

可視分光実験

Visible spectroscopy for student

— 分光器と光スペクトル —
— Spectrometer and optical spectrum —

テキスト最新版 http://www.sci.u-hyogo.ac.jp/material/photo_phys/ishikawa/Class/index.html

目次

1	はじめに	2
2	目的	2
3	実験装置	2
3.1	概要	2
4	モノクロメータ	4
4.1	分光器の構造と光学素子の役割	4
4.2	分光される光の波長と色	4
4.3	輝線スペクトルによる分光器の波長較正	4
4.4	分光器の分解能	5
4.5	第1日目の後片付け	5
5	スペクトロメータ	6
5.1	簡易分光器を作ろう	6
5.2	身近な光を見てみよう	6
5.3	工作の後片付け	6
6	光ファイバー入力分光器によるスペクトル測定	6
6.1	スペクトル計測	7
6.2	黒体輻射	8
6.3	原子ランプの輝線	9
6.4	色ガラスフィルター	9
6.5	任意試料	9
6.6	第3日目の後片付け	10
7	レポート	10
8	参考文献	10

1 はじめに

可視分光実験は、下に示す流れにそって完了させる。特に、工夫した実験、討論、考察を重視する。なお、実験中、情報処理室のユーザー名とパスワードが必要になる。

第0週 予習（実験内容の理解）

第1週 実験解説 — 実験(モノクロメータ)— 討論 — 課題と考察 — 宿題

第2週 簡易分光器 — 光ファイバー入力分光器 — 討論 — 課題と考察 — 宿題

第3週 吸収・反射測定 — 討論 — 課題と考察 — レポート完成

2 目的

物質の性質(物性)を調べる方法の1つとして、分光実験は、波長(λ)ごとに分けた光を物質に照射し、光に対する物質の応答を計測する。光の振動数($\nu = c/\lambda$)を変えながら物質中の電子のエネルギー状態を調べ、分光学的手法の有効性を体験する。実験をとおし、「エネルギー(E)と振動数の比例関係($E = h\nu$)を認識し、振動数をエネルギーという概念でとらえる」ことも目標である。

3 実験装置

3.1 概要

分光実験の基本的な装置は、図1に示すように、光源、分光器、光検出器から成る。物性を調べる試料は、通常、光源と分光器の間、または、分光器と光検出器の間に置く。光電管などの光検出器が試料になったり、発光スペクトルにより原子のエネルギー準位を観測する場合、光源が試料である。

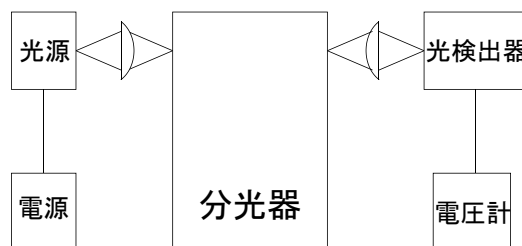


図1: 分光実験で使う装置の基本構成

3.1.1 光源

きわめて高温の黒体がないため、1種類の光源でX線から遠赤外にわたって使用できるものはなく、紫外域と可視・赤外域とは異なる光源が、必要に応じて使い分けられる。紫外光より短波長側ではシンクロトロン放射、紫外・可視では気体放電が用いられる。可視・赤外光では固体からの熱輻射および気体放電による放射が利用される。「可視分光実験」では、波長を掃引し分光計測する場合、連続スペクトルのキセノンランプまたはタングステンランプを使用する。ある特定の波長の光で計測する場合は、気体放電管を使用する。以下に、それぞれの光源の特徴を記す。さらに詳しい特徴は、実験室備え付け資料や文献を参照せよ。

1. キセノン(ショートアーク)ランプ

- 発光スペクトルが太陽光に似ており、スペクトル形状が電力によりほとんど変化しない。
- 所どころ輝線が混じるが、高輝度の点光源とみなしうる連続スペクトル光源である。逆にいえば、陰極近傍の狭い範囲に輝度の高い部分が集中しているので、慎重な光軸調整が必要である。

- 240 nm 以下の短波長の光が強いため、空気中の酸素から生成されるオゾンに注意する。

2. タングステンランプ

- 可視部から赤外部にかけて広がる連続スペクトルである。
- 熱輻射なので、タングステンフィラメントの温度が高いほど短い波長が得られる。
- 輝度が高く光強度が安定である。

3. 原子スペクトル放電ランプ

- 封入された原子や分子のエネルギー準位に特有の波長の光を放射する。
- 分光器で波長分解すると、特定波長のみ明るいスペクトル(輝線)を観測できる。
- 輝線の中心波長や線幅は、外部の装置の状態に依存せず、放電電圧や気体圧力などランプの動作条件にのみ依存する。波長の安定な光が簡単に得られ、分光分析に適する。
- 学生実験室にある原子線ランプは、He, Ne, Ar, Kr, Xe, H, Na, Hg, Cd などである。

4. レーザーポインタ

- 学生実験室には、4色(紫, 青, 緑, 赤)のレーザーポインタがある。使用してもよい。
- 半導体レーザーは、バンドギャップのエネルギーに相当する波長の光を放射する。
- レーザー光は指向性がよく単位面積あたりのエネルギーが高いので、光を直接あるいは反射させて目に入れないように注意する。

3.1.2 分光器

光源から放射された光を分け、ある波長範囲の光を選び出す分光器をモノクロメーター、一挙に複数の波長の光を観測する分光器をスペクトロメーターと呼ぶ。これら分光器内では、プリズムや回折格子が使われる。プリズムは、波長によって材質の屈折率が異なるので、プリズムを出ていく光の方向が波長により異なることを利用する。回折格子は、規則正しく並んだ細い多くの格子(溝)からの回折光が重なって、光の強めあう方向が波長によって異なることを利用する。すなわち、プリズムや回折格子は、光の波長に応じて進行方向を異にする作用(分散)を持つ光学素子である。¹

連続光から実験に使う狭い波長幅の光を選び出すのに必要なのは、分散素子だけではない。光源からの光を無駄なく集め、入射スリットを照明するための光源光学系、入射スリットから入った光を分散素子に投射して分光し、単色光を無駄なく集めるための分光光学系、出射スリットから出た単色光を光検知器まで導く光学系などが必要である。

3.1.3 分光フィルター

分光フィルターは分光器を補い、おおまかに波長選別するために使う。レーザー光などの強い迷光が存在するラマン分光では必需品である。回折格子分光器は高次光が発生するので、光源、回折格子の種類、観測波長を検討し、高次光が出力される可能性があれば、フィルターを併用する。

1. 干渉フィルター：多層膜による光の干渉を利用し、急峻なバンドパス、ハイパス、ローパス特性を有する。

¹逆に、光の波長と回折角により回折格子の溝数、光の屈折角によりガラスの分散を知ることができる。

2. 色ガラスフィルター：半導体微粒子を分散させたガラス板で、伝導帯と価電子帯のエネルギー差(バンドギャップ)より高いエネルギー(短波長)の光を吸収し、低いエネルギーの光を透過する。その境界となる波長(カットオフ波長)は、実験で使用するフィルター R62 では 620 nm, IR80 では 800 nm である。

3.1.4 光検出器

外部光電効果を利用した光電管と、内部光電効果を利用したフォトダイオードを使う。これらは、光パワー ($W = J/s$) に比例した電流 ($A = C/s$) を出力する。それぞれの感度曲線(出力電流の入射光波長依存性)などの特性を調べ、実験に適した光検出器を使用する。

4 モノクロメータ

4.1 分光器の構造と光学素子の役割

分光器の入射スリットの前にタングステンランプ²やキセノンランプなど連続スペクトル光源を置き、分光器の構造を調べる。分光器の上蓋を開け、光が入射スリットから出射スリットへ進む経路(光路)、光が波長に応じて分散されるようすなど、光学素子の機能がわかるような図を描く。実験全体をとおり、鏡や回折格子などの表面を手で触らない、光学素子の方を向いてしゃべらない。また、スリットの開けすぎや閉めすぎに十分注意する。

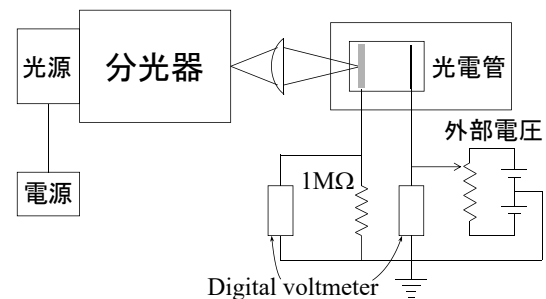


図 2: 実験配置。光電管に加える電圧を 8.0 V にし、抵抗 1 MΩ を流れる電流を測る。

課題 4-1 文献を参考にして、実際に使用した分光器の種類と特徴を自分の言葉で述べよ。また、分光器内の各光学素子の役割を、上で描いた図を使いながら述べよ。

4.2 分光される光の波長と色

分光器のスリットから出射された光の色を目で観測し、そのときの分光器の波長ダイヤル目盛りを記録する。赤、橙、黄、緑、青、紫と自分で思ったときの分光器のダイヤル波長を記録する。この実験から、分光器のダイヤルと色の関係が、およそどのようになっているかを推測する。

課題 4-2 色と波長の関係を文献で調べて、上の実験と比較せよ。

4.3 輝線スペクトルによる分光器の波長較正

原子 (He, Hg, または Cd) の輝線スペクトルを観測し、回折格子分光器 (光研工業製, SG-100 (焦点距離 100 mm), SG-250 (250 mm)) の波長表示を較正する。スリット幅は 0.5 ~ 1.0 mm にする。波長ダイヤルを動かす際、バックラッシュ³に注意する。まず、光検出器 (光電管またはフォトダイオード) を出射スリットの後におく。光電管を使う場合、外部電圧を +8 V 付近に固定し、

²タングステンランプの電源電圧は、8 V にする。

³backlash. 歯車などの回転機構では、歯車に遊びが存在するので、回転方向によりダイヤルの読みが異なる。

信号ケーブルをデジタル電圧計に接続し、表示される数値を記録する⁴。フォトダイオードとオプティカルチョッパーを使う場合、信号ケーブルをロックインアンプの背面 sig1 端子に接続し、前面 sig1 と chopper を選択すれば光の相対的強さを測定できる。

課題 4-3 文献(備え付け資料や理科年表)波長と分光器の目盛の関係から、測定した輝線を同定し、表とグラフを作成せよ。また、最小二乗法⁵などにより較正曲線の式を求めよ。表に載せる項目は有効数字⁶で表し、波長実測値⁷、光検出器の出力電圧、波長較正值⁸、文献値、文献値 - 実測値、残差 = 文献値 - 較正值である。2種類のグラフを縦に並べ横軸(波長ダイヤル)をそろえて表示せよ。一つは、縦軸が波長文献値と較正曲線、もう一方のグラフの縦軸は残差である。測定と較正が正しく行われた場合、残差はゼロを中心に分布するはずである。

4.4 分光器の分解能

ある一本の輝線を選び、図 3 のように、分光器の各スリット幅に対し波長ダイヤルを細かく動かして、スペクトル線の形状を測定する。正しい半値全幅を求めるため、広い波長範囲で電圧を測定し電圧オフセットを得る。実際のスリット幅がマイクロメータ目盛の表示と異なるので、目盛り表示と光量の関係から、真のスリット幅がゼロになる目盛の値を求めておく⁹。入射スリットと出射スリットの3つの幅(0.25, 0.75, 1.25 mm)に対し、スペクトルを測定するのがよいだろう。興味があれば、分光器の分解能の限界を調べるため、レーザーポインタを使ってみるとよい。

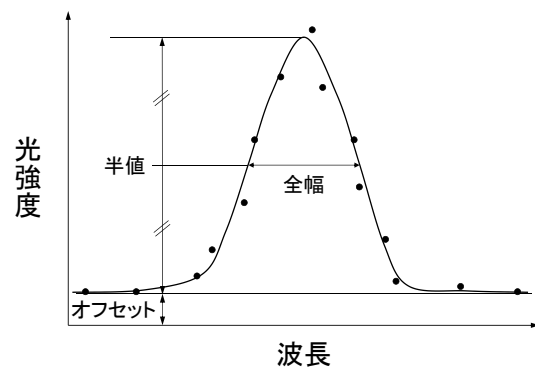


図 3: はんち ぜんはば 半値全幅(FWHM: Full Width at Half Maximum). 測定値を大きな点で表し、単に測定点をつなぐのではなく、スペクトル線の形状を描いて半値全幅を求める。測定点の数は、半値全幅の中に4点以上入るようにする。

課題 4-4 グラフ用紙にスペクトルを描き、スペクトル幅(半値全幅)を求める。次に、横軸にスリット幅、縦軸に半値全幅のグラフを描き、最小二乗法などにより近似曲線を求めよ。回折格子、光学系の収差、スリットによる回折、スリット幅などを考慮し、実験で使った分光器の波長分解能を決める要因を、式と数値を使い定量的に考察せよ。

4.5 第1日目の後片付け

1. 各装置(光源、デジタルボルトメータ、電池など)の電源スイッチを切る。
2. 使用した装置の故障、破損がある場合は報告する。

⁴出力電圧が 0.5 V 以下になるように光量を調整する。図 2 を参考にし、理由を考えよ。

⁵残差二乗和を最小にする手法である。

⁶アプリが 1.23456 ± 0.00123 (第 2 項は誤差) と出力したとき有効数字を何桁にするか? $x \approx 500$ で較正曲線が $y = (1.23456 \pm 0.00123)x + (9.8765 \pm 0.987)$ (積と和が混在) と求まったとき、それぞれ何桁の数字にするか?

⁷SG-100: ダイヤル目盛の 1 桁下の位まで読む。SG-250: デジタル 4 桁の数字を 1/10 し波長実測値とする。

⁸電卓で表示される無用に多い桁数ではなく、有効数字で表した係数の較正曲線の式を使い、較正值を求める。

⁹分光器の波長を輝線スペクトルのピークにあわせ、入射スリットを十分に開けたまま出射スリットを閉じていき、信号電圧の変化しなくなり始めの目盛を読み、出射スリットのゼロとする。入射スリット幅のゼロも同様に求める。

5 スペクトロメータ

5.1 簡易分光器を作ろう — 太陽光やレーザーポインタなど強い光を直視しない

台紙にある説明にしたがい、分光器本体となるパーツを切り離す。スリットはナイフの刃の厚さ程度に隙間を広げ、ものさしのパーツを本体に貼りつける。透過型回折格子の表面に指紋がつかないように注意し、テープで本体に貼りつける。回折格子の向きに気をつけよう。最後に、木工用ボンドなどで本体を組み立てる。その際、すき間から光が入らないように、ノリシロを外側から貼り付ける。完成した分光器を蛍光灯に向け、目でスペクトルを観察しながら、分光器の原理を考える。

課題 5-1 スリットと回折格子のみの分光器により、光をスペクトル分解して観察できる原理を図を描いて説明し、本体記載の式 $\lambda = (d/\ell)x$ を導出せよ。図には、スリット、回折格子、入射角、回折角、可視光を代表し赤色と青色光の(光検出器としての目の網膜に達するまでの)光路を描き入れる。

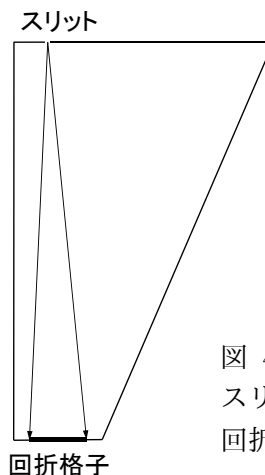


図 4: 分光器の概観。スリットから入った光は回折格子全体を照らす。

5.2 身近な光を見てみよう

タングステンランプ、蛍光灯、太陽光、雲による散乱光、電子機器のLEDの光などを観察する。1日目に観測した原子線ランプも利用しよう。

課題 5-2 簡易分光器を使った、自分で設定した課題を報告せよ。次の例を参考にしてもよい。

- 例 1. 蛍光灯と複数の原子線ランプのスペクトルを比較し、蛍光灯内にある原子を同定する。
- 例 2. 微細に分裂した輝線を観測し、分光器の分解能を調べる。回折の次数に依存するか？
- 例 3. 目視していたスペクトルをカメラで撮影し、波長と光強度の関係を定量的に評価する。

5.3 工作の後片付け

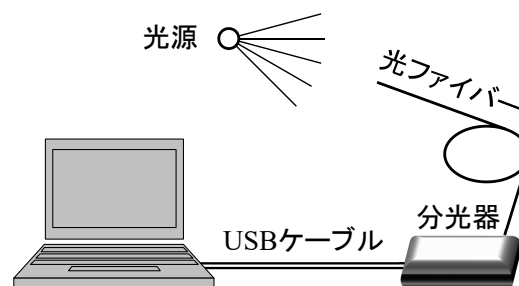
1. 工作に使った、ナイフ、ボンド、テープ、新聞紙を返却し、台紙の残りはゴミ袋へ捨てる。
2. 簡易分光器を持ち帰り、身のまわりの光を観察して下さい。レポートを書くときも手元にあると便利です。
3. 十分に使い尽くし不要になった簡易分光器は、回収箱に入れて下さい。オープンキャンパスで見学者に配るなど、再利用します。

6 光ファイバー入力分光器によるスペクトル測定

光ファイバー入力分光器は、反射型回折格子を使っている点で、4節のモノクロメータに似ている。分光素子として入射スリットと回折格子しか使っていない点で、5節の簡易分光器に似ている。5節では、目の代わりにカメラで光スペクトルを撮影した。ファイバー入力分光器は、結像素子と1次元配列した光検出素子を内蔵し、波長ごとの光強度のデータがパソコンに送られる。

注意 !!

光ファイバーを折り曲げない
 レーザーやレンズで絞った強い光を入力しない
 パソコンや分光器に衝撃を加えない
USBメモリなど個人の装置をパソコンに挿さない



6.1 スペクトル計測

次節以降、身のまわりの発光体や吸収体に光ファイバーを向け、スペクトル計測する。例えば、太陽、青空、雲、木々、白熱灯、原子線ランプ、蛍光灯、LED、色ガラスフィルターの透過光などを測定する。ここでは、蛍光灯のスペクトル観測を例にし、計測手順を説明する。

図 5: 光は、ファイバーにより分光器に導かれ、分光されたのち、1次元配列した光検出素子を照らす。それぞれの素子に照射される光パワー (W) × 露光時間 (s) に比例する量が、パソコン画面の縦軸の値として表示される。光が弱い場合、露光時間を長くすればスペクトルを測定できる。

6.1.1 計測手順

1. パソコンに AC アダプタをつなぎ電源スイッチを入れ、ユーザー名とパスワードを入力する。
2. 使用記録ノートに使用日、学年、名前、パソコンと光ファイバーの番号を記入する。
3. 光ファイバーのキャップ1つをはずし、ファイバー端面をさわらないよう注意しながら、光ファイバーを分光器につなぐ。分光器からははずしたキャップはファイバーのケースに入れる。
4. USB ケーブルで、分光器とパソコンをつなぐ。
5. SpectraSuite アイコンをクリックし、スペクトル計測用ソフトを立ち上げる。
6. 自動計測が始まっていない場合、スタート (▶) をクリックし計測を始める。
7. 光ファイバーのキャップをはずし、試しに、光ファイバーを蛍光灯に向けてみよう。
8. 測定できる最大値を越えないように入力光の強さを調整し、停止ボタンをクリックする。
9. 試し撮りしたスペクトル(数値データ)を保存する。(ディスクボタンをクリック、保存先はデスクトップ、ファイル名を入力、処理済みスペクトル、タブ区切り、保存ボタンをクリック)

表 1: 分光器と光ファイバーの仕様

	1	2	3	4
分光器	USB4000	USB4000	HR4000	HR4000CG-UV-NIR
スリット (μm)	5	5	5	5
分解波長 (nm) (参考値)	0.94	0.91	0.24	0.5
測定範囲 (nm)	350-1000	530-1100	350-790	200-1100
光ファイバー	VIS-NIR	P400-2-VIS-NIR	UV-VIS	P400-2-UV-VIS
透過帯域 (nm)	450-1100	450-1100	300-900	300-900
コア径 (μm)	50	400	50	400

6.1.2 データ送信

1. Internet Explorer を立ち上げ、情報処理室のユーザー名とパスワードを入力する。
2. Windows Live mail を立ち上げ、電子メールメッセージをクリックする。
3. メッセージ作成をクリックし、送信先のメールアドレスを入力、データファイルを添付する。
4. アドレス左横の送信ボタンをクリックする。
5. Windows Live mail の送信履歴を消去し、送信済トレイを空にする。
6. Windows Live mail を閉じ、Internet Explorer の画面でログアウトする。

6.1.3 グラフ作成

次のいずれかの方法でグラフを描く。

- SpectraSuite でグラフを描いた場合、画像をクリップボードにコピー(Copy Graphical Data to Clipboard)し、ペイントソフトを立ち上げ、貼り付け、ファイル保存。
- 学生実験のパソコンには、フリーソフトの Gnuplot がインストールされている。
 1. gnuplot アイコンをクリックし、template.plt アイコンをつかんで入れる。
 2. gnuplot 画面で「plot 'ファイル名' using 1:2」と入力する。
 3. グラフを整形し、画像を保存する。
- Excel で描くなら、情報処理室または各自のパソコンを使う。

課題 6-1 測定点数の多いデータを描く練習として、蛍光灯のスペクトルをグラフ表示せよ。軸目盛、目盛りに添える数字、軸タイトル、単位、グラフタイトルを簡潔に記す。スペクトルの微細な構造が隠れないように、線の太さを調整する。

6.2 黒体輻射

どんな物質も、温度に応じて電磁波を放射している。熱平衡状態を仮定し、電磁波の空間モードを数え上げ、カノニカル分布をあてはめると、スペクトルを求めることができる。電磁波が温度 T の空洞内をみたしているとき、周波数が ν と $\nu + d\nu$ の間にある熱輻射のエネルギー密度 (J/m^3 , 単位体積あたりのエネルギー) は、次のようになる。

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{\exp(h\nu/k_B T) - 1}. \quad (1)$$

太陽光やタングステンランプのスペクトル(パワー密度 (W/m^2) の波長依存性)を、光ファイバー入力分光器で観測せよ。

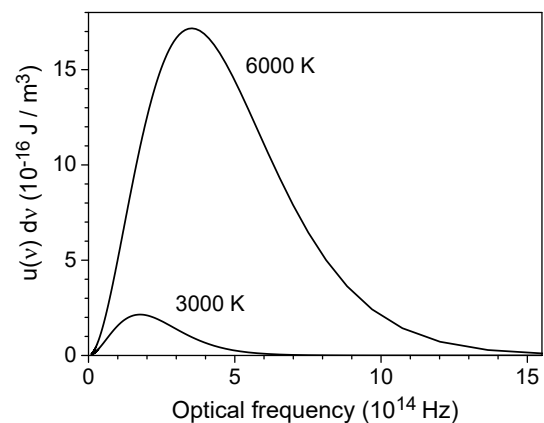


図 6: 黒体輻射。式 (1) に $T = 3000 \text{ K}$, 6000 K を代入して描いたスペクトル。高温になると、エネルギー密度が最大となる周波数が高くなるとともに、全エネルギー密度が増加し、光源が明るくなる。

課題 6-2 関係 $\lambda\nu = c$ をプランクの熱放射式 (1) に代入し、波長が λ と $\lambda + d\lambda$ の間にあるエネルギー密度 $u(\lambda)d\lambda$ を求めよ。また、 $T = 6000 \text{ K}$ を代入し、横軸(波長)、縦軸(単位波長あたりのエネルギー密度)のグラフを描け。

課題 6-3 観測したスペクトルとプランクの熱放射式の形状を比較し、太陽の表面温度を推定するとともに、形状について考察せよ。太陽表面の原子や地球の大気中の分子などに光が吸収されることも考慮する。測定する波長範囲が広いので、回折格子の回折効率や光検出器感度の波長依存性が顕わである。標準ランプの参照スペクトルにより感度を補正する。

6.3 原子ランプの輝線

1 日目に使ったものとは異なる原子線ランプ(H, He, Ne, Na, Hg など)のスペクトルを観測する。

課題 6-4 ファイバー入力分光器を使った、自分で設定した課題を報告せよ。

- 例 1. 課題 4-3 と同様に、表とグラフを作成し最小二乗法により較正曲線を求める。
- 例 2. Na 原子の D 線の微細分裂を観測し、スピン軌道相互作用の大きさを求める。
- 例 3. H 原子のバルマー系列を観測し、リドバーグ定数を求める。

6.4 色ガラスフィルター

色ガラスフィルターを透過する光と、フィルターがないときの光源(タングステンランプ、キセノンランプ、太陽光など)のスペクトルを観測する。雑音(測定値のふらつき)が大きい場合、隣接平均(スムージング、移動平均)をすると、滑らかな曲線を描くことができる。

課題 6-5 色ガラスフィルターの透過率のグラフ(縦軸:透過率、横軸:波長)を描き、カットオフ波長を境に、透過率が 0 から 1 に階段状に変化するようすを示す。

6.5 任意試料

実験室から外に出て、自然素材、人工物など好きな試料を選び、光の吸収や反射を調べよう。測定する物質が決まったら、透過光または反射光スペクトルと、光源のスペクトルを保存する。

課題 6-6 光源スペクトルと透過(反射)光スペクトル、透過(反射)率の波長依存性をグラフに示せ。これらを用いて、試料について議論せよ。

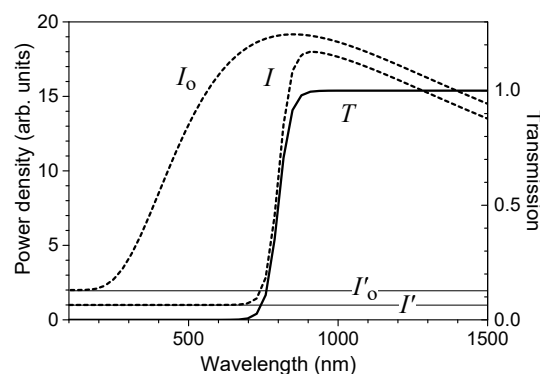


図 7: 透過率の波長依存性. 光源のスペクトル $I_0(\lambda)$, 透過光スペクトル $I(\lambda)$, それぞれのオフセット I'_0, I' より, 透過率は, $T(\lambda) = (I(\lambda) - I') / (I_0(\lambda) - I'_0)$ である. 露光時間が同じ場合, $I'_0 \approx I'$ になる. 割り算をするので, 分母が小さいと透過率の曲線に大きな雑音がのる. スペクトルの構造を失わないように隣接平均する.

6.6 第3日目の後片付け

1. Experiment > Data > (西暦年)の下に, (班番号)を名前にしたデータフォルダーを作る.
2. デスクトップに保存したデータを, データフォルダーに移動する.
3. パソコンをシャットダウンし, ケーブルをはずし, 丁寧に片づける.
4. 使用記録ノートに, 返却日, 装置について気づいたことを記録する.
5. 使用した装置の故障, 破損がある場合は報告する.
6. 実験台とその周りを清掃し, 椅子を整頓する.

7 レポート

データに基づいた主張を表わした明快な報告書(レポート)を書く. 各課題ごとに「実験内容」「実験結果」「考察と結論」の順に報告する. 以下, 注意点を記す.

1. グラフのタイトル, 縦軸と横軸のタイトルと単位を記入する. 軸の目盛は, 読みやすく切れの良い数字を書く.
2. 実験結果について考察する. つまり, 客観的事実(実験結果)に対し, 自分の考えを述べる. 調べたことを書くだけで終わらない. 学生実験は「調べ物学習」ではない.
3. 実験データの有効数字・誤差について十分に吟味し, 物理量を求める.
4. グループで実験するが, レポートは個々に作成する. 同じデータでも解析法により異なる結果が得られる — グループ内で同じデータを使用し, 市販ソフトで生データをグラフに描くと, 似たような図ができあがる. いかに関性を表現するかが重要である.
5. 参考にした文献のリストを最後につけて, レポート本文中の適切な箇所 で引用する.
6. 文章, 式, 表, グラフを活用して, レポート読者に自分の考えを伝える. 式と数値を列挙するだけで文章がないのは, 報告書ではない.
7. 文章の量と表・グラフの量が同程度になるように書く. つまり, 文章はできるだけ丁寧に書く(1年後の自分が読んでも理解できるように). これは, 上で述べた“明快”に反しない. グラフは描き方を十分に吟味し, 情報を凝縮させる. — 百聞は一見に如かず —
8. 実験終了後1週間以内に研究棟205号室に提出. (期限や場所の変更は, 実験中に指示する)

8 参考文献

実験室に備えてある資料を以下に記す. 実験装置や実験内容を理解するため, 図書館の文献も利用する. 参考文献の内容をレポートに書き写すのではなく, 理解したことを自分の言葉で表現する. インターネット検索を利用してもよいが, 内容の真偽を判断するには, かえって知識と学力が必要になる(だから, やめたほうが良い).

- 1 理科年表, 国立天文台 編, 丸善
- 2 固体分光実験用資料「輝線スペクトル」「光電子増倍管」「フォトダイオード」
- 3 実験物理学講座 8 分光測定, 管 滋正, 榎田孝司 編, 丸善
- 4 実験物理学講座 9 レーザー測定, 榎田孝司 編, 丸善
- 5 レーザーハンドブック, レーザー学会 編, オーム社