軽い細糸は、定滑車を通して鉛直下向きに曲げられフックに結び付けられている。つり下げ振動実験の時は、十分にたるませて木箱の横板に粘着テープで留めておき、振動実験の邪魔にならないようにする。

◆定滑車

写真 1-3 に示されているように、木箱の仕切り板に取り付けられ、ばねからの水平な細糸を鉛直下向きに曲げる。滑車がなめらかに回転するか実験の始めに確認し、なめらかでない時は、回転軸のねじを回して調整する。

◆フック

写真 1-4 に見られるように、軽い細糸に接続され 5mmφのおもりのナットを掛けて、ばねに張力を与える。

◆5mmφナットのおもり

フックに掛け、ばねに張力を与える。

◆赤印厚板（伸び測定用）

ばねの伸びを測定するのに使用し、赤印が上部に付いているプラスチック板である。軽い細糸が付いているばねの端部に軽く接触させて木箱と直角になるように差し入れ、ばねの端部の位置をスケールで読み伸びを測定する。

◆小型プラスチック定規（つり下げ伸び測定用）

つり下げ実験の時にばねの伸びを測定するのに使用する。

◆黒印ばね支持板（つり下げ振動開始用）

つり下げ実験の時、ばねを下部より支え、少しばねを上を持ち上げてすばやく下ろし、ばねを振動させるのに用いる黒印のプラスチック板である。

◆ストップウォッチ

ばねのつり下げ振動の周期の測定に用いる。スタート・ストップ及びリセットのボタンがある。

課題 1. ばね定数の測定

課題 1-1. ばねの伸びの実験

フックの法則より自然長からのばねの伸びは、加えた張力に比例する。ばねを水平にし、張力にはおもりの重力を利用してばね定数を求める。

- (1) プラスチックばねを水平に支える支え糸が、ばねの輪の中を通り木製の箱の上側に張られている。支え糸に適度な張力を与えるために、張り加減を調節するねじが木箱の端に取り付けられているので、ねじを調整してばねがほぼ水平になるようにしなさい。ばねの一端は木箱の壁に固定され他端には軽い細糸がばねの直径に沿いほぼ水平に付けられていて、その軽い細糸の中心から同じ軽い細糸がのびて仕切り板の定滑車にかけられ、鉛直下向きに曲げられているのを確認しなさい。軽い細糸の先端にはフックが付けられているので、フックに3個のおもりを掛けてばねが適度に伸びることを確認しなさい。定滑車の動きが鈍いときは、滑車の軸棒のねじを調整し定滑車がなめらかに動けるようにしなさい。

注意点: [1]ばねとばねを支える支え糸との間に摩擦があるため、おもりを掛けてもばねは対応する長さに伸びないので、ばねの伸びを測定するときは、常に支え糸を指で何度かはじいてばねをゆすり、ばねの伸びが安定するように工夫しなさい。[2]細糸がばねの直径に沿って接着され、中心からばねを引く構造になっている。直径の細糸がほぼ水平になりばねの支え糸と接触していないことを確かめておきなさい。接触していた時はばね全体を回転させ、直径の細糸をほぼ水平にしなさい。

- (2) ばねの固定端からほぼ4巻伸ばした場所にばね基準板が木箱に差し込まれているのを確認し、ばね基準板から先のばねの巻き数を初期巻き数(整数値)としなさい。写真 1-1 がそうした状態になっている。ばねの終端の位置を測定する時は、ばねの終端部に軽く接触させて赤印厚板(厚さ10mm)を木箱に直角に差し込んで、側面に貼ってあるスケールを読んで、ばねの伸びを出しなさい。
- (3) ばねを引く力が弱いとばねの伸びが不安定になるので、おもりとして初めに5mmφのナットを1個、写真 1-4 のようにフックに掛けた状態を基準とし、そこからナットの数を増やしてばねを伸ばし、張力とばねの伸びの関係を5点以上測定しなさい。ナット1個の質量は1.1g、重力加速度の大きさは $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ としなさい。
- (4) ばね基準板を抜き取り、ばね基準板より先のばねの巻き数を初期巻き数の2/3程度の整数値になるようにばね基準板を木箱に差し込みなさい。細糸の先端のフックにおもりのナットを掛け、ばねの伸びと張力との関係を5点以上測定しなさい。ばねの支え糸を指ではじいてばねをゆすり、ばねの伸びが一様に安定させることに注意して測定しなさい。
- (5) ばね基準板を抜き取り、ばね基準板より先のばねの巻き数を初期巻き数の1/2程度の整数値になるようにばね基準板を再度木箱に差し込みなさい。同様にばねの伸びと張力との関係を5点以上測定しなさい。

- (6) ばね基準板より先のばねの巻き数を初期巻き数の $1/3$ 程度の整数値になるようにばね基準板を木箱に差し込み、ばねの伸びと張力との関係を 5 点以上測定しなさい。

課題 1 - 2. 実験の整理・考察

- (1) おもりのナットを 1 個掛けた時を基準とし、ばね基準板より先のばねの長さを測定してばねの伸びを求め、初期巻き数 (n_0) (●印で記入), $n_0 \times 2/3$ 程度 (▲印で記入), $n_0 \times 1/2$ 程度 (○印で記入), $n_0 \times 1/3$ 程度 (■印で記入) の各ばねについて、伸びを横軸にとり、ばねを伸ばす力を縦軸にしたグラフに測定点を記入し、グラフ上の各点が一つの直線の近傍に位置することを確認しなさい。
- (2) 測定により得られた直線の傾きから、各ばねに対するばね定数 ($k_{n_0}, k_{n_0 \times 2/3}, k_{n_0 \times 1/2}, k_{n_0 \times 1/3}$) を求めなさい。
- (3) 初期巻き数 n_0 のばね定数 k_{n_0} と $n_0 \times 2/3$ 巻き及び $n_0 \times 1/3$ 巻きの各ばね定数 $k_{n_0 \times 2/3}, k_{n_0 \times 1/3}$ との関係式を、測定値から求めなさい。また、初期巻き数 n_0 のばね定数 k_{n_0} と $n_0 \times 1/2$ 巻きのばね定数 $k_{n_0 \times 1/2}$ との関係式も測定値から求めなさい。

課題 2. ばねのつり下げ実験 (おもり無し自重のみ)

課題 2 - 1. 自重によるばねの伸び

- (1) ばねをつり下げる実験を行う。軽い細糸のフックからおもりをはずした後にばね基準板を引き抜き、ばねの固定端を引き抜いて木箱からはずしなさい。ばね支え糸の張力調整用のねじをゆるめて抜き取り、支え糸をばねからはずして実験の邪魔にならないように木箱の側面に粘着テープで固定しなさい。定滑車が付いている側を下にして木箱をゆっくりと立てなさい。ばね基準板を差し込み、その上にばねを乗せて、ばねの上部の端の一巻きを、引き抜く前と同じ状態になるように、ばね固定用プラスチック細板と木箱の間に押し込みなさい。手でばねを受けながら基準板を引き抜き、固定端から約 10 巻きの位置に再度基準板を差し込みなさい。ばねを静かにつり下げ、振動させて下端が木箱に接触しないことを確認しなさい。写真 1-5 がそうした状態になっている。接触した場合あるいは短すぎると思われた時は、基準板を引き抜き基準板より上側のばねの巻き数を増減させなさい。ばねの下端についている軽い細糸は振動実験の邪魔にならないように、十分にたるませて木箱の側面等に粘着テープで固定しなさい。

ばね全体の巻き数と基準板から先のばねの巻き数の比から、振動するばねの質量を求めなさい。ただし、ばね全体の質量はばねを入れる箱の透明部分に書かれている。

- (2) ばねを静かにつり下げて静止させなさい。ばねは質量があるため自然に伸び、写真 1-5 に見られるように上部のばねの伸びの方が下部の伸びより大きくなる。下端部の軽い細糸がばねの伸びに影響を与えないように注意しなさい。

- (3) ばねの上部から 8 巻きについて、一卷き毎のばねの長さを、プラスチック定規を用いて測定しなさい。

課題 2-2. 実験の整理・考察

- (1) 課題 1-2 で求めたばね定数の測定値を基にして、ばね一卷きのばね定数を求め、また求めた方法も書きなさい。
- (2) ばね一卷きのばね定数を用いて、つり下げているばねの上部から 8 巻きについて、一卷き毎の伸びを計算し、計算方法とともに記入しなさい。また、対応するばねの長さの測定値を記入しなさい。

課題 2-3. 自重によるばねの振動

ばね自身に質量があるため、おもりを付けなくてもばねは伸び、平衡位置から下端部をわずかに変位させ離すと、ばねは振動をはじめめる。この実験では、振動の周期を測定し、ばねの質量を無視しておもりを付けたときに予想される振動の周期と比較検討する。

- (1) ばねの下端部の軽い細糸が振動に大きな影響を与えないように注意して、水平にした黒印ばね支持板の上にはばねを乗せ、下端部の平衡位置より例えば 3cm 程度持ち上げてすばやく黒印ばね支持板を下げ、ばねに振動を与えなさい。ストップウォッチを用いて、振動の 10 周期を測定しなさい。同じ測定を 3 回繰り返しなさい。
- (2) 振動部のばねの巻き数が前実験の 3/4 程度の整数値になるように、基準板を差し込み直しなさい。軽い細糸に注意しながら 10 周期を測定し、同じ測定を 3 回繰り返しなさい。
- (3) 振動部のばねの巻き数が 1/2 程度の整数値になるように基準板を再度差し込み、ばねをつり下げなさい。10 周期を測定し、同じ測定を 3 回繰り返しなさい。
- (4) 振動部のばねの巻き数が 1/4 程度の整数値になるように基準板を差し込み、黒印ばね支持板を用いてばねを振動させ 10 周期を測定しなさい。同じ測定を 3 回繰り返しなさい。

課題 2-4. 実験の整理・考察

- (1) 始めに設定した巻き数の 4/4, 3/4 程度の整数値, 2/4 程度の整数値, 1/4 程度の整数値のそれぞれの巻き数のばねについて、質量 m とばね定数 k を算出し、その比 m/k を単位を含めて記入しなさい。
- (2) 4 種類の巻き数のそれぞれのばねに対して周期 T の平均値を求め、記入しなさい。
- (3) 両対数グラフ用紙（解答用紙では、上（右）端が下（左）端の 500 倍である）に、質量とばね定数の比 m/k を横軸に、ばね振動の周期 T を縦軸にして実験点を記入し、直線と考えて傾きを出しなさい。傾きから周期 T と質量とばね定数の比 m/k との間でどのような関係式が成り立つと考えられるか説明しなさい。
- (5) ばね定数 k_0 のばねで質量が無視できる時に、質量 m_0 のおもりをつり下げて振動させたときの周期 T_0 を表す式を導出しなさい。
- (6) 巻き数が 4/4, 3/4 程度の整数値, 2/4 程度の整数値, 1/4 程度の整数値のそれ

それぞれのばねの周期 T と、ばねの自身と同じ質量のおもりを付けた質量の無視できるばねの振動周期 T_0 との比を、方眼紙に記入しなさい。また、その結果から、ばねの周期 T と m/k との関係式を書きなさい。

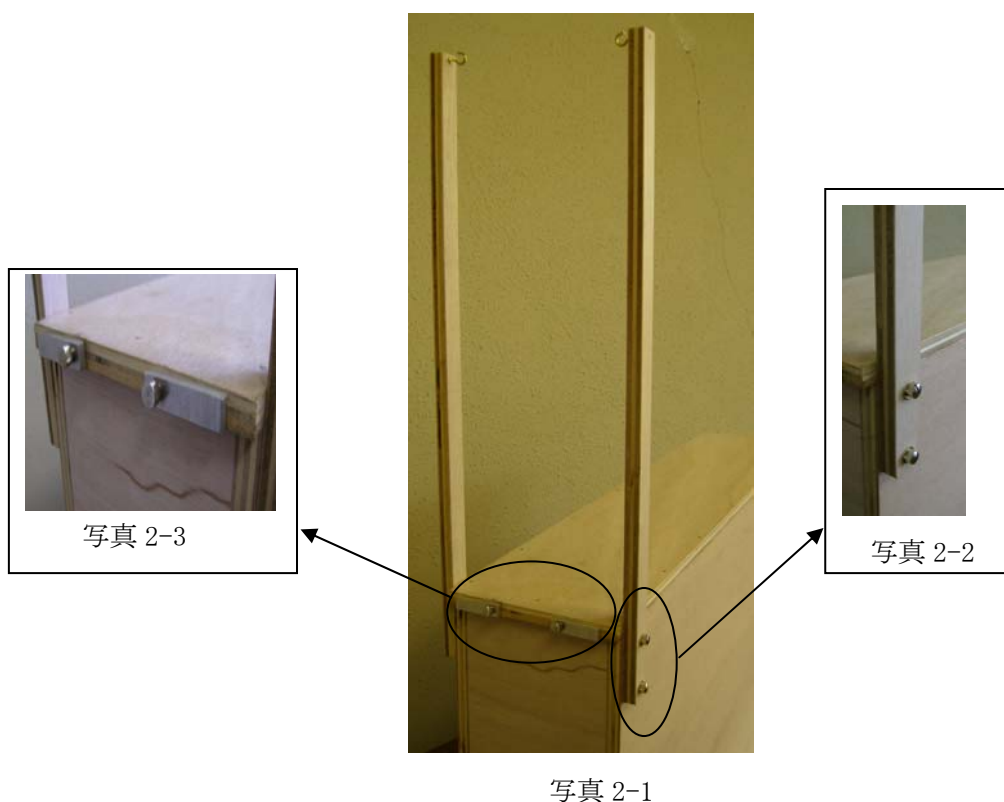
実験問題Ⅱ（エネルギーおよび運動量の保存則）

実験の目的：

重力中の物体の運動には、重力による位置エネルギーと運動エネルギーとが深く関与する。ここでは投射台を使ってさらに、平面内の物体の衝突におけるエネルギーおよび運動量の保存則を検証する。

実験で使用する装置・物品：

この実験では、ある高さから物体を水平方向に飛ばし、その落下位置から、水平に飛ばされた物体の初速度を求める。実験問題Ⅰで使用した箱を上下逆にして、投射実験の架台として使用する。架台は机の端に設置する。この架台の左側側面上部に、写真 2-1 のように、支柱を、上方に取り付けられているフックが内向きなるように 2 本のねじで取り付ける（写真 2-2）。また、長さ 4cm、幅 1cm のアルミの支柱 2 枚を、写真 2-3 のように、架台前面に横向きにねじで止めておく。この支柱の役割は方法(6)で述べる。



飛ばされた物体の着地点を知るために、予想される着地点付近のプラスチック板の上に A4 サイズのトレース方眼紙を置く。移動しないように、角に重し（大きなナット）を置く。その上にカーボン紙をかぶせる。投げ出された物体がこのカーボン紙の上に落下した場合、

カーボン紙をめくると、下にある方眼紙に黒く跡が付いている。その座標を調べることに
よって、物体の落下位置を定量的に知ることができる。読み取った落下跡には目印を付け
ておく。落下跡が識別しにくくなったら、随時、方眼紙を交換したり、位置を変えるよう
にする。

付属品：この実験で使用する投射用の物体として、次の4種類が用意されている。

- ・ ビー玉（大） 直径 17mm、重さ 6.2g、 個数 5個
- ・ ビー玉（小） 直径 12mm、重さ 2.5g、 個数 3個
- ・ 鉄球 直径 16mm、重さ 16g、 個数 1個
- ・ リング 外形 30mm、肉厚 2mm、 重さ 9g、 個数 1個

ただし、ビー玉の重さには0.2g程度のばらつきがある。

用いる物品リスト

1. プラスチックダンボール1枚
2. プラスチック板（片面に罫線の描かれたシートが貼られている）1枚
3. ガイドレール付の台1台
4. 振り子吊り下げ用支柱（フック付）2本
5. アルミの支柱（長さ4cm、幅1cm）2枚
6. アクリル棒とその台それぞれ1個
7. ビー玉を乗せる台（つりひも付き）1個
8. ビー玉（大）4個、ビニールテープ付ビー玉（大）1個
9. ビー玉（小）2個、鉄球1個、リング1個
10. 大きなナット（トレース方眼紙おさえ用重し）8個
11. サインペン1本、カーボン紙2枚、トレース方眼紙6枚
12. アクリル板（4cm×6cm）1枚、アクリル板（3cm×10cm）1枚

課題3：力学的エネルギーの保存則の検証

実験の目的：

物体の重力による位置エネルギーと、運動エネルギーの関係を調べる。以下の2つの場合について検証する。



写真 2-4



写真 2-5



写真 2-6

課題3-1. 支柱から吊り下げられた物体を、ある高さから静かに離し、物体が最下端にきたときの水平方向の速さを求め、最初の物体の位置エネルギーと、最下端での物体の運動エネルギーを比較する

方法

- (1) 写真 2-4, 2-5 のように、架台の左右の支柱に物体を乗せる台をぶら下げ、ダブルクリップのつまみ部分に径の大きいビー玉（直径 17mm）をのせる。
- (2) 支柱を前後に微調整して、写真 2-6 のように、物体を乗せたクリップのつまみが出ているアルミ面が、架台の先端の鉛直上方にくるようにする。このときのビー玉の位置を位置エネルギーの基準にする。そのために、架台上面からビー玉の下端までの距離 h_1 を測定しておく。
- (3) この位置で、ビー玉から鉛直に線を降ろしたときの位置 P をプラスチック板上にマー

クする。さらに、ビー玉の下端からプラスチック板上面までの距離 H を測定する。

(4) 写真 2-7 に示すように、ビー玉の乗った台の背後にかけられている糸をアクリル棒に引っ掛け、ゆっくり後方に引っ張りながら移動することによってビー玉を持ち上げる。その際アクリル棒にひっかけた糸の高さを徐々に上にずらしていくとよい。このようにして、ビー玉を架台から 10cm ほど持ち上げる。

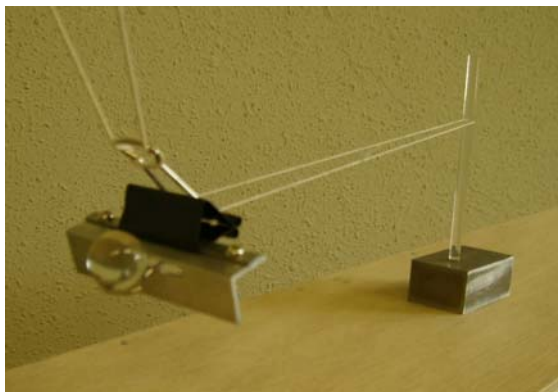


写真 2-7

(5) この状態で、ビー玉の乗った台を引っ張っている糸を、写真 2-8 で示すように、指で静かにアクリル棒からはずす。ビー玉の乗った台がスムーズに前後に振れることを確認する。台がねじれて振れるような場合は、もう一度(2)から調整しなおす。



写真 2-8

(6) 台がスムーズに振れることが確認できたら、最下点で物体の乗った台を止めてビー玉を水平方向に飛び出させるために、架台の先端に取り付けた 2 枚の支柱を写真 2-9 のように垂直にしてネジでとめる。この状態で、(4)のように、ビー玉の乗った台を静かに持ち上げる。架台の上面からビー玉の下端までの距離が、 $10\text{cm}+h_1$ になるようにする。ここで、写真 2-8 のように糸をアクリル棒からそっと離す。真下に来たとき、台が支柱にぶつかり(写真 2-10)、ビー玉が慣性により水平に飛び出す。そのビー玉の落ちた位置 Q は、カーボン紙でつけたマークによって知ることができ、水平方向の飛行距離 S が求まる。



写真 2-9



写真 2-10

- (7) 同じ高さからの測定を 5 回行い、それぞれの結果を記録する。
- (8) (3) で測定したビー玉の下端からプラスチック板上面までの距離 H から、ビー玉の落下時間が求まる。さらに、水平方向に飛んだ距離からビー玉の飛び出したときの速さが決まり、運動エネルギーが求まる。
- (9) 測定された、ビー玉の位置エネルギーと運動エネルギーの関係を考察する。
- (10) 位置エネルギーの基準からの高さが 8cm の場合に対して、同じような測定を行い、結果について考察する。
- (11) 以上の実験が終了したら、課題 3-1 で使用した物体を乗せる台および支柱等を架台からはずしてケースにしまう。

課題 3-2. 写真 2-11 に示すように、ガイドレールでできた斜面上のある高さから、静かに物体をころがし、最下端で水平方向に架台から打ち出す。この場合の物体の位置エネルギーと運動エネルギーの関係を調べる。物体として、球と円環を用いて測定し、斜面上の落下について物体の形による違いを調べる。



写真 2-11



写真 2-12



写真 2-13

方法

- (1) 写真 2-11 に示すようなガイドレールのついた台を、架台の上に設置する。さらに、ガイドレール出口に厚さ 6 ミリのアクリルの板を置く。これによってガイドレールから出た物体はスムーズに水平方向に運動を続けることができる。このアクリル板の中央付近に直径 2 ミリメートルの小さな穴があいている。この穴は、後の実験でビー玉を安定して乗せるための穴である。この穴はアクリル板の中心から前後 10 ミリメートルずれてあいている。後の実験のため、この穴の位置が、ガイドレール出口より、架台出口に近い位置に来るようにアクリル板を置く。
- (2) ビー玉が架台から水平方向に飛び出す真下の位置をプラスチック板上の紙にマークする。ビー玉が落下する高さとして、プラスチック板からアクリル板の上面までの距離 H を測定する。
- (3) 課題 3-1 で使用したのと同じビー玉を斜面上ある高さ（約 15cm 程度）に載せ、写真 2-13 に示すように、ビー玉が滑り落ちないようにプラスチック板で支え、ガイドレールの端にサインペンでしるしを付けておく（写真 2-12）。このときの、ビー玉の滑り台水平面からの高さを測定する。
- (4) ビー玉を止めていた支えを静かに放し、ビー玉をガイドレール上に転がし、滑り台から水平に飛び出させた後、着地した位置から飛行距離を測る。
- (5) 課題 3-1 のときと同じようにビー玉が水平方向に飛び出したときの速さを求める。
- (6) おなじ高さからの落下の測定を 3 回行いそれぞれの結果を記録する。
- (7) ビー玉の位置エネルギーと最下端での運動エネルギーの関係を考察する。
- (8) 同じような測定を大きさの違うビー玉、鉄球および、円環で測定し、それらの結果について考察する。

課題 4 : 運動量の保存則の検証

実験の目的 :

運動量の保存の法則を、2 物体の直線上の衝突、および平面内の衝突について実験的に検証する。同時に衝突前後における運動エネルギーの変化について調べる。

課題 4-1-1. 直線上（一次元）の衝突

方法

- (1) 課題 3-1 で使用した大きなビー玉を前回課題 3-2 の実験と同じようにサインペンでしるしをつけた高さから静かにころがし、滑り台から水平に飛び出させた後、飛行距離を測る。
- (2) アクリル板に空けた小さな穴の上に同じ種類のビー玉を標的として乗せる（写真 2-14）。

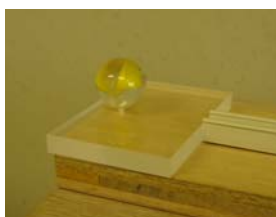


写真 2-14

- (3) (1)と同じようにサインペンでしるしをつけた高さから静かにビー玉をころがし、水平方向の飛び出し口におかれた標的のビー玉に正面衝突させる。衝突されたビー玉の落下の方向が、①の場合の方向から大きくずれているようだったら、ビー玉を乗せているアクリル板の位置を微調整して、できるだけ正面衝突となるようにする。
- (4) 着地した位置からそれぞれのビー玉の衝突後の飛行距離を測定する。
- (5) 同じ測定を3回行う。
- (6) 衝突前後での運動量および運動エネルギーの関係を調べる。また反発（跳ね返り）係数を求める。
- (7) 別に、ビニールテープを張ったビー玉が用意されている。見つからない場合は、手を上げて監督員からもらう。
- (8) テープを張ったビー玉をアクリル板の上に乗せる。テープを張ったところが衝突面となるように置く。
- (9) 前回のビニールテープのはっていない場合の衝突実験と同じ条件で衝突させる。それぞれのビー玉の落下位置を測定する。
- (10) 同じ測定を3回行う。
- (11) これらの測定結果から、衝突前後での運動量および運動エネルギーの関係を調べる。また、このときの反発（跳ね返り）係数を求める。

課題4-1-2（チャレンジ実験） 時間に余裕のあるものは、異なる種類のビー玉での正面衝突実験から衝突前後でのエネルギーおよび運動量の関係を調べる。また反発（跳ね返り）係数を求める。

課題4-2. 平面上（二次元）の衝突

課題4-2-1. 大きさ、質量とも同じビー玉の衝突

方法

- (1) 一次元での衝突実験と同じように、斜面の同じ高さからビー玉をころがし、落下位置を計測する。
- (2) 標的となる同じ大きさのビー玉をアクリル板の穴の上に乗せ、アクリル板を正面から横にずらして設置する。
- (3) (1)と同じように、斜面からビー玉をころがし(2)で設置したビー玉に斜めに衝突した

2球が、水平方向に飛び出して着地した位置を観測する。2つのビー玉の落下位置が計測しにくい場合は、標的の位置をずらして、衝突させる。2つのビー玉が、進行方向に対して30度から60度程度の範囲に飛ぶようにすると観測しやすい。

(4) 標的の位置が決まり、それぞれのビー玉の落下位置がほぼ予想できたら、それぞれの落下位置に方眼紙と、カーボン紙を置く。(方眼紙、カーボン紙はA4サイズで小さく、広い範囲をカバーすることができないので、あらかじめ落下位置を予想する必要がある)

(5) 衝突実験を行い、それぞれのビー玉の落下位置の座標を読み取る。(1)で計測したビー玉の運動量ベクトルと、衝突後のそれぞれのビー玉の運動量ベクトルとの関係を調べる。

(6) 標的の位置をわずかに移動させ、同じような衝突実験を行い、衝突後のそれぞれのビー玉の運動量ベクトルとの関係を調べる。

(7) これら一連の衝突において、ビー玉の運動エネルギーは、衝突前後でどのように変化したか。

課題4-2-2. 大きさ、質量のちがうビー玉の衝突

方法

課題4-2-1と同じ衝突実験を行う。今回は標的として小さなビー玉を使用する。

(1) 標的位置を微調整することによって、衝突後の2つのビー玉の落下位置が、計測可能な範囲になるような条件を見つけて行う。

(2) 適当な条件を見つけたら、前回の実験と同じ方法で衝突前後における、運動量および運動エネルギーの関係を調べよ。

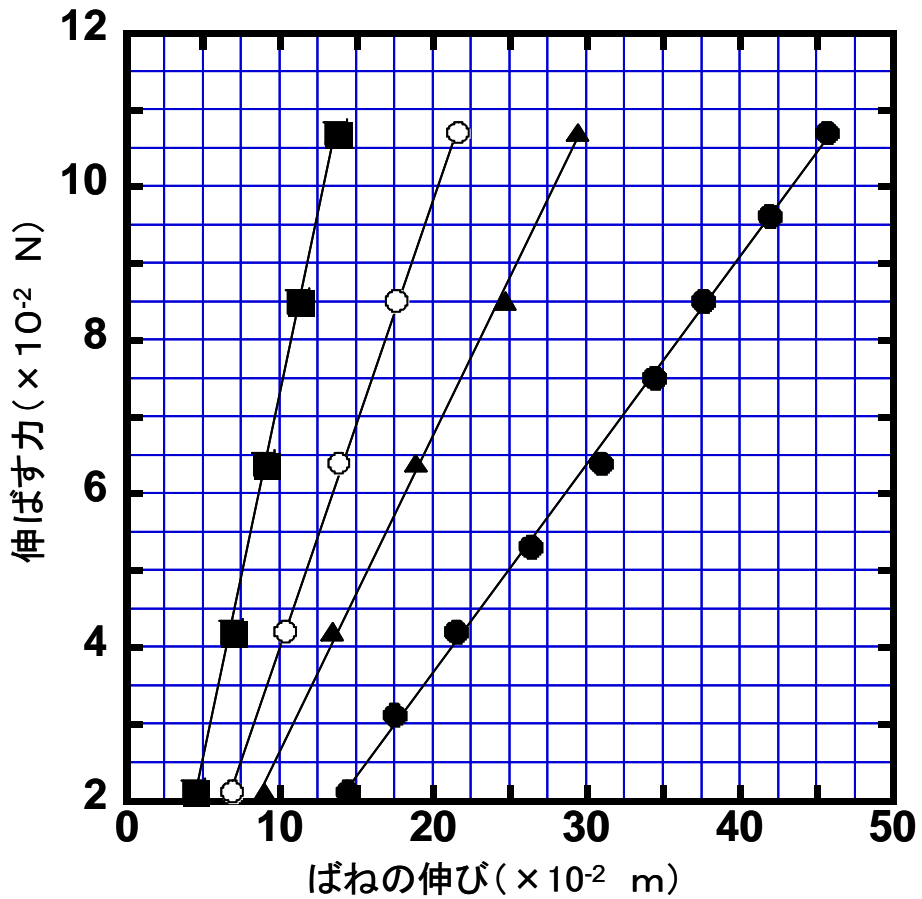
物理チャレンジ2009 第2チャレンジ 実験問題 測定例

物理チャレンジ 2009 実験課題

解答用紙 1

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-2 (1)



初期巻き数(n_0) 31 巻き

点

課題 1-2 (2)

	巻き数 (整数)	ばね定数 (N/m)
n_0	31	0.27
$n_0 \times 2/3$ 程度	20	0.42
$n_0 \times 1/2$ 程度	15	0.58
$n_0 \times 1/3$ 程度	10	0.90

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-2 (3)

ばね定数は、 $k_{n_0} = 0.27$, $k_{n_0 \times 2/3} = 0.42$, $k_{n_0 \times 1/2} = 0.58$, $k_{n_0 \times 1/3} = 0.90$ と測定されたので、
 $k_{n_0} / k_{n_0 \times 2/3} = 0.64 \approx 2/3$, $k_{n_0} / k_{n_0 \times 1/2} = 0.47 \approx 1/2$, $k_{n_0} / k_{n_0 \times 1/3} = 0.30 \approx 1/3$ と近似されると
 考えられる。したがって、 $1/k_{n_0 \times 2/3} + 1/k_{n_0 \times 1/3} = (2/3 + 1/3)1/k_{n_0} = 1/k_{n_0}$

$$1/k_{n_0 \times 1/2} + 1/k_{n_0 \times 1/2} = 1/k_{n_0}$$

点

課題 2-2 (1)

31 巻き、20 巻き、15 巻き、10 巻きの各ばね定数より、各巻き数のばねに対する 1 巻き当りのばね定数は、それぞれ 8.4 (N/m)、8.4 (N/m)、8.7 (N/m)、9.0 (N/m) となり、平均をとると 8.6 (N/m) となる。

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-2 (2)

測定値	4.4 cm	4.1 cm	4.0 cm	3.9 cm	3.7 cm	3.6 cm	3.5 cm	3.3 cm
計算値	3.7 cm	3.5 cm	3.4 cm	3.2 cm	3.0 cm	2.9 cm	2.7 cm	2.6 cm
計算方法	ばね全体の質量と巻き数より、1巻き当りのばねの質量を算出する。対象とする1巻きのばねより下のばねの重力と1巻き当りのばね定数よりばねの伸びを求める。ばねの自然長などを考慮していないので測定値とのずれが生ずる。							

点

課題 2-4 (1)

	× 4/4 巻き	× 3/4 巻き	× 2/4 巻き	× 1/4 巻き
質量 m	0.034 (kg)	0.025 (kg)	0.017 (kg)	0.0084 (kg)
ばね定数 k	0.36 (N/m)	0.48 (N/m)	0.72 (N/m)	1.4 (N/m)
m/k	0.094 (s ²)	0.052 (s ²)	0.024 (s ²)	0.0060 (s ²)

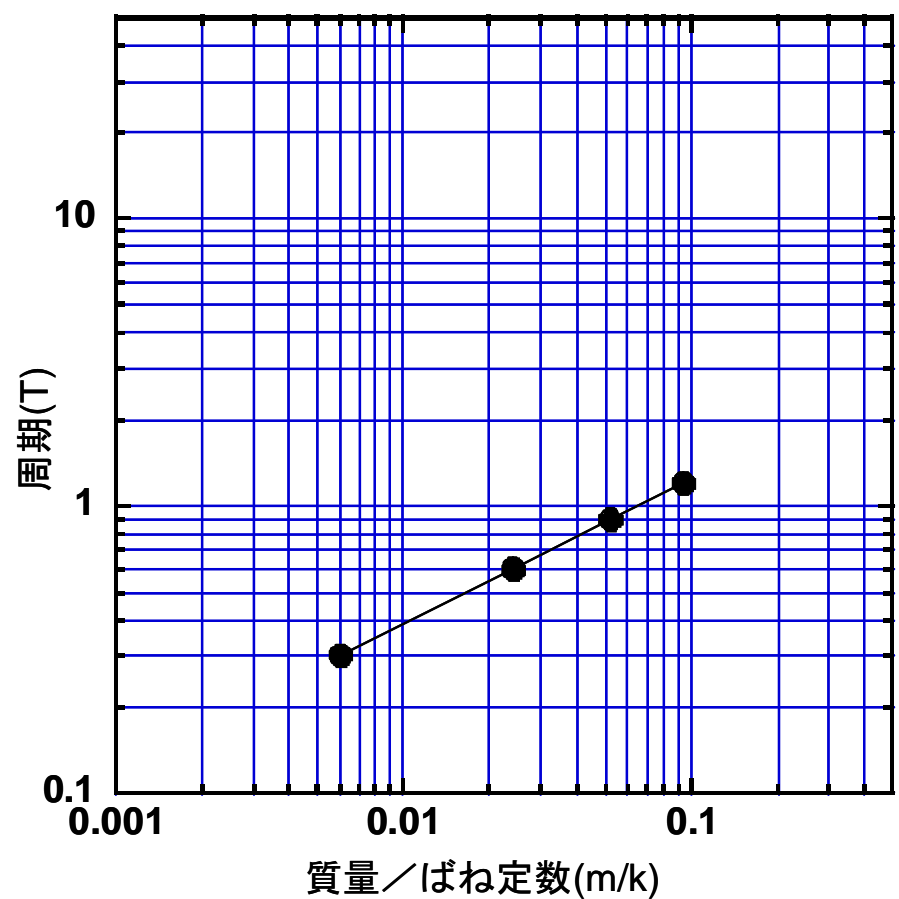
点

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-4 (2)

	× 4/4 巻き	× 3/4 巻き	× 2/4 巻き	× 1/4 巻き
周期 T	1.20 秒	0.89 秒	0.60 秒	0.30 秒

課題 2-4 (3)



点

説明 A と B を定数とし、 $T = A(m/k)^B$ で表されるとすると、
 $\log T = \log A + B \log(m/k)$ となり、両対数グラフ上の直線の傾きが B となる。実験点をプロットすることにより、直線の傾きから、B がほぼ 0.5 になり、 $T \propto \sqrt{m/k}$ になることが知れる。

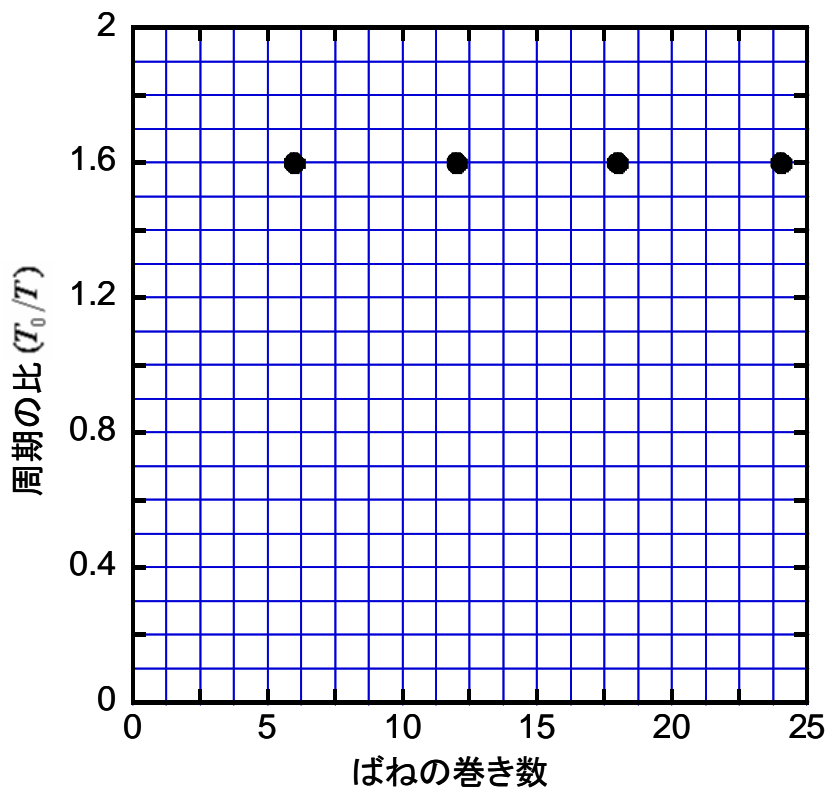
点

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-4 (4)

フックの法則により、物体には変位 x の大きさに比例する復元力がはたらき、物体は単振動をする。単振動の角振動数を ω とすると、 $m_0\omega^2 = k_0$ より $\omega = \sqrt{k_0/m_0}$ 、
従って、周期は $T_0 = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{m_0/k_0}$ で表される。

課題 2-4 (5)



点

$$T = \frac{T_0}{1.6} = \frac{2\pi}{1.6} \sqrt{\frac{m}{k}} = 3.9 \sqrt{\frac{m}{k}} \approx 4 \sqrt{\frac{m}{k}}$$

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 3-1

測定データ 1 : 位置エネルギーの基準からの高さが 10cm のときの、水平飛行距離 S の測定結果 :

1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
415	410	420	414	415	415 mm

測定データ 2 : 位置エネルギーの基準からの高さが 8cm のときの、水平飛行距離 S の測定結果 :

1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
370	365	368	368	367	368 mm

今回測定した、位置エネルギーの基準からの高さ、水平飛行距離 S 、自由落下距離 H の間にどのような関係式が成り立つか、力学的エネルギーの保存則を用いて考察せよ。またその結論を測定値と比較して議論せよ

$H = 420$ mm なので、自由落下時間を t とすると、 $\frac{1}{2}gt^2 = H$ より、

$$t = \sqrt{2H/g} = 0.293 \text{ s}$$

つまり、自由落下時間は一定となる。一方、力学的エネルギー保存則から、

$$mgh = \frac{1}{2}mU^2$$

なので、 U を求めると、

$$U = \sqrt{2gh}$$

$U = S/t$ より、

$$S = U \cdot t = \sqrt{2gh} \sqrt{2H/g} = 2\sqrt{hH}$$

高さ $h = 10$ cm のとき、水平移動距離 $S = 2\sqrt{Hh} \approx 410$ mm となる。

高さ $h = 8$ cm のとき、水平移動距離 $S = 2\sqrt{Hh} \approx 367$ mm となる。

どちらも、誤差の範囲内で測定値と一致している。

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 3-2

ビー玉 (大)、ビー玉 (小)、鉄球、円環を、同じ高さからガイドレール上を転がしたときの、水平飛行距離の測定値。

	1 回目	2 回目	3 回目	平均値
ビー玉 (大)	375	376	376	376 mm
ビー玉 (小)	375	370	365	370
鉄球	385	380	378	381
円環	303	305	305	304

ガイドレール上を転がした場合の位置エネルギーと運動エネルギーの関係を考察せよ。転がす物体の種類によって違いが見られた場合その理由を考察せよ。

実験条件：斜面の高低差 150 mm - 6 mm = 144 mm

エネルギー保存則から $\frac{1}{2}mU^2 = mgh$ が成り立つとすると、 $U = \sqrt{2gh} \approx 1.68$ m/s となる。

一方、水平投射の高さ (自由落下距離) は 430 mm より、落下時間は $\sqrt{2H/g} = 0.296$ 秒。以上より、位置エネルギーと水平方向の運動エネルギーで力学的エネルギー保存則が成り立つなら、水平飛行の距離は、

$$S = U \cdot t \approx 497 \text{ mm}$$

となるはずである。これに対して、上記の測定値は、誤差を考えても大きく異なり、一致していない。

次に、この理由を考察する。まず、ビー玉の大きさは大きな作用をしていないので、空気の抵抗などは、この不一致の大きな原因ではないと考えられる。球形の形をしているビー玉と鉄球は似た値を与えているのに対して、円環が大きく異なる水平飛行の距離を与えていることから、この違いは、重さより形状が大きな作用をしていると考えられ、質量の分布の違いが大きな違いを生み出している可能性が高い。このような質量の分布が大きな違いを生み出すエネルギーを考えると、形状により物を同じ速度で回転するのに必要な力が変化するので、回転のエネルギーがこの違いの最も大きな要因と予想できる。

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 4-1-1 直線上（一次元）の衝突

水平飛行距離の測定結果

- ・ 同じビー玉どうしの衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合	382	380	380	381 mm
標的のビー玉	364	372	365	367
ぶつけたビー玉	100	96	98	98

- ・ 結果について考察せよ。

ぶつけたビー玉は、衝突後いったん静止し、その後、回転を続けて飛び出すように見える。つまり前問より、ぶつけたビー玉の水平飛行は回転のエネルギーによって起こっていると考えられるので、無視する。飛行距離は速さに比例するので、運動量は水平飛行距離に比例し、それより、衝突前後での運動量の比は、水平飛行の距離で考えることができるので、

$$\text{反発係数 } e = 367/381 \approx 0.96$$

となり、1 に近く弾性衝突と見なせる ($e = -(98 - 367)/381 = 0.71$ でも正解)。

- ・ 標的のビー玉にビニールテープを張った場合の衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合	386	384	386	385 mm
標的のビー玉	240	242	244	242
ぶつけたビー玉	152	154	152	153

・ この測定結果は、前回のビニールテープの張っていない衝突と大きく違う。その理由について考察せよ。また今回の衝突において、衝突前後で、全体の運動量および運動エネルギーはどのように変化したか。

ビニールテープの重さを無視すると、

$$\text{運動量の比 } 385/(242+153) \approx 0.97$$

となり、保存していると考えられる。一方、

$$\text{運動エネルギーの比 } 385^2/(242^2+153^2) \approx 1.8$$

となり、これは保存していない。ビニールのため、反発係数は $e = -(153-242)/385 \approx 0.23$ となり、非弾性衝突となるためと考えられる。

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 4-1-2 直線上（一次元）の衝突

水平飛行距離の測定結果

- ・ 小さなビー玉を標的とした衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合	384	386	382	384 mm
標的のビー玉	515	530	524	523
ぶつけたビー玉	182	182	180	181

- ・ 結果について考察せよ。

いままで見てきたように、ビー玉の速度 U は、水平飛行距離と比例する。そこで、この問題でも運動量が、水平飛行距離に比例することから、運動量の保存を、水平飛行距離から考えることとする。まず、小さなビー玉と等しい運動量を持つ大きなビー玉があるとする、その飛行距離は、

$$523/2.5 \approx 209 \text{ mm}$$

となる。これから、衝突後の運動量を考えると、 $209+181=390 \text{ mm}$ に比例すると考えられ、この値は、標的がない場合の水平飛行距離 384 mm とほぼ一致している。つまり運動量保存則が成り立っていると考えられる。

次に力学的なエネルギーについて考察する。同様に速度が水平飛行距離に比例するので、

$$523^2/2.5 + 181^2 \approx 377^2$$

となる。つまり、標的がない場合の水平飛行距離 384 mm とほぼ一致しているので、力学的エネルギー保存則が成り立っていると考えられる。

最後に反発係数 e について考える。同様に速度が水平飛行距離に比例するので、

$$e = -(181 - 523)/384 \approx 0.89$$

弾性衝突に近い値を与えていることがわかる。

点

チャレンジ番号	氏名

課題4-2 平面上（二次元）の衝突

課題4-2-1 大きさ、質量とも同じビー玉の衝突

衝突前後のビー玉の運動量ベクトルを下のグラフ用紙に示すことによって、運動量保存則について議論せよ。

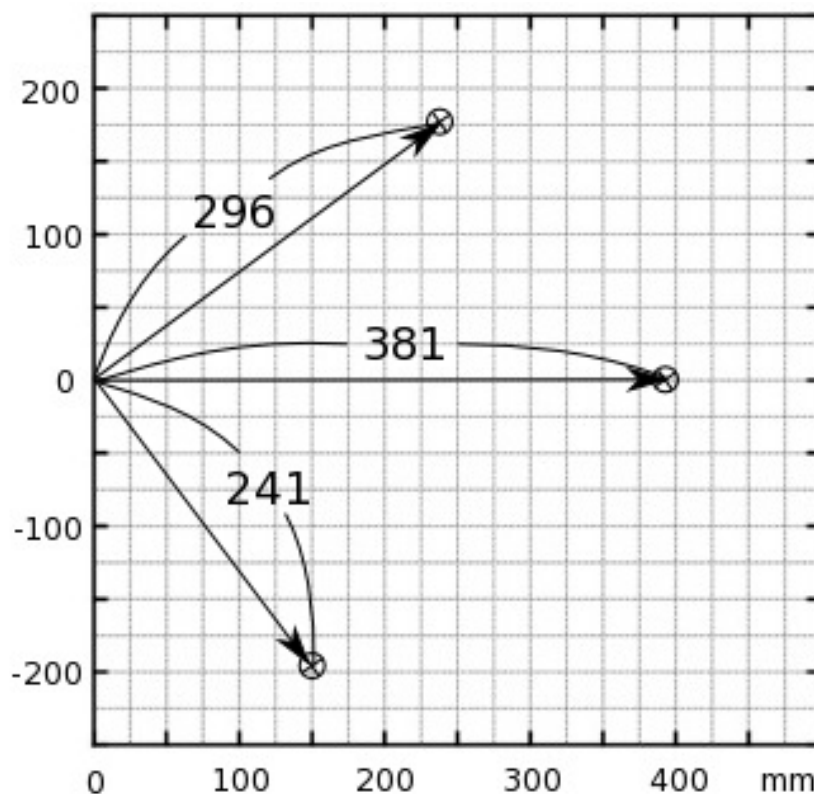
ビー玉の速さは飛行距離に比例するので、以下では飛行距離を用いて保存則について議論する。

まず、衝突をしないビー玉については、その飛行距離は 380mm なので、これを衝突前のビー玉の速度と考える。

次に衝突後のビー玉の落下位置については、標的は前方 235mm で右 180mm となり、その衝突地点から飛行距離は 296mm であった。

また、投射したビー玉については、前方 148mm で左 190mm に落下した。以上の値から、運動量保存則については、前方には $234+148 \approx 383$ 、左右には $180 \approx 190$ となっており、方眼紙の横軸方向、縦軸方向の両方の向きについて、運動量保存則が成立していることがわかる。また、このときエネルギー保存則についても、 $241^2 + 296^2 \approx 381^2$ より、ほぼ成立していることがわかる。

何回か測定を行っても、すべての場合について、同様の関係が成り立っている。



点

チャレンジ番号	氏名

課題4-2-2 大きさ、質量のちがうビー玉の衝突

衝突前後のビー玉の運動量ベクトルを下のグラフ用紙に示すことによって、運動量保存則について議論せよ。

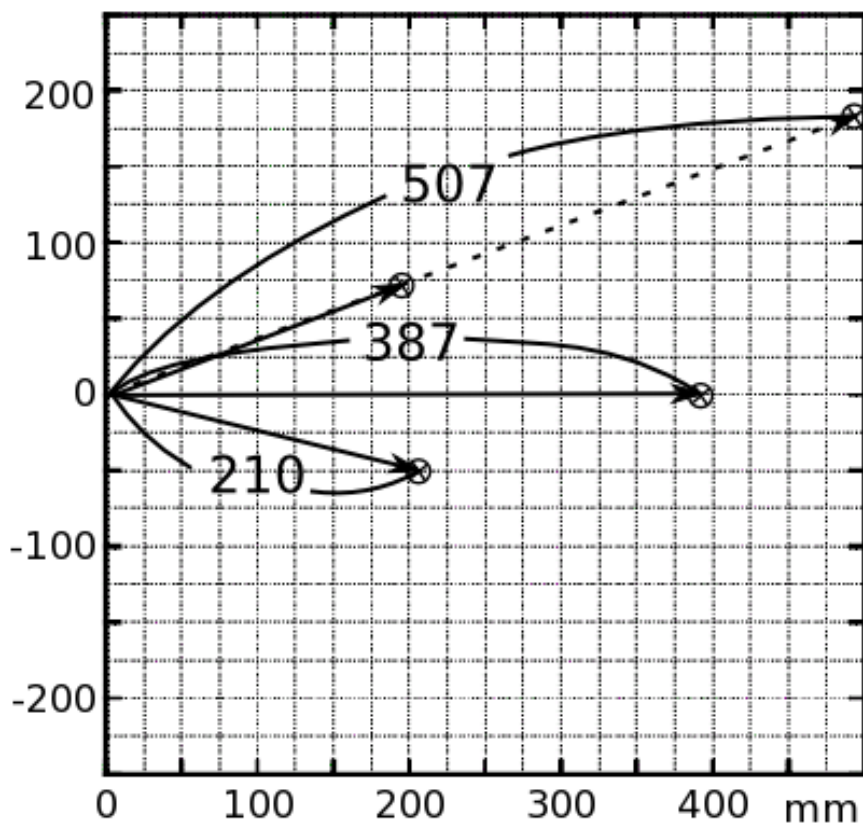
前の課題と同様に、飛行距離を用いて、それぞれの保存則について議論する。

まず、衝突をしないビー玉については、その飛行距離は 387mm なので、これを衝突前のビー玉の速度と考える。

次に衝突後のビー玉の落下位置については、標的は前方 480mm で右 164mm、飛行距離が 507mm となった。この小さい玉は、大きい玉の質量の $1/2.5$ なので、大きい玉を基準として、小さい玉の運動量は、その飛行距離の $1/2.5$ に比例するので、上記の飛行距離を $1/2.5$ して、前方 192mm で右 66mm と考える。

大きい方のビー玉については、前方 204mm で左 50mm なので、前方には $204+192 \approx 387$ 、左右には $50 \approx 66$ となり、ほぼ一致している。

一方、衝突後の運動エネルギーについては、 $\frac{1}{2.5} 507^2 + 210^2 \approx 383^2$ に比例する。一方、衝突前のエネルギーは 387^2 に比例するので、この場合もほぼ運動エネルギーが保存している。



点

物理チャレンジ 2010

第2チャレンジ 実験問題

2010年8月3日（火）

諸注意・実験器具確認	8:30	～	8:40
実験問題にチャレンジ	8:40	～	13:20
実験器具後片付け	13:20	～	13:30

実験問題にチャレンジを始める前に下記の<注意事項>をよく読むこと。

チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の<実験問題の背景>、<実験で使用する部品>およびいくつかの部品についての説明>を読み、<測定盤の組み立て>を行え。その後<測定を始める前に>を読み、課題1から課題4に取り組むこと。

<注意事項>

1. 合図があるまで、問題冊子、解答用紙と方眼紙が入った封筒、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 監督者の指示に従って封筒、解答用紙の全てのページ、およびすべての方眼紙の右上隅にチャレンジ番号と氏名を記入すること。
3. 実験結果や計算結果、式の導出など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の場所に記入すること。下書き用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙と方眼紙に記入すること。
4. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓、セロファンテープ以外は使用してはならない。ただし、電卓は自分の物を使用してもよい。
5. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、手をあげて監督者に申し出ること。2回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。ただし、数には限りがあるので、交換できない場合もある。
6. チャレンジ開始後から12:00まではチャレンジを終了することはできない。
7. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、手をあげて監督者に知らせること。
8. 終了の合図があれば、解答用紙とグラフ用紙を封筒の中に入れ、机におく。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。また、机上に貼られたチャレンジ番号と氏名が書かれた紙をはがし、箱に入れること。問題冊子と下書き用紙は持ち帰ってよい。

<実験問題の背景>

光は電磁波であると同時に振動数に比例するエネルギーを持つ粒子でもあるという二重性を持つ。電磁波は、その名前が示すように電場と磁場からなる波である。よく知られているように真空中での光の速さは $c \cong 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ であるが、物質中を進む光の速度を v とすると、この値は c よりも小さくなる。 c/v を物質の屈折率 n と呼び、物質の電氣的、磁氣的性質によって決まる。したがって、物質中の光の伝播や異なる物質の境界面での光の反射、屈折には物質がどの様に電磁波に応答するかが反映される。本実験課題では光の電磁波としての性質を中心に、課題 1 では屈折率について、課題 2～4 では電磁波の横波としての性質について実験を進める。

電場、磁場とその波である電磁波について

帯電した紙片や磁石は、お互いが接触していなくても互いに引き付けあったり反発しあったりする。このように、物体に働く力が、物体の位置、速度、性質（電荷など）で決定される時、この空間を力の場と言う。上に述べた、帯電した物体に働く力の場を電場、磁極に働く力の場を磁場と言う。電場や磁場は大きさと向きを持つため、ベクトル場であると言う。この電場と磁場が時間によらないとき、点 (x, y, z) における静電場と静磁場はそれぞれ $\vec{E}(x, y, z)$, $\vec{H}(x, y, z)$ のように位置の関数としてのベクトルで表される。図 1 に示すように電磁場が時間とともに振動しながら真空中をある方向（ここでは x の正の方向とする）に速度 c で進む場合、電場および磁場ベクトルは位置 x と時刻 t を用いて次のような正弦波の式で表すことができる。

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \sin[2\pi f(t - \frac{x}{c})] \quad \text{および} \quad \vec{H}(x, t) = \vec{H}_0 \sin[2\pi f(t - \frac{x}{c})] \quad (1)$$

ここで \vec{E}_0 , \vec{H}_0 はそれぞれ電場と磁場の振幅ベクトル、 f は振動数、 c は波の速度を表す。このとき、波の波長 λ は

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

と表される。式 (1) で表される x 軸方向に進む波は yz 平面内では何処でも同じ位相と振幅を持つので平面波と呼ばれる。真空中を伝わる電磁波の速度は文字 c で表されるが、前述のように物質中を伝わる場合の速度は、物質の屈折率を n とすると、 c/n と遅くなる。また x 軸に平行な方向に進む電磁波の振幅ベクトル \vec{E}_0 , \vec{H}_0 は x 軸に垂直かつ互いに直交する。この波形を図 1 に示した。

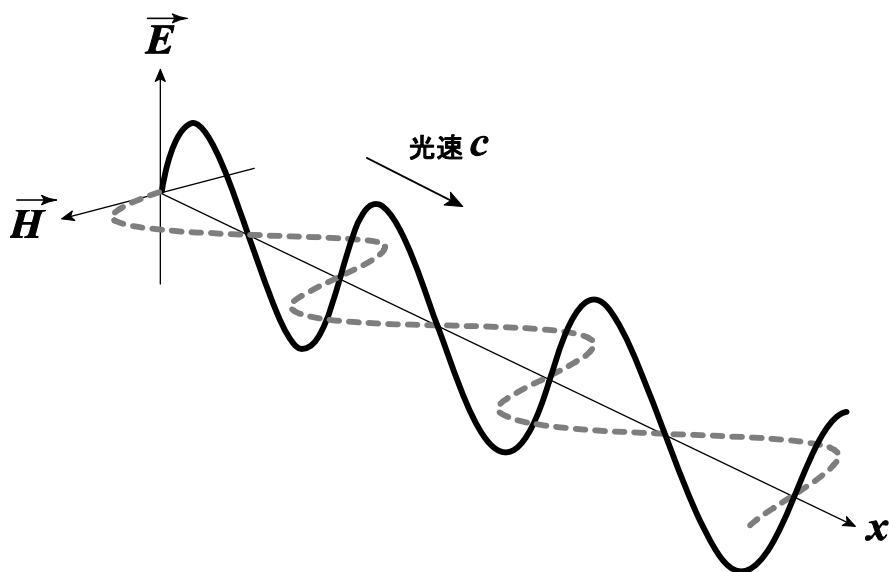


図1 x 方向に進む電磁波の電場ベクトルと磁場ベクトルのある時刻における波形

このうち、電場ベクトルに注目すると、 y , z 成分だけを持つ横波となり、 yz 平面内に独立した2成分を持つ。たとえば、同一波長、同一進行方向の波として y 方向に電場振幅ベクトルを持つ波と、 z 方向に電場振幅ベクトルを持つ2つの独立な波が存在できる。このとき、磁場ベクトルは、電場ベクトルを電磁波の進行方向に向かって時計回りに、 90° 回転した方向を向いている。これらの事は、電磁場の基本方程式として知られるマクスウエルの方程式から導き出される。波の進行方向が x 軸方向ではなく、任意の方向の場合でも、電場および磁場の振幅ベクトルは進行方向に垂直、かつ互いに直交すること、また、2つの独立な波が存在できることが重要な結論である。電磁波の波長が長い場合、ラジオやテレビ、携帯電話などの電波であり、波長が短くなるに従って赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線などと呼ばれている。

電磁波のエネルギーについて

電磁波によって運ばれるエネルギーの流れは電場ベクトルと磁場ベクトルの大きさの積で表されるが、電場ベクトルの大きさと磁場ベクトルの大きさは互いに比例するので、エネルギー流れの大きさ、すなわち光の強さ（明るさ）は電場、または磁場振幅の2乗に比例する。

媒質中、媒質境界での電磁波の伝わり方

前に述べたように一般の媒質、空気や水、ガラスなどの中ではそれぞれの物質の屈折率により光の速度が真空中とは異なる。媒質の密度や性質が方向によらず一様であれば（等方的な媒質と言う）、光速は、媒質の屈折率を n とすると、 c/n と遅くなるだけである。

しかし媒質の密度や性質が一様であっても，進行方向に垂直な平面内で方向により（たとえば y 方向と z 方向で）電場や磁場ベクトルに対する応答が異なる場合（異方性を持つ媒質と言い，電場ベクトルの方向により光を吸収する割合や光の速度が異なる。），等方的な媒質中とは異なった伝わり方をする。その一例が本実験課題で使用する偏光板である。図2に示すように，偏光板は，電場ベクトルが偏光板固有の特定の方向を向いている光だけを透過し，電場ベクトルがこの方向に垂直な光は吸収する性質を持っている。したがって，偏光板を透過した光の電場ベクトルは偏光板に固有の方向成分だけを持つ。このような光を直線偏光と呼ぶ。偏光板からの透過光を考えると，入射した光の電場ベクトルを，偏光板を透過する方向の電場ベクトルと，この方向に垂直な方向の電場ベクトルとに分解して考えると理解しやすい。

もう一つの異方性の例として，2つの媒質の境界がある。光が境界面に垂直に入射する場合，光が伝播する媒質は光の進行方向に沿って不連続に変化するが，進行方向に垂直な平面内では変化の仕方に方向による違いがない。したがって，進行方向に垂直な電場と磁場ベクトルに対する影響に差はない。しかし，斜めに入射した場合，入射面内（注）と入射面に垂直な面内とでは変化の仕方が違い，光の伝わり方に電場と磁場ベクトルの方向が影響する。

（注） 入射光を含み，境界面に垂直な平面を入射面と言う。

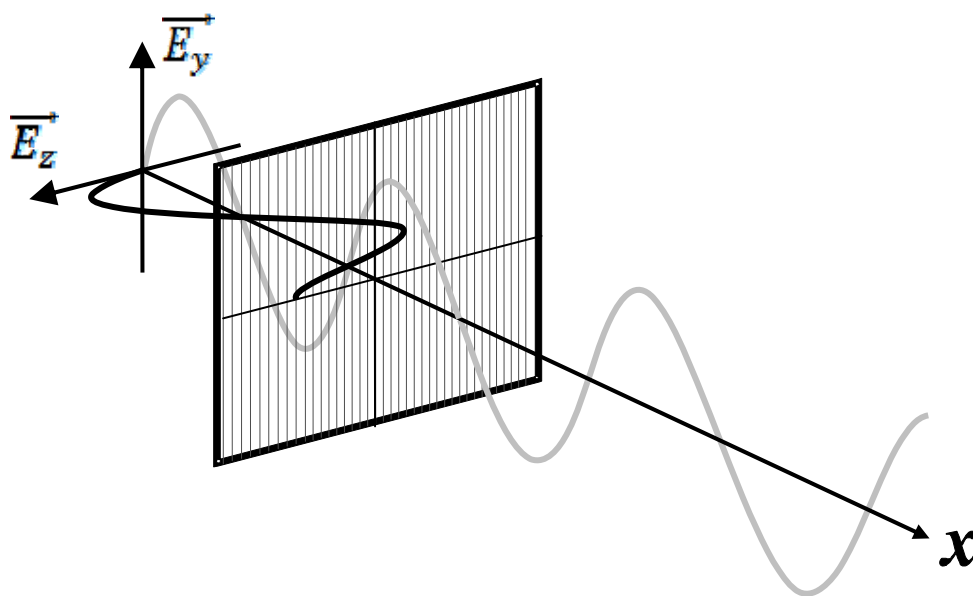


図2 偏光板の概念図 x 方向へ進む二つの波（電場が y 方向に振動する波と z 方向に振動する波）が偏光板に入射している。図では z 方向に振動する電場ベクトルを持つ波は吸収され， y 方向に振動する電場ベクトルを持つ波は透過する。

＜実験で使用する部品＞

まず、以下の部品が机の上にあることを確認する。

(1)	赤色LEDの光源 (マグネット, 電池内蔵)	1 個
(2)	光検出器 (マグネット, 006p 電池外付き)	1 個
(3)	光源, 検出器光軸調整用の台	2 個
(4)	デジタルマルチメーター	1 台
(5)	回転目盛り付き偏光板スタンド	2 台
(6)	40Φ穴のみの偏光板スタンド	2 台
(7)	プラスチック板 52 cm×29 cm	1 枚
(8)	角度測定用の目盛りを印刷した紙 52 cm×29 cm	1 枚
(9)	鉄製腕板	2 本
(10)	透明アクリル板 (レンズ台, 刻線あり)	1 枚
(11)	5mm 径皿ネジと六角ナット	1 組
(12)	3mm 径皿ネジと 10mm 径金属パイプ	各 2 個
(13)	3mm 径ローレットナット	2 個
(14)	消しゴム	2 個
(15)	半円柱レンズ	1 個
(16)	遮光衝立用の段ボール紙	4 枚
(17)	遮光用黒紙 (大) 104 cm×29 cm	2 枚
(18)	遮光用黒紙 (中) 52 cm×29 cm	1 枚
(19)	物差し (最小 1 mm 目盛り)	1 本
(20)	A 3 方眼紙	1 枚
(21)	A 4 方眼紙	8 枚
(22)	偏光板 (5 cm×5 cm)	3 枚
(23)	偏光板 (3 cm×2.5 cm)	2 枚
(24)	透明なプラスチックフィルム (5 cm×5 cm)	1 枚
(25)	遮光用黒紙 (小) 3 cm×2.5 cm	1 枚
(26)	蓋つき円柱型ペットボトル	1 本
(27)	小型懐中電灯	1 本
(28)	ラベル	1 枚
(29)	セロファンテープ	1 個
(30)	電卓	1 台
(31)	白紙片	1 枚
(32)	A 4 黒紙	1 枚

＜いくつかの部品についての説明＞

(1) 赤色LEDの光源 (マグネット, 電池内蔵): 側面にある赤いスライドスイッチで点灯する。前面のスリットから幅の狭い光ビームが出る。底部にはマグネットが付いており, (9) の測定盤の腕に付けるときに利用する。

(2) 光検出器: マグネットが付いている面が底面である。測定盤の鉄製腕にこのマグネットを取り付けることができる。5mm径ほどの穴があいている面が前面で, この穴から入る光を検出する。検出素子は穴から少し奥にあるので, 光はこの前面の穴に垂直に入るようにしなければならない。スイッチは無く, 乾電池 006p (9V) を赤黒リード線の先のスナップに取り付けると検出器として作動する。使用後はスナップをはずしておく。

(3) 光源, 検出器光軸調整用の台: (5), (6) のスタンドを利用する際, スタンドの穴の中心高さに光源, 検出器の光軸高さを合わせるために使用する。

(4) デジタルマルチメーター: 中央の円形ダイヤルを電圧測定モード (V の表示) に回し, 電圧計として使用する。上部の表示が DC AUTO になっていることを確認せよ。光検出器から出ている出力リードのクリップでマルチメーターの入力ピンをはさんで, 検出器出力電圧を測る。2本のクリップが互いに接触しないように注意すること。このデジタルマルチメーターは入力がしばらく変化しないと自動的に停止するので, 測定を続けたい場合, いったん中央のダイヤルを OFF に回してから, 再度電圧測定表示 (V) に戻す。

(7) ~ (13) 反射, 屈折角測定盤用部品: 次ページ以下に関連部品リスト, 組み立て手順を記してあるので, 始めに測定盤を組み立てること。

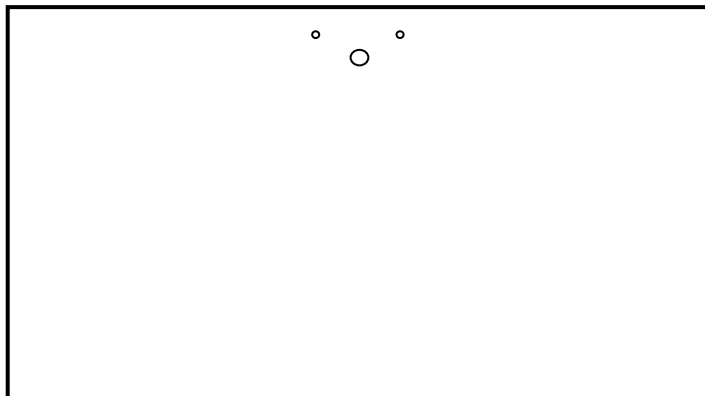
(16) (17) (18) 遮光衝立用の段ボール紙と遮光用黒紙 (大, 中): セロファンテープでつなぐ等して, 机の上で前方, 側面からの光を遮るために使用する。使い方は自由。必要に応じて上部の遮光にも利用できる。遮光用黒紙 (中) は特に使用方法は指定しないので, 各自が自由に利用すること。

(27) 小型懐中電灯: 遮光衝立で周りをおおったとき, 偏光板の回転目盛りなどが読みにくい場合がある。このようなとき, 随時使用してよい。ただし, 懐中電灯の光が検出器に入らないように注意すること。

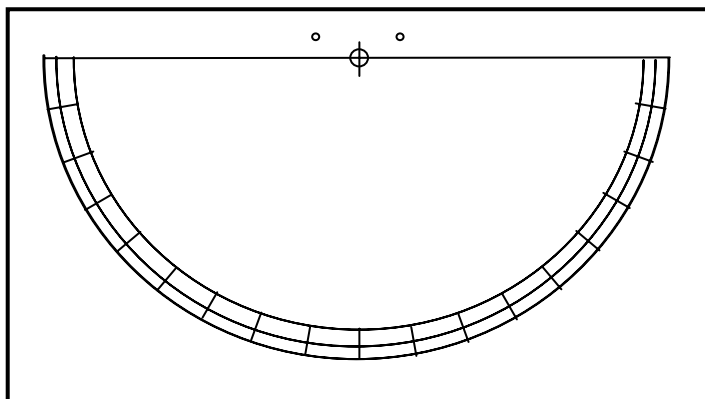
<測定盤の組み立て>

部品リスト

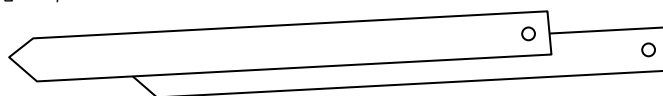
(7) プラスティック板



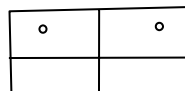
(8) 角度目盛り紙



(9) 鉄製の腕 2 本



(10) レンズの台 (透明アクリル板) 1 枚



(11) 5mm 径皿ネジとナット, それぞれ 1 個



(12) 3mm 径皿ネジとパイプ, それぞれ 2 個



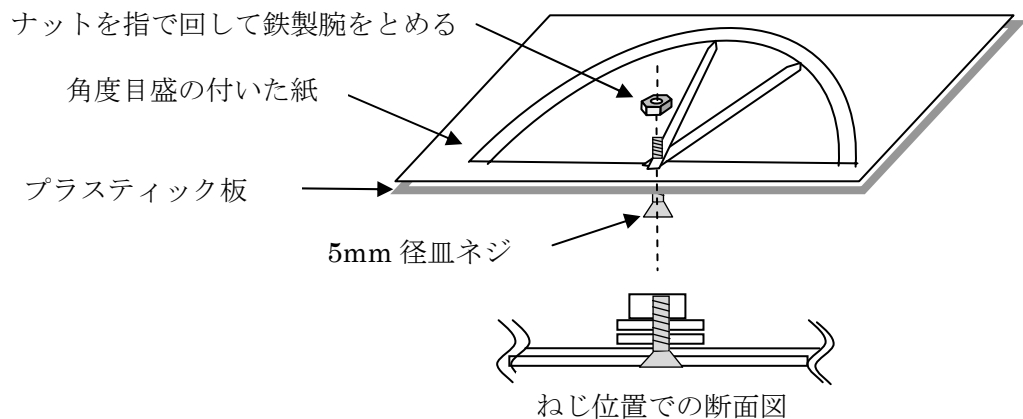
(13) 3mm 径ローレットナット 2 個



(円筒型のナットの周りに溝が刻んであり, 指で回しやすくなっている)

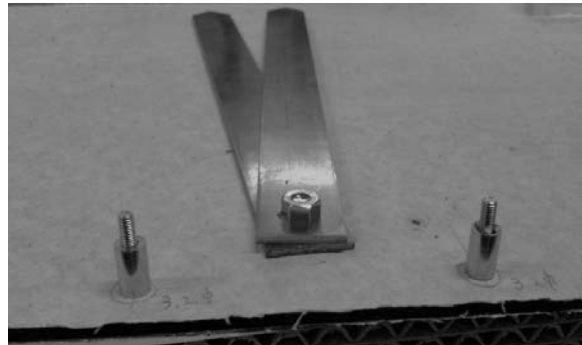
始めに以下に述べる手順で測定盤を組み立てること。

1. プラスティック板 (7) の上に角度目盛の付いた紙 (8) を乗せる。このとき、ねじの通る穴の部分が一致するように置く。
2. 5mm 径の皿ネジをプラスチック板の下から、角度目盛の付いた紙、鉄製腕 2 本の順に通し、6 角ナットを指でつまんで回し、しっかりと止める。



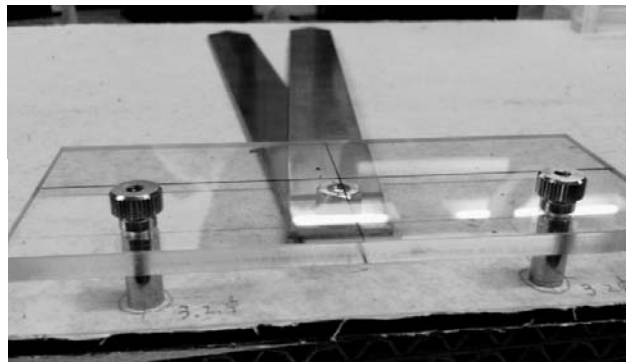
3. 鉄製腕を止めた 5mm 径のねじの両側にあいている 2 つの 3.2mm の穴に 3mm 径の皿ネジをプラスチック板の下側から角度目盛の付いた紙、パイプ、レンズ台の順に通して、上からローレットナットで止める。レンズ台は十文字の線が書いてある面を上にする。

腕を止めたプラスチック板に、下から 2 本の 3mm 皿ネジを通し、上からパイプを通したところ。



透明アクリル板のレンズ台をパイプの上に乗せ、ローレットナットで止めた状態。

角度目盛りのついた紙をプラスチック板にセロファンテープでとめる。その際、紙上の直径の線と透明アクリル板上の横線を一致させること。これで完成。



＜測定を始める前に＞

測定値について： ある量を測定した場合、その測定値がどの程度正しい値に近いか考えてみよう。たとえば目盛りの針が最小目盛り線の間にある、針が止まらない、デジタル表示の値が一定しないなどはよく経験する。また、いくつかの条件を設定して測定し、これらの条件の設定が、毎回正確に同じ状態に設定できるとは限らないとき、当然測定値も毎回異なった値を示すと考えられる。さらに、測定器その物が正しい値を示さず、常に少しずれた値を示すことも考えられる。前2者の場合、測定値は正しい値を中心としてある分布を持ってばらつくと考え、偶然誤差とよぶ。後者の場合、測定値は測定装置固有のずれを含むので、系統誤差と呼ぶ。系統誤差は適当な既知の量を測るなどで修正できる。たとえば、入力が無く、出力が0を示すことが分かっている場合（いわゆるゼロ点やバックグラウンド補正と呼んでいる）や標準入力による出力（感度補正、フルスケール補正などよんでいる）である。これに対し、偶然誤差の場合、測定値は真の値を中心として分布し、測定を多数回繰り返して平均値を求めれば真の値に近づき、無限回測定を繰り返せば真の値が得られると考える。しかし、実際には無限回の測定は不可能なので、有限回の平均を求める測定値とし、この測定値がどの程度真の値に近いと考えられるかを求めておく。真の値からのこのずれの推定値をいわゆる“誤差”と呼んでいる。このずれの値は毎回の測定値のばらつきから求められる。

n 回測定を繰り返し、 i 番目の測定値を x_i とする。求める測定値の表記として $X \pm \Delta$ と表す場合、次のような計算値が一般に使われている。

$$X = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{および} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

Δ としては、以下のような式が使われているが、(1)、(2) がよく使われている。

- (1) $\Delta = 0.674 \sigma$: 確率誤差、この範囲に真の値が入る確率が 50%
- (2) $\Delta = \sigma$: 平均2乗誤差、この範囲に真の値が入る確率が 68.3%
- (2) $\Delta = 2\sigma$: この範囲に真の値が入る確率が 95.4%

有効数字について： デジタル表示では、8桁も9桁も表示されることが多い。しかし、上述の議論から分かるように、誤差が現れる桁より下位の桁を表示しても無意味であることが分かる。したがって、誤差を1桁（あるいは誤差の数値の最初の数字が1に近ければ2桁）を超えて記すのはあまり意味が無い。

測定値を求める際や、先に計算を進める場合の途中に含まれる定数などの値の有効数字を総合的に含めて誤差を考えること。

＜光の屈折率に関する実験＞

＜課題 1＞ 臨界角から屈折率を求める

屈折率の異なる領域の境界面を光が通るときに、屈折や反射が観測される。図 3 のように、この境界面に立てた法線と光路のなす角 θ_1 , θ_2 , θ_3 を入射角、屈折角、反射角と呼ぶ。入射角と反射角は等しく、入射角と屈折角の間にはスネルの法則と呼ばれる式 (4) の関係がある。

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (4)$$

最初に、半円柱レンズから空気中へ光が進む場合の光の屈折を調べる。光が屈折率の大きな領域から小さい領域に進む場合、入射角に比べて屈折角が大きくなる。このため、入射角がある角度（臨界角）をより大きな角度で入射すると、屈折角が 90° を超えることになり、屈折率の小さい領域に光が進むことができない。このため、すべての光が境界面で反射されることになる。この性質を使用して光ファイバーでは内部に光を閉じ込めて伝えることができる。光が全反射となる入射角を求め、レンズ材質の屈折率の測定を行う。

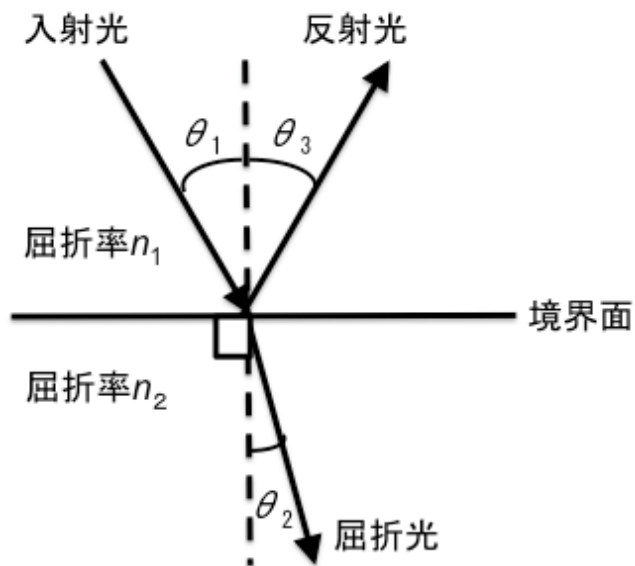


図 3

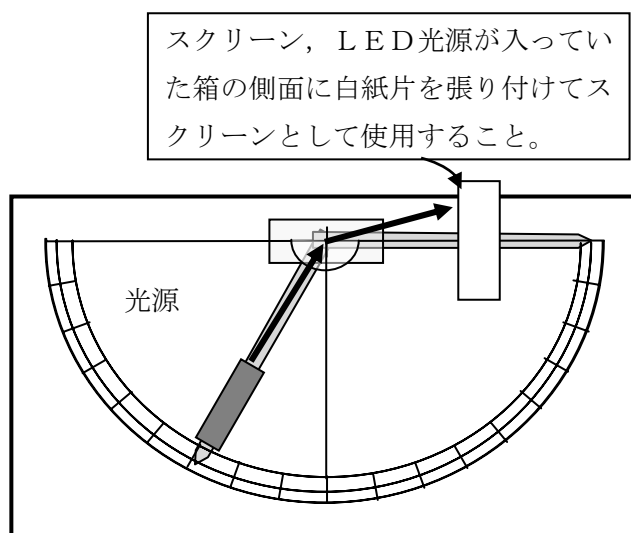


図 4

課題 1-1 臨界角の測定

図 4 のように、LED 光源を磁石で測定盤の一方の鉄製腕に固定する。中央の試料台の上にレンズを半円部分が大きな分度器目盛りと一致する向きに置く。この場合、レンズの平面部が試料台上の直線に一致し、半円の中心が 2 本の腕の止めネジの中心に一致するよう

にレンズを設置すること。腕に沿って空気中から半円柱レンズへ入射する光は、常に円柱面の法線方向と一致し、入射角が 0° となるため、この境界では光は直進すると考えて良い。レンズ内に入った光は平らな面で屈折して空気中へ出ていく。図4に示すスクリーンの位置に部品リスト(3)の光軸調節用台を置き、この屈折光を観測する。レンズ中側から平面に入り、空気中に出る光の入射角を 0° から増加させ、屈折角が 90° となり、屈折光が見えなくなる臨界入射角を決定せよ。空気の屈折率は 1 と考えて良いので、この臨界角からレンズ材質の屈折率を求めよ。

課題1-2 半円柱(平凸)レンズの焦点を実験から求め、材質の屈折率を求める

片面が平面である平凸レンズに、平面側から平行光線を垂直に入射した場合を考えよう。図5のように、半円の中心Oを通り平面に直交する光軸とレンズ円周との交点をAとする。光軸と h だけ離れ、光軸に平行に入射した光は、空気中からレンズへの入射角は 0° のためそのまま直進し、レンズから空気中へ進むB点のみで屈折が起きる。B点で屈折した後、光軸と交わる点をFとする。また、半円の半径を r とする。半円の中心Oから点Bに引いた直線と光路のなす角を、それぞれ入射角 θ_1 と屈折角 θ_2 とする。レンズ材質の屈折率を n とした場

合、

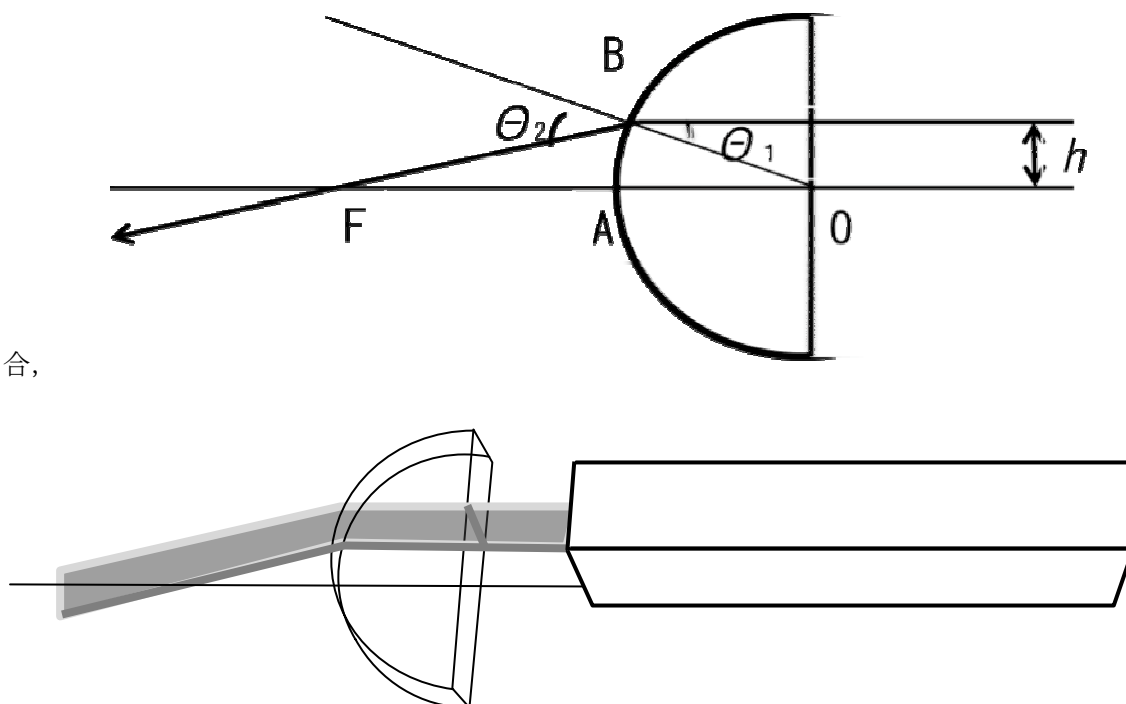


図5

屈折の法則から $\sin\theta_2 / \sin\theta_1 = n$ となる。今、レンズの光軸近くを通る光についてのみ考えると、 θ_1, θ_2 は十分小さく、 $\sin\theta = \tan\theta = \theta$ の近似が成り立つと考えて良い。ただし、 θ の単位はラジアンである。このため $n\theta_1 = \theta_2$ としてよい。また、 $\angle BOA = \theta_1$ 、 $\angle AFB = \theta_2 - \theta_1$ の関係が成立している。

(1) この関係を用いて、レンズからの出射面（光がレンズから外部に出る面）と光軸の交点 A から焦点 F までの距離 f が、

$$f = \frac{r}{n-1} \quad (5)$$

となることを示せ。

(2) 方眼紙の上に直線を描き、これを光軸とする。図 5 と同じ条件になるようにレンズを置き、平面側から LED 光源からの光が光軸と平行になるように照射する。この場合光軸からの距離 h を 1cm 以下にすること。レンズを透過した光が光軸と交わる点を F とし、距離 AF ($=f$) を測定せよ。測定した値と式 (5) からレンズ材質の屈折率 n を求めよ。なお円柱レンズの半径 r は各自で実測せよ。

注意： レンズに入射する光が光軸から大きく離れると、AF の長さが h により異なるようになる。このため、今回のような球面レンズでは平行光線が一点に集まらなくなる。この現象をレンズの球面収差と呼ぶ。

課題 1-3 レンズの非対称性の影響

レンズを図 6 のように逆向きにして、平行光線を凸面から入射した場合考える。光軸と距離 h で平行に進んできた光は、B' 点でレンズに入射し、C' 点で空気中に出た後、F' 点で光軸と交わる。B' 点での入射角と屈折角を θ_3, θ_4 、点 C' での入射角と屈折角を θ_5, θ_6 とする。レンズの光軸近くを通る光についてのみ考えると、 $\theta_3 = n\theta_4$ 、 $n\theta_5 = \theta_6$ としてよい。また、 $\angle C'A'O' = \angle C'B'O' = \theta_4$ 、 $\angle C'F'O' = \theta_6$ の関係が成立している。

(1) 課題 1-2 と同様に、光の集まる F' 点とレンズからの出射面と光軸の交点 O' の間の距離 F'O' を f' とすると、

$$f' = \frac{r}{n-1} - \frac{r}{n} \quad (6)$$

の関係があることを示せ。

(2) 課題1-2の(2)と同様の方法で、距離 $O'F'$ ($=f'$) を測定せよ。また、式(6)からレンズ材質の屈折率 n を求めよ。

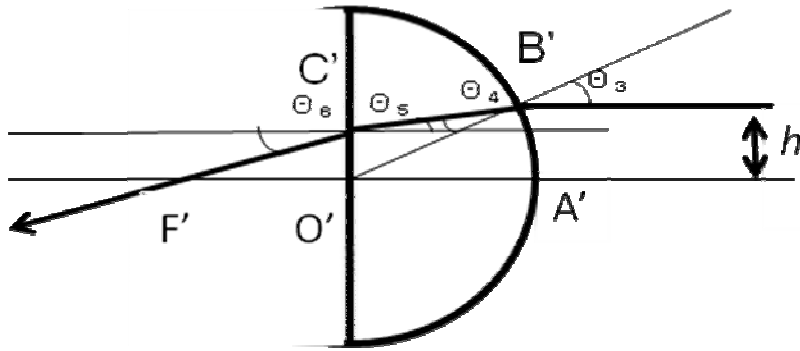


図6

<課題2> 光の電場ベクトルに関する実験

偏光板の準備

回転目盛り付きの偏光板スタンド2個のそれぞれに、偏光板1枚ずつ4隅をセロファンテープで止める（図7参照）。スタンドの表裏どちら側に貼っても構わないが、回転目盛りが読めるようにしておくこと。また、張り付けに用いたセロファンテープが穴の部分にはみ出さないように注意すること。回転円板目盛りの外側に接してスタンド上部と横には刻線があるので、この刻線を利用して回転角の目盛りを読む。回転目盛りと偏光板の角度関係は任意であるが、たとえば上の刻線に一致する角度目盛りの読みが0のとき、偏光板の1辺が鉛直または水平になるようにしておく。偏光板を貼り付けたスタンド2台を以下では偏光板1、偏光板2と呼ぶので、区別できるようにラベルを張り、印を付けておく。

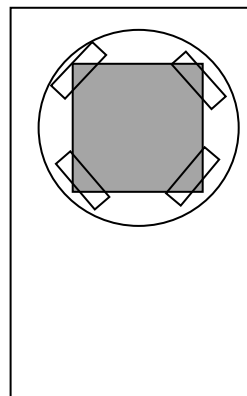


図7

課題2-1 光源、偏光板1、偏光板2、検出器を図8のように並べる。次に偏光板を2台とも取り外す。光源と検出器を光源からの光が検出器の前面、すなわち電池のリード線と反対側にあいた小穴に垂直に入るように向きを調節する。このとき、検出器の出力が、4Vを超えない範囲で、なるべく大きな値になるような距離と角度に光源と検出器を置くと、読み取り誤差による影響を少なくできる。ただし、光源と検出器の間隔を10 cm以上あけておくこと。

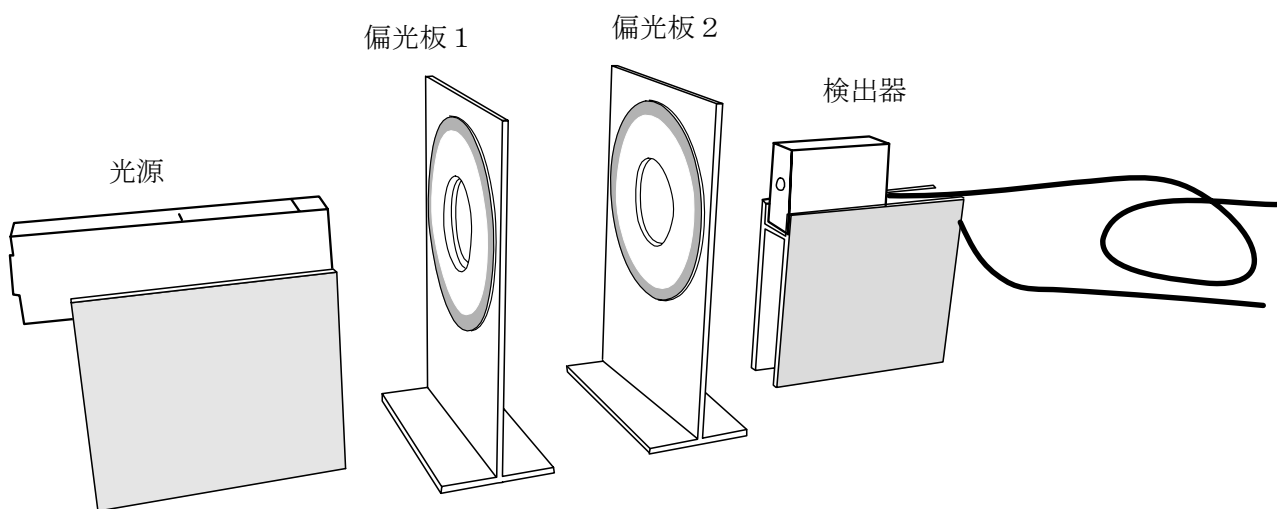


図8

まず、偏光板を2台とも光路から外して光源の光が直接検出器に入る状態にし、検出器の出力（以下単に出力とする）を光源出力値の欄に記入せよ。次に偏光板1のみを、光源と検出器の間に、検出器の前を5 cm程度あけておく。このとき、角度目盛りが光源側を向くようにして回転目盛りを0の位置にセットせよ。この状態で出力と回転目盛りの数値を記録し、以後 20° ずつ、1回転、すなわち 360° まで19個のデーターを記録し、横軸を回転角、縦軸に出力をとり、方眼紙に図示せよ。

課題2-2 回転目盛り0の位置にセットした偏光板2を光源と検出器の間、すでに置いてある偏光板1の後ろに、偏光板1と同じ向きに置く。偏光板1を 20° ずつ回転し、出力を回転角の関数として記録し、課題2-1と同じ図上に示せ。このとき、偏光板2の回転目盛りは0の位置に固定しておく。また、どちらの出力なのかが分かるように記録する点の形を変えること（○，×，△など）。

課題2-3 次に、課題2-2で回転させた偏光板1を角度0の位置に固定せよ。偏光板2を回転し、課題2-2と同じ測定と記録をし、同じ図上に、課題2-1、2のデーターとは区別が付くように示せ。

この方眼紙の右上隅に「課題2-1~3」と書き、またチャレンジ番号と氏名を書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出せよ。

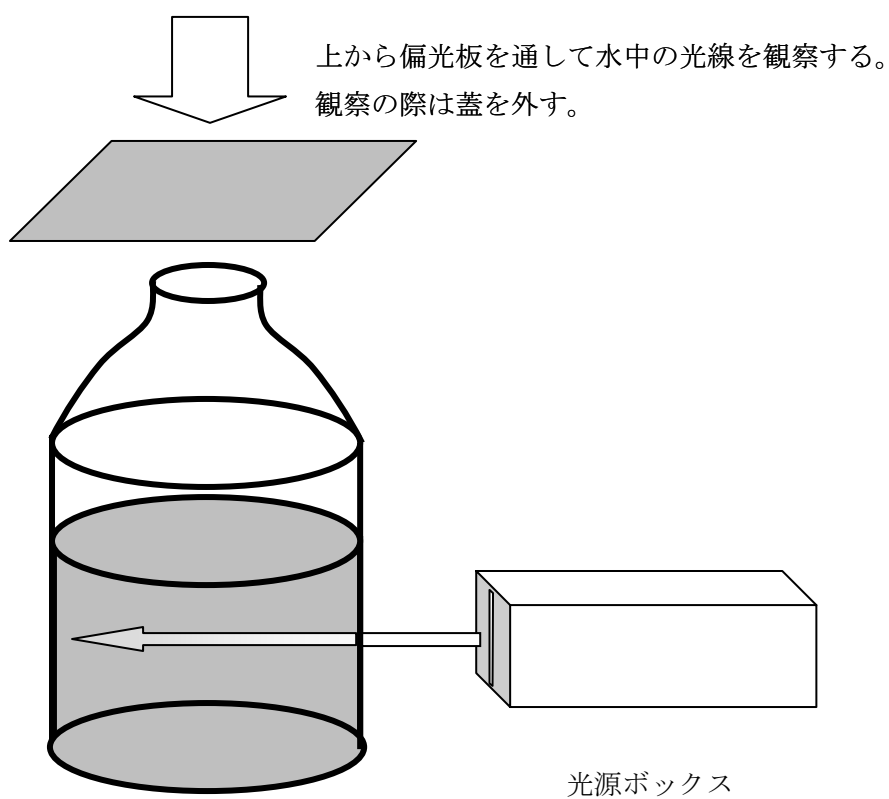
課題2-4 課題2-1で偏光板を入れたときの出力の最大値が、偏光板を入れる前の光源出力値の2分の1を超えないのはなぜか、理由を書け。

課題2-5 課題2-1、2、3のそれぞれの場合に、出力は回転角のどのような関数と考えられるか、理由とともに記せ。

課題2-6 蓋つきペットボトルに微量のミルクを加えて薄く濁った水を3分の1ほど入れる。この水は試験場内の数か所に大きなペットボトルに入れておいてあるので、そこまで行って各自のペットボトルに入れてくること。図9のようにこのペットボトルに横から光源の光を入れ、偏光板を通してペットボトルの口から水中を通る光線を観察せよ。偏光板を回転したときに、光線の見え方がどのように変化するかを観察し、その理由を考え、述

べよ。光源の位置が低くて光線を観察しにくいときは、部品リスト（3）の光軸調節用の台を利用してもよい。

ヒント： 光，すなわち電磁場が物質中を通る際，物質を構成している電子は電場ベクトルの方向に振動すると考えてよい。この電子による散乱光（あるいは，この電子が出す光）は電子の振動方向に振動する電場ベクトルを持つ。



蓋つきペットボトル。中に薄く白濁した水を入れる

図9

<課題3> 反射率の偏光依存性

小さな偏光板 (3 cm×2.5 cm) 2枚を消しゴムに旗が両横に出るような形にセロファンテープで止めておく (図 10 参照)。2枚の偏光板は長手方向に対し一方は垂直, 他方は平行方向の偏光方向を持つ (この時点では2枚の偏光板の偏光方向はわからない)。このとき, 偏光板の長い方の辺が水平になるように止めること。消しゴムと偏光板はちょうど十字の形になる。次に黒紙 (3 cm×2.5 cm) 1枚をもう1個の消しゴムに偏光板と同じようにセロファンテープで止めておく。以下では2枚の小偏光板を偏光板 A, 偏光板 B と呼ぶ。図のように貼り付ければ, これらの一方は偏光方向が水平, 他方は鉛直方向となっている。消しゴムの上にラベルを張り, どちらを偏光板 A, B と決めたかが分かるよう A, B と印を付けておく。

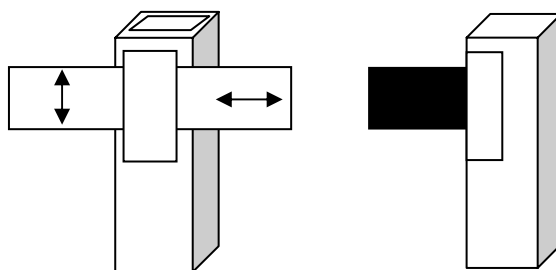


図 10 消しゴムに小さい偏光板と黒紙をセロファンテープで止める

課題3-1 検出器を測定盤の腕の片方 (2本の腕のどちらでもよい) に乗せ (磁石で付くようになっていて), もう片方の腕に光源を乗せる。図 11 に示すように, 腕の先が 90° をさす位置に置き (角度目盛りの中央を角度原点とする), もう一本の腕を反対側 90° の位置に置く。このようにすると光源, 腕の回転軸 (腕を止めているねじの中心), 検出器が同一直線上に並んだ状態となる。光源, 検出器の位置を微調整し, 光が正しく2本の腕を止め

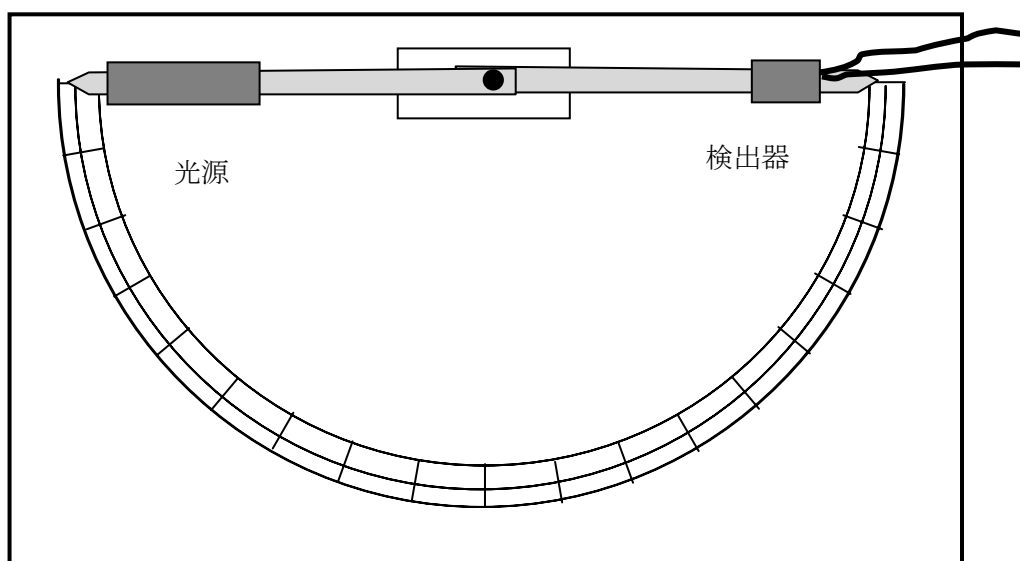


図 11

ているねじの中心上を通り、かつ検出器の出力が最大（ただし、4Vを超えないこと）になるようにする。次に消しゴムに取り付けた偏光板 A を検出器の前に置き、光源から出た光が偏光板を通過して検出器に入るようにし、出力を記録せよ。次に消しゴムに取り付けた黒紙が光を遮断するように光源の前、腕の横におき、検出器出力を記録せよ。この値がバックグラウンド出力（光源以外の光や検出器の雑音による出力）の値を与えるので、先ほどの出力からこのバックグラウンド出力を差し引いた値が、偏光板 A を通過した偏光の入射光強度を与える。バックグラウンド測定は、偏光板や、測定者の姿勢など他の条件を変えずに光源の光だけを遮って行う。次に同様の手順で、偏光板 B を通過した偏光の入射光強度を求めよ。

課題 3-2 測定盤の 2 本の腕のうちの片方の上に光源を置く。腕の先が盤上のある角度目盛り（たとえば 50° など）を指すようにし、光源から出た光が腕の回転軸中心上を通るように位置を調節する。次に、もう一方の腕の上に検出器を、前面が回転軸中心方向を正しく向くように乗せ、腕が光源を乗せた腕の反対側、同じ角度目盛りを指すようにする（図 12）。半円柱レンズの平らな面が図のように腕の回転中心上に来るように置き、レンズをごくわずか動かして（平面部分は腕の回転軸からずれないように注意）検出器の信号が最大になるように微調節する。この状態でレンズの平面部分への光の入射角と反射角の読みが等しいという条件をほぼ満足するようになっている。次に 2 種類の偏光の反射率測定を以下の手順に従って行え。

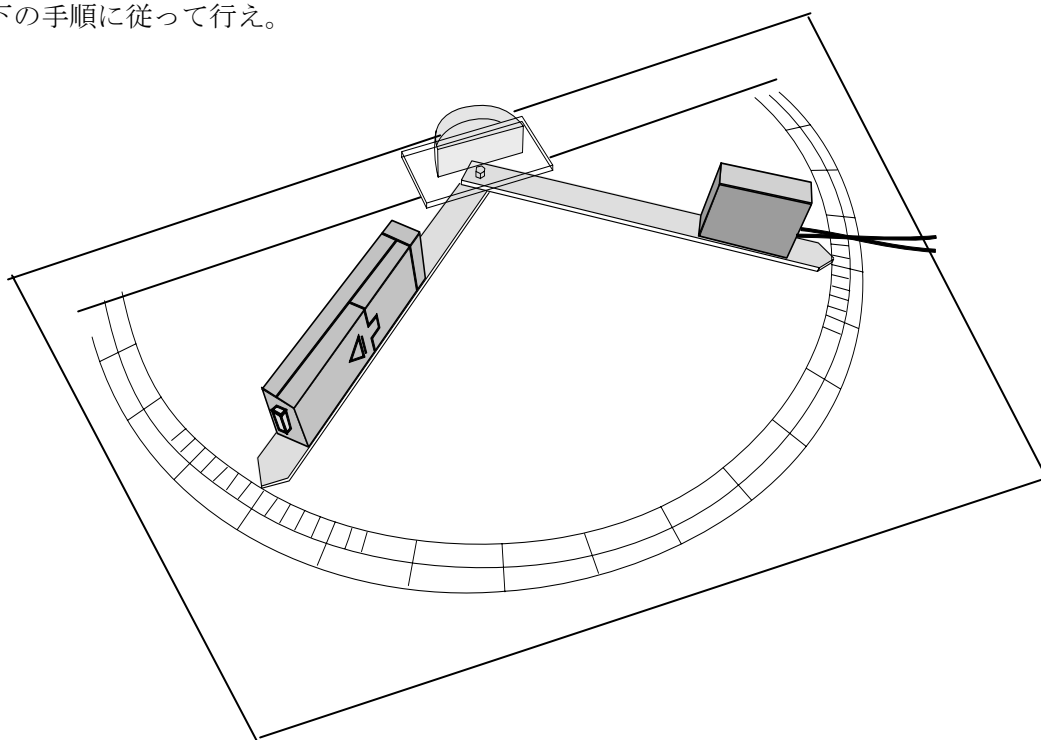


図 12

測定手順：

- ① 光源を乗せた腕を測定する角度に置く。次に検出器を乗せた腕を同じ角度（反対側）に置き、出力を見ながら最大値を示すように検出器の腕の角度を微調節する。
- ② 消しゴムに付けた偏光板を検出器の前に置き、偏光板 A を通過した光の出力を記録する。
- ③ 消しゴムに付けた黒紙を光源の前に置き、光を遮断し、出力を記録する。この値がバックグランド出力値である。②の出力からバックグランドを差し引いた値が正しい出力値となることに注意。
- ④ 偏光板 B について②，③を繰り返す。このとき，どちらの偏光板を置いたときの出力か分かるように記録すること。

以上の測定を、入射角を 10° から 80° まで 5° ごとに変化させ、偏光板 A，偏光板 B を通過した反射光強度を入射角の関数として測定し、記録する。課題 3-1 で測定した入射光強度で割り算して反射率を求め、反射率が入射角（=反射角）にどの様に依存しているか、方眼紙横軸に角度、縦軸に反射率を取って図示せよ。

方眼紙の右上隅に「課題 3-2」と書き、またチャレンジ番号と氏名を書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出せよ。

課題 3-3 上の課題 3-2 で測定したどちらか一方の偏光の反射率は測定角度範囲内で極小値を取る。この角度 θ をブリュスター角といい、反射する物質の屈折率と次のような関係がある。

$$\tan \theta = n \quad (7)$$

ここで n は光を反射している物質の屈折率である。

極小値が現れる偏光板を使い、極小値を取る角度付近、約 10° の範囲で、角度を 1° ずつ変えて反射光強度を入射角の関数として測定・記録する。方眼紙に、角度を横軸、出力を縦軸にとり、グラフを描いて最小値を与える角度を推定し、角度と出力を記録せよ。求めた最小値を与える角度と式 (7) からレンズの屈折率を計算し、前半の課題（全反射角、レンズ）で求めた屈折率と一致するかどうか確かめよ。さらに、なぜ反射率の角度依存性が偏光方向で異なるのか、また反射率に極小値が現れる偏光方向は水平、鉛直のどちらの方向か考察せよ。

方眼紙の右上隅に「課題 3-3」と書き、またチャレンジ番号と氏名を書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出せよ。

ヒント： 課題 2-6 と同様に、光すなわち電磁波が物質中を通る際、物質を構成している電子は電場ベクトルの方向に振動していると考えてよい。そこから出る反射光、屈折光はこの電子の振動方向に振動する電場ベクトルを持つ。

＜課題4＞ 異方性のある媒質中での光の伝播

課題4-1 3枚目の偏光板を、回転目盛りのないスタンドに貼り付け（やはりセロファンテープが穴にかからないようにすること）、ラベルを貼り、印を付けておく。これを偏光板3と呼ぶ。光源、偏光板1、偏光板3、検出器をこの順に、図13のように並べる。このとき、2個の偏光板の間に偏光板2を入れられるよう間隔を空けておくこと。また光路の調節を課題2-1と同様にして行っておく。

(1) 偏光板1を回転し、2枚の偏光板を透過する光による出力が最小になる位置、すなわち光が通らなくなる角度を探し固定する。偏光板2を、初めに置いた2個の偏光板の間に置き、3枚の偏光板を通過する光の強度を測り、偏光板2の回転角とともに記録、方眼紙に図示せよ。ただし横軸に回転角を 0° から 360° までとり、縦軸に検出器出力、すなわち透過光強度を取ること。

この方眼紙の右上隅に「課題4-1」と書き、またチャレンジ番号と氏名を書いて試験終了時に解答用紙と一緒に提出せよ。

(2) 得られた強度の変化は回転角のどのような関数と考えられるか、理由とともに記せ。

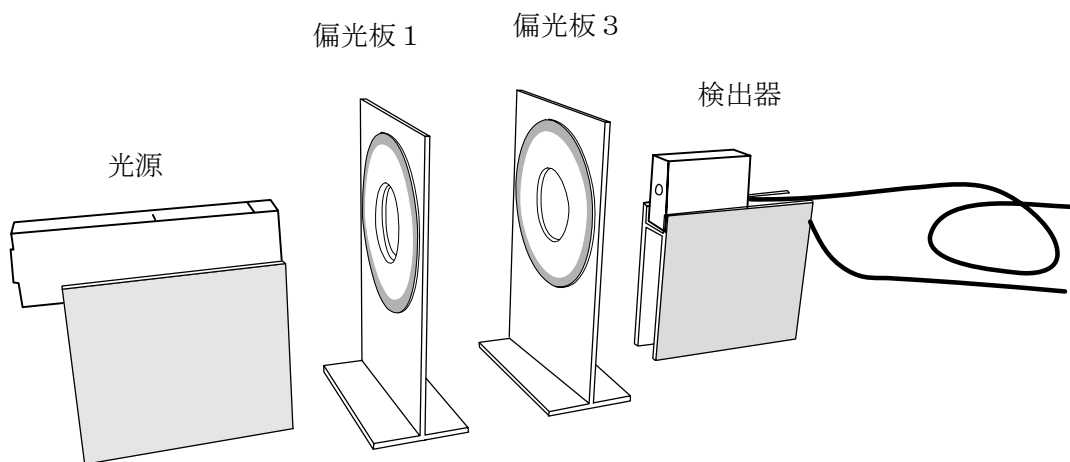


図13

課題4-2 偏光板2のスタンドから偏光板を取り外して、代わりに特殊な性質を持つ透明なプラスチックフィルム（ $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ）をセロファンテープで貼り付ける。この板を以下では4番目の板と呼ぶ。光源、偏光板3、偏光板1の順に並べ、偏光板1、3を通して光源を眺める。この状態で偏光板1を回転して、課題4-1のときと同様に2枚の偏光板が光を通さない角度（光源が見えなくなる角度）に設定する。この2枚の間に4番目の板

を入れ、4番目の板を回転して3枚の板を通して見える光源の明るさがどのように変化するか、目視観察せよ。次に、4番目の板をいろいろな角度に設定し、偏光板1を回転したときに見える光源の明るさがどのように変化するか、目視観察せよ。さらに、偏光板3を取り除き、4番目の板を通した光を1番目の偏光板を通して観察し、この透明な4番目の板が偏光板ではないことを確認せよ。これらの結果から、実験に用いた透明なプラスチックフィルムはどのような性質を持つと推察されるか。観察結果、理由とともに述べよ。

ヒント：

(1) 4番目の板1枚だけを持って透過率がどの程度か観察せよ。偏光板のように入射光の2分の1以下に弱くなることは無く、ほぼ90%程度の透過率であることがわかる。

(2) 電場ベクトルが互いに直交する2つの平面波（振幅と振動数が同じ）を合成する場合、2つの振動するベクトルの間の位相（注）の違いにより、合成されたベクトルはどのようなふるまいをするかを考えよ。例として図12に位相のずれが 30° の場合を示す。

（注） 式（1）の[...]の中身を位相といい、角度と同様に「度」や「ラジアン」の単位で表す。

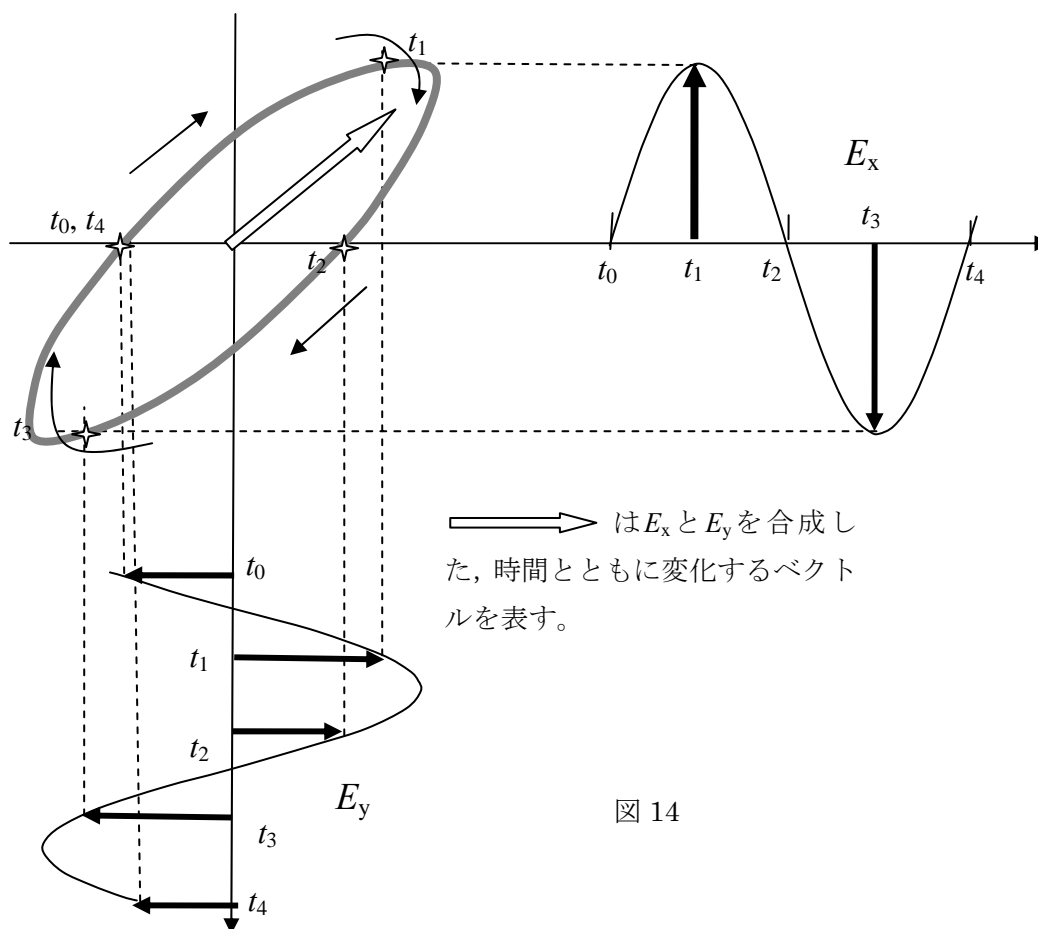


図 14

物理チャレンジ2010 第2チャレンジ 実験問題 測定例

物理チャレンジ 2010 実験課題

解答用紙 1

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-1 臨界角の測定

点

臨界入射角	屈折率
42.4	1.483
42.2	1.489
42.2	1.489
42.4	1.483
42.6	1.477
平均	1.484
誤差	0.005
	1.484±0.005 (例)

$$\begin{aligned} \text{平均との差の2乗の和} &= (0.000001+0.000025+0.000025+0.000001+0.000049) \\ &= 0.000101 \end{aligned}$$

$$\text{確率誤差} (\sigma) = 0.005$$

*これは測定の一例、ほぼこの程度の値になることで測定に大きなミスがないことが分かります。また、誤差の算出は特に題意には含まれていませんが、結果の有効数字を考える際の根拠になります。

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-2

(1) $f = \frac{r}{n-1}$ であることを示せ。

点

Bに入る光線は OF に平行であるから $\angle FOB = \theta_1 = \frac{AB}{r} \cong \frac{h}{r}$ (1)

$\triangle OFB$ において、 $\angle BFO + \angle FOB = \theta_2$ $\angle BFO = \theta_3$ とおく。 (3)

$$\therefore \theta_3 + \theta_1 = \theta_2 \quad (4)$$

$$\therefore \theta_3 = \theta_2 - \theta_1 \quad (5)$$

しかるに、 $n\theta_1 = \theta_2$

$$\therefore \theta_3 = n\theta_1 - \theta_1 = (n-1)\theta_1 \quad (6)$$

θ_1 が充分小さければ θ_3 も充分小さく、 $FA \cong FB$ とみなせるので、

$$FB \sin \theta_3 = h \quad \therefore FA(n-1)\theta_1 = h \quad (7)$$

(1) を θ_1 に代入すると

$$\therefore FA = f = \frac{h}{(n-1)\theta_1} = \frac{r}{n-1} \quad (\text{答})$$

(2)

AF(=f)	半 径 r	屈 折 率 n
測定値 : 5.5, 5.6, 5.65, 5.75, 5.6 平均値と誤差 5.62 ± 0.09 cm	3.00cm	1.534 ± 0.009

f, r から n を求めた計算法を示せ :

答えを変形すると $n = 1 + r/f$ となるので、この式に r と f を代入する。

誤差は、 $dn/df = -(r/f^2)$ から、 $\Delta n = (r/f^2)\Delta f$ を利用した。

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-3 レンズの非対称性の影響

(1) $f' = \frac{r}{n-1} - \frac{r}{n}$ であることを示せ。

点

$$\theta_4 + \theta_5 = \theta_3 \quad (1)$$

$$h = r\theta_3 = f'\theta_4 + r\theta_5 \quad (2)$$

$$(1) \text{より} \quad \frac{1}{n}\theta_3 + \theta_5 = \theta_3 \quad \therefore \theta_5 = \left(1 - \frac{1}{n}\right)\theta_3 \quad (3)$$

$$\text{また、} \theta_4 = \frac{(n-1)\theta_3}{n} \quad (4)$$

$$(2) \text{に代入} \quad r\theta_3 = f'(n-1)\theta_3 + r\left(1 - \frac{1}{n}\right)\theta_3 \quad (5)$$

$$r = f'(n-1) + \left(1 - \frac{1}{n}\right)r \quad (6)$$

$$f' = \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n}\right)r = \frac{1}{n(n-1)}r \quad (\text{答})$$

(2)

O'F' (=f')	屈折率 n
測定値 : 3.85, 4.00 3.90, 4.00, 3.95 平均 : $3.94 \pm 0.07 \text{ cm}$	1.506 ± 0.007

f' から n を求めた計算法を示せ :

上の答えの式を変形、 n について解くと、

$$\frac{1}{n(n-1)} = \frac{f}{r} \quad \text{従って、} \quad n(n-1) = \frac{r}{f} \quad (8)$$

従って、 $n = \frac{1}{2} \left(1 \mp \sqrt{1 + 4 \frac{r}{f}} \right)$ ただし、 n は正なので+を取る。
誤差については、(8) 式を微分して、

$$\frac{dn}{df} = -\frac{n(n-1)}{(2n-1)f} \quad \text{従って、} \quad |\Delta n| = \left| \frac{n(n-1)}{(2n-1)} \frac{\Delta f'}{f'} \right| \quad (9)$$

* (9) 式に $\Delta f'/f'$ を代入して求めた。測定値から屈折率を求め、その平均から誤差を求めてもよい。

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-1 偏光板 1 枚による光源強度の測定

光源のみの場合の検出器出力
3.808V

点

偏光板 1 枚を通した時の透過光強度			
偏光板の回転角	出力の読み	偏光板の回転角	出力の読み
0	1.433		
20	1.421		
40	1.429		
60	1.443		
80	1.451		
100	1.454		
120	1.455		
140	1.450		
160	1.436		
180	1.430		
200	1.415		
220	1.420		
240	1.435		
260	1.451		
280	1.448		
300	1.456		
320	1.449		
340	1.430		
360	1.413		

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-2 偏光板 2 枚の透過光強度測定

点

偏光板 2 枚を通した時の透過光強度			
偏光板 1 の回転角	出力の読み	偏光板 1 の回転角	出力の読み
0	1.061		
20	0.949		
40	0.637		
60	0.297		
80	0.050		
100	0.032		
120	0.249		
140	0.595		
160	0.920		
180	1.050		
200	0.951		
220	0.645		
240	0.305		
260	0.051		
280	0.034		
300	0.253		
320	0.606		
340	0.917		
360	1.051		

物理チャレンジ 2010 実験課題

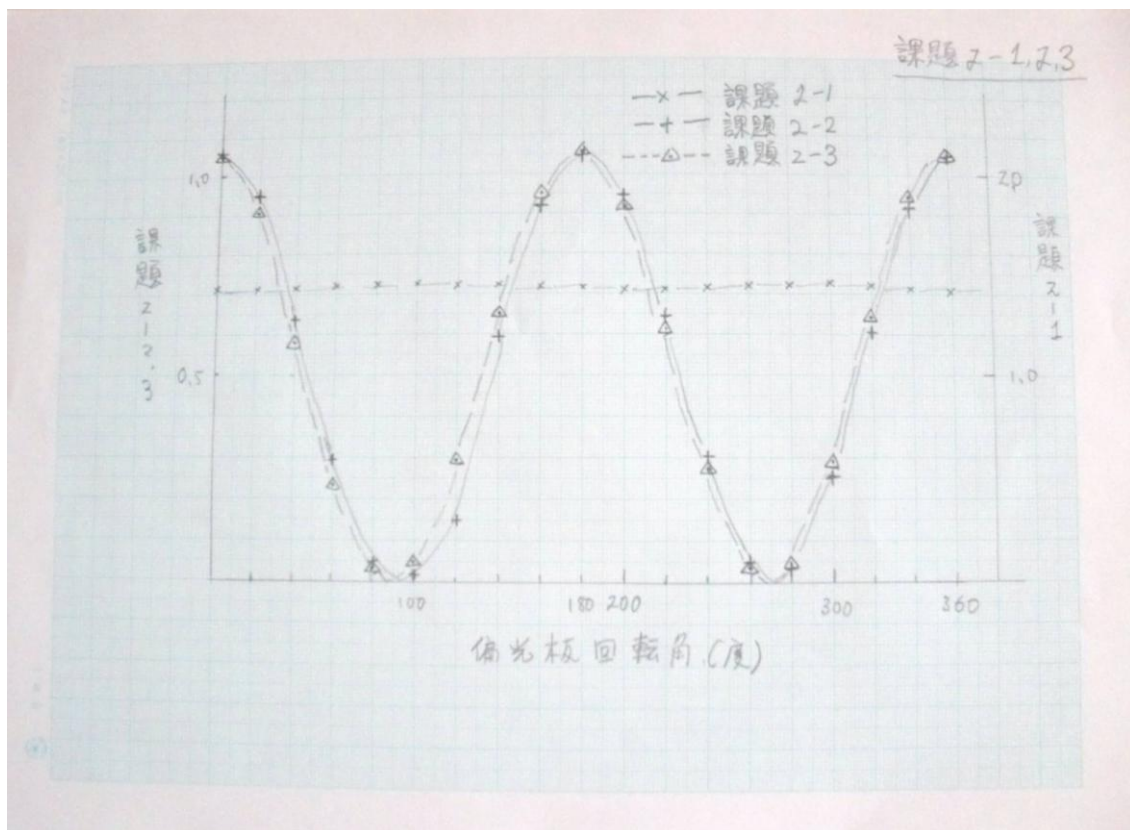
解答用紙 6

チャレンジ番号	氏名

課題 2 - 3

点

偏光板 2 枚を通した時の透過光強度			
偏光板 2 の回転角	出力の読み	偏光板 2 の回転角	出力の読み
0	1.048		
20	0.906		
40	0.579		
60	0.236		
80	0.030		
100	0.050		
120	0.294		
140	0.650		
160	0.951		
180	1.060		
200	0.918		
220	0.615		
240	0.271		
260	0.036		
280	0.045		
300	0.293		
320	0.645		
340	0.945		
360	1.049		



課題 2-1, 2, 3

物理チャレンジ 2010

実験課題

解答用紙 7

チャレンジ番号	氏名

課題 2-4 偏光板を入れた時の出力の最大値が、偏光板を入れる前の光源出力値の 2 分の 1 を超えない理由を書け。

点

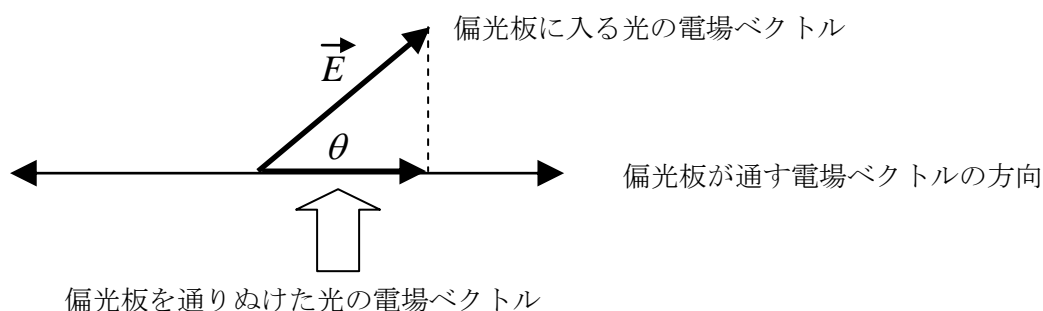
光源からの光を偏光板 1 を通し、明るさを検出器で測定する。結果は、偏光板を回転しても強度がほとんど変化しないことを示す。（このことは、光源からの光が偏光していないことを示している）偏光板に入る光のうち、使用している偏光板が光を通す方向に成分を持つ光が通り抜ける。このとき、通り抜ける光の電場の強さは、入射した光の電場ベクトルを、偏光板固有の方向と、それに垂直な方向とに分解して考える。すなわち、半分だけが通りぬけるので、最大でも 2 分の 1 の強度である。

もう少し厳密に考えた場合。

入射光の電場ベクトルの大きさを E とすると、通り抜けた光の電場ベクトルの大きさは、下図のように考えると、偏光板固有の軸との角度を θ として、 $E\cos\theta$ となる。明るさは電場の 2 乗に比例するので、 $(E\cos\theta)^2$ となり、全方向について積分すると

$$\int_0^\pi (E\cos\theta)^2 d\theta = \frac{E^2}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{1+\cos 2\theta}{2}\right) d\theta = \frac{E^2}{2}$$

すなわち、途中での吸収を考えると、最大でも入射光の $1/2$ をこえない。



チャレンジ番号	氏 名

課題 2-5 課題 2-1～3 のそれぞれの場合の関数形とその理由を記せ。

点

課題 2-1 の場合、偏光板を回転してもほとんど変化がない。

このことは、光源から出る光の電場ベクトルの方向が全角度に一様に分布していることを示している。すなわち、光源が無偏光であることを示している。

課題 2-2 の場合、偏光板 1 を通りぬけた光の電場ベクトルが回転

偏光板に偏光が入射した時は、 $(E\cos\theta)^2$ が透過した光の強度である。したがって、

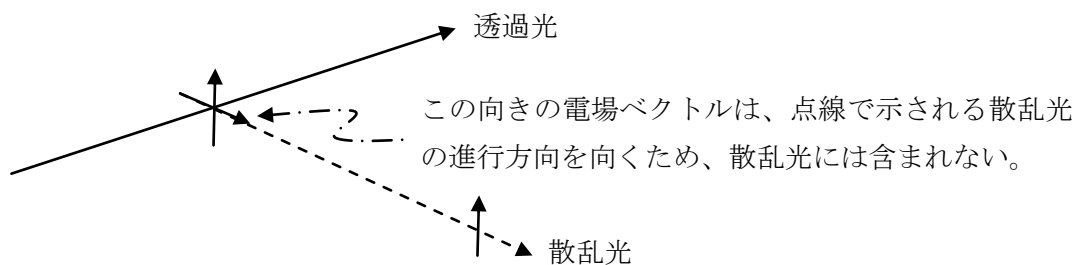
$(E\cos\theta)^2 = E^2 \frac{1+\cos 2\theta}{2}$ が得られた結果を表す関数である。

チャレンジ番号	氏名

課題 2-6 ペットボトル中の光線の観察結果とその理由を述べよ。

点

薄く白濁した水の中を通る光は、微粒子によって散乱される。その際、入射した光の振動方向と同じ方向に電場ベクトルが振動するとき、散乱光の強度が強い。図のように考えると、光の進行方向に垂直な方向に偏光していることが分かる。



チャレンジ番号	氏名

課題 3-1 入射光強度の測定

点

出力 (偏光板 A)	バックグラウンド	出力 (補正後)
1.790(V) 1.812 1.795 1.795 1.790	0.002(V)	1.788(V) 1.810 1.793 1.793 1.788
出力 (偏光板 B)	バックグラウンド	出力 (補正後)
1.654 1.658 1.650 1.650 1.646	0.002	1.652 1.656 1.649 1.649 1.645

偏光板 A を通過した 偏光の入射光強度	1.794V
偏光板 B を通過した 偏光の入射光強度	1.650V

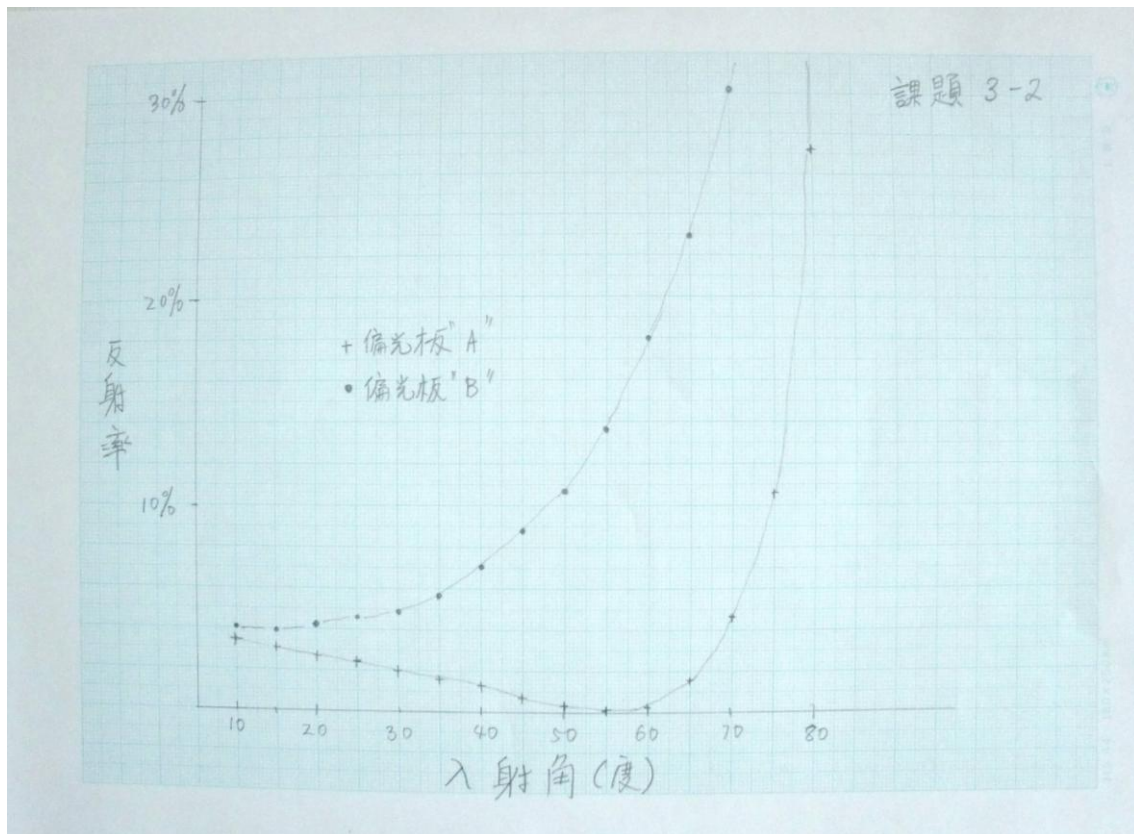
チャレンジ番号	氏名

課題 3-2 偏光の反射率測定

点

偏光板 A を通過した入射光強度	1794mV
偏光板 B を通過した入射光強度	1650mV

角度	偏光板 A	黒紙	補正後出力	反射率	偏光板 B	黒紙	補正後出力	反射率
10°	63.6	0.4	63.2mV	3.52%	67.0	0.4	66.6	4.04%
15°	55.7	0.3	55.4	3.09	64.5	0.3	64.2	3.89
20°	49.5	0.3	49.2	2.74	68.5	0.3	68.2	4.13
25°	44.8	0.3	44.5	2.48	76.5	0.3	76.2	4.62
30°	36.2	0.4	36.8	2.00	80.7	0.3	80.4	4.87
35°	28.8	0.3	28.5	1.59	94.0	0.4	93.6	5.67
40°	22.6	0.3	22.3	1.24	117.8	0.4	117.4	7.11
45°	13.5	0.4	13.1	0.73	145.6	0.3	145.3	8.81
50°	6.1	0.3	5.8	0.32	176.8	0.3	176.5	10.70
55°	2.1	0.4	1.7	0.09	227.0	0.4	226.6	13.73
60°	6.5	0.4	6.1	0.34	298.2	0.5	297.7	18.04
65°	29.2	0.5	28.7	1.60	379.0	0.4	378.6	22.95
70°	84.6	0.4	84.2	4.70	499.1	0.4	498.7	30.22
75°	190.3	0.5	189.8	10.58	642	0.4	641.8	38.90
80°	489.2	0.6	488.6	27.23	976	0.6	975.4	59.12



課題 3-2

チャレンジ番号	氏 名

課題 3-3 反射率が極小値を取る角度付近での反射率測定

点

使用した偏光板	A
その偏光板を通過した入射光強度	1794mV

角度	偏光板を通した 反射光による 出力	黒紙による遮光 時出力	補正後の反射光 出力	反射率
50	6.2mV	0.4mV	5.8mV	0.32%
51	4.9	0.4	4.5	0.25
52	3.9	0.4	3.5	0.20
53	3.2	0.4	2.8	0.16
54	2.6	0.5	2.1	0.12
55	2.1	0.4	1.7	0.09
56	2.1	0.4	1.7	0.09
57	2.5	0.5	2.0	0.11
58	3.2	0.5	2.7	0.15
59	4.6	0.5	4.1	0.23
60	6.5	0.4	6.1	0.34

チャレンジ番号	氏 名

課題 3-3 (続き) (1)求めた反射率の極小値とそれを与える角度, 求めた屈折率を記入し, (2)他の方法で求めた屈折率との比較結果を書き, (3)なぜ反射率の角度依存性が偏光方向で異なるのかについて考察と理由を書き, また, (4)反射率に極小値が現れる偏光方向は水平, 鉛直のどちらの方向かを答えよ。

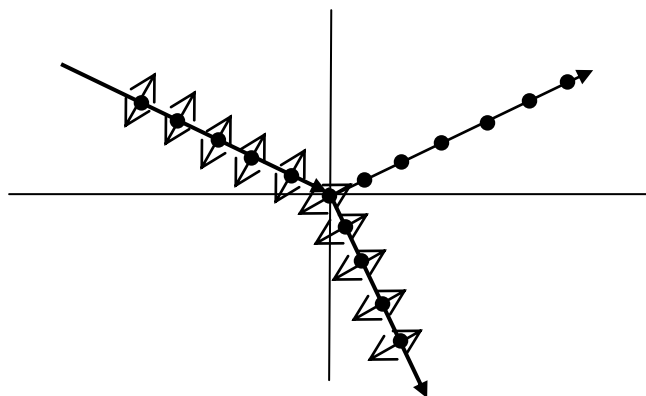
点

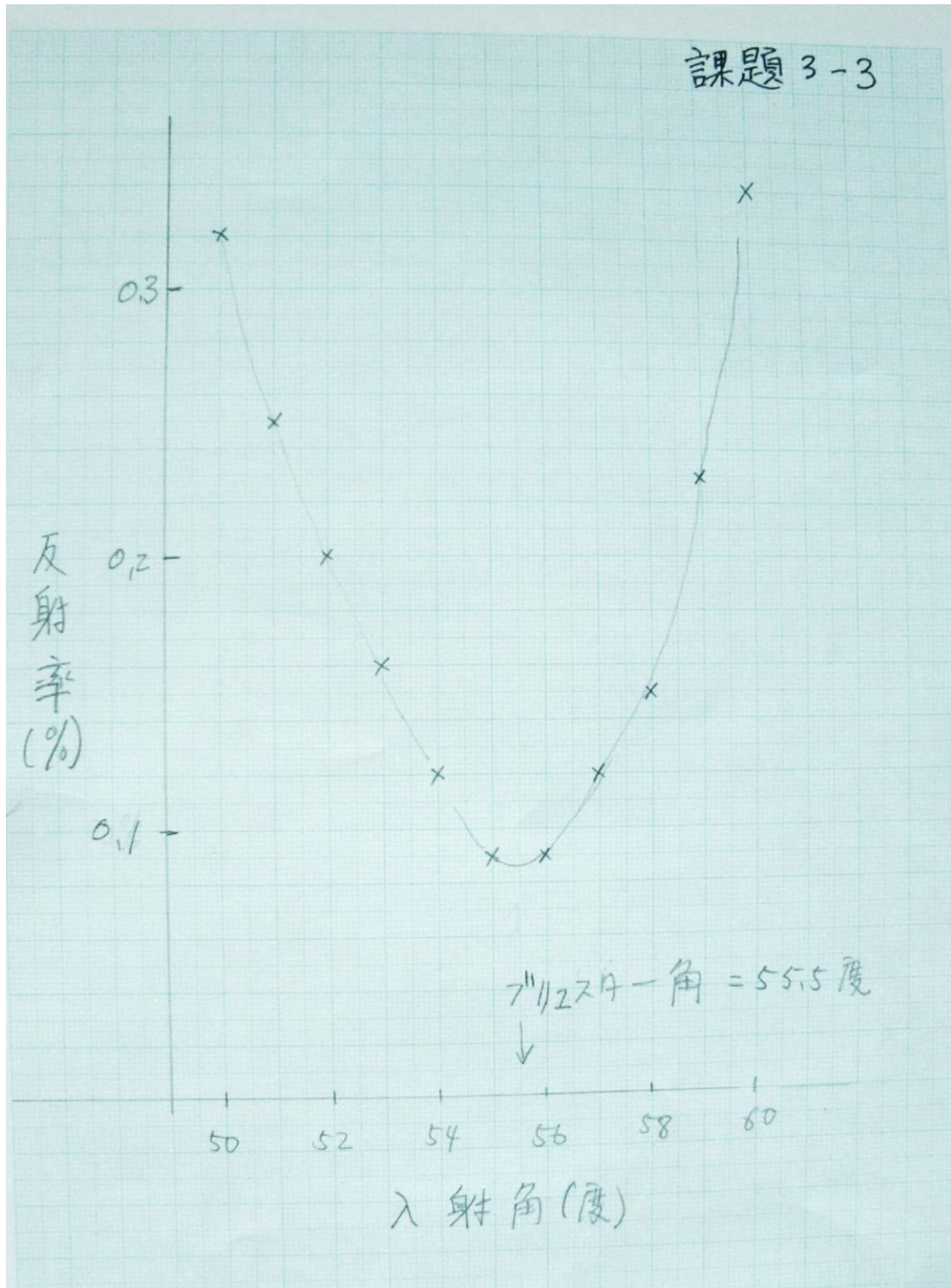
反射率の極小値	反射率の極小値を与える角度	式(7)から求めた屈折率
0.08%	55.5°	1.455

(2)

(3) 入射光から見て電場ベクトルの振動方向が境界面に垂直な方向では、不連続であるのに対し、境界面に平行な方向では一様である。この違いにより、反射率に差異が生ずる。

(4) 図から分かるように、ブリュスター角で入射した光の反射光の偏光方向は図面に対して垂直、すなわち入射面に垂直である。実験では、反射面の法線が水平方向であり、入射面は水平面である。従って、極小値が現れる偏光方向は水平方向である。





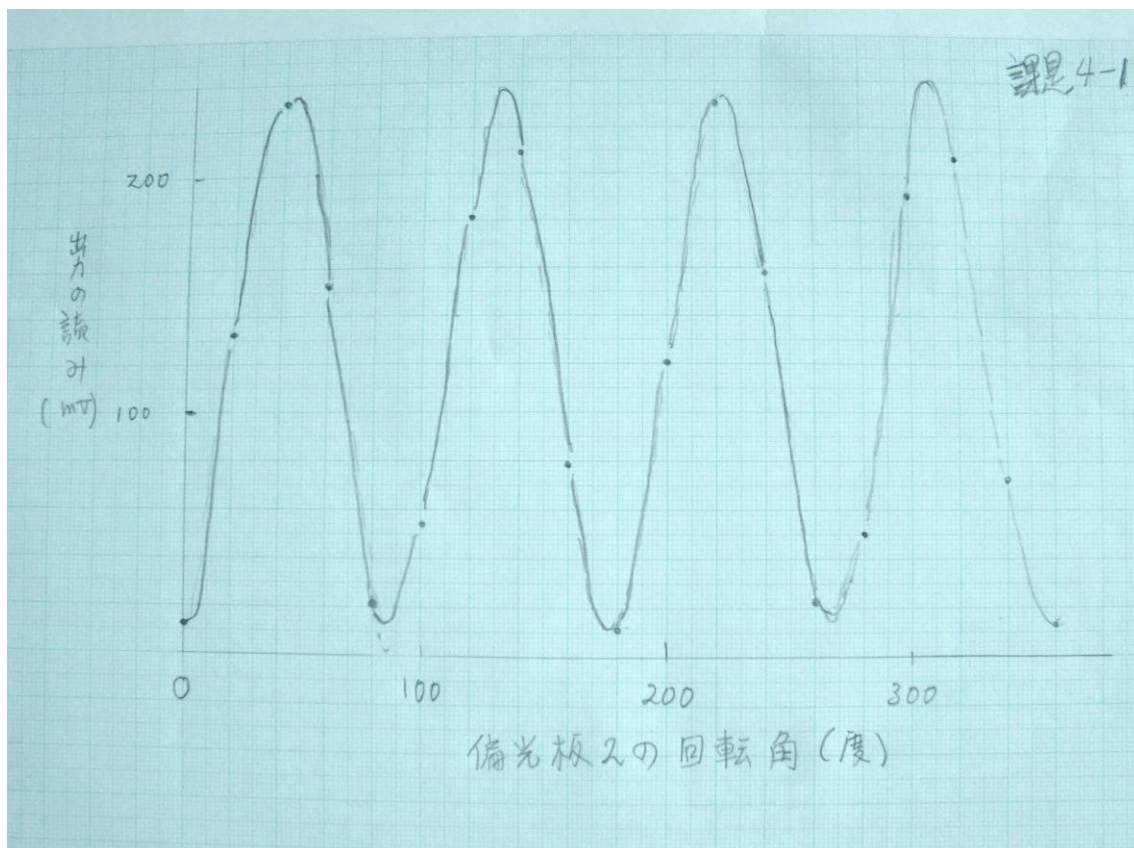
課題 3-3

チャレンジ番号	氏名

課題 4-1 (1)

点

偏光板 3 枚を通した時の透過光強度			
偏光板 2 の回転角	出力の読み	偏光板 2 の回転角	出力の読み
0 (度)	12.5mV		
20	131.7		
40	231.5		
60	152.1		
80	20.6		
100	54.2		
120	191.0		
140	208.8		
160	78.5		
180	11.6		
200	121.4		
220	231.3		
240	158.3		
260	22.0		
280	50.6		
300	191.1		
320	206.8		
340	71.8		
360	13.6		



課題4-1

チャレンジ番号	氏名

課題 4-1 (2) 強度変化を表す関数とそう考えた理由を書け。



2) : 右の図のように、偏光板 1 を出た光は直線偏光である。

偏光板 2 を通って出る光 B の振幅は、

$$B = A \cos \theta$$

図の B 方向の直線偏光である。さらに、この光が偏光板 3 を通る際、透過した光は直線偏光であり、その振幅は

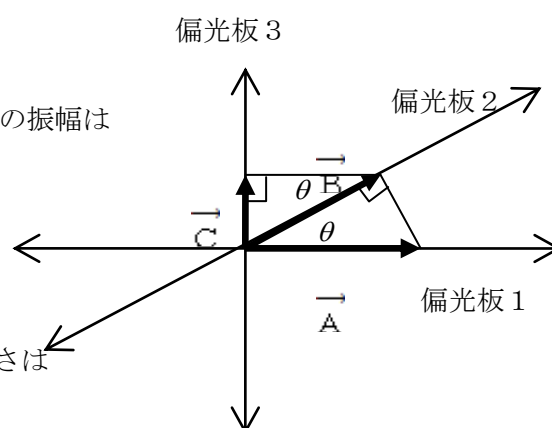
$$C = B \cos \alpha$$

したがって、 $C = A \cos \theta \cos \alpha = A \cos \theta \sin \theta = \frac{A}{2} \sin 2\theta$

したがって、3 枚の偏光板を通り抜けてくる光の明るさは次の式で与えられる。

$$|C|^2 = \frac{A^2}{4} \sin^2 2\theta = \frac{A^2}{8} (1 - \cos 4\theta)$$

すなわち、明るさには 90° ごとに山と谷が現れる。



チャレンジ番号	氏名

課題 4-2 目視観察の結果とプラスチックフィルムの性質についての推察を、その理由とともに書け。

点

2枚の、偏光方向がたがいに直角な偏光板の間に、4番目の板を入れ、この板を回転する。90°ごとに暗くなるのが観察される。この現象は、課題4-1と同じである。したがって、偏光板と同じように、光に対する性質が直交する2つの方向で異なることを示している。しかし、偏光板1と4番目の板を通る光は、偏光板1を回転させても、明るさに変化は見られない。したがって、偏光板ではないことが分かる。4番目の板の持つ2つの軸の方向が前後の2枚の偏光板の偏光方向に一致するごとに透過光が暗くなると考えられる。

4番目の板を例えば45度に設定すると、光は3枚を通りぬける。この状態で偏光板1を回転すると明暗が現れる。同様に偏光板3を回転させても明暗が現れることから、完全ではないが、偏光板1と4番目の板を通りぬけた光は直線偏光に近い光であることが分かる。

以上の観察から、4番目の板は、光に対する性質が異なる固有の2方向をもつが、偏光板と異なり、どちらかの軸方向の電場を持つ光を吸収するのでは無い。この2方向で屈折率が異なると、この板を透過した光は入射したときと比べて、2方向で光の振動の位相が異なる。したがって、ヒントに示したように、電場振動ベクトルの向きがいろいろな方向をとるので、光の電場ベクトルがいろいろな方向を持った光が得られていることを示している。

*実験で使用した4番目の板は、1/2波長板と呼ばれるもので、波長550nmの光に対し、2方向で位相が1/2波長ずれるという性質を持つ。したがって、4番目の板の異方性軸に対し45度回転した方向の偏光が入射すると、X、またはY方向の電場ベクトルの振動方向が、入射した時と比べてちょうど反対方向となる。その結果、通りぬけた光の偏光方向が90度回転する。

国際物理オリンピック

実験コンテスト編

第 3 7 回国際物理オリンピック
シンガポール
実験コンテスト
2006年7月12日 水曜日

最初にこれを読んで下さい。

1. 実験コンテストの制限時間は5時間である。
2. 実験問題は、4つのPart からなり、合計点は20点である。
3. 筆記には、用意された文具のみを用いなさい。
4. Writing sheet に解答を書きなさい。それらは採点の対象となる。
 - Writing sheet はおもて面だけを用いなさい。Writing sheet は問題ごとに新しい用紙を用いなさい。
 - 各用紙には以下のことを書きなさい。
 - 1) 試みた実験のPart 番号
 - 2) ページ番号 : Part ごとの一連の番号
 - 3) そのPart ごとの総ページ数
 - 4) 国コード、生徒コード
 - 簡潔に書きなさい。できるだけ方程式、数、記号、図、グラフを用い、文章は最小限にとどめなさい。
 - 採点の対象となることを望まないページには大きな×を書き、用紙の通し番号に含めないこと。
5. 各問題の Answer Sheet には対応する枠内に最終的な答えを記入しなさい。重要な図には適切な番号を付けなさい。単位を付けるのを忘れないようにしなさい。
6. 終了したとき、**Partごとに**、次の順序にしたがってすべての用紙を整えなさい。
 - Answer Sheet
 - 採点の対象を希望する Writing Sheet (ページ順)
 - 採点対象を希望するグラフ用紙
 - 採点して欲しくない Writing Sheet とグラフ用紙
 - 未使用の用紙、グラフ用紙、問題用紙は一番下にする
7. すべての用紙はクリップでとめ、机の上に置いておきなさい。
8. すべての用紙、実験に用いたすべての物品は試験場から持ち出してはいけない。



37th International Physics Olympiad

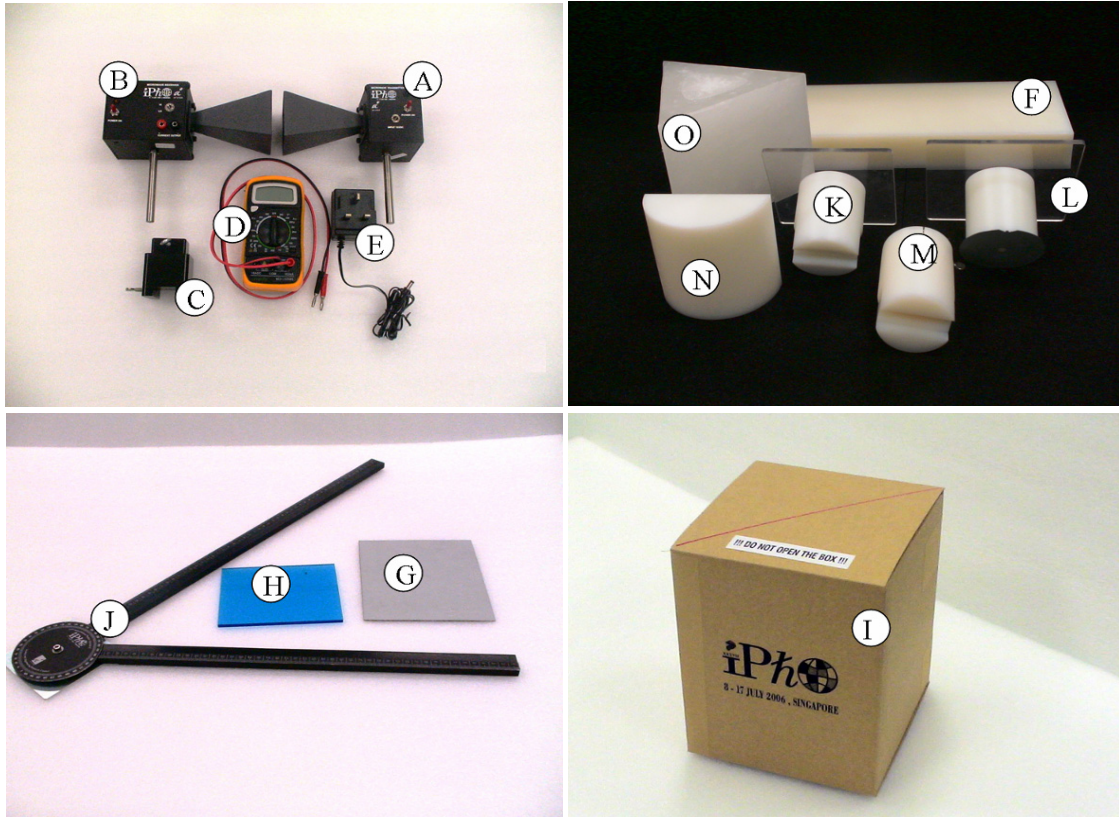
Singapore

8 - 17 July 2006

実験問題

2006年7月12日 (水)

実験器具一覧



器具記号	器具	個数	器具記号	器具	個数
Ⓐ	マイクロ波発信器	1	Ⓘ	ブラックボックス (金属棒格子が入っている)	1
Ⓑ	マイクロ波受信器	1	Ⓙ	角度調整器 (ゴニオメーター)	1
Ⓒ	発信器/受信器支持台	2	Ⓚ	プリズム支持台	1
Ⓓ	デジタルマルチメーター	1	Ⓛ	回転台	1
Ⓔ	発信器用電源	1	Ⓜ	レンズ/反射板支持台	1
Ⓕ	「薄膜」の役割をする樹脂板	1	Ⓝ	半円筒型レンズ (片側が平面)	1
Ⓖ	反射板 (金属板)	1	Ⓞ	ロウでできた三角柱プリズム	2
Ⓗ	ビーム分離器 (青色の透明アクリル樹脂板)	1		Blu-Tack (固定用の粘着材)	1 パック
	ノギス (別に配られる)			30 cm 定規 (別に配られる)	

はじめの注意:

- マイクロ波の発信器の出力は、標準的な安全レベルに保たれている。しかし、発信器のスイッチが入っているときは、近づいてマイクロ波発信器の開口部を決して直接のぞき込まないこと。
- 金属棒格子の入っているブラックボックス ① は決して開けないこと。
- ロウでできたプリズム ② はもろくて壊れやすいので注意すること (Part 3 で使う)。

注意:

- 重要な注意なので忘れないこと：マイクロ波受信器の出力（電流値）は、マイクロ波のエネルギー強度ではなく、マイクロ波の振幅に比例する。
- マイクロ波受信器の感度切り替えスイッチは、常に「LO」に設定すること。
- データ取得中は、マルチメーターのレンジ（感度）を変えないこと。
- 影響を最小限にするために、使わない機器類は、実験装置からなるべく遠ざけること。また、自分の体を動かしても変わるので注意すること。
- 器具配置図を描くときには、器具を示すために、器具記号 (A, B, C, ...) を必ず用いること。



デジタルマルチメーターは、上の写真に示されているように、2本のリード線をつないで使用する。この実験では、この写真のように直流電流測定レンジの「2 m」（最大2 mA）の設定で使用する。

Part 1: マイケルソン干渉計

1.1. はじめに

マイケルソン干渉計は、次のような装置である。ビーム分離器が、入射した電磁波 (EM, Electromagnetic wave) を2つの経路に分けて送りだし、それぞれのビームは各々反射板で反射された後、一緒になって再び重なった電磁波がつくられ、その結果、干渉パターンができる。図1.1 は、これから組み立てるマイケルソン干渉計の概略図である。入射波は、発信器から出て、2つの異なる経路に沿って、受信器へと進む。これら2つの波が、重なりあって干渉し、受信器で受信される。受信器の位置での信号の強さは、2つの波の位相差に依存する。位相差は、光路差を変えるとで変化する。

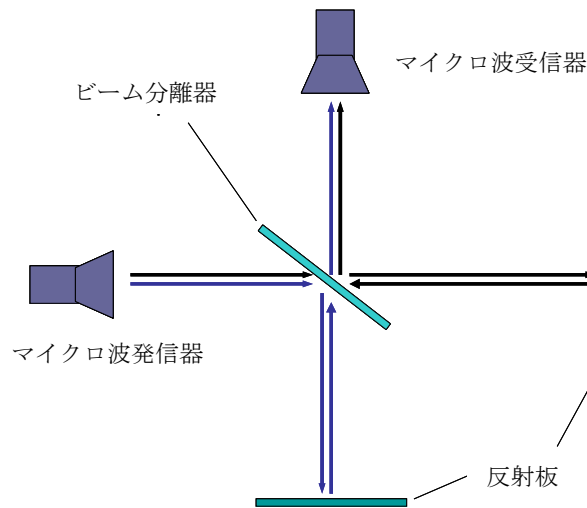


図 1.1: マイケルソン干渉計の概略図.

1.2. この実験に必要な実験器具一覧

- 1) マイクロ波発信器 (A) とその支持台 (C)
- 2) マイクロ波受信器 (B) とその支持台 (C)
- 3) 角度調整器 (J)
- 4) 2つの反射板: 反射板 (G) とその支持台 (M)、反射板として用いる樹脂板 (F)
- 5) 支持台として機能する回転台 (L) にのせたビーム分離器 (H)
- 6) デジタルマルチメーター (D)

1.3. 課題：マイクロ波の波長の決定

(配点 2 点)

1.2 で示した実験器具だけを用いて、空気中におけるマイクロ波の波長 λ を決定するために、マイケルソン干渉計を組み立てなさい。光路差を変えながら測定した受信器の出力値を表に示しなさい。それをもとにして波長 λ を求めなさい。その際、定規の目盛の半分が読み取り誤差であることを考慮し、多数回測定して、求めた波長の最終的な誤差 $\Delta \lambda$ が 0.02 cm より小さくなるように示しなさい。

注意：樹脂版 ⑥ はマイクロ波を一部透過させるので、その後ろに立ったりすると測定結果に影響する。⑥ の後ろに立ったり、動いたりしないこと。

Part 2: 「薄膜」の干渉

2.1. はじめに

電磁波が、誘電体の「薄膜」に入射し、図 2.1 に示されるように、2つの波に分かれる。Aは「薄膜」の上面で反射され、Bは下面で反射される。AとBの重ね合わせが、いわゆる薄膜干渉に相当する。

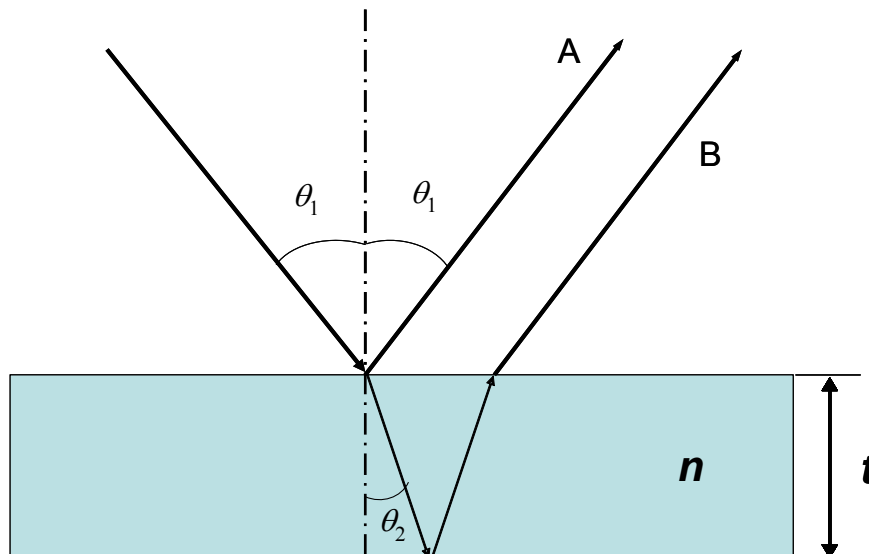


図 2.1: 薄膜の干渉現象の模式図.

AとBの光路差が干渉による強め合いや弱め合いの原因になる。そのとき得られる波の強度 I は、2つの波の光路差で決まる。それは結局、入射波の入射角 θ_1 、波長 λ 、薄膜の厚さ t 、および薄膜の屈折率 n で変わる。したがって、薄膜の屈

折率 n は、 t と λ の値を使い、受信器の出力 S 対 θ_i の関係をプロットしたグラフから求めることができる。

2.2. この実験に必要な実験器具の一覧

- 1) マイクロ波発信器 (A) と支持台 (C)
- 2) マイクロ波受信器 (B) と支持台 (C)
- 3) 半円筒型レンズ (N) と支持台 (M)
- 4) 角度調整器 (J)
- 5) 回転台 (L)
- 6) デジタルマルチメーター (D)
- 7) 「薄膜」の役割をする樹脂板 (F)
- 8) ノギス

2.3. 課題: 樹脂板の屈折率の決定

(配点 6 点)

課題 1 : 強め合いと弱め合いの条件式を θ_i, t, λ, n を使って表しなさい。

(1 点)

課題 2 : 2.2 にリストされた実験器具だけを使って、受信器の出力 S の変化を、入射角 θ_i が 40° から 75° の範囲の角度の関数として測定することのできる実験装置を組み立て、その略図を描きなさい。その際、入射角と反射角、および回転台の上の「薄膜」の位置などをはっきりと示しなさい。また、略図中では、2 ページで与えられた器具記号を使って各器具を明記しなさい。次に、得られたデータを表で示しなさい。さらに、それをもとに受信器出力 S を入射角 θ_i に対してグラフに描きなさい。強め合いと弱め合いに対応する (受信器出力 S の最大値と最小値を与える) 角度をそれぞれ正確に決定しなさい。

(3 点)

課題 3 : 空気の屈折率を 1.00 と仮定し、干渉の次数、すなわち整数値 m を決定し、樹脂板の屈折率 n を求めなさい。 m と n の値を解答用紙に記入しなさい。

(1.5 点)

課題 4 : 得られた結果に対する誤差解析を進め、屈折率の誤差を見積もりなさい。誤差 Δn を解答用紙に記入しなさい。

(0.5 点)

注意:

- 半円筒型レンズの平面をマイクロ波発信器に向けて置くと、マイクロ波はほぼ平行ビーム、つまり平面波となる。そのレンズの平面とマイクロ波発信器の開口部の距離を **3 cm** にしなさい。

- マイクロ波発信器と受信器は樹脂板からなるべく離して設置するとよい結果が得られる。
- マイクロ波が平面波でないと、観測される受信器出力 S と入射角 θ_1 のグラフに不要なピークが現れてしまう。正しく測定されると、指定された θ_1 の範囲 $40^\circ \sim 75^\circ$ では、干渉によって、一つの極大と一つの極小が現れるだけである。

Part 3: 不満足な全反射

3.1. はじめに

全反射という現象は、光学的に密な物質から疎な物質へ平面波が入射したときに生じる。しかしながら実際には、幾何光学によって予想される全反射とは違って、入射波は光学的に疎な物質に侵入し、少しの間、境界に沿うように進んでから、散乱し、光学的に密な物質に戻る（図 3.1 を見なさい）。この効果は、反射波のずれ D で表される「グースーヘンヒェンのずれ」として知られている。

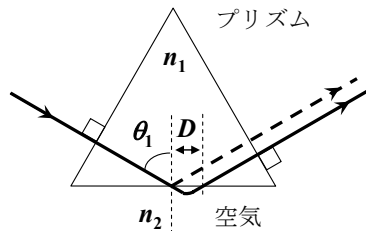


図 3.1: プリズムで起こる電磁波の全反射を表した概念図。ずれ D は、グースーヘンヒェンのずれによる反射波のプリズム表面での平行移動の距離を示している

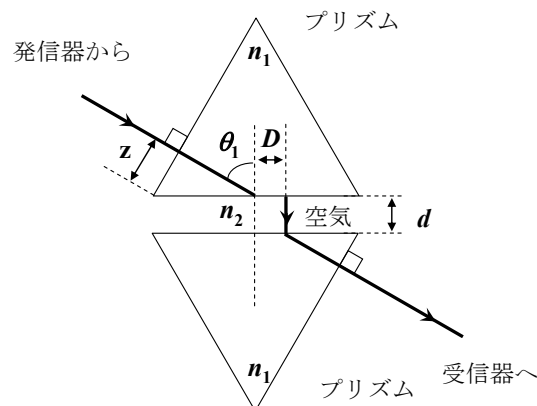


図 3.2: 2つのプリズムを距離 d 離れたときの実験の配置図。ずれ D は、グースーヘンヒェンのずれによる反射波のプリズム表面での平行移動の距離である。また、 z は発信器の中心軸とプリズムのふちまでの距離である。

図 3.2 に示すように、同じ屈折率をもつ（同じ物質でできている）2つのプリズムを、最初のプリズムからわずかな距離 d だけ離れた位置におくと、2番目のプリズムの中に電磁波が侵入する現象が起こる。この不思議な現象は、「不満足な全反射 (Frustrated Total Internal Reflection, FTIR)」と呼ばれる。伝播する波のエネルギー強度 I_t は、距離 d が増加するとともに、次の式で示されるように指数的に減少する。

$$I_t = I_0 \exp(-2\gamma d) \quad (3.1)$$

ここで、 I_0 は入射波のエネルギー強度を示し、 γ は次の式で与えられる。

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 \theta_1 - 1} \quad (3.2)$$

λ は空気中での電磁波の波長である。 n_2 は、空気の屈折率であり、1.0 とする。

3.2. この実験に必要な実験器具一覧

- 1) マイクロ波発信器 ① とその支持台 ②
- 2) マイクロ波受信器 ③ とその支持台 ②
- 3) 片側が平面になっている半円筒型レンズ ④ とその支持台 ⑤
- 4) 2つのロウでできた三角柱のプリズム ⑥ とその支持台 ⑦、および支持台としても機能する回転台 ⑧
- 5) デジタルマルチメーター ⑨
- 6) 角度調整器 ⑩
- 7) 定規

3.3. 装置の設定

3.2 に表示された器具だけを使い、「不満足な全反射」におけるプリズム間の距離 d の関数として、エネルギー強度 I_t の変化を測定するための装置を組み立てる。よりよい実験結果を得るために、次のことに注意しなさい。

- この実験では、角度調整器の片方のアームだけを使い、また、必要なら発信器と受信器をアームからはずしてよい。
- プリズムの表面がお互いに平行になるように十分注意すること。
- プリズムとレンズの曲面の頂点との間の距離を 2 cm としなさい。
- マイクロ波受信器の開口部をプリズムに接触させて置くこと。
- それぞれの d の値ごとに、最大の信号を得るようにプリズムの面に沿って、マイクロ波受信器の位置を微調整しなさい。
- デジタルマルチメーターを 2 mA のレンジに設定し、 $d=0.6$ cm からデータを取り始めること。 d を大きくしていったとき、デジタルマルチメーターの読みが 0.20 mA 以下になったら、測定をやめ、再度同じ測定を繰り返しなさい。

3.4. 課題：プリズムの屈折率の決定

(配点 6 点)

課題 1

組みあがった実験装置の略図を描き、各実験器具には 2 ページで指示した器具記号を付けなさい。略図には、距離 z (図 3.2 を見なさい) の最適値を探してその値を明示しなさい。 z は、発信器の中心軸とプリズムのふちまでの距離である。

(1 点)

課題 2

この一連の測定を 2 度行って、測定したデータおよび誤差などを一覧表にしなさい。

(2.1 点)

課題 3

(a) 表のデータをグラフにプロットしなさい。その際、アーム目盛の読み取り誤差をグラフ中に示して描きなさい。これをもとにして屈折率 n_1 およびその誤差を求めなさい。

(b) プリズムの屈折率 n_1 とその誤差 Δn_1 を解答用紙に記入しなさい。

(2.9 点)

Part 4: 金属棒の格子構造によるマイクロ波の回折：ブラッグ反射

4.1. はじめに

ブラッグの法則

結晶の格子構造は、ブラッグの法則

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (4.1)$$

を使って、調べることができる。ここで、 d は、X線を「反射」する平行な格子面間の距離で、格子定数と呼ばれる。ここで、 m は回折次数で、 θ は入射X線と結晶面とのなす角である。ブラッグの法則は、一般的にはブラッグの反射式、あるいはX線回折式という名で知られている。

金属棒の格子構造

X線の波長は、結晶の格子定数と同程度の値であるので、通常のブラッグの回折実験は、X線を用いておこなわれている。しかし、マイクロ波の場合、より大きな格子定数をもつ結晶構造で回折が生じるので、簡単に定規で測定できる。

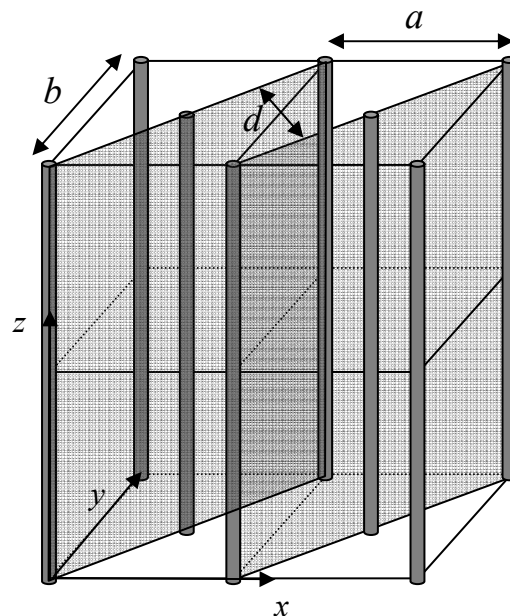


図 4.1 格子定数 a 、 b の金属棒格子，および格子面間隔 d

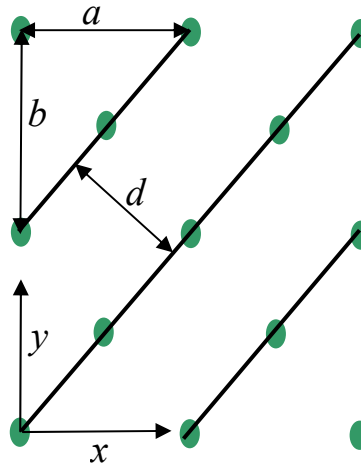


図 4.2 図 4.1 (同じスケールではない) を真上から見た金属棒の格子。
直線は、格子の対角線の面を示している。

この実験では、金属棒でつくられた格子は、ブラッグの法則を確認するために利用される。そのような金属棒格子の例を図 4.1 に示す。ここで、金属棒は、鉛直な太線で示している。xy 平面の対角線方向に沿った格子面を、影をつけた面で表している。また、図 4.2 は、金属棒の格子を上から見た図 (z 軸に沿って見下ろす) を表し、ここでは、点が棒を示し、線が対角線方向の格子面を表している。

4.2. この実験に必要な器具一覧

- 1) マイクロ波発信器 ㉠ と支持台 ㉡
- 2) マイクロ波受信器 ㉢ と支持台 ㉡
- 3) 円筒型レンズ ㉣ と支持台 ㉤
- 4) 金属棒格子の入ったブラックボックス ㉥
- 5) 回転台 ㉦
- 6) デジタルマルチメーター ㉧
- 7) 角度調整器 ㉨

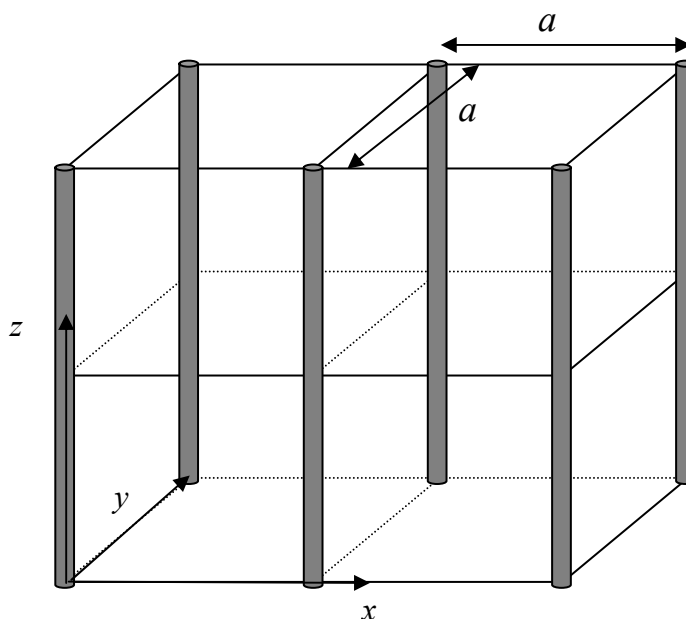


図 4.3: 金属棒による平方格子.

この実験では、図 4.3 に描かれているように、金属棒が**単純な**平方格子を作っているものが与えられている。この金属格子は、箱の中に密閉されている。この実験結果から格子の格子定数 a を導きだす。密閉されているブラックボックスは、そのまま測定できるので、絶対に、開けないこと。もし、実験終了後、箱が開けられていることがわかった場合、零点になるので、注意しなさい。

4.3. 課題: 単純平方格子の格子定数の決定

(配点 6 点)

課題 1

図 4.3 に示すような単純平方格子を真上から見るとどのような図形になるか。広い範囲で描きなさい。また、その図形に、与えられた格子の格子定数 a と対角線方向の格子面間隔 d とを描き込みなさい。この図形を使って、ブラッグの法則を導きなさい。(1 点)

課題 2

ブラッグの法則と与えられた装置を使って、格子定数 a を決定するためのブラッグの回折実験を設計しなさい。

- (a) 実験装置の組み立てをスケッチしなさい。2 ページの器具記号を使って、すべての器具を器具記号で示しなさい。そして、発信器と格子面とのなす角度 θ と発信器と受信器とのなす角度 ζ をはっきりわかるように示しなさい。この実験での回折面は、箱の上面の赤い線で示される対角線方向の面である。 (1.5 点)
- (b) 回折実験を $20^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の θ に対して測定しなさい。解答用紙に、測定結果を表にして、 θ と ζ を記録しなさい。 (1.4 点)
- (c) θ の関数として、回折波のエネルギー強度をプロットしなさい。 (1.3 点)
- (d) グラフを使って、格子定数 a を決定して、実験誤差を見積もりなさい。 (0.8 点)

注意:

1. 最良の結果を得るために、受信器は実験の間動かさないこと（同じ場所に固定しておくこと）。発信器と格子の間、格子と受信機の間は、ともに 50cm 程度離すこと。
2. この実験では、格子の対角線方向の面だけを使いなさい。もし、他の面を使うと間違った結果になる。
3. 金属棒格子の入ったブラックボックス ① は、赤い対角線が描かれている面を上にして使用すること。
4. 正確な結果を得るには、それぞれの角度での回折強度のピークを得るように、そのピーク付近の角度で何点か測定しなさい。

国際物理オリンピック2006 実験問題解答例



The 37th International Physics Olympiad
Singapore

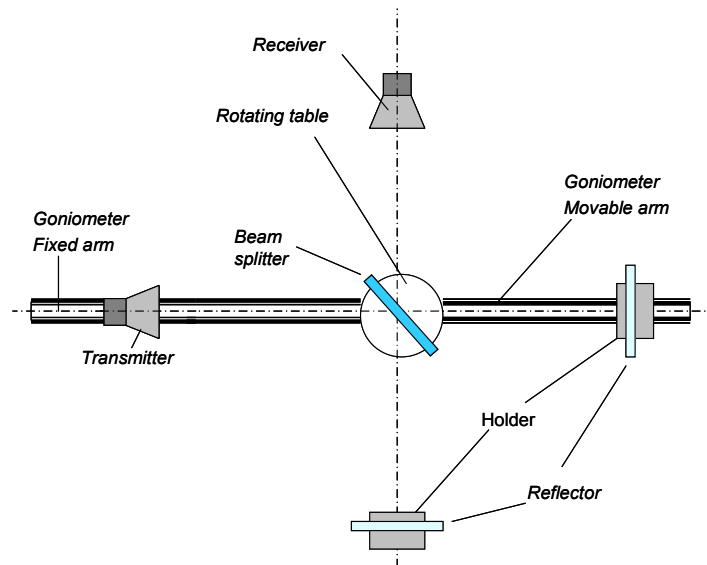
Experimental Competition

Wednesday, 12 July, 2006

Sample Solution

Part 1

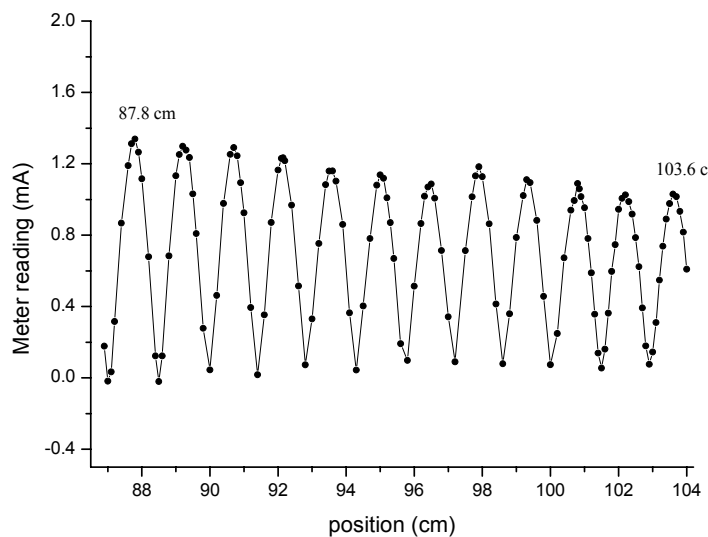
a. A sketch of the experimental setup



b. Data sheet

Position (cm)	Meter reading (mA)	Position (cm)	Meter reading (mA)	Position (cm)	Meter reading (mA)	Position (cm)	Meter reading (mA)
104.0	0.609	100.9	1.016	96.0	0.514	91.0	0.925
103.9	0.817	100.85	1.060	95.8	0.098	90.9	1.094
103.8	0.933	100.8	1.090	95.6	0.192	90.8	1.245
103.7	1.016	100.7	0.994	95.4	0.669	90.7	1.291
103.6	1.030	100.6	0.940	95.3	0.870	90.6	1.253
103.5	0.977	100.4	0.673	95.2	1.009	90.4	0.978
103.4	0.890	100.2	0.249	95.1	1.119	90.2	0.462
103.3	0.738	100.0	0.074	95.0	1.138	90.0	0.045
103.2	0.548	99.8	0.457	94.9	1.080	89.8	0.278
103.1	0.310	99.6	0.883	94.7	0.781	89.6	0.809
103.0	0.145	99.4	1.095	94.5	0.403	89.5	1.031
102.9	0.076	99.3	1.111	94.3	0.044	89.4	1.235
102.8	0.179	99.2	1.022	94.1	0.364	89.3	1.277
102.7	0.392	99.0	0.787	93.9	0.860	89.2	1.298
102.6	0.623	98.8	0.359	93.7	1.103	89.1	1.252
102.5	0.786	98.6	0.079	93.6	1.160	89.0	1.133
102.4	0.918	98.4	0.414	93.5	1.159	88.8	0.684
102.3	0.988	98.2	0.864	93.4	1.083	88.6	0.123
102.2	1.026	98.0	1.128	93.2	0.753	88.5	-0.020
102.1	1.006	97.9	1.183	93.0	0.331	88.4	0.123
102.0	0.945	97.8	1.132	92.8	0.073	88.2	0.679
101.9	0.747	97.7	1.015	92.6	0.515	88.0	1.116
101.8	0.597	97.5	0.713	92.4	0.968	87.9	1.265
101.7	0.363	97.2	0.090	92.2	1.217	87.8	1.339
101.6	0.161	97.0	0.342	92.15	1.234	87.7	1.313
101.5	0.055	96.8	0.714	92.1	1.230	87.6	1.190
101.4	0.139	96.6	1.007	92.0	1.165	87.4	0.867
101.3	0.357	96.5	1.087	91.8	0.871	87.2	0.316

101.2	0.589	96.4	1.070	91.6	0.353	87.1	0.034
101.1	0.781	96.3	1.018	91.4	0.018	87.0	-0.018
101.0	0.954	96.2	0.865	91.2	0.394	86.9	0.178
104.0	0.609	100.9	1.016	96.0	0.514	91.0	0.925
103.9	0.817	100.8	1.060	95.8	0.098	90.9	1.094
103.8	0.933	100.8	1.090	95.6	0.192	90.8	1.245
103.7	1.016	100.7	0.994	95.4	0.669	90.7	1.291
103.6	1.030	100.6	0.940	95.3	0.870	90.6	1.253
103.5	0.977	100.4	0.673	95.2	1.009	90.4	0.978
103.4	0.890	100.2	0.249	95.1	1.119	90.2	0.462
103.3	0.738	100.0	0.074	95.0	1.138	90.0	0.045
103.2	0.548	99.8	0.457	94.9	1.080	89.8	0.278
103.1	0.310	99.6	0.883	94.7	0.781	89.6	0.809
103.0	0.145	99.4	1.095	94.5	0.403	89.5	1.031
102.9	0.076	99.3	1.111	94.3	0.044	89.4	1.235
102.8	0.179	99.2	1.022	94.1	0.364	89.3	1.277
102.7	0.392	99.0	0.787	93.9	0.860	89.2	1.298
102.6	0.623	98.8	0.359	93.7	1.103	89.1	1.252
102.5	0.786	98.6	0.079	93.6	1.160	89.0	1.133
102.4	0.918	98.4	0.414	93.5	1.159	88.8	0.684
102.3	0.988	98.2	0.864	93.4	1.083	88.6	0.123
102.2	1.026	98.0	1.128	93.2	0.753	88.5	-0.020
102.1	1.006	97.9	1.183	93.0	0.331	88.4	0.123
102.0	0.945	97.8	1.132	92.8	0.073	88.2	0.679
101.9	0.747	97.7	1.015	92.6	0.515	88.0	1.116
101.8	0.597	97.5	0.713	92.4	0.968	87.9	1.265
101.7	0.363	97.2	0.090	92.2	1.217	87.8	1.339
101.6	0.161	97.0	0.342	92.15	1.234	87.7	1.313
101.5	0.055	96.8	0.714	92.1	1.230	87.6	1.190
101.4	0.139	96.6	1.007	92.0	1.165	87.4	0.867
101.3	0.357	96.5	1.087	91.8	0.871	87.2	0.316
101.2	0.589	96.4	1.070	91.6	0.353	87.1	0.034
101.1	0.781	96.3	1.018	91.4	0.018	87.0	-0.018
101.0	0.954	96.2	0.865	91.2	0.394	86.9	0.178



From the graph, the positions of the first maximum point and 12th maximum point are measured at 87.8 cm and 103.6 cm.

The wavelength is calculated by

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{103.6 - 87.8}{11} \text{ cm}$$

2 marks

Thus, $\lambda = 2.87 \text{ cm}$.

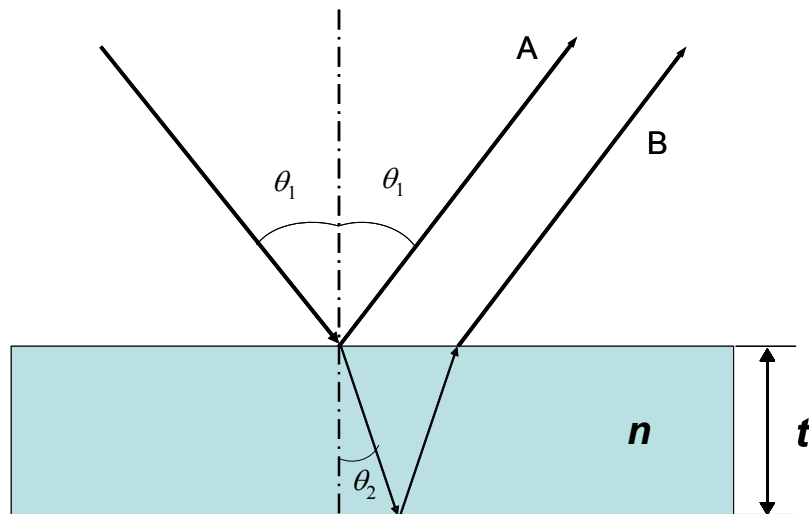
Error analysis (not required)

$$\lambda = \frac{2}{11}d, \quad \Delta d = 0.05 \times 2 \text{ cm} = 0.1 \text{ cm}.$$

$$|\Delta\lambda| = \left| \frac{2}{11} \Delta d \right| = \frac{2}{11} \times 0.10 = 0.018 \text{ cm} < 0.02 \text{ cm}$$

Part 2

(a) Deduction of interference conditions



Assume that the thickness of the film is t and refractive index n . Let θ_1 be the incident angle and θ_2 the refracted angle. The difference of the optical paths ΔL is:

$$\Delta L = 2(nt / \cos \theta_2 - t \tan \theta_2 \sin \theta_1)$$

Law of refraction:

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$$

Thus

$$\Delta L = 2t\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}$$

Considering there is 180° ($\lambda/2$) phase shift at the air- thin film interface for the reflected beam, we have interference conditions:

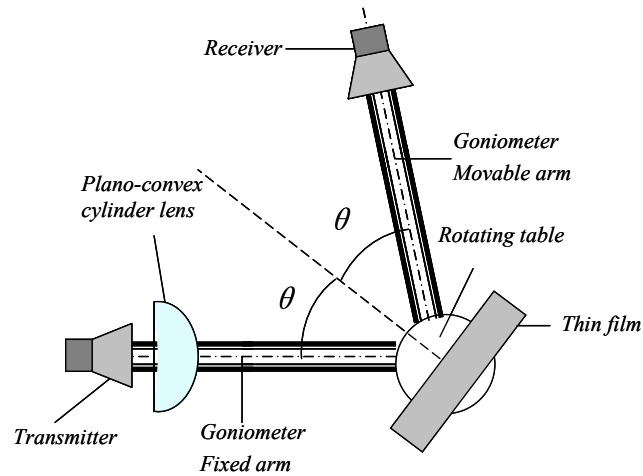
$$2t\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{\min}} = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad \text{for the destructive peak}$$

and $2t\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{\max}} = (m \pm \frac{1}{2})\lambda$ for the constructive peak

1 mark

If thickness t and wave length λ are known, one can determine the refractive index of the thin film from $I - \theta_1$ spectrum (I is the intensity of the interfered beam).

(b) A sketch of the experimental setup



1 mark

(The sketch should include the transmitter, lens, receiver and the thin film, goniometer and the direction of angle measurement) Student should the Labels mentioned on Page 2.

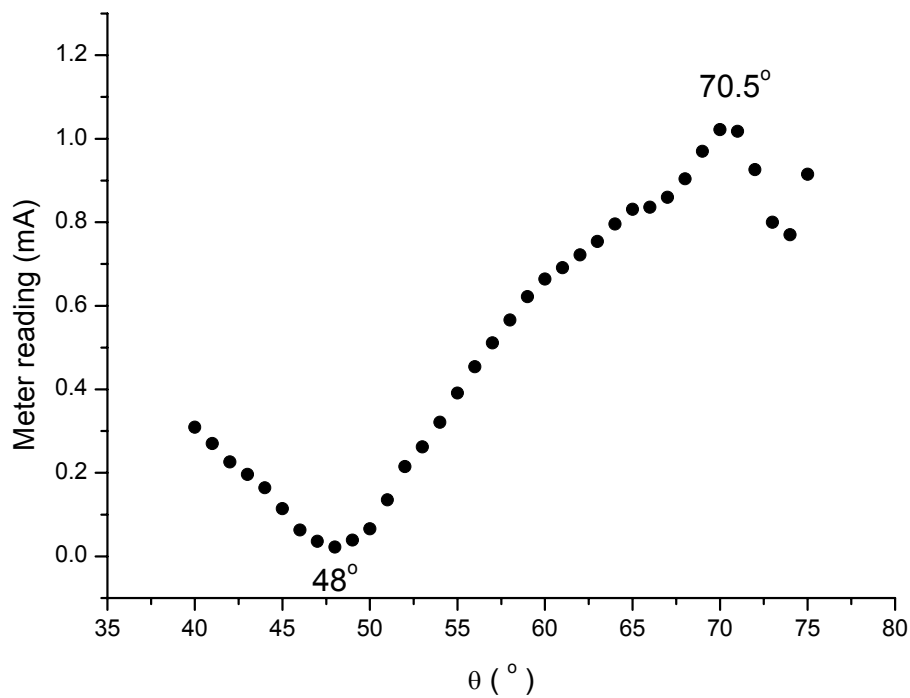
(c) Data Set

X: θ_1 / degree	Y: Meter reading S/mA
40.0	0.309
41.0	0.270
42.0	0.226
43.0	0.196
44.0	0.164
45.0	0.114
46.0	0.063
47.0	0.036
48.0	0.022
49.0	0.039
50.0	0.066
51.0	0.135
52.0	0.215
53.0	0.262
54.0	0.321
55.0	0.391
56.0	0.454
57.0	0.511
58.0	0.566
59.0	0.622
60.0	0.664

61.0	0.691
62.0	0.722
63.0	0.754
64.0	0.796
65.0	0.831
66.0	0.836
67.0	0.860
68.0	0.904
69.0	0.970
70.0	1.022
71.0	1.018
72.0	0.926
73.0	0.800
74.0	0.770
75.0	0.915

0.5 marks

Uncertainty: angle $\Delta\theta_1 = \pm 0.5^\circ$, current: ± 0.001 mA



0.9 marks

From the data, θ_{\min} and θ_{\max} can be found at 48° and 70.5° respectively.

0.6 marks

To calculate the refractive index, the following equations are used:

$$2t\sqrt{n^2 - \sin^2 48^\circ} = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

and
$$2t\sqrt{n^2 - \sin^2 70.5^\circ} = (m - \frac{1}{2})\lambda \quad (2)$$

In this experiment, $t = 5.28$ cm, $\lambda = 2.85$ cm (measured using other method).

Solving the simultaneous equations (1) and (2), we get

$$m = \frac{\sin^2 70.5^\circ - \sin^2 48^\circ}{\left(\frac{\lambda}{2t}\right)^2} + 0.25$$

$$m = 4.83 \longrightarrow m = 5$$

1 mark

Substituting $m = 5$ in (1), we get $n = 1.54$

Substituting $m = 5$ in (2), we get $n = 1.54$

0.5 marks

Error analysis:

$$n = \sqrt{\sin^2 \theta + \left(\frac{m\lambda}{2t}\right)^2}$$

$$\Delta n = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \theta + \left(\frac{m\lambda}{2t}\right)^2}} \left(\sin 2\theta \cdot \Delta\theta + \frac{m^2 \lambda}{2t^2} \Delta\lambda - \frac{m^2 \lambda^2}{2t^3} \Delta t \right)$$

$$= \frac{1}{n} \left(\sin 2\theta \cdot \Delta\theta + \frac{m^2 \lambda}{2t^2} \Delta\lambda - \frac{m^2 \lambda^2}{2t^3} \Delta t \right)$$

If we take $\Delta\theta = \pm 0.5^\circ = \pm 0.0087$ rad, $\Delta t = \pm 0.05$ cm, $\Delta\lambda = \pm 0.02$ cm

Then, when $\theta = 48^\circ$

$$\Delta n = \frac{1}{1.54} \left(0.0087 \sin 96^\circ + \frac{5^2 \times 2.85}{2 \times 5.28^2} \times 0.01 + \frac{5^2 \times 2.85^2}{2 \times 5.28^3} \times 0.05 \right) \approx 0.02$$

0.5 marks

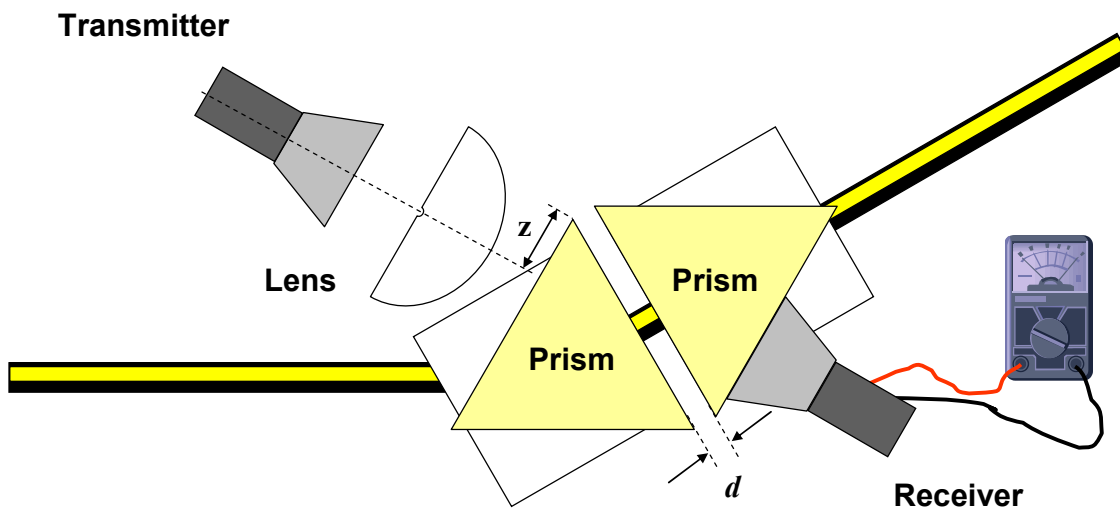
Thus, $n + \Delta n = 1.54 \pm 0.02$

Part 3

Sample Solution

Task 1

Sketch your final experimental setup and mark all components using the labels given at page 2. In your sketch, write down the distance z (see Figure 3.2), where z is the distance from the tip of the prism to the central axis of the transmitter.



Task 2

Tabulate your data. Perform the experiment twice.

Data Set

X: $d(\text{cm})$	$\Delta X(\text{cm})$	Set 1 $S_1 (\text{mA})$	Set 2 $S_2(\text{mA})$	S_{average} (mA)	$\Delta S(\text{mA})^\#$	$I_t(\text{mA})^{2*}$	$\Delta(I_t)^s$	Y: $\ln(I_t (\text{mA})^2)$	$\Delta Y^\&$
0.60	0.05	0.78	0.78	0.780	0.01	0.6080	0.016	-0.50	0.03
0.70	0.05	0.68	0.69	0.685	0.01	0.4690	0.014	-0.76	0.03
0.80	0.05	0.58	0.59	0.585	0.01	0.3420	0.012	-1.07	0.03
0.90	0.05	0.50	0.51	0.505	0.01	0.2550	0.010	-1.37	0.04
1.00	0.05	0.42	0.42	0.420	0.01	0.1760	0.008	-1.74	0.05
1.10	0.05	0.36	0.35	0.355	0.01	0.1260	0.007	-2.07	0.06
1.20	0.05	0.31	0.31	0.310	0.01	0.0961	0.006	-2.34	0.06
1.30	0.05	0.26	0.25	0.255	0.01	0.0650	0.005	-2.73	0.08
1.40	0.05	0.21	0.22	0.215	0.01	0.0462	0.004	-3.07	0.09

[#] $\Delta S = 0.01 \text{ mA}$ (for each set of current measurements)

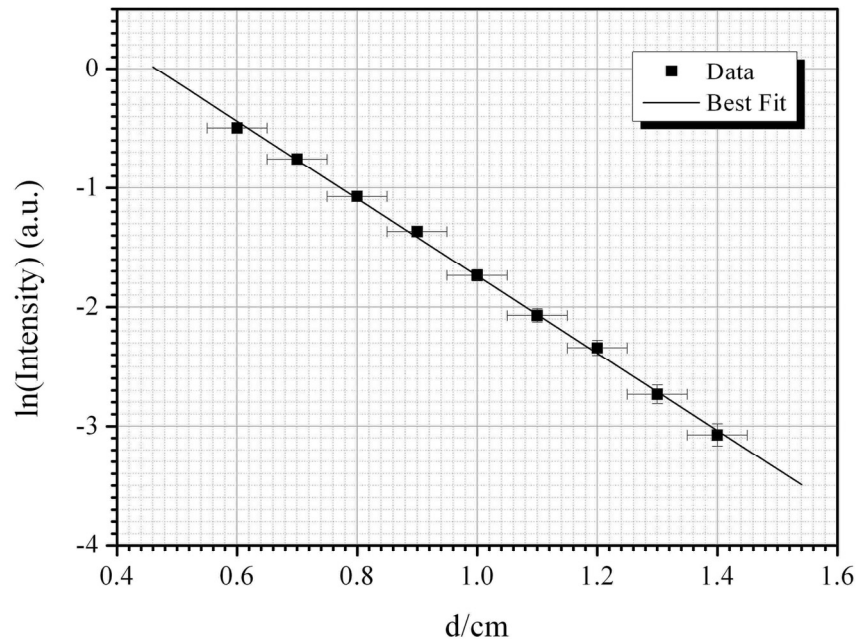
^{*} S^2 proportional to the intensity, I_t

^s $\Delta(S^2) = \Delta I_t = 2 S \times \Delta S$

[&] $\Delta Y = \Delta(\ln I_t) = \Delta(I_t)/I_t$

Task 3

By plotting appropriate graphs, determine the refractive index, n_1 , of the prism with error analysis. Write the refractive index n_1 , and its uncertainty Δn_1 , of the prism in the answer sheet provided.

**Least Square Fitting**

X = d(cm)	ΔX (cm)	Y = $\ln(I_t)$	ΔY	ΔY^2	XY	X^2	Y^2
0.60	0.05	-0.50	0.03	0.001	-0.298	0.360	0.247
0.70	0.05	-0.76	0.03	0.001	-0.530	0.490	0.573
0.80	0.05	-1.07	0.03	0.001	-0.858	0.640	1.150
0.90	0.05	-1.37	0.04	0.002	-1.230	0.810	1.867
1.00	0.05	-1.74	0.05	0.002	-1.735	1.000	3.010
1.10	0.05	-2.07	0.06	0.003	-2.278	1.210	4.290
1.20	0.05	-2.34	0.06	0.004	-2.811	1.440	5.487
1.30	0.05	-2.73	0.08	0.006	-3.553	1.690	7.469
1.40	0.05	-3.07	0.09	0.009	-4.304	1.960	9.451
$\Sigma X =$		$\Sigma Y =$	$\Sigma \Delta Y =$	$\Sigma (\Delta Y)^2 =$	$\Sigma XY =$	$\Sigma X^2 =$	$\Sigma Y^2 =$
9.00		-15.648	0.469	0.029	-17.596	9.600	33.544

From $I_t = I_0 \exp(-2\gamma d)$, taking natural log on both sides, we obtain:

$$\ln(I_t) = -2\gamma d + \ln(I_0)$$

which is of the form $y = mx + c$.

To calculate the gradient, the following equation was used, where N is the number of data points:

$$m = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = -3.247$$

To calculate the standard deviation σ_Y of the individual Y data values, the following equation was used:

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum(\Delta Y)^2}{N-2}} = 0.064$$

Hence the standard deviation in the slope can be calculated:

$$\sigma_m = \sigma_Y \sqrt{\frac{N}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}} = 0.082$$

From the gradient:

$$\begin{aligned} 2\gamma &= 3.247 \pm 0.082 \\ &\approx 3.25 \pm 0.08 \end{aligned}$$

Using:

$$n_1 = \frac{\sqrt{k_2^2 + \gamma^2}}{k_2 \sin \theta_1}$$

where $\theta_1 = 60^\circ$, $k_2 = 2\pi/\lambda \approx 2.20$ (using the wavelength determined from earlier part (using $\lambda = (2.85 \pm 0.02)\text{cm}$), we obtain:

$\begin{aligned} n_1 \pm \Delta n_1 &= 1.434 \pm 0.016 \\ &\approx 1.43 \pm 0.02 \end{aligned}$

Error Analysis for refractive index of n_1

$$\begin{aligned}\Delta n_1 &= \frac{d}{dk_2} \left[\frac{(k_2^2 + \gamma^2)^{1/2}}{k_2 \sin \theta_1} \right] \Delta k_2 + \frac{d}{d\gamma} \left[\frac{(k_2^2 + \gamma^2)^{1/2}}{k_2 \sin \theta_1} \right] \Delta \gamma \\ \Delta n_1 &= \left[\frac{(k_2^2 + \gamma^2)^{-1/2}}{\sin \theta_1} - \frac{(k_2^2 + \gamma^2)^{1/2}}{k_2^2 \sin \theta_1} \right] \Delta k_2 + \left[\frac{\gamma (k_2^2 + \gamma^2)^{-1/2}}{k_2 \sin \theta_1} \right] \Delta \gamma \\ &= 0.016 \\ &\approx 0.02\end{aligned}$$

where:

$$\Delta k_2 = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \Delta \lambda = -0.015$$

Part 4

<i>Task</i>	<i>Marks</i>
1. Top-view drawing of the lattice and derivation of Bragg's equation <ul style="list-style-type: none"> • Correct drawing of the simple square lattice (0.2 marks) • Indicating diagonal planes (0.1 mark) • Correct labeling of a & d (0.1 + 0.1 mark) • Illustration of the optical path difference (0.2 marks) • Derivation of Bragg's Law (0.2 marks) • Indicating m is an integer (0.1 mark) 	1.0

Task 1

Top-view of a simple square lattice.

0.5 marks

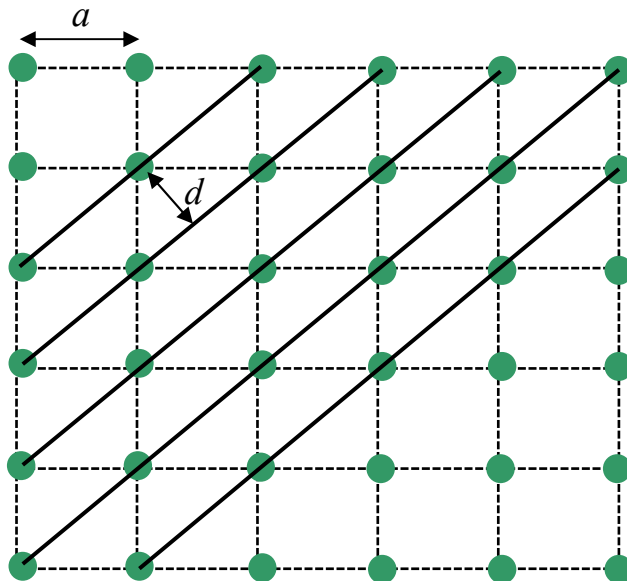


Figure 4.1: Schematic diagram of a simple square lattice with lattice constant a and interplanar d of the diagonal planes indicated.

*Deriving Bragg's Law***0.5 marks**

Conditions necessary for the observation of diffraction peaks:

1. The angle of incidence = angle of scattering.
2. The pathlength difference is equal to an integer number of wavelengths.

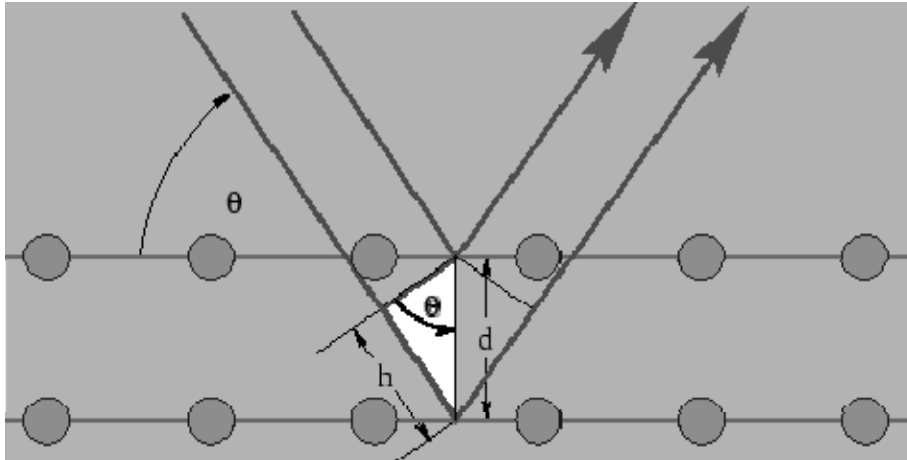


Figure 4.2: Schematic diagram for deriving Bragg's law.

$$h = d \sin\theta \quad (1).$$

The path length difference is given by,

$$2h = 2d \sin\theta \quad (2).$$

For diffraction to occur, the path difference must satisfy,

$$2 d \sin\theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3... \quad (3)$$

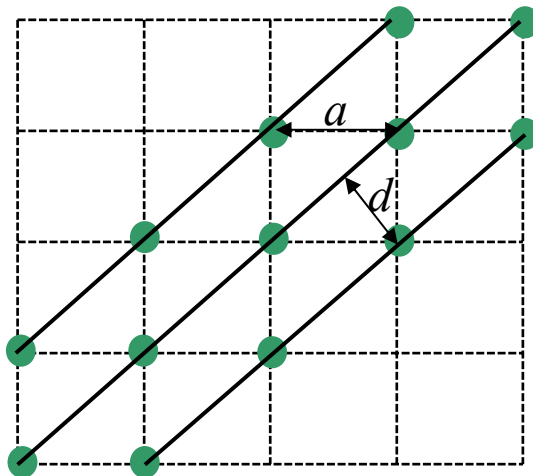


Fig. 4.3 Illustration of the actual lattice used in the experiment (this Figure is not required)

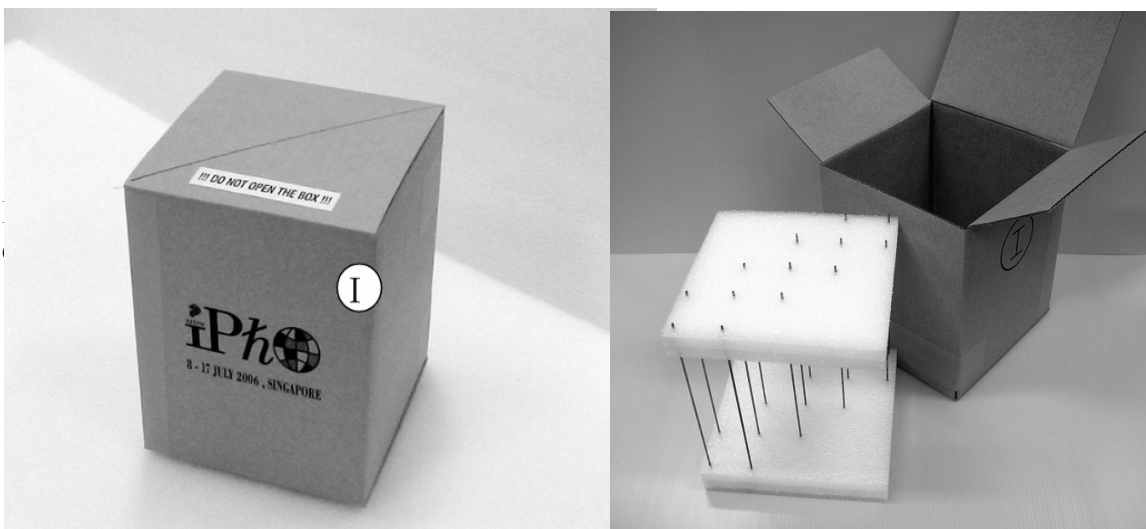


Fig. 4.4 The actual lattice used in the experiment (not required)

Task 2 (a)

<p>2(a) Experimental design + drawing</p> <ul style="list-style-type: none"> • Correct drawing of the diagram including transmitter, lens, lattice and receiver (0.6 marks) (Deduct 0.2 marks if the components are drawn on a straight line.) (Deduct 0.1 mark if lattice is not at center.) (Deduct 0.1 mark for each missing component.) • Indication of the goniometer & rotating table (0.2 marks) • Labeling of all the 6 major components (A, B, I, J, L & N): 0.05 marks for each labeling (0.3 marks) • Indication of θ and $\zeta=180^\circ-2\theta$. (0.2+ 0.2 marks) 	<p>1.5</p>
---	-------------------

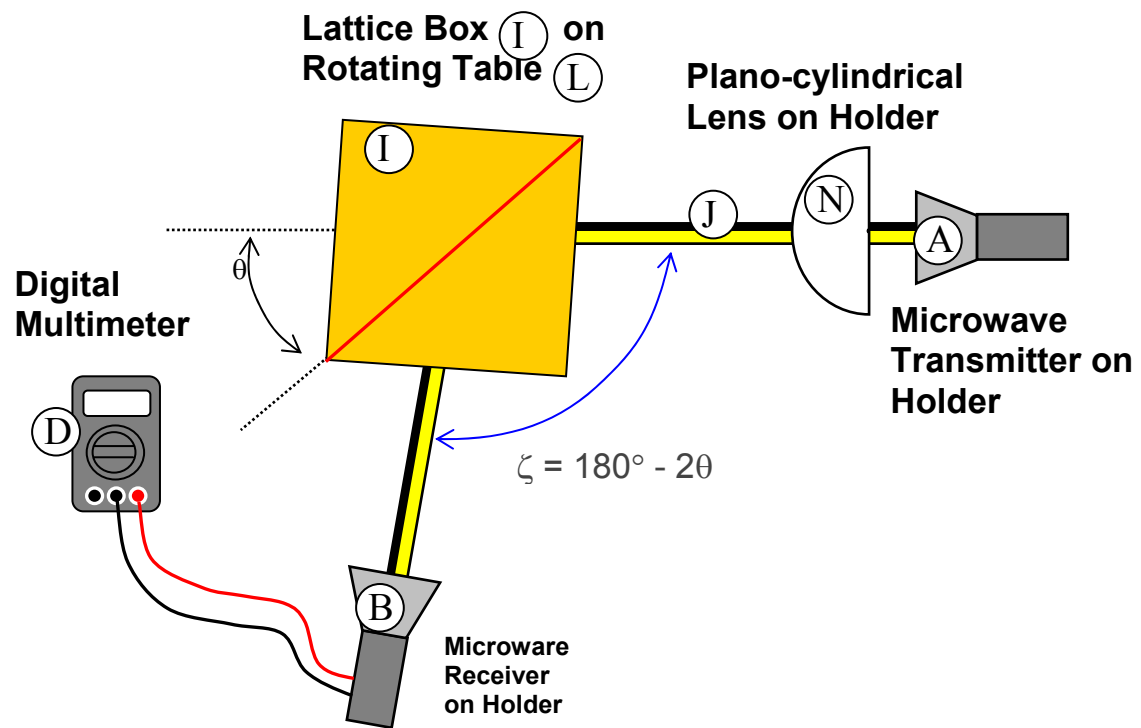
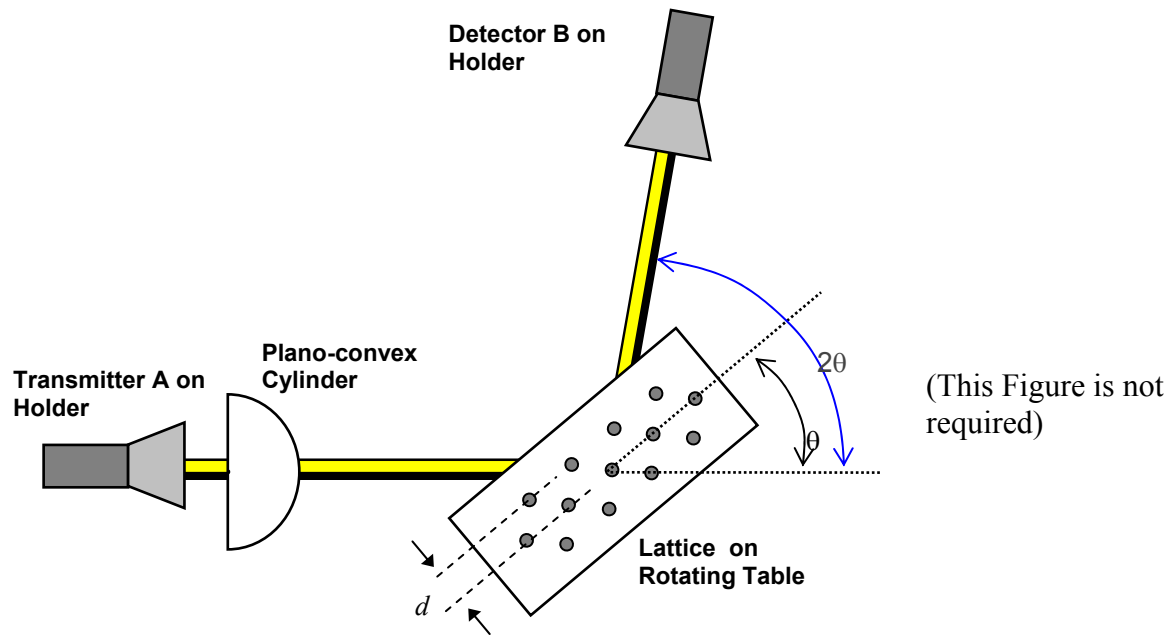


Fig. 4.5 Sketch of the experimental set up

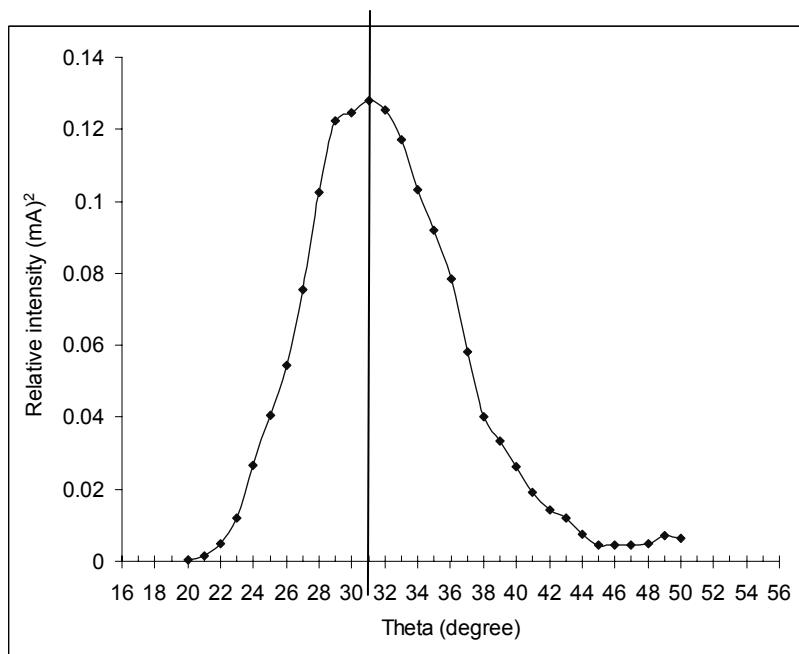
Task 2(a) and 2(b)

<p>Task 2(b) Correct result & small enough interval.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Correct unit for receiver output S: mA (0.1 mark) • Correct significant figure for S: to 3rd decimal point (0.1 mark) • Correct ζ (180-2θ). (0.5 marks) (No mark for wrong values) • 1 degree angle interval <u>throughout or covering at least the 22 -4 deg range</u> (0.5 marks) (2 deg interval: 0.3 marks; 3 deg : 0.1 mark; and 0 mark for larger interval) • Range covering the 20-50 degree (0.2 marks) (Range covering the 25-45 degree: 0.1 mark) (Other range: 0 mark) 	1.4
<p>Task 2(c) Conversion from amplitude (current) to intensity</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calculating (Output S)² (0.3 marks) • Label (mA)² or A.U. (0.1 mark) (0 mark for not writing any unit) • Using symmetry axis: (0.2 marks) • Correct peak position within 2 deg : (0.3 marks) within 3 deg: 0.2 marks outside 3 deg: 0 mark • Appropriate scale of the graph (0.1 mark) • Correct labeling of axes with units (0.1 mark) No mark if any label/unit missing • Correct data plotting (0.2 marks) 	1.3

Data Set 1

$\theta/^\circ$	$\zeta/^\circ$	Output current S (mA)	Intensity $I=S^2$ (mA) ²
20.0	140.0	0.023	0.000529
21.0	138.0	0.038	0.001444
22.0	136.0	0.070	0.0049
23.0	134.0	0.109	0.011881
24.0	132.0	0.163	0.026569
25.0	130.0	0.201	0.040401
26.0	128.0	0.233	0.054289
27.0	126.0	0.275	0.075625
28.0	124.0	0.320	0.1024
29.0	122.0	0.350	0.1225
30.0	120.0	0.353	0.124609
31.0	118.0	0.358	0.128164
32.0	116.0	0.354	0.125316
33.0	114.0	0.342	0.116964
34.0	112.0	0.321	0.103041
35.0	110.0	0.303	0.091809
36.0	108.0	0.280	0.0784
37.0	106.0	0.241	0.058081
38.0	104.0	0.200	0.04
39.0	102.0	0.183	0.033489
40.0	100.0	0.162	0.026244
41.0	98.0	0.139	0.019321
42.0	96.0	0.120	0.0144
43.0	94.0	0.109	0.011881
44.0	92.0	0.086	0.007396
45.0	90.0	0.066	0.004356
46.0	88.0	0.067	0.004489
47.0	86.0	0.066	0.004356
48.0	84.0	0.070	0.0049
49.0	82.0	0.084	0.007056
50.0	80.0	0.080	0.0064

*Power = 4.36 X Current²



From the symmetry of the data, the peak position is determined @ $\theta_{max} = 31^\circ$
 (The theoretical value is $\theta_{max} = 32^\circ$)

2(d) Determination of a & error analysis		0.8 marks
• $a - \theta$ relation (expression)	(0.2 marks)	
• a value: <u>prior to error correction</u>	(0.4 marks)	

3.55 – 4.10 cm:	0.4 marks	
3.40 – 3.54 or 4.11 - 4.20:	0.2 marks	
Other values:	0 mark	
• Error estimate Δa		(0.2 marks)

From eq 3 and let $m = 1$,

$$2d \sin \theta_{\max} = \lambda \quad (4)$$

From Fig. 4.3,

$$a = \sqrt{2}d \quad (5)$$

Combine eqs (4) and (5), we obtain,

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{2} \sin \theta_{\max}} = \frac{2.85 \text{ cm}}{\sqrt{2} \sin 31^\circ} = 3.913 \text{ cm} \quad (\text{Actual value } a = 3.80 \text{ cm})$$

$$\text{The value 3.55 is derived from: } a = \frac{\lambda}{\sqrt{2} \sin \theta_{\max}} = \frac{2.83 \text{ cm}}{\sqrt{2} \sin 34^\circ} = 3.58 \text{ cm}$$

where 2.83 cm and 34 deg are the min and max allowed values for wavelength and peak position.

Similarly:

$$\text{The value 4.10 is derived from: } a = \frac{\lambda}{\sqrt{2} \sin \theta_{\max}} = \frac{2.87 \text{ cm}}{\sqrt{2} \sin 30^\circ} = 4.06 \text{ cm}$$

$$\text{The value 3.55 is derived from: } a = \frac{\lambda}{\sqrt{2} \sin \theta_{\max}} = \frac{2.83 \text{ cm}}{\sqrt{2} \sin 34^\circ} = 3.58 \text{ cm}$$

$$\text{The value 3.40 is derived from: } a = \frac{\lambda}{\sqrt{2} \sin \theta_{\max}} = \frac{2.83 \text{ cm}}{\sqrt{2} \sin 35^\circ} = 3.49 \text{ cm}$$

$$\text{The value 4.20 is derived from: } a = \frac{\lambda}{\sqrt{2} \sin \theta_{\max}} = \frac{2.87 \text{ cm}}{\sqrt{2} \sin 29^\circ} = 4.18 \text{ cm}$$

Error analysis:

Known uncertainties:

$$\Delta \lambda = 0.02 \text{ cm};$$

$\Delta\theta = 0.5 \text{ deg} = 0.014 \text{ rad}$. (uncertainty in determining θ from graph).

$$\text{From: } a = \frac{\lambda}{\sqrt{2} \sin \theta_{\max}}$$

$$\Delta a = \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{2} \sin \theta_{\max}} - \frac{\lambda}{\sqrt{2} (\sin \theta_{\max})^2} \frac{d}{d\theta} (\sin \theta_{\max}) \Delta\theta$$

$$= a \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} - \frac{1}{\sin \theta_{\max}} \frac{d}{d\theta} (\sin \theta_{\max}) \Delta\theta \right)$$

$$= a \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} - \cot \theta_{\max} \Delta\theta \right)$$

$$= 3.80 \left(\frac{0.02}{2.85} - \cot(32^\circ) \times (-0.014) \right) \text{cm}$$

$$= 0.112 \text{cm} \approx 0.1$$

Hence:

$a \pm \Delta a = 3.913 \pm 0.112$ $\approx 3.9 \pm 0.1 \text{ cm}$

国際物理オリンピック2007 イラン大会 実験問題

実験問題

半導体薄膜のエネルギーバンドギャップの決定

I. はじめに

半導体は導体と絶縁体の中間の電氣的性質をもつものとして特徴づけられる。半導体の電氣的性質を理解するために、よく知られている「光電効果」から始めよう。光電効果は量子的電子現象である。光電子(光を吸収して飛び出した電子)は照射光(光子)から十分なエネルギーを吸収することにより、物質から放出される。金属から光照射によって電子(光電子)が放出されるために必要な最小のエネルギーは「仕事関数」と呼ばれる。よって、特徴的なしきい値よりも高い振動数 ν の光子(すなわち、 h をプランク定数として、物質の仕事関数よりも大きいエネルギー $h\nu$ をもつ光子)だけが、光電子をたたき出すことができる。

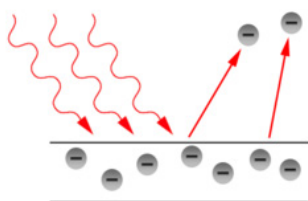


図 1. 金属板からの光電子放出の様子:

入射する光子は物質の仕事関数よりも大きなエネルギーをもたなければならない

実際に、光電効果における仕事関数の概念は、半導体物質のエネルギーバンドギャップの概念と似ている。固体物理学において、バンドギャップ E_g は、絶縁体と半導体の価電子バンドの最高部と伝導バンドの最低部との間のエネルギー差である。価電子バンドは電子によって満たされており、伝導バンドは空になっている。しかしながら、電子は、十分なエネルギー(少なくともバンドギャップのエネルギー)が与えられれば、価電子バンドから伝導バンドに遷移して伝導に寄与することができる。よって、半導体の電気伝導度はエネルギーバンドギャップに強く依存する。

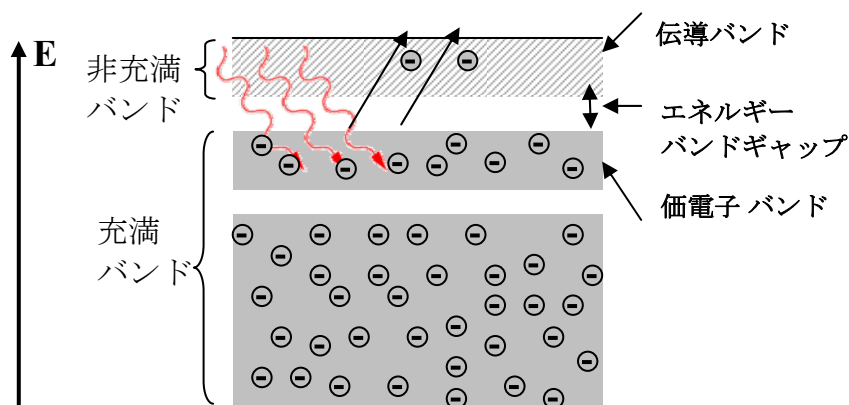


図 2. 半導体のエネルギーバンドの概念図

この実験では、光学的方法により、酸化鉄(Fe_2O_3)のナノ粒子鎖を含む半導体薄膜のエネルギーバンドギャップを求める。バンドギャップを測定するのに、薄膜の光吸収の性質を、その光透過スペクトルを用いて調べる。大まかにいえば、入射する光子のエネルギーがエネルギーバンドギャップと等しいところで、吸収スペクトルが鋭く増加する。

II. 実験準備

机の上に以下のものが置いてある。

1. ハロゲンランプと分光計をおおう大きな白い箱
2. 半導体薄膜試料, ガラス板, 試料ホルダー (sample-holder), 回折格子 (grating), 光抵抗器(photo-resistor)の入った小さな箱
3. デジタルマルチメータ(抵抗測定に使用する)
4. 電卓
5. 物差し(ruler)
6. 中心に穴があいている黄色い板
7. 白いシール

分光器には角度 5 分(1 度は 60 分)の精度をもつ角度計測装置がついている。ハロゲンランプは光源であり、分光器の固定アームに設置されている(詳細は、添付した「装置の説明」を参照)。

小さな箱には以下のものが入っている。

1. 二つの窓をもつ試料ホルダー: Fe_2O_3 薄膜がついたガラス板が一方の窓につけてあり、何もついてないガラス板がもう一方の窓にとりつけられている。
2. 支持台に光抵抗器がとりつけられており、光検出器として使用される。
3. 透明な回折格子 (600 本/mm)。

注意: 小さな箱の中のものすべては、表面に触れないように!

図3に、組み上がった装置の概念図を示す。

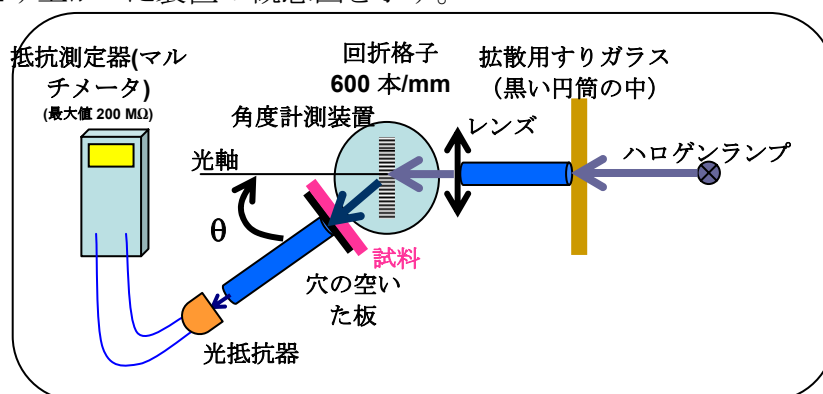


図 3. 装置の概念図

III. 方法

それぞれの波長での薄膜の透過率 $T_{film}(\lambda)$ を求めるために、以下の公式を用いる。

$$T_{film}(\lambda) = I_{film}(\lambda) / I_{glass}(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 I_{film} は酸化鉄薄膜をつけたガラス板からの透過光の強度であり、 I_{glass} は薄膜のついていないガラス板からの透過光の強度である。 I の値は光抵抗器を用いて測定できる。光抵抗器においては、入射光強度が大きくなると、電気抵抗が減少する。ここで、 I の値は以下の関係式で決まる。

$$I(\lambda) = C(\lambda)R^{-1} \quad (2)$$

ここで R は光抵抗器の電気抵抗値であり、 C は λ に依存する係数である。分光器についている透明な回折格子は波長の異なる光を異なる角度に回折する。したがって、 λ の関数として T の変化を調べるには、図4のように、光軸に対する光抵抗器の角度(θ')を変化させればよい。ここで、光軸は回折格子に入射する光線の方法として定義される。

回折格子の方程式

$$n\lambda = d[\sin(\theta' - \theta_0) + \sin \theta_0] \quad (3)$$

から、特定の λ に対応する角度 θ' を求めることができる。ただし、ここで n は回折の次数を表す整数である。 d は回折格子の格子間隔、 θ_0 は、回折格子の表面の法線ベクトルと光軸のなす角度である(図4参照)。(この実験では、回折格子を光軸と垂直において $\theta_0 = 0$ とすることを試みるが、これを完全な精度で行うことは不可能なので、この調整における誤差は課題 1-e で測定する)。

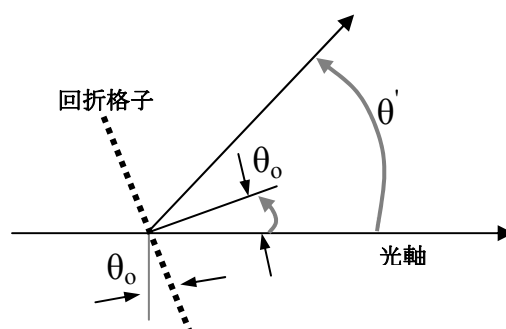


図 4. 式(3)で示される角度 θ' と θ_0 の定義

実験的には、バンドギャップエネルギーよりも僅かに大きな光子エネルギーについて以下の関係式が成り立つことが分かっている。

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^\eta \quad (4)$$

ここで、 α は薄膜の吸収係数であり、 A は薄膜の物質に依存する定数であり、 η は薄膜の吸収機構によって決まる定数である。透過率と α の値とは、以下のよく知られた関係式で結ばれている。

$$T_{film} = \exp(-\alpha t) \quad (5)$$

ここで、 t は薄膜の厚さである。

IV. 課題:

課題 0 装置と試料の箱(試料ホルダーが入っている小さな箱)にはそれぞれ番号がついている。台の左上に書いてある**装置番号**と試料が入っている小さな箱に書かれている**試料番号**を解答用紙に記入しなさい。

課題 1 調節と測定

1-a	● 角度計測器の精度($\Delta\theta$)を度単位で答えよ。	0.1 点
------------	---------------------------------------	--------------

注意: 角度の目盛を読み取るために、拡大鏡が必要な人は試験監督者に申し出てください。

第 1 段階

実験を始めるにあたって、ハロゲンランプを点灯し暖める。実験の間、ハロゲンランプは消灯しないほうがよい。実験の間にハロゲンランプは熱くなるので、手を触れないように気をつけること。

ハロゲンランプとレンズの間の長さ調節用アームを最長にして実験しなさい。そうすると、光線は平行となる。

これから光抵抗器を用いないで、角度計測器の大まかな零点調整を行う。回転アームの下にあるネジ 18 をゆるめて回転アームのロックを外し、回転アームと光軸を目測で一直線にする。次にネジ 18 をしめてから、副尺目盛りをゼロまで回転する。次に、ネジ 9 をしめて副尺をしっかりロックし、副尺微調整用のネジ(ネジ 10)を用いて、副尺目盛りのゼロを正確に定める。回折格子をホルダーにおく。回折格子がおよそ光軸と垂直になるまで、回折格子台を回転する。穴の開いた黄色い板を光源の出口におき、入射光線が回折格子にあたるようにする。回折格子を注意深く回転させて、反射光が穴に当たるようにする。反射光は弱いので、白い大きな箱を少しかぶせて暗くすると良い。そうすると、反射光線と入射光線が重なり、回折格子が光軸に垂直になる。そこで、ネジ 12 を締めて回折格子台を固定する。以上で、主尺と副尺のゼロが一致しており、固定アームと回転アームが一直線上になっている。

1-b	● 穴と回折格子の間の距離および穴の半径を測定することにより、この調整の角度精度($\Delta\theta_0$)を見積もれ。	0.3 点
	● 回転アームを回転させることにより、可視光(紫から赤への)の第一次回折光が観測される角度の範囲を求めよ。	0.2 点

第 2 段階:

回転アームの端に光抵抗器を設置せよ。光源がついている固定アームと回転アームがほぼ一直線状にする。その付近で回転アームをわずかに回して、光抵抗器が最小抵抗値を示す角度を探す。精度よい角度にするために、回転アームの精度調整ねじを用いよ。

1-c	● 最小抵抗値($R_{\min}^{(0)}$)を求めよ。	0.1 点
	● この調整によって、零点調整はさらに精度よくなっている。この	0.1 点

	調整による誤差 ($\Delta\phi_0$) を求めよ。この誤差とは回転アームをわずかに回転させても抵抗値が最小値を保つ角度の範囲である。	
--	---	--

- **ヒント:** この課題が終わったところで、副尺のネジは締めて固定されている。さらに、光抵抗器のネジも締めて固定する。実験の間、ネジを緩めないこと。

第3段階:

回転アームを動かして第一次回折光の領域にもっていく。光抵抗器の抵抗値が最小(光強度が最大)となる角度を求める。「装置の説明」の図4の13の「調整ネジ」を用いて、回折格子の傾きをわずかに変えて、さらに低い抵抗値を得ることができる。

1-c	• 観測された抵抗の最小値 ($R_{\min}^{(1)}$) を解答欄に記せ。	0.1点
------------	---	------

ここで、ゼロ点調整のために回折格子が光軸に対して垂直であることを再び確認することが必要である。 そのために、第一段階で行った「入射反射一致の方法(入射光と反射光が同じ方向になるように調節する方法)」を使いなさい。

- **重要:** これより先では、暗くして(装置にカバーを掛けて)実験を行う。

測定: 試料ホルダーをネジで回転アームの端にとり付ける。測定を始める前に、ガラス板と半導体薄膜の試料を確認する。つまり、赤みがかっている方が半導体薄膜試料であり、透明な方がガラス板である。ネジをゆるめることにより試料ホルダーを回転できる。一様に半導体で覆われた部分が回転アームの入射穴 S_1 を覆うように、試料ホルダーの回転角を調整して試料を S_1 の前に設置せよ。毎回試料の同じ部分を測定することを確かにするために、試料ホルダーと回転アームに白いシールを使って印をつけること。

1-d	• 半導体のついていないガラス板 (glass) と半導体薄膜試料 (film) のそれぞれに対して、回転アームの回転角度 θ を変えながら光抵抗器の抵抗値を測定せよ。 θ は、回転アームと光学軸との間の角度を角度計測器で読んだ値である。表 1d を完成させよ。第一段階の 1b で得られた角度範囲の中で少なくとも 20 個のデータ点で計測を行うこと。マルチメータでの抵抗測定は、適切なレンジを使え。	2.0点
	• マルチメータの最下位の桁の不確かさを抵抗の測定誤差とせよ。	1.0点

第4段階:

これまで得られた精度はまだ十分でない。なぜなら、回転アームと光軸を完全に直線に並べることは困難であり、また、回折格子を光軸とを完全に垂直にすることは不可能だからである。したがって、光軸をはさんで対称な角度で測定された値の差

(回折格子の面の法線と光軸との間の角度 θ_0 によって生じる非対称性)を求める必要がある。

この非対称性を測定するために、以下のような段階を追うことにする。

1-e	<ul style="list-style-type: none"> まず、$\theta = -20^\circ$ における T_{film} を R_{glass} と R_{film} を測定して求めよ。次に $+20^\circ$ 付近のいくつかの角度で T_{film} を求め、表 1e に記入すること(表 1d で得られた R_{glass} と R_{film} の値を使ってもよい)。 	0.6 点
	<ul style="list-style-type: none"> θ に対して T_{film} をプロットし、曲線を描きなさい。 	0.6 点

曲線上で、 T_{film} が $\theta = -20^\circ$ で測定した T_{film} と等しくなる角度 γ を求めよ。すなわち、 $\gamma \equiv \theta |_{T_{film} = T_{film}(-20^\circ)}$ がある。この角度と $+20^\circ$ との差を δ と表す。すなわち、

$$\delta = \gamma - 20^\circ \quad (6)$$

である。

1-e	<ul style="list-style-type: none"> 解答用紙の指定の欄に δ の値を記せ。 	0.2 点
-----	---	-------

よって、第一次回折光($n=1$)に対して、方程式(3)は、 δ は θ に比べて十分小さいので、

$$\lambda = d \sin(\theta - \delta/2), \quad (7)$$

となる。ここで、 θ は角度計測器の読みの角度である。

課題 2 計算

2-a	<ul style="list-style-type: none"> (7)式と角度測定の精度を考慮して、$\Delta\lambda$ を θ の関数として表せ。ただし、d は正確であり、d に対する誤差 Δd はゼロとしてよい。また、δ は θ に比べて十分小さいとしてよい。さらに、(1),(2),(5)式から、ΔT_{film} を、半導体薄膜とガラスに対する R と ΔR を用いて表せ。 	0.6 点
-----	---	-------

2-b	<ul style="list-style-type: none"> 1-b で求めた可視光の角度範囲に対応する $\Delta\lambda$ の値の範囲を求めよ。 	0.3 点
-----	---	-------

2-c	<ul style="list-style-type: none"> 課題 1 で測定された表 1d の抵抗値から、解答用紙の表 2c を各 θ について値を計算して表を完成させよ。その際、波長は(7)式を用いて計算せよ。 	2.4 点
2-d	<ul style="list-style-type: none"> 同じグラフ上に $1/R_{glass}$ と $1/R_{film}$ を波長の関数としてプロットせよ。(2)式によると、$1/R_{glass}$、$1/R_{film}$ は、それぞれ I_{glass}、I_{film} と同じ波長依存性をしめす。 	1.5 点
	<ul style="list-style-type: none"> いま描いたグラフのピークから R_{glass} と R_{film} が最小となる波長をそれぞれ表 2d に書け。 	0.4 点

2-e	<ul style="list-style-type: none"> 半導体薄膜試料に対して T_{film} を波長の関数としてプロットせよ。このグラフは、フィルムの透過率を波長の関数として表したものである。 	1.0 点
------------	---	-------

課題3 データ解析:

(4)式に $\eta=1/2$ と $A=0.071$ ((eV)^{1/2}/nm) を代入することによってエネルギーギャップ E_g と薄膜の厚さ t の値を eV と nm の単位で求めることができる。これらは、 $x-y$ 平面上で適当な図をプロットし、**グラフの延長線と軸との交点の座標を求め**、この式を適用する**(外挿する)**ことによって求められる。

3-a	<ul style="list-style-type: none"> $x=h\nu$, $y=(\alpha t h\nu)^2$ とおき、課題1での測定結果を用いて、表 3a を完成させよ。ただし、波長が 530 nm 付近およびそれより短波長 に対応する角度の範囲のデータを示せ。数値 (x と y) は、個々の測定データの誤差を考慮して、適切な有効数字桁数で示せ。 ここで、下の物理定数表を用いて、$h\nu$ は eV の単位で、波長は nm の単位で表せ。表の最上行の()内にはそれぞれの単位を忘れずに書け。 	2.4 点
------------	--	-------

3-b	<ul style="list-style-type: none"> y を x に対してプロットせよ。 	2.6 点
	<ul style="list-style-type: none"> パラメータ y は、フィルムの吸収に対応している。λ が 530 nm 付近より波長の短い範囲のデータ点を直線で近似せよ。 	
	<ul style="list-style-type: none"> (4)式が成り立つ領域を示すために、直線フィットできる x の範囲の最小値および最大値を読みとれ。 	

3-c	<ul style="list-style-type: none"> この直線の傾きを m とする。半導体薄膜の厚さ(t)とその誤差 (Δt)を、m と A (A に誤差はないとする)を用いて表せ。 	0.5 点
------------	--	-------

3-d	<ul style="list-style-type: none"> E_g と t, および、E_g と t の誤差 ΔE_g, Δt の値を、eV と nm の単位を用いてそれぞれ求め、表 3d を完成せよ。 	3.0 点
------------	---	-------

❖ 解析に際して必要となるいくつかの物理定数を下記に示す。

- 真空中の光速: $c=3.00 \times 10^8$ m/s
- プランク定数: $h=6.63 \times 10^{-34}$ J·s
- 電気素量: $e=1.60 \times 10^{-19}$ C

Solution (The Experimental Question):

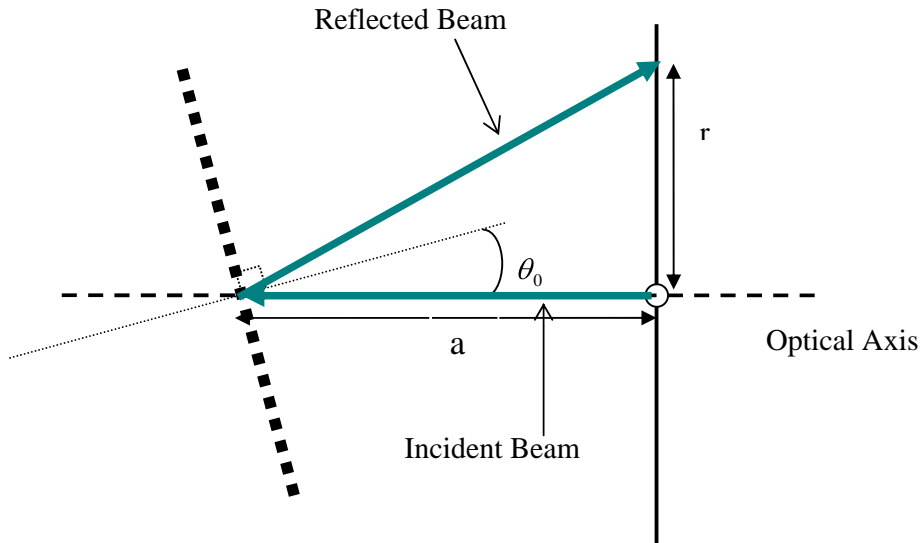
Task 1

1a.

$$\Delta\theta_{\text{nominal}} = 5' = 0.08^\circ$$

$\Delta\theta_{\text{nominal}}$ (degree)	0.08
--	------

1b.



If “a” is the distance between card and the grating and “r” is the distance between the hole and the light spot so we have

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2} + \dots$$

$$\tan(2\theta_0) = \frac{r}{a}, \text{ If } \theta_0 \ll 1 \Rightarrow \theta_0 = \frac{r}{2a} \Rightarrow \Delta\theta_0 = \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{2a}\right)^2 + \left(\frac{r \Delta a}{2a^2}\right)^2}$$

We want θ_0 to be zero i.e. $r = 0 \Rightarrow \Delta\theta_0 = \frac{\Delta r}{2a}$

$$\Delta r = 1\text{mm}, a = (70 \pm 1)\text{mm} \Rightarrow \theta_0 = \frac{\Delta r}{2a} \text{ rad} = 0.007 \text{ rad} = 0.4^\circ$$

$\Delta\theta_0$	0.4°
θ range of visible light (degree)	$13^\circ \leq \theta \leq 26^\circ$

1c.

$R_{\min}^{(0)}$	$(21.6 \pm 0.1) \text{ k}\Omega$
$\Delta\varphi_0$	$5' = 0.08^\circ$
$R_{\min}^{(1)}$	$R = (192 \pm 1) \text{ k}\Omega$

 $\Delta\varphi_0 = 5'$ because

$$\theta = 5' \Rightarrow R = (21.9 \pm 0.1) \text{ k}\Omega$$

$$\theta = -5' \Rightarrow R = (21.9 \pm 0.1) \text{ k}\Omega$$

1d.

Table 1d. The measured parameters

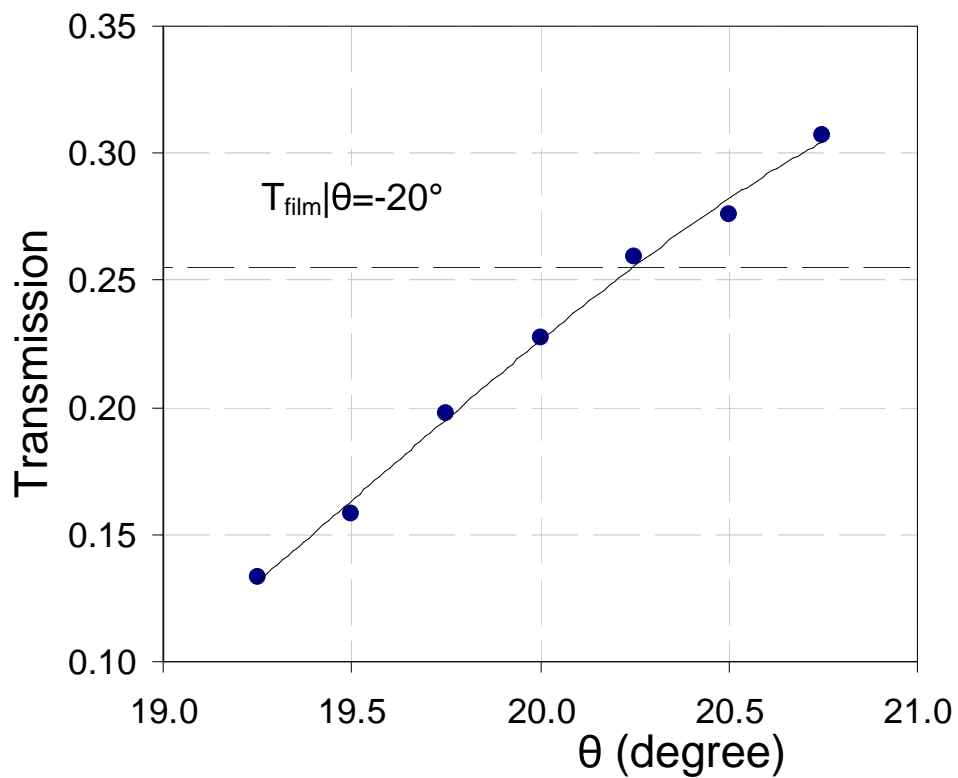
θ (degree)	$R_{\text{glass}}(\text{M}\Omega)$	$\Delta R_{\text{glass}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{film}}(\text{M}\Omega)$	$\Delta R_{\text{film}}(\text{M}\Omega)$
15.00	3.77	0.03	183	3
15.50	2.58	0.02	132	2
16.00	1.88	0.01	87	1
16.50	1.19	0.01	51.5	0.5
17.00	0.89	0.01	33.4	0.3
17.50	0.68	0.01	19.4	0.1
18.00	0.486	0.005	10.4	0.1
18.50	0.365	0.005	5.40	0.03
19.00	0.274	0.003	2.66	0.02
19.50	0.225	0.002	1.42	0.01
20.00	0.200	0.002	0.880	0.005
20.50	0.227	0.002	0.822	0.005
21.00	0.368	0.003	1.123	0.007
21.50	0.600	0.005	1.61	0.01
22.00	0.775	0.005	1.85	0.01
22.50	0.83	0.01	1.87	0.01
23.00	0.88	0.01	1.93	0.02
23.50	1.01	0.01	2.14	0.02
24.00	1.21	0.01	2.58	0.02
24.50	1.54	0.01	3.27	0.02
25.00	1.91	0.01	4.13	0.02
16.25	1.38	0.01	66.5	0.5
16.75	1.00	0.01	40.0	0.3
17.25	0.72	0.01	23.4	0.2
17.75	0.535	0.005	12.8	0.1
18.25	0.391	0.003	6.83	0.05
18.75	0.293	0.003	3.46	0.02
19.25	0.235	0.003	1.76	0.01
19.75	0.195	0.002	0.988	0.005
20.25	0.201	0.002	0.776	0.005
20.75	0.273	0.003	0.89	0.01

1e.

In $\theta = -20^\circ \Rightarrow R_{\text{glass}} = (132 \pm 2) \text{ k}\Omega$, $R_{\text{film}} = (518 \pm 5) \text{ k}\Omega$

θ	T_{film}	θ	T_{film}
$\theta = -20^\circ$	0.255	19.25	0.134
		19.50	0.158
		19.75	0.197
		20.00	0.227
		20.25	0.259
		20.50	0.276
		20.75	0.307

Graphics



We see that: $T(\theta = 20.25^\circ) = T(\theta = -20^\circ)$

δ (degree)	0.25 ± 0.08
-------------------	-----------------

Task 2.

2a.

$$\lambda = d \sin\left(\theta - \frac{\delta}{2}\right) \Rightarrow \Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \cot^2\left(\theta - \frac{\delta}{2}\right)\left(\Delta\theta^2 + \frac{\Delta\delta^2}{4}\right)} \approx d \cos(\theta) \left(\frac{0.1\pi}{180}\right)$$

where $\Delta\theta = \Delta\delta = 5' = 0.08$ degree

$$\text{and } d = \frac{1}{600} \text{ mm}$$

$$\Delta\lambda = 2.9 \cos(\theta) \text{ (nm)}$$

$$T_{film} = \frac{R_{glass}}{R_{film}} \Rightarrow \Delta T = T_{film} \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{film}}{R_{film}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{glass}}{R_{glass}}\right)^2}$$

$$\Delta T = \frac{R_{glass}}{R_{film}} \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{film}}{R_{film}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{glass}}{R_{glass}}\right)^2}$$

2b.

$$13 \leq \theta \leq 26$$

$$2.6 \leq \Delta\lambda \leq 2.8 \text{ nm}$$

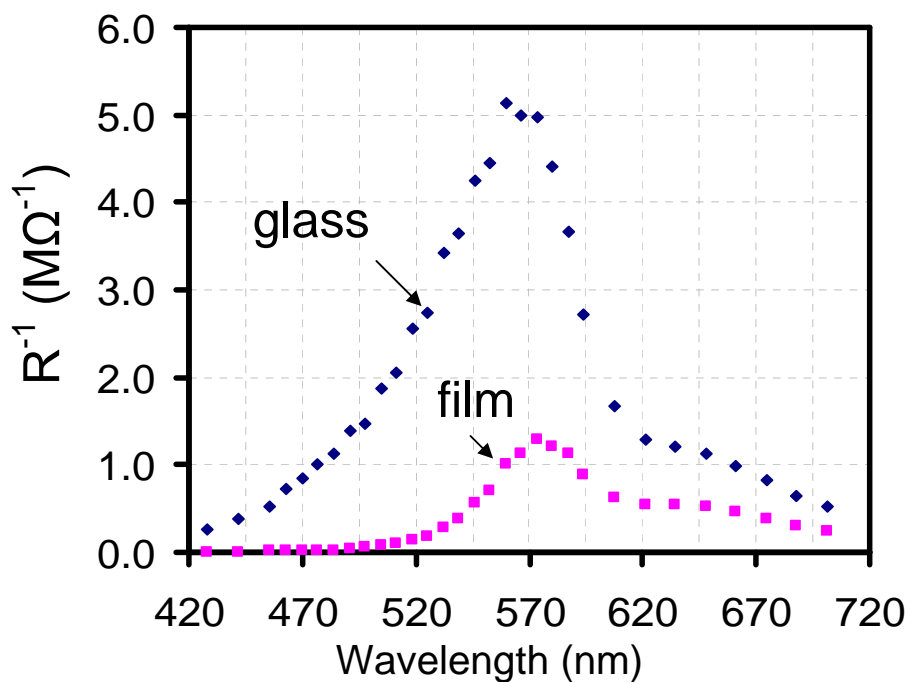
2c.

Table 2c. The calculated parameters using the measured parameters

θ (degree)	λ (nm)	$I_g/C(\lambda)$ ($M\Omega^{-1}$)	$I_s/C(\lambda)$ ($M\Omega^{-1}$)	T_{film}	αt
15.0	428	0.265	0.00546	0.0206	3.88
15.5	442	0.388	0.00758	0.0195	3.94
16.0	456	0.532	0.0115	0.0216	3.83
16.25	463	0.725	0.0150	0.0208	3.88
16.5	470	0.840	0.0194	0.0231	3.77
16.75	477	1.00	0.0250	0.0250	3.69
17.0	484	1.12	0.0299	0.0266	3.63
17.25	491	1.39	0.0427	0.0308	3.48
17.5	498	1.47	0.0515	0.0351	3.35
17.75	505	1.87	0.0781	0.0418	3.17
18.0	512	2.06	0.096	0.0467	3.06
18.25	518	2.56	0.146	0.0572	2.86
18.5	525	2.74	0.185	0.0676	2.69
18.75	532	3.41	0.289	0.0847	2.47
19.0	539	3.65	0.376	0.103	2.27
19.25	546	4.26	0.568	0.134	2.01
19.5	553	4.44	0.704	0.158	1.84
19.75	560	5.13	1.01	0.197	1.62
20.0	567	5.00	1.14	0.227	1.48
20.25	573	4.98	1.29	0.259	1.35
20.5	580	4.41	1.22	0.276	1.29
20.75	587	3.66	1.12	0.307	1.18
21.0	594	2.72	0.890	0.328	1.12
21.5	607	1.67	0.621	0.373	0.99
22.0	621	1.29	0.541	0.419	0.87
22.5	634	1.20	0.535	0.444	0.81
23.0	648	1.14	0.518	0.456	0.79
23.5	661	0.99	0.467	0.472	0.75
24.0	675	0.826	0.388	0.469	0.76
24.5	688	0.649	0.306	0.471	0.75
25.0	701	0.524	0.242	0.462	0.77

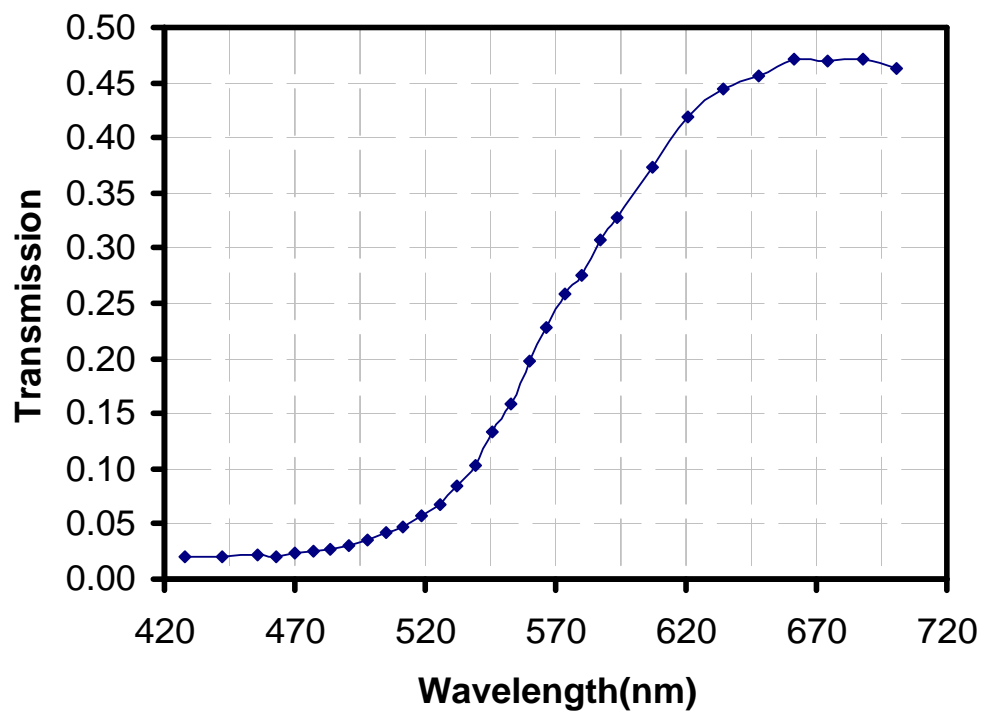
2d.

Graphics



$\lambda_{\max}(I_{\text{glass}})$	564 ± 5 (nm)
$\lambda_{\max}(I_{\text{film}})$	573 ± 5 (nm)

2e. Graphics



Task 3.

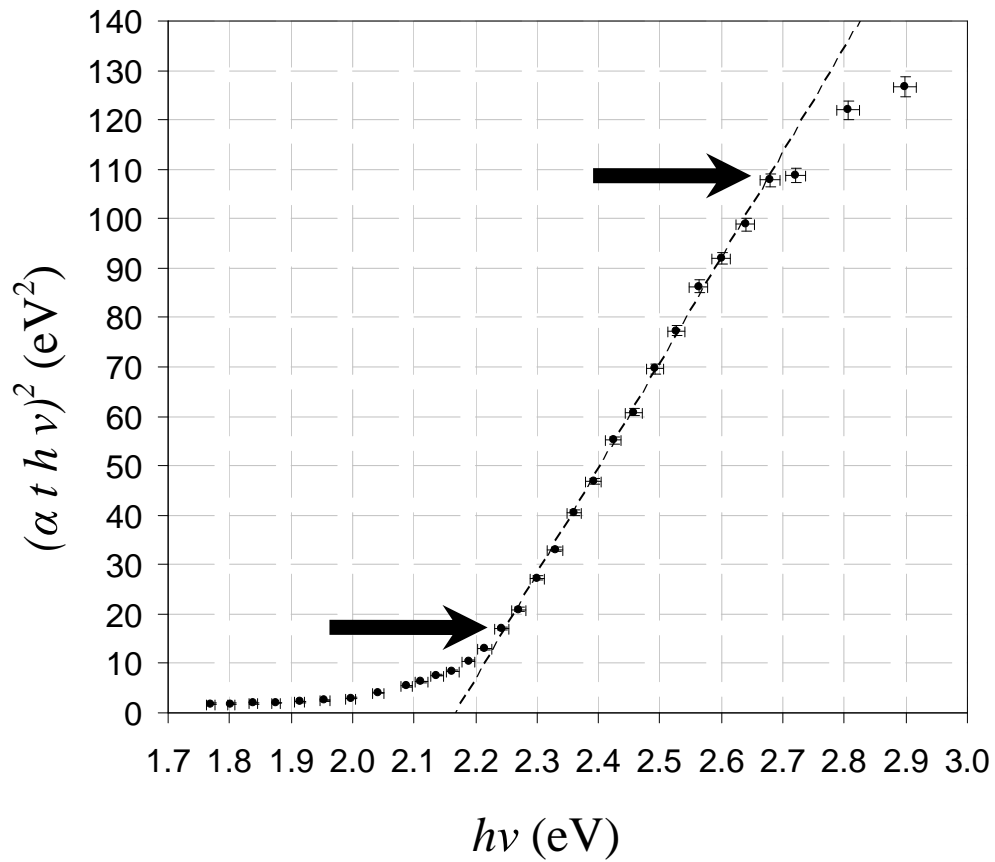
3a.

Table 3a. The calculated parameters for each measured data point

θ (degree)	x (eV)	y (eV ²)
15.00	2.898	126.6
15.50	2.806	121.9
16.00	2.720	108.8
16.25	2.679	107.8
16.50	2.639	98.9
16.75	2.600	92.0
17.00	2.563	86.3
17.25	2.527	77.4
17.50	2.491	69.7
17.75	2.457	60.9
18.00	2.424	55.1
18.25	2.392	46.8
18.50	2.360	40.4
18.75	2.330	33.1
19.00	2.300	27.3
19.25	2.271	20.91
19.50	2.243	17.07
19.75	2.215	12.92
20.00	2.188	10.51
20.25	2.162	8.53
20.50	2.137	7.56
20.75	2.112	6.23
21.00	2.088	5.43
21.50	2.041	4.06
22.00	1.997	3.02
22.50	1.954	2.52
23.00	1.914	2.26
23.50	1.875	1.98
24.00	1.838	1.94
24.50	1.803	1.84
25.00	1.769	1.86

3b.

Graphics



$$x_{\min} = 2.24(\text{eV})$$

$$x_{\max} = 2.68(\text{eV})$$

3c.

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow (\alpha t h\nu)^2 = (At)^2(h\nu - E_g)$$

$$\Rightarrow y = (At)^2(x - E_g) \Rightarrow m = (At)^2 \Rightarrow t = \frac{\sqrt{m}}{A}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta t}{t} = \frac{\Delta m}{2m}$$

$$t = \frac{\sqrt{m}}{A}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta m}{2A\sqrt{m}}$$

In linear range we have, $m=213$ (eV), $r^2=0.9986$, $E_g=2.17$ (eV)
and we have $A = 0.071$ (eV^{1/2}/nm) so we find $t= 206$ (nm)

$$\Delta m = \sqrt{\frac{(\delta y)^2 + \frac{m^2}{R^2}(\delta x)^2}{\sum_i x_i^2 - N\bar{x}^2}} \approx \sqrt{\frac{(\delta y)^2 + (m \delta x)^2}{\sum_i x_i^2 - N\bar{x}^2}} = \sqrt{\frac{(\delta \cdot xy)^2}{\sum_i x_i^2 - N\bar{x}^2}}, (\delta \cdot xy)^2 = (\delta y)^2 + (m \delta x)^2$$

where δx & δy are the mean of error range of x & y

$$\delta x \approx \sqrt{\frac{\sum_i \delta x_i^2}{N}} \quad \& \quad \delta y = \sqrt{\frac{\sum_i \delta y_i^2}{N}} \quad \text{So} \quad \delta x \approx 0.014 \text{ (eV)}, \quad \delta y \approx 0.9 \text{ (eV)}^2$$

$$\rightarrow \Delta m \approx 10 \text{ (eV)} \rightarrow \Delta t = t \times \Delta m / (2 m) \approx 5 \text{ (nm)}$$

$$\Delta E_g = \frac{1}{m} \sqrt{\left(\left(\frac{m^2 \delta x^2 + \delta y^2}{N} \right) + \left(\frac{\bar{y}}{m} \right)^2 \Delta m^2 \right)} = \frac{1}{m} \sqrt{\left(\left(\frac{\delta xy^2}{N} \right) + \left(\frac{\bar{y}}{m} \right)^2 \Delta m^2 \right)}$$

$$\Delta E_g \approx 0.02 \text{ (eV)}$$

Table 3d. The calculated values of E_g and t using Fig. 3

E_g (eV)	ΔE_g (eV)	t (nm)	Δt (nm)
2.17	0.02	206	5



差分温度測定法(示差熱法)

この問題では、差分温度測定法(示差熱法)を用いて以下の2つの課題を行う:

1. 結晶性固体の凝固点の温度を求める。
2. 太陽電池の発電効率を決める。

A. 差分温度測定法(示差熱法)

この実験では、温度測定のセンサーとして、シリコンダイオードを使う。ダイオードに流れる電流が一定ならば、ダイオードの両端の電圧の温度依存性は次のようになる。

$$V(T) = V(T_0) - \alpha(T - T_0) \tag{1}$$

ここで、室温 T_0 [°C] での電圧降下を $V(T_0)$ 、温度 T [°C] での電圧降下を $V(T)$ とした。係数 α は、

$$\alpha = 2.00 \pm 0.03 \text{ mV/}^\circ\text{C} \tag{2}$$

である。この $V(T_0)$ の値はダイオードによって多少異なる。

2つのダイオードを異なる温度のところにおけば、温度差は2つのダイオードの電圧の差から測定することができる。この電圧の差を「示差電圧」と呼び、これは高い感度で測定できる。よって、両者の温度差も高い感度で測定することができる。この方法を「差分温度測定法(示差熱法)」という。この実験の回路を図1に示す。回路にある D_1 と D_2 はダイオード、 R_1 と R_2 は $10 \text{ k}\Omega$ の抵抗、電池の電圧は 9V である。

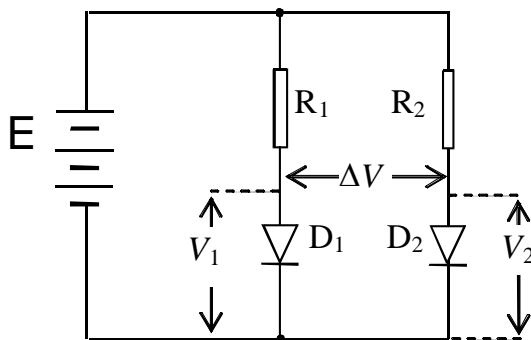


図1 ダイオード・センサーの回路

ダイオード D_1 の温度を T_1 、ダイオード D_2 の温度を T_2 とすれば、(1) 式によって、

$$V_1(T_1) = V_1(T_0) - \alpha(T_1 - T_0)$$

および

$$V_2(T_2) = V_2(T_0) - \alpha(T_2 - T_0)$$

が得られる。これにより、示差電圧は、

Experimental Problem

$$\Delta V = V_2(T_2) - V_1(T_1) = V_2(T_0) - V_1(T_0) - \alpha(T_2 - T_1) = \Delta V(T_0) - \alpha(T_2 - T_1)$$

$$\Delta V = \Delta V(T_0) - \alpha \Delta T \quad (3)$$

となる。ここで、 $\Delta T = T_2 - T_1$ とした。示差電圧 ΔV を測定することにより、温度差が求められる。

ダイオードに電圧をかけるために、図 2 に示す仕組みの回路ボックスを用いる。

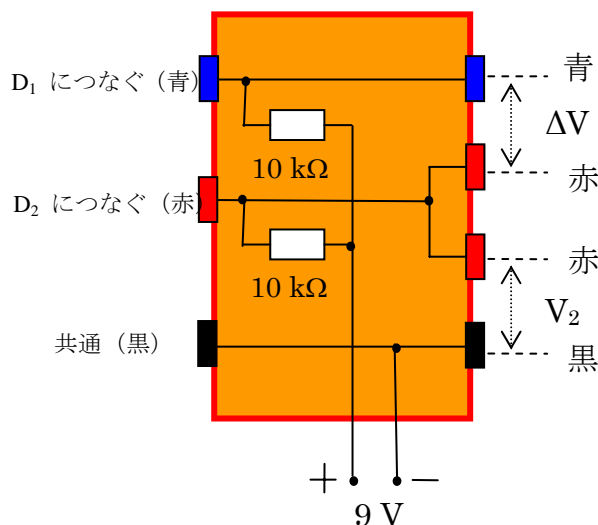


図 2. 回路ボックス (図 10 の部品 5) の概念図 (上から見た場合)

この回路ボックスは、それぞれのダイオードに直列に接続する抵抗値 $10 \text{ k}\Omega$ の 2 つの抵抗、 9 V の電池、 D_1 と D_2 のダイオードにつなげるための端子、ダイオード D_2 の電圧 V_2 と示差電圧 ΔV を測定するマルチメーターにつなげる端子からなる。

B. 課題 1: 結晶物質の凝固点の温度をを定める

1. 実験の目的

結晶物質の固体を加熱して溶かした後、冷却すると、ある決まった温度 T_s で固化する。この温度を凝固点 (固化点) とよぶ (あるいは逆過程から見ると融点といってもよい)。凝固点 T_s を決める通常の方法は、冷却過程において温度の時間変化を測定する。相転移に伴い潜熱を放出するので、固化の途中では、物質の温度は変化しない。物質の量が十分多いと、温度が一定である時間はそれだけ長くなるので、凝固点を決めるのが容易となる。しかし、物質の量が少ないと、その時間は短くなるので、 T_s を求めることが難しくなる。

示差熱法は、少量物質の場合に、凝固点 T_s を求めるのに用いられる。原理は次の通

Experimental Problem

りである。2つの同一の皿を用意して、一方の皿に測定したい少量の物質を置き、それを「試料皿」といい、もう一方を「基準皿」という（基準皿には試料物質を置いてはいけない）。2つの皿を熱源の上に置き、熱源の温度をゆっくりと変える。熱源と2つの皿の間の熱伝導は同じとみなせる。2つの皿には温度センサー（ダイオード）がついている。試料物質に相転移が起こらなければ、試料皿の温度 T_{samp} と基準皿の温度 T_{ref} はほぼ同じように変化する。このため T_{samp} が変化しても、 $\Delta T = T_{\text{ref}} - T_{\text{samp}}$ はわずかしか変化しない。試料物質に相転移が起こると、相転移が起こっている間 T_{samp} は変化しないので、 T_s と等しい温度を維持するが、 T_{ref} はそのまま変化し続けるので、 ΔT が大きく変化する。つまり、 T_{samp} に対して ΔT をプロットすると、急激に変化する。この ΔT の急激な変化に対応する T_{samp} が、まさに T_s である。

この実験の目的は、示差熱法と通常の方法とによって、純度の高い結晶物質の凝固点 T_s (50°C から 70°C の間にある) を求めることである。この実験で用いる試料物質の量は約 20 mg である。

2. 装置と部品

1. 熱源は 20 W のハロゲン・ランプである。
2. 皿の支持台はベークライトの板で、図 3 に示すように、その板にあいている穴に金属板がはめ込んである。金属板に 2 つの小さな磁石が付けてある。
3. シリコンダイオードが付いている 2 つの小さな円形の金属皿が、基準皿と試料皿である。これら 2 つの皿はそれぞれ磁石の上にある。これらの磁石が、磁力で皿と金属板をくっつけている。また、これらの磁石を通して、金属板と皿の間で熱が伝導する。灰色のプラスチック箱 (図 10 の部品 15) によって、皿が外界からの影響を受けないようにしてある。

図 3 に、支持台、金属板、磁石ならびに ハロゲン・ランプの配置を示した。

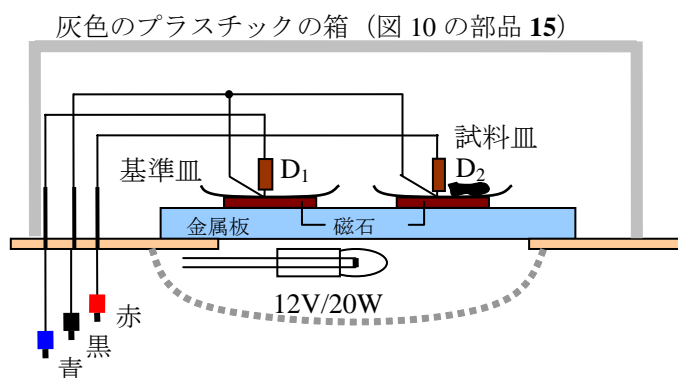


図 3. 凝固点を測定するための装置

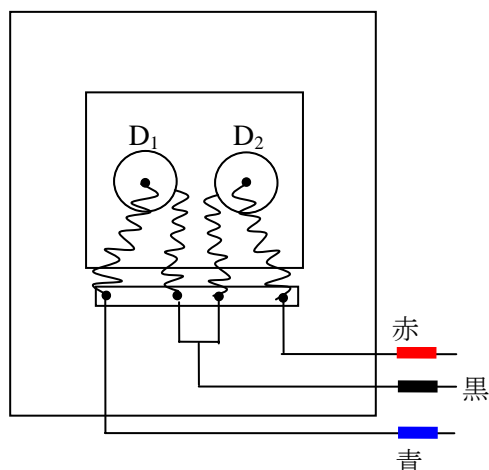


図 4. 皿の支持台を上から見た図

4. 電圧計として 2 つのマルチメーターを用いる。このマルチメーターは室温測定にも使われる。その場合は、端子には何も接続せず機能選択ダイヤル (Function selector) を「°C/°F」にあわせる。このマルチメーターの電圧測定に限って、誤差は、最小桁の数値に関して ± 2 である。それ以外の測定では、最小桁の読み取り誤差とする。

注: マルチメーター (図 9) の「自動的に電源が切れる (オートパワーオフ)」機能がはたらくのを防ぐ場合は、Select ボタンを押しながら、機能選択ダイヤル (Function selector) を OFF ポジションから必要なポジションに切り替える。

5. 図 2 に示す回路箱
6. 9 V の電池
7. 導線
8. 試料の入っている約 20 mg の試験管
9. ストップウォッチ
10. 電卓
11. グラフ用紙

3. 実験

1. 2 つの磁石は金属板上の対称な位置にあり、図 4 のように基準皿と空の試験皿が磁石の上においてある。左の皿は基準皿として用いるもので、ダイオード D_1 とつながっている (D_1 は「基準ダイオード」と呼ぶ)。右の皿は試験皿であり、ダイオード D_2 とつながっている (D_2 は「測定ダイオード」と呼ぶ)。

ランプのスイッチをオフ (OFF) にしたまま、図 5 のようにハロゲン・ランプのアームを伸ばして逆に倒してランプを上に向け、皿の支持台をランプの上におく。配線して、

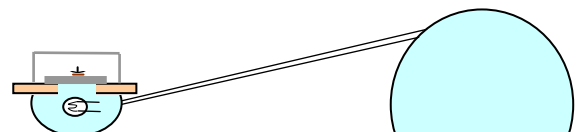


図 5 熱源として用いるハロゲン・ランプ
(図 10 の部品 1)

Experimental Problem

ダイオード D_2 の電圧 $V_{\text{samp}} = V_2$ と示差電圧 ΔV を測定できるようにする。

マルチメーターなどの作動が安定するためには、一定の時間が必要である。だから、測定を始める 5 分前には回路を接続してマルチメーターをオン(ON)にして電流を流して置くこと。

- 1.1. マルチメーターの温度測定機能を用いて、室温 T_0 を測りなさい。次に、試料皿に付いているダイオード D_2 の室温 T_0 での電圧 $V_{\text{samp}}(T_0)$ を測定しなさい。
 - 1.2. 上の測定値とダイオードの特性を表す式から、温度 50°C , 70°C , 80°C における測定ダイオード D_2 の電圧 $V_{\text{samp}}(50^\circ\text{C})$, $V_{\text{samp}}(70^\circ\text{C})$, $V_{\text{samp}}(80^\circ\text{C})$ の値を計算しなさい。
 2. 両方の皿にはまだ何も置かずに、ハロゲン・ランプのスイッチをオン(ON)にする。 V_{samp} を測定する。試料皿の温度が $T_{\text{samp}} \sim 80^\circ\text{C}$ に到達したら、ハロゲン・ランプをオフ(OFF)にする。
 - 2.1. $T_{\text{samp}} \sim 70^\circ\text{C}$ に下がるまで待ってから、 V_{samp} と ΔV の時間変化を測定しなさい。この間に金属板も冷却している。10 秒(s) から 20 秒(s) の間の一定時間間隔で、 V_{samp} と ΔV の値を測定し続け、解答用紙の表に記録しなさい。試料皿の温度が下がり、 $T_{\text{samp}} \sim 50^\circ\text{C}$ になったら、測定を止めなさい。ただし、 ΔV は正の場合も負の場合もある。
 - 2.2. 配布されたグラフ用紙に、横軸を t [s], 縦軸を V_{samp} [mV] としてグラフを描きなさい。グラフ用紙の右上に「グラフ 1」と書きなさい。
 - 2.3. 配布されたグラフ用紙に、横軸を V_{samp} [mV], 縦軸を ΔV [mV] としてグラフを描きなさい。グラフ用紙の右上に「グラフ 2」と書きなさい。
 3. 試験管から試料物質を試料皿に移す。上の 2. で述べた測定を同様に行う。
 - 3.1. 解答用紙の表に、時間 t に対して V_{samp} と ΔV のデータを記しなさい。 ΔV が急速に変化する場合は、測定する時間間隔を狭めなさい。
 - 3.2. このデータを用いて、配布されたグラフ用紙に、横軸に時間 t [s], 縦軸に V_{samp} [mV] としてグラフを描きなさい。グラフ用紙の右上に「グラフ 3」と書きなさい。
 - 3.3. 配布されたグラフ用紙に、横軸に V_{samp} [mV], 縦軸に ΔV [mV] としてグラフを描きなさい。グラフ用紙の右上に「グラフ 4」と書きなさい。
- 注意: それぞれのグラフ用紙にグラフの番号を忘れずに書くこと。

Experimental Problem

4. 上の 2. と 3. のグラフを比較することにより、試料物質の凝固点の温度を求める。
- 4.1. 通常の方法で T_s を求める。上の 3. と 2. における $t - V_{\text{samp}}$ グラフ (すなわち、グラフ 3 とグラフ 1) を比較することにより、試料物質の凝固点をグラフ 3 に記入し、凝固点に対応する V_{samp} の値 (V_s) を求め、グラフからその誤差も求めなさい。これから、この試料物質の凝固点の温度 T_s を求め、その誤差をグラフから評価しなさい。
- 4.2. 次に、示差熱法を用いて T_s を求める。上の 3. と 2. における $V_{\text{samp}} - \Delta V$ グラフ (すなわち、グラフ 4 とグラフ 2) を比較することにより、試料物質が凝固し始めた点をグラフ 4 に記入し、この凝固点に対する V_{samp} の値 (V_s) を求め、グラフからその誤差も求めなさい。これから、この試料物質の凝固点の温度 T_s を求めなさい。
- 4.3. 測定データの誤差と装置の測定精度から、示差熱法によって得られた T_s の誤差を計算しなさい。誤差計算の過程を解答用紙に書き、最後に T_s の値と誤差の値を解答用紙に記入しなさい。

C. 課題 2: ハロゲン・ランプの照明の下で太陽電池の発電効率を決定する

1. 実験の目的

実験の目的は、ハロゲン・ランプの照明の下で太陽電池の発電効率を決定することである。発電効率とは、太陽電池が外部回路に供給することができる電力を、太陽電池が受け取る光量(単位時間当たりの光のエネルギー)で割った値として定義される。この効率は、入射する光線のスペクトルに依存する。この実験では、白熱したハロゲン・ランプから放射された白色光を、太陽電池に照射する。太陽電池の効率を決定するために、太陽電池の発電効率が最大値 P_{\max} のとき、ランプの真下に距離 d だけ離れた位置における光の強度 E を測定する必要がある。この実験では、 $d = 12 \text{ cm}$ とする(図 6)。光の強度 E は次によって定義される:

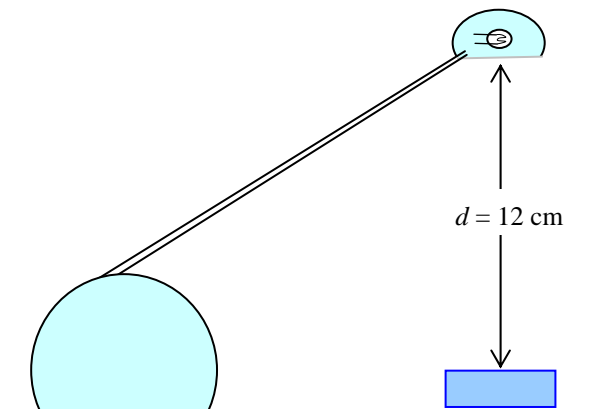


図 6 光源にはハロゲン・ランプを使用する。

$$E = \Phi / S$$

ここで、 Φ は光量(単位時間当たりの光のエネルギー)、 S は光が照射された部分(検出器または太陽電池)の面積であり、後で測定する。

2. 装置と部品

1. 光源となる 20W のハロゲン・ランプ
2. 輻射検出器

輻射検出器(図 7)は銅で作られた中空の円錐であり、その内部表面は煤によって黒くなっている。

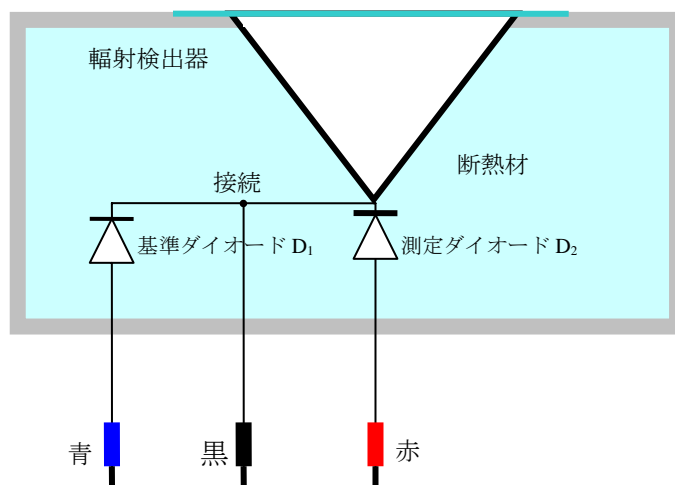


図 7. 輻射検出器 (図 10 の部品 11)

Experimental Problem

円錐とその外側との断熱は不完全である。この実験において、検出器は理想的な黒体と考える。すなわち、検出器は光をすべて熱に変換すると考える。温度を測定するためにシリコンダイオードを使っている。測定ダイオード(図 1 と図 7 における D_2)は検出器に固定されており、検出器と同じ温度になっている。基準ダイオードは検出器を収容している箱の内壁に置かれ、その温度は外気の温度と等しい。検出器の全熱容量(円錐と測定ダイオードの熱容量の和)は $C = (0.69 \pm 0.02) \text{ J/K}$ である。検出器は、その入り口が非常に薄いポリエチレンフィルムによって覆われており、そのフィルムによる光の吸収は無視できるとする。

3. 図 2 に示す回路ボックス
4. プラスチックの箱に取り付けられた太陽電池(図 8)

太陽電池は、いくつかの銀色の筋状の金属部分を含む。太陽電池の発電効率を計算するときには、これらの部分も太陽電池の一部として面積を計算に含める。

5. 2 つのデジタル・マルチメーター
電圧測定に使う時には、その内部抵抗は非常に大きい(それは無限大と考えることができる)。また、電流測定に使う時には、内部抵抗は小さいが無視できない。マルチメーターは、機能選択ダイヤル

(Function selector)をまわして、室温を直接測定することもできる。電圧測定に限り、誤差は、最小桁の数値に関して ± 2 である。それ以外の測定では、最小桁の読み取り誤差とする。

注:マルチメーター(図 9)の「自動的に電源が切れる(オートパワーオフ)」機能がはたらくのを防ぐ場合は、Select ボタンを押しながら、機能選択ダイヤル(Function selector)を OFF ポジションから必要なポジションに切り替える。

6. 9V の電池
7. 可変抵抗器
8. ストップウォッチ
9. 最小目盛 1 mm の定規
10. 導線
11. グラフ用紙

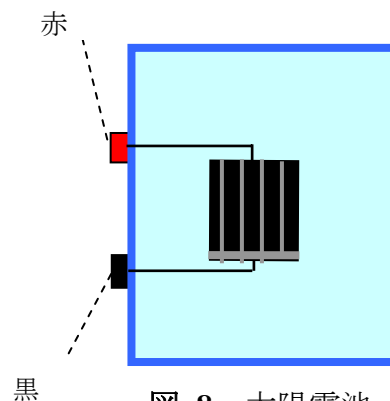


図 8 太陽電池
(図 10 の部品 12)

Experimental Problem

3. 実験

検出器が光からエネルギーを受けると、熱くなる。同時に、検出器は様々なメカニズムで熱を失う。例えば、熱伝導、対流、放射などである。よって、検出器が微小時間 dt に受け取る光のエネルギーは、検出器の温度を上昇させるのに必要なエネルギーと検出器から周囲に逃げるエネルギー（エネルギー損失量）の和である。

$$\Phi dt = CdT + dQ$$

ここで、 C は検出器とダイオードの熱容量であり、 dT は温度上昇、 dQ はエネルギー損失量である。

検出器と周囲との温度差 $\Delta T = T - T_0$ が小さければ、時間 dt の間に検出器から周囲に逃げるエネルギー dQ は近似的に ΔT と dt に比例し、 $dQ = k\Delta T dt$ となる。ここで、 k は W/K の単位をもつ係数である。よって、 k が一定で、 ΔT が小さいときは、

$$\Phi dt = CdT + k\Delta T dt = Cd(\Delta T) + k\Delta T dt$$

すなわち、

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} + \frac{k}{C} \Delta T = \frac{\Phi}{C} \quad (4)$$

が得られる。この微分方程式の解によって一定の光量の光を受け取り始めた瞬間からの温度差 ΔT が、時間 t の関数として決まる。 $t=0$ のとき、 $\Delta T = 0$ とすると、

$$\Delta T(t) = \frac{\Phi}{k} \left(1 - e^{-\frac{k}{C}t} \right) \quad (5)$$

光を当てるのを止めれば、上に述べた微分方程式は、

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} + \frac{k}{C} \Delta T = 0 \quad (6)$$

となり、温度差 ΔT は次の式にしたがって変化する。

$$\Delta T(t) = \Delta T(0) e^{-\frac{k}{C}t} \quad (7)$$

ここで $\Delta T(0)$ は時刻 $t=0$ （測定が始める時刻）における温度差である。

1. マルチメーターの温度測定機能を用いて、室温 T_0 を測定しなさい。
2. 検出器の温度を測定するために、ダイオード・センサー、回路ボックス、マルチメーターからなる電気回路を組み立てなさい。
装置の作動が安定するまでに生じる誤差を防ぐために、実際に実験を始める

Experimental Problem

5分前には、回路をすべてオン(ON)にして電流を流しておくこと。

- 2.1. 図6のように、検出器をハロゲン・ランプの下に距離 $d = 12 \text{ cm}$ のところに置きなさい。ランプを OFF にして、約2分間 10 s 間隔で ΔV の変化を測定し、それから方程式(3)の $\Delta V(T_0)$ の平均値および誤差を求めなさい。
- 2.2. ハロゲン・ランプを ON にして、検出器を照らす。 ΔV の変化を測定しなさい。10~15 s の間の適切な一定時間間隔ごとに ΔV の値を記録しなさい(注意: 解答用紙の表のうち、 x と y の欄は、下記の4. で使用する)。2分後、ハロゲン・ランプを OFF にして、冷めないうちに、すぐに 次の測定に移りなさい。
- 2.3. 検出器をハロゲン・ランプから離しなさい。それ以降、冷却中の約2分間 ΔV の変化を測定しなさい。10~15 s の間の適切な一定時間間隔ごとに ΔV の値を記録しなさい。(注意: 解答用紙の表のうち、 x と y の欄は、下記の3. で使用する)

問2のヒント:

熱慣性とよばれる性質のために、検出器に光が照射されはじめた直後と照射をやめた直後の数点は使用しないこと。

3. ハロゲン・ランプのスイッチを切った後、方程式(7)が成り立つことを利用して、横軸を x 、縦軸を y として、グラフが直線になるように x 軸と y 軸に適当な変数を選んでグラフを描く。
 - 3.1. 変数 x と y として適切な表式を書きなさい。
 - 3.2. 2.3 の解答用紙の表に x と y の数値を記入し、 y を縦軸、 x を横軸として、グラフを描きなさい。そのグラフの右上に「グラフ5」と書きなさい。
 - 3.3. そのグラフの勾配から k の値を求めなさい。
4. 検出器に光が入射している時に方程式(5)が成り立つことを利用し、横軸を x 、縦軸を y として、光の強度を求めるために、 x 軸と y 軸に適当な変数を選んでグラフを描く。
 - 4.1. 変数 x と y として適切な表式を書きなさい。
 - 4.2. 前問の結果を利用して2.2の解答用紙の表に x と y の数値を計算して記入し、それをもとに、 y を縦軸、 x を横軸として、グラフを描きなさい。そのグラフの右上に「グラフ6」と書きなさい。
 - 4.3. 検出器の開口部の面積を測定し、上で描いたグラフの勾配から、開口部における単位時間当たりの光の強度 E を求めなさい。
5. 太陽電池を検出器と同じ位置に来るように置きなさい。太陽電池にマルチメー



Experimental Problem

ターと可変抵抗を接続して、測定に適切な回路を作る。その際、端子の横の穴を利用して結線する。可変抵抗は太陽電池の負荷を変えるために使用する。回路に流れる電流と太陽電池の電圧を、異なる抵抗値に対して測定する。マルチメーターを電流計として使用する際、接続する端子の位置に注意すること。

- 5.1. この実験に用いる回路図を描きなさい。
- 5.2. まず、可変抵抗についているノブを時計回りにいっぱい回し、そこから反時計回りに徐々に回し、電流値 I を変化させ、そのときの電圧値 V を記録しなさい。その際、電流値が適当な間隔になるように変化させること。
- 5.3. その結果から、太陽電池が負荷に供給する電力を計算し、それを縦軸、太陽電池に流れる電流を横軸としてグラフを描きなさい。そのグラフ用紙の右上に「グラフ 7」と書きなさい。
- 5.4. このグラフから最大電力 P_{\max} を読み取り、その誤差を求めなさい。
- 5.5. その最大電力における太陽電池の発電効率を与える式を書きなさい。なお、発電効率の定義は、実験の目的に述べられている。太陽電池の面積を測定し、さらに、上で求めた最大電力および光の強度の値を用いて、この式から発電効率の値と誤差を計算しなさい。

Experimental Problem

実験装置の名称(装置の番号は図 10 を参照しなさい)

1	ハロゲン・ランプ 220V/ 20W	9	ストップウォッチ
2	皿の支持台	10	関数電卓
3	皿	11	輻射検出器
4	マルチメーター	12	太陽電池
5	回路ボックス(図 2 参照)	13	可変抵抗器
6	9 V の電池	14	定規
7	導線	15	灰色のプラスチックの箱
8	試料の入った試験管		

注:マルチメーター(図 9)の「自動的に電源が切れる(オートパワーオフ)」機能がはたらくのを防ぐ場合は, Select ボタンを押しながら, 機能選択ダイヤル(Function selector)を OFF ポジションから必要なポジションに切り替えます。



図 9. マルチメーター

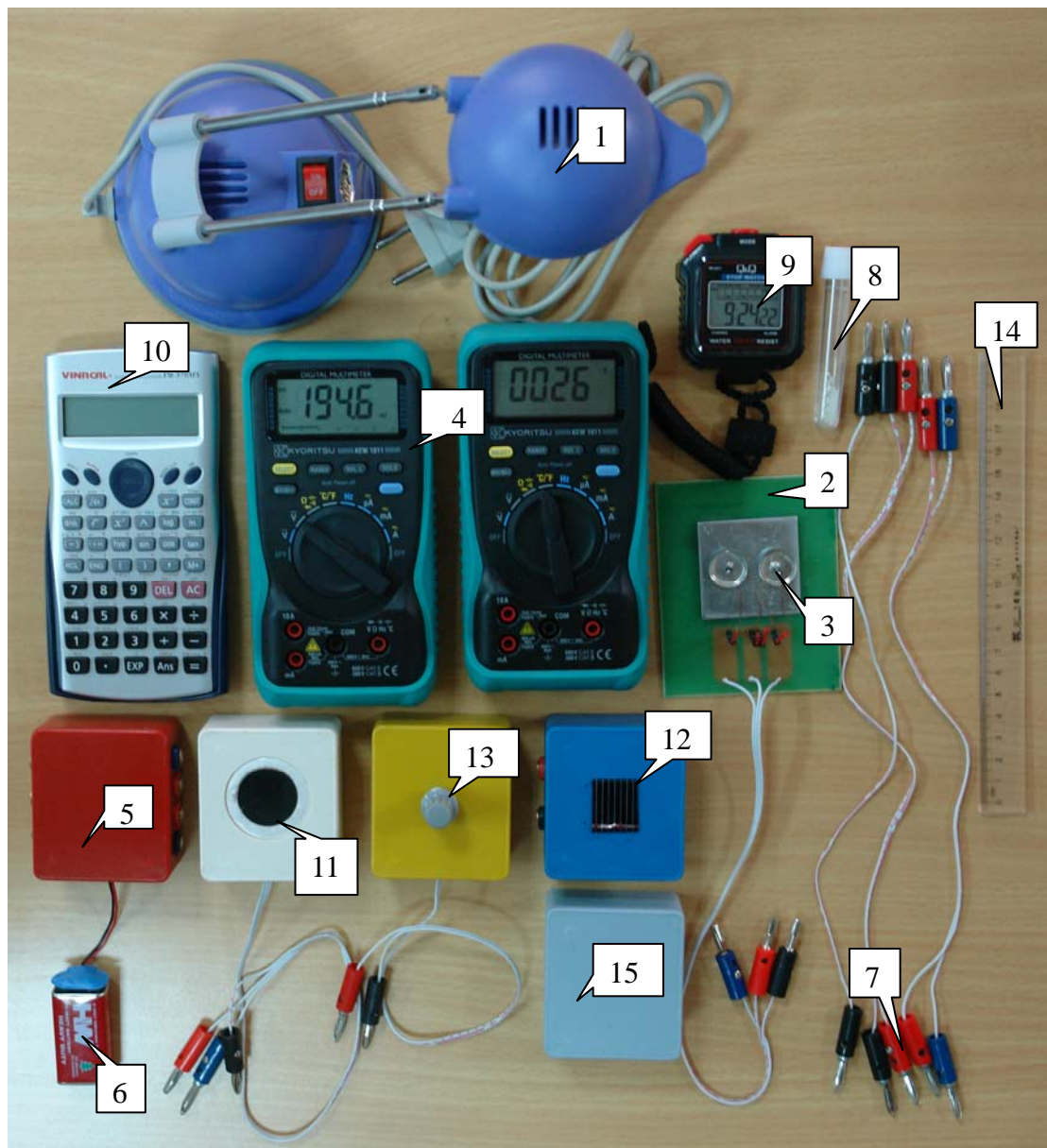


図 10. 実験キットの装置と部品



Solution

Task 1

1.

$$1.1. \quad T_0 = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_{\text{samp}}(T_0) = 573.9 \text{ mV}$$

With different experiment sets, V_{samp} may differ from the above value within ± 40 mV.

Note for error estimation:

δV and δV are calculated using the specs of the multimeter: $\pm 0.5\%$ reading digit +2 on the last digit. Example: if $V = 500$ mV, the error $\delta V = 500 \times 0.5\% + 0.2 = 2.7$ mV ≈ 3 mV.

Thus, $V_{\text{samp}}(T_0) = 574 \pm 3$ mV.

All values of $V_{\text{samp}}(T_0)$ within $505 \div 585$ mV are acceptable.

1.2. Formula for temperature calculation:

From Eq (1): $V_{\text{samp}} = V_{\text{samp}}(T_0) - \alpha(T - T_0)$

$$V_{\text{samp}}(50^\circ\text{C}) = 523.9 \text{ mV}$$

$$V_{\text{samp}}(70^\circ\text{C}) = 483.9 \text{ mV}$$

$$V_{\text{samp}}(80^\circ\text{C}) = 463.9 \text{ mV}$$

Error calculation: $\delta V_{\text{samp}} = \delta V_{\text{samp}}(T_0) + (T - T_0)\delta\alpha$

Example: $V_{\text{samp}} = 495.2$ mV, then $\delta V_{\text{samp}} = 2.7 + 0.03 \times (50 - 25) = 3.45$ mV ≈ 3.5 mV

Thus:

$$V_{\text{samp}}(50^\circ\text{C}) = 524 \pm 4 \text{ mV}$$

$$V_{\text{samp}}(70^\circ\text{C}) = 484 \pm 4 \text{ mV}$$

Experimental Problem / Solution

$$V_{\text{samp}}(80^{\circ}\text{C}) = 464 \pm 5 \text{ mV}$$

The same rule for acceptable range of V_{samp} as in 1.1 is applied.

2.

2.1. Data of cooling-down process without sample:

t (s)	V_{samp} (mV) ($\pm 3\text{mV}$)	ΔV (mV) ($\pm 0.2\text{mV}$)
0	492	-0.4
10	493	-0.5
20	493	-0.5
30	494	-0.6
40	495	-0.7
50	496	-0.7
60	497	-0.8
70	497	-0.8
80	498	-0.9
90	499	-1.0
100	500	-1.0
110	500	-1.1
120	501	-1.1
130	502	-1.2
140	503	-1.2
150	503	-1.3
160	504	-1.3
170	504	-1.4
180	505	-1.5
190	506	-1.6
200	507	-1.6
210	507	-1.7
220	508	-1.7
230	508	-1.8
240	509	-1.8
250	509	-1.8
260	510	-1.9
270	511	-1.9

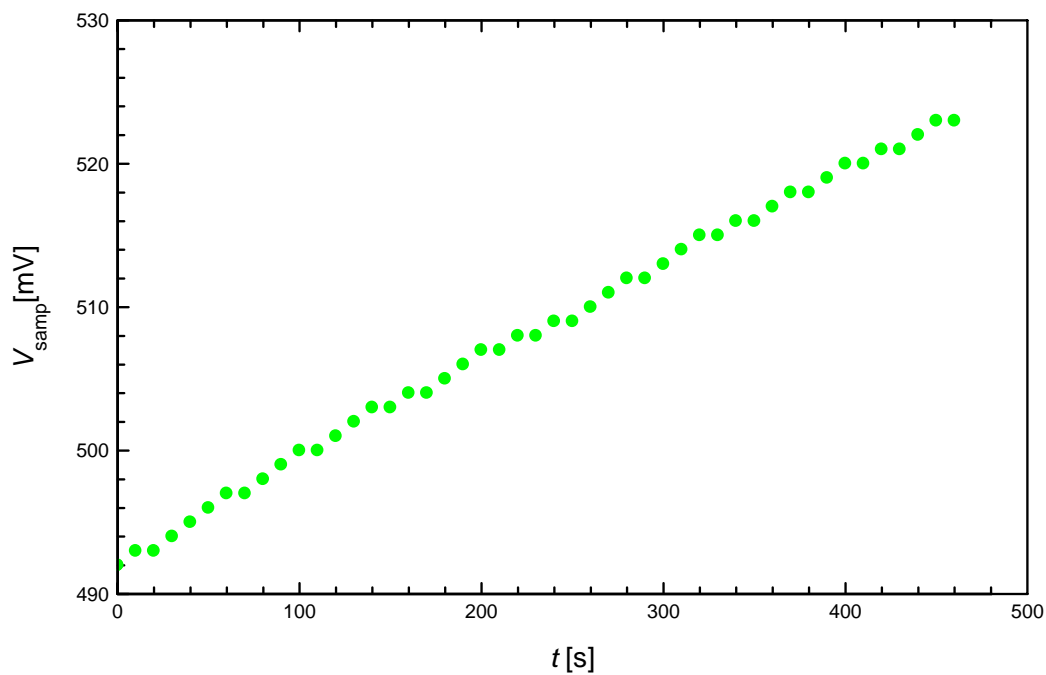
Experimental Problem / Solution

280	512	-1.9
290	512	-2.0
300	513	-2.0
310	514	-2.1
320	515	-2.1
330	515	-2.1
340	516	-2.1
350	516	-2.2
360	517	-2.2
370	518	-2.3
380	518	-2.3
390	519	-2.3
400	520	-2.4
410	520	-2.4
420	521	-2.5
430	521	-2.5
440	522	-2.5
450	523	-2.6
460	523	-2.6

The acceptable range of ΔV is ± 40 mV. There is no fixed rule for the change in ΔV with T (this depends on the positions of the dishes on the plate, etc.)

2.2.

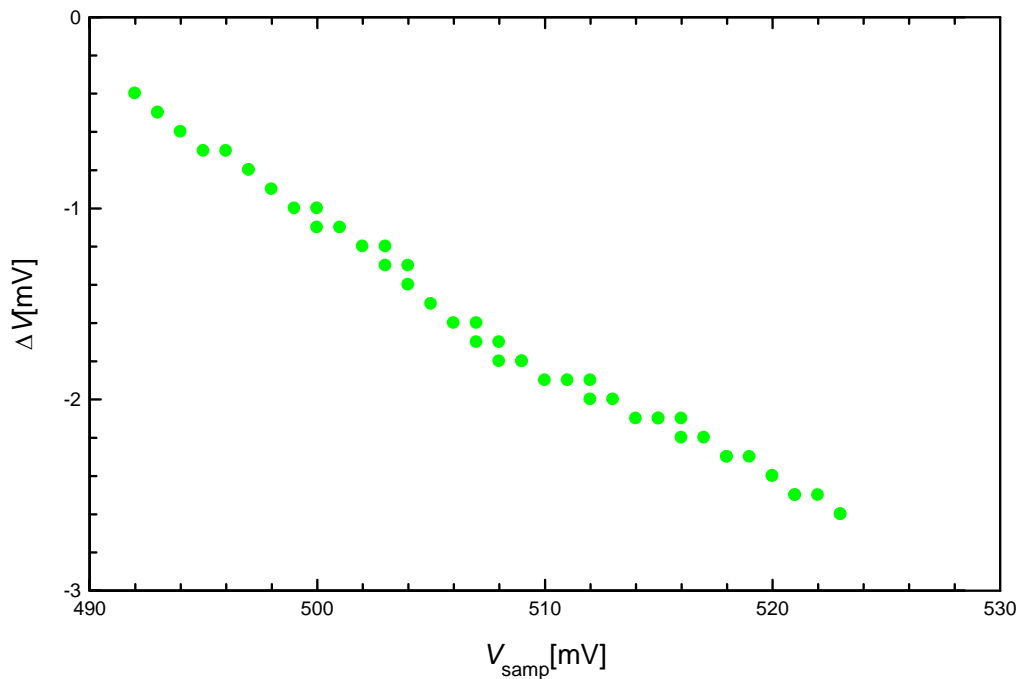
Graph 1



The correct graph should not have any abrupt changes of the slope.

2.3.

Graph 2



The correct graph should not have any abrupt changes of the slope.

3.

3.1. Dish with substance

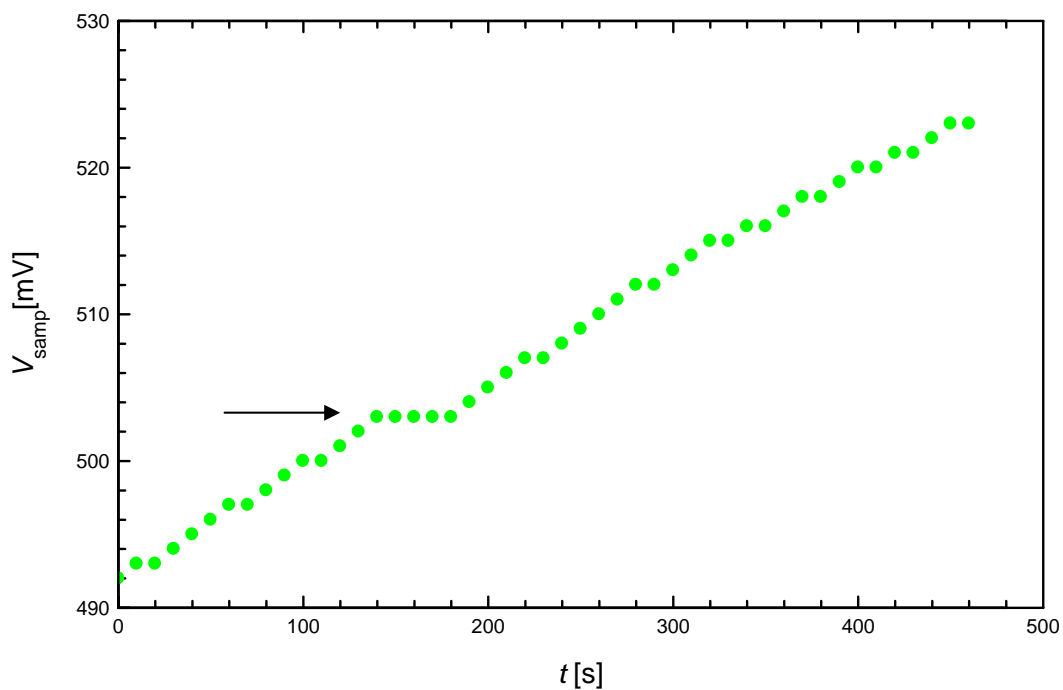
t (s)	V_{samp} (mV) ($\pm 3\text{mV}$)	ΔV (mV) ($\pm 0.2\text{mV}$)
0	492	-4.6
10	493	-4.6
20	493	-4.6
30	494	-4.6
40	495	-4.6
50	496	-4.6
60	497	-4.6
70	497	-4.5
80	498	-4.5
90	499	-4.5
100	500	-4.5
110	500	-4.5
120	501	-4.5

Experimental Problem / Solution

130	502	-4.6
140	503	-4.6
150	503	-5.1
160	503	-5.6
170	503	-6.2
180	503	-6.5
190	504	-6.6
200	505	-6.5
210	506	-6.4
220	507	-6.3
230	507	-6.1
240	508	-5.9
250	509	-5.7
260	510	-5.5
270	511	-5.3
280	512	-5.1
290	512	-5.0
300	513	-4.9
310	514	-4.8
320	515	-4.7
330	515	-4.7
340	516	-4.6
350	516	-4.6
360	517	-4.5
370	518	-4.5
380	518	-4.4
390	519	-4.4
400	520	-4.4
410	520	-4.4
420	521	-4.4
430	521	-4.3
440	522	-4.3
450	523	-4.3
460	523	-4.3

3.2.

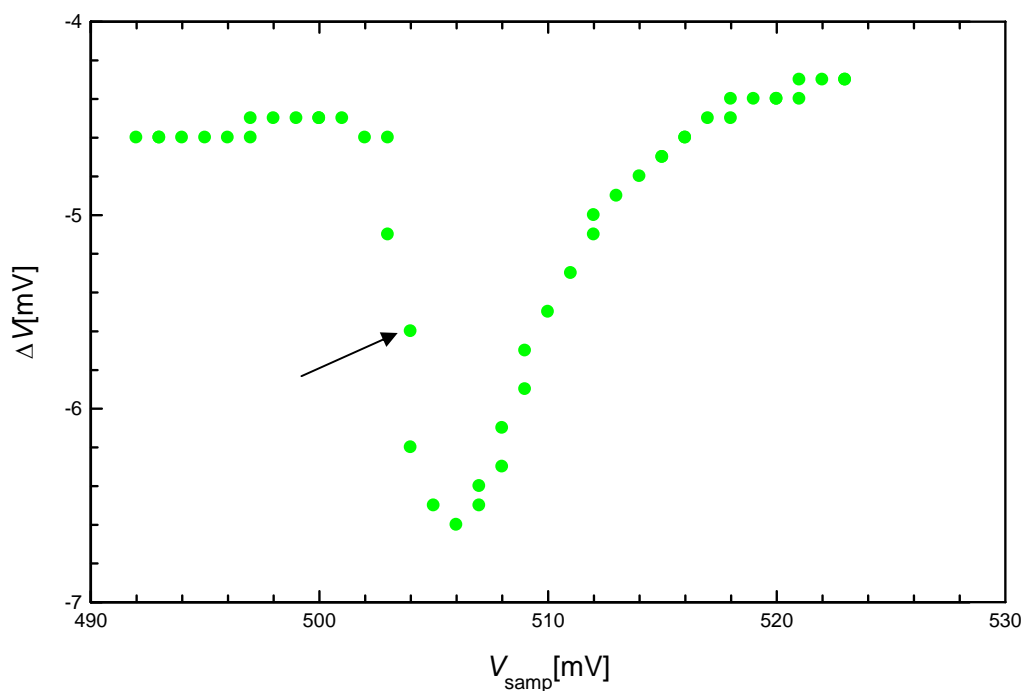
Graph 3



The correct Graph 3 should contain a short plateau as marked by the arrow in the above figure.

3.3.

Graph 4



Experimental Problem / Solution

The correct Graph 4 should have an abrupt change in ΔV , as shown by the arrow in the above figure.

Note: when the dish contains the substance, values of ΔV may change compared to those without the substance.

4.

4.1. V_s is shown in Graph 3. Value $V_s = (503 \pm 3)$ mV. From that, $T_s = 60.5$ °C can be deduced.

4.2. V_s is shown in Graph 4. Value $V_s = (503 \pm 3)$ mV. From that, $T_s = 60.5$ °C can be deduced.

4.3. Error calculations, using root mean square method:

Error of T_s : $T_s = T_0 + \frac{V(T_0) - V(T_s)}{\alpha} = T_0 + A$, in which A is an intermediate variable.

Therefore error of T_s can be written as $\delta T_s = \sqrt{(\delta T_0)^2 + (\delta A)^2}$, in which $\delta \dots$ is the error.

Error for A is calculated separately:

$$\delta A = \frac{V(T_0) - V(T_s)}{\alpha} \sqrt{\left\{ \frac{\delta[V(T_0) - V(T_s)]}{V(T_0) - V(T_s)} \right\}^2 + \left(\frac{\delta \alpha}{\alpha} \right)^2}$$

in which we have:

$$\delta[V(T_0) - V(T_s)] = \sqrt{[\delta V(T_0)]^2 + [\delta V(T_s)]^2}$$

Errors of other variables in this experiment:

$$\delta T_0 = 1^\circ\text{C}$$

$$\delta V(T_0) = 3 \text{ mV, read on the multimeter.}$$

$$\delta \alpha = 0.03 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

$$\delta V(T_s) \approx 3 \text{ mV}$$

From the above constituent errors we have:

$$\delta[V(T_0) - V(T_s)] \approx 4.24 \text{ mV}$$

$$\delta A \approx 2.1^\circ\text{C}$$

Finally, the error of T_s is: $\delta T_s \approx 2.5^\circ\text{C}$

Hence, the final result is: $T_s = 60 \pm 2.5^\circ\text{C}$

Note: if the student uses any other reasonable error calculation method that leads to approximately the same result, it is also accepted.

Task 2

1.

1.1. $T_0 = 26 \pm 1^\circ\text{C}$

2.

2.1. Measured data with the lamp off

t (s)	$\Delta V(T_0)$ (mV) ($\pm 0.2\text{mV}$)
0	19.0
10	19.0
20	19.0
30	19.0
40	19.0
50	18.9
60	18.9
70	18.9
80	18.9
90	18.9
100	19.0
110	19.0
120	19.0

Values of $\Delta V(T_0)$ can be different from one experiment set to another. The acceptable values lie in between $-40 \div +40$ mV.

2.2. Measured data with the lamp on

t (s)	ΔV (mV) ($\pm 0.2\text{mV}$)
0	19.5
10	21.9
20	23.8
30	25.5
40	26.9
50	28.0
60	29.0
70	29.9
80	30.7
90	31.4



100	32.0
110	32.4
120	32.9

When illuminated (by the lamp) values of ΔV may change $10 \div 20$ mV compared to the initial situation (lamp off).

2.3. Measured data after turning the lamp off

t (s)	ΔV (mV) (± 0.2 mV)
0	23.2
10	22.4
20	21.6
30	21.0
40	20.5
50	20.1
60	19.6
70	19.3
80	18.9
90	18.6
100	18.4
110	18.2
120	17.9

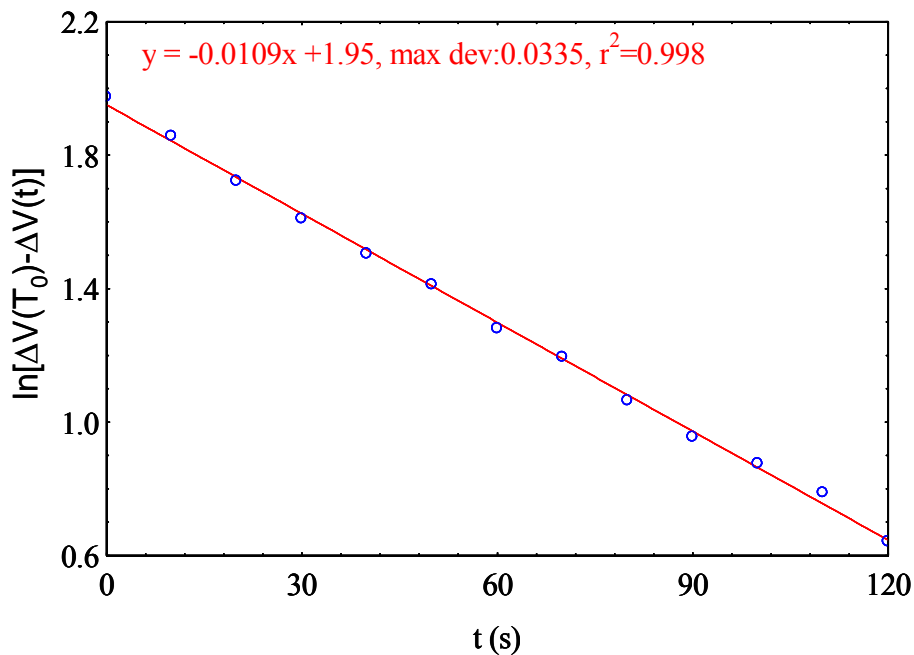
3. Plotting graph 5 and calculating k

$$3.1. \quad x = t; \quad y = \ln[\Delta V(T_0) - \Delta V(t)]$$

Note: other reasonable ways of writing expressions for x and y that also leads to a linear relationship using **ln** are also accepted.

3.2. Graph 5

Graph 5



3.3. Calculating k : $\frac{k}{C} = 0.0109 \text{ s}^{-1}$ and $C = 0.69 \text{ J/K}$, thus: $k = 7.52 \times 10^{-3} \text{ W/K}$

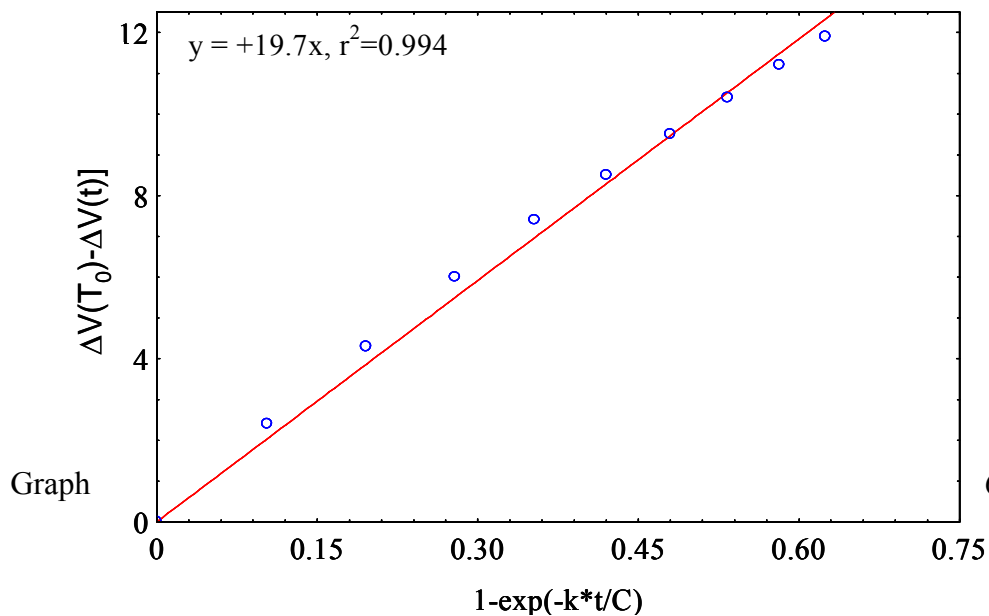
Note: Error of k will be calculated in 5.5. Students are not asked to give error of k in this step. The acceptable value of k lies in between $6 \times 10^{-3} \div 9 \times 10^{-3} \text{ W/K}$ depending on the experiment set.

4. Plotting Graph 6 and calculating E

4.1. $x = \left[1 - \exp\left(\frac{-kt}{C}\right) \right]$; $y = |\Delta V(T_0) - \Delta V(t)|$

4.2.

Graph 6



Graph

6 should

be substantially linear, with the slope in between $15 \div 25$ mV, depending on the experiment set.

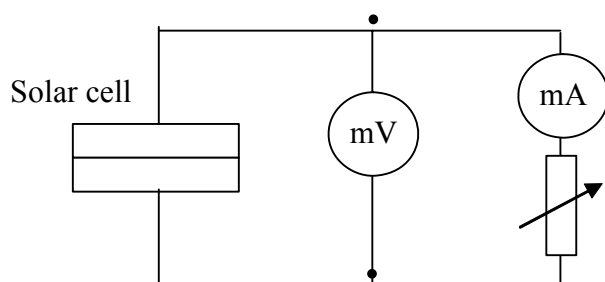
4.3. From the slope of Graph 6 and the area of the detector orifice we obtain $E = 140$ W/m². The area of the detector orifice is

$$S_{\text{det}} = \pi R_{\text{det}}^2 = \pi \times (13 \times 10^{-3})^2 = 5.30 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ with error: } \frac{\delta R_{\text{det}}}{R_{\text{det}}} = 5\%$$

Error of E will be calculated in 5.5. Students are not asked to give error of E in this step. The acceptable value of E lies in between $120 \div 160$ W/m², depending on the experiment set.

5.

5.1. Circuit diagram:



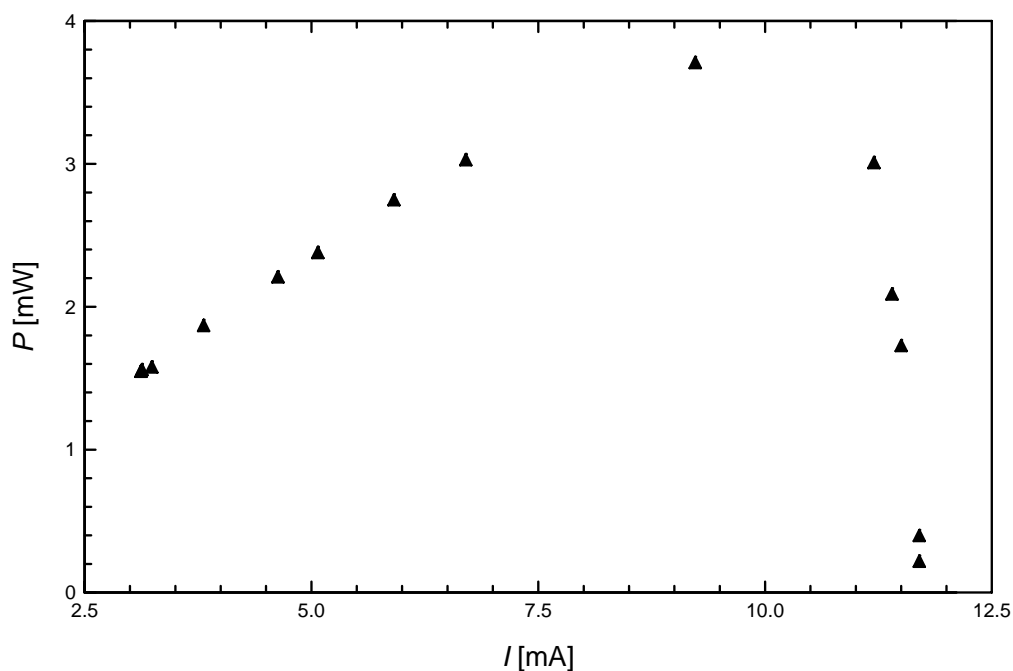
5.2. Measurements of V and I

V (mV) ($\pm 0.3 \div 3$ mV)	I (mA) ($\pm 0.05 \div 0.1$ mA)	P (mW)
18.6 ± 0.3	11.7	0.21
33.5	11.7	0.39
150	11.5	1.72
157	11.6	1.82
182 ± 1	11.4	2.08
267	11.2	3.00
402 ± 2	9.23	3.70
448	6.70	3.02
459	5.91	2.74
468	5.07	2.37
473 ± 3	4.63	2.20
480	3.81	1.86
485	3.24	1.57

487	3.12	1.54
489	3.13	1.55

5.3.

Graph 7



5.4. $P_{\max} = 3.7 \pm 0.2 \text{ mW}$

The acceptable value of P_{\max} lies in between $3 \div 4.5 \text{ mW}$, depending on the experiment set.

5.5. Expression for the efficiency

$$S_{\text{cell}} = 19 \times 24 \text{ mm}^2 = 450 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\text{Then } \eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{E \times S_{\text{cell}}} = 0.058$$

Error calculation:

$$\delta \eta_{\max} = \eta_{\max} \sqrt{\left(\frac{\delta P_{\max}}{P_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\delta S_{\text{cell}}}{S_{\text{cell}}}\right)^2}, \text{ in which } S_{\text{cell}} \text{ is the area of the}$$

solar cell.

$$\frac{\delta P_{\max}}{P_{\max}} \text{ is estimated from Graph 7, typical value } \approx 6 \%$$

$\frac{\delta S_{\text{cell}}}{S_{\text{cell}}}$: error from the millimeter measurement (with the ruler), typical value $\approx 5\%$

E is calculated from averaging the ratio (using Graph 6):

$$B = \frac{\Delta V(T_0) - \Delta V(t)}{1 - \exp\left(-\frac{k}{C}t\right)} = \frac{E\pi R_{\text{det}}^2 \alpha}{k}$$

in which B is an intermediate variable, R_{det} is the radius of the detector orifice.

$$E = \frac{kB}{\pi R_{\text{det}}^2 \alpha}$$

Calculation of error of E :

$$\left(\frac{\delta E}{E}\right) = \sqrt{\left(\frac{\delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\delta B}{B}\right)^2 + 4\left(\frac{\delta R_{\text{det}}}{R_{\text{det}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \alpha}{\alpha}\right)^2}$$

k is calculated from the regression of:

$$\Delta T = \Delta T(0) \exp\left(-\frac{k}{C}t\right), \text{ hence } \ln \Delta T = \ln \Delta T(0) - \frac{k}{C}t$$

We set $k/C = m$ then $k = mC$

From the regression, we can calculate the error of m :

$$\frac{\delta m}{m} \approx 2(1-r) \approx 0.2\%$$

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C}\right)^2}$$

We derive the expression for the error of η_{max} :

$$\delta \eta_{\text{max}} = \eta_{\text{max}} \sqrt{\left(\frac{\delta P_{\text{max}}}{P_{\text{max}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta S_{\text{cell}}}{S_{\text{cell}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta B}{B}\right)^2 + 4\left(\frac{\delta R_{\text{det}}}{R_{\text{det}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \alpha}{\alpha}\right)^2}$$

Typical values for η_{max} and other constituent errors:

$$\eta_{\text{max}} \approx 0.058$$

$$\frac{\delta P_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} = 5\% ; \quad \frac{\delta B}{B} \approx 0.6\% ; \quad \frac{\delta m}{m} \approx 0.2\% ; \quad \frac{\delta S_{\text{cell}}}{S_{\text{cell}}} \approx 5\% ; \quad \frac{\delta R_{\text{det}}}{R_{\text{det}}} \approx 5\% ;$$

$$\frac{\delta C}{C} \approx 3\%; \frac{\delta k}{k} \approx 3\%; \frac{\delta E}{E} \approx 10.5\%; \frac{\delta \alpha}{\alpha} \approx 1.5\%$$

Finally:

$$\frac{\delta \eta_{\max}}{\eta_{\max}} = 12.7\%; \delta \eta_{\max} \approx 0.0074$$

and

$$\eta_{\max} = (5.8 \pm 0.8)\%$$

Note: if the student uses any other reasonable error method that leads to approximately the same result, it is also accepted.

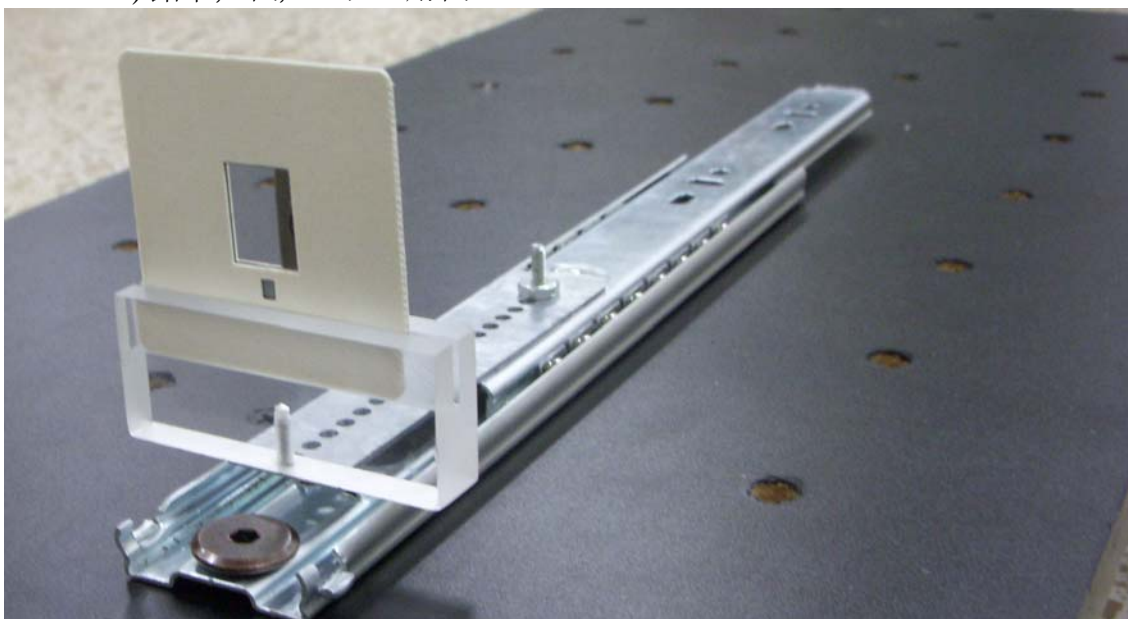
国際物理オリンピック2009 メキシコ大会 実験問題

実験問題 1

ダイオードレーザーの波長の決定

器具

- 1), 2), 3) 以外に以下のものを使用する。
- 4) 四角の支柱に取り付けられたレンズ(部品写真の装置記号 C).
 - 5) スライド枠に固定されたカミソリの刃と、これを差し込むためのアクリル支持台(装置記号 D1)。さらにそれらを載せた滑り支持台(装置記号 D2)。必要ならば強く固定するためにねじ回しを使うこと。下の写真参照。
 - 6) 副尺 (1/20mm の精度) がついた観測用のスクリーン(装置記号 E)。
 - 7) 拡大鏡(装置記号 F)。
 - 8) 30 cm のものさし(装置記号 G)。
 - 9) ノギス(装置記号 H)。
 - 10) 計測用巻き尺(装置記号 I)。
 - 11) 電卓。
 - 12) ハガキ大の白カード, 粘着テープ (masking tape) , 剥離粘着紙, はさみ, 三角定規セット。
 - 13) 鉛筆, 紙, グラフ用紙。



アクリル支持台(装置記号 D1)を滑り支持台 (装置記号 D2) の先端に差し込み、図のようにねじ留めし、ミラー(装置記号 B)から4番目の穴に滑り支持台を固定する。スライド枠に固定されたカミソリの刃をアクリル支持台に差し込む。

実験方法

ここで、ダイオードレーザーの波長を決定する。この測定の特徴は、厳密な微小測定器（例えば、規格ものの回折格子など）を使わないことである。測定する最小の長さはミリメートル領域である。カミソリの刃の鋭い縁による光の回折を使って、波長が測定される。

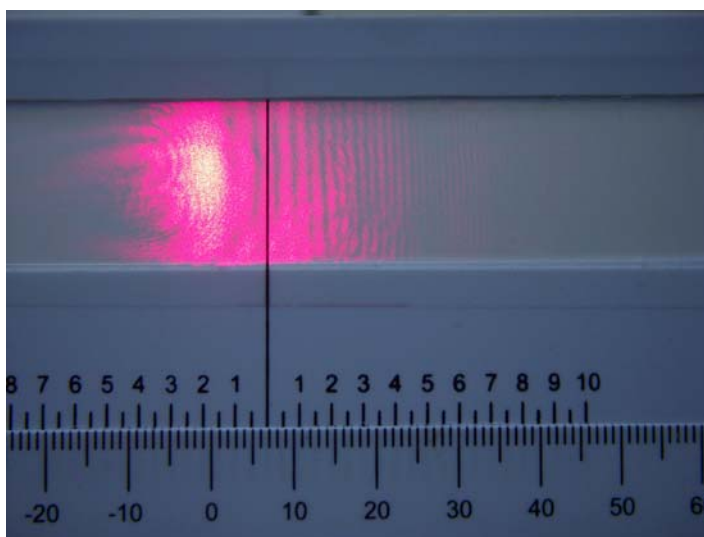


図 1.1 典型的な干渉縞パターン

レーザー光は、ミラー(装置記号 B)で反射されてからレンズ (装置記号 C) をカミソリの刃の直前で通るようにする。レンズは**数センチメートル**の焦点距離をもつため、カミソリの刃をレンズに近づけたときアクリル台がレンズ支柱に当たるようにする。焦点は、球面波を放射する光源とみなすことができる。レーザー光は、レンズを通ったあと、光路に沿って進み、障害物である鋭いカミソリの刃の縁に衝突する。その縁も、球面波を放射する光源とみなすことができる。これら二つの波が前方で干渉しあい、スクリーン上で干渉パターンをつくる。これを観測する。図 1.1 には典型的な干渉パターンの写真を示す。

ここで図 1.2 と 1.3 にあるように 2 つの場合があることが重要である。

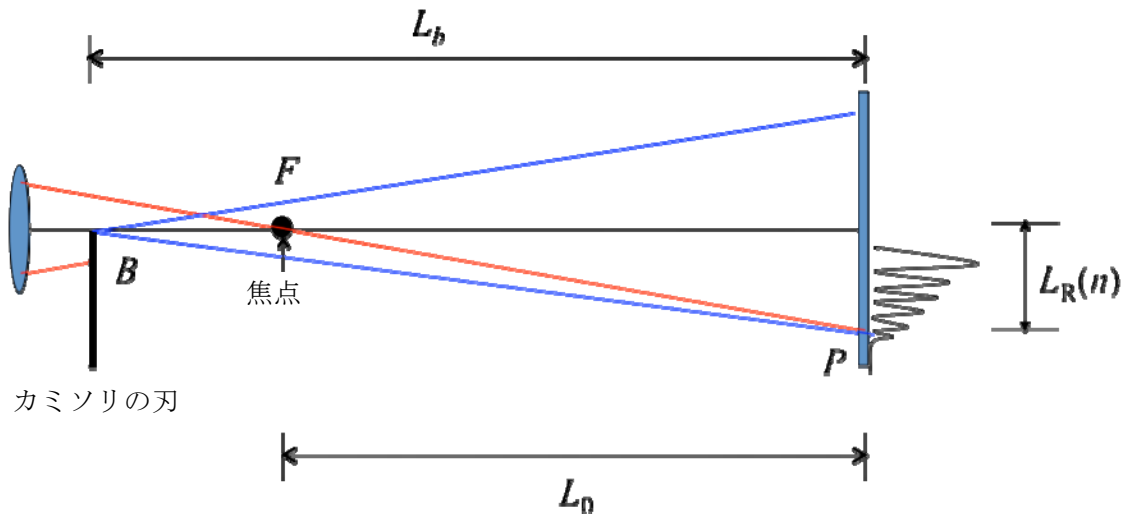


図 1.2. 場合 (I). カミソリの刃がレンズの焦点の**前方**にある場合。図は実際の縮尺ではない。

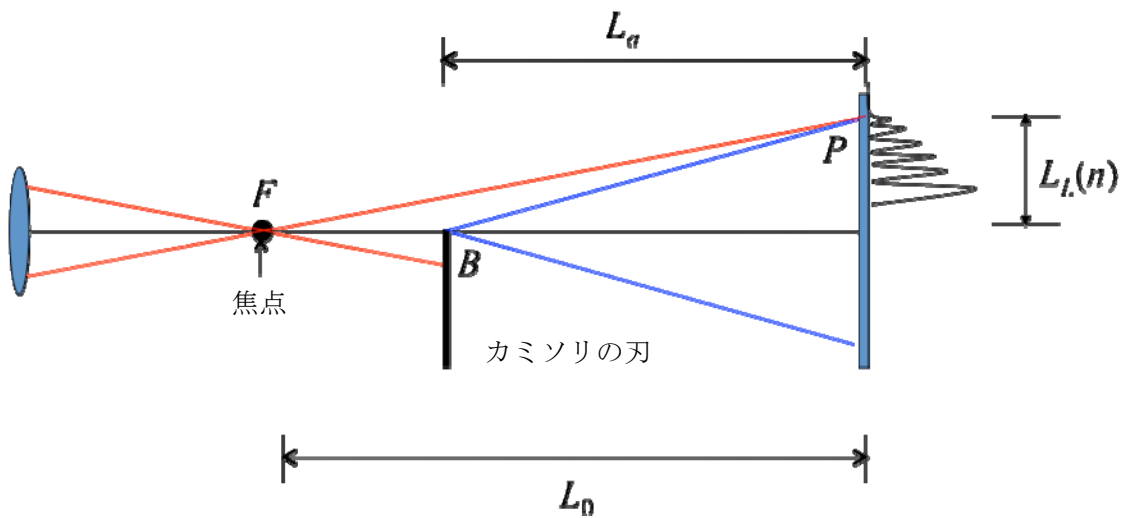


図 1.3. 場合 (II). カミソリの刃がレンズの焦点の**後方**にある場合。図は実際の縮尺ではない。

実験装置の組み立て

課題 1.1 実験装置組み立て(1.0 点).

上述した干渉パターンを得るために実験装置の配置を設計しなさい。焦点からスクリーンまでの距離 L_0 は焦点距離よりも十分長くせよ。

- 光学台が書いてある図の上に、自作した実験装置の配置を詳しく書き写しなさい。異なる装置には、それぞれの**装置記号**をその光学台が書いてある図の中に書きなさい。ここで自分の設計を説明する簡単な図を加えてもよい。
- ハガキ大の白カードを用いて、反射レーザー光の光路をたどることによって、アライメント調整(光学台の厳密に穴の真上を通るように)せよ。
- 十分調整した後、光学台が書いてある図の上にレーザー光の光路を描きなさい。また、レーザー光の光学台からの高さ h を各所で確かめ、それらなるべく一致するようにして、その値を書きなさい。

警告: 時々出る大きなリングパターンを無視せよ。これはダイオードレーザーそのものからの効果である。

レーザー光の光路組み立ては重要であり、時間をかけて最適なアライメントにせよ。そうして 10 本以上の垂直な直線の縞(しま)模様がスクリーン上で見えるように組み立てなさい。読み取りは、縞模様の**暗線**の位置とせよ。縞模様をよりはっきり読み取るために、虫眼鏡(拡大鏡)を用いてよい。**縞模様は、光っているスクリーン(部品写真の装置記号 E)のレーザー光の来る方向とは反対の側から読み取るとよい。**そのため、スクリーンの副尺付き目盛りの文字は外側から読めるように配置せよ。もし、配置がうまくいってれば、レーザー光を半分隠すカミソリの刃(装置記号 D1)を滑り支持台(装置記号 D2)上で滑らせるだけで、両方のパターン(図 1.2 の場合 I も図 1.3 の場合 II も)が見えるはずである。

理論的考察

前述の図 1.2 と 1.3 を見なさい。次の 5 つの基本的な長さがある。

L_0 : 凸レンズの焦点からスクリーンまでの距離

L_b : カミソリの刃からスクリーンまでの距離, 場合 I

L_a : カミソリの刃からスクリーンまでの距離, 場合 II

$L_R(n)$: 場合 I の n 番目の**暗線**の位置

$L_L(n)$: 場合 II の n 番目の**暗線**の位置

場合Ⅰでも場合Ⅱでも、はじめの暗線は最も広がっている。これを $n = 0$ の暗線とする。

実験装置の組立では、場合Ⅰは $L_R(n) \ll L_0, L_b$ 、場合Ⅱは $L_L(n) \ll L_0, L_a$ となるようにしなければならない。

1点から発せられる光波の干渉は、光路差（位相差）により生じる。位相差により、互いに打ち消すと暗線を生じ、互いに強め合うと明線を生じる。

暗線を生じる条件は、これらの光波の詳細な解析により、次の条件で与えられる。場合Ⅰに対して

$$\Delta_I(n) = \left(n + \frac{5}{8}\right)\lambda \quad \text{ただし, } n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.1)$$

場合Ⅱに対して

$$\Delta_{II}(n) = \left(n + \frac{7}{8}\right)\lambda \quad \text{ただし, } n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.2)$$

ここで、 λ はレーザー光の波長、 Δ_I 、 Δ_{II} はそれぞれの場合の光路差である。

場合Ⅰの光路差は、

$$\Delta_I(n) = (BF + FP) - BP \quad \text{それぞれの } n = 0, 1, 2, \dots \text{ について} \quad (1.3)$$

場合Ⅱの光路差は、

$$\Delta_{II}(n) = (FB + BP) - FP \quad \text{それぞれの } n = 0, 1, 2, \dots \text{ について} \quad (1.4)$$

課題 1.2 光路差の表式(0.5 点).

場合Ⅰに対して $L_R(n) \ll L_0, L_b$ 、場合Ⅱに対して $L_L(n) \ll L_0, L_a$ を仮定して、(1.3) (1.4) 式（実験の組立でこの条件が満たされているか確かめよ）より、光路差 $\Delta_I(n)$ と $\Delta_{II}(n)$ を $L_0, L_b, L_a, L_R(n), L_L(n)$ を用いて表せ。ただし、 $x \ll 1$ のときの近似式 $(1+x)^r \approx 1+rx$ を用いてよい。

上の式を用いる際の実験的な難しさは、 $L_0, L_R(n), L_L(n)$ を正確に測定することができない点にある。はじめの量 L_0 を定める上での難しさは、レンズの焦点の位置を見つけるのが容易ではないことにあり、次の2つの量 $L_R(n), L_L(n)$ を定める上での難しさは、光学装置を直線的に並べるのが非常に難しいことにある。

$L_R(n)$ と $L_L(n)$ を求める際の困難を解決するために、すべての縞模様の原点としてスクリーンの目盛り（装置記号 E）上にゼロ点をまず決めなさい。次に $L_R(n)$ と $L_L(n)$ の位置を定めるために、未知の位置を l_{0R} , l_{0L} とし、 $l_R(n)$, $l_L(n)$ を上で決めたゼロ点から測った暗線の位置とする。

$$L_R(n) = l_R(n) - l_{0R} \quad \text{と} \quad L_L(n) = l_L(n) - l_{0L} \quad (1.5)$$

が成り立つ。

実験の実行. データ解析.

課題 1.3 暗線の位置とカミソリの刃の位置の測定 (3.25 点).

- 場合 I と場合 II の両方について、縞の番号 n の関数として、暗線の位置 $l_R(n)$, $l_L(n)$ を測定せよ。そして測定値を表 1 に記せ。それぞれの場合について少なくとも 8 回の測定を行うこと。
- 同様にカミソリの刃の測定に最適の位置として L_b と L_a の値を記せ。そしてそれらの位置を測った装置を、装置記号で示せ。
- **重要な示唆:** 解析を簡単にし精度を上げるために、距離 $d = L_b - L_a$ を直接測定せよ。そうすると、 L_b と L_a の精度よりもよい精度が得られる。すなわち、 L_b と L_a の測定値から計算することをしない。ここで、距離を測った装置を、装置記号で示せ。

答には、測定の不確定性（誤差）を必ず入れること。

課題 1.4 データ解析. (3.25 点).

上記のすべての情報から、 l_{0R} と l_{0L} の値を求めることができ、さらに波長 λ が求められる。

- これらの値を求めるための手続きを考案せよ。必要な表式、方程式を書き出せ。
- 誤差の解析を含めよ。表 I を用いるか別の表を用いて、見いだしたことを報告せよ。すなわち、作った表の各欄の内容が明確に分かるように記せ。
- 解析した変数を、与えられたグラフ用紙を用いてプロットせよ。
- l_{0R} と l_{0L} の計算値を誤差も含めて書き出せ。

課題 1.5 λ を計算する. (2 点).

λ の計算値を記せ。誤差とそれを得るための誤差解析も含めよ。**示唆:** λ についての公式において、 $(L_b - L_a)$ が現れたら、 d で置き換えて、その d に測定値を用いること。

実験問題 2 雲母の複屈折

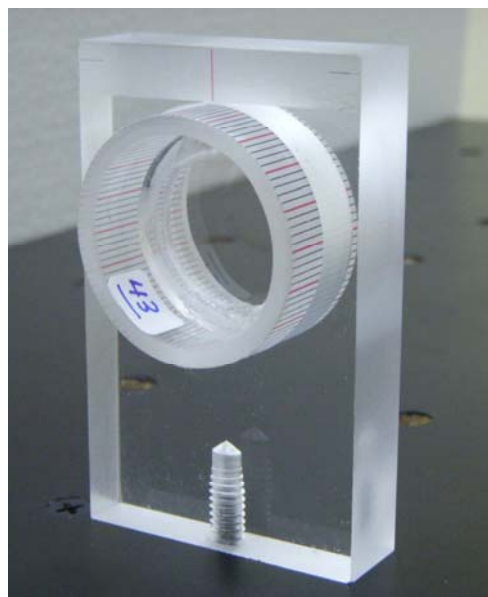
この実験では雲母（光を偏光させる光学装置で広く使われる結晶）の複屈折を測定する。

・器具

- 1), 2), 3)以外に以下のものを使用する。
- 14) スライド枠に取り付けた 2 つの偏光板がそれぞれアクリル支持台（装置記号 J）によって支えられている。組み立てについては写真を見よ。
- 15) 雲母の薄膜がプラスチック製の円筒に取り付けてあり、円筒には数字のない目盛りがついている。円筒はアクリル支持台（装置記号 K）で支えられている。組み立てについては写真を見よ。
- 16) 光検出器はプラスチック製の箱に入っている。コネクタ、発泡スチロール製支持台、光検出器の電圧を測定するマルチメータ（テスター）（装置記号 L）の組み立てについては写真を参照。
- 17) 電卓
- 18) ハガキ大のカード、粘着テープ（masking tape）、剥離粘着紙、はさみ、三角定規セット
- 19) 鉛筆、紙、グラフ用紙



スライド枠に取り付けた偏光板がアクリル支持台（装置番号 J）に支えられている



雲母の薄膜を取り付けた円筒には数字のない目盛りがついていて、円筒はアクリル支持台（装置記号 K）に支えられている。



プラスチック箱の中にある光検出器，コネクター，発泡支持台，光検出器（装置記号 L）の電圧を測定するマルチメータ。ここに示しているように接続する。

・現象の説明

光は横波の電磁波であり，その電場は光の伝播方向に垂直な面上で，光の進行と共に時間的に振動する。

電場の振動の向きが一定のとき，その光波は直線偏光，または，単に偏光と呼ばれる（図 2.1）。

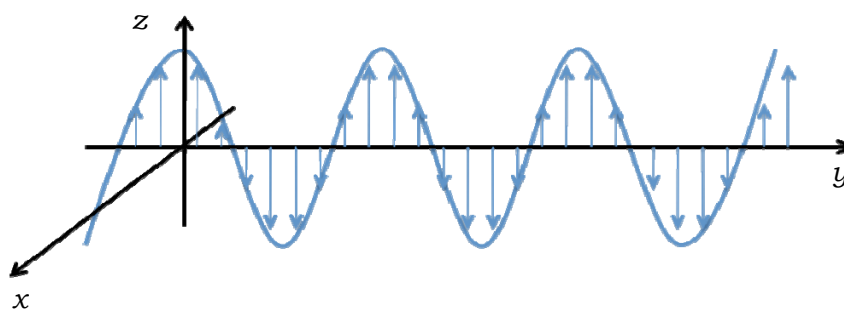


図 2.1 z 軸方向へ偏光した y 軸方向へ伝播する光波

偏光フィルム（偏光板）は、その表面に平行な特別な軸，すなわち，透過した光がその軸方向の偏光となる軸をもつ物質である。特別な軸の方向を（+），その軸に垂直な方向を（-）で表す。

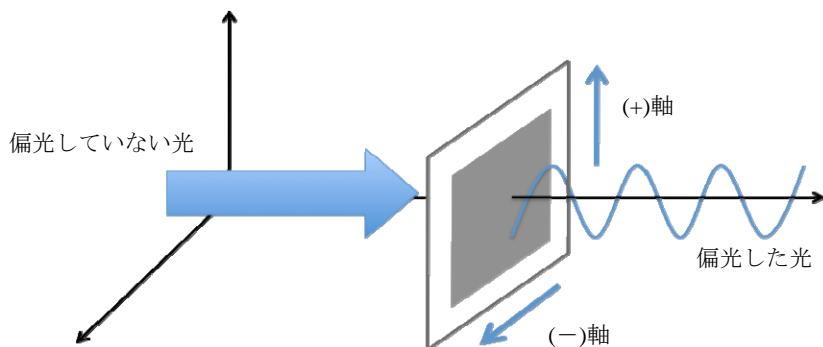


図 2.2 偏光していない光が偏光板に垂直に入射する。透過光は偏光板の（+）方向に偏光する。

ガラスのような通常の透明物質は、入射光と同じ偏光の光を透過する。その屈折率は入射光の偏光方向によらない。しかし、雲母を含む多くの結晶は、光波の電場方向に敏感である。表面に垂直方向の伝播に対し、雲母の薄い平板には特別な2つの直交軸がある。それを軸1，軸2と呼ぶ。これにより複屈折と呼ばれる現象が起こる。

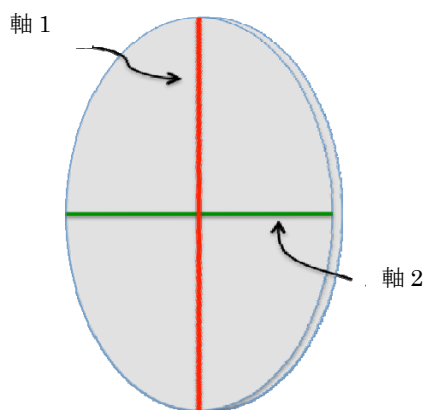


図 2.3 軸1（赤）と軸2（緑）という2つの軸をもつ雲母の薄い板。

複屈折の例として、2つの簡単な例を解析する。鉛直方向へ偏光した光波が、雲母の薄い板の表面に垂直に入射するとする。

場合1) 軸1または軸2が入射波の偏光方向に平行であるとする。透過光はその偏光方向を変えずに通過するが、物質の屈折率が n_1 あるいは n_2 であるかのように伝播する(図2.4, 図2.5)。

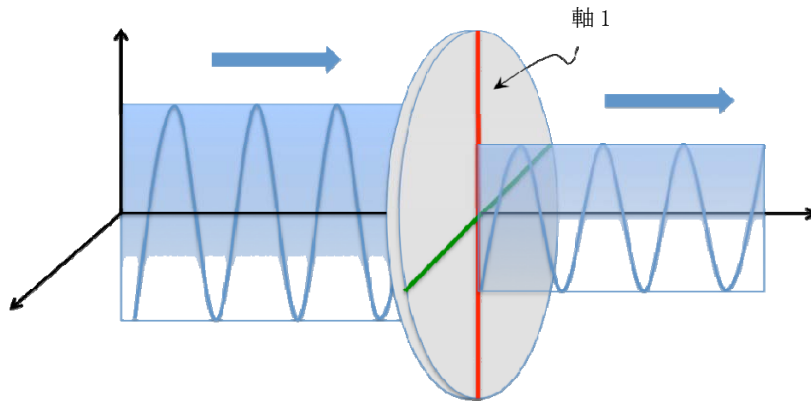


図2.4 軸1が入射光の偏光方向に平行である場合、屈折率は n_1 である

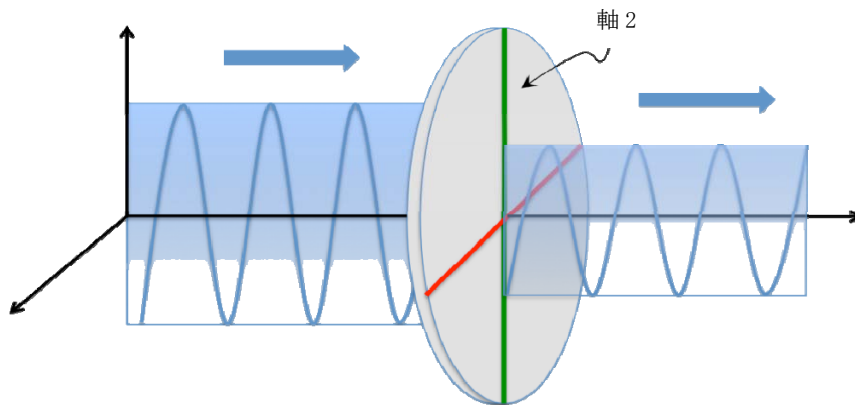


図2.5 軸2が入射光の偏光方向に平行である場合、屈折率は n_2 である

場合2) 軸1が入射光の偏光方向と角 θ をなすとする。透過光の偏光状態はさらに複雑である。しかし、この光波は次の2つの光波の重ね合わせで表される。1つは入射光の偏光に平行な方向(すなわち、鉛直方向)に偏光した光波であり、

もう1つは、入射光の偏光に垂直な方向（すなわち水平方向）に偏光した光波である。

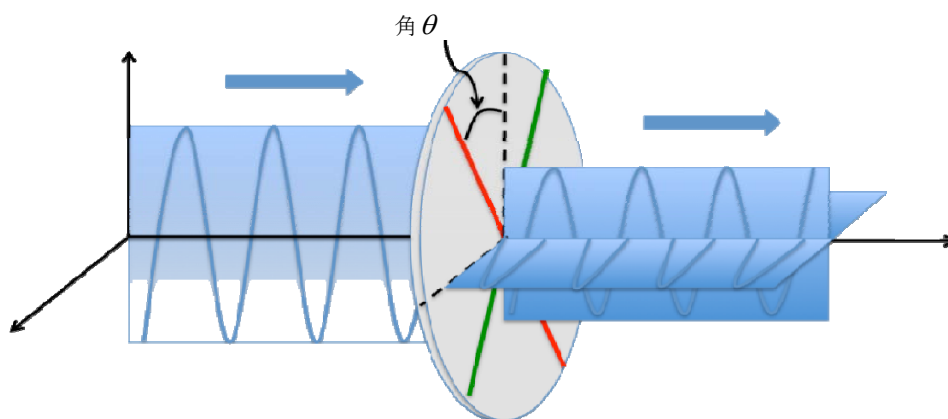


図 2.6 軸 1 が入射光の偏光方向と角 θ をなしている

入射光の偏光に平行な方向に偏光した透過光の強度を I_p ，入射光の偏光に垂直な方向に偏光した透過光の強度を I_o とする。これらの強度は、角 θ と光源の波長 λ ，平板の厚さ L ，および、屈折率の差 $|n_1 - n_2|$ に依存する。この最後の量は、物質の複屈折率と呼ばれる。この問題のゴールは、複屈折率を測定することである。偏光板と複屈折の性質を示す物質は、共に、光の偏光状態を調整するのに用いられる。

ここで、光検出器は偏光状態とは独立に、入射光の強度を測定することを指摘しておく。

$I_p(\theta)$ と $I_o(\theta)$ の角 θ 依存性は、雲母による入射光の吸収率のように、これまで考えてこなかったような効果にも依存して複雑である。しかし、

$$\bar{I}_p(\theta) = \frac{I_p(\theta)}{I_p(\theta) + I_o(\theta)} \quad (2.1)$$

および、

$$\bar{I}_o(\theta) = \frac{I_o(\theta)}{I_p(\theta) + I_o(\theta)} \quad (2.2)$$

で定義される規格化された強度 $\bar{I}_p(\theta)$ と $\bar{I}_o(\theta)$ に対する非常に簡単な表現だけは近似的に求められる。これらの規格化された強度はそれぞれ、

$$\bar{I}_p(\theta) = 1 - \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi) \sin^2(2\theta) \quad (2.3)$$

および

$$\bar{I}_o(\theta) = \frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\phi)\sin^2(2\theta) \quad (2.4)$$

で与えられる。また、 $\Delta\phi$ は、平行および垂直な透過光の位相差であり、

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda}|n_1 - n_2| \quad (2.5)$$

と表される。ここで、 L は雲母の平板の厚さ、 λ は入射光の波長、 $|n_1 - n_2|$ は複屈折率である。

実験装置の組み立て

課題 2.1 強度測定のための実験装置の組み立て

透過波の強度 I_p および I_o を 図 2.6 に示すような光学軸の角度 θ の関数として測定するための実験の組み立てを設計しなさい。その際に、光学台の図にそれぞれの装置の装置記号を記すこと。 偏光板の向きを記号 (+) および (-) で表しなさい。あなたの考えた設計を分かりやすくするために簡単な書き込みをしてもよい。

課題 2.1 a) I_p の測定のための実験装置の組み立て(0.5 点).

課題 2.1 b) I_o の測定のための実験装置の組み立て(0.5 点).

レーザー光のアライメント調整

レーザー光が光学台と平行になるようにして、雲母を支えている円筒の中心にレーザー光が入射するようにする。白カードを使って光路を追うことによって、レーザー光の向きを調整するとよい。微小な調整は可動の鏡を使って行う。

光検出器とマルチメータ

光検出器は光が入射すると電圧を生じる。マルチメータを用いてこの電圧を測定しなさい。電圧は光の強度に比例しているため、光の強度を光検出器に生じた電圧で表す。光検出器にレーザー光が入射しないときも、光検出器の背景光強度を測定する可能性がある。しかし、この強度は 1 mV より小さいはずである。光強度の測定をするときに、この背景強度の補正をしないこと。

注意: レーザー光は部分的に偏光しているが、どの方向を向いているかは分からない。強度の読みが十分できる程度の偏光を得るためには、(+) 軸あるいは (-) 軸をもつ偏光器を垂直方向にして、他の光学機器がない状況で最大の透過光強度を得るようにする。

強度測定

課題 2.2 角度目盛りの設定

雲母が取り付けられている円筒は角度を測るための目盛りがついている。最小間隔（すなわち、隣り合う目盛り線の間）に対応する角度を書け (0.25 点)。

(近似的に) θ の零点と雲母の軸の位置を求めること

解析を進めるためには、角度の零点（すなわち強度がゼロとなる角度）を近似的に求めることが重要である。まず、雲母の一つの軸を特定することを勧める。これを軸 1 と呼ぶことにしよう。この角度の位置が円筒上の目盛りと一致することはまずない。よって、雲母円筒の目盛り線のうちもっとも近い目盛り線を暫定的な角度の原点とすることにする。その原点からの角度を $\bar{\theta}$ と表すことにする。以下では、もっと正確な θ の零点を求めることが要求される。

課題 2.3 I_p と I_o の測定

あなたが必要と思う数だけの角度 $\bar{\theta}$ に対して、強度 I_p と I_o を測定せよ。測定結果を表 I に報告せよ。雲母を取り付けた円筒について、同じ設定で、すなわち固定した角度 $\bar{\theta}$ について、強度 I_p および I_o を測定せよ (3.0 点)。

課題 2.4 θ の近似的な零点を求めること

軸 1 の位置が角度 θ の零点を決める。上に述べたように、軸 1 が雲母を取り付けた目盛り線と一致することはまずない。角度の零点を求めるには、グラフで調べるか数値で調べるかのいずれかの方法をとる。極大点あるいは極小点の近傍では、次のように関係式は二次曲線で近似できる。

$$I(\bar{\theta}) \approx a\bar{\theta}^2 + b\bar{\theta} + c$$

極大点あるいは極小点は以下で与えられる。

$$\bar{\theta}_m = -\frac{b}{2a}.$$

上記の選択をすると、課題 2.3 の表 I に与えられている全ての数値にずれ $\delta\bar{\theta}$ を生じる。そうすると、数値は近似的な零点からの角度 $\theta = \bar{\theta} + \delta\bar{\theta}$ として表される。ずれの角度 $\delta\bar{\theta}$ の値を書け (1.0 点)。

データ解析.

課題 2.5 適当な変数の選択

位相差 $\Delta\phi$ を見つける解析をするための $\bar{I}_p(\theta)$ あるいは $\bar{I}_o(\theta)$ を選び、用いる変数を明記せよ (0.5 点)。

課題 2.6 データ解析と位相差

- 課題 2.5 で定めた変数を用いて、 $\Delta\phi$ を見出すために表 II を完成せよ。角 θ に対して補正された値を用いよ。表 II に誤差を含めよ。グラフ用紙にそれらの変数をプロットせよ (1.0 点)。

- 位相差 $\Delta\phi$ を求めるのに必要な解析をせよ。誤差を含む結果を記せ。解析に使われる表式を書け。あなたが得た結果をグラフ用紙にプロットせよ。(1.75 点)。
- 位相差 $\Delta\phi$ を、誤差を含めてラジアン単位で計算せよ。区間 $[0, \pi]$ で位相差の値を求めよ(0.5 点)。

課題 2.7 複屈折率 $|n_1 - n_2|$ の計算

位相差 $\Delta\phi$ に $2N\pi$ (N は整数) を加えても、あるいは、位相の符号を変えても強度の値は変化しない。しかし、複屈折率の値 $|n_1 - n_2|$ は変化するであろう。こうして、課題 2.6 で求めた $\Delta\phi$ の値を用いて複屈折率の値を正しく計算するには、以下のことを考えなければならない。

$$L < 82 \times 10^{-6} \text{ m} \quad \text{ならば} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2|$$

あるいは、

$$L > 82 \times 10^{-6} \text{ m} \quad \text{ならば} \quad 2\pi - \Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2|$$

ここで、雲母平板の厚さ L の値は、それを取り付けてある円筒に書かれている。この数値は、マイクロメートル (1マイクロメートル = $1 \times 10^{-6} \text{ m}$) を単位としている。 $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ を L に対する誤差とせよ。レーザー光の波長については、問題 1 で求めた値、あるいは、 $620 \times 10^{-9} \text{ m}$ と $750 \times 10^{-9} \text{ m}$ の間の平均値 (可視光の赤色の波長) を用いよ。 L と λ の値および複屈折率 $|n_1 - n_2|$ を誤差を含めて書け。また、誤差を計算するのに用いた公式を記せ (1.0 点)。

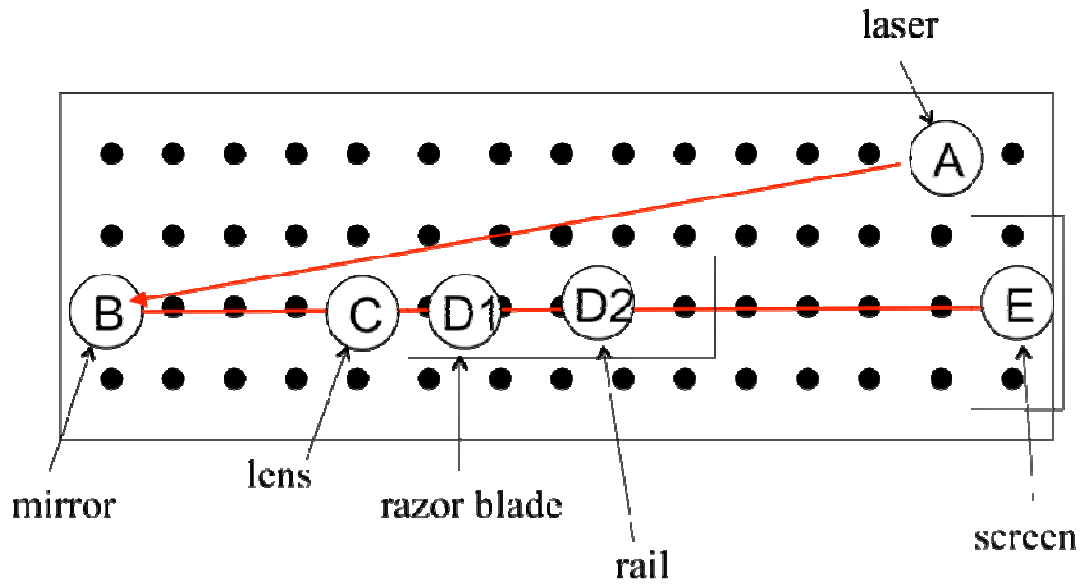
国際物理オリンピック2009 実験問題解答例

Answer Form

Experimental Problem No. 1

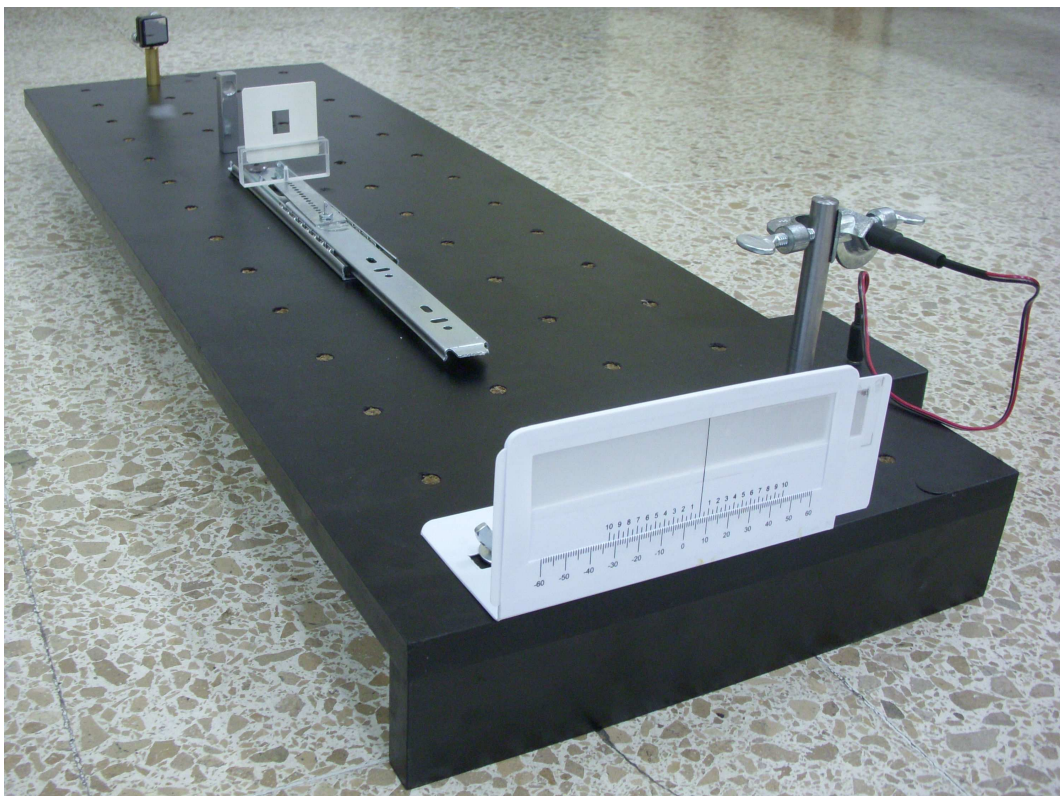
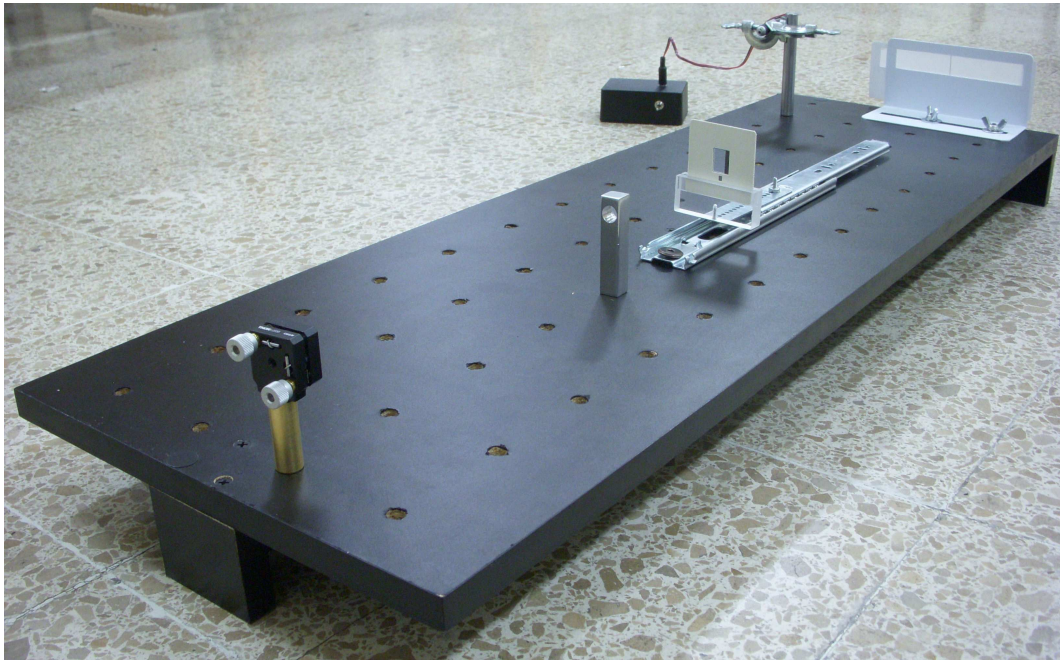
Diode laser wavelength

Task 1.1 Experimental setup.



(0.75)

1.1	Sketch the laser path in drawing of Task 1.1 and Write down the height h of the beam as measured from the table	1.0
	$h \pm \Delta h = (5.0 \pm 0.05) \times 10^{-2} \text{ m}$ (0.25)	



**Experimental setup for measurement of diode laser wavelength
Task 1.2 Expressions for optical path differences.**

1.2	<p>The path differences are</p> <p>Case I: (0.25)</p> $\Delta_I(n) = (BF + FP) - BP = (L_b - L_0) + \sqrt{L_0^2 + L_R^2(n)} - \sqrt{L_b^2 + L_R^2(n)}$ $= (L_b - L_0) + L_0 \sqrt{1 + \frac{L_R^2(n)}{L_0^2}} - L_b \sqrt{1 + \frac{L_R^2(n)}{L_b^2}}$ <p>using $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x$</p> $\approx (L_b - L_0) + L_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{L_R^2(n)}{L_0^2}\right) - L_b \left(1 + \frac{1}{2} \frac{L_R^2(n)}{L_b^2}\right)$ $\Rightarrow \Delta_I(n) \approx \frac{1}{2} L_R^2(n) \left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L_b}\right)$ <p>Case II: (0.25)</p> $\Delta_{II}(n) = (FB + BP) - FP = (L_0 - L_a) + \sqrt{L_a^2 + L_L^2(n)} - \sqrt{L_0^2 + L_L^2(n)}$ $\approx (L_0 - L_a) + L_a \sqrt{1 + \frac{L_L^2(n)}{L_a^2}} - L_0 \sqrt{1 + \frac{L_L^2(n)}{L_0^2}}$ <p>using $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x$</p> $\approx (L_0 - L_a) + L_a \left(1 + \frac{1}{2} \frac{L_L^2(n)}{L_a^2}\right) - L_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{L_L^2(n)}{L_0^2}\right)$ $\Rightarrow \Delta_{II}(n) \approx \frac{1}{2} L_L^2(n) \left(\frac{1}{L_a} - \frac{1}{L_0}\right)$	0.5
-----	--	-----

Task 1.3 Measuring the dark fringe positions and locations of the blade. Use additional sheets if necessary.

TABLE I

n	$(l_R(n) \pm 0.1) \times 10^{-3}$ m	$(l_L(n) \pm 0.1) \times 10^{-3}$ m	x_R	x_L
0	-7.5	1.1	0.791	0.935
1	-10.1	3.7	1.275	1.369
2	-12.4	6.4	1.620	1.696
3	-14.0	8.2	1.903	1.968
4	-15.6	10.0	2.151	2.208
5	-17.2	11.4	2.372	2.424
6	-18.4	12.2	2.574	2.622
7	-19.7		2.761	
8	-20.7		2.937	
9	-22.0		3.102	
10	-23.0		3.260	
11	-24.1		3.410	

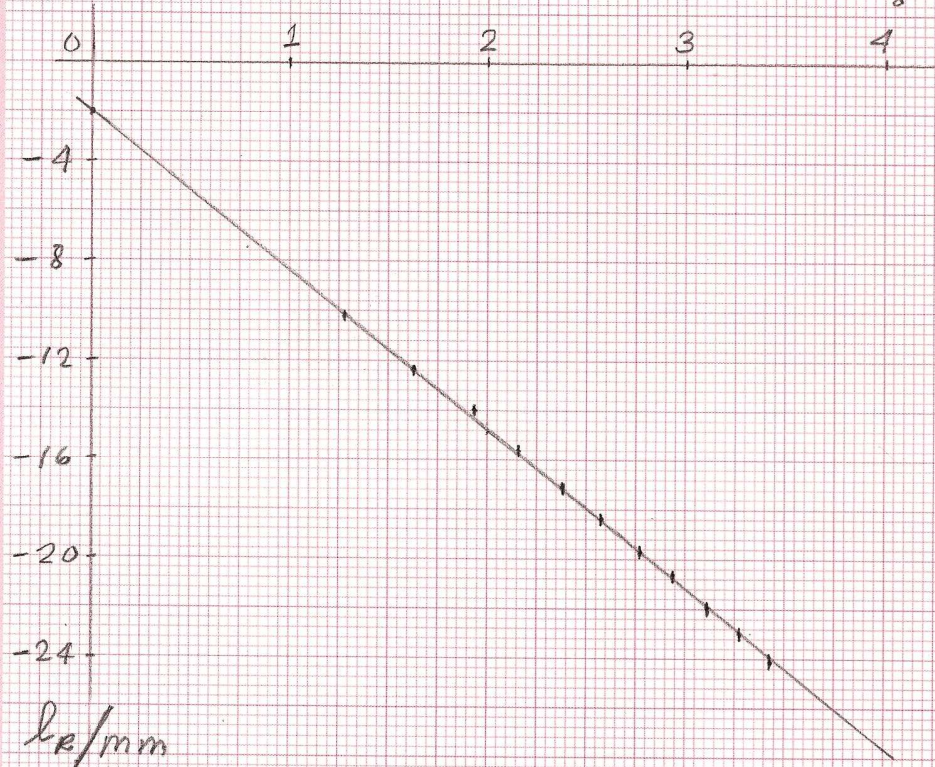
1.3	Report positions of the blade and their difference with higher precision: $L_b \pm \Delta L_b = (653 \pm 1) \times 10^{-3} \text{ m}$ (0.25) LABEL (I) (measuring tape) $L_a \pm \Delta L_a = (628 \pm 1) \times 10^{-3} \text{ m}$ (0.25) LABEL (I) (measuring tape) $d = L_b - L_a = (24.6 \pm 0.1) \times 10^{-3} \text{ m}$ (0.25) LABEL (H) (caliper)	3.25
-----	---	------

W

PINK 40th International Physics Olympiad
 Merida, Yucatan, Mexico, July 2009

Student code	Page No.	Total No. of pages

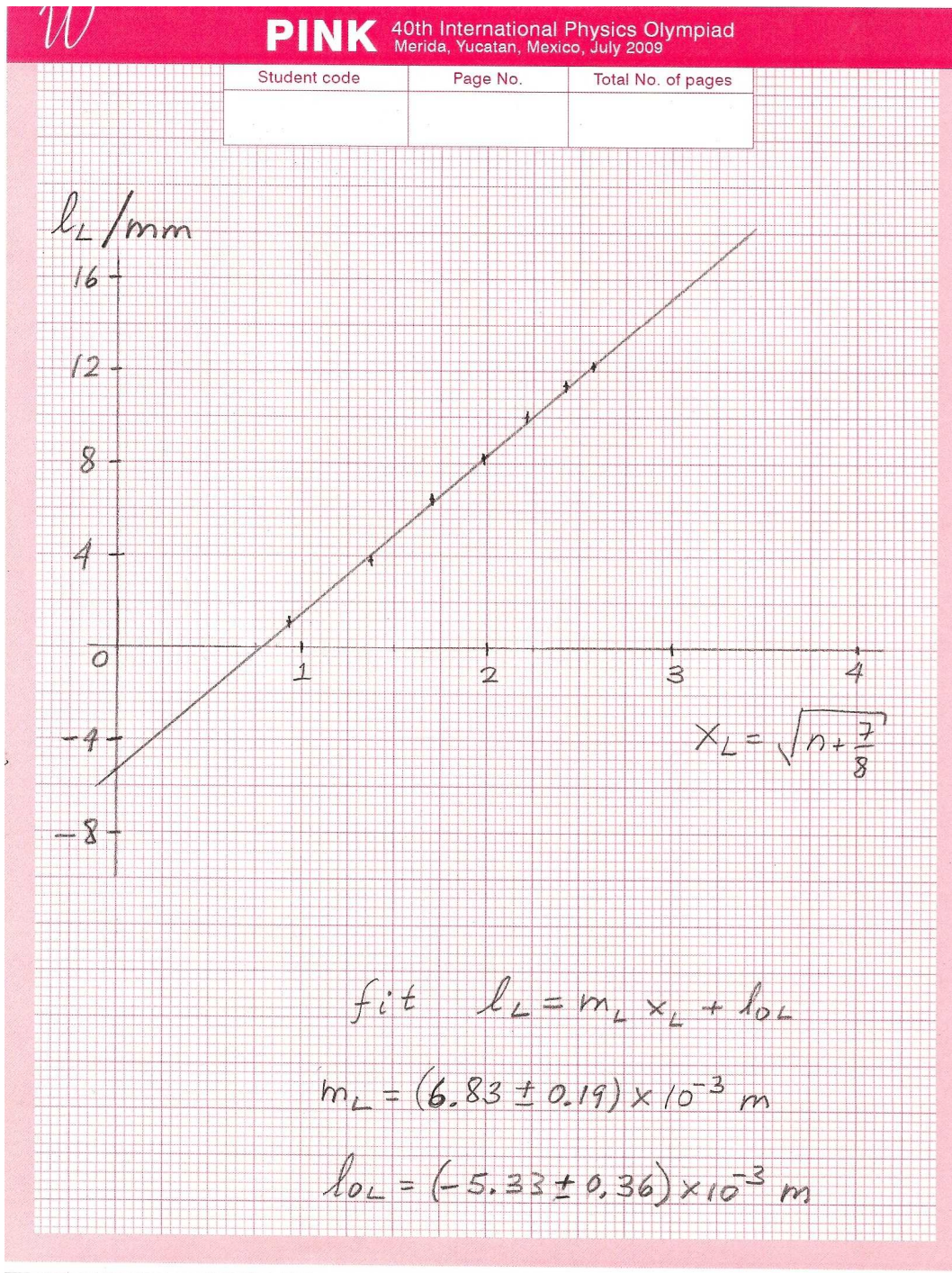
$$x_R = \sqrt{n + \frac{5}{8}}$$



$$\text{fit } l_R = m_R x_R + l_{0R}$$

$$m_R = (-6.39 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$l_{0R} = (-2.06 \pm 0.17) \times 10^{-3} \text{ m}$$



Task 1.4 Performing a statistical and graphical analysis.

1.4	<p>A procedure:</p> <p>From the condition of dark fringes and Task 1.2, we have</p> $\frac{1}{2}L_R^2(n)\left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L_b}\right) = \left(n + \frac{5}{8}\right)\lambda$ <p>and</p> $\frac{1}{2}L_L^2(n)\left(\frac{1}{L_a} - \frac{1}{L_0}\right) = \left(n + \frac{7}{8}\right)\lambda$ <p>Using (1.5), $L_R(n) = l_R(n) - l_{0R}$ and $L_L(n) = l_L(n) - l_{0L}$ we can rewrite</p> $\frac{1}{2}(l_R(n) - l_{0R})^2\left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L_b}\right) = \left(n + \frac{5}{8}\right)\lambda$ $\Rightarrow l_R(n) = \sqrt{\frac{2L_bL_0}{L_b - L_0}}\lambda\sqrt{n + \frac{5}{8}} + l_{0R}$ <p>and</p> $\frac{1}{2}(l_L(n) - l_{0L})^2\left(\frac{1}{L_a} - \frac{1}{L_0}\right) = \left(n + \frac{7}{8}\right)\lambda$ $\Rightarrow l_L(n) = \sqrt{\frac{2L_aL_0}{L_0 - L_a}}\lambda\sqrt{n + \frac{7}{8}} + l_{0L}$ <p>These can be cast as equations of a straight line, $y = mx + b$.</p> <p>Case I:</p> $y_R = l_R \quad x_R = \sqrt{n + \frac{5}{8}} \quad m_R = \sqrt{\frac{2L_bL_0}{L_b - L_0}}\lambda \quad b_R = l_{0R}$ <p>Case II:</p> $y_L = l_L \quad x_L = \sqrt{n + \frac{7}{8}} \quad m_L = \sqrt{\frac{2L_aL_0}{L_0 - L_a}}\lambda \quad b_L = l_{0L}$ <p>Perform least squares analysis of above equations. In Table I, we write down the values x_R and x_L.</p> <p>One finds:</p> $m_R \pm \Delta m_R = (-6.39 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ m}$	3.25
-----	---	------

	<p> $m_L \pm \Delta m_L = (6.83 \pm 0.19) \times 10^{-3} \text{ m}$ and (values of l_{0R} and l_{0L}) $l_{0R} \pm \Delta l_{0R} = b_R \pm \Delta b_R = (-2.06 \pm 0.17) \times 10^{-3} \text{ m}$ $l_{0L} \pm \Delta l_{0L} = b_L \pm \Delta b_L = (-5.33 \pm 0.36) \times 10^{-3} \text{ m}$ </p> <p>The equations used in the least squares analysis:</p> $m = \frac{N \sum_{n=1}^N x_n y_n - \sum_{n=1}^N x_n \sum_{n'=1}^N y_{n'}}{\Delta}$ $b = \frac{\sum_{n=1}^N x_n^2 \sum_{n'=1}^N y_{n'} - \sum_{n=1}^N x_n \sum_{n'=1}^N x_{n'} y_{n'}}{\Delta}$ <p>where</p> $\Delta = N \sum_{n=1}^N x_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N x_n \right)^2$ <p>with N the number of data points. The uncertainty is calculated as</p> $(\Delta m)^2 = N \frac{\sigma^2}{\Delta} \quad , \quad (\Delta b)^2 = \frac{\sigma^2}{\Delta} \sum_{n=1}^N x_n^2 \quad \text{with,}$ $\sigma^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{n=1}^N (y_n - b - m x_n)^2$ <p>REFERENCE: P.R. Bevington, <i>Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences</i>, McGraw-Hill, 1969.</p>	
--	---	--

Task 1.5 Calculating λ .

1.5	<p>From any slope and the value of L_0 one finds,</p> $\lambda = \frac{L_b - L_a}{2L_a L_b} \frac{m_R^2 m_L^2}{m_R^2 + m_L^2}$ <p>Using the suggestion to replace $d = L_b - L_a$, we can write</p>	2.0
-----	---	-----

$$\lambda = \frac{d}{2L_a L_b} \frac{m_R^2 m_L^2}{m_R^2 + m_L^2}$$

$$\lambda \pm \Delta\lambda = (663 \pm 25) \times 10^{-9} \text{ m}$$

The uncertainty may range from 15 to 30 nanometers.

A precise measurement of the wavelength is $\lambda \pm \Delta\lambda = (655 \pm 1) \times 10^{-9} \text{ m}$.

The formula for the uncertainty,

$$\Delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda}{\partial d}\right)^2 \Delta d^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial L_a}\right)^2 \Delta L_a^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial L_b}\right)^2 \Delta L_b^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial m_R}\right)^2 \Delta m_R^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial m_L}\right)^2 \Delta m_L^2}$$

one finds,

$$\frac{\partial\lambda}{\partial d} = \frac{\lambda}{d}, \quad \frac{\partial\lambda}{\partial L_b} = \frac{\lambda}{L_b}, \quad \frac{\partial\lambda}{\partial L_a} = \frac{\lambda}{L_a} \quad \text{and} \quad \frac{\partial\lambda}{\partial m_R} = \frac{2m_L^2}{m_R} \frac{\lambda}{m_L^2 + m_R^2}$$

and analogously for the other slope.

One can calculate directly these quantities. However, one may note that the errors due to L_a , L_b and d are negligible. Moreover, $m_R^2 \approx m_L^2$ and $L_a \approx L_b$. This implies,

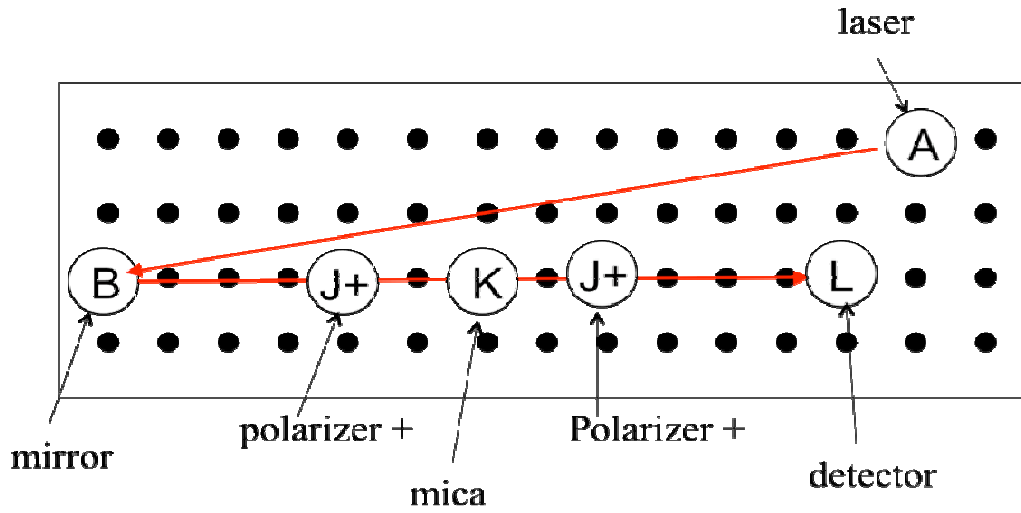
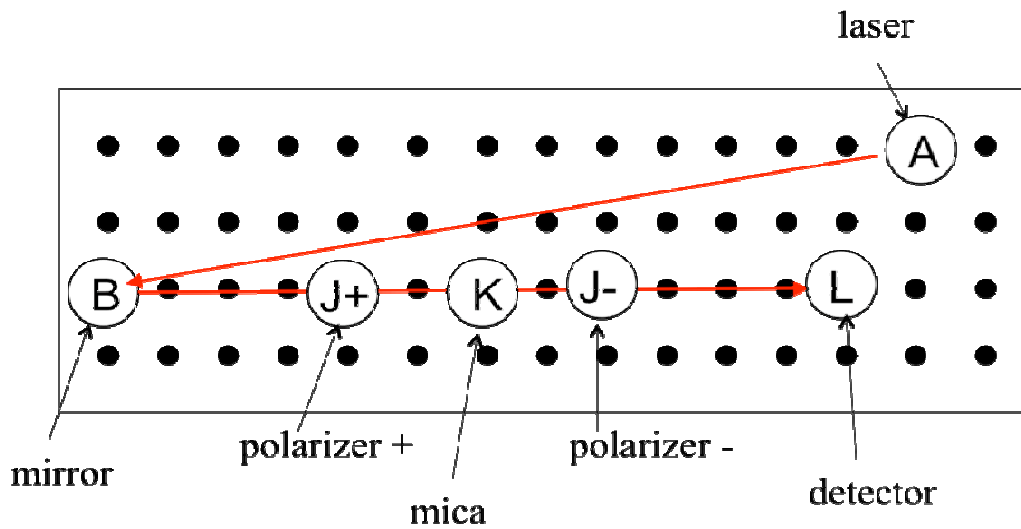
$$\frac{\partial\lambda}{\partial m_R} \approx \frac{\lambda}{m_R} \approx \frac{\partial\lambda}{\partial m_L}. \quad \text{Thus,}$$

$$\Delta\lambda \approx \sqrt{2} \frac{\lambda}{m_L} \Delta m_L \approx (25 \times 10^{-9}) \text{ m}$$

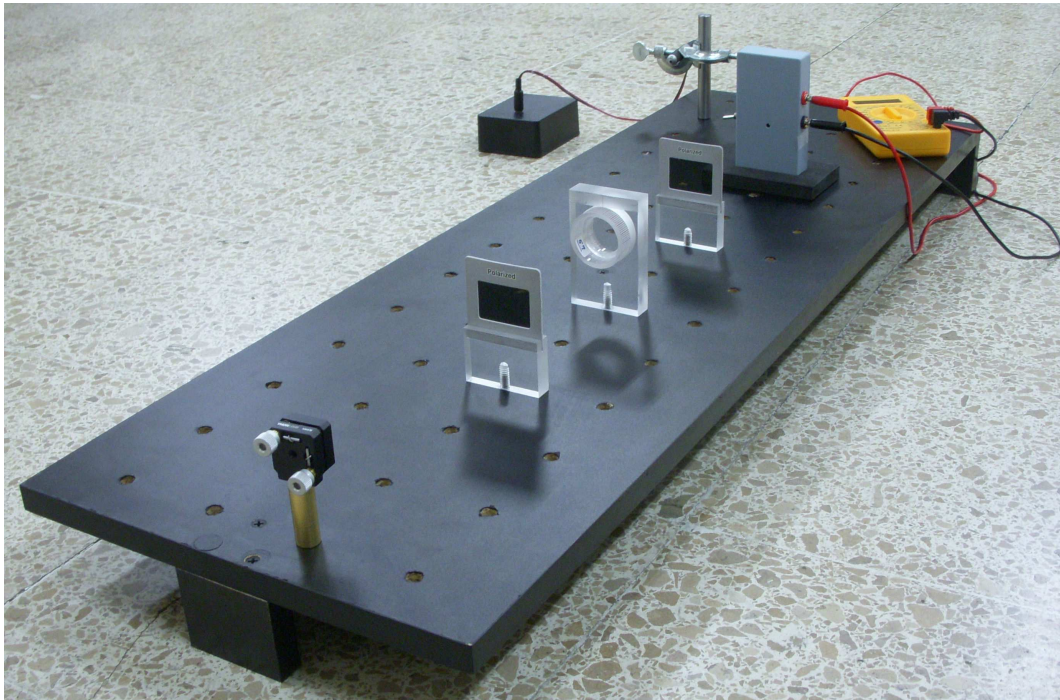
Answer Form

Experimental Problem No. 2

Birefringence of mica

Task 2.1 a) Experimental setup for I_p . (0.5 points)Task 2.1 b) Experimental setup for I_o . (0.5 points)

2.1		1.0
-----	--	-----



Experimental setup for measurement of mica birefringence

Task 2.2 The scale for angles.

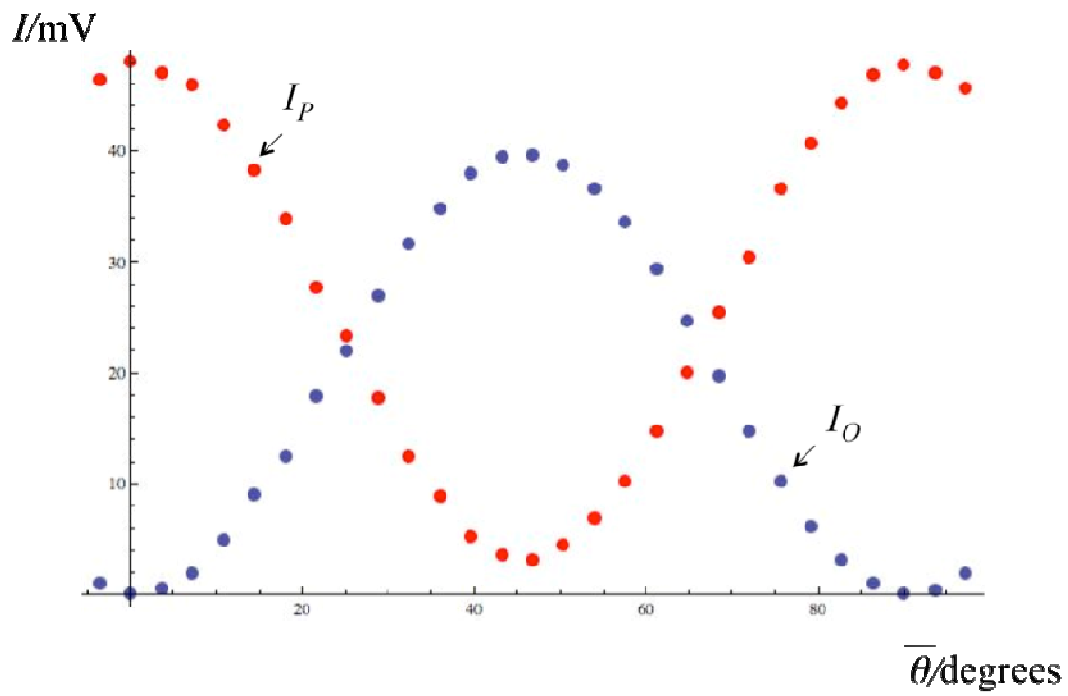
2.2	The angle between two consecutive black lines is $\theta_{\text{int}} = 3.6$ degrees because there are 100 lines.	0.25
-----	--	------

Tasks 2.3 Measuring I_p and I_o . Use additional sheets if necessary.

TABLE I (3 points)

$\bar{\theta}$ (degrees)	$(I_p \pm 1) \times 10^{-3}$ V	$(I_o \pm 1) \times 10^{-3}$ V
-3.6	46.4	1.1
0	48.1	0.2
3.6	47.0	0.6
7.2	46.0	2.0
10.8	42.3	4.9
14.4	38.2	9.0
18.0	33.9	12.5

21.6	27.7	17.9
25.2	23.4	22.0
28.8	17.8	27.0
32.4	12.5	31.7
36.0	8.8	34.8
39.6	5.2	38.0
43.2	3.6	39.4
46.8	3.2	39.6
50.4	4.5	38.7
54.0	6.9	36.6
57.6	10.3	33.6
61.2	14.7	29.4
64.8	20.1	24.7
68.4	25.4	19.7
72.0	30.5	14.7
75.6	36.6	10.2
79.2	40.7	6.1
82.8	44.3	3.2
86.4	46.9	1.0
90.0	47.8	0.2
93.6	47.0	0.4
97.2	45.7	2.0

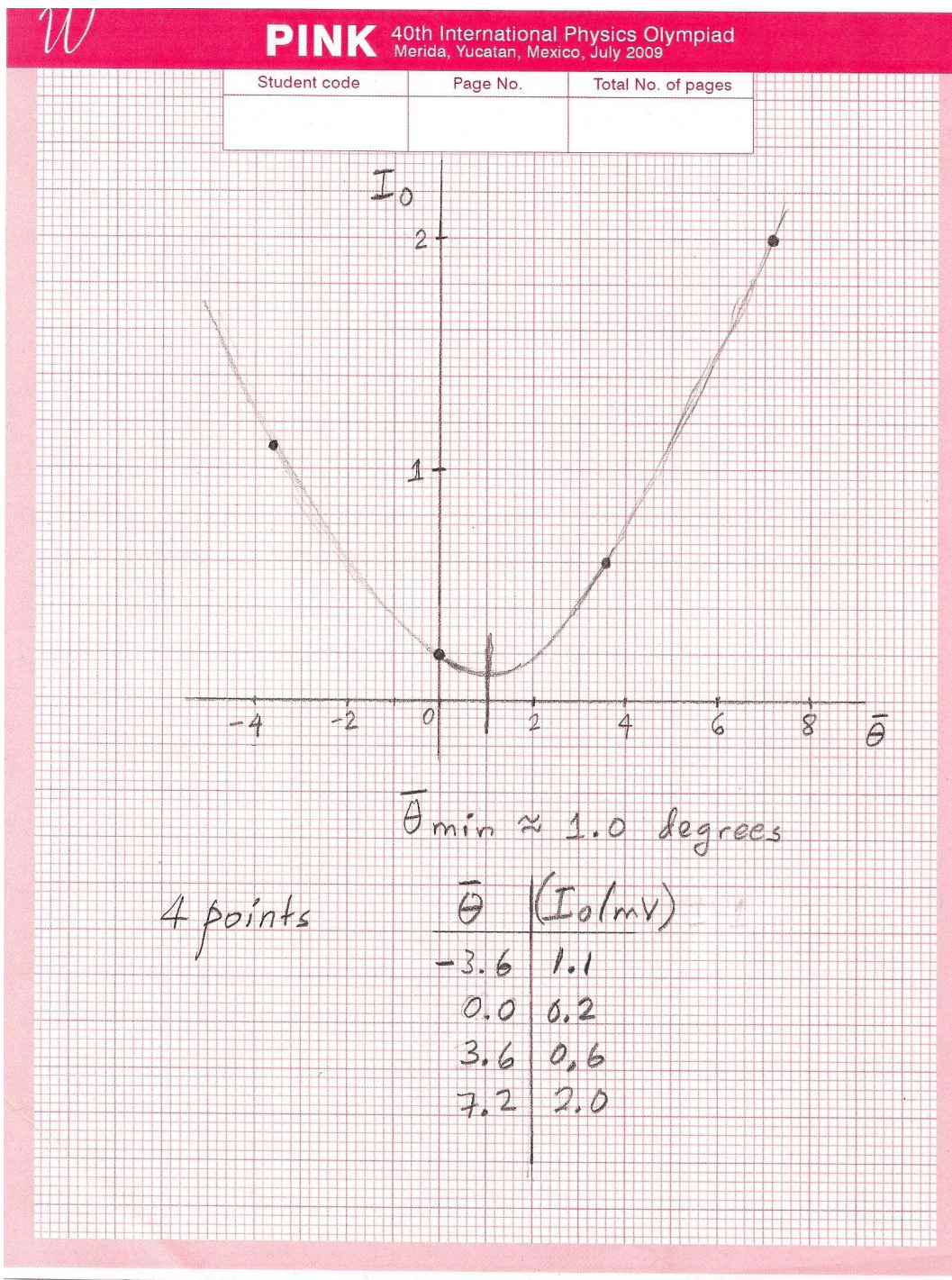


Parallel I_p and perpendicular I_o intensities vs angle $\bar{\theta}$.

GRAPH NOT REQUIRED!

Task 2.4 Finding an appropriate zero for θ .

2.4	<p>a) <i>Graphical analysis</i></p> <p>The value for the shift is $\delta\bar{\theta} = -1.0$ degrees.</p> <p>Add the graph paper with the analysis of this Task.</p> <p>b) <i>Numerical analysis</i></p> <p>From Table I choose the first three points of $\bar{\theta}$ and $I_o(\bar{\theta})$: (intensities in millivolts)</p> <p>$(x_1, y_1) = (-3.6, 1.1)$ $(x_2, y_2) = (0, 0.2)$ $(x_3, y_3) = (3.6, 0.6)$</p> <p>We want to fit $y = ax^2 + bx + c$. This gives three equations:</p> $1.1 = a(3.6)^2 - b(3.6) + c$ $0.2 = c$ $0.6 = a(3.6)^2 + b(3.6) + c$ <p>second in first $\Rightarrow b = \frac{-0.9 + a(3.6)^2}{3.6}$</p> <p>in third $\Rightarrow 0.6 = a((3.6)^2 + (3.6)^2) - 0.9 + 0.2$</p> $\Rightarrow a = 0.050 \quad b = -0.069$ <p>The minimum of the parabola is at:</p> $\bar{\theta}_{\min} = -\frac{b}{2a} \approx 0.7 \text{ degrees}$ <p>Therefore, $\delta\bar{\theta} = -0.7$ degrees.</p>	1.0
-----	---	-----



Task 2.5 Choosing the appropriate variables.

2.5	<p>Equation (2.4) for the perpendicular intensity is</p> $\bar{I}_o(\theta) = \frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\phi)\sin^2(2\theta)$ <p>This can be cast as a straight line $y = mx + b$, with</p> $y = \bar{I}_o(\theta) \quad , \quad x = \sin^2(2\theta) \quad \text{and} \quad m = \frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\phi)$ <p>from which the phase may be obtained.</p> <p>NOTE: This is not the only way to obtain the phase difference. One may, for instance, analyze the 4 maxima of either $\bar{I}_p(\theta)$ or $\bar{I}_o(\theta)$.</p>	0.5
-----	---	-----

Task 2.6 Statistical analysis and the phase difference.

2.6	<p>To perform the statistical analysis, we shall then use</p> $y = \bar{I}_o(\theta) \quad \text{and} \quad x = \sin^2(2\theta) \quad .$	1.0
-----	--	-----

	<p>Since for $\theta: 0 \rightarrow \frac{\pi}{4}$, $x: 0 \rightarrow 1$, we use only 12 pairs of data points to cover this range, as given in Table II.</p> <p>x may be left without uncertainty since it is a setting. The uncertainty in y may be calculated as</p> $\Delta \bar{I}_o = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{I}_o}{\partial I_o}\right)^2 \Delta I_o^2 + \left(\frac{\partial \bar{I}_o}{\partial I_p}\right)^2 \Delta I_p^2}$ <p>and one gets</p> $\Delta \bar{I}_o = \frac{\sqrt{I_o^2 + I_p^2}}{(I_o + I_p)^2} \Delta I_o \approx 0.018, \text{ approximately the same for all values.}$	
--	---	--

TABLE II

$\bar{\theta}$ (degrees)	$x = \sin^2(2\theta)$	$y = \bar{I}_o \pm 0.018$
2.9	0.010	0.013
6.5	0.051	0.042
10.1	0.119	0.104
13.7	0.212	0.191
17.3	0.322	0.269
20.9	0.444	0.392
24.5	0.569	0.484
28.1	0.690	0.603
31.7	0.799	0.717
35.3	0.890	0.798
38.9	0.955	0.880
42.5	0.992	0.916

2.6	<p>We now perform a least square analysis for the variables y vs x in Table II. The slope and y-intercept are:</p> $m \pm \Delta m = 0.913 \pm 0.012$ $b \pm \Delta b = -0.010 \pm 0.008$ <p>The formulas for this analysis are:</p>	1.75
-----	---	------

$$m = \frac{N \sum_{n=1}^N x_n y_n - \sum_{n=1}^N x_n \sum_{n'=1}^N y_{n'}}{\Delta}$$

$$b = \frac{\sum_{n=1}^N x_n^2 \sum_{n'=1}^N y_{n'} - \sum_{n=1}^N x_n \sum_{n'=1}^N x_{n'} y_{n'}}{\Delta}$$

where

$$\Delta = N \sum_{n=1}^N x_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N x_n \right)^2$$

with N the number of data points.

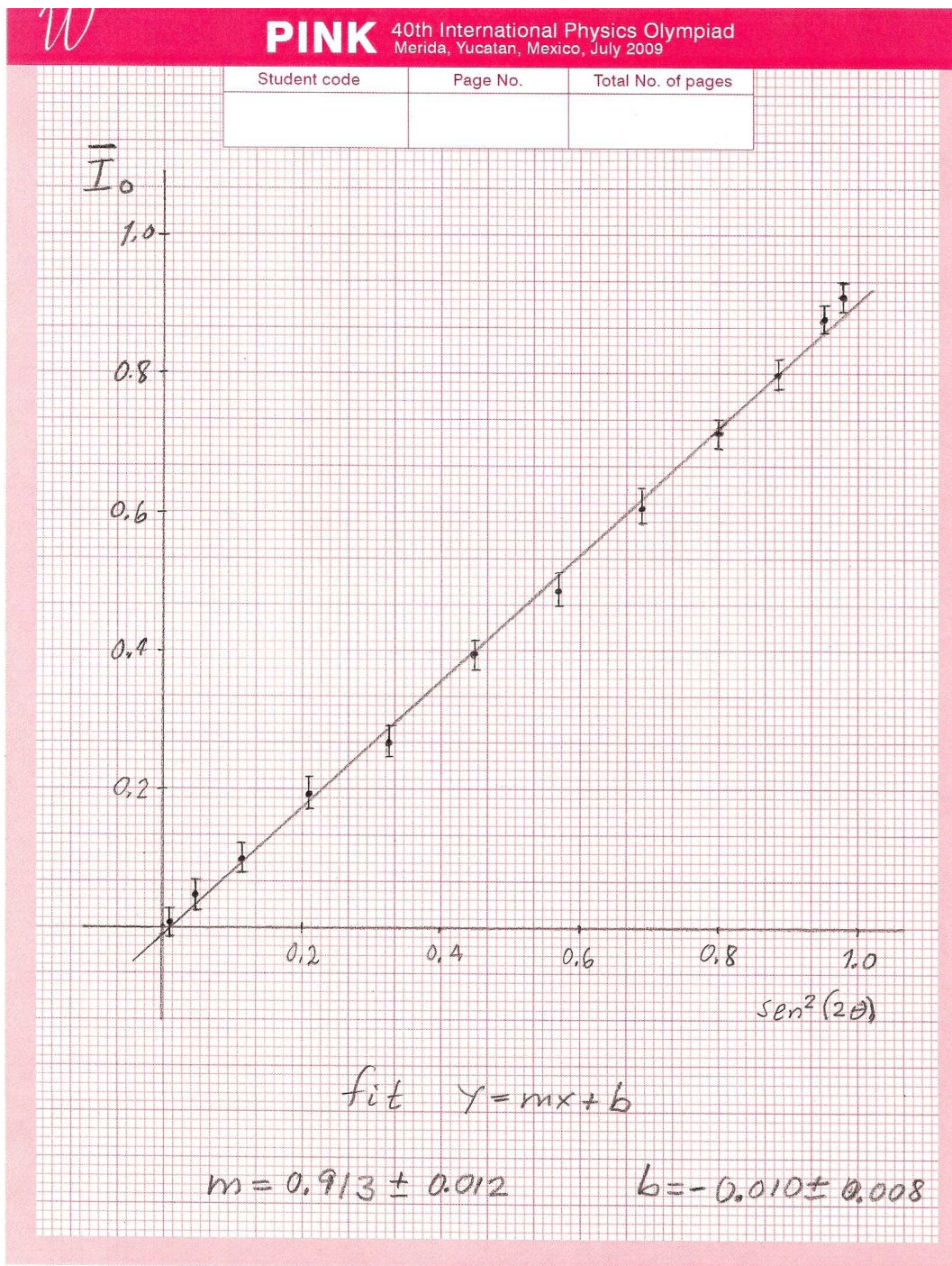
The uncertainty is calculated as

$$(\Delta m)^2 = N \frac{\sigma^2}{\Delta} \quad , \quad (\Delta b)^2 = \frac{\sigma^2}{\Delta} \sum_{n=1}^N x_n^2 \quad \text{with,}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{n=1}^N (y_n - b - m x_n)^2$$

with $N = 12$ in this example.

Include the accompanying plot or plots.



2.6	<p>Calculate the value of the phase $\Delta\phi$ in radians in the interval $[0, \pi]$.</p> <p>From the slope $m = \frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\phi)$, one finds</p> <p>$\Delta\phi \pm \Delta(\Delta\phi) = 2.54 \pm 0.04$</p> <p>Write down the formulas for the calculation of the uncertainty.</p> <p>We see that,</p>	0.5
-----	--	-----

	$\Delta m = \left \frac{\partial m}{\partial \Delta \phi} \right \Delta(\Delta \phi) = \frac{1}{2} \sin(\Delta \phi) \Delta(\Delta \phi), \text{ therefore, } \Delta(\Delta \phi) = \frac{2\Delta m}{\sin(\Delta \phi)}.$	
--	---	--

Task 2.7 Calculating the birefringence $|n_1 - n_2|$.

2.7	<p>Write down the width of the slab of mica you used,</p> $L \pm \Delta L = (100 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ m}$ <p>Write down the wavelength you use,</p> $\lambda \pm \Delta \lambda = (663 \pm 25) \times 10^{-9} \text{ m (from Problem 1)}$ <p>Calculate the birefringence</p> $ n_1 - n_2 \pm \Delta n_1 - n_2 = (3.94 \pm 0.16) \times 10^{-3}$ <p>The birefringence is between 0.003 and 0.005. Nominal value 0.004</p> <p>Write down the formulas you used for the calculation of the uncertainty of the birefringence.</p> <p>Since the width $L > 82$ micrometers, we use</p> $2\pi - \Delta \phi = \frac{2\pi L}{\lambda} n_1 - n_2 $ <p>The error is</p> $\Delta n_1 - n_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial n_1 - n_2 }{\partial \lambda} \right)^2 \Delta \lambda^2 + \left(\frac{\partial n_1 - n_2 }{\partial L} \right)^2 \Delta L^2 + \left(\frac{\partial n_1 - n_2 }{\partial \Delta \phi} \right)^2 \Delta(\Delta \phi)^2}$ $\Delta n_1 - n_2 = \sqrt{\left(\frac{ n_1 - n_2 }{\lambda} \right)^2 \Delta \lambda^2 + \left(\frac{ n_1 - n_2 }{L} \right)^2 \Delta L^2 + \left(\frac{\lambda}{2\pi L} \right)^2 \Delta(\Delta \phi)^2}$	1.0
-----	---	-----

Since the data may appear somewhat disperse and/or the errors in the intensities may be large, a graphical analysis may be performed.

In the accompanying plot, it is exemplified a simple graphical analysis: first the main slope is found, then, using the largest deviations one can find two extreme slopes.

The final result is,

$$m = 0.91 \pm 0.08 \quad \text{and} \quad b = -0.01 \pm 0.04$$

The calculation of the birefringence and its uncertainty follows as before. One now finds,

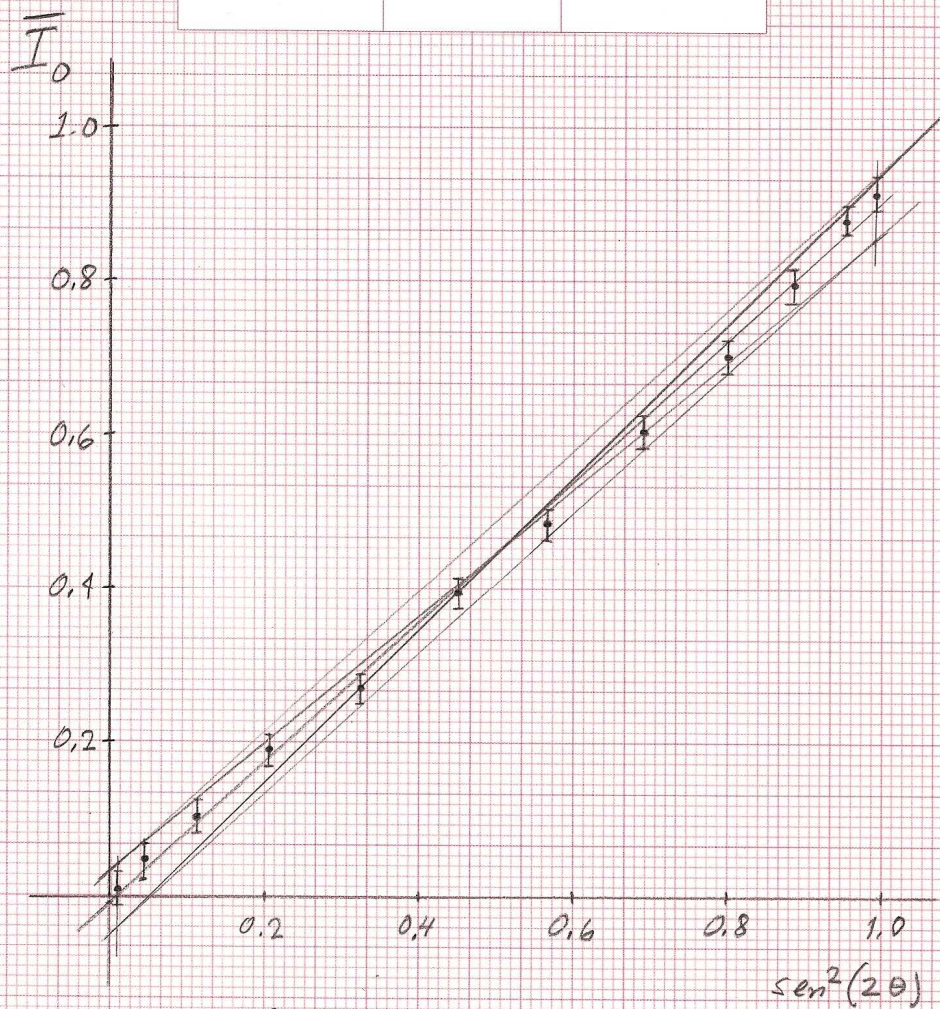
$$|n_1 - n_2| \pm \Delta|n_1 - n_2| = (3.94 \pm 0.45) \times 10^{-3}.$$

A larger (more realistic) error.

W

PINK 40th International Physics Olympiad
Merida, Yucatan, Mexico, July 2009

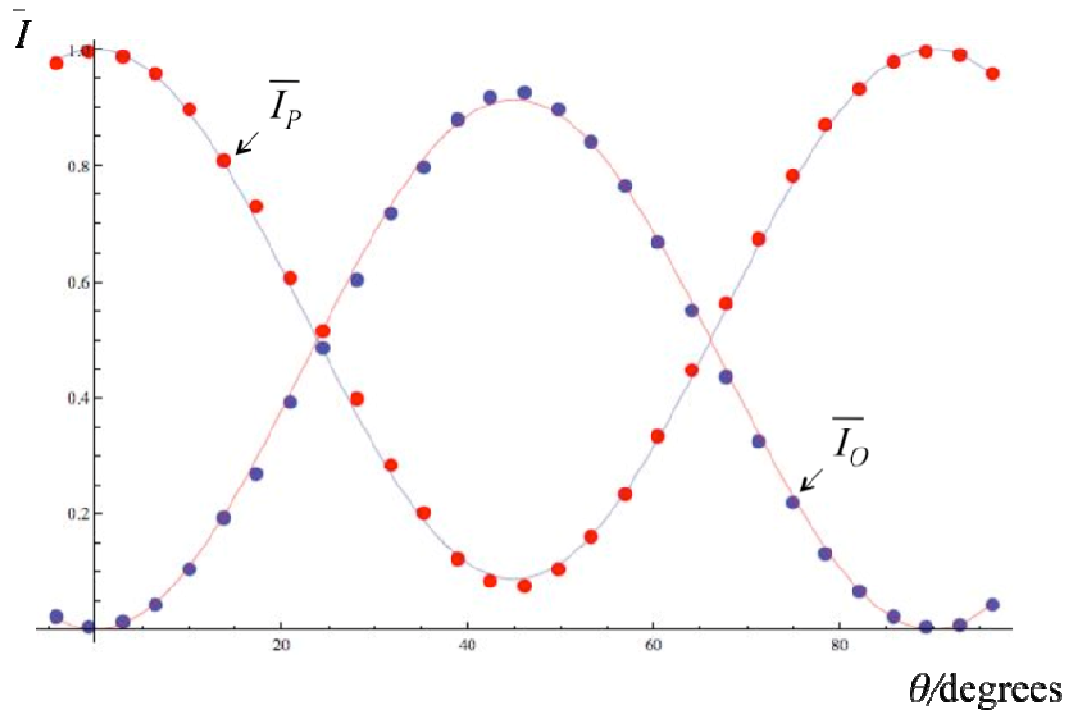
Student code	Page No.	Total No. of pages



Graphical analysis

$$m = 0.91 \pm 0.08$$

$$b = -0.01 \pm 0.04$$



Comparison of experimental data (normalized intensities \bar{I}_p and \bar{I}_o) with fitting (equations (2.3) and (2.4)) using the calculated value of the phase difference $\Delta\phi$.

GRAPH NOT REQUIRED!

実験問題 1

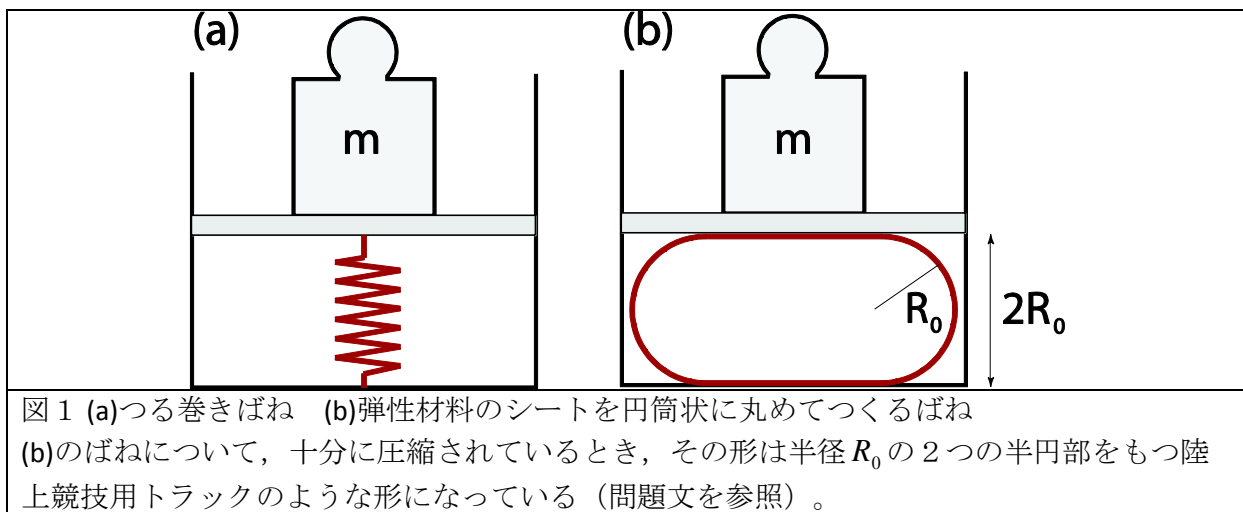
実験問題は2問である。机の上にある実験器具は両方の問題に共通である。試験時間は2問で5時間である。

実験問題 1: シートの弾性

導入

ばねは、力学的エネルギーを蓄える弾性的な性質を持つ材料（弾性材料）からできている。普通のつる巻きばねに働く力は、つり合いの位置から押し戻された変位に比例する（線形）というフックの法則で表される。すなわち、 $F = -k\Delta x$ である。ここで F は押す力、 k はばね定数、 Δx はつり合い（平衡）の位置からの変位を表す（図1(a)）。

しかし、いろいろな弾性ばねは普通のつる巻きばねとはまったく異なった形状をしているばかりか、変形が大きくなるとフックの法則は適用できない。この問題では、図1(b)に示すような、弾性材料のシートでつくった弾性ばねの性質を調べる。



透明シートを巻いた円筒ばね

弾性材料でできたシート（ここでは、透明シート）を曲げたものを考える。これをさらに曲げると、さらに大きな弾性エネルギーがシートに蓄えられる。この弾性エネルギーは、シートの曲率（曲がりぐあい）に依存する。シートの曲率の大きな部分は、より多くのエネルギーを蓄える（シートの平らな部分はエネルギーを蓄えない）。

この実験で用いるばねは、長方形の透明なシートを図2のように、円筒状に丸めてつくる。この円筒ばねに蓄えられるエネルギーは、

$E_{el} = \frac{\kappa}{2} \frac{1}{R_c^2} A$	(1)
---	-----

で表される。

ここで、 A は円筒ばねの曲率を持った側面の面積（円形の底面は含まれない）、 R_c は円筒ばねの曲率半径、 κ は曲げ難さを表す係数で、材質の弾性的な性質と、シートの厚みによって決まる。

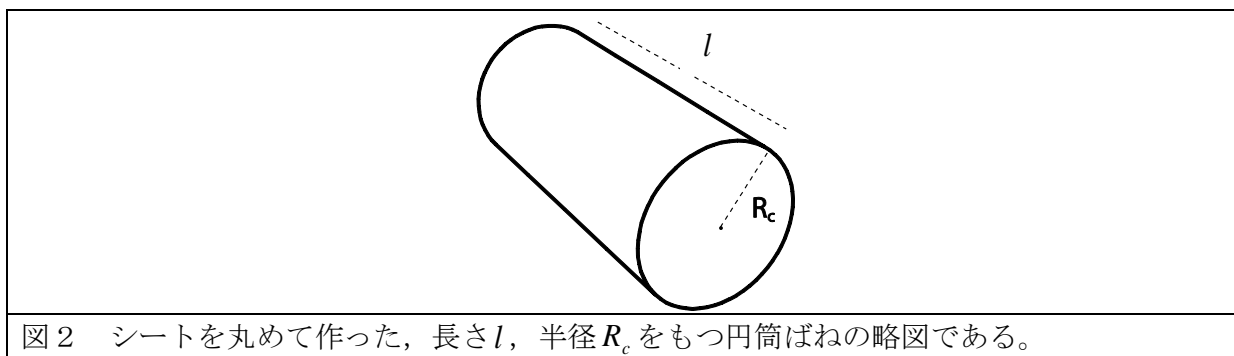


図2 シートを丸めて作った、長さ l 、半径 R_c をもつ円筒ばねの略図である。

図1(b)のように、円筒ばねが圧縮されているものを考える。おもりによって与えられた押す力(F)に対して、平衡状態からの変位は透明なシートの弾性に依存する。押す力を一定の間隔で変化させていくと、圧縮された透明なシートの形は陸上競技用トラックのようになり、その断面の周りは2つの直線と2つの半円周（半径 R_0 ）からなる。圧縮された系のエネルギーが最小となるのは

$R_0^2 = \frac{l\kappa\pi}{2F}$	(2)
---------------------------------	-----

で表される。

力は、電子天秤で測定した質量 m から、 $F = mg$ を用いて求める。ここで重力加速度は、 $g = 9.81\text{m/s}^2$ とする。

実験手順 (実験問題 1)

実験問題1で使用する実験道具は以下のとおりである。

1. ブロック（石）のおもりを載せた圧縮用の板、必要であればカバーシートの説明を読みなさい。
2. 電子天秤（5000gまで計測可能であり、ゼロ点に補正する機能がある。電子天秤の上に、下の圧縮板と曲げたシートを載せ、上の圧縮板がシートに接触する前にゼロ補正するとき用いる。もし必要であれば、カバーシートの説明を読みなさい。）
3. 透明なシート3枚（シートは21cm×29.7cmである。厚み200 μm の青いシート（2枚）、厚み150 μm の無色のシート（1枚）がある。）
シートがさらに必要な場合は、スタッフに頼みなさい。
4. セロテープ（scotchテープ）
5. はさみ
6. 目盛付きの三角定規

7. 長方形の木製の板（木製の板は電子天秤の上に置かれており，透明なシートはこの木製の板の上に置く。）

図 3 に実験の完成図があるように，おもりは太いネジの近くに，シートののりしろ部分が底辺の中央にくるようにして，下の圧縮板中央に置きなさい。上にある圧縮用の板は留めねじで上下に動くようになっている。圧縮することによってかかる力（質量）はおもりで測定することができる。

重要：留めねじは 360 度回転させると 2mm 動く。

細いアルミニウムの棒は実験問題 1 では使わない。

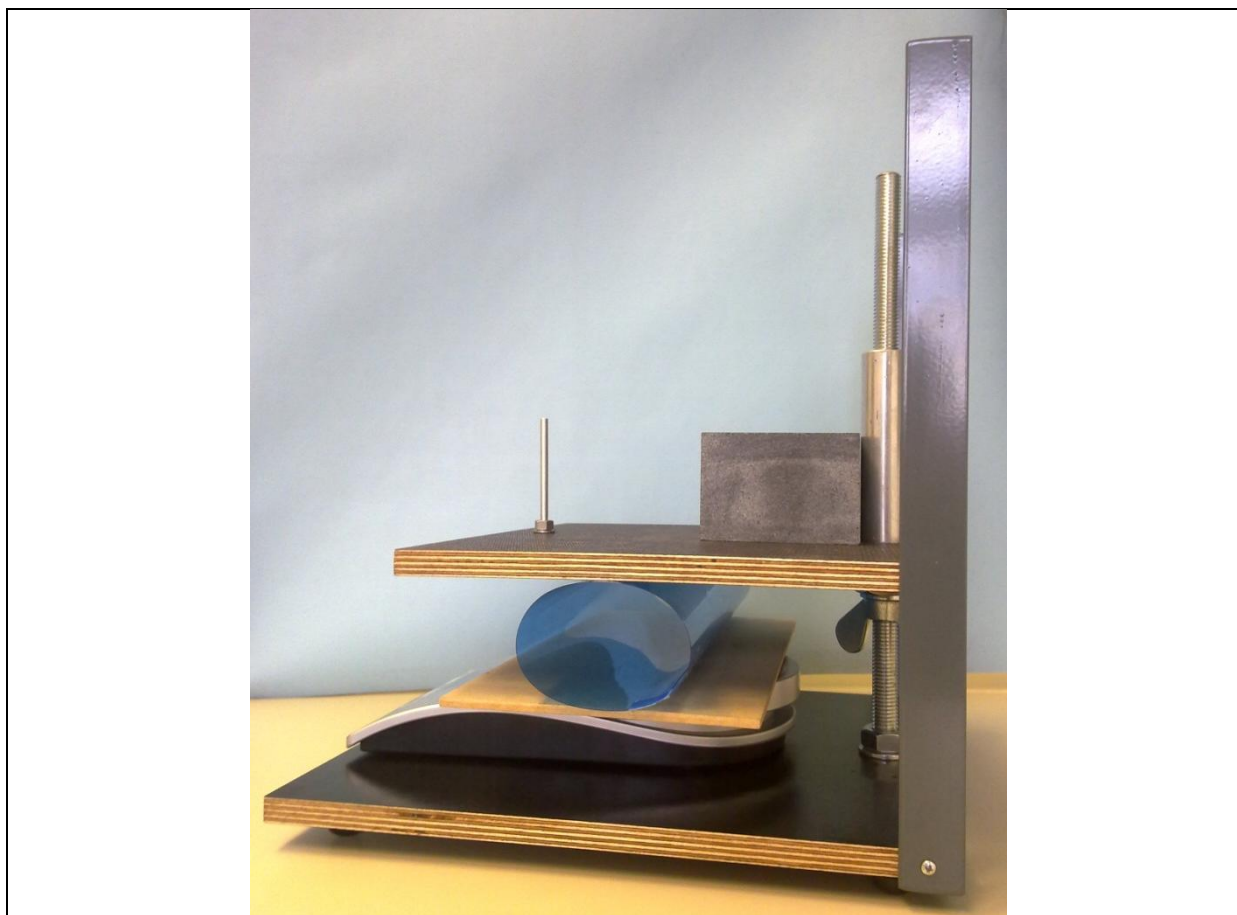


図 3 曲げ難さの係数の測定のための実験装置の完成写真。

問

- 青いシートを筒状に巻きなさい。1 つは長い辺が側面になるように巻き，もう 1 つは短い辺が側面になるように巻きなさい。のりしろ部分の長さ l の辺をセロテープで固定しなさい。ただし，シート同士ののりしろ幅は 0.5cm としなさい。
 - 上下の圧縮板間の距離と電子天秤の読み（質量）を測定して，表にしなさい。この測定を，縦巻きと横巻きの青いシートについて実験を行いなさい。ただし，青いシートが 1 枚しかない場合，もう 1 枚をスタッフに要求しなさい。 (1.9 点)
 - 実験結果を，本文にある式を参考に，縦軸と横軸に適切な値を取って直線となる

グラフに描きなさい。このグラフから、筒状シートの曲げ難さを表す係数 κ を求めなさい。その際、定規を用い、図に直線を書き入れ、その傾きを利用しなさい。巻き方の異なる青いシート各々の場合について κ を求めなさい。

グラフが直線になっている領域を丸で囲みなさい。この領域において、 $\frac{R_0}{R_c}$ の比を見積もりなさい。ここで、 R_c はおもりがないときの筒状シートの半径である。
(4.3 点)

この実験では、誤差の見積もりは必要ない。

- 無色のシートを、短い辺が側面となるように巻いて、曲げ難さを表す係数 κ を求めなさい。
(2.8 点)
- 曲げ難さを表す係数 κ は、ヤング率 Y (均質な物質の弾性率を表す)、透明なシートの厚み d で決まり、次の式にしたがう。

$\kappa = \frac{Yd^3}{12(1-\nu^2)}$	(3)
-------------------------------------	-----

ここで ν は材質のポアソン比であり、多くの物質は $\nu \approx 1/3$ である。これらの実験結果から、青いシートと無色のシートのヤング率を求めなさい。
(1.0 点)

実験問題 2

実験問題は 2 問である。机の上にある実験器具は両方の問題に共通である。試験時間は 2 問で 5 時間である。

実験問題 2: 2 つの磁石に働く力, 安定性と対称性の概念

導入

面積 S の円形回路を流れる円電流 I は $m = IS$ の大きさの磁気モーメントを生み出す (図 1 (a))。永久磁石は、鉄原子(Fe)の持つ小さな磁気モーメントの集まりと考えることができる。そして、それぞれは円電流の作る磁気モーメントとみなせる。この磁石についてのアンペールのモデルを、図の 1(b)に示した。磁石の磁気モーメントの合計は、S 極から N 極へ点在する小さな磁気モーメントの和である。

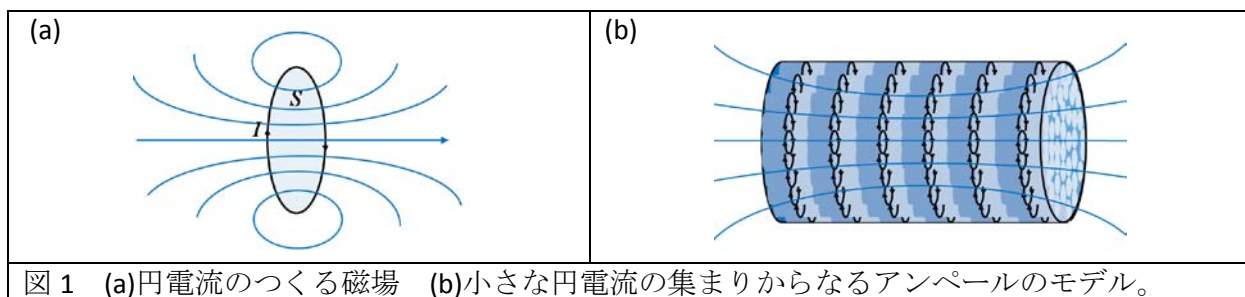


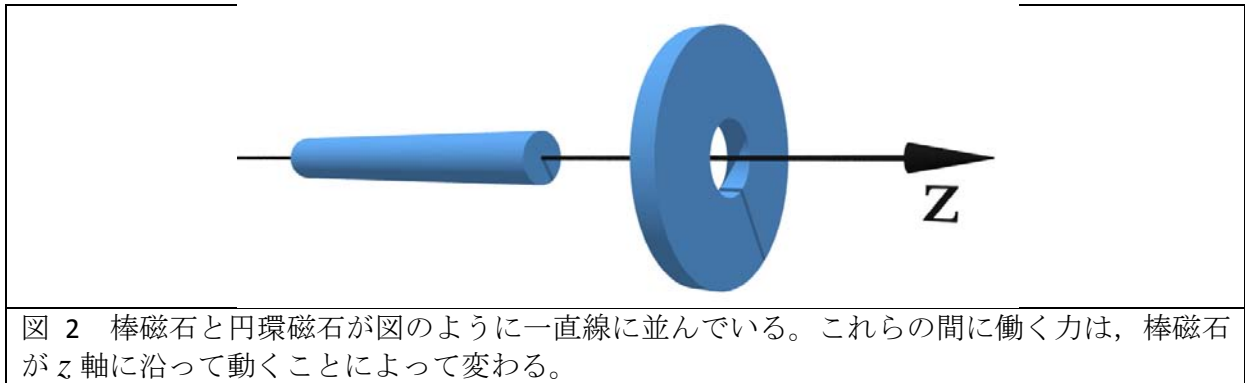
図 1 (a)円電流のつくる磁場 (b)小さな円電流の集まりからなるアンペールのモデル。

磁石の間に働く力

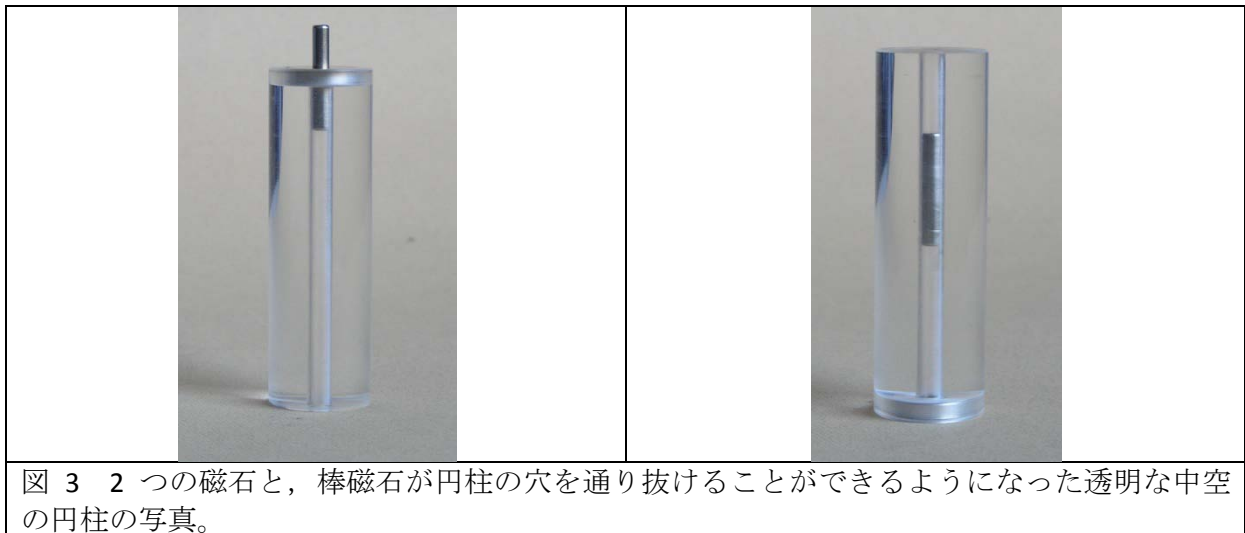
2 つの磁石の間に働く力を計算することは、難問である。2 つの磁石の同極は反発し、異極は引き合うことは知られている。2 つの閉じた電流間に働く力は、そこを流れる電流の強さ、形状、相互の距離に依存する。もし、その閉じた回路の 1 つを流れる電流の向きを反対にした場合、働く力の大きさは変わらないが向きが正反対になる。

この問題では、円環磁石と棒磁石の 2 つの磁石間に働く力を実験的に詳細に調べる。図 2 のように、幾何学的に 2 つの磁石の対称軸が一致する場合は興味深い。棒磁石は、 z 軸に沿って左側から、円環磁石を通過し、右側へ向かって動くことができる。

以下の問題では、磁石間に働く力を z の関数として見積もりなさい。2 つの磁石の中心が一致する場合を、原点 $z = 0$ としなさい。



対称軸 (z 軸) に沿って動く棒磁石の運動方向を保持するために、 z 軸に沿って細い穴があけられている透明な円柱に、円環磁石がしっかりと埋め込まれている。棒磁石は、図 3 のように、その穴の中心を貫く z 軸に沿ってのみ動く。その棒磁石は、 z 軸に沿って磁化している。



実験手順 (実験問題 2)

実験問題 2 で使用する実験道具は以下のとおりである。

1. ブロック (石) のおもりを載せた圧縮板。必要であればカバーシートの説明を読みなさい。
2. 電子天秤 (5000g まで計測可能であり、ゼロ点に補正する機能がある。もし必要であれば、カバーシートの説明を読みなさい。)
3. 端に円環磁石が埋め込まれた透明な中空円柱
4. 棒磁石
5. 細い木製の棒 (円柱から棒磁石を取り出すのに用いる。)

図4に示す装置は、磁石間に働く力を測定するために用いられる。上の板は上下を裏返し、細いアルミニウムの棒を下にせよ。細いアルミニウムの棒は、中空円柱に棒磁石を押し込むのに必要である。電子天秤で、棒磁石を押しこむ力（質量）を計測する。上の圧縮板は留めねじを用いて上下に動かすことができる。

重要：留めねじは 360 度回転させると 2mm 動く。

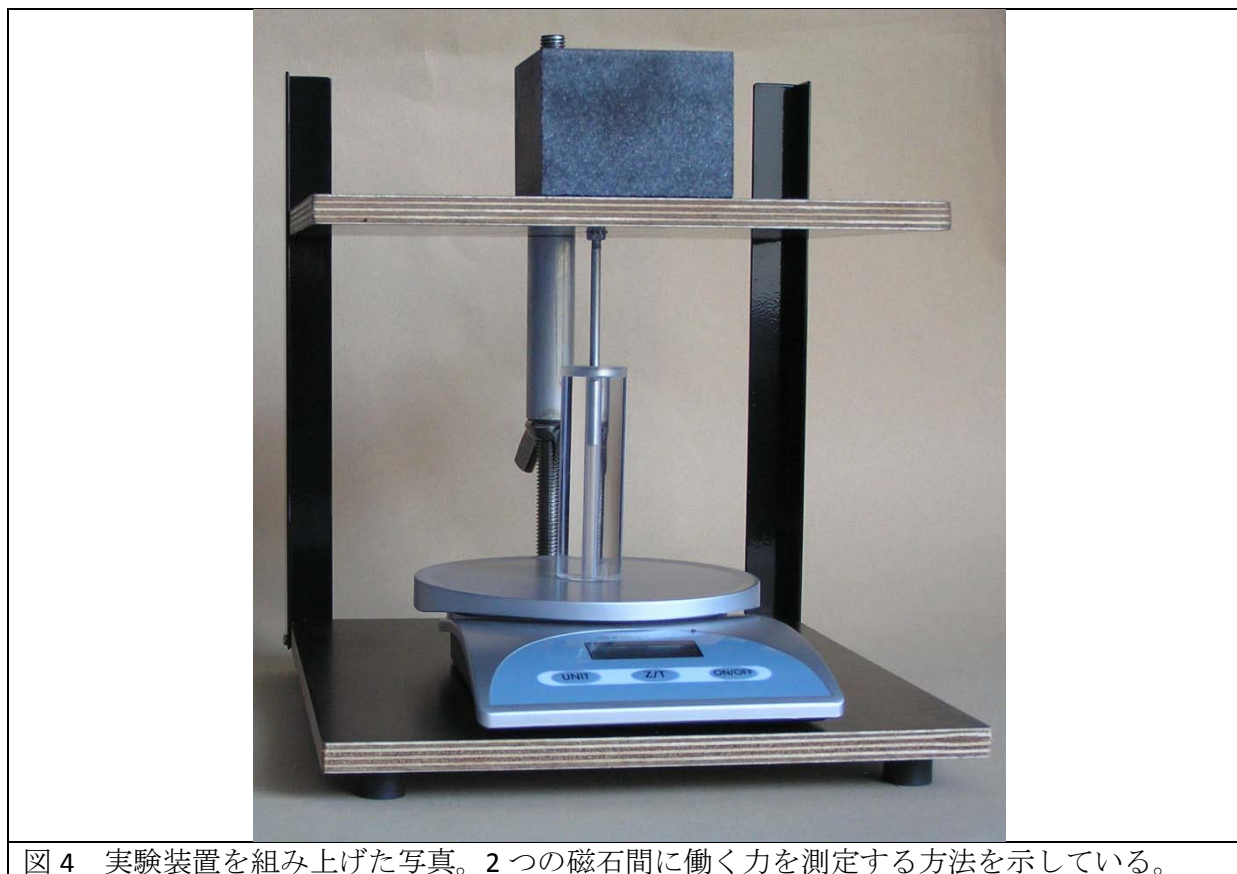


図4 実験装置を組み上げた写真。2つの磁石間に働く力を測定する方法を示している。

問

- ここでは、中空円柱を手で水平に持ち、木の棒を用いて実験しなさい。図2のように、 z 軸が水平になっていると仮定して、2つの磁石がつり合う全ての位置関係を、実験を行うことによって決定し、解答用紙に図示しなさい。そして、安定 (S) または不安定 (U) を示すラベルに丸を付けなさい。安定点では、磁石に少し力を加えても元に戻る。 (2.5点)
- まず、中空円柱に磁石を入れた状態で、ゼロ点補正しなさい。次に、図4の装置を用いて、 z 座標の関数として2つの磁石の間に働く力を決定しなさい。 z 軸の正の向きを、透明な中空円柱の中に向かう向きとする（正の方向へ向かうとき、力も正とする。）。

力の対称性を見つけたら、解答用紙に力に関する式で書きなさい。磁気モーメントの配置が平行同じ向きのときは $F_{\uparrow\uparrow}(z)$ で示し、平行逆方向きのときは $F_{\uparrow\downarrow}(z)$ で示せ。

重要：棒磁石の質量は無視（働く重力も無視）せよ。そして、磁石間に働く力の対称性を利用して、グラフの異なる領域に同じ測定値を用いなさい。

測定値は、全て解答用紙に書きなさい。その際、実験値を記した表には、それぞれ、どのような磁石の向きと位置で実験したのかも合わせて図示しなさい。（例が挙げられている。） (3.0 点)

3. 問 2 の実験結果から、 $z > 0$ での $F_{\uparrow\uparrow}(z)$ の z 依存性をミリ単位のグラフに描き入れなさい。

曲線 $F_{\uparrow\uparrow}(z)$ と $F_{\uparrow\downarrow}(z)$ の形を (z 軸の正負の領域にわたって) 図示しなさい。それぞれのグラフについて、安定なつり合いの位置を点で書き入れ、問 1 と同様にその磁石の向きと位置を図示しなさい。 (4.0 点)

4. z 軸を鉛直方向にとる。棒磁石の質量を考えると、本質的に新たな安定なつり合いの位置が現れるだろうか。もし現れる場合は、新たに現れるすべての場合を、問 1 と同様に、図で示しなさい。 (0.5 点)

Solution: Exp. problem 1

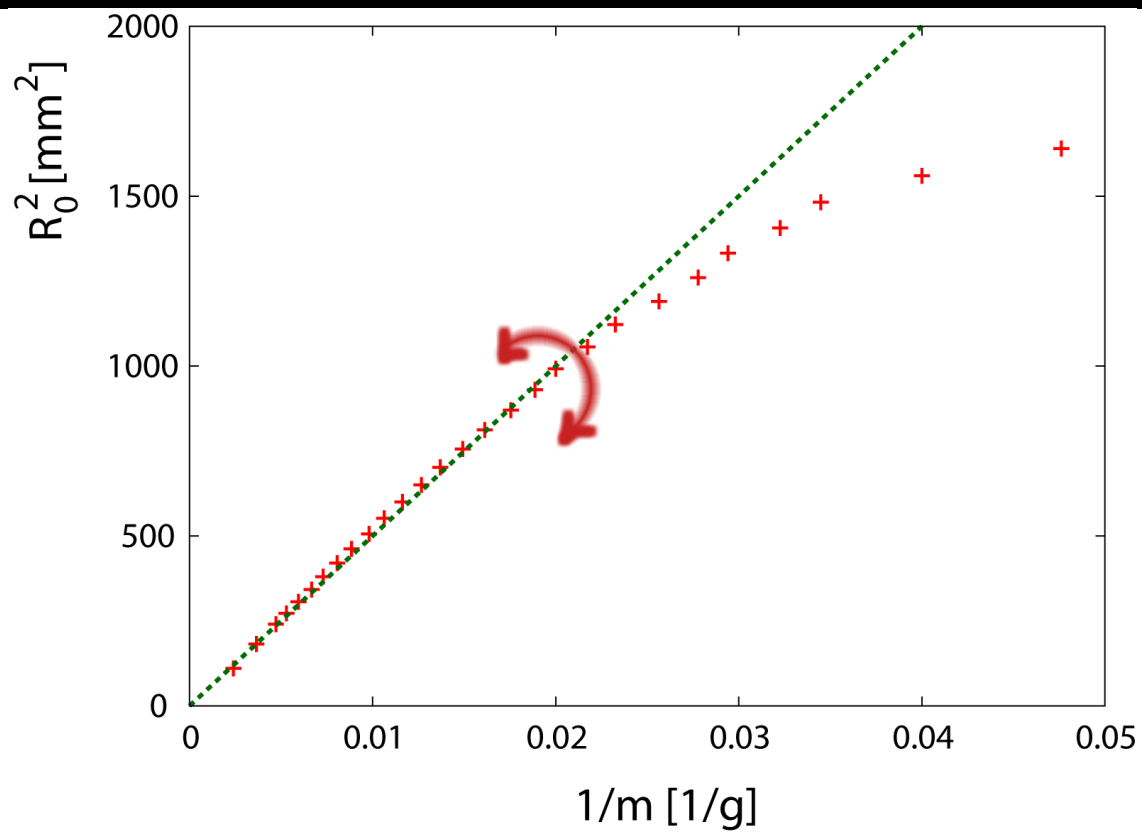
Task 1			Points
(a)	m[g]	R₀[mm]	0.95
	21	40.5	
	25	39.5	
	29	38.5	
	31	37.5	
	34	36.5	
	36	35.5	
	39	34.5	
	43	33.5	
	46	32.5	
	50	31.5	
	53	30.5	
	57	29.5	
	62	28.5	
	67	27.5	
	73	26.5	
	79	25.5	
	86	24.5	
	94	23.5	
	102	22.5	
	113	21.5	
	124	20.5	
	137	19.5	
	150	18.5	
	168	17.5	
	189	16.5	
	212	15.5	
	274	13.5	
	417	10.5	

Task 1	Points																																																										
(a)	0.95																																																										
<table border="1"><thead><tr><th>m[g]</th><th>R₀[mm]</th></tr></thead><tbody><tr><td>40</td><td>29.9</td></tr><tr><td>42</td><td>29.8</td></tr><tr><td>45</td><td>29.6</td></tr><tr><td>47</td><td>29.4</td></tr><tr><td>50</td><td>29.3</td></tr><tr><td>52</td><td>29.1</td></tr><tr><td>54</td><td>28.9</td></tr><tr><td>57</td><td>28.8</td></tr><tr><td>59</td><td>28.6</td></tr><tr><td>61</td><td>28.4</td></tr><tr><td>64</td><td>28.3</td></tr><tr><td>71</td><td>27.8</td></tr><tr><td>78</td><td>27.3</td></tr><tr><td>92</td><td>26.3</td></tr><tr><td>105</td><td>25.3</td></tr><tr><td>118</td><td>24.3</td></tr><tr><td>129</td><td>23.3</td></tr><tr><td>143</td><td>22.3</td></tr><tr><td>157</td><td>21.3</td></tr><tr><td>171</td><td>20.3</td></tr><tr><td>189</td><td>19.3</td></tr><tr><td>211</td><td>18.3</td></tr><tr><td>235</td><td>17.3</td></tr><tr><td>259</td><td>16.3</td></tr><tr><td>293</td><td>15.3</td></tr><tr><td>336</td><td>14.3</td></tr><tr><td>386</td><td>13.3</td></tr><tr><td>449</td><td>12.3</td></tr></tbody></table>	m[g]	R₀[mm]	40	29.9	42	29.8	45	29.6	47	29.4	50	29.3	52	29.1	54	28.9	57	28.8	59	28.6	61	28.4	64	28.3	71	27.8	78	27.3	92	26.3	105	25.3	118	24.3	129	23.3	143	22.3	157	21.3	171	20.3	189	19.3	211	18.3	235	17.3	259	16.3	293	15.3	336	14.3	386	13.3	449	12.3	
m[g]	R₀[mm]																																																										
40	29.9																																																										
42	29.8																																																										
45	29.6																																																										
47	29.4																																																										
50	29.3																																																										
52	29.1																																																										
54	28.9																																																										
57	28.8																																																										
59	28.6																																																										
61	28.4																																																										
64	28.3																																																										
71	27.8																																																										
78	27.3																																																										
92	26.3																																																										
105	25.3																																																										
118	24.3																																																										
129	23.3																																																										
143	22.3																																																										
157	21.3																																																										
171	20.3																																																										
189	19.3																																																										
211	18.3																																																										
235	17.3																																																										
259	16.3																																																										
293	15.3																																																										
336	14.3																																																										
386	13.3																																																										
449	12.3																																																										

Task 1

Points

(b)



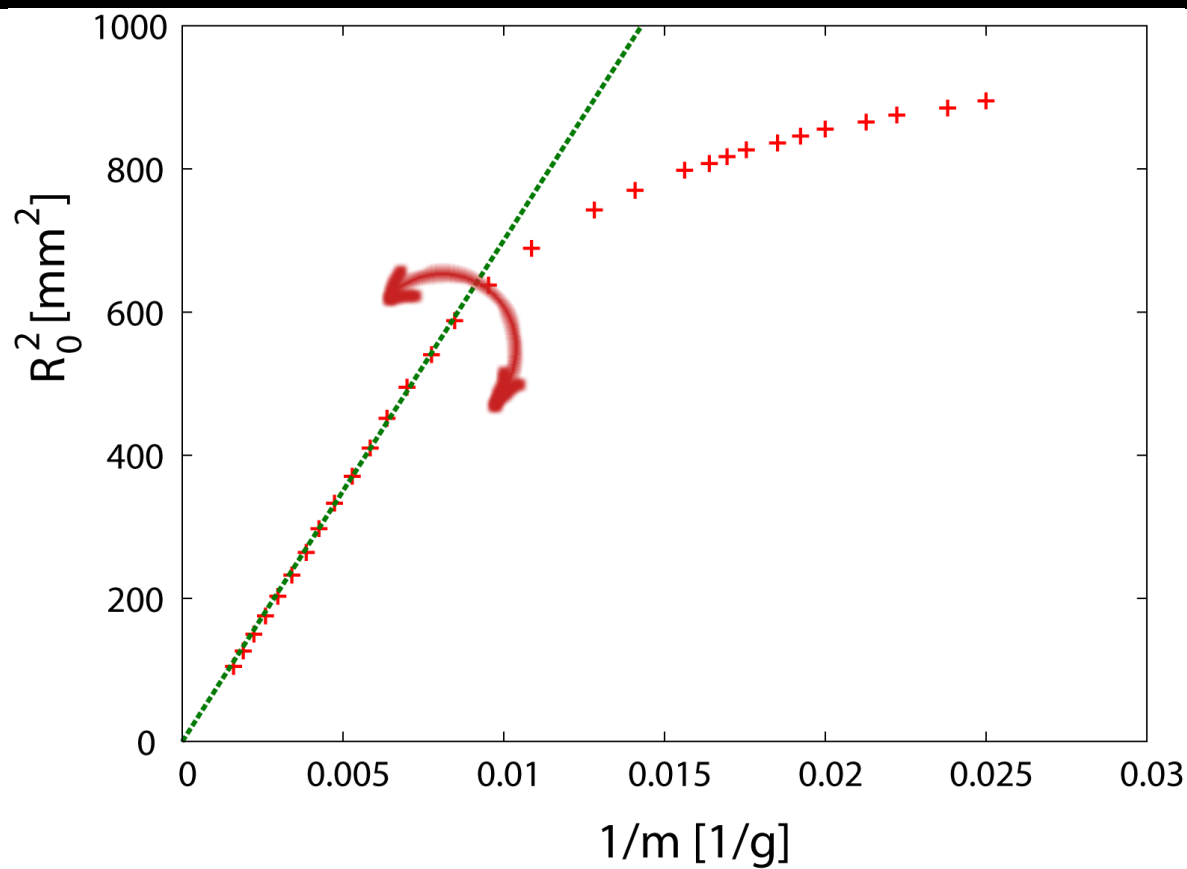
$$a = 50000 \text{ g mm}^2$$

1.4

Task 1

Points

(b)



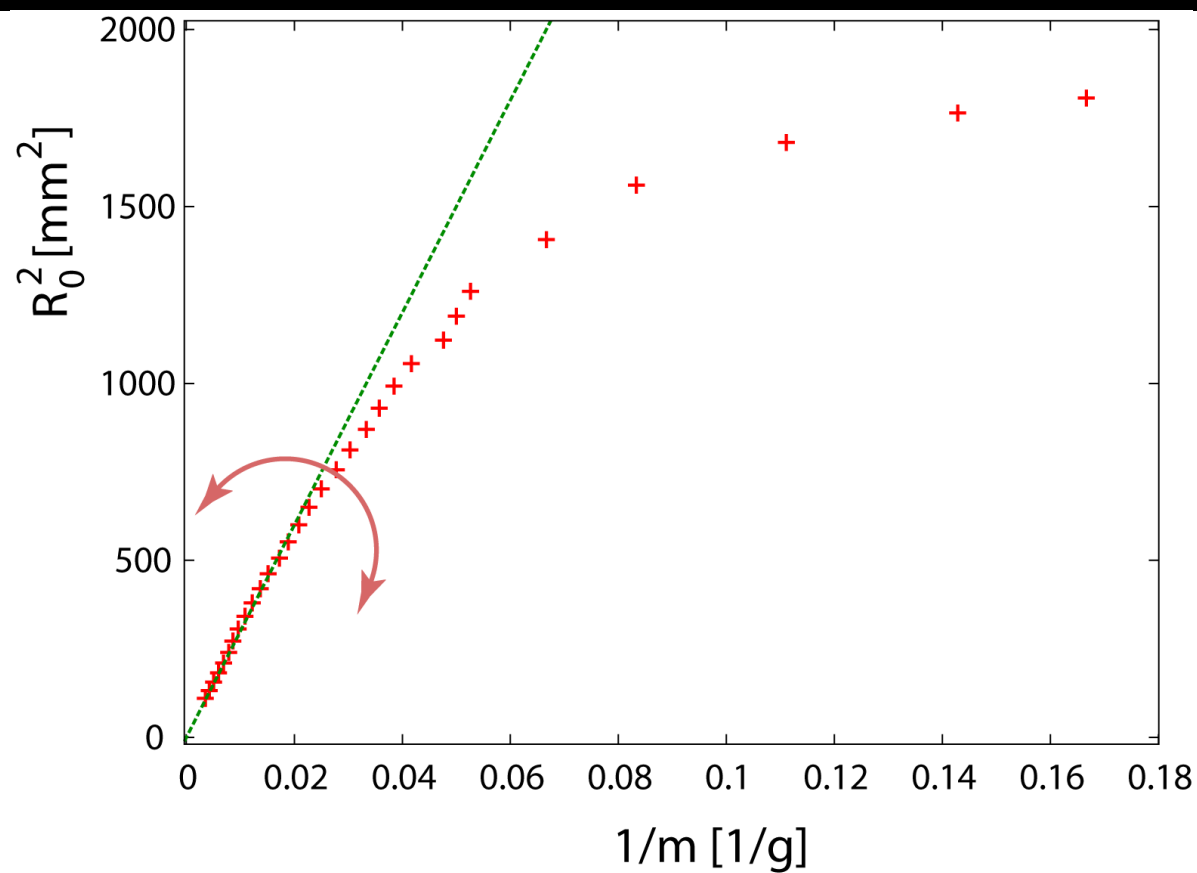
$$a = 70000 \text{ g mm}^2$$

1.4

Task 1		Points																																																										
(b)	$\kappa = \frac{2ag}{\pi l} = 1.5 \text{ mJ}$	0.5																																																										
	$\kappa = \frac{2ag}{\pi l} = 1.5 \text{ mJ}$	0.5																																																										
	$\frac{R_0}{R_c} \leq 0.70$ $\frac{R_0}{R_c} \leq 0.77$	0.5																																																										
Task 2		Points																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>m[g]</th> <th>R₀[mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>6</td><td>42.5</td></tr> <tr><td>7</td><td>42.</td></tr> <tr><td>9</td><td>41.</td></tr> <tr><td>12</td><td>39.5</td></tr> <tr><td>15</td><td>37.5</td></tr> <tr><td>19</td><td>35.5</td></tr> <tr><td>20</td><td>34.5</td></tr> <tr><td>21</td><td>33.5</td></tr> <tr><td>24</td><td>32.5</td></tr> <tr><td>26</td><td>31.5</td></tr> <tr><td>28</td><td>30.5</td></tr> <tr><td>30</td><td>29.5</td></tr> <tr><td>33</td><td>28.5</td></tr> <tr><td>36</td><td>27.5</td></tr> <tr><td>40</td><td>26.5</td></tr> <tr><td>44</td><td>25.5</td></tr> <tr><td>48</td><td>24.5</td></tr> <tr><td>53</td><td>23.5</td></tr> <tr><td>58</td><td>22.5</td></tr> <tr><td>66</td><td>21.5</td></tr> <tr><td>73</td><td>20.5</td></tr> <tr><td>82</td><td>19.5</td></tr> <tr><td>92</td><td>18.5</td></tr> <tr><td>104</td><td>17.5</td></tr> <tr><td>116</td><td>16.5</td></tr> <tr><td>127</td><td>15.5</td></tr> <tr><td>145</td><td>14.5</td></tr> <tr><td>168</td><td>13.5</td></tr> </tbody> </table>	m[g]	R ₀ [mm]	6	42.5	7	42.	9	41.	12	39.5	15	37.5	19	35.5	20	34.5	21	33.5	24	32.5	26	31.5	28	30.5	30	29.5	33	28.5	36	27.5	40	26.5	44	25.5	48	24.5	53	23.5	58	22.5	66	21.5	73	20.5	82	19.5	92	18.5	104	17.5	116	16.5	127	15.5	145	14.5	168	13.5	0.9
m[g]	R ₀ [mm]																																																											
6	42.5																																																											
7	42.																																																											
9	41.																																																											
12	39.5																																																											
15	37.5																																																											
19	35.5																																																											
20	34.5																																																											
21	33.5																																																											
24	32.5																																																											
26	31.5																																																											
28	30.5																																																											
30	29.5																																																											
33	28.5																																																											
36	27.5																																																											
40	26.5																																																											
44	25.5																																																											
48	24.5																																																											
53	23.5																																																											
58	22.5																																																											
66	21.5																																																											
73	20.5																																																											
82	19.5																																																											
92	18.5																																																											
104	17.5																																																											
116	16.5																																																											
127	15.5																																																											
145	14.5																																																											
168	13.5																																																											

Task 2

Points



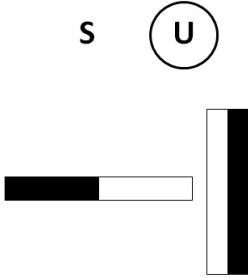
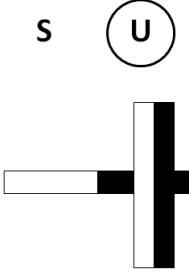
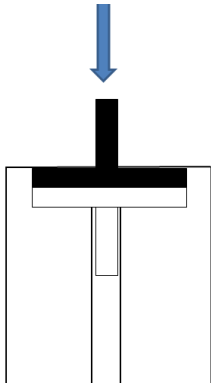
$$a = 27000 \text{ g mm}^2$$

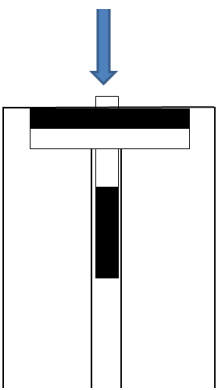
0.9

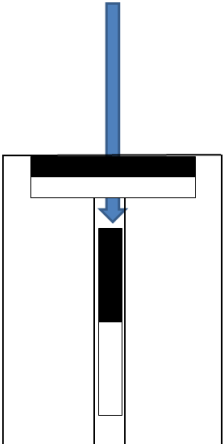
Task 2		Points
	$\mathcal{K} = 0.8 \text{ mJ}$	1.0
Task 3		Points
	Young modulus of the blue foil: $Y = 2.0 \text{ GPa}$	0.6
	Young modulus of the colorless foil: $Y = 2.5 \text{ GPa}$	0.4
Total:		10

Solution - Exp. Problem 2

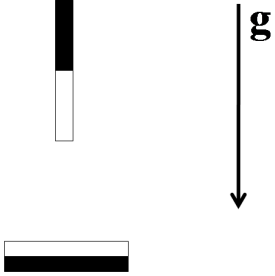
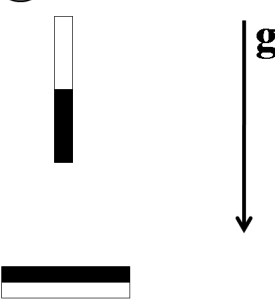
Task 1		Points
		0.25
		0.45
		0.45
		0.45

		0.45																		
		0.45																		
Task 2		Points																		
	<p>Symmetries that should be utilized in the measurements:</p> <table border="1" data-bbox="336 976 1110 1126"> <tbody> <tr> <td>$F_{\uparrow\downarrow}(z) = -F_{\uparrow\downarrow}(-z)$</td> </tr> <tr> <td>$F_{\uparrow\downarrow}(z) = -F_{\uparrow\uparrow}(z)$</td> </tr> <tr> <td>From the two above one gets also $F_{\uparrow\uparrow}(z) = -F_{\uparrow\uparrow}(-z)$</td> </tr> </tbody> </table>	$F_{\uparrow\downarrow}(z) = -F_{\uparrow\downarrow}(-z)$	$F_{\uparrow\downarrow}(z) = -F_{\uparrow\uparrow}(z)$	From the two above one gets also $F_{\uparrow\uparrow}(z) = -F_{\uparrow\uparrow}(-z)$	0,6															
$F_{\uparrow\downarrow}(z) = -F_{\uparrow\downarrow}(-z)$																				
$F_{\uparrow\downarrow}(z) = -F_{\uparrow\uparrow}(z)$																				
From the two above one gets also $F_{\uparrow\uparrow}(z) = -F_{\uparrow\uparrow}(-z)$																				
	<p>By using the setup as it is, the whole curve can be measured by starting the measurements from three stable equilibrium points; the equilibrium point (z_0) can be measured also by using the setup.</p> <p>Configuration:</p>  <p>Measurements:</p> <table border="1" data-bbox="336 1787 764 2029"> <thead> <tr> <th>$z_0=0\text{mm}$</th> <th>m [g]</th> <th>Δz [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>31</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>55</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>75</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>97</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>	$z_0=0\text{mm}$	m [g]	Δz [mm]		0	0		31	1		55	2		75	3		97	4	0,8
$z_0=0\text{mm}$	m [g]	Δz [mm]																		
	0	0																		
	31	1																		
	55	2																		
	75	3																		
	97	4																		

	<table> <tbody> <tr><td>119</td><td>5</td></tr> <tr><td>140</td><td>6</td></tr> <tr><td>158</td><td>7</td></tr> <tr><td>171</td><td>8</td></tr> <tr><td>170</td><td>9</td></tr> <tr><td>118</td><td>10</td></tr> <tr><td>85</td><td>10,25</td></tr> <tr><td>50</td><td>10,5</td></tr> <tr><td>10</td><td>10,75</td></tr> </tbody> </table>	119	5	140	6	158	7	171	8	170	9	118	10	85	10,25	50	10,5	10	10,75																									
119	5																																											
140	6																																											
158	7																																											
171	8																																											
170	9																																											
118	10																																											
85	10,25																																											
50	10,5																																											
10	10,75																																											
	<p>Configuration:</p>  <p>Measurements:</p> <table> <thead> <tr> <th>$z_0=10.8\text{mm}$</th> <th>m [g]</th> <th>Δz [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td>233</td><td>1</td></tr> <tr><td></td><td>538</td><td>2</td></tr> <tr><td></td><td>927</td><td>3</td></tr> <tr><td></td><td>996</td><td>3,5</td></tr> <tr><td></td><td>1124</td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td>1154</td><td>4,5</td></tr> <tr><td></td><td>1213</td><td>5</td></tr> <tr><td></td><td>1212</td><td>5,5</td></tr> <tr><td></td><td>1120</td><td>6</td></tr> <tr><td></td><td>873</td><td>6,5</td></tr> <tr><td></td><td>284</td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td>36</td><td>7,5</td></tr> </tbody> </table>	$z_0=10.8\text{mm}$	m [g]	Δz [mm]		0	0		233	1		538	2		927	3		996	3,5		1124	4		1154	4,5		1213	5		1212	5,5		1120	6		873	6,5		284	7		36	7,5	0,8
$z_0=10.8\text{mm}$	m [g]	Δz [mm]																																										
	0	0																																										
	233	1																																										
	538	2																																										
	927	3																																										
	996	3,5																																										
	1124	4																																										
	1154	4,5																																										
	1213	5																																										
	1212	5,5																																										
	1120	6																																										
	873	6,5																																										
	284	7																																										
	36	7,5																																										

	<p>Configuration:</p>  <p>Measurements:</p> <table border="1" data-bbox="336 831 855 1637"> <thead> <tr> <th>$z_0=18.6\text{mm}$</th> <th>m [g]</th> <th>Δz [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td>116</td><td>1</td></tr> <tr><td></td><td>170</td><td>2</td></tr> <tr><td></td><td>186</td><td>3</td></tr> <tr><td></td><td>184</td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td>169</td><td>5</td></tr> <tr><td></td><td>150</td><td>6</td></tr> <tr><td></td><td>116</td><td>8</td></tr> <tr><td></td><td>89</td><td>10</td></tr> <tr><td></td><td>67</td><td>12</td></tr> <tr><td></td><td>53</td><td>14</td></tr> <tr><td></td><td>36</td><td>16</td></tr> <tr><td></td><td>27</td><td>18</td></tr> <tr><td></td><td>23</td><td>20</td></tr> <tr><td></td><td>14</td><td>22</td></tr> <tr><td></td><td>9</td><td>24</td></tr> <tr><td></td><td>5</td><td>26</td></tr> <tr><td></td><td>3</td><td>28</td></tr> </tbody> </table>	$z_0=18.6\text{mm}$	m [g]	Δz [mm]		0	0		116	1		170	2		186	3		184	4		169	5		150	6		116	8		89	10		67	12		53	14		36	16		27	18		23	20		14	22		9	24		5	26		3	28	0,8
$z_0=18.6\text{mm}$	m [g]	Δz [mm]																																																									
	0	0																																																									
	116	1																																																									
	170	2																																																									
	186	3																																																									
	184	4																																																									
	169	5																																																									
	150	6																																																									
	116	8																																																									
	89	10																																																									
	67	12																																																									
	53	14																																																									
	36	16																																																									
	27	18																																																									
	23	20																																																									
	14	22																																																									
	9	24																																																									
	5	26																																																									
	3	28																																																									
Task 3		Points																																																									
	Due to symmetry, it is sufficient to plot e.g., the following graph in detail:	2																																																									

	<p>$F_{\uparrow\uparrow}(z)$ [N]</p> <p style="text-align: right;">z [mm]</p>	
	<p>$F_{\uparrow\uparrow}(z)$</p> <p style="text-align: right;">z</p>	<p>1</p>
	<p>$F_{\uparrow\downarrow}(z)$</p> <p style="text-align: right;">z</p>	<p>1</p>

		0,5
	<p>OR</p> 	
Total:		10.0