

太阳物理学

• 章振大 编著 • 科学出版社

太 阳 物 理 学

章振大 编著

国家自然科学基金资助项目

科 学 出 版 社

1 9 9 2

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是以作者多年来为南京大学天文系学生和研究生讲授“太阳物理学”课程的讲义为基础编写的。全书比较全面地叙述了对太阳大气及其活动过程的观测研究,同时也着重介绍了用分光方法、等离子体物理和磁流体力学等理论方法进行分析所取得的结果和最新进展。

本书共分八章:第一章从总体上讨论太阳;第二至四章叙述太阳大气(包括光球、色球、过渡层和日冕);第五至八章论述太阳活动过程(包括黑子、光斑、谱斑、日珥和耀斑)。

本书可供天体物理、空间物理和地球物理等领域的科技人员、研究生和大学生等阅读参考。

太 阳 物 理 学

章 振 大 编 著

责任编辑 方开文

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100707

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

*

1992 年 12 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1992 年 12 月第一次印刷 印张:17 7/8

印数:1—700 字数:474 000

ISBN 7-03-002961-5/P·581

定价:21.70 元

TW 33/06

前 言

太阳物理学是迅猛发展的天体物理学的一个重要分支学科,它应用物理方法研究太阳的本质和演化.太阳与一般恒星不同,由于它具有离地球近和光强方面的特点,可观测其表面细节和测出微小的光度变异.对太阳大气结构和在其中所发生的一系列活动过程的研究已有很长的历史,并取得了一些有价值的结果.由于太阳活动过程(尤其是耀斑)的出现会引起全波段(从射电波到X射线)辐射(逐渐的和爆发式的)增强、等离子体的运动、大量电子和质子的加速和加热等,这些现象对日地空间物理和地球物理效应以及气候等都会产生直接或间接的影响;而通过对它们的研究促又进了基本理论、新工艺、新技术的发展和可能的实际应用,因此,最近 20 多年来,随着观测手段与技术设备的不断更新和改进,特别是空间探测技术的发展,人们对太阳大气及其中的活动现象不断有新的发现和进一步了解,也涌现出一些新的研究领域(如日震学等),使得探测太阳内部的物理状态成为可能,并对阐明类太阳恒星的物理过程有重要的作用.所有这些都使太阳物理的研究有着相当好的前景和具有实用的及理论的价值,因而越来越受到人们的重视.

本学科发展迅速,内容繁多.限于篇幅,本书仅着重介绍一些基本的理论和方法,并尽量兼顾一些最新的研究成果.而对每个问题则难以作全面的阐述,有些公式的推导也只能从简,仅给出有关文献,供有兴趣的读者进一步研究时参考.

本书第一至四章由黄佑然同志、第五至八章由王振一同志审阅,他们提出了一些建议和修改意见,对全书的改进很有帮助,作者谨向他们表示衷心的感谢.

由于作者水平有限,书中错误和缺点在所难免,希望读者批评
指正。

作者

1990年8月于南京大学

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 太阳物理学的研究意义.....	1
§ 1.2 太阳的内部结构.....	4
§ 1.3 太阳大气.....	11
§ 1.4 研究任务和本书内容.....	16
参考文献.....	16
第二章 光球层	17
§ 2.1 光球的光谱诊断.....	17
§ 2.2 光球的一维模型.....	21
§ 2.3 谱线形成高度的测定.....	28
§ 2.4 光球速度场.....	33
§ 2.5 米粒和超米粒.....	37
§ 2.6 太阳振荡.....	49
§ 2.7 光球磁场.....	61
参考文献.....	66
第三章 色球层和过渡层	69
§ 3.1 色球观测和闪光谱.....	69
§ 3.2 色球的光谱研究和模型.....	77
§ 3.3 针状物.....	84
§ 3.4 网络组织.....	98
§ 3.5 色球的紫外辐射.....	105
§ 3.6 色球的磁场和速度场.....	115
§ 3.7 色球层的加热.....	120
§ 3.8 过渡层的加热.....	129
参考文献.....	138

第四章 日冕	141
§ 4.1 日冕的观测研究.....	141
§ 4.2 日冕的分光特性.....	144
§ 4.3 日冕散射和电子密度.....	157
§ 4.4 日冕的温度.....	168
§ 4.5 日冕的结构.....	178
§ 4.6 日冕的磁场和扰动.....	194
§ 4.7 日冕的能量平衡和加热.....	201
§ 4.8 太阳风.....	207
参考文献.....	221
第五章 黑子	225
§ 5.1 黑子的形态特征.....	225
§ 5.2 黑子的分光性质.....	231
§ 5.3 黑子内运动和谱线不对称性.....	236
§ 5.4 黑子物理参数的测定.....	250
§ 5.5 黑子磁场及其模型.....	259
§ 5.6 黑子的动力学现象.....	277
§ 5.7 黑子的活动规律.....	292
§ 5.8 黑子的一些理论问题.....	300
参考文献.....	316
第六章 光斑和谱斑	321
§ 6.1 光斑的形态特征.....	321
§ 6.2 光斑的物理模型.....	322
§ 6.3 谱斑的形态特性.....	326
§ 6.4 谱斑的分光性质.....	328
§ 6.5 谱斑辐射的发射机制.....	329
§ 6.6 谱斑模型.....	332
§ 6.7 光斑和谱斑的磁性质.....	334
§ 6.8 加热和致冷.....	336
参考文献.....	339

第七章 日珥	341
§ 7.1 日珥的形态学.....	341
§ 7.2 日珥的光谱分析.....	350
§ 7.3 日珥的 EUV 和射电辐射及过渡层.....	371
§ 7.4 日珥中原子的激发与电离.....	381
§ 7.5 日珥的磁场.....	389
§ 7.6 日珥的能量和质量平衡.....	393
§ 7.7 日珥的形成.....	397
§ 7.8 日珥的稳定性(支撑).....	410
参考文献.....	415
第八章 耀斑	421
§ 8.1 耀斑形态学.....	421
§ 8.2 耀斑的光谱分析.....	431
§ 8.3 耀斑与磁场和速度场的关系.....	449
§ 8.4 耀斑的高能辐射.....	459
§ 8.5 与耀斑伴生的光学现象.....	496
§ 8.6 耀斑的理论模型.....	500
§ 8.7 耀斑对地球的影响及耀斑预报.....	545
参考文献.....	551
附录 I 太阳的一些基本数据	561
附录 II 宁静太阳光谱 $221400\text{--}300\text{ \AA}$ 的部分观测谱线波长 和证认	562

第一章 绪 论

§1.1 太阳物理学的研究意义

太阳物理学是用物理方法研究太阳的本质和演化的一门学科,又是一个理论与实际紧密相联的学科,是天体物理学的一个分支。

众所周知,太阳是地球的光和热的来源,是维持地球上一切生命的基础,是人类进化和发展的主要因素。因此,对太阳能源的研究就具有特殊的意义;而且了解太阳的结构及其动力学性质的演变在科学上也有重要的作用。在太阳系中,太阳对行星际介质和行星大气的影响起着关键的作用。太阳,尤其是太阳活动对地球物理现象的影响更是不言而喻的,因而日地关系的研究也是太阳物理学的一个重要方面,亦是详细研究太阳的重要理由之一。

现在人们已明确了解太阳对一些地球物理效应(如磁暴、电离层扰动和极光等)的作用,而似乎也有证据表明太阳对地球气候和天气的影响。太阳电磁辐射对地球大气和生命影响的形式是极其复杂的,这些影响包括物理的、化学的和生物的过程。最近已了解到地球气候对日射能量的变化相当敏感,即历史上重大的气候变化可能是由于地球轨道参数的变化引起的。人们认为,轨道效应导致日射能量的变化可能是发生在2万年前最后一个冰期,以及百万年前更早的冰期的主要成因。

为了论证地面上所接受到的太阳辐射起伏对气候影响的灵敏度,显然必须知道太阳总辐射能(太阳常数)是否有变化。不过在地面上测量太阳常数的变化是很困难的。最近太阳物理学家已利用SMM(太阳活动极大使命)飞船的精密辐射计进行过这种测量,研究结果表明太阳光度并非常数。因此确定地球大气变化与

太阳光度变化的相关性是非常重要的。人们已试图探索这种光度起伏的起源,估计太阳黑子的出没是一个重要的因素,当然也不排除其他的效应。

除了太阳总辐射能变化对地球大气的影响外,地球电离层对太阳电离辐射(包括紫外和X射线)的变化也很敏感;而电离层的变化对无线电传播等有着重大的影响。

太阳风及渗入其中的磁场的变化也产生重要的地球物理效应。例如,当扫过地球的行星际磁场有一向南分量(持续1小时以上)时,就会出现极光和无线电通讯的干扰。太阳风与地磁层的相互作用使地磁场结构发生变化。当太阳风与磁场在磁层顶相互作用时,也引起磁层等离子体对流,并把从太阳风获得的能量由磁层传输到极光区的电离层,对极光和地磁层亚暴的出现起着重要的作用。

在磁活动期间,来自外磁层的高能电子能够穿入中层大气,并造成平流层臭氧的减少。由于中层大气的臭氧影响着到达低层大气的辐射,因而平流层臭氧丰度的改变便可能影响到天气。此外,偶然从太阳发出的高能质子和电子流也对地球环境起作用。这些粒子对地球环境的影响取决于它们到达大气的途径。粒子最容易抵达极冠区,因为该处磁场与地磁尾甚至行星际空间相连。因此太阳粒子事件会造成电离层极冠区电离的增强,它不仅引起对无线电波吸收的大大增加,而且使传播波相位发生改变。同时,进入地球大气的高能粒子流也对大气化学成分起作用,例如高能粒子能离解分子,并使NO浓度增加。这种化学成分的改变影响着臭氧丰度,因而太阳粒子事件也能使平流层的臭氧减少,导致天气的变化。所以这一切都表明,日地关系的研究不仅对实际应用,而且对太阳本身和地球环境的理论也是重要的。

从天体物理来看,太阳是银河系中千千万万颗恒星中的一颗,但由于它离我们很近,而且光非常强,使我们能够观测到它的物理结构的细节,提供了检验恒星结构理论和宇宙性质的概念的基础。其他恒星因为距离太远和光太弱,用今天的仪器还远不能达到我

们对太阳所进行的观测研究的程度。

人们对恒星和类恒星天体的了解是根据对恒星物态、能量的产生和传输以及化学成分等的一系列假设而得出的。对于太阳这样特殊的情况,我们能对其外层结构作充分的研究,并最少可部分地检验对恒星所作的假设是否满意。若这些假设对太阳不成立,则它们对大多数恒星也可能不成立。若它们对太阳结构的预测是错误的,无疑对大多数其它恒星结构的预测也将是错误的。若我们对恒星结构的了解不正确,则对宇宙的了解也将是有疑问的。这就是说对宇宙的正确了解,实际上也将取决于对太阳的了解。因此,近来,太阳物理与天体物理,尤其是与恒星物理的关系引起了人们广泛的重视。

近年来恒星色球和星冕以及星风的发现,促使了太阳与恒星物理学的相互渗透。不同光谱型、光度和年龄的恒星中类太阳现象的观测和解释,也大大增加了把太阳作为一颗恒星的了解。由于日冕和色球受到太阳磁场很大的影响,因而这些区域的研究与磁活动性(特别是发电机过程)的研究紧密相连。恒星的白光观测已显示出恒星上也有黑子,以及存在自转、甚至较差自转的证据,而恒星黑子的存在与色球活动密切相关,而且与太阳上大致相同。对于给定光谱型的恒星来说,较老恒星的活动周期特性同太阳类似,而较年轻恒星则显示出活动性的随机变化。这种差别最少反映了两种不同的发电机模式,可用来对太阳发电机模型进行检验。同样,对大量恒星色球和星冕辐射的分析,也有助于验证太阳色球和日冕的加热理论。

对太阳长期演化和变化的了解,一部分只能由对太阳的观测、古气候研究和分析流星及月球的样品来得到,而为了全面地了解,则要求利用另外的信息,即需对大量类太阳恒星进行观测。仔细选择这种观测资料,便可发现在整个太阳一生中,太阳光度变化、周期变化的形态和磁活动性(包括黑子和耀斑)等。有了这些信息,就可能对太阳早期到现在的辐射变化作出比较可靠的估计和预测它的未来。

• • •

此外，我们还可把太阳看作巨大的天体物理实验室。太阳的温度、密度、磁场和很大的特征尺度相结合，提供了地球实验室所无法比拟的物理条件。因此，通过对太阳的研究，也大大促进了一些具有重大实用价值和理论价值的学科的发展，譬如原子物理学，磁流体力学和等离子体物理学等等。

§ 1.2 太阳的内部结构

太阳内部指光球层以下的区域，不能直接观测到。下面我们讨论几种最主要情况。

一、内部分层

太阳类似于其他恒星，是一个巨大的等离子体球，它主要由氢（约 90%）和氦（约 10%）以及约 0.1% 的其他元素（如 C, N 和 O 等）所组成。太阳在其自身的引力作用下，物质向核心区聚集，从而形成高温和高压状态，并导致不断发生热核反应。这些核反应所释放的能量维持着太阳连续地向行星际和宇宙空间发出辐射，而且激起各种太阳活动现象。

根据理论推测，太阳内部大致可分为三个区域，即核反应区、辐射区和对流区。核反应区从中心到 $0.25 R_{\odot}$ ($R_{\odot}$ 为太阳半径)，约占太阳体积的 $1/64$ ，而其质量却占总质量的一半以上，太阳发射能量的 99% 由这里产生。核心区的温度高达 1500 万度，压力为 2.5×10^{11} 大气压；在这里所产生的能量主要由氢核合成氦核的聚变 ($4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$) 所引起，参加反应的每一克氢中就有 0.007 克变为能量。按照爱因斯坦的质量 m 与能量 E 的关系 $E = mc^2$ (c 为光速)，每克质量相当于 9×10^{20} 尔格¹⁾ 能量。为了维持太阳不断地向外辐射，其质量损耗大约是每秒 50 万吨。辐射区大约从 $0.25 R_{\odot}$ 至 $0.86 R_{\odot}$ 。在核反应区产生的能量通过这个区域向外传

1) 1 尔格 = 10^{-7} 焦耳。

输；温度和压力从核心区向外迅速减小，而所产生的光子在向外表面传播时多次被物质吸收然后又发射。刚由核反应区产生的能量形式为高能 γ 射线，然后光子能量就减小而成为 X 射线，再向外便变为远紫外线 (EUV)、紫外线 (UV)，最后成为低能可见光和其他形式的辐射。大约从 $0.86R_{\odot}$ 。（最近的模型有将对流层底部取为 $0.7R_{\odot}$ 。）至光球底部为对流区，能量传输的方式主要是对流。除了通过对流和辐射传输能量外，在对流区的湍动还会产生噪声，即低频声波。这种声波将力学能量传输到太阳外层大气，导致加热和其他作用。图 1.1 为太阳结构示意图。

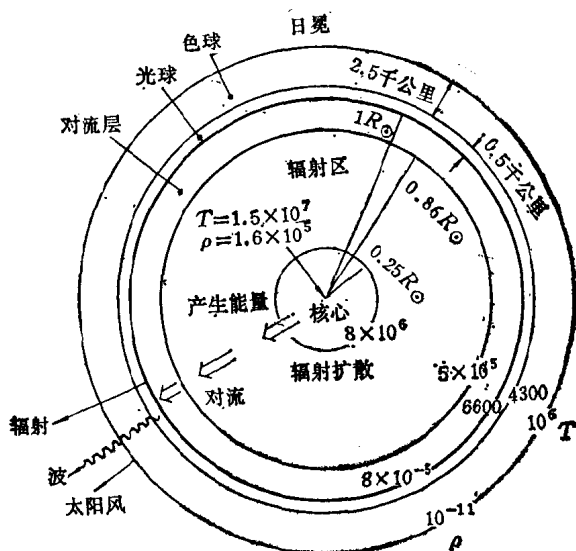


图 1.1 太阳结构示意图(T 的单位为 K, ρ 的单位为 $\text{千克} \cdot \text{米}^{-3}$).

二、太阳模型

太阳内部结构模型指太阳基本参数(质量、压力和光度等)的径向变化。由于太阳基本上处于平衡状态,而且是球对称的,因而所推求的参数将只是离中心距离 r 的函数。这样,流体静力学平衡方程为

$$\frac{dP}{dr} = -g\rho, \quad (1.1)$$

式中 ρ 为密度, P 为气压, g 为重力加速度:

$$g = \frac{GM(r)}{r^2}, \quad (1.2)$$

其中 G 为引力常数, $M(r)$ 为半径 r 的圆球内的物质质量:

$$M(r) = \int_0^r \rho(r') 4\pi r'^2 dr'. \quad (1.3)$$

对于现在的太阳, $M(R_\odot) = M_\odot$, 于是 M 随 r 的变化为

$$\frac{dM}{dr} = \rho 4\pi r^2. \quad (1.4)$$

令 ε 为核反应引起的单位质量的产能率, 则半径为 r 的球体的发光度为

$$L(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \varepsilon(r') \rho(r') dr', \quad (1.5)$$

于是 L 随 r 的变化率为

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \varepsilon \rho. \quad (1.6)$$

在对流层之下能量平衡给出^[1]

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 K_r \frac{dT}{dr} \right) + \rho \varepsilon = 0, \quad (1.7)$$

式中 T 为温度, K_r 为辐射传导率:

$$K_r = \frac{16\sigma T^3}{3\rho\tilde{\kappa}}, \quad (1.8)$$

其中 σ 为斯特藩-玻耳兹曼常量, $\tilde{\kappa}$ 为不透明度。在对流层内, 温度随 r 的变化取决于能流向外传输的方式。在以对流为能量传输的主要形式时, 上升的对流元胞把过剩的热能带到上面, 并通过辐射传给周围介质, 而元胞最后瓦解时则通过直接混合把能量传给周围介质。理想气体定律为

$$P = \frac{k}{m} \rho T, \quad (1.9)$$

式中 m 为平均粒子质量, k 为玻耳兹曼常量, 由于对流元胞的运

动是绝热的,即它们与周围介质没有能量交换,则有

$$P\rho^{-\gamma} = \text{常数}, \quad (1.10)$$

式中 γ 为定压比热 c_p 与定容比热 c_v 的比值。因此,由 (1.1), (1.9)和(1.10)式可得

$$\frac{dT}{dr} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{T}{P} \frac{dP}{dr} = -\frac{(\gamma-1)}{\gamma} \frac{gm}{k}, \quad (1.11)$$

这是周知的绝热温度梯度公式。这样一来,太阳内部物理参数随径向的变化可由(1.1),(1.4),(1.6)和(1.7)式求出;而压力 P 、单位质量产能率 ε 和不透明度 $\tilde{K}$ 则由 ρ, T 和化学成分的局部数值表示。

(1) 压力 P 由(1.9)式有

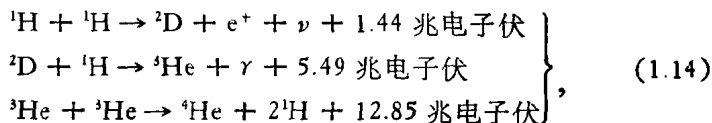
$$P = \frac{k}{\mu m_H} \rho T, \quad (1.12)$$

式中 μ 是平均原子量,它实际上是以质子质量 m_H 为单位的一个粒子的平均质量。在完全电离条件下

$$\mu = \frac{1}{2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z}, \quad (1.13)$$

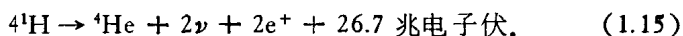
式中 X, Y 和 Z 分别表示氢、氦和重元素所占的质量分数。除了日面附近和核心区外,太阳内部区域 $\mu \approx 0.6$ 。

(2) 产能率 ε 由于太阳中心温度约为 $1.5 \times 10^7 \text{K}$, 一般认为以质子-质子反应为主,而碳氮循环仅占少量。根据 Bahcall 等^[2]的太阳模型,质子-质子反应可解释太阳内部所产生能量的 99%。质子(氢核)以下列步骤合成为氦:



式中上角标表示原子核中的质子和中子的数目, ν 为中微子, e^+ 为正电子。这些反应首先由两个氢核产生一个氦核, 一个正电子和一个中微子。正电子立即与电子发生湮没作用, 产生两个 γ 光子

的辐射。中微子尽管产生于核心区,但由于它不带电,质量又极小(比电子质量的万分之五还小),与其他物质发生相互作用的截面或概率极小,因而它在向外发射中几乎不同物质发生作用而直接逃离太阳。第二步由氘核与氢核合成 ^3He ,并发射一个 γ 光子。第三步形成氦的反应有几种方式(参见[3]), (1.14)式所列是最为频繁的一种,即两个 ^3He 合成一个氦核和两个氢核。由于最后一步用到两个 ^3He 粒子,因而第一、二步的反应数应是第三步的两倍。这样,质子-质子反应的净结果为



第一步是最慢的一步,因而决定了整个反应的速度。根据第一步反应而估计出质子-质子反应的质能转换率为^[4]

$$\varepsilon_{pp} = 2.5 \times 10^6 \rho X^2 \left(\frac{10^6}{T} \right)^{2/3} \exp \left[-33.8 \left(\frac{10^6}{T} \right)^{1/3} \right] \\ \text{尔格} \cdot \text{克}^{-1} \cdot \text{秒}^{-1}, \quad (1.16)$$

式中 X 表示氢所占质量的分。

(3) 不透明度 $\tilde{\kappa}$ 它表示太阳气体阻碍辐射能向外传播的因素,主要决定于:(i) 束缚-束缚跃迁;(ii) 束缚-自由跃迁(光致电离);(iii) 自由-自由跃迁;(iv) 散射。前三种机制都是光子频率的函数,常对频率按某种方式求平均值,它表征辐射场的温度。在核心区,对 $\tilde{\kappa}$ 的主要贡献是自由电子散射,以及主要由质子和 He 核引起的束缚-自由跃迁。而在对流区,束缚-自由跃迁占优势,不透明度值比核心区增大了约20倍,这是使太阳内部产生的辐射只有少量向外传播的主要原因。

为了由解上述方程来推算太阳内部结构,还必须给出适当的边界条件。例如,在 $r=0$ 时,有

$$M = 0, \quad L = 0, \quad (1.17)$$

而在 $r=R_\odot$ 的太阳表面(对于年龄约为 4.5×10^9 年的太阳而言),

$$M = M_\odot, \quad L(R_\odot) = L_\odot, \quad (1.18)$$

而且在 $r=R$ 处有^[4]

$$P = \Gamma T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (1.19)$$

式中常数 Γ 是混合长 l 与大气标高 H 的比值。所谓混合长是指上升的对流元(湍流旋涡)瓦解到不能辨认之前所经过的路程(或对流元平均自由程), 而大气标高 $H = kT/(\mu m_{\text{H}}g)$ 。在太阳对流层中, $\Gamma \approx 1$ 。

作为例子, 图 1.2 给出 Durrant 等^[5]所得的太阳内部标准模型, 其中 $X(\text{H})$ 和 $X(^4\text{He})$ 分别代表氢和氦所占的质量分数, 取中心温度和密度分别为 $T_c = 1.6 \times 10^7 \text{K}$, $\rho_c = 160 \text{克/厘米}^3$ 。在这一模型中, 他们取核心区延伸至 $0.25-0.30R_\odot$, 辐射区则延伸至 $0.8-0.9R_\odot$, 而对流区底部位于 $0.8-0.9R_\odot$ 处。最近有些模型把对流区底部取在 $0.7R_\odot$ 以上, 而且中心温度也没有上述那么高。

必须指出, 过去人们认为除了目前还没有满意的对流层理论外, 太阳内部的物理状态似乎已比较清楚了。但是近年来, 人们对太阳内部的了解的可靠性, 由于太阳中微子流量的实测值与理论预测值之间的不一致而受到深刻的动摇, 观测的中微子流量的实

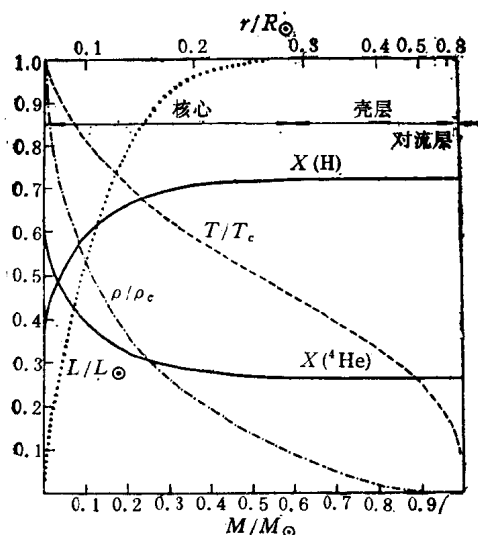


图 1.2 太阳内部模型^[5], 作为半径 (r) 函数的密度 (ρ)、温度 (T)、光度 (L) 和质量分数 (X)。