

光学望远镜附属仪器的发展动向

胡景耀

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文简要地评述了作为天体物理学研究的重要设备——光学望远镜的附属仪器最近的发展动向和天体物理一些研究领域对它提出的一些新要求。

一、前 言

天体物理学自从将它的观测波段从可见区向长波扩充到红外、射电区，向短波扩展到紫外、X射线和 γ 射线后，大大地丰富了从天体所获得的信息。但是光学波段的观测迄今仍然是天体物理研究的基本手段。而其它波段的发展不但没有降低光学波段观测的重要性，反而对它提出了更高的要求。对X射线源，射电源等的证认，由于大多是而非热辐射源，在光学波段的对应体就非常微弱，要得到它的光学信息就很困难，尤其是射电观测分辨率的提高要求光学波段也应有相应的提高。目前一些经济发达国家提出研制大口径地面光学望远镜和空间望远镜，就是顺应这一需要。

望远镜的口径决定了我们可以得到天体信息的上限，即用它对从一定视亮度的天体所能收集到的光子速率和它可能达到的空间分辨率（对地面观测要排除大气影响才能达到或接近衍射理论分辨率）。在一定观测台址的气候条件下，充分利用望远镜所提供的上述两项基本条件，从天体的辐射中提取出观测课题所需要的信息，这就是附属仪器所承担的任务。一般说来，不够理想的附属仪器是指浪费了望远镜所提供的基本条件（光子利用率低或像的蜕化），浪费了望远镜的使用时间和不能有效地提取信息。很明显，光子利用率低是和望远镜口径减小相当的，为增大口径所支出的巨大财力就被白白地浪费了。所以，大型望远镜的拥有者是非常重视附属仪器的研制的。而中、小望远镜的拥有者为了作出有特色的课题，它必然要将课题思想贯穿到仪器设计中，以加强他们的课题竞争力；这就不仅是重视，而是吸引许多天文学家去参与设计和研制附属仪器了。

天体物理的研究领域近年来扩展得很快，不同的课题要求提供不同的物理信息。考虑到一些具体的限制（如最基本的是望远镜从天体所收集到的光子速率和有限的望远镜使用时间），所以对某一些课题往往是追求某一种或某几种性能而舍弃其它的信息。例如从观测宇宙

学的角度希望能判断类星体的红移 Z 值是否有截止。这就要求有更高极限星等的光谱巡天, 但它的色散则只要能证认它是类星体和有高的红移(当然发现对应体后, 尚须利用有缝光谱仪进一步开展工作)。要研究恒星大气的内部运动和结构, 要求有极高的光谱分辨率, 由于样品在亮星中即可找到, 所以至少目前还不急于追求其极限星等。对一些光学微变的研究(如类太阳五分钟振荡和类太阳活动), 则要求观测结果有非常高的信噪比。考虑到已发现毫秒级的脉冲星, 作这类课题就必须有亚毫秒以上分辨率的光度计。所以一架望远镜(一般是指大型的)则往往配有不同性能的光度计、光谱仪等, 以供不同课题的使用者选择。而对中、小型望远镜, 尤其是对口径 ≤ 1 米的小型望远镜, 则往往是供某一特定课题使用, 它本身和附属设备是按课题要求设计的。附属仪器的设计和研制贯穿着课题思想, 这是目前附属仪器发展的明显特点。

由于大规模集成电路和计算机技术的发展, 使得在大多数观测课题中电信号实时读出、处理成为可能。这不仅减轻了天文学家的劳动量, 更重要的是它可提取以前不能提取的信息, 完成以前不能实现的观测。如前面已经谈到的高速测光和下面将谈到的利用 CCD 器件的响应线性和宽的动态范围用减背景的方法提高观测极限星等。信息的电信号实时输出和计算机联机采集, 是目前附属仪器发展的第二个特点。

由于计算机的发展, 有可能通过改进观测方法和处理方法来提高信息质量。例如用谱分析的方法从测光资料寻找变化周期和用傅里叶变换方法从光谱资料中提取大气运动、分层结构的信息。这就牵涉到软件的研究, 软件成为附属仪器研制中的重要方面, 将会愈来愈被人们所重视, 这就是附属设备研制中的第三个特点。

在我国光学望远镜的附属设备研制中, 上述三个特点是应该引起重视的。

下面将就探测器、分析器和数据采集系统等方面的发展动向谈一些粗浅看法。

二、探测器的发展

天体物理观测对探测器的要求可归结为

1. 量子效率(QE)高;
2. 探测器噪声(包括读出噪声)低;

上述两点可用可探测量子效率(DQE)来表示:

$$DQE = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)^2_{\text{输出}}}{\left(\frac{S}{N}\right)^2_{\text{输入}}}$$

只有当探测器噪声为零时, DQE和QE相等。

3. 线性响应;
4. 动态范围宽;

这两点与观测精度关系密切。不仅如此, 若响应是线性的又有宽的动态范围, 我们就可以减去背景以提高探测的极限。而最终确定探测极限的将是天空和器件的背景, 它的起伏是不可能克服的噪声源。

5. 足够多的像素。

因为在望远镜焦平面和光谱仪照相机的焦平面上可能分辨的像素是非常大量的。如 5° 视场的施密特望远镜, 当视影为 $2''$ 时, 它可能分辨的像素数为 8×10^6 。好的探测器应能充分利用它的这一优点。

当然, 我们还可列出一些其它要求, 如时间响应, 光谱响应范围, 灵敏度的稳定性, 像素的确定性和使用是否方便等。

还没有一种器件能完全满足上述要求。但 CCD 器件与照相底片相比除了像素还太少外, 其它性能都相当好, 所以它将成为新一代的天文探测器已没有人怀疑了。当然, 有一些性能尚待进一步提高。到目前为止 CCD 在天文观测中已走向实用阶段。在欧美等国一些口径大于两米的望远镜, 多数已配备有 CCD 系统, 它分别用于直接成像、光谱和法布里-帕洛干涉仪的记录。Latham[1]对 CCD 在天文学中的应用有一很好的综述。

由于 CCD 的高量子效率、线性响应和宽的动态范围, 因而提高了探测极限和缩短了观测时间。由于可以实时判断观测是否成功, 更提高了望远镜的使用率。

早期 CCD 大多采用 Fairchild 公司的产品, 但目前多用 RCA, Texas Instrument (美国) 和 GEC (英国) 的产品。表 1 中列出了它们的典型产品的参数。

表 1. 不同厂家 CCD 典型参数

厂 家	工作面积 (mm)	像素大小 (μ)	像素数	量子效率		读出噪声 (e/pixel)	类 型
				峰值	范围(nm)		
RCA	15.4×9.6	30×30	512×320	80%	350—850	50—100	薄型, 三相
TI	12.0×12.0	15×15	800×800	70%	500—1000	83	薄型, 三相
TI	12.0×12.0	15×15	800×800	45%	500—800	20	厚型, 虚相
GEC	12.7×8.5	22×22	576×385	40%	600—1000	20	厚型

目前用于天文观测最多的是 RCA SID 53612, 主要原因是它已商品化了。Texas Instrument (TI) 的三相 CCD 是为空间望远镜所设计的, 其中已有少数应用于地面观测中(如 KPNO 和 Mt. Palomar), 它的读出噪声可小到 $20e/\text{pixel}$, 甚至更低。TI 的虚相读出 CCD, 使读出电路简化且有低的噪声, 是一种很有前途的产品。英国 GEC 公司的 CCD 以噪声低而著称。

CCD 像素的增加, 目前还受到大规模集成电路制造工艺(它要求有非常高的转移效率)和数据采集系统贮存容量的限制。目前最高的像素数目是 TI 的 CCD, 为 800×800 。为了进一步扩大像素数目, 则可采用分束或拼镶(如空间望远镜的宽视场照相机/行星照相机(WFC/PC), 即由四块 800×800 的 CCD 拼成的)。

目前, 由于 CCD 的平场改正不稳定, 一般测量精度为 ± 0.02 , 还低于用光电倍增管所作的光度测量。

硅 CCD 的波长响应的长波限是由硅的能带所决定的, 一般说为 1.1μ 。为了得到红外响应的成像器件, 人们作了很大的努力。I. McLean^[2]和 J. W. V. Storey^[3]分别作过综述。由于红外响应的材料如 InSb 等在加工、电气和化学性能上不如硅, 所以红外成像器件多采用混合型, 即一个红外响应的光电二极管阵和硅读出器件相耦合。目前有 InSb CCD (Cincinnati

Electronics 和 Santa Barbara Research Center 等); Si:Bi CCD (Aerojet); Si:In CCD (Rockwell); Cd Hg Te CCD (TI) 和 Pt Si CCD (RCA) 等。它们的像素还远不能与硅 CCD 相比。红外成像器件在提高红外观测的效率上有非常大的优点, 所以它引起红外天文学家的普遍注意。

上述成像器件的模拟读出有相当的读出噪声, 另一方面硅器件在可见区的蓝紫区不够灵敏(RCA在CCD上镀上一层160nm的荧光物质作转换, 结果在100nm只有10%的量子效应, 也许以后可以解决这个问题)。若用光电阴极和光子计数技术, 将会克服这两个问题并能提高信噪比, 尤其是对弱光源在蓝、紫区工作时更为有利。光子计数成像器件大致可分为三种类型: 1) 电子轰击型, 即将硅的面成像器件如RETICON或CCD封装在一个具有光电阴极的真空器件中, 光电阴极受光照产生的光电子, 通过电子光学系统将其成像于硅器件并用静电场使它加速(一般达几十千伏), 这样使带有几十千伏能量的光电子向硅器件轰击, 就能产生数千量级以上的电子-空穴对, 如它远大于硅器件的读出噪声, 就有可能得到单光子计数。DIGICON中封装的是RETICON, I-CCD中封装的是CCD。前者已商品化, 在一些天文台得到成功的应用, 但器件价格贵(数万美元), 寿命有限(~三年)。ITT公司已成功地试验过I-CCD^[4], 据说TI与VARO合作, 为美国军方提供了很好的I-CCD。2) 利用像管组级联放大光信号, 然后由电视型器件来拾取, 对视频信号加以分析, 当光增益足够时(单光子信号与噪声比大于100时), 就可以得到单光子计数。Boksenberg的IPCS即是成功的例子。现在人们一般开始采用固体电视型器件如RETICON和CCD来拾取, 而级联像管有采用微通道增强器的, 若用光纤板耦合更能减小透镜耦合的损耗, 还缩小了体积, 并且提高了器件的可靠性。3) 多阳极微通道探测器阵(Multi-Anode Micro-Channel Array Detector Systems 简称为MAMA系统)^[5], 只有J. G. Timothy小组在这方面做过工作, 似乎也没有人对他们的工作有过任何的评论。

目前, 电真空型电视探测器(如SIT和SEC)还大量地用于导星系统, 但作为测量用已被淘汰。Spectracon亦已被淘汰。McMullan成功地制作了大口径的电子照相机, 但由于CCD的严重挑战, 类似的工作已没有象以前那样受到人们的注意。

光电倍增管的测量精度目前是最高的, 在单星高精度观测中占有重要地位。GaAs阴极将光谱响应扩展到9000Å, HAMAMATSU(日本)的R943-02是一种很好的管子, 据一些天文学家提到, RCA C31034A由于其阴极不固定在作高精度的测光时会受到影响。

虽然照相底片的量子效率、线性和动态范围等都不好, 但它有永远可满足要求的像素。所以在天文观测中大视场的工作仍然离不开它。Kodak III a-J型底片用H₂+N₂混合气体加温敏化后, 使照相速度有所提高, 南天施密特巡天已经使用这种底片。北天珀洛马天文台已决定用Kodak III a-J片重拍珀洛马天图。

三、分析器的发展

分析器可分为两大类: 其一是频率分析器, 按分辨本领的顺序为外差接收光谱仪(10⁷)、F-P干涉仪(10⁶—10⁵)、阶梯光栅光谱仪(10⁵)、平面光栅光谱仪(10⁵—10³)、窄波段光度计

(10^2-10^4)和宽带光度计(10^1-10^0)；其二是偏振计，包括线偏振和圆偏振计两种。

自外差接收成功后，光谱仪从原理上没有任何新的进展，但它的性能得到了很大的改进，尤其是提高效率上有许多成功的例子。

例如，利用光学纤维将处于望远镜焦平面上的多个天体的光引导到光谱仪上去，改变了过去只能对一个天体进行有缝光谱观测的限制，如Steward天文台的 J. M. Hill^[6] 和 AAO^[7] 已成功地将 50 颗天体的光用 50 根光纤引导到光谱仪中。若考虑到目前传输效率约 50%，那么可提高效率达 25 倍。当然，这首先要要求这些研究对象集中在一个视场范围之内，这对于星团，星系团成员的研究是很有吸引力的。当然，若有一具大口径的施密特望远镜，作这类工作时这一限制将会减轻。

光纤的应用也将简化望远镜的设计，由于固定的光谱仪的重要性（它的稳定性在视向速度测量中是至关重要的），不少天文学家仍然需要折轴光谱仪，采用光纤耦合直接将天体的辐射从主焦点耦合到固定光谱仪，就能避免折轴系统对望远镜设计带来的麻烦。Steward Heacock^[8]和欧南台(ESO)的 Enard^[9]都在进行这方面的工作。

用长缝光谱仪研究面源如星系，同样能提高效率。

前面提到过的 CCD与法布里-帕洛干涉仪配合，在研究气体星云时可同时得到星云两维的物质密度分布和速度场。

上面提到的都是充分利用望远镜的视场所得到的好处。

提高效率的另一方面是扩展利用波段。地面望远镜所收集到的天体辐射波段是很宽的，从大约 3200Å 到近红外几个大气窗口。但由于探测器和分析器（如光栅级次的重叠，测光性能的要求）性能的限制，往往只利用了其中一部分。

用拼镶的CCD来记录阶梯光栅光谱仪众多级次的光谱就是一个例子。

用双色滤光片将辐射投向不同的分析器和探测器，是目前常采用的方法。Hale望远镜(5米)上的卡焦光谱仪就分别用 Boksenberg 的 IPCS 和 TI800×800 的 CCD 来记录光谱蓝紫区(3200Å—5200Å)和红区(5200Å—10000Å)的光谱^[10]。一批光学/红外光度计^[12]，偏振计^[11]，法布里-帕洛干涉仪^[13]的设计，也是从这一角度出发的。

我们可以预期当固态探测器的平场改正稳定性得到解决后，目前效率低的多色测光，将会被诸如 GRISM等无缝光谱仪加上 CCD 所取代。因为它将同时得到变星、比较星的信息，又可同时得到不同波段的信息，所以提高了望远镜的利用率。

分析器发展的另一趋势是减少分析器内部的光线损失。最典型的例子是1974年Buchroeder提出的 GRISM^[14]，在会聚光束中使用了色散元件，引入的彗差当然使像质变坏，但当分辨率要求不高时它减少了光学元件数目，也减小了光线的损失。这一思想的发展是 CFH3.6米望远镜上的 GRENS，它把透射光栅、方向补偿棱镜和主焦改正镜的最后一块合成一个光学元件。由于减少了元件数，亦即减少了光学元件/空气界面，从而使失光减少。加上 CFH 望远镜所在地莫纳凯亚山优秀的天文气候，使得在其上用敏化过的 III a-J底片露光一小时就可得到 21.2 等的类星体光谱(色散为 1000Å/mm)^[15]。

改进有缝光谱仪的结构和设计，以提高其性能，仍然有许多可为之处。例如以往用像管记录光谱要求成像面在相机之外，这不仅使短焦距相机结构变得复杂而且导致失光增加。新

近当用 CCD 时则往往将其置于施密特相机之内主焦面上, 整个相机真空密闭, 利用“冷指”(cooling finger)将 CCD 和相机外的杜瓦瓶连接, 使得 CCD 能在 -100°C 工作, 把平场改正镜作为 CCD 的窗口, 这样大大地减少了光学损失。

如上所述, 由于发现了毫秒脉冲星, 所以要求光度计的时间分辨率更高。目前已知最高时间分辨率的光度计是装在苏联六米望远镜上的, 分辨率为 10^{-7} 秒。

为了消除大气湍流所引起的像的蜕化, 成功地使用了 Speckle 干涉法。目前已发展到用数字记录, 送计算机处理了。当然方法也有所改进, 例如 J. M. Beckers 等人的差分 Speckle 法^[17]。

Griffin 设计的视向速度仪得到了推广, 使得视向速度测量(至少对晚型星)变得又快又精确。已设计了一些专门用于视向速度测量的小型望远镜。

一个应该引人注意的问题是, 磁场对天体的演化和辐射过程起着很关键的作用。但迄今我们只能从高色散光谱的塞曼分裂得到它的信息, 实在是少慢差费。是否有可能发展一个如 Griffin 作视向速度测量那样的专用设备来测量它? 由于磁场信息对天体物理研究的重要性, 相信今后几年会有所发展。

四、数据采集系统的进展

七十年代计算机开始成为天文数据采集系统的主角。但当时, 一些天文台所采用的都是小型计算机, 如 NOVA 和 PDP 系列的早期产品。由于微型机和 32 位超级小型机的发展, 小型机已几乎被淘汰。现在的大型望远镜的数据系统大多是采用超级小型机(字长 32 位, 内存容量为兆级), 若这一机器还要担任控制任务, 则往往还用微型机作前级机。目前各主要天文台几乎都风行采用 DEC 公司的 VAX-11 系列机。而对中、小型望远镜则常用微型机, 若功能不够时则往往配以两台以上的机器各司其职, 因为它们价格不高, 而且这样做更为有利。

从探测器到计算机输入/输出接口之间的接口电路, 因不同的探测器/分析器而有不同的信号形式和控制要求。同样的情况发生于实验核物理。他们已采用标准的 CAMAC 和 NIM 系统, 对于微型机, 美国电气工程师协会则推荐 S-100 总线。在一些国际性的天文会议上常有人呼吁统一天文的接口系统, 虽然响应不强烈, 但实际上一些管理成熟的天文台多采用 CAMAC 和/或 NIM 系统。

数据采集的软件是数据采集系统的灵魂。但由于各天文台的计算机型号不统一, 操作系统品种繁多, 所以只能各自花费大量的人力、财力于其上。但是, 在国际天文界图象处理乃至一些大望远镜的实时处理都集中于 VAX-11 系列机了, 期望在国际天文界中能如同学术刊物交换那样能自由地免费地交换软件。

这里, 仅对光学望远镜的附属仪器发展的动向作了肤浅的介绍, 文中一定有不确切和错误之处, 望同志们指正。

参 考 文 献

- [1] Latham, D. W., *Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes*, p245, (1982).
- [2] McLean, I., *Infrared Detector Arrays, A Preliminary Report of the Current Status in the USA*, Preprint of Royal Observatory, Edinburgh, (1982).
- [3] Storey, J. W. V., *Survey of Current Infrared Array Technology*, AAO TR3, (1982).
- [4] 例如参阅 *Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes* 中的讨论.
- [5] Timothy, J. G., *Rev. Sci. Instrum.* **52** (1981), 1131.
- [6] Hill, J. M., *Ap. J. Suppl.*, **242** (1980), 169.
- [7] Gray, P. M., AAO preprint 182, (1983).
- [8] Heacox, W. D. et al, *BAAS*, **11** (1980), 687.
- [9] Enard, D., *ESO Newsletter*, (1983) No. 31.
- [10] Oke, J. B. and Guun, J. E., *PASP*, **94** (1982), 586.
- [11] Bailey, J. and Houch, J. H., *PASP*, **94** (1982), 618.
- [12] 例如见一些红外望远镜的使用手册.
- [13] Treffers, R. R., *PASP*, **93** (1981), 247.
- [14] Buchroeder, R. A., *A Raytrace Study of Prime Focus Grisms and the Like*, Report of Optical Sciences Center, Univ. of Arizona, (1974).
- [15] Fonéré, J. C. et al, *Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes*, p. 143, (1982).
- [16] Beskin, G. M., 同上, p. 181, (1982).
- [17] Beckers, J. M. and Hege, E. K., 同上, p. 199, (1982).

The Development of Telescope's Auxiliary Instruments

Hu Jing-yao

(Beijing Observatory, Academia Sinica)

Abstract

The recent development of telescope's auxiliary instruments is discussed in this paper.