

天体物理学方法

南京大学数学天文学系天体物理学教研室 编

上海科学技术出版社

天体物理学方法

南京大学数学与物理学系天体物理学教研室 編

編寫者

戴天賽	阮璋	孫大
黃佑綏	方成	李春生
蘇定強	孫凱	史央

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是根据南京大学数学天文系的讲稿改編而成的,共分輻射接受器,天体光度学,天体分光学,射电天文方法,太阳的观测,行星和卫星的观测,彗星和流星的观测以及恒星大小和质量的测定等八章。前四章介绍了天体物理学領域内的基本观测方法和有关仪器;后面四章討論了观测太阳和太阳系内其他天体的方法及有关仪器,还討論了恒星大小和质量的测定方法,此外并适当介绍了观测和分析处理的結果。

本书可作为綜合大学天文专业的教科书以及天文和物理学工作者的参考书。

簡 裝 本 說 明

本书原以 850×1168 1/32 开本排印,为了节约用紙,暫以 787×1092 1/32 开本印刷,定价相应减少,希鉴諒。

天 体 物 理 学 方 法

南京大学数学天文学系天体物理学教研室 編

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出033号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

上海大东集成联合印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印張 17 4/32 插頁 9 字數 420,000

1962年3月第1版 1962年3月第1次印刷

印數 1-1,000

統一書號: 13119 · 452

定 价: (十) 1.85 元

序 言

“天体物理学方法”一书是我校多年来教学实践的产物，它的前身是“普通天体物理学”讲义。这份讲义是1959年集中我室教师编写的，在编写过程中，主要参考了下列教材：

1. 苏联普尔柯沃天文台编：天体物理与恒星天文教程。
2. 苏联专家西特尼克(Г. Ф. Ситник)教授在南京大学的讲稿。
3. 南京大学原有的“普通天体物理讲义”，等等。

“普通天体物理学”这门课程在1955年就开设了。为了进一步提高教学质量，保证循序渐进，在1959年重新编写了讲义以后，1960年又对课程内容作了某些调整。原“普通天体物理学”的课程内容比较庞杂，有部分内容不很恰当，经过调整以后，把其中大部分叙述性的内容放到“天文学教程”中，以充实专业基础课；部分内容放在“理论天体物理学”中讲授，而将课程改称为“天体物理学方法”。这样既避免重复，又能讲得透彻、深刻。

“天体物理学方法”着重介绍天体物理学的基本观测方法和观测仪器，介绍研究和观测太阳及太阳系内其他天体的方法，并适当介绍有关观测结果及近代天体物理学的新成就。

根据这一精神编写的教材，第一章由孙凯编，第二章由黄佑然编，第三章由陈载璋编，第四章由李春生编，第五章由章振大编，第六章由苏定强编，第七章由方成编，第八章由戴文赛编。这次被推荐出版，由陈载璋、黄佑然、方成、卢央等同志进行了修改，并增添了若干插图、照片、附录、附表和实习指导。

由于我们的政治、业务水平有限，教学经验不足，书中一定有不少缺点和错误，希望读者提出批评和指正。

南京大学数学天文学系天体物理学教研室

1961年5月

目 录

序言

緒論	1
第一章 輻射接受器	5
§ 1.1 人眼	6
§ 1.2 照相原理	11
§ 1.3 照相底片特性	16
§ 1.4 彩色照相	25
§ 1.5 光电仪器	28
§ 1.6 温差电偶	42
第二章 天体光度学	46
§ 2.1 星等概念	47
§ 2.2 大气消光	51
§ 2.3 光度测量的衡消法	65
§ 2.4 目視光度测量	71
§ 2.5 照相光度测量	72
§ 2.6 光电光度测量	83
§ 2.7 热輻射测量	93
§ 2.8 色指数、热指数和热改正	98
§ 2.9 星等表和星等标准	105
第三章 天体分光学	108
§ 3.1 棱鏡摄譜仪	109
§ 3.2 棱鏡摄譜仪的特性	114
§ 3.3 天体摄譜仪	118
§ 3.4 光譜分析	124
§ 3.5 視向速度的測定	133

目 录

§ 3.6	影响视向速度的各种因素	136
§ 3.7	显微光度计	142
§ 3.8	单色仪	147
§ 3.9	分光光度测量	152
§ 3.10	恒星光谱分类法	158
§ 3.11	恒星大气内的激发和电离	169
§ 3.12	分光视差	175
§ 3.13	分光光度温度	178
§ 3.14	谱线轮廓和等值宽度	182
§ 3.15	生长曲线	188
第四章	射电天文方法	193
§ 4.1	宇宙射电辐射的特征和观察仪器	194
§ 4.2	天线的基本原理和参数	199
§ 4.3	射电望远镜的接收机	222
§ 4.4	射电强度测量	230
§ 4.5	射电干涉仪	235
§ 4.6	偏振测量	250
§ 4.7	频谱测量	253
§ 4.8	天文雷达的原理	257
§ 4.9	利用雷达研究月球、行星和太阳	266
§ 4.10	流星的雷达观测	280
第五章	太阳的观测	288
§ 5.1	太阳常数的测定	288
§ 5.2	太阳望远镜	294
§ 5.3	太阳的连续光谱	306
§ 5.4	太阳的吸收光谱	314
§ 5.5	利用火箭和人造地球卫星观测太阳	324
§ 5.6	黑子	334
§ 5.7	米粒组织和光斑	342
§ 5.8	太阳单色光观测仪器	346
§ 5.9	色球层、谱斑和耀斑	361
§ 5.10	日珥	371

§ 5.11	日冕	374
第六章	行星和卫星的观测	388
§ 6.1	对观测仪器和地点的基本要求	388
§ 6.2	行星和卫星的观测方法	392
§ 6.3	行星和卫星大小和质量的测定	403
§ 6.4	行星自转周期的测定	407
§ 6.5	行星和卫星大气的研究	411
§ 6.6	行星和卫星的累积光度及反照率	414
§ 6.7	行星表面的温度和气候	419
§ 6.8	行星和卫星的内部结构	423
第七章	彗星和流星的观测	427
§ 7.1	彗星的发现和彗头的形状	428
§ 7.2	彗星的光度测量	431
§ 7.3	彗星的分光观测	434
§ 7.4	彗核	436
§ 7.5	彗尾的观测	439
§ 7.6	流星观测的意义和条件	444
§ 7.7	流星的观测方法	447
§ 7.8	流星几个主要量的测定	455
第八章	恒星大小和质量的测定	472
§ 8.1	测定恒星大小的几种方法	473
§ 8.2	目视双星质量的测定	482
§ 8.3	分光双星质量的测定	487
§ 8.4	交食双星子星半径和质量的测定	496
§ 8.5	质量、光度和半径的关系	503
§ 8.6	恒星的密度	505
实习指导	509	
一、	观测日晕	509
二、	恒星照相光度测量	511
三、	天体光谱分析	514
四、	单色仪的调节	518

目 录

五、照相分光光度测量	522
六、太阳黑子的光电观测	525
附录	529
I. 望远镜的几个基本参数	529
II. 显影液和定影液配方	530
III. 光度学的基本概念	533
IV. 从热力学的有关原理推导 G 和 A 的关系式	535
V. 大气质量表	537
VI. 标准视向速度表	540
VII. 星等表	542
VIII. 电离电势及光谱型关系表	546
IX. 哈佛分类法	548

緒 論

天体物理学是天文学的一个部門，它应用物理学的技术和理論来研究各种天体的物理性质和化学組成。在天文学的各个部門中，天体物理学是建立和发展得比較晚的。最先发展的是天体測量学，它的主要任务是研究精确測定天体位置的方法和如何把測定結果应用于測量制图、航海、航空和天文学的理論研究工作。其次是十七世紀后半世紀开始发展起来的天体力学，其主要任务是研究在万有引力和其他力的綜合作用下，天体的运动規律。十八世紀末叶出現了天文学的另一个部門——恒星天文学，其主要任务是通过恒星的方位、距离和运动情况的統計分析，研究恒星系統的结构和运动。十九世紀中叶分光术、測光术和照相术广泛应用于天体的观测研究以后，才产生了天体物理学。天体物理学虽然比較晚才建立起来，但一百多年来它发展得很快，研究范围也不断地扩大。

在1666年，牛頓就用三棱鏡得到太陽的光譜，发现太陽光的复合性，但到了1802年，沃拉斯頓 (Wollaston) 在棱鏡前面加上一個狹縫以后，才发现太陽光譜中的吸收綫。德国光学家方和斐



hofer) 制造了分光鏡，用它来仔細观测太陽光譜中的吸收綫。1858年克希霍夫說明了吸收綫产生的原因。方和斐和克希霍夫的工作为天体分光学打下了基础。到了十九世紀七十年代照应用于恒星的分光观测以后，恒星光譜的研究才开始发展

元前二世紀，依巴谷在观测恒星編制星表时，就已經把恒星

的亮度用自己任意規定的等級記錄下來。公元二世紀，托勒玫在編制星表時也這樣做，他把肉眼能看到的星按照亮度分為六等。但星等的精確定義一直延到十九世紀中葉才規定。菲克納 (Fechner) 和韋伯 (Weber) 發現了表示出亮度和人的感覺的關係的“心理生理定律”以後，普森 (Pogson) 於 1856 年建議把相鄰兩個星等的亮度比值定為 $\sqrt[5]{100}$ ，即 2.512。這個建議得到了普遍的採納。1859 年崔爾納 (Zöllner) 製造出一種適合於天體光度測量的光度計，使天體測光結果更加精確。照相術應用於天體的觀測以後，目視測光以外多了照相測光。應用光電技術於天體的光度測量則是二十世紀的事情。

1727 年德國舒耳策 (J. H. Schultze) 發現銀鹽一見光就變黑。到了 1839 年，法國達蓋爾 (L. J. Daguerre) 才發明了照相術。1845 年費佐和佛科拍攝到第一張太陽的照片，照片上有幾個黑子。1851 年布施 (Busch) 在日全食時拍攝到日冕的照片。1859 年哈佛天文台邦德 (Bond) 首先利用照相方法來進行恆星的測光。十九世紀七十年代，照相術開始廣泛地應用於天體的觀測，包括恆星光譜的分類工作。一直到今天，照相術仍然是天文學研究中的一種重要工具。

二十世紀開始以後，物理學的迅速發展，尤其是原子物理學、原子核物理學、量子力學和相對論的建立和發展，為天體物理學提供了分析觀測資料的強有力的理論工具。

通過天體的光度測量和分光研究，可以判明天體的物理狀態和在天體上進行着的各種物理過程，決定天體的各種物理量——光度、質量、大小、溫度、壓力、磁場強度、自轉速度、視向速度，等等，也可以決定天體的化學組成。

天體物理學常分為實測天體物理學和理論天體物理學兩個部分。實測天體物理學研究天體物理學中的基本觀測技術、所用儀

器的原理和結構，以及觀測結果的處理方法。理論天體物理學則根據觀測結果，運用理論物理學來研究恆星大氣結構、內部結構、能量來源、天體上不穩定過程的本質（包括變星光度變化和新星發亮的原因）等等問題。天體物理學方法即實測天體物理學，本書的內容就是實測天體物理學的內容。

恆星離地球都很遠，可以當為點光源。對它們進行天體物理研究主要就是分析它們發出來的光綫：測量星光的總強度以及在各個不同波長處的強度。星光在到達望遠鏡和輻射接受器以前，通過了廣闊的星際空間，受到星際彌漫物質的散射和吸收；進入了地球大氣以後又受到大氣質點的消光。因此對星光強度的每次測量結果，無論是總強度或者是分光強度，都需要做星際消光和地球大氣消光的改正。這類改正的方法也是實測天體物理學的具体課題。

太陽、月球、行星、彗星以及體積龐大的星云都具有可以測量的視面，可以分別測定視面上個別部分的亮度和分光強度。為了詳盡地觀測太陽，本世紀開始以來先後發明了許多種专用的儀器，例如太陽單色光照相機、太陽單色光觀測鏡、干涉偏振濾光器、日冕儀、磁象儀，等等。對於流星，有专用的流星照相機；對於星云，有星云攝譜儀。所有這些儀器的結構和使用方法也是實測天體物理學的討論內容。

波長短於 2900 埃的紫外光綫和波長長於一萬埃的紅外光綫受到地球大氣分子嚴重的吸收。但是在波長從一厘米到十米左右的無線電波段里，地球大氣的吸收不厲害。過去沒有注意到這一點，到了 1931 年才發現了由天體發出來的無線電輻射。本世紀四十年代天文學中便出現了一個新的部門——無線電天文學，也稱為射電天文學。把射電天文學當做天體物理學的一個分支是完全可以的，因為無線電電子學也可以當為物理學的一個部門，射電天文學就是運用無線電電子學的方法來研究天體的物理性質。本書

的第四章就專論射电天文学方法。但十多年来射电天文学发展得很快，內容愈来愈丰富，有些研究課題已經超出了天体物理学的範圍，而是較接近天体測量学（例如測定射电源的准确位置，利用射电点源的觀測決定經緯度和時間）或恒星天文学（例如利用中性氫 21 厘米发射綫決定銀河系的自轉情况和旋臂位置），因此目前都把射电天文学和天体物理学并列为天文学的分支。

各种新技术在天体物理研究上的应用，不断給这門科学以新的生命力。除了射电天文技术以外，光电成象技术在天体物理觀測上也有其无限的前途，它可以大大提高觀測的效率。自动記錄光电分光光度計在經過进一步改进以后，也有可能大大提高天体分光光度測量的效率。电子計算机的应用，使恒星內部結構和恒星模型研究中极为繁重的計算問題得到解决。探空火箭里携带的自动摄譜仪已經成功地拍摄到太阳的远紫外区光譜。宇宙航行时代的到来使得有可能到地球大气外对月球、行星、太阳、恒星、星云和星系进行觀測。今后天体物理学的发展必将比过去更为迅速。

利用天体物理学方法所获得的日益丰富的觀測数据是人們为了認識宇宙、掌握宇宙中物质运动和发展規律，以及解决天体的起源和演化問題所需要的最重要的資料。天体物理学的发展对于人們建立科学的宇宙觀——辯証唯物主义的宇宙觀——起了很大作用。

第一章 輻射接受器

直到目前为止，人們还不能直接接触到地球以外的其他天体（除隕石外），即使星际航行发达后人們不久就可以到太阳系的一些天体上去直接研究它們，可是对于广大的恒星世界至少在比較长的时期内还不能去直接研究它們，因而对于天体的研究，直到目前为止，最主要的还是依靠来自这些天体的輻射（如可見光、无綫电輻射、紫外綫和紅外綫輻射），人們就是通过对这些天体的輻射的研究来观测天体的运动、变化，分析它們的物理过程、化学成分。因此本书首先談用来接受天体輻射的各种仪器設備。

輻射不能够直接測量，而須轉变为其他形式，利用輻射接受器測量。常用的能量轉化形式有下列几种：

(1) 光化学效应：輻射引起物质的化学变化，如照相底片。

(2) 光电效应：如光电管、光敏电阻等光电元件把輻射能变为电能。

(3) 热效应：元件受到輻射作用，温度升高。例如測輻射热計等就是把輻射能变为热能。

(4) 螢光效应：天体輻射能轉变为其他物质的輻射能，波长范围起了变化，螢光屏就属这一类。

不論根据哪一种能量轉化形式的輻射接受器，在分別研究以前，我們首先应当了解它們的一般性质（共性），以选择对某項工作最适合的元件。

(1) 选择性：光敏物质对不同光譜区的同等能量有不同的反应。因而任何輻射接受器都有选择性，只有热輻射接受器对很广

闊光譜區的輻射都起反應，所以可近似地認為它是無選擇性的。

(2) 輻射能和輻射接受器的反應之間的對應性：對同一光譜區的輻射能，輻射接受器的反應同輻射能的比率受很多因素的影響，並不一定是固定的，它決定於接受器本身的性質和外界條件。對於光電效應和熱效應元件，採用的測量綫路不同，這一比率也會改變。對同一光譜區，當輻射能的量改變時，這個比率固定不變，就說這種輻射接受器具有綫性的標度；否則，就說是具有非綫性的標度。

對於某些非綫性標度的輻射接受器，可以利用適當測量綫路，使標度接近於綫性的；相反的，在某些條件下，綫性標度也可能被破壞。因此，在實際工作中必須預先研究在不同條件下，輻射接受器的反應和輻射能的关系。通常由實測得出特性曲綫，用來描述這一比率的变化情況。

(3) 靈敏度和靈敏度閾：輻射接受器的靈敏度是指單位功率的輻射流所引起的輻射接受器的反應（對人眼、光電管等），或單位能量的輻射所引起接受器的反應（對照相底片）。對單色輻射流測得的靈敏度就稱為分光靈敏度。剛剛可以引起輻射接受器反應的最小輻射流或輻射能，稱為這一接受器的靈敏度閾。

(4) 反衬靈敏度：輻射接受器的反衬靈敏度可理解為在輻射流 Φ 作用時，輻射接受器能反應出輻射流最小改變 $\Delta\Phi$ 的本領。反衬靈敏度在數值上等於 $\Phi/\Delta\Phi$ 。容易看出，反衬靈敏度代表測量的相對精度。

本章將討論幾種輻射接受器的特性和功能。

§ 1.1 人 眼

在天文學歷史上，首先用來作為輻射接受器的是人的眼睛。現代已有同人眼分光靈敏度幾乎相同的輻射接受系統。由於星光

的閃爍和星象的抖動，只有人眼才能辨別出天體良好的象和觀察其細節，因此目前仍利用目視方法來觀測太陽、行星和月球等。人眼的成象系統使外界物體在網膜上產生實象。

網膜上有兩種光感元素——圓錐細胞和圓柱細胞。這些細胞內的光化學作用對神經的刺激，就使人看到東西。這兩種光感元素的作用並不相同：圓柱細胞對光最敏感，但不能感受光的顏色；圓錐細胞對顏色很敏感，但對光不很敏感。當光較強時，圓錐細胞起主要作用，稱為白晝視覺。當物體亮度約小於 5×10^{-3} 爾格/厘米²·秒·球面度 (3×10^{-3} 烛光/米²) 時，就只有圓柱細胞起作用，稱為黃昏視覺。因此眼睛的分光靈敏度是會改變的。

下面介紹眼睛的一些特性：

1. 眼睛的適應 不同的照度作用在眼睛上，眼睛的靈敏度會自動改變，這種本領稱為適應。眼睛在亮度改變很大的範圍（約 10 倍）內都能夠適應。

適應有兩種形式：對光的適應和對昏暗環境的適應。這兩種適應都需要一些時間。對光亮環境的適應比較快（幾分鐘），這說明白晝視覺恢復得較快。對天文工作者來說，昏暗環境的適應特別重要，一般在暗環境中停留相當長的時間（大約 40~60 分鐘），才能獲得這種適應。同時，在觀測的時候，眼睛應該避免強光的照射，否則測量質量將會顯著降低。在微弱照度下（適應了昏暗環境時），為了避免微弱天體輻射過多的損失，望遠鏡上測量儀器的出射光瞳應不超過 8 毫米，以配合人眼瞳孔。

2. 眼睛的一般靈敏度和分光靈敏度 眼睛的靈敏度閾 Φ_M 的數量決定於適應的情況，實驗得到 $\Phi_M \approx 2.5 \times 10^{-16}$ 瓦特，這是一般人所能覺察到的最小輻射。

確定眼睛的一般靈敏度和分光靈敏度時，首先測量某一輻射流 Φ 和 Φ_λ （對單色輻射），以功率的絕對單位表示。對輻射流進行

目視測量，可得到同这个輻射流对应的光流大小，用 F 和 F_λ 表示。对应于輻射流 Φ ，眼睛的一般灵敏度 K 和分光灵敏度 K_λ 可写成下列形式：

$$K = \frac{F}{\Phi}, \quad K_\lambda = \frac{F_\lambda}{\Phi_\lambda}. \quad (1.1)$$

显然，分光灵敏度就是单位功率輻射流使眼睛在某一波长 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 范围引起的反应。

在測定眼睛分光灵敏度时，一般不用绝对单位而用相对单位来表示，也就是用某一固定波长处的灵敏度的比值来表示，这个波长常为分光灵敏度曲线极大值处的波长值 λ_0 。設 V_λ 表示眼睛的相对分光灵敏度，則

$$V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda_0}}; \quad (1.2)$$

其中， K_{λ_0} 是在波长 λ_0 处用绝对单位表示的分光灵敏度。在决定分光灵敏度时，只須对灵敏度极大值处的一个波长 λ_0 进行绝对測量就够了；如果知道了对各种不同波长的量 V_λ ，就很容易决定这些波长的绝对分光灵敏度 K_λ 。对于白昼视觉，极大灵敏度对应的波长 $\lambda_0 = 5550$ 埃，绝对分光灵敏度 $K_{\lambda_0} = 621$ 流明/瓦特；对于黄昏视觉， $\lambda_0 = 5100$ 埃。

对于 V_λ 的測定已获得大量資料，从这些資料中求得 V_λ 的平均值，国际上采用这个平均值为正常人眼的分光灵敏度。图 1.1 表示白昼和黄昏视觉正常人眼的相对分光灵敏度曲线。由图中灵敏度曲线不难看出，波长 6550 埃的紅光輻射功率几乎等于 5500 埃的綠光輻射功率的 9.3 倍时，才引起相同的光感。由白昼视觉向黄昏视觉过渡时，整个灵敏度曲线向光谱紫端位移。在黄昏视觉情况下，眼睛对藍色的光感相对地灵敏些，这叫作普尔金耶现象。在对强度和顏色都不相同的輻射流进行比較时，普尔金耶现象将使观测产生严重的系統誤差。因此，在輻射流的强度和顏色

都相差很大时，依靠光的衡等法进行定量的测量实际上是不可能的。但是在同一个光谱区比较两个光源时，这些困难就消除了。单色光源的目视测量能得到足够准确的结果。应该尽可能对分光组成相近的辐射源进行比较，这是准确目视测量的基本原则。

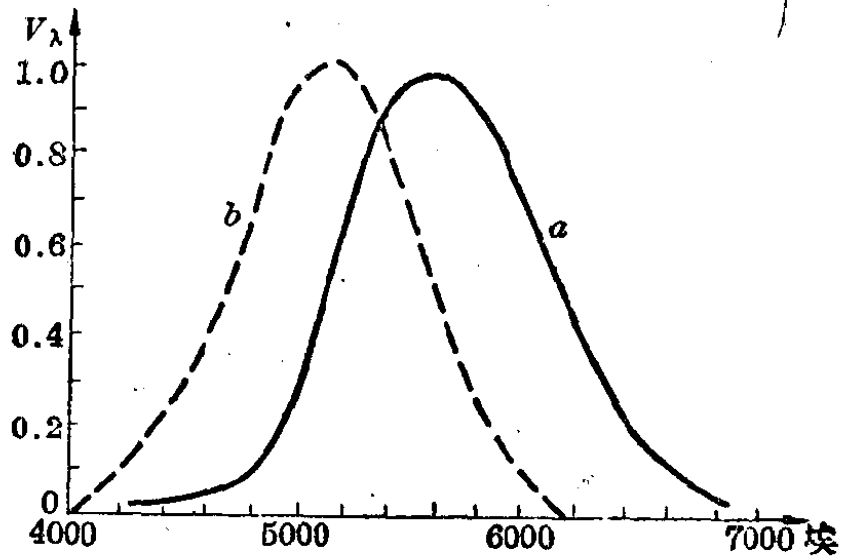


图 1.1 白昼视觉(a)和黄昏视觉(b)的分光灵敏度曲线

3. 眼睛的反衬灵敏度 反衬灵敏度表示眼睛能觉察出亮度差别的本领。它不仅同眼睛的适应情况及观测者有关，也同被观察物体的大小有关。被观察物体的反衬通常表示为

$$\Gamma = \frac{B_1 - B}{B} = \frac{\Delta B}{B}, \quad (1.3)$$

其中， B_1 是物体的亮度； B 是背景的亮度。能感觉出的亮度最小差别 ΔB_0 和背景亮度的比率称为反衬阈 Γ_0 ，

$$\Gamma_0 = \frac{\Delta B_0}{B}. \quad (1.4)$$

反衬阈的倒数称为眼睛的反衬灵敏度，即

$$\gamma_0 = \frac{1}{\Gamma_0} = \frac{B}{\Delta B_0}. \quad (1.5)$$

研究结果表明反衬阈 Γ_0 和背景的亮度有关。

4. 人眼的分辨本领 人眼的分辨本领就是它分辨角距很小