

## フラウンホーファー線の原理に関する演示実験

坪田幸政・松本直記（慶應義塾高等学校）

### 1. はじめに

太陽のフラウンホーファー線の観察は、恒星のスペクトル型の分類やHR図の学習への導入として良い教材であり、直視分光器を利用すれば、簡単に観察することができる。しかし、直視分光器は高価なために1人1台の割に購入するのは困難である。

アメリカでは、回折格子のレプリカを用いて簡易分光器を製作し、光のスペクトルの観察を行うことが普及している[1]。日本でも物理教育の分野では簡易分光器の製作が普及している[2]。例えば、三省堂の高等学校物理IBの教科書に「簡易分光器の製作と実験」として掲載されている[3]。ただし、物理における分光器の役割は、回折格子定数の決定や原子スペクトルの波長の測定が目的となっている。そのために、製作された簡易分光器では、フラウンホーファー線が観察できないことが多い。

地学では原子や分子によるスペクトル線の違いや吸収線の原理を学習し、恒星のスペクトル型へ発展させることが目的なので、フラウンホーファー線の観察は欠かせない条件である。これまでの経験から、回折格子の格子定数が適切であれば、簡易分光器でもフラウンホーファー線の観察ができることが実験で確認されている。回折格子のレプリカの購入先を資料1として示す。簡易分光器の製作については、片平[4]を参照されたい。

吸収線の実験としては、食塩水で湿らせた石綿を加熱してナトリウムのD線を発光させ、その後ろから強力な白熱灯で照らして観察するように説明されている（例えば、長沢

[5]）。しかし、この実験は白熱灯の光度や分光器の分解能などの問題のため、なかなか成功しない実験である。本報告では、アルコールランプとナトリウムランプを使って、吸収線の原理の説明が簡単にできることを示す。

以下に紹介する教材は、筆者が慶應義塾高等学校で実践している天文教育[6][7]の中で実施している。また、簡易分光器の作成および使用は筆者の1人(Y. T.)が慶應ニューヨーク学院赴任中(1990~1994年)に行った。

この教材は、高等学校の物理や地学などの授業で利用できる。また、この教材では、吸収線に関しては物理学や天文学、原子の構造やエネルギーレベルに関しては化学や物理学、そして回折格子の説明では幾何的な知識も利用され、分光学の歴史的な事柄は科学史の重要なテーマであり、総合的なアプローチが可能であると考えられる。ここで用いた機器は、普通の物理教室の備品や比較的低価格な材料なのでどこでも実践可能である。

### 2. 授業実践

授業では、資料2に示したワークシートに従って実験を行う。本校では直視分光器を用いているが、自作の簡易分光器でも十分に実施できる。授業の前に照明の蛍光灯は消しておく。そして、図1に示したような図版を用いて分光の原理と連続スペクトル、輝線、吸収線の特徴について説明する。

ここで暗幕を引き教室全体を暗室にして、ワークシートに従って白熱電灯、ナトリウム、水銀、カドミウムなどの光源を観察させ

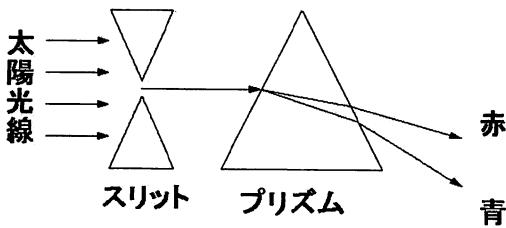


図1. プリズムによる分光の原理

る。これらの観察によって、生徒は連続スペクトルや輝線を実際に見ることでその理解を深める。光源を変える時は、あえて蛍光灯を点けず白熱電灯を用いて生徒にスケッチを取らせる。ここで特に重要なのは、それぞれの原子が固有の輝線の組み合わせを発しているのに気付かせることである。

直視分光器を用いた場合、スリット幅が広過ぎると、輝線が幅広く見えたり、ピントが合っていないために複数の輝線が連続スペクトルのように観察される場合があるので注意を要する。そこで、机間巡視を行って生徒の分光器を調整する。簡易分光器のスリットは製作時に適当な幅となっているので問題はない。

上記の光源以外に、他のスペクトル管などを用意していろいろな原子や分子の発光を演示できれば効果的である。例えば、空気の発光管を使用して「この色から何を想像するか」と発問して、「稲妻」を連想してくれれば成果であろう。また、酸素や窒素のスペクトルとオーロラを関連させて話が展開できれば生徒は興味を示してくれるはずである。最後に蛍光灯を点灯し、観察させる。蛍光灯には、連続スペクトルの上に輝線スペクトルが重なっていることを確認させる。また、この間に次の実験の準備をする。特にナトリウムランプは暖まるまでに時間がかかるの

で机の影で早めに点灯しておく。

アルコールランプを点灯して、図2に示したように透過型スクリーンを通してオレンジ色の炎を観察する。ここで、炎の色を指摘しながら、燃料用アルコールにはナトリウムが少量混入していることを話す。次に、白熱灯でアルコールランプの後ろから照らし、透過型スクリーンに白熱灯に照らされたオレンジ色の炎を生徒に確認させる。そして、白熱灯を消灯し、ナトリウムランプでアルコールランプを照らして透過型スクリーン上の像の変化を観察させる。生徒は図3に示したように炎の影を観察でき、このことから、生徒に「アルコールランプの炎がナトリウムランプからの光を吸収した(減光させた)こと」を気付かせるようにする。

透過型のスクリーンを利用した炎の影は、暗幕を引いた程度の教室で、多くの生徒に同時に十分に観察させることができる。この方法は分光器を用いた吸収線の観察に比べて、容易に吸光現象を示すことができる。

次に、オレンジ色のアルコールランプの炎がナトリウムが発しているオレンジ色(同じ波長)の光を吸収するように、それぞれの原子は固有の波長の光を吸収するはずであると発展させる。そして、教科書のフラウンホーファー線の説明、「…太陽の大気中のいろいろな元素がそれぞれ固有の波長の光を吸収するために生じるものである。」[8]につなげ

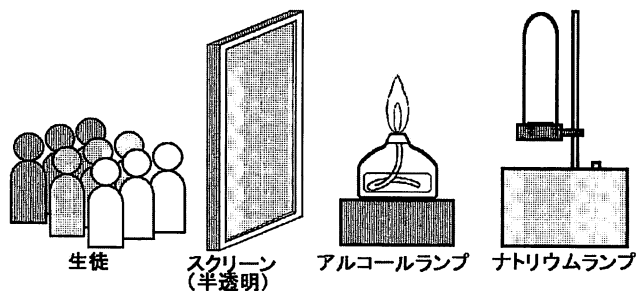


図2. フラウンホーファー線の原理の実験

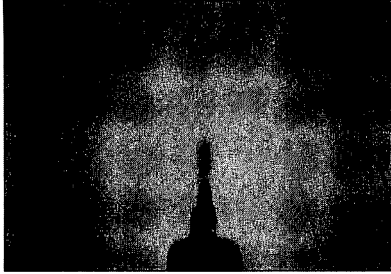


図3. アルコールランプの炎の影

るようにする。別な方法としては、部屋を十分に暗くし、食塩水を湿らした石綿をアルコールランプで熱しておき、ナトリウムランプで照らすと真っ黒い炎が観察できる。ナトリウムがナトリウムランプの光を吸収していることが確認できる。類似の実験は [9] を参照。

最後に、暗幕を開けて太陽スペクトルを観察して実際に太陽のフラウンホーファー線を観察する。この時、太陽を直接観察しないよう十分に注意する。白い壁や紙に反射させた太陽光や散乱光で十分に観察できる。

### 3. アルコールランプを使った実験の検証

筆者は経験的にアルコールランプが、ナトリウムのD線を発していることを推定し、天文の授業で、2.で紹介したような演示実験を行っていた。本報告のためにアルコールランプとナトリウムランプのスペクトル観測を行い、図4に示すような結果を得た。実験に先立ち、ランプは中性洗剤で洗浄し、新しい芯に取り替え、新しいアルコールを充填した。使用した分光器は日本光学製のNIKON G-250 回折格子分光器であり、分解能は $N=62000$ (本)である。今回の実験では、逆線分散は $0.1\text{nm/mm}$ であった。図中の放射強度は、スリットの幅(光量)や分解能(波長幅)によって異なるので波長間の相対値で示してある。つまり、アルコールランプとナトリウムランプの放射強度の大きさの比較は意味がなく、各ランプがどの波長で強い光を放射しているか判断できるだけである。しかし、明らかにナトリウムランプの光度の方が、アルコールランプの光度よりも強いことは確認された。

さらに、アルコールランプのオレンジ色の

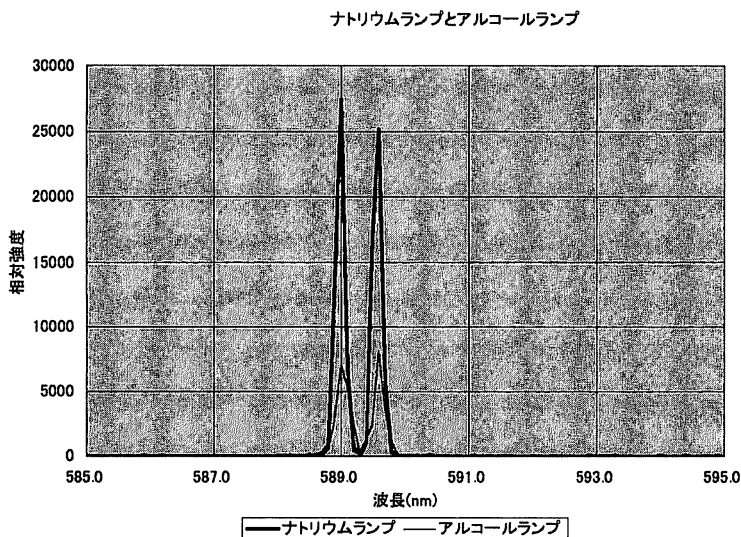


図4. ナトリウムランプとアルコールランプのスペクトル線の比較

炎がナトリウムランプのD線を吸収していることを視覚的に示すため、暗室にてナトリウムランプに照らされたアルコールランプの炎を観察した。炎は、図5に示したようにナトリウムランプの光を吸収するため周辺部が黒くなる。また、炎の影も生じた。

対照実験として同様に、アルコールランプの炎を水銀ランプで照らした場合、図6に示したようにアルコールランプの炎は黒くならず、炎の影も生じなかった。これはカドミウムランプで実験を行っても同様の結果であった。

さらに、ガスバーナーをナトリウムランプ

によって照らして、同様の実験を行ったが、図7に示したように炎に変化はなく、影も観察できなかった。

ここで、ガスバーナーに食塩水を湿らした金網をかざすと図8に示したように金網より上に黒い炎が観察でき、また炎の影も観察できた。

これらの結果が示すように、アルコールランプはナトリウムのD線を発していることが確認された。これだけではナトリウムの起源は判明しないが、ここで重要な点はアルコールランプがオレンジ色の炎を出し、ナトリウムランプによって影が作られることを確認す

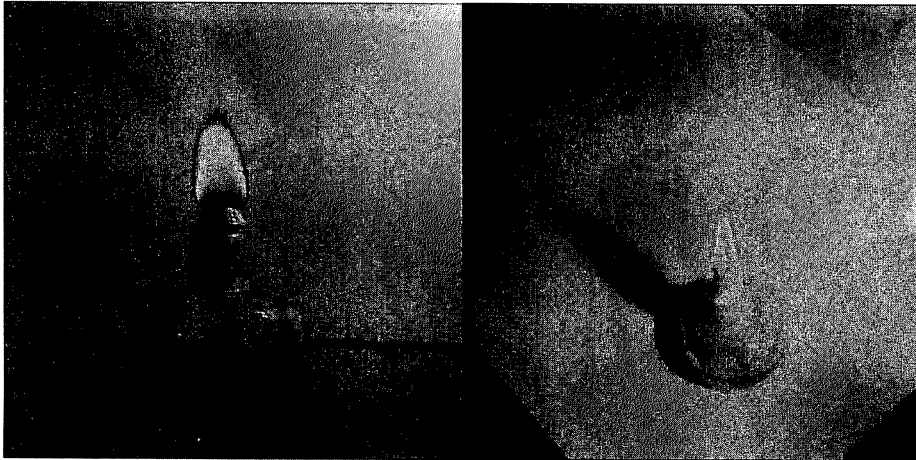


図5. ナトリウムランプに照らされたアルコールランプの炎とその影

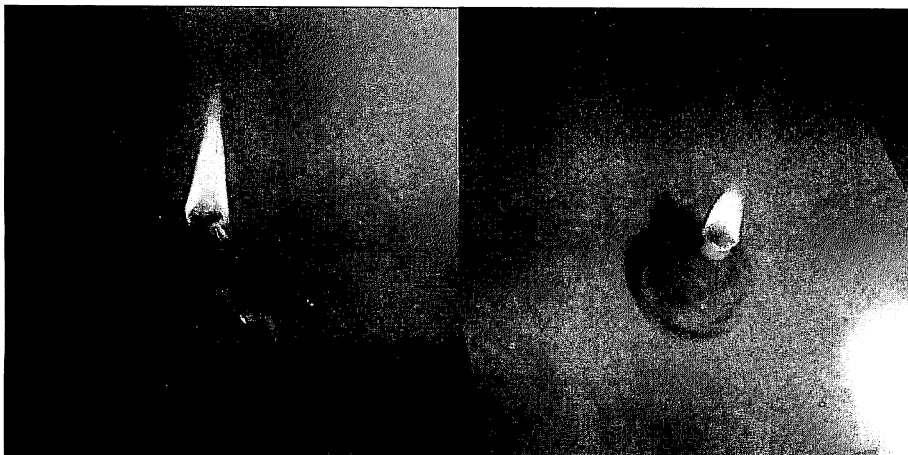


図6. 水銀ランプに照らされたアルコールランプの炎とその影

ることである。もしも、生徒にナトリウムの起源をはっきりと示したいのならば、アルコールに微量の塩化ナトリウムを溶かすなり、アルコールランプの芯に塩化ナトリウムを振りかければよい。

従来は食塩水に浸した白金線を炎の中に入れて、食塩水を湿らした石綿を用いた炎色反応として、ナトリウムのD線を発光させていた。しかし、教員1人で演示実験を行うことを考えると、D線を出し続けながら背後からナトリウムランプや白熱灯などで照らす操作をすることは困難であった。アルコールランプを利用すれば、両手が使えるので背後か

ら照らす光源の変更も容易である。瞬時に光源を変更するとスクリーン上の像は急変するので、生徒は必ずその変化に気付く。この方法は非常に簡単で誰でも絶対に失敗しない演示実験である。

#### 4. 生徒の反響

実習「スペクトルの観察」は、1年の必修地学（3単位）の中で行われている。この1年必修地学は、地学全領域を実験・観察を中心とした、体験の授業で構成されている。毎年実施する実験・実習は、30程度のテーマである。

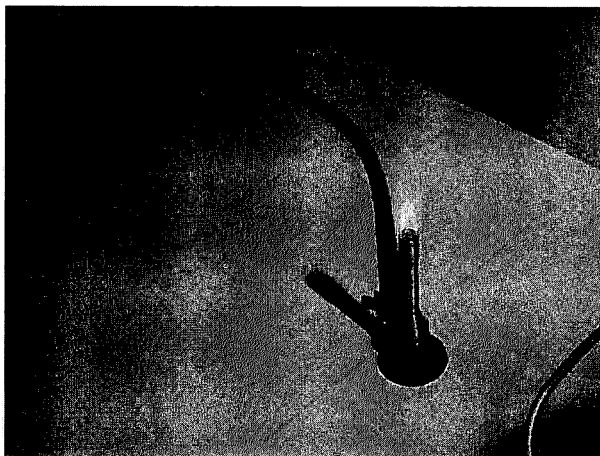


図7. ガスバーナーを使った追試実験1

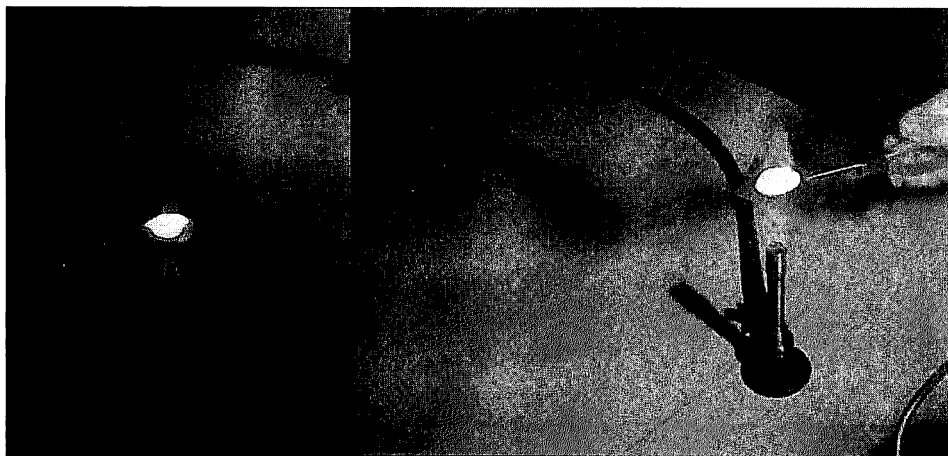


図8. ガスバーナーを使った追試実験2

1996年度から最後の授業で、アンケート調査を行っている [10]。内容は、それぞれの実習の「興味度」(実習は面白かったか)、及び「学習効果」(実習で行ったことにより学習効果が上がったか)を5段階で自己評価させた。この実験に関するアンケート結果を表1に示した。

年度によるばらつきはあるが、興味度、学習効果ともに、5・4(面白かった、もしくは実習により学習効果が上がった)と答えた生徒が多かった。5・4欄のカッコ内の数字は、5・4と答えた割合が全実習のうち上位から何番目かを表している。30程度行う実習のなかでもかなり好評な部類にはいることを示していると言えるだろう。

この実験では、初めて分光器を通してスペクトルを見たときやフラウンホーファー線の原理に関する演習を行った時に生徒から歓声が上がる。そして、アルコールランプの炎の黒い影を不思議そうに眺めている。アンケートに書かれた生徒の感想のうち、この実習に関するものをいくつか挙げる。

- 「非常に鮮やかで印象に残った。」(T. O.)
- 「太陽光に暗線が入っていることを知って驚いた。」(K. S.)
- 「宇宙のロマンを感じた。」(T. I.)
- 「光源によっていろいろな見え方があって意外だった。きれいだった。」(T. T.)
- 「目が疲れたが勉強になった。」(Y. Y.)

「教室の実験と実際の現象がつながって面白かった。」(M. A.)

### 5. まとめ

高等学校「地学」の天文分野における「スペクトルの観察」の授業実践を紹介した。地学におけるスペクトルの観察では、フラウンホーファー線の観察が重要であるが、直視分光器や回折格子のレプリカを使った自作の簡易分光器を用いても、格子定数などが適当であれば、フラウンホーファー線の観察が十分にできることを指摘した。また、アルコールランプがナトリウムのD線を発していることを実験で示し、アルコールランプとナトリウムランプを使って、吸収線の原理を簡単な演習実験で指導できることを示した。

ここで紹介した学習内容は、高等学校の物理、化学、地学などで教えられている内容に関連している。そこで、このような演習を特定の科目にとらわれない、総合科学的な演習と考え、総合的な学習の時間に、科学史などと関連づけて実施することもできるだろう。そして、この授業実践では、普通の物理教室の備品や比較的低価格な材料を用いているので、どこの高等学校でも実践可能である。

分光器の利用に関しては、横浜国立大学教育学部の鈴木勝久教授に便宜を図っていただきました。ここに、感謝の意を表します。ま

表1. 実習「スペクトルの観察」についてのアンケート集計結果

年度	実習数	興味度			学習効果		
		5・4	3	2・1	5・4	3	2・1
'98	28	49.7% (5)	35.0%	15.3%	48.7% (4)	34.8%	16.5%
'97	29	50.0% (4)	28.5%	21.5%	44.8% (6)	35.9%	19.3%
'96	30	62.9% (6)	23.4%	13.7%	59.2% (19)	34.2%	6.7%

た、本原稿を読んで、貴重なご意見を賜りました方々にお礼申し上げます。

#### 引用文献

- [1] Wood, R. W. (1991) "Science for Kids: 39 Easy Astronomy Experiments", TAB Books, Blue Ridge Summit, PA, p139
- [2] 後藤道夫, 岸野安彦, 馬場秀夫 (1982) 「理科実験シリーズ 物理」講談社, p192
- [3] 中山正俊 他 (1994) 「高等学校 物理 IB」三省堂, p207
- [4] 片平順一 (2000) 「光のスペクトルで楽しい授業を！」天文教育, 12巻, 1号, 24-28
- [5] 長沢進午 (1976) 「太陽の科学」講談社, p212
- [6] 坪田幸政 (1987) 「慶応高校における天文

- 教育」第1回天文教育研究会集録, 108-112
- [7] Tsubota, Y. (1990) "Teaching Astronomy at Keio Senior High School", J. M. Pasachoff and J. R. Percy, Eds., "The Teaching of Astronomy", Cambridge University Press, Japan, 280-283
- [8] 力武常次 他 (1997) 「高等学校 地学 IB」数研出版, p274
- [9] 竹中功 (1998) 「黒い炎～黒い炎とフラウンホーファー線の観察～」, 左巻建男, 滝川洋二 編著「たのしくわかる物理実験事典」東京書籍, 241-242
- [10] 松本直記, 坪田幸政 (1998) 「地学実習に関するアンケート調査」日本地学教育学会第52回全国大会要項集, 32-33

#### 資料1. 回折格子のレプリカの購入先

日本 株式会社「光洋」

〒100-0006 東京都千代田区有楽町 1-8-1 日比谷パークビル 9F

回折格子レプリカフィルム

(格子定数 500 本/mm、15.2cm × 30.4cm) コード 2562 ¥2,000

枠付回折格子レプリカ

(格子定数 500 本/mm、厚紙枠外寸 5cm × 5cm、25 個組) コード 3332 ¥4,100

アメリカ Science Kit 社

Science Kit & Boreal Laboratories: 777 East Park Drive, Tonawanda, NY 14150-6782, USA

電話: 716-874-6020 ファックス: 716-874-9572

Replica Diffraction Gratings

(格子定数 5,360 本/cm、厚紙枠外寸 5cm × 5cm、25 個組) 品番 65681 \$11.95

Unmounted Diffraction Grating

(格子定数 5,300 本/cm、15cm × 15cm) 品番 64350 \$6.95

<http://www.scienceki.com>

注: 中村理科工業株式会社より、回折格子のレプリカを含め簡易分光計の作成キットが販売されている。製品名は簡易分光計で、価格は1998年度のカatalogで3,300円、型番はD20-1827である。ただし、フラウンホーファー線の観察はできなかった。なお、1999年のカatalogには掲載されていない。

## 資料2. 授業で使用されたワークシート「スペクトルの観察」

## 実習 スペクトルの観察

( ) 年 ( ) 組 ( ) 番 氏名 ( )

## 目的

- ・直視分光器を使って色々な光源からのスペクトルを観察し、その特徴を観察する。
- ・太陽スペクトルを観測する。

## 準備

直視分光器、ナトリウムランプ、水銀ランプ、カドミウムランプ、スタータ・スタンド、スペクトル管（水素、酸素、窒素、アルゴン、ヘリウム、空気など）、スペクトル管支持台、高圧電源装置、白熱電球、蛍光灯、アルコールランプ、スクリーン、色鉛筆

## 予備知識

- ・直視分光器の構造 直視分光器は図1に示すように、アミーチプリズムを利用した分光器であり、スリット調整リングを用いて光量を調節する。直視分光器のダイダイ色付近の解像力は2nm程度である。

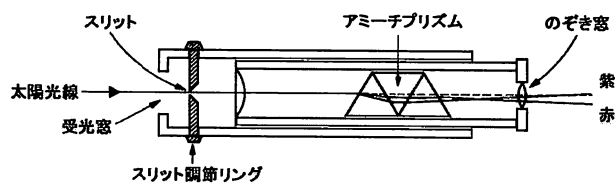


図1. 直視分光器の構造

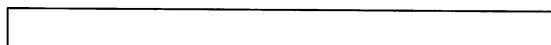
- ・連続スペクトル 紫から赤まで連続的に観測されるスペクトル。
- ・輝線スペクトル ある特定波長に観測される輝いた線。
- ・吸収スペクトル 連続スペクトル中のある特定波長に観測される暗線。

## 作業

- ① 白熱電球からの光を直視分光器で観測し、色鉛筆を使ってスケッチを取りなさい。横軸が波長に対応するように留意する。

白熱電灯

赤



紫



② ナトリウムランプ、水銀ランプとカドミウムランプのスペクトルを観察してその違いをスケッチしなさい。

ナトリウム      赤       紫

水銀              赤       紫

カドミウム      赤       紫

③ スペクトル管を使って水素、酸素、アルゴン、ヘリウムの各元素が放射するスペクトルを観察してその特徴をまとめよ。最後に、蛍光灯を観察する。

(            )      赤       紫

(            )      赤       紫

蛍光灯            赤       紫

④ アルコールランプを点火し、だいたい色の発光を確かめる。この炎をスクリーンに映し、その背後より白熱灯で照らし、スクリーン上の炎の像を観察する。

スクリーン上の炎の像

---

---

⑤ アルコールランプを背後よりナトリウムランプで照らし、スクリーン上の炎の像の変化を観察する。

スクリーン上の炎の像の変化

---

---

⑥ 太陽光のスペクトルを観察してその特徴を調べる。この時スリットの間隔は可能な限り狭くする。また、太陽の直射光を見ないで、教室に差し込んだ日光を白壁か白い紙に受けて観察する。

太陽光            赤       紫

特徴

---

---

## 考察

① ⑤の作業から吸収スペクトルの原理を考察せよ。

---



---

② 太陽のスペクトル中の暗線は何と呼ばれているか。

答 ( )

## データ A 主な太陽の暗線

記号	波長(nm)	吸収元素	強度	記号	波長(nm)	吸収元素	強度
	381.585	Fe	1272	d	438.356	Fe	1008
L	382.044	Fe	1712	H $\beta$	486.134	H	3680
	382.589	Fe	1519	b4	516.733	Mg	935
	383.231	Mg	1685	b2	517.270	Mg	1259
	383.830	Mg	1920	b1	518.362	Mg	1584
	385.992	Fe	1554	E	526.955	Fe	478
K	393.368	Ca+	20253	D2	588.997	Na	752
H	396.849	Ca+	15467	D1	589.594	Na	564
	404.583	Fe	1174	H $\alpha$	656.281	H	4020
H $\delta$	410.175	H	3133		849.806	Ca+	1470
g	422.674	Ca	1476		854.214	Ca+	3670
H $\gamma$	434.048	H	2855		866.217	Ca+	2600

## データ B 波長と色のたまかな関係

赤	だいだい	黄	緑	青	紫
770 ~ 640nm	640 ~ 590nm	590 ~ 550nm	550 ~ 490nm	490 ~ 430nm	430 ~ 380nm