



言

从 400 年前开始,天文学对暗弱目标研究的需求,自然地带动了望远镜口径逐渐增大(图 1)。19 世纪早期,格尔格-哈尔认识到,选好观测站址(例如,加利福尼亚州)可以带来巨大收益,但即使在最好站址,设备仍然受限于可以接收到的光子流量。因此,他开始支持使用大型望远镜。随着这一想法的发酵,帕洛玛山 5m 望远镜,从 1930 年开始构思,到 1949 年终于完成。接下来 40 年,4~6m 级望远镜一直是发展主流。一是因为望远镜技术已进入稳定发展期,另外,提高灵敏度以取代增加口径,也不失为一种有效途径。毫无疑问,现有和新增的这类望远镜,其灵敏度大幅度地提升,得益于以下观念和技术进步:

(1) 新观测站点(智利,夏威夷州)的建立,使得视宁度提高了两倍,灵敏度得以大幅度增加,可与口径两倍的望远镜获得的灵敏度相媲美。

(2) 认识到圆顶和镜面视宁度的重要性,克服其影响可以改善灵敏度,这一贡献不亚于好的观测点位对**灵敏度**的改善。

(3) 快速自动目标提取,替代了原来的慢速人工视觉定位,可以大幅度减少图像的倾斜模糊,从而提高了灵敏度。

(4) 引人瞩目的进步,还在于光电探测器取代了摄影胶片(量子效率从摄影胶片的 4% 上升到 80%,大致相当于将口径增大 4 倍)。这是最重要的,也是决定性的进步。

尽管如此,19 世纪 80 年代中期,当宇宙天体学成为天文学最热门领域时,现有望远镜可达到的灵敏度,远不能满足宇宙天体的观测需求。这就催生了目前 8~10m 量级望远镜和已经获得了巨大成功的哈勃空间望远镜(HST)。虽然按照今天的标准看来,哈勃空间望远镜规模还太小,但它免除了大气影响,已可以获得比较理想的成像。

一系列技术进步,使研制经费和研制周期大幅度缩减,也使得口径大幅

度增加的望远镜,其研制经费和周期变得可以接受。这些进步包括基于计算机的设计、快速和优化的光学加工技术、方位-俯仰结构减少了望远镜和支座质量并降低成本,以及可在更小望远镜罩和观测塔内使用的小焦比系统。

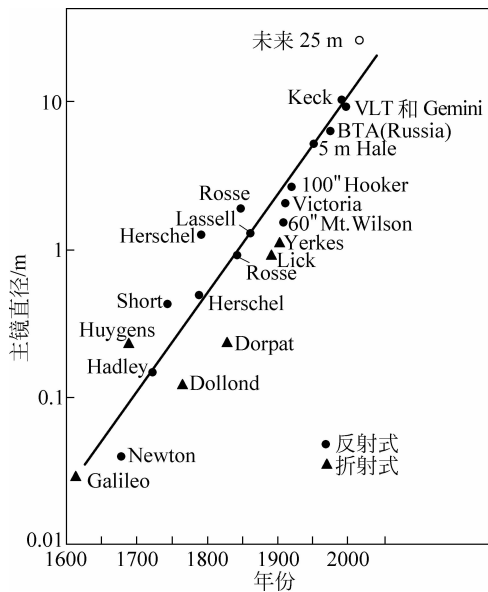


图 1 过去 4 世纪望远镜口径的发展。图 1 显示了发展趋势。最大望远镜口径,已经达到 40 年前的两倍。20~30m 量级望远镜项目可在 2015 年完成。望远镜发展速度,变得稍微快了些。

已经证明,天文观测站角分辨力是非常重要的指标,其重要性仅次于灵敏度。事实上,很多重要发现,确实得益于角分辨力的改善。理论上,角分辨力与望远镜口径应当成比例。但是,大气扰动(图 2)导致口径增加到一定程度时,并不能进一步提高角分辨力。尽管如此,通过更大更优化的光学系统、选择更好的站址也获得了分辨力的缓慢提高。最近,还开始采用补偿大气扰动或者将观测站送入太空的方法。

新世纪伊始,本书为大家呈上目前最先进的天文**光学望远镜**设计和建造技术。将讨论范围限定在光学望远镜,也就是说,覆盖整个光学波段范围,不仅是可见光,还包括了相邻的光谱范围:紫外和红外,一直延伸到 $500\mu\text{m}$ 。在 X 线频域,几何光学占主导地位(衍射可以忽略不计)。而在**射电频域**,衍射起到决定性作用(需运用天线传播理论)。从 100nm 到亚毫

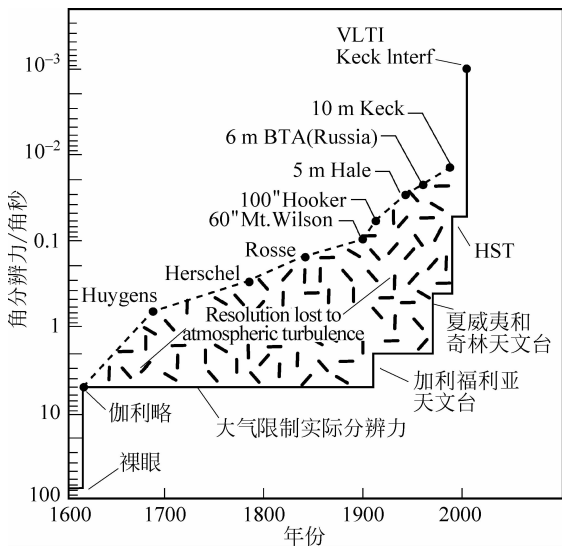


图 2 天文观测光学成像角分辨率发展示意。由于存在大气扰动,地基望远镜角分辨率从未达到过衍射极限,但是通过寻求好的观测站址可以使其有一定提高。目前,大气扰动补偿技术,可以在部分空域使角分辨率达到理论极限。干涉测量技术可以将多个望远镜采集到的能量合并起来,以获得比单台望远镜更高的分辨率,但是这个方法却受到灵敏度的限制。**甚大干涉望远镜阵(VLTI)**和**凯克(Keck)干涉望远镜**建成后,其分辨率将达到毫角秒。

米波段,仍然可以运用几何光学理论(反射、折射),衍射效应不占主要地位,但也不可忽略不计。这样,就使得望远镜设计原理在本质上都是相同的。

本书前两章回顾了天文学基本概念和设备原理,有助于理解望远镜功能及应具备的能力。

第 3 章讲述大型望远镜设计和项目管理方法。第 4~9 章覆盖了大型望远镜及其研制所涉及的各类工程问题:光学、结构、机械、控制系统和热控制。考虑到重要性在不断增加,第 8 章用了整整一章,来讲述主动光学和自适应光学。

第 10 章讲述生产期间对望远镜系统进行组装、验证和试运行的方法。后续两章讲述了环境相关问题。第 11 章主要讲述了地基望远镜望远镜罩的设计与研制,第 12 章讲述了站点和轨道选址,以及相应的环境条件。

每一章结束都列出基本参考文献,供需要深入研究者参考。最后,附录

中提供了基本的天文学及工程数据、现有主要望远镜明细、大量专业术语和译名。

希望本书能为那些直面大型空间与地面望远镜设计和建造的挑战,需要工作在科学和技术前沿的天文学家、工程师和相关管理人员,提供一些基础知识与参考。

天文观测

1.1 天文望远镜的作用

与所有其他科学不同,天文学是一门受观测限制的科学。除陨石分析和利用空间探测器可能不需要观测实验外,地球上天文学家一直是被动的观测者。除了一些特定的粒子(如宇宙射线、中微子等)外,宇宙信息的唯一载体,就是地球上或者地球附近能接收到的电磁辐射。天文望远镜的作用,就是尽可能多地收集这种电磁辐射,以更高的灵敏度去探测它,以更高的精度去测量它。

本章阐述天文观测源的主要特点和天空复杂的背景辐射,而且还涉及天文望远镜设计者应熟悉的基本天文概念。

1.2 观测源特点

1.2.1 强度

天文观测源,涉及具有巨大变化幅度的亮度。传统上,这种幅度变化的度量,在天文学中称为“星等”。大约公元前 2 世纪,依巴谷(Hipparchus)建立了星等系统,将人眼能看见的恒星分类成 6 个等级,某等级恒星的亮度是下一个等级恒星亮度的两倍。由于人眼对恒星亮度的响应近似符合对数关系,因此依巴谷星表按照对数制成。今天使用的星等,是直到 19 世纪,才通过使用精确亮度测量正式确定的,而且调整后前 6 个星等和依巴谷星表相对应。因为古代星等系统中第一个等级表示的是最亮的恒星,所以星等遵循了一个与直观近乎相反的规则,恒星的星等数字越大,表示那颗恒星越暗。

在星等系统中,两个分别具有视流量密度为 ϕ_1 和 ϕ_2 的天体,其视星等

分别为 m_1 和 m_2 , 它们之间存在这样的关系式:

$$m_1 - m_2 = 2.5 \log \frac{\phi_1}{\phi_2} \tag{1.1}$$

反之, 为

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = 10^{0.4(m_1 - m_2)} \tag{1.2}$$

表 1.1 给出了天体星等差和天体亮度比之间的关系

表 1.1 星等差和亮度比之间的关系

星等差	0.5	0.75	1	2	2.5	5	10
亮度比	1.58	2	2.51	6.31	10	100	10 000

按惯例, 明亮的织女星(光谱类型为 A0 的蓝主序星)被认为是所有波长的 0 星等基准。比织女星更亮的天体(如太阳、亮行星等)为负星等。

精确测光, 通过具有只接收某些带宽波长的光电固态探测器和滤光片实现。一种应用非常广泛的测光系统是 **UBV 系统**, 已经扩展到红光和红外波段(1.3.1 节)。表 1.2 给出了这些波段的特点和每一个波段的 0 星等源的流量。应该指出的是: 目前在用的几种测光系统, 其中心波长和带宽会有所不同, 它还特别依赖于每个观测站仪器的响应特性。这里给出的数据, 不是为了实际观测工作的需要, 而是为了快速粗略估计的需要。

表 1.2 0 星等的光度测量的波长带宽和流量密度

波 段	$\lambda/\mu\text{m}$	$\nu/10^{14}\text{Hz}$	$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	$F_\lambda/[\text{光子数}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{s})]$	F_ν/Jy
U(紫外)	0.365	8.3	0.068	7.9×10^{10}	1810
B(蓝)	0.440	7.0	0.098	1.6×10^{11}	4260
V(可见)	0.550	5.6	0.089	9.6×10^{10}	3540
R(红)	0.700	4.3	0.22	6.2×10^{10}	2870
I(近红外)	0.880	3.7	0.24	4.9×10^{10}	2250
J(近红外)	1.25	2.4	0.26	2.02×10^{10}	1520
H(近红外)	1.65	1.8	0.29	9.56×10^9	1050
K(近红外)	2.20	1.4	0.41	4.53×10^9	655
L(近红外)	3.40	0.86	0.57	1.17×10^9	276
M(近红外)	5.0	0.63	0.45	5.06×10^8	160
N(中红外)	10.4	0.30	5.19	5.07×10^7	35.2
Q(中红外)	20.1	0.14	7.8	7.26×10^6	9.70

来源: 参考文献[1]和[2]。

从射电天文学引入,比星等系统更通俗易懂的流量密度单位,正被广泛使用,它就是 Jansky(央),定义如下:

$$1 \text{ Jansky(Jy)} = 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \tag{1.3}$$

对想使用 Jansky 单位的测量结果,又更喜欢以星等来看待的天文学家,派生出 AB 星等。AB 星等基于央斯基(Jansky)系统,但计算结果的单位是星等:

$$\text{ABmag} = -2.5\log(\text{Jansky}) + 8.90 \tag{1.4}$$

式中,加入常数项的目的,是为了和 V(可见)波段的正常星等一致。

表 1.3 给出了几种典型目标在大气层外、可见波段视星等和流量密度的关系。

表 1.3 可见波段典型目标大气层外的视星等和流量密度

星 体	星 等	流量/[光子数/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{s}$)]	流量/Jy
太阳	-26.5	3.8×10^{21}	1.4×10^{14}
满月	-12.7	1.1×10^{16}	4.2×10^8
木星	-2.6	1.0×10^{12}	3.9×10^4
天狼星	-1.5	3.8×10^{11}	1.4×10^4
暗弱星系	~ 30	~0.1	$\sim 3 \times 10^{-9}$

1.2.2 天空中最关注源的分布

对于一项指定的科学项目,在选取观测目标时,必须充分考虑一些可能影响观测结果的因素。天空中,有些目标是唯一的或几乎唯一的,很少有机会获得最佳观测条件。但是,对于那些能够出现在天空中许多位置的“普通”目标,观测者不仅可以通过选择一年中最佳的观测时间(此时目标源在天空中的仰角足够高)和月相(新月时有更暗天空背景),而且还可以通过选择合适的观测天区,以降低黄道光 and 星系尘埃对观测背景的影响,从而获得更理想的观测数据。

图 1.1 给出了整个天空的近红外辐射图,标出了黄道带高背景天区和银河中恒星和星云形成的银河辐射天区。为了充分发挥探测器的灵敏度,必须避免在这两种天区开展天文观测。图中还标出那些对开展银河系外研究工作特别重要的天区。天空近红外辐射图,以黄道坐标显示了黄道带的高背景天区和银河辐射天区,以及一些挑选的感兴趣天区。不同数字对应的含义为:(1)星光洞(特别低的远红外星系辐射天区);(2)室女座星系

团；(3)哈勃深场 HDF(哈勃空间望远镜长时间曝光的天区)；(4)星系团；(5)小麦哲伦云(银河星系的卫星)；(6)天炉座星系团；(7)大麦哲伦云。GN 和 GS 分别代表银河系的北南极,GC 代表银河系的中心。

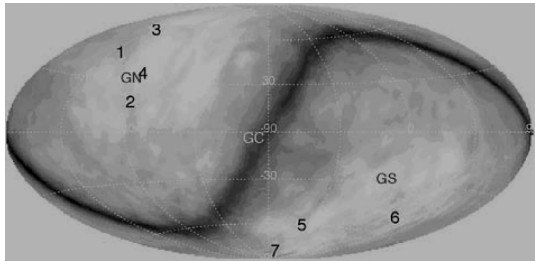


图 1.1 整个天空的近红外辐射图。

值得关注的是,除上面提到的那些特别感兴趣天区外,当空间望远镜没有地基观测的相关约束时,观测者挑选的目标在天空中的分布,是出人意料地随机的(图 1.2)。

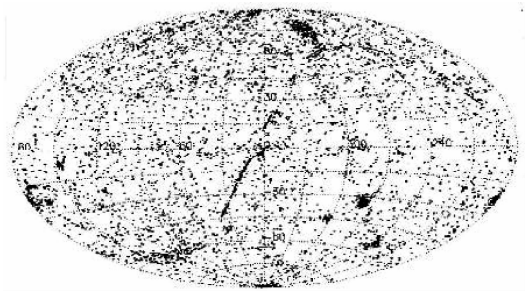


图 1.2 哈勃望远镜(HST)在过去 11 年中观测目标的分布。
(数据来源于太空望远镜科学研究所的多任务档案)

1.3 通过大气的观测

大气在以下几方面影响观测：(1)消光,减少了观测源的流量；(2)线状和热辐射,产生对观测结果有害的背景,尤其是在红外波段；(3)折射,改变观测源的视位置和分散源成像的光谱；(4)扰动,使观测目标成像模糊。这些影响因素的量化和详细论述如下。

1.3.1 大气消光

入射光子和空气分子或粒子的碰撞产生吸收和散射,是导致大气消光

的原因。吸收过程中,主要吸收体是水、二氧化碳、氧气和臭氧,入射光子被破坏而且其能量转移到分子,这可能导致后续辐射。散射过程中,尽管光子不被破坏,但其方向和能量发生改变,其中由典型尺寸远小于入射光波长的空气分子引起的散射,称为瑞利散射,大约和入射光波长 λ^{-4} 成正比;由尺寸和入射光波长相近的微小固体粒子引起的散射,称为米氏散射,和入射光波长 λ^{-1} 成正比。

除一些称为“大气窗口”的光谱区域外,吸收和散射的结合基本上阻止了对地球外观测源电磁辐射的探测。其中最重要的“窗口”有:(1)光学窗口,包括可见光、近紫外和波长高达 $25\mu\text{m}$ 的红外波段;(2)射电窗口(图 1.3)。

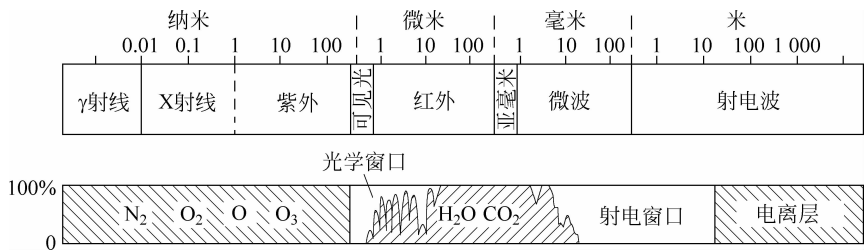


图 1.3 电磁波频谱图和大气吸收作为波长函数的吸收分子变化图。

可见光波段,大气消光只有 $10\%\sim 15\%$ 。但是,由于高度 $20\sim 30\text{km}$ 臭氧层的影响,使短于 300nm 波段大气变得不透明。在波长介于 $0.8\mu\text{m}$ 和 $1.35\mu\text{m}$ 的近红外波段,有一些是因为水蒸气和氧气造成的吸收带。在这些吸收带中,大气不是完全不透明的。当波长超过 $1.3\mu\text{m}$,尤其在低海拔的观测站,开始出现完全不透明的吸收带。

其中,字母表示的是红外窗口。图 1.4 标出了与表 1.2 中测量光波段相对应的大气透明的波长窗口。在低海拔观测站,大气完全不透明的波长范围为 $25\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 。

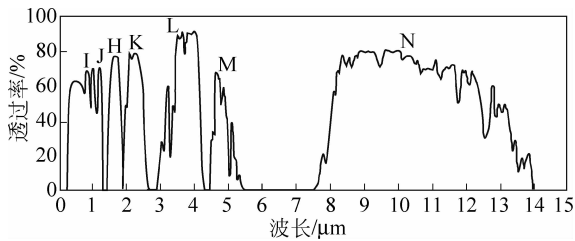


图 1.4 可见光和红外波段大气透过率和波长的关系图。

对大多数吸收体,其粒子数密度随着海拔高度按指数率下降。水是近红外波段的主要吸收体,标高为 2km,所以测站海拔高度越高,开展红外波段观测的优势就越大。例如,夏威夷莫纳克亚山顶(4200m)的大气水蒸气含量占 95%以上,残余水柱深度(包含大气层上方所有可降水的等效厚度层)仅仅只有 1.5mm。而在南极洲高原地区,残留水柱深度比它还要低得多,通常典型值在 0.1~0.3mm 之间。很明显,在这些地区开展天文学研究可以使用更宽的波长范围。海拔高度 10km 以上可降水量非常低,也是利用高空飞行平台(如气球和飞机)开展天文观测的主要原因(图 1.5)。

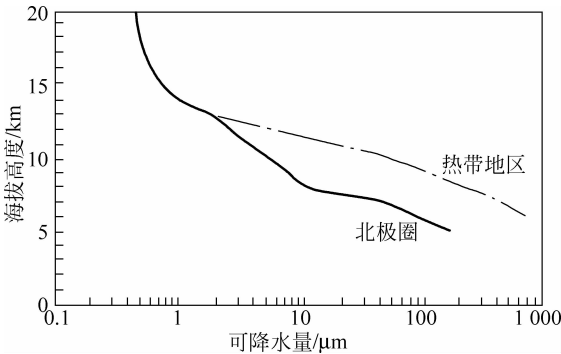


图 1.5 可降水量和海拔高度关系图。

显然,由于入射光通过大气的路径随着天顶角增大而增加,大气消光也随着天顶角增大而增强。这种影响,传统用术语“大气质量”表示,就是观测方向大气量和天顶方向大气量的比率。天顶角小于 60° 时,大气可认为是一个扁平板,并且大气质量和天顶角余弦的倒数(即 $\sec z$)成正比^[3]。

1.3.2 大气辐射

白天,太阳光散射占据大气辐射主导地位,从而阻碍可见光和近红外波段观测。晚上,除月光散射的可能贡献外,在这些波长大气辐射的主要来源是荧光(“气辉”)、上层大气(高度约 100km)的原子和自由基进行的激发辐射发射出的特征谱线。由于 OH^- 光谱的强烈强度,这种现象对近红外波段观测非常重要。气辉线在空间和时间上的波动限制了地基近红外波段的测光精度。

波长超过 $2.3\mu\text{m}$,无论白天或者晚上,大气的热辐射都占据天空背景辐射的主导地位。各种大气成分的实际温度在 $-43\sim 7^\circ\text{C}$ 之间变化,但由于气体的实质,大气的实际辐射比相同温度黑体辐射要小得多。只有在那些