

现代太阳物理丛书

太阳物理导论

林元章 著



科学出版社

现代太阳物理丛书

太阳物理导论

林元章 著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书对太阳物理学的各个领域作了比较全面和系统的论述, 全书共十章, 内容包括绪论、太阳观测方法、太阳能源和内部构造、太阳自转和对流、太阳振动、太阳大气(光球、色球、日冕和太阳风)结构、太阳大气中各种活动现象(黑子、日珥和耀斑等)的物理过程, 以及日地关系和太阳活动预报问题。此外, 书中第五章(太阳电动力学)则集中讲述了太阳物理所需的等离子体物理和磁流体力学有关知识。

本书可作为高等学校和科研单位天文专业本科生和研究生的太阳物理教材, 以及空间物理、地球物理、物理和等离子体物理等非天文专业毕业生和研究生进入太阳物理研究领域的入门读物。本书也可供天体物理、空间物理和其他有关学科的科研工作者参阅。

图书在版编目(CIP)数据

太阳物理导论/林元章著. —北京: 科学出版社, 2000.12

(现代太阳物理丛书/艾国祥主编)

ISBN 7-03-008760-7

I. 太… II. 林… III. 太阳物理学-研究 IV. P182

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 55193 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

西源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 12 月 第 一 版 开本: 850×168 1/32

2000 年 12 月 第一次印刷 印张: 19 1/2

印数: 1—2 000 字数: 511 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈北燕〉)

《现代太阳物理丛书》序言

现在呈现给读者的，是由我国太阳物理学界同仁编著的系列学术专著——《现代太阳物理丛书》。它覆盖当代太阳物理研究的主要前沿领域，汇集了太阳物理学的主要观测发现和理论成就，反映了近年太阳物理研究的最新进展，包括我国学者的贡献。

太阳是一颗普通的恒星。在显示恒星分类的赫罗图，即光谱型和光度分布的散布图上，太阳位于主序星的中部，光谱型是G2V。就恒星参数而言，太阳在组成宇宙的恒星大家庭中极其普通。正因为这样，研究太阳对认识恒星的形成、演化、内部结构和外层大气有典型的意义。另一方面，太阳是离地球最近的恒星，为我们提供了足够的亮度，使其成为一颗唯一可被高空间分辨、高时间分辨、高光谱分辨，并且有高灵敏度观测的恒星。众所周知，夫琅禾费太阳光谱研究和原子谱线塞曼分裂对黑子磁场的诊断，实际上标志了近代天体物理学的发端。太阳物理研究涉及粒子物理、量子辐射理论、等离子体物理、流体和磁流体力学、计算物理等基础物理学科。

太阳研究的唯一性还在于，它在自己的第三颗行星——地球上孕育了智慧的人类。太阳是决定人类生存的日地环境的母体。太阳至少30亿年来一直保持稳定的光度。同时，激烈的太阳活动及其周期变化，又影响和调制着人类生存的环境。在人类活动早已扩展到地球之外的今天，研究太阳活动又成为认识人类地外的可居住性和预报日地环境中灾变事件的基本要求。众所周知，不息演化的太阳磁场在巨大的空间尺度产生不稳定性 and 灾变过程。太阳耀斑释放的磁能相当于几十亿次核爆炸的能量；而由磁场驱动的日冕物质抛射，每次将数十亿吨的磁化等离子体抛入日

球空间。激烈的太阳活动引起地球磁场和电离层强烈的扰动，导致短波无线电通信中断、供电系统破坏、长距离输油管道过早损坏、空间飞行器发生故障、宇航人员健康受到伤害以及远距离导航失灵等破坏性事件。实时地监视和预报太阳活动事件及其对人类环境的影响，已经成为太阳物理工作者和日地物理工作者的一个最富有挑战性的任务。组织这套丛书的目的之一，是为研究空间环境，提供更好的观测和理论基础。

早在公元前 28 年，中国就有了目视太阳黑子的正式记录。曾经创造了灿烂文化的中华民族，为世界天文学的发展做出了重要的贡献。当 1987 年，由中国天文学家独立研究和创造性发展的中国太阳磁场望远镜投入工作，中国的现代太阳研究开始步入国际前沿领域。在中国改革开放的今天，随着综合国力的增加，“发展空间天文，探索太阳奥妙”的新的任务，又历史地落在当代中国太阳物理学者的身上。这套丛书的撰写和出版，是中国太阳物理学家成熟的标志，也是中国太阳物理学家信心的象征。中国的太阳物理和日地物理工作者有能力抓住机遇，面临新世纪的挑战，为在科学技术领域再创辉煌做出自己的贡献。

艾国祥

1998 年 6 月

前 言

对于本书的撰写，作者有如下几点考虑，也可以说是指导思想 and 着意突出的特色，现略予说明。

1. 论述宁静太阳与太阳活动的篇幅的比例，大体上应是 3:2。虽然当前对太阳活动的研究远比对宁静太阳的研究活跃，但其争议也更多；而宁静太阳则是理解太阳结构和物理过程的基本框架，其争议成分较少。因此认为，作为太阳物理导论，对于比较经典的宁静太阳的论述（第三、四、六、七章）在篇幅上稍为超过太阳活动方面（第八、九章和第十章的一部分）是合适的。

2. 第一章绪论是对太阳的粗略描述，相当于一幅肖像画开始的粗线条素描。这样的安排有很大好处。它不仅可以使读者对太阳首先有一个宏观的总体概念，而且由于引入许多术语和定义（如太阳的分层结构、宁静太阳概念和各种太阳活动现象等），为以后各章的分别仔细阐述带来很大方便。

3. 要有太阳观测手段的专门论述。对于以实测作为理论分析基础的太阳物理学，一定要有相当分量的篇幅来专门讲述对太阳的观测手段。为此而安排的第二章主要介绍各种太阳观测设备的基本原理，而且限于地面光学观测仪器。至于太阳的红外观测、射电观测和空间观测，会在这套丛书的相关专著中详细介绍。

4. 在太阳大气结构和太阳活动的论述中，会涉及许多等离子体物理和磁流体力学的基本知识。这些知识的集中讲解显然比分散讲述更为可取。因此在第五章中着重讲述了对太阳物理最重要的宇宙等离子体的基本特性、磁流管、等离子体中的波动和粒子加速机制等预备知识。

5. 对太阳物理的各不同领域要有比较全面的介绍。除了对

太阳大气结构和能量传输过程以及太阳活动现象等传统课题，要有较大篇幅的论述外，对于国内学者很少涉足而在国外颇为热门的研究领域（如太阳中微子“亏缺”问题、太阳振动和太阳发电机理论等），也给予适当篇幅的介绍。

6. 本书的主要目标是为太阳提供一幅比较清晰的物理图像。因此，着重于阐述各种物理概念和基本原理，为此有时采用启发式的半定量介绍（例如对流层的混合长理论和太阳风的径向速度推导等），而不作过分复杂的精确数学描述，也避免如某些参数的多种测量方法之类的冗长叙述。不过，对于重要的严格理论处理和关键参数的测量结果，会尽量提供有关文献。

7. 加强太阳磁场和电流方面的论述。对于各种太阳现象所作的辐射转移描述仍然占有相当大篇幅的同时，对于近年来在国内外非常活跃的太阳磁场和电流研究领域给予了特别的重视。例如关于太阳高层大气磁场的理论外推、日面小尺度磁场、太阳活动区磁场非势性的表示和电流推算，以及它们与耀斑的关系等，均有较多篇幅的介绍。

作者衷心感谢艾国祥院士对写作本书所给予的鼓励和支持。在本书撰写过程中，从不同方面得到汪景琇教授、傅其骏教授、张洪起教授、王家龙教授、唐玉华教授、赵仁扬教授，以及王华宁博士和张军博士的热忱帮助，作者同样向他们表示诚挚的感谢。

最后，作者也感谢家人的全力支持。没有他们的关照和支持，本书将难以顺利脱稿。

林元章

1999年12月22日于中国科学院北京天文台

《现代太阳物理丛书》编委会

主 编 艾国祥

副主编 汪景琇

编 委 方 成 张柏荣 张和祺

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 研究太阳的意义	(1)
§ 1.2 太阳的基本参数	(2)
§ 1.3 太阳分层结构	(5)
§ 1.4 太阳活动与宁静太阳	(7)
§ 1.5 太阳自转.....	(10)
§ 1.6 太阳辐射.....	(14)
§ 1.7 太阳磁场.....	(19)
§ 1.8 日面坐标.....	(23)
太阳物理综合性参考书	(27)
第二章 太阳观测方法	(28)
§ 2.1 地面光学观测中的视宁度.....	(29)
§ 2.2 太阳照相机和白光高分辨观测.....	(31)
§ 2.3 色球望远镜和双折射滤光器.....	(34)
§ 2.4 大型太阳望远镜的成像系统.....	(39)
2.4.1 地平式定天镜装置	(40)
2.4.2 垂直式(塔式)定天镜装置	(41)
2.4.3 定日镜装置	(42)
2.4.4 追日镜装置	(43)
2.4.5 赤道仪式装置	(44)
2.4.6 经纬仪式装置	(44)
§ 2.5 太阳光谱仪和太阳单色光照相机.....	(47)
2.5.1 光栅光谱仪	(47)
2.5.2 太阳单色光照相机	(50)
2.5.3 阶梯光栅光谱仪	(50)

2.5.4	Fourier 变换光谱仪	(51)
2.5.5	二维光谱仪	(52)
§ 2.6	太阳速度场观测设备	(53)
§ 2.7	偏振和磁场测量	(57)
2.7.1	太阳光谱线的 Zeeman 分裂	(57)
2.7.2	偏振光的 Stokes 参数表示法	(62)
2.7.3	Stokes 轮廓和 Stokes 转移方程	(63)
2.7.4	强磁场的总强度和极性测量	(66)
2.7.5	光电磁像仪	(67)
2.7.6	照相磁像仪	(69)
2.7.7	视频磁像仪 (磁场望远镜)	(70)
§ 2.8	日冕仪	(74)
§ 2.9	多通道太阳望远镜	(75)
§ 2.10	空间太阳观测	(78)
§ 2.11	太阳射电观测	(82)
	参考文献	(85)
第三章	太阳内部构造和能源	(87)
§ 3.1	确定太阳内部构造的基本方程	(87)
3.1.1	质量、压力和能量平衡方程	(87)
3.1.2	能量转移方程	(89)
3.1.3	物态方程	(94)
§ 3.2	太阳的化学组成和平均原子量	(96)
§ 3.3	太阳的能源	(101)
§ 3.4	太阳内部物质的吸收系数和不透明度	(106)
§ 3.5	标准太阳模型	(112)
§ 3.6	太阳中微子发射及其探测	(115)
3.6.1	太阳中微子流量理论估算	(115)
3.6.2	太阳中微子探测实验	(117)
§ 3.7	非标准太阳模型	(119)
§ 3.8	太阳演化	(122)

3.8.1 主序星前阶段	(123)
3.8.2 主序星阶段	(124)
3.8.3 主序星后阶段	(125)
参考文献	(126)
第四章 太阳的自转、对流和振动	(128)
§ 4.1 太阳自转和子午环流	(128)
§ 4.2 太阳内部对流的观测证据	(133)
4.2.1 米粒组织	(133)
4.2.2 超米粒组织	(136)
4.2.3 中米粒组织	(138)
§ 4.3 混合长理论和对流层模型	(140)
§ 4.4 太阳振动的理论描述	(146)
4.4.1 确定太阳振动的基本方程	(146)
4.4.2 各种振动模式及其传播特征	(151)
4.4.3 几个重要的近似关系	(156)
4.4.4 自转对太阳振动的影响	(158)
§ 4.5 太阳振动的观测	(159)
4.5.1 有空间分辨的观测	(162)
4.5.2 无空间分辨的观测	(165)
§ 4.6 日震学研究结果和问题	(170)
4.6.1 日震学中的直接模拟和反演	(170)
4.6.2 日震学研究取得的一些结果	(171)
4.6.3 日震学研究存在的问题	(173)
参考文献	(177)
第五章 太阳电动力学	(180)
§ 5.1 宇宙等离子体的一些基本特性	(181)
5.1.1 感应电场和感应方程	(181)
5.1.2 磁场扩散与冻结	(183)
5.1.3 电导率	(185)
5.1.4 磁应力	(192)

§ 5.2 太阳磁流管	(195)
5.2.1 太阳磁流管的基本特征	(196)
5.2.2 磁流管的不稳定性	(201)
5.2.3 磁流管的热效应	(206)
§ 5.3 等离子体中的波动	(210)
5.3.1 等离子体波概述	(210)
5.3.2 太阳等离子体中的主要波动模式	(215)
5.3.3 激波、磁流体力学激波和无碰撞激波	(221)
§ 5.4 带电粒子加速机制	(224)
5.4.1 Fermi 加速	(225)
5.4.2 等离子体湍流加速	(237)
参考文献	(247)
第六章 太阳光球	(249)
§ 6.1 光球中的能量传输	(249)
6.1.1 光球概念	(249)
6.1.2 几种平衡态	(252)
6.1.3 辐射转移方程	(254)
§ 6.2 太阳常数和太阳辐射能谱分布	(261)
6.2.1 太阳常数和大气外太阳分光辐照	(261)
6.2.2 测量方法简介	(263)
6.2.3 测量结果的讨论	(265)
§ 6.3 临边昏暗、连续吸收和光球模型	(269)
6.3.1 太阳临边昏暗和临边增亮	(269)
6.3.2 光球的连续吸收系数	(272)
6.3.3 太阳低层大气模型	(274)
§ 6.4 谱线辐射转移方程、选择吸收和谱线源函数	(281)
6.4.1 吸收线的辐射转移方程	(281)
6.4.2 选择吸收	(283)
6.4.3 谱线的源函数	(284)

§ 6.5 谱线的加宽机制	(287)
6.5.1 辐射阻尼加宽	(287)
6.5.2 Doppler 加宽	(289)
6.5.3 辐射阻尼和 Doppler 效应联合加宽	(291)
6.5.4 压力加宽	(293)
§ 6.6 真吸收因子、谱线轮廓和局部热动平衡偏离	(295)
6.6.1 真吸收所占的分量因子	(295)
6.6.2 谱线轮廓及其应用	(297)
6.6.3 非局部热动平衡的谱线源函数	(301)
§ 6.7 谱线的等值宽度和生长曲线	(304)
6.7.1 等值宽度和生长曲线概念	(304)
6.7.2 理论生长曲线	(306)
6.7.3 观测生长曲线	(308)
参考文献	(311)
第七章 色球、日冕和太阳风	(313)
§ 7.1 色球和过渡区	(313)
7.1.1 色球的观测特征	(313)
7.1.2 色球模型	(320)
7.1.3 色球-日冕过渡区	(324)
§ 7.2 日冕辐射	(327)
7.2.1 日冕辐射的多种成分	(327)
7.2.2 散射日冕 (K 冕和 F 冕)	(329)
7.2.3 发射日冕 (E 冕)	(336)
§ 7.3 日冕构造和物理模型	(340)
7.3.1 各种日冕结构	(340)
7.3.2 宁静日冕和冕洞模型	(343)
§ 7.4 日冕磁场的理论外推	(349)
7.4.1 基本方程	(349)
7.4.2 势场近似	(351)

7.4.3	常 α 无力场近似	(354)
7.4.4	一般无力场	(363)
§ 7.5	宁静太阳的射电辐射	(366)
7.5.1	日冕等离子体中射电波的传播	(367)
7.5.2	射电辐射的亮温度	(368)
7.5.3	射电临边增亮和临边昏暗	(371)
§ 7.6	太阳风和日球	(372)
7.6.1	太阳风起源和主要特征	(372)
7.6.2	太阳风速度的理论推测	(375)
7.6.3	太阳角动量损失	(379)
7.6.4	日球结构	(382)
§ 7.7	色球和日冕加热问题	(384)
7.7.1	色球和日冕的能量平衡	(384)
7.7.2	色球和日冕的加热	(388)
参考文献		(390)
第八章	光球活动和磁场	(394)
§ 8.1	太阳黑子的观测特征和分类	(394)
§ 8.2	黑子的物理构造和演化	(402)
8.2.1	黑子本影大气模型	(402)
8.2.2	黑子磁流管	(405)
8.2.3	磁场在黑子演化中的作用	(407)
§ 8.3	太阳活动周期	(411)
8.3.1	黑子相对数与太阳活动周	(411)
8.3.2	纬度迁移与极性转换	(415)
§ 8.4	太阳活动的超长期变化	(418)
§ 8.5	光斑和小尺度磁场	(424)
8.5.1	光斑	(424)
8.5.2	小尺度磁场	(428)
§ 8.6	太阳活动起源与发电机理论	(433)
8.6.1	Babcock 和 Leighton 的太阳活动周模型	(434)

8.6.2 太阳发电机理论	(440)
参考文献	(450)
第九章 色球和日冕中的活动现象	(454)
§ 9.1 日珥和暗条	(454)
§ 9.2 光学耀斑 (低温耀斑区)	(459)
9.2.1 耀斑概述	(459)
9.2.2 H_{α} 单色光观测	(463)
9.2.3 耀斑光谱观测	(468)
9.2.4 白光耀斑	(474)
§ 9.3 高温耀斑区和高能现象	(479)
9.3.1 耀斑的 X 光辐射	(480)
9.3.2 太阳射电爆发	(486)
9.3.3 耀斑粒子发射	(492)
§ 9.4 耀斑活动区磁场和电流	(497)
9.4.1 活动区磁场的非势性	(497)
9.4.2 横向磁场方位角的确定和电流推算	(503)
9.4.3 耀斑引起的磁场和电流变化	(508)
9.4.4 耀斑发生位置的观测结果	(513)
§ 9.5 耀斑的能量释放过程	(519)
9.5.1 磁场位形、不稳定性和粒子加速	(520)
9.5.2 各种观测现象的解释	(524)
§ 9.6 日冕物质抛射 (CME)	(527)
参考文献	(531)
第十章 日地关系和太阳活动预报	(539)
§ 10.1 地球附近空间环境	(539)
10.1.1 地磁层	(539)
10.1.2 辐射带	(541)
10.1.3 电离层	(543)
§ 10.2 太阳短波辐射增强的地球物理效应	(544)
10.2.1 对电离层和电波传播的影响	(544)

10.2.2 对大气密度分布的影响	(546)
§ 10.3 太阳粒子辐射增强的地球物理效应	(548)
10.3.1 高能粒子流和低能等离子体的不同效应	(548)
10.3.2 近地空间粒子污染的危害	(551)
§ 10.4 太阳活动对低层大气的影响	(554)
10.4.1 太阳与天气现象的相关	(554)
10.4.2 可能的物理机制	(558)
§ 10.5 地球自转变化中的太阳物理效应	(560)
10.5.1 地球自转的各种扰动	(560)
10.5.2 太阳活动对地球自转的影响	(564)
10.5.3 太阳风对地球自转的可能影响	(568)
§ 10.6 太阳活动预报	(574)
10.6.1 太阳活动短期预报和警报	(575)
10.6.2 太阳活动总体水平的长期预报	(582)
参考文献	(584)
附录 I 日面坐标计算公式的推导	(589)
附录 II 双折射滤光器有关公式的推导	(594)
附录 III Saha 电离公式的推导	(597)
索引	(600)

第一章 绪 论

§ 1.1 研究太阳的意义

在宇宙间所有天体中,与人类关系最密切的就是太阳.正是太阳的光和热温暖着地球,维持着人类生存以及地球上一切生命活动所必需的适当环境.太阳也是地球上除了原子能以外的其他能源的直接和间接创造者.我们所看到的四季变化、昼夜交替、风云雨雪、植物生长……无一不是太阳作用的结果.由于太阳与人类的生活和生产活动有着密不可分的联系,人们自然会产生深入了解太阳本质的强烈愿望.除了想知道太阳有多大和距离有多远之外,当然还想知道太阳到底是由什么物质组成的?它的内部结构是怎样的?它的表面又是如何?它以这样的规模发出辐射到底还能维持多长时间?……为了探讨此类涉及太阳的物理构造、内部和表面发生的物理过程,以及太阳整体演化等问题,在天文学中形成了一个重要的分支学科,称为太阳物理学.太阳物理研究者通过精心设计的各种专门仪器,对太阳进行各式各样的长期观测,并且用物理学的方法,对观测结果进行综合分析和理论推断之后,对上述这些基本问题,可以说都能给予答复.然而,还有许多重要问题至今还不清楚,或知之甚少,有待于进一步的探索.

研究太阳的理论和实际意义,可以概括为如下几点:

(1)太阳是一颗典型的恒星,关于它的详细研究对于了解广阔的恒星世界具有普遍意义.太阳是一颗主序星(光谱型为G2),又是离我们最近从而可以对它作区域分解观测和仔细研究的唯一恒星,从太阳的研究结果,使我们对大多数恒星的状况能有大致的认识.实际上关于恒星大气的辐射传输、内部构造和演化等问题的研究,都是以太阳作为范例和进行检验的.