

自然科学総合実験レポート

課題7「光のスペクトルと太陽電池」

[個人情報保護の観点から削除]

[個人情報保護の観点から削除]

表: 正規の授業を受講した

裏: 正規の授業を受講した

1 実験の目的

化石燃料に代わる新たなエネルギー源として注目されているもののひとつに、太陽電池がある。太陽電池は太陽の光エネルギーを半導体の光電効果を利用して直接電気エネルギーに変換するものであり、二酸化炭素を排出しない。太陽電池は、今日では腕時計や電卓などの日用品に搭載されたり、家庭用省エネ機器として一般家屋の屋上に設置されたりと、広く一般に普及している。

光は波動性と粒子性をあわせもち(二重性)、太陽電池の原理である光電効果は光が粒子性をもつと考えると説明できる。光電効果を理論的に説明したのは Einstein であり、彼は ν という振動数をもつ光が伝播することを $h\nu$ (h はプランク定数) なるエネルギーをもつ粒子が飛んでいくと考えると提唱した。その結果、彼は光電効果の理論的解明によって 1921 年のノーベル物理学賞を受賞した [1]。このような背景から、本実験課題では光のエネルギーと太陽光発電に関する理解を深め、光の波動性と粒子性について考察することを目的に実験を行う。

実験 1 では原子スペクトルを観測して光の放出機構についての理解を深め、実験 2 では太陽電池に利用される半導体であるフォトダイオードを用いて光電効果が起こることを観測して、光の粒子性(光子)について理解を深める。

2 実験の原理

2.1 光電効果

物質に光を照射すると、光の振動数がある一定値を上回る場合は物質から電子が飛び出す。光は波でもあるため、振動数を大きくするだけでなく振幅を大きくすることでも与えるエネルギーは大きくできるが、振動数がじゅうぶん大きくなければ強い光を照射しても物質から電子が飛び出すことはない。逆に、振動数がじゅうぶん大きければ光が弱くても電子が飛び出す。このように、光電効果は光の波動性からは説明がつかず、光の粒子性を考えると説明がつくようになる現象である。

2.2 光のスペクトル

De Broglie は、電子は粒子であると同時に波でもあると提唱した。電子が波であると考え、特定の波長では定常波をつくって安定に存在するが、定常波をつくらぬような波長では波が打ち消し合って安定に存在できないことになる。実際、電子が取れる軌道では $2\pi r = n\lambda$ (r は軌道の半径、 λ は波長、 n は量子数 ($n = 1, 2, 3, \dots$)) が成り立つことが知られている。

また、Bohr は原子核の周囲の電子のふるまいが Newton 力学と Maxwell の電磁気学に従うと考えるだけでは説明できないことから、3つの仮説を提唱した [2]。そのうちのひとつに「原子は飛び飛びの値のエネルギーをもった状態でのみ存在することができる」というものがある。また、Bohr の仮説を水素原子に適用すると、水素原子中の電子のエネルギー準位は

$$E_n = -13.6 \frac{1}{n^2} [\text{eV}] \quad (1)$$

であるということになる。 n が 2 より大きい状態から $n = 2$ の状態まで遷移するときみられるスペクトルを、特に Balmer 系列と呼ぶ。

水素や希ガスなどを、高電圧を加えるなどして励起状態にすると、それらの物質はよりエネルギーの低い励起状態や基底状態に遷移し、その際に差分に当たるエネルギーをもつ光(電磁波)を放出する。この放出された光をプリズム分光器を用いて波長の違う色の光に分け(分光)、放出された光の強度を各波長に対して測定したものが発光スペクトルである。先述したように、放出された光のエネルギーは光を放出する前後のエネルギーの差にあたるため、発光スペクトルを測定することで物質の電子エネルギー準位間隔を求めることができる。

2.3 太陽電池

太陽電池セルには、半導体を用いられている。ある元素が集合体を作ると、エネルギー準位が少しずつ重なり合ってエネルギー準位の帯を形成する。この帯には価電子帯と伝導帯の2つがあって、この2つの間には電子が存在できない禁制帯というものがある。半導体は絶縁体よりも禁制帯の幅が狭く、価電子帯に存在する電子は光などのエネルギーを吸収することで禁制帯を越えて伝導帯に映ることができる。これによって半導体は伝導性を示すようになる。

太陽電池は、基本的には種類の異なる2種類の半導体(p型、n型)を積み重ねた構造をしている。p型半導体とn型半導体の違いは動きやすい電子(伝導電子)の多さで、n型半導体のほうが多い。これらを接合すると電子が移動して接合部分に電界(内部電界)が生じる[3]。接合部分に光を当てると半導体の価電子が励起され、内部電界に導かれて電子が移動し、起電力が生まれる[3]。光を当てることで起電力が発生する現象は光起電力効果と呼ばれ、光電効果の一種として知られている[4]。

2.4 最小二乗法

今回の実験課題では、得られたデータに最小二乗法を適用して、2つのデータの関係を1次関数 $y = ax + b$ で近似する。この a と b は誤差の二乗和が最小となるような実数、言い換えると2つの量 X と Y に $Y = aX + b$ という関係がある場合に、 y_i を Y の測定値として

$$S = \sum (y_i - Y_i)^2 = \sum (y_i - ax_i - b)^2 \quad (2)$$

が最小になる値である。これが未知の実数 a, b により極小となる条件は

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum x_i (ax_i + b - y_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum (ax_i + b - y_i) = 0 \quad (4)$$

となることであり、この連立方程式から a と b を求めると

$$a = \frac{(\sum x_i)(\sum y_i) - N \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - N \sum x_i^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{(\sum x_i)(\sum x_i y_i) - (\sum x_i^2)(\sum y_i)}{(\sum x_i)^2 - N \sum x_i^2} \quad (6)$$

となる(ただし N は測定値の個数)。

3 実験方法

今回の実験課題は、実験を行っている様子を動画で見て、与えられたデータを用いてレポートを書くというものであるため、以下では動画で行われていた操作とテキストに書かれていた実験方法について書く。

使用する実験器具: 光源起動装置、プリズム分光器 (島津製スペクトロスコープ KB-2 型)、放電管ボックス、尺度投影用ランプ、Hg 放電管、H 放電管、ネオン・トランス、蛍光灯、白色光源 (ハロゲンランプ)、三角プリズム、Si ダイオード、GaP ダイオード、デジタルマルチメーター

3.1 実験 1

光源起動装置、プリズム分光器、放電管ボックス、尺度投影用ランプを設置し、尺度投影用ランプと Hg 放電管を点灯させる。その後、色のついた線と目盛りが両方とも見えるようにスリット調整ネジを用いてスリットの開き具合を調整する。また、V 字型くさびを動かしてスリットの長さを調整し、スペクトルを測定しやすい長さにする。黄色の線が一番左側に見えるか確認し、見えない場合は望遠鏡回転ハンドルを回して視野に入るようにする。最後に、接眼レンズを前後に動かしてピントを調整し、黄色の線を細い 2 本に分離する。スリットを調整したら、実験が終わるまでいじらないよう注意する。

次に Hg の線スペクトルを観察し、輝線スペクトルの目盛りの値、線の色、線の相対強度を記録する。見えた線の色に対応する波長を表 1 から調べて記録する。人によって目盛りの読み方には癖があるため、目盛りは実験全体を通して同一人物が読むようにする。今回は Hg の線スペクトルを観察しているため、黄色 2 本を含む 4 本以上の線を観察すればよい。放電管には少量の Ar が混入されているため、Ar のスペクトルが見える場合は表 1 中の該当データを記入する。目盛りの値を縦軸に、波長の値を横軸にとったデータをプロットし、このデータに最小二乗法を適用して回帰直線を得る。光源起動装置の電源や接続コネクタは抜いて、次の実験に差し支えないよう調整する。

次に水素原子のバルマー系列線を観察する。スリットと水素放電管を設置し、光源起動用誘導コイルの電源を入れて点灯させる。水素放電管とプリズム分光器のコリメータがスリットの中心に来るようにして、Hg の線スペクトルを観察したときと同じように目盛りの値、線の色、線の相対強度を記録する。輝線は最低でも 3 本は観測するようにする。

最後に蛍光灯のスペクトルを観察する。蛍光灯を設置して点灯させ、Hg の線スペクトルを観察したときと同様にして目盛りの値、線の色、線の相対強度を記録する。輝線スペクトルは 5 本程度観察できればよい。

表 1: 原子の主な放出スペクトル

Hg スペクトル			Ar スペクトル		
色	波長 (nm)	相対強度	色	波長 (nm)	相対強度
黄	579.1	中	赤	706.7	大
黄	577.0	中	赤	696.5	大
緑	546.1	大	赤	641.6	小
青	491.6	小	橙	604.3	大
青紫	435.8	大	...		
紫	407.8	大	青紫	451.1	中
紫	404.7	中	紫	419.1	中
...			紫	415.9	中
			...		

3.2 実験 2

白色光源の光を三角プリズムで分光し、壁に当てて虹が見えるようにする。分光する際は三角プリズムの下面に白色光を入射させて分光する (図 1)。壁には方眼紙とフォトダイオードを設置しておいて、フォトダイオードは上下方向に動かせるようにしておく。フォトダイオードを虹の代表的な色まで動かし、光起電力をデジタルマルチメーターで測定する。そして、光起電力と動かしした距離を記録してグラフを作成する。可視光の領域に関しては、色から波長を大まかに推定して、波長と後期電力の関係についてのグラフも作成する。最後に、Si と GaP ダイオードの同定、限界波長の計算を行う。今回、Si のバンドギャップは 1.12eV、GaP のバンドギャップは 2.25eV としてそれぞれ計算を行う。限界波長は式 7 を用いて計算する。

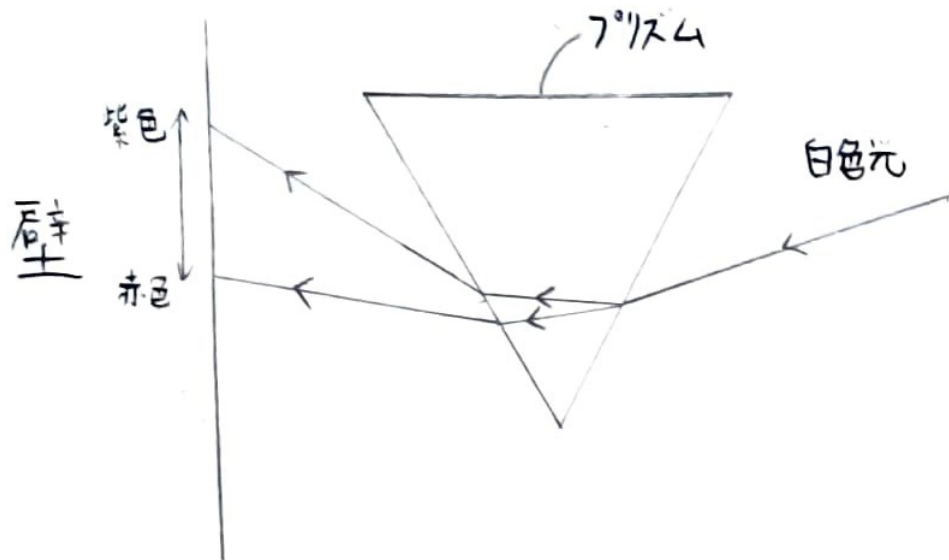


図 1: 白色光を分光する様子の模式図

$$\lambda_{\text{限界}} = \frac{hc}{\Delta E} \quad (7)$$

4 結果

4.1 実験 1

水銀の線スペクトルを観察した結果として与えられたデータは、表 2 のようなものであった。

表 2: 水銀の線スペクトル

輝線スペクトルの目盛の値	線の色	線の相対強度
5.80	黄	強
5.78	黄	強
5.38	緑	強
4.87	青緑	弱
4.33	青紫	強
4.04	紫	弱

このデータと表 1 のデータを見比べて、表 2 に波長のデータを加えると、表 3 のようになった。

表 3: 表 2 に波長のデータを加えたもの

輝線スペクトルの目盛の値	線の色	線の相対強度	波長 (nm)
5.80	黄	強	579.1
5.78	黄	強	577.0
5.38	緑	強	546.1
4.87	青緑	弱	491.6
4.33	青紫	強	435.8
4.04	紫	弱	404.7

横軸を波長、縦軸を輝線スペクトルの目盛の値としてプロットすると図 2 のようになる (図 2 には、後述する計算によって得られた回帰直線も描かれている)。

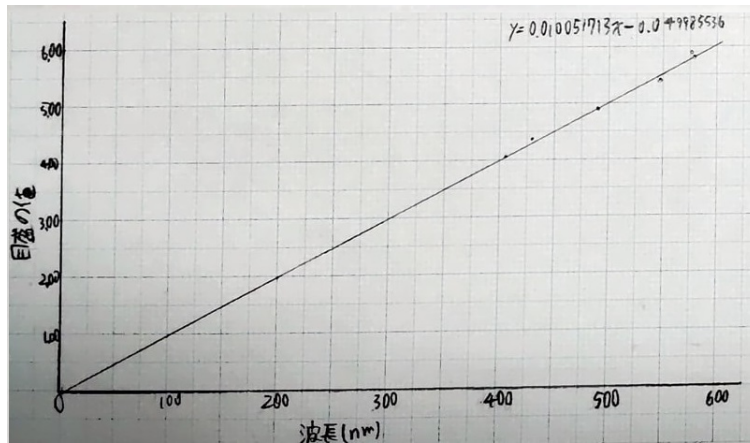


図 2: 波長と目盛の値の関係

波長を x 、輝線スペクトルの目盛の値を y として式 5, 6 を適用すると、結果は下表 4 のようになる ($N = 6$ として計算した)。

表 4: 式 5, 6 に含まれる総和と a, b の計算結果

$\sum x_i$	$\sum y_i$	$\sum x_i y_i$	$\sum x_i^2$	a	b
3034.3	30.2	15547.952	1561885.3	0.010051713	-0.049985536

したがって、回帰直線の式は $y = 0.010051713x - 0.049985536$ となる。

また、水素放電管と蛍光灯から出た光のスペクトルを観察した結果として与えられたデータは表 5, 6 のようであった。

表 5: 水素の線スペクトル

輝線スペクトルの目盛の値	線の色	線の相対強度
6.41	赤	強
4.82	青緑	中

表 6: 蛍光灯の線スペクトル

輝線スペクトルの目盛の値	線の色	線の相対強度
5.80	黄	強
5.78	黄	強
5.38	緑	強
4.33	青紫	強
4.04	紫	弱

ここで、 $y = ax + b$ を変形すると $x = \frac{y-b}{a}$ となるため、表 5, 6 にある輝線スペクトルの目盛の値と表 4 の a, b を用いて対応する波長 (nm) を計算すると表 7, 8 のようになる。(少数第一位を四捨五入し

て整数に直してある)

表 7: 水素の線スペクトルと対応する波長

輝線スペクトルの目盛の値	線の色	線の相対強度	波長 (nm)
6.41	赤	強	643
4.82	青緑	中	484

表 8: 蛍光灯の線スペクトルと対応する波長

輝線スペクトルの目盛の値	線の色	線の相対強度	波長 (nm)
5.80	黄	強	582
5.78	黄	強	580
5.38	緑	強	540
4.33	青紫	強	436
4.04	紫	弱	407

また、波長と Rydberg 定数 R_∞ の関係は式 8 で表され、Balmer 系列の場合は $n = 2$ である。

$$\frac{1}{\lambda} = R_\infty \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad (8)$$

よって、表 7 のデータと式 8 をもとにして計算すると表 9 のようになる。ここで、Rydberg 定数の単位は m^{-1} として、波長の単位を m に直して計算する。(観察できた中でもっとも波長が長いのは赤色の線であるため、赤色の線を $n' = 3$ 、青緑色の線を $n' = 4$ と仮定して計算する。)

表 9: 水素の線スペクトルの、波長とそこから計算される Rydberg 定数 (有効数字 3 桁)

波長 (nm)	n'	Rydberg 定数 [m^{-1}]
643	3	1.12×10^7
484	4	1.10×10^7

計算した結果、有効数字 2 桁で考えれば同じ値が出たため n' の仮定は妥当であると推測される。また、理化学辞典 第 5 版 (岩波書店)[5] によると Rydberg 定数の値は $1.097373153 \times 10^7 \text{m}^{-1}$ であるため、この値を真の値とすると今回計算した値の相対誤差は赤色の線と青緑色の線でそれぞれ

$$\frac{1.12 \times 10^7 - 1.097373153 \times 10^7}{1.097373153 \times 10^7} \approx 2.1 \times 10^{-2} \quad (9)$$

$$\frac{1.1 \times 10^7 - 1.097373153 \times 10^7}{1.097373153 \times 10^7} \approx 2.4 \times 10^{-3} \quad (10)$$

である。百分率に直すと約 2.1 % と 0.24 % であるため、文献にある値とは異なるが近い値を求められたと考えられる。

次に、表 8 のスペクトルはどの元素によるものか考える。表 3 と表 8 を見比べると色と目盛の値が一致しているデータが多いことと、理科年表 [6] によると水銀のスペクトル線には 580.378nm のもの、

542.525nm のもの、435.833nm のものなどがあり、表 8 にある値に近いものが多く含まれていることを考えると、蛍光灯の線スペクトルは水銀原子によるものだと考えられる。

また、蛍光灯が発行する原理について文献調査を行った。蛍光灯は、内面に蛍光物質が塗布され、内部には水銀蒸気が封入され、両端には放電電極が取り付けられたガラス管である [7][8]。電極に電流が流れて電圧がかかると両端のフィラメントが加熱されて熱電子が飛び出し、それが水銀原子に衝突して水銀原子を励起する [7][8]。水銀原子が基底状態に戻ろうとする際に紫外線を放出し、蛍光物質によって可視光に変換される [7][8]。紫外線を可視光に変換する蛍光体としては様々な物質が使われていて、各色に発光する蛍光体を使い分けながらランプの発光スペクトルを幅広く調整できる [9]。

4.2 実験 2

フォトダイオードを動かした距離、光の色、波長、起電力のデータとしては表 10 が与えられた。

表 10: フォトダイオードを動かした距離、光の色、波長、起電力のデータ

移動距離 (mm)	光の色	波長 ($\times 10^{-7}\text{m}$)	起電力 [V]	
			ダイオード 1	ダイオード 2
0	赤外	-	0.264	0.002
5	赤外	-	0.290	0.002
10	赤外	-	0.301	0.003
15	赤	6.9	0.305	0.005
20	橙	6.2	0.296	0.015
25	黄橙	5.7	0.278	0.064
30	黄	5.5	0.256	0.160
35	黄緑	5.2	0.237	0.260
40	青緑	4.9	0.216	0.319
45	青	4.4	0.199	0.315
50	青紫	4.2	0.184	0.227
55	紫	4.1	0.166	0.179
60	紫外	-	0.150	0.096
65	紫外	-	0.135	0.056
70	紫外	-	0.121	0.030

この表のデータを、横軸を移動距離、縦軸を起電力としてプロットしてなめらかな線で結ぶと図 3 のようになる。

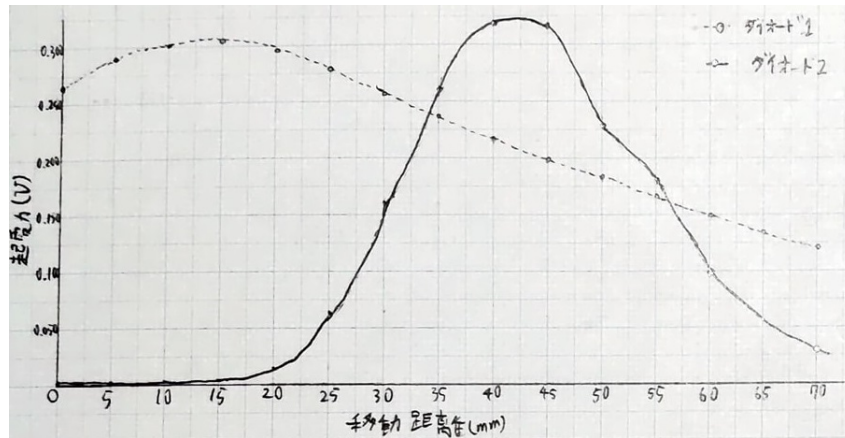


図 3: 移動距離と起電力の関係

また、可視光領域について、横軸を波長、縦軸を起電力としてプロットすると図 4 のようになる。

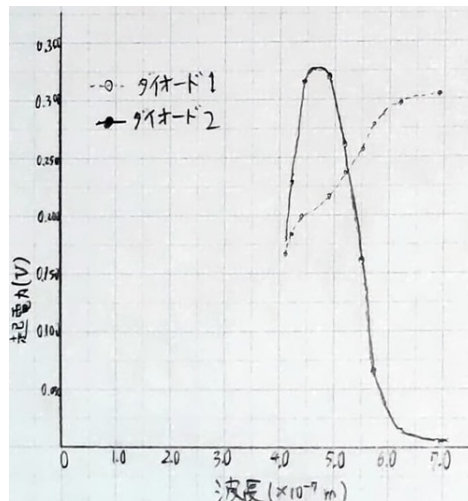


図 4: 移動距離と起電力の関係

また、Si のバンドギャップを 1.12eV、GaP のバンドギャップを 2.25eV として、 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ として限界波長を計算すると

$$\lambda_{\text{限界}}(\text{Si}) = \frac{hc}{1.12 \times 1.6 \times 10^{-19}} \quad (11)$$

$$\approx 1.11 \times 10^{-6}\text{m} \quad (12)$$

$$= 1110\text{nm} \quad (13)$$

$$\lambda_{\text{限界}}(\text{GaP}) = \frac{hc}{2.25 \times 1.6 \times 10^{-19}} \quad (14)$$

$$\approx 5.52 \times 10^{-7}\text{m} \quad (15)$$

$$= 552\text{nm} \quad (16)$$

5 考察(設問への回答)

5.1 実験1

水素の Balmer 系列とは、水素原子で主量子数 $n = 2$ のエネルギー準位とそれより上のエネルギー遷移の間で遷移するときみられる、一連の輝線あるいは吸収線の総称である [10][11]。電磁波を放出する場合も吸収する場合もそのエネルギーは2つの状態のエネルギー差に等しい。波長と主量子数の関係は、Rydberg 定数を用いて式 8 で $n = 2, n' \geq 3$ の場合として表される [12]。

また、今回の実験では実験データから Rydberg 定数を計算することを試みたが、文献にある値との相対誤差は赤色の線でおよそ 2.1×10^{-2} 、青緑色の線でおよそ 2.4×10^{-3} であった。この原因は回帰直線を作成するのに使ったデータ(表 3)にある波長は 404.7nm から 579.1nm までであり 484nm はこの範囲に入っているが、一方で 643nm はこの範囲に入っていないことであると考えられる。最小二乗法は測定データを関数にあてはめる手法であるため、今回得られた回帰直線はこの範囲では比較的精度の高い近似ができていて、この範囲から離れていくにつれて近似の精度が落ちていると考えられる。

5.2 実験2

図 4 を見るとダイオード 2 は波長を短くしていくと 5.0×10^{-7} nm 付近で起電力が大きく上昇していることから、この付近の波長でバンドギャップが突破されたものだと考えられる。また、さらに波長を短くしていくと起電力が低下している。ダイオード 1 は波長を短くすると起電力が落ちていることから、ダイオード 1 の限界波長は図 4 で描かれていない範囲の波長であり、より長い波長まで描く範囲を広げるとダイオード 2 の場合と似た形のグラフが現れると推測できる。したがって、ダイオード 2 が限界波長が 552nm である GaP であり、残ったダイオード 1 が Si であると考えられる。ダイオード 1, 2 ともに波長を短くしていくと起電力が高くなった後に低くなる原因としては、分光した後の光の強度が波長によって異なることや、半導体の表面構造によって吸収しやすい波長とそうでないものがあることなどが考えられる。

5.3 レポート提出要件課題

5.3.1 空が青く見える理由

空が青く見える理由は、レイリー散乱によって説明される [13][14]。レイリー散乱は大きさが波長のおよそ $\frac{1}{10}$ 以下の粒子によって起こる [13] ため、波長が短いとより小さい粒子によって散乱されることになる。ここで、地表付近の大気に含まれる成分は割合が高い順に窒素、酸素、アルゴン、二酸化炭素、その他である [15]。地表付近の大気中に含まれる割合と分子の大きさを表にまとめると表?? のようになる(アルゴンの大きさは文献にあるファンデルワールス半径の 2 倍を、ナノメートル単位に換算して書いている)。

表 11: 地表付近の大気中に含まれる割合と分子の大きさ [15][16][17]

分子	割合	大きさ
窒素	78.08%	0.364nm
酸素	20.95%	0.346nm
アルゴン	0.93%	0.382nm
二酸化炭素	0.03 %	0.33nm

可視光の波長は下限が 360~400nm 程度、上限が 760~830nm 程度であるため、可視光線は大気中の分子によってレイリー散乱を起こすことになる。また、散乱光の強度は波長の 4 乗に反比例する [13] ため青色の光のほうがより強く散乱され、赤色の光は青色の光ほど強くは散乱されないことになる。波長以外の条件はすべて同じであると仮定した上で具体的に散乱光強度の比を計算してみると、赤色光の波長を $6.5 \times 10^{-7} \text{m}$ 、青色光の波長を $5.2 \times 10^{-7} \text{m}$ とし (この値は Google Classroom 上の資料を見て決めた。)

$$\frac{\frac{1}{(5.2 \times 10^{-7} \text{m})^4}}{\frac{1}{(6.5 \times 10^{-7} \text{m})^4}} \approx 2.4 \quad (17)$$

より青色光は赤色光の約 2.4 倍散乱されやすいことになる。したがって、空を見ると散乱された青色の光が多く目に入り、空は青く見えることになると考えられる。

5.3.2 朝焼け、夕焼けが赤く見える理由

先述の議論を言い換えると、赤色光は青色光の約 $\frac{1}{2.4}$ 倍散乱されにくいということになる。ここで、夕焼けや朝焼けが見えるときの地球 (とその大気) と太陽の位置関係を図にあらわすと図 5 のようになる。

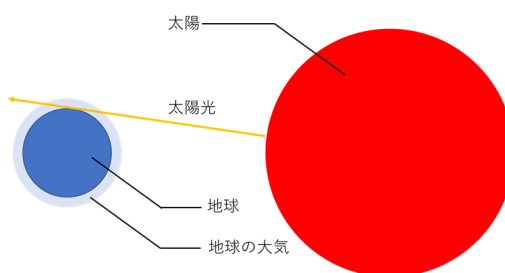


図 5: 夕焼けや朝焼けが見えるときの地球と太陽の位置関係 (作成:[個人情報保護の観点から削除])

このとき、太陽から夕焼けが見える地域に向かう光は日中に比べて大気中を長い距離進むことになる。したがって、太陽光に含まれる波長の短い成分は散乱される一方で波長の長い成分は波長の短い成分ほどは散乱されずに地上に届くと考えられる。これが、夕焼けや朝焼けが赤く見える理由と考えられる。

5.3.3 朝焼けと夕焼けの色の違い

また、図夕焼けが見える場合と朝焼けが見える場合で太陽の位置と地球の自転の方向を図にまとめると図6のようになる。

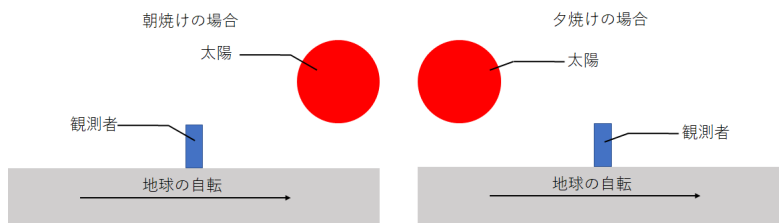


図 6: 太陽の位置と地球の自転 (作成:[個人情報保護の観点から削除])

ドップラー効果を考えると、観測者と波源 (光源) が互いに近づく場合は観測者から見た波長が短く見え、互いに遠ざかる場合は波長が長く見えることになる。地球は西から東に向かって自転しているため、朝焼けが見えるときは太陽に観測者が近づいていくことになり、夕焼けが見えるときは太陽から観測者が遠ざかっていくことになる。したがって観測者から見ると朝焼けの波長よりも夕焼けの波長のほうが長く見えることになるため、夕焼けと朝焼けを比べると夕焼けのほうが赤色が強く見えることが多いと考えられる。

6 結論

本実験課題では、光のエネルギーと太陽光発電に関する理解を深め、光の波動性と粒子性について考察することを目的に、原子スペクトルの観察によって光の放出機構についての理解を深め、フォトダイオードを用いた光電効果の観察によって光の粒子性について理解を深めることをそれぞれ試みた。

実験1では水銀の線スペクトルに関するデータに最小二乗法を適用して波長と分光器の目盛の関係を近似的に表す式を求めた。その式を用いて水素のスペクトル線のデータからリュードベリ定数を計算したら、文献にある値と近い値を求めることができた。また、蛍光灯の光を分光器に通した結果と理科年表のデータから、蛍光灯のスペクトルがどの元素によるものか考察することができた。

実験2では、白色光源の光を分光器で色 (波長) ごとに分け、フォトダイオードを動かして当てる光の波長を少しずつ変えることで移動距離と起電力の関係を表すグラフと、波長と起電力の関係を表すグラフを作成した。また、Si と GaP のバンドギャップの大きさから限界波長を計算し、その計算結果とグラフを照らし合わせてダイオードの種類を同定することができた。

参考文献

- [1] 福岡市科学館「ノーベル賞受賞 100 年記念「アインシュタイン展」 — 特別展・企画展 — 福岡市科学館」
https://www.fukuokacity-kagakukan.jp/sp_exhibition/2021/11/100.html

- [2] 九州大学 大学院理学研究院 物理学部門「Bohr theory (Japanese)」
http://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/Part4/P43/Bohr_theory.htm
- [3] 産業技術総合研究所「太陽電池の原理3：AIST 太陽光発電技術開発」
https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/about_pv/principle/principle_3.html
- [4] 理化学辞典 第5版(岩波書店)「光起電力効果」の項目より
- [5] 理化学辞典 第5版(岩波書店)「リュードベリ定数」の項目より
- [6] 理科年表 2022年版「紫外、可視、近赤外域のおもなスペクトル線の波長」の項目より
- [7] キヤノンサイエンスラボ「キヤノン：技術のご紹介 — サイエンスラボ 白熱灯と蛍光灯」
https://global.canon/ja/technology/s_lab/light/002/02.html
- [8] 中国電力「電球や蛍光灯が明るいのは何でだろう?|中国電力」
<https://www.energia.co.jp/kids/kids-ene/chosatai/lamp.html>
- [9] 植田 和茂「照明の化学2—放電ランプ、蛍光灯、LED 照明の仕組みと進歩—」580ページ(3ページ目)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kakyoshi/65/11/65_578/_pdf/-char/ja
- [10] 天文学辞典(日本天文学会)「バルマー系列」の項目より
<https://astro-dic.jp/balmer-series/>
- [11] 天文学辞典(日本天文学会)「スペクトル線」の項目より
<https://astro-dic.jp/spectral-line/>
- [12] 理化学辞典 第5版(岩波書店)「水素原子のスペクトル」の項目より
- [13] 理化学辞典 第5版(岩波書店)「レイリー散乱」の項目より
- [14] 理科年表オフィシャルサイト「理科年表オフィシャルサイト／FAQ／気象部：なぜ夕日は赤く、空は青いのですか?」
https://www.rikanenpyo.jp/FAQ/kisyo/faq_kisyo_005.html
- [15] 北海道立総合研究機構「大気的主要成分」
<https://www.hro.or.jp/list/environmental/research/ies/katsudo/taiki/syuseibun.html>
- [16] 科学技術振興機構「電子状態の違いを検知する新しい分子吸着現象を発見—酸素と窒素の超高効率分離技術の開発—」
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20100607/index.html>
- [17] 奈良女子大学「Ar.html」
<http://www.chem.nara-wu.ac.jp/~tanase/echem/PeriodicTable/Element1/Ar.html>