

太阳十讲

胡文瑞 赵学溥 编著

科学出版社



55.54
391

太阳十讲

胡文瑞 赵学溥 编著

361/53

斜



内 容 简 介

太阳是太阳系的中心天体。近年来,由于科学技术的突飞猛进,在研究太阳和太阳系的天体方面有了长足的进步。本书从太阳的概况、太阳能源、太阳对流层、太阳磁场、太阳色球、日冕层、太阳活动、日球层、日地关系和行星探索等十个方面给以详细的论述。为读者提供了一个清晰的概要,并为研究太阳的人员提供了一个背景材料。本书是一本雅俗共赏、图文并茂的读物,可供具有中等文化程度的广大青年、天文爱好者,中等学校的地理教师阅读和参考。

太 阳 十 讲

胡文瑞 赵学溥 编著

责任编辑 黎昌顺

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1987年6月第一次印刷 印张: 14 1/2

印数: 0001—2,800 字数: 278,000

统一书号: 13031·3517

本社书号: 4725·13—5

定价: 2.60 元

目 录

前 言	1
第一章 太阳的概况	3
一、认识太阳而历经艰辛	5
二、群星中的太阳	11
三、太阳的总体性质	18
四、太阳光谱	22
五、宁静太阳模型	34
第二章 太阳能源	41
一、核能的释放	42
二、太阳核聚变	47
三、太阳中微子短缺	54
四、中微子疑难的解释	60
五、日震学	65
第三章 太阳对流层	75
一、能量从核心传递到表面	76
二、太阳对流层结构	83
三、对流层中的波动	91
四、对流层的大尺度运动	98
五、对流层过程在光球的表现	104
第四章 太阳磁场	110

一、太阳黑子磁场	111
二、太阳磁场的结构	119
三、太阳磁流体力学	125
四、黑子磁场的作用	136
五、太阳发电机过程	141
第五章 太阳色球和过渡区	150
一、色球结构	151
二、针状体结构	161
三、色球活动区	169
四、色球——日冕过渡区	175
五、加热机制	181
第六章 日冕层	189
一、日冕光的性质及平均日冕层模式	192
二、日冕层的空间结构	198
三、日冕层磁场	203
四、冕洞	211
五、冕环	223
六、日冕加热	228
第七章 太阳活动	236
一、太阳活动区	237
二、活动日珥	244
三、太阳耀斑	251
四、太阳的变化	260
五、日冕瞬变	267
第八章 日球	277
一、大尺度磁场和大尺度太阳风变化	280

二、长期变化	290
三、共转流共转激波与瞬时流瞬时激波	294
四、磁流涨落和间断	306
五、日球中等离子体次要成分和宇宙线	311
六、太阳风理论	327
第九章 日地物理	334
一、地球磁层概述	335
二、磁层中的磁场和电场	339
三、磁层中的等离子体和能量粒子	351
四、地球磁层中的等离子体波	363
五、热层——电离层	371
六、太阳——气象关系	376
第十章 行星探索	390
一、行星的一般性质	390
二、行星表面和大气	396
三、行星磁场和等离子体	416
四、太阳系起源	433

前 言

太阳是恒星家族中的普通一员，它有着行星系统，并在地球环境下演化出各种各样的生物。太阳的典型性使它成为一个样板，通过它可揭示出恒星世界的奥秘。

人们的生活与太阳休戚相关。日地体系的相对运动规律发展成了天体力学，而哥白尼的日心学说冲破了两千年的宗教束缚，揭示了天体运行的规律，为牛顿力学的发展奠定了基础。随着科学技术的发展，出现了新型的天文仪器和观测手段，同时也发展了新的太阳物理学科。近百年来，原子物理学和量子力学促成了太阳和恒星光谱学的研究；等离子体物理学的发展促成了太阳和宇宙射电天文学；近年来的空间探测开创了空间天文学的新时代；粒子物理学又蕴育着中微子天文学。新的观测方法和结果，不断扩展的观测波段，给人们认识太阳提供了丰富的信息。

日球是从太阳外层大气一直延伸到恒星际空间交界面的整个空间区域。日球物理不仅对于日地关系是极为重要的，而且对于探索太阳和恒星环境也是重要的。随着近日和深空卫星的探测以及许多地面观测的资料积累，日球的大尺度结构，三维位形，电流的分布、太阳风传播等正在成为人们关注的课题。探索日球的结构及其中的动力学过程将是今后一

段时间空间物理学的重要内容。

有时，人们曾经自信对于太阳的结构和状态已经认识得很清楚了。但是，新的观测结果不断地对许多甚至是经典的观念提出了挑战。可以预见到，这种挑战还会不断增加。太阳物理是个经典的研究领域，而今又充满了新鲜的活力。日球物理是一门新的学科，在空间物理学中是一支突起的新军。

本书的目的在于介绍太阳和日球的来龙去脉，它们中间的主要过程的观测和理论解释，特别是近来的新发展。我们将这本书献给广大的读者，希望它能帮助希望了解一般情况的人得到一个清晰的概念，为从事这方面研究的人提供一个背景性的材料，使有志于解答各种挑战的人知道目前研究的进展。作者的目的是将本书写得雅俗共赏，因此尽量不用数学公式来描述过程，而采用图文并茂的方式解释问题的始末。王家龙教授仔细阅读了全书手稿，并提出了许多宝贵意见，谨此致谢。由于作者水平有限，不妥之处在所难免，请读者不吝指正。

中国科学院力学研究所 胡文瑞

北京大学地球物理系 赵学溥

1984年6月于北京

第一章 太阳的概况

在银河系中有千千万万颗恒星，太阳是这千千万万颗恒星家族中的一员。它的年龄不老也不少：它的质量既不太大，也不太小：它的表面温度既不太热，也不太冷；总之，是一颗普普通通的恒星。正是这种普通性使太阳在恒星家族中颇有代表性，往往用太阳的有关值来度量其他恒星。例如，我们常说其他恒星的质量是多少太阳质量，其他恒星的亮度是多少太阳亮度，等等。就是太阳与地球之间的距离也被定义为一个天文单位，表示成 AU，

$$1 \text{ AU} = 149597892 \text{ 公里，}$$

粗略地讲就是一亿五千万公里。当然，用天文单位度量太阳系内部的长度还很合适，要用它去量恒星之间的距离，这把尺子就太小了，需要用光年。一光年就是光子以每秒三十万公里跑一年的距离，写成 ly，

$$1 \text{ ly} = 9.460530 \times 10^{17} \text{ 公里} = 63239.728 \text{ AU.}$$

在天文测量上常用地球轨道上张的角来描述恒星的距离，如图1.1所示。除太阳外，其他恒星距我们遥远，张角最多只有秒的大小。一秒张角的距离称为一个秒差距，记为 pc，

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AU}}{\tan(1'')} = 3.0857 \times 10^{13} \text{ 公里.}$$

所以，其他恒星与我们的距离至少超过日地距离几十万倍。其中只有太阳才是可以进行仔细观测的唯一恒星，为我们揭示恒星世界的奥秘提供了难得的样板。

正是由于太阳比其他恒星离地球近得多，太阳辐射的能量、发射的粒子流以及延伸出的磁场不仅主宰着行星际环境，也控制着人们赖以生存的地球空间。例如，太阳的活动和变化就直接影响着地球的天气和气候。因此日地关系学所讨论的有关太阳与地球环境之间的联系，已成为当代科学的重要领域。在1990年前后，国际合作开展的“国际日地物理”计划，将同时发射多颗卫星，有监测行星际的卫星，有的在地球极区考查，还有观测赤道附近和深空磁尾的卫星。这些卫星同时探测将会有助于分析太阳和地球之间的耦合过程。人类社会已迈进到空间开发的时代，越来越多的空间站将会应运而生。这时，理解太阳和预报它的活动将会变得象我们今天研究和预报天气一样重要。

太阳上有着丰富的物理现象：例如，太阳核心的热核反应过程启发人们去探索核聚变能源，太阳上的耀斑过程帮助我们去理解巨大能量的储存和转换，太阳上声波的激发和传播机理被用来研究声爆和噪音。人们曾经以为，太阳上的现象大多有定论了。然而近年来，随着观测仪器的精度提高，特别是空间探测的进展，许多太阳和恒星的经典理论被打上了问号，一些传统的观点受到了严重的质疑。于是，太阳上的现象又显示出巨大的魅力，吸引着人们的注意。

一、认识太阳而历经艰辛

太阳是蕴育着人类文明的天体，与人们的生活休戚相关。日月星辰每天和我们交往，时刻影响着我们的生活。浩瀚的宇宙神奇多姿，我们对宇宙的认识则始于太阳和太阳系。甚至在远古的年代，游牧民族和农业民族为了确定季节，就需要了解昼夜长短，寒暑变化，潮汐泛滥，日月蚀等等。标定时间和编制历法已成为古今中外天文学的一个重要任务。早在两千多年前，我国天文学家就用土圭来测量太阳阴影的变化，从而定出一年有365.25天。河南省登封的古观象台相传建于公元前十三世纪，至今仍保存着。由于天文观测的发展，中国对于编历，以及观测和预报日、月食的研究都作出了卓越的贡献。在公元前2000年，中国就有日、月食的纪录，历代王朝都设有观测天象的官员。而古希腊天文学的鼎盛时期处于亚里士多德时代前后，大约是公元前300多年。

历法和日月食涉及到日地月三个天体之间的相对运动。尽管我国在这些领域中有巨大的实际贡献，但长期以来用“天圆地方”的宇宙观却很难认识天体运动的规律。古希腊的学者，以阿里斯塔卡为代表，曾提出过地球绕着太阳运动的说法。公元前二世纪，海帕卡斯提出地球位于宇宙中心，日月都绕地球转动。大约三百年以后，也就是公元140年，托莱梅发表了行星表，仍以地球为太阳系之中心天体，太阳绕地球作圆周运动。这种地心说持续统治了1400年，它特别

适合当时宗教的需要，变成宗教服务的工具。诚然，从日心说变到地心说是一种学术认识的退步。但是，古希腊的日心说带有很强的推论成分，它的主要根据是太阳质量比地球大。当建立在精密计算周转圆轨迹的地心说提出来以后，地心说取代了原始的日心说是不奇怪的。到了公元1530年，哥白尼提出了近代日心说，计算和论证了当时发现的六个行星都围绕着太阳转动。关于这场日心说与地心说的激烈斗争是人所共知的。宗教政治的干预使得一个学术争论变成了一场生死存亡的斗争，而梵蒂冈当局不得不在350年后的今天，为哥白尼平反昭雪，以了却这场冤案。

哥白尼的学说预示着人们对天体的运动规律将有实质性的认识。果然，1609年，开普勒发现了行星运动的规律，发表了开普勒三定律：首先，行星绕太阳作椭圆运动而不是圆运动，太阳位于椭圆的一个焦点；其次，行星与太阳连线所扫过的扇形面积在每个确定时间间隔内是相同的；第三，行星转动周期的平方正比于它与太阳平均距离的三次方。开普勒继承和发展了哥白尼创立的近代日心说，而且为牛顿力学体系的创立奠定了基础。牛顿力学是描述宏观物体非高速（比光速小）运动的基本体系，它也是由三大定律构成：物体不受力时，静者恒静，动者匀速运动；物体加速度与受的力成正比；作用力与反作用力大小相等，方向相反。牛顿三大定律成功地对物体宏观运动的实质进行了科学的概括，使人们对物质运动规律的认识发生了质的飞跃。1687年，牛顿发表了他的万有引力定律，指出两个物体之间的引力正比于

它们的质量 m_1 和 m_2 ，反比于它们之间距离 r 的平方，作用于两物体联线的方向，即

$$f_g = -G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

其中 $G = 6.672 \times 10^{-8}$ 达因·厘米²/克²为引力常数。这样，行星绕着太阳转动，月亮绕地球运动都可以用离心力与引力之间的平衡来描述，即

$$-m_1 r \omega^2 = -G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

其中 m_2 为中心天体的质量， m_1 是环绕天体的质量。上式也可以表示为

$$\omega = \frac{\sqrt{Gm_2}}{r^{3/2}}.$$

这表明，环绕天体的角速度 ω 与天体之间距离的 $3/2$ 次方成反比，这就是开普勒第三定律。

以牛顿的力学原理和万有引力为基础，发展起一门研究天体的运动和平衡的科学，叫做天体力学。天体力学首先分析了太阳系中诸天体的运动规律，成功地解释了行星绕太阳的运动，卫星绕行星的运动，彗星的运动轨迹等许多现象。今天，天体力学已应用到卫星工程之中，成为实用性的科学技术问题。在理论上，研究许多天体组成的体系受引力相互作用的运动规律，小范围的如日地月三体问题，大范围的如一个星系中恒星组份的集体行为，这些用天体力学方法研究的问题仍在吸引人们的注意。天体力学至今仍是天文学的一

个活跃分支。还应指出一件历史事实。牛顿力学建立以后取得了广泛的成功，但有一例外。1856年法国的勒威耶仔细地计算了水星的轨道，得到水星近日点每世纪进动 527 角秒。但是，水星近日点进动实际是 565 角秒。这个天体力学上的小差异促使爱因斯坦的相对论的诞生，成为广义相对论的三大验证之一。

在十七世纪初，伽里略就开始用望远镜观测天体。望远镜开拓了人们的视野，开始成为天文学的主要观测工具。但是，早期的望远镜观测还是限于力学和形态的范围，观测更遥远的天体，观测太阳和行星表面的一些结构。在十八世纪，牛顿用三棱镜把太阳光色散成连续光谱。到了十九世纪初，夫琅和费发现了几百条太阳光谱线。在 1859 年，基尔霍夫解释了夫琅和费线产生的原因，并且证实了太阳大气的元素化学组分。原子物理学和量子力学的理论揭示了物质辐射现象的本质，太阳光谱提供了越来越多的太阳信息，开创了太阳物理学的发展。1869 年让桑和洛基尔把太阳摄谱仪和太阳单色光观测镜或太阳单色光照相机配合起来，首次拍摄到太阳单色光像。1908 年，美国天文学家黑尔成功地测量了太阳黑子磁场；不久又测量到太阳普遍磁场。大量观测表明，太阳磁场在太阳黑子、太阳大气结构和活动过程中往往起着决定性的作用。1930 年李约发明了日冕仪，使太阳外层大气的观测可以在非日食的情况下进行。1941 年，李约又发明了双折射偏振滤光器，成功地拍摄了太阳的单色光，使人们可以研究太阳的中层大气，标志着很大的一次技术飞跃。太阳光

谱给出太阳大气从光球经色球到日冕的结构和热力学状态。谱线的轮廓又给出太阳大气中的磁场，运动速度以及湍流状态的大量情报。近百年来的太阳观测和理论的侧重点已经从力学转到了物理学的内容。

人们越来越认识到太阳黑子在太阳物理中的重要作用。在西方，人们长期忽视太阳黑子。亚里士多德认为太阳是完美无缺的因而不会有黑点的观点一直延续到十七世纪。当伽利略用望远镜观测到太阳黑子时，这个观测结果又和宗教的教义抵触。与此相反，中国的封建皇朝相信“天人感应”，极为重视天象中的灾变现象。我国从公元前28年开始，历代正史中都有太阳黑子的肉眼观测记录，成为宝贵的古天文资料。西方的黑子观测记录始于十七世纪，并一直持续到现在。大量观测显示出黑子变化的规律性，以及黑子变化与地面的气候和灾害性自然现象之间的关系。1843年，斯韦伯提出太阳黑子呈现11年周期。1852年，沙邦恩、沃耳夫和古替尔发现太阳黑子周期与磁暴之间的联系。1858年，卡林顿发现太阳黑子周期中黑子的纬度飘移。1861年，斯波勒尔得到黑子随时间分布的蝴蝶图。东方的肉眼观测记录与西方的望远镜观测记录一起，给出了太阳黑子的变化规律，进而也揭示了太阳的活动。这些资料对于理解日地关系以及解释地球环境的风云变化是很重要的。

在第二次世界大战期间，作为一种新型的国防技术，雷达装置迅速发展起来。另一方面，从三十年代开始，磁流体力学和等离子体物理学也迅速地发展起来，它们都是研究导

电流体的行为以及其与磁场之间的相互关系。以等离子体物理的理论和实验为基础，结合雷达装备这种新技术，形成了天文学的一个新的分支——射电天文学。1942年，英国防空部队的雷达在4到6米的波长范围受到干扰。分析发现，这种干扰来自太阳发出的射电辐射。以后，人们就开始分析太阳射电的性质，发展了太阳射电的理论，各国在战后又陆续设计和制造了专门观测太阳射电的望远镜。太阳射电天文学扩展了光学观测的波段，使我们更好地了解太阳外层大气中的等离子体行为。特别是，在太阳耀斑过程中伴随着许多不同类型的射电爆发，分析这些射电的流量和谱可提供许多耀斑爆发过程的等离子体状态和运动的参数，已成为必不可少的资料。另一方面，宇宙射电的结果则给出了许多高能量、大尺度结构的天体形态和过程，成为当代天文学的前沿阵地之一。

近二十年来，由于空间飞行器大量发射，现在已进入了空间时代，空间天文学应运而生。由于地球大气的吸收，地面的光学设备不能接收到太阳紫外和X射线等短波辐射。空间飞行器在地球大气层外，可以直接观测太阳紫外(UV)，远紫外(EUV)，软X射线和硬X射线的辐射，发现了许多新的现象。六十年代发射了一系列太阳轨道天文台卫星，对太阳各个波段进行了探测。1973年的天空实验室计划进行了许多高分辨率的太阳观测。1980年太阳峰年使者卫星从几个不同的波段对太阳活动区和耀斑进行同时观测，对太阳耀斑的爆发过程有了新的认识。1990年前后将开展国际日地物理

合作计划，同时发射许多卫星，有的飞向太阳极区，有的飞近太阳，有的在磁层内的不同区域。此外，精度为100公里左右的太阳高分辨率X射线和紫外观测卫星也正在计划之中。大量的空间探测发现了冕洞。日冕瞬变事件等新现象；探测了太阳大气的能流，改变了对太阳耀斑的传统观念；空间观测还以比地面观测高得多的分辨率揭示了太阳大气的精细结构和运动过程。空间飞行器还飞出了地球磁层，遨游在行星际空间，直接测量太阳发出的波动、辐射、粒子流和磁场。空间探测已成为观测太阳的重要手段。

从我们认识和了解太阳的历史过程可以看出，我们对太阳的认识来自对太阳的观测，观测方法和观测手段发展一步，就提出一些新的现象和问题，促使发展新的理论去解释它们。反之，理论上又不断提出新的要求，发展新的观测方法和手段。正是这种互相促进的过程，加深了人们对太阳上各种现象的认识。尽管观测已经有了长足的进步，尽管对太阳的观测比其他恒星要细致得多，但我们现在对太阳的认识和理解仍很不够。许多看来很简单的问题也使人迷惑不解，各种各样的挑战性问题不时地出现，使人不知所措。这就是目前的现状。

二、群星中的太阳

人们对恒星的了解是基于观测恒星大气的光谱，我们利用光谱来对恒星进行分类就是很自然的了。恒星光谱分类法是一种经验的方法，不同的人采用不同的判据。但是，恒星