

杨志良 景海荣 编著

太阳

物理概论

清华大学出版社



本书是作者多年从事太阳物理教学和科研工作的经验总结。全书共分八章，第一章介绍太阳的概况，第二章介绍太阳的内部结构，第三章介绍太阳的大气结构，第四章介绍太阳的磁场，第五章介绍太阳的辐射，第六章介绍太阳的粒子辐射，第七章介绍太阳的演化，第八章介绍太阳的探测。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事太阳物理研究的科研人员参考。

太阳物理概论

杨志良 景海荣 编著

本书是作者多年从事太阳物理教学和科研工作的经验总结。全书共分八章，第一章介绍太阳的概况，第二章介绍太阳的内部结构，第三章介绍太阳的大气结构，第四章介绍太阳的磁场，第五章介绍太阳的辐射，第六章介绍太阳的粒子辐射，第七章介绍太阳的演化，第八章介绍太阳的探测。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事太阳物理研究的科研人员参考。

本书是作者多年从事太阳物理教学和科研工作的经验总结。全书共分八章，第一章介绍太阳的概况，第二章介绍太阳的内部结构，第三章介绍太阳的大气结构，第四章介绍太阳的磁场，第五章介绍太阳的辐射，第六章介绍太阳的粒子辐射，第七章介绍太阳的演化，第八章介绍太阳的探测。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事太阳物理研究的科研人员参考。

本书是作者多年从事太阳物理教学和科研工作的经验总结。全书共分八章，第一章介绍太阳的概况，第二章介绍太阳的内部结构，第三章介绍太阳的大气结构，第四章介绍太阳的磁场，第五章介绍太阳的辐射，第六章介绍太阳的粒子辐射，第七章介绍太阳的演化，第八章介绍太阳的探测。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事太阳物理研究的科研人员参考。

本书是作者多年从事太阳物理教学和科研工作的经验总结。全书共分八章，第一章介绍太阳的概况，第二章介绍太阳的内部结构，第三章介绍太阳的大气结构，第四章介绍太阳的磁场，第五章介绍太阳的辐射，第六章介绍太阳的粒子辐射，第七章介绍太阳的演化，第八章介绍太阳的探测。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事太阳物理研究的科研人员参考。

本书是作者多年从事太阳物理教学和科研工作的经验总结。全书共分八章，第一章介绍太阳的概况，第二章介绍太阳的内部结构，第三章介绍太阳的大气结构，第四章介绍太阳的磁场，第五章介绍太阳的辐射，第六章介绍太阳的粒子辐射，第七章介绍太阳的演化，第八章介绍太阳的探测。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事太阳物理研究的科研人员参考。

内 容 简 介

本书系统地阐述了太阳物理的基本内容。全书共9章,分为宁静太阳和活动太阳两个部分进行介绍。第1~4章主要为太阳整体参数、太阳模型、太阳对流自转、太阳振动,对太阳作为一个整体的物理过程进行描述;第5章专门讲述了研究太阳活动过程的等离子体物理有关知识;第6~9章主要描述了太阳活动,分为色球和日冕、太阳磁场与发电机过程、太阳风、太阳耀斑和日冕物质抛射几个部分。

本书可作为高等学校天文专业本科生和研究生的太阳物理教材,以及作为非天文专业但期望了解太阳物理人员的阅读材料。可供天体物理、空间物理和其他有关领域人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

太阳物理概论/杨志良,景海荣编著.--北京:清华大学出版社,2015
ISBN 978-7-302-42497-0

I. ①太… II. ①杨… ②景… III. ①太阳物理学—青少年读物 IV. ①P182-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 299958 号

责任编辑:梁颖

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:虎彩印艺股份有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印张:13.75 彩插:3 字数:242千字

版 次:2015年12月第1版

印 次:2015年12月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:39.00元

产品编号:063190-01

前言

FOREWORD

太阳决定了人类生存的环境,研究太阳的结构、演化规律、活动现象及对日地环境的影响,对人类的现在以及未来都有着极其重要的意义。

太阳是一颗普通的恒星,在组成宇宙的恒星世界中非常普通。然而,作为离地球最近、为我们提供了足够的亮度、唯一可被高空间分辨和高时间分辨观测的恒星,太阳在人们认识恒星形成、演化、内部结构以及活动规律方面具有至关重要的地位。太阳物理研究标志着天体物理学的开端,涉及粒子物理、流体力学、磁流体力学、量子理论和等离子体物理等各个基础物理学科。

另一方面,太阳是人类生存的母体,在近 30 亿年中一直保持稳定的辐射;但是激烈的太阳活动又影响着环境的变化。今天,认识太阳活动是人类研究预测当前以及未来居住环境变化、日地环境中灾变事件发生的重要基础。

太阳既是天体物理研究的开端,也是人们从未停止探索的对象,还有很多待探索的谜团,因而围绕太阳的观测资料和理论繁杂众多。本书的目的是让读者了解太阳物理的基本研究内容,同时了解研究太阳物理的基本思路和研究理论。为了在有限的篇幅中,给读者一个探索太阳物理的清晰思想,本书避免了对一些具体理论和现象的过多描述。本书的主要思想为:

(1) 将太阳分为宁静太阳和活动太阳两个部分,由于宁静太阳的基本理论框架比较成熟,与恒星物理、恒星大气等有很大的重合,因此内容只占本书的 $1/3$ 。而活动太阳作为当前太阳物理的研究重点,尽管在理论方面有着很大的分歧,但是由于内容在其他天体物理理论中较少涉及,因此本书给予了相对多的介绍。

(2) 主要介绍太阳物理的基本理论,有关太阳的观测设备和方法基本没有涉及。

(3) 为了力求全面,对太阳物理的理论基础进行了详细的阐述,而对求解过程以及解的讨论等只给予了简短说明。

本书适合高等学校本科生和研究生作为基础教程,了解太阳物理的基本理论和概念,为探索太阳的奥秘奠定基础。

作者衷心感谢太阳物理同人的支持,感谢北京师范大学天文系同事的支持。本书撰写过程中,得到了郑建川、陈荣、郭开明等的帮助,向他们表示诚挚的感谢。

编 者
2015 年 9 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 太阳整体性质	1
1.1 太阳整体参数	1
1.1.1 地球运行轨道	1
1.1.2 日地距离——天文单位(AU)	2
1.1.3 $GM_{\odot}$ 和太阳质量	4
1.1.4 太阳辐射能量: 太阳光度	4
1.1.5 太阳半径 $R_{\odot}$	5
1.1.6 太阳表面重力加速度	6
1.1.7 太阳表面逃逸速度	6
1.1.8 太阳表面有效温度	6
1.1.9 太阳的形状	7
1.1.10 太阳振荡的临界频率	9
1.1.11 太阳的平均密度	9
1.2 太阳辐射	11
1.3 太阳光球元素丰度	13
第 2 章 太阳模型及演化	16
2.1 标准太阳模型	16
2.1.1 确定太阳内部构造的基本方程	16
2.1.2 确定太阳模型的参数	19
2.1.3 太阳内部结构方程解	22
2.2 太阳中微子之谜	26
2.3 太阳演化	28
2.4 非标准太阳模型	31

第3章 太阳对流、自转和子午环流	34
3.1 太阳对流	34
3.1.1 米粒结构	34
3.1.2 超米粒组织	35
3.1.3 中米粒组织	36
3.2 对流模型	37
3.2.1 对流发生的判据	37
3.2.2 混合长理论	39
3.2.3 对流层模型	41
3.3 太阳转动	42
3.4 太阳子午环流	47
3.5 太阳扁率	48
第4章 太阳振动与日震学	49
4.1 时变分析	50
4.2 空间和时间变化分析	52
4.3 模的径向模数	55
4.4 确定太阳振动的基本方程	57
4.5 忽略引力势扰动近似	62
4.6 自转和磁场对振动的影响	64
4.7 分层大气中波传播	66
4.8 最简单的情况：等温大气层	67
4.9 临界频率和临界周期	68
4.10 太阳的长周期震荡	70
4.11 日震学简介	71
第5章 太阳等离子体基本理论	72
5.1 单粒子运动	72
5.2 导电流体运动	73
5.3 等离子体电导率	75
5.4 磁场扩散与磁冻结	77
5.5 磁场应力：磁压力和磁张力	78
5.6 广义欧姆定律	79

5.7 广义欧姆定律的进一步讨论	81
5.8 焦耳定律加热的本质	85
第6章 色球和日冕以及加热机制	88
6.1 光球边界	88
6.2 色球的定义	89
6.3 色球特征	91
6.4 色球网络结构	92
6.5 日珥与暗条	93
6.6 色球模型	94
6.7 色球-日冕过渡层	96
6.8 电子密度	98
6.9 白光日冕的空间结构	98
6.10 电子温度	100
6.10.1 光学波段光子	100
6.10.2 X-射线光子	101
6.11 谱线形成的温度	101
6.12 日冕压强标高	102
6.13 离子温度	103
6.14 X-射线辐射强度	104
6.15 日冕的大气压强	105
6.16 色球和日冕的加热机制	106
6.16.1 声波加热	107
6.16.2 交流磁加热(AC)机制	112
6.16.3 直流磁加热(DC)机制	118
6.16.4 费米加热机制	122
6.16.5 色球和日冕加热小结	124
第7章 太阳磁场和发电机理论	125
7.1 太阳黑子	125
7.2 活动区	129
7.3 磁场: 太阳活动之源	130
7.4 磁场测量	130
7.4.1 光学磁场观测方法	130

7.4.2	Babcock 磁像仪	132
7.5	太阳黑子的 Hale 极性定律	134
7.6	太阳磁场的射电观测	135
7.7	空间直接磁场测量	135
7.8	太阳磁场的经验性质	136
7.9	典型的发电机模型	136
7.9.1	发电机基本要素	136
7.9.2	平均场发电机模型	138
7.9.3	非轴对称发电机模型	147
7.9.4	MHD 模拟	148
7.9.5	小尺度发电机模型	149
第 8 章	太阳风	152
8.1	太阳风简介	152
8.1.1	电子在太阳风中的观测	153
8.1.2	质子和重离子在太阳风中的观测	154
8.1.3	太阳风速度分布	155
8.2	Parker 太阳风模型	157
8.3	波加速太阳风模型	159
8.4	磁重联驱动模型	163
8.4.1	日冕中的能量累积	164
8.4.2	日冕物质的聚集过程	165
8.4.3	太阳风速度的计算	166
8.4.4	模型结果及讨论	167
8.5	本章小结	169
第 9 章	耀斑和日冕物质抛射	171
9.1	耀斑概述	171
9.2	大耀斑的 H_{α} 单色光观测	173
9.3	耀斑的光谱观测	177
9.4	白光耀斑	182
9.5	耀斑的 X 光辐射	184
9.6	太阳射电爆发	188
9.7	耀斑的物理过程	192

参考文献 198

第 1 章

太阳整体性质

1.1 太阳整体参数

太阳作为一颗典型的恒星,是人类研究天体物理和对宇宙进行了解的起点。对太阳参数,包括太阳半径、质量、距离等的确定,标志着大尺度天体测量的开端,也是研究太阳物理过程的基础。本章简要描述如何测量这些参数的过程。

对于天体测量,最能精确描述的量就是时间。因此,从时间开始,通过测量确定太阳参数。

1.1.1 地球运行轨道

质量是恒星演化过程的重要参数,也是决定其性质最重要的物理量;质量决定了恒星最终安静还是爆发性地消亡。

为了确定太阳质量 $M_{\odot}$, 首先应该测量时间,同时还要确定地球绕太阳的轨道。时间标度可以通过地球上的观测者记录太阳回到相对于某个“位置不变天体”的特定位置所用的时间段决定。这些“位置不变恒星”是宇宙中已知的一种星系,叫做类星体射电源。相对于类星体的运动,定义了恒星年作为时间单位: $1 \text{ 恒星年 } P = 365.256 \ 36 \text{ d} = 31 \ 558 \ 150 \text{ s}$ 。这也是地球围绕太阳运动的轨道周期。

知道了地球的轨道周期,现在考虑地球在其轨道上的运动方程。根据太阳和地球的位置矢量可以写出方程。任意选取一个相对零点,太阳的位置矢量为 $\mathbf{r}(\text{S})$, 地球的位置矢量为 $\mathbf{r}(\text{E})$ 。地球相对于太阳的位置矢量为 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\text{E}) - \mathbf{r}(\text{S})$, 矢量单位和相对位置矢量 $\hat{\mathbf{r}}$ 有关,方向是由太阳指向地球。

对太阳($M_{\odot}$)和地球($m_{\oplus}$)运动起作用的力可以由牛顿引力定律

给出。引力通过以下方程决定了地球的运动。

$$m_{\oplus} \frac{d^2 \mathbf{r}(E)}{dt^2} = - \frac{GM_{\odot} m_{\oplus}}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.1)$$

其中 G 是引力常数, 负号表示力的方向是指向太阳, 即在 $\hat{\mathbf{r}}$ 的负方向。

同时通过以下方程引力决定了太阳的运动。

$$M_{\odot} \frac{d^2 \mathbf{r}(S)}{dt^2} = + \frac{GM_{\odot} m_{\oplus}}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.2)$$

其中正号表示力的方向指向地球, 即沿着 $\hat{\mathbf{r}}$ 的方向。

联立以上两个方程式(1.1)和式(1.2)可得

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = - \frac{G(M_{\odot} + m_{\oplus})}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.3)$$

该方程的解是一个椭圆, 太阳的质量中心为椭圆的一个焦点。设该椭圆的半长轴为 D , 轨道运行周期 P , 可以得到

$$P^2 = \frac{4\pi^2 D^3}{G(M_{\odot} + m_{\oplus})} \quad (1.4)$$

由式(1.4)可以得到太阳质量近似表示为

$$\frac{GM_{\odot}}{D^3} = \frac{4\pi^2}{P^2 [1 + m_{\oplus}/M_{\odot}]} \quad (1.5)$$

实际上 $m_{\oplus}$ 与 $M_{\odot}$ 的比值很小(简单估算)。忽略这个比值, 可以得到 $GM_{\odot}/D^3$ 的近似值。在这一近似下, 太阳系中的每个行星运动周期的平方 P^2 与平均距离的立方 D^3 成正比。这个性质最初是由开普勒通过观测数据确定的开普勒第三定律。

从式(1.5)可以看出, 无论是否考虑 $m_{\oplus}/M_{\odot}$ 的影响, 要得到太阳的质量 $M_{\odot}$ 需要知道日地距离 D 。

1.1.2 日地距离——天文单位(AU)

当已知各星体的轨道周期后, 就可以利用开普勒第三定律得到太阳系的标度模型。在任一时刻, 以天文单位(地球绕太阳轨道的半长轴, AU)为计量单位, 这个标度模型能够给出行星和太阳系中其他星体的距离。也就是说, 在任何给定时刻, 由天体的轨道周期, 可以计算太阳系中任意星体与地球以 AU 为单位的距离。

在地球上, 可以利用雷达反射来测量到某一天体距地球的直线距离。首次可靠的雷达反射测量是在 20 世纪 60 年代进行金星距离测量。测量时, 不仅需要测量信号强度, 还应该考虑天体运动的多普勒移动。在持续观测过程中必须考虑了金星的轨道运动。当金星靠近

地球时,雷达发射并返回的时间大约 5s,而且可以精确到很多位有效数字。只要准确地测量了太阳系中一个天体的距离,就可以得到太阳和地球之间的距离。

目前国际天文联合会(IAU)定义天文单位如下:

$$1\text{AU} \equiv D = 149\,597\,870.691\text{km}$$

将 D 值代入式(1.5),就可以得到 $GM_{\odot}$ 的近似值。

为了获得更加精确的估计值 $M_{\odot}$,我们需要估算 $m_{\oplus}/M_{\odot}$ 的比值。为此,需要通过比较两个已知运动周期和轨道的星体的运动,其中一个绕太阳运动,另一个绕地球运动。

对一个绕太阳运动的星体(如地球),已知周期 $P(S)$ 和半长轴 $D(S)$,可知

$$P(S)^2 \approx \frac{D(S)^3}{M_{\odot} + m_{\oplus}} \quad (1.6)$$

对一个绕地球运动的星体(任意人造卫星),已知周期 $P(E)$ 和半长轴 $D(E)$,可知

$$P(E)^2 \sim \frac{D(E)^2}{m_{\oplus}} \quad (1.7)$$

假设相对于地球的质量,卫星的质量可以完全忽略(二者相差 20 个数量级以上)。通过式(1.6)和式(1.7),可以得到太阳和地球的质量比:

$$\frac{M_{\odot}}{m_{\oplus}} + 1 = \left(\frac{D(S)}{D(E)}\right)^3 \left(\frac{P(E)}{P(S)}\right)^2 \quad (1.8)$$

根据式(1.8),选择绕地轨道上任何一个人造卫星都可以进行计算。例如,名叫 RADCAT 的卫星的轨道参数为:近地点距离地球表面高度 491km,远地点为 495km。也就是说,该卫星距离地球表面的平均高度为 $h=493\text{km}$ 。卫星轨道半长轴 $D(E)=R_{\oplus}+h$, $R_{\oplus}$ 表示地球半径。由国际大地测量学和地球物理学联合会给出的地球赤道半径精确为 $R_{\oplus}=6378.137\text{km}$,所以 RADCAT 卫星 $D(E)=6871.137\text{km}$ 。与 $D(S)=1\text{AU}$ 比较,得到 $D(S)/D(E)=21\,771.924$ 。因此式(1.8)的右边第一因子 $\left(\frac{D(S)}{D(E)}\right)^3$ 为 $1.032\,025\,5 \times 10^{13}$ 。

根据测量给出的 RADCAT 轨道周期为每天 15.242 430 84 转,即周期 $P(E)=5668.387\text{s}$ 。与 $P(S)$ (一恒星年)比较,可得式(1.8)的右边第二因子 $\left(\frac{P(E)}{P(S)}\right)^2$ 为 $3.226\,234\,4 \times 10^{-8}$ 。

代入式(1.8),可得 $m_{\oplus}/M_{\odot}=1/332\,955$ 。这是用单一卫星

(RADCAT)轨道数据得到的质量比,其中我们只知道该卫星高度的三个有效数字。如果用多个卫星数据计算,可获得精度更高的 $m_{\oplus}/M_{\odot}$ 值。目前公认值接近于 $1/332\,946$ 。因此,单独使用 RADCAT 数据而导致的误差大约是 $1/30\,000$ 。如果用 493.08km 代替 493km 作为 RADCAT 的平均高度,最后的计算值将更加接近目前的公认值。值得注意的是,在研究太阳过程中,任何微小的观测误差都可能影响到一些有意义的物理参数的精度。

1.1.3 $GM_{\odot}$ 和太阳质量

利用以上的数据,可以估算出引力常数和太阳质量的乘积:

$$GM_{\odot} = 1.327\,124 \times 10^{26} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-2} \quad (1.9)$$

随着航空技术的发展, $GM_{\odot}$ 的精确度也在不断提高。越来越多的太空飞船在观测,目前给出 $GM_{\odot}$ 的有效数字可以达到 11 或 12 位,实际上并不需要这么多位,因为 G 还没有完全确定。

为了得到太阳质量,需要除去 G 。 G 的值是自然界中最难测量的常量之一,通常使用的是 $G=6.674\,28(\pm 0.000\,67) \times 10^{-8} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^2 \text{ g}^{-2}$ 。

用这个 G 值,能够估算出太阳的质量为

$$M_{\odot} = 1.9884 \times 10^{33} \text{ g} \quad (1.10)$$

1.1.4 太阳辐射能量: 太阳光度

装载辐射计的太空飞船可以精确测量太阳在地球位置处的辐射通量: 太阳辐射能流表示为 I_s , 其平均值约为 $1366 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 即 $1.366 \times 10^6 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

利用日地距离(D), 可以求出太阳的总辐射量 $L_{\odot} = 4\pi D^2 I_s$, 即

$$L_{\odot} = 3.8416 \times 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.11)$$

太阳能输出值(也就是太阳光度)在每隔 $10 \sim 12$ 年的周期中变化大约 $\pm 1/1000$ 。在这周期内, 太阳表面充斥着大量的或大或小的暗斑, 叫做“太阳黑子”。 I_s 的量级在太阳黑子变化周期中会稍微变化(见图 1.1), 变化幅度大约是 0.1% 。

比较式(1.10)和式(1.11), 可知 $L_{\odot}/M_{\odot}$ 的值接近于 $2 \text{ erg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

太阳依赖于其核心的核质量转化成能量来提供辐射能。根据质能公式 $E=mc^2$, 可知太阳输出需要的质量转化速率为

$$(dM/dt)_{\text{nucl}} = 4.274 \times 10^{12} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$$

由太阳总质量可以计算出太阳在 46 亿年中核反应已经使其质量

减少大约 $1/10\,000$ 。

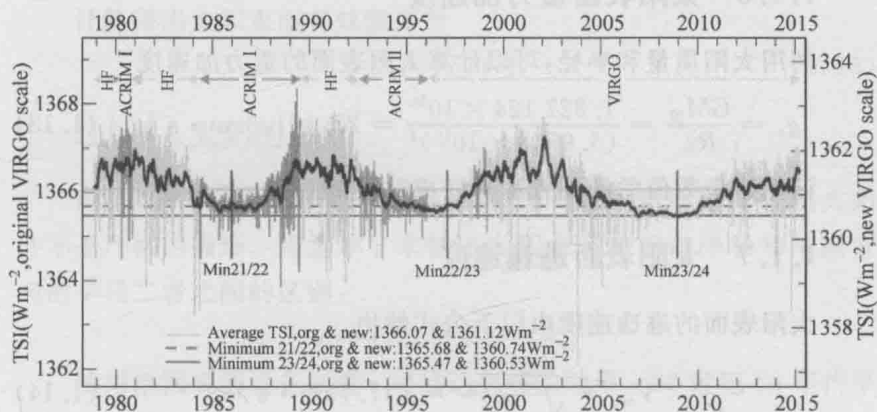


图 1.1 太阳辐射流量变化曲线

1.1.5 太阳半径 $R_{\odot}$

知道了太阳的平均距离,通过测量太阳的角半径(直径)来获取线半径(直径)似乎是很简单的事情。实际上,从地面精确测量太阳的角半径也很困难。地球大气层湍流涡旋使太阳图像不稳定,因而在太阳圆盘边缘 1 角秒范围内的图像模糊。基于地面测量,太阳半径将会有将近 700km 的误差。

在日食(日全食和日环食)时,利用日地距离以及月球的距离,可以推断太阳和月球半径的关系。月球的角直径接近于 $32'$ (角分),即 $1920''$ (角秒)。太阳角半径在 $960''$ 左右。

要获得更精确的数值,必须进行空间观测。1996 年发射的 SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) 是欧洲航天局与美国太空总署共同研制的无人太空飞船,于 1995 年发射升空,在空间中对太阳进行了 360° 测量,每次角增量 0.7° 。SOHO 使太阳半径的测量精度得到了很大提高。所测得的太阳的角半径为 $959.28 \pm 0.15''$ 。对应于太阳的线性半径 $R_{\odot} = 6.9574 (\pm 0.0011) \times 10^5 \text{ km}$ ($D = 1 \text{ AU}$)。

另一种测量太阳半径的方法是利用日震学提供的数据。从日震数据得到的最佳太阳半径是

$$R_{\odot} = 6.9568 \pm 0.0003 \times 10^5 \text{ km} \quad (1.12)$$

这个结果和从 SOHO 得到的值一致,但是前者的精确度是后者的 3 倍。通过 D 和 $R_{\odot}$,我们可以算出 1 AU 等于 $215.04 R_{\odot}$ 。

1.1.6 太阳表面重力加速度

利用太阳质量和半径,可以计算太阳表面的重力加速度。

$$g_s = \frac{GM_\odot}{R_\odot^2} = \frac{1.327\,124 \times 10^{26}}{(6.9568 \times 10^{10})^2} = 27,421.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} \quad (1.13)$$

记忆这个数值的简便方法是变成对数值: $\log g_s = 4.44$ 。

1.1.7 太阳表面逃逸速度

太阳表面的逃逸速度由以下公式给出

$$V_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM_\odot}{R_\odot}} = 617.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.14)$$

由于整个太阳物质质量产生了引力势能,所以可以用逃逸速度来表示引力势能。如果太阳保持流体静力学平衡,由太阳核心物质产生的引力与向外的压力平衡。

压力大小取决于气体粒子的动量。所以,热压与热速度的平方有关。设热运动粒子的质量为 m ,在温度为 T 的介质中,有均方根热速度 $V_{\text{rms}} = \sqrt{3kT/m}$,其中 k 是玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数, $k = 1.380\,650\,4 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{deg}^{-1}$ 。

V_{rms} 和 V_{esc} 都是描述太阳特征的速度,根据流体静力学平衡,表明太阳在某种模式中,二者应该有相同的量级。

作为以后参考,我们指出对于由氢原子构成的气体来说, $1/m = 1/m_H$,其中 m_H 为一个氢原子质量,利用阿伏伽德罗 (Avogadro) 常数 N_a ,也就是一摩尔的分子数。乘积 kN_a 简称为气体常量 $R_g = 8.314\,472 \times 10^7 \text{ erg} \cdot \text{deg}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ 。对于由原子质量为 μ 构成的气体来说,其均方根速度 $V_{\text{rms}} = \sqrt{3R_g T/\mu}$ 。

1.1.8 太阳表面有效温度

现在知道了太阳辐射值和太阳半径,就能计算有效温度。发射出与太阳辐射数值相同的总辐射流时的黑体温度即为有效温度:

$$L_\odot = 4\pi R_\odot^2 \sigma_B T_{\text{eff}}^4$$

其中斯特藩-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常数为

$$\sigma_B = 5.670\,40 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-4}$$

太阳表面的能量流为

$$F_{\odot} = L_{\odot}/4\pi R_{\odot}^2 = 6.3155 \times 10^{10} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

计算得出太阳表面有效温度为

$$T_{\text{eff}} = 5777 \text{ K} \quad (1.15)$$

1.1.9 太阳的形状

用肉眼来观测,太阳形状基本为圆形。但是,精确观测表明太阳并不是严格的圆形。用扁率 ϵ 来描述太阳赤道方向的半径和两极方向的半径二者之间的区别:

$$\epsilon = (R_{\text{eq}} - R_{\text{pole}})/R_{\text{eq}}$$

使用地面观测设备测量 ϵ 很难达到好的结果。20 世纪 60 年代早期的测量结果是 $\epsilon = 4.2 \times 10^{-5}$, 对应的太阳赤道向半径和两极向半径的线性差别为 30km, 也就是说两个角半径的差别在 $0.04''$ 量级内。这比肉眼可分辨率要小很多(一般肉眼的可分辨约为 $1''$), 所以地面观测设备得不到有效结果是很正常的。

太阳盘六分仪(SD)是一种球载仪器,从 1992—1994 年,该仪器一直漂浮在几乎高于大气层的高度观测。由此得到的扁率 $\epsilon = 9 \pm 1 \times 10^{-6}$, 比早期由地面观测获得的数据要小很多。

SOHO 把整个周长分成 $360/0.7 = 514$ 份“扇形”图观测并记录数据。每个“扇形”是辐射状剖面: 计算每个剖面的径向导数, 然后平方, 所得的峰值即定义为太阳的边缘。最后的数据结果的精确度从原先的 $0.15''$ 减少为 $0.15/\sqrt{514} = 0.007 \text{ arcsec} = 5 \text{ km}$ 。经过几个月观测, 使太阳半径的测量精确度达到 0.5 km 。

由 1996—1997 年的观测数据得出太阳的扁率为

$$\epsilon = (7.77 \pm 0.66) \times 10^{-6} \quad (1.16)$$

这个数据虽然与 SDS 在 1992—1994 年获得的数据一致, 但是改进了观测精度。

有限的扁率对太阳结构影响很大, 因为太阳物质结构受旋转产生的势能影响。如果没有旋转, 太阳就是一个球对称结构等势面: $\varphi = -GM_{\odot}/r$ 。根据引力 $g = -d\varphi/dr$, 表面加速度也是对称结构。但是, 如果存在旋转, 由引力而产生的向内力被向外的离心力抵消而减小。设太阳角速度为 Ω , 在纬度 θ 的净引力加速度为

$$g(\text{rot}) = g - r\Omega^2 \sin^2 \theta \quad (1.17)$$

对应于势能公式