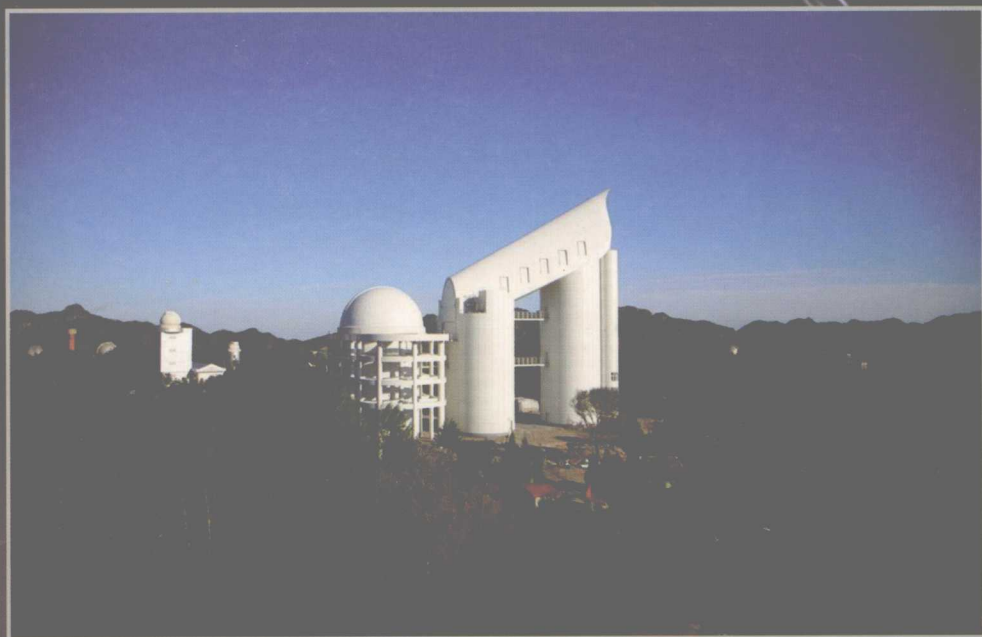


[英] C R Kitchin 编著  
杨大卫 等 译 胡景耀 等 校

# 天体物理方法

(原书第四版)



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



# 天体物理方法

(原书第四版)

[英] C R Kitchin 编著

杨大卫等 译 胡景耀等 校

本书由国家自然科学基金(10673002)资助出版

科学出版社

北京

图字: 01-2007-2254 号

## 内 容 简 介

全书共5章24节,涵盖了全部电磁波谱、宇宙线、中微子和引力波等各类信息源的探测技术、成像技术和数据处理技术,提供了对现代天文学与天体物理学所用设备与方法的全面而准确的理解。许多新的设备和方法是第一次论述,并且删除了一些专业和业余天文学家多年不用的内容(除“照相乳胶”外)。本书以“探测—成像—辅助设备”的模式为主线,整合了一批曾有分歧的观测方法,给读者提供了一个当代天体物理研究的统一视角。每一种方法的解释都从基本原理出发,并附有插图,力图能对读者的实际工作有所帮助。每章都提供了附有答案的习题来增强概念理解。最后一章新增了网站、虚拟天文台和在线资源等内容。

本书可供天体物理专业及相关专业的科研工作者和研究生参考,也可供天文爱好者参考。

All Rights Reserved.

Authorized Translation from English Language Edition Published by Taylor & Francis Group LLC.

### 图书在版编目(CIP)数据

天体物理方法(原书第四版)/(英)基钦(Kitchin, C.R.)编著;杨大卫等译.  
—北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023350-9

I. 天… II. ①基… ②杨… III. 天体物理—研究方法 IV. P14-3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 172805 号

责任编辑:王飞龙 胡 凯/责任校对:陈丽珠

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年7月第一版 开本: B5(720×1000)

2009年7月第一次印刷 印张: 26 1/4

印数: 1—2 000 字数: 505 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

# 序 一

天体物理既是天文学中的一个主要学科，又是物理学中的一个重要领域。在科学技术发展的现阶段，天体物理占有重要位置。子曰：“工欲善其事，必先利其器”。天体物理的发展必然需要大型望远镜、大型计算机等大型仪器设备，甚至需要空间飞行器，因而与高科技密不可分。它的发展也需要有深厚的理论基础和广博的知识。同时，它也必然拥有广大的爱好者，需要有大量的科学普及工作，这是人才涌现的基础。总之，它的发展需要不同层次的教育培养，也需要有观测和理论两方面的人才。

C.R.Kitchin 编著的教科书《天体物理方法》(*Astrophysical Techniques*)正适应了这两个方面的需求。该书主要讲述了天体物理上的观测设备、观测技术和分析方法，甚至还包括了高能天体物理和相对论天体物理上的许多新技术、新方法。书中也包括了对照相底片等一些较为古老内容的介绍，这对处理一些历史资料会有一定帮助。该书适合于该领域的科研工作者参考，但对于在读的大学生和研究生以及有一定基础的业余天文爱好者而言，该书也是一本好的参考书。

原书作者 C.R. Kitchin 是英国赫特福德郡大学天文台台长，也是该校物理与天文系教授。他在天文学与天体物理学领域的著作有十余部之多，他的著作得到了天文学和天体物理学界的广泛欢迎。

杨大卫教授等翻译的这本《天体物理方法》已经是该书的第四版了。杨大卫教授曾任中国天文学会第九届教育工作委员会副主任，长期从事天体物理的教学和科研，重视理论和实测的结合，对翻译也十分认真，并且有丰富的经验。这是一本很好的译作。相信该书的出版对于天体物理学的教学、科研和普及都是有意义的。

陆燮

于中国科学院紫金山天文台

2008.8.3 南京

## 序 二

### ——推荐一本好书

很高兴看到中文版的《天体物理方法》出版。这是由河北师范大学杨大卫教授等翻译的 C.R.Kitchin 所著的“*Astrophysical Techniques*” (第四版)。

近 20 年来, Kitchin 的多部著作连续出版, 并被世界各国译成多种文字, 说明它具有相当高的实用价值。在我国, 大家都希望在这方面有一本好书, 但要做到这一点很难。原因有二: 其一, 天体物理学发展至今, 它所使用的波段已覆盖了整个电磁波谱, 甚至还有中微子探测和引力波探测。要较好地了解这么多领域并作出正确阐述以用来作教科书的确不易。其二, 天体物理的观测技术发展太快, 要在教科书中跟上步调, 更实属不易。而 Kitchin 的这本书对此有相当全面的介绍, 甚至还包括高能天体物理和广义相对论天体物理的观测方法。当然, 该书对照相底片的介绍确实陈旧了, 即使对爱好者今后也可能意义不大。但是作为曾对天体物理的发现作过巨大历史贡献的记录工具, 这些介绍对整理百年来众多重要档案照片的工作还是有意义的。

杨大卫教授等翻译该书的认真态度令人敬佩。我看过他的全部手稿, 对一些问题多次推敲使得译文有了正确的表述, 对原文中某些存疑之处又多次讨论, 并专门向各有关行家请教, 听取了他们的建议。该书可以让从事天文研究的年轻人, 特别是研究生了解作为以观测为基础的天体物理学是如何取得资料的。对于理论工作者来说, 该书可以帮助他们了解哪些资料对解决问题是有用的, 并可帮助提出用什么手段来验证自己的模型; 而对于主要从事观测研究的工作者来说, 该书则可以帮助了解从众多可能取得资料的手段中, 选择何种手段对解决他们的问题更直接、更有用, 又如何通过何种观测来提高结果的可靠性。

多读书总是有益的。我希望该书对大家有帮助, 并感谢杨大卫教授的辛劳。

胡景珉

于中国科学院国家天文台

2008.6.29 北京

## 原著前言

本书旨在有条理地叙述当天文学和天体物理学中所用的仪器与技术。作者十分明白，虽然竭尽一切努力尽可能地使本书完整和新颖，但还会有许多疏漏或处理不当之处。对某些仪器的最终发展形式，尽可能给出详细的说明；然而即使如此，对于迅速发展的新天文分支学科，在本版的写作与发行期间，其细节也会变化。因此，对天文学的这些领域，只对支持其技术的原理作了笼统的介绍，以便读者从科学文献中查到详细的设计。

本书(第四版)第一次囊括了许多新设备和新技术，同时删除了某些无论是专业的还是业余的天文学家多年来都不曾使用的内容。而另一些内容，虽然在专业天文工作者的当前工作中不再使用，但是由于那些仍在使用的档案材料是利用这些设备和技术获得的，或是由于业余天文学家还在使用这些技术，故本书依然需要包括它们。对于新设备和新技术，在网站上已有一些参考文献(可查)，但并不多，尽管现在搜索引擎是如此之好。因为这些网站的变化是如此频繁，对大多数科学家，这种资源现在是第一次引入，此时他们仍心怀疑虑，大量的资料，如大规模巡天的数据，只不过是网上可用。此外，在最后一章论述了使用网络遥控望远镜以及由此组成的“虚拟”望远镜。

本书还试图消除目前天文研究的分割化倾向。观测各奇特区域频谱所需的新技术各自带来的概念和术语，事实上本是相同的，只不过这些东西从不同观点来讨论，却能给人以与基本过程十分不同的印象。例如，艾里斑和艾里环与射电蝶形天线的方向图，初看起来没什么关系，不过它们是对相同数据提出的两种不同的方法。因此，尽可能地将频谱与其延伸区域处理为一个单独的区域，比分成许多较小的学科要好。本书的编排还强调所有天文观测的基本统一；对此均采用“探测—成像—辅助手段”这种模式，所以会遇到某项观测的一个步骤与所有其他信息载体必需的类似步骤在一起。当然，这并不是一条绝对严格的规则，在某些地方，或是为了防止许多小节的重复，或是为了保持论述进行的连续性，似乎按序列之外的主题处理比较合适。

这些主题的论述水平适合具有科学基础的大学程度的读者。对论题所需的数学和物理学的预备知识尽可能在该节中给出或展开。作者认为，对于某些内容读者最好还是具备一些天文背景知识，这样才能完全理解所讨论的那项技术的意义。尽管本书是针对大学水平读者编写的，但任何一位学过中学数学课程的读者都能理解本书的大部分数学知识，况且本书还有一些非数学的章节。因此，许多天文爱好者会发现本书诸多内容既有用又有趣。前已提及的所谓天文学的“分割”，意味着还有

第三批读者会感到本书有用，这便是专业天文学家自己。书中的专题论述具有足够高的水准，并且以一种便捷且易接受的形式，为那些专家在他们并不完全熟悉的天文领域中提供相关技术信息的查询。

最后，我必须向许多天文学家和其他科学家致谢，本书中引用了他们的工作。在此不可能把他们的名字一一列出，在这里加进详尽的参考文献，不便于读者阅读。然而我愿乘此机会，向他们全体表示最深切的谢意。

C. R. Kitchin

## 标准符号表

本书所使用的大部分符号在首次出现时都已定义,并且在其后的有关章节中该定义也都适用。不过,在天文学中,有些符号已作为标准符号来共同使用。现把这些符号列于下表,当它们在正文出现时,将不再个别定义。

$u^{\text{D}}$	原子质量单位 $u = 1.6605 \times 10^{-27} \text{kg}$
$c$	真空中的光速 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$e$	电子电荷 $e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{C}$
$e^-$	电子符号
$e^+$	正电子符号
$\text{eV}$	电子伏特 $1\text{eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{J}$
$G$	引力常量 $G = 6.670 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
$h$	普朗克常量 $h = 6.6262 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
$k$	玻尔兹曼常量 $k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
$m_e$	电子质量 $m_e = 9.1096 \times 10^{-31} \text{kg}$
$n$	中子符号
$p^+$	质子符号
$U、B、V$	标准 UB $V$ 测光系统的星等
${}^A_Z\text{C}$	原子核的符号(以碳的同位素为例);上标是最接近整数的原子质量(以 $u$ 为单位),下标是原子序数。
$\gamma$	伽马射线的符号
$\epsilon_0$	真空电容率(介电常数) $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$
$\lambda$	波长符号
$\mu$	折射率的符号(也常用 $n$ )
$\mu_0$	真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
$\nu$	频率的符号(也常用 $f$ )

---

① 原文为 amu, 现按有关规定改为  $u$ 。——译者注



# 目 录

序一

序二

原著前言

标准符号表

第 1 章 探测器	1
1.1 光学和红外探测	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 探测器类型	1
1.1.3 人眼	2
1.1.4 半导体	6
1.1.5 探测器索引	10
1.1.6 探测器的各参量	10
1.1.7 低温恒温器	11
1.1.8 电荷耦合器件	12
1.1.9 照相术	21
1.1.10 光电倍增管	21
1.1.11 超导隧道结探测器	23
1.1.12 其他类型探测器	24
1.1.13 红外探测器	28
1.1.14 紫外探测器	31
1.1.15 未来可能的探测器	32
1.1.16 噪声	32
1.1.17 望远镜	35
1.1.18 望远镜设计	53
1.1.19 空间望远镜	64
1.1.20 机架装置	65
1.1.21 实时大气补偿	69
1.1.22 未来的发展	75
1.1.23 观测圆顶室、防护罩和站址	78
习题	79
1.2 射电与微波探测	80
1.2.1 引言	80
1.2.2 探测器与接收机	81
1.2.3 射电望远镜	85

习题	93
1.3 X射线与 $\gamma$ 射线的探测	93
1.3.1 引言	93
1.3.2 探测器	95
1.3.3 屏蔽	101
1.3.4 成像	102
1.3.5 分辨率和图像认证	108
1.3.6 能谱学	109
1.3.7 偏振测量	112
1.3.8 观测平台	112
1.4 宇宙线探测器	113
1.4.1 预备知识	113
1.4.2 探测器	114
1.4.3 实时测量方法	114
1.4.4 余迹探测器	119
1.4.5 间接探测器	122
1.4.6 阵列	123
1.4.7 各种改正因素	124
习题	126
1.5 中微子探测器	127
1.5.1 预备知识	127
1.5.2 氯-37 探测器	129
1.5.3 水基探测器	130
1.5.4 镓基探测器	134
1.5.5 闪烁体探测器	134
1.5.6 其他类型探测器	135
1.5.7 目前正运行和已计划的中微子探测器	137
习题	137
1.6 引力辐射	138
1.6.1 引言	138
1.6.2 探测器	140
习题	144
<b>第 2 章 成像</b>	145
2.1 反演问题	145
2.2 照相术	149
2.2.1 引言	149
2.2.2 照相感光乳胶的构成	150
2.2.3 照相成像	153
2.2.4 处理	157

2.2.5 敏化 .....	159
2.2.6 胶片的种类 .....	159
2.2.7 天文照相的方法 .....	160
2.2.8 照相影像的分析 .....	161
2.3 电子成像 .....	162
2.3.1 引言 .....	162
2.3.2 电视及相关系统 .....	162
2.3.3 像增强器 .....	163
2.3.4 光子计数成像系统 .....	165
2.4 扫描 .....	166
2.5 干涉测量 .....	169
2.5.1 引言 .....	169
2.5.2 迈克耳孙光学恒星干涉仪 .....	169
2.5.3 迈克耳孙射电干涉仪 .....	177
2.5.4 反射干涉仪 .....	180
2.5.5 综合孔径 .....	181
2.5.6 强度干涉仪 .....	187
习题 .....	189
2.6 斑点干涉测量 .....	190
2.7 掩星 .....	192
2.7.1 预备知识 .....	192
2.7.2 方法 .....	195
2.7.3 数据分析 .....	197
2.8 雷达 .....	198
2.8.1 引言 .....	198
2.8.2 原理 .....	198
2.8.3 装置 .....	202
2.8.4 数据分析 .....	203
2.8.5 流星 .....	205
习题 .....	205
2.9 电子图像 .....	206
2.9.1 图像的格式 .....	206
2.9.2 图像压缩 .....	206
2.9.3 图像处理 .....	207
<b>第 3 章 测光</b> .....	210
3.1 测光 .....	210
3.1.1 预备知识 .....	210

3.1.2	滤光片系统	212
3.1.3	恒星的参量	217
	习题	228
3.2	光度计	228
3.2.1	仪器	228
3.2.2	观测方法	233
3.2.3	数据的归算与分析	234
	习题	236
<b>第 4 章</b>	<b>光谱学</b>	<b>237</b>
4.1	光谱学	237
4.1.1	引言	237
4.1.2	衍射光栅	237
4.1.3	棱镜	246
4.1.4	干涉仪	256
4.1.5	纤维光学	266
	习题	267
4.2	分光镜	267
4.2.1	基本设计思想	267
4.2.2	棱镜分光镜	273
4.2.3	光栅分光镜	277
4.2.4	集成场分光术	279
4.2.5	多天体分光术	281
4.2.6	光谱学方法	282
4.2.7	今后的发展	285
	习题	285
<b>第 5 章</b>	<b>其他方法</b>	<b>286</b>
5.1	天体测量学	286
5.1.1	引言	286
5.1.2	预备知识	287
5.1.3	中天望远镜	289
5.1.4	照相天顶筒和超人差等高仪	290
5.1.5	测微计	291
5.1.6	天体照相机和其他望远镜	293
5.1.7	干涉仪	294
5.1.8	空基系统	294
5.1.9	探测器	296
5.1.10	测量与归算	297

5.1.11 巡天和星表	299
习题	299
5.2 偏振测量学	300
5.2.1 预备知识	300
5.2.2 偏振测量的光学元件	303
5.2.3 偏振计	311
5.2.4 分光偏振测量	315
5.2.5 数据的归算和分析	316
习题	317
5.3 太阳研究	317
5.3.1 引言	317
5.3.2 太阳望远镜	318
5.3.3 太阳分色观测镜	322
5.3.4 窄带滤光器	323
5.3.5 日冕仪	328
5.3.6 太阳热量计	330
5.3.7 太阳振荡	330
5.3.8 观测太阳的其他方法	331
习题	331
5.4 磁场测量	331
5.4.1 预备知识	331
5.4.2 磁强计	337
5.4.3 数据归算和分析	340
5.5 计算机和环球网	340
5.5.1 引言	340
5.5.2 数字化星空巡测	341
5.5.3 虚拟天文台	341
附录 A 北极星序暗星表及证认图	343
附录 B 儒略日	346
附录 C 习题答案	348
附录 D 首字母缩写词	350
附录 E 参考文献	358
索引	362
译后记	399

# 第 1 章 探 测 器

## 1.1 光学和红外探测

### 1.1.1 引言

本节及以下各节着重讨论辐射和其他信息载体的探测,以及使这些探测既简便又尽可能完善的各种仪器和方法。内容上不可避免地与其他章节有某种程度的交叉,也许某些设备放在其他的章节里讨论更加符合逻辑。在本节,望远镜是探测器本身必要的附件,用望远镜使点源成像的理论不仅是简单探测所需的全部内容,而且还让我们有许多方法导出展源成像的理论。为此,我们把两种理论放在一起讨论,尽管后者也许应该放在第 2 章讨论。还有一些其他的例子,如 X 射线能谱测量和偏振测量出现在 1.3 节里,而没有出现在 4.2 节和 5.2 节里。总的来说,作者尽量在全书遵循“探测—成像—辅助方法”的模式,但是个别问题没有按这个顺序进行讨论,这样在当时似乎更自然些。

光学区域可以包括近红外波段和紫外波段,大致覆盖范围为  $10\text{nm}\sim 100\mu\text{m}$ 。研究这个范围的物理过程和技术至少是彼此相似的,因此可以一起讨论。

### 1.1.2 探测器类型

在光学范围内,探测器分为两大类:热学的和量子的。这两者都是非相干的,也就是说,只能探测电磁波的振幅,失去了相位信息。而相干探测器通常用在长波段(见 1.2 节),其中被测信号与自身信号混频(外差原理)。光学外差技术只是最近才在实验室里开发出来,刚开始应用于天文学。所以,我们还可以认为全部光学探测器基本上还是非相干的。不过若有 3 台或更多台望远镜运用光学综合孔径技术(见 2.5 节),就可以获得一些相位信息。

在量子探测器中,光信号的各单个光子直接与探测器中的电子相互作用。有时记录单一检测(如光子计数),而在其他情况下则将探测积分后给出一个模拟输出,就像热探测器那样。量子探测器的实例包括人眼、照相乳胶、光电倍增管、光敏二极管和电荷耦合器件。

相比之下,热探测器是利用传感元件吸收辐射导致温度升高来探测的。它们一般不如量子探测器敏感,响应比较迟钝,不过它有很宽的频带响应。其实例有热电偶、热电探测器和热辐射计等。

### 1.1.3 人眼

毫无疑问，对于天文学家来说，虽然眼睛远非最简单的探测器，但却是最基本的探测器。尽管人眼在一些应用中所起的作用仍比得上甚至可能超过其他探测系统，可是现在很少用于主要的探测工作了。例如，对密近双星的研究和对行星的观测，人眼可以承担有价值的工作，但仍可用一些特殊的观测手段来代替，如干涉测量、光斑干涉测量和行星空间探测器。更普遍的是，在用其他探测器研究天体的过程中，必须用目视方法来寻星和(或)导星，何况大众及大多数职业天文学家们凝视星空是为了享受一种乐趣。因此，了解眼睛，特别是它的缺陷对这些过程所能产生的影响还是重要的。

须知，只根据基本的光学原理来简单地考察人眼将会误入歧途。在目视过程中，眼睛和大脑同时工作，所给出的结果比光学上等效的照相机系统给出的结果可能更好也可能更差，这取决于具体条件，如在视网膜上的像是颠倒的，且具有色差(图 1.1.30)，不过这些影响可以由大脑来补偿。而高反差(高对比度)的目标或接近分辨极限的结构，如行星凌日和所谓的“火星运河”，就可能会被“看”错。

眼睛的光学原理如图 1.1.1 所示，且为大家所熟知，故不再赘述。视网膜上的感光细胞分为两种(图 1.1.2)：探测颜色的锥状细胞和对明暗(黑白)感受具有较高灵敏度的柱状细胞。光先通过神经连接(细胞)的外层，再到达这些感受器<sup>①</sup>。在柱状细胞中有一种叫做视紫质(rhodopsin)的色素(其颜色看起来是紫色的)吸收辐射。该

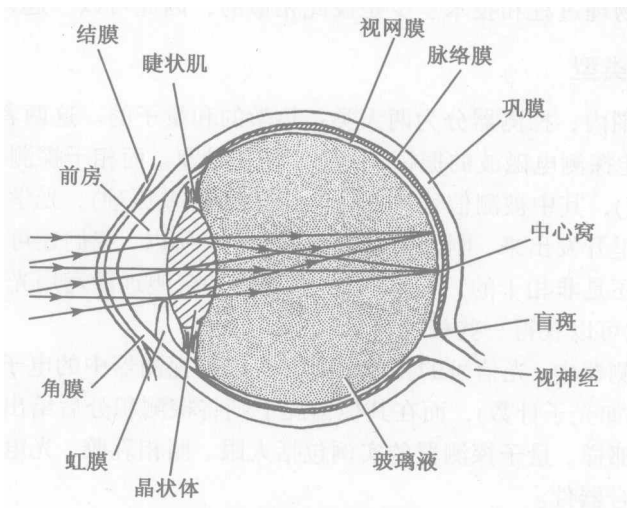


图 1.1.1 人眼纵截面的水平光路图

<sup>①</sup> 注意图 1.1.2 中人射光的方向。脊椎动物视网膜由于胚胎发育上的原因是倒置的，即光照到视网膜时先透过神经连接细胞，后到达光感受器，产生信号后再由神经连接细胞组成的视神经传到大脑。这似乎不符合人体的“节约”原则，但因神经细胞透明度很高，并不影响成像的质量。——译者注

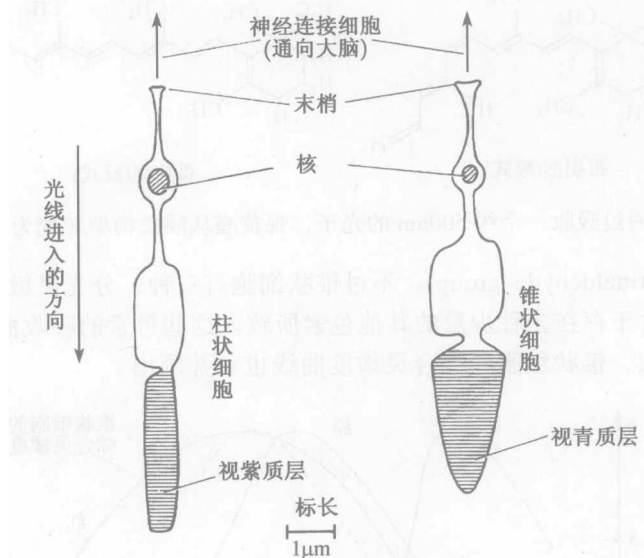


图 1.1.2 视网膜上的感光细胞

色素是一种分子质量约为 40 000u 的复杂蛋白质，其吸收曲线如图 1.1.3 所示。这些分子在柱状细胞内分层排列，大约 20nm 厚、500nm 宽，重量可达该细胞净重的 35%。在光的影响下，其中一小片会脱离，这一小片载色体(chromophore)是一种维生素 A 的衍生物，被称作视黄醛(retinaldehyde)，其分子质量为 286 u，其双键中的一条会吸收光子在 1ps( $10^{-12}$ s)内从顺式构型(cis)变为反式构型(trans)(图 1.1.4)。剩下的部分是一种叫做视蛋白(opsin)的无色蛋白质。在视紫质分子分裂过程中的某个阶段会产生瞬间的视觉刺激，但其确切机制尚不清楚。这种反应引起感光细胞膜对钠离子渗透性能(可渗性)的改变，进而导致细胞电势的改变。这一电势变化通过神经细胞传播到大脑，此后视紫质分子会缓慢地再生，锥状细胞的响应大概也有类似的机制。在锥状细胞中，发现了一种叫做视青质(iodopsin)的色素，这种色素也含

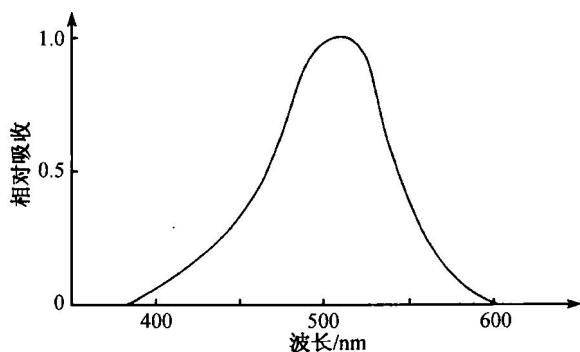


图 1.1.3 视紫质吸收曲线



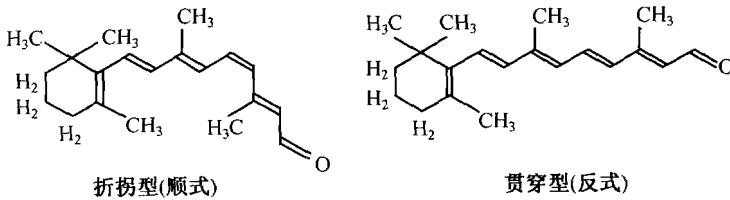


图 1.1.4 通过吸收一个约 500nm 的光子，视黄醛从顺式构型转变为反式构型

有视黄醛基 (retinaldehyde group)。不过锥状细胞有三种，分光灵敏度特性各不相同，这似乎是由于存在多种少量的其他色素所致。这些色素的吸收曲线如图 1.1.5 所示，作为比较，锥状细胞的综合灵敏度曲线也一并画出。

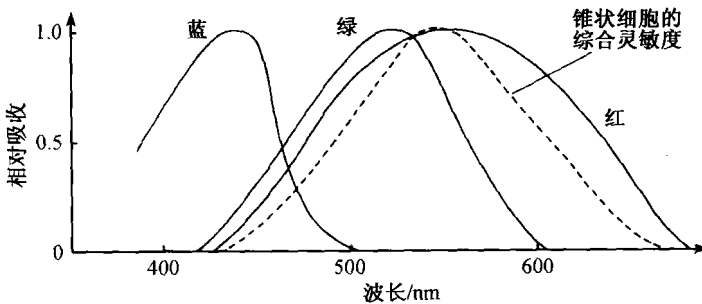


图 1.1.5 锥状视觉细胞中各种色素的吸收曲线

在强光下，柱状细胞中的许多视紫质分裂为视蛋白和视黄醛，因而其灵敏度大为降低。尽管锥状细胞的灵敏度仅为柱状细胞最高灵敏度的 1% 左右，可视觉<sup>①</sup>还主要是由锥状细胞提供的。三种锥状细胞的联合作用才产生了对颜色的视觉。在低照度情况，只有柱状细胞才能被辐射所触发，产生对(黑白)明暗的视觉。柱状细胞和锥状细胞的综合灵敏度曲线是不同的(图 1.1.3 和图 1.1.5)，前者的峰值为 505~510nm，而后者为 550~555nm。视觉灵敏度的这种移位现象叫 Purkinje 效应。它会给双星观测带来一个问题，即与冷而暗的伴星相比，热而亮的主星的星等要被低估，反之亦然。当你从明亮的房间进入黑暗的观测室后，柱状细胞中的视紫质大约需要半个多小时才慢慢地重新形成，其灵敏度因此而提高。在黑暗中呆上几分钟，你就会比起初所辨认的东西更多，这就是人们所熟知的暗适应现象。对观测而言，灵敏的视觉是重要的，因此为获得最佳效果，在正式开始观测之前半小时就应该避免强光。为了使“暗适应”的“损失”减到最小，大多数天文台都只用暗照明，且通常只用红光。

天文观测通常是柱状细胞的视觉起作用。一般对已经适应了黑暗的眼睛，激发

① 包括明视觉和色视觉。——译者注