

可視分光実験

Visible spectroscopy for student

— 分光器, 干渉計, そして光スペクトル —
— Spectrometer, interferometer, 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 目的	2
2 実験装置	2
2.1 光源	2
2.2 分光器	3
2.3 グラフ作成	4
2.4 分光フィルター	4
2.5 光検出器	4
3 光電効果	5
3.1 外部光電効果	5
3.2 内部光電効果	5
4 光の粒子性	6
4.1 モノクロメータ	6
4.2 光電効果	6
5 原子のスペクトル	7
5.1 スペクトロメータ	7
5.2 色ガラスフィルター	7
6 光のコヒーレンス	8
6.1 マイケルソン干渉計	8
6.2 光源のスペクトルとコヒーレンス	8
7 直線偏光の性質	9
7.1 ブリュースタ角	9
7.2 マッハ・ツェンダー干渉計	9
8 レポート	10
9 参考文献	10

1 目的

物質の性質(物性)を調べる方法の1つである分光実験では、波長 λ の光を物質に照射し、光に対する物質の応答を計測し、物質中の電子のエネルギー状態を調べる。「可視分光実験」では、原子のエネルギー準位(E_e)、光の振動数($\nu = c/\lambda$)、光子のエネルギー($E = h\nu$)、光のコヒーレンス(可干渉性)と偏光(振動の偏り)を実験を通して勉強する。「2. 実験装置」では共通に使われる装置について、「3. 光電効果」では基本的な現象を予習する。実習する4つのテーマ「4. 光の粒子性」「5. 原子のスペクトル」「6. 光のコヒーレンス」「7. 直線偏光の性質」では、工夫した実験、観察、討論、考察を重視する。ネット検索により辞書的内容を覚えたり写したりするのではなく、実習中の観察に基づいて考察する。

2 実験装置

分光実験(spectroscopy)の基本的な装置は、図1に示すように、光源(light source)、分光器(monochromator)、光検出器(photo detector)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は光源が試料になる。レーザー(laser)はエネルギー選択性が高いので、光源と分光器の機能をあわせ持つ。

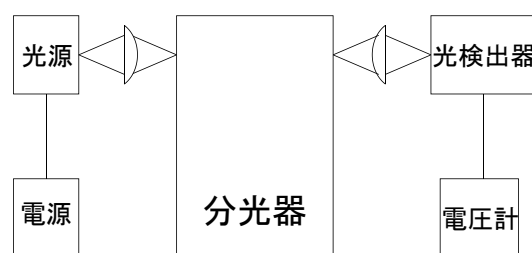


図1: 分光実験で使う装置の基本構成

2.1 光源

きわめて高温の黒体がないため、X線から遠赤外にわたって使用できる1種類の光源はない。したがって、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・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、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。
- 実験室にある原子線ランプには、He, Ne, Ar, Kr, Xe, H, Na, Hg, Cd などが封入されている。

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 (laser diode) 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ため、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。

5. 発光ダイオード (LED, light emitting diode)

- 実験室には、紫, 青, 黄, 橙, 赤, 白色 LED がある

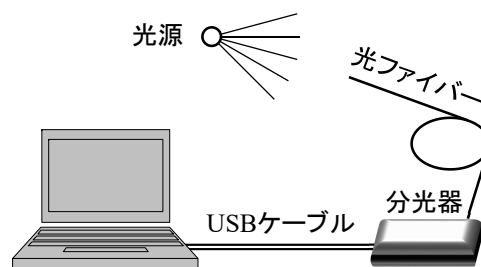
2.2 分光器

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、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と呼ぶ。これら分光器内では、プリズム(prism)や回折格子(grating)が使われる。プリズムは、材質の屈折率が波長により異なるので、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 dispersion)を持つ光学素子である。(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)

連続光(continuous wave)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。

2.2.1 スペクトロメータ

図 2 に示す光ファイバー入力分光器は、分光素子として、入射スリット、反射型回折格子、結像素子と 1 次元配列した光検出素子を内蔵したスペクトロメータである。素子(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
個人の USB メモリなどをパソコンに挿さない

図 2: 光を光ファイバーにより分光器に導き、回折格子で分光し、1次元配列した約 3000 個の素子で検出する。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。光パワーが弱い場合、露光時間を長くしてスペクトルを測定する。

2.2.2 計測手順

1. 光ファイバー(optical fiber)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。
2. USB ケーブルで、分光器とパソコンをつなぐ。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 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。

7. 原子のスペクトルなど本番データを記録する際、蛍光灯の光など迷光が入る場合は暗幕を使う。
8. 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, 参照ボタンをクリック, 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)

2.2.3 データ送信

1. パソコンは, 実験室無線 LAN, あるいは, eduroam につながっている。パスワードなどを保存しないように, 例えば, Edge の InPrivate モードを使う。
2. GMail, または, Google Workspace, Google Drive, Onedrive

2.3 グラフ作成

軸目盛, 目盛に添える数字, 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。Excel など, 測定点数の多いデータをグラフにする。その他, フリーソフト (for Windows, Mac, Linux) としては SciDAVis, LabPlot, Gnuplot がある。Python も便利である。

2.4 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。
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)が 390 nm (L39), 620 nm (R62), 820 nm (IR82) のフィルターが実験室にある。

2.5 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 ($1\text{ W} = 1\text{ J/s}$) に比例した電流 ($1\text{ A} = 1\text{ C/s}$) 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。

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

3 光電効果

物質が光を吸収し自由電子を生ずる現象一般を光電効果と呼ぶ。固体表面から電子が外部に放出される場合、狭い意味で光電効果と呼ぶ。実験で使用する光電管がこれに相当する。それに対し、固体内で自由電子が生じ、電気伝導率が変化したり、起電力が生じたりするとき光伝導と呼ぶ。特に区別する場合、前者を外部光電効果、後者を内部光電効果(光導電効果)と呼ぶ。

3.1 外部光電効果

電磁波が粒子であることは、光電効果の実験により広く信じられるようになった。図 3 は外部光電効果の概念図である。振動数 ν の光を固体に照射すると、 $h\nu > \Phi$ をみたすとき電子が固体表面から放出される。ここで Φ は、しばしば表面の性質にもよるが、物質により決まる定数(仕事関数, work function)である。放出される電子の運動エネルギーの最大値は、 $T_0 = h\nu - \Phi$ になる。これらの結果は入射光強度に無関係に観測され、入射光強度は単位時間あたりに放出される電子数を決めるにすぎない。この観測結果は、光子(photon)という概念を導入すると、次のように説明できる。物質中の電子は、高さ Φ のエネルギー障壁により真空に出ることを抑制される。衝突する光子は、エネルギー $h\nu$ を表面近くの電子に与える。もし $h\nu < \Phi$ なら、電子のもらったエネルギーは障壁を乗り越えるのに不十分だから、電子は真空中に出ることはできない。 $h\nu > \Phi$ ならば、余剰のエネルギーは真空中に放出された電子の運動エネルギーとなる。

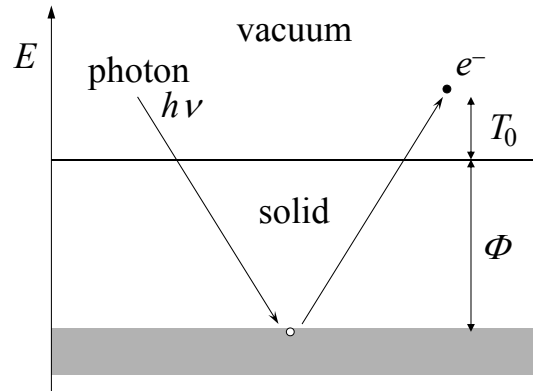


図 3: 外部光電効果. 光電面に光があたると、真空より Φ だけ低いエネルギー状態にあっても、電子が放出される。電子の運動エネルギー T は、 $T \leq T_0 = h\nu - \Phi$ 。ここで、光子のエネルギー $h\nu$ 、仕事関数 Φ である。

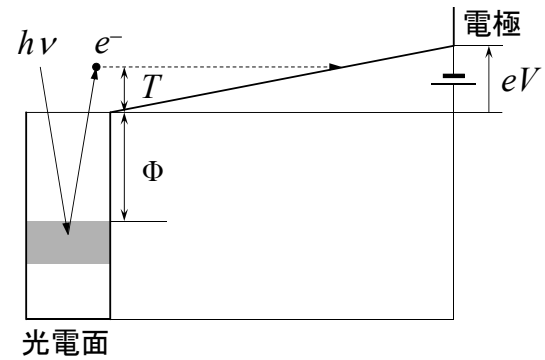


図 4: 真空中に飛び出た電子の運動エネルギーが、外部電圧によるポテンシャルエネルギーより小さいと、電子は相対する電極に到達しない。

3.2 内部光電効果

内部光電効果の場合、上記 Φ が物質の伝導帯と価電子帯の間のエネルギーギャップ E_g に相当する。 $E_g < h\nu$ の光を照射すると、価電子帯の電子は伝導帯に上がり、価電子帯に正孔ができる。このようにフォトキャリア(電子と正孔)が生成されるので、電気伝導度が増加する。CdS のエネルギーギャップは $E_g \approx 2.4 \text{ eV}$ である。この場合、ちょうど E_g に相当するエネルギーの光の波長は $\lambda_g = \frac{c}{\nu_g} = \frac{hc/e}{h\nu_g/e} \approx \frac{1240 \text{ nm} \cdot \text{eV}}{E_g} \approx 520 \text{ nm}$ である。電子を伝導帯へ励起するためにはエネルギーギャップより大きなエネルギーが必要なので、 $\lambda < \lambda_g$ の光を照射すると内部光電効果を観測することができる。

4 光の粒子性

4.1 モノクロメータ

分光器の入射スリットの前にLED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、スリットの開けすぎや閉めすぎに注意する。

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読む。赤、橙、黄、緑、青、紫と自分で思ったときの分光器の波長を記録する。この実験から、分光器のダイヤルと色の関係が、およそどのようなになっているかを推測する。

課題 4-1 分光器内の各光学素子の役割、分光器の種類や特徴を、上で描いた図を使いながら述べよ。また、実験結果と文献を比べ、色と波長の関係を述べよ。

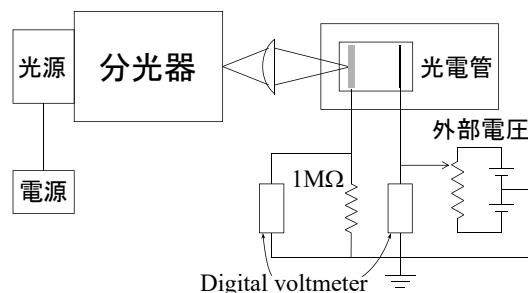


図 5: 実験配置. 光電管に加える電圧を -8 V から 8 V に変えながら、抵抗 $1\text{ M}\Omega$ に流れる電流を測る。

4.2 光電効果

4.2.1 光電子の運動エネルギー

光電効果の概念図 3 を測定装置の中に組み込むと図 4 のようになる。ここで、外部電圧、運動エネルギー、仕事関数と光子のエネルギーの関係を理解しよう。波長 λ の光を仕事関数 Φ の光電面に照射すると、光電効果で放出される電子の運動エネルギーの最大値は $T_0 = hc/\lambda - \Phi$ になる。外部電圧による電子に対するポテンシャル障壁を T_0 に等しくすると、 $qV_S = hc/\lambda - \Phi$ である。ここで q は電子の電気量 $q = -e < 0$ である。図 5 のような配置で実験を行い、 $1\text{ M}\Omega$ の抵抗の両端の電位差から、抵抗に流れる光電流を求める。

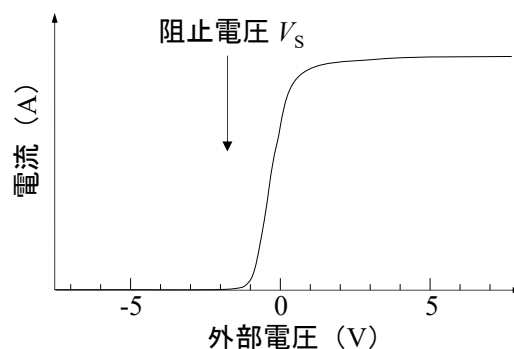


図 6: 光電管の出力電流. 光電子が相対する電極に達すると、外部に電流が流れる。電流 (A) は単位時間あたりに流れる電気量 (C/s) だから、電流値により流れる電子数がわかる。

課題 4-2 波長 450 nm 、入射と出射スリット 0.4 mm に固定し、外部電圧 V を -8 V から 8 V の範囲で変化させ、図 6 のような電圧と電流の関係 (曲線 1) を測定する。電流の立ち上がる電圧を阻止電圧 V_S として、放出された電子の最大の運動エネルギー T_0 を求めよ。

4.2.2 阻止電圧の波長依存性

波長ごとにスリット幅を調整し、図 6 のような電圧と電流の関係を測定する。その曲線より阻止電圧を求め、さらに、阻止電圧の波長依存性を求める。例えば、光電管を照射する光の波長、入射と出射スリット幅を (430 nm , 0.5 mm , 曲線 2), (530 nm , 0.5 mm , 曲線 3), (630 nm , 1.0 mm , 曲線 4) とする。スリットの主な役割は、波長分解能と光量の調整である。波長やスリット幅は、光パワーの波長依存性、回折格子を使用している分光器の特徴、光

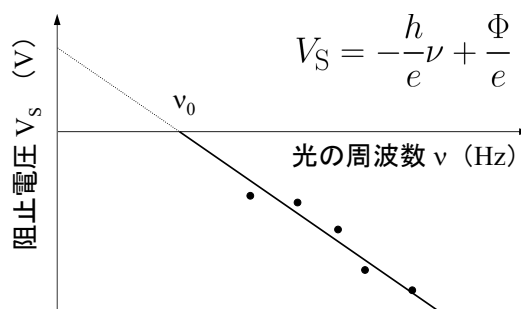


図 7: プランク定数と仕事関数の求め方。

電効果の効率を考慮して決める。測定条件を決める基準として、出力電圧の最大値が 20 mV (電流 20 nA) になるようにスリット幅を調整してもよい。

課題 4-3 波長ごとの阻止電圧 V_S を求め、図 7 のように、素子電圧 V_S と光の周波数 $\nu = c/\lambda$ のグラフを描く。最小二乗法により直線を求め、プランク定数 (Planck constant) h と仕事関数 Φ を求めよ。

4.2.3 光電流と光強度

波長 450 nm において、スリット幅により、光電管に入射する光強度を 3 段階 (曲線 1 を含む) に変化させよ。それぞれの入射光強度における、電流の外部電圧依存性 (曲線 5, 6) を測定せよ。

課題 4-5 波と粒子の性質を対比させ、光をひとつひとつ数えられる粒子として、上の実験結果 (曲線 1-6) を説明せよ。次に、ある入射光強度における最大電流値から、単位時間あたりに流れる電子数、つまり、光電効果により放出される電子数を求めよ。

5 原子のスペクトル

5.1 スペクトロメータ

蛍光灯の光を使い、光ファイバー入力分光器の動作確認をする。次に、原子 (Hg, He, Ne, Ar) の輝線スペクトルを観測する。¹ それぞれの輝線の最も高くなる波長を求め、課題 5-1 で説明するような表にする。4 種類の原子すべての輝線データを 1 つのデータセットとして、最小二乗法 (残差二乗和を最小にする手法) により、分光器の波長表示を較正する。

課題 5-1 備え付け資料、理科年表、データベース² などに記載された波長 (文献値) と分光器の目盛による波長 (実測値) の関係から、測定した輝線を同定する。表とグラフを作成し、最小二乗法により較正曲線の式を求める。表に載せる項目は有効数字³で表し、波長実測値、光検出器の出力 (輝線の高さ)、波長較正值⁴、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、横軸の範囲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。原子ごとに異なるマーク (色や形) で表示するとよい。測定と較正が正しく行われた場合、残差のヒストグラムはゼロを中心にガウス分布する。

(班内で話し合い、上の課題内容をしっかり理解する)

5.2 色ガラスフィルター

半導体微粒子を分散させたガラスは、バンドギャップより高いエネルギーの光を吸収する。このような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 (ショートアーク) 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) をすると、滑らかな曲線を描くことができる。

課題 5-2 図 8 のような光源と透過光のスペクトルより、色ガラスフィルターの透過率のグラフを描け。透過率が階段状に変化する波長より、半導体微粒子のバンドギャップエネルギーを eV の単位で求めよ。

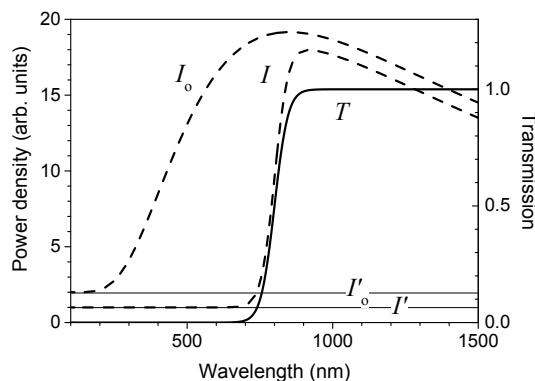
¹ 迷光が入るときは暗幕を使う。

² https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

³ 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?

⁴ 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。

図 8: 色ガラスフィルターの透過率. 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. 露光時間が等しいと $I'_0 \approx I'$ 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 光のコヒーレンス

6.1 マイケルソン干渉計

図 9 のように, レーザー光を半透鏡 (half mirror, beam splitter) で 2 つに分け, それぞれを異なる光路で伝播させたのち, 重ね合わせた光の干渉を観測する装置をマイケルソン干渉計 (Michelson interferometer) と呼ぶ. 重ね合わせた光の位相が等しければ強めあい, 逆位相 (位相差が π) であれば弱めあう. スクリーン上の光の強さを測定す

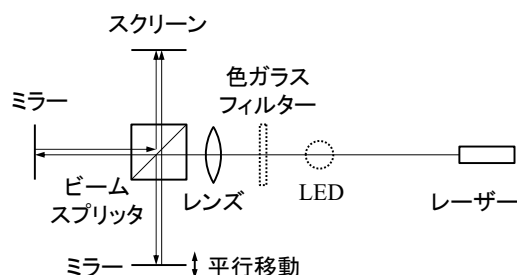


図 9: マイケルソン干渉計

れば, 光路長 (屈折率 $\times$ 光の伝播した距離) の相対的な変化を敏感に検知できる. ここでは, 屈折率が一樣な媒質である空气中を伝播する光について, 一方の光路にある鏡を平行移動させ相対位相を変える. まず, 緑色レーザー光が, スクリーン上に干渉するように鏡の角度を調整する (通常は調整済み). 次に, 干渉縞の明暗がはっきりする (visibility が高くなる) ように, 鏡の位置 (光路長) を調整する. スクリーン上で干渉した光の強さが強 $\rightarrow$ 弱 $\rightarrow$ 強と変化したとき, 相対位相が 2π , つまり, 光路長が 1 波長だけ変化したことになる.

課題 6-1 マイケルソン干渉計を用いて緑色レーザー光の波長を求めよ. 平行移動のつまみは一目盛が $1 \mu\text{m}$ である. 波長を精度よく測定するために, 多数個の干渉縞 (多数回の強弱) を観測する.

6.2 光源のスペクトルとコヒーレンス

2 つの光路長が等しいとき, どんな波長の光を干渉計に入射させても, 干渉縞は明瞭に観測できる. しかし, 光路差を大きくすると干渉縞がぼやけていく. 干渉縞が観測できる最大の光路差を, その光のコヒーレンス (可干渉) 長 (coherence length) という. ここでは, スペクトルとコヒーレンス長の関係性を調べよう. まず, 光ファイバー入力分光器を使って, 4 つの光スペクトル (緑色レーザー光, 赤色 LED (light emitting diode), 白色 LED, 白色 LED + 赤色フィルター) を観測する.⁵ 次に, それぞれの光のコヒーレンス長を測定する.

課題 6-2 緑色レーザー光, 赤色 LED, 白色 LED のコヒーレンス長とスペクトル幅との関係性を議論せよ.

赤色の色ガラスフィルターをビームスプリッタの前または後において, 白色 LED 光のスペクトルを赤色の領域のみに制限し, コヒーレンス長を測定する.

課題 6-3 色ガラスフィルターを加えたことによる, 白色 LED のコヒーレンス長の変化について述べよ. また, 同一の光源を使い, フィルターによりスペクトルを変化させて測定することの意義を述べよ.

⁵ 迷光が入る場合は暗幕を利用する.

7 直線偏光の性質

7.1 ブリュースタ角

波面(等位相面)が平面である平面電磁波は横波であり、電場と磁場の振動する方向が電磁波の伝播方向(propagation direction)と直交する。電場や磁場が、それぞれ直交する平面内で振動しながら電磁波が伝播するとき、直線偏光(波)(linearly-polarized light)という。(例、液晶ディスプレイの光、床や水面での反射光)

まず、横波の1つである直線偏光を利用した計測として、物質の屈折率を測定する。直線偏光を物質(ここではプラスチック板)に入射させると、境界で透過(transmission)または反射(reflection)される。直線偏光の偏向面が入射面内にあるとき、反射光の強度を観測しながら入射角を変えていくと、ある角度で反射光が非常に弱くなるのがわかる。この角 θ_B をブリュースタ角(Brewster angle)とよび $\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$ である。ここで、 n_1 は空気の屈折率(refractive index)、 n_2 はプラスチックの屈折率である。

課題 7-1 緑色レーザー光をプラスチック板に入射させ、反射光がレーザーに戻る角度、反射光強度が極小になる角度からブリュースタ角を計算し、プラスチックの屈折率を求めよ。また、ブリュースタ角で反射光が弱くなる理由を説明せよ。

7.2 マッハ・ツェンダー干渉計

図 10 のように、マッハ・ツェンダー干渉計(Mach-Zehnder interferometer)では、半透鏡(half mirror, beam splitter)で分けた光が、異なる光路を通過したのち、半透鏡で重ね合わせられる。それぞれの光路は(往復させずに)片道一回だけ通るので、被測定物を光路に挿入しやすい、偏光操作をしやすいなどの特徴がある。また、2つの出力ポートのどちらも観測しやすい。以上のように、マッハ・ツェンダー干渉計では、干渉効果により光路内の光学特性の変化を敏感に観測することができる。ここでは、それぞれの光路に直線偏向板を挿入し、直線偏光の性質を調べる。

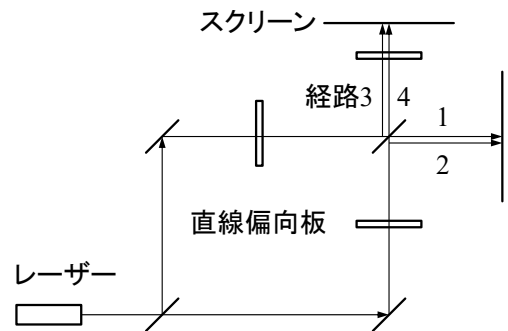


図 10: マッハ・ツェンダー干渉計。光源から出力ポートまで経路1は反射-反射-透過、経路2は透過-反射-反射、経路3は反射-反射-反射、経路4は透過-反射-透過を経て出力される。しかし、反射の回数だけでは干渉を説明できない。

課題 7-2 直線偏向板の向きを(例、どちらも鉛直方向の直線偏光が通過するように)そろえ、干渉計の調整をする。2つのスクリーン上の干渉パターン(同心円の中心の明暗)が逆になる理由を説明せよ。

z 軸方向に伝播する平面電磁波の電場は、 $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_{10} \exp i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 - \omega_1 t + \phi_1)$ のように書かれる。ここで、電場の振幅ベクトル $\mathbf{E}_{10} = (E_{10}^x, E_{10}^y, 0)$ 、伝播(波数)ベクトル $\mathbf{k}_1 = (0, 0, k_1^z)$ 、電磁波の光路上の点 $\mathbf{r}_1$ 、角周波数 ω_1 、反射による位相変化 ϕ_1 である。2つの電磁波 $\mathbf{E}_1$ と $\mathbf{E}_2$ を干渉させたとき、スクリーン上の明るさは $|\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2|^2$ に比例する(単位体積あたりの電磁波のエネルギーが ϵE^2 であることを思い出そう)。課題 7-2 は、位相部分 $(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}_i - \omega_i t + \phi_i)$ を理解するための実験である。課題 7-3、7-4 は、振幅ベクトル $\mathbf{E}_{i0}$ を理解するための実験である。

課題 7-3 一方の直線偏向板を 90° だけ回し、それぞれの光の偏向面を直交させる。2つのスクリーン上の干渉パターンを観察し、直線偏光と干渉について説明せよ。

直線偏向板の透過方向の軸を x 軸から θ だけ傾けると、透過光の偏向方向は $\epsilon = (\cos \theta, \sin \theta, 0)$ になる。つまり、電磁波 $\mathbf{E}_{10} \exp i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 - \omega_1 t)$ を入射させると、透過電磁波は $(\mathbf{E}_{10} \cdot \epsilon) \epsilon \exp i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 - \omega_1 t)$ になる。

課題 7-4 光路内の直線偏向板を互いに直交させたまま、一方の出力ポートに直線偏向板を 45° の向きに置く。それぞれのスクリーン上の干渉を観察し、元は直交していた直線偏光が干渉する理由を説明せよ。

8 レポート

データに基づいた主張を報告書(レポート)として明快に記す。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。いかに個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 —

9 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。ネット検索や生成 AI の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。

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, 櫛田孝司 編, 丸善
4. 実験物理学講座 9 レーザー測定, 櫛田孝司 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
6. マイケルソン干渉計マニュアル
7. マッハ・ツェンダー干渉計マニュアル