

固体分光実験

量子現象としての光と物質の相互作用

— 光電効果と原子のエネルギー準位 —

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	共通実験	2
3.1	実験装置	2
3.2	実験手順	4
3.3	第1日目の後片付け	5
4	光電効果と光の粒子性	5
4.1	光電効果	5
4.2	実験手順	6
5	原子と光の輻射	8
5.1	エネルギー準位	8
5.2	実験手順	9
6	固体によるファラデー回転	10
6.1	ファラデー回転	10
6.2	実験手順	11
7	後片付け	12
8	レポート	12
9	参考文献	12

1 はじめに

固体分光実験は、下の流れにそって始まり、完了する。つまり、予習がなければ始まらない。また、グループで話し合っって実験を工夫する「第3週目の再実験」を重視する。

第0週目 予習（実験内容の理解、選択課題の希望決定）

第1週目 実験解説 — 共通実験 — データ整理（グラフや表の作成）

第2週目 選択実験 — データ整理（グラフや表の作成） — 課題問題の考察 — グループ討論

第3週目 再実験 — レポート作成 — レポート提出

第4週目 レポート返却、討論

2 目的

物質の性質（物性）を調べる方法は数多くあるが、「固体分光実験」では、波長（ λ ）ごとに分けた光を物質に照射して電気的応答を調べる。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。実験をとおして、光の振動数とエネルギー（ E ）という物理量の間に関係 $E = h\nu$ という比例関係があることを認識し、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 共通実験

第1日目は共通の実験を行い、分光器の特徴を理解する。

3.1 実験装置

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、光検出器で構成される。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設置する。「固体分光実験」で光電効果を観測する場合は、光電管という光検出器の光電面が試料になる。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。

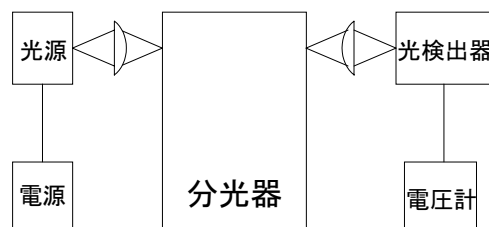


図1 分光実験で使う装置の基本構成

3.1.1 光源

きわめて高温の黒体（融点が非常に高い物質）がないため、現在、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・赤外域とは異なるタイプの光源が、必要に応じて使い分けられている。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ている。「固体分光実験」では、波長を広い範囲で変えて測定する場合、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まとめるが、さらに詳しい特徴は実験室備え付けの資料を参照せよ。

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、スペクトルの形が電力によりほとんど変化しない。
- 高輝度の点光源の特性を持つ連続スペクトル光源である。
- 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。
- 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、ランプ電圧・圧力などランプの動作条件に依存するだけなので、エネルギー分解能や光強度に厳しい条件がなければ、分光分析に適している。

4. 半導体レーザー

- 半導体の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。
- 学生実験では、赤色と緑色のレーザーポインターを使う。
- レーザー光は指向性がよく単位面積当たりの強度が強いため、光を目に入れないよう気をつける。

3.1.2 分光器

光源から放射された光を分けて、ある限定された波長幅の光を選び出すにはプリズム、回折格子などが使われる。プリズムは波長によって材質の屈折率が異なり、したがってプリズムを出ていく光の方向が波長によって異なることを利用している。回折格子は規則正しく並べられた細い多くの格子(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している。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)を持つ分光素子である。^{*1}

連続光から、実験に必要な狭い波長幅の光を選び出すには分散素子だけではなく、光源からの光を無駄なく集めて分散素子の内蔵された光学系の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

干渉フィルターや色ガラスフィルターは、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を透過するので、光源や回折格子の種類、観測波長を検討し、高次光が出力に混ざる可能性がある場合は、分光フィルターを併用する。

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、光の強度 $[W] = [J/s]$ 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。

^{*1} 逆に、光の波長と光が反射する角度がわかれば、回折格子の溝数を知ることができる。

3.2 実験手順

3.2.1 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などの連続スペクトルの光源を置いて、分光器の構造を調べる。分光器の上蓋を開ける際に、ミラー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ように注意する。また、実験全体をとおして、スリットの開けすぎや閉めすぎに、十分注意する。光が入射スリットから出射スリットへ進む経路、光が波長に応じて分散されるようすを、光学素子の機能がわかるように記録する。

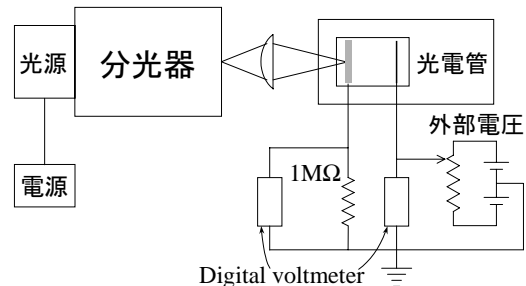


図2 実験配置。自分がどんな実験条件を変えながら何を測定しているのか、よく考えよ。

課題 3-1 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記述せよ。また、分光器内の各光学素子の役割を述べよ。

3.2.2 分光される波長と光の色

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。各自、赤、橙、黄色、緑、青、紫と自分で思った分光器のダイヤルを記録する。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 3-2 色と波長の関係を文献で調べて、上記の実験と比較せよ。

3.2.3 輝線スペクトルと分光器の分解能

焦点距離 100 mm の回折格子分光器 (SG-100, 光研工業製) を使って、He, Ne, Ar, Xe, Hg, Cd などから適当に選んだ原子の輝線スペクトルを測定し、分光器の波長較正を行う。^{*2} スリット幅は、0.5~1.0 mm にする。測定の際、分光器ダイヤルのバックラッシュ^{*3}に注意する。オプティカルチョッパーの設置されているテーブルでは、ロックインアンプのスイッチを入れ、sig1 と chopper を選択すれば光の相対的強さを表示する。光電管を使う場合は、外部電圧を +8 V 付近に固定する。

課題 3-3 備え付けの理科年表の各輝線のデータと分光器の目盛りの関係から、測定した輝線の波長を同定し、グラフ (横軸:分光器ダイヤル、縦軸:波長の文献値) を作成せよ。^{*4} また、最小二乗法などにより較正曲線の式を求めよ。^{*5}

ある一本の輝線を選んで分光器のダイヤルを細かく動かし、スペクトル線の形状を測定し記録する。スリット幅を変えて形状を測定し、スペクトルの半値全幅を求める。図3のように、半値を得るためには電圧オフ

^{*2} 以降の実験を踏まえ、較正すべき波長領域に適したランプを選ぶ。

^{*3} backlash. 装置が歯車などの機構で動作する場合、歯車には遊びが存在するので、回転させる方向によりダイヤルの読みが異なる。

^{*4} 「グラフを描くことによって、どんなよいことがあるのか」を、自問しながらグラフを作成する。

^{*5} 有効数字について熟考せよ。例えば、電卓により多すぎる桁数で 1.23456 ± 0.00123 (第2項目は誤差) と値が求まったとき、有効数字を何桁にするか? また、電卓により較正曲線が $y = (1.23456 \pm 0.00123)x + (9.8765 \pm 0.987)$ (積と和が混在している) と求まったとき、それぞれ何桁の有効数字にするか?

セットをしっかりと測定する。光検出器(フォトダイオードまたは光電管)を出射スリットの後につける。出力信号ケーブルを、フォトダイオードの場合には測定器の背面2番端子に接続し、光電管の場合にはデジタル電圧計に接続し、表示される数値を記録していく。^{*6} 実際のスリット幅がマイクロメータ目盛り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りの値を求めておく。^{*7} その後、入射スリット・出射スリット双方の幅を [0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 mm など]^{*8} にして、スペクトルを測定する。また、測定できるギリギリのスリット幅でもスペクトルを測定する。興味があれば、分光器の分解能の限界を調べるため、半導体レーザー(ポインター)を使ってみると良い。

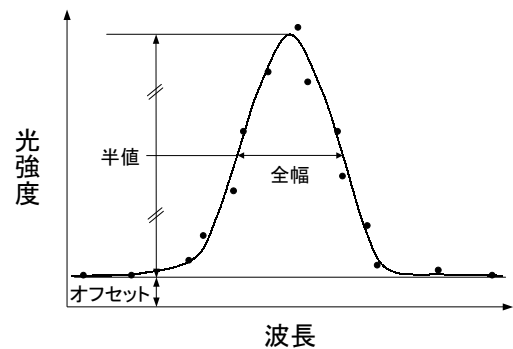


図3 ^{はんちぜんはば}半値全幅 (FWHM : Full Width at Half Maximum)。測定値を十分大きな点で表し、スペクトル線の形状を(測定点を単につなぐのではなく)描いてから半値全幅を求める。

課題 3-4 横軸にスリット幅、縦軸にスペクトル幅(半値全幅)のグラフを作成し、スリット幅が0 mm におけるスペクトル幅を外挿によって求めよ。回折格子・光学系の収差・スリットによる回折などを考慮し、実験で使用した分光器の波長分解能を決める要因を、式と数値を使って考察せよ。^{*9} さらに、実験で観測した ^{はんちぜんはば}半値全幅 から外挿して求めた幅は、輝線本来の幅^{*10}ではないことを定量的^{*11}に説明せよ。

3.3 第1日目の後片付け

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

4 光電効果と光の粒子性

4.1 光電効果 第2日目の選択実験 I

物質が光を吸収し自由電子を生ずる現象を光電効果と呼ぶ。光を吸収して固体表面から電子が外部に放出される場合を(狭い意味で)光電効果と呼ぶ。実験で使用する光電管は、こちらのタイプである。これに対し、

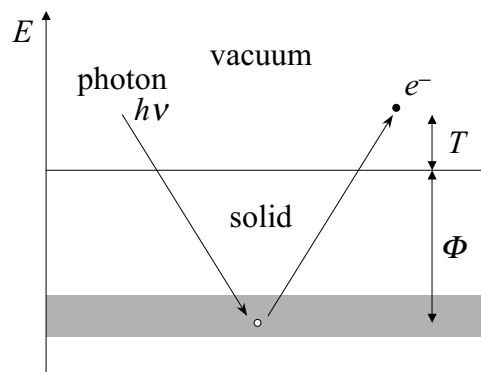


図4 外部光電効果。光電面に光があると、真空中に比べ Φ だけ低いエネルギー状態であった電子がはじき出される。電子の運動エネルギーは、光子のエネルギー $h\nu$ から、仕事関数 Φ を引いたものになる。

^{*6} 光の強さに比例した値を表わす電圧計の値が0.5 V 以下になるように、光量を調整する。理由は、図2を参照して考えよ。

^{*7} 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、信号電圧の出なくなる目盛りを読み、出射スリットのゼロとする。入射スリットの場合も同様である。

^{*8} 「など」は、必要に応じて他の値でもデータを取りなさい、ということの意味する。

^{*9} 「実際にはスリットが完全に閉じてなく光が漏れているから」なんて書かないこと。

^{*10} 輝線本来の幅とは、ドップラー幅・圧力幅・自然幅などが畳重なった、放電ランプの線幅である。学生実験で使用する分光器より格段に分解能が高い装置だと観測できる。ここでは、原子線ランプから発生する光の線幅の原因を考察する必要がある。

^{*11} 分光器で分解できる波長は、実験で実測したのだから、定量的に求まっている。その値が、「輝線本来の幅」と一致するか否かについて定量的に議論する必要がある。定量的に議論するとは、理論で予想した量と実験の観測量を比較しながら議論することである。

物質が光を吸収して固体内で自由電子を生じ、電気伝導率が変化したり、起電力が生じたりする場合を光伝導と呼ぶ。特に区別する場合は、前者を外部光電効果、後者を内部光電効果(光導電効果)と呼ぶこともある。

4.1.1 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って広く信じられるようになった。図4は外部光電効果の概念図である。振動数 ν の光が固体に照射されると、 $h\nu > \Phi$ 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)である。放出される電子の運動エネルギーは、 $T_0 = h\nu - \Phi$ 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の数を決めるにすぎなかった。

1905年にA. Einsteinは光子という概念を導入し、上記の観測結果を次のように説明した。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ことができる。もし $h\nu < \Phi$ ならば、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。

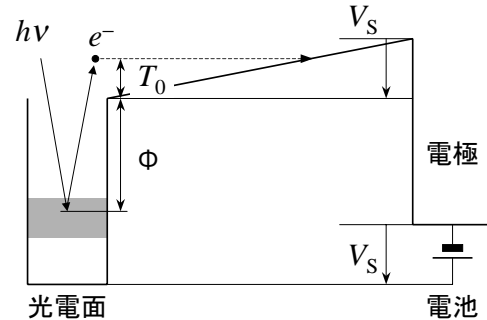


図5 阻止電圧の模式図。真空中に飛び出した電子の運動エネルギーが、阻止電圧によるポテンシャルエネルギーより小さいと、相対する電極に到達しない。

4.1.2 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の場合、 $E_g \approx 2.4$ eV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である。この場合、ちょうどエネルギーギャップに相当するエネルギーの光の波長は $\lambda_0 \sim 1240/E_g \sim 520$ nmなので、 $\lambda < \lambda_0$ 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。

4.2 実験手順

4.2.1 光電子の運動エネルギー

光電効果の概念図4を、測定装置の中に当てはめて描くと図5のようになる。ここで阻止電圧、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は $T_0 = hc/\lambda - \Phi$ になる。阻止電圧による電子に対するポテ

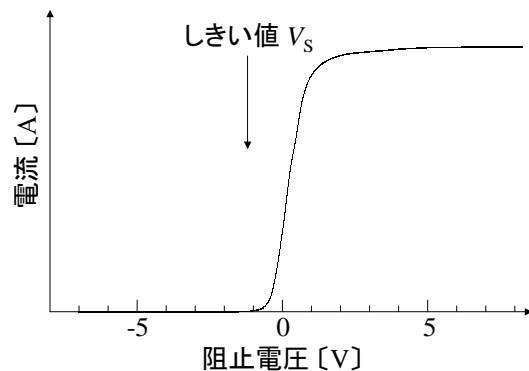


図6 光電管から流れ出る光電流。光電子が相対する電極に到達すると、外部に電流が流れることになる。電流 $[A = c/s]$ は単位時間あたりに流れる電荷量であるから、電子の電荷と電流値から、流れる電子数がわかる。

ンシャル障壁を T_0 に等しくしたとき、阻止電圧 V_S は $qV_S = hc/\lambda - \Phi$ になる。ここで q は電子の電荷で、 $q = -e < 0$ である。図2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、抵抗に流れる電流を求めよ。^{*12} 波長を 500 nm に固定し、ダイヤルを回し阻止電圧 V_S を $[-8\text{ V} \sim +8\text{ V}]$ の範囲で変化させ、図6のように電圧 V_S と光電流 I のグラフを作成する。グラフの立ち上がりから、光電効果により放出された電子の運動エネルギーを求めよ。

課題 4-1 光電流 V_S 阻止電圧のグラフで、立ち上がりがシャープでないことが意味していることを述べよ。^{*13} また、阻止電圧の閾値^{しきいち}の決定法の問題点を述べよ。^{*14} 文献を調べて、光のエネルギー幅・固体中電子のエネルギー・フェルミ準位・光を吸収した後の電子の振舞い、などを念頭において考察せよ。

4.2.2 阻止電圧閾値の波長依存性

光電管に照射する光の波長を $[450, 550, 600, 650\text{ nm}]$ ^{*15} のように変え、前項の実験を繰り返す。各波長ごとにスリット幅を調整しよう。スリットの主な役割は、波長分解能の設定と光量の調整である。ランプ光強度の波長依存性^{*16}や分光器の特徴^{*17}を考慮して、適宜、色ガラスフィルターを使い、不要な波長の光を取り除く。^{*18}

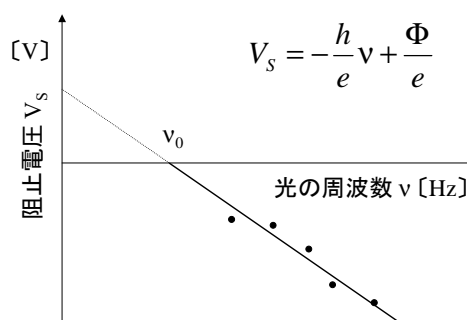


図7 プランク定数と仕事関数の求め方。

課題 4-2 それぞれの波長に対する阻止電圧の閾値

V_S を求め、図7のように、 V_S 対 $\nu = c/\lambda$ の

グラフを作成する。グラフから Planck 定数 h と仕事関数 Φ を求めよ。桁違いの値が出たら、「データを吟味する」「実験をやり直す」などを繰り返す。

4.2.3 光電流と光強度

波長 500 nm において入射光強度を3段階に変化させ、光電流の外部電圧依存性を測定せよ。タングステンランプでは電源電圧を調整し、キセノンランプでは分光器と光源の距離を調節して入射光強度を変化させる。

課題 4-3 以上を総合して、光を波とするより、1つ1つ数えられる粒子であるとすれば、実験結果を説明できることを述べよ。^{*19} 各光強度において、電流値から単位時間あたりに放出される電子数を計算し、放射感度から単位時間あたりに入射する光子数^{*20}を求めよ。

^{*12} 測定器の配線をよく理解して図6のグラフを描きなさい。例えば、スリットの幅を変化させ光強度を変えると、同じ波長の光でもグラフに描かれる曲線の形が変わる。

^{*13} 「少しづつ電子が飛び出て漏れ電流が流れているから」なんていうのは考察ではない。

^{*14} 20歳を過ぎたら、電圧がゼロをよぎる点が閾値である、なんて安易な思考回路を捨てましょう。

^{*15} 「など」は、必要に応じて他の値でもデータを取りなさい、ということの意味する。

^{*16} キセノンランプやタングステンランプは、紫外光も放射している

^{*17} 特に、分散素子として回折格子を使用しているので、回折の次数に注意する。

^{*18} 色ガラスフィルターの特性は備え付けの資料により確認すること。

^{*19} 例えばエネルギーの表式など、波の性質と粒子の性質を対比させて説明する。

^{*20} 光電管の放射感度は、波長 340 nm の光に対して 51 mA/W である。これは、「 1 W の光が光電管に入射すると 51 mA の電流が流れる」ことを意味する。この値により、1個の光子により何個の電子をとり出すことができるかを表す「量子効率」を求めることができる。他の波長における量子効率が、 340 nm のものと同じであるとして課題に答えよ。

5 原子と光の輻射

第2日目の選択実験 II

5.1 エネルギー準位

原子のエネルギー状態は、離散的なエネルギー準位で表される。そのエネルギー (E) は、原子核と電子の運動エネルギー (T) と、それらの相互作用エネルギー (V) の和 ($E = T + V$) である。原子内の相互作用には主に、静電的なクーロン相互作用と磁気的な(電子) スピン-軌道相互作用がある。原子の状態が遷移(エネルギー準位が E_n から E_m に変化)すると、多くの場合、振動数 $\nu = (E_n - E_m)/h$ の電磁波を放射する。

5.1.1 クーロン相互作用

荷電粒子である電子と原子核の間には、ポテンシャル

$$V = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ne^2}{r}, \quad (1)$$

で表されるクーロン相互作用が働き、これは電子準位のエネルギー値の大部分を占める最も大きな相互作用である。ここで N は原子番号、 r は電子と原子核の距離である。内殻の電子は原子核の電荷を遮蔽するので、価電子は式(1)の $N = 1$ に相当するポテンシャルを感じる。クーロン相互作用による離散的なエネルギーは、電子が1個だけの水素原子では、

$$E_n = -\frac{R}{n^2}, \quad (2)$$

と表される。ここで、 R はリドバーク(リュドベリ)定数、 n は主量子数と呼ばれる自然数である。図8に示すように、基底準位(最も安定な電子状態)では $n = 1$ である。

課題 5-1 水素原子の場合で量子力学のシュレディンガー方程式を解き、式(2)を求めよ。^{*21} また、リドバーク定数を基礎物理定数で表せ。

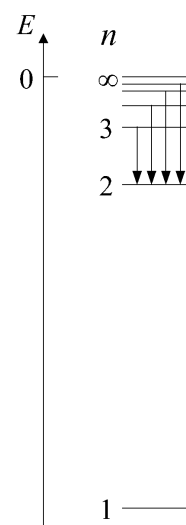


図8 水素原子のエネルギー準位。整数値は主量子数 n である。ここでは電子の軌道角運動量やスピンを考慮していない。

5.1.2 スピン-軌道相互作用

図9に示すようにスピン-軌道相互作用は、電子の軌道運動に起因する磁場と、電子スピンの伴なう磁気モーメントとの間に働く磁気的な相互作用である。その大きさは次のように表される。

$$E = \xi \mathbf{S} \cdot \mathbf{L} = \xi \frac{J(J+1) - S(S+1) - L(L+1)}{2}, \quad (3)$$

ここで、 S は電子スピン、 L は軌道角運動量、 J は電子の全角運動量 ($J = S + L$) の演算子である。^{*22} 角運動量を無次元量として表現し、角運動量の次元を担っている \hbar を、スピン-軌道相互作用定数 ξ に入れ込んでいる。スピン-軌道相互作用はクーロン相互作用に比べ非常に小さいので、実験では、図10のように主量子数で表されるエネルギー準位が微細に分裂しているように観測される。ナトリウム原子の D 線の場合、対応す

^{*21} ここでは原子核と価電子のクーロン相互作用のみを考えている。つまり、中心力ポテンシャルの問題なので、角度変数について波動関数を求める必要はない。

^{*22} 量子力学の教科書で、「角運動量の合成」を参照せよ。

る励起準位の軌道角運動量の量子数は $L = 1$ であり、価電子が 1 個なので $S = 1/2$ である。分裂した 2 つの準位は、それぞれ、 $J = 3/2$ と $J = 1/2$ である。

課題 5-2 ベクトルの内積で表される式 (3) の左辺が、実数である右辺と等しいことを示せ。^{*23}

5.2 実験手順

5.2.1 水素原子のスペクトル

光源として水素原子の輝線ランプを使い、光検出器としてフォトダイオードを使う。フォトダイオードの出力端子がつながっているロックインアンプのスイッチを入れ、sig1 と chopper を選択すれば、アンプは光の相対的強さを表示する。実験の手順は、共通実験で分光器の較正をした方法と同様である。線形を測定せずに、スペクトル線強度が最大となる波長と強度を手際よく測定する。分光器のスリットは、必要とする波長精度と分光器の分解能を比較して、最適な幅にする。光の弱い短波長側では、レンズを使って効率よく光を導く。

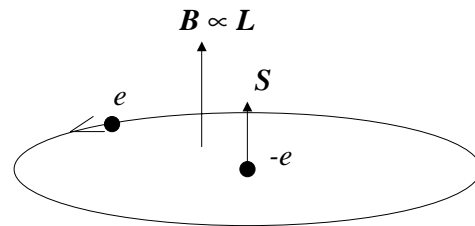


図9 スピン-軌道相互作用。電子が静止している座標系で考えると、原子核の運動によって電子の位置に磁場 B (軌道角運動量 L に比例) が発生する。その磁場に対する電子スピンの向き (up/down) により、準位のエネルギーが異なる (エネルギー縮退が解ける)。

課題 5-3 水素原子のバルマー系列の輝線波長を測定し、リドバーグ定数を求めよ。また、課題5-1 で求めた式に基礎定数の値を代入した値やリドバーグ定数の文献値の三者を比較し検討せよ。

5.2.2 ナトリウム原子のスペクトル

光源としてナトリウムランプを使い、光検出器としてフォトダイオードを使う。実験手順は、共通実験で分光器の較正をした方法と同様である。ただし、スペクトルの微細構造を観測できるように分光器の分解能を最大にして D 線の形状を測定する。フォトダイオードの信号出力が非常に小さいので、ランプ・分光器・光検出器の配置を慎重に整える。

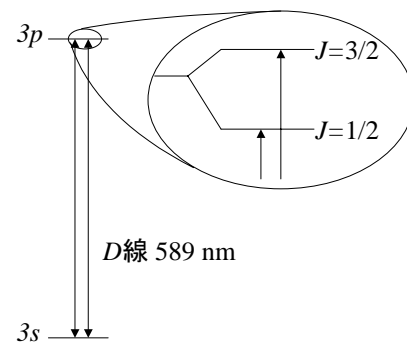


図10 ナトリウム原子の D 線と、スピン-軌道相互作用による微細構造

課題 5-4 ナトリウム原子の近接した二重線のスペクトル

をグラフに描き、電子励起状態のエネルギー分裂^{*24}の大きさを、 $\Delta E/h$ [Hz] の単位で求めよ。

^{*25} さらに、スピン-軌道相互作用定数を求めよ。^{*26}

^{*23} この問いは、次のように言い換えてもよい。演算子 S, L を含む左辺が、右辺のように S^2, L^2, J^2 の固有値で表されることを説明せよ。 S, L, J の同時固有関数の存在も示しなさい。

^{*24} スピンと軌道角運動量の磁気相互作用によって縮退していた準位が分裂する、というイメージを忘れずに。

^{*25} 原子スペクトルについて、さらに深く勉強したい学生は、2重線の強度比を説明するのも良いでしょう

^{*26} ξ の値が 2 つ求まるなんてありえない。

6 固体によるファラデー回転

第2日目の選択実験 III

6.1 ファラデー回転

物質に直線偏光^{*27}を照射し、光軸と平行に磁場を印加すると、偏光面が回転する。この現象をファラデー効果(回転)と呼び、偏光面の回転角 θ は、

$$\theta = V H \ell, \quad (4)$$

と表される。ここで、 H は磁場の強さ、 ℓ は試料の長さである。 V はヴェルデ定数で物質の種類、波長、温度によって決まる。その符号は、磁場を発生するソレノイドコイルに流す電流と同じ向きに回転する場合を正とする。光学遷移に関わる準位のゼーマン分裂^{*28} が起源なので、共鳴波長に近いほど偏光面の回転角が大きい。あらゆる物質は程度の差こそあれファラデー効果を示すが、^{*29} ガラスなどの透明な固体では吸収が紫外域にあるので、可視域では短波長ほど回転角が大きくなる。実験では、希土類元素を含むガラス(直径 4 mm, 長さ 20 mm) に直線偏光を照射する。

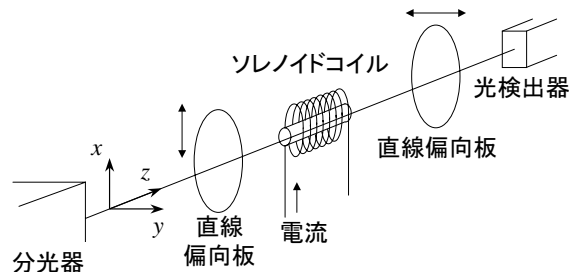


図 11 ファラデー回転を観測する実験配置

課題 6-1 ファラデー効果について調べ、偏光面が回転する機構を述べよ。さらに偏光面の回転角が式(4)のように表されることを示せ。

ヒント 1 電場が x 軸方向に偏った直線偏光の電場を、ファラデーガラスへの入射前は、 $E = (E_x, E_y) = (E_0 \cos(\omega t - nkz), 0)$ と書くことができる。ここで、 n は空気の屈折率、 $k = \omega/c$ は真空中の波数である。ファラデーガラスの入射側端面 ($z = 0$) において、 x 軸に偏った直線偏光の電場を、

$$(E_0 \cos \omega t, 0) = \frac{E_0}{2} (\cos \omega t, \sin \omega t) + \frac{E_0}{2} (\cos \omega t, -\sin \omega t) \quad (5)$$

と書く。第 1 項と第 2 項は、それぞれ逆回りの円偏光である。それぞれの円偏光に対するファラデーガラスの屈折率を、 n_+ , n_- とすると、出射側端面 ($z = \ell$) における電場は、

$$\frac{E_0}{2} (\cos(\omega t - n_+ k \ell), \sin(\omega t - n_+ k \ell)) + \frac{E_0}{2} (\cos(\omega t - n_- k \ell), -\sin(\omega t - n_- k \ell)), \quad (6)$$

と表わすことができる。さらに、 $n_S = (n_+ + n_-)/2$, $n_D = (n_+ - n_-)/2$ とおいて変形すると、 $E_0 (\cos \theta, \sin \theta) \cos(\omega t - n_S k \ell)$ の形を得ることができる。

ヒント 2 ガラス中のすべてのイオンの共鳴周波数が同一であり、磁場によるゼーマン分裂の大きさが 2δ ($\propto H$) と書けると仮定し、円偏光に対する屈折率を次のように表わす。

$$n_+ = 1 - \alpha_0 \frac{\gamma}{2k} \frac{\omega - \omega_0 - \delta}{(\omega - \omega_0 - \delta)^2 + \gamma^2}, \quad n_- = 1 - \alpha_0 \frac{\gamma}{2k} \frac{\omega - \omega_0 + \delta}{(\omega - \omega_0 + \delta)^2 + \gamma^2}, \quad (7)$$

ここで、 ω_0 は磁場がない場合に吸収する光の角周波数、 2γ は吸収線の幅、 α_0 は $\omega = \omega_0$ における光の吸収率である。さらに、 $\gamma \ll |\omega - \omega_0|$, $\delta \ll |\omega - \omega_0|$ と近似し、式を簡単にしよう。^{*30}

^{*27} 電場あるいは磁場の振動方向が一定の電磁波を直線偏光(波)と呼び、電場の振動方向を含む面を偏光面という。

^{*28} 磁場の印加によるエネルギー準位の分裂のこと。

^{*29} 理科年表で確認しよう。

^{*30} $|\epsilon| \ll 1$ のとき、次の近似式が使える。 $(1 + \epsilon)^\alpha \approx 1 + \alpha\epsilon$ 。

課題 6-2 糖類の水溶液などに見られる旋光性とファラデー効果の相違について議論せよ。

6.2 実験手順

次に示す手順で、赤色と緑色の半導体レーザー光のファラデー回転を観測する。まず、赤色と緑色のレーザー光の波長を分光器で測る。次に、実験装置を、第 1 日目の配置から図 12 のように変更する。レーザー光を直線偏光板におし、偏光方向を確認する。^{*31} さらに 2 枚めの直線偏光板を設置し、レーザー光の直線偏光度を確認する。その後、透過光が最も暗くなるような角度に偏光板の軸を合わせる。その状態でファラデーガラスを 2 枚の偏光板の間に設置し、2 枚めの偏光板を微調し透過光が最も暗くなる角度にする。

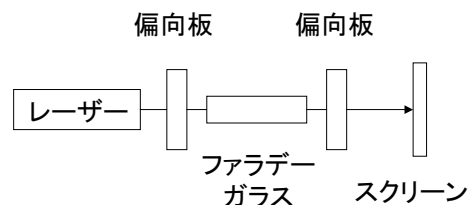


図 12 半導体レーザーを使ったファラデー回転の観測配置

さて、以上のような光学配置でファラデー回転角を測定する。この状態は、ソレノイドコイルに電流が流れていないので磁場はゼロであり、2 枚めの偏光板を透過する光は最も暗くなっているので回転角の基準である。ここでソレノイドコイルに電流を流し、偏光面の回転角と回転の向きを測定する。電流は 0 A から 3 A まで、0.5 A おきに变化させる。コイルに流す電流は、測定時以外は必ず OFF にする。^{*32}

課題 6-3 ソレノイドコイル内の対称軸における磁束密度 [T] と電流 [A] の大きさの関係を求めよ。ただし、10 層のコイルが直列につながれて 1 つのコイルになっている。各層の導線の巻数は、同じとせよ。^{*33}

課題 6-4 直線偏光の回転角と磁束密度の関係をグラフにし、ヴェルデ定数 [$\text{min G}^{-1} \text{cm}^{-1}$] を求めよ。^{*34}

キセノンランプを使い、図 13 のような光学配置でファラデー回転角の波長依存性を測定する。今度は、コイルに流す電流を 2 A に固定し、波長を 800 ~ 380 nm の範囲で变化させ測定する。ランプ光は弱いので、分光器前にオプティカルチョッパー、スクリーンの代わりに光検出器を置く。各波長ごとに電流 0 A と 2 A の場合の偏光板の角度を記録する。今回も、電流は測定時以外は必ず OFF にすることに留意する。光検出器については、ロックインアンプのスイッチを入れ、sig1 と chopper を選択すれば光の相対的強さを表示する。実験終了後、第 1 日目の光学配置に戻して終了する。

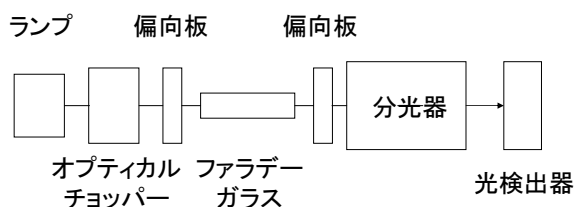


図 13 ランプを使ったファラデー回転の観測配置。分光器によって波長依存性を調べる。

課題 6-5 ヴェルデ定数の角周波数 ($\omega = 2\pi c/\lambda$) 依存性をグラフに表わせ。レーザーによる測定値も描き入れる。さらに、課題 [6-1] で求めた式を観測データにフィッティングし、ヴェルデ定数のグラフに描け。

^{*31} 実験に使用する半導体レーザー光は直線偏光している。

^{*32} 電流を流し続けるとコイルが過熱して、絶縁が破れる。電流を OFF にするには、直流電源の主電源を切るのではなく、出力のみを切るための左上の緑色のスイッチを操作する。

^{*33} 磁束密度。地磁気は約 50 nT であり、永久磁石は 0.01 ~ 1 T の磁場を発生する。

^{*34} 単位系や定義式 4 における H と B が混在しているが、ここでは次のように変換してヴェルデ定数を表現しよう。min は 1° の $1/60$ の角度の単位、G (gauss) は試料に印加する磁束密度の単位で $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ 、cm は試料の長さ 1 cm あたりを表わす。

7 後片付け

1. 各装置の電源スイッチを切る。[光源、デジタルボルトメータ、電池など]
2. 使用した装置の故障、破損がある場合は必ず報告する。
3. 実験台とその周りを清掃し、椅子を整頓する。

8 レポート

レポート作成の際の注意点などを以下に記す。データに基づいた自分の主張を明快・簡明に表現したレポート(報告書)を作成する。

1. 実験データの有効数字・誤差について十分に吟味して物理量を求める。
2. レポート作成の際に参考にした文献リストを最後につけて、それらを本文中の適切な箇所で引用する。
3. 実験はグループで行なうが、レポートは個々に作成する。同じデータであっても解析の仕方によって異なる結果が得られるので、個々にグラフなどを作成する。
4. グループ内で同じデータを使用し、市販の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るのは当然である。そのような場合に、個性を表現できるか否かが運命を分ける。
5. 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。
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しっかり伝える。文章で説明せずに式と数値を列挙しても、報告の意味はない。
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読者が理解できるように書く。これは上で述べた明快・簡明に反しない。グラフなどは描き方を十分に吟味し情報を凝縮させる。つまり、百聞は一見に如かず、を実現する。
8. 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。
9. 実験終了後1週間以内に研究棟205号室に提出し、提出後1週間以内に受取りに来る。(各年度によってスケジュールや提出場所が変更されることがあるから、実験中の指示に従うこと)

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ように心がける。また、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も利用したらいいが、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、注意せよ。

- 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