

投稿

子ノ星教育社特製直視分光器の紹介

坂元 誠（子ノ星教育社）

1. はじめに

数年前、筆者が公開天文台に勤務していた頃である。高校で講師をしていた知人が Facebook 上で波長が読み取れる安価な分光器はないものかと書き込んでいたのが目に入った。工作で作る直視分光器は物理実験工作の定番であり、ちまたにあふれかえっている（ただし、理科教育の範囲内だが）といっても過言ではない。本会でも、1998 年の年会において西村昌能氏が実践報告をおこなっている（1998 年天文教育普及研究会年会集録）。理化学実験機器用品で販売される直視分光器の多くがプリズムを使用しているのに対して、これら工作で作られるものは、透過グレーティングシートを使用しているため、構造もシンプルでコストも安い。

知人は、透過グレーティングシートを用いた工作を前提にし、生徒全員に配布して実験観察をさせようと考えていたにちがいない。海外の製品で、非常に良くできたものがあるのを知っていたので紹介はしたが、2,000 円/個以上とそれなりに値が張る物であった。値段だけの価値はあるとは思いが、10 セットも買えば本格的なプリズム直視分光器が買えてしまうのだ。残念ながら、要求に応えることはできなかった。

公開天文台を退職し、天文教育に専念するために事業を立ち上げた筆者は、このことが忘れられず、奮起して波長目盛を備え、安価な直視分光器キットを開発し、世に出すことを決意した。

2. 直視分光器の仕組み

最初に透過グレーティングを用いた直視分光器の仕組みを簡単に紹介しておこう。直視

分光器の構成要素は主に 2 点。ひとつは分散素子である回折格子、もう一つはスリットである（図 1）。

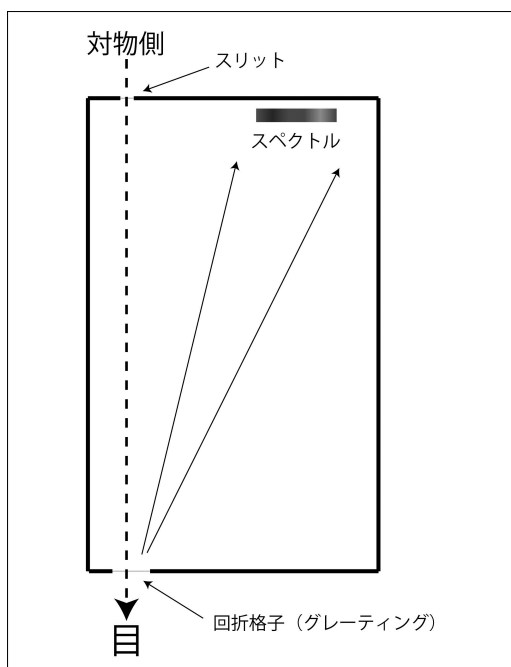


図 1 回折格子を使った直視分光器

2.1 分散素子

光を分光するための分散素子には、プリズムと、回折格子がある。プリズム分光は、光の波長によって屈折率が異なることを利用して分光をおこなう。空気と異なる屈折率を持つ媒体のなかに光を斜め入射させれば分光するのである。ただし、プリズムの分散は小さく、必要な波長分解能を得るためには像面までの距離を長くとり、複数のプリズムを用いる必要がある。

一方、回折格子による分光は、プリズム分光と比べ分光像は暗いものの、高い分散を得ることができるのが特徴だ。天体望遠鏡はも

もちろん、実験室での分析用分光器もほとんどが反射式の回折格子を用いている。ここでは直視分光器に用いられる透過式を前提としよう。

透過グレーディング（回折格子）は 1mm 中に 200～1000 本程度の溝を切った透明シートである。波長の分散は単位長さあたりの溝数が多いほど大きい。回折格子が分光を起こす仕組みは、屈折ではなく光の回折と干渉を用いる（図 2）。

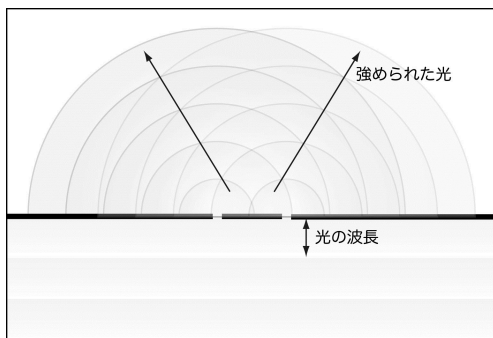


図 2 光の解説と回折と干渉

回折によって同心円状に進んだ波は波長の整数倍の場所で強めあう。波長の 1 倍で強め合う光を 0 次光、2 倍で強め合うのを 1 次光、3 倍で強め合うのを 2 次光とよぶ。0 次光は回折格子に対して垂直方向に強め合いながら伝搬していくが、1 次光以降は波長により異なる角度で伝搬していく。これが回折格子でスペクトルができる原理である。一般的に分光ではこの 1 次光を利用する。

2.2 スリット

分光器の多くはスリットを用いる。炎色反応などはもちろん、銀河、星雲なども面で光っている場合、波長分散方向においては、視野に対して制限をかけなければ、視野中の分散像が重なり合い、観察に耐えうる分光像を得ることはできない。

特に、輝線、吸収線を観察する際には、ス

リット幅が重要な意味を持つ。その幅が、そのまま線幅として表れる（図 3）。波長同定の精度を高めるためにも、その幅が波長読み取り限界に対して十分細い方が望ましい。

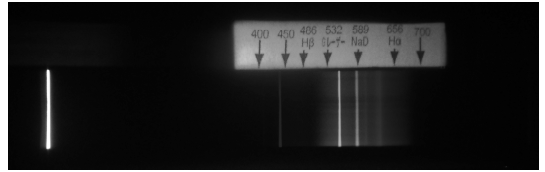


図 3 スリット幅と輝線幅

3. 子ノ星教育社特製直視分光器の特徴

まず、装置の外形は、型紙が A 型用紙におさまることを前提にして考えた。ただし、作りやすさ・デザイン・機能性を重視して、蓋付き箱の形状（蓋箱＋身箱：図 4）とし、大きめの A3 用紙 1 枚に収めることにした。



図 4 分光器は蓋箱と身箱からなる

今回開発した直視分光器では 500 本/mm のグレーディング（エドモンド・オプティクス製）を採用した。1000 本/mm も検討したが、太陽の H β 線を見るために明るさのコントラストが欲しいことから 500 本/mm で落ち着いた。観測可能波長域はおおよそ 400nm～700nm である。

シートは長方形にし、のぞき穴に貼り付ける際に向きを間違えるリスクを軽減した。グレーディングは身箱の表から貼り付けるようになっているため、傾きの修正が可能だ（図 5）。

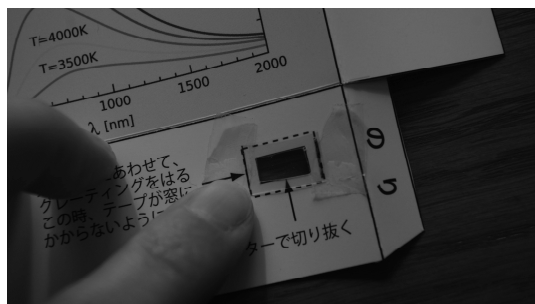


図5 身箱にグレーティングシートを貼る

スリットは、型紙を直接カッターナイフでくりぬく方法とはっていない。カッターナイフで、細いスリットを精度良く抜き取るのはなかなかむずかしい。空間方向に対してスリット幅が一定でなかったり、断面が毛羽立つ・切り目が入ったりする。特に後者では、分散方向に筋が入ることがあり、初めて分光に触れる初心者にとっては誤解を与えかねない。

そこで、カッターを用い、あらかじめ身箱、蓋箱に大き目のスリット孔を開けておく。次に身箱に外側から、はさみなどで切り取ったスリット部品を貼り付ける方法をとった。はさみで切り取ったスリット部品はカッターで切り抜いた場合よりも直線に近く、端面もきれいになる。また、スリットの平行度、幅ともに、貼り付け時に調整しやすい。さらに、くり返し何度でもというわけにはいかないが、貼り直しが可能なので、スリット幅を変更することも可能だ（図6）。

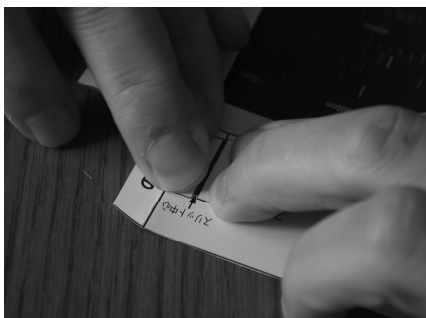


図6 身箱外側にスリット部品を貼り付ける

その後、長 兼弘氏から真鍮板を使うと良いのではないかとアドバイスがあり、採用させていただいた。真鍮のスリットはパッケージに同梱している。

もっとも大きな特徴と言えるのは波長目盛を実装したことだ。波長 λ の像がスリットから離れた位置 X にできるとき、 X は次の式で与えられる。

スリットとグレーティングの距離： L
スリットと波長 λ の分光像の距離： X
グレーティングの溝間距離： d

$$X = L \frac{\lambda}{\sqrt{d^2 - \lambda^2}}$$

目盛は分光像の上に表示することを考えたため、箱の高さに対して、スリット高さを抑え設計した。箱に窓を開けて、数値をトレーシングペーパーに印刷した波長目盛シートを差し込むことにした（図7）。



図7 波長目盛シートはスライド可能

スリット中心位置のずれや、箱の製作精度によって、分光像の場所が設計値とずれてしまうことが考えられるが、シートを左右にずらすことで（目盛の間隔は変えられないが）校正することができる。校正用の光源としては、レーザーをもちいるのが簡単だ。ただし、拡散板などを使って減光の工夫が必要だ。

波長目盛シートは2種類を同梱している400nm～700nmの数値のみを記したものと、観察する機会が多いであろう、H β 、NaD、

H α 線そして、グリーンレーザーの波長を書き込んだ物である。差し替えも可能だ(図8)。

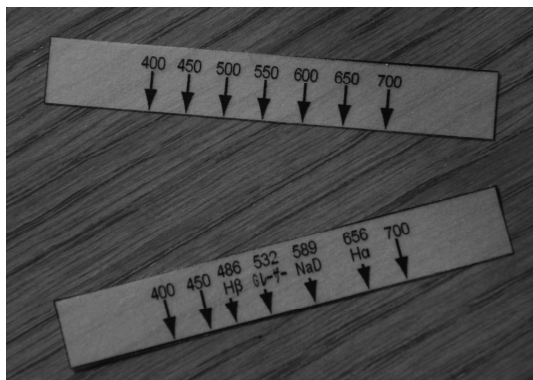


図8 2種類の波長目盛シート

波長目盛は透過式なので、目盛を読むためにある程度背景が明るくなくてはならない。天体望遠鏡を通して恒星のスペクトルを観察するような場合には、別途、目盛を照らす光源などを工夫する必要があるだろう。一方、炎色反応や、太陽の反射光を観察するような場合には明るすぎるため、波長目盛窓からの入射光が分散され、視野内がスペクトルだらけで見づらくなる。そこで、蓋箱の内側の波長目盛窓部に赤セロファンを貼り付けることにした(図9)。分光像は光源に近いところに短波長側、つまり青色がくる。赤フィルターを通す事で、図3にあるように波長目盛左右の分散像はずいぶん押さえることができた。

実際の観察では炎色反応の輝線スペクトルはもちろん、太陽の吸収線も十分観察できる。

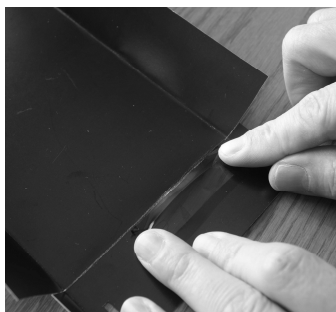


図9 蓋箱の内側に赤セロファンを貼る

ただし、前述の通り波長域は700nm付近までであり、明るさが暗いことから、H α 線よりも青から緑あたりにあたるH β 線、Mg、Feが観察しやすい。

4. 教材として期待できる効果

天文分野においては、輝線のみならず、黒体放射の観察もおこないたいと思う方も多いだろうが、実際はなかなかむずかしい。理由は、分光像は550nmあたりにピークがあり400nm、700nmにむけて感度は落ちていくためである。波長にする感度特性を補正した上でないと黒体放射による色温度を評価することはむずかしい。直視分光器を使う意義は撮像して処理することなく、即時、直感的にスペクトルを観察できることである。残念ながら色温度の測定には不向きと言わざるを得ない。また、可視光の波長域内にピークを持つ高温の熱源が身のまわりにはほとんどないという点もある。実験室で4000~8000℃あたりの熱源を用意できない事には、連続スペクトルと輝線スペクトルの違いを実感させる程度のものであると考えるしかないだろう。

ただ、太陽光と白熱電球を見比べ、白熱電球の連続スペクトルのピークが赤外線域にあることは確認できる。なぜ、白熱電球が照明としての効率が悪いのか、エネルギー教育の一環として用いるには有効だ。

やはり本領を発揮するのは輝線スペクトルの観察だ。スリット幅を小さくすれば線幅は細くなり、質の高い輝線を観察できる。満足のいくスペクトル像を得られなくとも、スリットへのアクセスは容易なので、くり返し修正することで装置としての分光器の構造を学ぶきっかけにもなる。

さて、(開発者としては)最大の目玉である波長目盛に期待する効果である。

スペクトルは感覚的に理解するのは簡単ではない。理解を促すために、虹を例に持ち出

してスペクトルの解説がなされることが多いと思う。しかし、実際に虹を見ると、多くの人は、それが雨上がりの景色に貼り付いたものであるかのように感じてしまう。「虹は追いかけても逃げてしまう」と不思議がられたのはなにも昔の話ではない。岡村孝子の「虹をおいかけて」を口ずさんだ方も多いのではないか。景色はXYZの空間にある実像であり、それと重なって見えている虹は、空間方向、分散方向の2成分からなっている虚像なのだ。実像と虚像が重なって見えてしまう虹こそが逆に誤解を与え、スペクトルを理解しづらくしているのかもしれない。

分光器で見られるスペクトルに波長目盛が付くことで、その像は空間と異なる座標の上にあることを印象づけることができるのではないか。

一目で全域を観察してしまえる低分散のスペクトル、しかもカラーで見るわけである。炎色反応などの観察で、資料集にあるサンプル写真と比べてしまえば、色自体が波長を表すことになってしまい、元素の同定をおこなうに当たって、数値としての波長は必ずしも必要ないかもしれない。しかし、それでもあえてスペクトルの波長を数値で読みとる習慣

をつけることは、その後の生徒の科学の学びに大きな意味を持つと考える。

子ノ星教育社製分光器は200円/個と、生徒全員に配れるレベルにまで価格を押さえている。花火のスペクトル動画などもアップロードされているので、くわしくは子ノ星教育社のwebページ (<http://www.nenohoshi.info/>) をご覧戴きたい。

文 献

- [1] 横尾武夫 編 (2000)『マンガ 手作りの宇宙』, 裳華房



坂元 誠

* * * * *