

中国科学院国家天文台
天体物理技术与方法丛书

天文可见光探测器

王传晋 叶彬浔◎编著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科学院国家天文台天体物理技术与方法丛书

天文可见光探测器

王传晋 叶彬浔 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

天文可见光探测器/王传晋, 叶彬浔编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2011. 11

(中国科学院国家天文台天体物理与方法丛书)

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5841 - 8

I. ①天… II. ①王… ②叶… III. ①天文光学—光导探测器
IV. ①P111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 211934 号

选题策划 赵 晖
责任编辑 赵 晖 夏凤金
封面设计 杜 宇
责任校对 赵丽英
责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010 - 62173865
传 真 010 - 62179148
投稿电话 010 - 62103182
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 710 × 1020mm 1/16
字 数 400 千字
印 张 17.25
版 次 2013 年 11 月第 1 版
印 次 2013 年 11 月第 1 次印刷
印 刷 北京金信诺印刷有限公司

书 号 978 - 7 - 5046 - 5841 - 8/P · 145
定 价 55.00 元

如有缺页、倒页、脱页, 请联系本社发行部调换

中国科学院国家天文台天体物理技术与方法丛书

编委会

主 编：苏定强

副主编：崔向群

编 委（按姓氏笔画排序）：

王兰娟 甘为群 叶彬浔

南仁东 阎保平

《天体物理技术与方法丛书》序

除了太阳系内的天体，人类都无法到达那里，对它们的研究是通过望远镜的观测进行的，望远镜的使用开创了现代天文学，为了纪念1609年伽利略开始用望远镜观测天体400年，2009年被定为国际天文年。望远镜口径越大收集的光越多，衍射限制的分辨率也越高。400年来不仅望远镜的口径越做越大，而且在技术和方法方面有一系列重大的进展：从单纯观测天体的像，发展到观测天体的光谱（多色测光相当于低分辨光谱），它可以使我们了解天体的化学成分、物理状态、视向速度，这是天体物理学研究最重要的手段。以光谱观测为主，发展了多种的终端仪器。对天体辐射的接收由肉眼发展到底片，近三十多年又发展到CCD，它的量子效率比底片高得多。上世纪80年代发展的主动光学，使光学红外望远镜的口径突破了5~6米，增大到上世纪90年代的8~10米，现正在向30~40米迈进。还发展了自适应光学、斑点干涉和光干涉等高分辨技术。1931年央斯基发现了来自天体的无线电波，第二次世界大战后射电望远镜包括综合孔径、甚长基线干涉仪（VLBI）、接收机技术，以至整个射电天文学蓬勃发展起来了。1957年苏联成功发射了第一颗人造卫星，此后望远镜又从地面发展到空间，波段又从可见光、一些红外窗口和射电发展到整个电磁波段，特别是x、 γ 波段对高能天体物理学的研究有重要意义。除电磁波外，对来自天体的宇宙线（多种粒子）的探测和研究也是天体物理学的重要内容。还应当指出，利用气球和火箭的观测，也取得了一批重大成果。对以上各种观测得到的数据要做许多处理，为此发展了相应的方法和软件。各波段巡天和其他观测所得到的数据量是极大的，将它们处理、归档放到网上，就相当于在网上建立了一个天文台，这就是虚拟天文台。天文望远镜和技术、方法是天体物理学研究的基础。

上世纪50年代以来，中国研制了多个望远镜和仪器，对多种天文技术和方法作了研究，这些工作是在十分困难的条件下进行的，改革开放前，绝大多数科技人员没有读研究生和出国学习的机会，当然改革开

放后情况是完全变了，不过经费仍然是很少的，只是到了近十年才有了较大的增加，我国的科技人员和工人就是凭着为了科学和民族的振兴在这些领域取得了多项成果，并有不少创新。这里仅举一个近的例子：2008年建成的大天区面积多目标光纤光谱望远镜（LAMOST），就是我国创新的、世界上口径最大的大视场望远镜，配有4000根光纤和16台光谱仪，这样大规模的有缝光谱巡天是空前的，当前世界上好几个项目也正在计划沿着这个方向去做。通过LAMOST的研制，我国掌握并发展了大望远镜的关键技术——主动光学，基本上具备了研制30米级光学红外望远镜的能力。

本丛书的作者都是这三五十年来在我国天文望远镜和技术、方法领域中做了很多工作的专家，丛书最大的特点是大多数作者在书中包括了很多本人和合作者的研究和工作成果，并有许多实例。不过，本丛书各本的情况也是有区别的，有的包括了作者参与的直到当前最前沿的工作，也有的由于作者年龄较高，参与的工作较早，国内外的最新进展包含得较少，另外，本丛书未能包括以上提到的天文望远镜、技术和方法的所有方面，这些是不足的地方。

最后，要感谢各位作者将自己的知识和心得无保留地奉献给了读者，感谢崔向群副主编实际上对本丛书做的大量的组织工作，也向做了很多具体工作的林素女士表示感谢。

苏定强

2012年6月

序

纵观光学天文观测仪器之发展，堪称革命性飞跃者凡四。一是望远镜的出现，使收集天体光子的能力越出人眼瞳孔的限制，从而可探测到遥远的深空；二是照相乳胶的问世，使人类能够累积天体的信息，并客观地记录；三是电荷耦合器件（CCD）的发明，使天体来的光子得到更有效利用和实时显示天文图像；四是空间观测的实现，人类从此彻底摆脱大气的桎梏，得以进一步“看清”天体的真实面貌。这四次突进中，后两次都发生在20世纪后半叶，人类科学进步的步伐越来越快，对宇宙的认识也越来越深入。但建立空间观测平台耗资巨大，需要许多高精技术的支撑，目前只有少数国家能够做到，而装配一套CCD系统则所费无多，一般天文台都有能力配置，甚至较富有的天文爱好者亦能负担。从这个意义上说，CCD的应用所带来的影响更为广泛和普及，何况空间观测本身也大大得益于CCD的成果。

作者有幸较早接触这一领域。20世纪80年代初，正是一个百废待兴的时期。我国改革开放刚刚起步，财政拮据，科研经费还很紧张。而国际上，一种新型光学探测器——CCD，已微露端倪。1981年在各方支持下，开始筹划一个为国内望远镜配置这种先进探测器的项目。几经协力，1984年在云南天文台的一米望远镜上装成了“云台一号”CCD系统。4月16日夜，首次试机，摄得来自M57行星状星云的壮观图像。进一步观测表明，“云台一号”比原来使用照相底片的探测能力提高了3.8星等，相当于把该望远镜的口径扩大4~5倍，充分显示出这种新型探测器的威力。此后十几年，我国天文台的中大型望

望远镜上都增添了 CCD 设备。CCD 也成为天文界众所周知的名词。

这本书是为对光学探测器有兴趣的天文工作者写的。除重点介绍 CCD 外，还简要叙述了有关基本知识，回顾了发展历史，最后略述各种正在研制的其他类型光学探测器。目前 CCD 已成为世界各国天文台的首选光学观测设备，但具体结构、布局和用途，都有不同。限于篇幅，不能一一介绍。为便于读者进一步了解，我们把历年累积的资料汇总于附录二，读者有了本书所述的基本知识，循着该附录的线索，应当不难从网上获得想要的资料。

现今科学日新月异，文献书刊浩如烟海，要及时跟踪最新进展，实非易事，而作者水平有限，书中遗漏谬误一定不少。谨望读者和专家不吝赐教。

在本书的撰写过程中，曾得到许多朋友和同仁的帮助，上海天文台姚保安研究员撰写了第三章“星等的改正”一节，并提供了佘山站 1.56m 望远镜上的 CCD 照相机性能的有关数据；紫金山天文台姚大志研究员提供了盱眙站 1.04/1.2m 望远镜上的 CCD 照相机性能的有关数据；国家天文台天文探测器实验室冯志伟博士帮助收集了附录中的部分资料，并规范了 3.5.9 中的一些术语。在此深表感谢。

作者

目 录

第一章 基本知识	1
1.1 辐射带来天体的信息	1
1.2 光子到达率	2
1.3 大气的影响	3
1.3.1 大气消光	4
1.3.2 大气折射	6
1.3.3 大气色散	6
1.3.4 大气散射	7
1.3.5 大气扰动	7
1.3.6 大气发射	9
1.4 天光	10
1.5 光子收集率	12
1.6 量子效率和光谱响应	14
1.7 光子的统计特性	16
1.8 噪声和信噪比	18
1.9 空间分辨率	21
第二章 经典探测器	28
2.1 发展回顾	28
2.2 人眼	29
2.3 照相乳胶	31
2.3.1 照相技术的应用	31
2.3.2 照相乳胶的特性	33
2.3.3 天文用照相底片	39

2.3.4	照相乳胶的优缺点	39
2.4	光电倍增管	40
2.4.1	光电发射	40
2.4.2	光电倍增管的原理	42
2.4.3	光电倍增管的类型	43
2.4.4	光电倍增管的两种工作模式	44
2.4.5	光电倍增管的特性	48
2.4.6	光电倍增管的优缺点	50
2.4.7	析像管	50
2.5	光增强器	51
2.5.1	像管	51
2.5.2	微通道板 (MCP)	54
2.6	摄像管	57
2.6.1	次级电子电导摄像管 (SEC)	58
2.6.2	光导摄像管 (Vidicon)	59
2.6.3	硅靶光导摄像管 (ST)	59
2.6.4	硅增强靶光导摄像管 (SIT)	60
2.7	电子照相机	61
2.8	固体器件	63
2.8.1	集成硅二极管阵 (IDA)	65
2.8.2	电荷注入器件 (CID)	66
2.9	组合系统	68
2.9.1	析像管扫描器 (IDS)	68
2.9.2	成像光子计数系统 (IPCS)	69
2.9.3	多阳极微通道阵 (MAMA)	70
2.9.4	精密模拟光子定位器 (PAPA)	71
第三章	电荷耦合器件 (CCD)	73
3.1	概述	73
3.2	CCD 的工作原理	75
3.2.1	光电转换	76
3.2.2	光电子的收集	79
3.2.3	电荷团的驱动和转移	80

3.2.4	电荷团的输出	80
3.3	CCD 的类型	84
3.3.1	按转移层不同分类	84
3.3.2	按入射面不同分类	86
3.3.3	按驱动相数不同分类	90
3.3.4	按读出方法不同分类	92
3.4	CCD 探测系统	99
3.4.1	科学用 CCD 系统	99
3.4.2	商用 CCD 系统	123
3.5	CCD 系统的特性	124
3.5.1	几何特性	124
3.5.2	量子效率和光谱响应	126
3.5.3	电荷转移效率	128
3.5.4	暗流	134
3.5.5	线性	137
3.5.6	动态范围	142
3.5.7	噪声	142
3.5.8	增益和噪声的测定	146
3.5.9	调制传递函数	148
3.5.10	失效像元	154
3.5.11	宇宙线效应	155
3.5.12	电致发光	155
3.5.13	干涉条纹	157
3.6	信噪比和极限星等的估算	157
3.7	CCD 和照相乳胶的优缺点比较	162
3.8	CCD 图像的处理	165
3.8.1	数字图像	165
3.8.2	CCD 图像的预处理	166
3.8.3	CCD 图像上的星像	169
3.8.4	星等的测定	170
3.8.5	重心定位法	175
3.8.6	星像的二维高斯拟合	177

第四章 探测器的新动向	179
4.1 引言	179
4.2 增强电荷耦合器件 (ICCD)	180
4.3 微光电荷耦合器件 (L3CCD, EMCCD)	183
4.4 正交转移 CCD (OTCCD)	186
4.5 pnCCD	189
4.6 雪崩二极管 (AD, APD)	192
4.7 互补金属氧化物半导体 (CMOS)	195
4.7.1 被动像元传感器 (PPS)	197
4.7.2 主动像元传感器 (APS)	198
4.7.3 读出方式	201
4.8 超导隧道结探测器 (STJ)	203
附录一 时下仍然活跃的科学级 CCD/CMOS 成像器件的研发 厂商或机构	209
附录二 世界各国主要地面大望远镜上的在役/在研 CCD 系统 一览表	211
附录三 专用术语中英对照表	250
参考文献	252
索引	257

第一章 基本知识

1.1 辐射带来天体的信息

尽管空间飞行发展迅速，但在可以预见的将来，除太阳系内的天体外，人们还不可能直接接触或访问其他天体。即使离太阳系最近的恒星、半人马座 α ，也相距达 4.3 光年之遥。对太阳系外天体的了解，只有靠探测和分析它们射向地球的辐射所带来的信息。从这些天体辐射中，可以探索它们的物理性质和化学成分，以及它们的年龄、距离和运动速度等等，从而推演出宇宙整体结构和演化过程等重要知识。

天体来的辐射中，包含了全部电磁波段。从无线电长波、短波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线和宇宙线。覆盖的波长超过 27 个量级（图 1.1）。记录和分析这样宽的波长范围的辐射，需要使用不同的仪器设备。大致说来，各种探测系统都包含以下几个环节（图 1.2）。

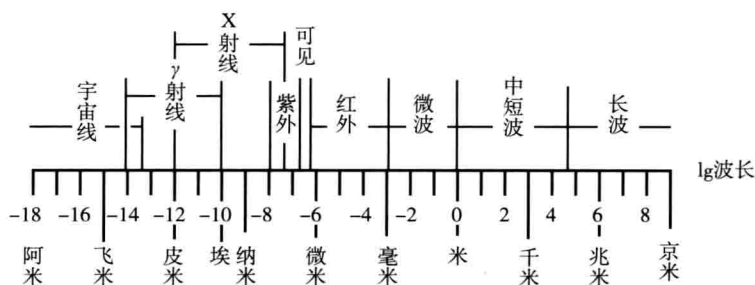


图 1.1 天体来的辐射包含全部电磁波段



图 1.2 探测系统所包含的几个主要环节

(1) 收集器。如望远镜，不同波段的天文望远镜有不同形式。目的都是提高收集该波段辐射的能力。

(2) 分析器。对收集到的辐射加以分析。根据需要，用适当手段记录下相应的信息，如光谱仪或频谱仪收集按波长展开成光谱的辐射，偏振计则检测电磁矢量的强度和振动模式等。

(3) 探测器。虽然都是探测电磁波，对各种波长的辐射敏感的探测器的原理和结构大有不同。大都通过各种物理或化学效应将之转换成电信号加以记录。

(4) 记录器。记录探测器输出的信号，方法很多。在计算机出现以后，大多数记录系统最终使用计算机以数字形式记录，不但保存方便，不会损坏，而且可实现实时监视和便于后期处理。

在各种波段的辐射中，可见光波段是人们最早认识和直接感觉到的辐射波段。人眼可探测的辐射波段大约在 380 ~ 680nm 之间。红外波段的辐射，通过热效应也能为人体所察觉。人的感觉仅是直观的印象，不能得到定量的数据，所以对这两类波段的探测，仍需要有效的探测器。其他的波段辐射则必须通过各种探测器转换后才能知道。本书专门讨论可见光探测器。

1.2 光子到达率

天体的辐射，以波动形式传递能量。光具有波粒两重性，因此，光同时可被看作由光子组成的粒子流。向短波方向一直延伸到 X 射线，以及波长更短的 γ 射线和宇宙线，用粒子概念较方便；而向长波方向，则较多以波动概念来讨论。能量和光子数都可以描述光流的强弱。

天体的辐射通过浩瀚的宇宙空间到达地球，以球面波的方式，与距离平方成反比的规律衰减。天文上用星等来表示亮暗。不同的星等系统，相互间有较大差别，各种天文书籍中都有介绍。单位时间、单位面积到达地球的光子数称为光子到达率。这是一个非常有用的数据。它和许多因素都有关系，如天体的颜色（光谱型）和星等系统等。艾伦的《天体物理量》(Allen G. W., 1973) 一书中给出了恒星射到地球大气外辐射通量。由此可推算光子到达率。作为例子，这里计算一种特定情况的光子到达率。（实际上，仅是一些单位变换的简单计算，但非常容易弄错。小

字括号内是各量所用的单位；大字括号内是最后结果的单位。)

艾伦给出，目视星等为 0，光谱型为 A0 的恒星在 300nm 处的通量 $\lg f_\lambda$ 为 -8.4 (f_λ 以 $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{\AA}$ 计)。

$$\text{光子能量 } E = hc/\lambda = 6.626 \cdot 10^{-27} (\text{erg} \cdot \text{s}) \cdot 2.997 \cdot 10^{10} (\text{cm/s})/\lambda (\text{nm}) \\ = 1.9858 \cdot 10^{-9}/\lambda (\text{nm}) (\text{erg});$$

$$\text{故光子到达率 } \xi = f_\lambda/E = 5.036 \cdot 10^8 \cdot f_\lambda (\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{\AA}) \cdot 10^5 \cdot \lambda (\text{nm}) \\ (\text{光子}/\text{m}^2/\text{s}/\text{nm});$$

对于 300nm，则光子到达率为 $5.036 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8.4} \cdot 10^5 \cdot 300 = 0.601 \cdot 10^8$ 光子/ $\text{m}^2/\text{s}/\text{nm}$ 。参见表 1.1。

表 1.1 目视星等 0 等的恒星可见辐射大气外的光子到达率

(单位: 10^8 光子/ $\text{m}^2/\text{s}/\text{nm}$)

波长 (nm)	光谱型					
	B0	A0	F0	G0	K0	M0
300	3.791	0.601	0.301	0.190		
350	2.791	0.625	0.442	0.351		
400	2.107	1.713	1.056	0.748	0.472	0.171
450	1.717	1.428	1.161	0.966	0.803	0.507
500	1.351	1.204	1.073	1.025	0.913	0.693
550	1.005	1.005	1.005	1.005	1.005	1.005
600	0.794	0.831	0.891	0.956	1.148	1.412
800	0.343	0.507	0.638	0.841	1.215	1.040
1000	0.187	0.382	0.503	0.694	1.076	1.666

注：艾伦原始数据缺 O0 型星。

1.3 大气的影晌

星光到达地球表面，必须先经过大气。大气对星象的影响有以下几个方面。

1.3.1 大气消光

星光穿过大气而产生的减弱，称为大气消光。大气对光的吸收非常大，几乎把大部分辐射阻挡掉。在光学波段，大气消光主要是大气中臭氧、氧、二氧化碳、氮、水分子和各种质点对星光的吸收，产生许多吸收线和吸收带。大气的主要成分—氮和氧—的吸收带遍布短于290nm的紫外波段，所以地面上无法观测紫外辐射。在可见区域，大气有较好的透明度。在380~680nm范围内，透射系数在0.3~0.9之间。在红外区，水、二氧化碳、臭氧以及甲烷和氧化氮的吸收，使红外的辐射只限于很少几个波带内才能到地面。红外观测在地面上只有在这些“窗口”内才能进行。大气密度随高度指数地减少，所含的水汽也迅速减少。所以，低层大气起主要消光作用。另外，低层大气本身也有红外辐射，将叠加在天体的辐射上，甚至淹没天体的微弱信号。红外观测站必须选择高而干燥的地点。至于被大气阻挡的波段，如紫外、X射线和 γ 射线等，则只有在气球、人造卫星和空间飞行器上才能观测。图1.3和图1.4分别是可见波段及红外波段到亚毫米波段大气透射系数和波长的关系。

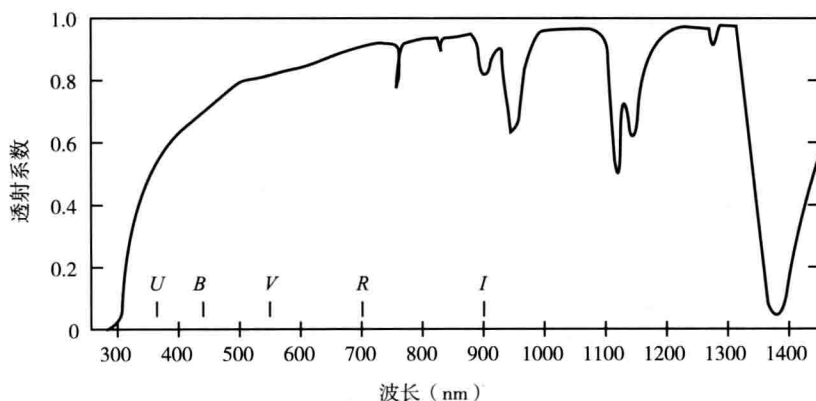


图 1.3 可见波段大气透射系数和波长的关系

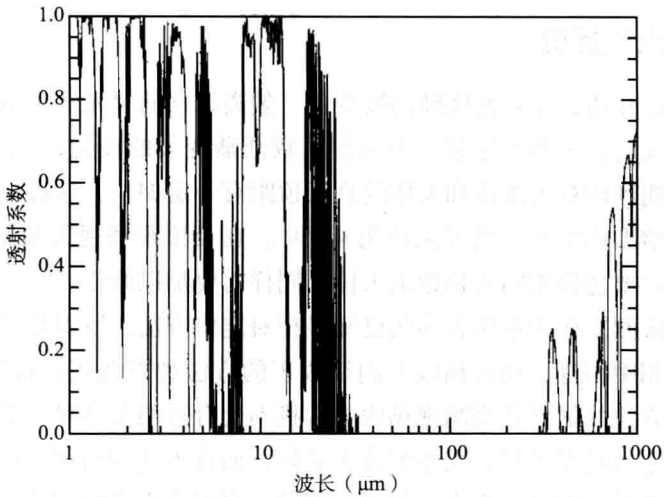


图 1.4 红外波段到亚毫米波段大气透射系数和波长的关系

天体因地球自转的缘故，东升西落，天顶距随时间改变。因此，星光通过大气的厚度也不同。如图 1.5 所示，天顶距小时，穿过大气厚度也小。地平附近，大气厚度最大，消光也最大。消光可以作定量改正，但大气情况极为复杂，改正精度不高，在接近地平时尤其如此。

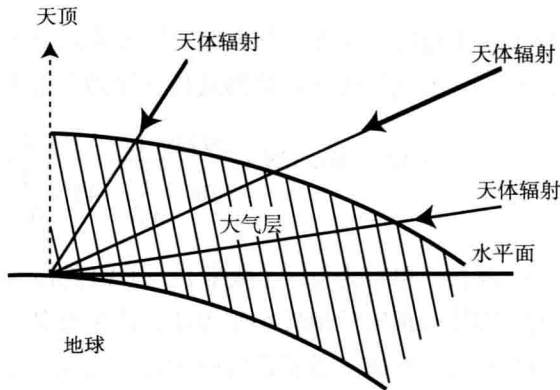


图 1.5 不同天顶距时星光通过大气的厚度不同