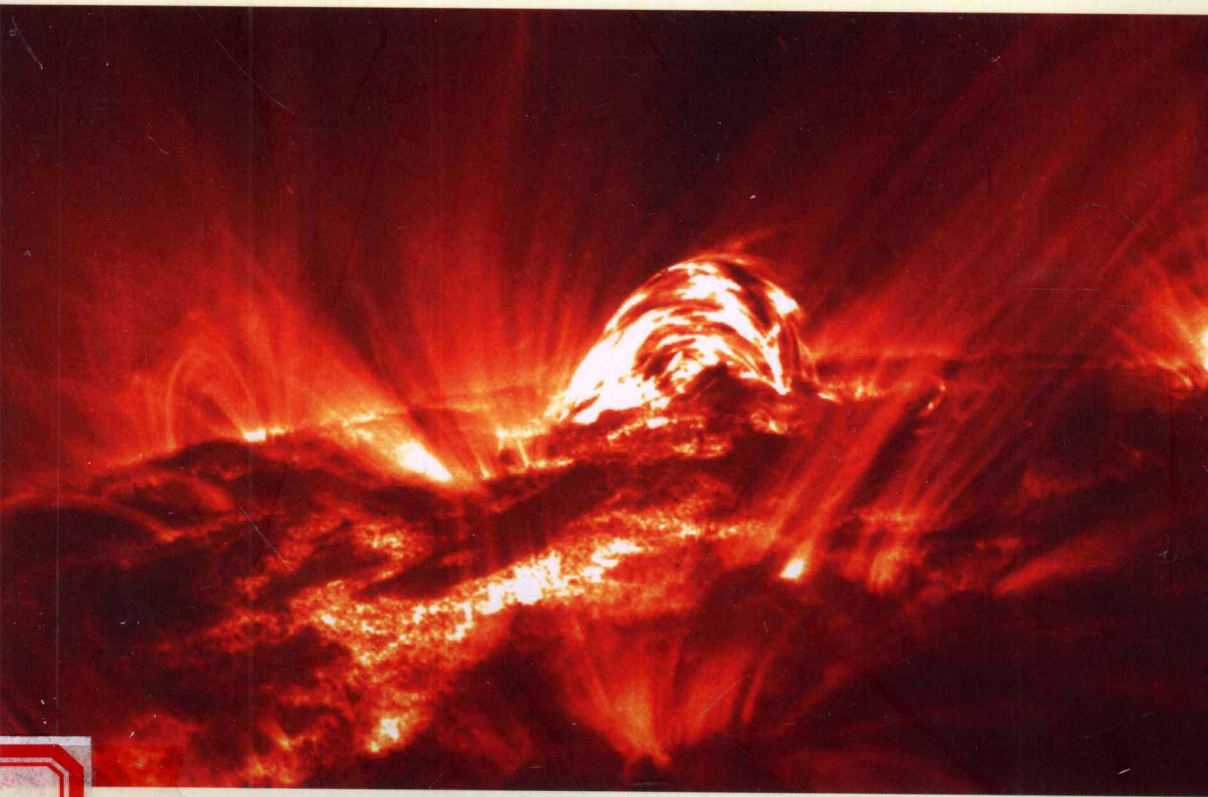


# 太阳活动区物理

Physics of Solar Active Regions

方成 丁明德 陈鹏飞 著



R182  
F182

# 太阳活动区物理

Physics of Solar Active Regions

方 成 丁明德 陈鹏飞 著

## 图书在版编目(CIP)数据

太阳活动区物理 / 方成, 丁明德, 陈鹏飞著. —南京:  
南京大学出版社, 2008. 6  
ISBN 978-7-305-05503-4

I. 太… II. ①方… ②丁… ③陈… III. 太阳  
物理学 IV. P182

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 092263 号

出版者 南京大学出版社  
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093  
网 址 <http://press.nju.edu.cn>  
出版人 左 健

书 名 太阳活动区物理  
著 者 方 成 丁明德 陈鹏飞  
责任编辑 孟庆生 编辑热线 025-83597087

照 排 南京玄武湖印刷照排中心  
印 刷 南京通达彩色印刷有限公司  
开 本 787×960 1/16 印张 24 字数 407 千  
版 次 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷  
ISBN 978-7-305-05503-4  
定 价 60.00 元

发行热线 025-83594756  
电子邮箱 [sales@press.nju.edu.cn](mailto:sales@press.nju.edu.cn)(销售部)  
[nupress1@public1.ptt.js.cn](mailto:nupress1@public1.ptt.js.cn)

---

\* 版权所有, 侵权必究

\* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购图书销售部门联系调换

# 前 言

太阳活动区物理是太阳物理中最活跃、最令人注目的一个分支。它的主要任务是研究太阳活动区内各种活动现象(如黑子、耀斑、日珥和日冕物质抛射等)的物理特性以及它们发生、发展和消亡的规律,研究它们的相互关系,从而揭示它们以及它们所在的太阳活动区的本质。这些研究对于了解天体物理中宇宙等离子体的各种特性和行为有着重要的普遍意义;对于日地空间环境、日地关系和空间天气学的研究更具有重大的现实意义。

本书是作者多年来在太阳物理研究和指导研究生科研的基础上,结合国内外太阳物理最新研究成果而编撰而成的,主要阐述了研究太阳活动区和各种太阳活动现象的基本理论、基本方法和研究成果。本书的安排是这样的:第1章太阳活动区概论,简单介绍太阳的一些基本特性和大气结构,概述太阳活动区和各种活动现象的一般特性和结构,并阐明研究的意义。第2章介绍研究太阳活动区辐射的基本理论——非局部热动平衡理论。第3章至第6章分别介绍研究太阳耀斑、黑子、日珥和日冕物质抛射的主要方法和研究成果。本书力求理论联系实际,对基本概念和基本理论阐述明确、深入浅出;对物理图像和研究结果叙述清晰、介绍准确。为避免繁杂,本书各章后面均列出了一些主要的参考文献,供读者阅读和参考。

本书第4章由丁明德撰写,第6章由陈鹏飞重新撰写,其余各章由方成撰写。限于作者的水平,本书难免存在一些缺点和错误,热诚欢迎广大读者

批评和指正.

作者在撰写本书期间的工作得到国家自然科学基金(项目编号10221001, 10333040, 10403003, 10673004, 10073005, 10173024, 10620150099)、国家重点基础研究发展规划(2006CB80632)、教育部全国优秀博士基金(FANEDD200226)及新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0445)等项目的支持. 本书的出版还得以南京大学出版基金的资助.

作 者

2007 年 12 月于南京大学

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 太阳活动区概论 .....            | 1  |
| § 1.1 太阳的一些基本特征和结构 .....       | 2  |
| § 1.2 太阳活动区的基本结构和演化 .....      | 9  |
| § 1.3 太阳活动体概述 .....            | 12 |
| § 1.4 太阳活动区物理的研究意义和基本问题 .....  | 18 |
| 参考文献 .....                     | 19 |
| 第 2 章 太阳大气的非局部热动平衡理论 .....     | 23 |
| § 2.1 局部热动平衡和非局部热动平衡 .....     | 23 |
| § 2.2 跃迁速率 .....               | 25 |
| 2.2.1 辐射速率 .....               | 26 |
| 2.2.2 碰撞速率 .....               | 29 |
| § 2.3 统计平衡方程组 .....            | 30 |
| § 2.4 辐射转移方程的二阶微分形式和差分方程 ..... | 33 |
| 2.4.1 辐射转移方程的二阶微分形式 .....      | 33 |
| 2.4.2 差分方程表达式 .....            | 35 |
| 2.4.3 发射系数和吸收系数的表达式 .....      | 36 |
| 2.4.4 考虑部分频率再分配的辐射转移方程 .....   | 37 |
| § 2.5 完全线性化方法 .....            | 42 |
| 2.5.1 基本原理 .....               | 42 |

|                     |                     |     |
|---------------------|---------------------|-----|
| 2.5.2               | 统计平衡方程组的线性化 .....   | 43  |
| 2.5.3               | 辐射转移方程的线性化 .....    | 43  |
| 2.5.4               | 费特利尔解法 .....        | 44  |
| § 2.6               | 大气模型的计算 .....       | 46  |
| 参考文献 .....          |                     | 47  |
| <b>第3章 耀斑</b> ..... |                     | 50  |
| § 3.1               | 耀斑概述 .....          | 50  |
| 3.1.1               | 耀斑研究的历史 .....       | 50  |
| 3.1.2               | 耀斑的分类和基本结构 .....    | 56  |
| § 3.2               | 耀斑的近代观测结果 .....     | 59  |
| 3.2.1               | 耀斑的一般特性 .....       | 59  |
| 3.2.2               | 耀斑可见光光谱 .....       | 61  |
| 3.2.3               | 射电辐射 .....          | 66  |
| 3.2.4               | EUV 辐射 .....        | 72  |
| 3.2.5               | 软 X 射线辐射 .....      | 75  |
| 3.2.6               | 硬 X 射线辐射 .....      | 79  |
| 3.2.7               | $\gamma$ 射线辐射 ..... | 89  |
| § 3.3               | 耀斑前活动的观测和研究 .....   | 93  |
| 3.3.1               | 暗条的活动 .....         | 93  |
| 3.3.2               | 磁场的形态和变化 .....      | 94  |
| 3.3.3               | 电流体系 .....          | 96  |
| 3.3.4               | 速度场的特征 .....        | 97  |
| 3.3.5               | 耀斑前大气的加热和增亮 .....   | 97  |
| 3.3.6               | 剪切和转动贮能 .....       | 98  |
| § 3.4               | 耀斑的触发和释能 .....      | 99  |
| 3.4.1               | MHD 基本方程组 .....     | 100 |
| 3.4.2               | 电流片和磁重联的基本概念 .....  | 102 |
| 3.4.3               | 电流片的形成 .....        | 103 |
| 3.4.4               | 二维磁重联的分类 .....      | 108 |
| 3.4.5               | 稳态快磁重联的一般解 .....    | 110 |
| 3.4.6               | 三维磁重联 .....         | 115 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| § 3.5 耀斑的能量传输 .....      | 118        |
| 3.5.1 辐射加热 .....         | 118        |
| 3.5.2 粒子轰击加热 .....       | 121        |
| 3.5.3 非热粒子产生的激发和电离 ..... | 128        |
| 3.5.4 热传导加热 .....        | 131        |
| § 3.6 耀斑大气模型 .....       | 133        |
| 3.6.1 耀斑大气半经验模型 .....    | 133        |
| 3.6.2 耀斑大气的动力学模型 .....   | 136        |
| § 3.7 耀斑的理论模型 .....      | 142        |
| 3.7.1 耀斑磁重联的观测证据 .....   | 143        |
| 3.7.2 双带耀斑的理论模型 .....    | 147        |
| 3.7.3 致密耀斑的理论模型 .....    | 148        |
| 3.7.4 电流并合不稳定性模型 .....   | 153        |
| 3.7.5 等离子体团导致磁重联模型 ..... | 155        |
| 参考文献 .....               | 159        |
| <b>第4章 太阳黑子 .....</b>    | <b>178</b> |
| § 4.1 黑子的结构、形态和演化 .....  | 179        |
| 4.1.1 本影的精细结构 .....      | 179        |
| 4.1.2 半影的精细结构 .....      | 180        |
| 4.1.3 埃弗谢德流动 .....       | 181        |
| 4.1.4 黑子中的振荡和波动 .....    | 183        |
| 4.1.5 磁流浮现与黑子的形成 .....   | 184        |
| 4.1.6 黑子的衰减 .....        | 185        |
| § 4.2 黑子的大气模型和磁场结构 ..... | 186        |
| 4.2.1 黑子的大气模型 .....      | 186        |
| 4.2.2 黑子的磁场结构 .....      | 189        |
| 4.2.3 磁流体静力学平衡 .....     | 192        |
| § 4.3 黑子的形成理论和致冷机制 ..... | 201        |
| 4.3.1 磁对流的物理效应 .....     | 201        |
| 4.3.2 磁通量的会聚 .....       | 205        |
| 4.3.3 磁流的浮现 .....        | 207        |



|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 4.3.4 黑子的稳定性 .....              | 211        |
| § 4.4 太阳活动周期 .....              | 214        |
| 参考文献 .....                      | 217        |
| <b>第5章 日珥 .....</b>             | <b>221</b> |
| § 5.1 日珥的结构和物理特性 .....          | 221        |
| 5.1.1 日珥的形态与分类 .....            | 221        |
| 5.1.2 日珥的辐射特性 .....             | 230        |
| 5.1.3 日珥的磁场 .....               | 232        |
| 5.1.4 日珥物理参数的测定方法 .....         | 234        |
| 5.1.5 日珥大气半经验模型的计算 .....        | 238        |
| § 5.2 日珥形成的理论 .....             | 241        |
| 5.2.1 基本观测事实 .....              | 241        |
| 5.2.2 日珥形成的可能条件是磁结构物中存在一个凹陷 ... | 243        |
| 5.2.3 日冕物质的凝聚 .....             | 244        |
| 5.2.4 密度增加使日珥形成 .....           | 250        |
| 5.2.5 直接由色球的物质形成日珥 .....        | 252        |
| 5.2.6 新的日珥形成模型 .....            | 252        |
| § 5.3 日珥磁流体力学 .....             | 255        |
| 5.3.1 日珥磁流体静力学平衡与日珥模型 .....     | 255        |
| 5.3.2 日珥内部结构和热平衡 .....          | 263        |
| 5.3.3 稳定性和日珥的爆发 .....           | 269        |
| 参考文献 .....                      | 272        |
| <b>第6章 日冕物质抛射 .....</b>         | <b>283</b> |
| § 6.1 概 述 .....                 | 283        |
| 6.1.1 观测历史 .....                | 283        |
| 6.1.2 多波段观测 .....               | 284        |
| § 6.2 观测特性 .....                | 286        |
| 6.2.1 CME 的形态 .....             | 286        |
| 6.2.2 CME 的密度与质量 .....          | 287        |
| 6.2.3 CME 的速度 .....             | 291        |

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 6.2.4 | 角宽度 .....                          | 292 |
| 6.2.5 | 速度及角宽度的投影改正 .....                  | 294 |
| 6.2.6 | 纬度分布 .....                         | 295 |
| 6.2.7 | CME 的能量 .....                      | 296 |
| 6.2.8 | CME 的发生率 .....                     | 296 |
| § 6.3 | CME 与耀斑及暗条爆发的关系 .....              | 298 |
| 6.3.1 | CME 与耀斑的关系 .....                   | 298 |
| 6.3.2 | CME 与爆发日珥的关系 .....                 | 303 |
| 6.3.3 | 两类日冕物质抛射之辩 .....                   | 304 |
| § 6.4 | 理论问题及模型 .....                      | 307 |
| 6.4.1 | 整体图像 .....                         | 308 |
| 6.4.2 | 前身结构 .....                         | 310 |
| 6.4.3 | 前兆特征 .....                         | 312 |
| 6.4.4 | 触发机制 .....                         | 313 |
| 6.4.5 | 传播规律 .....                         | 324 |
| 6.4.6 | 磁重联必要性之辩 .....                     | 326 |
| 6.4.7 | 其他几个问题 .....                       | 330 |
| § 6.5 | 伴随的爆发现象 .....                      | 331 |
| 6.5.1 | 射电爆发 .....                         | 332 |
| 6.5.2 | 太阳高能粒子事件 .....                     | 337 |
| 6.5.3 | 莫尔顿波、EIT 波、暗区及 He 1 083 nm 波 ..... | 341 |
| § 6.6 | 结束语 .....                          | 353 |
| 参考文献  | .....                              | 353 |

# 第 1 章 太阳活动区概论

太阳是一个非常美丽而迷人的天体. 它不仅对于人类有着重大的影响, 而且由于它到地球的距离只有到我们最近的恒星——半人马座  $\alpha$  星的距离的  $1/(2.8 \times 10^5)$ , 所以它是宇宙中唯一的一颗可以进行详细观测和研究的恒星. 正是由于这一原因, 太阳物理学成为天体物理学中最早发展起来, 并对天文学的发展有着重大影响的分支.

传统上人们把太阳的各种现象分为宁静和活动两类. 宁静太阳是一个静止的、球对称的等离子体球, 在一级近似下, 它的物理特性是径向距离的函数. 活动太阳由黑子、日珥和耀斑等活动现象所组成, 它们叠加在宁静太阳大气上, 并且大部分同磁场密切相关. 近代研究表明, 宁静太阳实际上是有许多结构的. 由于对流产生了不同尺度的不均匀性, 而且它们也在不断变化着, 因此也可以说是“活动的”. 这些变化或者比较缓慢(例如宁静太阳风), 或者比较有规律(例如对流), 或者遍布太阳表面(例如色球网络), 因此人们还是习惯上把它们归入宁静太阳的范畴. 太阳活动现象通常是指太阳上局部区域内的、随时间变化较快的活动体. 它们常常聚集出现在一些称为活动区的地方, 主要包括黑子、光斑、谱斑、日珥、耀斑和日冕物质抛射等. 太阳活动区物理的研究内容主要就是研究这些活动现象的发生、发展和消亡的演化规律, 研究它们的物理特性和机制, 以揭示它们的物理本质.

本章主要概述太阳活动区和各主要太阳活动体的基本特征, 第 2 章将介绍研究太阳活动区物理的基本理论之一, 即非局部热动平衡理论. 这可为以后各章提供基本的理论框架和研究工具. 第 3~6 章将分别介绍耀斑、黑子、日珥和日冕物质抛射等太阳主要活动现象的观测特性和理论.

## § 1.1 太阳的一些基本特征和结构

太阳是一个在自引力作用下收缩并聚合在一起的巨大的等离子体球, 主要由氢(90%)和氦(10%)组成, 碳、氮、氧等其他元素仅约占 0.1%。由于太阳具有很高的不透明度, 因此我们看不到太阳的内部, 而仅能观测到它的表层大气。近年来, 根据太阳振荡模式(特别是声波振荡的 p 模式)的观测结果, 采用日震学的反演技术, 已能推测出太阳内部的某些物理和化学性质, 例如测定了太阳自转速度随深度和纬度的变化, 估算出温度和密度等参数同“标准的”太阳内部结构模型的偏差等。不过迄今关于太阳内部结构的许多知识还是根据太阳结构模型的理论计算得到的。图 1-1 是太阳总体结构的示意图。

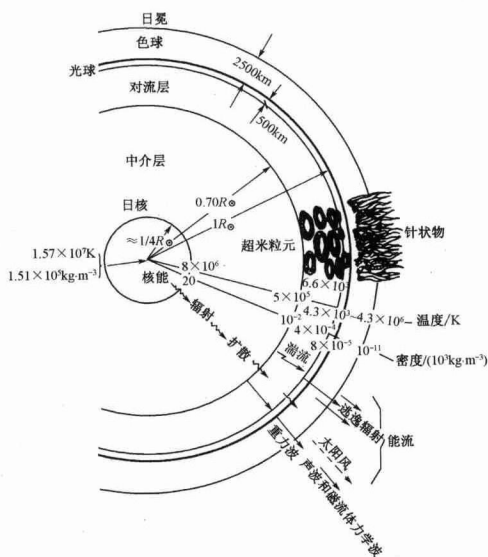
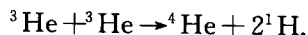
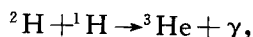
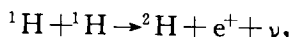
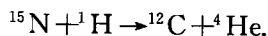
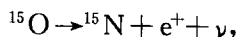
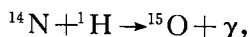
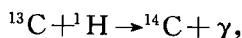
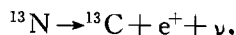
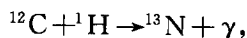


图 1-1 太阳总体结构的示意图

太阳内部分为三个区域, 即核心区、中介层和对流层。它们由不同的物理过程所支配。核心区质量仅为太阳质量的一半, 体积约占太阳的 1/50, 中心温度约为  $1.57 \times 10^7$  K, 密度约为  $1.51 \times 10^5$  kg/m<sup>3</sup>, 但核心区内部的核反应(主要是质子-质子循环, 部分是碳氮循环)却产生了太阳的 99% 的能量, 其质子-质子循环的反应过程为



碳氮循环的反应过程为



上述两个反应过程的最终结果都是 4 个质子聚合成 1 个氦核而释放出 2 个正电子、2~3 个高频  $\gamma$  光子 (26.7 MeV) 和 2 个以  $\nu$  表示的中微子 (0.42 MeV). 在这个反应中的质量亏损为  $4m_{\text{H}} - m_{\text{He}} = 4.8 \times 10^{-29} \text{ kg}$ , 转变为能量  $E = mc^2 = 4.3 \times 10^{-12} \text{ J}$ . 高频  $\gamma$  射线光子在太阳内部经历了大量的碰撞 (包括吸收和再发射), 经过大约  $10^7$  年以后才能到达太阳表面, 并以典型值为可见光波长的光子形式辐射出去. 中微子非常微小, 可以不受阻碍地穿过太阳内部逃逸出来, 因此是唯一可供直接诊断太阳核心的物质. 根据标准太阳模型和现有的核物理理论, 可期望捕捉中微子的速率是 6 SNU [太阳中微子单位,  $1 \text{ SNU} = 10^{-36}$  中微子/(秒  $\times$  靶原子)], 但目前仅探测到上限为  $(2.1 \pm 0.3) \text{ SNU}$  的中微子<sup>[1]</sup>. 这一著名的太阳中微子之谜对太阳内部结构理论提出了严峻的挑战, 也给现代核物理提出了新的难题. 但是, 近年来, 加拿大安大略省的 Sudbury 中微子观测站利用放在地下  $2 \times 10^3 \text{ m}$  处的  $1 \times 10^3 \text{ t}$  重水作为探测介质, 成功地探测到从太阳到达地球的  $\mu$  中微子和  $\tau$  中微子; 随后日本神冈矿放在地下  $1 \times 10^3 \text{ m}$  深处的 kamLAND 实验装置利用众多的液体闪烁器发现电子中微子只有理论预期的 60%. 这些实验的详细观测和研究表明, 实际上太阳核心区产生的电子中微子在传播到地球时已有相当一部分转变为  $\mu$  中微子和  $\tau$  中微子, 因此看起来似乎太阳中微子“失踪”了. 这种中微子的转变可能是因中微子振荡产生的. 意大利戴维斯 (R. Davis) 和日本小柴昌俊在探测中微子方面的杰出贡献, 于 2002 年获得诺贝尔物理学奖.

近年来,利用高精度的地基(例如 GONG)和卫星(如 MDI/SOHO)的太阳振荡观测资料,对太阳内部结构的了解有了很大的进展<sup>[3]</sup>,表 1-1 给出了在太阳内部物理参数分布的模型<sup>[2]</sup>.

表 1-1 太阳内部物理参数分布的模型<sup>[2]</sup>

| $r/R_{\odot}$      | $r/\text{cm}$ | $T/(\text{10}^6 \text{ K})$ | $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $M_r/M_{\odot}$      | $\lg p/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ |
|--------------------|---------------|-----------------------------|----------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|
| $7 \times 10^{-3}$ | 4.87E8        | 15.7                        | $1.500 \times 10^5$                    | $3 \times 10^{-5}$   | 1.736 9                                |
| $2 \times 10^{-2}$ | 1.39E9        | 15.6                        | $1.460 \times 10^5$                    | $1 \times 10^{-3}$   | 1.735 5                                |
| $9 \times 10^{-2}$ | 6.24E9        | 13.6                        | $9.573 \times 10^4$                    | $5.7 \times 10^{-2}$ | 1.717 7                                |
| 0.22               | 1.53E10       | 8.77                        | $2.872 \times 10^4$                    | 0.399                | 1.652 5                                |
| 0.32               | 2.23E10       | 6.42                        | $9.970 \times 10^3$                    | 0.656                | 1.572 4                                |
| 0.42               | 2.92E10       | 4.89                        | $3.220 \times 10^3$                    | 0.817                | 1.532 4                                |
| 0.52               | 3.62E10       | 3.77                        | $1.050 \times 10^3$                    | 0.908                | 1.472 2                                |
| 0.60               | 4.18E10       | 3.15                        | 500                                    | 0.945                | 1.432 2                                |
| 0.71               | 4.94E10       | 2.23                        | 177                                    | 0.977                | 1.372 1                                |
| 0.81               | 5.64E10       | 1.29                        | 76.6                                   | 0.992                | 1.311 9                                |
| 0.91               | 6.33E10       | 0.514                       | 19.4                                   | 0.999                | 1.211 9                                |
| 0.96               | 6.68E10       | 0.208                       | 4.85                                   | 0.999 9              | 1.111 8                                |
| 0.99               | 6.89E10       | $4.41 \times 10^{-3}$       | $2.56 \text{E}-1$                      | 1.000 0              | 0.911 8                                |
| 0.995              | 6.93E10       | $2.66 \times 10^{-3}$       | $4.83 \text{E}-2$                      | 1.000 0              | 0.811 8                                |
| 0.999              | 6.95E10       | $1.35 \times 10^{-3}$       | $1.29 \text{E}-3$                      | 1.000 0              | 0.611 8                                |
| 1.000              | 6.96E10       | $6.00 \times 10^{-4}$       | $2.18 \text{E}-4$                      | 1.000 0              | 0.491 8                                |

由太阳中心向外超过  $0.71 R_{\odot}$  (太阳半径) 时, 由于电子同其他质点发生复合, 出现了新的离子, 不透明度开始快速增长, 光子更易被吸收, 辐射传热率降低. 根据能量平衡的要求, 温度梯度就要增加. 当温度梯度大于绝热温度梯度时, 发生对流不稳定性, 于是形成了对流层. 根据日震学研究的新结果, 对流层底部大约位于  $0.71 R_{\odot}$  处<sup>[4]</sup>. 近年的测量给出了对流层底部大约在  $(0.713 \pm 0.001) R_{\odot}$  处<sup>[5]</sup>. 在对流层内, 对流是输运能量的主要方式. 根据发电机理论, 它也是太阳磁场产生的主要地方. 从太阳大气表面的观测知道, 对流主要表现为“米粒”、“中米粒”和“超米粒”三种空间尺度不同的对流

胞,分别同氢的电离和氦的一次、二次电离发生的深度相对应.在光球以下约  $1 \times 10^3$  km 以内,氢被高度电离.这个高度相当于“米粒”的大小.在深度为  $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$  km 处,90%的氢被一次电离,在  $3 \times 10^4$  km 处,90%的氢已被二次电离,分别对应于中米粒和超米粒的大小.此外还可能存在着一种巨对流胞,其尺度为  $3 \times 10^5$  km,与对流区的深度相当.建立可压对流层中的湍流对流模型是一件很困难的事情.传统上采用的对流混合长理论具有唯像的性质,但物理意义并不太明确.运用湍流理论求解可压流体动力学的全部方程组已获得进展,在某些方面可更好地同观测结果相符合<sup>[6]</sup>.

日震学的研究利用反演技术从太阳表面速度场的精确测量求得不同频率的声波在太阳内部的传播速度,从而给出了太阳内部自转速度分布的新结果.图 1-2 给出 Kosovichev 等<sup>[7]</sup>的研究结果.由图可见,太阳自转速度从太阳表面向内,在不同纬度处是很不相同的;只有在对流层底部向内,自转速度才趋于一致.因此,在对流层底部(称为差旋层 tachocline 的一层,见图 1-3 中虚线所示)很可能是太阳发电机由较差自转而产生太阳磁场的地方.剪切层的厚度上限为  $0.05 R_{\odot}$ ,中心位置约在  $0.705 R_{\odot}$ <sup>[5]</sup>.近年来有学者还发现剪切层的位置和厚度随太阳纬度有明显的变化<sup>[8][9]</sup>.图 1-3 给出太阳在  $1/4$  的剖面中平均角速度  $\Omega$  按日面纬度和太阳半径方向深度的分布<sup>[10]</sup>,图中画出  $\Omega/2\pi$ (单位为 nHz)的等强度线,外圈边缘的短线分别对应于纬度  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  和  $75^\circ$ .图中黑色部分是  $\Omega$  分布不确定的地方,主要是由于目前对重力模的测量还不可靠引起的.

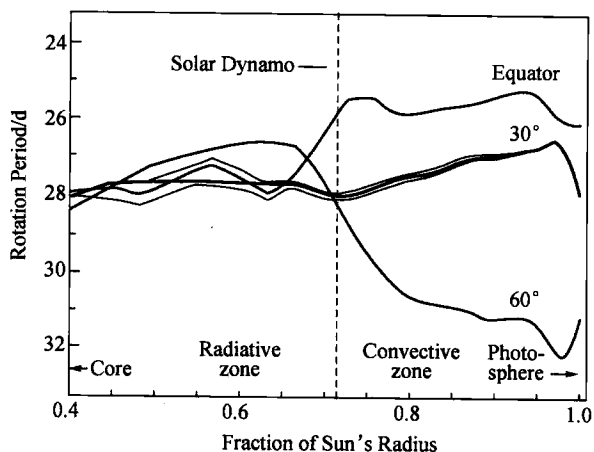


图 1-2 太阳自转速度在不同太阳纬度处沿深度的分布<sup>[6]</sup>

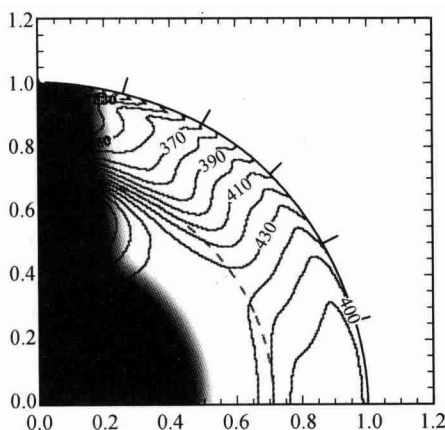


图 1-3 太阳平均角速度按日面纬度和太阳半径方向深度的分布<sup>[10]</sup>

由对流层向外,便是太阳的表层大气.它是由光球、色球和日冕组成的.图 1-4 是目前广泛采用的宁静太阳大气模型 VAL 所给出的温度分布图<sup>[11]</sup>.

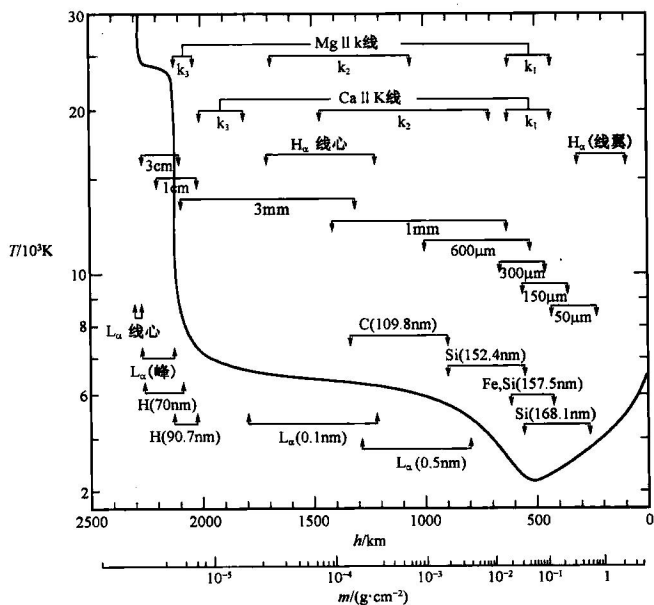


图 1-4 太阳外层大气温度分布图<sup>[11]</sup>

通常定义波长 500 nm 处光学厚度为 1 的地方为光球底部.由此向外,温度逐渐减小到  $4.17 \times 10^3$  K 的极小值.光球层厚约 500 km,数密度的典型



值为  $10^{22}/\text{m}^3$ , 再往外, 就进入色球层, 温度逐渐上升, 通过急剧上升的过渡区, 到达日冕的几百万度. 色球层的厚度约  $2 \times 10^3 \text{ km}$ , 过渡区则只有几十到上百千米厚. 它们数密度的典型值分别为  $(10^{17} \sim 10^{18})/\text{m}^3$  和  $10^{15}/\text{m}^3$ . 由于日冕的高温, 等离子体不断向外膨胀而形成太阳风, 以后温度缓慢下降到 1 AU 处的  $10^5 \text{ K}$ . 光球上温度上升的原因至今没有圆满的解答. 低色球可能是由产生于对流层的声波向外传播时形成激波所耗散的能量而加热形成的. 较高层大气的加热可能是由若干与磁场有关的机制产生的.

考虑了新的不透明度数据等因素, Avrett<sup>[12]</sup> 对温度极小区附近的温度分布做了改进, 得到温度极小值为  $4.41 \times 10^3 \text{ K}$  的结果. Fontenla 等<sup>[13]</sup> 考虑了氢和氦扩散过程的影响, 详细计算了氦的激发和电离, 还考虑了日冕辐射对过渡区和色球的作用, 利用能量平衡方程得到了过渡区的更可靠的大气模型, 可以更好地符合观测到的氢和氦谱线的轮廓. 对于色球大气模型也有一些争论. 较高空间和时间分辨率的 Ca II 和 CO 分子谱线观测表明, 在磁场很弱的太阳内的网络区内, 在温度极小区上的温度似乎并没有上升. 特别是, 观测表明色球并非处于静态平衡之中, 而是充满着动态的变化. Carlsson 和 Stein<sup>[14]</sup> 考虑到这些因素, 计算得到了有压力驱动产生激波的动态色球大气模型, 图 1-5 给出了他们的研究结果.

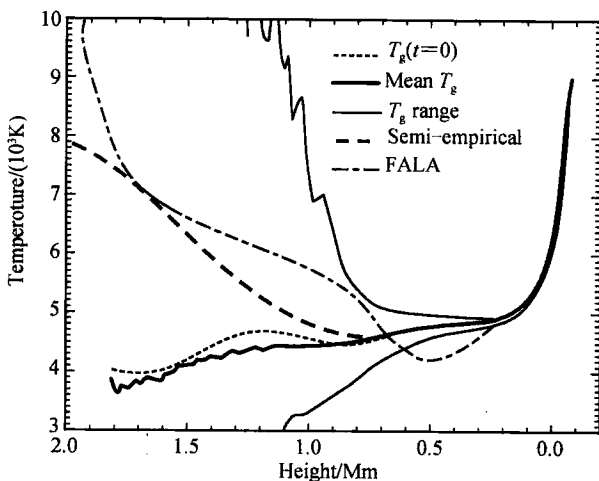


图 1-5 太阳色球层可能的动态大气模型<sup>[14]</sup>

图中细实线为动态色球大气的温度变化范围, 粗实线为对时间求平均的色球大气温度分布. 虚线为与动态计算的谱线强度符合最好的半经验静