装置と技術

天体用エッセル分光器*

糸 井 信 夫**・戸 川 博 文**

(昭和40年2月27日受理)

Echelle Spectrograph for Astronomical Observation

Nobuo ITOI and Hirofumi TOGAWA

(Nippon Kogaku K.K.)

(6-3, Nishiioi-1, Shinagawa-ku, Tokyo)

1. ま え が き

天体の分光観測は、万光年、億光年といった、はるか彼方からの光を対象としなければならないという点で、分光の分野においても、難物の一つと考えられていた。しかし、最近では、口径が36吋、74吋そして200吋にも及ぶ大望遠鏡の現出と、長時間の露出にも耐え得る。天体の日周運動に対する追尾機構の精密化などによって、光源が暗いという欠点は、着々と補われつつある。

エッセル¹⁻³⁾を用いた分光器の最大の特徴は、大分散、大分解能という点にある。さらに補助の分散系を使うことによって、異なる次数のスペクトルが重なるのを避けられること、同時撮影範囲が広く、装置全体がコンパクトにまとめられること、しかも、各スペクトルが非常に明るいこと、などが優れた点である。

天体観測にエッセルの利用された例は、太陽を除いて、余り知られていないが、気象的制約というものが、大きく妨げられているこの分野にとって、上記の特徴は、願ってもないことのように思われる。

以下、東京天文台、岡山天体物理観測所に設置されている、74吋口径の反射望遠鏡用として計画、製作されたエッセル分光器について述べる。

2. エッセルの原理

まずエッセルの原理を、きわめて簡単に考えてみる。エッセルといっても、回折格子の一種であるから、その基本式(1)に従うことはいうまでもない。

$$a(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda \quad (1)$$

a : 格子定数, α : 入射角, β : 回折角,
 m : 次数, λ : 波長

また、同様に、分散、分解能も、(2)、(3)の式によって、計算されるべきものである。

$$D = f \times d\beta / \lambda = f \times m / a \cos \beta \quad (2)$$

$$R = \lambda / d\lambda = mN \quad (3)$$

f : カメラの焦点距離, N : 溝の総本数

今、簡単な比較をするために、入射角 α 、回折角 β が共に、格子のブレイズ角 θ にほとんど等しいという場合を考えてみる。一般の回折格子では (Fig. 1. a), 隣り合う回折光の間の光路差が、大体波長の程度に作られている。(すなわち、階段の深さを t とすると、 $2t \approx \lambda$) これに対して、エッセルでは (Fig. 1. b) その光路差が、波長の m 倍程度に作られている。すなわち、(1)、(2)、(3)の各式において、普通の回折格子では、 $m=1$ または、高々2、エッセルでは、 $m=$ 数十～数百、という違いがあり、これが、エッセルに、大分散、大分解能の特徴をもたらす因である。

初めに分散を考えると、(2)式において、 $1/a$ は1mm当りの溝数を表わし、エッセルでは、30本/mm、73.25本/mmなどで、普通の回折格子の600本/mm、

* 39年12月5日。日本分光学会秋季講演会において発表したもの。

** 日本光学工業 K. K. 機器設計部。
(東京都品川区西大井1丁目6番3号)

- 1) G.R. Harrison, J.E. Archer and J. Camus:
J. Opt. Soc. Am., **42**, 706 (1952).
- 2) G.R. Harrison, S.P. Davis and H.J. Robertson:
J. Opt. Soc. Am., **43**, 853 (1953).
- 3) 瀬谷: 分光研究, 第9号, 11 (1954).

Fig. 1. Sectional diagram of grating

1200 本/mm などと比べると、ほぼ一桁少ないものであるが、逆に、回折角 β が大きい（ブレイズ角、たとえば $63^\circ 26'$ にほとんど等しい）、そして次数 m が圧倒的に大きい、などを総合すると、結局、エッセルの分散は、普通の回折格子の数倍～数十倍になることが分かる。また同様の考え方で、分解能の点でも、(3) 式から、数倍～数十倍になることも分かる。

つぎに、エッセルの分散だけであると、 $m\lambda = \text{const}$ という式を満たす m と λ の組み合わせは、範囲を可視域に限っても、相当数（数十～数百）あり、これらが皆、同一個所に重ってしまう。そこで補助の分散系、たとえば、プリズム、透過格子、凹面格子、あるいは平面格子を用いて、エッセルの分散と直角な方向に分散を与えてやると、Fig. 2 のごとく、次数毎のスペクトル群が、何段にも並んでくる。この場合、補助分散系の能力としては、一番せまいスペクトル群の間隔が、スリット像の長さよりも大きくなるように選べば良い。

Fig. 2. Geometrical distribution of Echellogram

このようにして得られるスペクトルでは、各波長は、エッセルの鏡面反射の方向に最も近い次数のものが現われるので、全域にわたり、非常に明るいものである。しかも、Fig. 2 で明らかなように、ある段の左端にある波長が (m 次)、次の段の ($m-1$ 次) 右端に現われるというように、波長は全く切目なくつながり、(この

一つのサイクルの長さが Free Spectral Range と称されるものである。) 広い範囲のスペクトルが、狭いスペースの中に、効果的に収められる。

3. 装置の概要

ここで、74 吋反射望遠鏡のクーデ焦点に取り付けられた、本装置について述べる。クーデ焦点というのは、反射型望遠鏡の観測部の一つで、観測される星の位置によって、望遠鏡の向きは変わるが、分光器に入る光束の方向は変わらないよう考慮された。光学系の焦点であり、望遠鏡と一緒に振り回せないような大型の分光器などは、一般に、この焦点に取り付けられる。(Fig. 3)

Fig. 3. Optical system of a typical reflecting telescope

分光器の初めの目標としては、線分散度 $1.5 \text{ \AA/mm}$ 程度、分解能、10 万以上、それに波長範囲として $3500 \sim 7000 \text{ \AA}$ を、手札乾板におさめる。ということで出発し、カメラレンズの口径比は、74 吋望遠鏡の方から定められて $F/8$ とした。ただ普通の写真用レンズでは、 $4000 \text{ \AA}$ 以下の光がほとんど吸収されてしまう。そこで、どうしても反射鏡を主体に考えなければならないが、 $F/8$ という明るさでは、球面収差を無視できないから、単なる球面鏡は使えない。かといって、非球面、たとえば拋物面では、成程球面収差は無くせるが、視界収差すなわち、コマ収差に対しては、全く効果を持たないから、約 7 度の視界を要する。この系では適当でないことが分かる。

かくして、シュミットカメラを用いることになった。よく知られているように*、シュミットカメラは、球面の反射鏡と、シュミットプレートという極めて簡単な構成で、球面収差が理論的には零、コマ収差も著しく少な

Fig. 4. Optical system of off axis Schmidt camera

い光学系である。さらに、写真取枠部の大きさ、取り扱い上の便宜などを考慮して、結局、軸外のシュミットカメラとした (Fig. 4)。この場合、シュミットプレートと、像平坦化レンズの透過率が気になるが、BK 7 タイプの硝子を使えば、 $3500 \text{ \AA}$ で 90% 以上の透過率をもつので、問題にならない。

以下、本分光器の性能を、まとめる、

1. 波長範囲: $3500 \sim 7000 \text{ \AA}$
 線分散度: $1.5 \text{ \AA/mm}$ ($4861 \text{ \AA}$ において)
 分解能: 約 14 万 (")
 Free Spectral Range:
 $200 \text{ \AA}$ ($7000 \text{ \AA}$ において, 長さ 90 mm)
 $50 \text{ \AA}$ ($3500 \text{ \AA}$ " , 長さ 45 mm)

2. コリメーター鏡 (軸外拋物面)
 口径: 100 mm
 焦点距離: 2800 mm
3. 透過格子
 有効面積: $102 \times 102 \text{ mm}^2$
 溝数: 90 本/mm
 ブレィズ角: $3^\circ 33'$ ($4000 \text{ \AA}$)
4. エッセル
 有効面積: $95 \times 206 \text{ mm}^2$
 溝数: 73.25 本/mm
 ブレィズ角: $63^\circ 26'$
5. カメラレンズ (軸外シュミット・タイプ)
 口径比: F/8
 焦点距離: 780 mm
 視界: 7° (Vignetting free)
6. 写真取枠部
 乾板サイズ: $107 \times 41 \text{ mm}^2$
 像平坦化レンズ付き

つぎに、全体の配置図 (Fig. 5) と、シュミットカメラ部の外貌写真を示す。分光器は、約 36 度傾いて取り付けられた。

Fig. 5. Optical arrangement of the Echelle spectrograph

Photo. 1. Photograph of the off axis Schmidt camera

製作過程で、特に問題となったのは、シュミット・プレートである。これは、主反射鏡と組み合せて、球面収差が零になるように定められる非球面で、少なくとも、四次以上の式で与えられるものである。その加工法は、ともかく、最終的に高精度面を保証すべき検査方法に乏しいのが、大きな弱みであった。しかるに、最近、複屈折による波面の横ずれを利用した・シアリング干渉計型横収差測定機⁴⁾が開発されたので、それを最終的な研磨工程に入れ、それも、シュミット・プレート単体の検査

4) 鶴田：応用物理，**32**，225 (1963)

に用いるのではなく、主反射鏡と組み合せたシュミット・カメラ全体としての横収差を観測しながら、修正研磨を行なう。という方法で、結局、横収差にして、0.02 mm 内外のカメラができた。

そしてさらに、各分散系を含めた総合調整の結果、写真乾板上で、約 0.025 mm の解像力が得られた。これは、分解能に換算すると、4861 Å において、約 14 万に相当するものである。

4. 結 果

Photo. 3 に 74 吋反射望遠鏡にとりつけられた・エッセル分光器による、星のスペクトルの一例を示す。

これは、こいぬ座の Procyon と称される 0.5 等級星のスペクトルである。星のスペクトル分類によれば、F₅ 型に属し、丁度、太陽のように、金属の吸収線が、沢山現われている。たとえば、Na の D₁D₂ 線は左上部に (41 次)、H_β は中央右よりに (49 次)、CaK の太い吸収線が、中央下部に (61 次)、それぞれ矢印で示してある。この写真では短波長は、3500 Å (69 次) から始まり、長波長は、乾板の関係で、6300 Å (38 次) で終わっている。なお乾板は Kodak 103 a-F、約 30 分間、星を追尾して、撮影されたものである。

最後に、終始、御指導いただいた、東京天文台、大沢清輝教授に、深く感謝いたします。

Photo. 2. A stellar spectra by the Echelle spectrograph