

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	7
5	原子と光の輻射	7
5.1	エネルギー準位	7
5.2	実験手順	8
6	固体によるファラデー回転	9
6.1	ファラデー回転	9
6.2	実験手順	10
7	ファイバー分光器によるスペクトル測定	10
7.1	スペクトル計測	10
7.2	計測手順	11
8	後片付け	12
9	レポート	12
10	参考文献	12

1 はじめに

固体分光実験は、下に示す流れにそって完了させる。特に、予習、討論、工夫した実験、考察を重視する。前週の測定結果をグラフに描いてきた人のみ、次の実験に進む。選択実験は、I, II, IIIの中から1つ、それに加えIVの計2つを行う。なお、実験IVでは、情報処理室のユーザー名とパスワードが必要である。

第0週 予習(実験内容の理解, 選択実験の希望決定)

第1週 実験解説—選択実験決定—共通実験—討論—データ整理(表とグラフの作成)—課題問題と考察

第2週 選択実験(I, II, III)∧IV—討論—データ整理—課題問題と考察

第3週 選択実験(IV)∧I, II, III—討論—データ整理—課題問題と考察—レポート提出

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などを調べる。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、エネルギー(E)と光の振動数の間に $E = h\nu$ 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。「固体分光実験」で光電効果を観測する場合、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。

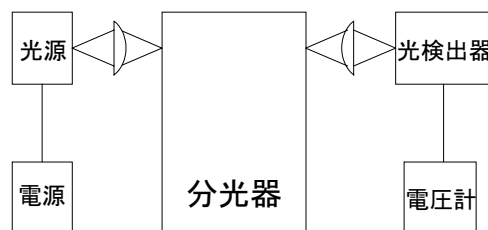


図1 分光実験で使う装置の基本構成

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ではなく、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。それぞれの光源の特徴を以下にまとめる。さらに詳しい特徴は、実験室備え付け資料を参照せよ。

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。
- 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、ランプ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、分光分析に適している。

4. レーザーポインタ

- 学生実験では、4色のレーザーポインターを使う。
- 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。^{*2} 分光器の上蓋を開ける際、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など、光学素子の機能がわかるような図を描く。

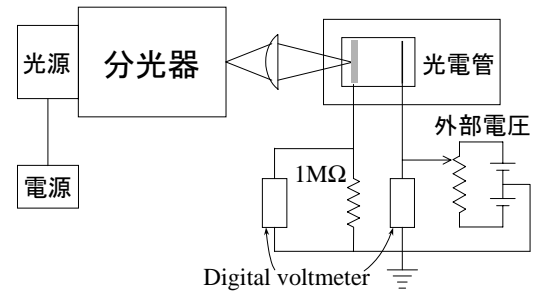


図2 実験配置。自分がどの実験条件を変えながら何を測定しているのか、よく考えよ。

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、図を使いながら述べよ。

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。赤、橙、黄、緑、青、紫と自分で思ったときの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) を使い、He, Hg, Cd のいずれかの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。^{*3} スリット幅は 0.5~1.0 mm にする。分光器ダイヤルを動かす際、バックラッシュに注意する。^{*4} 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、外部電圧を +8 V 付近に固定する。

課題 3-3 備え付け資料や理科年表の輝線波長と分光器の目盛りの関係から、測定した輝線を同定し、表とグラフ (横軸: 分光器ダイヤル, 縦軸: 波長の文献値) を作成せよ。^{*5} また、最小二乗法^{*6} などにより較正曲線の式を求めよ。^{*7} 表に載せる項目は、ピーク波長, 光検出器の出力電圧, 波長実測値, 文献値, 実測値 - 文献値, 較正值 - 文献値である。

^{*2} タングステンランプの電源電圧は、1 日目は 8 V, 2 日目は 8~10 V の範囲に設定する。

^{*3} 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。

^{*4} 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。

^{*5} グラフを描くことによって、どんなよいことがあるのかと、自問しながらグラフを描く。

^{*6} 残差二乗和を最小にする手法である。(残差 = 較正值 - 文献値)

^{*7} 有効数字について熟考せよ。電卓により 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? 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?

ある一本の輝線を選び、分光器のスリット幅を設定し、波長ダイヤルを細かく動かし、スペクトル線の形状を測定する。図3のように、電圧オフセットを求め、半値全幅を得る。まず、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おく。信号出力ケーブルを、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する。^{*8} 実際のスリット幅がマイクロメートル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。^{*9} その後、入射スリットと出射スリットの幅の3つの値(0.25, 0.75, 1.25 mm)に対し、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、レーザーポインタを使ってみるとよい。

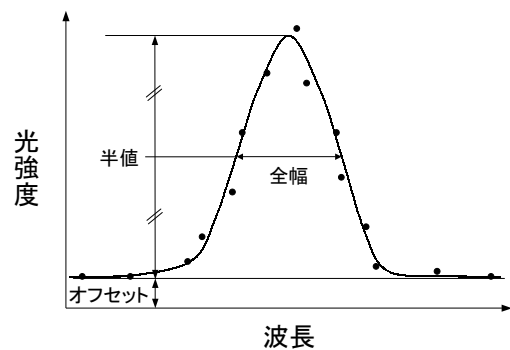


図3 半値全幅 (FWHM: Full Width at Half Maximum)。測定値を十分大きな点で表し、測定点を単につなぐのではなく、スペクトル線の形状を描いてから半値全幅を求める。

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、最小二乗法などにより最適化した曲線を求めよ。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、式と数値を使い定量的に考察せよ。

3.3 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 光電効果と光の粒子性

4.1 光電効果 選択実験 I

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は、後者を利用する。それに対し、物質が光を吸収し、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り広く信じられるようになった。図4は外部光電効果

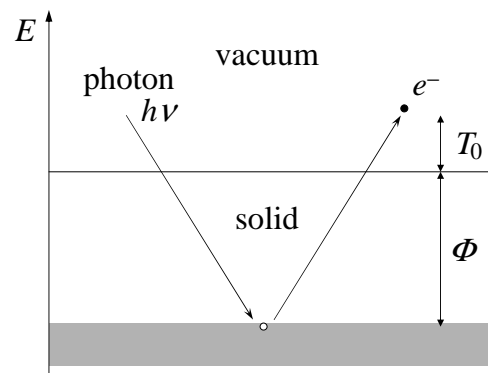


図4 外部光電効果。光電面に光があたると、真空よりΦだけ低いエネルギー状態にあっても、電子は放出される。光子のエネルギー $h\nu$ から仕事関数 Φ を引くと、電子の運動エネルギーになる。

^{*8} 光検出器の出力電圧が0.5V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。

^{*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。

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)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かった。1905年 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、電子のもらったエネルギーは障壁を乗り越えるのに足りないから、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。光電効果の概念図 4 を測定装置にあてはめると、図 5 のようになる。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 の光電面に照射したとき、光電効果で放出された電子の運動エネルギーは $T_0 = hc/\lambda - \Phi$ と表される。外部電圧 V による電子に対するポテンシャル障壁を T_0 に等しくしたとき、 $qV_s = hc/\lambda - \Phi$ の関係になる。ここで q は、電子の電荷 $q = -e < 0$ である。

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、 $E_g \approx 2.4 \text{ eV}$ である。CdS では、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 $\lambda_g \sim 1240/E_g \sim 520 \text{ nm}$ であり、 $\lambda < \lambda_g$ 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。

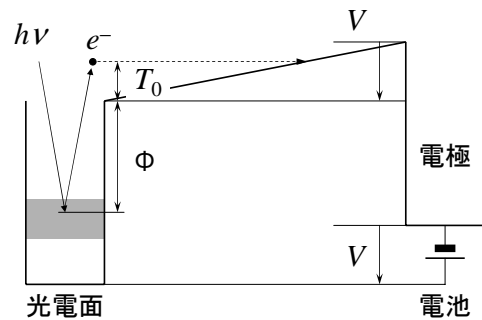


図 5 真空中に飛び出た電子の運動エネルギーが、外部電圧によるポテンシャルエネルギーより小さいと、電子は相対する電極に到達しない。

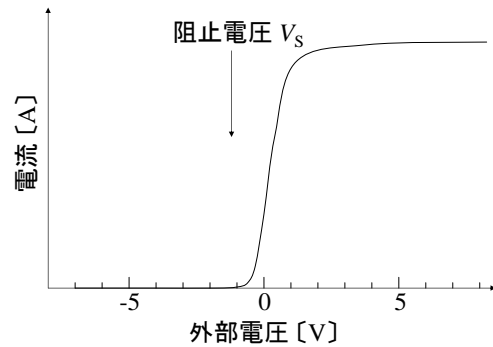


図 6 光電管から流れ出る電流。光電子が相対する電極に到達すると、外部に電流が流れる。電流 [A] は単位時間あたりに流れる電荷量 [C/s] だから、電子の電荷と電流値から、流れる電子数がわかる。

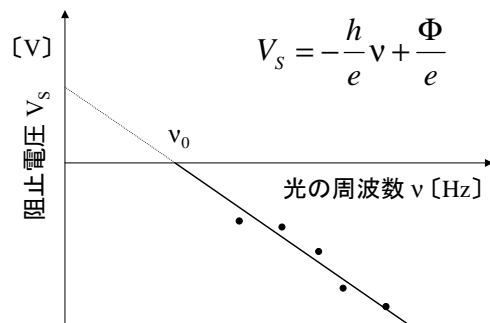


図 7 プランク定数と仕事関数の求め方。

4.2 実験手順

4.2.1 光電子の運動エネルギー

図2に示す実験配置で、電気抵抗 $1\text{ M}\Omega$ の両端の電位差から、抵抗に流れる電流を求める。波長を 550 nm に固定し、外部電圧を $-8\text{ V} < V < +8\text{ V}$ の範囲で掃引し、図6のような電流 I と電圧 V のグラフを作成する。^{*10}

課題 4-1 I - V グラフで電流の立ち上がる電圧を V_S として、電子の運動エネルギー T_0 を求めよ。^{*11} 光のスペクトル幅、固体内の電子のエネルギー、フェルミ準位、光を吸収した後の電子のふるまい、光電管の構造を考慮し、電流の立ち上がる V_S から T_0 を求める理由を述べよ。

4.2.2 阻止電圧の波長依存性

光電管に照射する光の波長 $450, 650\text{ nm}$ について、前項の実験を繰り返す。ランプ光強度の波長依存性^{*12}や分光器の特徴^{*13}を考慮し、適宜、色ガラスフィルターを使い、不要な光を取り除く。^{*14}

課題 4-2 4つの波長ごとに阻止電圧 V_S を求め、図7のように、 V_S 対 $\nu = c/\lambda$ のグラフを作成し、プランク定数 h と仕事関数 Φ を求めよ。

4.2.3 光電流と光強度

波長 550 nm にて入射光強度を3段階変化させ、電流の外部電圧依存性をグラフにせよ。(タングステンランプの電源電圧 ($\leq 10\text{ V}$) を調整し入射光強度を変える)

課題 4-3 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。波と粒子のエネルギーなど、波と粒子の性質を対比させて説明する。

課題 4-4 各光強度において、単位時間あたりに放出される電子数 [1/s] を求めよ。さらに、放射感度を使い、単位時間あたりに入射する光子数 [1/s] を計算せよ。^{*15}

5 原子と光の輻射

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。原子内の相互作用は、おもに、静電的なクーロン相互作用と磁気的な(電子)スピン-軌道相互作用である。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。

^{*10} 波長ダイヤルを固定しても、スリット幅により光強度を変えると、グラフに描かれる I - V 曲線の形が変わる。スリットの主な役割は、光量の調整と波長分解能の設定である。

^{*11} 電圧がゼロをよぎる点が立ち上がりだ、なんて安易な思考回路を捨てましょう。

^{*12} ランプは紫外光も放射している

^{*13} 分散素子として回折格子を使用しているため、回折の次数に注意する。

^{*14} 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。

^{*15} 光電管の放射感度は、波長 340 nm の光に対し 51 mA/W である。つまり、光 1 W が光電管に入射すると電流 51 mA が流れる。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わす「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。

5.1.1 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く。これは、電子のエネルギーに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、1 族原子の価電子は式 (1) の $N = 1$ に相当するポテンシャルを感じる。水素原子の離散的なエネルギーは、

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

と表される。ここで、 R はリドバーク(リュドベリ)定数、 n は主量子数である。図8に示すように、エネルギーの最も低い基底準位は、 $n = 1$ である。

課題 5-1 シュレディンガー方程式を解き、式 (2) で表される水素原子のエネルギーを求めよ。^{*16} また、リドバーク定数を基礎物理定数で表せ。

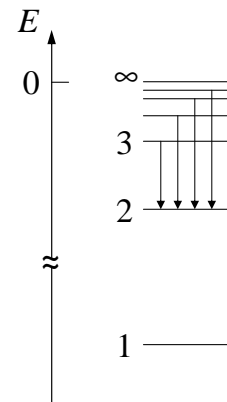


図 8 水素原子のエネルギー準位。主量子数 n は自然数である。図は、電子スピンや軌道角運動量を無視して描いた。

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、電子の軌道運動による磁場と電子の磁気モーメント間の磁気相互作用である。それは、次のように表される。

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

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。角運動量を無次元量として表現し、角運動量の次元 \hbar を、相互作用係数 ξ に入れ込んだ。クーロン相互作用に比べ、スピン-軌道相互作用は非常に小さいので、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見える。ナトリウム原子の D 線の場合、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、 $J = 3/2$ と $J = 1/2$ である。

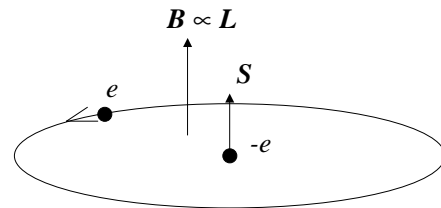


図 9 スピン-軌道相互作用。電子が静止する座標系では、原子核の運動によって電子の位置に磁場 $B (\propto$ 軌道角運動量 $L)$ が発生する。その磁場に対する電子スピンの向き (\uparrow, \downarrow) により、準位のエネルギーが異なる(エネルギー縮退が解ける)。

課題 5-2 式 (3) の $\xi \mathbf{S} \cdot \mathbf{L}$ が、右辺のように表されることを示せ。^{*17}

5.2 実験手順

5.2.1 水素原子のスペクトル

水素原子ランプを光源とし、分光器をとおしてフォトダイオードで光検出する。フォトダイオード出力が繋がっているロックインアンプで 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

^{*16} 原子核と価電子のクーロン相互作用は中心力ポテンシャルになるので、角度変数について波動関数を求める必要はない。

^{*17} 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。

験の手順は、分光器の波長校正をした共通実験と同様である。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勘案し、最適な幅にする。

課題 5-3 水素原子の輝線を 2 つ測定し、リドバーク定数を求めよ。課題 5-1 で基礎物理定数を代入した値やリドバーク定数の文献値の三者を比較し考察せよ。

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。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。スリット幅を狭くすると信号が小さくなるので、ランプ・分光器・光検出器の配置を慎重に整える。

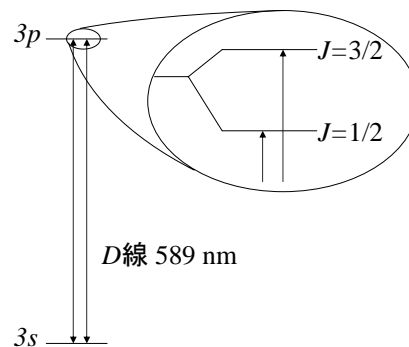


図 10 ナトリウム原子の D 線と、スピン-軌道相互作用による微細構造。

課題 5-4 ナトリウム原子の近接した二重線スペクトルをグラフに描き、励起状態のエネルギー分裂の大きさを $\Delta E/h$ [Hz] の単位で求めよ。^{*18} また、係数 ξ [J] を求めよ。^{*19}

6 固体によるファラデー回転

選択実験 III

6.1 ファラデー回転

物質に直線偏光^{*20}を照射し、光軸と平行に磁場を加えると、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、

$$\theta = VB\ell, \quad (4)$$

と表される。ここで、 B は磁束密度、 ℓ は試料の長さである。 V はヴェルデ定数で、光の波長、物質の種類、温度によって決まる。符号は、磁場を発生するソレノイドに流す電流と同じ向きに回転

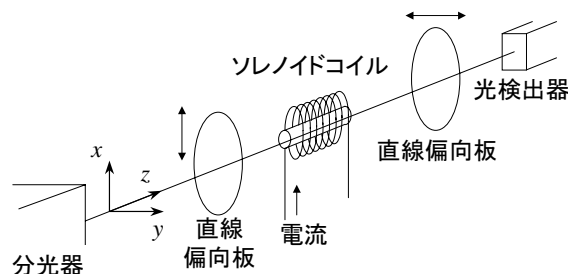


図 11 ファラデー回転を観測する実験配置

する場合を正とする。光学遷移の上下準位のゼーマン分裂^{*21}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。ガラスなどの透明な固体は紫外光を吸収するので、可視域では波長が短い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。

課題 6-1 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を説明せよ。

課題 6-2 ファラデー効果で偏光面が回転する機構を説明し、回転角 θ が式 (4) で表されることを示せ。

ヒント 電場が x 軸方向に偏った直線偏光は、ファラデーガラス入射前は、 $E = (E_x, E_y) = (E_0 \cos(\omega t - nkz), 0)$

^{*18} さらに深く勉強したい学生は、二重線の強度比を説明するのもよいでしょう。

^{*19} ξ の値が 2 つ求まるなんてありえない。

^{*20} 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(偏波)と呼び、電場の振動方向を含む面を偏光面という。

^{*21} 磁場の印加によるエネルギー準位の分裂のこと。

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、

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

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

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

になる。 $n_S = (n_+ + n_-)/2$ 、 $n_D = (n_+ - n_-)/2$ とおいて式 (6) を変形すると、 $E_0(\cos \theta, \sin \theta) \cos(\omega t - n_S k \ell)$ になり、偏光面が x 軸から θ だけ回転した直線偏光を表す。この θ を n_D で表し、式 (4) と比較する。

6.2 実験手順

4色のレーザー光の波長をそれぞれ分光器で測る。次に、赤色レーザー光を使って、図12のような実験配置にする。レーザー光を直線偏向板におし、不要な偏光を除去する。さらに2枚目の直線偏向板を設置し、レーザー光の直線偏向度を確認する。その後、透過光が最も暗くなるような角度に偏向板の軸を合わせる。その状態でファラデーガラスを2枚の偏向板の間に設置し、2枚目の偏向板を微調し透過光が最も暗くなる角度にする。ソレノイドに電流が流れていないので磁場はゼロであり、2枚目の偏向板を透過する光は最も暗くなっているため、回転角の基準である。次にソレノイドに電流を流し、偏光面の回転角と回転の向きを測定する。電流は0Aから3Aまで、0.5A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。^{*22} 他のレーザーでも同様の測定をする。

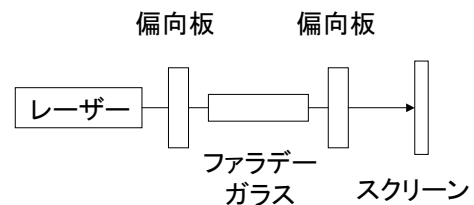


図12 レーザー光のファラデー回転

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。

課題6-4 偏光面の回転角と磁束密度の関係をグラフにし、ヴェルデ定数 [rad / T·m] を求めよ。

7 ファイバー分光器によるスペクトル測定

選択実験 IV

7.1 スペクトル計測

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、ファイバーを太陽、青空、雲に向ける。原子線ランプ、蛍光灯やLEDなどの発光、色ガラスの透過光などを測定する。!! 注意!! 光ファイバーを折り曲げない。ケーブル端子を歪ませない。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つながらない。

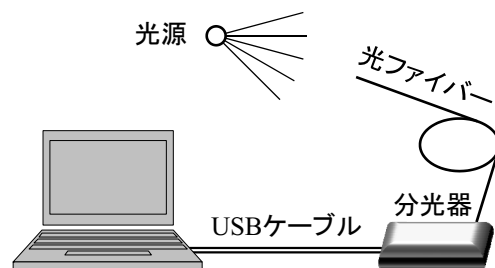


図13 光をファイバーに入力すると、パソコン画面に光のスペクトルが表示される。

^{*22} 電流を流し続けるとコイルが過熱され壊れる。電流をON-OFFするには、直流電源の左上にある緑色のスイッチを操作する。

課題 7-1 計測したスペクトルのグラフ(横軸:波長,縦軸:光強度)を表示し,それぞれのスペクトル線について,発光・吸収する原子・イオン・分子の遷移を明らかにし,その同定理由などを説明する。スペクトルを同定するため,波長の文献値,参照ランプの発光スペクトルと比較する。

7.2 計測手順

1. 使用記録ノート表紙に記載の特徴をふまえ分光器を1つ選び,使用記録ノートに使用日,学年,名前を記入する。分光器と同じ番号のパソコンと光ファイバーを選び,ノートに番号を書く。
2. 光ファイバーを分光器につなぐ—ファイバー端面をさわらない—(分光器からはずしたキャップは,ファイバーのケースに入れる)
3. USB ケーブルで,分光器とパソコンをつなぐ。
4. ノートパソコンに 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。
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. 試しに,キャップをはずし,光ファイバーを蛍光灯に向けてみよう。
8. 試し撮りしたスペクトルを保存する。
 - 適当なスペクトルが画面に表示されたら,停止ボタンをクリックする。
 - ディスクボタンをクリックし,デスクトップにファイルを保存する。(数値データの保存)
 - ピーク波長を表示し,画像をクリップボードにコピー(Copy Graphical Data to Clipboard)
 - ペイントソフトを立ち上げ,貼り付け,ファイル保存。(画像の保存)
9. AC アダプタをはずし実験室から出てみよう。光ファイバーをいろいろな物に向け,スペクトルを測る。

グラフ作成 SpectraSuite 以外のソフトでグラフを描く場合,Excel で描くなら情報処理室または各自のパソコンを使う。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。

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 を閉じ,Internet Explorer の画面でログアウトする。

後処理

1. Experiment > Data > 2013 の下に日付を名前にしたフォルダーを作る。例えば,実験日が 2013 年 5 月 7 日ならば,2013_05_07 という名前の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。

8 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。
3. 実験台とその周りを清掃し，椅子を整頓する。

9 レポート

データに基づいた主張を明快に表現した報告書を書く。以下，レポート作成について注意点を記す。

1. 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。
2. 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すべて引用する。
3. 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，当然，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。
4. 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。
5. 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。文章で説明せず，式と数値を列挙しても，報告にはならない。
6. 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 — 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。
7. 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。
8. 実験終了後1週間以内に研究棟205号室に提出する。(期限や場所の変更は，実験中の指示に従うこと)

10 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。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。

- 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