

綜説と解説

回折格子とマウンティング

瀬谷 正 男*

(昭和43年7月8日受理)

Diffraction Grating and its Mounting

Masao SEYA

Institute for Optical Research, Kyoiku University
(400, Hyakunincho-4, Sinzyuku-ku, Tokyo)

1. 緒 言

回折格子が分光器の素子として使用されるようになってからすでに50年以上の歳月を経た。かつては非常に貴重な光学器械部品であった回折格子も今日では精密複製格子(レプリカグレーティング)の製作技術が進歩したため性能の良い複製格子が大量に供給されるようになり、プリズムに代わって様々な分光器に広く用いられるようになってきた。また回折格子が手軽に使えるようになるにつれて回折格子のマウンティングについても色々な型式のものが考案されてきた。

はじめに回折格子の一般的性質について述べ次いで市販分光器に使用されているマウンティング、最近研究されたマウンティングについて紹介する。

2. 回折格子の種類

回折格子はその表面の形状によって次の3種類に大別される。

1. 平面回折格子
2. 凹面回折格子
3. 特殊回折格子

平面回折格子とは平面に等間隔に直線溝を刻んだものであり、凹面回折格子とは球面上に溝を刻んだもので回折格子の中心で球面に接する平面上に溝を射影すると等間隔の直線となっている。特殊回折格子とは非球面上に溝を刻んだものであるが実用に供し得るほど大量に製作さ

れているという話は未だ聞いていない。理論的な研究では溝の間隔を一定規則に従って変化させたものや溝の形を円弧や双曲線にしたものも考えられてはいるが実用とは縁の遠いものである。

平面回折格子には透過型と反射型とがある。しかし精度を必要とする分光器に使用されているものはほとんどが反射型である。

3. 平面回折格子の性質

Fig. 1 は平面回折格子の溝に直角な切断面の図である。回折格子に関する術語として格子定数、回折格子の法線、溝面の法線、入射角、回折角、ブレイズ角などがあるが Fig. 1 から容易にその意義を理解できると思う。入射角、回折角の符号については次のように定める。入射角は常に正にとる。回折角は回折格子の法線に関して回折光が入射光と同じ側にあるときには正に、反対側にあるときには負にとる。入射光の波長を λ とするとき、 α 、 β 、 d の間には次の関係がある。

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{m\lambda}{d} \quad (1)$$

ここで m は観測するスペクトルの次数であって0また

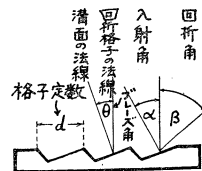


Fig. 1. 平面回折格子.

* 東京教育大学光学研究所 (東京都新宿区百人町 4-400).

は正負の整数値をとることができる。入射光の波長 λ ，入射角 α が与えられれば (1) 式の関係を満たす種々の β の方向に回折光は進んで行く。 $m=0$ のときの β の方向に現われるスペクトルを 0 次スペクトル， $m=+1, -1$ のときの β の方向に現われるスペクトルをそれぞれ +1 次， -1 次のスペクトルという。 0 次の方向では $\beta=-\alpha$ である。 0 次のスペクトルの方向を境として入射光と同じ側は +1 次で反対側は -1 次である。

スペクトルの角分散は (1) 式から求められる。

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta} \quad (2)$$

角分散はスペクトルの次数 m に比例し，格子定数 d に反比例する。また回折角が大きいくほど角分散は大きくなる。回折格子の真正面附近では β の値は 0° に近く，したがって $\cos \beta$ の値の変化が小さいので角分散はほとんど一定である。この附近で撮影したスペクトルではスペクトル線の間隔と波長差とが比例している。このようなスペクトルは **normal spectrum** と呼ばれる。

回折格子の分解能は次式で与えられる。

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad (3)$$

N は回折格子の溝の総数である。 $\Delta\lambda$ はおおよそ分離して見ることのできる 2 本のスペクトル線の波長差と考えてよい。

回折格子の分解能を十分に発揮させるためにはスリットの幅とスリットの照明法を適切なものとしなくてはならない。最適のスリット幅 B は照明法によって多少異なるが，おおよそ

$$B = \frac{\lambda f}{D} \quad (4)$$

で与えられる。 f は分光器のコリメーターレンズの焦点距離， D はその直径である。スリット幅を最適幅より次第に広げてゆくとスペクトル線の半値幅は急速に大きくなり分解能は低下する。その上，像の中心部の強度にはほとんど変化がないので写真撮影をする場合に露出時間を短縮するわけにもゆかず何の利益もない。また最適幅より狭くしても半値幅にはほとんど変化がなく，像の中心部の強度は減少する一方である。

Blaze の角 (θ) とは回折格子の法線と溝の面の法線とのなす角をいう。 **Blaze** の波長とは溝の面の法線に沿って光を入射させたとき，入射光と同じ方向に回折してゆく一次光の波長をいう。数式で表わすと

$$\lambda_{\text{Blaze}} = 2d \sin \theta. \quad (5)$$

回折格子はプリズムと違って波長 λ の光を入射させた

とき，そのエネルギーは多くの次数に分散する。いろいろな次数のうちエネルギーが最も多く集中する次数は溝の面の法線に関して入射光，回折光が正反射の関係にある次数である。したがって溝の面の法線に沿って入射させた場合に最もエネルギーが集中する次数は溝の面の法線に沿って逆行する次数である。もしその次数が m 次であればその波長は λ_{Blaze}/m である。

Blaze の角 θ^* の平面回折格子に入射角 α で入射させたとき最もエネルギーの集中する次数 m ，波長 λ の間には次の関係がある。

$$m\lambda = 2d \sin \theta \cos(\alpha - \theta) \quad (6)$$

平面回折格子の使用法としてはコリメーターレンズ(あるいは凹面鏡)で平行光線とした光を平面回折格子に入射させ回折した光をカメラレンズ(あるいは凹面鏡)で結像させるのが最も一般的な使用方法である。

これまで述べた公式は入射光が平面回折格子の溝に垂直な平面(主断面という)に平行に入射する場合に適用されるものであり，また実用化されているほとんどのマウンティングが主断面に平行な光を使用している。しかし時として主断面と或る角度をもった光を入射させることがある。 **Fig. 2** で回折格子の中心 O に入射する光線上の一点 A の主断面上的の射影点を B とし， $\angle XOB = \alpha$ ， $\angle AOB = \gamma$ とする。このとき波長 λ の m 次の光の回折する方向を OA' とし， A' の主断面上的の射影点を B' とする。 $\angle XOB' = \beta$ ， $\angle A'OB' = \gamma'$ とすると

$$\left. \begin{aligned} \gamma' &= \gamma \\ d \cos \gamma (\sin \alpha + \sin \beta) &= m\lambda \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

なる関係がある。スペクトルを主断面上に射影したものについて考えると格子定数が小さくなったのと同じこと

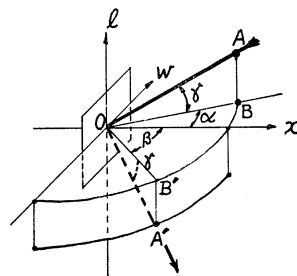


Fig. 2. 平面回折格子に主断面と γ の角をなす光が入射した場合の回折光の方向。

* θ は回折格子の法線に関して，溝の面の方向が入射光と同じ側にあるときに正，反対側にあるときには負にとるものとする。

になっている。入射光線の γ の値によって見掛け上の格子定数 ($d \cos \gamma$) は異なった値となるので、長いスリットを用いた場合のスペクトル像は 0 次のスペクトル線だけが直線となり他のスペクトル線はすべて僅かではあるが曲線となる。Fig. 3 は長い入射スリットを使用したときのスペクトル線の現われ方を示している。

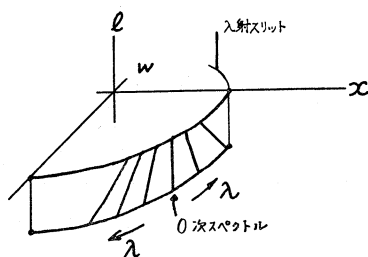


Fig. 3. γ が大きくなると分散も大きくなるのでスペクトル線は曲る。

実用に供されている回折格子は完全なものではなく溝の間隔に多少の誤差がある。そのためスペクトル線も理想通りにはならない。一本の真のスペクトル線の両側に等間隔に多数の随伴線が現われることがある。このような随伴線は偽線 (ghost line) であって格子溝の間隔に周期的な誤差がある場合に現われる。この種の偽線を Rowland Ghost という。真のスペクトル線の波長を λ 、一周期の中に含まれる溝の数を N 、真のスペクトル線の次数を n 、偽線の次数を n' とすると偽線の波長 λ' は次の式で与えられる。

$$\lambda' = \lambda \left(1 \pm \frac{n'}{nN} \right) \quad (8)$$

Rowland Ghost 線の強さと真のスペクトル線の強さの比は真のスペクトル線の次数の自乗にほぼ比例する。比例定数は回折格子の良否によって異なる。偽線にはこの外に Lyman Ghost と呼ばれる種類のものもある。Lyman Ghost は真のスペクトル線の波長の簡単な分数倍の波長の位置に現われる。その分数値は回折格子によって異なるが、たとえば $2/5$, $3/5$, $4/5$... などである。したがって Lyman Ghost の強い回折格子では可視領域のスペクトル線が真空領域に現われたりする。

4. 凹面回折格子の性質

平面回折格子はレンズあるいは球面鏡と組み合わせることによってはじめて分光器としての機能を発揮するのに対して凹面回折格子は、それ自身で入射スリットから入射してきた光を分散し結像させる。主断面内に点光源

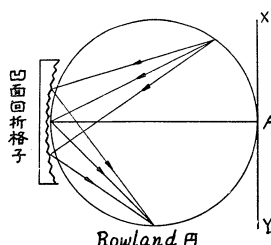


Fig. 4. 凹面回折格子。

があるとする (Fig. 4 参照)。普通の凹面鏡の場合と同じように主断面内の光束の結像する点と光束の中心光線を含み主断面に垂直な平面 (球欠平面という) 内にある光束の結像する点の位置とは一致しない。点光源が凹面回折格子の曲率半径を直径とする円周 (Rowland 円という) 上にあるときには主断面の光束の結像する位置は同じ Rowland 円である。球欠面内の光束の結像点の位置は Rowland 円の遙か外方である。Rowland 円上凹面回折格子に正対する点 A を通って円の接線 XY を引く。 XY 上の任意の一点からでる光束のうち球欠面内の光束は同じ XY 上に結像する。光源から凹面回折格子の中心までの距離を r 、入射角を α 、回折角を β とする。回折格子の中心から主断面内の光束の結像点までの距離を r_i' 、球欠面内の光束の結像点までの距離を r_s' とすると、 r_i' 、 r_s' は次の式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} r_i' &= \frac{\cos^2 \beta}{\frac{1}{R} (\cos \alpha + \cos \beta) - \frac{1}{r} \cos^2 \alpha} \\ r_s' &= \frac{1}{\frac{1}{R} (\cos \alpha + \cos \beta) - \frac{1}{r}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Rowland 円を紙面とし、スリットが紙面に垂直で Rowland 円上にあるときにはスペクトルは Rowland 円に沿って生じ、各スペクトル線は紙面に垂直になっている。しかし球欠面内の光の像点は Rowland 円とは別の場所にあるので、Rowland 円でのスペクトル像はスリットの長さよりも遙かに長いものとなっている。

スリットが Rowland 円の外側 (内側) にあるときにはスペクトル像は Rowland 円の内側 (外側) に生じる。

次に Rowland 円を周囲とする Rowland 円筒を仮想し、点光源が Rowland 円筒上にある場合のスペクトルの位置について考える。

Fig. 5 で点光源が Rowland 円筒上高さ z の位置にあるとし、像点の高さを z' とすると z' は次のようになる。

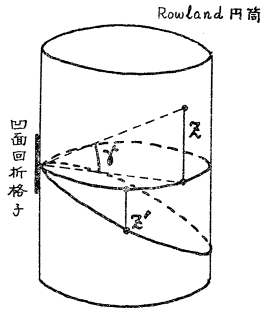


Fig. 5. Rowland 円筒上の点光源と像の関係.

$$z' = -R \tan \gamma \cdot \cos \beta$$

ただし $\tan \gamma = \frac{z}{r}$.

5. 平面回折格子のマウンティング

5.1 Ebert 型, Czerny-Turner 型マウンティング¹⁾

平面回折格子の使われている分光器には Ebert 型あるいはその変型である Czerny-Turner 型が多い。Fig. 6 は Ebert 型の原理を示している。入射スリットから入射した光を凹面鏡によって平行光線とし、平面回折格子に入射させ、回折光を再び凹面鏡で受けて結像させるものである。Ebert によって考案された初期のものでは入射スリット、平面回折格子、写真取枠がほとんど同一の直線上に配置されていた。Fig. 6 に示すものは Fastie によって改良されたもので平面回折格子は入射スリットと凹面鏡との間隔のほぼ中央附近に位置している。また入射スリットから入射した光は平面回折格子の真下を通して凹面鏡に入射し、回折光は平面回折格子の真上を通

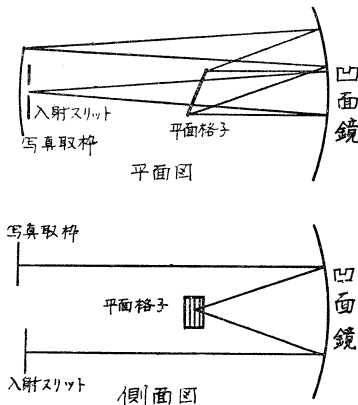


Fig. 6. Ebert 型回折格子分光器.

過して結像するようになっている。したがって入射光は平面回折格子の主断面内にはない。

5.2 Gillieson 型マウンティング²⁾

平面回折格子は原則として平行光線を入射させて使用するものであるが特異な用法として収斂光束を入射させ、凹面鏡やレンズを使用することなく、回折光自身で結像させる方法がある。この種の研究はかなり古くから行なわれていた。しかし詳しい計算を発表したのは Gillieson が最初である。Ebert 型と比べてみると、Gillieson 型では凹面鏡によって収斂光束をつくり平面回折格子に入射させればよいのであるから反射面が一面少ないことになる。したがって反射による光の損失もまた少ない。しかし、従来はコマ収差が大きいので大型の分光器には不適当なマウンティングであるとされてきた。最近になってからは Gillieson mounting の欠点である Coma 収差を少なくする研究が行なわれている。平面回折格子に収斂光束を入射させた場合に像の出来る位置を求めるには凹面回折格子に関する計算式 (9) の中で凹面回折格子の曲率半径 R を ∞ とすることによって求められる。平面回折格子の中心から主断面内の光束の結像点までの距離を r_i' 、球欠面内の光束の結像点までの距離を r_s' とする。また入射収斂光束の結像までの距離を r とする。 $r, r_i', r_s', \alpha, \beta$ の間には次の関係がある。

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \beta}{r_i'} = 0$$

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r_s'} = 0$$

r と r_s' とは符号が反対で大きさは等しい。したがって r_s' は平面回折格子の中心を中心とする円となる。 r_i' は r, α, β の関数で卵形である。Fig. 7 は $\alpha=45^\circ$ の場合の r_s', r_i' の軌跡である。図の A, B 点では非点収差はない。しかしコマ収差は大きい。

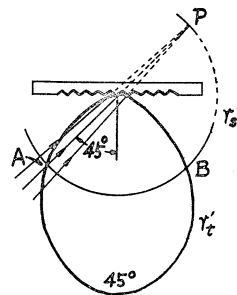


Fig. 7. Gillieson 型マウンティング.

5.3 其他の平面回折格子分光器についての研究

Birl ら³⁾は小型プリズム分光計のプリズムを平面回折

格子で置換した場合に性能がどのように変わるかを調べた。使用した回折格子は 2μ Blaze, $2'' \times 2''$, 7500本/inch のものと可視部に Blaze, $2'' \times 1\frac{1}{2}''$, 15000本/inch の2枚である。実験するまでもなく回折格子とプリズムの分散は紫外部ではほとんど差異はないが近赤外部では回折格子の分散はプリズムの十倍ぐらいになる。Fig. 8 は種々の材質のプリズムの分散と回折格子の分散とを示している。プリズムと回折格子の分解能が同じ程度になるようにスリット幅を調整した場合の明るさは回折格子の方がまさっているという結果を得ている。

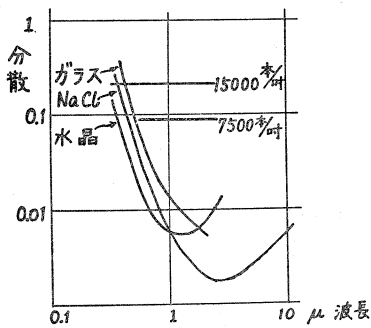


Fig. 8. 回折格子分光器とプリズム分光器の分散の比較。

6. 凹面回折格子のマウンティング

凹面回折格子はレンズや凹面反射鏡の力を借りずに像を結ぶことができるので反射率の極端に悪い真空紫外領域の分光には専ら凹面回折格子が使用される。

6.1 直入射型マウンティング

光を小さな入射角で凹面回折格子に入射させ格子の真

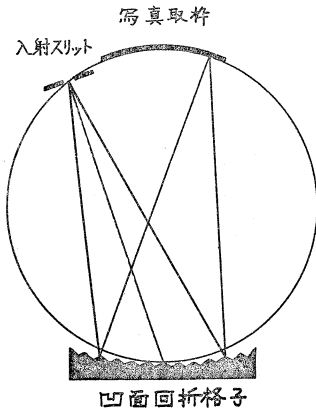


Fig. 9. 直入射型マウンティング。

正面附近に結像する normal spectrum を撮影する使用法である。分散はほとんど n/d に等しく一定である。

6.2 斜入射型マウンティング

直入射型は取差も少なく、分散も一定で分光写真の撮影には勝れた性能をもっているが、ただ一つの欠点は回折格子の反射率が良くないということである。ことに 500 \AA ぐらいよりも短い波長の光の反射率が悪くほとんどスペクトルを撮影することができない。この点を改良したのが斜入射型である。一般に反射率は入射角が増大するにつれて増加する。また入射角が非常に大きくなると全反射を起こす。入射角 α のとき全反射を起こす最長波長を λ とすると α, λ の間には次の関係がある。

$$\sin(90^\circ - \alpha) = \lambda c^{-1} (n/m\pi)^{1/2}$$

e, m はそれぞれ電子の電荷、質量、 c は光の速度、 n は単位体積中にある電子の数である。したがって α が大きくなるにつれて最長波長は短くなる。

斜入射型は真空分光器としてのみ使用される。他の領域では反射率の点で問題がない上、スペクトル線の鮮鋭度の点で他のマウンティングの方がすぐれているからである。斜入射型は分散が大きい。分散式の中で分母に $\cos \beta$ が含まれているからである。

6.3 イーグル型マウンティング

可視、近紫外領域で多く使われている方式である。図

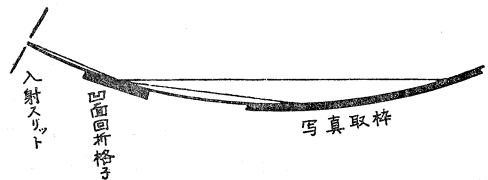


Fig. 10. 斜入射型マウンティング。

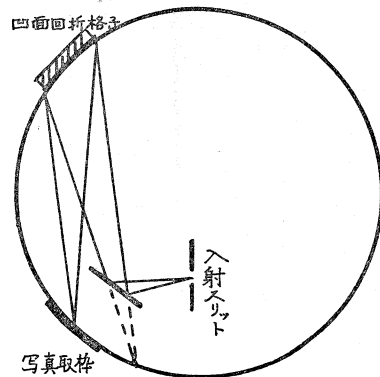


Fig. 11. イーグル型マウンティング。

からわかるように分光器として組み立てた場合に細長い場所がありさえすればよいという利点がある外、スペクトル線の収差も少ない。

6.4 ワーツワース型マウンティング

凹面回折格子と凹面鏡を組み合わせた点で他のマウンティングと著しく異なっている。スリットから入射した光を凹面鏡によって平行光線として反射し、これを凹面回折格子に入射させる。回折格子の真正面に生ずるスペクトル像には非点収差がない。

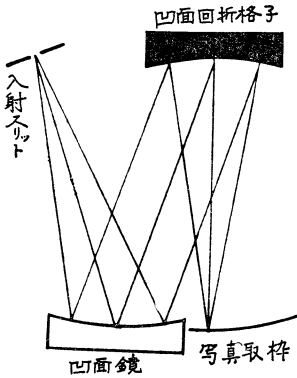


Fig. 12. ワーツワース型マウンティング.

6.5 レディアス型マウンティング⁴⁾

ローランド円周上に入射、射出スリットが固定されている。凹面回折格子はローランド円の中心を中心としてローランド円周上を左右に移動できるようになっている。射出スリットから射出される光の波長を変えるには回折格子の位置を移動させる。6.1~6.4 は分光写真を撮影するためのマウンティングであるがレディアス型マウンティングおよびこれ以後に述べるものは光電測光用のものである。

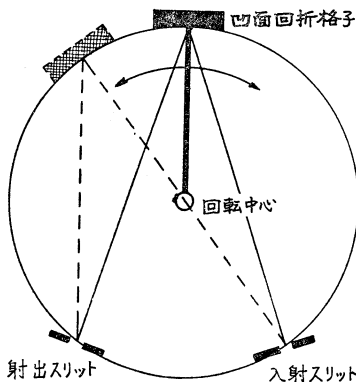


Fig. 13. レディアス型マウンティング.

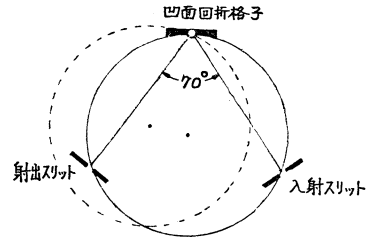


Fig. 14. 瀬谷・波岡型マウンティング.

6.6 瀬谷・波岡型マウンティング⁵⁾

射出・入射スリットは凹面回折格子の中心に対して約70°の角度を張る位置に固定されている。回折格子をその中心を通る鉛直軸のまわりに回転することによって射出スリットから射出される光の波長を変えることができる。回折格子のローランド円に対し、二つのスリットのうち、一方は円内に、一方は円外に位置する。

6.7 Johnson Onaka 型マウンティング⁶⁾

入射スリット、射出スリットは固定されている。凹面回折格子は側方の回転中心の回りに回転する。

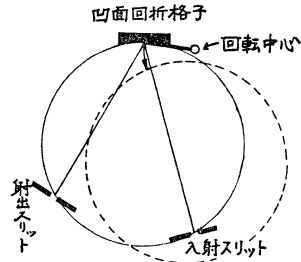


Fig. 15. Johnson-Onaka 型マウンティング.

6.8 Vodar 型マウンティング⁷⁾

Fig. 15 に示すように斜交する2本のレールがあって

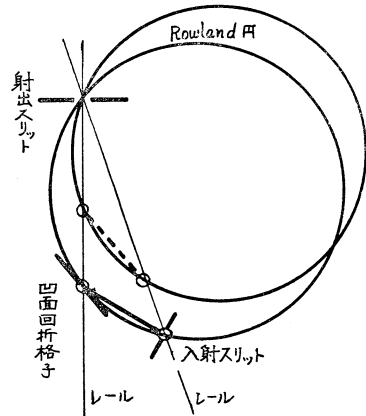


Fig. 16. Vodar 型マウンティング.

その交点に射出スリットが固定されている。凹面回折格子と入射スリットとは両端が2本のレールの上を移動できる棒の上に固定されている。射出スリット上の波長を変化させるには回折格子をレールに沿って移動させればよく、回折格子の移動につれて入射スリットも自動的に位置を変える。常に Rowland 円の条件を満足している点ではすぐれているが回折格子、スリットが移動するので機構が複雑である。

6.0 Romand-Vodar 型マウンティング⁸⁾

Fig. 17 で AB 直線はレールであって凹面回折格子はレールに沿って前後に移動する。F₁, F₂ は入射スリット、射出スリットでありレールの両側に対称的に位置している。B は F₁, F₂ と共に同一のローランド円上にある。腕木 OA, OB は凹面回折格子の曲率半径の 1/2 の長さであり、O 点が移動するにつれて凹面回折格子が移動し射出スリット上の波長が変化する。O 点がレールの上にある場合を除いて入射スリット、射出スリットのいずれもローランド円上にはない。

一般に分解能を高めるためには単位幅当たりの溝数の多い凹面回折格子を使用することになるが、この装置では O 点の移動量が非常に大きくなる。この点を改良したものが次のマウンティングである。

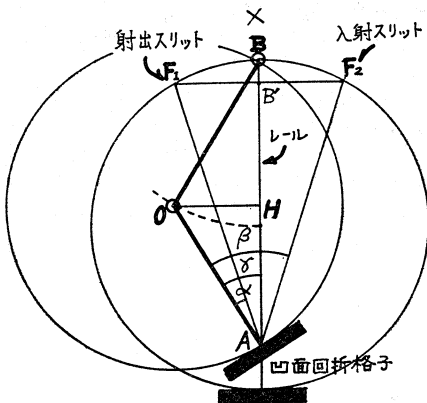


Fig. 17. Romand-Vodar 型マウンティング.

6.10 Pouey-Romand 型マウンティング⁹⁾

Fig. 17 に示してあるように腕木 OA, OB の長さが Romand-Vodar 型に較べて短くなると共に B 点はレールから外れたところに位置している。試作機では凹面回折格子の曲率半径 40 cm, OA, OB はそれぞれ 14 cm, 10 cm である。B 点をレールからどれだけの距離離すかによって性能が大きく変わる。500 Å から 2300 Å の範囲では 1.35 cm レールから離れたときが最も像の位置の変化が少なかった。

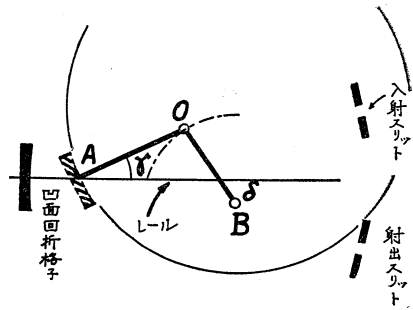


Fig. 18. Pouey-Romand 型マウンティング.

6.11 Landon 型マウンティング¹⁰⁾

このマウンティングの特色は凹面回折格子への入射角を自由に変化させることができる点にある (Fig. 19)。入射スリットは固定されている。P 点も固定されていて凹面回折格子 B, 射出スリット C の回転中心となっている。B を適当な入射角の位置に固定し、ネジ S に沿って N を移動させると射出スリット C はローランド円に沿って移動する。また N のネジに沿っての移動量が波長の変化量に比例する。入射角を変えるのは、必要とする波長域より短い光の反射を少なくしてカブリを減少させるためである。この装置はプラズマ研究用に開発された。

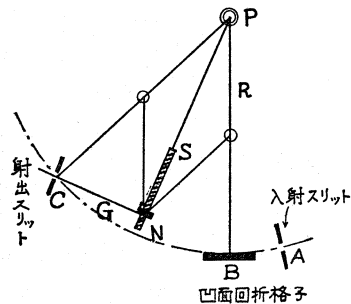


Fig. 19. Landon 型マウンティング.

6.12 前置分散子としての回折格子¹¹⁾

光源にもよるが一般に斜入射型分光器は迷光が強い。そのためスペクトルは一見連続スペクトルが重畳しているかのごとくに見えることがある。カブリ, 迷光の影響を除去するには入射スリットの手前に回折格子を置く方法がある。このようにすると光は射出スリットあるいは写真乾板に到達するまでに2回の回折をすることとなりよほど強い光源でないかぎり検知は困難になる。

前置分散子としては凹面回折格子が使用されることも

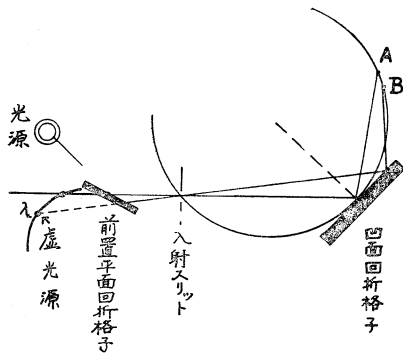


Fig. 20. 前置分散子としての回折格子.

あるが、ここでは平面回折格子を使った Weiss'er の方法を紹介します。Fig. 20 で平面回折格子の傾きを調整して必要とする波長の光が入射スリットに入射するようにすればよいのであるが注意すべきことが一つある。光源から平面回折格子に入射した光はそれぞれの波長の光について発散光となって回折してゆく。したがって光源は各波長についての虚光源で置き換えて考えることができる。図からわかるようにすべての波長の光の主光線が凹面回折格子の中心に入射するようにすることはできない。A は主光線が凹面回折格子の中心に入射した光の像点である、B は主光線が凹面回折格子の端に入射した光の像点である。B 点の位置は同じ波長の光が凹面回折格子の中心に入射した場合に生ずる像の位置とは一致しない。その差は波長にして 0.4 \AA 程度にも達するという。

7. 結 言

以上にてマウンティングを理解するのに必要は回折格

子の性質と、回折格子のマウンティングについて述べた。マウンティングにはこの外にも Paschen-Runge 型、Rowland 型などがあるが割愛した。紹介では名称と原理を示したに過ぎないので詳細に関しては末尾の文献を参考にされたい。

文 献

- 1) K. Kudo: *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 150 (1965).
W.T. Welford: *J. Opt. Soc. Am.*, **53**, 766 (1963).
S.C. Baker: *J. Opt. Soc. Am.*, **54**, 271 (1964).
- 2) M.V.R.K. Murtz: *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 768 (1962).
M. Seya, T. Namioka and T. Sai: *Science of Light*, **16**, 138 (1967).
- 3) A. Bril und Meurs-Hoekstra: *Z. Instr.* **71**, 232 (1963).
- 4) Y. Fujioka and R. Ito: *Science of Light*, **1**, 1 (1951).
- 5) M. Seya: *Science of Light*, **2**, 8 (1952).
H. Greiner und E. Schäffer: *Optik*, **15**, 51 (1958).
- 6) Ryumyo Onaka: *Science of Light*, **7**, 23 (1958).
- 7) M. Salle et B. Vodar: *C.R. Acad. Sci. Paris*, **230**, 380 (1950).
J. Romand et B. Vodar: *Optica Acta*, **9**, 392 (1962).
- 8) J. Romand et B. Vodar: *Revue d'Optique*, **37**, 167 (1960).
- 9) M. Pouey et J. Romand: *Revue d'Optique*, **44**, 445 (1965).
- 10) D.O. Landon: *Applied Optic*, **3**, 115 (1964).
- 11) H.E. Blackwell, G.S. Shipp, M. Ogawa and G.L. Weissler: *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 665 (1966).