

# 多天体摄谱技术的现状述评

蒋世仰

(中国科学院北京天文台)

## 提 要

本文介绍对比了物端棱镜、非物端光栅、棱镜光栅、透棱栅、多孔缩焦器光谱仪、长缝摄谱仪、多缝摄谱仪、光纤引导多天体光谱仪等多天体摄谱仪的发展过程、现状和优缺点。最后提出了准三维摄谱仪的一些可能性和优点。

## 一、引 言

天体光谱是确定天体物理特性的重要手段。由于大多数天体极其遥远而暗弱，常见的有缝摄谱仪虽可获得高分辨率，却无法获得许多重要天体的可用光谱。更何况每次只能获得一个或少数几个或面源的局部的光谱。对应着亿兆个天体，何时才能有足够可靠的样本呢？因此，人们开动脑筋，思考着新的获取暗弱天体光谱的高效率方法。谁都明白，天体越远、越暗，同类所占之体积越大，子民数目也就越多。要想对它们有一个全面而可靠的认识，就必须获得一个比较亮天体大得多的样本。自然也就更加依赖于巧妙而高效的摄谱方法。近十年来，随着光学和电子学的飞跃发展，多天体高效摄谱仪的发展十分迅速，大大地推动了观测宇宙学的发展。反过来，它又促使人们竞相研制新的大型仪器。面对这种现实，中国的天文学家们究竟应当采取何种对策，才能以弱小的基力作更大的贡献呢？唯一可行的途径是根据我国国情，扬长避短。为此作者写此短文，剖析一下在暗天体高效摄谱仪器方面应走之道路，供国内天文界同行参考。

## 二、物端棱镜种种

把一块顶角为  $A$  的棱镜安置在望远镜物镜前或望远镜光路中的任何平行光束中，就可在望远镜的焦平面上获得视场内全部天体的光谱。这种装置叫做物端棱镜。由于没有入射狭缝，光谱的纯度取决于天体的视宁度直径(对点源)或天体本身沿色散方向的视尺寸(对面源)；由于射到色散元件上的入射光全是平行光，所以与普通摄谱仪中的像质特性没有差异。这种摄谱仪对巡视性工作十分有效。其缺点是极限星等受到天空背景的严重限制：色散越大，极限星等越低。设星像的视宁度直径为  $\rho''$ ，望远镜焦面上底片尺寸为  $a''/\text{mm}$ ，光谱沿色散方向的长度为  $l\text{mm}$ ，则星像在底片上所占有面积色散后比色散前大了  $N = la''/\rho$  倍，

1991年11月25日收到。

1992年2月14日收到修改稿。

因而星光在单位面积上的光能量色散后降为色散前的  $1/N$ 。而天空背景是面光源，所以单位面积上的强度并未变。对于非常暗弱的天体，噪声只取决于天空背景的起伏，因而也没有改变。这样一来，信噪比也就降为  $1/N$ 。因此，对给定信噪比下的极限星等就减小了  $\Delta m = 2.5 \log N \text{ mag}$ 。若系统的倒线色散为  $S \text{ \AA/mm}$ ，工作波段为  $\lambda_2$  至  $\lambda_1$ ，则  $l = (\lambda_2 - \lambda_1)/S$ 。因此减小工作波段和加大  $S$  值，均可提高极限星等。

物端棱镜的另一常见缺点是视场偏折和畸变。因为视场中不同区域的星光的入射角不相同，同样波长的偏向角也就不相同。加之一般无法拍摄定标光谱，使得物端棱镜光谱通常只适宜用作定性研究。近年来，在低色散情况下，有人使用照相乳胶的截止波长作定标，以确定大红移天体的红移值<sup>[1]</sup>。由于这个截止波长不仅与不同批号的底片的光谱灵敏度有关，还与天体自身的光谱能量分布等许多因素有关，所以精度一般只能达到  $\Delta Z = \pm 0.01$  的量级， $Z$  为红移。

为了克服这些缺点，就出现了费仑巴赫直视物端棱镜<sup>[2]</sup>。通常它由两块顶角相同，玻璃牌号不同的直角棱镜拼成一块正方形平行平面体。选择玻璃的折射系数，使对某一中心波长  $\lambda_0$  的色散为零，而在  $\lambda_0$  的长、短波长两边的色散分别为正及负。利用这种棱镜拍下的星场与直接照相底片上的星场几乎完全一样，而且借助于绕光轴旋转  $180^\circ$  后拍取的另一光谱，可方便地定出中心波长的位置，从而给光谱以可靠的波长定标。不过也带来一些缺点，即对于同样的色散，一般棱镜的顶角要适当加大，因而棱镜吸光厚度、重量和造价均要增加。当然旋转棱镜后拍出的光谱可等效于色散加倍，但对同一天区和同样的等效色散，要达到相同极限星等的总耗时量要适当增加，并略微加大了光谱重叠的概率，减少可用光谱的数目。

由于受玻璃材料等因素的限制，物端棱镜不易作得很大，尤其是直视型。因此提出了拼嵌棱镜法<sup>[3]</sup>。普通棱镜拼嵌的要求是很高的，不仅要求各子棱镜彼此严格相同，而且要求拼嵌得很好。我们提出的拼嵌直视物端棱镜主要要求各子棱镜是精确的平行平面体，平行度不低于视宁度角直径  $1''-2''$ ，还可不用旋转棱镜拍取反向光谱，而是利用拼嵌缝隙加装有色平板玻璃来获取多色定标光谱<sup>[4]</sup>。因而光谱重叠现象只比普通棱镜略微增加。由同时获得的两个或多个颜色的直接星像，可求得色指数，这对于天体分类十分有用。为了增加色散而不加大顶角，也可用旋转  $180^\circ$  再拍一条光谱的方式。在有些望远镜中存在一个小口径平行光区，如图 1 及 2 所示，可在该处插入小得多的棱镜或透射光栅或其他色散元件，而获得视场中全部天体的光谱。

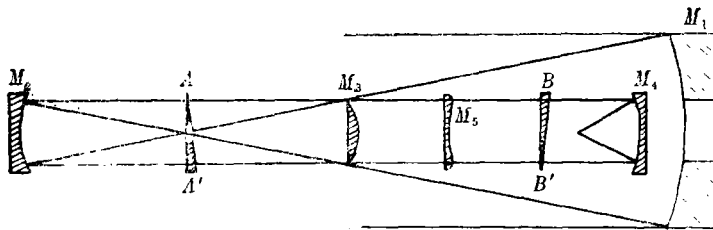


图 1 望远镜光学系统中次级平行光束中的物端棱镜方案

AA' 为格雷果里系统中的物端棱镜，此时  $M_3$  不在位。BB' 为消像差卡氏系统中的物端棱镜，此时  $M_3$  在位。 $M_4$  为再成像物镜， $M_5$  为施米特改正板

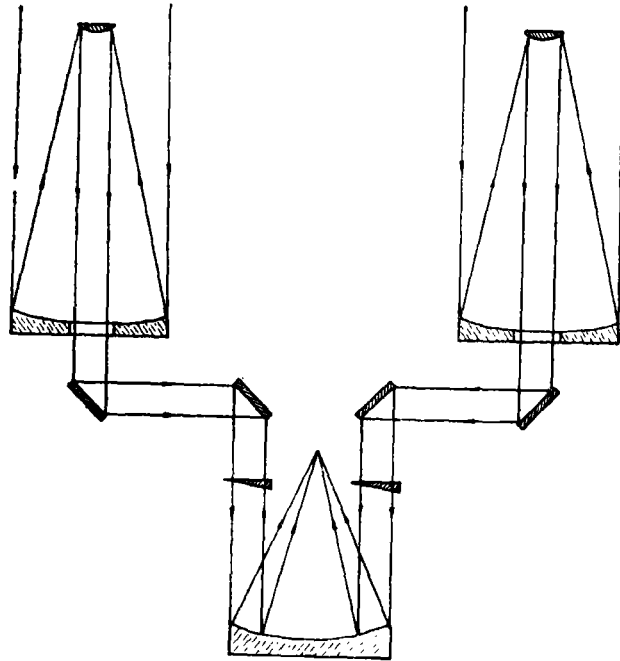


图 2 多镜望远镜合成焦面前平行光束中的物端棱镜

### 三、非物端光栅及直视棱镜

对大口径望远镜，视场一般小于  $2^\circ$ ，制造巨大的物端棱镜既困难又不经济。有人遂提出把透射光栅或直视棱镜加在焦面前的会聚光束中<sup>[4]</sup>。普通透射光栅垂直地放在焦比为  $F$  的会聚光束中会引入彗差，使单色像变大为

$$l = C/2 = 3mn\lambda L/16F^2 \approx 3b/16F^2 \quad (1)$$

从而限制系统的分辨本领

$$R = \lambda/\Delta\lambda \leq 16F^2/3 \quad (2)$$

式中  $C$  为彗差系数， $m$  为级次， $n$  为光栅刻线密度， $\lambda$  为波长， $L$  为光栅离零级光谱像(接收器面)的距离， $b$  为光谱中被研究谱线离零级光谱的距离。当  $l$  大于视宁度线尺度  $\rho f$  时，就必须设法减小<sup>[5]</sup>。办法是把透射光栅刻在顶角为  $A$  的棱镜的斜边上，构成棱镜光栅 (grism)。顶角  $A$  的计算公式为

$$\sin A = \lambda_0 n_0 / [\alpha(n_0^2 - 1)] \quad (3)$$

选择光栅常数  $\alpha$ 、棱镜平均折射率  $n_0$ 、顶角  $A$ ，使被研究谱段中心波长  $\lambda_0$  的偏折为零，就可把谱段内  $l$  限制到一定程度。为克服棱镜引入的光程变化，检测器相对于光轴垂直平面应转动一个小角

$$\varphi = \lambda_0 / [\alpha(n_0 + 1)] \quad (4)$$

方向是棱镜厚端与检测器光敏面间的距离变小。这时光栅到光敏面间的距离  $L$  相当于普通摄谱仪中照相机的焦距，残余像散使谱线变宽

$$\Delta l = L\lambda^2/[n^2f(n^2-1)] \quad (5)$$

式中  $f$  为望远镜的焦距。这时可利用的光谱段长度为  $5.33F^2$  倍视宁度直径。对于一般主焦比  $F=3$ , 只能分辨出 48 个像元, 只适宜于低色散工作。且由于大口径望远镜中的星像视影线直径  $\rho f$  常大于检测器中检测元的大小, 所以宜于在色散后加缩焦器, 然后使合成的  $\rho f'$  与元大小适当匹配。另外, 一般大型反射望远镜均使用焦前像改正镜系统, 所以为了节省光能, 常把上述 grism 与改正镜系统中最靠近焦点的那一个面作在一起, 构成透棱栅(grens)<sup>[6]</sup>。

#### 四、多缝缩焦多天体摄谱仪

利用原拍照片, 对所需获得光谱的天体复制一块大小和尺度均与原片一样的多缝光栏板, 代替底片安放在焦面上。然后添加准直镜及透射光栅、grism、grens, 或不加准直镜而直接添加光栅、grism 等色散元件, 最后加照相系统拍摄光谱。由于照相系统的焦比常小于望远镜的原焦比, 因此这种系统被叫做多缝缩焦多天体摄谱仪<sup>[7]</sup>。这个系统的优点是极限星等不会受到损失, 且可使用准直镜提高光谱纯度<sup>[8]</sup>。缺点是必须复制光栏板, 无法进行真正的巡视工作。若把贯通视场直径的长缝分割为 10—20 个短节, 每节可沿色散方向任意平移, 则可在视场内同时对准 10—20 个天体并拍取光谱。这仍需预先知道视场内何处有需拍光谱的天体, 但对不同天区不必更换缝板。若改用多条位置固定的平行狭缝, 各缝均穿过全视场而方向与色散垂直, 当缝间距恰当而不致使各缝对应的光谱彼此重叠时, 就可一次拍下全视场 1/7—1/20 范围内的全部天体的光谱。例如 4m 望远镜的主焦点, 焦比 3, 焦面尺度 17"/mm, 缝宽 2", 倒线色散若为 2000—3000 Å/mm, 用滤光片限制光谱长度到 1mm, 可拍下全视场的 1/9 左右。

迄今最全面用法最多的缩焦多天体分光仪器为 ESO 的 EMMI (ESO Multi-Mode-Instrument)。它同时工作于红、蓝两臂。每臂既可工作于多色成像方式, 又可工作于摄谱方式。在摄谱时, 既可以有缝, 也可以无缝。不仅有 Grism, 还可用衍射光栅及阶梯光栅<sup>[9]</sup>。但是它的准直光束直径很小, 允许的缝宽仅 0".4 左右, 只适合于优等台址。

#### 五、光纤引导多天体摄谱仪

使每一根光导纤维对准视场内一个需要研究的天体, 而将纤维的另一端引到摄谱仪的入射狭缝高度方向依次排列, 就可同时拍得许多天体的中色散光谱<sup>[10]</sup>。对准天体的办法最初是多孔星板法, 即根据直接照相片或天体的坐标复制一张星板<sup>[11]</sup>。星板上还装有三根纤维束, 对准三个较亮的星并把它们引到电视摄像管靶面上, 供对中星场及导星用。这种方法虽然能实现多天体摄谱, 但更换对象很不方便, 且更换视场必须更换星板, 不够经济。为了克服上述缺点, 因而发展了半自动及全自动系统<sup>[12-19]</sup>。AAO 的办法是使用机械手安放光纤, 而固定光纤用磁铁与铁制星板来实现, 所以每根光纤均必须附加一只小转向棱镜, 使光线转 90° 角。这样虽然可用, 却带来了附加的光损失。由于光纤与光纤头及棱镜间全靠胶粘, 不具备任何微调功能, 因而要求装配时极为认真仔细, 才能保证足够的精度。为了克服这个缺

点，可在机械手上加一只光电二极管，使得机械手移动纤维头时以纤维中心位置为准而不是以纤维头的轴心为准。为了确定纤维中心的位置，应在纤维狭缝端加一照明激光器，这样纤维头中的纤维端面会射出光束并被机械手上的光电二极管所感知。

Steward 天文台的全自动光纤系统采用围池钓鱼杆的办法，虽然灵活些，但造价要贵些。

光纤最好加在焦比为 3 左右的主焦点上，这时出射光束的焦比变化最小，失匹配现象也最小，因而光损失最小（正确地理解这一点是十分重要的。这种光损失并非源于光纤自身的吸光或其他，而是源于光纤本身的入、出射端面芯径大小相同，当入、出射光束焦比不同时，等效于天空的张角常被放大了，而摄谱仪允许的入射狭缝对应于天空的张角常常是十分有限的，从而常会挡掉光纤出射端面过大张角中的星光）。由于一般摄谱仪的准直镜焦比大于 10，所以必须在光纤输出端加装变焦系统。最好选用自聚焦透镜为变焦镜。它的一端与光纤结合，另一端安装在狭缝装置上。选择适当长度的自聚焦透镜，可以获得需要的出射光束焦比<sup>[20]</sup>。对于望远镜的其他焦点，在光纤的入射端同样应加装适当的自聚焦透镜使焦比先变成  $F/3$  左右。

使用光纤引光时，最好在望远镜焦前加一双色滤光片，把波段分成红蓝两个。对不同波段分别选用不同类型的光纤，方可获得好的光效率。当端面处理得当时，光纤的光效率在  $\lambda \geq 3000 \text{ \AA}$ ，均有 50% 以上的光效率，特别是当  $\lambda > 3750 \text{ \AA}$  时，一根 21m 长的光纤，光效率可达 80% 以上<sup>[21]</sup>。

## 六、限制可用视场的因素

在上述各种多天体摄谱仪中，除物端棱镜外，可达到的视场均小于望远镜的视场。限制视场的主要因素是色散元件的有限尺寸  $d$  和望远镜的口径  $D$ 。当色散元件离焦面距离为  $L$  时，零视场所需的直径  $d_0 = L/F$ 。因此，当色散元件尺寸为  $d$  时，最大可用视场角  $\theta = (d - d_0)/FD$ 。以 2.16m 望远镜卡焦为例， $F = 9$ ， $d = 300\text{mm}$ ，若  $L = 300\text{mm}$ ，则  $d_0 = 34\text{mm}$ ，故  $\theta = 47'$ ，大致与卡焦设计视场相符。但对 AAT， $D = 3.89\text{m}$ ， $F = 7$ ，用同样的  $d$  及同样的色散，则  $d_0 = 43\text{mm}$ ， $\theta = 32'$ 。如果望远镜口径为 8m， $F$  仍为 7，则  $\theta$  仅 16'。所以望远镜口径越大越不利。

对于光纤引导多天体摄谱仪，由于入射缝高同样要受到  $d/D$  的限制，从而限制了同时使用光纤的总数目。一般摄谱仪允许入射狭缝对准直镜在高度方面的张角不大于 0.1rad，通常在 0.01—0.05rad 间，若  $d = 300\text{mm}$ ， $D = 2160\text{mm}$ ，则实际可用角高度仅 5'—24'。为了避免彼此混淆及光纤包皮的存在，以每 5" 一根光纤计算，一架专门设计的长缝摄谱仪可同时拍取 60 到 288 个天体的光谱。但若口径加大到 3980mm，就只能拍 33—156 个；加大到 8000mm，就只能拍 16—78 个。进一步，若色散不很高，还可把更多的光纤排成互相平行、间隔一定距离的多条狭缝。这时允许的狭缝数同样与  $d/D$  成比例。于是允许的天体数与  $(d/D)^2$  成正比。由于望远镜的聚光能力与  $D^2$  成正比，所以对于多天体摄谱仪，除物端棱镜外，总效率与口径  $D$  无关。

上面的讨论尚未计及检测器的有限尺寸, 把它加进去会更有利于说明多天体摄谱的总效率与望远镜的口径无关。不过, 在实际工作中, 由于积分时间有限, 检测器并非没有噪声, 加上一次拍摄光谱数的要求并非多多益善, 所以望远镜的口径选择仍可多种多样。不过一般而言, 选用口径介于 2—3m 的望远镜较有利。

## 六、准三维摄谱仪

无论上述哪种方法均不能同时获得视场内每一点的光谱。只有发明一种三维 ( $\alpha$ 、 $\delta$ 、 $\lambda$ ) 摄谱仪才能办到。彩色乳胶可看作是最粗的三维摄谱仪, 但尚缺乏科学定量的测量价值。在此我们提出几种可能的准三维摄谱仪途径。一种是用光纤束。束在像面一端盖住整个视场, 而另一端(出射端)分别引向一架或多架摄谱仪的入射狭缝并使之沿缝高方向依次排列。这种方法已有人用来研究面源的光谱。缺点是光纤束的端面积很难作得太大, 从而要在总视场与空间分辨率间有所取舍。另一点是光纤端面为圆形, 且有包皮, 故仍有至少 40% 的盲区。另一种是艾国祥提出的多通道滤光器<sup>[22-23]</sup>。它的视场是连续的, 但它的总透过率不高, 波段也不连续。法布里·珀洛干涉仪加阶梯光栅摄谱仪也可获得连续的两维视场, 但波段也不连续。这类仪器的实际视场也均不能太大。第四节中提到的多条垂直于色散方向的平行狭缝方案, 不仅具有连续的波长, 且有一维连续视场, 只是色散不能太高, 且实际可用视场仅为全视场的 10% 左右。如果减小色散元件的角色散, 同时利用成像物镜的轴向色差, 使对应于每一条入缝的光谱与光轴成一斜角  $i$ 。当保持光谱长度不变时, 它在正常焦面上的投影长度为  $\cos i$  mm。因而可允许多  $1/\cos i$  倍的狭缝而仍保持光谱互不重叠。当然, 这时的检测器必须分成许多部分, 各部分互相平行, 均与光轴成  $i$  角, 去接收与每一条入射狭缝所对应的视场的光谱。还要求检测器对斜入射光线具有足够高的量子效率。由于入射狭缝缝宽也有投影效应, 所以虽然允许的入射狭缝数目加多了, 实际可利用的视场比例并未增加。唯一的好处是在优良台址条件下获得较高的空间分辨率。

像切分器是另一种获得连续二维视场光谱的方法, 虽然视场仍不能太大且有失焦问题<sup>[24]</sup>。

## 七、结 论

通过上面的讨论分析, 我们得到以下结论:

1. 一切多天体摄谱法中物端棱镜的可用视场最大。对于口径较大的望远镜, 最好用镶嵌直视物端棱镜。

2. 为了克服天光对极限星等的限制, 宜采用光纤引导多缝多天体摄谱仪。由于总效率与望远镜口径  $D$  无关, 在考虑到造价的情况下, 宜选用口径 2—3m 的望远镜, 只用主焦点。视场可作到  $2^\circ$ — $4^\circ$ 。考虑到星等极限、样本大小及积分时间与大气较差折射的限制(在自动系统中是可以克服的), 对望远镜口径及视场的选择具有相当的宽松性。

3. 在当今竞相建造大口径望远镜的热潮中, 不可忽视口径 2—3m 的中、小望远镜对多

天体摄谱工作以及它们对天体物理发展可能有的促进作用。还较贫穷的中国应注意这方面的工作。

4. 对大面积中、低色散暗天体巡天，应当使用中等口径望远镜加某种准三维摄谱仪。我们仅仅提出了一些可能的选择。在这方面尚有许多工作要做。

### 参 考 文 献

- [1] 刘继英, 北京天文台台刊副刊 (1984), No. 8, 10.
- [2] Fehrenbach, C., *Annales D' Astrophysique*, 10 (1947), 257, 306 et 11 (1948), 35.
- [3] Korhonen, T. K., in *Proceedings of ESO Conference "Optical Telescopes of the future"*, ed. by F. Pacini, W. Richter and R. N. Wilson, p. 313, (1977).
- [4] Hoag, A. A. and Schroeder, D. J., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 82 (1970), 1141.
- [5] Bowen, I. S. and Vaughan, A. H. J., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 85 (1973), 174.
- [6] Fouere, J. C., Lelievre, G. et al., in *IAU Colloquium No. 67*, p. 143, (1982).
- [7] Geyer, E. H., *Mitt. Astron. Ges.*, Nr. 54 (1981), 156.
- [8] Geyer, E. H. and Nelle, B., *Astron. Astrophys*, 148 (1985), 312.
- [9] Dekker, H. and Molaro, P., *ESO Messenger*, No. 59, (1990), 57, Dekker, H. and D'odorico, H. et al., *ESO Messenger*, No. 63, (1991), 73.
- [10] 蒋世仰, 自然杂志, (1980), No. 3, 305.
- [11] Lund, G., *Operating Manual of the ESO OPTOPUS*, (1986), 5.
- [12] Hill, J. M. and lesser, M. P., *Proc SPIE*, 627 (1986), 303.
- [13] Parry, I. R. and Gray, P. M., *Proc SPIE*, 627 (1986), 118.
- [14] Wang Shunde, Jiang Shiyang and Men Li, *Astrophys. Space Sci.*, 121 (1986), 345.
- [15] Watson, F. G., *Proc SPIE*, 627 (1986), 787.
- [16] Pettersson, B., in *Fiber Optics in Astronomy*, ed. by G. W. Nelson, p. 133 (1988).
- [17] Brodie, J. P. and Craig, W. W., et al., in *Fiber Optics in Astronomy*, ed. by G. W. Nelson, p. 151, (1988).
- [18] Barden, S. C. and Wade, R. A., in *Fiber Optics in Astronomy*, ed. by G. W. Nelson, p. 113, (1988).
- [19] Guerin, J. and Felenbok, P., in *Fiber Optics in Astronomy*, ed. by G. W. Nelson, p. 52, (1988).
- [20] 赵培谦, 潘君骅, 蒋世仰, 杨世杰, *天文仪器与技术*, (1989), 6.
- [21] Bellenger, R. et al., *ESO Messenger*, No. 65, (1991), 54.
- [22] 艾国祥, 胡岳风, *中国科学*, (1986), A(8).
- [23] 艾国祥, 胡岳风, *中国科学*, (1986), A(9).
- [24] Carleton, N., *Astrophysics of the Methods of Experimental Physics*, 12A (1974), 201.

(责任编辑 舒似竹)

## A Review of the Present Status for Multi-object Spectroscopy

Jiang Shiyang

(Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

In this paper, after a general review about different kinds of multi-object spectroscopy technology such as objective prism, grating in converging beam, grism, grens, multi-hole focal reducer spectrograph, long slit spectrograph multi-slit spectrograph and fiber linking spectrograph, we suggest a new idea about the quasi-three-dimensional spectrograph and discuss its possible advantages,